

T.C.
FIRAT ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ



KATI DOLGU BARAJLARIN EKONOMİK VE STATİK ANALİZİ

Miray ÜNAL

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 BARAJLARIN EKONOMİK VE STATİK ANALİZİ

Tez Yazarı
Miray ÜNAL

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 Barajların Ekonomik ve Statik Analizi
Yazarı: Miray ÜNAL
İlk Teslim 16.06.2021
Savunma 26.07.2021

TEZ ONAYI

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

Danışman:	Prof. Dr. Muhammet Emin EMİROĞLU Fırat Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi	<i>İmza</i> Onayladım
Başkan:	Doç. Dr. Muhammet KARATON Fırat Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi	Onayladım
Üye:	Prof. Dr. Mehmet Cihan AYDIN Bitlis Eren Üniversitesi, Mühendislik Mimarlık 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 Barajların Ekonomik ve Statik Analizi” yüksek lisans tezimin içindeki bütün bilgilerin doğru olduğunu, bilgilerin üretilmesi ve sunulmasında 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 hiçbir şekilde kullanmadığımı beyan ederim.

26.07. 2021

Miray ÜNAL



ÖNSÖZ

Bu yüksek lisans çalışmasında SAP2000 paket programı kullanılarak bir katı dolgu baraj üzerinde lineer ve parabolik modeller tasarlanmıştır. Bu sayede bir katı dolgu barajın memba ve mansap yüzeylerinde değişiklik sağlanıp farklı bir geometri ile aynı ya da daha düşük gerilmeler sağlanabilirliği araştırılmış olup, baraj gövdesi hacminde elde edilebilecek maksimum fayda oranı yüzdelik olarak hesaplanmıştır. Bu çalışma ile tasarımcılara yeni bir fikir önerilmektedir.

Lisans eğitimim süresince beni akademik duruşu ve başarılarıyla etkileyen, bana yüksek lisans yapma fikri veren, tez konusu belirlerken yardımcı olan aynı zamanda da bana tezin yapılabilirliği açısından destek ve cesaret veren, benim hayatımda bu sözler dahilinde ifade edemeyeceğim kadar değerli olan ağabeyim Prof. Dr. M. Emin EMİROĞLU'na, yine lisans eğitimimde tanıdığım SAP2000 paket programı hakkında bana bütün samimiyeti ile yardımcı olan ve benden desteğini esirgemeyen Doç. Dr. Muhammed KARATON'a, bana kuvvet fonksiyonu tabanlı baraj gövdesi enkesit denklemlerinde yardım eden, kapısı her zaman her öğrencisine açık olan güzel yürekli hocam Prof. Dr. Ragıp İNCE'ye bütün samimi duygularıyla teşekkür ve şükranlarımı sunarım.

Miray ÜNAL

ELAZIĞ, 2021

İÇİNDEKİLER

	Sayfa
ÖNSÖZ.....	iv
İÇİNDEKİLER	v
ÖZET	vii
ABSTRACT	viii
ŞEKİLLER LİSTESİ	ix
TABLolar LİSTESİ	x
EKLER LİSTESİ	xii
SİMGELER VE KISALTMALAR	xiii
1. GİRİŞ	1
2. LİTERATÜR ÖZETİ	3
3. BARAJ TÜRLERİ VE YAPIM KRİTERLERİ	7
3.1. Barajların Sınıflandırılması	7
3.2. Baraj Tip Seçimi	8
3.3. Baraj Türleri.....	9
3.3.1. Beton Barajlar.....	11
3.3.2. Katı Dolgu Baraj	23
3.3.3. Payandalı Barajlar	25
3.3.4. Kemer Barajlar	25
4. MATERYAL VE METOT	26
4.1. Sonlu Elemanlar Yöntemi Kullanılarak Yapılan Statik Analizler.....	26
4.1.1. İzoparametrik Elemanlar	26
4.2. SAP2000 Sonlu Elemanlar Yöntemi Hakkında Genel Bilgi	32
4.3. Gövde Hacmini Azaltmak İçin Memba ve Mansap Şevlerinin Seçimi	32
4.4. Ağırlık Barajlarında Yapılan Tahkikler	34
4.4.1. Kayma Tahkiki	34
4.4.2. Devrilme Tahkiki	35
4.4.3. Gerilme Tahkiki	35
4.5. Simetrik Yüzlü Katı Dolgu Barajın Lineer ve Kuvvet Fonksiyonu Tabanlı Baraj Gövdesi Enkesit Denklemleri Kullanılarak Oluşturulan Durumlarının Hacimleri Karşılaştırılması	35
4.6. Değişen Hacimlerin Yüzdelik Hesabı	37
5. FARKLI ENKESİTLERE SAHİP KATI DOLGU BARAJLARIN STATİK ANALİZİ	38
5.1. Katı Dolgu Baraj İçin Yapılan Lineer Elastik ve Kuvvet Fonksiyonu Tabanlı Baraj Gövdesi Enkesit Denklemlerinin Kullanılmasıyla Yapılan Statik Analizler	38

5.2. Katı Dolgu Baraj Şevinin Temelli Ve Rijit Ortamlarda (0.7y/1.0d) Olması Durumu.....	42
5.3. Katı Dolgu Baraj Şevinin Temelli Ve Rijit Ortamlarda Kuvvet Fonksiyonu Tabanlı Baraj Gövdesi Enkesit Denklemine Göre Kuvvet Derecesi $N=1.1$ Olması Durumu	45
5.4. Katı Dolgu Baraj Şevinin Temelli Ve Rijit Ortamlarda Kuvvet Fonksiyonu Tabanlı Baraj Gövdesi Enkesit Denklemine Göre Kuvvet Derecesi $N=1.5$ Olması Durumu	47
5.5. Katı Dolgu Baraj Şevinin Temelli Ve Rijit Ortamlarda Kuvvet Fonksiyonu Tabanlı Baraj Gövdesi Enkesit Denklemine Göre Kuvvet Derecesi $N=2.0$ Olması Durumu	50
5.6. Katı Dolgu Baraj Şevinin Temelli Ortamlarda Kuvvet Fonksiyonu Tabanlı Baraj Gövdesi Enkesit Denklemini Dereceleri $N=1.1$, $N=1.5$, $N=2.0$ İken Parabolik Şev Başlangıcı Baraj-Temel Yüzey Alanından 20 M Yükseklikte Başlatılması Durumu	52
5.6.1. Baraj Memba ve Mansap Şevleri Uygulama Aşamasında Nasıl İnşa Edileceği Hakkında Bilgi	58
5.6.2. Baraj Gövdesinin Tasarım Dayanımı Sağlama Hesapları	58
6. SONUÇLAR VE ÖNERİLER.....	61
6. 1. Sonuçlar	61
6. 2. Öneriler	63
KAYNAKLAR.....	64
EKLER	66
ÖZGEÇMİŞ	

ÖZET

Katı Dolgu Barajların Ekonomik ve Statik Analizi

Miray ÜNAL

Yüksek Lisans Tezi

FIRAT ÜNİVERSİTESİ
Fen Bilimleri Enstitüsü

İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı
Temmuz 2021, Sayfa xiii+82

Silindirle Sıkıştırılmış Beton (SBB) barajlar; ekonomik olarak inşa edilmeleri, inşa sürelerinin kısa olması gibi birçok nedenlerden dolayı çok tercih edilen bir baraj türüdür. SSB barajların bir türü olan katı dolgu barajlar, SSB türleri içerisinde en çok tercih edilen baraj türüdür. Katı dolgu barajlar yükü daha geniş bir alana yaydığı için SSB barajların diğer türlerine göre daha zayıf temellere de inşa edilebilmektedirler. Ayrıca SSB barajlar için gereksinim duyulan iyi düzeydeki silindirle sıkıştırma beton kalitesine katı dolgu barajlar için gereksinim duyulmamaktadır. Böylece katı dolgu barajlar günümüzde sık tercih edilen ve baraj emniyeti açısından güvenilir bir baraj türüdür.

Bu çalışmada, yapılacak olan katı dolgu barajlar için farklı şev geometrileri incelenmiştir. Bu çalışmanın asıl amacı katı dolgu barajlarda malzeme maliyetini azaltmak için yeni bir enkesit belirlemektir. Belirlenen enkesitin güvenilirliğini detaylı bir şekilde analiz etmek hedeflenmiştir. Bu nedenle, rijitlikleri değişen farklı elastisite modüllerine sahip temeller üzerine inşa edilen katı dolgu barajların statik yükler altında doğrusal elastik davranışı incelenmiştir. Farklı rezervuar su seviyeleri ve memba ve mansap yüzeyi için dikkate alınan kuvvet fonksiyonu tabanlı enkesit denkleminde farklı “n” kuvveti dereceleri için analizler yürütülmüştür. Ayrıca baraj enkesitinde temelden itibaren baraj yüksekliğinin yaklaşık beşte biri kadar kısmında bir temel dikkate alınarak da analizler yapılmıştır. Elde edilen bulgular detaylı bir şekilde tartışılmıştır. Farklı enkesitler için beton hacminde sağlanan fayda belirlenmiştir. Tasarımcılara güvenli ve ekonomik bir katı dolgu baraj enkesiti önerilmesi hedeflenmiştir.

Çalışma bulgularına göre; baraj enkesitinde önemli oranda maliyet kazanımı sağlanacağı ve bu durumda barajın emniyetinde bir sorun oluşmayacağı sonucuna varılmıştır. Böylece baraj mühendislerine yeni bir katı dolgu baraj enkesiti önerilmektedir.

Anahtar Kelimeler: SSB, Katı Dolgu Baraj, SAP2000, Statik Analiz, Baraj Emniyet, Ağırlık Baraj, Baraj Maliyeti.

ABSTRACT

Economic and Static Analysis of Hardfill Dams

Miray ÜNAL

Master's Thesis

FIRAT UNIVERSITY
Graduate School of Natural and Applied Sciences

Department of Civil Engineering
July 2021, Page xiii+82

Roller Compacted Concrete (RCC) dams are preferred due to many reasons. For example; it can be built quickly, it can be built economically, and it is a safe type of dam. Moreover; hardfill dams, which are a type of RCC dams, are the most preferred dam type among RCC types. Since hardfill dams spread the load over a wider area, they can also be built on weaker foundations than RCC dams. In addition, the good roller compaction concrete quality required for RCC dams is not required for hardfill dams. Thus, hardfill dams are a reliable type in terms of dam safety, which is frequently preferred today.

In this study, different slope geometries were investigated for hardfill dams to be built. The aim of this study is to determine a new cross-section to reduce the material cost in hardfill dams. It is aimed to analyze the reliability of the determined cross-section in detail. For this reason, the linear elastic behavior of hardfill dams built on foundations with different elasticity modulus varying stiffness under static loads has been investigated. For different reservoir water levels and upstream and downstream surface, analyzes were carried out for different n-degrees in the force-function-based cross-section equation. In addition, analyzes were made in the dam cross-section by considering a foundation at approximately one-fifth of the dam height from the foundation. Obtained findings are discussed in detail in the study. The benefit in concrete volume was determined for different cross-sections. It is aimed to propose a safe and economical hardfill dam cross section to the designers.

According to the study findings; It has been concluded that significant cost savings will be achieved in the dam cross-section and in this case, there will be no problem in the safety of the dam. Thus, a new hardfill dam cross-section is proposed to dam engineers.

Keywords: RCC, Hardfill Dam, SAP2000, Static Analysis, Dam Safety, Gravity Dam, Cost of Dam.

ŞEKİLLER LİSTESİ

	Sayfa
Şekil 2.1. SSB baraj enkesitleri	5
Şekil 3.1. Sakarya’da bulunan beton ağırlık türünde Sarıyar Barajı	12
Şekil 3.2. Türkiye’de iki SSB barajı	14
Şekil 3.3. Klasik katı dolgu baraj (<i>hardfill</i>) enkesiti	24
Şekil 3.4. Diyarbakır, Çüngüş’te bulunan Karakaya Kemer Barajı	25
Şekil 4.1. Dörtgen izoparametrik sonlu eleman	26
Şekil 4.2. Katı dolgu barajın kuvvet fonksiyonu tabanlı enkesit denklemi kullanılarak farklı kuvvet dereceleri ile tasarlanmış baraj gövdesi grafiği	34
Şekil 4.3. Klasik katı dolgu baraj (<i>hardfill</i>) enkesiti	35
Şekil 4.4. Simetrik yüzlü katı dolgu kuvvet fonksiyonu tabanlı baraj gövdesi enkesiti	36
Şekil 4.5. Katı dolgu barajın değişen hacim grafiği	37
Şekil 5.1. Katı dolgu barajın memba ve mansap yüzeyi şev eğim	39
Şekil 5.2. Katı dolgu barajın memba ve mansap yüzeyi şev eğimi	40
Şekil 5.3. Katı dolgu barajın memba ve mansap yüzeyi şev eğimi	41
Şekil 5.4. Kuvvet derecesi ($n=1.5$) baraj yüksekliği 105 m bir katı dolgu baraj için memba mansap tasarım görünümü	58
Şekil 5.5. Kuvvet derecesi ($n=1.5$) baraj yüksekliği 105 m bir katı dolgu baraj için memba ve mansap yüzeyleri tasarım detayı	58

TABLOLAR LİSTESİ

Sayfa

Tablo 3.1.	Baraj tipinin seçimi ve tip seçimine etki eden faktörler	9
Tablo 3.2	Ülkemiz'de SSB kullanılarak tamamlanmış ve yapımı devam eden barajlar	14
Tablo 3.3.	Beton numunelerinin karışım oranları.....	21
Tablo 4.1.	$0 \leq x \leq 70$ için kuvvet fonksiyonu tabanlı baraj gövdesi enkesit denklemi tablosu.....	33
Tablo 4.2.	$x \geq 77$ için kuvvet fonksiyonu tabanlı baraj gövdesi enkesit denklemi tablosu	33
Tablo 4.3.	Taban sürtünme katsayıları	34
Tablo 5.1.	$H_b=105$ m, $E_t/E_b=0.25, 0.50$ ve 1.0 , $m=0.7y/1.0d$, $H_r/H_b=0.0, 0.5$ ve 1.0 olması durumları için baraj kretinin yatay ve düşey yer değiştirme değerleri	44
Tablo 5.2.	$H_b=105$ m, $E_t/E_b=0.25, 0.50$, ve 1.0 , $m=0.7y/1.0d$, $H_r/H_b=0.0, 0.5$ ve 1.0 olması durumları için baraj gövdesi ile baraj-temel ara yüzeyinde oluşan maksimum ve minimum asal gerilmelerin maksimum değerleri	44
Tablo 5.3.	$H_b=105$ m, $E_t/E_b=0.25, 0.50$ ve 1.0 , Kuvvet Derecesi ($n=1.1$), $H_r/H_b=0.0, 0.5$ ve 1.0 olması durumları için baraj kretinin yatay ve düşey yer değiştirme değerleri.....	47
Tablo 5.4.	$H_b=105$ m, $E_t/E_b=0.25, 0.50$, ve 1.0 Kuvvet Derecesi ($n=1.1$), $H_r/H_b=0.0, 0.5$ ve 1.0 olması durumları için baraj gövdesi ile baraj-temel ara yüzeyinde oluşan maksimum ve minimum asal gerilmelerin maksimum değerleri.....	47
Tablo 5.5.	$H_b=105$ m, $E_t/E_b=0.25, 0.50$ ve 1.0 , Kuvvet Derecesi ($n=1.5$), $H_r/H_b=0.0, 0.5$ ve 1.0 olması durumları için baraj kretinin yatay ve düşey yer değiştirme değerleri.....	49
Tablo 5.6.	$H_b=105$ m, $E_t/E_b=0.25, 0.50$, ve 1.0 Kuvvet Derecesi ($n=1.5$), $H_r/H_b=0.0, 0.5$ ve 1.0 olması durumları için baraj gövdesi ile baraj-temel ara yüzeyinde oluşan maksimum ve minimum asal gerilmelerin maksimum değerleri	50
Tablo 5.7.	$H_b=105$ m, $E_t/E_b=0.25, 0.50$ ve 1.0 , Kuvvet Derecesi ($n=2.0$), $H_r/H_b=0.0, 0.5$ ve 1.0 olması durumları için baraj kretinin yatay ve düşey yer değiştirme değerleri.....	52
Tablo 5.8.	$H_b=105$ m, $E_t/E_b=0.25, 0.50$, ve 1.0 Kuvvet Derecesi ($n=2.0$), $H_r/H_b=0.0, 0.5$ ve 1.0 olması durumları için baraj gövdesi ile baraj-temel ara yüzeyinde oluşan maksimum ve minimum asal gerilmelerin maksimum değerleri.....	52
Tablo 5.9.	$H_b=105$ m, $E_t/E_b=0.25, 0.50$ ve 1.0 , Kuvvet Fonksiyonu Tabanlı Baraj Gövdesi Enkesit Denkleminin Baraj-Temel Ara yüzeyinden 20m yukarıda Başlanması ve Kuvvet dereceleri sırasıyla ($n=1.1, n=1.5, n=2.0$), $H_r/H_b=0.0, 0.5$ ve 1.0 olması durumları için baraj kretinin yatay ve düşey yer değiştirme değerleri	56
Tablo 5.10.	$H_b=105$ m, $E_t/E_b=0.25, 0.50$, ve 1.0 Kuvvet Fonksiyonu Tabanlı Baraj Gövdesi Enkesit Denkleminin Baraj-Temel Ara yüzeyinden 20m yukarıda Başlanması ve Kuvvet dereceleri sırasıyla ($n=1.1, n=1.5, n=2.0$), $H_r/H_b=0.0, 0.5$ ve 1.0 olması durumları için baraj gövdesi ile baraj-temel ara yüzeyinde oluşan maksimum ve minimum asal gerilmelerin maksimum değerleri	57
Tablo 5.11.	$H_b=105$ m, $E_t/E_b=1.0$ kuvvet fonksiyonu tabanlı baraj gövdesi enkesit denklemi kuvvet dereceleri sırasıyla ($n=1.1, n=1.5, n=2.0$), $H_r/H_b=1.0$ olması durumları için baraj gövdesi ile baraj-temel ara yüzeyinde oluşan maksimum ve minimum asal gerilmelerin maksimum değerleri	57

Tablo 5.12. EM 1110-2-2006, mühendislik el kitabından alıntıdır	59
Tablo 5.13. EM 1110-2-2006, mühendislik el kitabından alıntıdır	60



EKLER LİSTESİ

Sayfa

Ek.1.	Şev eğimi (0.7y/1.0d) ve kuvvet dereceleri sırasıyla (n=1.1,1.5,2.0) baraj yüksekliği 105 m rijit baraj için minimum asal gerilme görünümü	67
Ek 2.	Şev eğimi (0.7y/1.0d) ($E_t/E_b=0.25$) ($E_t/E_b=0.50$) ($E_t/E_b=1.00$) baraj yüksekliği 105 m baraj için minimum asal gerilme görünümü	68
Ek 3.	Kuvvet derecesi (n=1.1) ($E_t/E_b=0.25$) ($E_t/E_b=0.50$) ($E_t/E_b=1.00$) baraj yüksekliği 105 m baraj için minimum asal gerilme görünümü	69
Ek 4.	Kuvvet derecesi (n=1.5) ($E_t/E_b=0.25$) ($E_t/E_b=0.50$) ($E_t/E_b=1.00$) baraj yüksekliği 105 m baraj için minimum asal gerilme görünümü	70
Ek 5.	Kuvvet derecesi (n=2.0) ($E_t/E_b=0.25$) ($E_t/E_b=0.50$) ($E_t/E_b=1.00$) baraj yüksekliği 105 m baraj için minimum asal gerilme görünümü	71
Ek 6.	Şev eğimi (0.7y/1.0d) ve kuvvet dereceleri sırasıyla (n=1.1,1.5,2.0) baraj yüksekliği 105 m rijit baraj için maksimum asal gerilme görünümü	72
Ek 7.	Şev eğimi (0.7y/1.0d) ($E_t/E_b=0.25$) ($E_t/E_b=0.50$) ($E_t/E_b=1.00$) baraj yüksekliği 105 m baraj için maksimum asal gerilme görünümü	73
Ek 8.	Kuvvet derecesi (n=1.1) ($E_t/E_b=0.25$) ($E_t/E_b=0.50$) ($E_t/E_b=1.00$) baraj yüksekliği 105 m baraj için maksimum asal gerilme görünümü	74
Ek 9.	Kuvvet derecesi (n=1.5) ($E_t/E_b=0.25$) ($E_t/E_b=0.50$) ($E_t/E_b=1.00$) baraj yüksekliği 105 m baraj için maksimum asal gerilme görünümü	75
Ek 10.	Kuvvet derecesi (n=2.0) ($E_t/E_b=0.25$) ($E_t/E_b=0.50$) ($E_t/E_b=1.00$) baraj yüksekliği 105 m baraj için maksimum asal gerilme görünümü	76
Ek 11.	Kuvvet fonksiyonu tabanlı baraj gövdesi enkesit denkleminin baraj-temel arayüzeyinden 20m yükseklikte başlatılan (n=1.1) ($E_t/E_b=0.25$) ($E_t/E_b=0.50$) ($E_t/E_b=1.00$) baraj yüksekliği 105 m baraj için minimum asal gerilme görünümü	77
Ek 12.	Kuvvet fonksiyonu tabanlı baraj gövdesi enkesit denkleminin baraj-temel arayüzeyinden 20m yükseklikte başlatılan (n=1.5) ($E_t/E_b=0.25$) ($E_t/E_b=0.50$) ($E_t/E_b=1.00$) baraj yüksekliği 105 m baraj için minimum asal gerilme görünümü	78
Ek 13.	Kuvvet fonksiyonu tabanlı baraj gövdesi enkesit denkleminin baraj-temel arayüzeyinden 20m yükseklikte başlatılan (n=2.0) ($E_t/E_b=0.25$) ($E_t/E_b=0.50$) ($E_t/E_b=1.00$) baraj yüksekliği 105 m baraj için minimum asal gerilme görünümü	79
Ek 14.	Kuvvet fonksiyonu tabanlı baraj gövdesi enkesit denkleminin baraj-temel ara yüzeyinden 20m yükseklikte başlatılan (n=1.1) ($E_t/E_b=0.25$) ($E_t/E_b=0.50$) ($E_t/E_b=1.00$) baraj yüksekliği 105 m baraj için maksimum asal gerilme görünümü	80
Ek 15.	Kuvvet fonksiyonu tabanlı baraj gövdesi enkesit denkleminin baraj-temel ara yüzeyinden 20m yükseklikte başlatılan (n=1.5) ($E_t/E_b=0.25$) ($E_t/E_b=0.50$) ($E_t/E_b=1.00$) baraj yüksekliği 105 m baraj için maksimum asal gerilme görünümü	81
Ek 16.	Kuvvet fonksiyonu tabanlı baraj gövdesi enkesit denkleminin baraj-temel ara yüzeyinden 20m yükseklikte başlatılan (n=2.0) ($E_t/E_b=0.25$) ($E_t/E_b=0.50$) ($E_t/E_b=1.00$) baraj yüksekliği 105 m baraj için maksimum asal gerilme görünümü	82

SİMGELER VE KISALTMALAR

Simgeler

ΣH	: Kaydırıcı kuvvetler toplamı (N)
ΣM_0	: Toplam devirici moment (N m)
ΣM_r	: Toplam koruyucu moment (N m)
ΣV	: Kaymaya karşı koruyucu kuvvetler toplamı (N)
a	: Kuvvet fonksiyonu tabanlı baraj gövdesi enkesit denklemi katsayısı
A	: Alan (m ²)
e	: Düşey bileşke kuvvet ağırlık merkezi (m)
F_x	: Yatay kuvvetler (N)
F_y	: Düşey kuvvetler (N)
G	: Baraj ağırlık kuvveti (N)
H	: Baraja etki eden su yüksekliği (m)
I_x	: x yönünde etki eden atalet momenti (m ⁴)
I_y	: y yönünde etki eden atalet momenti (m ⁴)
M_0	: Dönme momenti (N m)
M_x	: x yönünde etki eden dönme momenti (N m)
M_y	: y yönünde etki eden dönme momenti (N m)
m	: Şev eğimi (yatay)
n	: Reel sayı
R_x	: Yatay bileşke kuvvet (N)
R_y	: Düşey bileşke kuvvet (N)
U	: Kaldırma kuvveti (N)
x_{cp}	: FY ağırlık merkezi (m)
x_M	: Parabol parçası ağırlık merkezi (m)
σ	: Taban gerilmesi (N/m ²)

Kısaltmalar

FS	: Güvenlik Faktörü
ICOLD	: Uluslararası Büyük Barajlar Komisyonu
KBA	: Klasik Beton Ağırlık (Baraj)
MCE	: Maksimum Güvenilir Deprem
OBE	: İşletme Esaslı Deprem
ÖYBK	: Ön Yüzü Beton Kaplı Kaya Dolgu (Baraj)
SSB	: Silindirle Sıkıştırma Beton (Baraj)
SYKD	: Simetrik Yüzlü Katı Dolgu (Baraj)
vd.	: ve diğerleri

1. GİRİŞ

Su, canlı yaşamı için hayati öneme sahiptir. Günümüz koşullarında suyun biriktirilmesi ihtiyacı küresel ısınma nedeni ile daha da elzem olmuştur. Suların biriktirilmesi de baraj inşa etmekle mümkün olmaktadır. Bütün dünyada olduğu gibi ülkemizde de içme ve kullanma suyu ihtiyacı gün geçtikçe daha da artmaktadır. Dünya çapında iklim koşulları ve çevre kirliliği nedeniyle içme suyu kaynakları hızla tükeniyor. Neticede su ve su yapılarının önemi gün geçtikçe artmaktadır. Gelişmiş ülkeler, su potansiyellerini faydaya dönüştürecek tesisler üreterek enerji ve diğer ihtiyaçları için gerekli tüm altyapıyı tamamlamış, ülkemiz ise bu altyapı çalışmalarını henüz tamamlamamasına rağmen kaynak kullanımında önemli mesafeler kat etmiştir (Aydın vd. 2015).

Ülkemizde birçok nehir, akarsu ve çay bulunmakla birlikte ülkemiz uluslararası kriterlere göre su fakiri sınıfına dâhildir. Bu nedenle sahip olunan bu zenginliği doğaya zarar vermeden kullanmak ve insanlığa faydalı hale getirmek amacıyla yapılan barajlar, geçmişten günümüze önemini koruyan önemli mühendislik yapılarıdır (Kalkan, 2017).

Baraj yapılacak bölgede birden fazla baraj tipinin yapımı söz konusu olabilmektedir. Bu nedenle yapım amacı, özellikle baraj yerinin ve malzeme ocaklarının özellikleri ve ekonomik durum dikkate alınarak en uygun baraj tipinin belirlenmesi gerekmektedir (Kalkan, 2017).

Barajlar, ağırlık barajları, payandalı barajlar, kemer barajlar ve dolgu barajlar olmak üzere farklı malzeme ve geometrik özelliklere sahip olabilmektedirler. Ağırlık, kemer ve payandalı barajlarda genellikle beton malzeme kullanılır. 1980 yılının ilk yıllarından itibaren Silindirle Sıkıştırılmış Beton (SSB) barajlar dünya genelinde yaygın olarak inşa edilmektedir. SSB barajların çok tercih edilmelerinin en önemli iki nedeni, inşa maliyetinin düşük olması ve erken inşa edilebilmeleridir. SSB, normal beton ile aynı temel bileşenlere sahiptir ve aynı yöntemleri kullanarak üretilmektedir. Adını uygulama sırasında taze betonun silindirle sıkıştırılmasından almaktadır. Ancak, geleneksel betondan farklı olarak, kuru kıvamı nedeniyle silindirler ile sıkıştırılmasının yanı sıra karışımda puzolan ve klasik betona göre daha az miktarda çimento kullanılır (Mardani-Aghabaglou vd. 2020).

Bu kütle betonu malzemenin özelliği, klasik betondan farklı olarak akışkan olmaması, yani kuru kıvama sahip olması ve çökme (slump) değerinin sıfır düzeyinde olmasıdır. Böyle bir malzeme hazırlanıp serildiğinde inşaat makineleri içine batıp girmemekte ve geleneksel betondan farklı olarak vibratörle konsolide edilmeyip silindirle sıkıştırılmaktadır. Sıfır çökme değerine sahip bu malzemenin işlenebilir hale getirilmesi için, karışıma çimentoya ek olarak bağlayıcı olarak doğal veya yapay puzolan eklenmektedir. Silindirle Sıkıştırılmış Beton'un özel bir hali olan Silindirle Sıkıştırılmış Katı Dolgu Betonun (*Hardfill*) baraj yapımında kullanılması yeni olanaklar oluşturmaları bakımından son derece önemli olmuştur. Düşük bağlayıcı kullanılan bu tip SSB kuru kıvamlı olmaya eğilimli olmakla birlikte ıslak karışımlarda kullanılmıştır. Çimento ve

puzolan miktarı toplamının düşük seviyelere indirilmesi malzeme maliyetlerini önemli ölçüde düşürmekte, bunun yanı sıra düşük bağlayıcılı hidrasyondan kaynaklanan ısı ve elastikiyet modülünü düşürmekte buna karşın sünme oranını ise yükseltmektedir. Simetrik Yüzlü Katı Dolgu (SYKD) Baraj katı dolgu uygulamasında yeni ve en etkili yaklaşım olarak kendini kanıtlamıştır (Çiçek, 2007). Bu yeni SSB uygulaması, Uluslararası Büyük Barajlar Komisyonu (ICOLD, Avrupa) eski onur başkanı Pierre Londe ve yeni onur başkanı Michel Lino tarafından geliştirilmiştir. Bir başka deyişle bu araştırmacılar simetrik yüzlü katı dolgu baraj enkesitini öneren ve geliştiren ilk mühendislerdir. Pierre Londe ve Michel Lino Fransa'da ISL Baraj ve Su Mühendisliği hizmetleri veren bir şirketin mühendisleridirler (URL-1). Bu tip uygulama simetrik bir kesite sahip olması; su geçirmez bir memba yüzü olması; baraj gövdesinde içsel drenaj bulunması ile diğerlerinden ayırt edilmektedir. Bu uygulamanın temel avantajları, katı dolgu maliyetinin düşük olması ve özellikle deprem koşullarına karşı ağırlık barajlara göre daha yüksek güvenliğe sahip olmasıdır. Katı dolgu barajlar yükü geniş bir alana yaydıklarından temelde daha düşük gerilmeler oluşturlar ve zayıf kaya temeller üzerine inşa edilebilmeleriyle bilinirler. Dolgu malzemesinin temin edilemediği baraj yerlerinde kaya dolgu barajlara önemli bir alternatif olmaktadır.

Barajlar büyük maliyetlerle inşa edilen önemli mühendislik yapılarıdır. Bir barajın hasar görmesi ve yıkılması büyük can ve mal kayıplarına neden olmaktadır. Bundan dolayı barajların hem ekonomik hem de emniyetli boyutlandırılması hayati önem taşımaktadır. Katı dolgu barajlar SSB barajların en çok tercih edilen türlerinden biridir. Katı dolgu barajlarda gövde hacminin azaltılıp azaltılamayacağı gerekli analizler yapılarak belirlenmeye çalışılacaktır.

Bu çalışmanın asıl amacı, katı dolgu barajların memba ve mansap şevlerini simetrik alarak ve farklı geometriler belirleyerek gövde beton hacmini azaltmak, böylece gerekli tahkikler (devrilme, kayma ve gerilme) ve statik analizler yapmaktır. Ayrıca, her bir durum için sonlu elemanlar yöntemine dayalı SAP2000 yazılımını kullanarak farklı durumlar için statik analizler yapmaktır. Böylece geliştirilen bu geometrik enkesitin dünya genelinde ve yurdumuzda yapılacak olan barajlarda da bu yöntemin kullanılabileceği ve literatüre katkı sağlayacağı beklenmektedir. Kapsamlı ve yararlı bir tez çalışması yapılması planlanmıştır.

2. LİTERATÜR ÖZETİ

Londe ve Lino (1992) yaptıkları çalışmada, silindire sıkıştırılmış beton barajların bir türü olarak katı dolgu barajlar incelemişler ve uygulama mühendislerine önermişlerdir. Araştırmacılar SSB barajların mansap ve memba şevini eşit eğimde incelemişlerdir. Memba ve mansap şev eğimlerini 0.7 Yatay/1.0 Düşey olarak önermişlerdir. Araştırmacılar tarafından yapılan çalışmalarda, 100 m yüksekliğinde memba ve mansapta 0.7 yatay/1 Düşey şevlere sahip bir simetrik yüzölçümlü katı dolgu barajın temelindeki gerilmeler bir klasik beton ağırlık baraj için verilen değerlerle karşılaştırmışlardır. Baraj tabanındaki basınç mukavemeti değeri, klasik beton ağırlık barajlara göre daha az olmaktadır. 100 m yüksekliğindeki bir katı dolgu barajda maksimum basınç mukavemeti 1.50 MPa'dan daha düşüktür. Çekme gerilmesine gerek olmamaktadır; çünkü simetrik profilde çekme gerilmeleri olmamaktadır. Kayma gerilmesi çok düşüktür, kesinlikle kritik değerde olmamaktadır. Memba topuğunda 2.4 MPa yerine 1.4 MPa olmaktadır. Farklı kaldırma basınçları için değişen ϕ açısı klasik beton ağırlık barajlarda 28° ile 43° iken katı dolgu barajda bu değer 14° ile 22° olmaktadır. Katı dolgu barajın birim hacim ağırlığı SSB'nin birim ağırlığından daha az olmaktadır. 0.4 MPa'lık önemsiz çekme gerilmeleri olabilmektedir. 0.2g ivmelik bir depremde hiç çekme gerilmeleri oluşmamaktadır. Bu kriter klasik beton ağırlık barajlar için önemlidir. Emiroğlu (1999) doktora tez çalışmasında, Londe ve Lino (1992)'nin çalışmalarına geniş yer vermiştir. Londe ve Lino (1992)'nin bu çalışmasından sonra katı dolgu baraj inşası dünya çapında yaygınlaşmıştır. Günümüzde de bu tür baraj en çok tercih edilen baraj türleri arasındadır.

BaCaRa (Fransa'da devlete bağlı bir araştırma kurulu) tarafından SSB barajlara göre maliyet karşılaştırılması yapılmış, maliyet oranı 1.7 olarak bulunmuştur. Tipik bir SSB baraj üçüncü sınıf agrega, 100 kg/m³ çimento, 50 kg/m³ uçucu kül, inşa derzleri ve yükselti işlemlerine göre dikkate alınmıştır. Hacim karşılaştırması katı dolgu barajın her iki yüzey şevini yatayda 0.7 alınarak yapılmıştır. Memba yüzeyi maliyeti toplam maliyetin yaklaşık %10'u olmaktadır. Yükseklik ne olursa olsun yüzey maliyeti 5 m kalınlıkla bir ilave katı dolgu barajın maliyetine denk olmaktadır. Dünyanın farklı yerlerinde inşa edilmiş SSB barajlar ile karşılaştırmalar yapılmış ve bu baraj tipinin daha ekonomik olduğu savunulmuştur.

Abdo (2008) yaptığı çalışmada, SSB barajların tasarım kriterleri ve inşa teknikleri hakkında geniş bilgiler vermiştir. SSB barajların ABD'de sıklıkla tercih edildiğini ve oldukça ekonomik bir baraj türü olduğunu ifade etmiştir. ABD'deki SSB barajların malzeme kriterlerini ve diğer tasarım kriterlerini detaylı bir şekilde vermiştir.

Akbaş ve Sak (2012) yaptıkları çalışmada, inşaat ve su tutma aşamalarında kil çekirdekli kaya dolgu tipi Akköprü Barajının deformasyon davranışını incelemiştir. Meydana gelen deplasmanları belirlemek için iki boyutlu düzlem şekil değiştirme prensibini kullanarak sonlu

eleman analizleri gerçekleştirdiler. İnşaat sonrası hesaplanan ve ölçülen deformasyonların büyüklüklerine, zamanla değişimlerine ve baraj gövdesindeki konumlarına uygun olduğunu ve en büyük yerleşimin baraj eksen derinliğinin yaklaşık yarısında meydana geldiğini gösterdiler.

Valtersson ve Johansson (2018) yaptıkları çalışmada, beton ağırlık barajların stabilite analizi yapılmış, örnek çalışma olarak Çin'deki önemli bir baraj olan Longtan Barajı seçilmiştir. Yaptığı nümerik analiz sonucunda barajın memba topuğunda negatif gerilmeler ve çekme gerilmeleri elde edilmiştir. -6.0 MPa ile -2.0 MPa arasında değişen gerilim ile baraj tabanındaki çekme gerilmesi nedeniyle barajın çökeceğini göstermektedir. Fakat basınç gerilmelerinin emniyet gerilmelerini sağladığını ifade etmiştir. İndüklenen basınç gerilmesi, betonun basınç dayanımının altında olmak üzere kararlı sonuçlar göstermiştir. Yine araştırmacı sızma analizi de yapmıştır. Sızıntı analizi, yüksek konsantrasyonlarda sızıntı hızının baraj tabanı ve enjeksiyon perdelerinin yakınında yoğunlaştığı barajın stabilitesi için önemli bir risk olmadığını göstermektedir. Düşük sızıntı hızı, herhangi bir erozyon riski veya yüksek gerilmelerin indüklenmesi anlamına gelmediği sonucuna varılmıştır. Barajın basınç gerilimine ve kaymaya karşı stabil olduğu kabul edilmektedir. Bununla birlikte, çekme göçmesi riski yüksektir ve bu nedenle baraj tabanındaki takviyeler uygulanmalıdır.

Sen (2018) yaptığı çalışmada, deprem yükleri altında beton ağırlık barajlarının risk analizini incelemiştir. Kaliforniya'daki Pine Flat Barajı'nın örnek olarak seçildiği beton ağırlık barajın nümerik analizi ile ilgili detaylı çalışma yapmıştır. Çalışmada baraj-su-temel kaya etkileşimi, sıkıştırılabilir su, esnek temel etkileri ve emici rezervuar taban malzemeleri dikkate alınarak analizler yapılmıştır. Risk analizi için de Normal, Log-Normal ve Weibull dağılımları kullanılmıştır. Minimum ana gerilimin çekme mukavemeti üzerindeki etkisinin önemsiz olduğu kabul edilmiştir. Ayrıca, gerilme çatlağının başarısız olma olasılığının, barajın taban kayması muhtemel çekme gerilmesi değerlerinin sınır değerleri aştığını ifade etmiştir. Ek olarak, orta dereceli bir deprem için rezervuar kontrolünün kaybedilmesi mümkün olmadığı tespit edilmiştir.

Mughieda vd. (2018) yaptıkları çalışmada, SSB barajı, baraj gövdesinin kaymaya karşı kararlılığını ve yapısal kararlılığını araştırmak için dinamik analizini SAP2000 yazılımını kullanılarak yapmışlardır. Spektrum analizi için 1995 Akabe depreminin tepki spektrumu ve hem İşletme Esaslı Deprem (OBE) hem de Maksimum Güvenilir Deprem (MCE) için yumuşak platolu temsili bir elastik spektrum kullanılmıştır. Analiz, baraj ile temel arasındaki ara yüzeyde kayma olmayacağı varsayılarak yapılmıştır. En büyük gerilimin, yukarı akış yamacının ucuna bitişik kayada geliştiği tespit etmiştir. Barajın tüm tabanı boyunca kaymaya karşı güvenlik faktörünün her iki yükleme koşulu için 1'den ($F_s > 1$) büyük olduğu bulunmuştur.

