

BÜLENT ECEVİT ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

GALERİLERİN SİLİNDİRLE SIKIŞTIRILMIŞ BETON BARAJLARIN İKİ
BOYUTLU DAVRANIŞINA ETKİSİ

İNŞAAT MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI

YÜKSEK LİSANS TEZİ

MUHAMMET KARABULUT

HAZİRAN 2016

BÜLENT ECEVİT ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

**GALERİLERİN SİLİNDİRLE SIKIŞTIRILMIŞ BETON BARAJLARIN İKİ
BOYUTLU DAVRANIŞINA ETKİSİ**

İNŞAAT MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI

YÜKSEK LİSANS TEZİ

Muhammet KARABULUT

DANIŞMAN: Doç. Dr. Murat Emre KARTAL

ZONGULDAK

Haziran 2016

KABUL:

Muhammet KARABULUT tarafından hazırlanan “Galerilerin Silindirle Sıkıştırılmış Beton Barajların İki Boyutlu Davranışına Etkisi” başlıklı bu çalışma jürimiz tarafından değerlendirilerek Bülent Ecevit Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalında Yüksek Lisans Tezi olarak oybirliğiyle kabul edilmiştir. 20/06/2016

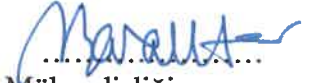
Danışman :Doç. Dr. Murat Emre KARTAL

Bülent Ecevit Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, İnşaat Mühendisliği Bölümü



Üye: Prof. Dr. Alemdar BAYRAKTAR

Karadeniz Teknik Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, İnşaat Mühendisliği Bölümü



Üye: Yrd. Doç. Dr. Ömer Faruk ÇAPAR

Bülent Ecevit Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, İnşaat Mühendisliği Bölümü



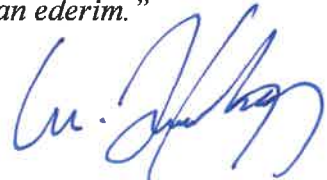
ONAY:

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



Prof. Dr. Baki HAZER
Fen Bilimleri Enstitüsü Müdürü

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



Muhammet KARABULUT

ÖZET

Yüksek Lisans Tezi

GALERİLERİN SİLİNDİRLE SIKIŞTIRILMIŞ BETON BARAJLARIN İKİ BOYUTLU DAVRANIŞINA ETKİSİ

Muhammet KARABULUT

Bülent Ecevit Üniversitesi

Fen Bilimleri Enstitüsü

İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı

Tez Danışmanı: Doç. Dr. Murat Emre KARTAL

Haziran 2016, 83 sayfa

Bu çalışmada, galerilerin silindirinle sıkıştırılmış beton (SSB) barajların doğrusal ve doğrusal olmayan deprem davranışı üzerine etkisi alt modelleme tekniği ile incelenmiştir. Bu amaçla, Türkiye'nin Aydın İlinde inşa edilen Çine SSB barajı uygulama için seçilmiştir. Çine SSB barajının iki boyutlu sonlu eleman modeli ANSYS programı ile oluşturulmuştur. Barajın en elverişsiz kesiti, iki boyutlu model için seçilmiştir. Gövdeye ait malzeme ve zemin mekanik özellikleri barajdan elde edilen deneysel verilere göre belirlenmiştir. Beton ve temel kayası için malzeme bakımından doğrusal olmayan zaman-tanım analizinde Drucker-Prager malzeme modeli dikkate alınmıştır. İki boyutlu sonlu eleman modeli, baraj-zemin-rezervuar etkileşimini içermektedir. Rezervuar suyu, Lagrange yaklaşımı kullanılarak iki boyutlu sıvı sonlu elemanlarla modellenmiştir. Baraj ve zemin ara yüzeylerinde temas-hedef eleman çiftleri kullanılarak sürtünme tanımlanmıştır. Baraj gövdesindeki galeriler dikkate alınarak, sonlu eleman ağı alt modelleme tekniği ile galeri civarında sıkıştırılmıştır. Sonlu eleman modeli, baraj ölçüm sisteminden elde edilen verilere göre güncellenmiştir. Barajın boş ve dolu

ÖZET (devam ediyor)

durumları, doğrusal ve doğrusal olmayan analizlerde dikkate alınmıştır. Çine’de meydana gelen 181.52 saniyelik deprem verileri dinamik analizlerde kullanılmıştır. Galerili ve galerisiz durumlar için yapılan doğrusal ve doğrusal olmayan analizlerden elde edilen yerdeğiştirmeler ve gerilmeler birbirleri ile karşılaştırılmıştır.

Anahtar Kelimeler: Alt modelleme, Baraj-zemin-rezervuar etkileşimi, Drucker-Prager malzeme modeli, Galerli, Lagrange yaklaşımı, Silindirle sıkıştırılmış beton baraj

Bilim Kodu: 624.03.00.

ABSTRACT

M.Sc. Thesis

EFFECT OF GALLERIES ON TWO DIMENSIONAL BEHAVIOR OF ROLLER COMPACTED CONCRETE DAMS

Muhammet KARABULUT

Bülent Ecevit University

Graduate School of Natural and Applied Sciences

Department of Civil Engineering

Thesis Advisor: Assoc. Prof. Murat Emre KARTAL

June 2016, 83 pages

Effect of galleries on the linear and nonlinear earthquake response of roller compacted concrete (RCC) dams are investigated by submodeling technique in this paper. For this purpose, Çine RCC dam constructed in Aydın, Turkey, is selected as an application. The two dimensional finite element model of Çine RCC dam is obtained using ANSYS software. The unfavorable section of the dam is selected for two dimensional model. The material and soil mechanical properties were obtained from the experimental data of the dam. The Drucker-Prager material model is considered in the materially nonlinear time history analyses for concrete and foundation rock. The two dimensional finite element model includes dam-foundation-reservoir interaction. The reservoir water are modeled with the two dimensional fluid finite elements based on the Lagrangian approach. The friction is defined between dam and foundation interfaces using contact-target element pairs. Galleries are considered in the body of the dam and the mesh is refined around the galleries considering submodeling technique. The finite element model of the dam is calibrated according to the data coming from the dam monitoring system. Empty and full reservoir

ABSTRACT (continued)

conditions are considered in linear and non-linear analyses. Cine earthquake records were used in dynamic analysis during 181.52 seconds. The displacements and stresses obtained from the linear and non-linear analyses with and without galleries are compared with each other.

Keywords: Dam-foundation-reservoir interaction, Galleries, Drucker-Prager material model, Lagrangian approach, Roller compacted concrete dam, Submodeling

Science Code: 624.03.00.

TEŞEKKÜR

Bu tez çalışmasını, bana öneren ve çalışmanın her aşamasında gerek bilgi ve tecrübelerini gerekse maddi ve manevi desteğini benden esirgemeyen, önerileriyle ufkumu açan, idari görevlerindeki yoğunluğa rağmen değerli zamanını bana ayıran danışmanım ve saygıdeğer hocam Doç. Dr. Murat Emre KARTAL'a teşekkürlerimi bir borç bilirim. Çalışma süresince değerli görüş ve bilgilerini benimle paylaşan ve çalışmayı inceleyen değerli bilim insanı Prof. Dr. Alemdar BAYRAKTAR hocama ve her zaman yanımda olan çalışma arkadaşım Arş. Gör. Murat ÇAVUŞLİ' ye teşekkür ederim.

Bugünlere gelmemde emeği olan, hoşgörüsünü benden esirgemeyen, maddi, manevi olarak destekleyen ve haklarını ödeyemeyeceğim babam Hasan KARABULUT ve annem Suzan KARABULUT'a şükranlarımı sunarım. Ayrıca çalışmalarım sırasında en yakın arkadaşım ve ikizim olan kardeşim Ali KARABULUT'a ve her zaman beni neşelendiren küçük kardeşim Ahmet KARABULUT'a teşekkür ederim.

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

İÇİNDEKİLER

	<u>Sayfa</u>
KABUL	ii
ÖZET	iii
ABSTRACT	v
TEŞEKKÜR	vii
İÇİNDEKİLER.....	ix
ŞEKİLLER DİZİNİ.....	xi
ÇİZELGELER DİZİNİ	xvii
SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ.....	xix
BÖLÜM 1 GİRİŞ	1
1.1 SİLİNDİRLE SIKIŞTIRILMIŞ BETON BARAJLAR İLE İLGİLİ ÇALIŞMALAR....	4
1.2 ÇALIŞMANIN AMACI VE KAPSAMI	6
1.3 SSB BARAJLARIN SAYISAL MODELLEMESİ İLE İLGİLİ FORMÜLASYONLAR ..	6
1.3.1 Sıvı-Yapı-Zemin Etkileşim Sistemleri.....	7
1.3.1.1 Sıvı Sistemlerinin Lagrange Yaklaşımına Dayalı Sonlu Eleman Formülasyonu	8
1.3.1.2 Sıvı-Yapı-Zemin Etkileşim Sistemlerinin Sonlu Eleman Formülasyonu	9
1.3.2 Malzeme Bakımından Non-Linear Davranış Formülasyonu	10
1.3.2.1 Drucker-Prager Malzeme Modeli.....	10
1.3.3 Geometri Bakımından Non-Linear Davranış Formülasyonu.....	12
1.3.4 Temas Problemleri	13
BÖLÜM 2 BARAJLAR.....	15
2.1 BARAJLAR.....	15
2.2 SİLİNDİRLE SIKIŞTIRILMIŞ BETON (SSB) BARAJLAR	16
2.2.1 Silindirle Sıkıştırılmış Beton Baraj Tasarımında Farklı Yöntemler	18
2.2.2 SSB Barajların Kronolojisi	19

İÇİNDEKİLER (devam ediyor)

Sayfa

2.3 ÇİNE SİLİNDİRLE SIKIŞTIRILMIŞ BETON BARAJININ İKİ BOYUTLU MODELİ.....	20
2.3.1 Çine Barajı İçin Oluşturulan Modeller	22
2.3.2 Çine Barajı İçin Oluşturulan Modellerin Malzeme ve Geometrik Özellikleri	32
2.3.3 Dinamik Analizlerde Kullanılan Deprem Kaydı	33
 BÖLÜM 3 ANALİZ SONUÇLARI.....	 35
3.1 STATİK ANALİZ SONUÇLARI	35
3.2 MODAL ANALİZ SONUÇLARI.....	36
3.3 DİNAMİK ANALİZ SONUÇLARI.....	40
3.4 DİNAMİK ANALİZ SONUÇLARININ FARKLI DURUMLAR İÇİN KARŞILAŞTIRILMASI.....	66
 BÖLÜM 4 SONUÇLAR VE ÖNERİLER.....	 75
4.1 SONUÇLAR VE ÖNERİLER.....	75
 KAYNAKLAR.....	 79
ÖZGEÇMİŞ	83

ŞEKİLLER DİZİNİ

<u>No</u>	<u>Sayfa</u>
1.1. Coulomb, Drucker-Prager ve von Mises kırılma kriterleri	12
1.2. Coulomb sürtünme yasasına göre temas durumunda kayma davranışı	14
2.1. Baraj Türleri.....	15
2.2. Boş bitişik model sonlu eleman ağı	22
2.3. Boş bitişik model kullanılan malzeme bakımından sonlu eleman ağı	22
2.4. Baraj kretinin iki boyutlu modeli.....	23
2.5. Dolu bitişik model sonlu eleman ağı	23
2.6. Dolu bitişik model malzeme bakımından sonlu eleman ağı	24
2.7. Boş sürtünmeli model sonlu eleman ağı	24
2.8. Dolu sürtünmeli model sonlu eleman ağı	25
2.9. Galerili boş bitişik model malzeme bakımından sonlu eleman ağı	25
2.10. Galerili boş bitişik model sonlu eleman ağı	26
2.11. Galerili dolu bitişik model sonlu eleman ağı	26
2.12. Galerili dolu bitişik model malzeme bakımından sonlu eleman ağı	27
2.13. Galerili boş sürtünmeli model malzeme bakımından sonlu eleman ağı.....	27
2.14. Galerili dolu sürtünmeli model malzeme bakımından sonlu eleman ağı	28
2.15. Galerili boş sürtünmeli model malzeme bakımından sonlu eleman ağı.....	29
2.16. Sık mesh galerili boş bitişik model sonlu eleman ağı	29
2.17. Sık mesh galerili dolu bitişik model malzeme bakımından sonlu eleman ağı	30
2.18. Sık mesh galerili boş sürtünmeli model malzeme bakımından sonlu eleman ağı.....	31
2.19. Sık mesh galerili dolu sürtünmeli model malzeme bakımından sonlu eleman ağı	32
2.20. Kuzey-güney doğrultusu ivme-zaman kaydı.....	33
2.21. Doğu-batı doğrultusu ivme-zaman kaydı	34
2.22. Düşey doğrultu ivme zaman kaydı.....	34
3.1. Boş Bitişik Model maksimum asal gerilme değerlerinin yükseklikle değişimi.....	40
3.2. Boş Bitişik Model minimum asal gerilme değerlerinin yükseklikle değişimi	40
3.3. Boş Bitişik Model baraj yükseklik boyunca maksimum yerdeğiştirme değerleri	41

ŞEKİLLER DİZİNİ (devam ediyor)

No	Sayfa
3.4. Boş Bitişik Model baraj yükseklik boyunca minimum yerdeğiştirme değerleri.....	41
3.5. Dolu Bitişik Model maksimum asal gerilme değerlerinin yükseklikle değişimi	42
3.6. Dolu Bitişik Model minimum asal gerilme değerlerinin yükseklikle değişimi	42
3.7. Dolu Bitişik Model baraj yükseklik boyunca maksimum yerdeğiştirme değerleri.....	43
3.8. Dolu Bitişik Model baraj yükseklik boyunca minimum yerdeğiştirme değerleri	43
3.9. Boş Sürtünmeli Model maksimum asal gerilme değerlerinin yükseklikle değişimi.....	44
3.10. Boş Sürtünmeli Model minimum asal gerilme değerlerinin yükseklikle değişimi	44
3.11. Boş Sürtünmeli Model baraj yükseklik boyunca maksimum yerdeğiştirme değerleri.....	45
3.12. Boş Sürtünmeli Model baraj yükseklik boyunca minimum yerdeğiştirme değerleri.....	45
3.13. Dolu Sürtünmeli Model maksimum asal gerilme değerlerinin yükseklikle değişimi	46
3.14. Dolu Sürtünmeli Model minimum asal gerilme değerlerinin yükseklikle değişimi	46
3.15. Dolu Sürtünmeli Model baraj yükseklik boyunca maksimum yerdeğiştirme değerleri	47
3.16. Dolu Sürtünmeli Model baraj yükseklik boyunca minimum yerdeğiştirme değerleri	47
3.17. Galerili Boş Bitişik Model maksimum asal gerilme değerlerinin yükseklikle değişimi	48
3.18. Galerili Boş Bitişik Model minimum asal gerilme değerlerinin yükseklikle değişimi.....	48
3.19. Galerili Boş Bitişik Model baraj yükseklik boyunca maksimum yerdeğiştirme değerleri	49
3.20. Galerili Boş Bitişik Model baraj yükseklik boyunca minimum yerdeğiştirme değerleri	49
3.21. Galerili Dolu Bitişik Model maksimum asal gerilme değerlerinin yükseklikle değişimi.....	50
3.22. Galerili Dolu Bitişik Model minimum asal gerilme değerlerinin yükseklikle değişimi.....	50
3.23. Galerili Dolu Bitişik Model baraj yükseklik boyunca maksimum yerdeğiştirme değerleri	51
3.24. Galerili Dolu Bitişik Model baraj yükseklik boyunca minimum yerdeğiştirme değerleri	51
3.25. Galerili Boş Sürtünmeli Model maksimum asal gerilme değerlerinin yükseklikle değişimi.....	52
3.26. Galerili Boş Sürtünmeli Model minimum asal gerilme değerlerinin yükseklikle değişimi.....	52
3.27. Galerili Boş Sürtünmeli Model baraj yükseklik boyunca maksimum yerdeğiştirme değerleri	53

ŞEKİLLER DİZİNİ (devam ediyor)

