

**T.C.  
FIRAT ÜNİVERSİTESİ  
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**



**KATI DOLGU BARAJ ENKESİTİNDE ÜST KISMINDAKİ  
GÖVDE ELEMANININ STATİK ANALİZİ**

**Fahim QAYUMI**

Yüksek Lisans Tezi

İNŞAAT MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI

Hidrolik Bilim Dalı

TEMMUZ, 2021

**T.C.**  
**FIRAT ÜNİVERSİTESİ**  
**FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı

Yüksek Lisans Tezi

**KATI DOLGU BARAJ ENKESİTİNDE ÜST KISMINDAKİ GÖVDE  
ELEMENİNİN STATİK ANALİZİ**

Tez Yazarı

**Fahim QAYUMI**

Danışman

Prof. Dr. Muhammet Emin EMİROĞLU

TEMMUZ, 2021

ELAZIĞ

**T.C.**  
**FIRAT ÜNİVERSİTESİ**  
**FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı

Yüksek Lisans Tezi

|                    |                                                                              |
|--------------------|------------------------------------------------------------------------------|
| Başlığı:           | Katı Dolgu Baraj Enkesitinde Üst Kısımındaki Gövde Elemanının Statik Analizi |
| Yazarı:            | Fahim QAYUMI                                                                 |
| İlk Teslim Tarihi: | 25.5.2021                                                                    |
| Savunma Tarihi:    | 5.7.2021                                                                     |

**TEZ ONAYI**

Fırat Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü tez yazım kurallarına göre hazırladığım bu tez aşağıda imzaları bulunan jüri üyeleri tarafından değerlendirilmiş ve akademik dinleyicilere açık olarak yapılan savunma sonucunda OYBİRLİĞİ ile kabul edilmiştir.

|           |                                                                               |           |
|-----------|-------------------------------------------------------------------------------|-----------|
|           | <i>İmza</i>                                                                   |           |
| Danışman: | Prof. Dr. Muhammet Emin EMİROĞLU<br>Fırat Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi | Onayladım |
| Başkan:   | Prof. Dr. Mahmut FIRAT<br>İnönü Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi           | Onayladım |
| Üye:      | Doç. Dr. Erkut SAYIN<br>Fırat Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi             | Onayladım |

Bu tez, Enstitü Yönetim Kurulunun ...../...../20..... tarihli toplantısında tescillenmiştir.

*İmza*

Doç. Dr. Kürşat Esat ALYAMAÇ  
Enstitü Müdürü

## BEYAN

Fırat Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü tez yazım kurallarına uygun olarak hazırladığım “Katı Dolgu Baraj Enkesitinde Üst Kısımındaki Gövde Elemanının Statik Analizi” Başlıklı Yüksek Lisans Tezinin içindeki bütün bilgilerin doğru olduğunu, bilgilerin üretilmesinde ve savunulmasında bilimsel etik kurallarına uygun davrandığımı, kullandığım bütün kaynakları atıf yaparak belirttiğimi, maddi ve manevi desteği olan tüm kurum/kuruluş ve kişileri belirttiğimi, burada sunduğum veri ve bilgileri unvan almak amacıyla daha önce hiç bir şekilde kullanmadığımı beyan ederim.

05/07/2021

**Fahim QAYUMI**



# ÖNSÖZ

---

Bu yüksek lisans çalışma kapsamında SAP2000 paket programında bir katı dolgu baraj enkesitinde üst kısımdaki gövde elemanının statik analizi yapılmıştır. Analizler, barajın farklı başlık yüksekliği ( $a$ ) ve farklı hava payları ( $h_w$ ) için yapılmıştır.

Tez konumun seçiminde, planlanmasında ve tezimin yazımında yardımını hiç esirgmeden bütün destekleriyle her an her konuda yanımda olan sayın hocam Prof. Dr. M. Emin EMİROĞLU'na, ve tezin analizinde bana destek veren İnş. Müh. Miray ÜNAL'a en samimi duygularıyla teşekkürlerimi sunarım.

Tezim süresince manevi destekleriyle her zaman yanımda olan aileme teşekkürlerimi sunarım.

**Fahim QAYUMI**

ELAZIĞ, 2021

# İÇİNDEKİLER

|                                                                                   | Sayfa    |
|-----------------------------------------------------------------------------------|----------|
| ÖNSÖZ .....                                                                       | iv       |
| İÇİNDEKİLER .....                                                                 | v        |
| ÖZET .....                                                                        | vii      |
| ABSTRACT .....                                                                    | viii     |
| ŞEKİLLER LİSTESİ .....                                                            | ix       |
| TABLOLAR LİSTESİ .....                                                            | xi       |
| EKLER LİSTESİ .....                                                               | xii      |
| SİMGELER VE KISALTMALAR .....                                                     | xiii     |
| <b>1. GİRİŞ .....</b>                                                             | <b>1</b> |
| <b>2. LİTERATÜR ÖZETİ .....</b>                                                   | <b>2</b> |
| <b>3. SSB BARAJLAR VE TASARIMI .....</b>                                          | <b>8</b> |
| 3.1. SSB Barajların Sınıflandırılması .....                                       | 11       |
| 3.1.1. Katı Dolgu Baraj .....                                                     | 12       |
| 3.2. Silindire Sıkıştırılmış Beton Barajların Avantajları ve Dezavantajları ..... | 13       |
| 3.3. SSB’de Kullanılan Malzemeler .....                                           | 14       |
| 3.3.1. Bağlayıcı Malzemeler .....                                                 | 14       |
| 3.3.2. Agregalar .....                                                            | 16       |
| 3.3.3. Karma Suyu .....                                                           | 17       |
| 3.3.4. Katkı Maddeleri .....                                                      | 17       |
| 3.4. SSB Mekanik Özellikleri .....                                                | 18       |
| 3.4.1. Basınç Dayanımı .....                                                      | 18       |
| 3.4.2. Çekme Dayanımı .....                                                       | 19       |
| 3.4.3. Kayma Dayanımı .....                                                       | 19       |
| 3.4.4. Elastisite Özellikleri .....                                               | 20       |
| 3.4.5. Sünme .....                                                                | 21       |
| 3.4.6. Isıl Özellikler .....                                                      | 21       |
| 3.4.7. Geçirgenlik .....                                                          | 21       |
| 3.4.8. Yoğunluk .....                                                             | 22       |
| 3.4.9. Hacim Değişimi-Rötre .....                                                 | 22       |
| 3.5. SSB Barajlarda Yapılan Tahkikler .....                                       | 22       |
| 3.5.1. Tasarım Kriterleri .....                                                   | 22       |
| 3.6. SSB Barajların İnşası .....                                                  | 24       |
| 3.6.1. Genel Değerlendirme .....                                                  | 24       |
| 3.6.2. Agregalar Üretimi .....                                                    | 24       |
| 3.6.3. Harmanlama ve Karıştırma .....                                             | 25       |
| 3.6.4. Taşıma .....                                                               | 25       |
| 3.6.5. Yama ve Yerleştirme .....                                                  | 26       |
| 3.6.6. Sıkıştırma .....                                                           | 27       |
| 3.6.7. Tabakalar Arasındaki Bağ .....                                             | 27       |
| 3.6.8. Sertleştirilmiş SSB Üzerinde Yatak Karışımları .....                       | 28       |
| 3.6.9. Memba ve Mansap Yüzeylerin Tasarımı ve Sızma Kontrolü .....                | 29       |
| 3.6.10. Buzulme Derzleri ve Çatlak Kontrolü .....                                 | 29       |
| 3.6.11. Galeri ve Su Tutucu .....                                                 | 30       |

|                                                                                                                      |           |
|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----------|
| 3.6.12. Dolusavaklar .....                                                                                           | 30        |
| <b>4. KATI DOLGU BARAJLARIN STATİK ANALİZİ.....</b>                                                                  | <b>31</b> |
| 4.1. Statik Stabilité Analizi.....                                                                                   | 31        |
| 4.2. Lineer Elastik Statik Analizi.....                                                                              | 34        |
| 4.2.1 Katı Dolgu Baraj Üst Bloğunun $a= 0, 3, 5$ ve $8$ m Olması Durumu (Sık Sonlu eleman ağ sistemi $1$ m) .....    | 36        |
| 4.2.2. Katı Dolgu Baraj Üst Bloğunun $a= 0, 3, 5$ ve $8$ m Olması Durumu (Sık Sonlu eleman ağ sistemi $0.5$ m) ..... | 38        |
| 4.2.3. Katı Dolgu Baraj Üst Bloğunun $a= 0, 3, 5$ ve $8$ m Olması Durumu (Normal Sonlu eleman ağ sistemi) .....      | 40        |
| 4.2.4. Katı Dolgu Baraj Üst Bloğunun $a= 0$ m ve Hava Payı $h_w= 1, 3,$ ve $5$ m Olması Durumu .....                 | 43        |
| 4.2.5. Katı Dolgu Baraj Üst Bloğunun $a=3$ m ve Hava Payı $h_w= 1, 3,$ ve $5$ m Olması Durumu .....                  | 45        |
| 4.2.6. Katı Dolgu Baraj Üst Bloğunun $a=5$ m ve Hava Payı $h_w= 1, 3,$ ve $5$ m Olması Durumu .....                  | 47        |
| 4.2.7. Katı Dolgu Baraj Üst Bloğunun $a=8$ m ve Hava Payı $h_w= 1, 3,$ ve $5$ m Olması Durumu .....                  | 49        |
| <b>5. SONUÇ .....</b>                                                                                                | <b>52</b> |
| KAYNAKLAR.....                                                                                                       | 54        |
| EKLER.....                                                                                                           | 56        |
| ÖZGEÇMİŞ .....                                                                                                       |           |

## ÖZET

### Katı Dolgu Baraj Enkesitinde Üst Kısımındaki Gövde Elemanının Statik Analizi

**Fahim QAYUMI**

Yüksek Lisans Tezi

FIRAT ÜNİVERSİTESİ  
Fen Bilimleri Enstitüsü

İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı

Temmuz 2021, Sayfa: xiii + 61

Son zamanlarda Silindirle Sıkıştırılmış Beton (SSB), ağırlık barajlar için uygulanabilir yeni bir yapım malzemesi olarak ortaya çıkmıştır. Katı dolgu barajlar SSB barajların bir türü olup özellikleri ise; simetrik bir enkesit, su geçirmez bir memba yüzeyi, baraj gövdesinde iç drenajın olmaması ve SSB'nin zayıf kullanımıdır. Bu tasarımın ana avantajları; düşük maliyeti, hızlı yerleştirilmesi, baraj gövdesinde düşük gerilmeler, klasik beton ağırlık barajlardan özellikle deprem durumunda daha emniyetli olmasıdır. Katı dolgu baraj enkesitinde üst kısmındaki gövde elemanında statik ve sismik yüklerden kaynaklanan hasar gözlenebilmektedir. Bu tür barajların tasarımında gövde enkesitinin üst kısmında inşa edilen gövde elemanında uygulamada çatlakların gözlemlendiği hidrolik tasarım mühendisleri tarafından belirtilmektedir. Gövdenin üst kısmında yapılan bu eleman tamamen maliyet kazanımı nedeniyle yapılmaktadır.

Bu çalışmada, kaya (rijit) zemin üzerine inşa edilmiş katı-dolgu baraj üst kısmındaki gövde elemanının normal ve sık sonlu eleman ağ sistemi kullanılarak statik yükler altında lineer elastik davranışlarını incelenmiştir. Baraj yüksekliği sabit (100 m), barajın şev eğimleri (0.7y/1.0d) ve baraj gövdesinin üst kısmındaki bloğun yüksekliği  $a = 0, 3, 5$  ve  $8$  m olarak alınmıştır. Rezervuar hidrostatik su yükünün tesirini görmek için de rezervuarın tamamen dolu ve rezervuar su seviyesi kretten  $3$  m aşağıda kabul edilmiştir. İkinci denemede bu çalışma kapsamında “ $a$ ” değeri sabit tutularak farklı hava payı “ $h_w$ ” değerleri için analizler yapılmıştır. Yapılan bu analizler ile baraj emniyeti belirlenmeye çalışılmıştır. Baraj gövdesinde ve baraj gövdesinin üst kısmındaki gövde elemanında (bloktaki) oluşan maksimum ve minimum asal gerilmelerin maksimumlarının ve baraj gövdesinde oluşan maksimum yer değiştirmelerin değişimi her bir durum için ayrı ayrı incelenmiştir. Bunun yanında her bir “ $a$ ” değeri için barajın kaymaya ve devrilmeye karşı güvenlik faktörünü ve baraj topuğunda minimum ve maksimum gerilmeler elde edilmiştir. Analizlerin sonucunda  $a=5$  m olan barajın  $h_w=1$  m olması durumunda ve  $a=8$  m olan barajın kretinde çatlaklara yol açan yatay yer değiştirme daha fazla görülmüştür.

**Anahtar Kelimeler:** Katı dolgu baraj, SSB, Simetrik yüzlü katı dolgu baraj, Statik analiz, Baraj emniyeti

## ABSTRACT

---

### Static Analysis of the Body Element at the Top of Hardfill Dam Cross Section

**Fahim QAYUMI**

MSc. Thesis

FIRAT UNIVERSITY  
Graduate School of Natural and Applied Sciences  
Department of Civil Engineering

July 2021, Page: xiii + 61

---

Recently, Roller Compacted Concrete (RCC) has emerged as an applicable new construction material for gravity dams. Hardfill dam is one of the RCC dams which has some basic features as; a symmetrical cross section, a watertight upstream surface, no internal drainage in the dam body and use of lean RCC. The main advantages of this design are; low cost and fast installation, low stresses in the dam body; safer than conventional concrete gravity dams, especially in case of earthquake. There is some damages caused by static and seismic loads which can be observed in the upper part of the Hardfill dams. In the design of such dams, hydraulic design engineers indicate some cracks in the upper part of the dam body element (block) which is observed in application. This element (block) which is located in the upper part of the dam body is built completely for cost savings.

In this study, the linear elastic behavior of the upper part of the hardfill dam which is built on rigid (rock) foundations under static loads was investigated using dense finite element method. The dam height is fixed (100 m), the slope of the dam is 0.7H/1.0V, and the height of the block at the upper part of the dam body ( $a$ ) is taken as 0, 3, 5 and 8 m. In order to see the effect of the hydrostatic load of the reservoir, the reservoir was completely filled and the reservoir water level was considered 3 m below the crest. Secondly in this cope of study, the value of “ $a$ ” was fixed constant and analyses were done for different freeboard ( $h_w$ ) values. These analyses were done to determine the safety of the dam. The variation of the maximum and minimum principal stresses and the maximum displacements in the dam body and in the upper part of the dam body element (block) were examined separately for each case. Besides, for each “ $a$ ” value, the safety factor of the dam against sliding and overturning and minimum and maximum stress at the heel of the dam was obtained. As a result of the analysis, more horizontal displacement leading to fractures in the upper part of the dam was observed for the value of  $a=5$  m with the height of freeboard  $h_w=1$  m and  $a=8$  m.

**Keywords:** Hardfill dam, RCC, Faced symmetrical hardfill dam, Dam safety, Static analysis, Dam safety

## ŞEKİLLER LİSTESİ

|                                                                                                                                                                                                 | Sayfa |
|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-------|
| Şekil 2.1. Kılıç (2009) tarafından dikkate alınan SSB enkesitleri .....                                                                                                                         | 3     |
| Şekil 2.2. Baraj ve dolusavağın tipik enkesiti .....                                                                                                                                            | 4     |
| Şekil 2.3. Safsaf Barajına ait mansaptan görünüm .....                                                                                                                                          | 4     |
| Şekil 2.4. Xiong vd. (2013) tarafında dikkate alınan katı dolgu (Hardfill) baraj enkesiti .....                                                                                                 | 5     |
| Şekil 2.5. Wei vd. (2020) tarafından dikkate alınan ağırlık baraj enkesiti .....                                                                                                                | 6     |
| Şekil 3.1. Türkiye’de iki SSB barajların görümümü .....                                                                                                                                         | 11    |
| Şekil 3.2. Katı dolgu barajların şematik görünüm .....                                                                                                                                          | 12    |
| Şekil 3.3. Katı dolgu baraj (hardfill dam) tipik enkesiti .....                                                                                                                                 | 13    |
| Şekil 3.4. Barajın kayma yönü.....                                                                                                                                                              | 23    |
| Şekil 3.5. Barajın devrilmesi .....                                                                                                                                                             | 23    |
| Şekil 3.6. SSB’yi baraj alanına kamyonla ve kombine sistemiyle (konveyör-kamyon) taşınması.....                                                                                                 | 26    |
| Şekil 3.7. Yayılma, sıkıştırma ve dağıtım sistemlerini gösteren SSB yerleştirilmesi.....                                                                                                        | 26    |
| Şekil 3.8. SSB sıkıştırma .....                                                                                                                                                                 | 27    |
| Şekil 3.9. Yatak harcının serilmesi ve yayılması.....                                                                                                                                           | 29    |
| Şekil 3.10. Pueblo Barajı’nda çatlak indükleyicili bir bağlantı oluşturmak için galvanizli çelik sac levhasının montajı.....                                                                    | 30    |
| Şekil 4.1. Bu çalışmada dikkate alınan SSB baraj tipleri .....                                                                                                                                  | 31    |
| Şekil 4.2. Barajda birim metreye düşen toplam beton hacmi .....                                                                                                                                 | 33    |
| Şekil 4.3. Katı dolgu barajın üst bloğunun farklı yükseklikleri için sık sonlu eleman ağ sistemi kullanılarak sonlu elemanlar modelleri: (a) 0, (b) 3, (c) 5, ve (d) 8 m olması durumları ..... | 35    |
| Şekil 4.4. Baraja etki eden hidrostatik kuvvetlerden dolayı baraj üst kısmında oluşan minimum asal gerilme görünümü (Sık sonlu eleman ağ sistemi 1 m).....                                      | 38    |
| Şekil 4.5. Baraja etki eden hidrostatik kuvvetlerden dolayı baraj üst kısmında oluşan minimum asal gerilme görünümü (Sık sonlu eleman ağ sistemi 0.5 m).....                                    | 40    |
| Şekil 4.6. Baraja etki eden hidrostatik kuvvetlerden dolayı baraj üst kısmında oluşan minimum asal gerilme görünümü (Normal sonlu eleman ağ sistemi) .....                                      | 42    |
| Şekil 4.7. Üst bloğu $a=0$ m olan barajın farklı hava payı ( $h_w$ ) görünümü .....                                                                                                             | 43    |
| Şekil 4.8. Baraja etki eden hidrostatik kuvvetlerden dolayı baraj üst kısmında minimum asal gerilme görünümü ( $a=0$ , $h_w=1, 3, 5$ m) .....                                                   | 44    |
| Şekil 4.9. Üst bloğu $a=3$ m olan barajın farklı hava payı ( $h_w$ ) görünümü .....                                                                                                             | 45    |
| Şekil 4.10. Baraja etki eden hidrostatik kuvvetlerden dolayı baraj üst kısmında minimum asal gerilme görünümü ( $a=3$ , $h_w=1, 3, 5$ m) .....                                                  | 46    |
| Şekil 4.11. Üst bloğu $a=5$ m olan barajın farklı hava payı ( $h_w$ ) görünümü .....                                                                                                            | 47    |
| Şekil 4.12. Baraja etki eden hidrostatik kuvvetlerden dolayı baraj üst kısmında minimum asal gerilme görünümü ( $a=5$ , $h_w=1, 3, 5$ m). .....                                                 | 48    |
| Şekil 4.13. Üst bloğu $a=8$ m olan barajın farklı hava payı ( $h_w$ ) görünümü .....                                                                                                            | 49    |
| Şekil 4.14. Baraja etki eden hidrostatik kuvvetlerden dolayı baraj üst kısmında minimum asal gerilme görünümü ( $a=8$ , $h_w=1, 3, 5$ m) .....                                                  | 50    |

|                                                                                                                                                                  |    |
|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| <b>Şekil EK.1.1.</b> Baraj üst kısmındaki bloğun sık sonlu eleman ağ sistemi durumunda maksimum asal gerilme görünümü .....                                      | 56 |
| <b>Şekil EK.1.2.</b> Baraj üst kısmındaki bloğun sık sonlu eleman ağ sistemi durumunda minimum asal gerilme görünümü .....                                       | 57 |
| <b>Şekil EK.1.3.</b> Baraj üst kısmındaki bloğun normal sonlu eleman ağ sistemi durumunda maksimum asal gerilme görünümü .....                                   | 57 |
| <b>Şekil EK.1.4.</b> Baraj üst kısmındaki bloğun normal sonlu eleman ağ sistemi durumunda minimum asal gerilme görünümü .....                                    | 58 |
| <b>Şekil EK.2.1.</b> Baraj üst kısmındaki bloğun yüksekliği $a=0$ m ve farklı hava payı durumlarında baraj gövdesinde oluşan minimum asal gerilme görünümü ..... | 59 |
| <b>Şekil EK.2.2.</b> Baraj üst kısmındaki bloğun yüksekliği $a=3$ m ve farklı hava payı durumlarında baraj gövdesinde oluşan minimum asal gerilme görünümü ..... | 59 |
| <b>Şekil EK.2.3.</b> Baraj üst kısmındaki bloğun yüksekliği $a=5$ m ve farklı hava payı durumlarında baraj gövdesinde oluşan minimum asal gerilme görünümü ..... | 60 |
| <b>Şekil EK.2.4.</b> Baraj üst kısmındaki bloğun yüksekliği $a=8$ m ve farklı hava payı durumlarında baraj gövdesinde oluşan minimum asal gerilme görünümü ..... | 61 |

## TABLÖLAR LİSTESİ

Sayfa

|                    |                                                                                                                                               |    |
|--------------------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| <b>Tablo 3.1.</b>  | Türkiye’deki silindire sıkıştırılmış beton (SSB) barajlar .....                                                                               | 9  |
| <b>Tablo 3.2.</b>  | SSB ve RCD (Japon tekniği) tipte inşa edilen bazı barajların özellikleri .....                                                                | 10 |
| <b>Tablo 3.3.</b>  | SSB Barajların Sınıflandırılması .....                                                                                                        | 11 |
| <b>Tablo 3.4.</b>  | Portland çimentosunun çeşitleri ve genel özellikleri .....                                                                                    | 15 |
| <b>Tablo 3.5.</b>  | ASTM C618 (2018)'e göre puzolanların sınıfları .....                                                                                          | 15 |
| <b>Tablo 3.6.</b>  | İdeal iri agreganın sınıflandırılması .....                                                                                                   | 16 |
| <b>Tablo 3.7.</b>  | İnce agrega sınıflandırılmasının sınırları .....                                                                                              | 17 |
| <b>Tablo 3.8.</b>  | ASTM C494 (2018)'e göre katkı türleri.....                                                                                                    | 18 |
| <b>Tablo 3.9.</b>  | SSB Laboratuvar karışımlarının basınç dayanımı .....                                                                                          | 19 |
| <b>Tablo 3.10.</b> | SSB Laboratuvar karışımlarının elastisite modülü ve poisson oranı .....                                                                       | 20 |
| <b>Tablo 3.11.</b> | Taban sürtünme katsayıları .....                                                                                                              | 23 |
| <b>Tablo 3.12.</b> | SSB için önerilen karıştırma süreleri . .....                                                                                                 | 25 |
| <b>Tablo 3.13.</b> | Yatak harcı ile yatak betonu arasındaki farklar . .....                                                                                       | 28 |
| <b>Tablo 4.1.</b>  | Kayma ve devrilmeye karşı güvenlik faktörleri.....                                                                                            | 31 |
| <b>Tablo 4.2.</b>  | SSB, uygun kıvam $\leq 30$ saniye vebe titreşimi için mukavemet değerleri .....                                                               | 32 |
| <b>Tablo 4.3.</b>  | SSB, uygun kıvam $> 30$ saniye vebe titreşimi için mukavemet değerleri .....                                                                  | 32 |
| <b>Tablo 4.4.</b>  | Barajda birim metreye düşen toplam beton hacmi.....                                                                                           | 33 |
| <b>Tablo 4.5.</b>  | Katı dolgu baraj üst bloğunda ve gövdesinde meydana gelen yer değiştirme ve asal gerilme değerleri (Sık sonlu eleman ağ sistemi 1 m).....     | 37 |
| <b>Tablo 4.6.</b>  | Katı dolgu baraj üst bloğunda ve gövdesinde meydana gelen yer değiştirmesi ve asal gerilme değerleri (Sık sonlu eleman ağ sistemi 0.5 m)..... | 39 |
| <b>Tablo 4.7.</b>  | Katı dolgu baraj üst bloğunda ve gövdesinde meydana gelen yer değiştirmesi ve asal gerilme değerleri (Normal sonlu eleman ağ sistemi) .....   | 41 |
| <b>Tablo 4.8.</b>  | Katı dolgu baraj üst bloğunun $a=0$ m olduğunda farklı hava payı ( $h_w$ ) durumu .....                                                       | 43 |
| <b>Tablo 4.9.</b>  | Katı dolgu baraj üst bloğunun $a=3$ m olduğunda farklı hava payı ( $h_w$ ) durumu .....                                                       | 45 |
| <b>Tablo 4.10.</b> | Katı dolgu baraj üst bloğunun $a=5$ m olduğunda farklı hava payı ( $h_w$ ) durumu. ....                                                       | 47 |
| <b>Tablo 4.11.</b> | Katı dolgu baraj üst bloğunun $a=8$ m olduğunda farklı hava payı ( $h_w$ ) durumu .....                                                       | 49 |

## EKLER LİSTESİ

Sayfa

|               |                                                                                                                                                                                     |
|---------------|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| <b>EK- 1:</b> | Baraj Gövdesinde Oluşan Minimum ve Maksimum Asal Gerilme (Sık ve Normal Sonlu eleman ağ sistemi) ..... 56                                                                           |
| <b>EK- 2:</b> | Baraj Gövde Elemanının Üst Kısımındaki Bloğun Yüksekliği $a=0, 3, 5$ ve $8$ m, Hava Payı $h_w=1, 3$ ve $5$ m Olması Durumunda Baraj Gövdesinde Oluşan Minimum Asal Gerilme. .... 59 |

## SİMGELER VE KISALTMALAR

---

|               |                                                       |
|---------------|-------------------------------------------------------|
| $a$           | : Katı dolgu barajın üst kısmındaki bloğun yüksekliği |
| $A$           | : Yatay kesit alanı                                   |
| $C$           | : Kohezyon                                            |
| $E$           | : Elastisite modülü                                   |
| $E_b$         | : Baraj malzemesinin elastisite modülü                |
| $E_t$         | : Taban ortamının elastisite modülü                   |
| $F$           | : Düşey kuvvetlerin toplamı                           |
| $f_{ck}$      | : Beton karakteristik basınç dayanımı                 |
| $f(K)$        | : Sünme ölçüsü                                        |
| $H_b$         | : Baraj yüksekliği                                    |
| $h_w$         | : Hava payı                                           |
| $I$           | : Atalet momenti                                      |
| $M$           | : Moment                                              |
| $S$           | : Kayma dayanımı                                      |
| $t$           | : Zaman                                               |
| $\phi$        | : Kayma Mukavemeti açısı                              |
| $\sigma$      | : Gerilme                                             |
| $\varepsilon$ | : Belirli sünme veya çekme-yer değiştirme             |
| $\nu$         | : Poisson oranı                                       |
| $\gamma_b$    | : Betonun özgül ağırlığı                              |
| $\gamma_{su}$ | : Suyun özgül ağırlığı                                |

### Kısaltmalar

---

|       |                                                                                                      |
|-------|------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| ACI   | : American Concrete Institute (Amerikan Beton Enstitüsü)                                             |
| ASTM  | : American Society for Testing and Materials (Amerika Malzeme Tecrübeleri Kurumu)                    |
| CSG   | : Cement Sand Gravel (Çimento-Kum-Çakıl)                                                             |
| CVC   | : Conventional Vibrated Concrete (Klasik Titreşimli Beton)                                           |
| GERCC | : Grout-Enriched Roller Compacted Concrete (Harçla Zenginleştirilmiş Silindirle Sıkıştırılmış Beton) |
| JC    | : Jang Chin yöntemi                                                                                  |
| RCC   | : Roller Compacted Concrete (Silindirle Sıkıştırılmış Beton)                                         |
| RCD   | : Roller Compacted Dam ( Silindirle Sıkıştırılmış Baraj, Japon Tekniği)                              |
| SSB   | : Silindirle Sıkıştırılmış Beton                                                                     |

# 1. GİRİŞ

Katı dolgu baraj yeni bir tip olup simetrik enkesit, geçirimsiz bir memba yüzeye ve baraj gövdesinde iç drenajın olmamasına sahip bir baraj türüdür. Zayıf bağlayıcı içeren bu tasarım “Hardfill” diye adlandırılmaktadır. Katı dolgu baraj malzemeleri genellikle su, çimento, agrega, puzolan malzemelerinin bir arada karıştırılmasıyla üretilir. Bu tür barajların inşaa süresi daha kısa ve maliyeti daha düşük olduğundan tercih edilmektedir.

Katı dolgu barajların gövde elemanın üst kısmında statik ve sismik yüklerden kaynaklanan hasar olma ihtimali söz konusudur. Bu tür barajların tasarımında gövde enkesitinin üst kısmında inşa edilen blokta uygulamada çatlakların gözlemlendiği hidrolik tasarım mühendisleri tarafından belirtilmektedir. Gövdenin üst kısmında yapılan bu eleman tamamen maliyet kazanımı nedeniyle yapılmaktadır. Katı dolgu barajların üst kısmındaki gövde elemanının yapılmasıyla SSB (Silindirle Sıkıştırılmış Beton) kullanımından tasarruf edilmektedir. Fakat emniyet parametresi, maliyet parametresinden daha önde geldiğinden bu çalışmada baraj emniyeti ön planda tutularak farklı analizler yapılarak problemin aydınlatılmasına çalışılmıştır.

Bu çalışmada, sağlam kaya (rijit) zemin üzerine inşa edilmiş katı-dolgu barajların üst kısmındaki gövde elemanının normal ve sık sonlu eleman ağ sistemi kullanılarak statik yükler altında lineer elastik davranışlarını incelenmiştir. Baraj yüksekliği sabit (100 m), barajın şev eğimleri (0.7y/1.0d) ve baraj gövdesinin üst kısmındaki bloğun yüksekliği  $a= 0, 3, 5$  ve 8 m olarak alınmıştır. Rezervuar hidrostatik su yükünün tesirini görmek için de rezervuarın tamamen dolu yani rezervuar su seviyesi kretten 3 m aşağıda kabul edilmiştir. İkinci adımda bu çalışma kapsamında “ $a$ ” değeri sabit tutularak farklı hava payları “ $h_w$ ” değerleri için analizler yapılmıştır. Yapılan bu analizler ile baraj emniyeti belirlenmeye çalışılmıştır. Baraj gövdesinde ve baraj gövdesinin üst kısmındaki gövde elemanında (blokta) oluşan maksimum ve minimum asal gerilmelerin maksimumlarının ve baraj gövdesinde oluşan maksimum yer değiştirmelerin değişimi her bir durum için ayrı ayrı incelenmiştir. Ayrıca her bir “ $a$ ” değeri için barajın kaymaya ve devrilmeye karşı güvenlik faktörü ve baraj topuğunda minimum ve maksimum gerilmeler elde edilmiştir. Barajın “ $a$ ” değerinin artışına bağlı olarak baraj enkesitinde birim metreye düşen beton hacmi değişimi de belirlenmiştir.

## 2. LİTERATÜR ÖZETİ

Londe ve Lino (1992) katı dolgu baraj türünü öneren ilk araştırmacı mühendislerdir. Bu araştırmacılar Fransa’da çalışmalarını yürütmüş çok tecrübeli baraj mühendisleridir. Yazarlar SSB baraj enkesitini bir trapez enkesit olarak dikkate almışlardır ve hava payının olduğu üst kısmı bir başlık şeklinde tasarlamışlardır. Memba ve mansap şevlerini simetrik olarak dikkate aldıklarından bu baraj türünün adını da “Simetrik yüzlü katı dolgu baraj - *The faced symmetrical hardfill dam*” olarak isimlendirmişlerdir. Memba ve mansap şevlerini 0.7 yatay/1.0 düşey olacak şekilde dikkate almışlardır. Yazarlar katı dolgu baraj enkesitinin önerdikleri şekilde alınması durumunda tabana aktarılan gerilmelerin klasik SSB baraja göre çok azaldığını vurgulamışlardır.