Çiçek (2007) yaptığı çalışmada, farklı zemin dayanımlarına sahip zayıf temeller üzerine inşa edilmiş katı-dolgu barajların statik yükler altında lineer elastik davranışlarını incelenmiştir. Baraj ve temel ortamları lineer elastik kabul edilmiş olup sonlu elemanlar yöntemi ile

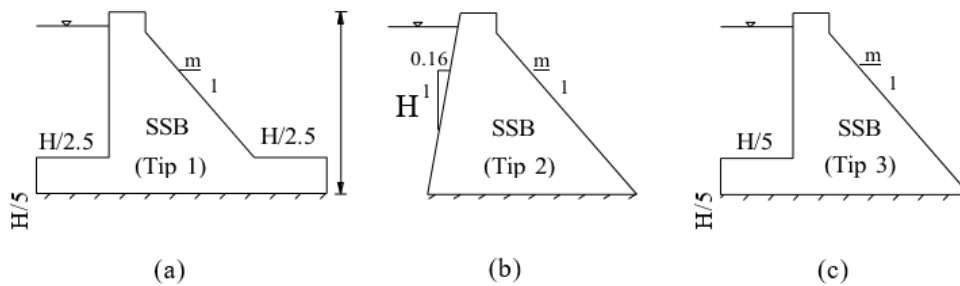
modellenmiştir. Temelin dayanımı, barajın elastisite modülünün bir oranı şeklinde (E_t/E_b) hesaba katmıştır. Analizler, E_t/E_b oranının 0.125, 0.25, 0.5 ve 1.00, şev eğimlerinin de $(0.6y/1.0d)$, $(0.7y/1.0d)$, $(0.8y/1.0d)$ olması için yapmıştır. Aynı zamanda, katı-dolgu baraj yüksekliğinin etkisini incelemek amacıyla baraj yüksekliği 30, 60, 90 ve 120 m almıştır. Rezervuar hidrostatik su yükünün tesirini görmek için de rezervuarın boş, yarı dolu, tam dolu olması durumları için çözümler yapmıştır. Yapılan bu çalışmada aşağıdaki bulgular elde edilmiştir:

a) Baraj gövdesi ve baraj-temel ara yüzeyinde oluşan maksimum ve minimum asal gerilme değerlerinin rezervuar boş, yarı dolu, tam dolu olması durumlarına bağlı olarak küçülmesine (çekme gerilmelerinin azalmasına, basınç gerilmelerinin artmasına) neden olmaktadır. Ayrıca, E_t/E_b oranının artışı, baraj-temel ara yüzeyi ve baraj gövdesi üzerinde elde edilen maksimum asal gerilme değerlerinin küçülmesine, minimum asal gerilme değerlerinin ise büyümesine neden olmaktadır. Akabinde şev değerlerinin artışı, baraj-temel ara yüzeyinde ve baraj gövdesinde elde edilen maksimum ve minimum gerilme değerlerinin büyümesine neden olmaktadır.

b) Temel ortamı elastisite modülü artışına bağlı olarak yani baraj gövdesinin daha rijit bir temel üzerine inşası durumunda yatay ve düşey yer değiştirme değerlerinin küçüldüğü görülmüştür.

c) Baraj kreti üzerinde yatay ve düşey yer değiştirmeler membanın doluluk oranının artışına bağlı olarak artmıştır. Memba doluluk oranı artarken baraj şev eğiminin daha yatık olması düşey yer değiştirme değerinde artışa ve yatay yer değiştirme değerinde ise azalmaya neden olmuştur.

Kılıç (2009) yaptıkları çalışmada, SSB baraj tipinin kaya olmayan temellerde inşa edilmesi halinde statik yükler altında mağruz kalabileceği şekil değişikliklerini incelemiştir. Farklı zemin dayanımlarına sahip temeller üzerinde inşa edilen barajların statik yükler altında lineer elastik davranışlarını dikkate almıştır. Yükü daha geniş bir alana yaymak ve sızma boyunu uzatmak amacıyla üç farklı geometrideki baraj enkesiti üzerinde analizler yapmıştır. Baraj yükseklikleri 20, 35, 50 ve 100 m olarak almıştır. Şekil 2.1’de a, b ve c SSB baraj enkesitleri görülmektedir.



Şekil 2.1. SSB baraj enkesitleri (Kılıç, 2009)

Temelin dayanımını, barajın elastisite modülünün bir oranı şeklinde (E_t/E_b) hesaba katmıştır. Analizler, E_t/E_b oranının 0.125, 0.25 ve 0.50, şev eğimlerinin de (0.7y/1.0d), (0.75y/1.0d), (0.8y/1.0d) olması durumlarında yapılmıştır. Yazar, baraj gövdesinde ve baraj temel ara yüzeyinde oluşan maksimum ve minimum asal gerilmelerin maksimumlarının ve baraj gövdesinde oluşan maksimum yer değiştirmelerin değişimini her bir durum için ayrı ayrı incelemiştir. Baraj enkesitinde değişiklikler yaparak (şevi yatırarak) detaylı statik ve dinamik analizler sonucu SSB barajların zayıf temeller üzerine inşa edilebileceklerini belirtmiştir. Ayrıca uygulamada da örneklerinin olduğundan bahsetmiştir.

Literatür incelendiğinde SSB barajların statik ve sismik analizleri ile ilgili çalışmalar yapıldığı görülmektedir. SSB barajlar çok tercih edilen bir baraj türü olduğunu söylemek mümkündür. İnşa maliyetleri düşük ve inşa süresi oldukça azdır. Baraj inşa edilen sağlam temelli yerler gün geçtikçe azalmaktadır. Böylece yükü daha geniş bir alana yayan SSB'nin katı dolgu baraj türü ön plana çıkmaktadır. Bu nedenlerden dolayı, bu çalışmaların daha uzun yıllar araştırmacılar tarafından yapılacağı düşünülmektedir. Bu çalışmanın asıl amacı katı dolgu barajlarda SSB beton miktarını azaltıp, böylece inşa maliyetini azaltmak ve beton hacmi azaltılmış enkesitler için gerekli analizleri yapmaktır. Yapılan analizler ile baraj emniyetini değerlendirmek ve uygulamada doğrudan kullanılacak yeni bir enkesit önermektir. Bu çalışmanın hem uygulamaya ve hem de literatüre önemli katkı yapacağı düşünülmektedir.

3. BARAJ TÜRLERİ VE YAPIM KRİTERLERİ

Barajlar; içme ve kullanma suyu temin etmek, endüstriyel su sağlamak, tarıma sulama suyu sağlamak, hidroelektrik enerji üretmek, iç su taşımacılığı temin etmek, gezi ve piknik yeri oluşturmak, atık depolamak, akarsu akım rejimini düzenlemek ve taşkından korunma amaçlarından biri veya birden fazlası için inşaa edilirler. Enerji üretimine katkı sağladıklarından bulundukları ülke ve bölge için büyük önem taşırlar. Barajların yapımı çok zor ve maliyetlidir. Barajlar çok büyük yapılar oldukları için ve barajların emniyetinin sağlanması hayati önem taşıdığı için barajların tasarım kriterleri büyük önem taşımaktadır. Aynı şekilde barajlar için yapılan bütün analizler de çok değer taşımaktadır. Her baraj türü için farklı analizler yapılmaktadır. (Aydın ve Taylan, 2019).

Bir baraj projelendirme çalışmasına başlamadan önce her biri ayrı bir uzmanlık alanı olan hidrolik, jeolojik ve topoğrafik çalışmalar ile ekonomik analizler gibi birçok çalışmanın detaylı olarak yapılması gerekmektedir. Aynı zamanda barajın hacmi, yüksekliği, dolusavak kapasitesi, tünel ve su alma yapılarına ait kapasitelerin yanı sıra barajın gövde tipine de karar verilir. Daha önce mevcut olan verilerle birlikte elde edilecek yeni veriler süzgeçten geçirilerek baraj projelendirme çalışmalarında kullanılmaktadır. Projelendirmede ön planlama ve fizibilite çalışmaları ne kadar ciddi yürütülürse kati projede, detay revizyonların dışında büyük proje değişimleri ortaya çıkmayacaktır (Emiroğlu, 1999; Çiçek, 2007).

3.1. Barajların Sınıflandırılması

Barajlar büyüklüklerine göre büyük barajlar veya küçük barajlar (göletler) olarak sınıflandırılır. Ancak barajları; büyüklüklerine göre kesin olarak ayırmak mümkün değildir. Uluslararası Büyük Barajlar Komisyonu (ICOLD), büyük barajlar için aşağıdaki sınıflandırmayı yapmıştır (Emiroğlu, 1999).

- Kret ile temeli arasındaki yükseklik 15 m'den fazla olan barajlar,
- Yüksekliği 10 m ile 15 m arasından olan fakat buna ek olarak;
 - Kret uzunluğu > 500 m.
 - Hazne hacmi > 1000 000 m³
 - En büyük taşkın debisi > 2000 m³/s

gibi hususlardan en az birinin olduğu barajlar büyük barajlar olarak adlandırılır. Küçük barajlar veya göletler bu tanımın dışında kalan etüt, proje ve yapım esasları daha basit ve hızlı sonuç alıcı kriterlere göre yapılan barajlardır.

Baraj gövde tiplerinin, özelliklerinin farklı yönlerden değerlendirilmesine göre farklı sınıflandırmaları yapmak mümkündür. Barajlar, gövde şekillerine göre, dolgu ve beton barajlar

olmak üzere ikiye ayrılmaktadır. Dolgu barajlar; toprak dolgu barajlar, kaya dolgu barajlar ve ön yüzü beton kaplı kaya dolgu barajlar olarak sınıflandırılır. Beton barajlar ise; beton ağırlık barajlar, payandalı beton barajlar, beton kemer barajlar ve silindire sıkıştırılmış beton barajlar şeklinde sınıflandırılır. Şekil 2.1’de barajların değişik açılardan sınıflandırılması verilmiştir (Tarhan, 1996; Çiçek, 2007; Çarhoğlu, 2012).

3.2. Baraj Tip Seçimi

Bir baraj tipinin seçiminde birçok faktör rol oynar. Herhangi bir baraj tipinin en uygun ve ekonomik olduğuna karar vermeden önce genel olarak birden fazla alternatif incelenip ön proje çalışmaları yapılmaktadır. Bununla birlikte baraj yerine ve yapılış amacına en uygun ve en ekonomik baraj tipinin belirlenmesi için birden fazla faktörün birlikte incelenmesi gerekmektedir.

- Topoğrafya
- Baraj yeri jeolojisi ve baraj aksı litolojisi
- Malzeme yerinin baraj yerine uzaklığı
- Malzemenin temin edilebilirliği
- Bölgenin depremselliği
- İklim koşulları
- İnşaat süresi
- Ani su alçalması ve yükselmesi durumu
- Çevresel koşullar
- Baraj maliyeti
- Mühendislerin bilgi birikimi ve cesareti
- Dolusavak yerleşimi ve maksimum debi değeri

Aks konumunun teknik olarak tasarlanan baraj tipine uygun olup olmadığı, baraj gövde tipinin seçiminde birincil rol oynar. Bazı özel durumlar haricinde, aks konumu birden fazla tipte baraj gövdesi projeksiyonu için uygun olabilir. Böyle bir durumla karşılaşılması durumunda plana uygun baraj tipleri yerleştirilir, uzunlukları ve kesitleri hazırlanır ve diğer yapıların etkileri, ekonomik karşılaştırmalar, jeolojik koşullar, malzeme koşulları, sismik koşullar ve vadinin şekli dikkate alınarak istenilen baraj tipinin seçiminde büyük önem taşımaktadır. Bu konular Tablo 3.1’de özetlenmiştir. Bazı durumlarda tesisle ilgili başka bir yapının düşük maliyeti de baraj gövde tipinin seçiminde önemli bir faktör olabilir. Bunun bir örneği, baraj gövdesi ile dolusavak arasındaki ilişki verilebilir. Bir aks sahasında tasarlanan dolgu ve beton tipi barajların benzer maliyet değerlerine sahip olduğu, dolusavağın gövde dışındaki boşaltma kanalının uzun olması ve yapının büyük hacimde kazı ve beton sarfiyatı gerektirmesi, beton tipine göre düzenlenmiş

ekonomik dolusavak yapısı vücut, toplam maliyet önemli ölçüde düşecektir. Genel olarak baraj gövde tipinin seçimini belirleyen faktörler aşağıdaki başlıklarda açıklanmıştır.

Tablo 3.1. Baraj tipinin seçimi ve tip seçimine etki eden faktörler

Tip	Temel	Malzeme	Yapım Şartları	İklim Türleri	Yapım Süresi	Vadi Tipi	Yükseklik Sınırı	Sismik Davranış
Beton Kemer	Çok sağlam temel ve yamaç kayası	Beton	çok hassas işçilik ve özel teknoloji	her türlü	kısa	U ve V	çok yüksek	çok hassas
Beton Ağırlık	Çok sağlam temel	Beton	çok hassas işçilik ve özel teknoloji	her türlü	kısa	U ve V benzeri	yüksek	hassas
Toprak Dolgu	Her cins temel	Kil, killi çakıl filtre	hassas işçilik	uzun kuru sezon	uzun	-	alçak	dayanıklı
Kaya Dolgu	Gerekli önlemler alınarak her cins zemin	Kil kaya filtre	hassas işçilik	nispeten uzun kuru sezon	uzun	-	çok yüksek	dayanıklı
Ön Yüzü Beton Kaplı	gerekli önlemler alınarak her cins	Betonarme veya asfalt yüzey kaplama serbest drenaj	hassas işçilik ve özel teknoloji	her türlü	kısa	-	yüksek	dayanıklı
Silindirle Sıkıştırılmış	sağlam temel	Slump sıfır SSB beton	hassas işçilik	nispeten uzun kuru sezon	kısa	dar vadi	yüksek	nispeten hassas

3.3. Baraj Türleri

Baraj türleri aşağıda özet olarak verilmiştir (Emiroğlu, 2008).

Dolgu Barajlar (*Embankment Dams*)

- Homojen Toprak Dolgu Barajlar (*Homogeneous earthfill dam*)
- Topuk Drenli Toprak Dolgu Barajlar (*Earthfill with toe drain dam*)
- Zonlu Toprak Dolgu Baraj (*Zoned earthfill dam*)
- Yatay Drenli Toprak Dolgu Baraj (*Earthfill with horizontal drain dam*)
- Yatay ve Düşey Drenli Toprak D.B. (*Earthfill with vertical and horizontal drains dam*)
- Merkezi Kil Çekirdekli Kaya Dolgu Baraj (*Earth and rockfill, central core dam*)
- Merkezi Kil Çekirdekli Kum-Çakıl D.B. (*Earth and sand-gravel, central core dam*)
- Eğik Kil Çekirdekli Kaya Dolgu Baraj (*Earth and rockfill, inclined core dam*)

- Ön Yüzü Beton Kaplı Kaya Dolgu Baraj (*Concrete face rockfill dam -CFRD*)
- Ön Yüzü Asfalt Kaplı Kaya D.B. (*Bituminous concrete face earth and rockfill dam*)
- Ön Yüzü Asfalt Kaplı Kaya D.B. (*Steel face rockfill dam*)
- Ön Yüzü Membran Kaplı Kaya D.B. (*Thin membrane face earth and rockfill dam*)

Beton Ağırlık Barajlar (*Concrete Gravity Dams*)

- Zayıf Bağlayıcı İçerikli SSB Baraj (*Lean roller compacted concrete (RCC) dam*)
- Orta Bağlayıcı İçerikli SSB Baraj (*Medium-paste RCC dam*)
- Yüksek Bağlayıcı İçerikli SSB Baraj (*High-paste content RCC dam*)
- Simetrik Yüzlü Katı Dolgu Baraj (*The faced symmetrical hardfill dam*)
- Silindirle Sıkıştırma Baraj (*Roller compacted dam, RCD*)
- Klasik Beton Ağırlık Baraj (*Conventional concrete gravity dam, CCD*)
- Öngerilmeli Baraj (*Prestressed dam*)

Kemer Barajlar (*Arch Dams*)

- İnce Kemer Baraj (*Thin arch dam*)
- Klasik Beton Kemer Ağırlık Baraj (*Conventional concrete arch gravity dam*)
- SSB Kemer Ağırlık Baraj (*RCC arch gravity dam*)
- Çift Eğrilikli İnce Kemer Baraj (*Cupola (double-curvature arch) dam*)

Payandalı Barajlar (*Buttressed Dams*)

- Düz Döşemeli Payandalı Baraj (*Flat slab buttress dam*)
- Yuvarlak Başlıklı Payandalı Baraj (*Round-head buttress dam*)
- Masif Başlıklı Payandalı Baraj (*Massive head buttress dam*)
- Boşluklu Payandalı Baraj (*Hollow-buttress dam*)
- Çok Kemerli Payandalı Baraj (*Multiple arch dam*)

Barajlar; akarsuların depolanarak ihtiyacı karşılayacak şekilde kullanıma sunulmasını ve çevre ile insan hayatına zarar vermesini engelleyen yapılardır. Dünyada ve ülkemizde en sık kullanılan barajlardan biri olan dolgu barajlar ise yapı yerinin yakınından alınan veya kazılan doğal malzemenin sıkıştırılarak kullanılmasıyla inşa edilen bir baraj türüdür. Dolgu barajlarında çevreden elde edilen dolgu malzemeleri yüksek kapasiteli makinelerle sıkıştırılarak baraj gövdesinde kullanılmaktadır (Güneş, 2020).

ICOLD verilerine göre dünyadaki mevcut barajların yaklaşık %75'i dolgu barajlardır. Dolgu barajlarını üç farklı sınıfta incelemek mümkündür: (a) homojen gövde dolgu barajlar, (b) zonlu dolgu barajlar ve (c) geçirimsiz ön yüz dolgu barajlar. Homojen gövdeli dolgu barajlar yapımı en kolay baraj türüdür. Ancak bugün kullanımı nadirdirler. Aynı geçirimsizlik veya daha az geçirgenlik özelliklerine sahip tek bir malzemedan yapılmıştır. Homojen gövdeli dolgu barajlarında sızıntı etkilerinin kontrolünde problemlerle karşılaşmaktadır. Genellikle 30

metrenin altındaki barajlarda kullanılır. Edirne'de Karademir Barajı ve Konya'da May Barajı ülkemizde homojen dolgu baraj tipinin örnekleridir. Bu tür barajları eski uygulamalarda görmek mümkündür. Dolgu barajlar arasında en yaygın kullanılan baraj türü, zonlu dolgu barajlarıdır. Bu tür barajlar genellikle üç farklı zondan oluşur. Birincisi, kil gibi geçirgenliği düşük bir malzemeden oluşan çekirdektir. Çekirdek bölgenin temel işlevi sızdırmazlığı sağlamak ve baraja su sızmasını önlemektir. Merkezi çekirdekten hemen sonra ince bir filtre bölgesi bulunur. Filtreler genellikle iri taneli malzemelerden oluşur ve çekirdekten sızan su için bir drenaj görevi görür. Son olarak en dış alanda genellikle kaya dolgusu olan iri taneli bir malzeme kullanılır. Bu bölgenin işlevi barajın stabilitesini sağlamaktır. (Selçuk, 2019).

Dolgu barajları çoğunlukla doğal malzemelerden yapılır. Dolgu barajlarının sıkça tercih edilmesinin sebepleri; dolgu malzemesinin barajın yapılacağı yerden kolaylıkla elde edilebilir olması, dolgu malzemesinin kolay işlenebilir olması, dar vadiden geniş vadiye kadar her vadi şekline uygun olması, oluşacak farklı deformasyonlardan depremden diğer baraj türlerine göre daha az etkilenmesi ve ekonomik olmasıdır. Su seviyesi çok yükseldiğinde rezervuardan suyu serbest bırakacak bir dolusavak inşaatı gereklidir, çünkü set barajları suyun taşmasından kaynaklanan erozyona karşı savunmasızdır (Aslan, 2019).

3.3.1. Beton Barajlar

Beton barajlar, ana gövde malzemesi olarak beton kullanılarak yapılan barajlardır. Beton barajlar yüksek taşıma gücüne sahip sağlam kaya temeller üzerine inşa edilirler. Barajın temeli, gevşek zemin ve ayrılmış kaya kazıldıktan sonra inşa edilir. Beton, doğal malzemelerden daha mukavemetli ve geçirimsiz olduğu için beton barajlar daha az hacim kaplar. Beton barajlar, basınç ve çekme etkileri altında yüksek mukavemete sahiptir ve bu nedenle farklı geometrilerde kullanılabilir. Beton baraj uygulamaları, dolgu malzemesinin bulunmaması ve inşa edilmesi durumunda dolgu barajlarında stabilite problemlerinin ortaya çıkacağı dar vadilerde yaygındır. Beton ağırlık barajlar, tüm dış yüklerin etkisi sonucu meydana gelecek kaymaya ve devrilmeye karşı kendi ağırlığı ile mukavemet gösteren ve çoğunlukla dik üçgen en kesite sahip kütleli yapılarıdır. Bu tip barajlarda yüksek mukavemetli beton kullanılması önerilmektedir. Dolgu barajlar ile mukayese edildiğinde daha az hacim kaplarlar. Beton barajların en önemli özelliği, suyun akışını kontrol eden dolu savak, dip savak vs. gibi yapıların gövdeyle beraber tasarlanmasına imkân vermesidir. Beton barajlar inşaat sahasının durumuna ve zeminin taşıma gücüne bağlı olarak payandalı olarak da inşa edilebilirler. Şekil 3.1'de beton ağırlık barajına örnek olarak Sakarya'da bulunan ve yapımı 1956'da biten Sarıyar Barajı'nı görülmektedir (Selçuk, 2019; Güneş, 2020).



Şekil 3.2. Sakarya’da bulunan beton ağırlık türünde Sarıyar Barajı (Selçuk, 2019; Güneş, 2020)

a. Klasik Beton Ağırlık Barajlar

Barajı etkileyen su yükü ve diğer ikincil yükleri kendi ağırlıkları ile karşılayan barajlardır. Bir beton ağırlık barajının stabilitesi tamamen gövdesine bağlıdır. Geometrisi, baraj gövdesi veya temelindeki aşırı gerilmeleri önlemek için uyarlanmıştır. Ağırlık barajlarının memba yüzleri genellikle düz olarak planlanmıştır. (U) ve (UV) şeklindeki vadilerde ve orta genişlikteki vadilerde beton ağırlık tipi barajlar inşaata uygun olup, inşası için sağlam veya orta mukavemetli kaya temeller tercih edilmektedir. Dolusavak hafriyatının zor olduğu vadilerde, beton gövde üzerine dolusavak oturtmanın mümkün olması nedeniyle, bu tip barajlar avantaj sağlarlar. Ancak baraj yüksekliği arttıkça diğer baraj türlerine göre daha pahalı olmaktadır. Bu tip barajlar suyun itme ve döndürme kuvvetine ağırlıkları ile karşı koyarlar. Topografik koşullara bağlı olarak düz bir çizgi veya hafif kavisli yukarı akış veya ikisinin birleşik şekli olabilmektedir. Enine kesitleri genellikle üçgene yakın trapez şeklindedir. Ağırlık barajların inşa edileceği temel kayasının sağlam olması istenir, fakat bununla birlikte çok çatlaklı, değişik litolojideki ve alüvyonlar üzerine de inşa edilebilmektedirler. Vadi yamaçları hafif eğimli, vadi şekli geniş bir kanyon ya da V şeklinde ise bu tip barajın uygun olacağı uzmanlar tarafından belirtilmektedir. Bu tip barajlar; vadide temel kayası 6-9 m derinlikte ve taşıma gücü 3.2-4 MPa arasında K şekil faktörü 6 veya daha az olan vadiler için uygundur. Taban genişliği yaklaşık olarak yüksekliğin 2/3’ü kadar olmaktadır. Temelde etkili olan boşluk suyu basıncını ve suyun kaldırma kuvvetini azaltmak veya yok etmek için drenaj galerileri inşa edilmektedir (Emiroğlu, 1999; Çiçek, 2007).

b. Silindirle Sıkıştırılmış Beton (SSB) Barajlar

Silindirle sıkıştırılmış beton (SSB) barajlar; genellikle beton ağırlık barajları olarak kabul edilmektedir. Bazı yayınlarda bu tip barajın rijit bir baraj ile dolgu barajı arasında geçiş

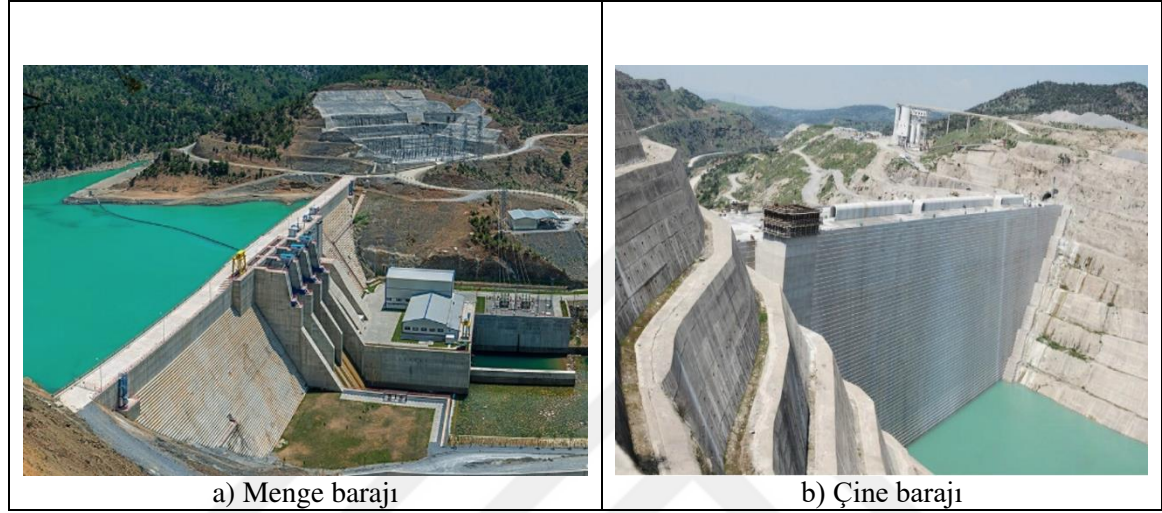
oluşturduğu belirtilmektedir. Bu tür barajların stabilite gereksinimleri ve analiz yöntemleri, ağırlık barajları ile aynıdır. Bu barajlar yapım yöntemlerinin yanı sıra; yardımcı yapıların karışım esasları ve detayları önünde ağırlık barajlarından ayrılır. Silindirle sıkıştırılmış beton barajların yapımında özel geliştirilmiş SSB tekniği kullanılmaktadır (Karadağ, 2018).

Silindirle Sıkıştırılmış Beton (SSB), kırk yıl önce uygulanabilir bir beton türü olarak ortaya çıkmıştır. Baraj inşaatı sırasında düşük maliyeti ve hızlı konuşlandırılması nedeniyle SSB tüm dünyada hızla popüler hale gelmiştir. Sıfır çökmeye sahip olmak SSB'yi geleneksel olarak titreşimli betondan (CVC) ayırmaktadır. SSB, yeni barajlar, mevcut barajların, kaldırımaların ve otoyolların rehabilitasyonu gibi çeşitli inşaat alanlarında kullanılmaktadır (Söğüt, 2014).

Silindirle sıkıştırılmış betonların geleneksel betonlara göre en önemli farkı, aynı çimento dozajı ile ancak daha düşük su/çimento oranı ile kuru bir karışım olması ve vibratör ile sıkıştırılamayacak kadar rijit ve kuru olmasıdır. Bu nedenle SSB'lere karıştırılıp yerleştirildikten sonra yüzeyden çok güçlü bir sıkıştırma işlemi uygulanması gerekmektedir. SSB'lerin normal betonlara göre hızlı üretim tekniği, erken yaşlarda yüksek dayanımı, düşük üretim maliyetleri, hızlı yapım süreci ve daha az bağlayıcı malzeme nedeniyle baraj gibi kütle beton yapılarda yaygın olarak tercih edilmektedir. Ayrıca, SSB üretiminde atık malzemelerin (uçucu kül, yüksek fırın cürufu vb.) yüksek bulunabilirliği SSB'lerin öne çıkmasında etkili olmuştur (Mardani-Aghabaglou vd. 2020).

SSB, titreşimli silindir ile sıkıştırılan ve sıkıştırma işlemi sırasında yükleri taşıyabilen bir betondur. Fiziksel olarak asfalt karışımı gibi görünür. SSB, mekanik özellikleri incelendiğinde toprak malzemesi ile CVC'nin kombinasyonu olarak görülebilir. Mukavemet kazancı, performansı ve elastik özelliklerinden dolayı CVC'ye benzer. Öte yandan SSB'nin geçirgenliği, dayanıklılığı ve yerleştirme yöntemleri, toprak ve kaya dolgu malzemeleri ile paralel davranış göstermektedir. SSB barajları hem yapı hem de malzeme mühendislerinin çabalarıyla ortaya çıkmıştır. 1950'lerden 1980'lere kadar, ağırlıklı beton barajların popülaritesi, geniş vadi sahalarında inşa edilmesinin maliyetli olması nedeniyle azalmıştır. Bu yıllarda düşük maliyetleri nedeniyle dolgu barajları beton ağırlık barajlarına tercih edilmiştir. Bununla birlikte, ekonomik avantajlarına rağmen, dolgu barajları hasara ve arızaya daha yatkındır. 1960'larda, yapı ve malzeme mühendisleri, güvenlik ve finansal sorunları çözmek için beton ağırlık barajı ve dolgu barajının avantajlarını birleştirmeye çalışmıştır. 1970'lerde, SSB kullanılarak bazı laboratuvar testleri ve saha uygulamaları yapılmıştır. 1974 yılında, Tarbela Barajı'nın derivasyon tünelinin onarımı ve yardımcı ve hizmet dolusavaklarının rehabilitasyonu, malzemenin hızlı yerleştirme özelliğini gösteren SSB kullanılarak yapılmıştır, (Amerikan Beton Enstitüsü (ACI) 207.5R-99). Bu çalışmalarda, ilk SSB barajları, Amerika Birleşik Devletleri'nde Willow Creek Barajı, 1982 ve Japonya'da Shimajigawa Barajı, 1981 yapılmıştır. Bu iki barajın inşası, dünya çapında geniş kabul gören yeni SSB barajlarına ışık tutmuştur. Şekil 3.2 Türkiye'de inşa edilen Menge ve Çine

SSB Barajlarını gösterilmektedir. İnşaatda kullanılan çimentolu malzeme miktarı bakımından SSB barajları 3 kategoriye ayrılabilir: Yalın SSB barajlar (yani, sert dolgu barajlar) karışım tasarımlarında 100 kg/m^3 'ten daha az çimentolu malzeme içerir. Orta macun SSB barajlarının karışım içeriği $100\text{-}149 \text{ kg/m}^3$ arasında çimentolu malzeme içerir. Çimento içeriği 150 kg/m^3 'ten fazla olan çimentolu barajlara sert macun SSB barajlar denir. Şekil 3.2'de Türkiye'deki iki SSB barajı görülmektedir (Söğüt, 2014).



Şekil 3.3. Türkiye'de iki SSB barajı (Söğüt, 2014)

Ülkemiz'de son yıllarda SSB yöntemi kullanılarak yapımı tamamlanmış ve devam eden bazı barajların genel bilgileri Tablo 3.2'de verilmiştir (Mardani-Aghabaglou vd. 2020).

Tablo 3.2 Ülkemiz'de SSB kullanılarak tamamlanmış ve yapımı devam eden barajlar, (Mardani-Aghabaglou vd. 2020)

Baraj	SSB Hacmi (m^3)	Çimento (kg/m^3)	Uçucu Kül (kg/m^3)	Yükseklik (m)	Uzunluk (m)	Başlama	Bitiş
Kocaeli Karamürsel	130.000	75	45	69	203	2016	-
İhsaniye	49.000	65	50	47	153	2016	-
Narlı	191.000	130	0	60	363	2013	-
Beyhan-II	2.224.000	130	0	150	516	2012	2017
Yukarı Kaleköy	1.192.000	130	0	103	346	2013	2018
Aşağı Kaleköy	1.871.000	90	60	124	944	2013	2017
Melen	640.000	85	130	100	404	2015	2017
Köroğlu Kotanlı-I	330.000	81	39	71	268	2008	2017
Kavşaktepe	108.000	75	50	54	246	2013	2017
Ardıl	245.000	85	130	70	250	2012	2015
Kotanlı-II	750.00	50	50	133	200	2011	2016
Göktaş-I	1.650.000	50-100	110-120	177	405	2011	2015
Ayvalı	186.000	95	0	78	176	2008	2015
Beyyurdu							

c. SSB Barajların Sınıflandırılması

SSB baraj çeşitliliği, kullanılan malzemelerdeki farklılığa veya inşaat yöntemine dayanmaktadır. Jerome Raphael ile 1/1 simetrik eğimli ve düşük bağlayıcılı karışımlarla başlayan bu süreç, Japonların geliştirdiği ve normal beton barajlara yakın SSB tekniği ile İngilizlerin geliştirdiği yüksek bağlayıcılı SSB'a sahip barajlar ile devam etmiştir (Çiçek, 2007).

SSB'ler, genel olarak mukavemet özelliklerini artırmak için içeriklerinde kullanılan bağlayıcı oranına göre aşağıda verildiği gibi sınıflandırmak mümkündür.

Zayıf SSB Baraj (Rolled Dry Lean Concrete)

Bağlayıcı oranı genelde 100 kg/m^3 'ten daha azdır. Bunun yanında içerisindeki olmaktadır. İçeriğindeki çimento (bağlayıcı) miktarının azlığı düşük hidrasyon ısısı olmasını sağlar. Taşdemir (2014) yaptığı çalışmada bunun SSB dayanımını arttırıcı bir etken olduğundan bahsetmiştir. Fakat betonun Elastisite modülü daha düşük olmaktadır. Yüksek sünme değerine sahip olması daha geniş alanlara kolaylık beton dökümü sağlar (Taşdemir, 2014).

Zayıf SSB karışım tasarımı, Proctor'un toprak sıkıştırma prensiplerini içeren maksimum yoğunluk felsefelerini birleştirir. Belirli çimento ve agrega oranları için, uygulanan bir sıkıştırma kuvvetinde SBB karışımında maksimum yoğunluğu sağlayacak optimum nem oranı tanımlanmıştır. Çimento içeriği yeterli olduğunda, agrega parçacıklarını karıştırmak ve yeterli mukavemetli sertleşmiş SBB üretmek için, sıkıştırma sonrasında tüm boşlukları doldurmaya yetecek yapıştırıcı oranı yoktur. Bu nedenle bir baraj yapısında donma-erime hasarına karşı yeterli dayanıklılık oluşmaz, yapı daha geçirgen hale gelir ve sızmayı önlemek için ek önlemler alınması gerekir. Donma-çözülme hasarını önlemek için en az 0,3 m SBB tüketilecek şekilde zayıf SBB barajlarının akış aşağısında geçirimsiz bir yüzey yapmak yaygın bir uygulamadır. Sızmayı azaltmak için katmanların yüzeylerinde düzleme harcı veya memba yüzeyinde klasik beton kaplama gibi tedbirlerin alınması gerekir. Düşük dayanıklılık ve yüksek geçirimliliğe bağlı olarak zayıf bir RCC barajı aynı zamanda katman yüzeylerinde daha düşük bağlanma mukavemetine sahiptir. Zayıf SBB barajı, geleneksel beton barajlardan veya beton baraj yaklaşımı ile inşa edilen SBB barajlara göre daha düşük yoğunluğa sahip olduğundan stabilitenin sağlanması için daha fazla kütleye ihtiyaç duyulur. Zayıf bir SBB baraj için tipik çimento oranı $45 \text{ ile } 150 \text{ kg/m}^3$ arasında değişmektedir. Adiyabatik ısı üretimi genellikle zayıf SSB karışımları için bir genellikle bir problem oluşturmamakla birlikte çimentonun bir kısmı yerine uçucu kül gibi puzolanlar kullanılabilir. İri agrega tanecikleri arasında direkt teması önlemek için yeterli miktarda kum ve ince malzeme kullanılmalıdır. 200 nolu elekten geçen plastik olmayan ince dane miktarı yüzde 5 ile 10 arasında genelde sınırlandırılmıştır. Zayıf SBB yaklaşımı kullanımının avantajları: hidrasyona bağlı ısı yayılımını azaltmak için puzolan kullanmaya gerek göstermez, bitmiş barajlar düşük elastik modül ve yüksek sünme oranı gösterir, daha az çatlama potansiyeli

ve az dikey derz ihtiyacı gösterir. A.B.D'deki Willow Creek ve Monskville barajları bu metodun ilk örneğini oluşturmaktadır (Entürk, 2002).

Normal Dozda Bağlayıcı İçeren SSB Barajlar (*Medium paste RCC dams*)

Bağlayıcı içeriği (yani çimento ve puzolan) 100-149 kg/m³ arasındadır (Taşdemir, 2014). İnşaat tarzı, düşük doz bağlayıcılı SSB barajları ile aynıdır. Tip seçimi, barajın temeli, vadi şekli ve özellikle mevcut puzolanik malzemenin mevcudiyeti ile ilgilidir (Çiçek, 2007).

Yüksek Oranda Bağlayıcı İçeren SBB Barajlar (*High paste RCC dams*)

Bağlayıcı içeriği 150 kg/m³ ten daha fazladır. Geleneksel beton barajlarla aynı performansa sahiptir. Gövdenin tümü geçirimsiz olmaktadır. Yüksek dayanım değerleri için düşük çimento oranı ve yüksek miktarda puzolanik malzeme içerir (Taşdemir, 2014).