<u>No</u>	<u>Sayfa</u>
3.28. Galerili Boş Sürtünmeli Model baraj yükseklik boyunca minimum yerdeğiştirme değerleri	53
3.29. Galerili Dolu Sürtünmeli Model maksimum asal gerilme değerlerinin yükseklikle değişimi.....	54
3.30. Galerili Dolu Sürtünmeli Model minimum asal gerilme değerlerinin yükseklikle değişimi.....	54
3.31. Galerili Dolu Sürtünmeli Model baraj yükseklik boyunca maksimum yerdeğiştirme değerleri	55
3.32. Galerili Dolu Sürtünmeli Model baraj yükseklik boyunca minimum yerdeğiştirme değerleri	55
3.33. Sık Mesh Galerili Boş Bitişik Model maksimum asal gerilme değerlerinin yükseklikle değişimi	56
3.34. Sık Mesh Galerili Boş Bitişik Model minimum asal gerilme değerlerinin yükseklikle değişimi	56
3.35. Sık Mesh Galerili Boş Bitişik Model baraj yükseklik boyunca maksimum yerdeğiştirme değerleri	57
3.36. Sık Mesh Galerili Boş Bitişik Model baraj yükseklik boyunca minimum yerdeğiştirme değerleri	57
3.37. Sık Mesh Galerili Dolu Bitişik Model maksimum asal gerilme değerlerinin yükseklikle değişimi	58
3.38. Sık Mesh Galerili Dolu Bitişik Model minimum asal gerilme değerlerinin yükseklikle değişimi	58
3.39. Sık Mesh Galerili Dolu Bitişik Model baraj yükseklik boyunca maksimum yerdeğiştirme değerleri	59
3.40. Sık Mesh Galerili Dolu Bitişik Model baraj yükseklik boyunca minimum yerdeğiştirme değerleri	59
3.41. Sık Mesh Galerili Boş Sürtünmeli Model maksimum asal gerilme değerlerinin yükseklikle değişimi	60
3.42. Sık Mesh Galerili Boş Sürtünmeli Model minimum asal gerilme değerlerinin yükseklikle değişimi	60
3.43. Sık Mesh Galerili Boş Sürtünmeli Model baraj yükseklik boyunca maksimum yerdeğiştirme değerleri	61

ŞEKİLLER DİZİNİ (devam ediyor)

<u>No</u>	<u>Sayfa</u>
3.44. Sık Mesh Galerili Boş Sürtünmeli Model baraj yükseklik boyunca minimum yerdeğiştirme değerleri	61
3.45. Sık Mesh Galerili Dolu Sürtünmeli Model maksimum asal gerilme değerlerinin yükseklikle değişimi	62
3.46. Sık Mesh Galerili Dolu Sürtünmeli Model minimum asal gerilme değerlerinin yükseklikle değişimi	62
3.47. Sık Mesh Galerili Dolu Sürtünmeli Model baraj yükseklik boyunca maksimum yerdeğiştirme değerleri	63
3.48. Sık Mesh Galerili Dolu Sürtünmeli Model baraj yükseklik boyunca maksimum yerdeğiştirme değerleri	63
3.49. Non-lineer Boş Bitişik Model maksimum asal gerilme değerlerinin yükseklikle değişimi.....	64
3.50. Non-lineer Boş Bitişik Model minimum asal gerilme değerlerinin yükseklikle değişimi.....	64
3.51. Non-lineer Boş Bitişik Model baraj yükseklik boyunca maksimum yerdeğiştirme değerleri	65
3.52. Non-lineer Boş Bitişik Model baraj yükseklik boyunca minimum yerdeğiştirme değerleri	65
3.53. Boş ve Dolu Bitişik Model maksimum asal gerilme değerlerinin yükseklikle değişimi	66
3.54. Boş ve Dolu Bitişik Model minimum asal gerilme değerlerinin yükseklikle değişimi...	66
3.55. Boş ve Dolu Sürtünmeli Model maksimum asal gerilme değerlerinin yükseklikle değişimi.....	67
3.56. Boş ve Dolu Sürtünmeli Model minimum asal gerilme değerlerinin yükseklikle değişimi.....	67
3.57. Boş ve Dolu Galerili Bitişik Model maksimum asal gerilme değerlerinin yükseklikle değişimi.....	68
3.58. Boş ve Dolu Galerili Bitişik Model minimum asal gerilme değerlerinin yükseklikle değişimi.....	68
3.59. Boş ve Dolu Galerili Sürtünmeli Model maksimum asal gerilme değerlerinin yükseklikle değişimi	69
3.60. Boş ve Dolu Galerili Sürtünmeli Model minimum asal gerilme değerlerinin yükseklikle değişimi	69

ŞEKİLLER DİZİNİ (devam ediyor)

<u>No</u>	<u>Sayfa</u>
3.61. Boş ve Dolu Sık Mesh Galerili Sürtünmeli Model maksimum asal gerilme değerlerinin yükseklikle değişimi	70
3.62. Boş ve Dolu Sık Mesh Galerili Sürtünmeli Model minimum asal gerilme değerlerinin yükseklikle değişimi	70
3.63. Boş Bitişik modelin maksimum asal gerilme değerlerinin yükseklikle değişimi	71
3.64. Boş Bitişik modelin minimum asal gerilme değerlerinin yükseklikle değişimi.....	71
3.65. Dolu Sık Mesh Galerili Sürtünmeli ve Bitişik Model maksimum asal gerilme değerlerinin yükseklikle değişimi	72
3.66. Dolu Sık Mesh Galerili Sürtünmeli ve Bitişik Model minimum asal gerilme değerlerinin yükseklikle değişimi	72
3.67. Farklı yoğunlukta ağ sıklığına sahip galerili modeller ile galerisiz modellerde kret yüksekliği boyunca maksimum asal gerilme değişimi	73
3.68. Galeri etrafında ki farklı sıklıklardaki mesh yoğunluğuna sahip modeller de ki asal gerilme değişiminin incelendiği eleman	74

ÇİZELGELER DİZİNİ

<u>No</u>	<u>Sayfa</u>
3.1. Modal Analiz Sonuçları	36
3.2. Modal Analiz Sonuçları	37
3.3. Modal analiz sonuçları	38
3.4. Modal analiz sonuçları	39

SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ

SİMGELER

A_1, A_2	Alan
a, b_i, c_i ve d_{ij}	Yaklaşık fonksiyonun katsayıları
$[B]$	Yerdeğiştirme-şekildeğiştirme matrisi
c	Kohezyon
$[C]$	Ortak sistemin sönüm matrisi
d_k	Adım doğrultusu
$[D]$	Elastisite matrisi
$[D_r]$	Sıvı sistemin elastisite matrisi
$\{e\}$	Şekildeğiştirme vektörü
e_1, e_2	Yakınsama kriterleri
f	Akma fonksiyonu
F	Dış yük
$\{F\}$	Dış yük vektörü
f_k	1~3 arasında değişen keyfi bir katsayı
$\{F_f\}$	Zamana bağlı düğüm noktası yük vektörü
$F_{kl}(\omega)$	Transfer fonksiyonu
$\{F^{nr}\}$	Newton-Raphson geri çağırım kuvveti
$f_R ()$	Dayanım için olasılık yoğunluk fonksiyonları
$f_Q ()$	Yük etkisi için olasılık yoğunluk fonksiyonları
$f_X(x)$	Olasılık yoğunluk fonksiyonu
$F_X(x)$	Eklenik dağılım fonksiyonu
g	Limit durum fonksiyon değeri
G	Kayma modülü
$[G]$	Şekil fonksiyonunun türev matrisi
I_1	Gerilme tensörünün birinci invaryantı
J_2	Deviatorik gerilme tensörünün ikinci invaryantı

SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ (devam ediyor)

k	Kayma gerilmesinin akma dayanımı
$[K]$	Ortak sistemin rijitlik matrisi
k_d, α_d	Kohezyon ve içsel sürtünme açısına bağlı sabitler
$[K_f]$	Sıvı sistemin rijitlik matrisi
$[K_E]$	Sistem rijitlik matrisinin elastik bileşeni
$[K_f^*]$	Sıvı serbest yüzey rijitliklerini de içeren sıvı sistemin rijitlik matrisi
$[K_G]$	Sistem rijitlik matrisinin geometrik bileşeni
$[\bar{K}]$	Tanjant rijitlik matrisi
K_m	Kaya dolgu modülü
ks	Yaklaşık fonksiyonun katsayı değerlerini gösteren vektör
$[M]$	Ortak sistemin kütle matrisi
$[M_f]$	Sıvı sistemin kütle matrisi
n	Değişken sayısı
N	Üretilen örnek sayısı
P	Basınç
$P()$	Olasılık
P_w	Dönmeye ait gerilme
q_i	i. genelleştirilmiş koordinat
Q	Yük etkisi
Q_{ij}	Normal akma yüzeyi
Q_i	i. genelleştirilmiş kuvvet
R	Dayanım
R_d	Gerilme farkının büyüklüğü
R_0	Yapının güvenilirliği
$[S_f]$	Serbest yüzey eleman rijitlik matrisi
S_{ij}	Deviatorik gerilme tensörü
S_U	Drenajsız kayma dayanımı
T	Kinetik Enerji
T_b	Beton plak kalınlığı

SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ (devam ediyor)

$\{U\}$	Toplam yerdeğiştirme vektörü
$\{U_f\}$	Sıvı sistemin yerdeğiştirme vektörü
U_{fs}	Sıvı serbest yüzeyi düşey yerdeğiştirmesi
U_{fy}, U_{fz}	Sıvının yerdeğiştirme bileşenleri
u_m	m tabakasındaki yerdeğiştirme
U_n	Arayüzeye normal yerdeğiştirme
$\{\dot{U}\}$	Toplam hız vektörü
$\dot{U}_{fy}, \dot{U}_{fz}$	Hız bileşenleri
$\{\dot{U}_f\}$	Sıvı sistemin hız vektörü
$\{\ddot{U}\}$	Toplam ivme vektörü
$\{\ddot{U}_f\}$	Sıvı sistemin ivme vektörü
$\ddot{U}_{g(s)}$	Serbest yüzey deprem ivmesi
w	Sıvının düzleme dik doğrultudaki dönmesi
W	Tasarım matrisi
X_1, X_2, X_3, X_n	Yapıları temsil eden yük ve dayanım parametreleri
x_i	Rastgele değişken
X_D	Tasarım noktası
X_M	Merkezi nokta
$\hat{x}_j$	Her bir değişken için üretilen örnek değer
$\{y\}$	Yanıt vektörü
Z_i	İndirgenmiş değişken
α	Doğrultman kosinüsü
α_f	Rotasyonla ilgili kısıtlama parametresi
α_{ij}	Deviatorik gerilme uzayında akma yüzeyinin merkezi
β_f	Sıvının hacimsel elastisite modülü
β_s	Bir skaler parametre
δ_{ij}	Kroneker delta

SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ (devam ediyor)

ε_{eq}^{pl}	Eşdeğer plastik şekildeğiştirme
ε_{ij}^{pl}	Plastik şekildeğiştirme
ε_v	Hacimsel şekildeğiştirme
$\Delta\varepsilon_{ij}^{pl}$	Plastik şekildeğiştirme artışı
$\Delta\varepsilon_{eq}^{pl}$	Eşdeğer plastik şekildeğiştirme artışı
$\Delta\sigma_{eff}$	Efektif gerilme artışı
ϕ	İçsel sürtünme açısı
γ	Bir skaler çarpan
$\Phi()$	Standart normal değişkenlerin eklenik dağılıma fonksiyonu
λ_k	Adım boyu
μ	Sürtünme katsayısı
Π_e	Toplam şekildeğiştirme enerjisi
Π_s	Yüzey potansiyel enerjisi
Π_t	Toplam potansiyel enerji
ρ	Kütle yoğunluğu
σ_{ij}	Gerilme tensörü
σ_b	Basınç gerilmesi
σ_φ	Çekme gerilmesi
$\{\sigma_f\}$	Sıvının gerilme vektörü
σ_m	Ortalama gerilme
σ_{mc}	Ortalama efektif basınç
σ_m'	Ortalama efektif gerilme
σ_y	Akma gerilmesi
$\sigma_1, \sigma_2, \sigma_3$	Asal gerilmeler
τ	Eşdeğer kayma gerilmesi
τ_m	m tabakasındaki kayma gerilmesi

SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ (devam ediyor)

τ_{maks}	Maksimum kayma gerilmesi
ξ_{ij}	Gerilme farkı

KISALTMALAR

DSİ	: Devlet Su İşleri
SSB	: Silindirle Sıkıştırılmış Beton

BÖLÜM 1

GİRİŞ

İnsanlık tarihi boyunca, suya duyulan hayati ihtiyaç ve bunun yanı sıra suyun taşkın ve sellerle yarattığı felaketler insanoğlunun suyu bir şekilde kontrol altına alma zorunluluğunu doğurmuştur. Suyu biriktirme ve kontrollü kullanma kavramından kaynaklanan baraj mühendisliği ve yapımı medeniyet tarihinin çok eski yıllarında başlamıştır. Mısır, Mezopotamya, İran ve Hindistan Uzakdoğu ve Anadolu’da 5000 yıl önce barajların yapıldığı ve hizmet verdiği ve ülkelerin ekonomi ve tarıma dayalı uygarlıklarını etkilediği bilinmektedir [1].

Barajlar, arkasında büyük su kütlesi ve kendi ağırlığı yanında, buz ve deprem gibi etkilere de maruz kalabilen yapılardır. Barajlar, genellikle dağların arasına, nehir sularının yolunu keserek arkasında göl oluşturmak ve enerji, tarım, taşkın kontrolü gibi farklı amaçlarla inşa edilirler.

Dünya genelinde çeşitli tiplerde barajlar inşa edilmektedir. İnşa edilecek barajın tipi inşa edilecek bölgenin zemin tipi, vadinin durumu, yapım maliyeti, iklim koşulları, taşkın durumu vs. gibi birçok faktör dikkate alınarak en uygun ve elverişli baraj tipi seçilir. İnşa edilecek baraj tipi arazinin durumu ve yapım maliyeti bakımından çeşitlilik gösterebilmektedir. Baraj tiplerini, gövde malzemesine ve gövde yapısına göre iki farklı gruba ayırabiliriz. Gövde malzemesine göre baraj tipleri; toprak dolgu barajlar, kaya dolgu barajlar, ön yüzü betonarme kaplı kaya dolgu barajlar olarak sıralayabiliriz. Gövde yapısına göre ise baraj tipleri; beton ağırlık barajlar, payandalı barajlar, beton kemer barajlar ve silindire sıkıştırılmış beton barajlardır. Kemer ve ağırlıklı barajların yapılacağı bölgenin çok sağlam kayaç yapısına sahip olması gerekirken, dolgu barajlar bu denli sağlamlığa ihtiyaç duyulmadan geniş vadilerde üstelik daha uygun maliyetle inşa edilebilirler.

Silindirle sıkıştırılmış beton. (SSB); geleneksel betona kıyasla daha düşük dozda çimento içeren, taze halde iken çökmesi olmayan kuru kıvamdaki karışımın damperli kamyonlarla taşınıp buldozer. greyder veya finişer ile tabakalar halinde serilerek vibrasyonlu silindirlerle sıkıştırılmasıyla üretilen bir beton türüdür.

SSB taze halde iken geleneksel betondan daha çok zemin dolgu malzemesi görünümünde, katılaştığında ise geleneksel beton gibi davranan bir yapıdadır. Kısa sürede büyük hacimlerde uygulama yapılmasına olanak tanınması, kalıp kullanımına ihtiyaç duyulmaması, düşük dozajda çimento kullanılması, ekonomik olması, yeterli dayanımda sertlikte ve dayanıklılıkta beton tabakası oluşturması gibi nedenlerle SSB özellikle baraj gövdelerindeki kütle beton uygulamalarında, yol, liman, pist, fabrika ve depo saha kaplanmalarında geleneksel betonun yerine son yıllarda yaygın olarak kullanılmaktadır. Bugüne kadar 200'e yakın barajın yapımında SSB kullanıldığı bilinmektedir.