Çiçek (2007) farklı zemin dayanımlarına sahip olan zayıf temeller üzerine inşa edilmiş katı dolgu barajların statik yükler altında lineer elastik davranışları SAP2000 yazılımı kullanılarak araştırılmıştır. Baraj ve temel ortamları lineer elastik kabul edilmiş olup sonlu elemanlar yöntemi ile modellenmiştir. Yapılan analizlerde temelin dayanımı, barajın elastisite modülünün bir oranı şeklinde ( $E_t/E_b$ ) hesaba katılmıştır. Yapılan analizler,  $E_t/E_b$  oranının 0.125, 0.25, 0.5 ve 1.0 şev eğimlerinin de 0.6yatay/1.0düşey, 0.7yatay/1.0düşey, 0.8yatay/1.0düşey olması durumları dikkate alınarak yapılmıştır. Aynı zamanda, katı dolgu baraj yüksekliğinin etkisini incelemek amacıyla baraj yüksekliği 30, 60, 90 ve 120 m olarak göz önüne alınmıştır. Çiçek (2007) yaptığı yüksek lisans çalışmasında; rezervuardaki hidrostatik su yükünün tesirini görmek için de rezervuarın boş, yarı dolu, tam dolu olması durumları için farklı çözümler yapılmıştır. Çiçek (2007) yaptığı yüksek lisans tez çalışmasında aşağıdaki bulgulara ulaşmıştır:

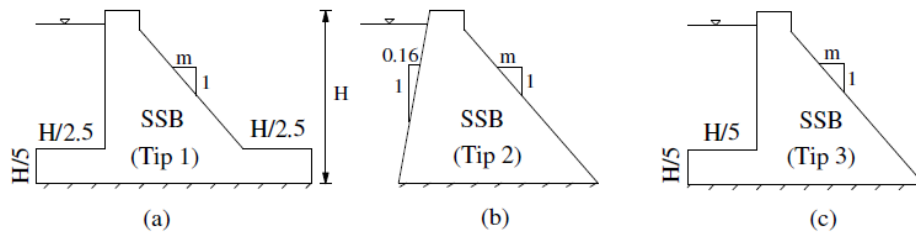
1) Baraj membasındaki doluluk oranının artışı ile yatay ve düşey yer değiştirme değerleri artmıştır. Şevin daha yatık olması durumunda düşey yer değiştirme değerlerinde artışa ve yatay yer değiştirme değerlerinde ise azalmaya neden olmuştur.

2) Temel ortamı elastisite modülünün artışına bağlı olarak yatay ve düşey yer değiştirme değerlerinin küçüldüğü görülmüştür.

3) Rezervuarın doluluk oranının artışına bağlı olarak baraj-temel ve baraj gövdesi üzerinde elde edilen maksimum ve minimum asal gerilme değerlerinin küçülmesine (çekme gerilmelerinin değer olarak azalmasına, basınç gerilme değerlerinin de artışına) neden olmaktadır. Aynı zamanda,  $E_t/E_b$  oranının artışı, baraj-temel ve baraj gövdesi üzerinde elde edilen maksimum asal gerilme değerlerinin küçülmesine, minimum asal gerilme değerlerinin ise büyümesine (çekme ve basınç gerilme değerlerinin küçülmesine) neden olmaktadır. Bunun yanı sıra şev değerlerinin artışı, baraj-temel ve baraj gövdesi üzerinde elde edilen maksimum ve minimum asal gerilme değerlerinin büyümesine (çekme gerilmesi değerlerinin büyümesine ve basınç gerilme değerlerinin ise küçülmesine) neden olmaktadır.

Mason vd. (2008) simetrik yüzölü katı dolgu barajların; özellikle temel koşullarının normal olarak klasik bir beton baraj ile benzer olduğunu, ancak klasik SSB barajlar için gereksinim duyulan kadar sağlam olmayan temellere de inşa edilebildiklerini, taşkın riskinin aşılabilen bir yapı gerektirdiği yerlerde kullanılabileceklerini, özellikle sağlam ve uygun maliyetli bir inşaat türünü temsil ettiğini belirtmişlerdir. 1970'lerde Pakistan'da Tarbela rezervuarında yapılan onarımlarda çimento bağli kazılmış malzeme kullanılarak kapsamlı sert dolgu kullanımının yapıldığını fakat SSB teknolojisinin 1980'li yıllardan sonra geliştiğini ifade etmişlerdir. Yazarlar katı dolgu barajların statik ve dinamik etkilere karşı ve ekonomiklik açısından iyi bir baraj türü olduğunu vurgulamışlardır.

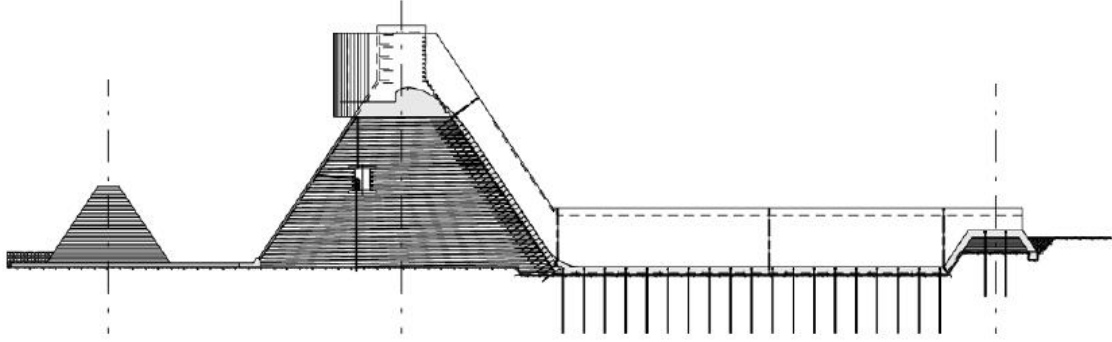
Kılıç (2009) yaptığı yüksek lisans çalışmasında; silindirle sıkıştırılmış beton baraj türünün kaya olmayan temellerde inşa edilebilme durumunu incelenmiştir. Kılıç (2009) farklı zemin dayanımlarına sahip temeller üzerinde inşa edilebilecek SSB barajların statik yükler altında lineer elastik davranışlarını analiz etmiştir. Kılıç (2009) tarafından dikkate alınan SSB baraj enkesitleri Şekil 2.1'de verilmiştir. Yüğü daha geniş bir alana yaymak ve sızma boyunu uzatmak amacıyla üç farklı geometrideki baraj enkesitini dikkate almıştır. Temelin dayanımı, barajın elastisite modülünün bir oranı şeklinde ( $E_t/E_b$ ) hesaba katılmıştır. Farklı şev açıları için statik analizler yapılmıştır. Baraj gövdesinde ve baraj-temel ara yüzeyinde oluşan maksimum ve minimum asal gerilmelerin maksimumlarının ve baraj gövdesinde oluşan maksimum yer değıştirmelerin değışimi her bir durum için ayrı ayrı belirlenerek incelenen problem analiz edilmiştir. Yazar, yüğü geniş alana yaymak, baraj enkesitinde değışiklikler yaparak (şevi yatırmak gibi), detaylı statik ve dinamik analizler yapmak suretiyle SSB barajların zayıf temeller üzerine inşa edilebileceklerini belirtmiştir. Ayrıca yazar, uygulamada da örneklerinin olduğunu vurgulamıştır.



Şekil 2.1. Kılıç (2009) tarafından dikkate alınan SSB enkesitleri

Guillemot ve Lino (2012) simetrik yüzölü katı dolgu barajların tasarım ve inşa avantajlarını göstermek amacıyla Safsaf Barajı (Doğu Cezayir) için bir çalışma yapmışlardır. Yazarlar ifade etmişlerdir ki simetrik yüzölü katı dolgu baraj kavramı, son yirmi yılda baraj yapımında geliştirilmiş ve uygulanmıştır. Bu tür barajların sağlamlık, hidrolojik ve hidrolik açısından birçok avantaja sahip olduklarını vurgulamışlardır. Yazarlar, bu avantajları Doğu Cezayir'deki Safsaf Barajı'nın bir vaka

alışması yoluyla göstermişlerdir. 36 metre yüksekliğindeki Safsaf Barajı, 2007 ile 2011 yılları arasında oldukça kırıklı ve zayıf bir kireçtaşı temel üzerine inşa edildiğini belirtmişlerdir. İncelenen Safsaf Barajı'nın enkesiti Şekil 2.2'de ve mansaptan görünümü Şekil 2.3'te verilmiştir.



Şekil 2.2. Baraj ve dolusavağın tipik enkesiti (Guillemot ve Lino, 2012)



Şekil 2.3. Safsaf Barajına ait mansaptan görünüm (Guillemot ve Lino, 2012)

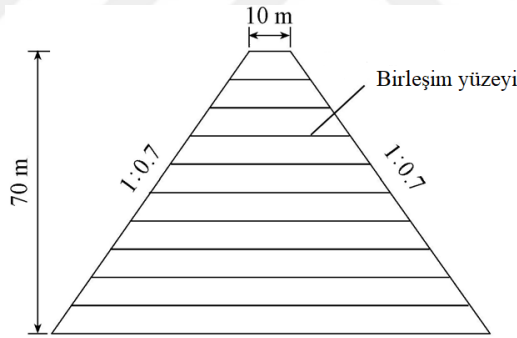
Xiong vd. (2013) katı dolgu barajların 8 derece büyüklüğündeki bir deprem sırasında baraj davranışını görmek için sismik analizi yapmışlardır. Mikroskobik hasar teorisine ve sonlu elemanlar yöntemine dayalı, malzemelerin mekanik özelliklerinin rastgele dağılımını nitelendirmek için Weibull dağılımını kullanarak, sayısal modelleme yoluyla, 8 derecelik bir deprem sırasında katı dolgu (*Hardfill*) barajının sismik analizini yapmışlardır. Xiong (2013) tarafından dikkate alınan baraj Şekil 2.4'te verilmiştir. Baraj gövdesi ile temel arasındaki ara yüzü ve baraj gövdesindeki birleşim yüzeyleri sonlu eleman ağ sistemi kullanılarak modellenmiştir. Katı dolgu barajın sismik analizinin sonucunu karşılaştırılabilmek için, aynı yüksekliğe, şev eğimine ve sonlu eleman ağ sistemine sahip bir ağırlık baraj da tasarlanmıştır. Sismik analizinde dikkate alınan yükler, barajın kendi ağırlığı, hidrostatik su basıncı, kaldırma kuvveti ve sismik yükleri içermektedir. Sismik analizi için zaman tanım alanı metod (time history method) kullanılmış ve Taft deprem dalgaları da yer hareketi olarak seçilmiştir. Hesaplamalarda, deprem süresi 12 saniye,

zaman aralığı 0.02 saniye ve maksimum ivmelendirme değeri de 0.2g olarak ayarlanmıştır. Temelin güçlendirici etkilerini ortadan kaldırmak için temelin kütlesi dikkate alınmamıştır. Hidrodinamik basıncının etkisi, Westergaard formülü ile hesaplanan, eklenmiş taban kütlesi olarak dikkate alınmıştır. Analizler sonucunda Xiong vd (2013) aşağıdaki sonuçlara varmışlardır:

1) Bir katı dolgu baraj, 8 derecelik bir deprem sırasında düşük gerilmeler, hasarsız veya hafif hasar görmüş durumlarda kalır. Ancak, farklı mikroskobik elemanların gerilme değerleri, katı dolgu malzemesinin homojen olmaması nedeniyle birçok değişkenlik göstermektedir.

2) Deprem sırasında, katı dolgu baraj gövdesinin hem memba hem de mansap yüzeyinde bazı hasar alanları görülmektedir, çünkü barajın enkesiti simetrik olduğundan alternatif atalet kuvvetleri altındadır. Baraj gövdesinin memba yüzeyi, baraj gövdesinin mansap yüzeyine göre daha fazla hasar görmektedir. Deprem pıık ivmesinin artmasıyla birlikte baraj yüzeylerinde çekme çatlakları oluşmakta ve daha sonra baraj gövdesine doğru uzanmaktadır. Bu nedenle, sismik koşullar altında, katı dolgu barajının göçme modeli, memba yüzünün ve barajın ön ayağının çekme çatlamlarıdır.

3) Klasik ağırlık barajıyla karşılaştırıldığında, simetrik katı dolgu barajı daha iyi sismik performansa ve daha fazla sismik güvenliğe sahiptir.

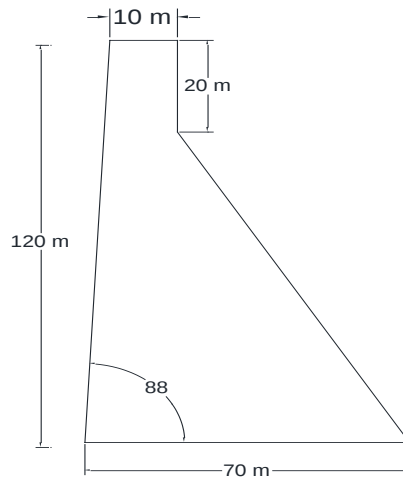


**Şekil 2.4.** Xiong vd. (2013) tarafında dikkate alınan katı dolgu (*Hardfill*) baraj enkesiti

Peng ve Yuan (2014) katı dolgu baraj inşa malzemesinin dinamik özelliklerini belirlemek için deneysel bir çalışma yürütmüşlerdir. Yazarlar, katı dolgu baraj inşa malzemesinin, düşük maliyetli ve çevre dostu olması gibi avantajları nedeniyle özellikle hidrolik yapılarda kütle yapısında çok tercih edildiklerini vurgulamışlardır. Deprem sırasında katı dolgu malzemesinin dinamik özelliklerini incelemek için döngüsel yükleme testleri yapılmıştır. Test sonuçlarında, gerilme-şekil değiştirme ilişkisinin esnekliği, maksimum basınç gerilmesinin katı dolgu malzemesinin doğrusal aralığını aşmadığı koşullar altında döngüsel yükleme testleri ile doğrulanmıştır. Ayrıca, döngüsel yükler katı dolgu malzemesinin doğrusal aralığını aştığında elasto-plastisite gözlenmiştir.

Zafeiratos vd. (2019) simetrik yüzölçü katı dolgu barajların dinamik yüklerin altında nasıl davrandığını incelemişlerdir. Yazarlar, bu tür barajlarda kullanılan baraj ve temel malzemesinin özellikleri üzerinde bir araştırma yapmışlardır. Yapılan çalışmada baraj ve temel zemini için kullanılan malzemelerin elastik olduğu varsayılmıştır. Abaqus sonlu elemanlar yazılımı kullanılarak baraj-su etkileşimini görmek için rezervuarın hem boş hem de dolu olduğu kabul edilmiştir. Baraj-su etkileşimini göz önünde bulundurmak için farklı yöntemler kullanılmıştır. Farklı malzeme özellikleri için statik ve dinamik yükler altında baraj gövdesindeki gerilmeler ve yer değiştirmeler incelenmiştir. Barajın ivmelenmesi ve sallanması için Yunanistan'da ve dünyanın diğer bölgelerinde meydana gelen üç deprem kayıtlarından yararlanılmıştır. Sonuç olarak, baraj kesitinin birçok yerinde çekme gerilmelerinin meydana gelebileceğini, malzeme seçiminin ve katı dolgu barajların inşası için kullanılan geometrik özelliklerin dikkatlice seçilmesini söylemişlerdir.

Wei vd. (2020) bir beton ağırlık barajı üzerinde statik analizin yapılması için sonlu elemanlar yöntemini ve ANSYS yazılımını kullanmışlardır. Barajın temeli rijit (kaya) ve barajın yüksekliği 120 m olarak dikkate alınmıştır. Wei vd (2020) tarafından dikkate alınan ağırlık barajın enkesiti Şekil 2.5'te gösterilmiştir. Baraj, normal su seviyesi ve tam dolu rezervuar koşullarında olup, memba hidrostatik yüküne, baraj tabanı yer değiştirme düğüm mafsallarına ve baraj gövde ağırlığının etkilerine maruz kalmıştır. Analiz sonucunda barajın üst kısmında pozitif yatay yer değiştirme görülmüş olup barajın topuğu daha fazla basınca maruz kalmıştır. Bu etkiler, barajının üst kısmında, barajın memba yüzeyinde ve baraj topuğunda çatlaklara neden olabileceği ve bu da baraj güvenliği üzerinde ciddi bir etkisi olduğu söylenmiştir. Wei vd. (2020) tarafından dikkate alınan baraj enkesiti, Şekil 2.5'te verilmiştir



**Şekil 2.5.** Wei vd. (2020) tarafından dikkate alınan ağırlık baraj enkesiti

Li vd. (2020) CSG (Çimento-kum-çakıl – *The cement sand and gravel* -) barajının stabilitesi ve güvenilirliği üzerine bir çalışma yapmışlardır. Bu çalışmada bir birinci sınıf ağırlık barajı, CSG barajıyla karşılaştırılması için tasarlanmıştır. Aynı yükseklikte (100 m) ağırlık barajın ve CSG barajların stabilite ve güvenilirliğini incelemek ve statik analiz yapmak için sonlu elemanlar yazılımı ve barajların güvenilirliğini hesaplamak için de analiz sonucuna dayalı JC yöntemini kullanmışlardır. CSG barajın eğimleri 0.7yatay/1.0düşey olarak dikkate alınmıştır. Baraj gövdesi kendi ağırlığına, hidrostatik basıncına ve kaldırma kuvvetine maruz kalmıştır. Gerilme değişimini incelemek için CSG barajının üç farklı su seviyeleri, rezervuar ortamı boş, su seviyesi baraj yüksekliğin 1/3'ü kadar, rezervuar ortamı tam dolu ve mansapta suyun olmadığı kabul edilmiştir. Li vd. (2020) yaptığı araştırmada aşağıdaki sonuçlara varmışlardır:

1) CSG barajı ile ağırlık barajı arasındaki maksimum asal gerilme, minimum asal gerilme ve kayma mukavemetinin dağılımının karşılaştırılmasında, CSG barajının aynı yükseklik altında ağırlık barajına göre daha düşük gerilme, daha iyi gerilme dağılımı, daha yüksek stabilite ve temele daha iyi uyurlanabilirliğe sahip olduğunu göstermektedir.

2) Hem CSG hem ağırlık barajı için, su seviyesi arttıkça güvenilirlik indeksi azalır ve hasar olasılığı artar. Aynı çalışma koşulu altında, CSG barajı, ağırlık barajına göre daha yüksek bir güvenilirlik indeksine ve daha düşük kayma olasılığına sahiptir.

Literatür özetine bakıldığında, katı dolgu barajlar ile ilgili birçok statik ve dinamik analizler ve farklı araştırmalar yapılmıştır, araştırmalar sonucunda bu tür barajlar hem ekonomik hem de güvenlik avantajları nedeniyle tercih edilebilir bir baraj türü olduğu belirtilmiştir. Katı dolgu baraj deprem şartların altında teorik olarak iyi davranış göstermektedir, 0,2g ivmelik bir depremde baraj gövdesinde önemli bir çekme gerilmesinin oluşmadığı, barajın güvende olduğu belirtilmektedir (Zafeiratos vd., 2019). Ayrıca, bu tür barajlar, tabanda artan genişliğin bir sonucu olarak zemine aktarılan basınç gerilmeleri azaldığından yüksek ve düşük mukavemet özelliklerine sahip zeminlerde inşa edilebileceği vurgulanmıştır (Londe ve Lino, 1992; Zafeiratos vd., 2019). Bu tür barajların malzemeleri genellikle su, çimento, agrega, puzolan malzemelerinin bir arada karıştırılmasından ve inşa süresi daha kısa olduğundan maliyeti daha düşük olmaktadır (Londe ve Lino, 1992).

Literatür özetinden de görüleceği üzere katı dolgu barajlar günümüzde sık tercih edilen ekonomik ve güvenilir bir baraj türüdür. Bu çalışmanın asıl amacı katı dolgu baraj enkesitindeki üst kısmın inşa edilmesi veya edilmemesi durumunu hem ekonomik ve hem de statik analizlerle belirlemeye çalışmaktadır. Bu amaçla çalışma kapsamında detaylı statik analizler gerçekleştirilmiş ve yorumlanmıştır. Bunun yanında ağırlık barajlar için yapılan devrilme, kayma ve gerilme tahkikleri de yapılmıştır. Açıkça belirtmek gerekir ki emniyet parametresi, maliyet parametresinden daha önde geldiğinden bu çalışmada baraj emniyeti ön planda tutularak farklı analizler yapılarak problemin aydınlatılmasına çalışılmıştır.

### 3. SSB BARAJLAR VE TASARIMI

Silindirle Sıkıştırılmış Beton (SSB) ifadesi, toprak dolgu barajlar için kullanılan uygun maliyetli ve hızlı yerleştirme tekniklerini betonun mukavemeti ve dayanıklılığı ile birleştiren baraj yapımında kullanılan betonu ifade eder. Adını son haline sıkıştırmak için kullanılan ağır silindirlerden almıştır. SSB genellikle yüksek kapasiteli sürekli harmanlama ekipmanı kullanılarak karıştırılır, kamyonlar veya konveyörler ile taşınır, sıkıştırmadan önce diğer betonlama tekniklerinde olduğu gibi tabaka olarak da adlandırılan katmanlar halinde buldozerlerle yayılır. SSB'nin yerleştirilmesi, aynı zamanda toprak ve kaya dolgu baraj yapım tekniklerine benzeyen yatay katmanlar halinde yerleştirilir. Bu şekilde SSB baraj yapıları ayda 10 metreye yakın bir oranda veya daha fazla yükseltilebilir (Sika, 2019).

SSB, titreşimli silindir ile sıkıştırılan ve sıkıştırma işlemi sırasında yükleri taşıyabilen bir betondur. Fiziksel olarak asfalt karışımına benziyor. SSB'nin mekanik özellikleri incelendiğinde toprak malzemesi ile klasik betonun kombinasyonu olarak görülebilir. Mukavemet kazancı, performansı ve elastik özelliklerinden dolayı klasik betona benzer. Öte yandan SSB'nin geçirgenliği, dayanıklılığı ve yerleştirme yöntemleri, toprak ve kaya dolgu malzemeleri ile paralel davranış göstermektedir (Soğut, 2014).

SSB barajları hem yapı hem de malzeme mühendislerinin çabalarıyla ortaya çıkmıştır. 1950'lerden 1980'lere kadar beton ağırlık barajların popülaritesi, geniş vadilerde inşa edilmelerinin maliyetli olması nedeniyle azaldı. Bu yıllarda dolgu barajların maliyeti beton ağırlık barajlara göre daha düşük olduğundan tercih edilmiştir (USACE, 2000). Bununla birlikte, ekonomik avantajlarına rağmen, dolgu barajlar hasara ve bozulmaya daha yatkındı. 1960'larda yapı ve malzeme mühendisleri, güvenlik ve mali sorunları çözmek için beton ağırlık barajı ve dolgu barajının avantajlarını birleştirmeye çalıştı. 1970'lerde SSB kullanılarak bazı laboratuvar testleri ve saha gösterileri yapıldı. 1974 yılında, Tarbela Barajı'nın derivasyon tünelinin onarımı ve yedek dolusavaklarının rehabilitasyonu, malzemenin hızlı yerleştirme özelliğini gösteren SSB'yi kullanılarak yapıldı (ACI 1999). Bu çalışmalar ilk SSB barajların 1982 Amerika Birleşik Devletleri'nde Willow Creek Barajı ve Japonya'da 1981 Shimajigawa Barajı'nın inşasına yol açtı. Tablo 3.1'de, Türkiye'deki SSB barajların bazı özellikleri, ve Tablo 3.2'de dünyada inşa edilen SSB barajların bazı özellikleri verilmiştir. Şekilde 3.1'de Türkiye'de iki SSB barajlar görülmektedir.

**Tablo 3.1.** Türkiye’deki silindire sıkıştırılmış beton (SSB) barajlar (Güman, 2019)

| Barajın adı  | Başlangıç tarihi | Bitiş tarihi | Yükseklik (m) | Uzunluk (m) | SSB Hacmi (m³) | Klasik beton hacmi (m³) | Çimento (Kg/m³) | Puzolan (Kg/m³) |
|--------------|------------------|--------------|---------------|-------------|----------------|-------------------------|-----------------|-----------------|
| Akçakoca     | 15.05.2015       | 16.10.2016   | 75            | 148         | 85000          | 45000                   | -               | -               |
| Akköy I      | 06.10.2006       | 07.04.2007   | 53            | 146         | 46000          | 55000                   | 100             | 100             |
| Akköy II     | 11.05.2011       | 12.09.2012   | 60            | 260         | 101000         | 95000                   | 85              | 85              |
| Ardil        | 14.05.2014       | 16.12.2016   | 54            | 246         | 108000         | 50000                   | 75              | 50              |
| Aşağı        | 13.03.2015       | 31.12.2017   | 103           | 346         | 1192000        | 150000                  | 130             | 0               |
| Astandağ     | 11.11.2011       | 14.02.2014   | 69            | 210         | 162000         | 40000                   | 95              | 0               |
| Ayvalı       | 13.02.2013       | 15.02.2015   | 177           | 405         | 1650000        | 250000                  | -               | -               |
| Balkuşan     | 01.10.2010       | 31.12.2011   | 48            | 189         | 60000          | 16000                   | 75              | 50              |
| Balıkkaya    | 15.06.2015       | 31.12.2019   | 98            | 188         | 99000          | 14000                   | -               | -               |
| Beydağ       | 25.07.2006       | 20.04.2008   | 96            | 800         | 2350000        | 300000                  | 60              | 30              |
| Beyhan-I     | 01.03.2012       | 31.03.2014   | 97            | 361         | 1480000        | 181000                  | 90              | 40              |
| Beyhan-II    | 01.01.2017       | 31.12.2018   | 60            | 363         | 191000         | 19000                   | 130             | 0               |
| Beyyurdu     | 01.01.2013       | 31.12.2014   | 54            | 176         | 186000         | 23000                   | 95              | 0               |
| Burç         | 01.01.2008       | 31.12.2010   | 70            | 235         | 232000         | 28000                   | 60              | -               |
| Çaltıkoru    | 01.01.2008       | 31.12.2010   | 66            | 477         | -              | 800000                  | -               | -               |
| Camlica III  | 15.04.2010       | 31.12.2010   | 52            | 186         | 160000         | 22000                   | 88              | 37              |
| Çetin        | 01.01.2018       | 31.12.2020   | 160           | -           | 2400000        | -                       | -               | -               |
| Çetintepe    | 01.01.2011       | 31.12.2012   | 39            | 173         | 60000          | 4000                    | 95              | 0               |
| Çindere      | 04.02.2002       | 31.05.2005   | 107           | 280         | 1500000        | 185000                  | 50              | 20              |
| Çine         | 01.11.2004       | 30.04.2010   | 137           | 300         | 1560000        | 90000                   | -               | -               |
| Cudi-Circip  | 01.01.2017       | 31.12.2018   | 30            | 213         | 48000          | 11000                   | -               | -               |
| Devecikonağ  | 01.03.2011       | 30.09.2012   | 29            | 313         | 54000          | 96000                   | 80              | 40              |
| Ergani       | 01.01.2016       | 31.12.2017   | 60            | 229         | 121000         | 40000                   | -               | -               |
| Erganlı      | 01.01.2013       | 31.12.2016   | 107           | 540         | 1249000        | 91000                   | -               | -               |
| Eriç-1       | 01.01.2009       | 31.12.2009   | 59            | 121         | 110000         | -                       | -               | -               |
| Eriç-2       | 01.01.2009       | 31.12.2009   | 25            | 239         | 121000         | -                       | -               | -               |
| Eriç-3       | 01.01.2009       | 31.12.2009   | 23            | 255         | 58000          | -                       | -               | -               |
| Eriç-4       | 01.01.2009       | 31.12.2009   | 44            | 227         | 61000          | -                       | -               | -               |
| Feko II      | 01.12.2008       | 28.02.2010   | 71            | 256         | 194000         | 33000                   | -               | -               |
| Gökkaya      | 01.07.2010       | 31.05.2012   | 69            | 118         | 96000          | 26000                   | 55              | 55              |
| Göktaş       | 01.03.2013       | 31.03.2015   | 135           | 200         | 750000         | 150000                  | 50              | 50              |
| Gölgeliyama  | 01.01.2013       | 31.12.2014   | 52            | 150         | 85000          | 14000                   | 95              | 0               |
| Güllübağ     | 01.02.2011       | 30.06.2011   | 72            | 97          | 160000         | 15000                   | 70              | 70              |
| Gümüşören    | 01.01.2013       | 31.12.2014   | 37            | 842         | 189000         | 1754000                 | -               | -               |
| İnandık      | 01.01.2020       | 15.12.2023   | 63            | 334         | 295000         | 37000                   | 80              | 80              |
| İncir        | 01.01.2016       | 31.12.2017   | 150           | -           | -              | -                       | -               | -               |
| Kapıçay      | 01.01.2009       | 01.12.2009   | 50            | -           | -              | -                       | -               | -               |
| Karakurt     | 01.01.2009       | 31.12.2013   | 150           | 449         | -              | 10915000                | -               | -               |
| Karakuz      | 01.01.2013       | 20.12.2014   | 52            | -           | -              | -                       | -               | -               |
| Karareis     | 01.01.2016       | 31.11.2018   | 45            | 298         | 142000         | 31000                   | -               | -               |
| Kargı        | 01.01.2015       | 30.10.2016   | 95            | 270         | 535000         | -                       | -               | -               |
| Kavşak Bendi | 01.01.2010       | 31.09.2012   | 88            | -           | -              | -                       | -               | -               |
| Kavşaktepe   | 01.01.2014       | 31.12.2016   | 71            | 268         | 330000         | 20000                   | 81              | 39              |
| Kelebek      | 01.01.2014       | 31.12.2016   | 60            | 193         | 74000          | 21000                   | -               | -               |
| İhsaniye     | 01.03.2017       | 31.06.2019   | 69            | -           | 130000         | -                       | 75              | 45              |
| Köprü        | 01.12.2010       | 30.04.2012   | 103           | 413         | 880000         | 170000                  | 85              | 45              |
| Kotanlı I    | 01.06.2015       | 28.02.2017   | 95            | 404         | 640000         | 40000                   | 85              | 130             |
| Kotanlı II   | 15.05.2014       | 30.04.2015   | 85            | 250         | 245000         | 7000                    | 85              | 130             |
| Melen        | 01.06.2015       | 31.03.2019   | 124           | 944         | 1871000        | 225000                  | 90              | 60              |
| Menge        | 01.08.2010       | 31.10.2011   | 73            | 304         | 321000         | 63000                   | 80              | 40              |
| Musatepe     | 01.01.2013       | 21.12.2014   | 66            | 165         | 130000         | 8000                    | 95              | 0               |
| Naras        | 01.12.2012       | 28.01.2014   | 78            | 448         | 600000         | 77000                   | 110             | 90              |
| Narlı        | 01.01.2017       | 31.12.2018   | 47            | 153         | 49000          | 19000                   | 65              | 50              |
| Oğuzlar      | 01.01.2018       | 10.01.2019   | -             | -           | -              | -                       | -               | -               |
| Oyuk         | 01.01.2009       | 11.12.2010   | 100           | 212         | -              | 470000                  | -               | -               |
| Pembelik     | 01.03.2013       | 07.10.2014   | 88            | 500         | 760000         | 78000                   | 120             | 0               |
| Sefaköy      | 01.01.2010       | 16.12.2011   | 45            | 148         | -              | -                       | -               | -               |
| Silopi       | 01.01.2010       | 31.12.2011   | 80            | 356         | 693000         | 34000                   | 81              | 39              |
| Şırmak       | 01.11.2009       | 09.08.2010   | 67            | 198         | 186000         | 45000                   | 125             | 0               |