Yüksek yapıştırıcı oranlı SBB karışımlar ilk defa 1970'li yıllarda Tennessee Valley Authority tarafından keşfedilmiş ve daha sonra İngiltere'de Malcolm R. Dunstan tarafından geliştirilmiştir. İngiltere'de geliştirilen bu yöntem (*high paste content rcc dam*) ABD' inde ilk olarak Upper Stillwater Barajı'nda uygulanmıştır. Bu Dunstan, yüksek mukavemet özellikleri elde etmek için düşük yüzdeli hava boşluk yoğunluğu elde etmeyi düşünmüştür ve bunun yüksek bir harç/yapıştırıcı oranıyla elde edilebileceğini bulmuştur. Bu oran, bağlayıcı hacminin (çimento, su ve kullanılıyorsa içeri giren hava) harç hacmine (bağlayıcı ve ince taneli malzeme) oranıdır. Sıfır çökmeli ve titreşimli silindiri geçmek üzere taşıyacak şekilde düzenlenmiş karışımlar arasında SSB'nin yüksek yapışma oranı, toprak dolgu baraj görünümünden daha fazla sıvı kıvamı göstermektedir. Agregalar arasındaki tüm boşlukları doldurmak için kullanılan bağlayıcı madde yeterli miktarda olmalıdır, böylece karışımın işlenebilme özelliği artar. Yüksek yapıştırıcı oranlı karışımların en belirgin özellikleri: yoğun ve geçirimsiz sertleşen SSB oluşturur, katmanlar arasındaki yüzeylerde sızıntıyı önlemek için çok fazla bağlayıcı dayanımına (kohezyon) sahip olmasıdır. Yapıştırıcı oranı yüksek olan karışım daha iyi şekil alabildiğinden ve soğuk derz haricinde hiçbir yerde tesviye harcı kullanılmadığından bağlayıcı dayanımları zayıf SSB'ye göre daha fazladır. Ayrıca yapıştırma oranı yüksek SSB'nin bir diğer farkı da cephe karışımı ile barajlarda sızıntıya karşı bariyer oluşturmalarıdır. Genel olarak barajların iç kısımlarını geçirmeyen SSB, yüksek yapıştırıcı oranına sahip olup kaplamalarda ise hava girişli klasik beton kullanılmaktadır. Bu sayede donma-çözölmeye karşı direnç arttırılır. Karışımın işlenebilirliği Vebe yöntemi ile test edilir. Böylece su içeriği ile istenen kıvam arasında bir ilişki vardır. Vebe testinde ağırlıkta titreşimli bir tabla kullanılmakta ve SSB karışım yüzeyinin yükselmesi için gereken süre fazla çimento bağlayıcı kullanılarak ölçülmektedir. Yüksek yapıştırıcı oranı SSB'de tipik çimento bağlayıcı oranları genellikle 150 kg/m³'ü aşmaktadır. Maliyet düşürmek ve çimento hidrasyonunun neden olduğu dahili ısı dağılımını kontrol etmek için çimento malzemesinin yüzde 60 ile 80'ine kadarı uçucu kül gibi puzolan bulunabilir (Entürk, 2002).

Silindirle Sıkıştırılmış Baraj (Roller Compacted Dam-Silindirle Sıkıştırılmış Baraj)

Bu yöntem Japonya'da geliştirilmiştir ve daha çok dünyanın diğer yerlerinde kullanılanlardan farklıdır. Bağlayıcı içeriği 120~140 kg/m³ arasında çimento oranı ile %30 oranında uçucu kül içeren ve tabaka kalınlığı SBB'ye göre daha kalın olan (60~70 cm) Japon teknolojisi ile baraj imalat şeklidir (Taşdemir, 2014).

d. SSB Barajların Tercih Sebepleri ve Avantajları

Puzolan kullanımı, betonun uzun süre dayanımını sağlamasının yanı sıra hidrasyon ısısını azaltarak işlenebilirliği artırmıştır. Ayrıca klasik beton ağırlık barajı kadar dayanım elde edilmektedir. Düşük hidrasyon ısı ve inşaat tekniği nedeniyle özel soğutma sistemlerine ihtiyaç duyulmaz. Çimento oranı düşürerek yerine puzolan (çoğunlukla uçucu kül) kullanılmasıyla ekonomiklik sağlanmaktadır. Bugün SSB barajlarında küçük miktarlarda çimento ve büyük miktarlarda uçucu kül kullanma yönünde genel bir eğilim vardır. Geleneksel beton barajlarda kalıp işlemleri SSB'da olmadığından bu bakımdan bu tip barajlara göre avantajlıdır. Geleneksel betonda %3 ile %6 oranlarında bir hava içeriği bulunmasına karşın, SSB %1 ile %3 oranında hava içermektedir. Maliyet açısından SSB barajlar, kemer ağırlık ve bazı durumlarda toprak dolgu ve kaya dolgu barajlara göre, daha avantajlı olmaktadır. Zamandan minimum %30 tasarruf edilmiş olur. Zamandaki bu azalma, barajın yapım maliyetlerini düşürür. İnşaat süresinin kısaltılması, inşaat süresi boyunca faizi azaltmakta ve anaparanın kısa zamanda iadesini sağlaması açısından avantaja sahiptir. SSB karışımında düşük kalitede agreganın kullanılabilirliğinin ortaya çıkmasıyla kazanılacak faydalar. Derz iyileştirme maliyetlerinin azalması. minimum nitelikli personel gereksinimi nedeniyle uygulama kolaylığı sağlaması açısından avantajlıdır. Toprak dolgulu yapılarda, kil malzemesinde en büyük sıkışmayı sağlayacak optimum su içeriğine kadar ıslatılmaya da özellikle kurutma işlemindeki zaman kaybına benzer bir durumun olmaması ve dolayısıyla zamandan tasarruf sağlanması avantajına sahiptir. SSB barajları, barajların rehabilitasyonunda işçilik, yapım kolaylığı ve maliyet açısından diğer türlere göre avantajlıdır. SSB barajlarının yapımında iş makinelerinin kullanımı son derece yaygındır. SSB barajları, taşıma, yayma ve sıkıştırma işlemlerinde geleneksel beton ağırlık barajlarına göre avantajlara sahiptir. SSB barajları, inşaat sırasında meydana gelen sellerden diğer birçok baraj türüne göre çok daha az zarar görür. Katı dolgu barajlar, yükü daha geniş bir alana yaydığı için zayıf kaya temeller üzerine inşa edilme imkanına sahiptirler (Çiçek, 2007).

e. SSB Betonunda Kullanılan Malzemeler

SSB, sıfır slump (çökme) değerine sahip agrega, çimento, su, uçucu kül ve gerekli görüldüğü takdirde bazı katkı maddelerinin de içinde bulunduğu ve bu malzemelerin belirli oranlarla karıştırılmasından elde edilen beton türüdür (Koçyiğit, 2019). Geleneksel betona göre silindirle sıkıştırılmış betonun en büyük farkı kıvamından kaynaklanmaktadır. SSB'nin üzerinden

silindirin batmadan geçebileceği kadar kuru kıvamda olmalıdır (Horzum, 2009). SSB'de geleneksel betonlarda kullanılan ince ve iri agregalar, uçucu kül, çimento, su ve katkı maddeleri kullanılmaktadır. Karışımın tasarımında temel ilkelerden biri agrega arasındaki boşlukların tamamen harç ile doldurulmasıdır. Yetersiz harç boşlukların tam dolmaması; artan hava boşluğu, ayrışma ile sıkıştırmada zorluk anlamına gelir. Bu da katmanlar arasında yetersiz bağlanmaya, su sızmasına ve düşük basınç dayanımına neden olur (Çiçek, 2007). Karışımlardaki su/bağlayıcı oranı 0.20 ile 0.40 arasındadır. SSB'nin ekonomisini ve kalitesini belirlemede en önemli faktörlerden biri, diğer beton türlerinde olduğu gibi, uygun agrega kaynağının seçimidir., SSB kaplama karışımlarının hacminin %70-80'ini agregalar oluşturmaktadır (Çetin, 2009).

Agrega

Agrega, kum, çakıl, kırma taş gibi doğal kaynaklı granüler bir malzemedir veya yüksek fırın cürufu, genişletilmiş perlit, genişletilmiş kil gibi yapay kaynaklı olup, çimento ve sudan oluşan bir bağlayıcı yardımıyla birleştirilir. 100 mm'ye kadar çeşitli boyutlarda tanelerden oluşan kum, çakıl veya kırmataş gibi mineral kökenli malzemelere agregalar denir (Toptaş, 2011).

Silindire sıkıştırılmış betonlarda tıpkı geleneksel beton gibi ince ve iri agregalar kullanılır. SSB'de kullanılan agrega hacimce %85'ten fazla olduğu için, toplam özellik SSB özelliklerini doğrudan etkiler. Agregaların tane boyut dağılımı, su emme miktarı, özgül ağırlık, aşınma direnci, plastisite indeksi, alkali-silika reaksiyonları ve dayanımları SSB özelliklerini doğrudan etkiler (Mardani-Aghabaglou vd. 2020).

Bu özellikler agreganın basınç, çekme ve kesme dayanımı, elastik özellikleri, ısı özellikleri ve dayanıklılığıdır. Bu nedenle, daha yoğun, daha yüksek mukavemetli ve üniform SSB elde etmek için, daha yüksek kalitede ve uygun derecelendirilmiş bir agrega seçmek gerekir. SSB üretiminde kırma ve doğal agrega kullanılabilir. Betonun harç ihtiyacı, agrega boşluk hacmi ve tane şekli ile belirlenir. SSB'deki en büyük tane boyutu, 200 nolu elekten geçen miktar ve kum içeriği gibi özellikler, geleneksel betona göre bazı farklılıklar göstermektedir. SSB betonlarında agreganın tane şekli, mukavemet üzerinde geleneksel betonlara göre daha az etkiye sahiptir. Bu olay, farklı karıştırma, taşıma ve sıkıştırma ekipmanlarından kaynaklanmaktadır. Alkali agrega reaksiyon potansiyeli SSB'de geleneksel betona göre daha azdır. Bunun nedeni SSB'nin düşük çimento ve su içeriğidir (Ağralıoğlu, 2005).

Agregalar elde edilme şekline göre iki grupta toplanabilir.

- **Doğal agrega:** Teraslar, nehirler, denizler, çöller, göller ve taş ocaklarından elde edilen kırık veya kırılmamış agregadır.
- **Yapay Agrega:** Yüksek fırın cüruf taşı, eritme cürufu veya yüksek fırın cüruf kumu gibi endüstriyel bir ürün olan kırık veya kırılmamış agregadır.

Agregalar aşağıda gösterildiği gibi partikül boyutlarına göre sınıflandırılır (Toptaş, 2011).

İri Agreg

SSB'de kullanılan en büyük agrega partikül boyutu genellikle 76 mm'dir. Bundan daha büyük agregalar büyük bir ayrışma sorunu yaratacağından ve ayrıca daha büyük üretim, işleme ve döşeme ekipmanı gerektireceğinden ekonomik değildir. Agreg boyutları SSB'nin sıkıştırılabilirliğini etkiler. SSB tabakalarının döşeme yüksekliği, en büyük tane büyüklüğünün en az 3 katı olmalıdır. Büyük tane çaplı betonlar için daha büyük sıkıştırma kuvveti gereklidir. Ayrışma olasılığı, tane çapı 38 mm'den büyük olan SSB'de daha yüksektir. Ayrışmayı önlemek için üretim, nakliye ve döşeme ekipmanları doğru seçilmelidir. En büyük tane boyutu seçiminde; yeterli mukavemet, bağlanma ve geçirgenlik sağlamak için, ayrışmayı önleme maliyeti de dikkate alınmalıdır. Klasik betonda olduğu gibi en büyük tane boyutu arttıkça agrega boşluk oranı azalır ve dolayısıyla harç miktarı azalır. Harç ihtiyacının azalması nedeniyle baraj gibi büyük kütleli SSB'lerde hidratasyon ısısından kaynaklanabilecek termal çatlaklar önlenecek ve maliyetler düşürülecektir. Ayrıca agrega üretim maliyeti de azalmış olacaktır (Mardani-Aghabaglou vd. 2020).

İnce Agreg

İnce agrega, doğal kum sınıflandırmasındaki herhangi bir eksikliğin giderilmesi için genel olarak dayanıklı doğal kum veya kırılmış kum ile desteklenmiş doğal kumdan oluşmalıdır. Üretilen kum parçacıkları ağırlıklı olarak kübik olup düz ve uzun partiküller içermemelidir. Agregalar arasındaki boşlukları dolduracak ve agrega çevresini saracak hamur içeriğini de belirler. Ayrıca, agreganın gradasyonu, tipi, kalitesi; SSB'nin sıkıştırılması için gerekli enerjiyi ve ayrıca optimum sıkıştırmayı elde edebilmek için silindirlerin geçiş sayısını etkiler. İnce agrega oranı %50 civarında tutularak beton daha kohezif hale getirilip ayrışma oluşma potansiyelini azaltılmaktadır. Beton yaklaşımıyla tasarlanan SSB'lerde kum miktarı genellikle toplam agreganın yüzde 30-50'si arasında olmaktadır. Zemin yaklaşımıyla tasarlanan SSB'lerde ise kum oranı toplam agreganın %40-55 arasında olabilir (Andriolo ve Polat, 2006).

Çimento

Klasik betonlarda kullanılan çimento tipleri silindir ile sıkıştırılmış betonlarda da kullanılmaktadır. Çimento, kalker ve kil karışımının yüksek sıcaklıkta pişirildikten sonra öğütülmesinden elde edilen bağlayıcı bir malzemedir. Temel bağlayıcı malzeme olan çimentonun temel işlevi; suyla tepkimeye girerek bağlayıcı özelliği ile malzemelerin birbirine yapışmasını sağlayarak beton malzeme oluşturmaktır (Koçyiğit, 2019).

Baraj gibi yapılarda kütle beton dökümü sırasında oluşan hidratasyon ısısını düşürmek için düşük ısılı portland çimentosu kullanılmalıdır. Bu düşük sıcaklık portland çimentosunun kullanımı hidratasyon ısısının neden olduğu çatlak oluşumunu önler ve enine derzleri azaltır. Karışımda düşük çimento içeriğinin kullanılması hidratasyon ısısını düşürmenin yanı sıra daha geçirimsiz bir yapı oluşmasını ve ekonomik olarak avantaj elde etmeyi sağlar (Horzum, 2009).

Bu çimento türlerinin ilk günlerdeki dayanımı normal Portland çimentosundan daha düşüktür. Ancak, yapılan deneylerde dayanımın ileri yaşlarda daha yüksek değerlere ulaştığı tespit edilmiştir. Normal portland çimentosu, açığa çıkan hidratasyon ısısının düşük olması nedeniyle çimento miktarının düşük ve puzolanik malzeme miktarının fazla olduğu barajlarda da kullanılmaktadır. İzmir Beydağ Barajı'nda 60 kg/m³ CEMI 42.5R tipi çimento ve 30 kg/m³ uçucu kül, Denizli Cindere Barajı'nda 50 kg/m³ CEMI 42.5R tipi çimento ve 20 kg/m³ uçucu kül kullanılmıştır. Japonya'da yapılan SSB barajlarında genellikle 120 kg/m³ çimento kullanılmaktadır (Mardani-Aghabaglou vd., 2020).

Genel olarak, endüstriyel veya kentsel kaplamalar için tasarlanmış ve üretilmiş SSB karışımlarındaki çimento içeriği 250-350 kg/m³ arasında değişmektedir. Bu oran, karışımdaki toplam kuru malzemenin ağırlıkça %12-16'sına karşılık gelir. Aşırı çimento dozu, büzülme çatlaklarında ve üretim maliyetlerinde artışa neden olabilir (Pektaş, 2015).

SSB'lerde düşük çimento içeriğinin kullanımının avantajları aşağıda sıralanmıştır:

- Düşük hidratasyon ısısı sebebiyle betonda çatlak oluşumu riskinin azalması,
- Çatlama riski azaldığından dolayı geçirimsizliği daha düşük bir beton elde edilmesi,
- Betonun soğutma masraflarının azaltması veya ortadan kaldırması,
- Düşey derz sayılarının azalması,
- Ekonomik olması,
- Çimento kullanımından kaynaklanan durabilite problemlerinin azalması (Horzum, 2009).

Karma Suyu

SSB'de kullanılacak karışım suyunun geleneksel betonlarda olduğu gibi belirli özelliklerde olması gerekmektedir. SSB karışımı için kullanılacak suyun kalitesi geleneksel beton karışımında kullanılan suyla aynı olmalıdır. Karışım suyunun içilebilir nitelikte olması ve içinde mümkün olduğu kadar klorürler, sülfatlar, şekerler, alkaliler, nitratlar ve fosfatlar gibi bazı kimyasallardan mümkün olduğunca arındırılmış olmalıdır (Taşkınsu, 2019).

Karışımında kullanılacak karışım suyu miktarı; kullanılan agreganın özgül yüzeyi ile inceliğine, bağlayıcı cinsi ve miktarına bağlıdır. Yüksek miktardaki mineral katkılar ve 200 nolu elek altı malzeme su ihtiyacını arttırır. Yapılan çalışmada 152 kg/m³ uçucu kül ile maksimum tane çapı 38 mm olan kırmataş agrega kullanılarak 77 kg/m³ optimum su miktarı bulunmuştur. Çimento ve gradasyon aynı kalması kaydıyla 110 kg/m³ su miktarı bulunmuştur (Sürmeli, 2002).

Katkı maddeleri

Mineral katkı maddeleri çoğunlukla silis veya silis-alümin bazlı malzemelerdir. Bağlayıcı özelliği az olan veya hiç olmayan mineral katkı maddeleri, nemli ortamlarda ve normal sıcaklıklarda ince öğütüldüğünde kireçle kimyasal olarak reaksiyona giren ve bağlayıcı hale gelen inorganik maddelerdir (Mardani-Aghabaglou vd., 2020).

Uçucu kül

Beton karışımında çimento ağırlığının %15-20'si oranında uçucu kül kullanılması ince malzeme miktarını artırdığı ve bu da beton kaplamanın sıkıştırılmasını kolaylaştırmaktadır. Uçucu kül kullanmanın bir başka yararı da alkali agrega genişlemesini azaltmasıdır. Taşdemir (2002) çalışmasında uçucu külle ilgili detaylı bilgilere yer vermiştir. Ayrıca, çimento + uçucu kül karışımlarında uzun süreli dayanım kazancı, sadece çimento içeren karışımlara kıyasla genellikle daha yüksektir. Uçucu kül en yaygın olarak kullanılan mineral katkıdır. Bu malzeme, termik santrallerinde öğütülmüş kömürün yanmasıyla açığa çıkan bir üründür. Uçucu kül, termik santrallerin bacalarındaki tozun elektrostatik filtrelerle yakıt olarak toz haline getirilmiş linyit veya taş kömürü kullanılarak tutulmasıyla elde edilen bir malzemedir. Uçucu kül, çimentonun hidratasyonu sonucunda oluşan kalsiyum hidroksit Ca(OH)_2 ve betonun boşluk çözeltisindeki alkali hidroksitler ile reaksiyona girmektedir. Ayrıca uçucu külün betonun dayanıklılığına zararlı olan alkali-agrega reaksiyonunu önlemede koruyucu bir malzeme olduğu tespit edilmiştir. Uçucu kül içindeki camsı silikatlar ile çimentodaki alkali hidroksitler arasındaki reaksiyonun alkali miktarını tüketeceği veya azaltacağı bilinmektedir. Bu nedenle uçucu külün, reaktif silisli agregalarla reaksiyona girecek alkali miktarını azaltarak, alkali agrega reaksiyonunun neden olduğu betonda genleşme ve çatlamayı önlediği veya azalttığı bilinmektedir (Taşdemir, 2002; Mindness vd. 2003; Mardani-Aghabaglou vd. 2020).

Uçucu kül kullanımı sıfır çökme değerine sahip betonun işlenebilirliğini artırır ve kütle betonda hidratasyon sıcaklığının düşürülmesinde olumlu bir etkiye sahiptir. Ayrıca uçucu külün, SSB baraj uygulamalarında özellikle önemli olan prizi geciktirme özelliğine sahiptir. Yapılan çalışmalar sonucunda uçucu kül kullanımının SSB'nin mekanik ve dayanıklılık özelliklerinin iyileştirilmesine katkı sağladığı görülmüştür. Uçucu kül, çimento hidratasyonu ile açığa çıkan kalsiyum hidroksit ile reaksiyona girerek boşlukları doldurur ve betonun geçirgenliğini azaltır. Ayrıca küçük boyutlu uçucu kül partikülleri betondaki boşlukları reaksiyona girmeden fiziksel olarak doldurarak sızdırmazlığa katkıda bulunabilir. Beton numunelerinin karışım oranları Tablo 3.3.'de verilmiştir (Sun vd. 1998).

Tablo 3.3. Beton numunelerinin karışım oranları (Sun vd. 1998)

Seri	Çimento (kg)	Uçucu kül (kg)	Kimyasal katkı (kg)	Kum (kg)	İri agrega (kg)	Su (kg)
F0	300	0	1.5	802	1309	114
F15	270	45	1.575	752	1332	113
F30	240	90	1.65	699	1348	113
F45	210	130	1.725	650	1373	113
NB	330	0	0.825	638	1344	1

SSB örneklerinde uçucu kül kullanımının betonların 28 ve 90 günlük eğilme ve yorulma dayanımlarını arttırdığı yapılan çalışmalar sonucunda görülmüştür. Yapılan bir çalışmada hem basınç dayanımı hem de eğilme dayanımı açısından en yüksek sonuçların %45 uçucu kül katkılı

SSB ile verildiği görülmüştür. Uçucu kül içeren ve içermeyen SSB'lerin yorulma dayanımı normal betona göre %40-50 artmıştır (Cao vd. 2000). Uçucu külün özgül ağırlığı çimentodan daha olmasından dolayı, çimento yerine aynı ağırlıkta uçucu kül ikame edildiğinde hacim artacak, beton daha plastik ve kohezif hale gelebilmekte ve işlenebilirliği artabilmektedir. SSB karışımında uçucu kül kullanım amaçları aşağıda listelenmiştir (Mardani-Aghabaglou vd., 2020).

- Betonun enine derzleri azaltmak ve hidrasyon ıslığını en aza indirmek,
- Betonun işlenebilirliğini artırmak,
- Betonun su geçirgenliğini azaltmak,
- Betonun ileri yaş dayanımını daha yüksek değerlere çıkarmak,
- Dolgu malzemesi olarak boşluk oranını azaltmak,
- Çimento dozajını düşürerek beton maliyetini azaltmaktır.

Granüle yüksek fırın cürufu

Demir üretiminde yüksek fırında, demir cevherinden demir alındıktan sonra kalan malzemeye cüruf denir. Cürufun içerisinde silis, alümin ve kireç maddeleri bulunmaktadır. Yüksek fırın cüruflarının yoğunluğu 2.85 ile 2.95 arasında değişmektedir. Taze ve sertleşmiş SSB'nin özellikleri üzerinde cüruf kaynağı ve inceliği etkilidir. Granüle yüksek fırın cürufu, sodyum hidroksit NaOH veya kalsiyum hidroksit Ca(OH)_2 gibi aktivatörler kullanılarak etkinleştirilebilir. Ayrıca Portland çimentosunun hidrasyonu ile açığa çıkan Ca(OH)_2 'yi ince öğütme ile bağlayarak hidrolik özellik kazanır ve tobermorit jelleri ortaya çıkarır. Granül YFC çimento endüstrisinde CEM III tipi katkı çimento üretiminde ve sülfata dayanıklı beton üretiminde mineral katkı maddesi olarak kullanılmaktadır. Ayrıca amorf olmayan ve topraksız cüruf beton agregası olarak kullanılabilir (Pektaş, 2015).

Silis dumanı

SSB karışımlarında uçucu kül dışında cüruf ve silis dumanı da kullanılabilir. Silis dumanı, ferrosilikon ve silisyum metal elektrik ark fırınlarında hammadde olarak kullanılan saf kuvarzın kömürle indirgenmesi ile elde edilen ve amorf yapıda %85- %98 arasında silis içeren çok ince katı parçacıklardan oluşan malzemedir. Betona endüstriyel atık olan silis dumanı ilave edilerek daha yüksek performanslı betonlar elde edilebilir. Silis dumanını oluşturan bileşikler arasında SiO_2 'nin %85'in üzerinde olduğu için kendi başına bağlayıcı özelliği olmamasına rağmen çok iyi bir suni puzolandır. Silis dumanı taneleri, çimento tanelerinden yaklaşık 100 kat daha küçüktür. Silis dumanının puzolanik reaksiyonu sonucunda oluşan ürünler betonun mikro yapısında geçirimsizliğini artırır ve dolgunluk sağlar. Silis dumanının olumsuz bir özellik olarak betonda plastik rötreği arttırdığı bilinmektedir (Baradan, 2004; Yaman ve Ceylan, 2013; Pektaş, 2015).

Kimyasal katkılar

Normal betonlarda kullanılan çoğu kimyasal katkılar SSB karışımlarında da kullanılabilir. Katkı maddeleri, çimento, agrega ve su karışımıyla doğru bir şekilde kontrol

edilemeyen beton özelliklerini iyileştirmek veya değiştirmek için kullanılır. Daha az su içeriğine ve karıştırma süresine sahip olduğundan, kimyasal katkıların SSB üzerindeki etkisi daha azdır. Sıcak havalarda yapılacak SSB dökümünde soğuk derz oluşmamak ve sıkışmış tabaka yüzeyini taze tutabilmek amacıyla priz geciktirici katkı maddelerin kullanılması büyük önem taşır. Ayrıca bu maddeler vibrasyon için gereken süreyi de azaltırlar. SSB karışımlarında kullanılan kimyasal katkılar şunlardır: (Harrington vd. 2010; Pektaş, 2015).

- **Su azaltıcı katkılar:** Bu katkı maddeleri, su miktarını değiştirmeden veya azaltmadan kuru SSB'nin işlenebilirliğini artırır. Ayrıca bu katkı maddeleri su içeriğini azalttığı için daha ekonomik SSB elde edilebilir.

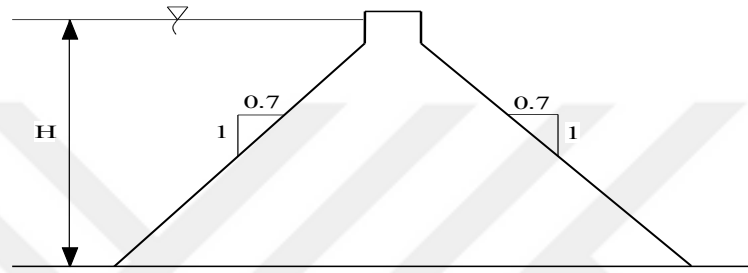
- **Priz geciktiriciler:** SSB'yi daha uzun bir süre işlenebilir durumda tutmak için kullanılır. Özellikle baraj inşaatlarında diğer SSB tabakası ile daha iyi füzyon (kaynaşma) sağlar.

- **Hava sürükleyici katkılar:** Donma-çözülme etkisinin görüldüğü soğuk iklimlerde SSB'yi korumak için kullanılır (Mardani-Aghabaglou vd., 2020).

3.3.2. Katı Dolgu Baraj

Dolgu barajların en önemli özellikleri, simetrik enkesit nedenleriyle beton ağırlık barajlarına göre özellikle deprem şartlarında sağladıkları üstün stabilite olup, gerek gövde içi gerekse taban gerilmelerinin daha düşük olması sebebiyle, beton ağırlık barajları için yeterli olmayan temel şartlarında, dolgu barajlara alternatif olmasıdır. Taban gerilmesinin düşük oluşu, Katı dolgu barajın betonundan istenilen mukavemetinde 4 ile 6 MPa gibi (emniyet katsayısının 3-4 olması halinde) çok küçük değerler alabileceğini gösterir. 100 m yüksekliğinde memba ve mansapta 0.7 yatay/1 düşey şevlere sahip bir simetrik yüzlü katı dolgu barajın temelindeki gerilmeler bir Klasik Beton Ağırlık barajı için verilen değerleri ile karşılaştırıldığında fark açıkça görülmektedir. Baraj tabanındaki basınç mukavemeti, geleneksel beton barajlardan daha azdır. Baraj tabanındaki basınç dayanımı, geleneksel beton barajlardan daha azdır. Simetrik yüzlü 100 m yüksekliğindeki bir katı dolgu barajında maksimum basınç mukavemeti 1.50 MPa'dan düşüktür. Simetrik profilinden dolayı çekme gerilmesi oluşmamaktadır. Kayma gerilmesi çok düşüktür, kesinlikle kritik değerde değildir. Kayma gerilmesi memba topuğunda 2.4 MPa yerine 1.4 MPa olmaktadır. Farklı kaldırma basınçları için değişen ϕ açısı klasik beton ağırlık barajlarda 28° ile 43° iken simetrik yüzlü katı dolgu barajlarda bu değer 14° ile 22° olmaktadır. Katı dolgu barajın birim ağırlığı SSB'nun birim ağırlığından daha az olmaktadır. 0.4 MPa'lık önemsiz çekme gerilmeleri olabilmektedir. 0.2g ivmelik bir depremde hiç çekme gerilmeleri oluşmamaktadır. Bu kriter klasik beton barajlar için önemlidir. Simetrik yüzlü katı dolgu baraj ile geleneksel beton ağırlık baraj arasındaki başka önemli bir fark da kayma gerilmeleridir. Ortalama kayma gerilmesi 0.63 MPa yerine 0.36 MPa olmaktadır. Bu nedenle düşük mukavemetli kaya temeller kabul

edilebilir. Hatta temeller tektonik kayma içerse bile, simetrik yüzlü katı dolgu barajlar gerekli temel işlemler yapılarak bu temeller üzerine inşa edilebilir. Kural olarak, simetrik yüzlü katı dolgu baraj güvenlik açısından 0.7 eğimli geleneksel bir ağırlık barajından daha iyi olmaktadır. Buradaki temel zayıf kaya içerebilir. Bu tip bir baraj, temel koşullar nedeniyle geleneksel bir beton baraj inşaatının uygun olmadığı durumlarda yapılabilir. Simetrik yüzlü katı dolgu barajlarda yük temele eşit olarak yayıldığından bu durum özellikle düşük modüllü kaya temellerde önemli olmaktadır. Aşağıda Şekil 3.3'te klasik bir katı dolgu baraj (*hardfill*) enkesiti görülmektedir.



Şekil 3.4. Klasik katı dolgu baraj (*hardfill*) enkesiti

Katı dolgu barajlarda, başlangıçtan itibaren betonun geçirgen olduğu kabul edilmiş olup SSB barajlarda olduğu gibi sızdırmazlığı sağlamak için katlar arası harç kullanılması gibi önlemlerin alınmasına gerek yoktur. Öte yandan, katı dolgu betonu ile inşa edilen barajlarda sızdırmazlık, yüksek kaliteli betonarme duvar veya barajın membaındaki plastik malzeme ile sağlanmalıdır. Öte yandan, katı dolgu betonda malzemelerin çok özenle hazırlanmış bir agregaya olmayışı nedeniyle teminin nispeten kolay ve ucuz olması, katı dolgu betondan istenilen mukavemetin düşük oluşu kullanılan bağlayıcıda sağlanan tasarruf, temel iyileştirmeyi de dikkate alındığında, yaklaşık iki misli malzeme kullanılmasına karşı katı dolgu barajlar, ekonomik bakımından da beton ağırlık barajı ile yarışabilmektedir. Katı dolgu barajlarda, başlangıçtan itibaren betonun geçirgen olduğu kabul edilmiş olup SSB barajlarda olduğu gibi sızdırmazlığı sağlamak için katlar arası harç kullanılması gibi önlemlerin alınmasına gerek yoktur. Katı dolgu baraj tipi, civarda kil malzemenin bulunmaması, taş ocağının daha uzakta olması, değerli tarım arazisinin elden çıkması gibi nedenlerden dolayı dolgu tipi barajlara iyi bir alternatiftir. Simetrik katı dolgu baraj tipinin seçilmesinin tek nedeni ekonomik nedenler değildir. Aynı zamanda emniyetli olması da oldukça önemli bir faktördür. Aynı güvenlik de bir faktördür. Jeoteknik açısından kaya dolgu baraj yapılacak bir yere simetrik yüzlü sağlam dolgu baraj da yapılabilir. Yükseklikleri 20 ile 180 m arasında değişebilen 20'den fazla simetrik yüzlere katı dolgu baraj inşa edilmiştir (Çiçek, 2007). Dolgu barajlar, iki ana başlık altında incelemek mümkündür (Güneş, 2020).

3.3.3. Payandalı Barajlar

Payandalı barajlar, ağırlık barajların özel bir şeklidir ve benzer statik prensiplere göre çalışır. Payandalı barajlar birçok şekilde olabilir. Vadi eksenine paralel olarak mansap kısmında inşa edilen payandaların arasının, eksene dik şekilde inşa edilmiş plak, kemer gibi elemanlarla kapatılmasıyla baraj gövdesi meydana gelir. Bir payandalı baraj, akış aşağı tarafındaki baraja dik açılarda yerleştirilmiş bir dizi destek duvarı tarafından desteklenir. Birkaç tür destek barajı vardır, en önemlileri düz döşeme ve çok kemerli payandalı barajlardır. Düz döşeme ve payandalı barajlar, özellikle uzun bir barajın gerekli olduğu ve temel malzemelerinin düşük mukavemetli olduğu geniş vadilere uyarlanmıştır. Çok kemerli baraj, düz döşeme tipinden daha serttir ve dolayısıyla daha iyi bir temel gerektirir (Ersayın, 2006).

3.3.4. Kemer Barajlar

Daire yayı parçası şeklinde tasarlanan kemer barajlar, hidrostatik su basıncı kuvvetini ve kendi ağırlığını şeklinin yardımıyla gövdenin bağlı olduğu dar vadilerde, temel ve yamaçların sağlam kaya olduğu bölgelerde inşa edilir. Bu tip dik ve dar vadilerde dolgu veya beton ağırlık barajlarının inşaatı için yeterli alan olmamaktadır. Ağırlık barajlarına göre daha ince kesitli bir gövdeye sahip olan kemer barajlarda, kemer etkisi ile gövdeye etki eden kuvvetler, gövde üzerinde dengeli bir şekilde dağılır. Kemer barajlar genelde temelden krete incelen bir tasarıma sahiptir. Planda ise kavisli olup dışbükey tarafı memba kısmına doğrudur. Bu geometri sayesinde büyük su yüklerine karşı mukavemet sağlar ve bu yükleri kemerlenme etkisi ile büyük oranda yamaçlara aktarır. Beton kemer ağırlık barajlar, ince kemer ve çift eğrilikli kemer barajlar olarak inşa edilebilirler. Gövde için kullanılan malzeme miktarının az olması baraj maliyetini önemli ölçüde düşürür. Bununla birlikte kemer barajın inşa edileceği vadinin oldukça dar; vadi yamaçlarının taşıma gücünün fazla olması gerekir. Şekil 3.4'te görülen Karakaya Barajı beton ağırlık kemer baraj sınıfına girmektedir (Selçuk, 2019; Güneş, 2020).



Şekil 3.5. Diyarbakır, Çüngüş'te bulunan Karakaya Kemer Barajı (Selçuk, 2019; Güneş, 2020)

4. MATERYAL VE METOT

4.1. Sonlu Elemanlar Yöntemi Kullanılarak Yapılan Statik Analizler

Bu çalışmada, katı dolgu barajların lineer elastik statik analizleri sonlu elemanlar yöntemi kullanılarak elde edilmiştir. Çözümler için SAP2000 paket programı kullanılmıştır. Baraj gövdesi ve barajın oturduğu temel, lineer elastik sonlu elemanlara modellenmiş olup her iki ortam için de iki boyutlu düzlem şekil değiştirme özelliğine sahip dörtgen elemanlar kullanılmıştır.

4.1.1. İzoparametrik Elemanlar

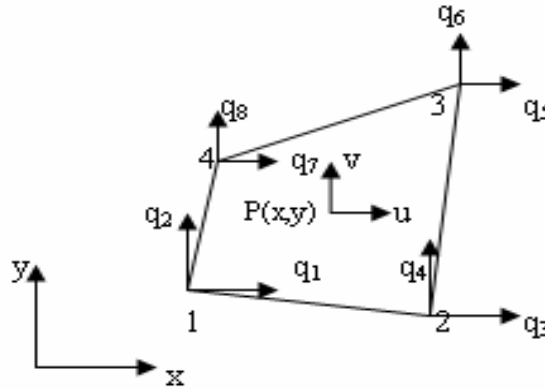
Baraj ve temel ortamları için dört düğümlü izoparametrik elemanlar kullanıldığından bu elemanların temel denklemleri incelenmiştir. Dörtgen izoparametrik sonlu elemanın genel bir görünüşü Şekil 4.1’de verilmiş olup i düğüm noktasını göstermek üzere her bir düğüm noktasının koordinatları x_i, y_i ’dir. Düğüm noktasının yer değiştirme vektörü,

$$\{q\} = [q_1, q_2, q_3, q_4, q_5, q_6, q_7, q_8]^T \quad (4.1)$$

olarak ifade edilmektedir. Eleman içindeki P noktasının yer değiştirmeleri ise,

$$\{u\} = [u(x,y), v(x,y)]^T \quad (4.2)$$

olarak dikkate alınmaktadır.



Şekil 4.6. Dörtgen izoparametrik sonlu eleman

Eleman şekil fonksiyonları, eleman lokal koordinat eksen takımı üzerinden elde edilmektedir. Eleman lokal koordinat eksenleri (r,s) ile ifade edilirse ve N_i i nci düğüm noktasına ait şekil fonksiyonunu göstermek üzere,

$$N_1 = \frac{1}{4}(1-r)(1-s), \quad N_2 = \frac{1}{4}(1+r)(1-s) \quad (4.3)$$

$$N_3 = \frac{1}{4}(1+r)(1+s), \quad N_4 = \frac{1}{4}(1-r)(1+s)$$

olarak ifade edilmektedir. Şekil fonksiyonlarını aynı zamanda,

$$N_i = \frac{1}{4}(1+rr_i)(1+ss_i) \quad (4.4)$$

sıkıştırılmış formda ifade edilebilir. Eleman içinde herhangi bir noktasının yer değiştirmeleri şekil fonksiyonları yardımıyla,

$$u = N_1q_1 + N_2q_3 + N_3q_5 + N_4q_7 \quad (4.5)$$

$$v = N_1q_2 + N_2q_4 + N_3q_6 + N_4q_8$$

ifade edilebilir. Eşitlik (4.6) matris formunda,

$$\{u\} = [N]\{q\} \quad (4.6)$$

yazılabilir. Burada $[N]$ şekil fonksiyonları matrisi olup,

$$N = \begin{bmatrix} N_1 & 0 & N_2 & 0 & N_3 & 0 & N_4 & 0 \\ 0 & N_1 & 0 & N_2 & 0 & N_3 & 0 & N_4 \end{bmatrix} \quad (4.7)$$

şeklindedir. İzoparametrik formülasyonda eleman düğüm noktası koordinatları aynı şekil fonksiyonları ile gösterilebileceğinden, düzlemdeki bir eleman içindeki herhangi bir noktanın x ve y koordinatları,

$$x = N_1x_1 + N_2x_2 + N_3x_3 + N_4x_4$$

$$y = N_1y_1 + N_2y_2 + N_3y_3 + N_4y_4 \quad (4.8)$$

şeklinde yazılabilir. Bu eşitlikler yardımıyla gerilmeler ile şekil değiştirmeler arasındaki bağıntıların elde edilmesi gerekmektedir. Bu amaçla, r ve s eleman lokal koordinat eksen takımında

tanımlanan şekil fonksiyonlarının x ve y koordinatlarındaki türevlerinin elde edilmesi gerekmektedir. Herhangi bir $f = f[x(r,s), y(r,s)]$ fonksiyonuna zincir kuralı uygulanırsa,

$$\frac{\partial f}{\partial r} = \frac{\partial f}{\partial x} \frac{\partial x}{\partial r} + \frac{\partial f}{\partial y} \frac{\partial y}{\partial r}, \quad \frac{\partial f}{\partial s} = \frac{\partial f}{\partial x} \frac{\partial x}{\partial s} + \frac{\partial f}{\partial y} \frac{\partial y}{\partial s} \quad (4.9)$$

ifadeleri elde edilir. Bu eşitlikler matris notasyonunda,

$$\begin{Bmatrix} \frac{\partial f}{\partial r} \\ \frac{\partial f}{\partial s} \end{Bmatrix} = [J] \begin{Bmatrix} \frac{\partial f}{\partial x} \\ \frac{\partial f}{\partial y} \end{Bmatrix} \quad (4.10)$$

olarak yazılabilir. Burada J jakobiye matrisini ifade etmekte olup,

$$[J] = \begin{bmatrix} \frac{\partial x}{\partial r} & \frac{\partial y}{\partial r} \\ \frac{\partial x}{\partial s} & \frac{\partial y}{\partial s} \end{bmatrix} \quad (4.11)$$

şeklindedir. Denklem (4.10), (4.6) denklemi için kullanılırsa J jakobiye matrisi,

$$[J] = \begin{bmatrix} -(1-s)x_1 + (1+s)x_2 + (1+s)x_3 - (1+s)x_4 & -(1-s)y_1 + (1+s)y_2 + (1+s)y_3 - (1+s)y_4 \\ -(1-r)x_1 - (1+r)x_2 + (1+r)x_3 + (1-r)x_4 & -(1-r)y_1 - (1+r)y_2 + (1+r)y_3 + (1-r)y_4 \end{bmatrix} \quad (4.12)$$

olarak yazılabilir. Jakobiye matrisi kısaltılmış formda,

$$J = \begin{bmatrix} J_{11} & J_{12} \\ J_{21} & J_{22} \end{bmatrix} \quad (4.13)$$

ifade edilebilir. f fonksiyonu yerine şekil fonksiyonları yazılırsa,

$$\begin{Bmatrix} \frac{\partial N}{\partial r} \\ \frac{\partial N}{\partial s} \end{Bmatrix} = J \begin{Bmatrix} \frac{\partial N}{\partial x} \\ \frac{\partial N}{\partial y} \end{Bmatrix} \quad (4.14)$$

eşitliği elde edilir. Bu denklemde x ve y' ye göre türevin elde edilmesi gerektiğinden (4.14) eşitliği,

$$\begin{Bmatrix} \frac{\partial N}{\partial x} \\ \frac{\partial N}{\partial y} \end{Bmatrix} = J^{-1} \begin{Bmatrix} \frac{\partial N}{\partial r} \\ \frac{\partial N}{\partial s} \end{Bmatrix} \quad (4.15)$$

olarak yazılır. Buradan Jakobiye matrisinin tersi için,

$$\begin{Bmatrix} \frac{\partial N}{\partial x} \\ \frac{\partial N}{\partial y} \end{Bmatrix} = \frac{1}{\det J} \begin{bmatrix} J_{22} & -J_{12} \\ -J_{21} & J_{11} \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \frac{\partial N}{\partial r} \\ \frac{\partial N}{\partial s} \end{Bmatrix} \quad (4.16)$$

eşitliği elde edilebilir.