SSB ilk olarak 1942 yılında Amerikan ordusuna bağlı istihkam mühendisleri birliğince (U'S, Army Corps of Engineers (USACE) tarafından Washington'da (Yakima 'da) bir uçak pistinin yapımında kullanılmıştır [2]. Barajda ilk ciddi SSB kullanımı 1960-1961 yılları arasında Taiwanda (Shifmen Cofferdam) olmuştur. Bu barajda .kullanılan SSB betonu geleneksel betonun üretildiği tarzda; maksimum tane boyutu 76 mm olan agregası kullanılarak 107 kg/m³ bağlayıcı ile üretilmiş ve üretilen beton damperli kamyonlarla döküm yerine taşınarak 300 mm kalınlıkta tabakalar halinde buldozerlerle serilerek, kamyonların gezinmesiyle sıkıştırılarak yerleştirilmiştir. Hazırlanan SSB karışımının optimum su muhtevası modifiye proktor yöntemi ile belirlenmiştir [3]. Bu barajdaki SSB kullanımını İtalya'da 1961-1965 yılları arasında inşa edilen 172 metre yükseklikteki Alpe Gera Barajı izlemiştir. Bu tecrübelerden ve 1970'li yıllarda özellikle ABD, Japonya, Brezilya, Kanada, Pakistan, Avustralya, İspanya ve İngiltere gibi ülkelerde yapılan araştırmalar neticesinde, SSB özellikle beton ağırlık barajların yapımında yaygın olarak kullanılmaya başlanmıştır. SSB kullanılarak inşa edilen barajlara örnek olarak; Tarbela Barajı (1975) Pakistan, Winbleball barajı (1979) İngiltere, Willow Creek barajı (1982) ABD, Tamagawa barajı (1987) Sakaigawa (1988) ve Myagase barajları (1991) Japonya gösterilebilir [4]. Türkiye 'de SSB uygulaması ilk olarak Karakaya Barajı Menba batardosunun yapımında gerçekleştirilmiş, bu uygulamayı daha sonra yapılan Atatürk, Sır, Berke, Suçatı ve Kürtün barajlarının belirli yapılarındaki kullanımlar izlemiştir. Günümüzde ise Cindere ve Çine Barajlarında ana gövde tamamen SSB kullanılarak yapılmaktadır [5].

Silindirle sıkıştırılmış beton, sertleşmemiş halde iken slump değeri sıfır kıvama sahip, toprak ve kaya dolgu elemanları ile serilen ve sıkıştırılan bir betondur. Sertleşmiş SSB'un özellikleri, geleneksel betonun özelliklerine benzerdir.

Silindirle sıkıştırılmış beton, sıkıştırma ekipmanlarını taşıyacak ve onlara dayanacak güçte olan bir karışımdır. Benzer serme yöntemlerinde kullanılan granüler toprak çimentosundan farklıdır. Başlıca farklılık, SSB'un iri taneli agrega içermesi ve geleneksel betona benzer özellikler göstermesidir. SSB hızlı ve daha ekonomik şekilde inşa edilecek barajların tasarımları için yapılan çalışmaların bir sonucu olarak geliştirilmiştir.

İkinci Dünya Savaşı sonrasında Avrupa'nın yeniden ve en hızlı şekilde yapılandırılma ihtiyacının ortaya çıkması baraj, liman, karayolu ve hava meydanları inşası ihtiyacına cevap verecek hızlı yapım metotlarının geliştirilmesini sağlamıştır. Bu durum SSB'un geliştirilmesi sağlamıştır.

SSB uygulamalarını, endüstri tarihçileri 1960'lı yıllarda İtalya'da "Alpe Gere" barajında kullanılmış olduğunu tespit etmişlerdir. 1970-72 yıllarında ABD/Kaliforniya'da toplanan "Temel ve Mühendislik" konferansında bu konunun teorik temellerinin gündeme geldiği görülür. Yine "Beton Barajların Hızlı İnşası" konferansında, çimento ile zenginleştirilmiş granüle dolgu malzemesinin toprak dolgu ekipmanları ile taşınması, serilmesi ve sıkıştırılması yoluyla sedde yapımı fikri ortaya atılmıştır. Bu yöntemle yapılacak barajların en kesitleri, kesme dayanımında elde edilecek artış sayesinde azaltılabilecek, dolayısıyla işçilik ve zamandan tasarruf sağlanabilecekti. "Ekonomik Beton Baraj" konulu ikinci konferansta ise "Vibratörlü Silindirle Kütle Betonunun Sıkıştırılması" adlı bildiride söz konusu kütle betonu karışımı revize edilerek iri agrega oranı bir miktar artırılmakta ve buna karşılık ince agrega oranı da azaltılmaktaydı. 1973-74 yıllarında ABD'de "Jackson ve Lost Creak" barajları inşaatlarında ilk SSB denemeleri gerçekleştirilmiştir [2].

Türkiye'de ilk olarak Karakaya Barajı Menba batardosunda uygulanan SSB daha sonra Atatürk, Sır, Berke ve Kürtün (Menba batardosu) barajlarının belirli yapılarında uygulanmıştır. Cindere Barajı ve HES, Çine Barajı ve HES ve Gümüşhane İli Kürtün İlçesi sınırları içinde inşa edilen Akköy I Bendi ve HES inşaatları gövde yapıları RCC olarak projelendirilmiştir [6].

1.1 SİLİNDİRLE SIKIŞTIRILIMIŞ BETON BARAJLAR İLE İLGİLİ ÇALIŞMALAR

Noorzaei vd. ısı analizlerin SSB ağırlık barajların yapımında etkili olduğunu ifade etmişlerdir. Termal davranışının belirlenmesi üzerine yapılan bu çalışmada uygulama için Kinta SSB ağırlık barajı seçilmiştir. Sonlu eleman kodlarıyla tahmin edilen sıcaklık değerleri ile baraj gövdesinde ölçülen gerçek değerlerle uyum içerisinde olduğu gözlenmiştir [7].

Jaafar vd. ısı analizlerin silindirle sıkıştırılmış beton barajlarda önemli bir rol oynadığını yaptıkları çalışma ile açıklamışlardır. Betonun dökülme işlemi sıcaklık bölgelerine göre optimize edilebilir şeklinde vurgulanmıştır [8].

Yilmazturk vd. yüksek bir SSB ağırlık barajın oldukça sismik bir bölgede yer alması durumunu incelemiştir. Tek parçadan oluşan SSB ağırlık barajın üç doğrultuda deprem analizi altında baraj-rezervuar-zemin etkileşimi dikkate alınarak davranışı incelenmiştir. Bu çalışmada üç boyutlu analizlerin önemi ve gerekliliği vurgulanmıştır [9].

Li vd. bu çalışmada gerilme ve sızıntı durumları menba yönünde su geçirmez çeşitli beton tabakaları kullanılarak SSB barajlar için incelenmiştir. Sonuçlara göre en üst tabakanın geçirimsiz olması önerilmektedir [10].

Huang vd. rezervuar su seviyesinin sızma üzerine etkisi ve rezervuar su seviyesinin dinamik etkisi incelenmiştir. Su seviyesinde ki artışın sızma oranını ve dinamik etkiyi artırdığı örneklerde gözlemlenmiştir [11].

Hariri vd. tarafından yapılan çalışmada baraj-rezervuar-zemin modelleri Lagrangian–Eulerian yaklaşımlarına dayanarak oluşturulmuş ve farklı deprem ivme kayıtları kullanılarak yakın fay ve uzak fayın çatlaklar üzerine etkisi incelenmiştir. Önemli parametreler kıyaslanarak ve uzak fayın çatlaklar üzerine etkisi incelenmiştir. Farklı parametreler kıyaslanarak en uygun nümerik model uygulamalar için tavsiye edilmiştir [12].

Lin vd. tarafından yapılan çalışmanın amacı 8 büyüklüğündeki Wenchuan depremine göre büyük barajlardaki risk ve sismik performans değerlendirmesi yapmaktır [13].

Jiang vd. sonlu elemanlar metodunu kullanarak beton ağırlık barajdaki çatlak durumunu incelemişlerdir. Geometrik non-lineerlik ve hedef-temas eleman çiftlerini kullanmışlar. Çökme durumu ve bloklarda ki maksimum yerdeğiştirmeler incelenmiştir [14].

Xiong vd. 8 büyüklüğün deki bir deprem sırasında farklı mekanik özelliklerdeki malzeme parametreleri kullanılarak barajın deprem davranışı incelenmiştir [15].

Cai vd. barajlar üzerinde optimizasyon metodunu kullanarak düşey yerdeğiştirme, maksimum oturma gibi değerleri baz alarak yaptıkları bu çalışmada barajların dizaynı konusunda önerilerde bulunmuşlar [16].

Cheng vd. baraj emniyetini gözleme de etkili bir yol olan modal analiz üzerine bir çalışma yapmışlardır. Deprem analizleri sonucunda elde edilen tutarlı sonuçlara göre modal parametre tanımlama metodu ağırlık barajlar için tavsiye edilmektedir [17].

Zhong vd. yüksek beton barajların güçlü deprem altında risk durumlarını incelenmişlerdir. Dinamik analizlerle çökme durumlarına etki eden faktörler irdelenmiştir. Bunlar çatlak ve malzemenin mekanik özellikleri olarak sıralanabilir [18].

Gaspar vd. baraj yapım sürecinde ki sıcaklık değışiminin ve sürecin etkilerini incelemek üzere bir olasılık yaklaşımı kullanmışlardır [19].

Zhuo vd. Shapai SSB kemer barajının sismik davranışını incelemişlerdir. Sayısal sonuçlarla gerçek ölçüm sonuçlarının tutarlı olduğu tespit edilmiştir. Sayısal metodun uygulanabilir olduğu ifade edilmiştir [20].

Liang vd. tabakalı dolgu baraj ve şevlerde göçme durumunu değerlendirmek için güvenilirlik ve olasılık teorileri geliştirmişlerdir. Geliştirilen yaklaşım ve bilgisayar programı bir dolgu barajın stabilitesinin incelenmesinde kullanılmıştır. Çalışmadan elde edilen sonuçlara göre en küçük güvenilirlik indeksleri menba yüzünde oluşurken; mansap yüzünde de güvenilirlik indeksleri hedef değere oldukça yakın elde edilmiştir [21].

Araujo vd. beton ağırlık barajların olasılık çözümünde bir yöntem sunmuştur. Çalışmalarında, betonun özellikleri ve sismik titreşim rastgele değışken olarak düşünülmüştür. Baraj-temel-

rezervuar etkileşim sisteminin hareket denklemleri Sonlu Elemanlar Yöntemi ile çözülerek yapı davranışı elde edilmiştir. Yapı güvenilirliği başlıca göçme modlarına (çatlak, betonun ezilmesi ve baraj-temel arayüzünde kayma) göre Monte Carlo Yöntemi kullanılarak değerlendirilmiştir [22].

1.2 ÇALIŞMANIN AMACI VE KAPSAMI

Silindirle Sıkıştırılmış Beton (SSB) barajların statik ve dinamik yükler altında davranışı belirlenirken, gövde dolu olarak düşünülmektedir. Hâlbuki gövde içerisinde galeriler bulunmaktadır. Bu durumda buralarda gerilme yığılmaları oluşması beklenir. Bu gerilme yığılmalarının daha hassas belirlenmesi ve tehlike arz edip etmeyeceğinin değerlendirilmesi için galeri etrafında sonlu eleman ağ sıklaştırması yapılmaktadır. Bu çalışma sonucunda galerili modellerde meydana gelen maksimum gerilmeler ile dolu kesitli olarak modellenen iki boyutlu baraj modellerinde meydana gelen gerilme durumları kıyaslanarak daha sonra yapılacak olan çalışmalarda eğer ciddi gerilme farkları mevcut ise yapılacak modellere galerilerin dahil edilmesi konusunda önerilerde bulunulması amaçlanmaktadır.

Bu çalışmada SSB barajların galeriler dikkate alınarak iki boyutlu sonlu eleman modeli barajın gerçek koordinat verileri kullanılarak tasarlanmıştır. Baraj gövdesinde ve barajın olduğu bölgenin jeolojik durumu dikkate alınarak tasarımda kullanılan zemin kayası ve betonun malzeme mekanik özellikleri (elastisite modülü ve poisson oranı vs.) temin edilen gerçek veriler olarak ANSYS yazılımına işlenmiştir. Barajda deprem durumunda oluşabilecek gerilmelerin hesabı için Aydın İlinin Çine İlçesinde barajın bulunduğu bu bölgede meydana gelen 181.52 saniye süren ve 5.9 M_w büyüklüğünde olan deprem verileri kullanılarak dinamik davranışının belirlenmesi ve bu kapsamda barajda oluşabilecek gerilme ve deformasyonların tehlike arz edip etmeyeceğinin değerlendirilmesi yapılmıştır.

1.3 SSB BARAJLARIN SAYISAL MODELLEMESİ İLE İLGİLİ FORMÜLASYONLAR

Rezervuar suyunun hidrodinamik etkisinin de dikkate alındığı doğrusal ve doğrusal olmayan sonlu eleman analiz formülasyonları verilmektedir. Formülasyonlarda, rezervuar suyunun baraj üzerindeki etkisi Lagrange yaklaşımına dayalı lineer davranış gösteren iki boyutlu sıvı sonlu elemanlarla dikkate alınmıştır. Lineer olmayan analiz formülasyonları aşağıdaki gibi üç gruba ayrılmıştır:

1. Malzeme bakımından lineer olmayan davranış (elastik olmayan, plastik, hiperplastik)
2. Arayüzey sınır şartları (temas problemleri)
3. Geometri bakımından lineer olmayan davranış (büyük yerdeğıştirmeler)

1.3.1 Sıvı-Yapı-Zemin Etkileşim Sistemleri

Barajlar, sıvı depoları ve su kanalları gibi yapılar sıvı-yapı etkileşim sistemleridir. Bu tip yapılarda dinamik bir etki altında sıvı yapının, yapı da sıvının davranışını önemli derecede etkilediğinden, sıvı-yapı etkileşiminin çözümlerde dikkate alınması gerekmektedir. Sıvı-yapı-zemin etkileşim problemlerinin çözümünde çeşitli yaklaşımlar kullanılmaktadır. Bunlar şu şekilde sıralanabilir:

1. Westergaard Yaklaşımı
2. Euler Yaklaşımı
3. Lagrange Yaklaşımı

Westergaard yaklaşımı, Euler yaklaşımına dayalı ilk sıvı-yapı etkileşim uygulamalarındandır. Bu yaklaşımda, barajın rijit, sonsuz uzun ve düşey memba yüzeyli olduğu, rezervuarın memba doğrultusunda sonsuza uzandığı ve yüzey dalgalarının oluşmadığı kabulleri yapılmıştır. Söz konusu yaklaşımda, yapı ile birlikte hareket eden sıvıyı temsil etmek üzere ilave bir kütle tanımlanmıştır [23].

Euler yaklaşımında, yapıda yerdeğıştirmeler sıvıda ise basınçlar veya hız potansiyelleri değışkendir. Bu yaklaşımda, sıvı ve yapı ortamında değışkenler farklı olduğundan sistemin çözümü için ara yüzey denkleminde ihtiyaç duyulmaktadır. Sıvı-yapı-zemin etkileşim sisteminin bu yaklaşıma göre çözümü özel amaçlı bilgisayar programları ile gerçekleştirilebilmektedir [24].

Lagrange yaklaşımında, her iki ortamda da yerdeğıştirmeler bilinmeyen olarak seçildiğinden eleman matrisleri simetrik olarak oluşturulmaktadır. Yapı sistemlerini analiz etmek için mevcut olan eleman alt programlarından yerdeğıştirmelere dayalı sıvı elemanları elde etmek ve genel amaçlı yapı analizi programlarına uyarlamak daha kolaydır [25]. Bu çalışmada, Lagrange yaklaşımı esas alınmıştır.

1.3.1.1 Sıvı Sistemlerinin Lagrange Yaklaşımına Dayalı Sonlu Eleman Formülasyonu

Lagrange yaklaşımına dayalı sıvı sonlu elemanın geliştirilmesi, standart bir katı elemanın elastisite matrisinin uygun bir şekilde değiştirilerek dikkate alınması fikri ile ortaya çıkmıştır. Wilson ve Khalvati [26] tarafından önerilen sıvı eleman kullanılarak sıvı, sıvı-yapı ve baraj-rezervuar sistemlerinin davranışı birçok araştırmacı tarafından incelenmiştir.