**Tablo 3.2.** SSB ve RCD (Japon tekniği) tipte inşa edilen bazı barajların özellikleri (Emiroğlu, 2012)

| İnşa edildiği ülke                              | Barajın adı      | Rezervuar kapasitesi (m <sup>3</sup> x10 <sup>6</sup> ) | Beton hacmi (10 <sup>3</sup> m <sup>3</sup> ) |                           | Baraj boyutları (m) |         | Bağlayıcı içeriği (kg/m <sup>3</sup> ) |         |
|-------------------------------------------------|------------------|---------------------------------------------------------|-----------------------------------------------|---------------------------|---------------------|---------|----------------------------------------|---------|
|                                                 |                  |                                                         | RCC                                           | Toplam                    | Yükseklik           | Uzunluk | Çimento                                | Puzolan |
| ABD                                             | Monksville       | 27                                                      | 219                                           | 232                       | 48                  | 671     | 63                                     | 0 (-)   |
| ABD                                             | Stagecoach       | 42                                                      | 34                                            | 39                        | 46                  | 116     | 77                                     | 0 (-)   |
| ABD                                             | Willow Creek     | 17                                                      | 331                                           | 331                       | 52                  | 543     | 47                                     | 19 (F)  |
| ABD                                             | Middle Fork      | 1                                                       | 42                                            | 43                        | 38                  | 125     | 66                                     | 0 (-)   |
| ABD                                             | Galesville       | 52                                                      | 161                                           | 171                       | 50                  | 290     | 53                                     | 51 (F)  |
| ABD                                             | Upper Stillwater | 37                                                      | 1125                                          | 1281                      | 90                  | 815     | 79                                     | 173 (F) |
| ABD                                             | Victoria         | 37                                                      | 33                                            | -                         | 37                  | 92      | 67                                     | 67 (C)  |
| Angola                                          | Capanda          | 4795                                                    | 757                                           | 1154                      | 110                 | 1200    | 70                                     | 90 (M)  |
| Arjantin                                        | Urugua-i         | 1175                                                    | 590                                           | 626                       | 77                  | 687     | 60                                     | 0 (-)   |
| Avusturalya                                     | Copperfield      | 20                                                      | 140                                           | 156                       | 40                  | 340     | 80                                     | 30 (F)  |
| Avusturalya                                     | Craigbourn       | 13                                                      | 22                                            | 22                        | 25                  | 247     | 70                                     | 60 (F)  |
| Avusturalya                                     | New Victoria     | 10                                                      | 121                                           | 135                       | 52                  | 285     | 79                                     | 160 (F) |
| Avusturalya                                     | Burton Gorge     | 20                                                      | 70                                            | 78                        | 26                  | 300     | 90                                     | 0 (-)   |
| Brezilya                                        | Caraibas         | 9                                                       | 18                                            | 22                        | 26                  | 160     | 74                                     | 0 (-)   |
| Brezilya                                        | Gemeleira        | -                                                       | 27                                            | -                         | 29                  | 150     | -                                      | 0 (-)   |
| Brezilya                                        | S. de N. Olinda  | 95                                                      | 132                                           | 143                       | 56                  | 230     | 55                                     | 15 (N)  |
| Çin                                             | Kengkou          | 27                                                      | 43                                            | 62                        | 57                  | 123     | 60                                     | 120 (F) |
| Çin                                             | Tongjiezi        | 200                                                     | 422                                           | 853                       | 88                  | 284     | 79                                     | 79 (F)  |
| Çin                                             | Shuikou          | 2970                                                    | 380                                           | 1710                      | 100                 | 786     | 60                                     | 110 (F) |
| Çin                                             | Guanying         | 17                                                      | 43                                            | 74                        | 43                  | 150     | 62                                     | 108 (F) |
| Çin                                             | Yantan           | 3350                                                    | 330                                           | 1685                      | 110                 | 525     | 55                                     | 104 (F) |
| Çin                                             | Puding           | 421                                                     | 103                                           | 137                       | 75                  | 196     | 85                                     | 103 (F) |
| Fransa                                          | Riou             | -                                                       | -                                             | 45                        | 26                  | 308     | 0                                      | 120 (R) |
| Fas                                             | Aoulouz          | 11                                                      | 608                                           | 830                       | 75                  | 480     | 120                                    | 0 (-)   |
| G. Afrika                                       | Taung            | 66                                                      | 130                                           | 151                       | 64                  | 248     | 44                                     | 66 (F)  |
| G. Afrika                                       | Santa Eugenia    | 17                                                      | 225                                           | 254                       | 84                  | 290     | 88                                     | 142 (F) |
| G. Afrika                                       | Wolwedans        | 24                                                      | 180                                           | 210                       | 70                  | 268     | 58                                     | 136 (F) |
| Honduras                                        | Concepcion       | 35                                                      | 270                                           | 290                       | 68                  | 694     | 95                                     | 0 (-)   |
| İspanya                                         | Santa Eugina     | 16.6                                                    | 225                                           | 254                       | 83                  | 280     | 88                                     | 152     |
| İspanya                                         | Marono           | 2.23                                                    | 80                                            | 91                        | 53                  | 182     | 80                                     | 160     |
| İspanya                                         | Los Morales      | 2.34                                                    | 22                                            | 25.5                      | 28                  | 200     | 81                                     | 140     |
| İspanya                                         | Hervas           | 0.22                                                    | 24                                            | 43                        | 33                  | 210     | 80                                     | 155     |
| İspanya                                         | Canchales        | 15                                                      | 25                                            | 54                        | 32                  | 240     | 84                                     | 156     |
| İspanya                                         | Guadalemar       | 4                                                       | 50                                            | 55                        | 13                  | 400     | 60                                     | 125     |
| İspanya                                         | Cenza            | 43                                                      | 204                                           | 225                       | 49                  | 640     | 70                                     | 130     |
| İspanya                                         | Amatisteros I    | 0.03                                                    | 3                                             | 3.5                       | 11                  | 91      | 73                                     | 109     |
| İspanya                                         | Urdalur          | 5.4                                                     | 160                                           | 208                       | 58                  | 396     | 72                                     | 108     |
| İspanya                                         | Arriaran         | 3.2                                                     | 110                                           | 123                       | 58                  | 206     | 85                                     | 135     |
| İtalya                                          | T. Laurenzana    | 350                                                     | 91                                            | 107                       | 34                  | 294     | 76                                     | 114 (F) |
| Japonya                                         | Miyagase         | 19                                                      | 1537                                          | 2001                      | 155                 | 400     | 91                                     | 39 (F)  |
| Japonya                                         | Urayama          | 58                                                      | 40                                            | 1860                      | 155                 | 372     | 91                                     | 39 (F)  |
| Japonya                                         | Shimajigawa      | 21                                                      | 165                                           | 317                       | 89                  | 240     | 84                                     | 36 (F)  |
| Japonya                                         | Tamagawa         | 254                                                     | 772                                           | 1150                      | 100                 | 441     | 88                                     | 42 (F)  |
| Japonya                                         | Sabigawa         | 11                                                      | -                                             | 590                       | 104                 | 273     | -                                      | -       |
| Kolombiya                                       | Porce II         | 211                                                     | 1300                                          | 1450                      | 118                 | 455     | 44                                     | 176 (S) |
| Meksika                                         | La Manzanilla    | 1                                                       | 38                                            | 50                        | 36                  | 150     | 130                                    | 0 (-)   |
| Meksika                                         | Trigomil         | 324                                                     | 362                                           | 400                       | 100                 | 250     | -                                      | -       |
| Şili                                            | Pangue           | 175                                                     | 640                                           | 680                       | 113                 | 410     | -                                      | -       |
| Tayland                                         | Pak Mun          | -                                                       | 48                                            | 250                       | 26                  | 323     | 58                                     | 124 (F) |
| Rusya                                           | Tashkumyr        | -                                                       | 85                                            | 1200                      | 75                  | 320     | 90                                     | 30 (N)  |
| Romanya                                         | Vadeni           | 5                                                       | 14                                            | 17                        | 25                  | 55      | 125                                    | 0 (-)   |
| Yunanistan                                      | Platanovryssi    | 84                                                      | 420                                           | 440                       | 95                  | 305     | 35                                     | 250 (C) |
| Yunanistan                                      | Marathia         | 4                                                       | 33                                            | 33                        | 26                  | 265     | 55                                     | 15 (N)  |
| Yunanistan                                      | Ano Mera         | 1                                                       | 45                                            | 45                        | 32                  | 150     | 55                                     | 15 (N)  |
| <b>Tabloda kullanılan harfler ve işaretler:</b> |                  |                                                         |                                               | R: C + S + kireçtaşı tozu |                     |         |                                        |         |
| C: Yüksek dozlu uçucu kül (ASTM Sınıf C)        |                  |                                                         |                                               | S: Yüksek fırın cürufu    |                     |         |                                        |         |
| F: Düşük dozlu uçucu kül (ASTM Sınıf F)         |                  |                                                         |                                               | N: Doğal puzolan          |                     |         |                                        |         |
| M: Öğütülmüş bağlayıcı                          |                  |                                                         |                                               | -: Eksik bilgi            |                     |         |                                        |         |



Şekil 3.1. Türkiye’de iki SSB barajların görünümü (Soğut, 2014)

### 3.1. SSB Barajların Sınıflandırılması

İnşaatta kullanılan bağlayıcı madde miktarına göre SSB barajları üçe ayrılabilir (Sika, 2019):

- ❖ **Zayıf SSB barajlar** (*Lean RCC dams*): Bağlayıcı içeriği  $100 \text{ kg/m}^3$ ’ten daha azdır. Bunun yanında içindeki uçucu kül oranı %40’a kadar çıkabilmektedir. Genellikle tabaka kalınlığı 30 cm olmaktadır.
- ❖ **Normal dozda bağlayıcı içeren SSB barajlar** (*Medium paste RCC dams*): Bağlayıcı içeriği (çimento ve puzolan)  $100\text{-}149 \text{ kg/m}^3$  arasındadır.
- ❖ **Yüksek dozda bağlayıcı içeren SSB barajlar** (*High paste RCC dams*): Bağlayıcı içeriği  $150 \text{ kg/m}^3$ ’ten daha fazladır.
- ❖ **RCD baraj** (*Roller Compacted Dam-Silindirle Sıkıştırılmış Baraj, Japon Tekniği*) Katı dolgu baraj bu yöntem Japonya’da geliştirilmiştir ve daha çok dünyanın diğer yerlerinde kullanılanlardan farklıdır. Bağlayıcı içeriği  $120\text{-}130 \text{ kg/m}^3$  tür. Tabaka kalınlığı 50-100 cm arasında değişmektedir.

Bağlayıcı malzeme miktarına göre SSB barajların sınıflandırılması Tablo 3.3’te verilmiştir.

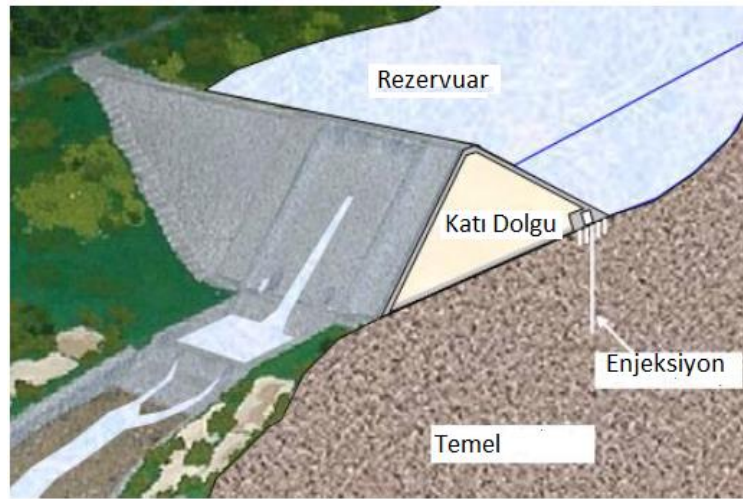
Tablo 3.3. SSB Barajların Sınıflandırılması (Sika, 2019)

| Sınıflandırma                         | Düşük bağlayıcıyı içeriği | RCD        | Normal dozda bağlayıcı içeriği | Yüksek dozda bağlayıcı içeriği |
|---------------------------------------|---------------------------|------------|--------------------------------|--------------------------------|
| Bağlayıcı içeriği ( $\text{kg/m}^3$ ) | $\leq 99$                 | 120 – 130  | 100 – 149                      | $\geq 150$                     |
| Katkı maddesi içeriği (%)             | 0 – 40                    | 20 – 35    | 20 – 60                        | 30 – 80                        |
| Katman kalınlığı (mm)                 | $\pm 300$                 | 750 – 1000 | $\pm 300$                      | $\pm 300$                      |
| Birleşim aralığı (m)                  | 30 – $\infty$             | 15         | 15 – 50                        | 20 – 75                        |

### 3.1.1. Katı Dolgu Baraj

Silindirle sıkıştırılmış beton barajların çok tercih edilen tip, simetrik yüzölçümlü katı dolgu barajıdır. Bu tip barajlar son yıllarda geliştirilmiştir. İlk olarak Londe ve Lino (1992) tarafından sunuldu ve daha sonra Stevens ve Lingard (2002) tarafından geliştirildi. Bu tipin ilk barajı 1997 yılında Yunanistan'ın Mikonos kentinde Ano Mera'da yapılmıştır. Yüksekliği 31 m olup su temini ve sulama amaçlı kullanılmaktadır. Bu tip baraj deprem şartların altında teorik olarak iyi davranış göstermektedir, 0.2g ivmelik bir depremde baraj gövdesinde herhangi bir çekme gerilmesinin oluşmadığı söylenmektedir. Ayrıca, bu tür barajlar tabanda artan genişliğin bir sonucu olarak zemine yol açan basınç gerilmeleri azaldığından yüksek ve düşük mukavemet özelliklerine sahip zeminlerde inşa edilebilir (Zafeiratos vd., 2019).

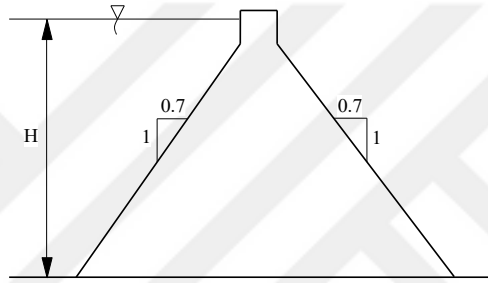
Klasik titreşimli beton (CVC) ile SSB arasındaki fark, katı dolgu malzemesinin daha az çimento içermesidir. Bazen  $100 \text{ kg/m}^3$ 'e ulaşabilen bu barajlarda  $50\text{-}80 \text{ kg/m}^3$  çimento kullanılmaktadır. Bu miktar, yapının talebine bağlıdır. Ayrıca, betonda kullanılan agregaların maksimum tane çapı 60-75 mm arasında olabilir. Malzemenin birim hacim ağırlığı  $21\text{-}23.5 \text{ kN/m}^3$ 'tür. Basınç mukavemeti 28 günde yaklaşık 4 MPa'dır ve 1 yıl sonra 7-10 MPa'a kadar ulaşabilir. Simetrik yüzölçümlü katı dolgu barajların tasarımı için 3.5 MPa değeri dikkate alınır. Çekme gerilmesindeki mukavemet, basınç mukavemetinin 1/10'a eşit olduğu tahmin edilmektedir, bu nedenle 0.3 MPa değeri kabul edilir (Zafeiratos vd., 2019). Bir katı dolgu baraja ait şematik görünüm Şekil 3.2'de verilmiştir.



Şekil 3.2. Katı dolgu barajların şematik görünümü (Peng ve Yuan, 2014)

Enkesiti Şekil 3.3'te verilen 0.7 yatay/1.0 düşey şevlere sahip bir simetrik yüzölçümlü katı dolgu barajın tabanındaki basınç mukavemeti, klasik beton ağırlık barajlara göre daha az olmaktadır. Yüksekliği 100 m olan bir simetrik yüzölçümlü katı dolgu barajın maksimum basınç mukavemeti 1.50

MPa'dan daha düşüktür. Kayma gerilmesi de çok düşüktür, kesinlikle kritik değerde olmamaktadır. Memba topuğunda 2.4 MPa yerine 1.4 MPa olmaktadır. Baraj gövdesinde çekme gerilmesi simetrik profilinden dolayı oluşmamaktadır. Farklı kaldırma basınçları için değişen  $\phi$  açısı klasik beton ağırlık barajlarda  $28^\circ$  ile  $43^\circ$  iken simetrik yüzlü katı dolgu barajlarda bu değer  $14^\circ$  ile  $22^\circ$  olmaktadır. 0.4 MPa'lık önemsiz çekme gerilmeleri olabilmektedir. Simetrik yüzlü katı dolgu baraj ile klasik beton ağırlık baraj arasındaki başka önemli bir fark da kayma gerilmeleridir. Klasik beton ağırlık barajlarda ortalama kayma gerilmesi 0.63 MPa iken katı dolgu barajlarda 0.36 MPa olmaktadır. Bu nedenle düşük mukavemetli kaya temeller kabul edilebilir. Bir kural olarak, simetrik yüzlü katı dolgu baraj 0.7 şevler ile bir klasik ağırlık barajdan emniyet açısından daha iyi olmaktadır (Londe ve Lino, 1992; Emiroğlu, 2012)



Şekil 3.3. Katı dolgu baraj (hardfill dam) tipik enkesiti (Emiroğlu, 2012)

Katı dolgu barajlarda, betonun geçirimli olacağından, SSB barajlarda olduğu gibi, geçirimsizliği sağlamak için tabakalar arasında harç kullanılmasına gerek yoktur. Buna karşı katı dolgu betonu ile inşa edilen barajlarda, barajın memba yüzünde yüksek kaliteli bir betonarme duvarı ya da plastik bir malzeme ile geçirimsizliği sağlanmış olmalıdır (Londe ve Lino, 1992; Çiçek, 2007)

### 3.2. Silindirle Sıkıştırılmış Beton Barajların Avantajları ve Dezavantajları

SSB baraj yapım yönteminin avantajları çoktur, ancak bazı dezavantajları da vardır, bunlar bazı özel saha koşulları ve tasarımlarına uygulanabilir olsa da uygun olduğu yerlerde tanınması ve dikkate alınması gerekmektedir. Söz konusu SSB barajların avantajları ve dezavantajları aşağıda sıralanmıştır (Sika, 2019; Aghabaglou vd., 2019):

#### a) Avantajları

- Hızlı inşaat: SSB kullanılmasıyla barajın inşaa süresi birkaç ay hatta yıllar kısalabilir.
- Düşük maliyet: Kaya dolgu barajlara göre %0-25 tasarruf, beton barajlara göre %25-40 tasarruf, çift eğrilikli beton barajlara göre %10-15 tasarruf, ancak toprak dolgu barajlara göre %0-20 daha fazladır.

- Dolusavak inşasında özellikle basamaklı dolusavaklar ile daha basit ve ekonomik çözümler.
- SSB barajlar, toprak ve kaya dolgu barajlara göre daha dar enkesit ve daha küçük hacme sahiptirler.
- Erozyona ve aşınmaya daha dayanıklıdır.
- SSB üretiminde atık malzemelerin değerlendirilmesi, örneğin uçucu kül, yüksek fırın cürufu vs.

#### **b) Dezavantajları**

- Uygun temelin seçimi
- İnşaat esnasında iyi bir zamanlama ve planlama
- Üretimde devam zorunluluğu
- Bağlayıcı malzemelerin (çimento, uçucu kül vs.) temini ve taşınmasında güçlük

### **3.3. SSB’de Kullanılan Malzemeler**

SSB’de kullanılan malzemeler, klasik betonda kullanılanlarla hemen hemen aynıdır. Bunlar, ince ve iri agregaları, suyu, bağlayıcı malzemeleri (çimento, puzolan) ve katkı maddeleri içerir (USBR, 2017).

#### **3.3.1. Bağlayıcı Malzemeler**

SSB barajlarda kullanılan bağlayıcı malzemeler genellikle portland çimentosu ve puzolanları içerir. Çimento tipi, betonun yerleştirilmesi metotlarına göre değil, yapının gereklerine uygun şekilde seçilir. Uçucu kül, düşük kireç veya yüksek kireç, yüksek fırın granüle cürufu, doğal veya üretilmiş puzolanlar karışımında kullanılmaktadır (Emiroğlu, 1998b).

Bağlayıcı malzemelerin seçimi, hidrasyon oranını ve mukavemet gelişimini önemli ölçüde etkiler. Puzolanların kullanımı SSB projeleri için oldukça yaygındır ve genellikle düşük maliyet ve düşük ısı üretimi sağlar. Bağlayıcı malzemelerin hacimce yüzde 80’ine varan puzolan içeriği birçok tasarım kuruluşu tarafından kullanılmıştır (USACE, 2000).

SSB için uygun çimentonun seçimini etkileyebilecek özel gereksinimleri arasında çimento tipi, hidrasyon ısısının sınırları, alkali içeriği ve beton için tasarım yaşı yer alır (USBR, 2017).

Beton uygulamasına bağlı olarak farklı çimento türleri Tablo 3.4’te listelenmiştir.

**Tablo 3.4.** Portland çimentosunun çeşitleri ve genel özellikleri (Al Baghdady ve Khan, 2018)

| Portland çimento tipi | Açıklama                               | Uygulama yeri                                                |
|-----------------------|----------------------------------------|--------------------------------------------------------------|
| Tip I                 | Normal                                 | Genel inşaat (çoğu bina, köprü, kaldırımlar, prekast vs.)    |
| Tip II                | Orta sülfat direnci                    | Toprağa veya sülfat iyonları içeren suya maruz kalan yapılar |
| Tip III               | Erken yüksek mukavemet                 | Hızlı inşaat, soğuk havada betonlama                         |
| Tip IV                | Düşük ısı hidratasyonu (yavaş tepkili) | Barajlar gibi büyük yapılar. (Günümüzde nadirdir.)           |
| Tip V                 | Yüksek sülfat direnci                  | Yüksek düzeyde sülfat iyonlarına maruz kalan yapılar.        |

SSB karışımında en yaygın olarak kullanılan çimento Tip II portland çimentosudur. Bu da erken yaşlarda düşük ısı üretme özellikleri ve daha uzun priz sürelerinden dolayı SSB’de daha yaygın olarak kullanılmaktadır. Tip III portland çimentosunun kullanımı, çoğu SSB uygulaması için pratik değildir çünkü sıkıştırma için mevcut süreyi kısaltır ve erken yaşlarda ısı oluşumunu artırır. Bazı çimentoların daha yavaş mukavemet gelişimi, genellikle belirli bir çimento içeriği için daha yüksek nihai mukavemet ile sonuçlanır (USACE, 2000).

Puzolan kullanılırken, çimento içeriğinin %70’ine kadar yerini alabilirler, bu SSB baraj karışımının ve tasarım konseptine bağlıdır. SSB karışımındaki çimento aşağıdaki nedenlerden dolayı kısmen SSB (Silindirle sıkıştırılmış barajlar ve Japon tekniği) tipte inşa edilen bazı barajların özellikleri puzolanlarla değiştirilebilir (Sika, 2019):

- Isı oluşumunu azaltmak için
- Maliyetleri düşürmek için
- İşlenebilirliği artırmak için
- Yerleştirme süresini artırmak için
- CO<sub>2</sub> emisyonlarını azaltmak için

ASTM C618 (2018)’e göre, puzolanlar Tablo 3.5’te gösterilen ve açıklanan üç kategoriye ayrılmıştır.

**Tablo 3.5.** ASTM C618 (2018)’e göre puzolanların sınıfları

| Sınıf | Açıklama                               |
|-------|----------------------------------------|
| N     | Ham veya kalsine edilmiş doğal puzolan |
| F     | Düşük kalsiyumlu uçucu kül             |
| C     | Yüksek kalsiyumlu uçucu kül            |

F sınıfı uçucu kül en yaygın olarak SSB için bir puzolan maddesi olarak kullanılır, ancak C Sınıf uçucu kül ve N Sınıf uçucu kül da başarıyla kullanılmıştır. Uçucu kül ucuzdur ve belirli dayanıklılık gereksinimlerinin karşılanması için de uygundur. Bunlar genellikle hidrasyon ısını azaltması ve maliyeti düşürmesi için kullanılır (Sika, 2019).

### 3.3.2. Agregalar

Agregalar, barajın kendi gövdesi için kazılan malzemelerden elde edilebilir veya nakliye maliyetlerini en aza indirmek için yerel olarak ayrı çakıl veya kaya ocaklarından sağlanır. Agregaların sınıflandırılması ve kalitesi hem taze hem de sertleşmiş SSB'nin ve diğer tüm beton çeşitlerinin özelliklerini önemli ölçüde etkileyebilir. Agreganın sınıflandırılması, karışımın işlenebilirliği, toplam boşluk oranını, sıkıştırma ve sağlamlaştırma kabiliyetini etkin bir şekilde etkiler. (USBR, 2017).

İri agregalar partiküllerinin çapları projeden projeye değişebilir, ancak genellikle çoğu SSB projelerinde 37.5 ve 75 mm arasında bir agregalar kullanılır. Çapı, 75 mm'den büyük iri agregalar pahalıdır ve segregasyonun kontrolü ile ilgili sorunlar yaratır. Yerleştirme katmanının kalınlığı her zaman iri dane çapının üç katından daha fazla (genellikle yaklaşık 300 mm) olmalıdır. Klasik betonunda kullanılan agregalar, SSB'de kullanılmıştır ve hem ince hem de iri agregalar için kalite kontrolü yapılmıştır. Bununla birlikte klasik betonunda, normal standartları ve gereksinimleri karşılamayan agregalar da SSB baraj yapımında başarıyla kullanılmıştır. (Sika, 2019).

SSB'de tavsiye edilen iri agregalar gradasyonu Tablo 3.6'da, ve ince agregalar gradasyon sınırları Tablo 3.7'de verilmiştir.

**Tablo 3.6.** İdeal iri agreganın sınıflandırılması (Sika, 2019)

| Elek çapı | Elekten yüzde geçen |            |            |
|-----------|---------------------|------------|------------|
|           | 4.75-75 mm          | 4.75-50 mm | 4.75-19 mm |
| 75 mm     | 100                 | --         | --         |
| 63 mm     | 88                  | --         | --         |
| 50 mm     | 76                  | 100        | --         |
| 37.5 mm   | 61                  | 81         | --         |
| 25.0 mm   | 44                  | 58         | --         |
| 19.0 mm   | 33                  | 44         | 100        |
| 12.5 mm   | 21                  | 28         | 63         |
| 9.5 mm    | 14                  | 18         | 41         |
| 4.75 mm   | --                  | --         | --         |

**Tablo 3.7.** İnce agrega sınıflandırılmasının sınırları (Sika, 2019)

| Elek çapı         | Elekten yüzde geçen |
|-------------------|---------------------|
| 9.5 mm            | 100                 |
| 4.75 mm           | 95-100              |
| 2.36 mm           | 75-95               |
| 1.18 mm           | 55-80               |
| 600 µm            | 35-60               |
| 300 µm            | 24-40               |
| 150 µm            | 12-28               |
| 75 µm             | 6-18                |
| İncelik katsayısı | 2.10-2.75           |

### 3.3.3. Karma Suyu

Klasik betonlarda kullanılan sular, SSB için de aynı ölçüde geçerlidir. Deneyimler, su kaynağının (yer altı suyu, yüzey suyu) SSB performansının üzerinde önemli ölçüde etki ettiğini göstermiştir. Priz ve dayanım geliştirme süreleri önemli ölçüde değiştirebilir. Bu nedenle karma suyu, çimento hidrasyon sürecini yavaşlatan veya hızlandıran bileşenler içermemelidir. Bunlar esas olarak (Sika, 2019):

- Yağ ve gres
- Klorür
- Sülfat
- Şeker
- Tuz

Yeraltı suyu, yağmur suyu, nehir suyu ve göl suyu gibi doğal olarak oluşan su normalde SSB karışımında kullanılması uygundur ancak yüksek klorür içeriği nedeniyle deniz suyu kullanılmamalıdır. SSB üretimi için içme suyu kalitesinde (içilebilir) su her zaman uygundur. Ek olarak, SSB'nin karışım sıcaklığını düşürmek için karışım suyunda kullanılan herhangi bir buz da bu gereksinimleri karşılayan sudan yapılmalıdır (Sika, 2019).

### 3.3.4. Katkı Maddeleri

SSB karışımında yaygın olarak kullanılan iki tür katkı maddeleri vardır: su azaltıcı katkılar ve hava sürükleyici katkılar. ASTM C494 (2018)'e göre katkı maddeler, SSB karışımının istenen özelliklerine bağlı olarak sekize ayrılmış ve Tablo 3.8'de verilmiştir.

**Tablo 3.8.** ASTM C494 (2018)'e göre katkı türleri

| Tip | Amaç                                               |
|-----|----------------------------------------------------|
| A   | Su azaltıcı katkılar                               |
| B   | Geciktirici katkılar                               |
| C   | Hızlandırıcı katkılar                              |
| D   | Su azaltıcı ve geciktirici katkılar                |
| E   | Su azaltıcı ve hızlandırıcı katkılar               |
| F   | Su azaltıcı, yüksek aralıklı katkılar              |
| G   | Su azaltıcı, yüksek menzil ve geciktirici katkılar |
| S   | Belirli performans katkıları                       |

En yaygın olarak kullanılan katkıların tipi D tipidir, bu da SSB'nin daha fazla işlenebilirliği ve daha uzun priz süreleri sağlar (ACI, 2011).

Hava sürükleyici katkılar, SSB ve klasik betonda homojen olarak küçük hava kabarcıkları oluşturmak için eklenir. Bu karışımın faydası, beton doyduğunda homojen bir şekilde dağılarak betonun donma-çözünme olaylarından korunmasını sağlar. Öte yandan SSB'de yaygın olarak kullanılmamaktadır, çünkü çökmesiz kıvamından dolayı uygun boyutta boşlukları yaratmak ve onu eşit olarak dağıtmak zordur. Ancak, eğer bu tür katkılar kullanılacaksa, tipik olarak 20 saniyeden daha kısa bir Vebe süresi gerekir (ACI, 2011).

### 3.4. SSB Mekanik Özellikleri

#### 3.4.1. Basınç Dayanımı

SSB'nin basınç dayanımını etkileyen faktörler su-bağlayıcı malzeme içeriği, agregalar ve sıkıştırma derecesidir. Tamamen sıkıştırılmış SSB için, su içeriğindeki azalma, basınç dayanımının artışına yol açar. Su içeriği Optimum seviyenin altındaki karışımlar boşluklara neden olur ve bu da daha zayıf bir basınç dayanımına yol açar. Klasik betona eşit bir basınç dayanımı elde etmek için, yüksek kaliteli agregalar kullanılmalıdır (USBR, 2017).

Yaygın olarak SSB karışımları, bir yıllık yaşta 6.9 MPa ile 27.6 MPa arasında değişen basınç dayanımı gösterir. Birçok SSB projelerinde, 90 gün ile 1 yıllık yaş aralığında 13.8 ile 20.7 MPa arasında ortalama basınç dayanımı gösteren karışımlar kullanılmıştır. SSB karışımları, sadece dayanıklılık sebeplerinden minimum 13.8 MPa dayanım için tasarlanabilir. Sismik alanlar için, gerekli olan daha yüksek çekme ve kayma mukavemetini elde etmek için genellikle daha yüksek tasarım basınç dayanımı gereklidir (USACE, 2000).

USBR (2018) tarafından elde edilen SSB Laboratuvar karışımlarının basınç dayanımı Tablo 3.9'da verilmiştir.

**Tablo 3.9.** SSB Laboratuvar karışımlarının basınç dayanımı (USBR, 2017)

| Projenin adı     | Ağırlıkça Su/Ç+P oranı | Basınç dayanımı (MPa) |           |           |          |
|------------------|------------------------|-----------------------|-----------|-----------|----------|
|                  |                        | 7 günlük              | 28 günlük | 90 günlük | 1 yıllık |
| Coolidge         | 0.7                    | 5.86                  | 10.06     | 17.03     | 25.64    |
| Coolidge         | 0.7                    | 6.13                  | 12.82     | 23.09     | 30.68    |
| Galesville       | 1.56                   |                       | 3.20      | 6.41      | -        |
| Milltown Hill    | 0.85                   | 2.55                  | 3.51      | 6.61      | 8.96     |
| Araştırma        | 1.3                    | -                     | 1.72      | 4.58      | 7.72     |
| Araştırma        | 0.55                   | -                     | 10.20     | 18.20     | 31.30    |
| Upper Stillwater | 0.47                   | 9.37                  | 14.68     | 24.2      | 35.99    |
| Upper Stillwater | 0.45                   | 5.30                  | 8.41      | 14.82     | 32.95    |
| Upper Stillwater | 0.43                   | 7.65                  | 11.16     | 19.09     | 34.19    |
| Ortalama         | 0.69                   | 6.13                  | 8.41      | 14.89     | 25.92    |

\*Ç: Çimento; P: Puzolan

### 3.4.2. Çekme Dayanımı

SSB'nin çekme dayanımı, bağlayıcı malzemelerin içeriği, agreganın dayanımı ve macunla yapıştırma özelliklerine, karışımın sıkıştırma derecesi ve tabaka yüzey durumuna ve işlemine bağlıdır. Klasik olarak yerleştirilmiş beton yapılarında olduğu gibi SSB'de de en zayıf noktalar, büzülme derzleridir. Bu nedenle, büzülme derzlerindeki çekme mukavemeti, SSB için kritik bir özellik taşıır (USACE, 2000).

Büzülme derzleri arasındaki çekme dayanımı test etmenin en uygun yolu, direkt çekme mukavemetinin testidir. Bu tip testin sonucu, büzülme derzlerinin olgunluğuna ve tabaka yüzeyinin hazırlanmasına bağlıdır. Eğer ana (derzsiz) SSB'nin çekme mukavemeti söz konusu ise, o zaman genellikle enine çekirdeklerin yarma (bölme) çekme mukavemeti testi kullanılır. Bu test, direkt çekme mukavemeti testiyle karşılaştırıldığında, gerçekleştirilmesi daha kolaydır, numunenin kuruması ve üzerinde mikro çatlaklardan fazla etkilenmez, dolayısıyla daha doğru sonuçlar verir. SSB derzlerindeki çekme dayanımı her zaman ana (derzsiz) betondakinden daha düşüktür (USACE, 2000).

### 3.4.3. Kayma Dayanımı

SSB'nin en önemli özelliklerinden biri, büzülme derzlerinin kohezyon ve içsel sürtünme arasındaki kayma dayanımıdır. Genel olarak aşağıda gösterilen Mohr denklemini kullanılarak gösterilir (USACE, 2000).

$$S = c + \sigma \tan \phi \quad (3.1)$$

S = Kayma dayanımı, c = Kohezyon,  $\sigma$  = Normal gerilme,  $\phi$  = Kayma Mukavemeti açısı

SSB'nin kayma mukavemetini belirlerken tipik olarak iki tür test gerçekleşir, ana kayma mukavemeti testi ve büzülme derzi kayma mukavemeti testi, Ana kayma mukavemeti testi, laboratuvarda yapılan silindir specimenlerle veya inşaatı bitmiş bir SSB barajında delinen çekirdeklerle gerçekleştirilir. SSB kayma dayanımı klasik betonun kayma dayanımına benzer. Bu testteki kohezyon, çimento miktarı, macunu ve yaşına göre değişirken, içsel sürtünme açısı ise agrega türünden etkilenir.