Düzlem Gerilme Dörtgen Elemanın Rijitlik Matrisi

Eleman rijitlik matrisinin elde edilmesinde minimum enerji prensibi kullanılırsa elemanın elastik enerjisi,

$$U = \int_V \frac{1}{2} \{\sigma\} \{\varepsilon\} dV \quad (4.17)$$

şeklinde ifade edilebilir. Kalınlık sabit alınır ve eleman boyutunda elastik enerji yazılırsa,

$$U = \sum_e t_e \int_e \frac{1}{2} \{\sigma\} \{\varepsilon\} dA \quad (4.18)$$

eşitliği elde edilir. Şekil değiştirme–yer değiştirme arasındaki bağıntı ise,

$$\{\varepsilon\} = \begin{Bmatrix} \varepsilon_x \\ \varepsilon_y \\ \varepsilon_{xy} \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} \frac{\partial u}{\partial x} \\ \frac{\partial v}{\partial y} \\ \frac{\partial u}{\partial y} + \frac{\partial v}{\partial x} \end{Bmatrix} \quad (4.19)$$

şeklinde ifade edilebilir. Denklem (4.10)' da verilen f yerine u alınıp (4.16) denkleminde yerine yazılırsa,

$$\begin{Bmatrix} \frac{\partial u}{\partial x} \\ \frac{\partial u}{\partial y} \end{Bmatrix} = \frac{1}{\det J} \begin{bmatrix} J_{22} & -J_{12} \\ -J_{21} & J_{11} \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \frac{\partial u}{\partial r} \\ \frac{\partial u}{\partial s} \end{Bmatrix} \quad (4.20a)$$

eşitliği elde edilir. Aynı şekilde v yer değiştirme büyüklüğü için,

$$\begin{Bmatrix} \frac{\partial v}{\partial x} \\ \frac{\partial v}{\partial y} \end{Bmatrix} = \frac{1}{\det J} \begin{bmatrix} J_{22} & -J_{12} \\ -J_{21} & J_{11} \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \frac{\partial v}{\partial r} \\ \frac{\partial v}{\partial s} \end{Bmatrix} \quad (4.20b)$$

ifadesi yazılabilir. (4.20a-b) eşitliği (4.19) denkleminde yerine yazılırsa,

$$\varepsilon = [A] \begin{Bmatrix} \frac{\partial u}{\partial r} \\ \frac{\partial u}{\partial v} \\ \frac{\partial s}{\partial r} \\ \frac{\partial s}{\partial v} \end{Bmatrix} \quad (4.21)$$

eşitliği elde edilir. Burada $[A]$ bir matris olup,

$$[A] = \frac{1}{\det J} \begin{bmatrix} J_{22} & -J_{12} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & -J_{21} & J_{11} \\ -J_{21} & J_{11} & J_{22} & -J_{12} \end{bmatrix} \quad (4.22)$$

şeklindedir. Bu durumda yer değiştirmelerle şekil değiştirmeler arasında,

$$\begin{Bmatrix} \frac{\partial u}{\partial r} \\ \frac{\partial u}{\partial v} \\ \frac{\partial s}{\partial r} \\ \frac{\partial s}{\partial v} \end{Bmatrix} = [G] \{q\} \quad (4.23)$$

eşitliği yazılabilir. Burada $[G]$ matrisi,

$$[G] = \frac{1}{4} \begin{bmatrix} -(1-s) & 0 & (1-s) & 0 & (1+s) & 0 & -(1+s) & 0 \\ -(1-r) & 0 & -(1+r) & 0 & (1+r) & 0 & (1-r) & 0 \\ 0 & -(1-s) & 0 & (1-s) & 0 & (1+s) & 0 & (1+s) \\ 0 & -(1-r) & 0 & -(1+r) & 0 & (1+r) & 0 & (1-r) \end{bmatrix} \quad (4.24)$$

şeklindedir. Denklem (4.22) ve (4.24) kullanılarak şekil değiştirme ve yer değiştirmeler arasındaki matris,

$$\{\varepsilon\} = [B] \{q\} \quad (4.25)$$

olarak elde edilebilir. Buradaki $[B]$ matrisi,

$$[B] = [A][G] \quad (4.26)$$

şeklinde olup Aynı zamanda gerilme ve şekil değiştirmeler arasında,

$$\{\sigma\} = [D] \{\varepsilon\} \quad (4.27)$$

eşitliği vardır. Denklem (4.25), (4.27) eşitliğinde bulunan şekil değiştirme vektörü $\{\varepsilon\}$ yerine yazılırsa,

$$\{\sigma\} = [D][B]\{q\} \quad (4.28)$$

eşitliği elde edilir. Burada, $[D]$ matrisi gerilme-şekil değiştirme arasındaki matris olup düzlem şekil değiştirme durumu için,

$$[D] = \frac{E(1-\nu)}{(1+\nu)(1-2\nu)} \begin{bmatrix} -1 & \frac{\nu}{(1-\nu)} & 0 \\ \frac{\nu}{1-\nu} & 1 & 0 \\ 0 & 0 & \frac{(1-2\nu)}{2(1-\nu)} \end{bmatrix} \quad (4.29)$$

olarak yazılabilir. Denklem (4.25) ve (4.28) denklem (4.18)'de yerine yazıldığında elastik eleman şekil değiştirme enerjisi ifadesi,

$$U = \sum_e \frac{1}{2} \{q\}^T \left[\int_{-1}^1 \int_{-1}^1 [B]^T [D] [B] \det J \, dr \, ds \right] \{q\} \quad (4.30)$$

elde edilir. Bu ifade daha basit bir ifadeyle,

$$U = \sum_e \frac{1}{2} \{q\}^T [k]_e \{q\} \quad (4.31)$$

yazılabilir. Burada $[k]_e$ eleman rijitlik matrisini ifade etmekte olup (8x8) boyutundadır. $[B]$ ve $[J]$ matrisleri r ve s lokal eksen koordinatlarına bağlı olduklarından integraller nümerik olarak elde edilecektir. Eleman rijitlik matrisleri global rijitlik matrisinde yerine yazılırsa,

$$[k]_{Glo} = \sum_{i=1}^n [k]_{e_i} \quad (4.32)$$

baraj-temel sisteminin global rijitlik matrisi elde edilir. Burada n eleman sayısı göstermektedir. Elastik enerjinin minimum olma şartı kullanılarak (4.32) eşitliği,

$$[k]_{Glo} \{u\}_{Glo} = \{f\}_{Glo} \quad (4.33)$$

şeklinde yazılabilir. Burada $\{f_e\}_{Glo}$ global yük vektörü olup,

$$[f_e]_{Glo} = \sum_{i=1}^n \{f_e\}_i \quad (4.34)$$

bağıntısıyla elde edilmektedir. Burada yer değiştirme vektörü lineer denklem takımı çözüm algoritmasıyla hesaplanabilir. Her bir eleman için gerilme vektörleri,

$$\{\sigma\}_e = \int_{-1}^1 \int_{-1}^1 [D][B]\{u\}_e \quad (4.35)$$

eşitliğiyle hesaplanmaktadır. Burada $\{u\}_e$ eleman yer değiştirme vektörüdür.

4.2. SAP2000 Sonlu Elemanlar Yöntemi Hakkında Genel Bilgi

SAP2000 programı, geometrisi tanımlanan sürekli bir ortam içindeki yapıyı, sonlu elemanlar adı verilen küçük parçacıkların düğüm noktalarına bağlanmasıyla oluşan bir sistem bütünü olarak ele almaktadır. Böylece tüm sistemin davranış denklemleri, sonlu elemanların farklı malzeme ve geometrik özellikleriyle tanımlanan bireysel davranış denklemlerinin, elemanlar arasında gerilim dengesi ve yer değiştirme sürekliliği sağlayacak şekilde birleştirilmesi ile elde edilir. Bu sistemle sınır ve yük koşullarını karşılayacak şekilde düzenlendikten sonra bilinmeyenleri düğüm noktalarındaki deplasmanlar olan doğrusal bir denklem takımı ortaya çıkar. Denklem takımının çözümü ile önce düğüm noktalarındaki deplasmanlar, kuvvetler ve ardından gerilme değerleri hesaplanır (Taşdemir, 2014).

Bu çalışma üç aşamadan oluşmaktadır. Bu aşamalar aşağıda sıralanmıştır.

- Simetrik yüzlü olan memba ve mansap şevleri için farklı “n” katsayılarına sahip parabol denklemlerini belirlemek, çizimlerini yapmak, alan ve hacim hesaplarını yapmak. Alan hesapları integraller alınarak işlemler yapılacaktır.
- Kayma tahkiki, Devrilme tahkiki ve Gerilme tahkiklerini yapmak
- SAP2000 yazılımı kullanarak statik analizler yapmaktır.

4.3. Gövde Hacmini Azaltmak İçin Memba ve Mansap Şevlerinin Seçimi

Baraj tipinin şevlerinin alternatif olarak parabolik yapılması yine araştırmacılar tarafından önerilmektedir. Bu önerilerdeki esas amaç gövde hacmini küçültmektir. Yapılan çalışmalarda her iki yüzeyin parabolik olarak yapılabileceğini ve barajın performansını etkilemediği ifade edilmiştir.

Baraj şevinde parabolik yapılması için kuvvet fonksiyonu tabanlı baraj gövdesi enkesit denklemleri kullanılmıştır.

Memba ve mansap şevlerine nasıl karar verileceği, daha anlaşılır olması açısından Şekil 4.1 ve 4.2’de gösterilmiştir.

$$n \in R \text{ olmak üzere, } 1.1 \leq n \leq 2.0 \text{ aralığı için;} \quad (4.36)$$

$$0 \leq x \leq 70 \text{ için } y = ax^n \quad (4.37)$$

$$70 < x \leq 77 \text{ için } y = 105 \quad (4.38)$$

$$x \geq 77 \text{ için } y = a(147 - x)^n \quad (4.39)$$

$$n \in R \text{ olmak üzere; } n = 1.1 \text{ için } a = \frac{100}{70^{1.1}} = 0.9340973844 \quad (4.40)$$

$$n = 2 \text{ için } a = \frac{100}{70^2} = 0.02040816327 \quad (4.41)$$

Tablo 4.1’de $0 \leq x \leq 70$ için kuvvet fonksiyonu tabanlı baraj gövdesi enkesit denklemi tablosu görülmektedir.

Tablo 4.3. $0 \leq x \leq 70$ için kuvvet fonksiyonu tabanlı baraj gövdesi enkesit denklemi tablosu

	$a_{1,1}$	$X_{1,1}$	$Y_{1,1}$	n_2	a_2	X_2	Y_2
		0	0			0	0
1.1	0.9340973844	10	11.75959	2	0.02040816327	10	2.040816
1.1	0.9340973844	20	25.20723	2	0.02040816327	20	8.163265
1.1	0.9340973844	30	39.37545	2	0.02040816327	30	18.36735
1.1	0.9340973844	40	54.03288	2	0.02040816327	40	32.65306
1.1	0.9340973844	50	69.06518	2	0.02040816327	50	51.02041
1.1	0.9340973844	60	84.40313	2	0.02040816327	60	73.46939
1.1	0.9340973844	70	100	2	0.02040816327	70	100

$$x \geq 77 \text{ için } y = a(147 - x)^n \quad (4.42)$$

$$a = \frac{y}{(147-x)^n} \text{ ‘den } n \in R \text{ olmak üzere,} \quad (4.43)$$

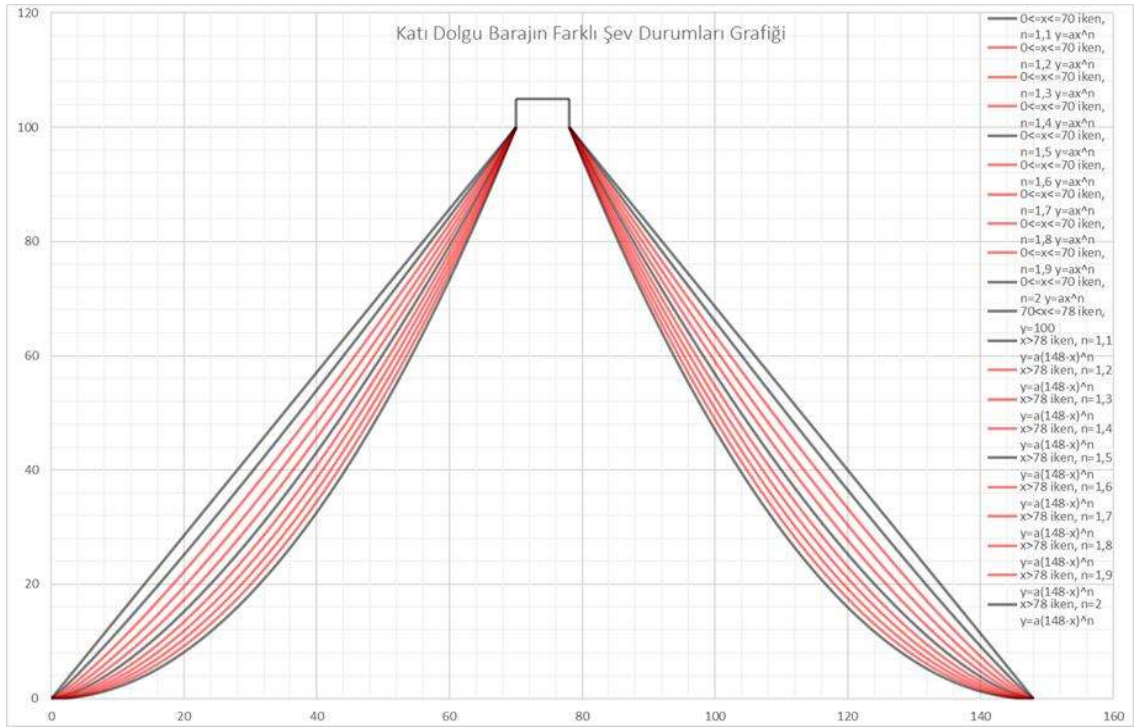
$$n = 1.1 \text{ için } a = \frac{100}{(147-77)^{1.1}} = 0.9340973844 \quad (4.44)$$

$$n = 2 \text{ için } a = \frac{100}{(147-77)^2} = 0.0204081632 \quad (4.45)$$

Tablo 4.2’de $x \geq 77$ için kuvvet fonksiyonu tabanlı baraj gövdesi enkesit denklemi tablosu görülmektedir.

Tablo 4.4. $x \geq 77$ için kuvvet fonksiyonu tabanlı baraj gövdesi enkesit denklemi tablosu

$n_{1,1}$	$a_{1,1}$	$X_{1,1}$	$Y_{1,1}$	n_2	a_2	X_2	Y_2
		77	100			77	100
1.1	0.9340973844	87	84.40313	2	0.02040816327	87	73.46939
1.1	0.9340973844	97	69.06518	2	0.02040816327	97	51.02041
1.1	0.9340973844	107	54.03288	2	0.02040816327	107	32.65306
1.1	0.9340973844	117	39.37545	2	0.02040816327	117	18.36735
1.1	0.9340973844	127	25.20723	2	0.02040816327	127	8.163265
1.1	0.9340973844	137	11.75959	2	0.02040816327	137	2.040816
1.1	0.9340973844	147	0	2	0.02040816327	147	0



Şekil 4.7. Katı dolgu barajın kuvvet fonksiyonu tabanlı enkesit denklemi kullanılarak farklı kuvvet dereceleri ile tasarlanmış baraj gövdesi grafiği

4.4. Ağırlık Barajlarında Yapılan Tahkikler

4.4.1. Kayma Tahkiki

Bir barajın kaymasına yatay kuvvetler neden olmaktadır. Kaymaya karşı direncini ise kayma yüzeyindeki sürtünme ile kesme kuvveti sağlar.

$$\begin{aligned}
 \text{Kaymayakarşıgüvenlik fak.} &= \frac{\text{kaydırmayakarşıkoruyucukuvvetlertoplamı}}{\text{kaydırıcıkuvvetlertoplamı}} \\
 &= \frac{(\text{tabansürtünmekatsayısı})(\sum V - U)}{\sum H}
 \end{aligned}
 \tag{4.46}$$

Tablo 4.3'te taban sürtünme katsayıları gösterilmiştir.

Tablo 4.5. Taban sürtünme katsayıları

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

4.4.2. Devrilme Tahkiki

Baraj, etkiyen kuvvetlerin etkisiyle devrilebilir. Bu nedenle beton ağırlık barajlarda devrilme tahkiki yapılmaktadır.

$$Dönmeye\ karşıgüvenlik\ fak. = \frac{Toplam\ koruyucu\ moment}{Toplam\ devirici\ moment} \quad (4.47)$$

Bu değer barajın emniyet durumuna göre değişmektedir. Eğer barajın yıkılması mal ve can kaybına neden olarsa bu değer 2.50-3.0 veya daha fazla alınmaktadır. Eğer can kaybı ihtimali yoksa ve barajın yıkılması halinde maddi kayıp az ise o zaman bu değer 1.25-1.50 arasında alınabilmektedir. Devrilme tahkiki için bir beton baraja etkiyen tüm kuvvetlerin dikkate alınması gerekmektedir.

4.4.3. Gerilme Tahkiki

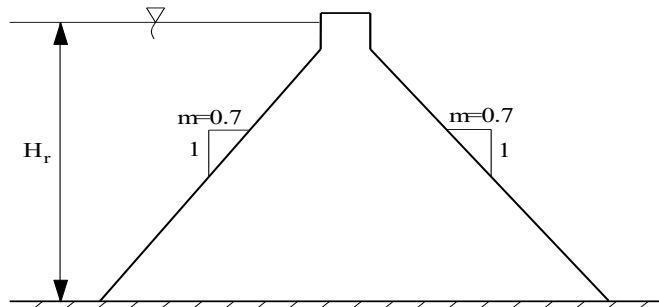
Yatay düzlemlerde normal gerilmelerin memba yüzünden mansap yüzüne doğru doğrusal bir dağılım gösterdiği kabul edilerek yatay düzlemin uçlarındaki gerilmeler;

$$\sigma = \frac{F}{A} \pm \frac{M_y x}{I_y} \pm \frac{M_x y}{I_x} \quad (4.48)$$

formülü ile hesaplanmaktadır. F : Düşey kuvvetler toplamı, A : Yatay kesit alanı, M : Moment, I : Atalet momentini göstermektedir.

4.5. Simetrik Yüzlü Katı Dolgu Barajın Lineer ve Kuvvet Fonksiyonu Tabanlı Baraj Gövdesi Enkesit Denklemleri Kullanılarak Oluşturulan Durumlarının Hacimleri Karşılaştırılması

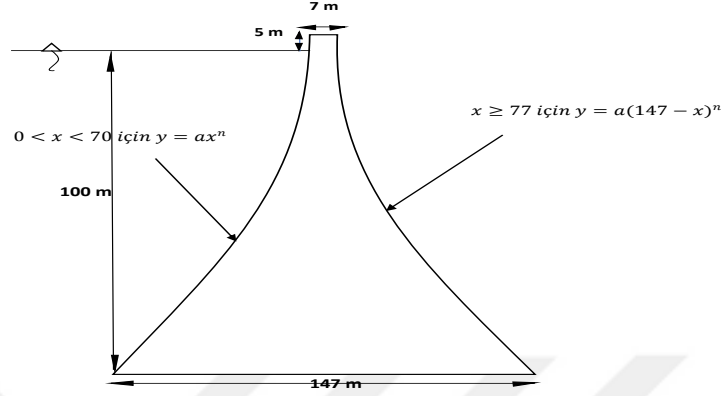
Her iki durumun hacim karşılaştırmaları aşağıdaki formüllerle hesaplanabilir; Şekil 4.3 ve 4.4'de Katı dolgu baraj enkesiti ve formülü görülmektedir.



Şekil 4.8. Klasik katı dolgu baraj (*hardfill*) enkesiti

$$(1) \left(\frac{(70)(100)}{2} \right) + (7)(105) + \left(\frac{(70)(100)}{2} \right) = 7735 \text{ m}^3 \quad (4.49)$$

Şekil 4.4'te Simetrik yüzölü katı dolgu parabolik şevli baraj enkesiti görülmektedir.



Şekil 4.9. Simetrik yüzölü katı dolgu kuvvet fonksiyonu tabanlı baraj gövdesi enkesiti

$$0 \leq x \leq 70 \text{ için } y = ax^n$$

$$n \in R \text{ olmak üzere; } n = 1.1 \text{ için } a = \frac{100}{70^{1.1}} = 0.9340973844 \quad (4.50)$$

$$x \geq 77 \text{ için } y = a(147 - x)^n \quad (4.51)$$

$$n \in R \text{ olmak üzere; } n = 1.1 \text{ için } a = \frac{100}{(147-77)^{1.1}} = 0.9340973844 \quad (4.52)$$

$$\left(2 \int_0^{70} ax^n dx + 7(105) \right) (1) = 2a \frac{x^{n+1}}{n+1} \Big|_0^{70} + 7(105) = 7401.67 \text{ m}^3 \quad (4.53)$$

$$0 \leq x \leq 70 \text{ için } y = ax^n \quad (4.54)$$

$$n \in R \text{ olmak üzere; } n = 1.5 \text{ için } a = \frac{100}{70^{1.5}} = 0.1707469442 \quad (4.55)$$

$$x \geq 77 \text{ için } y = a(147 - x)^n \quad (4.56)$$

$$n \in R \text{ olmak üzere; } n = 1.5 \text{ için } a = \frac{100}{(147-77)^{1.5}} = 0.1707469442 \quad (4.55)$$

$$\left(2 \int_0^{70} ax^n dx + 7(105) \right) (1) = 2a \frac{x^{n+1}}{n+1} \Big|_0^{70} + 7(105) = 6335 \text{ m}^3 \quad (4.57)$$

$$0 \leq x \leq 70 \text{ için } y = ax^n \quad (4.58)$$

$$n \in R \text{ olmak üzere; } n = 2 \text{ için } a = \frac{100}{70^2} = 0.02040816327 \quad (4.59)$$

$$x \geq 77 \text{ için } y = a(147 - x)^n \quad (4.60)$$

$$n \in R \text{ olmak üzere; } n = 2 \text{ için } a = \frac{100}{(147-77)^2} = 0.02040816327 \quad (4.61)$$

$$\left(2 \int_0^{70} ax^n dx + 7(105)\right)(1) = 2a \frac{x^{n+1}}{n+1} \Big|_{0,70} + 7(105) = 5401.67m^3 \quad (4.62)$$

4.6. Değişen Hacimlerin Yüzdelik Hesabı

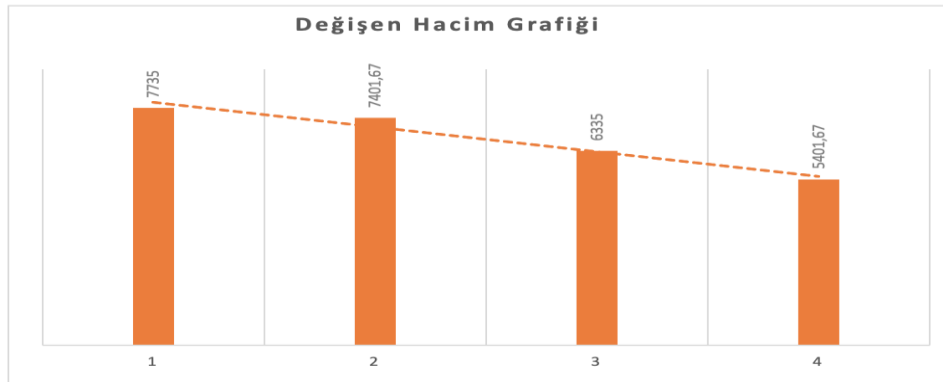
Her iki durumun hacimlerinin yüzdelik değişimi aşağıdaki gibi hesaplanabilir;

$$\left(\frac{7735-7401.67}{7735}\right)(100) = \%4.3094 \quad (4.63)$$

$$\left(\frac{7735-6335}{7735}\right)(100) = \%18.0995 \quad (4.64)$$

$$\left(\frac{7735-5401.67}{7735}\right)(100) = \%30.1659 \quad (4.65)$$

Şekil 4.5'teki grafikte de görüldüğü gibi baraj tipinin şevlerinin alternatif olarak parabolik yapılması baraj gövdesi hacminde değişkenlik göstermektedir. Buradaki esas amaç gövde hacmini küçültmektir. Yapılan çalışmalarda her iki yüzeyin parabolik olarak yapılabileceğini, barajın performansını etkilemediği ifade edilmiştir. Baraj şevinde parabolik yapılması için kuvvet fonksiyonu tabanlı baraj gövdesi enkesit denklemleri kullanılmıştır ve baraj gövdesi hacminde %30.17 oranında büyük fayda sağlanmıştır. Değişen hacim grafiğinde 1 numaralı sütun (0.7y/0.1d) eğimli baraj gövdesinin hacmidir. 2, 3 ve 4 numaralı sütunlar sırasıyla kuvvet fonksiyonu tabanlı baraj gövdesi enkesit denklemlerine göre tasarlanmış kuvvet dereceleri (n=1.1, n=1.5 ve n=2.0) olan baraj gövdelerini gösterilmektedir. Grafikten de anlaşılabileceği gibi hacimde lineer bir eğri gösterilerek sağlanan faydanın farkındalığı öne çıkarılmıştır.



Şekil 4.5. Katı dolgu barajın değişen hacim grafiği

5. FARKLI ENKESİTLERE SAHİP KATI DOLGU BARAJLARIN STATİK ANALİZİ

5.1. Katı Dolgu Baraj İçin Yapılan Lineer Elastik ve Kuvvet Fonksiyonu Tabanlı Baraj Gövdesi Enkesit Denklemlerinin Kullanılmasıyla Yapılan Statik Analizler

Katı dolgu barajlarda ekonomik fayda sağlamak amacıyla hem memba hem de mansap yüzeyi simetrik olan tipik bir katı dolgu baraj seçilmiştir. Çözümlerde baraj şevlerinin etkisini irdelemek amacıyla baraj şevleri hem doğrusal hem de doğrusal olmayan eğrilerle seçilmiştir. Baraj şevlerine bağlı olarak sonlu eleman modeller teşkil edilmiştir.

Katı dolgu barajlarda şevlerin etkisini incelemek amacıyla önce (0.7y/1.0d) şevi incelenmiş; sonra baraj şevinin parabolik yapılması için kullanılan kuvvet fonksiyonu tabanlı baraj gövdesi enkesit denklemlerinden faydalanılmıştır. Çözümlerde baraj yüksekliği bütün durumlara göre, 105 m seçilmiştir. Baraj kret uzunluğu 7 m, baraj gövdesinin başlık yüksekliği 5 m seçilmiştir. Temel ortamı lineer elastik olarak kabul edilmiş ve baraj şevlerine bağlı olarak temel sonlu eleman modeli teşkil edilmiştir.

Temel ortamı sonlu elemanlar ile modellenirken, temel boyutları, sınır koşullarının etkisini azaltmak için, baraj memba ve mansap topuklarından itibaren baraj yüksekliğinin 2 katı kadar ve baraj ayırma yüzeyinden de yine baraj yüksekliği kadar derinlikte seçilmiştir. Temel sonlu eleman ortamında en uzak sınır düğüm noktaları tutulu kabul edilmiştir.

Rezervuar ortamının doluluk oranı için, rezervuar ortamı boş, yarı dolu ve tam dolu olması durumları dikkate alınmış olup hidrostatik yükler barajın memba yüzeyine düğüm noktası tekil yükleri olarak etki ettirilmiştir. Sonlu eleman ağ sistemi sadece baraj ve temel ortamlarından teşkil edilmiştir.

$$n \in R \text{ olmak üzere, } 1.1 \leq n \leq 2.0 \text{ aralığı için;} \quad (5.1)$$

$$0 \leq x \leq 70 \text{ için } y = ax^n \quad (5.2)$$

$$70 < x \leq 77 \text{ için } y = 105 \quad (5.3)$$

$$x \geq 77 \text{ için } y = a(147 - x)^n \text{ sırasıyla;} \quad (5.4)$$

$n = 1.1$ için

$n = 1.5$ için

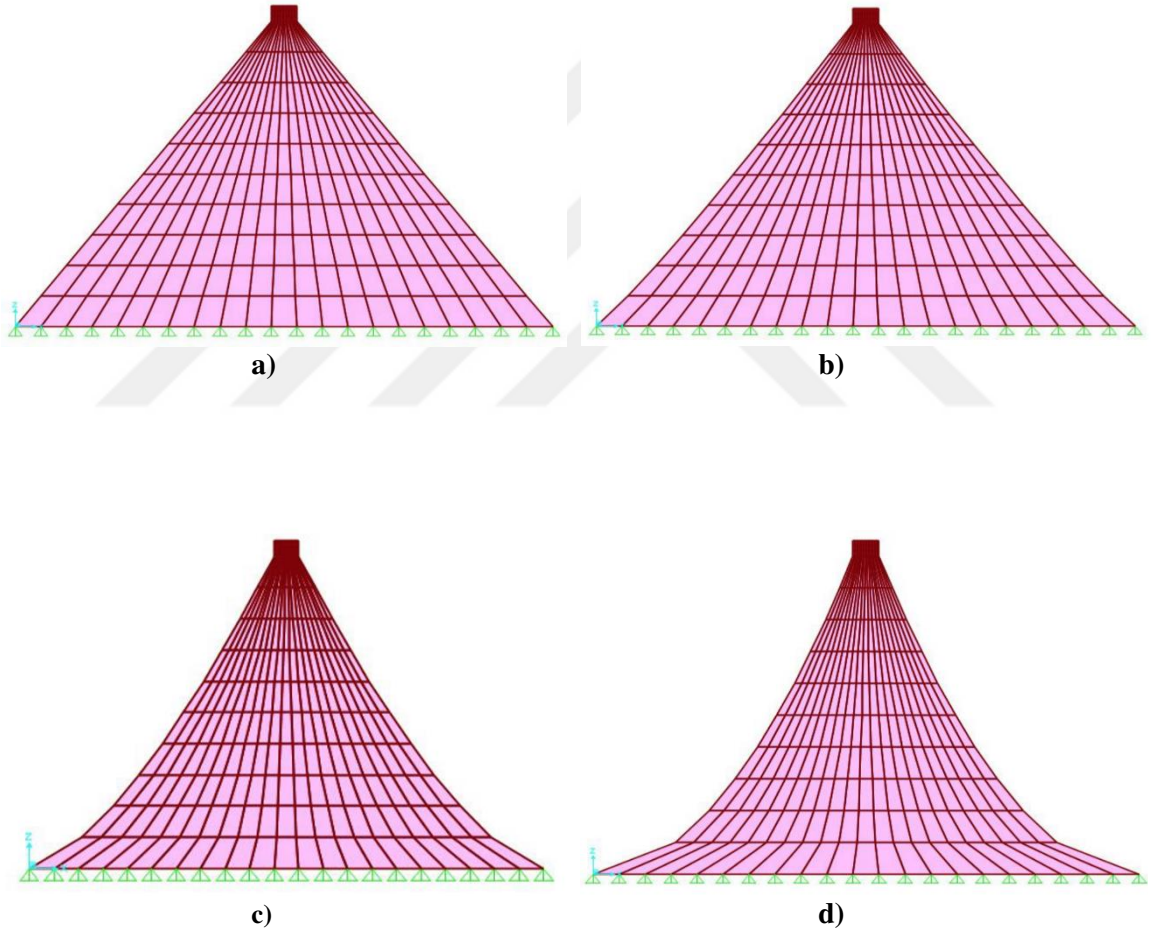
$n = 2$ için

değerlerine sahip üçü parabolik olmak üzere dört farklı şev seçilmiştir.

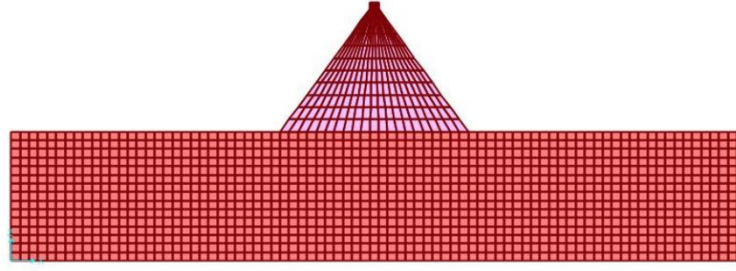
Baraj şevlerinin (0.7y/1.0d), $n = 1.1$ için , $n = 1.5$ için, $n = 2$ için, olması durumlarında rijit baraj ortamlarında sırasıyla, toplam 308, 308, 308 ve 308 düğüm noktası ve 273, 273, 273 ve 273 iki boyutlu dörtgen izoparametrik düzlem şekil değiştirme elemanı; baraj şevlerinin (0.7y/1.0d), $n = 1.1$ için , $n = 1.5$ için, $n = 2$ için, ve baraj ayırma yüzeyinin başlangıç noktası ile 20 m yükseklikte

parabolik şevlerin başlaması durumlarında baraj ortamlarında sırasıyla, toplam 1598, 1598, 1598 ve 1598 düğüm noktası ve 1488, 1488, 1488 ve 1488 iki boyutlu dörtgen izoparametrik düzlem şekil değiştirme elemanı kullanılmıştır.

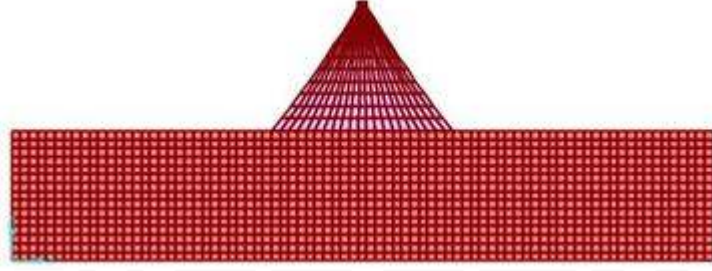
Sonuçların uygun bir şekilde yorumlana bilmesi amacıyla, bu şevlere sahip barajlarda sadece memba ve mansap yüzeylerine ait şevler değiştiği için sonlu eleman ağ yapısında sadece geometrik bir değişim elde edilmiş düğüm noktası ve eleman sayısı temelli çalışmada aynı kalmış, rijit çalışmada değişiklik göstermiştir. Barajın kret genişliği tüm baraj sonlu eleman ağ sistemlerinde 7 m alınmıştır. Baraj sonlu eleman ağ sistemleri şev eğimleri baraj şevlerinin; $(0.7y/1.0d)$, $n = 1.1$ için , $n = 1.5$ için, $n = 2$ için, olması durumları Şekil 5.1, Şekil 5.2, Şekil 5.3'te görülmektedir.