Sıvı sistemlerin lineer elastik, rotasyonsuz ve viskoz olmayan, küçük yerdeğiştirmeler yapması durumu için temel bağıntılar Wilson ve Khalvati [26], Calayır [24] ve Bayraktar [25] tarafından verilen formülasyona dayalı olarak sunulmuştur. Lagrange yaklaşımına göre rotasyonsuz ve viskoz olmayan lineer elastik bir sıvının küçük yerdeğiştirmeler yapması durumunda basınç ile hacimsel şekil değiştirme arasında aşağıda verilen bağıntı vardır.

$$P = \beta_f \epsilon_v \quad (1.1)$$

P basıncı, β_f sıvının elastisite modülünü hacimsel olarak gösterirken ϵ_v ise şekil değiştirmeyi göstermektedir. İki boyutlu problemlerde ϵ_v aşağıda ki gibi ifade edilmektedir:

$$\epsilon_v = \frac{\partial U_f y}{\partial y} + \frac{\partial U_f z}{\partial z} \quad (1.2)$$

U_{fy} ve U_{fz} sırasıyla y ve z doğrultularında ki yerdeğiştirme bileşenleridir. Sıvının gerilme-şekildeğiştirme bağıntılarına rotasyonlar ve bu rotasyonlarla ilgili kısıtlama parametreleri yerleştirilmektedir. Bu parametrelerin büyük değerde seçilmesiyle sıvı rotasyonsuz hale yaklaşacaktır [26] İki boyutlu haldeki rotasyonlar aşağıdaki bağıntı ile verilebilir.

$$w = \frac{1}{2} \left(\frac{\partial U_f y}{\partial z} - \frac{\partial U_f z}{\partial y} \right) \quad (1.3)$$

Bu ifadedeki w sıvının düzleme dik doğrultudaki dönmesini göstermektedir. Bu rotasyonlarla ilgili gerilmeler,

$$P_w = \alpha_f w \quad (1.4)$$

Bağıntısıyla hesaplanmaktadır. P_w dönmeye ait gerilmeyi, α_f rotasyonla ilgili kısıtlama parametresini göstermek üzere (1.1) ve (1.4) eşitlikleri kullanılarak iki boyutlu sıvının matris formundaki gerilme-şekildeğiştirme bağıntısı aşağıda ki gibi yazılabilir:

$$\begin{Bmatrix} P \\ P_w \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} \beta_f & 0 \\ 0 & \alpha_f \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \varepsilon_v \\ w \end{Bmatrix} \quad (1.5)$$

ya da

$$\{\sigma_f\} = [Df]\{e\} \quad (1.6)$$

$\{\sigma_f\}$ sıvının gerilme vektörünü, $[Df]$ elastisite matrisini ve $\{e\}$ şekil değiştirme vektörünü göstermektedir.

1.3.1.2 Sıvı-Yapı-Zemin Etkileşim Sistemlerinin Sonlu Eleman Formülasyonu

Sıvı-yapı sisteminin ortak hareket denklemleri her iki sisteme ait eşitliklerin arayüzey şartı dikkate alınarak birleştirilmesiyle elde edilmektedir. Bu nedenle, ortak sistemin arayüzey şartının belirlenmesi gerekmektedir. Sıvının viskoz olmadığı kabul edildiğinden ortak sistemin ara yüzeyinde, yalnızca arayüzey normalindeki yerdeğiştirmeler sürekli, teğet yerdeğiştirmeler ise süreksiz olmaktadır. Ortak sistemin arayüzeyinde, yapı kısmının pozitif yüzeye ve sıvı kısmının negatif yüzeye sahip olduğu kabul edilirse arayüzey şartı,

$$U_n^- = U_n^+ \quad (1.7)$$

şeklinde yazılabilir [27]. Burada, U arayüzeye normal yerdeğiştirmeyi göstermektedir. Bu şart, sıvı-yapı ya da sıvı-zemin arayüzeyinde arayüzeye normal doğrultuda karşılıklı düğüm noktaları arasına kısa ve yeterli rijitliğe sahip çubuk elemanlar yerleştirilerek [27] veya bu çalışmada olduğu gibi ortak sistemin ara yüzeyinde karşılıklı düğüm noktalarında ceza metodu [28] kullanılarak da sağlanabilir.

Arayüzey şartları dikkate alınarak, n serbestlik dereceli sıvı-yapı sistemlerinin yer hareketi altındaki sönümlü hale ait ortak hareket denklemi,

$$[M]\{\ddot{U}\} + [C]\{\dot{U}\} + [K]\{U\} = \{F\} \quad (1.8)$$

şeklinde yazılabilir. Burada $[M]$, $[C]$ ve $[K]$ sırasıyla bir sistemin kütle, sönüm ve rijitlik matrislerini ifade ederken, $\{\ddot{U}\}$, $\{\dot{U}\}$, $\{U\}$ ise toplam ivme, hız ve yerdeğiştirme vektörlerini, $\{F\}$ ise dış yük vektörünü göstermektedir. Lagrange yaklaşımına dayalı sıvı-yapı sisteminin hareket denklemi, (1.8), simetrik sistem matrislerine sahip olduğundan herhangi bir yapı sisteminin hareket denklemi ile benzer bir formdadır. Bu nedenle, yapı analizi için kullanılan çözüm yöntemleri sıvı-yapı sistemi için de kullanılabilir. Bu da sıvı-yapı etkileşim sistemlerinin çözümünde Lagrange yaklaşımının tercih edilmesinin en önemli sebebidir [25].

1.3.2 Malzeme Bakımından Non-Linear Davranış Formülasyonu

Yapı-zemin sistemini oluşturan tüm elemanların küçük şekil değiştirmelerdeki visko-elastik özellikleri ile hesap yapılmakta ve seçilen deprem hareketi için elemanlarda oluşan maksimum birim şekil değiştirmeler hesaplanmaktadır. Daha sonra, her elemandaki etkili birim şekil değiştirme maksimum değerlerin bir çarpanı olarak kabul edilip, kayma modülü ve sönüm oranı bu birim şekil değiştirmede alacağı değerlerle değiştirilerek tekrar tüm sistem analiz edilerek lineer olmayan davranış yaklaşık olarak elde edilmektedir [29].

Bu çalışmada, Drucker-Prager malzeme modeli kullanılmıştır. Beton ve kaya gibi nispeten daha rijit malzemelerin yapısal davranışına daha uygun olduğu yapılan çalışmalarla tavsiye edildiğinden dolayı Drucker-Prager modeli analizler için seçilmiştir. Kohezyon, içsel sürtünme açısı ve dilatasyon açı değerleri Drucker-Prager doğrusal olmayan davranış formülasyonlarında kullanılarak gerilme-şekildeğiştirme eğrileri elde edilmiştir.

1.3.2.1 Drucker-Prager Malzeme Modeli

Malzemelerin akma yüzeyinin veya akma fonksiyonlarının belirlenmesinde birçok etken vardır. Drucker-Prager modeli bu etkenlerin göz önüne alınabildiği, kaya ve beton gibi sürtünmeli malzemeler için yaygın şekilde kullanılan bir elasto-plastik malzeme modelidir. Drucker ve Prager [30] betonun elasto-plastik davranışını elde etmek için von-Mises kriterinin hidrostatik gerilme etkisini içerecek şekilde Mohr-Coulomb kriterini düzgünleştirerek uygun bir akma fonksiyonu elde etmiştir. Bu fonksiyon,

$$f = \alpha_d I_1 + \sqrt{J_2} - k_d \quad (1.9)$$

ifadesi ile tanımlanmaktadır [30]. Burada, α_d ve k_d ilgili malzemenin kohezyon (c) ve içsel sürtünme açısına (ϕ) bağlı sabitler olup (10) denklemindeki gibi elde edilmektedir.

$$\begin{aligned} \alpha_d &= \frac{2 \sin \phi}{\sqrt{3} (3 - \sin \phi)} \\ k_d &= \frac{6c \cos \phi}{\sqrt{3} (3 - \sin \phi)} \end{aligned} \quad (1.10)$$

Denklem (1.9)'de I_1 , (σ_{ij}) gerilme tensörünün birinci invariantı,

$$I_1 = \sigma_{11} + \sigma_{22} + \sigma_{33} \quad (1.11)$$

ve J_2 (S_{ij}) deviatorik gerilme tensörünün ikinci invariantı olup,

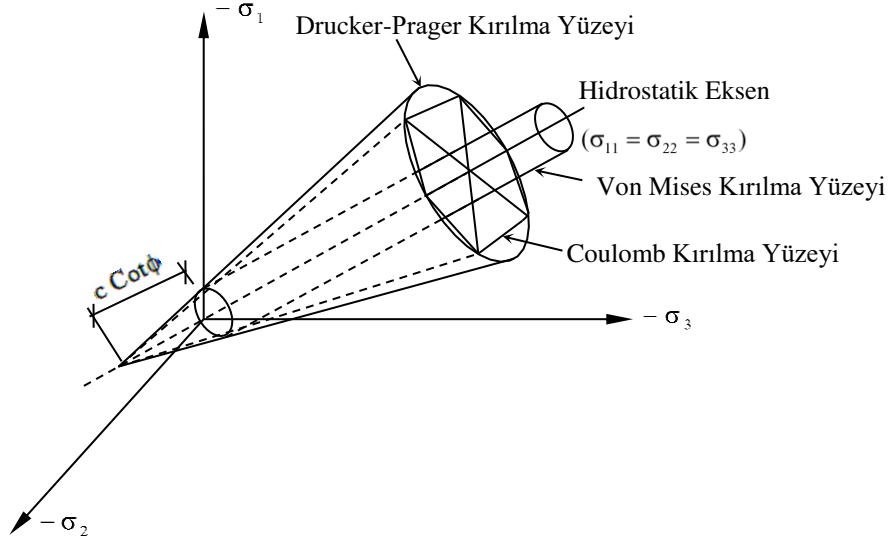
$$J_2 = \frac{1}{2} S_{ij} S_{ij} \quad (1.12)$$

ya da

$$J_2 = \frac{1}{6} [(\sigma_{11} - \sigma_{22})^2 + (\sigma_{22} - \sigma_{33})^2 + (\sigma_{33} - \sigma_{11})^2] + \sigma_{12}^2 + \sigma_{13}^2 + \sigma_{23}^2 \quad (1.13)$$

şeklinde yazılabilir.

Drucker-Prager kriteri için kırılma yüzeyi, Mohr-Coulomb kriterinin altıgen akma yüzeyinin köşelerine temas ederek çevreleyecek şekilde malzeme parametrelerine sahip bir koni biçimindedir [31]. Bu grafiksel gösterim malzemenin çekme ve basınçtaki davranışlarının farklı olduğunu göstermektedir. Şekil 1.1'de görülen σ_1 , σ_2 ve σ_3 büyüklükleri asal gerilmeleri temsil etmektedir.



Şekil 1.1. Coulomb, Drucker-Prager ve von Mises kırılma kriterleri [31]

1.3.3 Geometri Bakımından Non-Linear Davranış Formülasyonu

Yapılara etki eden kuvvetler, belli bir seviyenin altında kalması halinde yapının lineer davranışını değiştirmezler. Ancak, yük belirli bir seviyeye çıkınca malzemenin elastisite modülü ile yapı elemanının mesnetlenme şekli ve atalet momentlerine bağlı olarak yapı lineer olmayan davranış gösterebilir. Bu lineer olmama durumu, yapı elemanlarının ve buna bağlı olarak yapının rijitlik matrisinin yükün büyüklüğüne göre değişmesinden kaynaklanmaktadır. Rijitlik matrisindeki bu değişim geometrik rijitlik matrisi ve geometrik rijitlik matrisinin lineer rijitlik matrisiyle toplamına da sistem rijitlik matrisi denilmektedir. Bu tür lineer olmama durumunun hesaplara katılmasıyla yapılan analize ikinci mertebe hesabı veya geometri bakımından lineer olmayan analiz denilmektedir [32]. Lineer olmayan analizin zorunlu olduğu durumlarda rijitlik matrisi her yük adımında yeniden oluşturulur.

Büyük yerdeğiştirme yapan yapılarda kuvvet denge denklemleri yapının şekil değiştirmiş hali üzerinde yazılır. Bunun anlamı;

$$\{F\} = [K]\{U\} \quad (1.14)$$

şeklindeki lineer bağıntının artık geçerli olmadığıdır (Przemieniecki, 1968). Eleman matrisleri ve yük vektörleri güncellenmiş Lagrange formülasyonu kullanılarak elde edilmelidir. Bu durumda aşağıdaki ifade yazılabilir [33].

$$[\bar{\mathbf{K}}]\Delta \mathbf{u} = \{\mathbf{F}\} - \{\mathbf{F}^{nr}\} \quad (1.15)$$

Burada, $[\bar{\mathbf{K}}]$ tanjant rijitlik matrisi olup aşağıdaki gibi verilebilir.

$$[\bar{\mathbf{K}}] = [\mathbf{K}_E] + [\mathbf{K}_G] \quad (1.16)$$

Denklem (54)'te $[\mathbf{K}_E]$ başlangıç elastik rijitlik matrisi olup,

$$[\mathbf{K}_E] = \int [\mathbf{B}]^T [\mathbf{D}] [\mathbf{B}] dV \quad (1.17)$$

şeklinde verilebilir. Burada, $[\mathbf{D}]$ elastisite matrisini, $[\mathbf{B}]$ ise mevcut geometri için yerdeğiştirme-şekil değiştirme matrisini göstermektedir. $[\mathbf{K}_G]$ geometrik rijitlik katkısı olup,

$$[\mathbf{K}_G] = \int [\mathbf{G}]^T [\boldsymbol{\tau}_G] [\mathbf{G}] dV \quad (1.18)$$

ifadesi ile temsil edilmektedir. Burada, $[\mathbf{G}]$ şekil fonksiyonunun türev matrisi ve $[\boldsymbol{\tau}_G]$ mevcut $\{\boldsymbol{\sigma}\}$ Cauchy gerilmelerinin global kartezyen sistemdeki matrisini ifade etmektedir. $\{\mathbf{F}^{nr}\}$ Newton-Raphson geri çağırım kuvveti olup aşağıdaki gibi verilebilir.

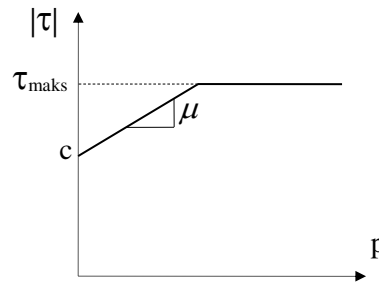
$$\{\mathbf{F}^{nr}\} = \int [\mathbf{B}]^T \{\boldsymbol{\sigma}\} dV \quad (1.19)$$

1.3.4 Temas Problemleri

İki ortam birbiriyle ayrık ya da temas halinde bulunabilir. Ortamlar arasında temas bulunması halinde aradaki davranış Coulomb sürtünme yasasına bağlı olarak elde edilmektedir. Temel Coulomb sürtünme modelinde, temas eden iki yüzey bir birine göre kayma hareketine başlamadan önce, arayüzeyleri boyunca belli bir kayma gerilmesi seviyesine kadar kayma gerilmesi taşıyabilirler (yapışık durum) [34]. Coulomb sürtünme modeli yüzeyde kaymanın P temas basıncının bir bölümü olarak başladığı bir τ eşdeğer kayma gerilmesi tanımlar. Bu gerilme,

$$\tau = \mu P + c \quad (1.20)$$

olarak ifade edilebilir [33]. Burada μ sürtünme katsayısını ve c kaymaya karşı mukavemeti temsil eder. Kayma gerilmesi bir kez aşıldı mı, iki yüzey bir diğerine göre rölatif olarak hareket eder (kayma durumu). Yapışma-kayma hesaplamaları bir noktanın yapışmadan-kaymaya ya da kaymadan-yapışmaya geçişini belirler. Sürtünme katsayısının 0 olması sürtünmesiz temas problemlerini işaret etmektedir. Pürüzlü ve bağlı temaslar için dinamik sürtünme katsayısı 1 olarak dikkate işleme alınır [35]. sonlu eleman yazılımında maksimum kayma gerilmesi (τ_{maks}) temas basıncından, bağımsız olarak tanımlanabilir. Eğer sürtünme gerilmesi bu değere ulaşırsa kayma oluşmaktadır. En büyük kayma gerilmesi ampirik formüller ile hesaplanabilir. Ayrıca, bu değer $\sigma_y / \sqrt{3}$ ifadesine de yaklaşabilir [33]. Burada σ_y , malzemenin deformasyona uğrayacağı akma gerilmesidir. Bir diğer sabit olan kohezyon da kayma gerilmesi gibi gerilme birimine sahiptir ve sıfır normal basıncı olsa bile kaymaya karşı mukavemet sağlar (Şekil 1.2).