Büzülme derzi kayma mukavemeti testi genellikle tasarım için kritik kayma dayanımını belirler. Klasik betonun kayma dayanımı ile karşılaştırıldığında, SSB büzülme derzlerinin kayma dayanımı daha düşük olabilir (USACE, 2000).

#### 3.4.4. Elastisite Özellikleri

- Elastisite modülü (E): Betonun elastik özelliklerini etkileyen ana faktörler; yaş, agreganın tipi, su-çimento oranı veya çimento hamurunun kalitesidir. Betonun elastisite modülü, yaş ve içerdiği çimento miktarı ile orantılı bir şekilde artmaktadır. Bir günde betonun elastisite modülü yaklaşık 6.9 GPa'dır. 28 günde yaklaşık 21 ile 38 GPa ve bir yılda betonun elastisite modülü 30 ile 47 MPa arasında değişir. Düşük kaliteli agregalar SSB'de başarılı bir şekilde kullanılmış ve genellikle her yaşta çok düşük elastisite ile sonuçlanmıştır. Bu nedenle, SSB'nin elastisite modülü değerleri klasik betona göre daha küçüktür. Düşük mukavemetli karışımlar genellikle düşük elastisite modülü verir (USACE, 2000).
- Poisson oranı ( $\nu$ ): SSB için Poisson oranı klasik beton değerine benzer. Statik yükler için çoğu değer 0.17 ile 0.22 arasındadır. Tasarımlarda test yapılmadığı zaman 0.20 olarak alınabilir (USACE, 2000).

USBR (2018) tarafından elde edilen SSB Laboratuvar karışımlarının elastisite modülü ve poisson oranı Tablo 3.10'da verilmiştir.

**Tablo 3.10.** SSB Laboratuvar karışımlarının elastisite modülü ve poisson oranı (USBR, 2017)

| Proje adı        | Ağırlıkça Su/Ç+P oranı | Elastisite modülü (GPa) |           |           |          | Poisson oranı |           |           |          |
|------------------|------------------------|-------------------------|-----------|-----------|----------|---------------|-----------|-----------|----------|
|                  |                        | 7 günlük                | 28 günlük | 90 günlük | 1 yıllık | 7 günlük      | 28 günlük | 90 günlük | 1 yıllık |
| Coolidge         | 0.7                    | 13.23                   | 18.61     | 24.61     | 34.88    | 0.16          | 0.18      | 0.18      | 0.19     |
| Coolidge         | 0.7                    | 11.92                   | 19.02     | 17.02     | 29.99    | 0.12          | 0.16      | 0.19      | 0.17     |
| Galesville       | 1.56                   | -                       | -         | -         | -        | -             | -         | -         | -        |
| Milltown Hill    | 0.85                   | -                       | 5.92      | 9.58      | 13.99    | -             | 0.25      | 0.25      | 0.21     |
| Upper Stillwater | 0.47                   | -                       | 7.10      | 9.10      | 11.79    | -             | 0.13      | 0.14      | 0.17     |
| Upper Stillwater | 0.45                   | -                       | 5.65      | -         | 10.96    | -             | 0.13      | -         | 0.20     |
| Upper Stillwater | 0.43                   | -                       | 6.34      | -         | 12.13    | -             | 0.13      | -         | 0.18     |
| Ortalama         | 0.69                   | -                       | 10.27     | 17.58     | 18.96    | -             | 0.16      | 0.19      | 0.19     |

\*Ç: Çimento; P: Puzolan

### 3.4.5. Sünme

Sünme, sürekli yük nedeniyle betonun zamana bağlı deformasyonudur. Sünme, yük uygulamasından hemen sonra başlar ve yük olduğu sürece azalan bir oranda devam eder. Sünme, agrega ve betonun elastisite modülü ve betonun basınç dayanımından etkilenir. SSB'deki yüksek elastisite modülü ve yüksek dayanım, düşük sünmeye neden olurken, malzemenin düşük elastisite modülü ve düşük mukavemeti daha büyük sünme değerlerine yol açar (USACE, 2000).

Betonun sünümü, ASTM C 512'ye göre ölçülür. Testlerde kuruma büzülmesinin etkilerini önlemek için kapalı specimenler kullanılmıştır. Bu yöntem sünme davranışını uygun şekilde belirtmek için 2 gün ile bir yıl arasında beş yaş yükleme önerir. Sünme aşağıdaki formül ile gösterilir. İlk kısım,  $(\frac{1}{E})$ , elastik yer değiştirme yükünü temsil eder ve ikinci kısım ise, yük yüklendikten sonra sünmenin uzun vadeli etkilerini gösterir (USACE, 2000).

$$\epsilon = (\frac{1}{E}) + f(K) \ln(t+1) \quad (3.2)$$

Burada  $\epsilon$ , belirli sünmeyi veya çekme-yer değiştirmeyi temsil eder.  $E$ , statik elastisite modülü,  $f(K)$ , sünme ölçüsü ve " $t$ " ise, yük yüklendikten sonra gün olarak geçen zamandır (USACE, 2000).

### 3.4.6. Isıl Özellikler

Klasik beton ve silindire sıkıştırılmış beton ısı özellikleri genellikle benzer. Karışım oranlarının SSB ısı özellikleri üzerine etkisi, agreganın ısı özelliklerine ve toplam bağlayıcı malzemelerin içeriğine bağlıdır. Yüksek dozda bağlayıcı malzemelerin içerikleri kütle içinde oluşan hidrasyon ısını artırarak ve SSB soğuduğunda termal çatlamalara neden olmaktadır (Sika, 2019).

### 3.4.7. Geçirgenlik

SSB barajlarının yapım yöntemine bağlı olarak, yatay katmanlar arasında ve kayma ve çekme dayanımında bir azalmaya yol açan düşey büzülme derzleri veya çatlaklar yoluyla sızıntı meydana gelebilir. SSB'nin geçirgenliği sıkıştırma derecesi, yerleştirme yöntemi, karışım dozajı ve tabaka yüzeylerinde yatak harcı kullanımı ile kontrol edilebilir (USACE, 2000).

Beton barajlarda geçirgenlikle ilgili temel sızıntı, büzülme derzleri arasındaki sızıntıdır. Geçirimsizliği ve tabakalar arasında yeterli bağ sağlamak için yüksek bağlayıcı içerikli karışımlara ihtiyaç vardır. Düşük bağlayıcı içerikli karışımlar genellikle yeterli geçirimsizliği sağlamaz ve tabakalar arasında yatak harcı ile işlenmesi gerekir. ACI (2011) 'e göre, bir macun ve %18-22'lik ince agrega hacmi içeren SSB karışımları, genellikle klasik betona benzer şekilde geçirimsizliği sağlar.

### 3.4.8. Yoğunluk

Yoğunluğun tanımı, birim hacim başına düşen kütledir ve SSB yoğunluğu, sıkıştırma derecesine ve agreganın yoğunluğuna bağlıdır. Birçok SSB karışımlar, klasik betona göre daha az su ve yetersiz sürüklenmiş hava içerir, bu da klasik betonla kıyaslandığında biraz daha yüksek bir yoğunluğa yol açar. Klasik betonun yoğunluğu yaklaşık  $2400 \text{ kg/m}^3$ 'tür ve SSB için bu yoğunluğu %1-3 arasında daha fazla ( $2424\text{-}2472 \text{ kg/m}^3$ ) olabilir (USACE, 2000; Al Baghdady ve Khan, 2018).

### 3.4.9. Hacim Değişimi-Rötre

Betonun hacim değişimi, kuruma rötresi, otojen rötresi ve ısıl rötresi gibi farklı türlere ayrılır.

Kuruma rötresi, daha düşük bağıl nem ortamına maruz kaldığında betonun nem göçüne bağlı olarak sergilediği hacim azalması olarak tanımlanmaktadır. Kuruma rötresi, betonun su içeriğine ve betonda kullanılan agreganın özelliklerine bağlıdır. SSB'deki daha düşük su içeriği nedeniyle, kuruma rötresi klasik betona benzer veya daha düşüktür. Otojen rötre ile karşılaştırıldığında, kuruma rötresi daha uzun zamanda gerçekleşir (USACE, 2000).

Otojen rötre, betonun çevresiyle nem alışverişi olmaksızın sabit sıcaklıkta meydana gelen deformasyondur. Kimyasal rötre, hidrasyon geliştiğinde betonda nem kaybı veya nem kazanımı olmadan betonun iç kısmında hacim değişikliği meydana gelir. Otojen rötre, betonda kullanılan malzemelerin özelliklerine ve karışım oranlarına bağlıdır. Genel olarak, daha yüksek mukavemet özellikleri, daha yüksek otojen rötreye neden olabilir (Barcelo vd., 2005).

Isıl büzülme, hidrasyon işlemi betonun sıcaklığı çevre sıcaklığından daha yüksek bir sıcaklığa ulaşıldığında gerçekleşir. Sıcak beton çevre sıcaklığına soğumaya başladığında daralır ve hacim olarak küçülür (BASF, 2014).

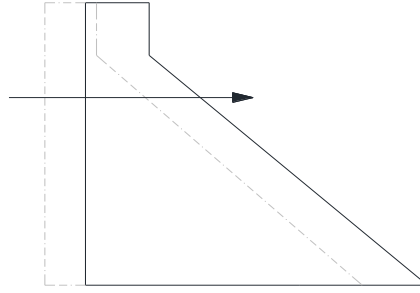
## 3.5. SSB Barajlarda Yapılan Tahkikler

### 3.5.1. Tasarım Kriterleri

SSB barajları tasarlanırken yerine getirilmesi gereken üç ana stabilite tahkikleri;

- ❖ **Kayma Tahkiki;** katman inşa yöntemi nedeniyle, barajın yatay düzlemleri arasında veya temel malzemesi ile baraj arasındaki bağlantıda kaçınılması gereken kayma meydana gelebilir (Hansen ve Reinhardt, 1991). Bir barajın kaymasına etki eden kuvvetler yatay kuvvetlerdir. Kaymaya karşı direnci ise kayma yüzeyindeki sürtünme kuvveti ve kesme kuvveti sağlar (Emiroğlu, 2012).

Barajın kaymasına karşı direnç gösteren taban sürtünme katsayıları Tablo 3.11'de verilmiştir. Şekil 3.4'te bir ağırlık barajın kayma yönü gösterilmektedir.



**Şekil 3.4.** Barajın kayma yönü

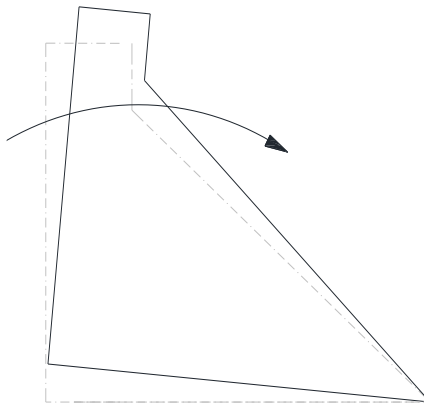
$$\text{Kaymaya karşı güvenlik faktörü} = \frac{\text{kaydırmaya karşı koruyucu kuvvetler toplamı}}{\text{Kaydırıcı kuvvetler toplamı}}$$

$$= \frac{(\text{taban sürtünme katsayısı})(\sum V - U)}{\sum H}$$

**Tablo 3.11.** Taban sürtünme katsayıları (Emiroğlu, 2012).

| Zemin cinsi             | İçsel sürtünme açısı | Taban sürtünme katsayısı |
|-------------------------|----------------------|--------------------------|
| <b>Kil</b>              | 11.30-16.70          | 0.20-0.30                |
| <b>Lem</b>              | 14.00-21.80          | 0.25-0.40                |
| <b>Kum</b>              | 21.80-26.56          | 0.40-0.50                |
| <b>İri kum ve çakıl</b> | 25.56-30.90          | 0.50-0.60                |

- ❖ **Devrilme Tahkiki;** Şekil 3.5'te görüldüğü gibi bir baraj, etki eden kuvvetlerin etkisiyle devrilebilir. Barajın devrilmemesi için barajın devrilme tahkikini yapılmaktadır (Emiroğlu, 2012).



**Şekil 3.5.** Barajın devrilmesi

$$\text{Dönmeye karşı güvenlik faktörü} = \frac{\text{Toplam koruyucu moment}}{\text{Toplam devirici moment}}$$

Dönmeye karşı güvenlik faktörü barajın emniyet durumuna bağlıdır. Eğer barajın yıkılması mal ve can kaybına neden olarsa bu değer 2.50-3.0 arasında veya daha fazla alınmaktadır. Eğer can kaybı söz konusu değilse ve barajın yıkılması halinde maddi kayıp az ise o zaman bu değer 1.25-1.50 arasında alınabilmektedir (Emiroğlu, 2012).

- ❖ **Gerilme Tahkiki;** Yatay düzlemde normal gerilmelerin membadan mansaba doğru doğrusal bir dağılım gösterdiği kabul edilerek yatay düzlemin uçlarındaki gerilmeler aşağıdaki formül ile hesaplanmaktadır (Emiroğlu, 2012).

$$\sigma = \frac{F}{A} \pm \frac{M_y X}{I_y} \pm \frac{M_x Y}{I_x} \quad (3.3)$$

F: düşey kuvvetlerin toplamı, A: Yatay kesit alanı, M: Moment, I, atalet momentini göstermektedir.

### 3.6. SSB Barajların İnşası

#### 3.6.1. Genel Değerlendirme

SSB'nin maliyet tasarrufu sağlayan özelliklerinden biri, SSB'nin yerleştirilebileceği ve konsolide edilebileceği hız oranıdır. Tipik üretim oranları, küçük bir SSB projesi için 35-150 m<sup>3</sup>/saat, orta büyüklükteki bir SSB projesi için 150-350 m<sup>3</sup>/saat ve büyük bir SSB yapısı için 350-750 m<sup>3</sup>/saat arasında değişebilir. Üretim hızı, birkaç sistemin eşzamanlı, düzenli çalışmanın: toplu üretim; malzeme harmanlama ve karıştırma, SSB nakliyesi, yerleştirilmesi, yayılması ve sıkıştırılması artı kalite kontrol testleri ve diğer ilgili operasyonların sonucudur. (Sika, 2019).

#### 3.6.2. Agregat Üretimi

SSB karışımlarında kullanılan agregalar, inşaat sahasında bulunabilir veya bir agregat üreticisinden taşınabilir. SSB barajın inşaatı için çalışmaya başlamadan önce agreganın stoklanması gerekir. SSB'nin yerleştirilmesi sırasında agreganın kullanım oranı, agregat üretim kapasitesini aşabilir, dolayısıyla büyük stoklara ihtiyaç vardır (ICOLD, 2003).

Agregat üretilirken, üretimin yapıldığı mevsim, soğuk veya ılık, agreganın stoklanması için kritik bir önem taşır. Agregat için yerleştirme sırasında belirli bir sıcaklık derecesi vardır, eğer hava sıcaklık derecesinin artışı bekleniyorsa, bu durumda stok sahasının üzerine su serpilerek buharlaştırmalı soğutma sağlanarak agregaların ön soğutması gerekebilir. Bununla birlikte, SSB karışımı karşıtıma sırasında agreganın nemini dikkate almak önemlidir. Genel olarak, eğer düşük

yerleştirme sıcaklıkları isteniyorsa, o zaman en iyi seçenek, agreganın kış mevsiminde stoklanmasıdır (USBR, 2017).

### 3.6.3. Harmanlama ve Karıştırma

SSB tipik olarak üç yollardan, eğimli tamburlu mikserler, transmikserler ve yatay milli mikserler ile harmanlanır ve karıştırılır. SSB için gerekli karıştırma süresi, harman boyutu, karışımın derecelendirilmesi, su/(çimento+Puzolan) oranı ve kullanılan karıştırma ekipman türüne bağlıdır. SSB için önerilen karıştırma süreleri Tablo 3.12’de verilmiştir. SSB’nin çok kuru kıvamı nedeniyle, transmikserler ve eğimli tamburlu mikserler için karıştırılmış malzemenin hacmi, çoğu zaman imalatçının klasik betonu için mikserin nominal kapasitesinden daha azdır (PCA, 2006).

Daha büyük SSB kaplama projeleri için, yatay milli mikserler en yaygın şekilde kullanılır çünkü bunlar, şantiyeye kolayca taşınır ve kurulur, nispeten büyük miktar malzeme üretebilir ve mükemmel karıştırma verimliliği sağlar. Daha küçük projeler için, eğimli tamburlu mikserler, transmikserler ve mobil kamyon mikserleri yeterlidir. SSB karışımını üreten merkezi karıştırma tesisi, taşıma süresini en aza indirmek için yapıya mümkün olduğunca yakın yerleştirilmelidir (PCA, 2006).

**Tablo 3.12.** SSB için önerilen karıştırma süreleri (PCA, 2006).

| Mikser tipi            | Karıştırma süresi |
|------------------------|-------------------|
| Transmikser            | 4 ile 5 dakika    |
| Eğimli tamburlu mikser | 2 ile 4 dakika    |
| Yatay milli mikser     | 20 ile 60 saniye  |
| Mobil kamyon mikser    | Sürekli           |
| Yatay sürekli akış     | Sürekli           |

### 3.6.4. Taşıma

Uygun bir taşıma sisteminin seçimi, projenin bütünleyici bir parçasıdır, malzemelerin döküm yerine taşınması SSB tabaka veya katman yüzeylerinin kalitesini önemli ölçüde etkileyebilir. SSB taşınmasının iki ana yöntemleri, konveyör ve nakliye araçlarıdır. Kovalarla taşıma, üretim oranını yavaşlatır ve segregasyona neden olma olasılığı daha yüksektir. Genel olarak, yüksek kaliteli bir SSB katman yüzeyine sahip olmanın en iyi yolu, konveyörlü bir taşıma sistemi kullanmaktır. Konveyör ve araç kombine sistemi de birçok projede etkili olmuştur. Şekil 3.6’da bir SSB’nin taşıma sistemi görülmektedir (Sika, 2019).

SSB'yi taşımak ve iletmek için kullanılan ekipman, segregasyonu en aza indirmeli, işlenebilirliği azaltmamalı veya tabaka yüzeylerini kirletmemeli ve tesisten çıkan SSB 15 dakika içinde döküm yerine iletilmelidir. Daha kuru kıvamlı karışımlarla SSB nakliyesi sırasında ciddi ayrışma meydana gelebilir, bu nedenle daha ıslak kıvamlı karışımlarla tasarlanması önerilir (Sika, 2019).



**Şekil 3.6.** SSB'yi baraj alanına kamyonla ve kombine sistemiyle (konveyör-kamyon) taşınması (Sika, 2019)

### 3.6.5. Yayma ve Yerleştirme

SSB yaymasının en yaygın yöntemi dozer ile yaymasıdır. Eğim kontrolü için lazerle gözlenen veya lazer kontrollü sistemler, Upper Stillwater Barajı ve diğer birçok projede başarıyla kullanılmıştır. SSB'nin taşınması, serilmesi, yayılması ve karışım suyunun bağlayıcı malzemesiyle temas etmesinden sonra 45 dakika içinde veya karışım tasarımı, beklenen sıcaklık, nem, rüzgâr ve güneşe maruz kalmaya dayalı olarak inşaattan önce belirtildiği şekilde sıkıştırılır. Eğer yayılma sırasında ayrışma meydana gelirse, ayrılmış agregalar sıkıştırılmadan önce yayılmış yüzeyin üstünden kaldırılır veya geri küreklenir. Bir SSB yayması ve yerleştirilmesi Şekil 3.7'de görülmektedir. (USBR, 2017).



**Şekil 3.7.** Yayılma, sıkıştırma ve dağıtım sistemlerini gösteren SSB yerleştirilmesi (USBR, 2017)

### 3.6.6. Sıkıştırma

Sıkıştırma işleminde kullanılan ana ekipmanlar, çelik vibratörlü silindirlerdir. Sıkıştırma, 7 ton/m dinamik yüke sahip 10-12 ton arasında vibratörlü tek kasnaklı silindirler kullanılmıştır. SSB için taze betonun kıvamı “çökmesiz” olarak kabul edilmesine rağmen, SSB barajlarının Vebe süresi 20 saniyeden 8-12 saniyeye düşmüştür (Broucek ve Satrapa, 2020).

Tabakalar, Şekil 3.8’de görüldüğü gibi teker katmanlar halinde sıkıştırılabilir veya tek bir tabaka olarak sıkıştırılmadan önce birkaç katman yayılıp daha sonra sıkıştırılabilir (RCD barajlarında olduğu gibi). Test sırasında gerekli sayıda pas (silindirle gidiş geliş) doğrulanmalıdır. Deneyimler, 150-300 mm kalınlığındaki SSB tabakaları için istenen yoğunluğu elde etmek için dört ile sekiz arasında silindir geçişinin yeterli olduğunu göstermektedir (Sika, 2019).

SSB, malzemesi yayıldıktan sonra mümkün olan en kısa sürede sıkıştırılmalıdır. Şartnameler genellikle SSB yayıldıktan sonra 15 dakika ve karıştırdıktan sonra 45 dakika içinde sıkıştırmayı gerektirir. (USBR, 2017).



Şekil 3.8. SSB sıkıştırma (Shaw, 2010)

### 3.6.7. Tabakalar Arasındaki Bağ

Normal, beklenmedik ve ekstrem yükleme koşullarında, gerekli güvenlik faktörünün yerine getirilmesi için hem SSB hem de klasik beton barajlarında tabakalar arasındaki bağın korunması önemlidir. Tabakalar arasında yeterli bağ elde etmek için aşağıdaki koşulların yerine getirilmesi gerekir (USBR, 2017):

1. SSB karışımların, yeterli macuna, harç miktarına ve işlenebilirliğe sahip olması
2. Yerleştirme sırasında segregasyonun (ayrışma) kontrol edilmesi

3. Titreşimli silindir ile yeterli sıkıştırmanın elde edilmesi
4. Tabaka yüzeylerinin iyice temizlenmesi
5. SSB tabakaların arasına yapıştırıcı bir harç veya beton tabakasının yerleştirilmesi
6. SSB'yi hızlıca yerleştirmek, tabakaların yerleştirme süresinin kısaltılması.

Tabakalar arasındaki bağı etkileyebilecek temel faktörler arasında tabakaların yerleştirme süresi, karışım tasarımı, yüzey hazırlığı, hava koşulları ve yatak harcı kullanımı sayılabilir. Yerleştirme süresini azaltmak ve tabakalar arasında bağı elde etmek için günde üç tabakaya kadar yerleştirme yapılabilir (USBR, 2017).

### 3.6.8. Sertleştirilmiş SSB Üzerinde Yatak Karışımları

Yatak karışımları SSB katmanlarının yüzeyindeki bağı iyileştirmek ve birleşimlerin kayma ve çekme mukavemetlerini iyileştirmek için tasarlanır. Düşük bağlayıcılı ve orta bağlayıcılı SSB barajlar için, bir yatak karışımının kullanılması, kabul edilebilir bağ özelliklerini elde etmek için önemli bir faktördür. Yatak karışımları her zaman aşağıdaki alanlarda kullanılır (Sika, 2019):

- Su geçirmezliği sağlamak için her bir büzülme derzinin memba yüzeyinde.
- Tabakalar arasında daha yüksek bir bağ mukavemetinin gerekli olduğu barajlarda (sismik bölgelerde).
- Büyük temeller, baraj yüzleri ve batardo gibi diğer alanlarda
- Soğuk derz durumundan kaçınılmadığında

İki çeşit SSB yataklama karışımları vardır: yataklama harcı ve yataklama betonu (arasındaki fark, Tablo 3.13'te verilmiştir). Yatak karışımının uygulanması, SSB'nin yerleştirilmesinden 10-15 dakika önce serilmelidir. Yatak karışımının serilmesi ile SSB'nin yerleştirilmesi arasındaki süre, sıcak havalarda kısaltılmalı ve soğuk havalarda uzayabilir (Sika, 2019).

Bir SSB üzerinde yatak harcının serilmesi ve yayılması, Şekil 3.9'de görülmektedir.

**Tablo 3.13.** Yatak harcı ile yatak betonu arasındaki farklar (Sika, 2019).

| Kriterler                                       | Yatak harcı                                                                | Yatak betonu                                                                |
|-------------------------------------------------|----------------------------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------|
| Maks agreg aapı                                 | <5 mm                                                                      | > 5 mm                                                                      |
| Yatak kalınlığı                                 | ~ 10 mm                                                                    | 75 mm'ye kadar                                                              |
| 1996'de Yatak karışımları kullanan SSB barajlar | %77                                                                        | %23                                                                         |
| Kalınlık                                        | Kalınlığı ~ 10 mm olduğundan üst üste bindirilmiş SSB'yi sıkıştırmak kolay | Yana doğru sıkma etkisi nedeniyle üst üste binen SSB'yi sıkıştırmada zorluk |
| Potansiyel ısı üretimi                          | Düşük ısı üretimi                                                          | Daha kalın bir yatak tabakası ile daha fazla ısı üretilir                   |
| Kayma dayanımı                                  | Daha düşük kayma dayanımı                                                  | Daha yüksek kayma dayanımı                                                  |
| Maliyet                                         | Daha düşük maliyet                                                         | Daha yüksek maliyet                                                         |



Şekil 3.9. Yatak harcının serilmesi ve yayılması (Sika, 2019)

### 3.6.9. Memba ve Mansap Yüzeylerin Tasarımı ve Sızma Kontrolü

Memba ve mansap yüzey kaplama amacı, SSB tabakalar arasındaki büzülme derzlerinden su sızıntısını kontrol etmek, donmaya ve çözölmeye dirençli bir yüzey elde etmek ve dolusavak akışlarına karşı dayanıklı bir yüzey sağlamaktır (ACI, 2011).

Barajın memba yüzü, çeşitli yöntemler kullanılarak tasarlanabilir. En yaygın yöntemleri ise, geçici kalıp ve klasik kaplama betonu ile oluşturulan düşey yüzler, içten titreşimli harçla zenginleştirilmiş SSB (GERCC) ve prekast beton panelleri kullanılarak yerinde yapılan yüzlerdir (ACI, 2011).

Barajın mansap yüzü de birçok yöntemler kullanılarak tasarlanabilir. En yaygın yöntemler ise, şekillendirilmiş basamaklı merdiven klasik beton yüzü ve şekillendirilmemiş (doğal) SSB yüzüdür (ACI, 2011).

### 3.6.10. Büzölme Derzleri ve Çatlak Kontrolü

Termal hacim değişikliğinden kaynaklanan çatlamayı önlemek için büzölme derzleri kullanılır. Büzölme derzlerin oluşturması için çatlak indükleyici bir levha kullanılır. Önce SSB, büzölme derzlerinin hizasına kadar yayılır, ardından levhayı dik olarak tutabilmesi için bir miktar dış kuvvet ile levha, dikey olarak derz yerinde yerleştirilir. Sonra, Dikey levhanın her iki tarafına el malzemeleriyle SSB yayılır. Dikey levhaların etrafında, daha sonra kaldırılacak bağ kırıcı görevi gören bir plastiğin kullanılması yaygındır. Büzölme derzi oluşturmanın başka bir yöntemi ise, Şekil 3.10'de görüldüğü gibi, kazı makinesinin koluna bağlı kepçe, kazıcı (*Backhoe*) ile adlandırılan dikey bir levha ile büzölme derzlerin oluşturulmasıdır. Galvanizli çelik levhaları, sıkıştırılmış

tabakalarda önceden belirtilmiş yerlerde titreştirilerek monte edilir ve bunlar SSB'de bırakıldıkları için bağ kırıcı görevi görür (USBR, 2017).



**Şekil 3.10.** Pueblo Barajı'nda çatlak indükleyicili bir bağlantı oluşturmak için galvanizli çelik sac levhasının montajı (USBR, 2017)

### 3.6.11. Galeri ve Su Tutucu

Baraj davranışının incelenmesi, temelde drenaj ve enjeksiyon deliklerinin açılması ve sızma dreninde kullanılan yerlerinin oluşturulabilmesi için yüksekliği 30 m'yi geçen barajlarda galerilerin bulunması gerekir. Galerilerin baraj inşaatına engel olmayacak şekilde yerleştirilmesi önemlidir. Galerilerin tasarlanması için birçok inşaat yöntemleri kullanılmıştır, örneğin, klasik betonu kullanılarak veya kullanılmadan klasik şekillendirme yöntemi ya da galeri alanından dolgu malzemesinin kazılması (ACI, 2011).

### 3.6.12. Dolusavaklar

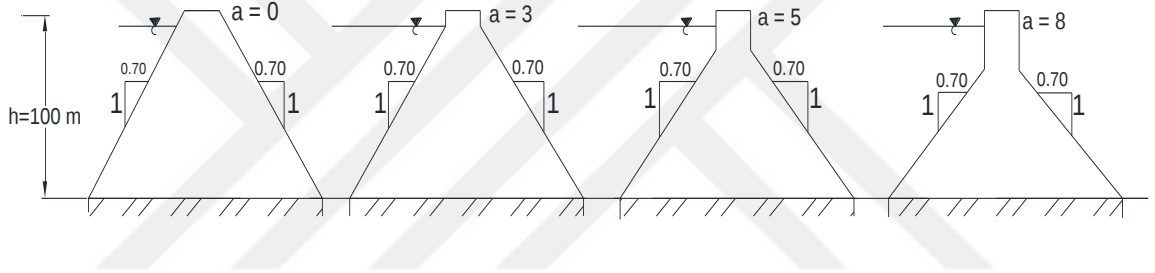
Klasik beton barajlar için kullanılan dolusavakların tasarımı SSB barajlar için de geçerlidir. SSB barajlarda yapılan 4 çeşit dolusavaklar yapılmaktadır. Bunlar; doğal şevli SSB dolusavaklar, basamaklandırılmış SSB dolusavaklar, basamaklandırılmış klasik beton dolusavaklar ve şevli klasik beton dolusavaklardır. SSB barajların inşasında basamaklandırılmış klasik beton dolusavakların kullanılması yaygındır. Bunlar, SSB barajları tamamlandıktan sonra, ya da SSB barajların inşaat esnasında tabakalar halinde inşa edilebilir (USACE, 2000).

## 4. KATI DOLGU BARAJLARIN STATİK ANALİZİ

Bu çalışmada, sonlu eleman ağ sistemi kullanılarak, katı dolgu barajların lineer elastik statik analizleri elde edilmiştir. Çözümler için SAP2000 paket programı kullanılmıştır. Baraj gövdesi normal ve barajın üst kısmındaki gövde elemanı sık ve normal sonlu elemanlarla modellenmesi için iki boyutlu düzlem şekil değiştirme özelliğine sahip dörtgen elemanlar kullanılmıştır.

### 4.1. Statik Stabilité Analizi

Barajın yüksekliği sabit 100 m, şev eğimi 0.7 yatay/1.0 düşey ve baraj temeli sağlam kaya olarak dikkate alınmıştır. Bu çalışmada dikkate alınan katı dolgu baraj enkesitleri Şekil 4.1’de verilmiştir.



Şekil 4.1. Bu çalışmada dikkate alınan SSB baraj tipleri

Katı dolgu baraj bir ağırlık baraj türüdür. Ağırlık barajlarda devrilme, kayma ve gerilme tahkikleri yapılmaktadır. Bu çalışma kapsamında Şekil 4.1’de verilen enkesitler için devrilme, kayma ve gerilme tahkikleri yapılmıştır. Elde edilen bulgular Tablo 4.1’de verilmiştir.

Tablo 4.1. Kayma ve devrilmeye karşı güvenlik faktörleri

| Barajın gövde yüksekliği<br>(m) | Barajın üst bloğunun yüksekliği<br>(a)<br>(m) | Kaymaya karşı güvenlik faktörü | Devrilmeye karşı güvenlik faktörü | Baraj topuğundaki maksimum gerilmeler (kPa) | Baraj topuğundaki minimum gerilmeler (kPa) |
|---------------------------------|-----------------------------------------------|--------------------------------|-----------------------------------|---------------------------------------------|--------------------------------------------|
| 100                             | 0                                             | 2.77                           | 3.09                              | 1436.74                                     | 920.67                                     |
| 97                              | 3                                             | 2.63                           | 2.99                              | 1421.92                                     | 881.80                                     |
| 95                              | 5                                             | 2.54                           | 2.93                              | 1417.86                                     | 850.50                                     |
| 92                              | 8                                             | 2.40                           | 2.83                              | 1414.10                                     | 801.42                                     |

Barajın kaymaya ve devrilmeye karşı güvenlik faktörü değerlerine bakılarak, baraj üst bloğun tüm yükseklikler boyunca kaymaya karşı güvenlik faktörü 2.0 üzere ve devrilmeye karşı güvenlik faktörü 2.5 ile 3.0 arasında veya daha fazladır. Aynı şekilde baraj topuğundaki gerilme değerlerine bakılarak, baraj üst bloğun tüm yükseklikler boyunca minimum gerilme değerleri sıfırdan büyüktür. Böylece, seçilen baraj enkesitleri için yapılan tahkikler sonucunda barajın emniyetli olduğu sonucuna varılmıştır.