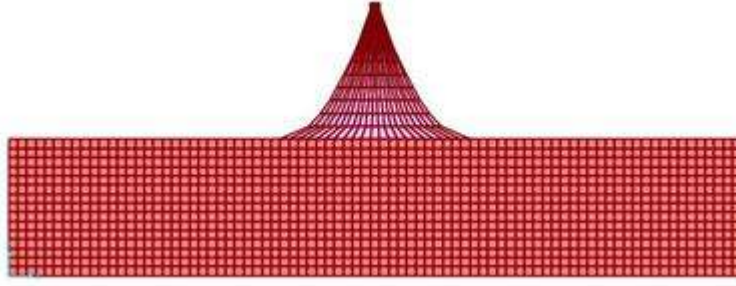
Şekil 5.10. Katı dolgu barajın memba ve mansap yüzeyi şev eğimi a) $(0.7y/1.0d)$ ve kuvvet dereceleri sırasıyla b) $n=1.1$, c) $n=1.5$, d) $n=2$ olması durumları için rijit baraj ortamlarına ait sonlu eleman modelleri



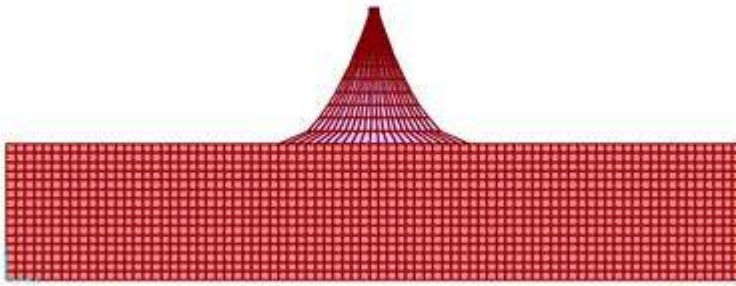
a)



b)

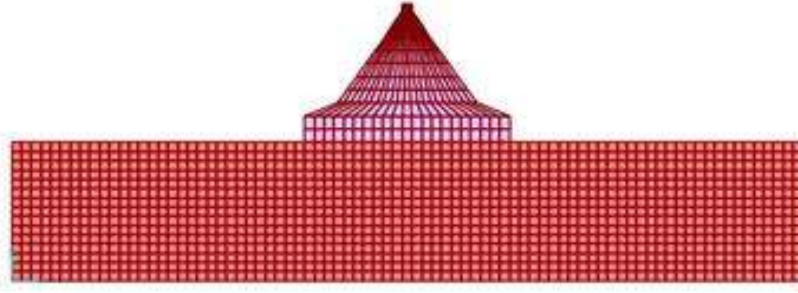


c)

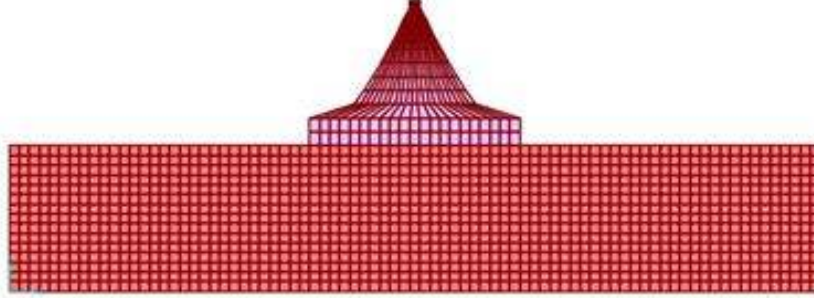


d)

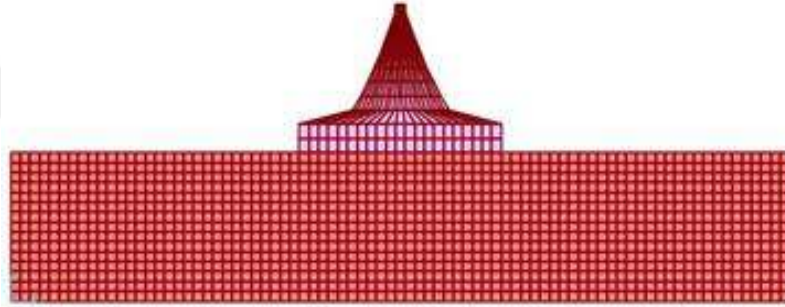
Şekil 5.11. Katı dolgu barajın memba ve mansap yüzeyi şev eğimi a) (0.7y/1.0d) ve kuvvet dereceleri sırasıyla b) $n=1.1$, c) $n=1.5$, d) $n=2$ olması durumları için baraj-temel ortamlarına ait sonlu eleman modelleri



a)



b)



c)

Şekil 5.12. Katı dolgu barajın memba ve mansap yüzeyi şev eğimi a) $n=1.1$, b) $n=1.5$, c) $n=2$ olması durumları ve baraj ayırma yüzeyinden 20 m yükseklikte parabolik şevlerin başlatılması durumları için baraj-temel ortamlarına ait sonlu eleman modelleri

Bu çalışmada temelli ya da rijit katı-dolgu baraj gövdelerinin farklı şev durumları için statik yükler altında lineer elastik davranışları incelenmiştir. Temel malzeme özellikleri barajın inşa edildiği bölgelere göre değişiklik gösterdiği için temel ortamının dayanımı baraj gövdesinin elastisite modülüne bağlı olarak hesaba katılmıştır. Bu amaçla, temel ortamının dayanımı, barajın baraj gövdesinin elastisite modülünün bir oranı şeklinde (E_b/E_t) hesaba katılmış olup sonuçlar E_t/E_b oranının 0.25, 0.50 ve 1.0 olması durumları için elde edilmiştir.

Çözümler barajın kendi ağırlığı ve hidrostatik su yükü dikkate alınarak, baraj rezervuarının boş, yarı dolu ve tam dolu halleri için her bir durum için statik analiz sonuçları elde edilmiş olup, sonuçlar sırasıyla baraj gövdesi ve baraj-temel ara yüzeyindeki maksimum, minimum asal gerilme değerleri için değerlendirilmiştir. Barajın elastisite modülü 15.00 GPa seçilmiş olup birim hacim ağırlığı $\gamma_b = 24.0$

kN/m^3 ve poisson oranı $\nu_b = 0.2$ olarak seçilmiştir. Temelin dayanımı, baraj gövdesinin elastisite modülünün bir oranı şeklinde (E_b/E_t) hesaba katılmış olup sonuçlar E_b/E_t oranının 0.25, 0.50 ve 1.0 olması durumları için elde edilmiştir. Temelin elastisite modülü bu oranlar karşısında 3.75, 7.50, 15.00 GPa olarak hesaba katılmıştır. Temel ortamı hesaplarda kütsüz olarak dikkate alınmış olup poisson oranı ise $\nu_b = 0.2$ olarak seçilmiştir.

5.2. Katı Dolgu Baraj Şevinin Temelli Ve Rijit Ortamlarda (0.7y/1.0d) Olması Durumu

Şev eğiminin (0.7y/1.0d), olması ve rezervuar ortamı doluluk oranın boş olması, yarı dolu ve tam dolu olması durumlarında rijit baraj için baraj kretinin yatay yer değiştirmeleri sırasıyla, 0.000099, 0.012628, 0.236597 cm düşey yer değiştirme değerleri ise sırasıyla, -0.529406, -0.528817, -0.568091 cm olarak elde edilmiştir. Bu çözümler ışığında rezervuarın doluluk oranının artışına bağlı olarak yatay ve düşey yer değiştirme değerlerinin büyüdüğü görülmektedir.

Şev eğiminin (0.7y/1.0d), $E_t/E_b = 0.25$ olması ve rezervuar ortamı doluluk oranın boş olması, yarı dolu ve tam dolu olması durumlarında temelli baraj için baraj kretinin yatay yer değiştirmeleri sırasıyla, 0.000064, -0.633205, 0.544603 cm düşey yer değiştirme değerleri ise sırasıyla, -3.3854.71, -3.89359, -4.142145 cm olarak elde edilmiştir.

Şev eğiminin (0.7y/1.0d), $E_t/E_b = 0.50$ olması ve rezervuar ortamı doluluk oranın boş olması, yarı dolu ve tam dolu olması durumlarında temelli baraj için baraj kretinin yatay yer değiştirmeleri sırasıyla, 0.000077, -0.299361, 0.405718 cm, düşey yer değiştirme değerleri ise sırasıyla, -1.994672, -2.240541, -2.389192 cm olarak elde edilmiştir.

Şev eğiminin (0.7y/1.0d), $E_t/E_b = 1.0$ olması ve rezervuar ortamı doluluk oranın boş olması, yarı dolu ve tam dolu olması durumlarında temelli baraj için baraj kretinin yatay yer değiştirmeleri sırasıyla, 0.000087, -0.134767, 0.330857 cm düşey yer değiştirme değerleri ise sırasıyla, -1.279192, -1.382328, -1.495408 cm olarak elde edilmiştir. Rezervuarın doluluk oranının artışı ile yatay ve düşey yer değiştirme değerlerinin büyüdüğü görülmektedir. Aynı zamanda temel elastisite modülünün artışı ile barajın daha rijit bir zemine konumlandırılması sağlanarak kuvvet ve momentlerin etkisi altında formunu koruması yani şekil değiştirmesinin önüne geçilmesi sağlanıp yatay ve düşey yer değiştirme değerlerinin küçülmesi sağlanmıştır.

Şev eğiminin (0.7y/1.0d), olması ve rezervuar ortamı doluluk oranın boş olması, yarı dolu ve tam dolu olması durumlarında rijit baraj için baraj gövdesi üzerinde elde edilen maksimum ve minimum asal gerilmeler ise sırasıyla, 21.78, 24.35, 386.40 kPa ve -1614.41, -1630.09, -1853.30 kPa olarak elde edilmiştir. Bu çözümler ışığında rezervuarın doluluk oranının artışına bağlı olarak maksimum ve minimum asal gerilme değerleri artış göstermiştir.

Şev eğiminin (0.7y/1.0d), $E_t/E_b = 0.25$ olması ve rezervuar ortamı doluluk oranın boş, yarı dolu ve tam dolu olması durumları için, baraj-temel ara yüzeyinde elde edilen maksimum ve minimum asal gerilmeler sırasıyla, 369.11, 107.64, 207.26 kPa ve -3204.98, -3127.66, -4302.29 kPa dır. Baraj gövdesi üzerinde elde edilen maksimum ve minimum asal gerilmeler ise sırasıyla, 369.11, 107.64,

207.26 kPa ve -3204.98, -3127.66, -4302.29 kPa olarak elde edilmiştir. Bu çözümler ışığında rezervuarın doluluk oranının artışına bağlı olarak baraj-temel ara yüzeyinde ve baraj gövdesinde maksimum asal gerilme değerlerinin artışına, minimum asal gerilme değerlerinin de küçülmesine (basınç gerilme değerlerinin artışına) neden olmuştur. Ayrıca baraj gövdesi üzerindeki gerilme değerleri en yüksek baraj-temel ara yüzeyinde görülmüştür.

Şev eğiminin (0.7y/1.0d), $E_t/E_b = 0.50$ olması ve rezervuar ortamı doluluk oranının boş, yarı dolu ve tam dolu olması durumları için, baraj-temel ara yüzeyinde elde edilen maksimum ve minimum asal gerilmeler sırasıyla, 53.53, 68.59, 138.65 kPa ve -2309.26, -2325.69, -3291.70 kPa dır. Baraj gövdesi üzerinde elde edilen maksimum ve minimum asal gerilmeler ise sırasıyla, 53.53, 68.59, 138.65 kPa ve -2309.26, 2325.69, -3291.70 kPa olarak elde edilmiştir. Bu çözümler ışığında rezervuarın doluluk oranının artışına bağlı olarak baraj-temel ara yüzeyinde ve baraj gövdesinde maksimum asal gerilme değerlerinin küçülmesine, minimum asal gerilme değerlerinin de küçülmesine (basınç gerilme değerlerinin artışına) neden olmuştur. Ayrıca baraj gövdesi üzerindeki gerilme değerleri en yüksek baraj-temel ara yüzeyinde görülmüştür.

Şev eğiminin (0.7y/1.0d), $E_t/E_b = 1.0$ olması ve rezervuar ortamı doluluk oranının boş, yarı dolu ve tam dolu olması durumları için, baraj-temel ara yüzeyinde elde edilen maksimum ve minimum asal gerilmeler sırasıyla, 11.91, 20.48, 61.15 kPa ve -1579.53, -1629.75, -2356.17 kPa dır. Baraj gövdesi üzerinde elde edilen maksimum ve minimum asal gerilmeler ise sırasıyla, 16.97, 20.48, 61.15 kPa ve -1579.53, -1629.75, -2356.17 kPa olarak elde edilmiştir. Bu çözümler ışığında rezervuarın doluluk oranının artışına bağlı olarak baraj-temel ara yüzeyinde ve baraj gövdesinde maksimum asal gerilme değerlerinin küçülmesine, minimum asal gerilme değerlerinin de küçülmesine (basınç gerilme değerlerinin artışına) neden olmuştur. Aynı zamanda temel elastisite modülünün artışına bağlı olarak maksimum ve minimum asal gerilmeler küçülmüştür. Ayrıca barajın boş olduğu durumda baraj gövdesindeki maksimum asal gerilme baraj-temel ara yüzeyinde oluşmamaktadır, yarı dolu ve tam dolu durumlarda maksimum asal gerilmeler baraj-temel ara yüzeyinde oluşmuştur.

Yapılan analiz sonuçları aşağıdaki Tablo 5.1 ve Tablo 5.2’de verilmiştir.

Tablo 5.6. $H_b=105$ m, $E_t/E_b=0.25, 0.50$ ve 1.0 , $m=0.7y/1.0d$, $H_r/H_b=0.0, 0.5$ ve 1.0 olması durumları için baraj kretinin yatay ve düşey yer değiştirme değerleri

Rezervuar Su Yüksekliği H_r (m)	E_t/E_b (-)	Maksimum Yatay Deplasmanlar (cm)	Maksimum Düşey Deplasmanlar (cm)
0	-	0.000099	-0.529406
50	-	0.012628	-0.528817
100	-	0.236597	-0.568091
0	0.25	0.000064	-3.385471
0	0.50	0.000077	-1.994672
0	1.00	0.000087	-1.279192
50	0.25	-0.633205	-3.89359
50	0.50	-0.299361	-2.240541
50	1.00	-0.134767	-1.382328
100	0.25	0.544603	-4.142145
100	0.50	0.405718	-2.389192
100	1.00	0.330857	-1.495408

Tablo 5.7. $H_b=105$ m, $E_t/E_b=0.25, 0.50$, ve 1.0 , $m=0.7y/1.0d$, $H_r/H_b=0.0, 0.5$ ve 1.0 olması durumları için baraj gövdesi ile baraj-temel ara yüzeyinde oluşan maksimum ve minimum asal gerilmelerin maksimum değerleri

Rezervuar Su Yüksekliği H_r (m)	E_t/E_b (-)	Baraj Gövdesi		Baraj-Temel Ara Yüzeyi	
		Min. Asal Gerilme (kPa)	Maks. Asal Gerilme (kPa)	Min. Asal Gerilme (kPa)	Maks. Asal Gerilme (kPa)
0	-	-1614.41	21.78	-	-
50	-	-1630.09	24.35	-	-
100	-	-1853.30	386.40	-	-
0	0.250	-3204.98	369.11	-3204.98	369.11
0	0.500	-2309.26	53.53	-2309.26	53.53
0	1.000	-1579.53	16.97	-1579.23	11.91
50	0.250	-3127.66	107.64	-3127.66	107.64
50	0.500	-2325.69	68.59	-2325.69	68.59
50	1.000	-1629.75	20.48	-1629.75	20.48
100	0.250	-4302.29	207.26	-4302.29	207.26
100	0.500	-3291.70	138.65	-3291.70	138.65
100	1.000	-2356.17	61.15	-2356.17	61.15

5.3. Katı Dolgu Baraj Şevinin Temelli Ve Rijit Ortamlarda Kuvvet Fonksiyonu Tabanlı Baraj Gövdesi Enkesit Denklemine Göre Kuvvet Derecesi $N=1.1$ Olması Durumu

Şev eğiminin kuvvet fonksiyonu tabanlı baraj gövdesi enkesit denklemine göre $n=1.1$, olması ve rezervuar ortamı doluluk oranının boş olması, yarı dolu ve tam dolu olması durumlarında rijit baraj için baraj kretinin yatay yer değiştirmeleri sırasıyla, 0.000086, 0.006615, 0.147921 cm ve düşey yer değiştirme değerleri ise sırasıyla, -0.522494, -0.522624, -0.539206 cm olarak elde edilmiştir. Bu çözümler ışığında rezervuarın doluluk oranının artışına bağlı olarak yatay ve düşey yer değiştirme değerlerinin büyüdüğü görülmektedir.

Şev eğiminin kuvvet fonksiyonu tabanlı baraj gövdesi enkesit denklemine göre $n=1.1$, $E_t/E_b=0.25$ olması ve rezervuar ortamı doluluk oranının boş olması, yarı dolu ve tam dolu olması durumlarında temelli baraj için baraj kretinin yatay yer değiştirmeleri sırasıyla, 0.000067, -0.875993, -0.163931 cm düşey yer değiştirme değerleri ise sırasıyla, -3.299563, -3.599063, -3.859593 cm olarak elde edilmiştir.

Şev eğiminin kuvvet fonksiyonu tabanlı baraj gövdesi enkesit denklemine göre $n=1.1$, $E_t/E_b=0.50$ olması ve rezervuar ortamı doluluk oranının boş olması, yarı dolu ve tam dolu olması durumlarında temelli baraj için baraj kretinin yatay yer değiştirmeleri sırasıyla, 0.000075, -0.423313, 0.007582 cm düşey yer değiştirme değerleri ise sırasıyla, -1.949137, -2.090805, -2.231112 cm olarak elde edilmiştir.

Şev eğiminin kuvvet fonksiyonu tabanlı baraj gövdesi enkesit denklemine göre $n=1.1$, $E_t/E_b=1.0$ olması ve rezervuar ortamı doluluk oranının boş olması, yarı dolu ve tam dolu olması durumlarında temelli baraj için baraj kretinin yatay yer değiştirmeleri sırasıyla, 0.00008, -0.202222, 0.086754 cm düşey yer değiştirme değerleri ise sırasıyla, -1.253226, -1.32028, -1.393982 cm olarak elde edilmiştir.

Şev eğiminin kuvvet fonksiyonu tabanlı baraj gövdesi enkesit denklemine göre $n=1.1$, olması ve rezervuar ortamı doluluk oranının boş olması, yarı dolu ve tam dolu olması durumlarında rijit baraj için baraj gövdesi üzerinde elde edilen maksimum ve minimum asal gerilmeler ise sırasıyla, 38.02, 39.82, 72.53 kPa ve -1591.60, -1600.99, -1701.66 kPa olarak elde edilmiştir. Bu çözümler ışığında rezervuarın doluluk oranının artışına bağlı olarak maksimum asal gerilme değerlerinin büyüdüğü, minimum asal gerilme değerlerinin küçüldüğü (basınç gerilme değerinin arttığı) görülmektedir.

Şev eğiminin kuvvet fonksiyonu tabanlı baraj gövdesi enkesit denklemine göre $n=1.1$, $E_t/E_b=0.25$ olması ve rezervuar ortamı doluluk oranının boş, yarı dolu ve tam dolu olması durumları için, baraj-temel ara yüzeyinde elde edilen maksimum ve minimum asal gerilmeler sırasıyla, 370.03, 294.80, 156.98 kPa ve -3059.99, -2649.41, -3404.88 kPa dır. Baraj gövdesi üzerinde elde edilen maksimum ve minimum asal gerilmeler ise sırasıyla 370.03, 294.80, 156.98 kPa ve -3059.99, -

2649.41, -3404.88 kPa olarak elde edilmiştir. Bu çözümler ışığında rezervuarın doluluk oranının artışına bağlı olarak baraj-temel ara yüzeyinde ve baraj gövdesinde maksimum asal gerilme değerlerinin küçülmesine, minimum asal gerilme değerlerinin de küçülmesine (basınç gerilme değerlerinin artışına) neden olmuştur. Ayrıca tüm durumlar için maksimum ve minimum gerilmeler baraj-temel ara yüzeyinde oluşmaktadır.

Şev eğiminin kuvvet fonksiyonu tabanlı baraj gövdesi enkesit denklemine göre $n=1.1$, $E_t/E_b=0.50$ olması ve rezervuar ortamı doluluk oranının boş, yarı dolu ve tam dolu olması durumları için, baraj-temel ara yüzeyinde elde edilen maksimum ve minimum asal gerilmeler sırasıyla, 35.07, 19.86, 60.71 kPa ve -2132.50, -1873.76, -2480.24 kPa dır. Baraj gövdesi üzerinde elde edilen maksimum ve minimum asal gerilmeler ise sırasıyla, 35.07, 19.86, 60.71 kPa ve -2132.50, -1873.76, -2480.24 kPa olarak elde edilmiştir. Bu çözümler ışığında rezervuarın doluluk oranının artışına bağlı olarak baraj-temel ara yüzeyinde ve baraj gövdesinde maksimum asal gerilme değerlerinin küçülmesine, minimum asal gerilme değerlerinin de küçülmesine (basınç gerilme değerlerinin artışına) neden olmuştur. Ayrıca tüm durumlar için maksimum ve minimum gerilmeler baraj-temel ara yüzeyinde oluşmaktadır.

Şev eğiminin kuvvet fonksiyonu tabanlı baraj gövdesi enkesit denklemine göre $n=1.1$, $E_t/E_b=1.0$ olması ve rezervuar ortamı doluluk oranının boş, yarı dolu ve tam dolu olması durumları için, baraj-temel ara yüzeyinde elde edilen maksimum ve minimum asal gerilmeler sırasıyla, 0.00, 0.00, 10.89 kPa ve -1406.40, -1407.33, -1702.46 kPa dır. Baraj gövdesi üzerinde elde edilen maksimum ve minimum asal gerilmeler ise sırasıyla, 15.86, 15.92, 28.92 kPa ve -1406.40, -1407.33, -1702.46 kPa olarak elde edilmiştir. Bu çözümler ışığında rezervuarın doluluk oranının artışına bağlı olarak baraj-temel ara yüzeyinde ve baraj gövdesinde maksimum asal gerilme değerlerinin küçülmesine, minimum asal gerilme değerlerinin de küçülmesine (basınç gerilme değerlerinin artışına) neden olmuştur. Aynı zamanda temelin elastisite modülünün artışına bağlı olarak gerilmeler küçülmektedir. Ayrıca barajın boş ve yarı dolu durumları için asal gerilmeler baraj-temel ara yüzeyinde sıfır olmakla birlikte maksimum asal gerilme baraj gövdesinde oluşmuştur, bu da daha rijit bir temele oturtulmasından kaynaklanmaktadır.

Yapılan analiz sonuçları aşağıdaki Tablo 5.3 ve Tablo 5.4'te verilmiştir.

Tablo 5.8. Hb=105 m, Et/Eb =0.25, 0.50 ve 1.0, Kuvvet Derecesi (n=1.1), Hr/Hb=0.0, 0.5 ve 1.0 olması durumları için baraj kretinin yatay ve düşey yer değiştirme değerleri

Rezervuar Su Yüksekliği Hr (m)	Et/Eb (-)	Maks. Yatay Deplasmanlar (cm)	Maks. Düşey Deplasmanlar (cm)
0	-	0.000086	-0.522494
50	-	0.006615	-0.522624
100	-	0.147921	-0.539206
0	0.250	0.000067	-3.299563
0	0.500	0.000075	-1.949137
0	1.000	0.000080	-1.253226
50	0.250	-0.875993	-3.599063
50	0.500	-0.423313	-2.090805
50	1.000	-0.202222	-1.320280
100	0.250	-0.163931	-3.859593
100	0.500	0.007582	-2.231112
100	1.000	0.086754	-1.393982

Tablo 5.9. Hb=105 m, Et/Eb =0.25, 0.50, ve 1.0 Kuvvet Derecesi (n=1.1), Hr/Hb=0.0, 0.5 ve 1.0 olması durumları için baraj gövdesi ile baraj-temel ara yüzeyinde oluşan maksimum ve minimum asal gerilmelerin maksimum değerleri

Rezervuar Su Yüksekliği Hr (m)	Et/Eb (-)	Baraj Gövdesi		Baraj-Temel Ara Yüzeyi	
		Min. Asal Gerilme (kPa)	Maks. Asal Gerilme (kPa)	Min. Asal Gerilme (kPa)	Maks. Asal Gerilme (kPa)
0	-	-1591.60	38.02	-	-
50	-	-1600.99	39.82	-	-
100	-	-1701.66	72.83	-	-
0	0.250	-3059.99	370.03	-3059.99	370.03
0	0.500	-2132.50	35.07	-2132.50	35.07
0	1.000	-1406.40	15.86	-1406.40	0.00
50	0.250	-2649.41	294.80	-2649.41	294.80
50	0.500	-1873.76	19.86	-1873.76	19.86
50	1.000	-1407.33	15.92	-1407.33	0.00
100	0.250	-3404.88	156.98	-3404.88	156.98
100	0.500	-2480.24	60.71	-2480.24	60.71
100	1.000	-1702.46	28.92	-1702.46	10.89

5.4. Katı Dolgu Baraj Şevinin Temelli Ve Rijit Ortamlarda Kuvvet Fonksiyonu Tabanlı Baraj Gövdesi Enkesit Denklemine Göre Kuvvet Derecesi N=1.5 Olması Durumu

Şev eğiminin kuvvet fonksiyonu tabanlı baraj gövdesi enkesit denklemine göre $n=1.5$, olması ve rezervuar ortamı doluluk oranının boş olması, yarı dolu ve tam dolu olması durumlarında rijit baraj için baraj kretinin yatay yer değiştirmeleri sırasıyla, 0.000061, 0.007194, 0.233743 cm, düşey yer değiştirme değerleri ise sırasıyla, -0.503288, -0.503894, -0.530093 cm olarak elde edilmiştir. Bu çözümler ışığında rezervuarın doluluk oranının artışına bağlı olarak yatay ve düşey yer değiştirme değerlerinin büyüdüğü görülmektedir.

Şev eğiminin kuvvet fonksiyonu tabanlı baraj gövdesi enkesit denklemine göre $n=1.5$, $E_t/E_b=0.25$ olması ve rezervuar ortamı doluluk oranının boş olması, yarı dolu ve tam dolu olması durumlarında temelli baraj için baraj kretinin yatay yer değiştirmeleri sırasıyla, 0.000063, -0.7179, 0.351575 cm düşey yer değiştirme değerleri ise sırasıyla, -2.822536, -3.073854, -3.338724 cm olarak elde edilmiştir.

Şev eğiminin kuvvet fonksiyonu tabanlı baraj gövdesi enkesit denklemine göre $n=1.5$, $E_t/E_b=0.50$ olması ve rezervuar ortamı doluluk oranının boş olması, yarı dolu ve tam dolu olması durumlarında temelli baraj için baraj kretinin yatay yer değiştirmeleri sırasıyla, 0.000057, -0.341325, 0.389368 cm düşey yer değiştirme değerleri ise sırasıyla, -1.69362, -1.813305, -1.955863 cm olarak elde edilmiştir.

Şev eğiminin kuvvet fonksiyonu tabanlı baraj gövdesi enkesit denklemine göre $n=1.5$, $E_t/E_b=1.0$ olması ve rezervuar ortamı doluluk oranının boş olması, yarı dolu ve tam dolu olması durumlarında temelli baraj için baraj kretinin yatay yer değiştirmeleri sırasıyla, 0.000053, -0.159865, 0.390826 cm düşey yer değiştirme değerleri ise sırasıyla, -1.108583, -1.165976, -1.26666 cm olarak elde edilmiştir.

Şev eğiminin kuvvet fonksiyonu tabanlı baraj gövdesi enkesit denklemine göre $n=1.5$, olması ve rezervuar ortamı doluluk oranının boş olması, yarı dolu ve tam dolu olması durumlarında rijit baraj için baraj gövdesi üzerinde elde edilen maksimum ve minimum asal gerilmeler ise sırasıyla, 57.73, 60.75, 106.77 kPa ve -1517.88, -1531.32, -1643.12 kPa olarak elde edilmiştir. Bu çözümler ışığında rezervuarın doluluk oranının artışına bağlı olarak yatay ve düşey yer değiştirme değerlerinin büyüdüğü görülmektedir.

Şev eğiminin kuvvet fonksiyonu tabanlı baraj gövdesi enkesit denklemine göre $n=1.5$, $E_t/E_b=0.25$ olması ve rezervuar ortamı doluluk oranının boş, yarı dolu ve tam dolu olması durumları için, baraj-temel ara yüzeyinde elde edilen maksimum ve minimum asal gerilmeler sırasıyla, 338.4, 304.19, 205.34 kPa ve -2062.85, -1759.75, -2789.46 kPa dır. Baraj gövdesi üzerinde elde edilen maksimum ve minimum asal gerilmeler ise sırasıyla, 338.4, 304.19, 205.34 kPa ve -2704.53, -2517.26, -3186.67 kPa olarak elde edilmiştir. Bu çözümler ışığında rezervuarın doluluk oranının artışına bağlı olarak baraj-temel ara yüzeyinde ve baraj gövdesinde maksimum asal gerilme değerlerinin küçülmesine, minimum asal gerilme değerlerinin de küçülmesine (basınç gerilme değerlerinin artışına) neden olmuştur. Ayrıca oluşan maksimum asal gerilmeler baraj-temel ara yüzeyinde olmasına rağmen minimum asal gerilmeler baraj-temel ara yüzeyinde daha büyüktür (basınç gerilmeleri küçülmüştür).

Şev eğiminin kuvvet fonksiyonu tabanlı baraj gövdesi enkesit denklemine göre $n=1.5$, $E_t/E_b=0.50$ olması ve rezervuar ortamı doluluk oranının boş, yarı dolu ve tam dolu olması durumları için, baraj-temel ara yüzeyinde elde edilen maksimum ve minimum asal gerilmeler sırasıyla, 20.04, 10.10, 110.01 kPa ve -1207.58, -1246.61, -1720.13 kPa dır. Baraj gövdesi üzerinde elde edilen

maksimum ve minimum asal gerilmeler ise sırasıyla, 29.38, 25.71, 110.01 kPa ve -1934.62, -1790.16, -2427.15 kPa olarak elde edilmiştir. Bu çözümler ışığında rezervuarın doluluk oranının artışına bağlı olarak baraj-temel ara yüzeyinde ve baraj gövdesinde maksimum asal gerilme değerlerinin küçülmesine, minimum asal gerilme değerlerinin de küçülmesine (basınç gerilme değerlerinin artışına) neden olmuştur. Ayrıca barajın boş ve yarı dolu durumları için maksimum asal gerilmeler baraj-temel ara yüzeyinde değil baraj gövdesinde oluşmuş olup, tam dolu model için baraj-temel ara yüzeyinde oluşmaktadır. Böylelikle oluşan maksimum asal gerilmeler baraj-temel ara yüzeyinde olmasına rağmen minimum asal gerilmeler baraj-temel ara yüzeyinde daha büyüktür (basınç gerilmeleri küçülmüştür).

Şev eğiminin kuvvet fonksiyonu tabanlı baraj gövdesi enkesit denkleminde $n=1.5$, $E_t/E_b=1.0$ olması ve rezervuar ortamı doluluk oranının boş, yarı dolu ve tam dolu olması durumları için, baraj-temel ara yüzeyinde elde edilen maksimum ve minimum asal gerilmeler sırasıyla, 0.00, 27.66, 230.84 kPa ve -1218.07, -1273.45, -1421.85 kPa dır. Baraj gövdesi üzerinde elde edilen maksimum ve minimum asal gerilmeler ise sırasıyla, 12.12, 27.66, 230.84 kPa ve -1397.10, -1321.42, -1873.16 kPa olarak elde edilmiştir. Bu çözümler ışığında rezervuarın doluluk oranının artışına bağlı olarak baraj-temel ara yüzeyinde ve baraj gövdesinde maksimum asal gerilme değerlerinin küçülmesine, minimum asal gerilme değerlerinin de küçülmesine (basınç gerilme değerlerinin artışına) neden olmuştur. Aynı zamanda temelin elastisite modülünün artışına bağlı olarak gerilmeler küçülmektedir. Böylelikle boş model için maksimum asal gerilme barajın gövdesinde oluşmaktadır, yarı dolu ve boş model için maksimum asal gerilme baraj-temel ara yüzeyinde oluşmuştur, minimum asal gerilmeler baraj-temel ara yüzeyinde artış göstermiş olup (basınç gerilmesi küçülmüştür).

Yapılan analiz sonuçları aşağıdaki Tablo 5.5 ve Tablo 5.6'da verilmiştir.

Tablo 5.10. $H_b=105$ m, $E_t/E_b=0.25, 0.50$ ve 1.0 , Kuvvet Derecesi ($n=1.5$), $H_r/H_b=0.0, 0.5$ ve 1.0 olması durumları için baraj kretinin yatay ve düşey yer değiştirme değerleri

Rezervuar Su Yüksekliği H_r (m)	E_t/E_b (-)	Maks. Yatay Deplasmanlar (cm)	Maks. Düşey Deplasmanlar (cm)
0	-	0.000061	-0.503288
50	-	0.007194	-0.503894
100	-	0.233743	-0.530093
0	0.250	0.000063	-2.822536
0	0.500	0.000057	-1.693620
0	1.000	0.000053	-1.108583
50	0.250	-0.717900	-3.073854
50	0.500	-0.341325	-1.813305
50	1.000	-0.159865	-1.165976
100	0.250	0.351575	-3.338724
100	0.500	0.389368	-1.955863
100	1.000	0.390826	-1.266660

Tablo 5.11. $H_b=105$ m, $E_t/E_b = 0.25, 0.50$, ve 1.0 Kuvvet Derecesi ($n=1.5$), $H_t/H_b=0.0, 0.5$ ve 1.0 olması durumları için baraj gövdesi ile baraj-temel ara yüzeyinde oluşan maksimum ve minimum asal gerilmelerin maksimum değerleri

Rezervuar Su Yüksekliği H_r (m)	E_t/E_b (-)	Baraj Gövdesi		Baraj-Temel Ara Yüzeyi	
		Min. Asal Gerilme (kPa)	Maks. Asal Gerilme (kPa)	Min. Asal Gerilme (kPa)	Maks. Asal Gerilme (kPa)
0	-	-1517.88	57.73	-	-
50	-	-1531.32	60.75	-	-
100	-	-1643.12	106.77	-	-
0	0.250	-2704.53	338.40	-2062.85	338.40
0	0.500	-1934.62	29.38	-1207.58	20.04
0	1.000	-1397.10	12.12	-1218.07	0.00
50	0.250	-2517.26	304.19	-1759.75	304.19
50	0.500	-1790.16	25.71	-1246.61	10.10
50	1.000	-1321.42	27.66	-1273.45	27.66
100	0.250	-3186.67	205.34	-2789.46	205.34
100	0.500	-2424.15	110.01	-1720.13	110.01
100	1.000	-1873.16	230.84	-1421.85	230.84

5.5. Katı Dolgu Baraj Şevinin Temelli Ve Rijit Ortamlarda Kuvvet Fonksiyonu Tabanlı Baraj Gövdesi Enkesit Denklemine Göre Kuvvet Derecesi $N=2.0$ Olması Durumu

Şev eğiminin kuvvet fonksiyonu tabanlı baraj gövdesi enkesit denklemine göre $n=2.0$, olması ve rezervuar ortamı doluluk oranının boş olması, yarı dolu ve tam dolu olması durumlarında rijit baraj için baraj kretinin yatay yer değiştirmeleri sırasıyla, 0.00005, 0.009554, 0.382361 cm düşey yer değiştirme değerleri ise sırasıyla, -0.490175, -0.491136, -0.526419 cm olarak elde edilmiştir. Bu çözümler ışığında rezervuarın doluluk oranının artışına bağlı olarak yatay ve düşey yer değiştirme değerlerinin büyüdüğü görülmektedir.

Şev eğiminin kuvvet fonksiyonu tabanlı baraj gövdesi enkesit denklemine göre $n=2.0$, $E_t/E_b = 0.25$ olması ve rezervuar ortamı doluluk oranının boş olması, yarı dolu ve tam dolu olması durumlarında temelli baraj için baraj kretinin yatay yer değiştirmeleri sırasıyla, 0.000063, -0.83099, 0.248665 cm düşey yer değiştirme değerleri ise sırasıyla, -2.822536, -3.104979, -3.36091 cm olarak elde edilmiştir.

Şev eğiminin kuvvet fonksiyonu tabanlı baraj gövdesi enkesit denklemine göre $n=2.0$, $E_t/E_b = 0.50$ olması ve rezervuar ortamı doluluk oranının boş olması, yarı dolu ve tam dolu olması durumlarında temelli baraj için baraj kretinin yatay yer değiştirmeleri sırasıyla, 0.000057, 0.395716, 0.355372 cm düşey yer değiştirme değerleri ise sırasıyla, -1.69373, -1.827814, -1.974779 cm olarak elde edilmiştir.

Şev eğiminin kuvvet fonksiyonu tabanlı baraj gövdesi enkesit denklemine göre $n=2.0$, $E_t/E_b = 1.0$ olması ve rezervuar ortamı doluluk oranının boş olması, yarı dolu ve tam dolu olması durumlarında temelli baraj için baraj kretinin yatay yer değiştirmeleri sırasıyla, 0.000053, -

0.18548, 0.38966 cm düşey yer değiştirme değerleri ise sırasıyla, -1.108583, -1.172672, -1.242492 cm olarak elde edilmiştir.

Şev eğiminin kuvvet fonksiyonu tabanlı baraj gövdesi enkesit denklemine göre, $n=2.0$ olması ve rezervuar ortamı doluluk oranının boş olması, yarı dolu ve tam dolu olması durumlarında rijit baraj için baraj gövdesi üzerinde elde edilen maksimum ve minimum asal gerilmeler ise sırasıyla, 49.44, 53.25, 111.71 kPa ve -1449.58, -1467.50, -1602.72 kPa olarak elde edilmiştir.

Şev eğiminin kuvvet fonksiyonu tabanlı baraj gövdesi enkesit denklemine göre $n=2.0$, $E_t/E_b=0.25$ olması ve rezervuar ortamı doluluk oranının boş, yarı dolu ve tam dolu olması durumları için, baraj-temel ara yüzeyinde elde edilen maksimum ve minimum asal gerilmeler sırasıyla, 338.40, 303.47, 636.56 kPa ve -2062.85, -1697.44, -2703.24 kPa dır. Baraj gövdesi üzerinde elde edilen maksimum ve minimum asal gerilmeler ise sırasıyla, 338.40, 303.47, 636.56 kPa ve -2704.53, -2794.98, -3130.95 kPa olarak elde edilmiştir. Bu çözümler ışığında rezervuarın doluluk oranının artışına bağlı olarak baraj-temel ara yüzeyinde ve baraj gövdesinde maksimum asal gerilme değerlerinin küçülmesine, minimum asal gerilme değerlerinin de küçülmesine (basınç gerilme değerlerinin artışına) neden olmuştur.

Şev eğiminin kuvvet fonksiyonu tabanlı baraj gövdesi enkesit denklemine göre $n=2.0$, $E_t/E_b=0.50$ olması ve rezervuar ortamı doluluk oranının boş, yarı dolu ve tam dolu olması durumları için, baraj-temel ara yüzeyinde elde edilen maksimum ve minimum asal gerilmeler sırasıyla, 11.74, 142.95, 454.95 kPa ve -1214.15, -1253.32, -1680.63 kPa dır. Baraj gövdesi üzerinde elde edilen maksimum ve minimum asal gerilmeler ise sırasıyla, 29.38, 82.64, 454.95 kPa ve -1934.62, -1937.04, -2390.22 kPa olarak elde edilmiştir. Bu çözümler ışığında rezervuarın doluluk oranının artışına bağlı olarak baraj-temel ara yüzeyinde ve baraj gövdesinde maksimum asal gerilme değerlerinin küçülmesine, minimum asal gerilme değerlerinin de küçülmesine (basınç gerilme değerlerinin artışına) neden olmuştur.

Şev eğiminin kuvvet fonksiyonu tabanlı baraj gövdesi enkesit denklemine göre $n=2.0$, $E_t/E_b=1.0$ olması ve rezervuar ortamı doluluk oranının boş, yarı dolu ve tam dolu olması durumları için, baraj-temel ara yüzeyinde elde edilen maksimum ve minimum asal gerilmeler sırasıyla, 0.00, 0.00, 319.54 kPa ve -1218.07, -1277.90, -1415.12 kPa dır. Baraj gövdesi üzerinde elde edilen maksimum ve minimum asal gerilmeler ise sırasıyla, 12.12, 10.92, 319.54 kPa ve -1397.10, -1345.01, -1850.42 kPa olarak elde edilmiştir. Bu çözümler ışığında rezervuarın doluluk oranının artışına bağlı olarak baraj-temel ara yüzeyinde ve baraj gövdesinde maksimum asal gerilme değerlerinin küçülmesine, minimum asal gerilme değerlerinin de küçülmesine (basınç gerilme değerlerinin artışına) neden olmuştur. Aynı zamanda barajın elastisite modülünün artışına bağlı olarak gerilmeler küçülmektedir.

Yapılan analiz sonuçları aşağıdaki Tablo 5.7 ve Tablo 5.8’de verilmiştir.