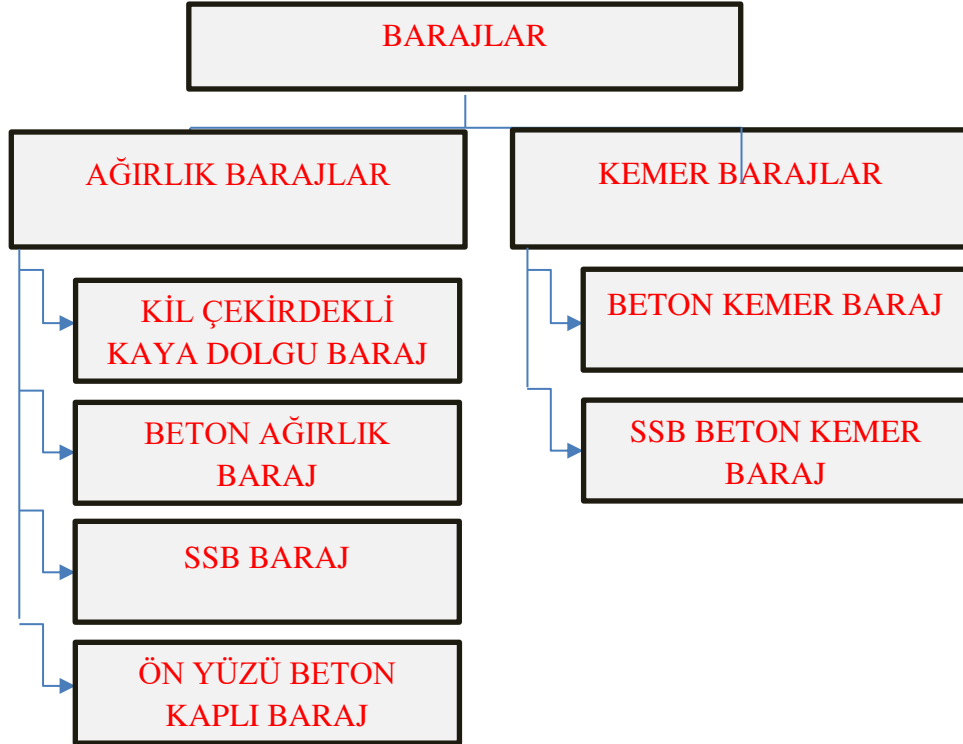
Şekil 1.2. Coulomb sürtünme yasasına göre temas durumunda kayma davranışı [33]

BÖLÜM 2

BARAJLAR

2.1 BARAJLAR

Barajlar, sıradan mühendislik yapıları değildir. Toplumun temel ihtiyaçlarının karşılanması ve standartlarının yükseltilmesi yönünde yaptığı katkıları yanında, canlı yaşam için önemli riskleri de taşımaktadır. Bu nedenledir ki, konuyla ilgili toplum duyarlılığının artırılması aşamasında yeterli çalışmanın yapılması zorunludur. Barajların boyutları büyüdükçe, en uygun yerlere barajlar yapıldığı için gittikçe daha az uygun yerlere baraj yapılması söz konusu olduğundan ve mevcut barajların ekonomik-teknik ömürleri dolduğundan, mühendislerin sorumluluğu da artmaktadır. Barajları aşağıda ki gibi kategorize edebiliriz:



Şekil 2.1. Baraj Türleri

2.2 SİLİNDİRLE SIKIŞTIRILMIŞ BETON (SSB) BARAJLAR

Silindirle sıkıştırılmış beton, sıkıştırılmasında vibrasyonlu silindirlerin kullanıldığı beton tipidir. SSB bir tasarım kriteri ya da tasarım teknolojisi değil. Sıfır slump'a sahip, toprak işlerinde kullanılan makinelerle taşınabilen, serilen ve sıkıştırılan betondan oluşan bir inşaat metodudur.

Sertleşmiş bir SSB'un bütün özellikleri diğer geleneksel betonlarla aynıdır. Ancak kütle betonlarında yerleştirme kolaylığından dolayı geleneksel betonlara göre bir çok avantajı vardır. Bunlar aşağıda sıralanmıştır;

- Düşük su içeriği nedeniyle birim ağırlığı daha yüksek beton oluşur,
- Düşük su içeriği nedeniyle daha az çimento içerir; dolayısıyla hidrasyon ısısı geleneksel betonlara göre daha düşüktür,
- Geniş alanlarda çok daha hızlı ve büyük hacimde yerleştirme imkanı sağlar,
- Bütün bu özellikleri bakımından geleneksel betonlara göre daha ekonomiktir.

Bu teknoloji Dünya'da birçok barajda başarıyla uygulanmıştır. Baraj teknolojisi olarak SSB seçilmesinin getirdiği yararlar aşağıda sıralanmıştır,

1) Dolgu tipteki barajlar ile karşılaştırıldığında,

- SSB olarak tasarlanan barajların gövde hacmi, kaya yada toprak dolgu barajlara göre çok daha düşüktür. Bu nedenle baraj gövdesine kullanılan malzeme miktarı azaltılarak kazı, dolgu ve taşıma maliyetleri düşürülebilir,
- Dolusavak baraj gövdesi üzerinde inşa edilebileceği için ayrıca bir dolusavak kazısı gerektirmeyecektir,
- Baraj temel kazısından çıkan malzeme SSB agregası olarak kullanılabilineceğinden atık malzeme miktarı azaltılarak ekonomi sağlanabilir,
- İnşaat yöntemi ve hacim azalması bakımından daha kısa sürede inşa edilebilmesi, inşaat süresince oluşan masraflardan tasarruf sağladığı gibi, daha erken işletmeye alınması sayesinde daha ekonomik olacaktır.

2) Geleneksel beton ağırlık barajlar ile karşılaştırıldığında,

- SSB çimento içeriği geleneksel betonlara göre daha düşük olduğundan çimento tasarrufu sağlanır,

- Beton, toprak işlerinde kullanılan makinelerle yerleştirileceğinden daha hızlı ve büyük hacimlerde yerleştirme imkanı sağlayacaktır, ayrıca daha az personel çalıştırılabileceğinden işçilik maliyetini azaltacaktır,
- SSB içerisinde ki su içeriği düşük olduğundan birim ağırlığı daha yüksek beton kullanılabilinecektir,
- Çimento içeriği düşük olduğu için hidratasyon ısısının yol açacağı çatlak riski ve buna karşı alınacak önlemler daha ekonomik olacaktır.

Günümüzde SSB barajlar, Dünya genelinde gelişmiş ve gelişmekte olan birçok ülkede inşa edilip işletmeye alınmıştır. Başta Çin ve Güney Afrika'da olmak üzere kemer SSB barajların sayısı da hızla artmaktadır.

Ülkemizde ilk olarak Karakaya Barajı memba batardosunda uygulanan SSB daha sonra Atatürk, Sır, Berke ve Kürtün barajlarının belirli yapılarında uygulanmıştır. Tamamı SSB olarak yapımı tamamlanan Cindere, Beydağ ve Çine Barajları başta olmak üzere birçok baraj SSB olarak projelendirilmiştir.

SSB teknolojisi sadece barajlarda değil havaalanları, yollar ve diğer kaplama işlerinde de başarıyla uygulanma imkanı bulmuştur. 1972 yılında Kaliforniya'da düzenlenen Asilomar Konferansında beton barajların daha hızlı ve ekonomik yöntemlerle inşa edilme ihtiyacı dile getirilmiştir. Sonrasında Dünya'nın bir çok yerinde yapılan sempozyum, konferans ve toplantılarda SSB baraj konusu irdelenmiştir. Bu fikrin temel amacı, toprak işlerinde kullanılan makinelerin hızı ve kolaylığı ile beton malzemesinin avantajları birleştirilerek yeni bir yapım yönteminin oluşturulmasıdır.

SSB'nin kullanıldığı ilk baraj projesi olarak, 1960-61 yıllarında Tayvan'da inşa edilen Shihmen Barajı'nın batardosu kayıtlara geçmiştir [36]. Bu yapıda en büyük tane çapı 76 mm olan geleneksel beton agregası, yine geleneksel beton santrallerinde 107 kg/m³ çimento içeriği ile işlenerek, kamyonlarla taşınmış, 30 cm tabakalar halinde serilmiş ve sıkıştırılmıştır. Karışımın su içeriği, modifiye proktor deneyi ile hesaplanan optimum nem içeriğine göre düzenlenmiştir. 1961-65 tarihleri arasında İtalya'da inşa edilen Alpe Gera Barajı'nda toprak işleri metoduyla taşınan beton, 70 cm kalınlığında tabakalar halinde serilmiş ve buldozernle monte edilen titreşimli vibratörlerle sıkıştırılmıştır [37].

SSB için önemli yapıtaşlarından biri de Pakistan'da bulunan Tarbela Barajı'nın 1974-86 yılları arasında yapılan rehabilitasyonudur. Bu projede yaklaşık 2.5 milyon m³ SSB kullanılmıştır [38]. SSB üretiminde, 150 mm en büyük tane çaplı dere yatağı agregası ve 134 kg/m³ çimento kullanılmıştır. Karışımın kamyonlarla taşınıp, dozerle serilmiş ve titreşimli silindirlerle sıkıştırılarak yerleştirilmiştir [39].

1974 yılında Japonya'da SSB araştırmalarına katılmış ve 1978 yılında tamamında SSB kullanılan, 89 m yüksekliğinde ki Shimajigawa Barajı inşaatına başlanmıştır [37]. Bu barajda kullanılan SSB, 80 mm en büyük tane çaplı agrega ve %30 u uçucu kül olan 130 kg/m³ bağlayıcıdan oluşmaktadır. Bu barajda kullanılan özel tekniğe RCD (Roller Compacted Dam) adı verilmiştir.

1974'te USACE (United States Army Corps of Engineers) tarafından Zintel Canyon rezervuarında bulunan dolgu baraj alternatif olarak SSB ağırlık baraj modeli geliştirildi, ancak bu baraj SSB olarak inşa edilmedi. Ardından yapılan çalışmalarda Willow Creek Barajı, 1982 yılında SSB olarak inşa edildi. Böylece RCD den farklı olarak SSB tekniği ile inşa edilen ilk baraj olma unvanını aldı.

Willow Creek Barajı, 51 m yüksekliğinde 300000 m³ hacminde, dik memba yüzü ve 0.8Y/1D eğiminde mansap yüzü özelliklerindedir. SSB'de 76 mm en büyük tane çaplı kırma agrega kullanılmıştır.

80'li yıllarda SSB barajların sayısı, bütün Dünya'da SSB teknolojisi geliştikçe aşamalı olarak artmıştır. Tamamlanmış SSB baraj sayısı 1990 yılı sonunda 65 iken, 1994 yılı sonunda 136, 1998 yılı sonunda 218, 2002 sonunda 263 ve 2006 yılı sonunda 323 olarak kaydedilmiştir. 2006 yılı itibari ile yapımı devam eden 61 barajda eklendiği zaman, Dünya üzerinde ki toplan SSB baraj sayısı 384 olarak belirtilmektedir.

2.2.1 Silindirle Sıkıştırılmış Beton Baraj Tasarımında Farklı Yöntemler

SSB baraj tasarımında, 1970'den günümüze kadar 3 farklı tasarım öne çıkmıştır. Bunları şöyle sıralayabiliriz:

➤ Amerika Birleşik Devletleri'nde USACE (United States Army Corps of Engineers) tarafından geliştirilen zayıf bağlayıcı içerikli SSB karışımlı barajlar

- İngiliz mühendisleri tarafından önerilen geleneksel betonu andıran zengin karışumlu SSB'nin toprak işleri makineleri ile işlenmesi ile inşa edilen SSB barajlar
- Japon araştırma grubu tarafından geliştirilen ve RCD (Roller Compacted Dam) olarak tanımlanan barajlar, olarak sıralanabilir.

2.2.2 SSB Barajların Kronolojisi

- 1964 yılında, 172 metre yüksekliğindeki Alpe Gera beton ağırlık barajının iç kesimleri, dolgu barajlar gibi, damperli kamyonlar, dozerler ve traktörlere monte edilen vibratörler kullanılarak, yatay tabakalar halinde inşa edilmiştir.
- 1970 yılında, Jerome Raphael tarafından “Optimum Gravity Dam (Optimum Ağırlık Baraj)” adında, toprak işleri makineleri kullanılarak beton ağırlık baraj yapımı konulu makale yayınlandı.
- 1970-73 yıllarında, Tennessee Valley Authority ve USACE tarafından, Tim Fords ve Lost Creek Barajları üzerine yapılan çalışmalarda SSB'nin ekonomik olarak yapılabilirliği kanıtlandı.
- 1974-75 yıllarında, Pakistan'daki Tarbela Barajı'nın çıkış tünelinin çöken düşü yatağı SSB ile hızlı şekilde onarılmıştır. Bu kapsamda 350000 m³ SSB 42 gün gibi çok kısa bir sürede yerleştirilmiştir.
- 1978 yılında, Japonya'da dört yıl süren araştırma çalışmaları sonunda, 89 metre yüksekliğinde ki Shimajigawa Barajı inşaatına başlanmıştır.
- 1978 yılında, İngiltere'de inşa edilen Wimbleshall Barajı'nda, zengin bağlayıcılı SSB de uçucu kül kullanımı ve lazer kontrollü kayar kalıp sistemi tam ölçekli olarak denenmiş ve başarıyla uygulanmıştır.
- 1980 yılında, Shimajigawa Barajı, Dünya'da tamamı SSB ile inşa edilen ilk baraj olarak kayıtlara geçmiştir.
- 1982 yılında, Willow Creek barajında ulaşılan 5 ayda 331000 m³ döküm başarısı, SSB nin hızlı ve ekonomik bir baraj yöntemi olduğunu doğrulamıştır.
- 1984 yılında, Avusturalya'da tasarlanan ve 10 ayda inşaatı tamamlanan 40 metre yüksekliğindeki Copperfield Barajı ile SSB Güney Yarımküre'de de uygulamaya başlandı.
- 1984 yılında, ABD'nin Kentucky Eyaleti'nde inşa edilen, 21 metre yüksekliğindeki Winchester Barajı önyüzünde , PVC membran kaplı öndökümlü beton paneller kullanılarak,

önyüzü geçirimsiz şekilde inşa edildi. Böylece SSB baraj tekniğinde “Concrete Faced RCC Dam (Ön Yüzü Beton SSB Baraj)” diye adlandırılacak teknik hayata geçirilmiş oldu.

- 1985 yılında, ABD’nin Teksas Eyaleti’nde inşa edilen 6.1 metre yüksekliğinde ki Kerville Barajı, tamamlanmasından 30 gün sonra 4.4 metrelik ve iki yıl sonra 4.9 metrelik taşkına maruz kalmasına rağmen, önemli bir tedbir alınmayan, korunmasız, baraj kretinde herhangi bir aşınma meydana gelmedi. Böylece SSB’nin erozyona karşı dayanımı kanıtlanmış oldu.
- 1988 yılında, Güney Afrika’da inşa edilen 50 metre yüksekliğindeki, Knellpoort Barajı, Dünya’da kemer ağırlık baraj tipinde inşa edilen ilk SSB baraj oldu.
- 1991 yılında, Japonya’da ,inşa edilen 155 metre yüksekliğindeki Myagase Barajı, Dünya’nın 150 metreden yüksek ilk RCD barajı oldu.
- 1993 yılında, Çin’de inşa edilen 75 metre yüksekliğindeki, Puding Barajı, Dünya’nın ilk çift kemer SSB barajı oldu.
- 2001 yılında, Çin’de, 216 metre yüksekliğindeki, Longtan SSB ağırlık barajının inşaatına başlandı [40].