Analizler sonucunda asal gerilmeler ve yatay-düşey gerilmeler elde edilir. Çekme gerilmeleri kütle çekme dayanımı ile ve yatay düşey gerilmeleri de derz çekme dayanımı ile karşılaştırılır. SSB (RCC) barajlarda şev eğimleri için düşük çimento gövde kesitleri C8, C10, C12 olarak seçilmektedir. SSB çekme mukavemetinin değerini bulmak için Tablo 4.2 ve 4.3 kullanılmaktadır.

$$f_{ck} = 10 \text{ MPa}$$

$$E = 4733 \times \sqrt{f_{ck}}$$

$$E = 4733 \times \sqrt{10} \text{ 'dan } E = 14967.06 \text{ GPa olur.}$$

Burada  $f_{ck}$  = Beton karakteristik basınç dayanımı ve  $E$  = Elastisite modülünü gösterir.

**Tablo 4.2.** SSB, uygun kıvam  $\leq 30$  saniye vebe titreşimi için mukavemet değerleri (Cannon, 1995)

|                      | Düzleme harcı durumu |          | Bölme çekme mukavemeti |                       |                 | Büzülme derzi tasarım çekme mukavemeti |                       |
|----------------------|----------------------|----------|------------------------|-----------------------|-----------------|----------------------------------------|-----------------------|
| Maksimum dane çapı   | E<br>H               | Maks/Min | $\leq 24.1$<br>MPa     | $>24.1$<br>MPa        | Çevirme faktörü | $\leq 24.1$<br>MPa                     | $>24.1$<br>MPa        |
| $\leq 75 \text{ mm}$ | -                    | Maksimum | $0.17 f_c'$            | $0.7055 (f_c')^{1/2}$ | 0.53            | $0.090 f_c'$                           | $0.3735 (f_c')^{1/2}$ |
|                      | -                    | Minimum  | $0.08 f_c'$            | $0.4565 (f_c')^{1/2}$ | 0.53            | $0.040 f_c'$                           | $0.2407 (f_c')^{1/2}$ |
| $> 75 \text{ mm}$    | E                    | Maksimum | $0.17 f_c'$            | $0.7055 (f_c')^{1/2}$ | 0.47            | $0.080 f_c'$                           | $0.3320 (f_c')^{1/2}$ |
|                      | E                    | Minimum  | $0.08 f_c'$            | $0.4565 (f_c')^{1/2}$ | 0.47            | $0.040 f_c'$                           | $0.2158 (f_c')^{1/2}$ |

**Tablo 4.3.** SSB, uygun kıvam  $> 30$  saniye vebe titreşimi için mukavemet değerleri (Cannon, 1995)

|                      | Düzleme harcı durumu |          | Bölme çekme mukavemeti |                       |                 | Büzülme derzi tasarım çekme mukavemeti |                       |
|----------------------|----------------------|----------|------------------------|-----------------------|-----------------|----------------------------------------|-----------------------|
| Maksimum dane çapı   | E<br>H               | Maks/Min | $\leq 24.1$<br>MPa     | $>24.1$<br>MPa        | Çevirme faktörü | $\leq 24.1$<br>MPa                     | $>24.1$<br>MPa        |
| $\leq 75 \text{ mm}$ | E                    | Maksimum | $0.17 f_c'$            | $0.7055 (f_c')^{1/2}$ | 0.35            | $0.060 f_c'$                           | $0.2490 (f_c')^{1/2}$ |
|                      | -                    | Minimum  | $0.08 f_c'$            | $0.4565 (f_c')^{1/2}$ | 0.35            | $0.030 f_c'$                           | $0.1577 (f_c')^{1/2}$ |
| $> 75 \text{ mm}$    | E                    | Maksimum | $0.17 f_c'$            | $0.7055 (f_c')^{1/2}$ | 0.32            | $0.055 f_c'$                           | $0.2241 (f_c')^{1/2}$ |
|                      | -                    | Minimum  | $0.08 f_c'$            | $0.4565 (f_c')^{1/2}$ | 0.32            | $0.025 f_c'$                           | $0.1411 (f_c')^{1/2}$ |
| $\leq 75 \text{ mm}$ | H                    | Maksimum | $0.17 f_c'$            | $0.7055 (f_c')^{1/2}$ | 0.18            | $0.030 f_c'$                           | $0.1245 (f_c')^{1/2}$ |
|                      | -                    | Minimum  | $0.08 f_c'$            | $0.4565 (f_c')^{1/2}$ | 0.18            | $0.015 f_c'$                           | $0.0830 (f_c')^{1/2}$ |
| $> 75 \text{ mm}$    | H                    | Maksimum | $0.17 f_c'$            | $0.7055 (f_c')^{1/2}$ | 0.16            | $0.025 f_c'$                           | $0.1162 (f_c')^{1/2}$ |
|                      |                      | Minimum  | $0.08 f_c'$            | $0.4565 (f_c')^{1/2}$ | 0.16            | $0.015 f_c'$                           | $0.0747 (f_c')^{1/2}$ |

1. Kontrol;

$$0.06f_{ck} < \text{k t le  ekme dayanımı} < 0.13f_{ck}$$

2. Kontrol;

$$0.04f_{ck} < \text{derz çekme dayanımı} < 0.09f_{ck}$$

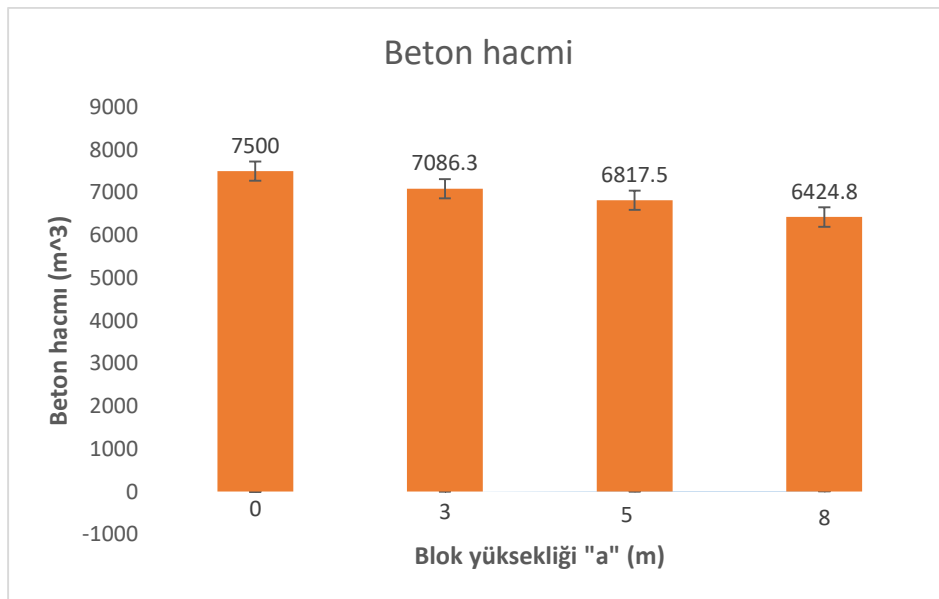
$$0.60 \text{ MPa} < \text{k t le çekme dayanımı} < 1.30 \text{ MPa}$$

$$0.40 \text{ MPa} < \text{derz çekme dayanımı} < 0.90 \text{ MPa}$$

**Tablo 4.4.** Barajda birim metreye d ş en toplam beton hacmi

| H <sub>b</sub><br>(m) |  st bloğun yüksekliği (a)<br>(m) | Beton hacmi<br>(m <sup>3</sup> ) | De i im<br>(%) |
|-----------------------|----------------------------------|----------------------------------|----------------|
| 100                   | 0                                | 7500                             | 0              |
| 100                   | 3                                | 7086.3                           | -5.51          |
| 100                   | 5                                | 6817.5                           | -9.10          |
| 100                   | 8                                | 6424.8                           | -14.34         |

Tablo 4.4'e göre baraj üst bloğunun  $a= 3, 5, 8$  m olması durumunda bloksuz (yani  $a=0$ ) baraja göre %5.51, %9.10, %14.34 daha az beton kullanılmaktadır. Barajda birim metreye d  en toplam beton hacmi  ekil 4.2'de gösterilmektedir.



**Şekil 4.2.** Barajda birim metreye d  en toplam beton hacmi

## 4.2. Lineer Elastik Statik Analizi

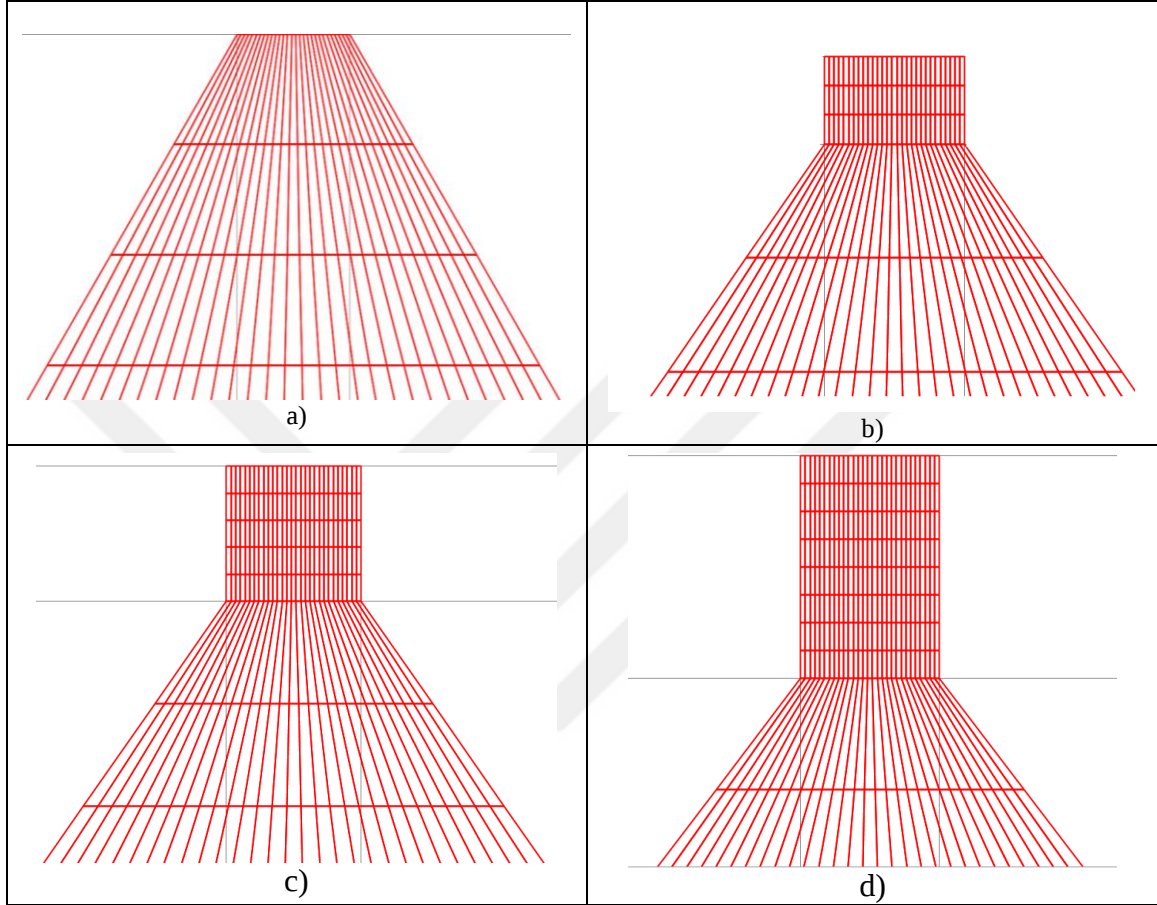
Katı dolgu barajların üst kısmındaki bloğunda meydana gelen kırılmaların incelenmesi için hem memba hem de mansap yüzeyi simetrik olan tipik bir katı dolgu barajı seçilmiştir. Çözümlerde baraj yüksekliği 100 m, şev eğimi 0.7y/1.0d sabit tutulup barajın üst kısmındaki bloğun yüksekliği 0, 3, 5 ve 8 m olarak seçilmiştir. Temel rijit (kaya) olarak seçilip herhangi bir modelleme yapılmamıştır. Bu çalışmada, katı dolgu baraj üst bloğunun statik analizini yapmak amaçlanmıştır. Rezervuar ortamının doluluk oranı için, rezervuar tam dolu olarak alınmıştır. Hava payı 3 m alınmıştır. Hidrostatik yükler barajın memba yüzeyine düğüm noktalarında tekil yük olarak etki ettirmiştir.

Baraj üst bloğun 1 m sonlu eleman ağ sistemi durumunda, baraj yüksekliği 100 m olup herhangi bir bloğun olmaması durumunda 780 düğüm noktası ve 725 iki boyutlu dörtgen izoparametrik düzlem şekil değiştirme elemanı kullanılmıştır. Baraj yüksekliği 100 m olup üst bloğun yüksekliği 3 m olması durumunda 870 düğüm noktası ve 812 iki boyutlu dörtgen izoparametrik düzlem şekil değiştirme elemanı kullanılmıştır. Baraj yüksekliği 100 m olup üst bloğun yüksekliği 5 m olması durumunda 930 düğüm noktası ve 870 iki boyutlu dörtgen izoparametrik düzlem şekil değiştirme elemanı kullanılmıştır. Baraj yüksekliği 100 m olup üst bloğun yüksekliği 8 m olması durumunda 960 düğüm noktası ve 899 iki boyutlu dörtgen izoparametrik düzlem şekil değiştirme elemanı kullanılmıştır.

Baraj üst bloğun 0.5 m sonlu eleman ağ sistemi durumunda, baraj yüksekliği 100 m olup herhangi bir bloğun olmaması durumunda 780 düğüm noktası ve 725 iki boyutlu dörtgen izoparametrik düzlem şekil değiştirme elemanı kullanılmıştır. Baraj yüksekliği 100 m olup üst bloğun yüksekliği 3 m olması durumunda 960 düğüm noktası ve 899 iki boyutlu dörtgen izoparametrik düzlem şekil değiştirme elemanı kullanılmıştır. Baraj yüksekliği 100 m olup üst bloğun yüksekliği 5 m olması durumunda 1080 düğüm noktası ve 1015 iki boyutlu dörtgen izoparametrik düzlem şekil değiştirme elemanı kullanılmıştır. Baraj yüksekliği 100 m olup üst bloğun yüksekliği 8 m olması durumunda 1200 düğüm noktası ve 1131 iki boyutlu dörtgen izoparametrik düzlem şekil değiştirme elemanı kullanılmıştır.

Baraj üst bloğun normal sonlu eleman ağ sistemi durumunda, baraj yüksekliği 100 m olup herhangi bir bloğun olmaması durumunda 780 düğüm noktası ve 725 iki boyutlu dörtgen izoparametrik düzlem şekil değiştirme elemanı kullanılmıştır. Baraj yüksekliği 100 m olup üst bloğun yüksekliği 3 m olması durumunda 810 düğüm noktası ve 754 iki boyutlu dörtgen izoparametrik düzlem şekil değiştirme elemanı kullanılmıştır. Baraj yüksekliği 100 m olup üst bloğun yüksekliği 5 m olması durumunda 810 düğüm noktası ve 754 iki boyutlu dörtgen izoparametrik düzlem şekil değiştirme elemanı kullanılmıştır. Baraj yüksekliği 100 m olup üst bloğun yüksekliği 8 m olması durumunda 780 düğüm noktası ve 725 iki boyutlu dörtgen izoparametrik düzlem şekil değiştirme elemanı kullanılmıştır.

Barajın memba ve mansap şev eğimleri sabit (0.7y/1.0d) olarak seçilmiştir. Barajın kret genişliği ise tüm baraj ağ sisteminde 5 m olarak alınmıştır. Barajın üst kısmındaki bloğun sonlu eleman ağ sistemi şekil 4.3'te görülmektedir.



**Şekil 4.3.** Katı dolgu barajın üst bloğunun farklı yükseklikleri için sık sonlu eleman ağ sistemi kullanılarak sonlu elemanlar modelleri: (a) 0, (b) 3, (c) 5, ve (d) 8 m olması durumları

Bu çalışmalar rijit (sağlam kaya) temel üzerinde inşa edilmiş katı dolgu barajların statik yükler altında lineer elastik davranışları incelenmiştir. Aynı şekilde katı dolgu barajların üst başlığının olup olmaması veya hangi yükseklikte daha uygun olduğunu ve başlık varken gövdede beton hacminden ne kadar betonun kâr edeceğini araştırılmıştır. Çözümler her bir katı dolgu baraj modeli hem sık sonlu eleman ağ sistemi hem de normal sonlu eleman ağ sistemi durumları için baraj gövdesi ile baraj üst kısmındaki bloğunda meydana gelen minimum ve maksimum yer değiştirmeleri elde edilmiştir. Çözümler barajın kendi ağırlığı, hidrostatik su yükü, baraj rezervuarın dolu ve kretten 3 m aşağıda olması durumunda ve ikinci denemede her bir barajın üst blok yüksekliği (yanı  $a$  değeri) için  $h_w=1, 3, 5$  m olması durumunda statik analiz sonuçları elde edilmiş olup, sonuçlar sırasıyla baraj gövdesi ve barajın üst kısmındaki bloğunda meydana gelen yer değiştirmeleri incelenmiştir. Barajın elastisite modülü 15.00 GPa seçilmiş olup betonun özgül

ağırlığı  $\gamma_b = 24.0 \text{ kN/m}^3$  ve poisson oranı 0.2 olarak seçilmiştir. Suyun özgül ağırlığı  $\gamma_{su} = 9.81 \text{ kN/m}^3$  alınmıştır. Temelde taban su basıncı (*uplift force*), temel geçirimsiz kaya olarak dikkate alındığından hesaplara katılmamıştır.

#### **4.2.1 Katı Dolgu Baraj Üst Bloğunun $a = 0, 3, 5$ ve $8 \text{ m}$ Olması Durumu (Sık Sonlu eleman ağ sistemi $1 \text{ m}$ )**

Baraj gövde yüksekliği  $100 \text{ m}$ , bloğun yüksekliği  $a = 0 \text{ m}$ , şev eğimi  $0.7y/1.0d$  olması ve rezervuar ortamı dolu su seviyesi kretten  $3 \text{ m}$  aşağıda olması durumunda maksimum yatay yer değiştirmesi  $0.243 \text{ cm}$ , krette meydana gelen maksimum yatay yer değiştirmesi  $0.214 \text{ cm}$ 'dir. Düşey olarak barajda meydana gelen yer değiştirmesi  $-0.536 \text{ cm}$ , krette meydana gelen düşey yer değiştirmesi  $-0.536 \text{ cm}$ 'dir. Baraj gövdesinde minimum asal gerilme  $-1.88 \text{ MPa}$  ve maksimum asal gerilme  $0.653 \text{ MPa}$  olarak elde edilmiştir.

Baraj gövde yüksekliği  $97 \text{ m}$ , bloğun yüksekliği  $a = 3 \text{ m}$ , şev eğimi  $0.7y/1.0d$  olması ve Rezervuar ortamı dolu su seviyesi kretten  $3 \text{ m}$  aşağıda olması durumunda maksimum yatay yer değiştirmesi  $0.254 \text{ cm}$ , krette meydana gelen yatay yer değiştirmesi  $0.237 \text{ cm}$ 'dir. Düşey olarak barajda meydana gelen yer değiştirmesi  $-0.519 \text{ cm}$ , krette meydana gelen düşey yer değiştirme ise  $-0.519 \text{ cm}$ 'dir. Baraj gövdesinde minimum asal gerilme değeri  $-1.851 \text{ MPa}$  ve maksimum  $0.678 \text{ MPa}$  olarak elde edilmiştir.

Baraj gövde yüksekliği  $95 \text{ m}$ , bloğun yüksekliği  $a = 5 \text{ m}$ , şev eğimi  $0.7y/1.0d$  olması ve rezervuar ortamı dolu su seviyesi kretten  $3 \text{ m}$  aşağıda olması durumunda maksimum yatay yer değiştirmesi  $0.261 \text{ cm}$ , krette meydana gelen yatay yer değiştirilmesi  $0.254 \text{ cm}$ 'dir. Düşey olarak barajda meydana gelen yer değiştirmesi  $-0.51 \text{ cm}$ , krette meydana gelen düşey yer değiştirmesi ise  $-0.51 \text{ cm}$ 'dir. Baraj gövdesinde asal gerilme değeri minimum  $-1.835 \text{ MPa}$  ve maksimum  $0.680 \text{ MPa}$  olarak elde edilmiştir.

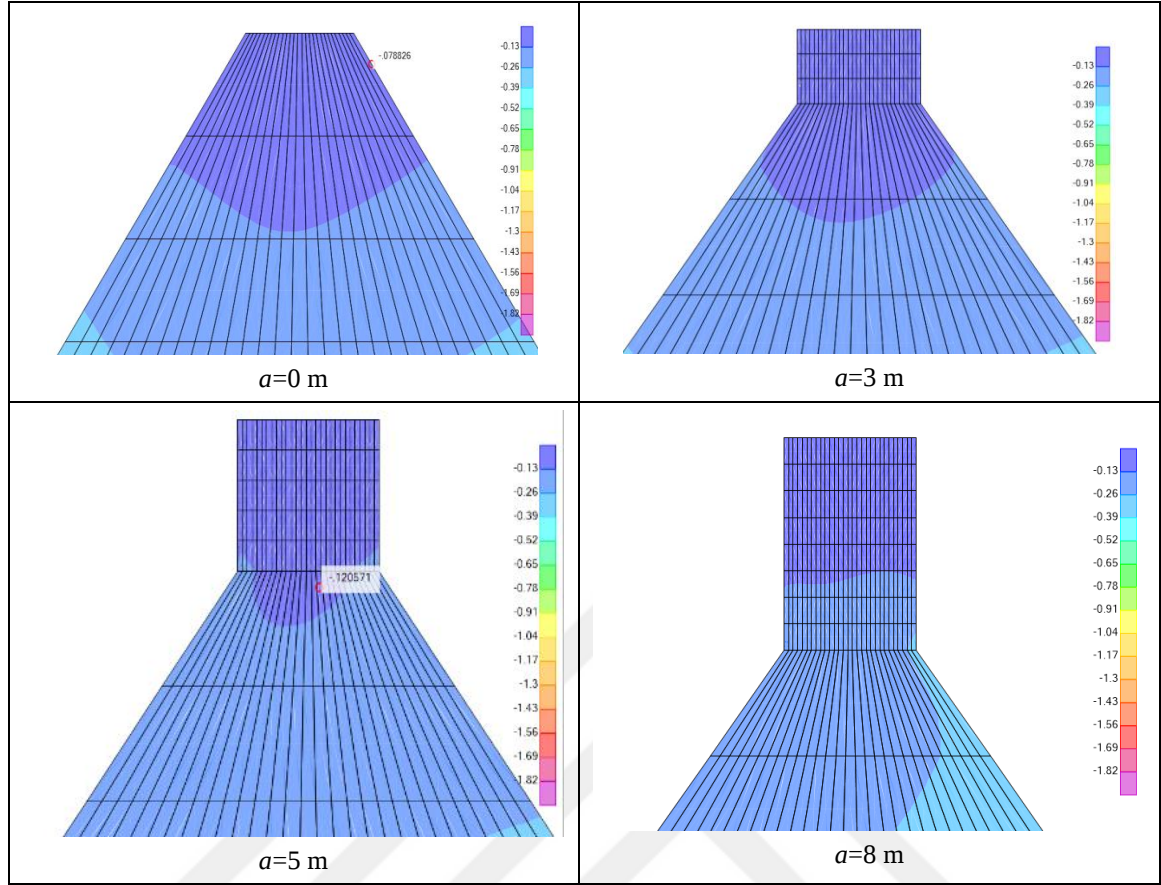
Baraj gövde yüksekliği  $92 \text{ m}$ , bloğun yüksekliği  $a = 8 \text{ m}$ , şev eğimi  $0.7y/1.0d$  olması ve rezervuar ortamı dolu su seviyesi kretten  $3 \text{ m}$  aşağıda olması durumunda maksimum yatay yer değiştirmesi  $0.294 \text{ cm}$ , krette meydana gelen yatay yer değiştirilmesi  $0.294 \text{ cm}$ 'dir. Düşey olarak barajda meydana gelen yer değiştirmesi  $-0.51 \text{ cm}$ , krette meydana gelen düşey yer değiştirmesi ise  $-0.51 \text{ cm}$ 'dir. Baraj gövdesinde asal gerilme değeri minimum  $-1.835 \text{ MPa}$  ve maksimum  $0.664 \text{ MPa}$  olarak elde edilmiştir.

**Tablo 4.5.** Katı dolgu baraj üst bloğunda ve gövdesinde meydana gelen yer değiştirme ve asal gerilme değerleri (Sık sonlu eleman ağ sistemi 1 m)

| Baraj üst bloğunun yüksekliği (m) | Yatay yer değiştirme (cm) | Krette oluşan yatay yer değiştirme (cm) | Krette oluşan düşey yer değiştirme (cm) | Maksimum asal gerilme (kPa) | Minimum asal gerilme (kPa) |
|-----------------------------------|---------------------------|-----------------------------------------|-----------------------------------------|-----------------------------|----------------------------|
| $a=0$                             | 0.243                     | 0.214                                   | -0.536                                  | 653                         | -1880                      |
| $a=3$                             | 0.254                     | 0.237                                   | -0.519                                  | 678                         | -1851                      |
| $a=5$                             | 0.261                     | 0.254                                   | -0.510                                  | 680                         | -1835                      |
| $a=8$                             | 0.294                     | 0.294                                   | -0.501                                  | 664                         | -1807                      |

Tablo 4.5 değerlerine bakıldığında, katı dolgu barajın üst bloğu 1 m sonlu eleman ağ sistemi durumunda, barajın üst kısmındaki bloğun yüksekliğin (yani “ $a$ ” değer)’in artışına bağlı olarak, barajın kretinde yatay olarak yer değiştirmesinin artışına ve düşey olarak yer değiştirmesinin azalmasına neden olmaktadır. Blok yükseklikleri  $a= 3, 5, 8$  m olan barajın kretinde bloksuz (yani  $a=0$  m) olan baraja göre sırasıyla %10.74, %18.69 ve %37.38 daha fazla yatay yer değiştirmeleri meydana gelmiştir. Aynı şekilde baraj gövdesinin memba yüzeyinde meydana gelen yer değiştirme ile krette meydana gelen yer değiştirme değerleri karşılaştırıldığında,  $a= 0, 3, 5$  m blok yükseklikleri için maksimum yatay yer değiştirmesi baraj gövdesinin memba yüzeyinde meydana gelmiştir, ancak  $a=8$  m blok yüksekliği için maksimum yatay yer değiştirmesi krette meydana gelmiştir.  $a=8$  m olan barajda meydana gelen yatay yer değiştirmesi bloksuz baraja göre %37.38 daha fazladır.

Katı dolgu barajın üst bloğu 1 m sonlu eleman ağ sistemi durumunda, barajın üst kısmındaki blok yüksekliğin (yani “ $a$ ” değer)’in artışına bağlı olarak, baraj gövdesinde minimum asal gerilme değerlerinin büyümesine (basınç gerilmesinin azalmasına) neden olmaktadır. Maksimum asal gerilme değerlerine bakıldığında,  $a= 0, 3, 5$  m için maksimum asal gerilme değerlerinin artışına (çekme gerilmesinin büyümesine) neden olmaktadır. Ancak  $a=8$  m ve daha fazla blok yüksekliği için baraj topuğunda maksimum asal gerilme değerinin tekrar azalması (çekme gerilmesinin küçülmesi) ve barajın üst kısmındaki blokta çekme gerilmesinin büyümesi görülüyor. Şekil 4.4’te görüldüğü gibi baraj gövdesi ile gövdenin üst kısmındaki blok arasında minimum asal gerilme değerlerine bakıldığında, “ $a$ ” değeri arttıkça barajın üst kısmındaki blokta basınç gerilmesinin artışı görülüyor. Baraj gövdesinde ve gövdesinin üst kısmındaki blokta çekme ve basınç gerilme değerleri sürekli emniyet gerilmesinin altındadır (yani SSB’nin çekme dayanımı 1.3 MPa iken barajdaki çekme gerilmesi 0.6-0.7 MPa arasındadır. Aynı şekilde simetrik yüzlü katı dolgu barajların tasarımında dikkate alınması gereken basınç dayanımı değeri 3.5 MPa (Zafeiratos vd, 2019) iken, barajdaki basınç gerilmesi 1.8-1.9 MPa arasındadır). Ancak  $a= 8$  m olan barajda meydana gelen yatay yer değiştirmesi bloksuz baraja göre %37.38 daha fazla olduğundan, barajın üst kısmındaki blok tehlikeye düşebilir.



**Şekil 4.4.** Baraja etki eden hidrostatik kuvvetlerden dolayı baraj üst kısmında oluşan minimum asal gerilme görünümü (Sık sonlu eleman ağ sistemi 1 m)

#### 4.2.2. Katı Dolgu Baraj Üst Bloğunun $a= 0, 3, 5$ ve $8$ m Olması Durumu (Sık Sonlu eleman ağ sistemi $0.5$ m)

Baraj gövde yüksekliği  $100$  m, bloğun yüksekliği  $a=0$  m, şev eğimi  $0.7y/1.0d$  olması ve rezervuar ortamı dolu su seviyesi kretten  $3$  m aşağıda olması durumunda maksimum yatay yer değiştirmesi  $0.243$  cm, krette meydana gelen maksimum yatay yer değiştirmesi  $0.214$  cm'dir. Düşey olarak barajda meydana gelen yer değiştirmesi  $-0.536$  cm, krette meydana gelen düşey yer değiştirmesi  $-0.536$  cm'dir. Baraj gövdesinde oluşan maksimum asal gerilme  $0.653$  MPa minimum asal gerilme ise  $-1.88$  MPa olarak belirlenmiştir.

Baraj gövde yüksekliği  $97$  m, bloğun yüksekliği  $a=3$  m, şev eğimi  $0.7y/1.0d$  olması ve rezervuar ortamı dolu su seviyesi kretten  $3$  m aşağıda olması durumunda maksimum yatay yer değiştirmesi  $0.254$  cm, krette meydana gelen yatay yer değiştirmesi  $0.237$  cm'dir. Düşey olarak barajda meydana gelen yer değiştirmesi  $-0.519$  cm, krette meydana gelen düşey yer değiştirmesi ise  $-0.519$  cm'dir. Baraj gövdesinde oluşan minimum asal gerilme değeri  $-1.851$  MPa ve maksimum asal gerilme değeri  $0.678$  MPa olarak elde edilmiştir.

Baraj gövde yüksekliği  $95$  m, bloğun yüksekliği  $a= 5$  m, şev eğimi  $0.7y/1.0d$  olması ve rezervuar ortamı dolu su seviyesi kretten  $3$  m aşağıda olması durumunda maksimum yatay yer

değiştirmesi 0.261 cm, krette meydana gelen yatay yer değiştirmesi 0.254 cm'dir. Düşey olarak barajda meydana gelen yer değiştirmesi -0.51 cm, krette meydana gelen düşey yer değiştirmesi ise -0.51 cm'dir. Baraj gövdesinde oluşan minimum asal gerilme değeri -1.835 MPa ve maksimum asal gerilme değeri 0.680 MPa olarak elde edilmiştir.

Baraj gövde yüksekliği 92 m, bloğun yüksekliği  $a=8$  m, şev eğimi 0.7y/1.0d olması ve rezervuar ortamı dolu su seviyesi kretten 3 m aşağıda olması durumunda maksimum yatay yer değiştirmesi 0.290 cm, krette meydana gelen yatay yer değiştirmesi 0.295 cm'dir. Düşey olarak barajda meydana gelen yer değiştirmesi -0.501 cm, krette meydana gelen düşey yer değiştirmesi ise -0.502 cm'dir. Baraj gövdesinde minimum asal gerilme değeri -1.807 MPa ve maksimum asal gerilme değeri 0.664 MPa olarak elde edilmiştir.