Tablo 5.12. Hb=105 m, Et/Eb =0.25, 0.50 ve 1.0, Kuvvet Derecesi (n=2.0), Hr/Hb=0.0, 0.5 ve 1.0 olması durumları için baraj kretinin yatay ve düşey yer değiştirme değerleri

Rezervuar Su Yüksekliği H _r (m)	E _t /E _b (-)	Maks. Yatay Deplasmanlar (cm)	Maks. Düşey Deplasmanlar (cm)
0	-	0.000050	-0.490175
50	-	0.009554	-0.491136
100	-	0.382361	-0.526419
0	0.250	0.000063	-2.822536
0	0.500	0.000057	-1.693730
0	1.000	0.000053	-1.108583
50	0.250	-0.830990	-3.104979
50	0.500	0.395716	-1.827814
50	1.000	-0.185480	-1.172672
100	0.250	0.248665	-3.360910
100	0.500	0.355372	-1.974779
100	1.000	0.389660	-1.242492

Tablo 5.13. Hb=105 m, Et/Eb =0.25, 0.50, ve 1.0 Kuvvet Derecesi (n=2.0), Hr/Hb=0.0, 0.5 ve 1.0 olması durumları için baraj gövdesi ile baraj-temel ara yüzeyinde oluşan maksimum ve minimum asal gerilmelerin maksimum değerleri

Rezervuar Su Yüksekliği H _r (m)	E _t /E _b (-)	Baraj Gövdesi		Baraj-Temel Ara Yüzeyi	
		Min. Asal Gerilme (kPa)	Maks. Asal Gerilme (kPa)	Min. Asal Gerilme (kPa)	Maks. Asal Gerilme (kPa)
0	-	-1449.58	49.44	-	-
50	-	-1467.50	53.25	-	-
100	-	-1602.72	111.71	-	-
0	0.250	-2074.53	338.40	-2062.85	338.40
0	0.500	-1934.62	29.38	-1214.15	11.74
0	1.000	-1397.10	12.12	-1218.07	0.00
50	0.250	-2794.98	303.47	-1697.44	303.47
50	0.500	-1937.04	82.64	-1253.32	142.95
50	1.000	-1345.01	10.92	-1277.90	0.00
100	0.250	-3130.95	636.56	-2703.24	636.56
100	0.500	-2390.22	454.95	-1680.63	454.95
100	1.000	-1850.42	319.54	-1415.12	319.54

5.6. Katı Dolgu Baraj Şevinin Temelli Ortamlarda Kuvvet Fonksiyonu Tabanlı Baraj Gövdesi Enkesit Denklemi Dereceleri N=1.1, N=1.5, N=2.0 İken Parabolik Şev Başlangıcı Baraj-Temel Yüzey Alanından 20 M Yükseklikte Başlatılması Durumu

Şev eğiminin kuvvet fonksiyonu tabanlı baraj gövdesi enkesit denklemine göre $n=1.1$, $E_t/E_b=0.25$ olması ve rezervuar ortamı doluluk oranının boş olması, yarı dolu ve tam dolu olması durumlarında temelli baraj için baraj kretinin yatay yer değiştirmeleri sırasıyla, 0.000069, 0.349111, 1.029732 cm düşey yer değiştirme değerleri ise sırasıyla, -3.39344, -3.698869, -3.838522 cm olarak elde edilmiştir.

Şev eğiminin kuvvet fonksiyonu tabanlı baraj gövdesi enkesit denklemine göre $n=1.1$, $E_t/E_b=0.50$ olması ve rezervuar ortamı doluluk oranının boş olması, yarı dolu ve tam dolu olması

durumlarında temelli baraj için baraj kretinin yatay yer değiştirmeleri sırasıyla, 0.000075, 0.197835, 0.606101 cm düşey yer değiştirme değerleri ise sırasıyla, -1.990881, -2.115603, -2.219246 cm olarak elde edilmiştir.

Şev eğiminin kuvvet fonksiyonu tabanlı baraj gövdesi enkesit denklemine göre $n=1.1$, $E_t/E_b=1.0$ olması ve rezervuar ortamı doluluk oranının boş olması, yarı dolu ve tam dolu olması durumlarında temelli baraj için baraj kretinin yatay yer değiştirmeleri sırasıyla, 0.000079, 0.122386, 0.394046 cm düşey yer değiştirme değerleri ise sırasıyla, -1.271318, -1.339851, -1.394024 cm olarak elde edilmiştir.

Şev eğiminin kuvvet fonksiyonu tabanlı baraj gövdesi enkesit denklemine göre $n=1.1$, $E_t/E_b=0.25$ olması ve rezervuar ortamı doluluk oranının boş, yarı dolu ve tam dolu olması durumları için, baraj-temel ara yüzeyinde elde edilen maksimum ve minimum asal gerilmeler sırasıyla, 442.84, 541.87, 660.13 kPa ve -2465.95, -2991.39, -3246.50 kPa dır. Baraj gövdesi üzerinde elde edilen maksimum ve minimum asal gerilmeler ise sırasıyla, 479.44, 541.87, 660.13 kPa ve -2465.95, -2786.83, -3246.50 kPa olarak elde edilmiştir. Bu çözümler ışığında rezervuarın doluluk oranının artışına bağlı olarak baraj-temel ara yüzeyinde ve baraj gövdesinde maksimum asal gerilme değerlerinin küçülmesine, minimum asal gerilme değerlerinin de küçülmesine (basınç gerilme değerlerinin artışına) neden olmuştur.

Şev eğiminin kuvvet fonksiyonu tabanlı baraj gövdesi enkesit denklemine göre $n=1.1$, $E_t/E_b=0.50$ olması ve rezervuar ortamı doluluk oranının boş, yarı dolu ve tam dolu olması durumları için, baraj-temel ara yüzeyinde elde edilen maksimum ve minimum asal gerilmeler sırasıyla, 320.06, 407.48, 530.34 kPa ve -2023.53, -2366.34, -2740.45 kPa dır. Baraj gövdesi üzerinde elde edilen maksimum ve minimum asal gerilmeler ise sırasıyla, 348.59, 407.48, 509.34 ve -2023.53, -2385.20, -2740.45 kPa olarak elde edilmiştir. Bu çözümler ışığında rezervuarın doluluk oranının artışına bağlı olarak baraj-temel ara yüzeyinde ve baraj gövdesinde maksimum asal gerilme değerlerinin küçülmesine, minimum asal gerilme değerlerinin de küçülmesine (basınç gerilme değerlerinin artışına) neden olmuştur.

Şev eğiminin kuvvet fonksiyonu tabanlı baraj gövdesi enkesit denklemine göre $n=1.1$, $E_t/E_b=1.0$ olması ve rezervuar ortamı doluluk oranının boş, yarı dolu ve tam dolu olması durumları için, baraj-temel ara yüzeyinde elde edilen maksimum ve minimum asal gerilmeler sırasıyla, 201.59, 266.91, 346.35 kPa ve -1604.31, -2414.13, -2428.75 kPa dır. Baraj gövdesi üzerinde elde edilen maksimum ve minimum asal gerilmeler ise sırasıyla, 243.42, 274.08, 346.35 ve -1604.31, -2414.13, -2428.75 kPa olarak elde edilmiştir. Bu çözümler ışığında rezervuarın doluluk oranının artışına bağlı olarak baraj-temel ara yüzeyinde ve baraj gövdesinde maksimum asal gerilme değerlerinin küçülmesine, minimum asal gerilme değerlerinin de küçülmesine (basınç gerilme değerlerinin artışına) neden olmuştur.

Şev eğiminin kuvvet fonksiyonu tabanlı baraj gövdesi enkesit denklemine göre $n=1.5$, $E_t/E_b=0.25$ olması ve rezervuar ortamı doluluk oranının boş olması, yarı dolu ve tam dolu olması durumlarında temelli baraj için baraj kretinin yatay yer değiştirmeleri sırasıyla, 0.000070, 0.302967, 1.136676, cm düşey yer değiştirme değerleri ise sırasıyla, -3.177301, -3.452842, -3.609866 cm olarak elde edilmiştir.

Şev eğiminin kuvvet fonksiyonu tabanlı baraj gövdesi enkesit denklemine göre $n=1.5$, $E_t/E_b=0.50$ olması ve rezervuar ortamı doluluk oranının boş olması, yarı dolu ve tam dolu olması durumlarında temelli baraj için baraj kretinin yatay yer değiştirmeleri sırasıyla, 0.000066, 0.166534, 0.691943 cm düşey yer değiştirme değerleri ise sırasıyla, -1.873958, -2.007296, -2.098223 cm olarak elde edilmiştir.

Şev eğiminin kuvvet fonksiyonu tabanlı baraj gövdesi enkesit denklemine göre $n=1.5$, $E_t/E_b=1.0$ olması ve rezervuar ortamı doluluk oranının boş olması, yarı dolu ve tam dolu olması durumlarında temelli baraj için baraj kretinin yatay yer değiştirmeleri sırasıyla, 0.000064, 0.098800, 0.469009 cm düşey yer değiştirme değerleri ise sırasıyla, -1.202702, -1.268274, -1.321520 cm olarak elde edilmiştir.

Şev eğiminin kuvvet fonksiyonu tabanlı baraj gövdesi enkesit denklemine göre $n=1.5$, $E_t/E_b=0.25$ olması ve rezervuar ortamı doluluk oranının boş, yarı dolu ve tam dolu olması durumları için, baraj-temel ara yüzeyinde elde edilen maksimum ve minimum asal gerilmeler sırasıyla, 434.21, 531.23, 669.69 kPa ve -1960.42, -2344.72, -2823.46 kPa dır. Baraj gövdesi üzerinde elde edilen maksimum ve minimum asal gerilmeler ise sırasıyla, 539.50, 563.74, 713.13 kPa ve -2532.35, -3015.44, -2903.29 kPa olarak elde edilmiştir. Bu çözümler ışığında rezervuarın doluluk oranının artışına bağlı olarak baraj-temel ara yüzeyinde ve baraj gövdesinde maksimum asal gerilme değerlerinin küçülmesine, minimum asal gerilme değerlerinin de küçülmesine (basınç gerilme değerlerinin artışına) neden olmuştur.

Şev eğiminin kuvvet fonksiyonu tabanlı baraj gövdesi enkesit denklemine göre $n=1.5$, $E_t/E_b=0.50$ olması ve rezervuar ortamı doluluk oranının boş, yarı dolu ve tam dolu olması durumları için, baraj-temel ara yüzeyinde elde edilen maksimum ve minimum asal gerilmeler sırasıyla, 305.59, 394.37, 513.10 kPa ve -1580.98, -2359.81, -2378.85 kPa dır. Baraj gövdesi üzerinde elde edilen maksimum ve minimum asal gerilmeler ise sırasıyla, 390.62, 429.59, 559.79 kPa ve -1941.54, -2587.35, -2414.43 kPa olarak elde edilmiştir. Bu çözümler ışığında rezervuarın doluluk oranının artışına bağlı olarak baraj-temel ara yüzeyinde ve baraj gövdesinde maksimum asal gerilme değerlerinin küçülmesine, minimum asal gerilme değerlerinin de küçülmesine (basınç gerilme değerlerinin artışına) neden olmuştur.

Şev eğiminin kuvvet fonksiyonu tabanlı baraj gövdesi enkesit denklemine göre $n=1.5$, $E_t/E_b=1.0$ olması ve rezervuar ortamı doluluk oranının boş, yarı dolu ve tam dolu olması durumları için, baraj-temel ara yüzeyinde elde edilen maksimum ve minimum asal gerilmeler sırasıyla, 188.08,

254.94, 383.20 kPa ve -1288.04, -2414.71, -2448.32 kPa dır. Baraj gövdesi üzerinde elde edilen maksimum ve minimum asal gerilmeler ise sırasıyla, 272.73, 311.21, 422.94 kPa ve -1510.78, -2414.71, -2448.32 kPa olarak elde edilmiştir. Bu çözümler ışığında rezervuarın doluluk oranının artışına bağlı olarak baraj-temel ara yüzeyinde ve baraj gövdesinde maksimum asal gerilme değerlerinin küçülmesine, minimum asal gerilme değerlerinin de küçülmesine (basınç gerilme değerlerinin artışına) neden olmuştur.

Şev eğiminin kuvvet fonksiyonu tabanlı baraj gövdesi enkesit denklemine göre $n=2.0$, $E_t/E_b = 0.25$ olması ve rezervuar ortamı doluluk oranının boş olması, yarı dolu ve tam dolu olması durumlarında temelli baraj için baraj kretinin yatay yer değiştirmeleri sırasıyla, 0.000055, 0.259707, 1.309065 cm düşey yer değiştirme değerleri ise sırasıyla, -3.008883, -3.286403, -3.416755 cm olarak elde edilmiştir.

Şev eğiminin kuvvet fonksiyonu tabanlı baraj gövdesi enkesit denklemine göre $n=2.0$, $E_t/E_b = 0.50$ olması ve rezervuar ortamı doluluk oranının boş olması, yarı dolu ve tam dolu olması durumlarında temelli baraj için baraj kretinin yatay yer değiştirmeleri sırasıyla, 0.000051, 0.137775, 0.839665, cm düşey yer değiştirme değerleri ise sırasıyla, -1.782261, -1.919291, -1.990487 cm olarak elde edilmiştir.

Şev eğiminin kuvvet fonksiyonu tabanlı baraj gövdesi enkesit denklemine göre $n=2.0$, $E_t/E_b = 1.0$ olması ve rezervuar ortamı doluluk oranının boş olması, yarı dolu ve tam dolu olması durumlarında temelli baraj için baraj kretinin yatay yer değiştirmeleri sırasıyla, 0.000049, 0.77618, 0.602376 cm düşey yer değiştirme değerleri ise sırasıyla, -1.148963, -1.218379, -1.25827 cm olarak elde edilmiştir.

Şev eğiminin kuvvet fonksiyonu tabanlı baraj gövdesi enkesit denklemine göre $n=2.0$, $E_t/E_b = 0.25$ olması ve rezervuar ortamı doluluk oranının boş, yarı dolu ve tam dolu olması durumları için, baraj-temel ara yüzeyinde elde edilen maksimum ve minimum asal gerilmeler sırasıyla, 412.20, 510.37, 668.78 kPa ve -1625.33, -2317.03, -2533.66 kPa dır. Baraj gövdesi üzerinde elde edilen maksimum ve minimum asal gerilmeler ise sırasıyla, 581.90, 631.90, 854.75 kPa ve -2504.68, -3087.78, -3045.81 kPa olarak elde edilmiştir. Bu çözümler ışığında rezervuarın doluluk oranının artışına bağlı olarak baraj-temel ara yüzeyinde ve baraj gövdesinde maksimum asal gerilme değerlerinin küçülmesine, minimum asal gerilme değerlerinin de küçülmesine (basınç gerilme değerlerinin artışına) neden olmuştur.

Şev eğiminin kuvvet fonksiyonu tabanlı baraj gövdesi enkesit denklemine göre $n=2.0$, $E_t/E_b = 0.50$ olması ve rezervuar ortamı doluluk oranının boş, yarı dolu ve tam dolu olması durumları için, baraj-temel ara yüzeyinde elde edilen maksimum ve minimum asal gerilmeler sırasıyla, 283.95, 374.05, 509.39 kPa ve -1289.87, -2386.60, -2399.83 kPa dır. Baraj gövdesi üzerinde elde edilen maksimum ve minimum asal gerilmeler ise sırasıyla, 426.40, 480.84, 675.19 kPa ve -1933.34, -2660.46, -2578.30 kPa olarak elde edilmiştir. Bu çözümler ışığında rezervuarın doluluk oranının

artışına bağlı olarak baraj-temel ara yüzeyinde ve baraj gövdesinde maksimum asal gerilme değerlerinin küçülmesine, minimum asal gerilme değerlerinin de küçülmesine (basınç gerilme değerlerinin artışına) neden olmuştur.

Şev eğiminin kuvvet fonksiyonu tabanlı baraj gövdesi enkesit denklemine göre $n=2.0$, $E_r/E_b=1.0$ olması ve rezervuar ortamı doluluk oranının boş, yarı dolu ve tam dolu olması durumları için, baraj-temel ara yüzeyinde elde edilen maksimum ve minimum asal gerilmeler sırasıyla, 170.82, 238.18, 617.16 kPa ve -1225.36, -2448.24, -2481.34 kPa dır. Baraj gövdesi üzerinde elde edilen maksimum ve minimum asal gerilmeler ise sırasıyla, 302.18, 348.97, 617.16 kPa ve -1521.76, -2448.24, -2481.34 kPa olarak elde edilmiştir. Bu çözümler ışığında rezervuarın doluluk oranının artışına bağlı olarak baraj-temel ara yüzeyinde ve baraj gövdesinde maksimum asal gerilme değerlerinin küçülmesine, minimum asal gerilme değerlerinin de küçülmesine (basınç gerilme değerlerinin artışına) neden olmuştur.

Yapılan analiz sonuçları aşağıdaki Tablo 5.9 ve Tablo 5.10'da verilmiştir.

Tablo 5.14. Hb=105 m, $E_r/E_b=0.25, 0.50$ ve 1.0 , Kuvvet Fonksiyonu Tabanlı Baraj Gövdesi Enkesit Denkleminin Baraj-Temel Ara yüzeyinden 20m yukarıda Başlanması ve Kuvvet dereceleri sırasıyla ($n=1.1, n=1.5, n=2.0$), $H_r/H_b=0.0, 0.5$ ve 1.0 olması durumları için baraj kretinin yatay ve düşey yer değiştirme değerleri

Rezervuar Su Yüksekliği H_r (m)	Kuvvet Derecesi n (-)	E_r/E_b (-)	Maks. Yatay Deplasmanlar (cm)	Maks. Düşey Deplasmanlar (cm)
0	1.1	0.250	0.000069	-3.39344
0	1.1	0.500	0.000075	-1.990881
0	1.1	1.000	0.000079	-1.271318
50	1.1	0.250	0.349111	-3.698869
50	1.1	0.500	0.197835	-2.115603
50	1.1	1.000	0.122386	-1.339851
100	1.1	0.250	1.029732	-3.838522
100	1.1	0.500	0.606101	-2.219246
100	1.1	1.000	0.394046	-1.394024
0	1.5	0.250	0.000070	-3.177301
0	1.5	0.500	0.000066	-1.873958
0	1.5	1.000	0.000064	-1.202702
50	1.5	0.250	0.302967	-3.452842
50	1.5	0.500	0.166534	-2.007296
50	1.5	1.000	0.098800	-1.268274
100	1.5	0.250	1.136676	-3.609866
100	1.5	0.500	0.691943	-2.098223
100	1.5	1.000	0.469009	-1.321520
0	2.0	0.250	0.000055	-3.008883
0	2.0	0.500	0.000051	-1.782261
0	2.0	1.000	0.000049	-1.148963
50	2.0	0.250	0.259707	-3.286403
50	2.0	0.500	0.137775	-1.919291
50	2.0	1.000	0.776180	-1.218379
100	2.0	0.250	1.309065	-3.416755
100	2.0	0.500	0.839665	-1.990487
100	2.0	1.000	0.602376	-1.258270

Tablo 5.15. Hb=105 m, Et/Eb =0.25, 0.50, ve 1.0 Kuvvet Fonksiyonu Tabanlı Baraj Gövdesi Enkesit Denkleminin Baraj-Temel Ara yüzeyinden 20m yukarıda Başlanması ve Kuvvet dereceleri sırasıyla (n=1.1, n=1.5, n=2.0), Hr/Hb=0.0, 0.5 ve 1.0 olması durumları için baraj gövdesi ile baraj-temel ara yüzeyinde oluşan maksimum ve minimum asal gerilmelerin maksimum değerleri

Rezervuar Su Yüksekliği H _r (m)	Kuvvet Derecesi n (-)	E _t /E _b (-)	Baraj Gövdesi		Baraj-Temel Ara Yüzeyi	
			Min. Asal Gerilme (kPa)	Maks. Asal Gerilme (kPa)	Min. Asal Gerilme (kPa)	Maks. Asal Gerilme (kPa)
0	1.1	0.250	-2465.95	479.44	-2465.95	442.84
0	1.1	0.500	-2023.53	348.59	-2023.53	320.06
0	1.1	1.000	-1604.31	243.42	-1604.31	201.59
50	1.1	0.250	-2786.83	541.87	-2991.39	541.87
50	1.1	0.500	-2385.20	407.48	-2366.34	407.48
50	1.1	1.000	-2414.13	274.08	-2414.13	266.91
100	1.1	0.250	-3246.50	660.13	-3246.50	660.13
100	1.1	0.500	-2740.45	509.34	-2740.45	530.34
100	1.1	1.000	-2428.75	346.35	-2428.75	346.35
0	1.5	0.250	-2532.35	539.50	-1960.42	434.21
0	1.5	0.500	-1941.54	390.62	-1580.98	305.59
0	1.5	1.000	-1510.78	272.73	-1288.04	188.08
50	1.5	0.250	-3015.44	563.74	-2344.72	531.23
50	1.5	0.500	-2587.35	429.59	-2359.81	394.37
50	1.5	1.000	-2414.71	311.21	-2414.71	254.94
100	1.5	0.250	-2903.29	713.13	-2823.46	669.69
100	1.5	0.500	-2414.43	559.79	-2378.85	513.10
100	1.5	1.000	-2448.32	422.94	-2448.32	383.20
0	2.0	0.250	-2504.68	581.90	-1625.33	412.20
0	2.0	0.500	-1933.34	426.40	-1289.87	283.95
0	2.0	1.000	-1521.76	302.18	-1225.36	170.82
50	2.0	0.250	-3087.78	631.90	-2317.03	510.37
50	2.0	0.500	-2660.46	480.84	-2386.60	374.05
50	2.0	1.000	-2448.24	348.97	-2448.24	238.18
100	2.0	0.250	-3045.81	854.75	-2533.66	668.78
100	2.0	0.500	-2578.30	675.19	-2399.83	509.39
100	2.0	1.000	-2481.34	617.16	-2481.34	617.16

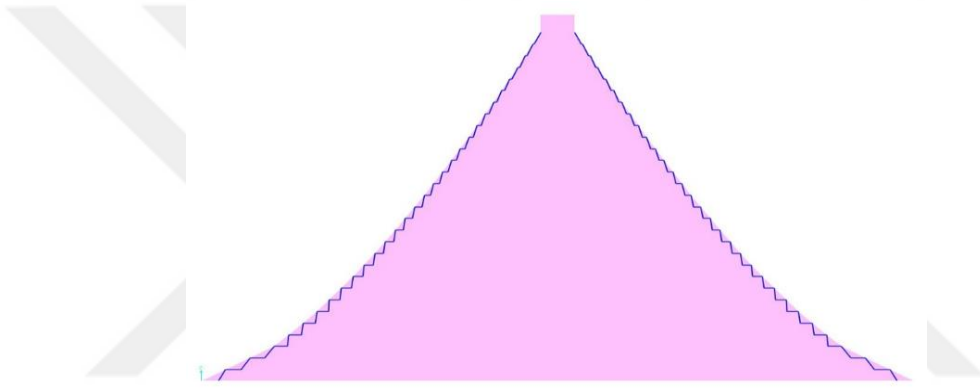
Farklı geometriler dikkate alınarak analiz sonuçları incelediğinde tam dolu baraj enkesiti için karşılaştırma aşağıdaki Tablo 5.11’de verilmiştir.

Tablo 5.11. Hb=105 m, Et/Eb = 1.0 kuvvet fonksiyonu tabanlı baraj gövdesi enkesit denklemi kuvvet dereceleri sırasıyla (n=1.1, n=1.5, n=2.0), Hr/Hb=1.0 olması durumları için baraj gövdesi ile baraj-temel ara yüzeyinde oluşan maksimum ve minimum asal gerilmelerin maksimum değerleri

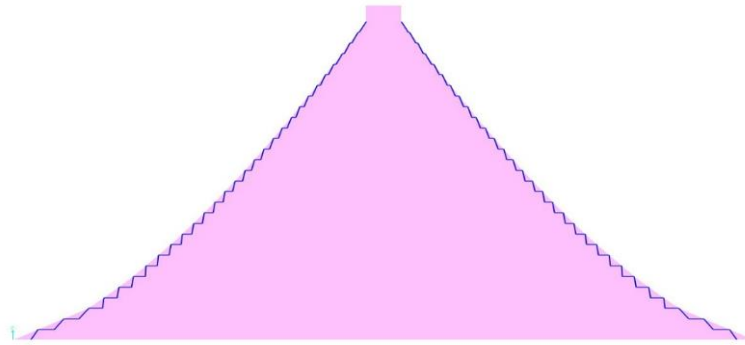
Kuvvet Derecesi n (-)	Baraj Gövdesi		Baraj-Temel Ara Yüzeyi	
	Min. Asal Gerilme (kPa)	Maks. Asal Gerilme (kPa)	Min. Asal Gerilme (kPa)	Maks. Asal Gerilme (kPa)
1.1	-1702.46	28.92	-1702.46	10.89
1.5	-1873.16	230.84	-1421.85	230.84
2.0	-1850.42	319.54	-1415.12	319.54

5.6.1. Baraj Memba ve Mansap Şevleri Uygulama Aşamasında Nasıl İnşa Edileceği Hakkında Bilgi

Baraj memba ve mansap şevleri uygulamada SBB barajlarda kullanıldığı gibi basamaklı olarak inşa edilecektir. Bilindiği üzere SBB barajların dış yüzeyleri ve temelinde belirli bir et kalınlığında klasik beton kullanılmaktadır. Bu kalınlık 1-2 m kadar olmaktadır. Klasik beton işlerinde vibratör kullanımı çok önemlidir. Bu kısımda dökülen betonun sınıfı C50 olabilmektedir. Şekil 5.4'te kuvvet derecesi ($n=1.5$), baraj yüksekliği 105 m bir katı dolgu baraj için memba mansap tasarım görünümü ve Şekil 5.5'te ise kuvvet derecesi ($n=1.5$), baraj yüksekliği 105 m bir katı dolgu baraj için memba ve mansap yüzeyleri tasarım detayı görülmektedir.



Şekil 5.13. Kuvvet derecesi ($n=1.5$) baraj yüksekliği 105 m bir katı dolgu baraj için memba mansap tasarım görünümü



Şekil 5.14. Kuvvet derecesi ($n=1.5$) baraj yüksekliği 105 m bir katı dolgu baraj için memba ve mansap yüzeyleri tasarım detayı

5.6.2. Baraj Gövdesinin Tasarım Dayanımı Sağlama Hesapları

Bu çalışmada belirli şevlere göre inşa edilmiş katı-dolgu barajların statik yükler altında lineer elastik davranışları incelenmiştir. Çözümler barajın kendi ağırlığı ve hidrostatik su yükü

dikkate alınarak, baraj rezervuarının boş, yarı dolu ve tam dolu halleri için her bir duruma göre statik analiz sonuçları elde edilmiş olup, sonuçlar sırasıyla baraj-temel ara yüzeyi ve baraj gövdesindeki maksimum minimum asal gerilme değerleri için irdelenmiştir.

Baraj şev değerlerinin değişimine bağlı olarak; baraj kretinin yatay ve düşey yer değiştirmeleri ile baraj gövdesi ve baraj-temel ara yüzeyindeki, maksimum ve minimum asal gerilme değerlerinin değişimi şu şekildedir. Baraj şev değerinin değişmesi ile, yatay ve düşey yer değiştirme değerlerinin büyümüştür.

Baraj su yüksekliğinin artması, baraj gövdesi ve baraj-temel ara yüzeyinde elde edilen minimum asal gerilme değerlerinin küçülmesine (basınç gerilme değerlerinin artışına) neden olmaktadır. Baraj su yüksekliğinin artması, baraj gövdesi üzerinde elde edilen maksimum asal gerilme değerlerinin büyümesine (çekme gerilme değerinin artışına), ayrıca baraj-temel ara yüzeyinde oluşan çekme ve basınç gerilmesi değerlerinin artmasına neden olmaktadır.

Baraj parabolik şev kullanılması sonucu elde edilen ekonomik fayda ile bir çok kazanım elde edilebilir. Dolayısıyla lineer ve parabolik şev çözümleri ışığında parabolik şevler ile elastisite modülü daha güçlü dayanıma sahip bir temel kullanılarak (daha rijit temel) hem düşük gerilmeler hem de ekonomik fayda sağlanmış olur. Barajın baraj-temel ara yüzeyinde kırılmalar yaşanmasının önüne geçmek amacıyla parabolik şevlerin 20 metre yükseklikte başlatılma önerisi ekonomik fayda sağlamak için ayrı bir seçenektir. Oluşan yer değiştirme ve gerilmeler dikkate alındığında tasarım sınırını aşmayan daha ekonomik bir baraj elde etmek için bu çalışmaya yön verilmiştir.

Ayrıca bütün çözümlere ait; baraj gövdesi ile baraj-temel ara yüzeyinde elde edilen minimum ve maksimum asal gerilme değerlerinin görünümleri Ekler bölümünde verilmiştir.

Katı dolgu bir barajın gövdesinde çekme dayanımı için aşağıdaki Tablo 5.12 ve Tablo 5.13'de verilen bağlantılar kullanılır.

Tablo 5.12. EM 1110-2-2006, mühendislik el kitabından alıntıdır

Silindire Sıkıştırılmış Beton, İşlenebilirlik Kıvamı ≤ 30 Saniyelik Vebe Titreşimi (Cannon 1995)								
C	Yataklama Harcı		Yarmada Çekme Dayanımı ^a			Tabaka Derzlerinin Tasarım Çekme Dayanımı		
NMSA mm	Evet	Hayır	En fazla/az	≤ 24.1 MPa (≤ 3500 psi)	> 24.1 MPa (> 3500 psi)	Dönüşüm faktörü ^b	≤ 24.1 MPa (≤ 3500 psi)	> 24.1 MPa (> 3500 psi)
≤ 75 (1.5)	-	-	En fazla	0.17 fc'	0.7055 (fc') ^{1/2}	0.53	0.090 fc'	0.3735 (fc') ^{1/2}
			En az	0.08 fc'	0.4565 (fc') ^{1/2}	0.53	0.040 fc'	0.2407 (fc') ^{1/2}
> 75 (1.5)	Evet		En fazla	0.17 fc'	0.7055 (fc') ^{1/2}	0.47	0.080 fc'	0.3320 (fc') ^{1/2}
	Evet		En az	0.08 fc'	0.4565 (fc') ^{1/2}	0.47	0.040 fc'	0.2158 (fc') ^{1/2}

^a Ana kütle malzemesinin (silindirler) yarmada çekme dayanımı.

^b Doğrudan çekme dayanımına dönüşüm için 0.75'lik, derz dayanımı ve derz bağ dayanımı oluşma yüzdesi için 0.70'lik ve NMSA > 75 mm (1.5 inç) için 0.90'lık faktörleri içerir.

Tablo 5.13. EM 1110-2-2006, mühendislik el kitabından alıntıdır

Silindirle Sıkıştırılmış Beton, Düşük İşlenebilirlik Kıvamı > 30 Saniyelik Vebe Titreşimi (Cannon 1995)								
NMSA mm (in.)	Yataklama Harcı Kullanıldı mı?		Yarmada Çekme Dayanımı			Tabaka Derzlerinin Tasarım Çekme Dayanımı		
	Evet	Hayır	En fazla /az	≤ 24.1 MPa	> 24.1 MPa	Dönüşüm faktörü ^b	≤ 24.1 MPa	> 24.1 MPa
				(≤ 3500 psi)	(> 3500 psi)		(≤ 3500 psi)	(> 3500 psi)
≤ 75 (1.5)	Evet		En fazla	0.17 fc'	$0.7055 (fc')^{1/2}$	0.35	0.060 fc'	$0.2490 (fc')^{1/2}$
			En az	0.08 fc'	$0.4565 (fc')^{1/2}$	0.35	0.030 fc'	$0.1577 (fc')^{1/2}$
> 75 (1.5)	Evet		En fazla	0.17 fc'	$0.7055 (fc')^{1/2}$	0.32	0.055 fc'	$0.2241 (fc')^{1/2}$
			En az	0.08 fc'	$0.4565 (fc')^{1/2}$	0.32	0.025 fc'	$0.1411 (fc')^{1/2}$
≤ 75 (1.5)		Hayır	En fazla	0.17 fc'	$0.7055 (fc')^{1/2}$	0.18	0.030 fc'	$0.1245 (fc')^{1/2}$
			En az	0.08 fc'	$0.4565 (fc')^{1/2}$	0.18	0.015 fc'	$0.0830 (fc')^{1/2}$
> 75 (1.5)		Hayır	En fazla	0.17 fc'	$0.7055 (fc')^{1/2}$	0.16	0.025 fc'	$0.1162 (fc')^{1/2}$
			En az	0.08 fc'	$0.4565 (fc')^{1/2}$	0.16	0.015 fc'	$0.0747 (fc')^{1/2}$

^a Ana kütle malzemesinin (silindirler) yarmada çekme dayanımı.

^b Doğrudan çekme dayanımına dönüşüm için 0.75'lik, derz dayanımı ve derz bağ dayanımı oluşma yüzdesi için 0.70'lik, NMSA > 75 mm (1.5 inç) için 0.90'lık ve yataklama harcı için (yatak harcının kullanılması durumunda 0.67, kullanılmaması durumunda 0.33) faktörleri içerir.

Burada Tablo 5.12'de iki adet çekme dayanımı var; kütle çekme dayanımı ve derz çekme dayanımı, analizler sonucunda elde edilen asal gerilmeler kütle çekme dayanımı ile yatay düşey gerilmeler ise derz çekme dayanımı ile karşılaştırılır.

f_{ck} , karakteristik basınç dayanımı ise;

1.Kontrol;

$$0.06f_{ck} < \text{kütle çekme dayanımı} < 0.13f_{ck} \quad (5.5)$$

2. Kontrol;

$$0.04f_{ck} < \text{derz çekme dayanımı} < 0.09f_{ck} \quad (5.6)$$

Bu değerlere göre; $f_{ck}=10$ MPa seçilirse, lineer ve kuvvet fonksiyonu tabanlı baraj gövdesi enkesit denklemlerine göre modellenen baraj tasarımlarımız kullanılabilir. (RCC barajlarda şev eğimleri için düşük çimento gövde kesitleri, C8, C10, C12 v.s seçilir.)

6. SONUÇLAR VE ÖNERİLER

6.1. Sonuçlar

Bu çalışmada, farklı şev durumlarına sahip farklı temeller üzerine inşa edilmiş katı- dolgu barajların statik yükler altında lineer elastik davranışları incelenmiştir. Baraj ve temel ortamları lineer elastik kabul edilmiş olup, sonlu elemanlar yöntemi ile modellenmiştir. Baraj memba ve mansap yüzeyleri simetrik olup şevleri sırasıyla lineer olarak (0.7y/1.0d), parabolik olarak kuvvet fonksiyonu tabanlı baraj gövdesi enkesit denklemine göre kuvvet dereceleri sırasıyla ($n=1.1$), ($n=1.5$), ($n=2.0$) alınmıştır. Temelin dayanımı, barajın elastisite modülünün bir oranı şeklinde (E_t/E_b) hesaba katılmıştır. Statik yükler için barajın kendi ağırlığı ve hidrostatik su yükü dikkate alınmış olup sonuçlar, E_t/E_b oranının 0.25, 0.50 ve 1.00 olması ve barajın doluluk oranının, boş, yarı ve tam dolu olması durumları için elde edilmiştir.

Yapılan statik analiz sonuçlarından elde edilen yer değiştirmeler incelendiğinde, temel ortamı elastisite modülünün artışına bağlı olarak yatay ve düşey yer değiştirme değerlerinin küçüldüğü ve rezervuarın doluluk oranının artışına bağlı olarak yatay ve düşey yer değiştirme değerlerinin büyüdüğü görülmektedir.

Maksimum ve minimum asal gerilmeler incelendiğinde, rezervuarın doluluk oranının artışına bağlı olarak baraj-temel ara yüzeyinde 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. Bunun yanı sıra, E_t/E_b oranının artışı, baraj-temel ara yüzeyinde 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. Ayrıca, şev değerlerinin değişimi, baraj-temel ara yüzeyinde 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.

Baraj şev eğiminin değişimine bağlı olarak; baraj kretinin yatay ve düşey yer değiştirmeleri ile baraj gövdesi ve baraj-temel ara yüzeyindeki maksimum ve minimum asal gerilme değerlerinin değişimini incelendiğinde, baraj şev eğimi değerlerinin lineer ve kuvvet fonksiyonu tabanlı baraj gövdesi enkesit denklemlerine göre değişmesi yatay ve düşey yer değiştirme değerlerinin sırasıyla boş, yarı dolu ve tam dolu durumlarına göre büyümesine neden olmaktadır. Baraj şev eğimi değerlerinin kuvvet fonksiyonu tabanlı baraj gövdesi enkesit denklemlerine göre değişmesi baraj gövdesi ve baraj-temel ara yüzeyinde minimum asal gerilme değerlerinin küçülmesine (basınç değerlerinin artmasına) neden olmaktadır. Yine baraj şev eğimi değerlerinin

değişmesi ile baraj gövdesi ve baraj-temel ara yüzeyinde elde edilen maksimum asal gerilme değerlerinin büyümesine (çekme gerilme değerlerinin artışına) neden olmaktadır.

Bu statik analiz çalışmanın asıl amacı (0.7y/0.1d), kuvvet fonksiyonu tabanlı baraj gövdesi enkesit denklemlerinden (n=1.1), (n=1.5), (n=2.0) şevleri aralığında inşa edilmesi planlanan bir katı dolgu barajın statik yükler altında ön boyutlandırılmasının yapılarak her bir şev eğimi değeri için beton hacminden fayda sağlamak ve ekonomik bir katı dolgu baraj en kesitini belirlemeye çalışmaktır. Betonun 1 m³ birim fiyatı ve ağırlığı yaklaşık 2.4 ton olarak düşünüldüğünde, daha hafif ve daha ekonomik bir katı dolgu baraj en kesitinin belirlenmesi büyük avantajlar sağlayacağı açıktır. Bu amaçla; lineer memba ve mansap yüzeyleri tercih edilecek bir katı dolgu baraj ile kuvvet fonksiyonu tabanlı baraj gövdesi enkesit denklemlerine göre tasarlanmış bir katı dolgu baraj kıyaslandığında hacimden sağlanacak fayda durumu dikkate alınır. Lineer şev eğimi değerlerine göre gerilmelerin önemli oranla değişmediği ve buna karşılık büyük oranda ekonomik fayda sağladığı görülmektedir. Lineer şev eğimli değerler ile kuvvet fonksiyonu tabanlı baraj gövdesi enkesit denklemlerine göre oluşturulan baraj geometrisi değerlerinin analizi sonucunda en zayıf dayanım gücüne sahip temel durumları için tam dolu baraj analiz sonuçları sırasıyla, $E_t/E_b = 0.25$, $H_b = 105$ m, $H_t/H_b = 1.0$, $m = 0.7y/1.0d$ için maksimum asal gerilmeler 207.26 kPa, minimum asal gerilmeler -4302.29 kPa ile $E_t/E_b = 0.25$, $H_b = 105$ m, $H_t/H_b = 1.0$, (n=2.0) için maksimum asal gerilmeler 636.56 kPa, minimum asal gerilmeler -3130.95 kPa olarak elde edilmiştir. Her iki tasarım arasında elde edilen hacim faydasının %30.17 olduğu dikkate alınır; kuvvet fonksiyonu tabanlı baraj gövdesi enkesit denklemlerine göre tasarlanmış bir katı dolgu baraj seçilmesinin ekonomik fayda sağlayacağı söylenebilir.