2.3 ÇİNE SİLİNDİRLE SIKIŞTIRILMIŞ BETON BARAJININ İKİ BOYUTLU MODELİ

Yapılan bu tez çalışmasında Aydın İlinin Çine İlçesinde bulunan SSB barajı, yapılacak çalışma için uygulama modeli olarak seçilmiştir. Seçilen SSB barajını modellemek ve analizler yapmak için ANSYS programı kullanılmıştır. Modelin geometrisini oluşturmak için Çine barajından temin edilen baraj gövdesi projelerinden yararlanılarak barajın en elverişsiz yeri olan baraj gövdesinin orta kısmının iki boyutlu modeli oluşturulmuştur. Oluşturulan baraj modelinde barajın kret kısmında yer alan ovallik de dikkate alınmıştır. ANSYS programında barajın kret kısmındaki bu ovallik “spline” komutu ile sağlanmıştır. Ayrıca baraj gövdesinde bulunan tünellerin lokasyonları belirlenerek barajda ki boyutlarıyla birebir aynı geometriye sahip olacak şekilde baraj gövdesine yerleştirilmiştir. Oluşturulan iki boyutlu Çine barajı modelinde malzeme olarak barajda kullanılan malzemelerin gerçek mekanik özellikleri (elastisite modülü, poisson oranı, yoğunluğu, kohezyonu, içsel sürtünme açısı ve dilatasyon açısı) temin edilerek ANSYS yazılımına girilmiştir. Hazırlanan modellerde sınır şartları olarak ankastre sınır şartı seçilmiştir. Bu tez çalışmasında, baraj gövdelerinde mevcut olan galerilerin barajda oluşabilecek maksimum asal gerilme değerlerine etkisi statik ve dinamik analizler ile incelenmiştir. Mesh yoğunluğunun, baraj gövdesin de ki süreksizliğin meydana geldiği yani

galeriler etrafında ki gerilmeler üzerine etkisini de görebilmek için farklı mesh sıklığına sahip modeller oluşturulmuştur. Ayrıca baraj gövdesi-zemin arasında ki etkileşimin baraj yüksekliği boyunca oluşacak gerilmeler ve yatay yerdeğiştirmeler üzerine etkisini ve rezervuarın boş ve dolu durumlarının lineer ve lineer olmayan statik ve dinamik analizleri, Çine’de meydana gelen 181.52 saniyelik deprem kayıtları kullanılarak yapılmıştır.

Bu çalışmada, baraj gövdelerinde mevcut olan galerilerin etrafında baraj kesitinde ki süreksizlikten dolayı oluşabilecek gerilme büyüklüklerinin risk arz edip etmediğı ve barajın performans eğrileri farklı modeller oluşturularak irdelenmiştir. Ayrıca barajın statik analizi yapılarak ne kadar yerdeğiştirme yaptığında belirlenmiştir. Oluşturulan modellerde baraj-zemin etkileşiminin etkisini görebilmek için baraj gövdesi ile zemin gövdesi arasına temas-hedef eleman çiftleri tanımlanarak sürtünme etkisi dikkate alınmıştır. Sürtünmenin etkisini gözlemleyebilmek için aynı geometri ve malzeme özelliklerine sahip ancak zemin ile baraj gövdesi arasında temas-hedef eleman çiftlerinin olmadığı zeminle bitişik gibi düşünülerek tasarlanan modellerle sürtünmeli modellerden elde edilen gerilme ve şekil değıştirmenin değışimleri karşılaştırılmıştır. Ayrıca bu çalışmada incelenen diğeri bir konu ise süreksizliğin meydana geldiğı baraj kesitinde ki bölgelerdeki sonlu eleman ağı büyüklüğünün aynı noktalar üzerinde oluşacak gerilmelere etkisi incelenmiştir. Bu sebepten dolayı galeriler etrafında iki farklı sonlu eleman ağı yoğunluğu olan modeller oluşturularak elde edilen asal gerilmeler kıyaslanmıştır. Sürtünmeli, bitişik, sık ağı ve normal ağı için oluşturulan modellerde ki rezervuar suyunun etkisini de gözlemleyebilmek ve rezervuarın dolu ve boş olması durumlarını irdelemek için ayrı ayrı modellenerek baraj gövdesi yüksekliği boyunca oluşan asal gerilmeler ve yatay yerdeğiştirmeler elde edilmiştir.

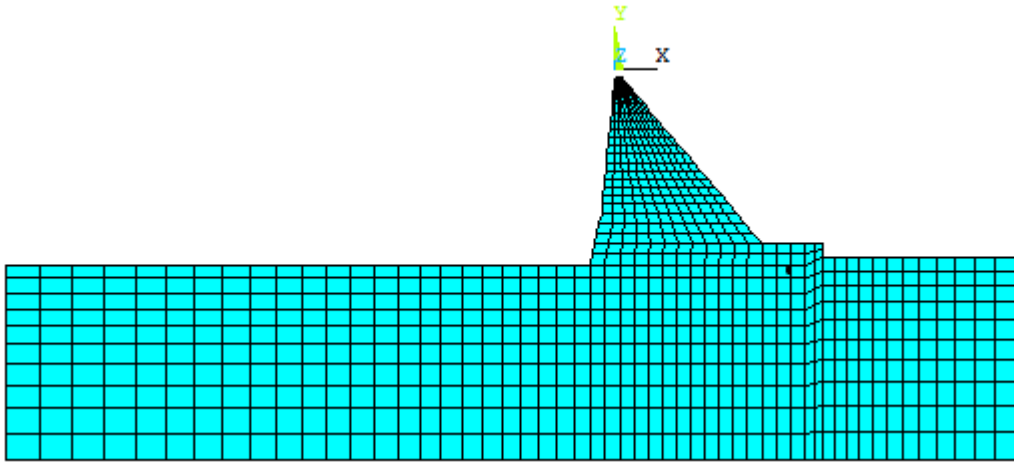
Yapılan statik lineer ve non-lineer analizlerde barajın belirli kotlarda ki deformasyon değışleri elde edilmiştir. Elde edilen bu yerdeğiştirme değışleri ile barajda ölçümle alınan aynı kotlarda ki noktalardan cihazlar ile gerçek yerdeğiştirmeleri karşılaştırılmış ve uyum içerisinde olduğı gözlenmiştir.

Barajın deprem açısından değışlendirmesinin yapılabilmesi için lineer ve non-lineer olmak üzere oluşturulan modeller de analizler yapılmıştır. Yapılan dinamik analizlerde kullanılan deprem kaydı olarak barajın lokasyonu göz önünde bulundurulduğundan o bölgede olmuş uzun süreli ve büyüklük değışeri olarak da kayıtlarda ki en büyük deprem seçilmiştir.

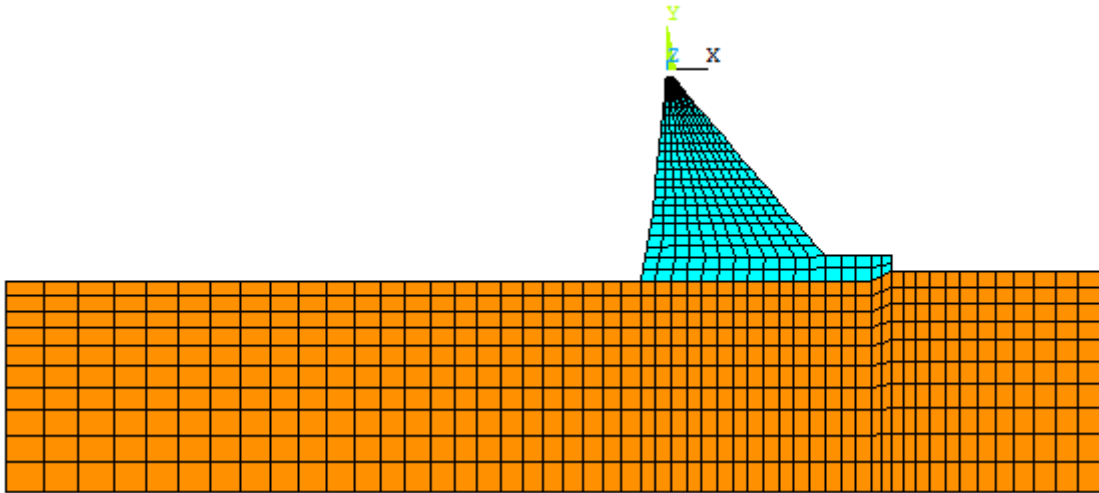
2.3.1 Çine Barajı İçin Oluşturulan Modeller

Barajı temsilen bu çalışmada toplam 12 farklı model oluşturulmuştur. Ancak dinamik analiz süresi çok uzun olduğundan bu tez çalışması için 12 farklı lineer ve 1 tane de non-lineer analiz tamamlanabilmiştir. Statik ve dinamik analizleri 13 model için tamamlanmıştır. Bu modelleri şöyle sıralayabiliriz:

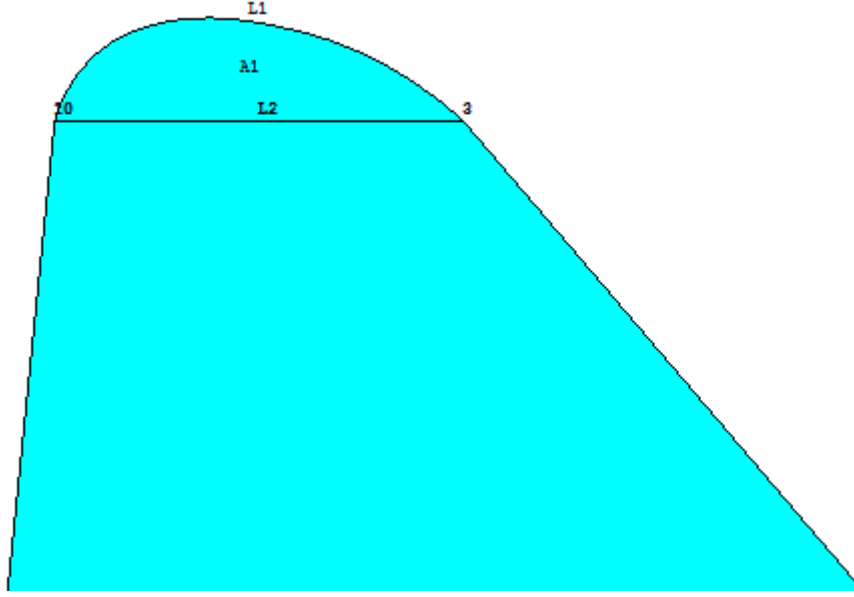
1) Boş Bitişik Model: Bu model zemin ile gövdenin birlikte, bütün olarak çalıştığını temsil etmektedir. Gövdede galeri bulunmamakta ve rezervuarın boş olması durumu dikkate alınmıştır. Bu modelde 899 düğüm noktası ve 814 eleman bulunmaktadır.



Şekil 2.2. Boş bitişik model sonlu eleman ağı

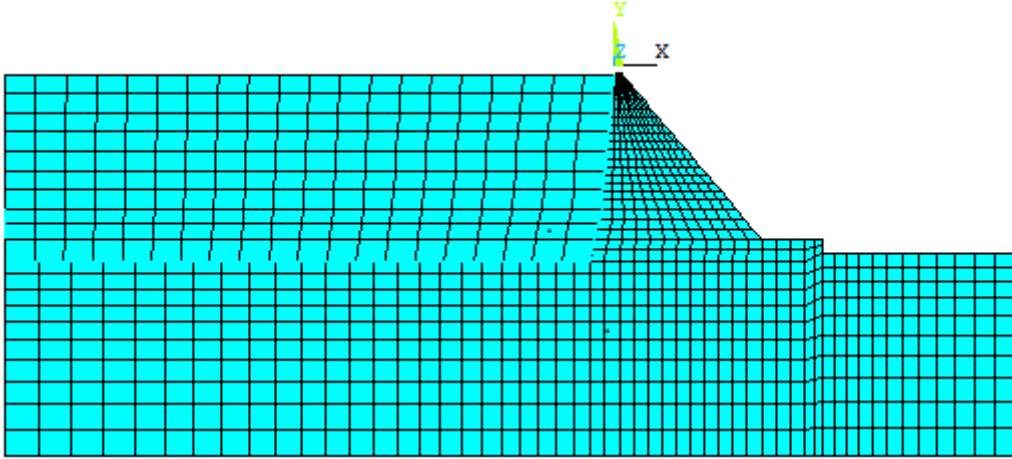


Şekil 2.3. Boş bitişik model kullanılan malzeme bakımından sonlu eleman ağı

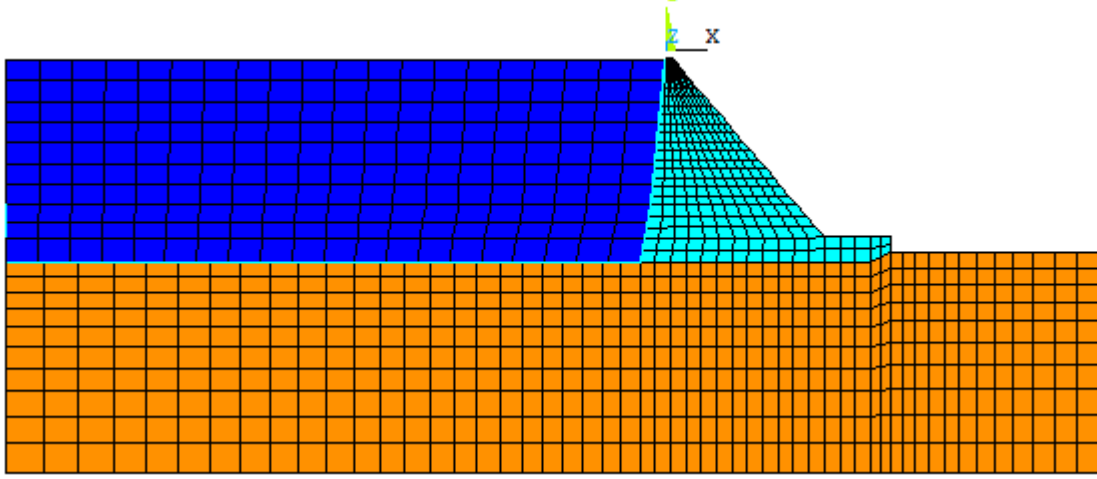


Şekil 2.4. Baraj kretinin iki boyutlu modeli.

2) Dolu Bitişik Model: Bu modelde baraj gövdesi ile gövdenin bir bütün olarak çalıştığı düşünülmüştür. Galeri bulunmamaktadır. Rezervuarın dolu olması durumu incelenmiştir. 1130 düğüm noktası ve 1070 elemandan oluşmaktadır. Su-zemin ve su-baraj gövdesi arasında temas eleman hedef çiftleri tanımlıdır.

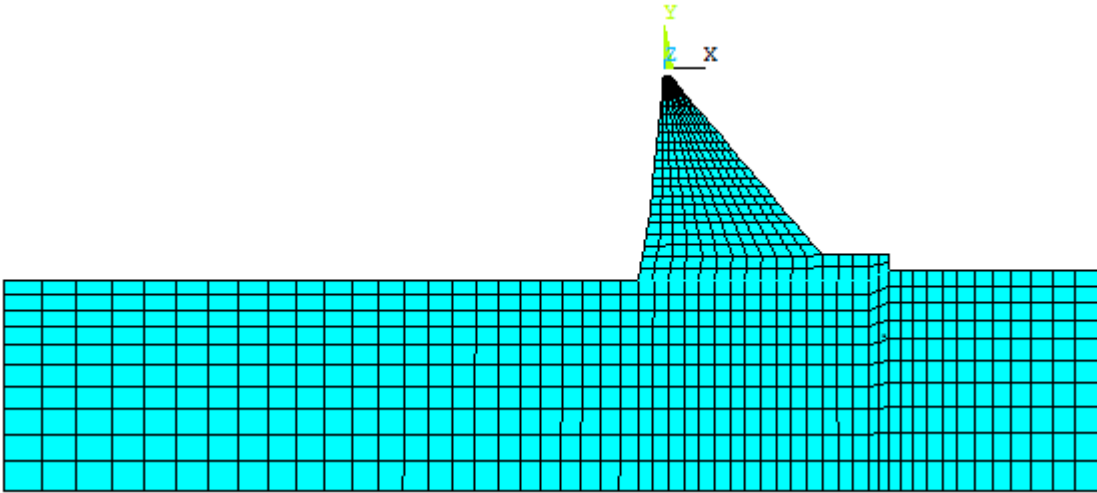


Şekil 2.5. Dolu bitişik model sonlu eleman ağı



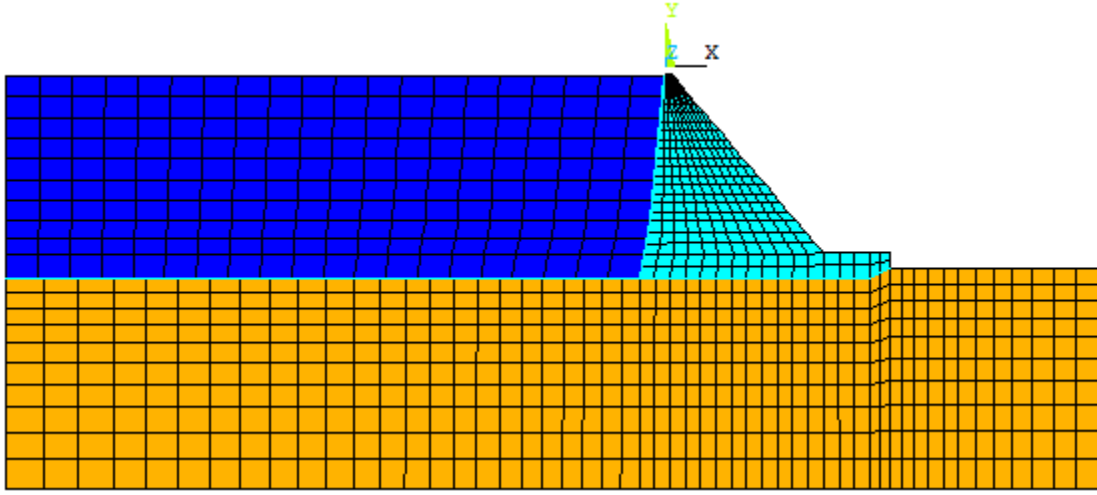
Şekil 2.6. Dolu bitişik model malzeme bakımından sonlu eleman ağı

3) Boş Sürtünmeli Model: Bu modelde baraj gövdesi ile zemin arasında sürtünme tanımlanarak yapı-zemin etkileşiminin, dinamik analiz sonucunda baraj gövdesinde oluşacak asal gerilmeler üzerine etkisi incelenmiştir. Bu model 917 tane düğüm noktası ve 848 tane elemandan oluşmaktadır.