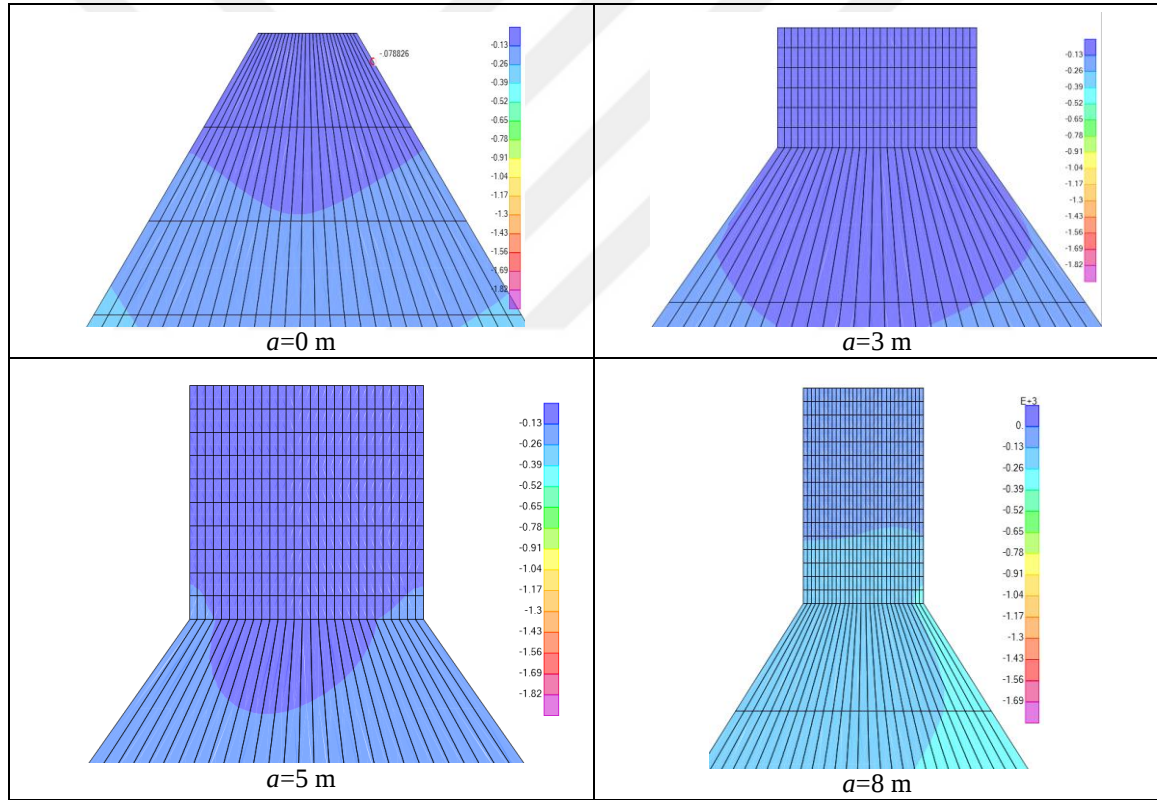
**Tablo 4.6.** Katı dolgu baraj üst bloğunda ve gövdesinde meydana gelen yer değiştirmesi ve asal gerilme değerleri (Sık sonlu eleman ağ sistemi 0.5 m)

| Baraj üst bloğunun yüksekliği (m) | Yatay yer değiştirme (cm) | Krette oluşan yatay yer değiştirme (cm) | Krette oluşan düşey yer değiştirme (cm) | Maksimum asal gerilme (kPa) | Minimum asal gerilme (kPa) |
|-----------------------------------|---------------------------|-----------------------------------------|-----------------------------------------|-----------------------------|----------------------------|
| $a=0$                             | 0.243                     | 0.214                                   | -0.536                                  | 653                         | -1880                      |
| $a=3$                             | 0.254                     | 0.237                                   | -0.519                                  | 678                         | -1851                      |
| $a=5$                             | 0.261                     | 0.254                                   | -0.510                                  | 680                         | -1835                      |
| $a=8$                             | 0.295                     | 0.295                                   | -0.501                                  | 664                         | -1807                      |

Tablo 4.6'daki değerlere bakıldığında, katı dolgu barajın üst bloğu 0.5 m sık sonlu eleman ağ sistemi durumunda, barajın üst kısmındaki bloğun yüksekliğin (yani " $a$ " değer)'in artışına bağlı olarak, barajın kretinde yatay olarak yer değiştirmesinin artışına ve düşey olarak yer değiştirmesinin azalmasına neden olmaktadır. Blok yükseklikleri  $a= 3, 5$  ve 8 m olan barajın kretinde, bloksuz ( $a=0$  m) baraja göre sırasıyla, %10.74, %18.69 ve %37.38 daha fazla yatay yer değiştirmeleri meydana gelmiştir. Aynı şekilde baraj gövdesinin memba yüzeyinde meydana gelen yer değiştirme ile krette meydana gelen yer değiştirme değerleri karşılaştırıldığında,  $a= 0, 3$  ve 5 m blok yükseklikleri için maksimum yatay yer değiştirmesi baraj gövdesinin memba yüzeyinde meydana gelmiştir, ancak  $a=8$  m blok yüksekliği için maksimum yatay yer değiştirmesi krette meydana gelmiştir.  $a=8$  m olan barajda meydana gelen yatay yer değiştirmesi bloksuz baraja göre %37.38 daha fazladır.

Katı dolgu barajın üst bloğu 0.5 m sık sonlu eleman ağ sistemi durumunda, barajın üst kısmındaki blok yüksekliğin (yani " $a$ " değer)'in artışına bağlı olarak, baraj gövdesinde minimum asal gerilme değerlerinin büyümesine (basınç gerilmesinin azalmasına) neden olmaktadır. Maksimum asal gerilme değerlerine bakıldığında,  $a= 0, 3, 5$  m için maksimum asal gerilme değerlerinin artışına (çekme gerilmesinin büyümesine), ancak  $a=8$  m ve daha fazla blok yüksekliği

için baraj topuğunda maksimum asal gerilme değerinin tekrar azalmasına (çekme gerilmesinin küçülmesine) ve barajın üst kısmındaki blokta çekme gerilmesinin büyümesine neden olmaktadır. Şekil 4.5'te görüldüğü üzere baraj gövdesi ile gövdenin üst kısmındaki blok arasında minimum asal gerilme değerlerine bakıldığında, “ $a$ ” değeri arttıkça barajın üst kısmındaki blokta basınç gerilmesinin artışı görünüyor. Ancak baraj gövdesinde ve gövdesinin üst kısmındaki blokta çekme ve basınç gerilme değerleri sürekli emniyet gerilmesinin altındadır (yani SSB’nin çekme dayanımı 1.3 MPa iken barajdaki çekme gerilmesi 0.6-0.7 MPa arasındadır. Aynı şekilde simetrik yüzölü katı dolgu barajların tasarımında dikkate alınması gereken basınç dayanımı değeri 3.5 MPa (Zafeiratos vd., 2019) iken, barajdaki basınç gerilmesi 1.8-1.9 MPa arasındadır.). Ancak  $a=8$  m olan barajda meydana gelen yatay yer değiştirmesi bloksuz baraja göre %37.38 daha fazla olduğundan, barajın üst kısmındaki blok tehlikeye düşebilir.



**Şekil 4.5.** Baraja etki eden hidrostatik kuvvetlerden dolayı baraj üst kısmında oluşan minimum asal gerilme görünümü (Sık sonlu eleman ağ sistemi 0.5 m)

#### 4.2.3. Katı Dolgu Baraj Üst Bloğunun $a= 0, 3, 5$ ve $8$ m Olması Durumu (Normal Sonlu eleman ağ sistemi)

Baraj yüksekliği 100 m, bloğun yüksekliği  $a=0$  m, şev eğimi  $0.7y/1.0d$  olması ve rezervuar ortamı dolu su seviyesi kretten 3 m aşağıda olması durumunda maksimum yatay yer değiştirmesi 0.243 cm, krette meydana gelen maksimum yatay yer değiştirmesi 0.214 cm’dir. Düşey olarak

barajda meydana gelen yer deęiřtirmesi -0.536 cm, krette meydana gelen dūřey yer deęiřtirme -0.536 cm'dir. Baraj gōvdesinde maksimum asal gerilme deęeri 0.653 MPa, minimum asal gerilme deęeri ise -1.88 MPa olarak elde edilmiřtir.

Baraj gōvde yūkseklēęi 97 m, bloęun yūkseklēęi  $a=3$  m, řev eęimi 0.7y/1.0d olması ve rezervuar ortamı dolu su seviyesi kretten 3 m ařaęıda olması durumunda maksimum yatay yer deęiřtirmesi 0.254 cm dır, krette meydana gelen yatay yer deęiřtirmesi 0.237 cm'dir. Dūřey olarak barajda meydana gelen yer deęiřtirmesi -0.519 cm, krette meydana gelen dūřey yer deęiřtirmesi -0.519 cm dir. Baraj gōvdesinde minimum asal gerilme deęeri -1.851 MPa ve maksimum asal gerilme deęeri 0.678 MPa olarak elde edilmiřtir.

Baraj gōvde yūkseklēęi 95 m, bloęun yūkseklēęi  $a=5$  m, řev eęimi 0.7y/1.0d olması ve rezervuar ortamı dolu su seviyesi kretten 3 m ařaęıda olması durumunda maksimum yatay yer deęiřtirmesi 0.261 cm, krette meydana gelen yatay yer deęiřtirmesi 0.254 cm'dir. Dūřey olarak barajda meydana gelen yer deęiřtirmesi -0.511 cm, krette meydana gelen dūřey yer deęiřtirmesi ise -0.511 cm'dir. Baraj gōvdesinde minimum asal gerilme deęeri -1.835 MPa ve maksimum asal gerilme deęeri 0.680 MPa olarak elde edilmiřtir.

Baraj gōvde yūkseklēęi 92 m ve bloęun yūkseklēęi  $a=8$  m, řev eęimi 0.7y/1.0d olması ve rezervuar ortamı dolu su seviyesi kretten 3 m ařaęıda olması durumunda maksimum yatay yer deęiřtirmesi 0.295 cm, krette meydana gelen yatay yer deęiřtirmesi 0.295 cm'dir. Dūřey olarak barajda meydana gelen yer deęiřtirmesi -0.501 cm, krette meydana gelen dūřey yer deęiřtirmesi ise -0.501 cm'dir. Baraj gōvdesinde minimum asal gerilme deęeri -1.804 MPa ve maksimum asal gerilme deęeri 0.664 MPa olarak elde edilmiřtir.

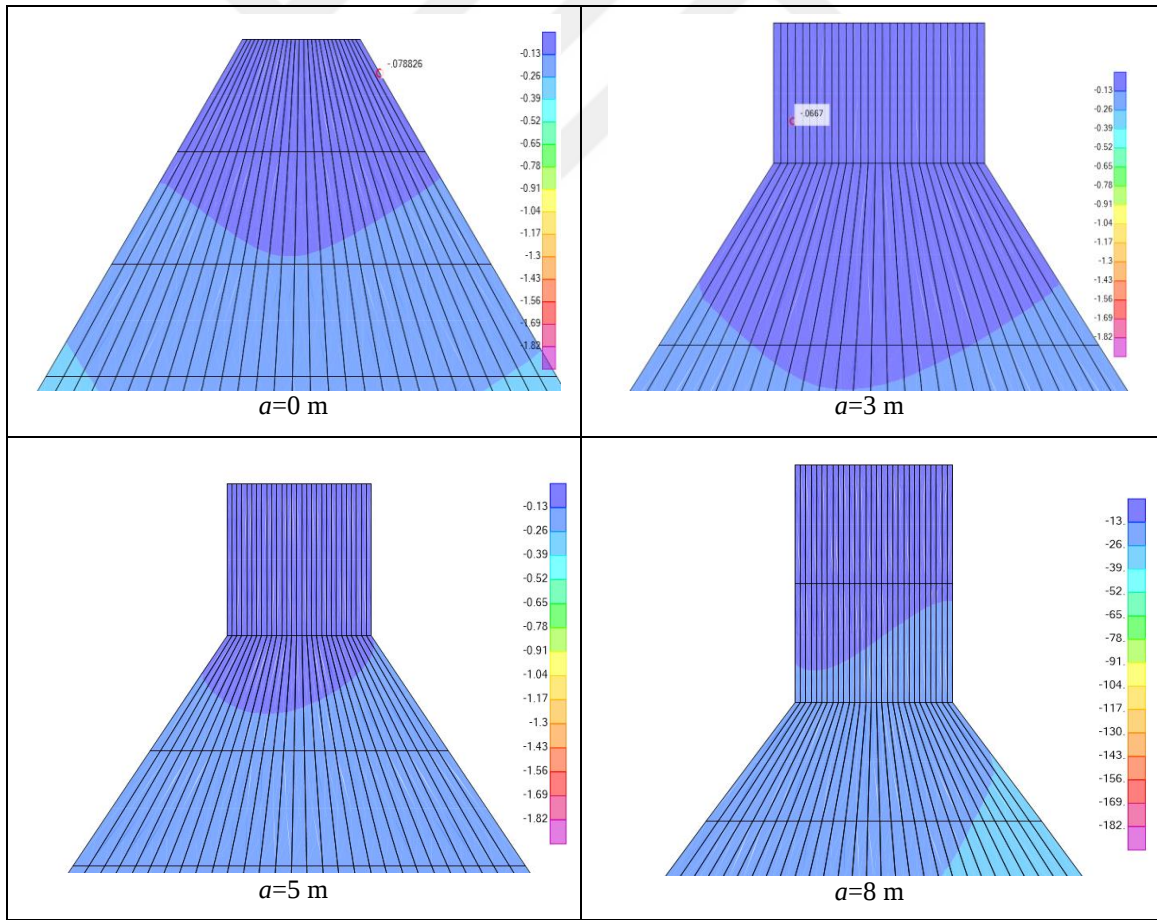
**Tablo 4.7.** Katı dolgu baraj űst bloęunda ve gōvdesinde meydana gelen yer deęiřtirmesi ve asal gerilme deęerleri (Normal sonlu eleman aę sistemi)

| Baraj űst<br>bloęunun<br>yūkseklēęi<br>(m) | Yatay yer<br>deęiřtirme<br>(cm) | Krette oluřan<br>yatay yer<br>deęiřtirme<br>(cm) | Krette oluřan<br>dūřey yer<br>deęiřtirme<br>(cm) | Maksimum<br>asal gerilme<br>(kPa) | Minimum<br>asal gerilme<br>(kPa) |
|--------------------------------------------|---------------------------------|--------------------------------------------------|--------------------------------------------------|-----------------------------------|----------------------------------|
| $a=0$                                      | 0.243                           | 0.214                                            | -0.536                                           | 653                               | -1880                            |
| $a=3$                                      | 0.254                           | 0.237                                            | -0.519                                           | 678                               | -1851                            |
| $a=5$                                      | 0.261                           | 0.254                                            | -0.511                                           | 680                               | -1835                            |
| $a=8$                                      | 0.295                           | 0.295                                            | -0.501                                           | 664                               | -1807                            |

Tablo 4.7 deęerlerine bakıldığında baraj űst kısmındaki bloęun normal sonlu eleman aę sistemi durumunda, bloęun yūkseklēęi arttıkça krette yatay olarak meydana gelen yer deęiřtirme deęeri artar, ancak bloęun yūkseklēęi arttıkça krette dūřey olarak meydana gelen yer deęiřtirme deęeri azalır. Gerilme deęerleri incelendięinde, baraj gōvdesinin űst kısmındaki bloęun yūkseklēęi arttıkça baraj gōvdesinde meydana gelen maksimum asal gerilme deęerleri,  $a= 0, 3, 5$  m için artar,

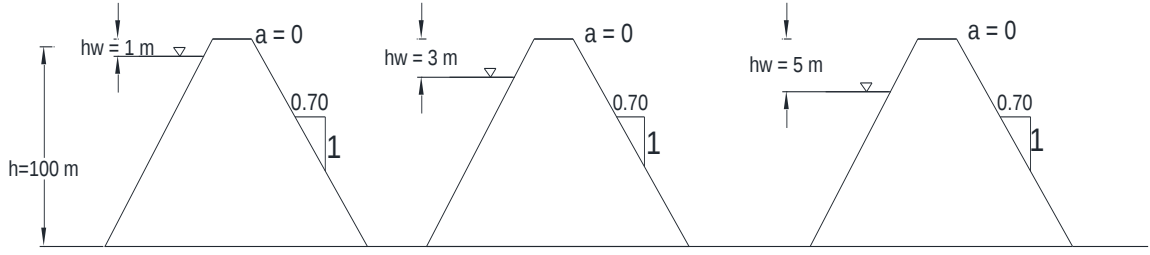
ancak  $a=8$  m ve daha fazla blok yükseklikleri için baraj topuğunda maksimum asal gerilme değerinin tekrar azalması (çekme gerilmesinin küçülmesine) ve barajın üst kısmındaki blokta çekme gerilmesinin büyümesi görülüyor. Baraj gövdesinde minimum asal gerilme değerleri ise, “ $a$ ” değerinin büyümesi, minimum asal gerilme değerinin büyümesine (basınç gerilmesinin küçülmesine) neden olmaktadır.

. Baraj gövdesi ile gövdenin üst kısmındaki blok arasında minimum asal gerilme değeri, Şekil 4.6’de görüldüğü gibi, “ $a$ ” değeri arttıkça barajın üst kısmındaki blokta basınç gerilmesinin artışı görünüyor. Baraj gövdesinde ve gövdesinin üst kısmındaki blokta çekme ve basınç gerilme değerleri sürekli emniyet gerilmesinin altındadır (yani SSB’nin çekme dayanımı 1.3 MPa iken barajdaki çekme gerilmesi 0.6-0.7 MPa arasındadır. Aynı şekilde simetrik yüzölçümü katı dolgu barajların tasarımında dikkate alınması gereken basınç dayanımı değeri 3.5 MPa (Zafeiratos vd., 2019) iken, barajdaki basınç gerilmesi 1.8-1.9 MPa arasındadır). Ancak  $a=8$  m olan barajda yatay yer değiştirmesi bloksuz baraja göre %37.38 daha fazla meydana gelmiştir, bu da barajın üst kısmındaki blokta kırılmaya yol açabilir.



**Şekil 4.6.** Baraja etki eden hidrostatik kuvvetlerden dolayı baraj üst kısmında oluşan minimum asal gerilme görünümü (Normal sonlu eleman ağ sistemi)

#### 4.2.4. Katı Dolgu Baraj Üst Bloğunun $a = 0$ m ve Hava Payı $h_w = 1, 3$ , ve $5$ m Olması Durumu



**Şekil 4.7.** Üst bloğu  $a = 0$  m olan barajın farklı hava payı ( $h_w$ ) görünümü

Enkesitleri Şekil 4.7’de verilen barajın gövde yüksekliği 100 m, şev eğimi 0.7y/1.0d olması ve rezervuar ortamı dolu su seviyesi kretten 1 m aşağıda olması durumunda maksimum yatay yer değiştirmesi 0.256 cm, krette oluşan yer değiştirmesi 0.235 cm’dir. Düşey olarak barajda meydana gelen yer değiştirmesi -0.539 cm, krette meydana gelen düşey yer değiştirmesi -0.539 cm’dir. Baraj gövdesinde maksimum asal gerilme 0.664 MPa, minimum asal gerilme -1.889 MPa olarak elde edilmiştir.

Baraj gövde yüksekliği 100 m, şev eğimi 0.7y/1.0d olması ve rezervuar ortamı dolu su seviyesi kretten 3 m aşağıda olması durumunda maksimum yatay yer değiştirmesi 0.243 cm, krette meydana gelen maksimum yatay yer değiştirmesi 0.214 cm’dir. Düşey olarak barajda meydana gelen yer değiştirmesi -0.536 cm, krette meydana gelen düşey yer değiştirmesi -0.536 cm’dir. Baraj gövdesinde maksimum asal gerilme 0.653 MPa, minimum asal gerilme -1.88 MPa olarak elde edilmiştir.

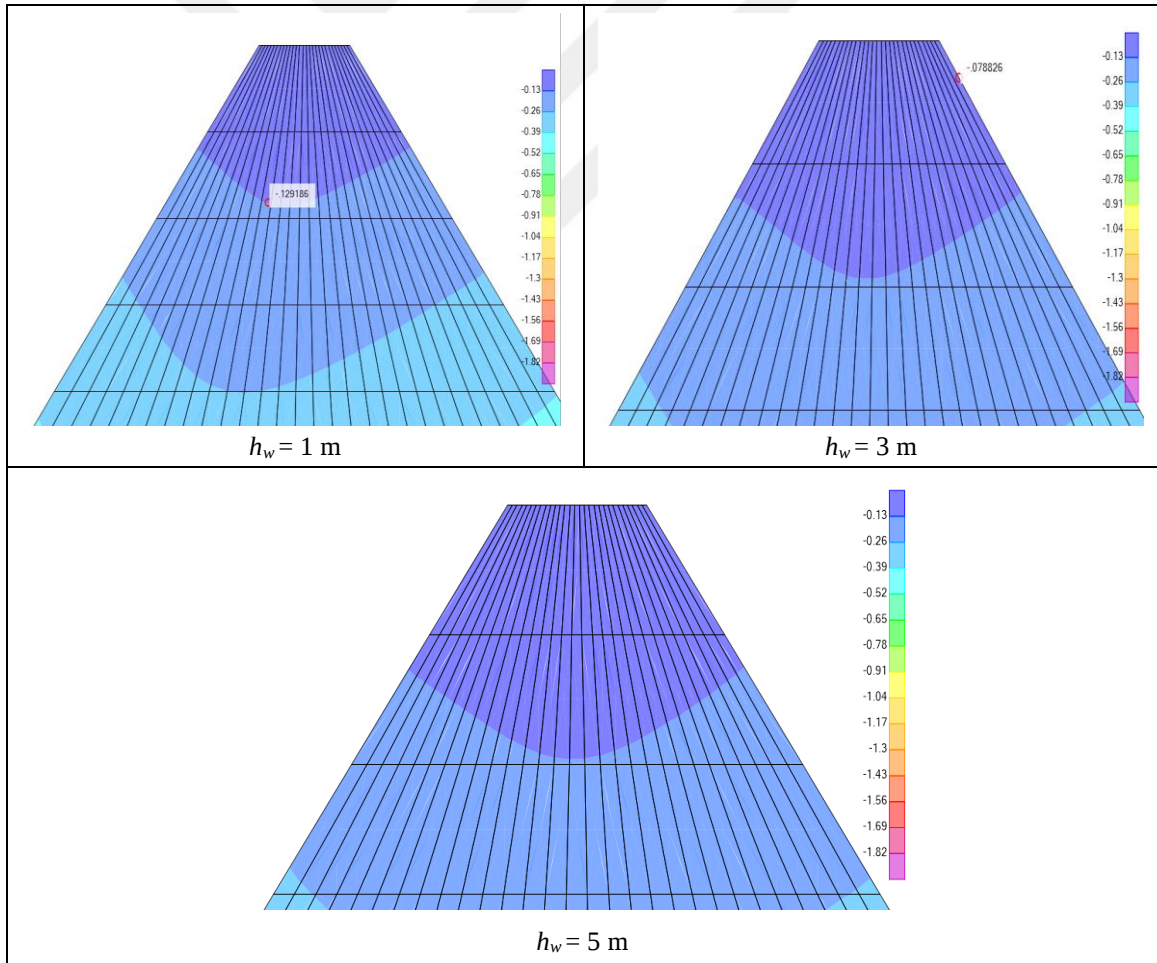
Baraj gövde yüksekliği 100 m, şev eğimi 0.7y/1.0d olması ve rezervuar ortamı dolu su seviyesi kretten 5 m aşağıda olması durumunda maksimum yatay yer değiştirmesi 0.231 cm, krette meydana gelen maksimum yatay yer değiştirmesi 0.194 cm’dir. Düşey olarak barajda meydana gelen yer değiştirmesi -0.533 cm, krette meydana gelen düşey yer değiştirmesi -0.533 cm’dir. Baraj gövdesinde maksimum asal gerilme 0.642 MPa, minimum asal gerilme -1.871 MPa olarak elde edilmiştir.

**Tablo 4.8.** Katı dolgu baraj üst bloğunun  $a=0$  m olduğunda farklı hava payı ( $h_w$ ) durumu

| Hava payı<br>(m) | Yatay yer<br>değiştirme<br>(cm) | Krette oluşan<br>yatay yer<br>değiştirme<br>(cm) | Krette oluşan<br>düşey yer<br>değiştirme<br>(cm) | Maksimum<br>asal gerilme<br>(kPa) | Minimum<br>asal gerilme<br>(kPa) |
|------------------|---------------------------------|--------------------------------------------------|--------------------------------------------------|-----------------------------------|----------------------------------|
| $h_w=1$          | 0.256                           | 0.235                                            | -0.539                                           | 664                               | -1889                            |
| $h_w=3$          | 0.243                           | 0.214                                            | -0.536                                           | 653                               | -1880                            |
| $h_w=5$          | 0.231                           | 0.194                                            | -0.533                                           | 642                               | -1871                            |

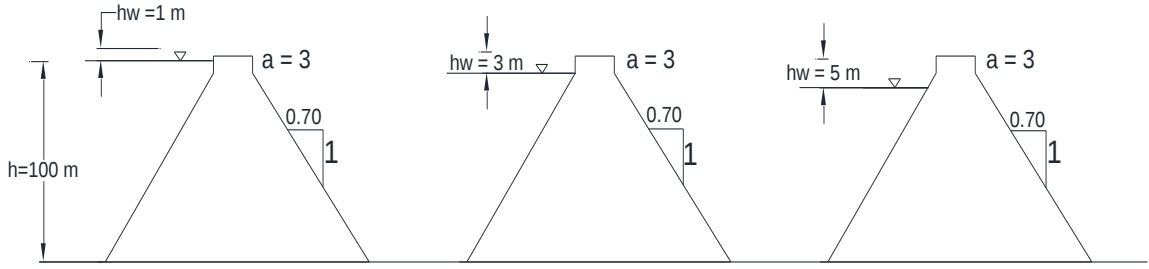
Tablo 4.8 değerlerine bakıldığında  $a=0$  m olan bir katı dolgu barajın  $h_w=1, 3, 5$  m olması durumunda, hava payı ( $h_w$ ) değerinin artmasıyla yatay ve düşey yer değiştirmelerin azalması görülmektedir.  $a=0$  m olan barajın tüm “ $h_w$ ” değerleri için maksimum yatay yer değiştirmesi baraj gövdesinin memba yüzeyinde meydana gelmiştir.

Baraj gövdesi üzerinde oluşan minimum ve maksimum asal gerilme değerlerine bakıldığında, hava payı değeri yükseldikçe baraj gövdesinde oluşan maksimum asal gerilme değerlerin küçülmesine ve minimum asal gerilme değerlerin büyümesine (çekme gerilmelerin küçülmesine ve basınç gerilmelerin de küçülmesine) neden olmaktadır.  $a=0$  m olan barajın tüm “ $h_w$ ” değerleri için sürekli emniyet gerilmesinin altındadır (yani SSB’nin çekme dayanımı 1.3 MPa iken barajdaki çekme gerilmesi 0.6-0.7 MPa arasındadır. Aynı şekilde simetrik yüzlü katı dolgu barajların tasarımında dikkate alınması gereken basınç dayanımı değeri 3.5 MPa (Zafeiratos vd., 2019) iken, barajdaki basınç gerilmesi 1.8-1.9 MPa arasındadır). Baraj gövdesinin üst kısmında oluşan basınç gerilmeleri Şekil 4.8’de gösterilmektedir.



Şekil 4.8. Baraja etki eden hidrostatik kuvvetlerden dolayı baraj üst kısmında minimum asal gerilme görünümü ( $a=0$ ,  $h_w=1, 3, 5$  m)

#### 4.2.5. Katı Dolgu Baraj Üst Bloğunun $a=3$ m ve Hava Payı $h_w=1, 3$ , ve $5$ m Olması Durumu



**Şekil 4.9.** Üst bloğu  $a=3$  m olan barajın farklı hava payı ( $h_w$ ) görünümü

Enkesitleri Şekil 4.9'de verilen barajın gövde yüksekliği 97 m, bloğun yüksekliği  $a=3$  m, şev eğimi 0.7y/1.0d olması ve rezervuar ortamı dolu su seviyesi kretten 1 m aşağıda olması durumunda maksimum yatay yer değiştirmesi 0.267 cm, krette oluşan yer değiştirmesi ise 0.259 cm'dir. Düşey olarak barajda meydana gelen yer değiştirmesi -0.524 cm, krette meydana gelen düşey yer değiştirmesi -0.524 cm'dir. Baraj gövdesinde maksimum asal gerilme 0.674 MPa minimum asal gerilme -1.863 MPa olarak elde edilmiştir.

Baraj gövde yüksekliği 97 m, bloğun yüksekliği  $a=3$  m, şev eğimi 0.7y/1.0d olması ve rezervuar ortamı dolu su seviyesi kretten 3 m aşağıda olması durumunda maksimum yatay yer değiştirmesi 0.254 cm, krette meydana gelen yatay yer değiştirmesi 0.237 cm'dir. Düşey olarak barajda meydana gelen yer değiştirmesi -0.519 cm, krette meydana gelen düşey yer değiştirmesi -0.519 cm'dir. Baraj gövdesinde minimum asal gerilme değeri -1.851 MPa ve maksimum asal gerilme değeri 0.678 MPa olarak elde edilmiştir.

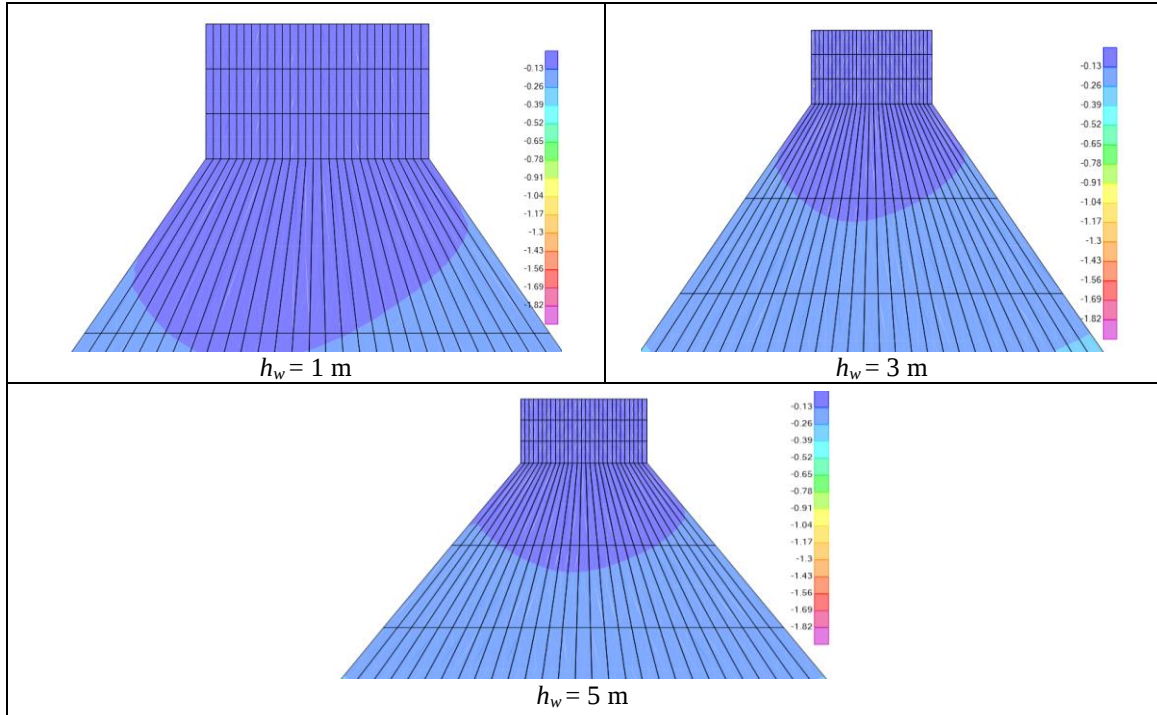
Baraj gövde yüksekliği 97 m ve bloğun yüksekliği  $a=3$  m, şev eğimi 0.7y/1.0d olması ve rezervuar ortamı dolu su seviyesi kretten 5 m aşağıda olması durumunda maksimum yatay yer değiştirmesi 0.241 cm, krette meydana gelen yatay yer değiştirmesi 0.215 cm'dir. Düşey olarak barajda meydana gelen yer değiştirmesi ise -0.515 cm, krette meydana gelen düşey yer değiştirmesi ise -0.515 cm olarak belirlenmiştir. Baraj gövdesinde minimum asal gerilme değeri -1.842 MPa ve maksimum asal gerilme değeri 0.667 MPa olarak elde edilmiştir.

**Tablo 4.9.** Katı dolgu baraj üst bloğunun  $a=3$  m olduğunda farklı hava payı ( $h_w$ ) durumu

| Hava payı<br>(m) | Yatay yer<br>değiştirme<br>(cm) | Krette oluşan<br>yatay yer<br>değiştirme<br>(cm) | Krette oluşan<br>düşey yer<br>değiştirme<br>(cm) | Maksimum<br>asal gerilme<br>(kPa) | Minimum<br>asal<br>gerilme<br>(kPa) |
|------------------|---------------------------------|--------------------------------------------------|--------------------------------------------------|-----------------------------------|-------------------------------------|
| $h_w=1$          | 0.267                           | 0.259                                            | -0.524                                           | 674                               | -1863                               |
| $h_w=3$          | 0.254                           | 0.237                                            | -0.519                                           | 678                               | -1851                               |
| $h_w=5$          | 0.241                           | 0.215                                            | -0.515                                           | 667                               | -1842                               |

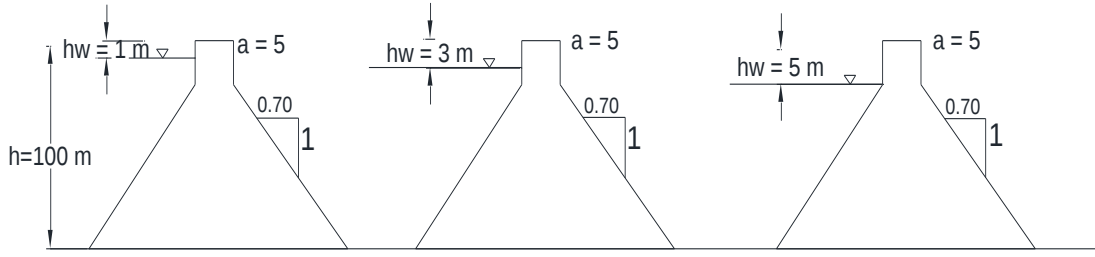
Tablo 4.9'daki değerlere bakıldığında,  $a=3$  m olan bir katı dolgu barajın  $h_w=1, 3, 5$  m olması durumunda, hava payı ( $h_w$ ) değeri arttıkça yatay ve düşey olarak yer değiştirmelerin azalması görülmektedir.  $a=3$  m olan barajın tüm " $h_w$ " değerleri için maksimum yatay yer değiştirmesi baraj gövdesinin memba yüzeyinde meydana gelmiştir. Bu da krette herhangi bir tehlikenin olmadığını gösteriyor. Blok yüksekliği  $a=3$  m olan barajın kretinde  $h_w=1, 3, 5$  m için meydana gelen yatay yer değiştirmeleri, bloksuz ( $a=0$ ) barajın  $h_w=1, 3, 5$  m için meydana gelen yatay yer değiştirmelerine göre,  $a=3$  m olan barajın kretinde sırasıyla %10.21, %10.74, %10.82 daha fazla yatay yer değiştirme meydana gelmiştir.