Bu çalışmada yapılan çözümlerde kuvvet fonksiyonu tabanlı baraj gövdesi enkesit denklemlerine göre her şev eğimi değerleri için kuvvet fonksiyonu tabanlı baraj gövdesi enkesit denklemlerinin baraj-temel ara yüzeyinden 20 m yükseklikte başlatılması kaydıyla birer model daha tasarlanmıştır. Böylelikle her iki durum için (baraj-temel ara yüzeyinden 0 m ve 20 m yüksekliklerde kuvvet fonksiyonu tabanlı baraj gövdesi enkesit denklemlerinin başlatılması) analiz sonuçları kıyaslanarak 20 m yükseklikte kuvvet fonksiyonu tabanlı baraj gövdesi enkesit denklemleri başlatılan modelin hem lineer hem de baraj-temel ara yüzeyinden 0 m yükseklikte kuvvet fonksiyonu tabanlı baraj gövdesi enkesit denklemleri başlatılan modellerle kıyaslandığında baraj gövdesi ve baraj-temel ara yüzeylerinde minimum gerilme değerlerinin küçüldüğü (basınç gerilme değerlerinin arttığı), maksimum gerilme değerlerinin arttığı (çekme gerilme değerlerinin arttığı) görülmüştür. Baraj-temel ara yüzeyinden 20 m yükseklikte kuvvet fonksiyonu tabanlı baraj gövdesi enkesit denklemlerinin başlatılması sonucu oluşturulan bu katı dolgu baraj modeli, baraj-temel ara yüzeyinden 0 m yükseklikte kuvvet fonksiyonu tabanlı baraj gövdesi enkesit denklemlerinin başlatılması sonucu oluşturulan diğer katı dolgu baraj modelinin şev eğimi değerlerinden dolayı baraj-temel ara yüzeyine yakın memba ve mansap kısımlarında

hidrostatik yükler altında oluşabilecek kuvvet ve momentlerin etkilerini azaltıp meydana gelebilecek her türlü kırılmaları engellemek amacıyla tasarlanmıştır. Nitekim temel elastisite modelinin artışına bağlı olarak baraj-temel ara yüzeyindeki çekme gerilmelerinin 0.00 kPa kadar düşürülmesi sağlanmıştır. Temel elastisite modülünün artışıyla da bu problemin çözülebileceği kanaatine varılmıştır. Neticede $E_t/E_b = 0.25$ olduğu durum yani baraj gövdesinin elastisite modülünün temel elastisite modülünün 4'te 1'i olması şartı gerçek tasarımlarda kullanılmamaktadır, bu durum analiz sonuçlarında da gerilme değerlerinin yüksek çıkmasından dolayı ortadadır.

Bu çalışmada her bir katı-dolgu baraj modeli statik yükler altında baraj gövdesi ile baraj-temel ara yüzeyinde oluşturdıkları maksimum ve minimum asal gerilme değerlerinin maksimumları kullanılarak dört farklı eşitlik elde edilmiş olup, bu tip barajların projelendirilmesinde kullanılabilirliği incelenmiştir. Ancak söz konusu bu çalışma, lineer olarak (0.7/1.0d), parabolik olarak kuvvet fonksiyonu tabanlı baraj gövdesi enkesit denklemlerine göre ($n=1.1$), ($n=1.5$), ($n=2.0$) arasında değişen hacime sahip katı dolgu barajlar incelenmiş olup suyun kaldırma basıncı dikkate alınmadan statik analizler elde edilmiştir. Aynı zamanda, deprem gibi dinamik yükler altında katı dolgu barajların doğrusal olmayan davranışı hesaba katılarak araştırmanın genişletilmesi gerekmektedir. Önerilen bu eşitlikler yardımıyla farklı temeller üzerine inşa edilebilecek daha ekonomik bir tasarımla hacimden fayda sağlanılarak bir katı dolgu barajın ön boyutlandırılması yapılabilecektir.

Aynı zamanda, deprem gibi dinamik yükler altında bu tip barajların doğrusal olmayan davranışları hesaba katılarak araştırmanın genişletilmesi gerekmektedir.

Bu çalışmadaki tasarımın ana avantajları; baraj gövdesinde ve temelde düşük gerilmeler; katı dolgu barajın düşük maliyeti ve ekonomik olarak beton hacminde seçilen kesitlere göre %30.17 oranında fayda sağlanacağı ifade edilebilir. Bu yüksek tez çalışması kapsamında çalışmayı çok dağıtmamak için bir optimizasyon yapılmamıştır. Burada elde edilen %30.17 değeri bu çalışmada seçilen en büyük n derecesine aittir.

6. 2. Öneriler

- a) Memba ve mansap şevleri basamak şeklinde alınarak statik analizler tekrarlanabilir.
- b) Memba ve mansap şevleri eğri yüzeyler alınarak dinamik analizler yapılabilir.
- c) Bu çalışmada yapılan statik analizler, farklı baraj yükseklikleri ve farklı malzeme parametreleri için yapılabilir.

KAYNAKLAR

- Abdo, F.Y. (2008). Roller-compacted-concrete dams: Design and construction trends. *Hydro Review*, 27(7)
- Akbaş, S.O. ve Sak I. (2012). "Predicted and Observed Deformation Behavior of Akkopru Dam," *Teknik Dergi*, vol.23, pp.6063-6087.
- Andriolo, F.R. ve Polat, O. (2006). Beydağ Barajı Gövde İnşaatında Kullanılacak SSKD Agregası Raporu, İzmir, 17
- Aslan, G. (2019). 'Köprübaşı barajının oturma davranışının sonlu elemanlar yöntemiyle analizi', Yüksek Lisans Tezi, Gazi Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü
- Aydın, S., Karabulut, İ. ve Yasemin, E.R. (2015). 'Tahtaköprü barajı yükseltilmesi ve dinamik performansının değerlendirilmesi', 3. Türkiye Deprem Mühendisliği ve Sismoloji Konferansı, DEÜ- İzmir Tahtaköprü, (2003), pp. 2-9
- Aydın, T. (2019). Darıderesi-II Göleti'nin Dinamik Davranışlarının Ansys ile İncelenmesi, Yüksek Lisans Tezi, Süleyman Demirel Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü
- Aydın, T. ve Taylan, D. (2019). Darıderesi-II Göleti'nin Dinamik Davranışlarının Ansys ile İncelenmesi. *Teknik Bilimler Dergisi*, 7(2), 10-17
- Baradan, B. (2004). "Yapı Malzemesi II", Dokuz Eylül Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Yayınları, İzmir, 221
- Cao, C., Sun, W. and Qin, H. (2000). The analysis on strength and fly ash effect of roller-compacted concrete with high volume fly ash. *Cement and concrete research*, 30(1), 71-75.
- Çarhoğlu, A. I. (2012). Türkiye'deki mevcut kemer barajların deprem etkisindeki davranışlarının değerlendirilmesi ve güçlendirilmesi, Doktora Tezi, Süleyman Demirel Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü
- Çetin, O. (2009). Beton Yollarda Yeni Teknolojiler Silindirle Sıkıştırılan Beton, Yüksek Lisans Tezi, İstanbul Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü
- Çiçek, M. (2007). 'Zayıf temeller üzerine inşa edilen ssb barajların statik analizi', Yüksek Lisans Tezi, Fırat Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü
- Emiroğlu, M.E. (1999). "Barajların Tip Seçiminin Belirlenmesinde Uzman Sistem Kullanımı", Doktora Tezi, Elazığ, 1999.
- Emiroglu, M. E. (2008). Influences on selection of the type of dam. *International Journal of Science and Technology*, 3(2), 173-189.
- Entürk, Ş. Ş. (2002). 'Silindirle sıkıştırılmış ağırlık beton barajlar ve bunların ağırlık beton barajlarla karşılaştırılması', Yüksek lisans tezi, İstanbul Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü
- Ersayın, D. (2006). 'Studying seepage in a body of earth-fill dam by (Artificial Neural Networks) ANNs', Yüksek Lisans Tezi, İzmir Yüksek Teknolojisi, Fen Bilimleri Enstitüsü
- Güneş, H. (2020). Türkiye'de baraj emniyeti ve atatürk barajı'nda deformasyon izleme çalışmaları ve son 12 yıllık analiz sonuçları, Yüksek Lisans Tezi, İstanbul Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü
- Horzum, U.S. (2009). Silindirle Sıkıştırılmış Betonun Basınç Dayanımının Hızlandırılmış Deney Yöntemleri Kullanılarak Belirlenmesi, Yüksek Lisans Tezi, Ege Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü
- Kalkan, E. (2017). 'Kemer barajların yapısal davranışlarının belirlenmesi amacıyla ölçeklendirme ve regresyona dayalı mühendislik yazılımının geliştirilmesi', Yüksek Lisans Tezi, Karadeniz Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü
- Karadağ, A. (2018). Dolgu Baraj Tasarımında Türkiye Pratiği, Yüksek Lisans Tezi, Eskişehir Osmangazi Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü
- Kılıç, Z. (2009). 'Kaya olamayan temeller üzerine inşa edilen düşük yükseklikli ssb barajların statik analizi' Yüksek Lisans Tezi, Fırat Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü

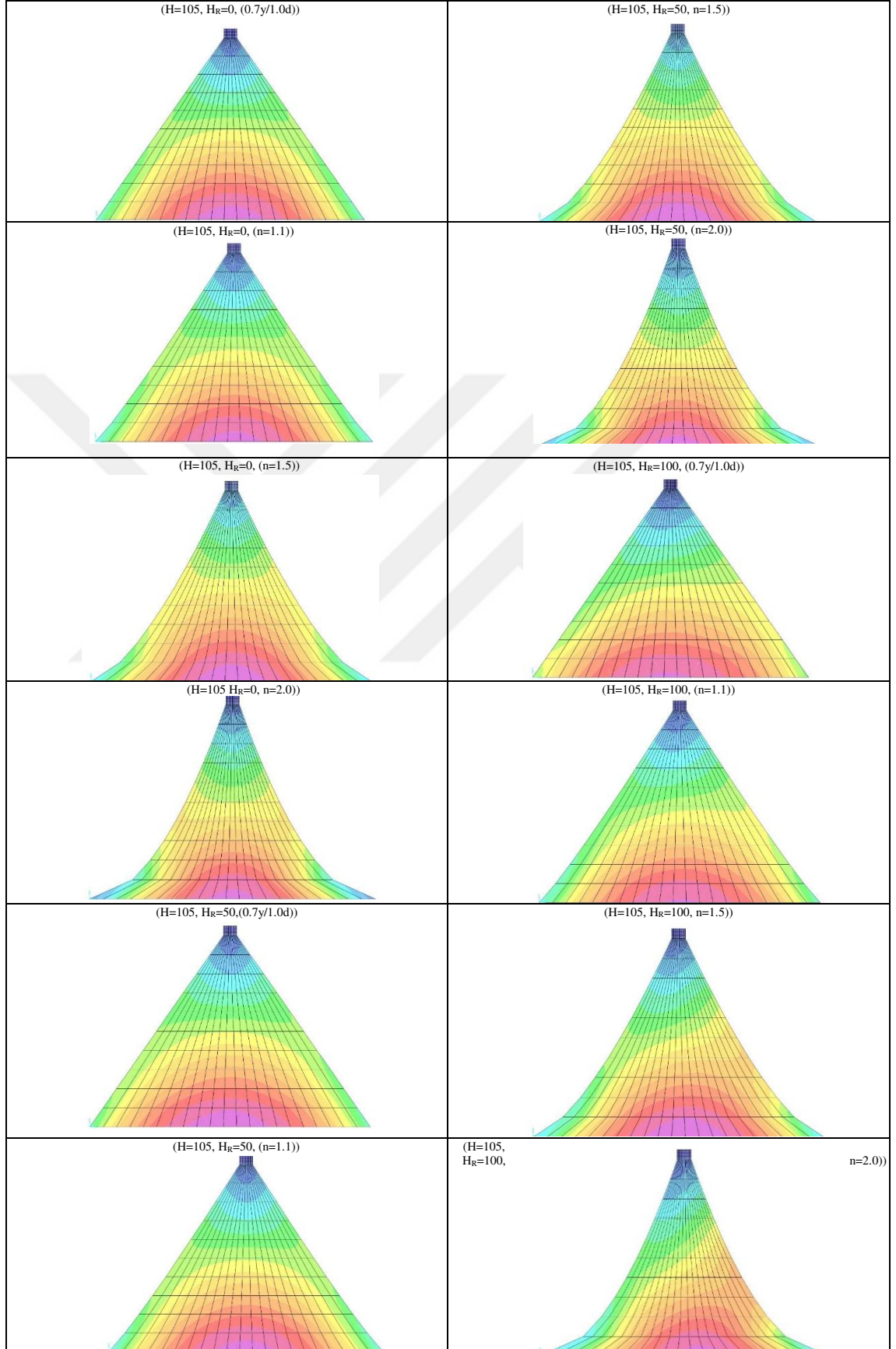
- Koçyiğit, K. (2019). Silindirle Sıkıştırılmış Beton Barajlarda Agregada Nem Miktarının, Niğde Ömer Halisdemir Üniversitesi, Yüksek Lisans Tezi, Gazi Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü
- Londe, P. and Lino, M. (1992). The faced symmetrical hardfill dam: a new concept for RCC. *International water power and dam construction*, 44(2), 19-24
- Mardani-Aghabaglou, A., Bayqra, S. H., Özen, S. Altun, M. G., Faqiri, Z. A. ve Ramyar, K. (2020). ‘Silindirle sıkıştırılmış beton karışımlarının tasarım yöntemleri ve yapılan çalışmalar’, *Pamukkale University Journal of Engineering Sciences*, Pamukkale Univ Muh Bilim Derg, 26(3), 419-431
- Mindness, S., Young J.F. and Darwin D. (2003). *Concrete*, Second Edition, Pearson Education, Inc. Upper Saddle River, NJ 07458, 644p.
- Mughieda, O., Hazirbaba, K., Bani-Hani, K. and Daoud, W. (2018). Numerical modelling of dynamic stability of RCC dam. In *MATEC Web of Conferences* (Vol. 195, p. 03021). EDP Sciences
- Pektaş, M. R. (2015). Silindirle sıkıştırılabilen yol betonlarının kalıcılık özellikleri, Yüksek Lisans Tezi, Bilecik Şeyh Edebali Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü
- Selçuk, C. (2019). Dolgu Barajların Deprem Analizleri, Yüksek Lisans Tezi, İstanbul Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü
- Sen, U. (2018). ‘Risk Assessment of Concrete Gravity Dams under Earthquake Loads’, Yüksek Lisans Tezi, Bülent Ecevit Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü
- Söğüt, S. (2014). ‘State of the art in roller compacted concrete (RCC) dams: design and construction’, Yüksek lisans tezi, ODTÜ Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü
- Sun, W., Liu, J., Qin, H., Zhang, Y., Jin, Z. and Qian, M. (1998). Fatigue Performance and Equations of Roller Compacted Concrete with Fly Ash. *Cement and Concrete Research*, 28(2): 309-315.
- Sürmeli, A.S. (2002). Silindirle Sıkıştırılmış Ağırlık Beton Barajlar Ve Bunların Ağırlık Beton Barajlarla Karşılaştırılması, Yüksek Lisans Tezi, İstanbul Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü
- Tarhan F. (1996). *Mühendislik Jeolojisi Prensipleri*, KTÜ Basımevi, Trabzon.
- Taşdemir, M. M. (2014). ‘Silindirle sıkıştırılmış beton (SSB) baraj gövdeleri içerisinde geçen kondüvi sistemlerinin tasarım’, Yüksek Lisans Tezi, Gazi Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü
- Taşdemir, M.A. (2002). “Uçucu Kül Nedir”, ACE 2002 Sempozyumu, İstanbul Teknik Üniversitesi, İnşaat Fakültesi
- Taşkınsu, H.Ç. (2019). Silindirle Sıkıştırılmış Beton Yolların Performanslarının, Geleneksel Beton Yolların ve Asfalt Yolların Performansı ile Karşılaştırılması, Yüksek Lisans Tezi, Eskişehir Osman Gazi Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü
- Toptaş, E. (2011). Agregada tipinin betonun çarpma dayanımına etkisinin incelenmesi, Yüksek Lisans Tezi, Fırat Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü
- URL-1: <https://congress.hydropower.org/2019-paris/speakers/michel-lino-icold/>
- Valtersson, D. and Johansson, L. (2018). ‘Stability Analysis of Non-overflow Section of Concrete Gravity Dams’, Master Thesis, Luleå Teknoloji Üniversitesi, Institute of Science
- Yaman, İ.Ö. ve Ceylan, H. (2013). Silindirle sıkıştırılmış beton yollar, THBB Hazır Beton Dergisi, (69), 82

EKLER

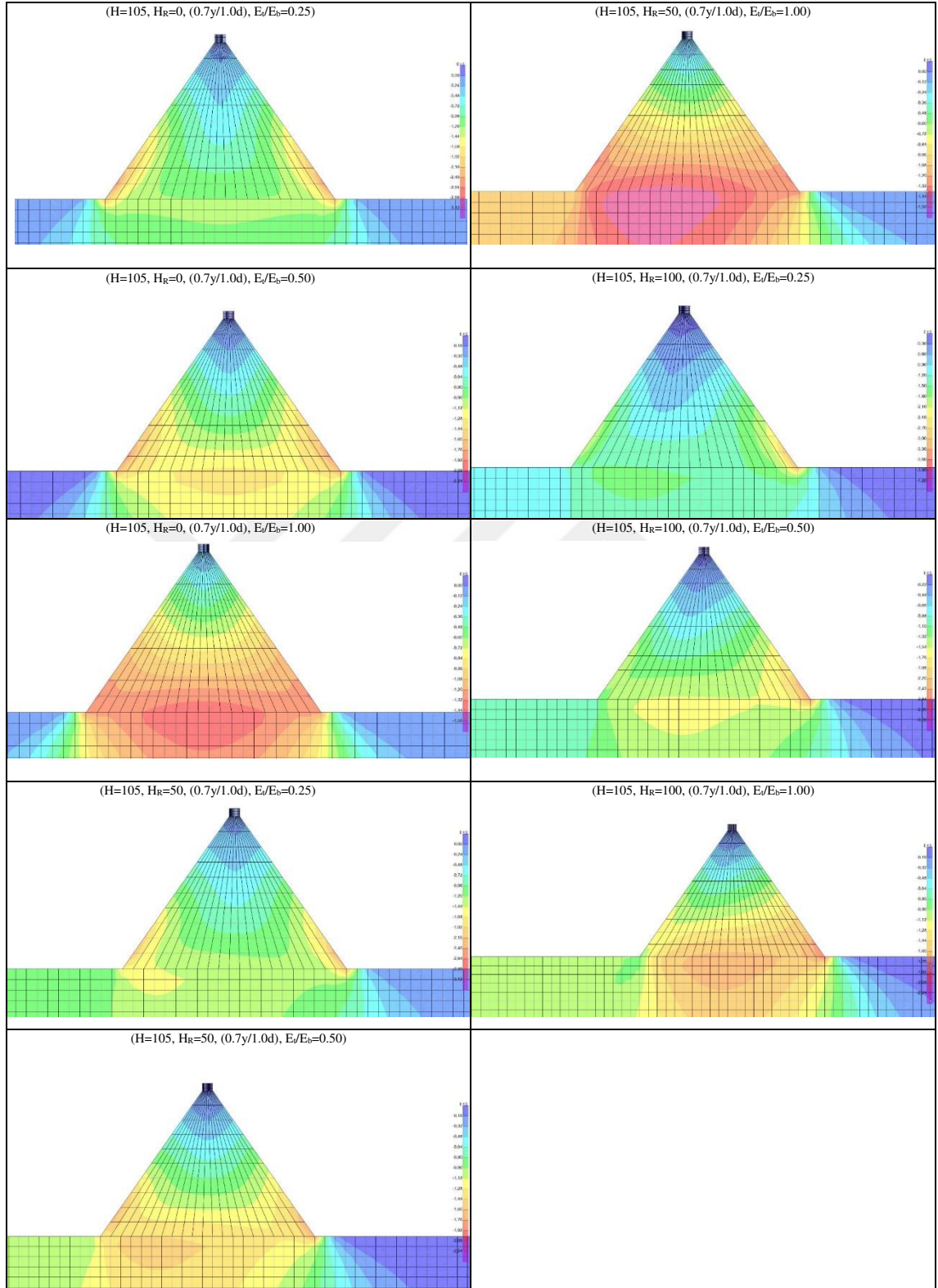
EK.1. Baraj yüksekliği 105 m, şev eğimlerinin (0.7y:1.0d), kuvvet fonksiyonu tabanlı baraj gövdesi enkesit denklemine göre ($n=1.1, 1.5., 2.0$) olması, temelli modeller için baraj-temel ara yüzeyi 0 metresi ile 20 metre yükseklikten kuvvet fonksiyonu tabanlı baraj gövdesi enkesit denklemlerinin başlatılması ve rezervuarın boş, yarı dolu, tam dolu olması için; baraj gövdesi ile baraj-temel ara yüzeyinde maksimum ve minimum asal gerilme görünümleri.



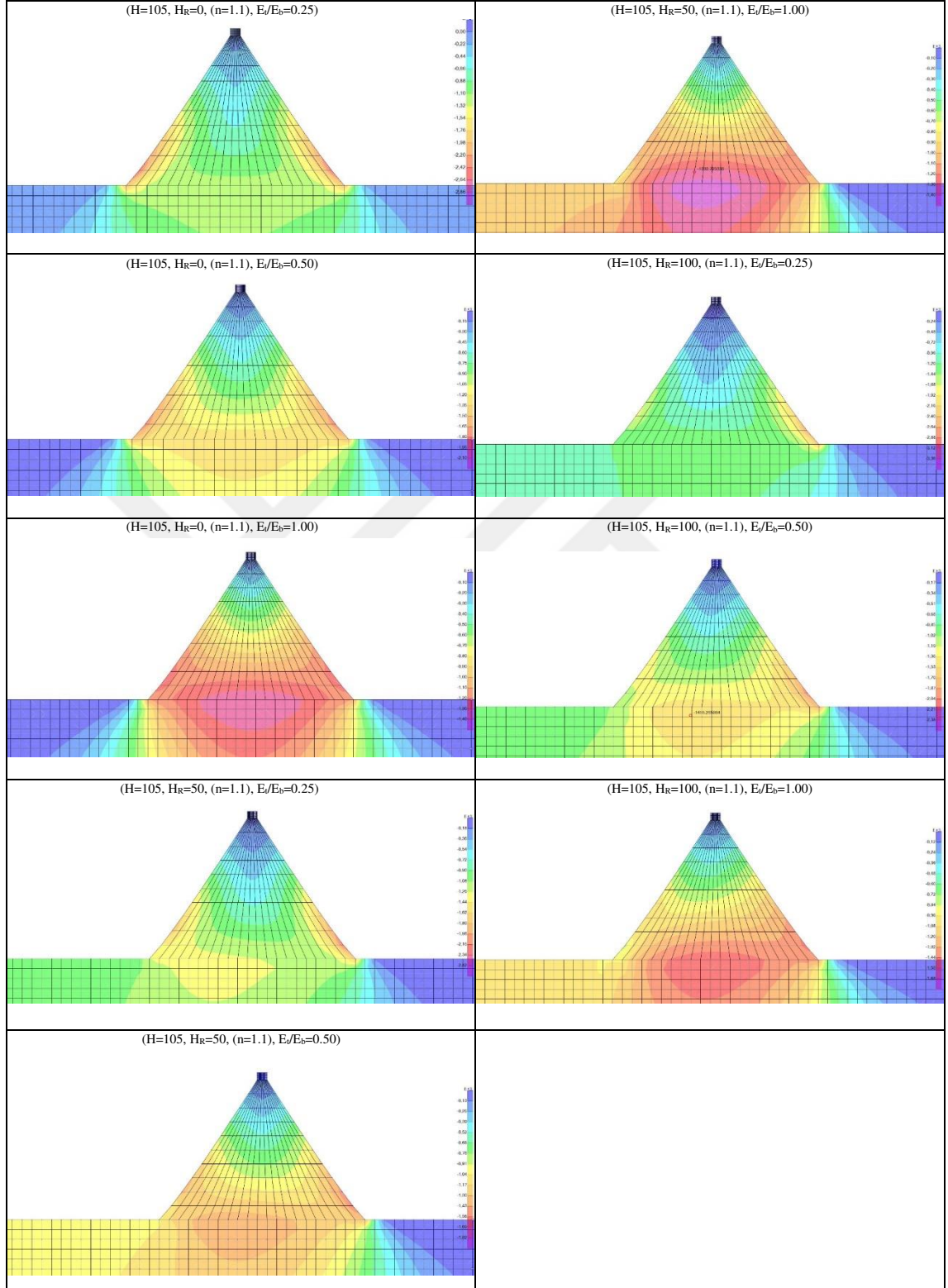
Ek.1. Şev eğimi (0.7y/1.0d) ve kuvvet dereceleri sırasıyla (n=1.1,1.5,2.0) baraj yüksekliği 105 m rijit baraj için minimum asal gerilme görünümü



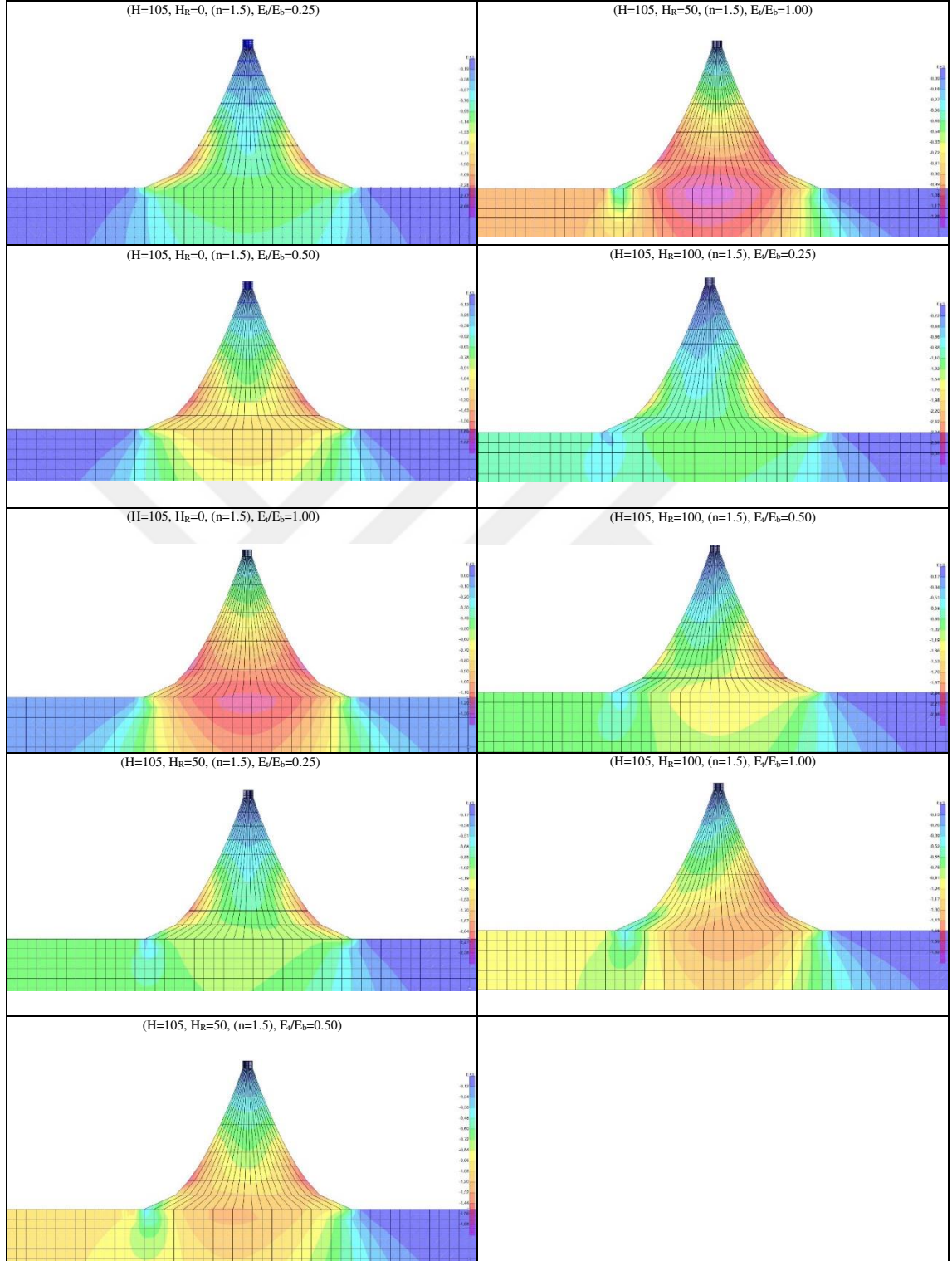
Ek 15. Şev eğimi (0.7y/1.0d) ($E_t/E_b=0.25$) ($E_t/E_b=0.50$) ($E_t/E_b=1.00$) baraj yüksekliği 105 m baraj için minimum asal gerilme görünümü



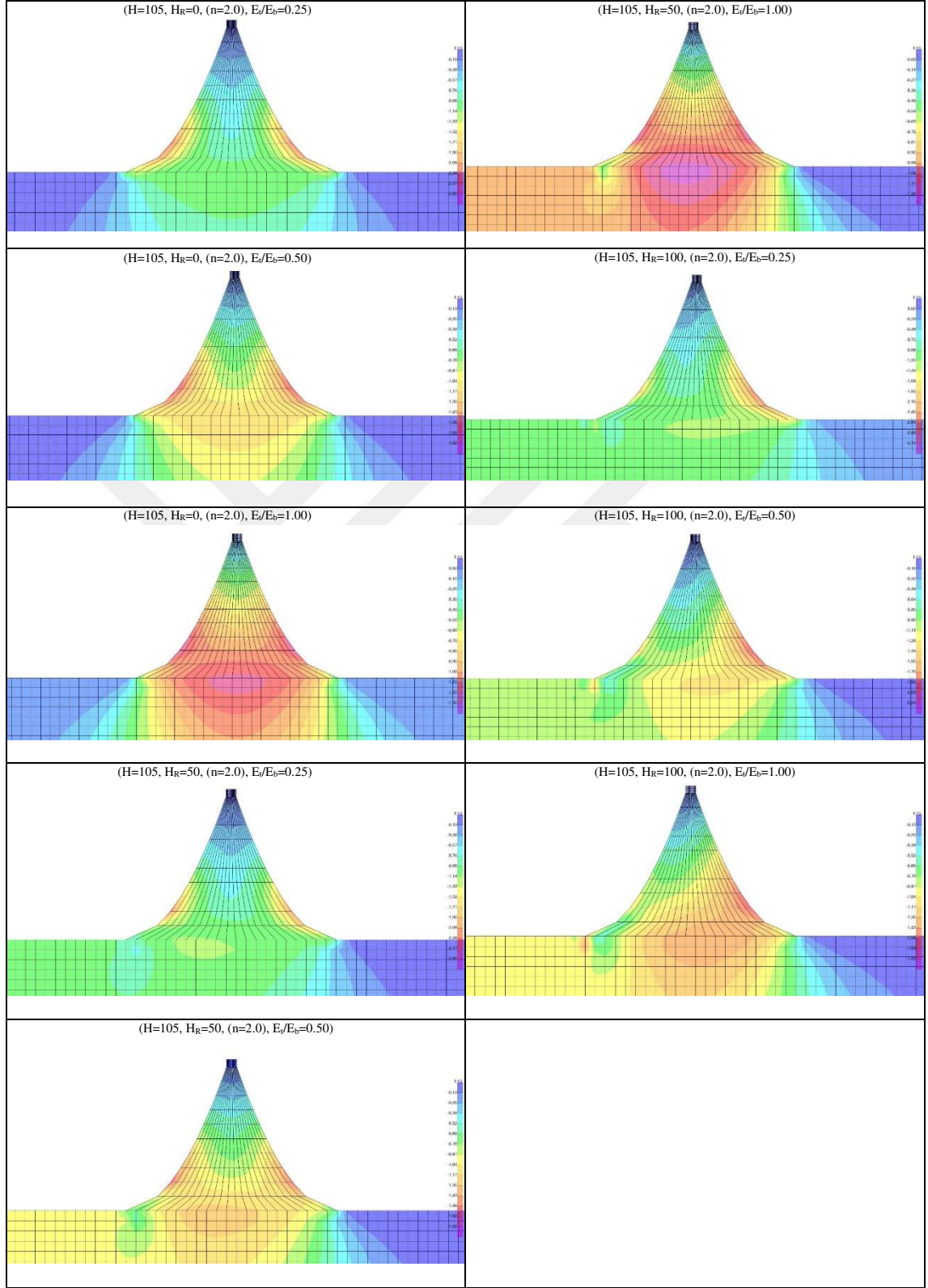
Ek 16. Kuvvet derecesi ($n=1.1$) ($E_t/E_b=0.25$) ($E_t/E_b=0.50$) ($E_t/E_b=1.00$) baraj yüksekliği 105 m baraj için minimum asal gerilme görünümü



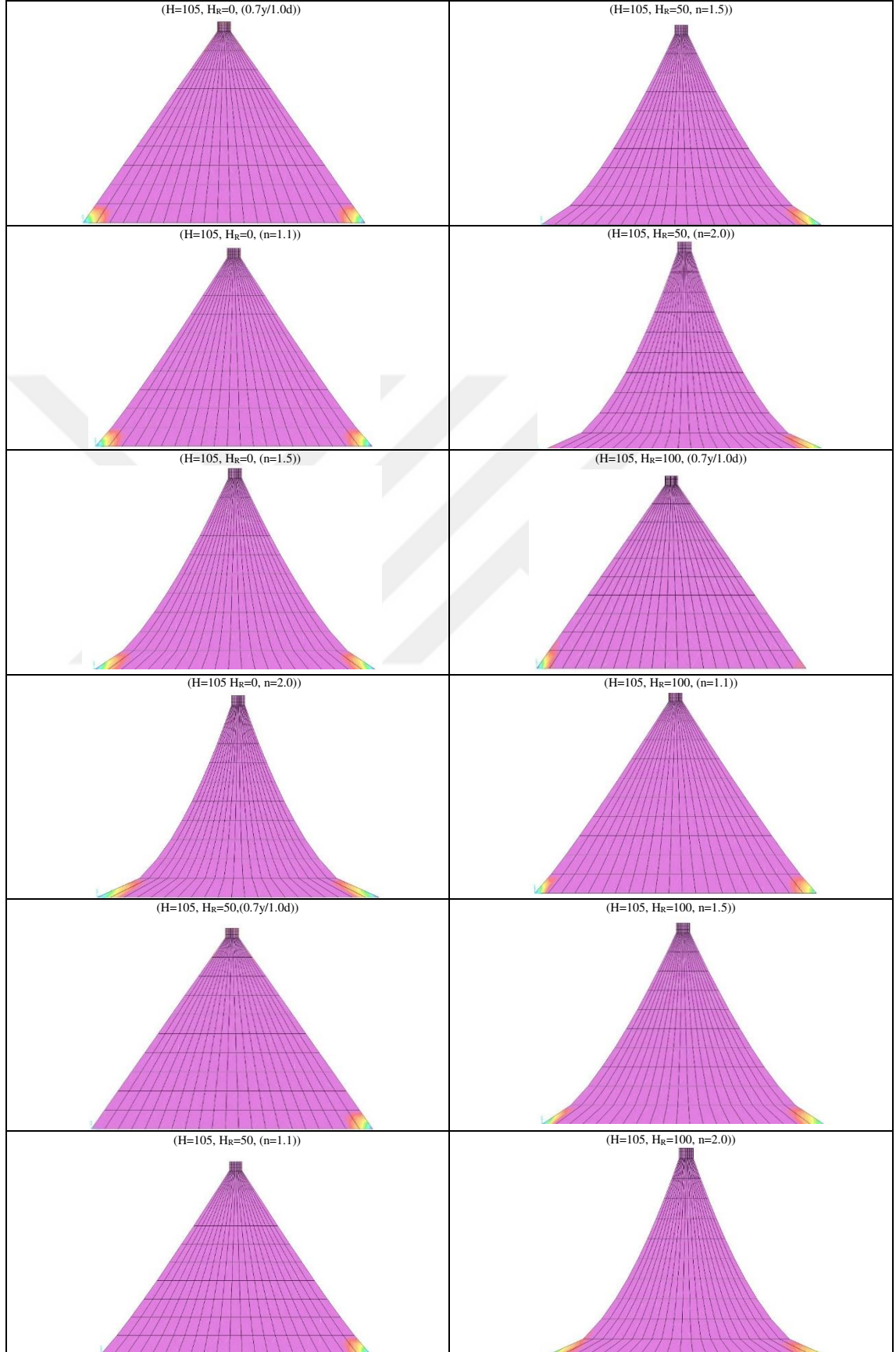
Ek 17. Kuvvet derecesi ($n=1.5$) ($E_t/E_b=0.25$) ($E_t/E_b=0.50$) ($E_t/E_b=1.00$) baraj yüksekliği 105 m baraj için minimum asal gerilme görünümü



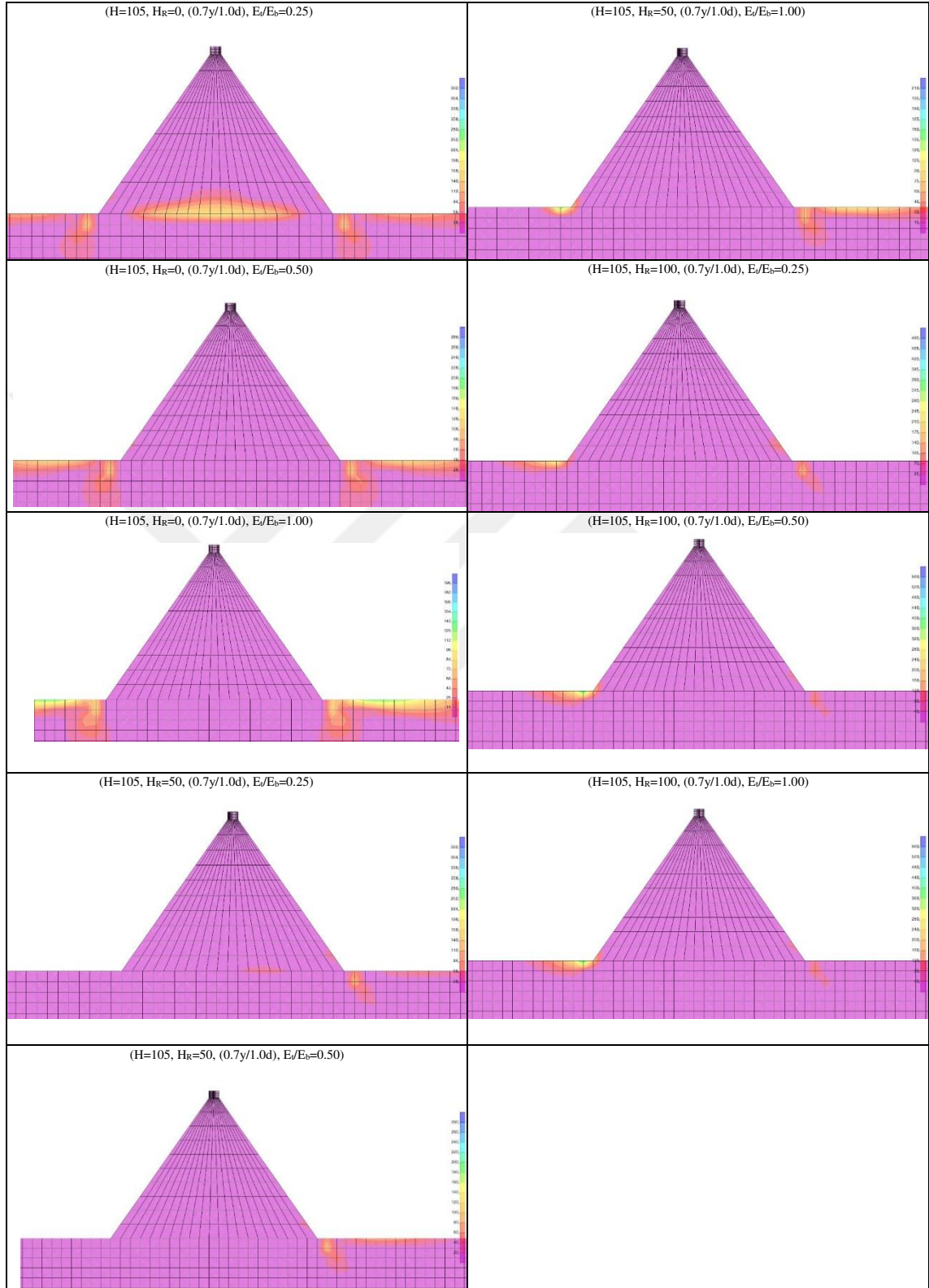
Ek 18. Kuvvet derecesi ($n=2.0$) ($E_t/E_b=0.25$) ($E_t/E_b=0.50$) ($E_t/E_b=1.00$) baraj yüksekliği 105 m baraj için minimum asal gerilme görünümü