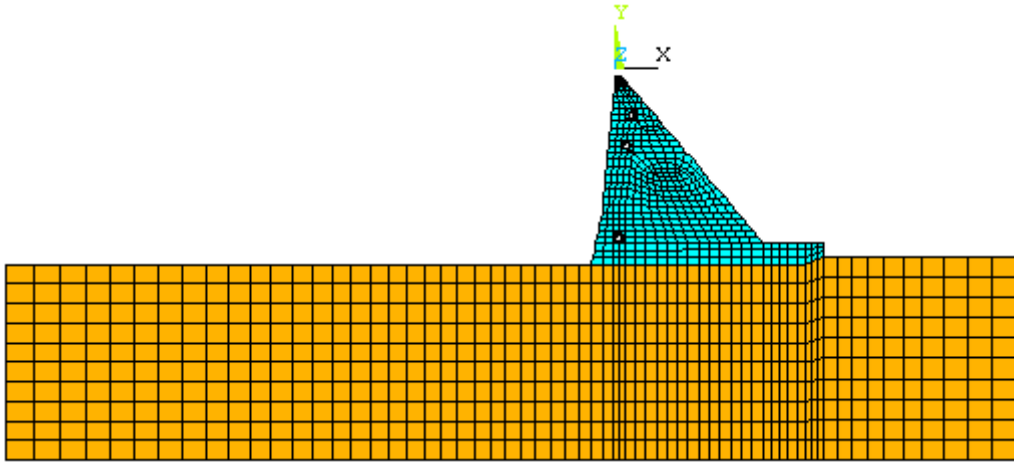
Şekil 2.7. Boş sürtünmeli model sonlu eleman ağı

4) Dolu Sürtünmeli Model: Bu modelde baraj gövdesi ile zemin arasında sürtünme tanımlanarak yapı-zemin etkileşiminin ve rezervuar suyu basıncının, dinamik analiz sonucunda baraj gövdesinde oluşacak asal gerilmeler üzerine etkisi incelenmiştir. Ayrıca su-zemin ve su baraj gövdesi arasına da temas hedef eleman çiftleri tanımlanarak birlikte çalışmaları sağlanmıştır. Bu model 1148 tane düğüm noktası ve 1123 tane elemandan oluşmaktadır.

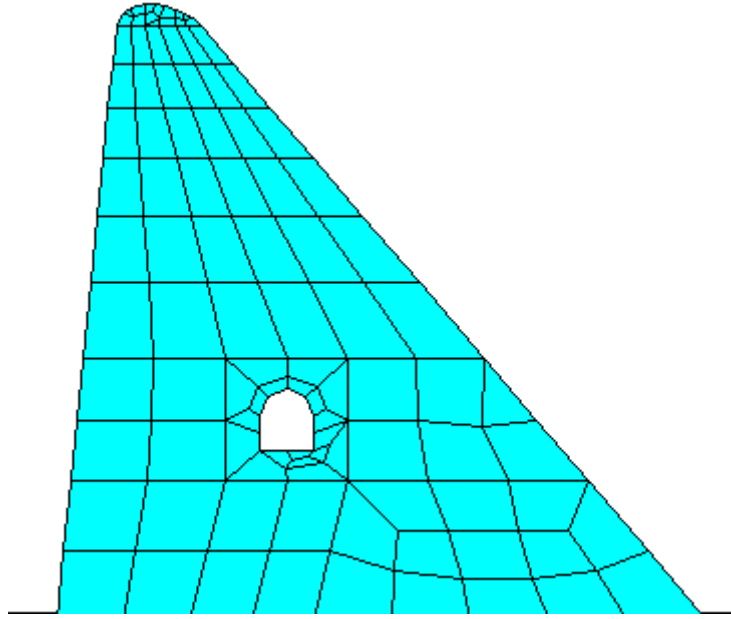


Şekil 2.8. Dolu sürtünmeli model sonlu eleman ağı

5) Galerili Boş Bitişik Model: Bu modelde baraj gövdesi ve zemin bütün olarak çalıştığı düşünülmektedir. Baraj gövdesinde bulunan tüneller mevcut oldukları gerçek koordinatlara göre modellenmiştir. Böylece yapılacak dinamik analizler sonucunda süreksizliğin meydana geldiği galeri boşluklarında özellikle maksimum-minimum asal gerilmeler üzerine bir etkisinin olup olmadığı araştırıldı. Bu modelde 1255 düğüm noktası ve 1154 eleman bulunmaktadır.

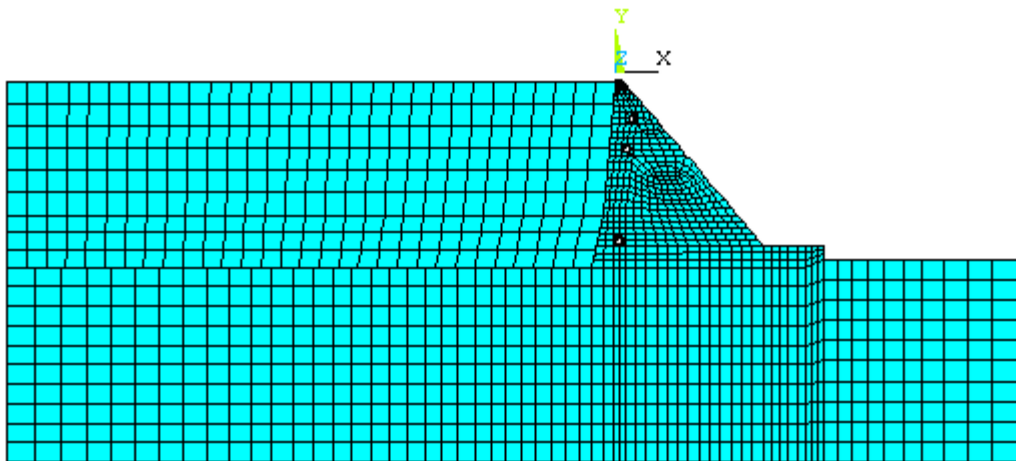


Şekil 2.9. Galerili boş bitişik model malzeme bakımından sonlu eleman ağı

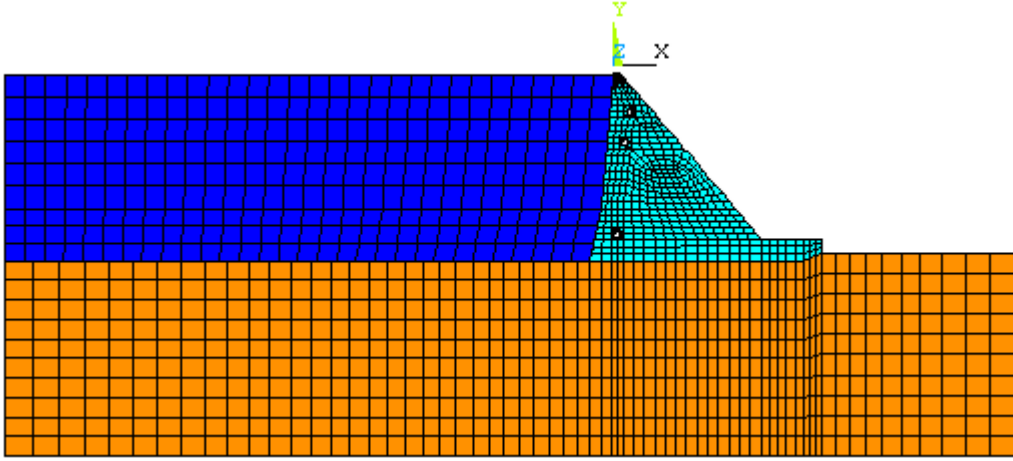


Şekil 2.10. Galerli etrafı sonlu eleman ağı

6) Galerli Dolu Bitişik Model: Oluşturulan bu modelde zemin- baraj gövdesi bitişik çalıştığı düşünülmektedir. Baraj gövdesi-rezervuar suyu arasında temas-hedef eleman çiftleri tanımlanarak sıvı ile yapının birlikte çalışması sağlanmıştır. Seçilen temas-hedef eleman çiftlerinde “no-separation” formu kullanılmıştır. Baraj gövdesinde modellenen galeriler etrafında oluşacak asal gerilme değerlerinin büyüklüklerinde ki değişen sonlu eleman ağı büyüklüğüne bağlı olarak değişimleri incelenecektir. Baraj rezervuar suyunun hidrodinamik etkisini dikkate alabilmek için dinamik analizlerde barajın tam dolu olması durumuna göre yapıldı. Bu model 1575 düğüm noktası ve 1424 elemana sahiptir.

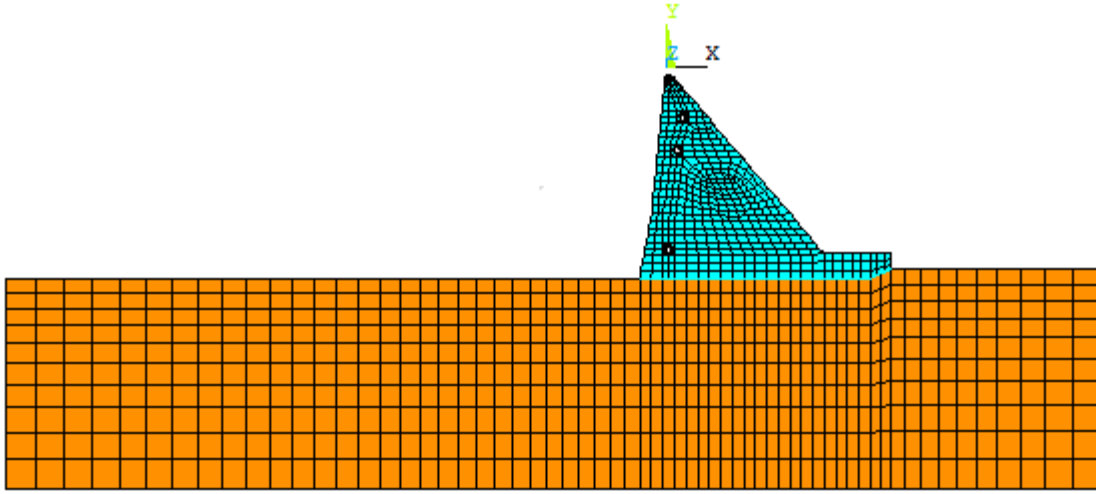


Şekil 2.11. Galerli dolu bitişik model sonlu eleman ağı



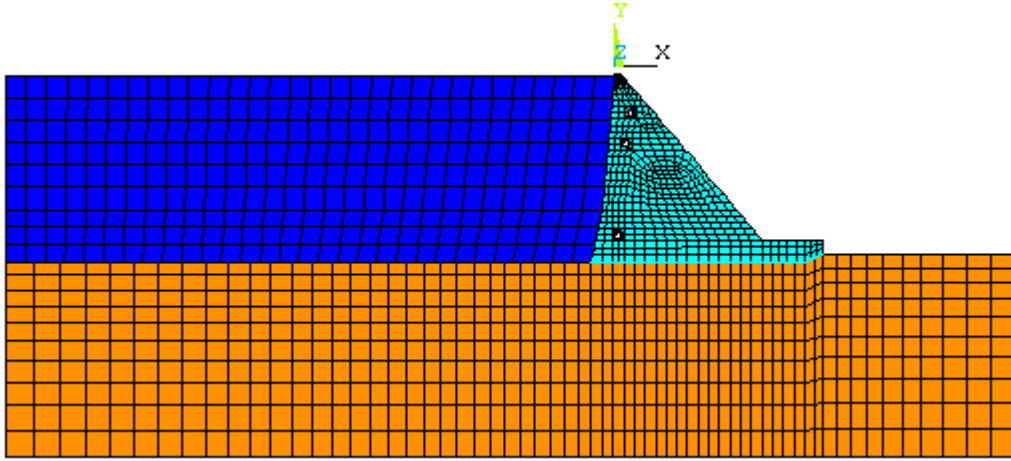
Şekil 2.12. Galerili dolu bitişik model malzeme bakımından sonlu eleman ağı

7) Galerili Boş Sürtünmeli Model: Bu modelde baraj gövdesi ile zemin arasında sürtünme tanımlanarak yapı-zemin etkileşiminin, dinamik analiz sonucunda baraj gövdesinde oluşacak asal gerilmeler üzerine etkisi incelenmiştir. Bu model 1258 tane düğüm noktası ve 1171 tane elemandan oluşmaktadır.



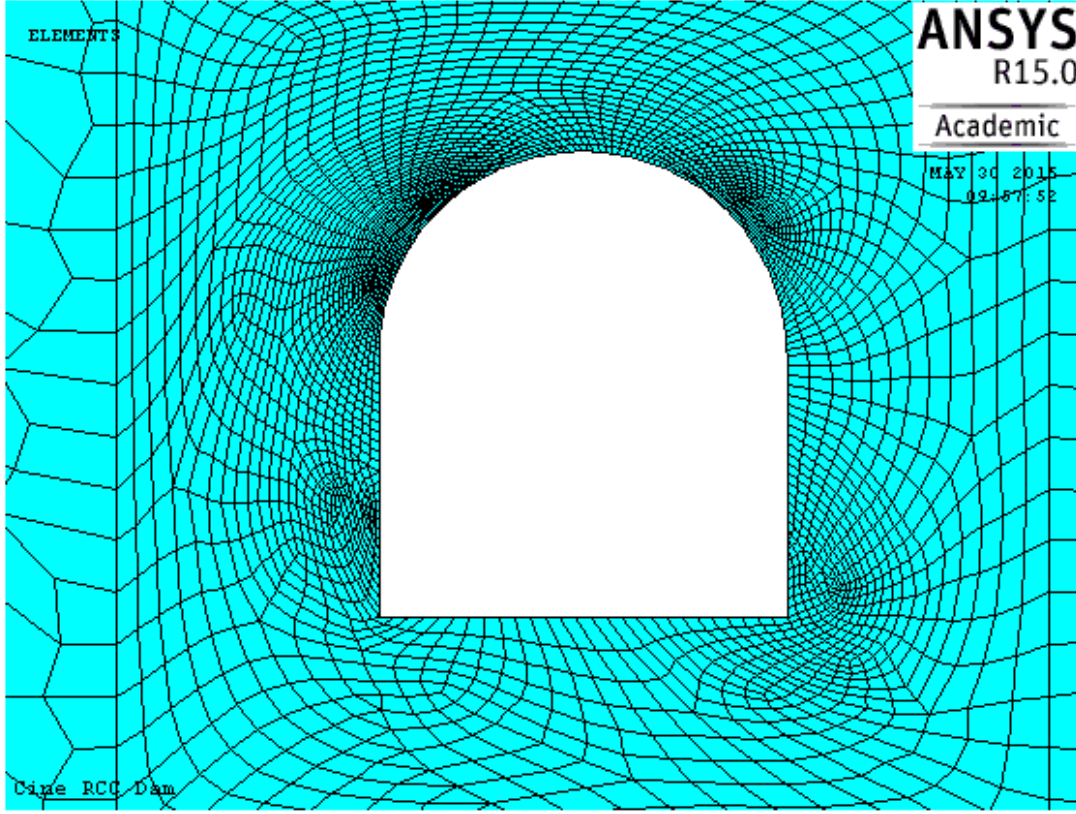
Şekil 2.13. Galerili boş sürtünmeli model malzeme bakımından sonlu eleman ağı

8) Galerili Dolu Sürtünmeli Model: Bu modelde baraj gövdesi ile zemin arasında sürtünme tanımlanarak yapı-zemin etkileşiminin ve rezervuar suyu etkisinin, dinamik analiz sonucunda baraj gövdesinde oluşacak asal gerilmeler üzerine etkisi incelenmiştir. Baraj gövdesi-rezervuar suyu arasında temas-hedef eleman çiftleri tanımlanarak sıvı ile yapının birlikte çalışması sağlanmıştır. Seçilen temas-hedef eleman çiftlerinde “no-separation” formu kullanılmıştır. Baraj gövdesinde modellenen galeriler etrafında oluşacak asal gerilme değerlerinin büyüklüklerinde ki değişen sonlu eleman ağı büyüklüğüne bağlı olarak değişimleri incelenecektir. Bu model 1568 tane düğüm noktası ve 1441 tane elemandan oluşmaktadır.