Baraj gövdesi üzerinde oluşan minimum ve maksimum asal gerilme değerlerine bakılarak hava payı değeri yükseldikçe (su seviyesi azalınca) baraj gövdesinde oluşan maksimum asal gerilme değerlerin küçülmesine ve minimum asal gerilme değerlerin büyümesine (çekme gerilmelerin küçülmesine ve basınç gerilmelerin de küçülmesine) neden olmaktadır. Şekil 4.10'da görüldüğü gibi baraj gövdesi ve gövdesinin üst kısmındaki blok arasında minimum asal gerilmesi incelendiğinde, " $h_w$ " değeri azalırken blok ve gövde arası basınç gerilmesi de azalır.  $a=3$  m olan barajın tüm " $h_w$ " değerleri için baraj gövdesinde ve gövdesinin üst kısmındaki blokta minimum ve maksimum asal gerilmeler, emniyet gerilmesinin altındadır. (Yani SSB'nin çekme dayanımı 1.3 MPa iken barajdaki çekme gerilmesi 0.6-0.7 MPa arasındadır. Aynı şekilde simetrik yüzölümlü katı dolgu barajların tasarımında dikkate alınması gereken basınç dayanımı değeri 3.5 MPa (Zafeiratos vd., 2019) iken, barajdaki basınç gerilmesi 1.8-1.9 MPa arasındadır).



**Şekil 4.10.** Baraja etki eden hidrostatik kuvvetlerden dolayı baraj üst kısmında minimum asal gerilme görünümü ( $a=3$ ,  $h_w=1, 3, 5$  m)

#### 4.2.6. Katı Dolgu Baraj Üst Bloğunun $a=5$ m ve Hava Payı $h_w=1, 3$ , ve $5$ m Olması Durumu



**Şekil 4.11.** Üst bloğu  $a=5$  m olan barajın farklı hava payı ( $h_w$ ) görünümü

Enkesitleri Şekil 4.11’de verilen barajın gövde yüksekliği 95 m, şev eğimi 0.7y/1.0d olması ve rezervuar ortamı dolu su seviyesi kretten 1 m aşağıda olması durumunda maksimum yatay yer değiştirmesi 0.305 cm, krette oluşan yatay yer değiştirme 0.305 cm ve krette düşey olarak meydana gelen yer değiştirme -0.519 cm’dir. Baraj gövdesinde maksimum asal gerilme 0.680 MPa ve minimum asal gerilme -1.847 MPa olarak elde edilmiştir.

Baraj gövde yüksekliği 95 m, başlığın yüksekliği  $a=5$  m, şev eğimi 0.7y/1.0d olması ve rezervuar ortamı dolu su seviyesi kretten 3 m aşağıda olması durumunda maksimum yatay yer değiştirmesi 0.261 cm, krette meydana gelen yatay yer değiştirmesi 0.254 cm’dir. Düşey olarak barajda meydana gelen yer değiştirmesi -0.51 cm, krette meydana gelen düşey yer değiştirmesi -0.51 cm’dir. Barajın gövdesinde minimum asal gerilme değeri -1.835 MPa ve maksimum asal gerilme değeri 0.680 MPa olarak elde edilmiştir.

Baraj gövde yüksekliği 95 m, şev eğimi 0.7y/1.0d olması ve rezervuar ortamı dolu su seviyesi kretten 5 m aşağıda olması durumunda maksimum yatay yer değiştirmesi 0.248 cm, krette oluşan yatay yer değiştirmesi 0.231 cm’dir. Düşey olarak barajda meydana gelen yer değiştirmesi -0.505 cm, krette meydana gelen düşey yer değiştirmesi -0.505 cm’dir. Barajın gövdesinde maksimum asal gerilme 0.683 MPa ve minimum asal gerilme -1.822 MPa olarak elde edilmiştir.

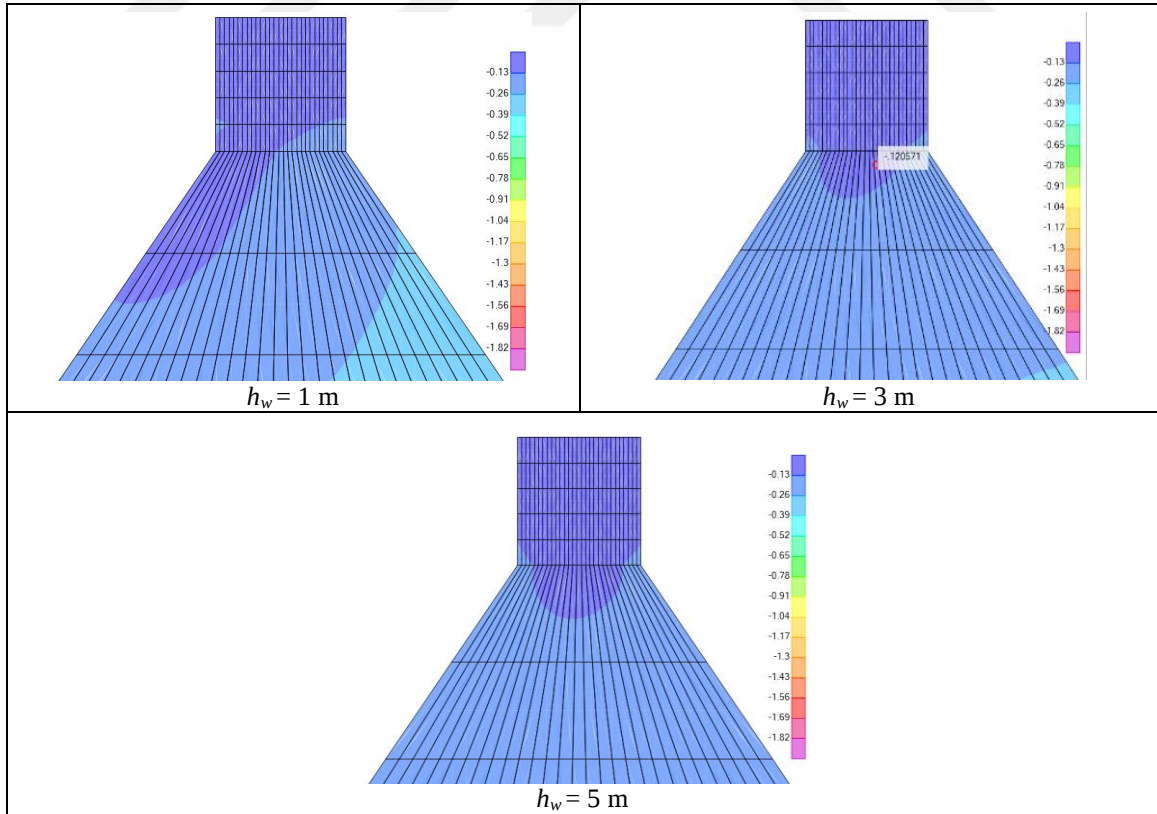
**Tablo 4.10.** Katı dolgu baraj üst bloğunun  $a=5$  m olduğunda farklı hava payı ( $h_w$ ) durumu

| Hava payı<br>(m) | Yatay yer<br>değiştirme<br>(cm) | Krette oluşan<br>yatay yer<br>değiştirme<br>(cm) | Krette oluşan<br>düşey yer<br>değiştirme<br>(cm) | Maksimum<br>asal gerilme<br>(kPa) | Minimum<br>asal gerilme<br>(kPa) |
|------------------|---------------------------------|--------------------------------------------------|--------------------------------------------------|-----------------------------------|----------------------------------|
| $h_w=1$          | 0.305                           | 0.305                                            | -0.519                                           | 680                               | -1847                            |
| $h_w=3$          | 0.261                           | 0.254                                            | -0.510                                           | 680                               | -1835                            |
| $h_w=5$          | 0.248                           | 0.231                                            | -0.505                                           | 638                               | -1822                            |

Tablo 4.10 değerlerine bakılarak  $a=5$  m olan bir katı dolgu barajın  $h_w=1, 3, 5$  m olması durumunda, hava payı değeri yükseldikçe (yani su seviyesi azaldıkça) hem krette hem baraj

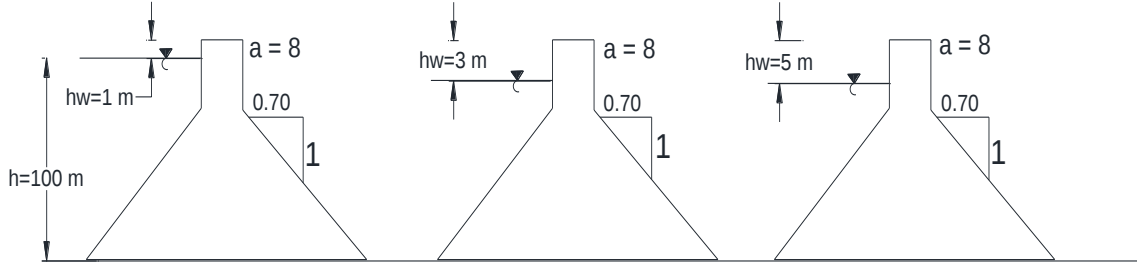
gövdesinde yatay ve düşey olarak yer değiştirmelerin azalması görülmektedir. Aynı zamanda baraj üst bloğun yüksekliği  $a=5$  m ve hava payı  $h_w=1$  m olması durumunda maksimum yatay yer değiştirmesi krette meydana gelmiştir. Blok yüksekliği  $a=5$  m olan barajın kretinde  $h_w=1, 3, 5$  m için meydana gelen yatay yer değiştirmeleri, bloksuz ( $a=0$ ) barajın  $h_w=1, 3, 5$  m için meydana gelen yatay yer değiştirmelerine göre,  $a=5$  m olan barajın kretinde sırasıyla %29.78, %18.69, %19.07 daha fazla yatay yer değiştirme meydana gelmiştir.

Baraj gövde üzerinde oluşan minimum ve maksimum asal gerilme değerlerine bakılarak hava payı değeri yükseldikçe baraj gövdesinde oluşan maksimum asal gerilme değerlerin küçülmesine ve minimum asal gerilme değerlerin büyümesine (çekme gerilmelerin küçülmesine ve basınç gerilmelerin de küçülmesine) neden olmaktadır. Barajın üst kısmındaki blokta, “ $h_w$ ” değeri arttıkça basınç gerilmesi azalıyor (Şekil 4.12). Baraj gövdesinde ve gövdesinin üst kısmında meydana gelen çekme ve basınç gerilmeler emniyet gerilmesinin altındadır (Yani SSB’nin çekme dayanımı 1.3 MPa iken barajdaki çekme gerilmesi 0.6-0.7 MPa arasındadır. Aynı şekilde simetrik yüzlü katı dolgu barajların tasarımında dikkate alınması gereken basınç dayanımı değeri 3.5 MPa (Zafeiratos vd., 2019) iken, barajdaki basınç gerilmesi 1.8-1.9 MPa arasındadır). Ancak  $a=5$  m olan barajın hava payı 1 m olması durumunda, bloksuz barajın  $h_w=1$  m için meydana gelen yer değiştirme değeriyle karşılaştırılmasında, barajın üst bloğu tehlikede olduğunu gösteriyor.



**Şekil 4.12.** Baraja etki eden hidrostatik kuvvetlerden dolayı baraj üst kısmında minimum asal gerilme görünümü ( $a=5$ ,  $h_w=1, 3, 5$  m)

#### 4.2.7. Katı Dolgu Baraj Üst Bloğunun $a=8$ m ve Hava Payı $h_w= 1, 3, \text{ ve } 5$ m Olması Durumu



**Şekil 4.13.** Üst bloğu  $a=8$  m olan barajın farklı hava payı ( $h_w$ ) görünümü

Enkesitleri Şekil 4.13'te verilen barajın gövde yüksekliği 92 m, bloğun yüksekliği  $a=8$  m, şev eğimi 0.7y/1.0d olması ve rezervuar ortamı dolu su seviyesi kretten 1 m aşağıda olması durumunda maksimum yatay yer değiştirmesi 0.33 cm, krette oluşan yer değiştirmesi 0.331 cm'dir. Düşey olarak barajda meydana gelen yer değiştirmesi -0.51 cm, krette meydana gelen düşey yer değiştirmesi -0.51 cm'dir. Baraj gövdesinde maksimum asal gerilme 0.632 MPa ve minimum asal gerilme ise -1.813 MP olarak elde edilmiştir.

Baraj gövde yüksekliği 92 m, başlığın yüksekliği  $a=8$  m, şev eğimi 0.7y/1.0d olması ve rezervuar ortamı dolu su seviyesi kretten 3 m aşağıda olması durumunda maksimum yatay yer değiştirmesi 0.295 cm, krette meydana gelen yatay yer değiştirmesi 0.295 cm'dir. Düşey olarak barajda meydana gelen yer değiştirmesi -0.501 cm, krette meydana gelen düşey yer değiştirmesi -0.501 cm'dir. Baraj gövdesinde minimum asal gerilme değeri -1.807 MPa ve maksimum asal gerilme değeri 0.664 MPa olarak elde edilmiştir.

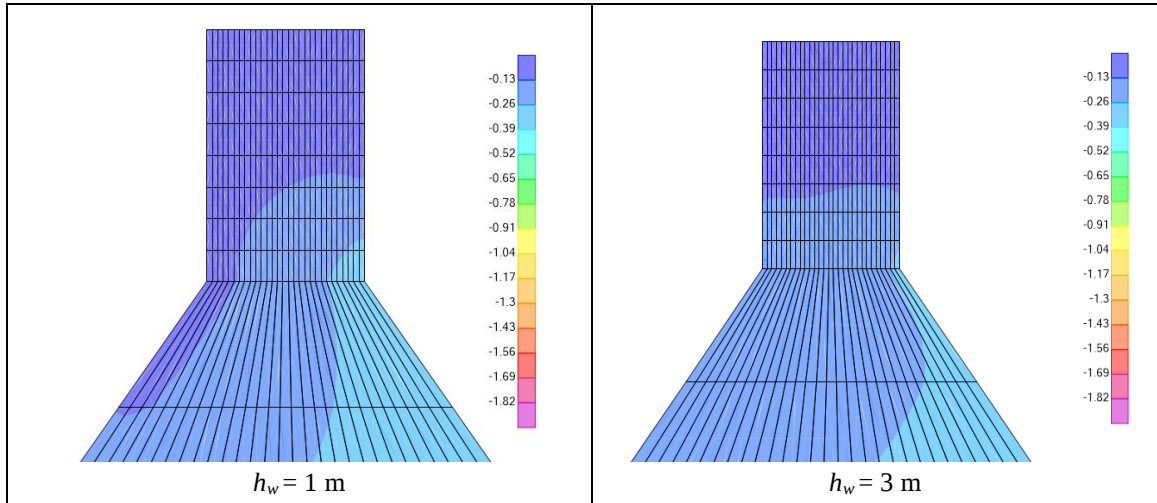
Baraj gövde yüksekliği 92 m, başlığın yüksekliği  $a=8$  m, şev eğimi 0.7y/1.0d olması ve rezervuar ortamı dolu su seviyesi kretten 5 m aşağıda olması durumunda maksimum yatay yer değiştirmesi 0.26 cm, krette oluşan yer değiştirmesi 0.26 cm'dir. Düşey olarak barajda meydana gelen yer değiştirmesi -0.494 cm, krette meydana gelen düşey yer değiştirmesi -0.494 cm'dir. Baraj gövdesinde maksimum asal gerilme 0.667 MPa ve minimum asal gerilme -1.795 MPa olarak elde edilmiştir.

**Tablo 4.11.** Katı dolgu baraj üst bloğunun  $a=8$  m olduğunda farklı hava payı ( $h_w$ ) durumu

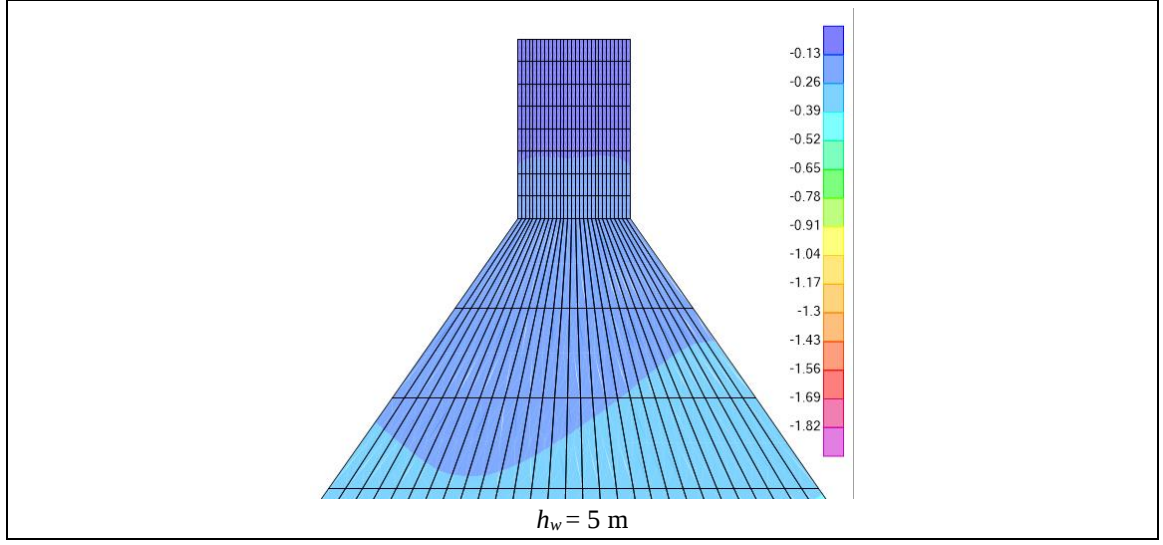
| Hava payı<br>(m) | Yatay yer<br>değiştirme<br>(cm) | Krette oluşan<br>yatay yer<br>değiştirme<br>(cm) | Krette oluşan<br>düşey yer<br>değiştirme<br>(cm) | Maksimum<br>asal gerilme<br>(kPa) | Minimum<br>asal gerilme<br>(kPa) |
|------------------|---------------------------------|--------------------------------------------------|--------------------------------------------------|-----------------------------------|----------------------------------|
| $h_w=1$          | 0.331                           | 0.331                                            | -0.51                                            | 632                               | -1813                            |
| $h_w=3$          | 0.295                           | 0.295                                            | -0.501                                           | 664                               | -1804                            |
| $h_w=5$          | 0.26                            | 0.26                                             | -0.494                                           | 667                               | -1795                            |

Tablo 4.11’deki değerlere bakıldığında  $a=8$  m olan bir katı dolgu barajın  $h_w= 1, 3, 5$  m olması durumunda, hava payı değeri arttıkça (su seviyesi azaldıkça), hem krette hem baraj gövdesinde yatay ve düşey olarak yer değiştirmelerin azalması görülmektedir.  $a=8$  m olan bir katı dolgu barajın tüm “ $h_w$ ” değerleri için maksimum yatay yer değiştirmesi krette meydana gelmiştir. Blok yüksekliği  $a=8$  m olan barajın kretinde  $h_w= 1, 3, 5$  m için meydana gelen yatay yer değiştirmeleri, bloksuz ( $a=0$ ) barajın  $h_w= 1, 3, 5$  m için meydana gelen yatay yer değiştirmelerine göre sırasıyla %40.85, %37.85, %34.02 daha fazladır.

Baraj gövdesi üzerinde oluşan minimum ve maksimum asal gerilme değerlerine bakılarak hava payı değeri yükseldikçe (yani su seviyesi azaldıkça) barajın üst kısmındaki blokta çekme gerilmesinin azalmasına, baraj gövdesinde oluşan maksimum asal gerilme değerlerin büyümesine ve minimum asal gerilme değerlerin de büyümesine (çekme gerilmelerin büyümesine ve basınç gerilmelerin de küçülmesine) neden olmaktadır. Baraj gövdesinin üst kısmındaki çekme gerilmesine bakıldığında, su seviyesi yükseldikçe blokta çekme ve basınç değerlerinin artışı görülür. Baraj gövdesinde ve üst kısmındaki blokta oluşan gerilmeler sürekli emniyet gerilmesinin altındadır (Yani SSB’nin çekme dayanımı 1.3 MPa iken barajdaki çekme gerilmesi 0.6-0.7 MPa arasındadır. Aynı şekilde simetrik yüzlü katı dolgu barajların tasarımında dikkate alınması gereken basınç dayanımı değeri 3.5 MPa (Zafeiratos vd., 2019) iken, barajdaki basınç gerilmesi 1.8-1.9 MPa arasındadır). Ancak  $a=8$  m olan barajın kretinde meydana gelen yatay yer değiştirmesi,  $a=0$  m olan baraja göre yaklaşık %40’lık bir fark,  $a=8$  m olan barajın üst kısmı tehlikede olduğunu gösteriyor. Şekil 4.14’te baraj üst kısmında oluşan basınç gerilmesi görülmektedir.



**Şekil 4.14.** Baraja etki eden hidrostatik kuvvetlerden dolayı baraj üst kısmında minimum asal gerilme görünümü ( $a=8$ ,  $h_w= 1, 3, 5$  m)



**Şekil 4.14 (Devamı).** Baraja etki eden hidrostatik kuvvetlerden dolayı baraj üst kısmında minimum asal gerilme görünümü ( $a=8$ ,  $h_w= 1, 3, 5 \text{ m}$ )

## 5. SONUÇ

Bu çalışmada, aynı yüksekliklere sahip bir katı dolgu baraj enkesitinde üst kısmındaki gövde elemanın (bloğun) statik yüklere maruz kaldığında elastik davranışlarını incelenmiştir. Baraj, sonlu elemanlar yöntemiyle modellenmiş üst kısmında normal ve sık sonlu eleman ağ sistemi kullanılmıştır. Baraj temeli sağlam kaya (rijit) alınmıştır. Temelden gelen kaldırma basıncı dikkate alınmamıştır. Analizler, baraj yüksekliği sabit (100 m) tutularak baraj üst kısmındaki blok yüksekliği  $a=0, 3, 5$  ve 8 m olarak alınmıştır. Rezervuar hidrostatik su yükünün tesirini görmek için de rezervuarın tam dolu ve rezervuar su seviyesi kretten 3 m aşağıda kabul edilmiştir. İkinci denemede Seçilen her bir katı dolgu baraj enkesitinin blok yüksekliği  $a=0, 3, 5, 8$  m için hava payları 1, 3, 5 m olarak dikkate alınmıştır. Barajın şev eğimi 0.7y/1.0d olarak seçilmiştir.

Statik analiz sonucunda meydana gelen yer değiştirmeleri incelendiğinde, baraj gövdesinin üst kısmındaki gövde elemanının (bloğun) yüksekliği arttıkça meydana gelen yatay yer değiştirmelerin arttığı görülmektedir. Ancak baraj gövdesinin üst kısmındaki gövde elemanının yüksekliği arttıkça meydana gelen düşey yer değiştirmelerin küçüldüğü görülmüştür. Bunun yanı sıra hava payı değerinin artışına bağlı olarak krette meydana gelen yatay ve düşey yer değiştirme değerlerinin küçüldüğü görülmüştür.

Minimum ve maksimum asal gerilme değerlerinin incelendiğinde, baraj gövdesinin üst kısmındaki gövde elemanının (bloğun) yüksekliği arttıkça baraj üst kısmındaki blokta ve baraj gövdesinde minimum asal gerilme değerlerinin küçülmesine (basınç gerilme değerlerinin büyümesine) neden olmaktadır. Maksimum asal gerilmesi ise, blok yüksekliği  $a=0, 3, 5$  m için baraj gövdesi üzerinde oluşan maksimum asal gerilme değerlerinin büyümesi (çekme gerilmesinin büyümesi), ama  $a=8$  m ve daha fazla blok yüksekliği için baraj topuğunda maksimum asal gerilme değerlerinin tekrar küçülmesi (çekme gerilmesinin küçülmesi) ve barajın üst kısmındaki blokta basınç gerilmesinin büyümesi görülmektedir. Barajın üst kısmındaki bloğun yüksekliği  $a=0, 3, 5$  m için hava payı değeri büyüdükçe, baraj gövdesinde oluşan maksimum asal gerilme değerlerinin küçülmesi ve minimum asal gerilme değerlerinin de büyümesine (çekme ve basınç gerilmesinin küçülmesine) neden olmaktadır. Ancak blok yüksekliği  $a=8$  m ve daha fazla blok yükseklikleri için baraj topuğunda maksimum asal gerilme değerlerinin tekrar azalması (çekme gerilmesinin küçülmesi) ve barajın üst kısmındaki blokta çekme gerilmesinin büyümesi görülmektedir. Çekme gerilmesi baraj topuğunda 0.6-0.7 MPa, baraj ön ayağında yaklaşık 0.05 MPa ve baraj üst kısmındaki blokta yaklaşık 0.02 MPa oluşmaktadır. Barajın tüm durumları için çekme gerilmesi, betonun çekme dayanımının (1.3 MPa) altındadır. Basınç gerilmesi ise baraj gövdesinin üst kısmından aşağıya doğru büyümektedir ama hiçbir zaman basınç emniyet gerilmesini aşmamaktadır (Yani simetrik yüzlü katı dolgu barajların tasarımında dikkate alınması gereken basınç dayanımı değeri 3.5 MPa

iken, barajdaki basınç gerilmesi 1.7-1.9 MPa arasındadır). Deprem gibi dinamik yükler altında bu tip barajların lineer olmayan davranışı hesaba katılarak araştırmanın genişletilmesi gerekmektedir.

Sonuç olarak:

- Blok yükseklikleri  $a=3, 5, 8$  m olan barajın kretinde, bloksuz ( $a=0$  m) baraja göre, sırasıyla %10.74, %18.69 ve %37.38 daha fazla yatay yer değiştirme meydana gelmiştir.
- $a=5$  m olan barajın  $h_w=1$  m için meydana gelen yatay yer değiştirme, bloksuz barajın aynı hava payı değerine göre %29.78 daha fazla yatay yer değiştirme meydana gelmiştir. Bu da normal yer değiştirme değerinin artışından daha fazla görünüyor.
- $a=8$  m olan barajın tüm " $h_w$ " değerlerine karşı meydana gelen yatay yer değiştirme değerlerine bakıldığında, bloksuz barajın tüm " $h_w$ " değerlerinin yatay yer değiştirmelerine göre,  $a=8$  m olan barajda sırasıyla %40.85, %37.85, %34.02 daha fazla yatay yer değiştirme meydana gelmiştir.
- Baraj gövdesi ile gövdenin üst kısmındaki blok arasında minimum asal gerilme değerlerine bakılarak, " $a$ " değeri arttıkça barajın üst kısmındaki blokta basınç gerilmesinin artışı görünüyor.
- $a=3, 5, 8$  m blok yükseklikleri için çekme gerilmesi barajın topuğunda meydana gelmiştir, ancak  $a=8$  m ve daha fazla blok yükseklikleri için baraj topuğunda çekme gerilmesi azalarak barajın üst kısmındaki blokta artıyor.
- Baraj gövdesinde ve gövdesinin üst kısmındaki blokta çekme ve basınç gerilme değerleri sürekli emniyet gerilmesinin altındadır. Ancak katı dolgu barajlarda kullanılan betonun çekme mukavemeti düşük olduğundan,  $a=5$  m olan barajın  $h_w=1$  m ve  $a=8$  m olan barajların üst bloğunda fazla yer değiştirmelerinden dolayı çatlaklar meydana gelebilir.
- Baraj üst bloğunun  $a=3, 5, 8$  m olması durumunda bloksuz ( $a=0$  m) baraja göre sırasıyla %5.51, %9.10, %14.34 daha az beton kullanılmaktadır.
- Barajın kaymaya ve devrilmeye karşı güvenlik faktörü değerlerine bakıldığında, baraj üst bloğun tüm yükseklikler boyunca kaymaya karşı güvenlik faktörü 2.0 üzere ve devrilmeye karşı güvenlik faktörü 2.5 ile 3.0 arasında veya daha fazladır. Aynı şekilde baraj topuğunda gerilme değerlerine bakıldığında, baraj üst bloğun tüm yükseklikler boyunca minimum gerilme değerleri sıfırdan büyüktür. Böylece, seçilen baraj enkesitleri için yapılan tahkikler sonucunda barajın emniyetli olduğu sonucuna varılmıştır.