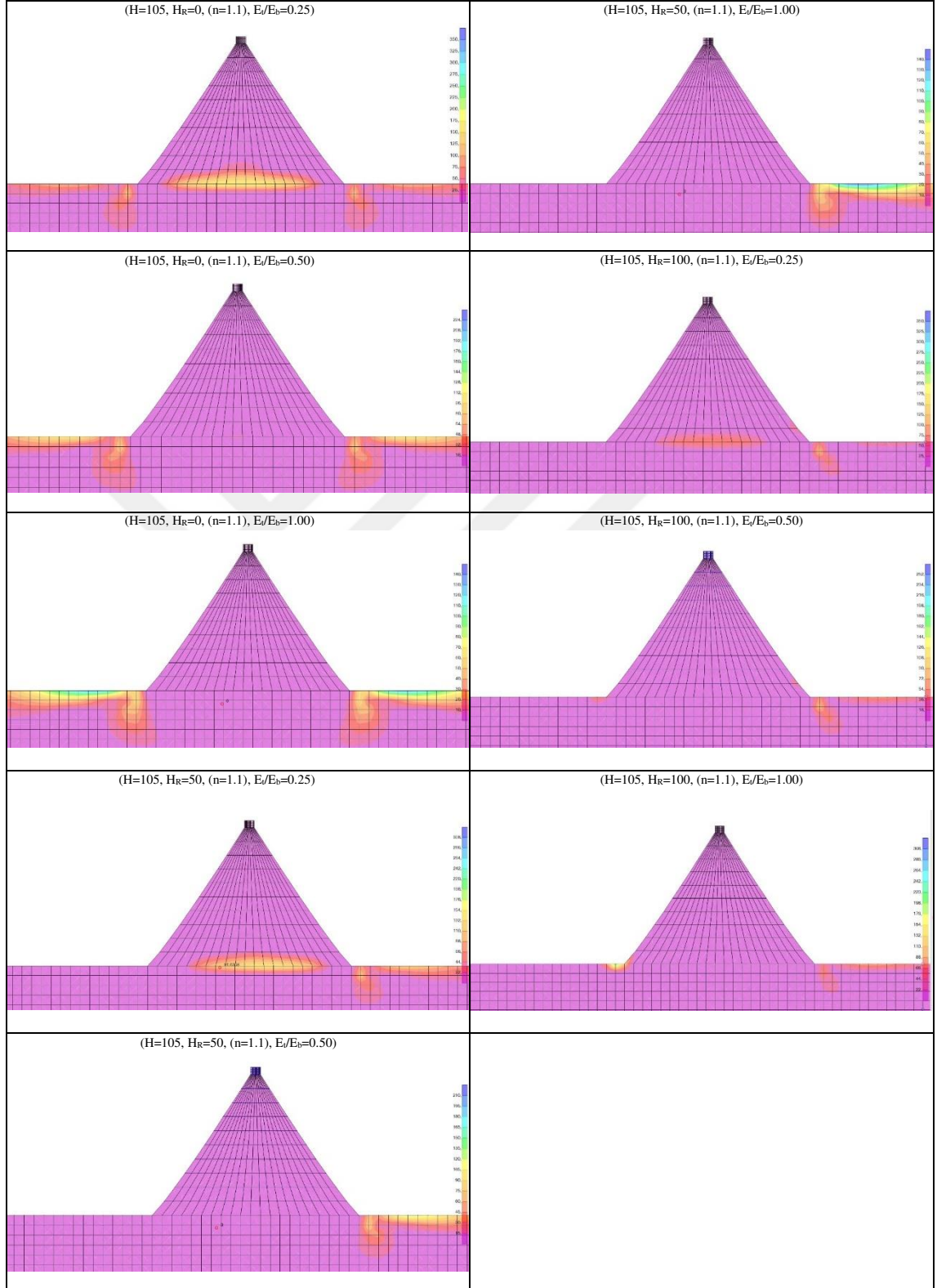
Ek 19. Şev eğimi (0.7y/1.0d) ve kuvvet dereceleri sırasıyla (n=1.1,1.5,2.0) baraj yüksekliği 105 m rijit baraj için maksimum asal gerilme görünümü



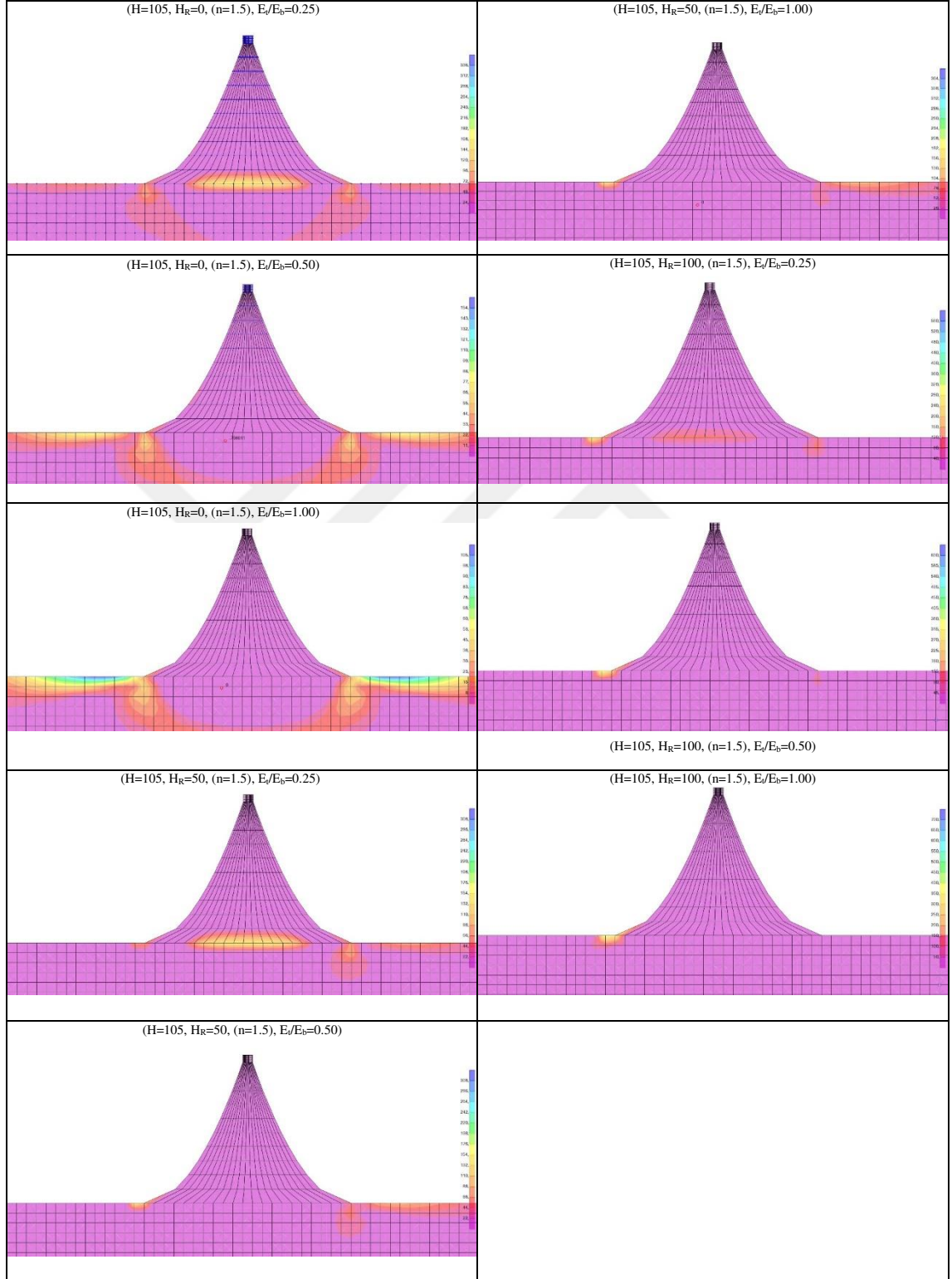
Ek 20. Şev eğimi (0.7y/1.0d) ($E_t/E_b=0.25$) ($E_t/E_b=0.50$) ($E_t/E_b=1.00$) baraj yüksekliği 105 m baraj için maksimum asal gerilme görünümü



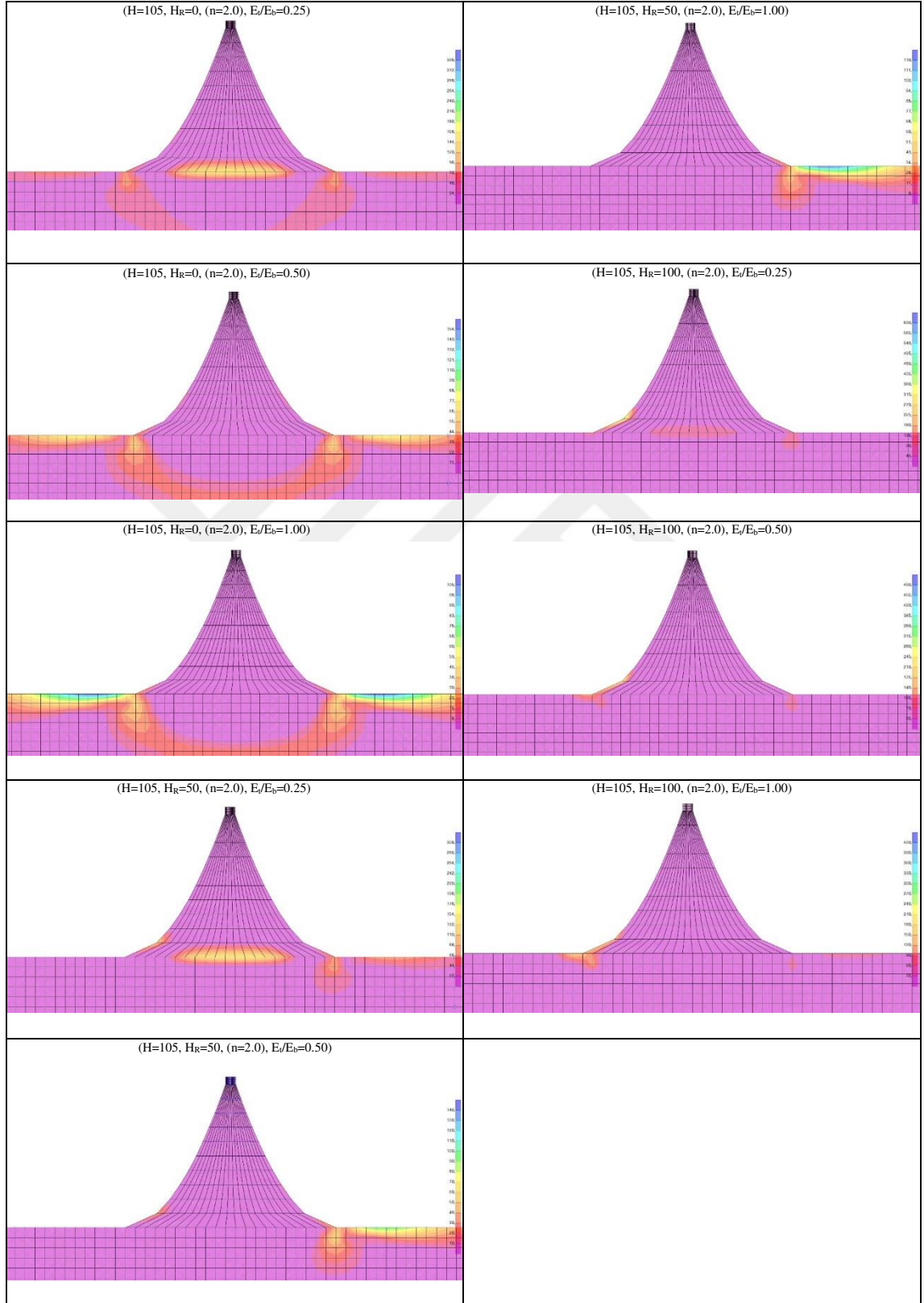
Ek 21. Kuvvet derecesi ($n=1.1$) ($E_t/E_b=0.25$) ($E_t/E_b=0.50$) ($E_t/E_b=1.00$) baraj yüksekliği 105 m baraj için maksimum asal gerilme görünümü



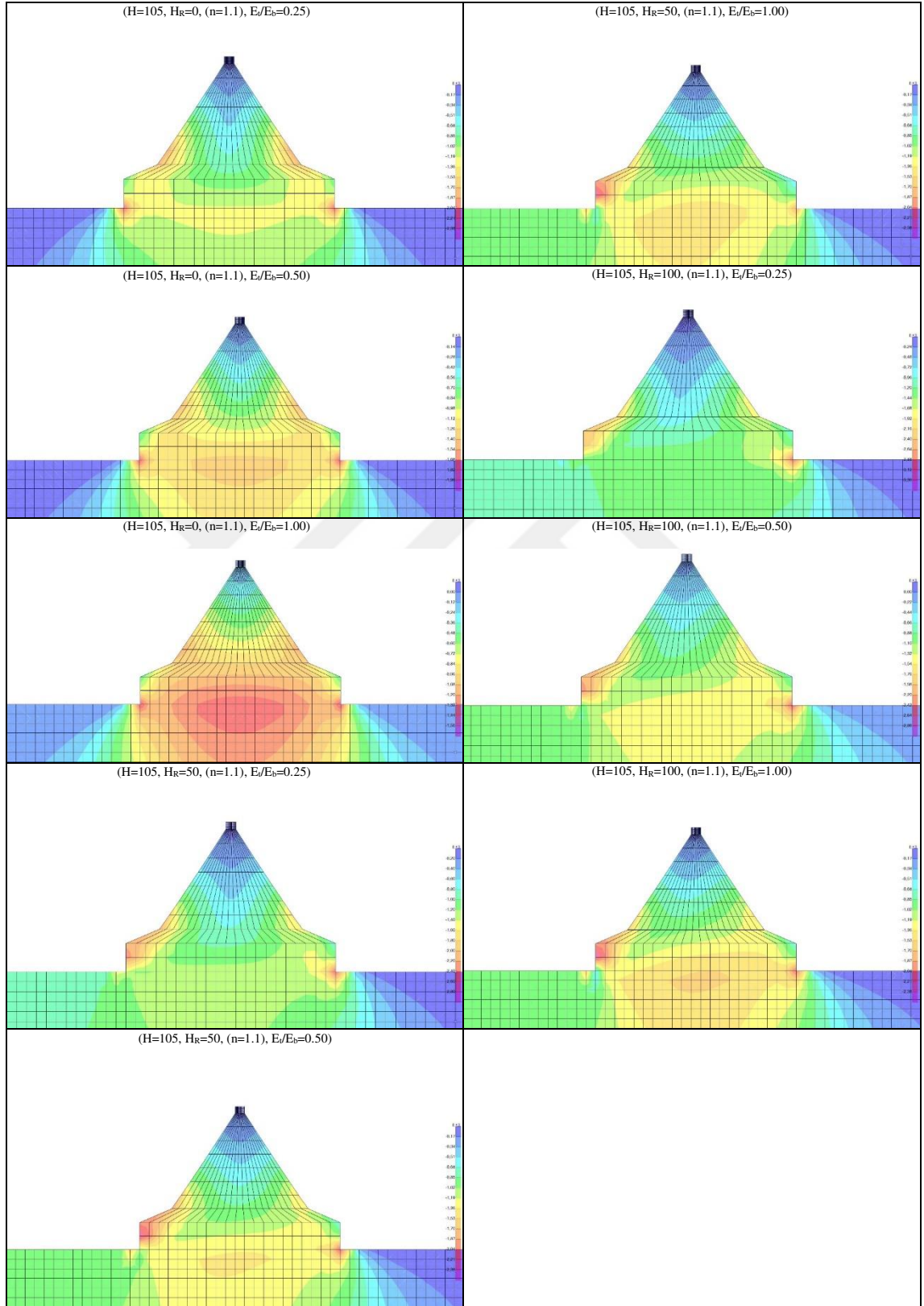
Ek 22. Kuvvet derecesi ($n=1.5$) ($E_t/E_b=0.25$) ($E_t/E_b=0.50$) ($E_t/E_b=1.00$) baraj yüksekliği 105 m baraj için maksimum asal gerilme görünümü



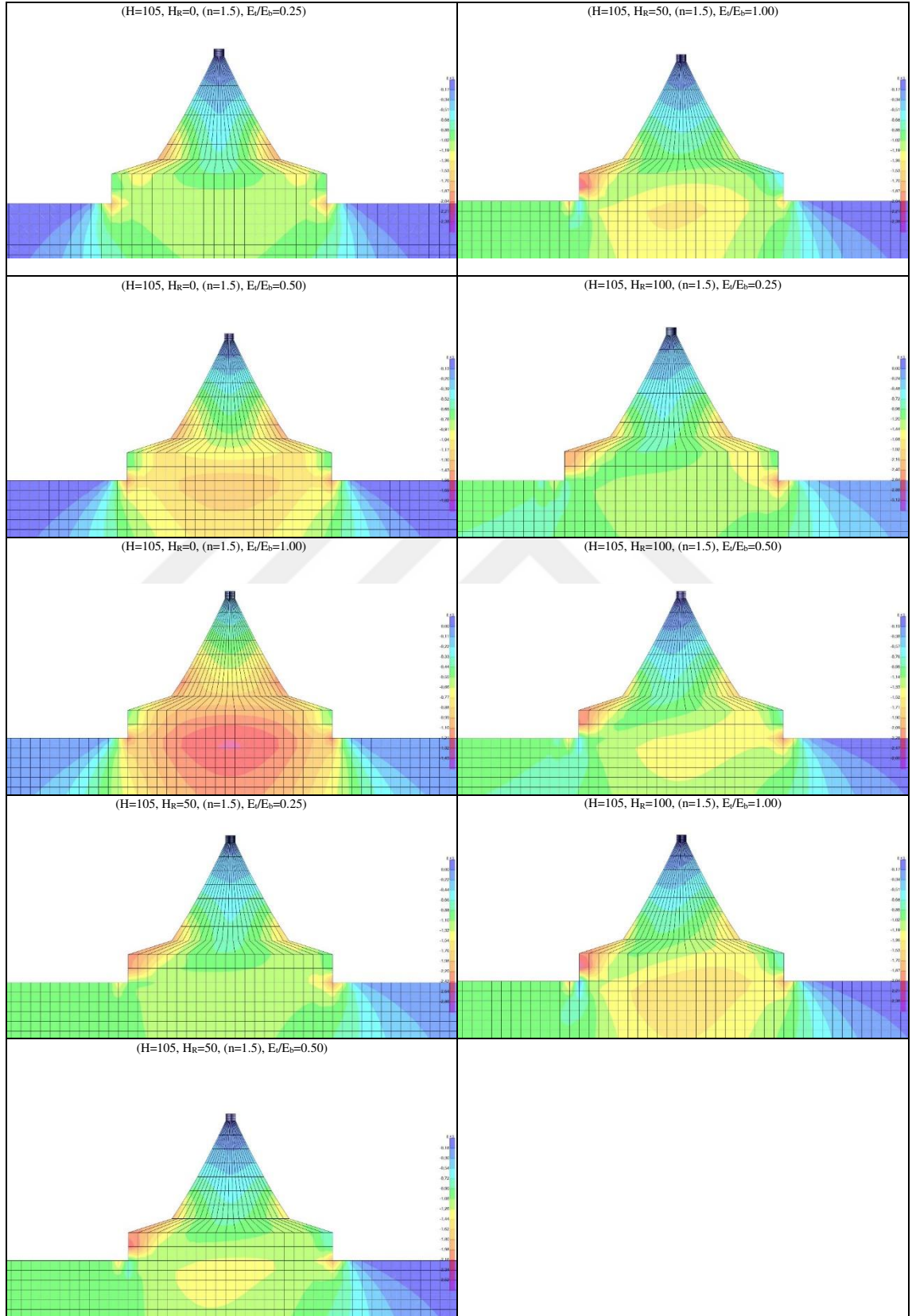
Ek 23. Kuvvet derecesi ($n=2.0$) ($E_t/E_b=0.25$) ($E_t/E_b=0.50$) ($E_t/E_b=1.00$) baraj yüksekliği 105 m baraj için maksimum asal gerilme görünümü



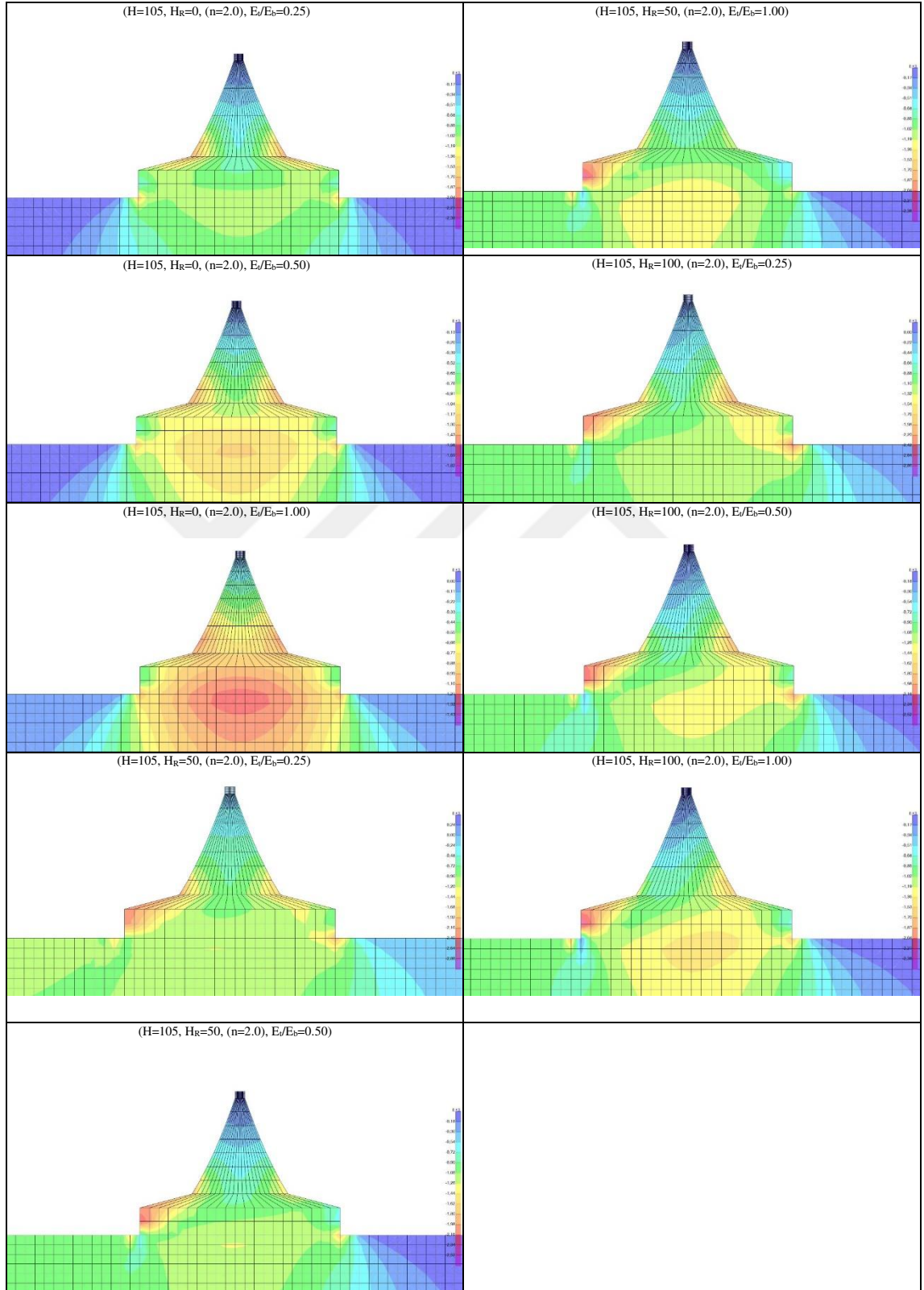
Ek 24. Kuvvet fonksiyonu tabanlı baraj gövdesi enkesit denkleminin baraj-temel arayüzeyinden 20m yükseklikte başlatılan ($n=1.1$) ($E_t/E_b=0.25$) ($E_t/E_b=0.50$) ($E_t/E_b=1.00$) baraj yüksekliği 105 m baraj için minimum asal gerilme görünümü



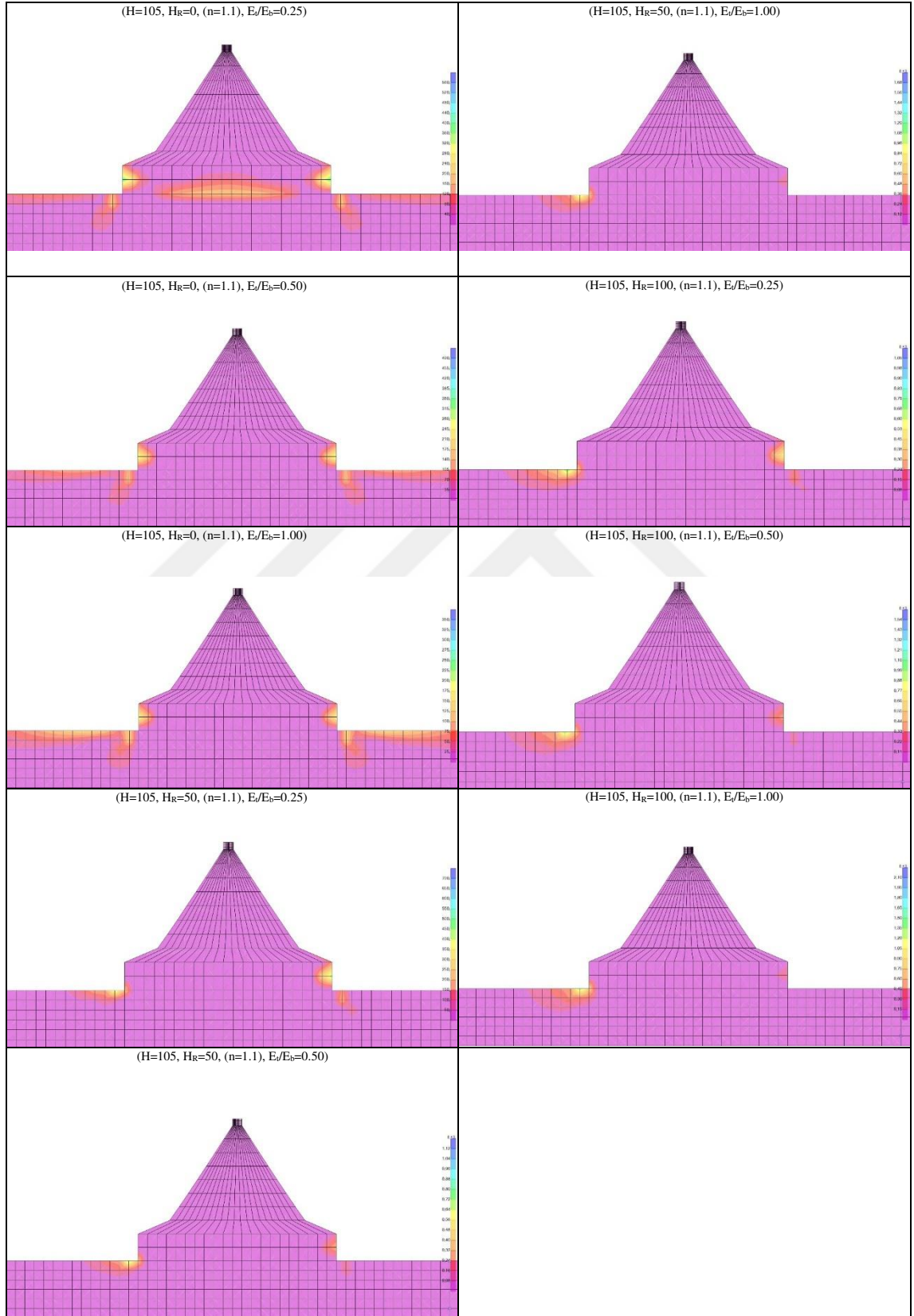
Ek 25. Kuvvet fonksiyonu tabanlı baraj gövdesi enkesit denkleminin baraj-temel arayüzeyinden 20m yükseklikte başlatılan ($n=1.5$) ($E_t/E_b=0.25$) ($E_t/E_b=0.50$) ($E_t/E_b=1.00$) baraj yüksekliği 105 m baraj için minimum asal gerilme görünümü



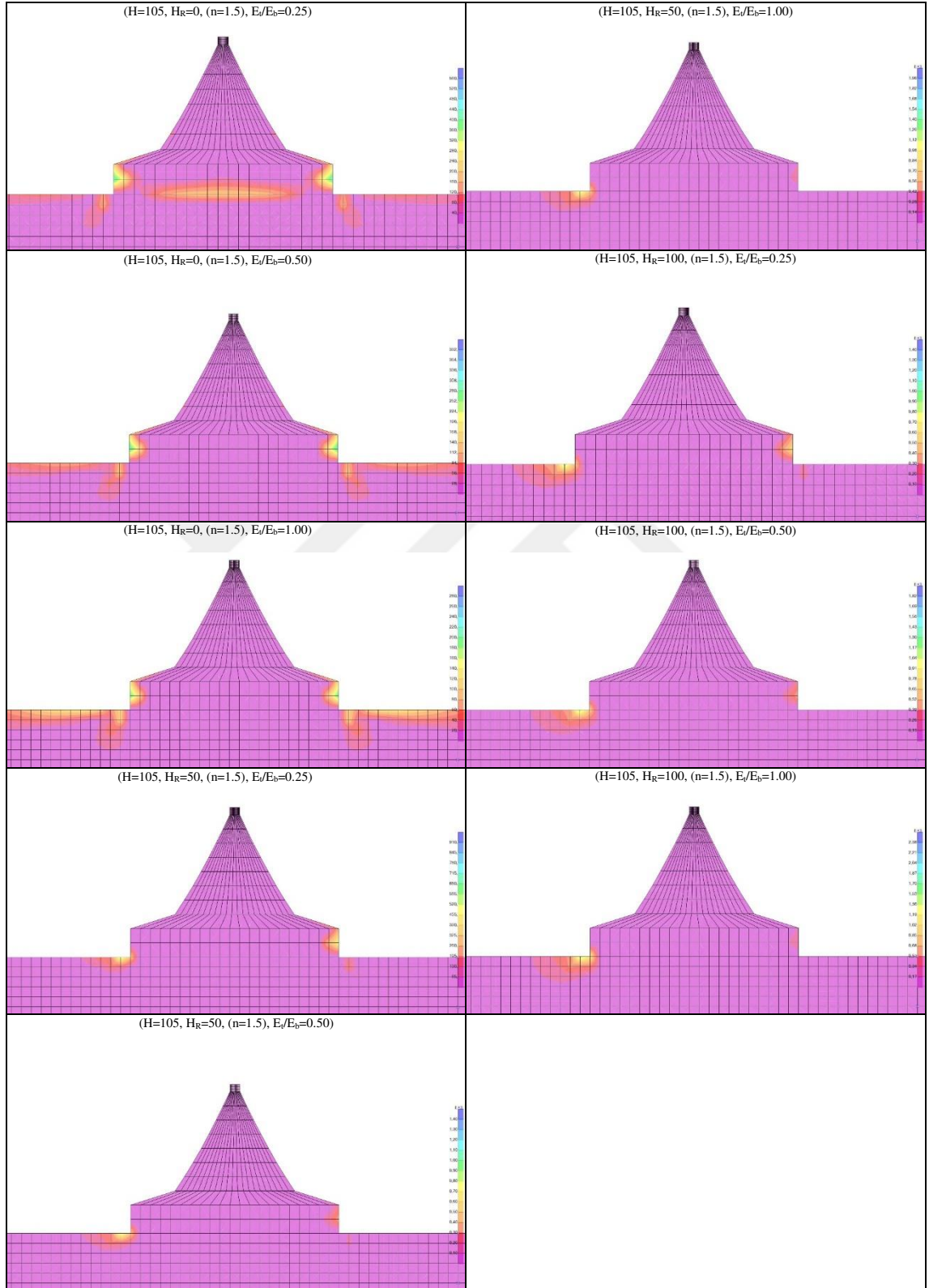
Ek 26. Kuvvet fonksiyonu tabanlı baraj gövdesi enkesit denkleminin baraj-temel arayüzeyinden 20m yükseklikte başlatılan ($n=2.0$) ($E_t/E_b=0.25$) ($E_t/E_b=0.50$) ($E_t/E_b=1.00$) baraj yüksekliği 105 m baraj için minimum asal gerilme görünümü



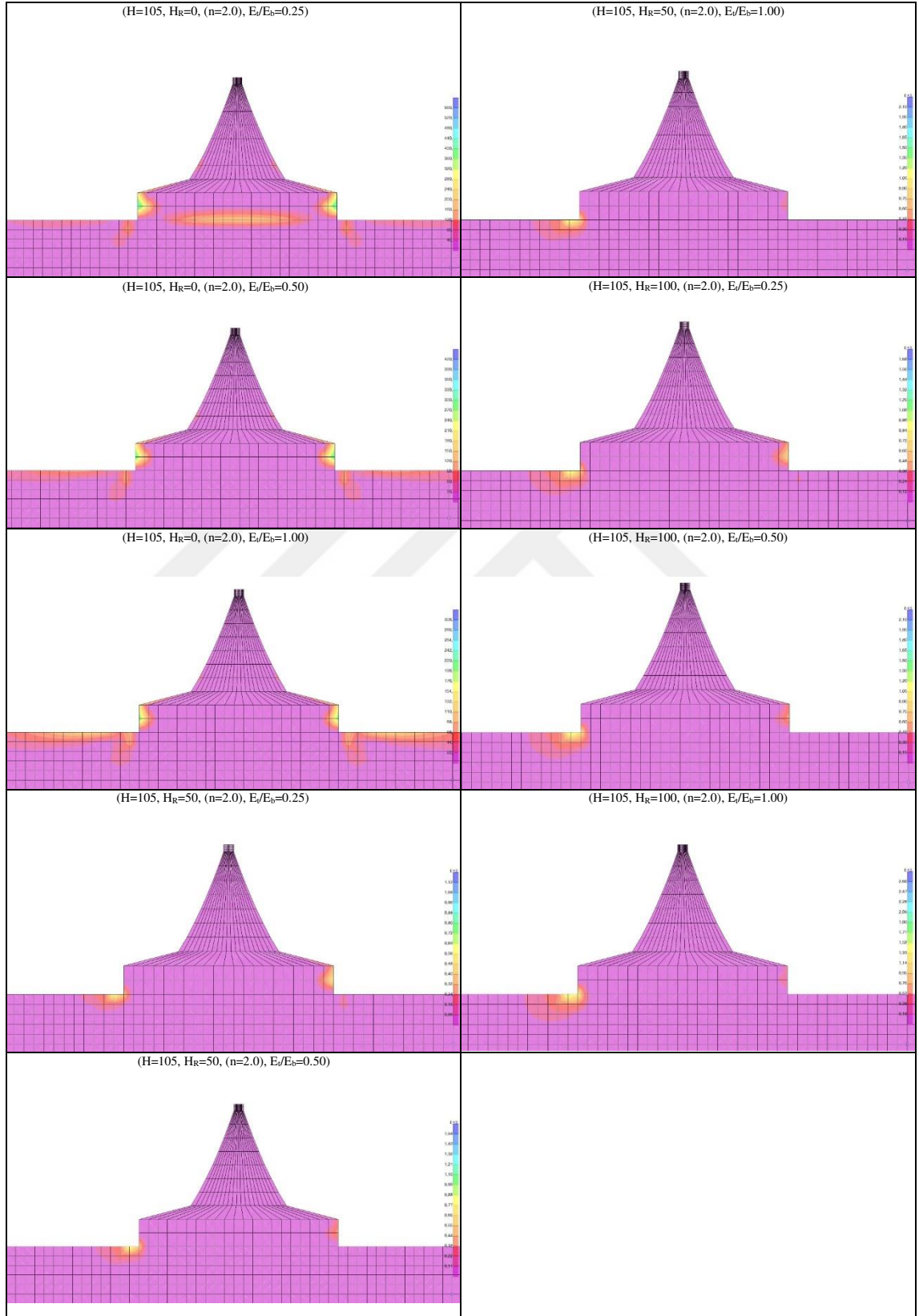
Ek 27. Kuvvet fonksiyonu tabanlı baraj gövdesi enkesit denkleminin baraj-temel ara yüzeyinden 20m yükseklikte başlatılan ($n=1.1$) ($E_t/E_b=0.25$) ($E_t/E_b=0.50$) ($E_t/E_b=1.00$) baraj yüksekliği 105 m baraj için maksimum asal gerilme görünümü



Ek 28. Kuvvet fonksiyonu tabanlı baraj gövdesi enkesit denkleminin baraj-temel ara yüzeyinden 20m yükseklikte başlatılan ($n=1.5$) ($E_t/E_b=0.25$) ($E_t/E_b=0.50$) ($E_t/E_b=1.00$) baraj yüksekliği 105 m baraj için maksimum asal gerilme görünümü



Ek 29. Kuvvet fonksiyonu tabanlı baraj gövdesi enkesit denkleminin baraj-temel ara yüzeyinden 20m yükseklikte başlatılan ($n=2.0$) ($E_t/E_b=0.25$) ($E_t/E_b=0.50$) ($E_t/E_b=1.00$) baraj yüksekliği 105 m baraj için maksimum asal gerilme görünümü



ÖZGEÇMİŞ

Miray ÜNAL

[illegible]