## KAYNAKLAR

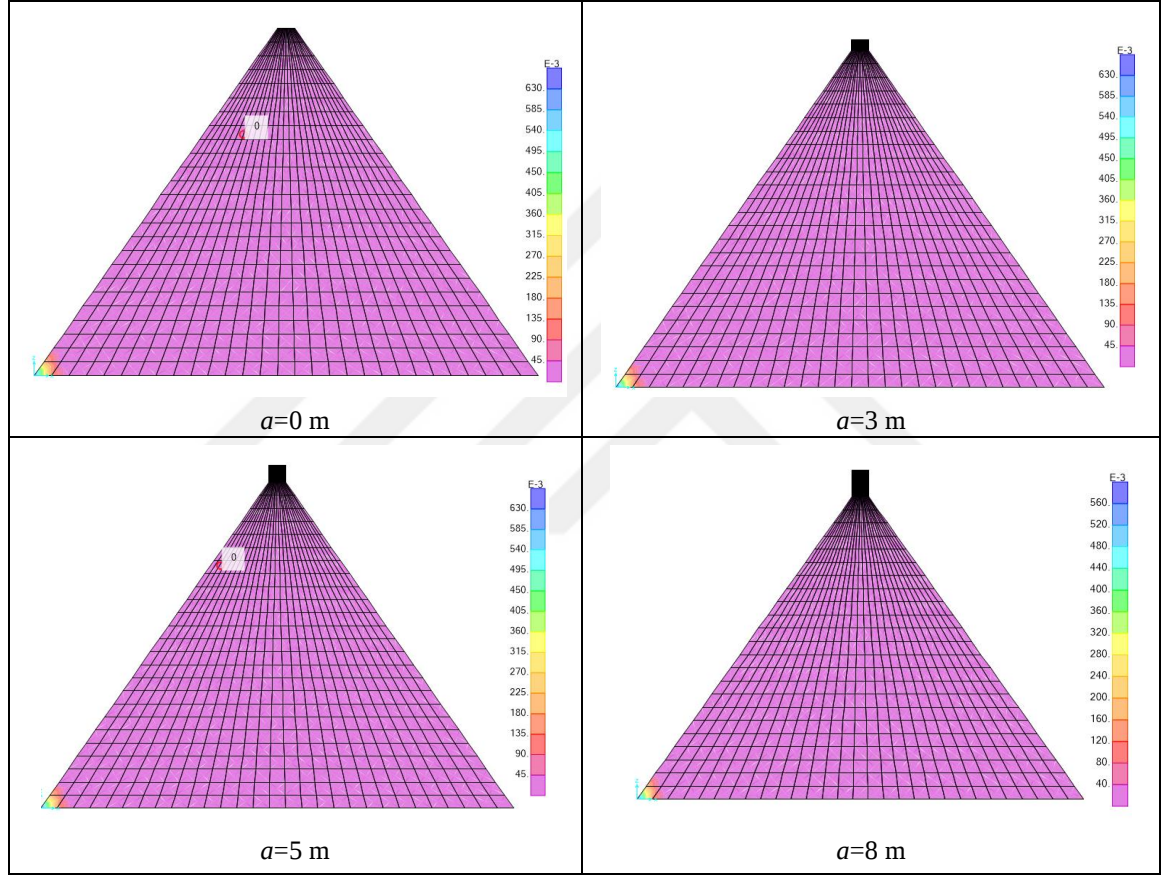
- ACI, (1999). Report on Roller-Compacted Mass concrete, ACI, 207.5R-99, American concrete institute
- ACI, (2011). Report on Roller-Compacted Mass concrete, ACI 207.5R-11, American Concrete Institute.
- Aghabaglou, A.M., Bayqra, S.H., Özen, S., Altun, M.G., & Faqiri, Z.A., (2019). Silindirle sıkıştırılmış beton karışımlarının tasarım yöntemleri ve yapılan çalışmalar. Pamukkale University Journal of Engineering Sciences. DOI: 10.5505/pajes.2019.93530
- Al Baghdady, S., and Khan, L., (2018). Designing Roller compacted concrete (RCC) dams, Master thesis, Royal Institute of Technology (KTH) Department of Civil and Architectural Engineering, Stockholm, Sweden
- ASTM C494, (2018). Standard Specification for Chemical Admixtures for Concrete, American Society for Testing and Materials.
- ASTM C618 (2018): Standard Specification for Coal Fly Ash and Raw or Calcined Natural Pozzolan for Use in Concrete, American Society for Testing and Materials.
- Barcelo, L., Clavaud, B., & Moranville, M (2005): Autogenous shrinkage of concrete: a balance between autogenous swelling and self-destruction. Cement concrete research 35.
- BASF, (2014). Concrete Technology in focus – Shrinkage of concrete. Accessible from [12-06-2018] [https://insights.basf.com/files/pdf/Shrinkage\\_Of\\_Concrete\\_CTIF.pdf](https://insights.basf.com/files/pdf/Shrinkage_Of_Concrete_CTIF.pdf)
- Broucek, B., & Satrapa, L. (2020). Recent enhancement of the RCC technology in dam engineering, AIP Conference Proceedings 2210, 020003(2020)
- Cannon, R.V., (1995). Seismic Design Provisions for Roller Compacted Concrete Dams; Appendix E Tensile Strength of Roller Compacted Concrete, Engineer Pamphlet 1110-2-12, U.S. Army Corps of Engineers.
- Çiçek, M., (2007). Zayıf Temeller Üzerinde İnşa Edilen SSB Barajların Statik Analizi, Yüksek lisans tezi, Fırat Üniversitesi, İnşaat mühendisliği.
- Emiroğlu, M.E. (2012) Barajlar ders notu. Fırat üniversitesi, İnşaat mühendisliği, Elazığ.
- Emiroğlu, M.E., (1998b). “RCC Barajların Tasarım ve İnşasındaki Gelişmeler”, Gap II. Mühendislik Kongresi Bildiriler Kitabı, Harran Üni. Müh. Fak., 21-23 Mayıs 1998, Sayfa: 191-200.
- Guillemot, T and Lino, M., (2012) Design and Construction Advantages of Hardfill Symmetrical Dams – Case study: Safsaf dam in eastern Algeria, 6<sup>th</sup>. international Symposium on roller compacted concrete dams Zaragoza, 23-25
- Güman, (2019). Silindirle Sıkıştırılmış Beton Baraj Örneği İhsaniye Barajı ve Enjeksiyon Uygulamaları, Yüksek lisans tezi, Sakarya Üniversitesi, İnşaat Mühendisliği.
- Hansen K.D & Reinhardt W.G (1991): Roller-Compacted Concrete Dams. McGraw-Hill, Inc.
- ICOLD, (2003). Roller-compacted concrete dams – State of the art and case histories, Bulletin 126, International Commission of Large Dams (ICOLD).
- Kılıç, Z., (2009). Kaya Olmayan Temeller Üzerinde İnşa Edilen Düşük Yükseklikteki SSB Barajların Statik Analizi, Yüksek lisans tezi, Fırat Üniversitesi, İnşaat Mühendisliği,
- Li, X., Zngang, S., Wu, H., Tian, D, (2020). Study on Stability and Reliability of Cement-Sand-Gravel Dam, IOP Conf. Ser.: Earth Environ. Sci. 513 012035
- Londe, P., & Lino, M. (1992). The faced symmetrical hardfill dam: a new concept for RCC. International water power & dam construction, 44(2), 19-24.
- Mason, P. J., Hughes, R. A. N., & Molyneux, J. D. (2008). The design and construction of a faced symmetrical hardfill dam. The international journal on hydropower & dams, 15(3), 90.
- PCA, (2006). Production of Roller-Compacted Concrete. Portland Cement Association. Accessible from [20-03-2021]. <http://secement.org/wp-content/uploads/2015/06/IS332.pdf>

- Peng, Y. & Yuan, Y. (2014). Analysis on the Dynamic Properties of Hardfill Materials, *Journal of Applied Science and Engineering Innovation*, Vol. 1, pp. 54-58.
- Shaw, Q.H.W, (2010): A new understanding of the early behavior of Roller Compacted concrete in large dams. PhD Thesis. University of Pretoria.
- Sika, (2019). *Roller Compacted Concrete Dams Handbook*, Tüffenwies 16. CH-8048, Zürich.
- Soğut. S, (2014). State of the art in RCC dams, design and construction, Master thesis, Middle east technical university, Civil engineering.
- USACE, (2000): *Roller compacted concrete*, EM 1110-2-2006. US Army Corps Engineers.
- USBR, (2017). *Design and Construction Considerations for Hydraulic structures – Roller compacted concrete*, Second edition. US Department of the Interior Bureau of Reclamation.
- Wei, L., Wei, P., Yang y., (2020). Static Calculation and Analysis of Certain Gravity Dam, *Journal of Physics: Conference Series*. 1550 032006
- Xiong, K., Weng, Y., & He, Y., (2013). Seismic failure modes and seismic safety of Hardfill dam, *Water Science and Engineering*, 2013, 6(2): 199-214. doi:10.3882/j.issn.1674-2370.2013.02.008
- Zafeiratos, E., Psycharis, I., & Papanico, P., (2019). Dynamic behavior of faced symmetrical hardfill dams, 11th ICOLD European Club Symposium, Chania, Crete, 2-4 October 2019.

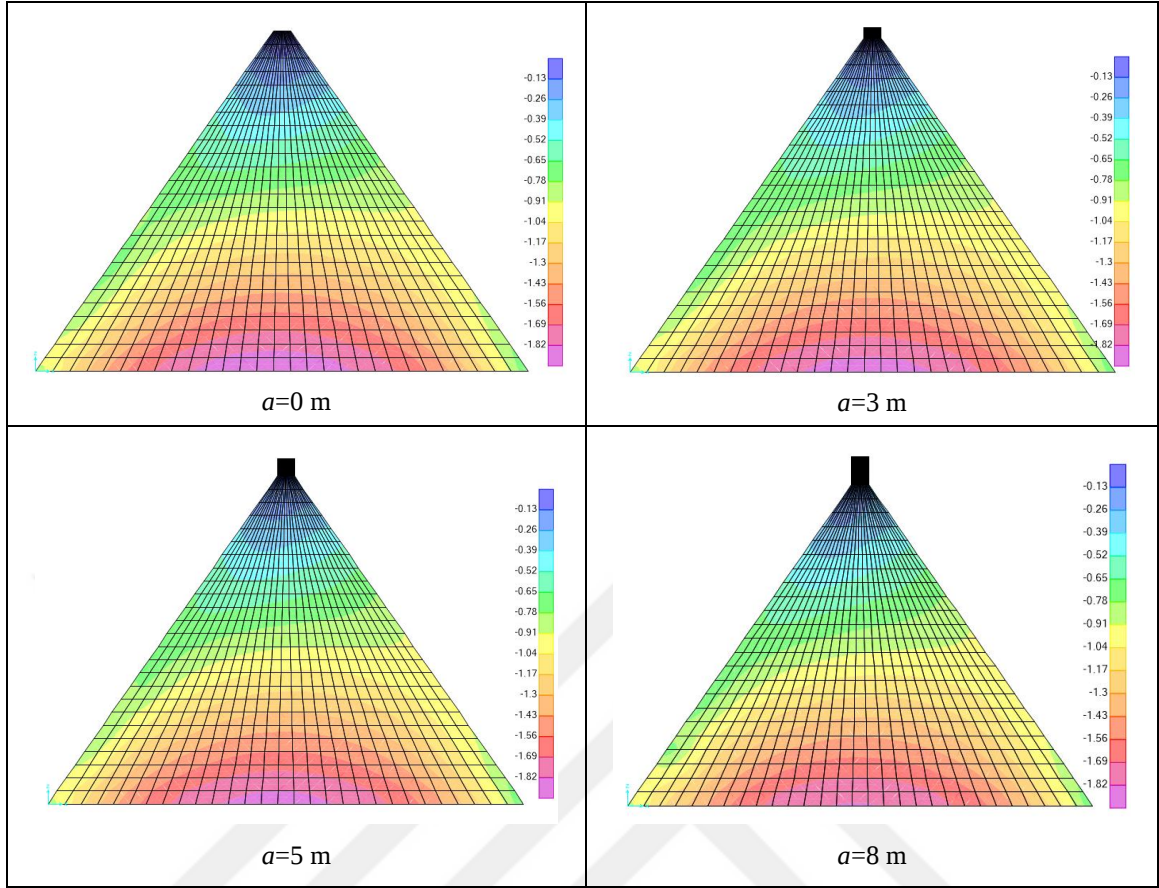
## EKLER

### EK- 1: BARAJ GÖVDESİNDE OLUŞAN MİNİMUM VE MAKSİMUM ASAL GERİLME (SIK VE NORMAL SONLU ELEMAN AĞ SİSTEMİ)

Baraj gövde elemanının üst kısmındaki bloğun yüksekliği  $a=0, 3, 5, 8$  m ve sık sonlu eleman ağı sistemi durumunda, yüksekliği 100 m ve şev eğimi 0.7y/1.0d olması için baraj gövdesinde oluşan minimum ve maksimum asal gerilme görünümü.

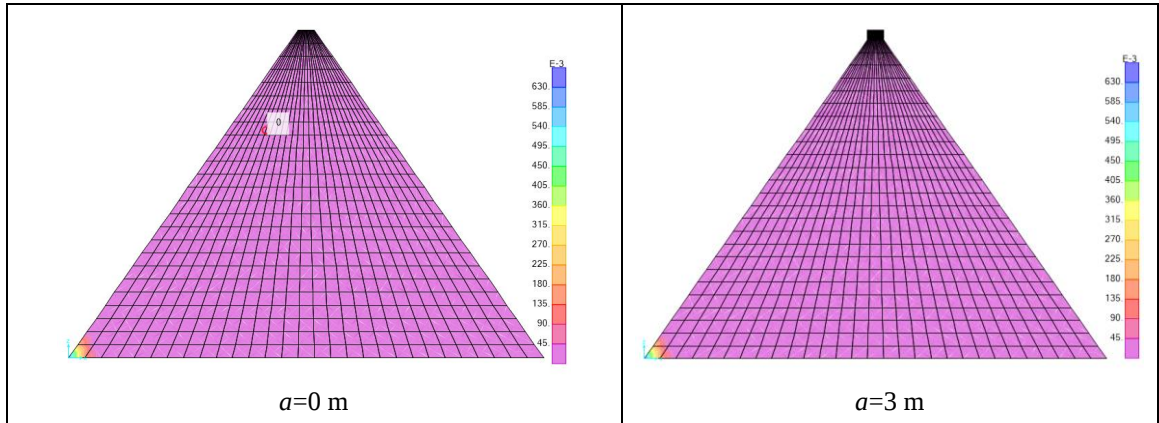


Şekil EK.1.1. Baraj üst kısmındaki bloğun sık sonlu eleman ağı sistemi durumunda maksimum asal gerilme görünümü

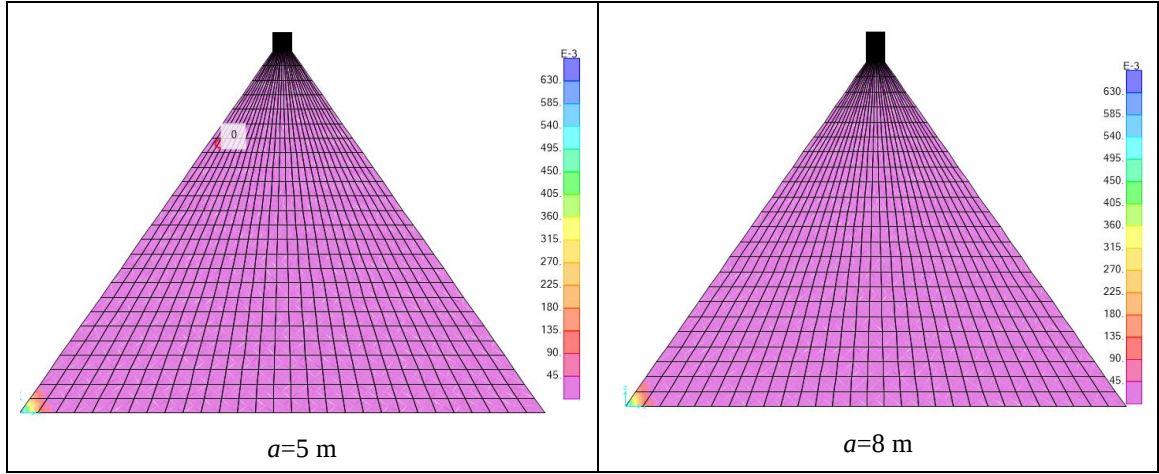


**Şekil EK.1.2.** Baraj üst kısmındaki bloğun sık sonlu eleman ağ sistemi durumunda minimum asal gerilme görünümü

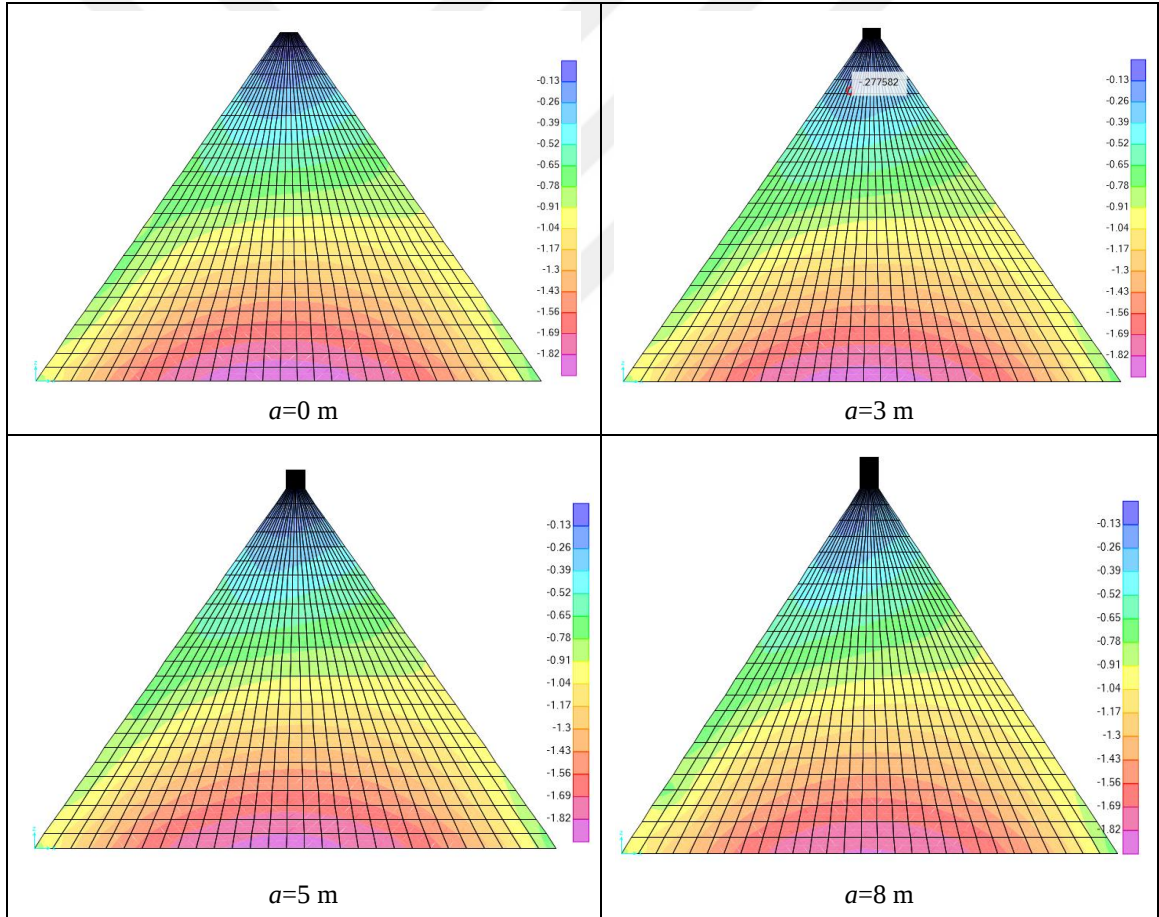
Baraj gövde elemanının üst kısmındaki bloğun yüksekliği  $a=0, 3, 5, 8$  m ve normal sonlu eleman ağ sistemi durumunda, yüksekliği 100 m ve şev eğimi 0.7y/1.0d olması için baraj gövdesinde oluşan minimum ve maksimum asal gerilme görünümü.



**Şekil EK.1.3.** Baraj üst kısmındaki bloğun normal sonlu eleman ağ sistemi durumunda maksimum asal gerilme görünümü

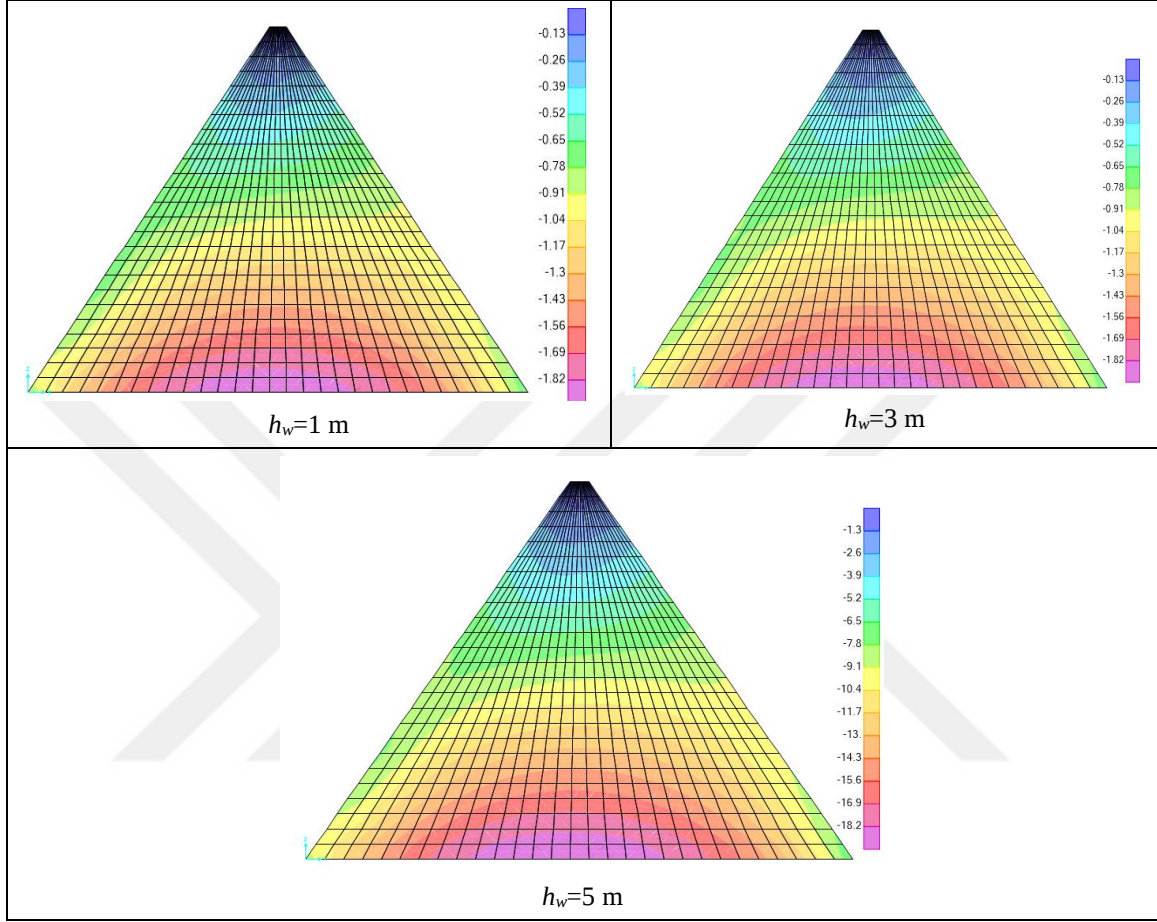


Şekil EK.1.3 (Devamı). Baraj üst kısmındaki bloğun normal sonlu eleman ağ sistemi durumunda maksimum asal gerilme görünümü

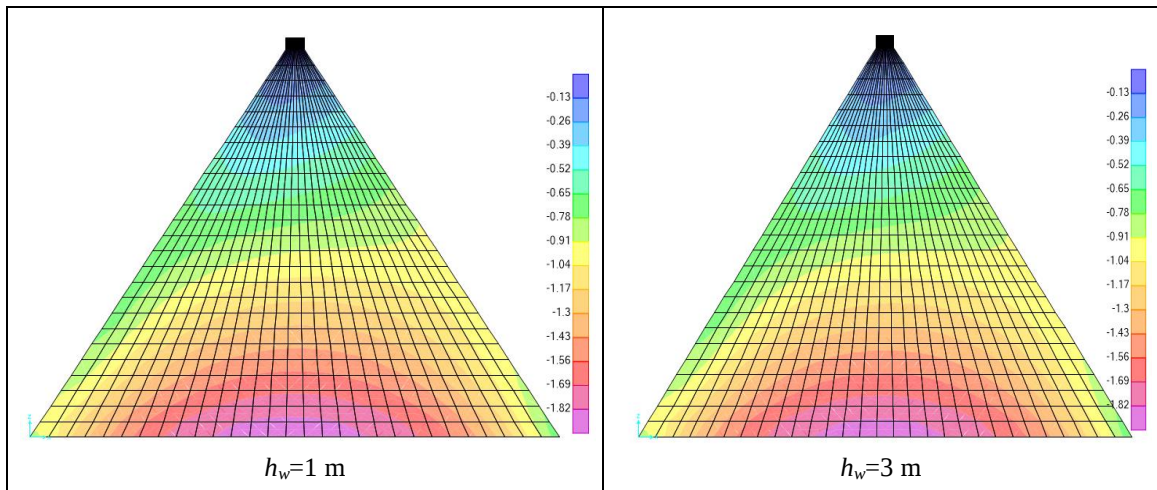


Şekil EK.1.4. Baraj üst kısmındaki bloğun normal sonlu eleman ağ sistemi durumunda minimum asal gerilme görünümü

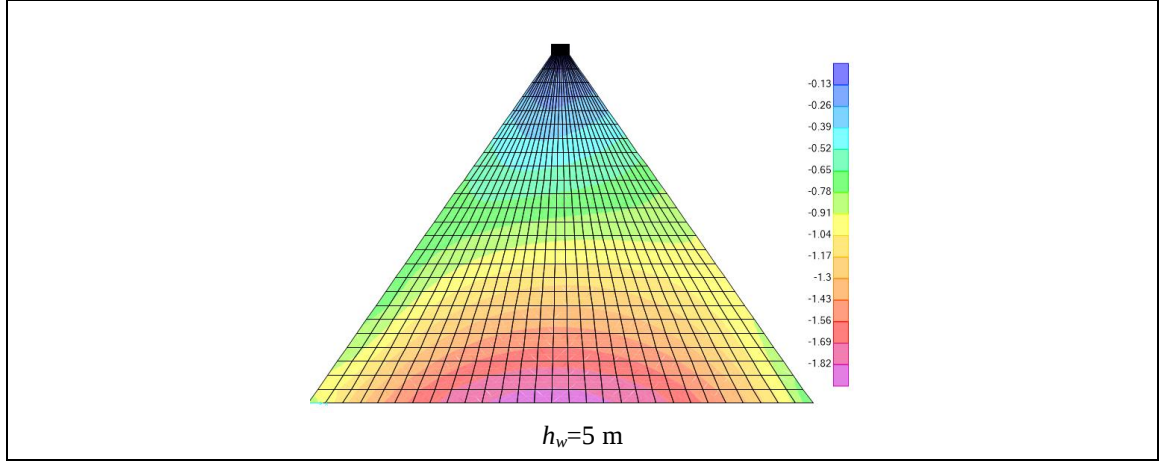
**EK- 2: BARAJ GÖVDE ELEMANININ ÜST KISMINDAKİ BLOĞUN YÜKSEKLİĞİ  $a=0, 3, 5$  VE 8 M, HAVA PAYI  $h_w=1, 3$  VE 5 M OLMASI DURUMUNDA BARAJ GÖVDESİNDE OLUŞAN MİNİMUM ASAL GERİLME**



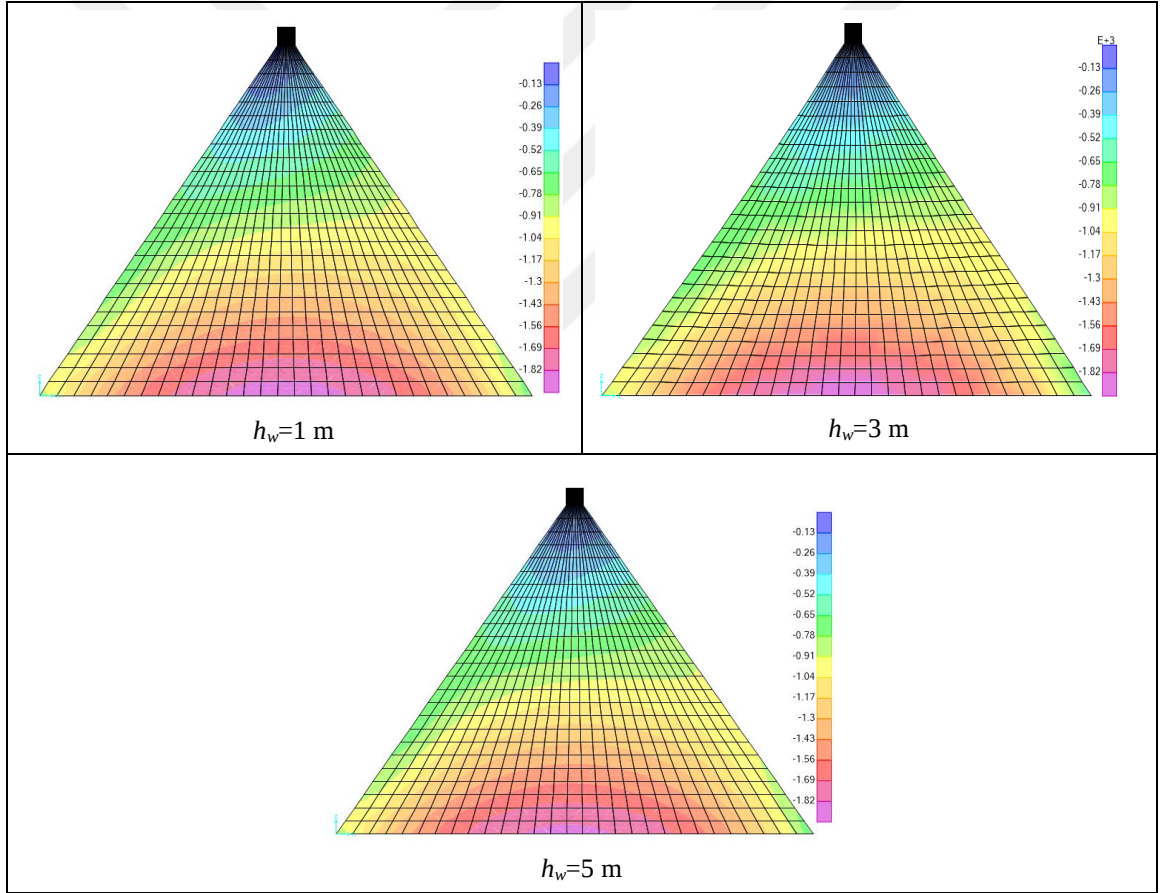
**Şekil EK.2.1.** Baraj üst kısmındaki bloğun yüksekliği  $a=0$  m ve farklı hava payı durumlarında baraj gövdesinde oluşan minimum asal gerilme görünümü



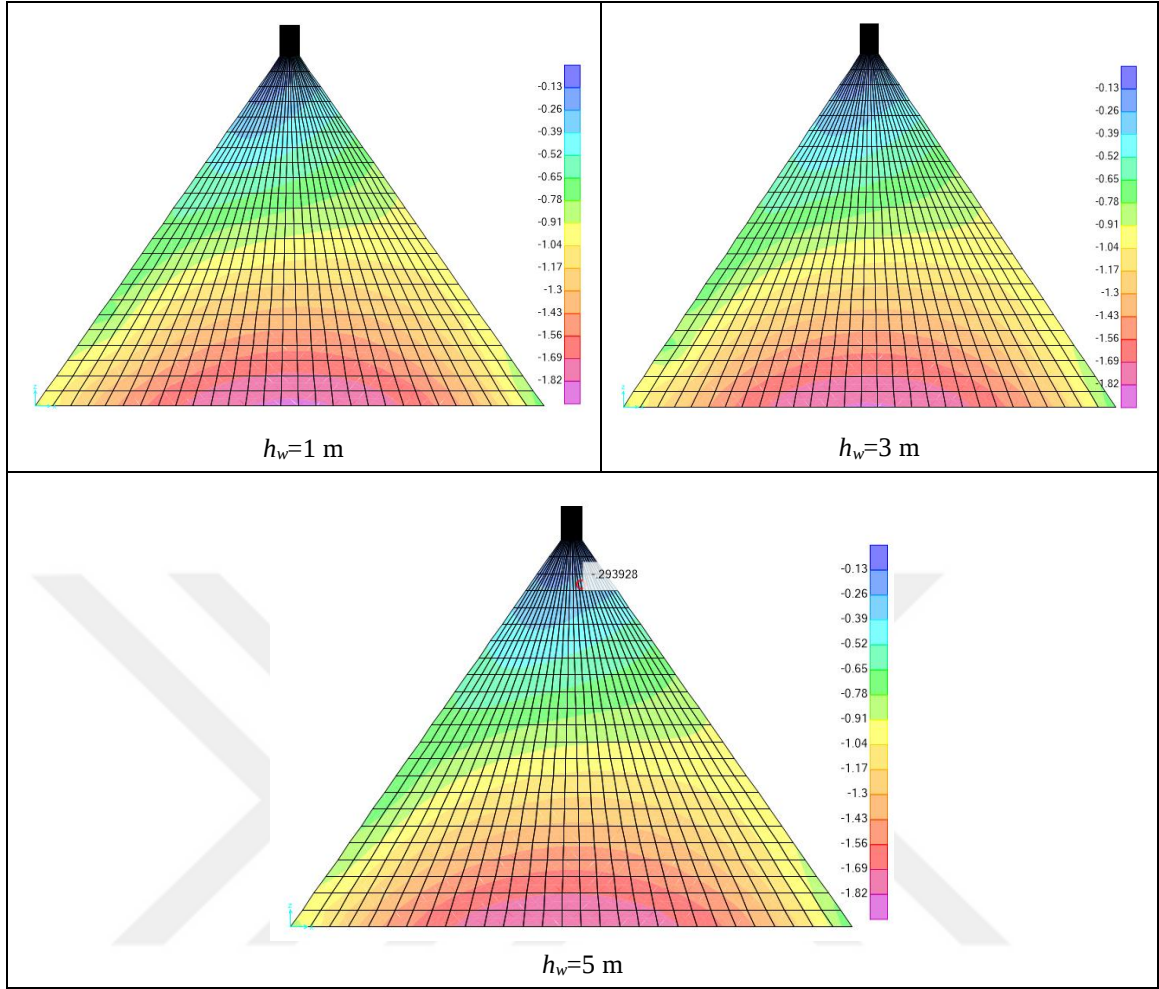
**Şekil EK.2.2.** Baraj üst kısmındaki bloğun yüksekliği  $a=3$  m ve farklı hava payı durumlarında baraj gövdesinde oluşan minimum asal gerilme görünümü



Şekil EK.2.2 (Devamı). Baraj üst kısmındaki bloğun yüksekliği  $a=3 \text{ m}$  ve farklı hava payı durumlarında baraj gövdesinde oluşan minimum asal gerilme görünümü



Şekil EK.2.3. Baraj üst kısmındaki bloğun yüksekliği  $a=5 \text{ m}$  ve farklı hava payı durumlarında baraj gövdesinde oluşan minimum asal gerilme görünümü



**Şekil EK.2.4.** Baraj üst kısmındaki bloğun yüksekliği  $a=8$  m ve farklı hava payı durumlarında baraj gövdesinde oluşan minimum asal gerilme görünümü

## ÖZGEÇMİŞ

Fahim QAYUMI

|  |  |
|--|--|
|  |  |
|  |  |
|  |  |
|  |  |
|  |  |
|  |  |
|  |  |
|  |  |

|  |  |
|--|--|
|  |  |
|  |  |
|  |  |

|  |  |
|--|--|
|  |  |
|  |  |
|  |  |

### ARAŞTIRMA DENEYİMİ

- ✓ 115M478 numaralı TÜBİTAK 1001 Projesinde Bursiyer
- ✓ Kullanılan Programlama Dili: C++
- ✓ Kullanılan Bilgisayar Programları: MS Office, AutoCad, IdeCAD, SAP2000, Revit, Abaqus
- ✓ Yüksek Lisans, Erasmus: Gdansk University of Technology, Gdansk, Polonya (Erasmus), 2019-2020