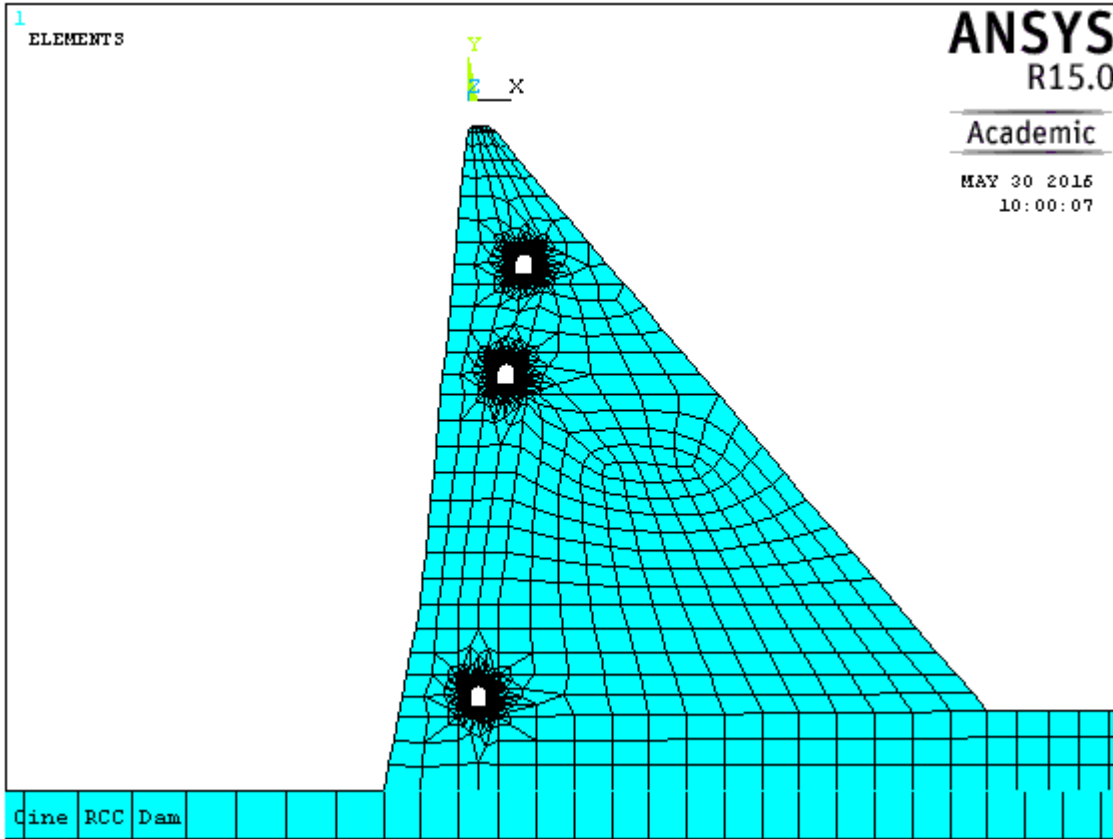


Şekil 2.14. Galerili dolu sürtülmeli model malzeme bakımından sonlu eleman ağı

9) Sık Ağ Galerili Boş Bitişik Model: Bu modelde baraj gövdesi ve zemin bütün olarak çalıştığı düşünülmektedir. Baraj gövdesinde bulunan tüneller mevcut oldukları gerçek koordinatlara göre modellenmiştir. Bu tünellerden dolayı baraj kesitinde oluşacak süreksizlikten dolayı gerilme değişimlerini daha iyi gözlemleyebilmek için galerilerin etrafı daha küçük sonlu eleman ağları ile çevrelenerek yapılacak analizlerde mesh yoğunluğunun gerilme üzerine etkisini de gözlemlemek mümkündür. Böylece yapılacak dinamik analizler sonucunda süreksizliğin meydana geldiği galeri boşluklarında özellikle maksimum-minimum asal gerilmeler üzerine bir etkisinin olup olmadığı araştırılmıştır. Bu modelde 8353 düğüm noktası ve 8086 eleman bulunmaktadır. Eleman ve düğüm noktası sayısında ki artış dinamik çözüm süresini doğrudan etkilemektedir. 181.52 saniyelik Çine depreminin kayıtları kullanılarak yapmış olduğum lineer dinamik analiz sadece bu model için 10 gün sürmektedir.

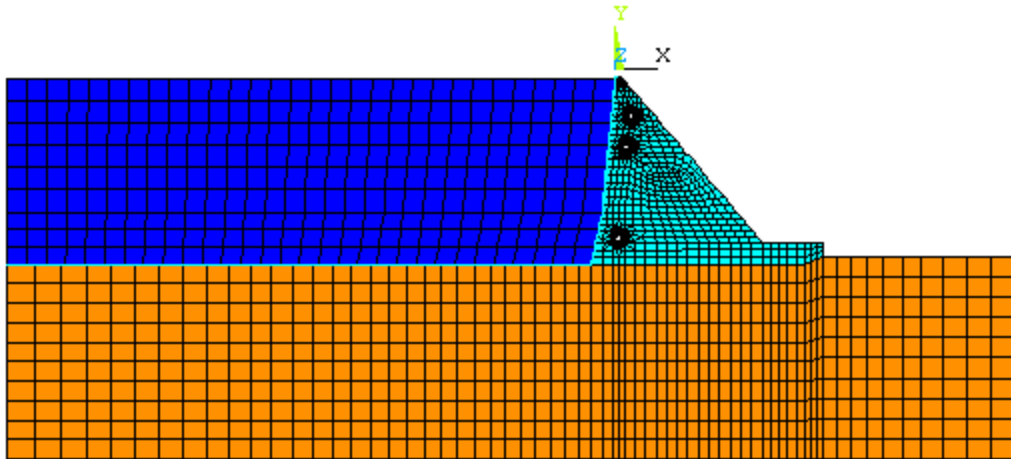


Şekil 2.15. Galeri etrafında yapılan sonlu eleman ağı sıklaştırması



Şekil 2.16. Sık mesh galerili boş bitişik model sonlu eleman ağı

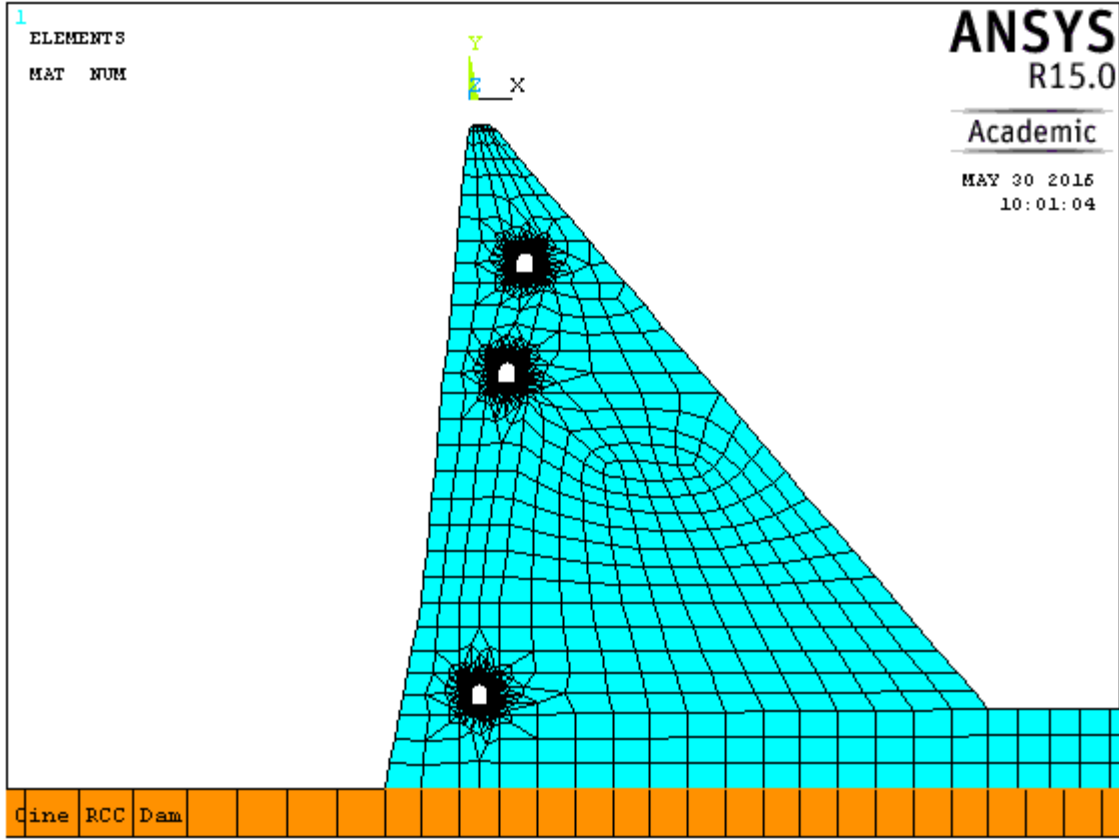
10) Sık Ağ Galerili Dolu Bitişik Model: Bu modelde baraj gövdesi ve zemin bütün olarak çalıştığı düşünülmektedir. Baraj gövdesinde bulunan galeriler mevcut oldukları gerçek koordinatlara göre modellenmiştir. Bu tünellerden dolayı baraj kesitinde oluşacak süreksizlikten dolayı gerilme değişimlerini daha iyi gözlemleyebilmek için tünellerin (galerilerin) etrafı daha küçük sonlu eleman ağları ile çevrelenerek yapılacak analizlerde mesh yoğunluğunun gerilme üzerine etkisini de gözlemlemek mümkündür. Böylece yapılacak dinamik analizler sonucunda süreksizliğin meydana geldiği galeri boşluklarında özellikle maksimum-minimum asal gerilmeler üzerine bir etkisinin olup olmadığı araştırılmıştır. Ayrıca bu modelde rezervuarın dolu olması durumu düşünülerek suyun dinamik analizlerde hidrodinamik basınç etkisini de dikkate alınmış olmaktadır. Burada rezervuar suyu-zemin ve rezervuar suyu-baraj gövdesi arasına temas hedef eleman çiftleri tanımlanarak suyun yapı ile birlikte çalışması sağlanmıştır. Kullanılan arayüz elemanlarda “no separation” formu seçilmiştir. Bu modelde 8663 düğüm noktası ve 8457 eleman bulunmaktadır. Eleman ve düğüm noktası sayısında ki artış dinamik çözüm süresini doğrudan etkilemektedir. 181.52 saniyelik Çine depreminin kayıtları kullanılarak yapılmış olduğum lineer dinamik analiz bu model için 10 gün sürmektedir. Malzeme parametrelerinde (elastisite modülü, poisson oranı, kohezyon, içsel sürtünme açısı, dilatasyon açısı ve yoğunluk) yapılan her bir değişim analizin tekrarlanmasına sebep olduğu gibi ANSYS yazılımında koşturulan bu modeller zaman adım aralığı açısından da bazen yakınsayamadığından zaman adım aralığını daha küçük aralıklara bölerek analizin tamamlanması sağlanmıştır.



Şekil 2.17. Sık mesh galerili dolu bitişik model malzeme bakımından sonlu eleman ağı

11) Sık Ağ Galerili Boş Sürtünmeli Model: Bu modelde baraj gövdesi ile zemin arasında sürtünme tanımlanarak yapı-zemin etkileşiminin, dinamik analiz sonucunda baraj gövdesinde oluşacak asal gerilmeler üzerine etkisi incelenmiştir. Ayrıca baraj gövdelerinde mevcut olan

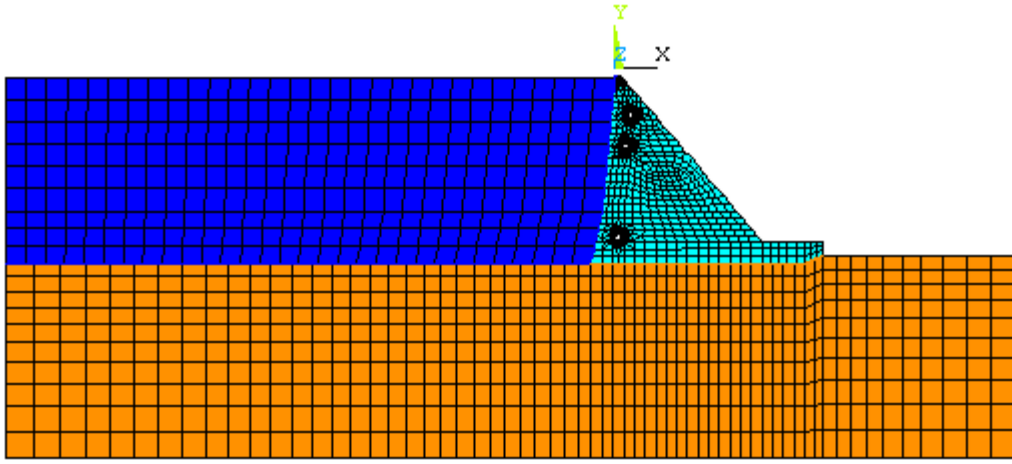
galeri etrafındaki sonlu eleman ağ yoğunluğu artırılarak bu bölgelerde oluşabilecek maksimum-minimum asal gerilmelerde ki değişimler gözlenmiştir. Bu model 8346 tane düğüm noktası ve 8103 tane elemandan oluşmaktadır.



Şekil 2.183. Sık mesh galerili boş sürtünmeli model malzeme bakımından sonlu eleman ağı

12) Sık Ağ Galerili Dolu Sürtünmeli Model: Bu modelde baraj gövdesi ve zemin arasına temas hedef eleman çiftleri tanımlanarak yapı-zemin etkileşimi incelenmiştir. Baraj gövdesinde bulunan tüneller mevcut oldukları gerçek koordinatlara göre modellenmiştir. Bu tünellerden dolayı baraj kesitinde oluşacak süreksizlikten dolayı gerilme değişimlerini daha iyi gözlemleyebilmek için tünellerin (galerilerin) etrafı daha küçük sonlu eleman ağları ile çevrelenerek yapılacak analizlerde mesh yoğunluğunun gerilme üzerine etkisini de gözlemlemek mümkündür. Böylece yapılacak dinamik analizler sonucunda süreksizliğin meydana geldiği galeri boşluklarında özellikle maksimum-minimum asal gerilmeler üzerine bir etkisinin olup olmadığı araştırılmıştır. Ayrıca bu modelde rezervuarın dolu olması durumu düşünülerek suyun dinamik analizlerde hidrodinamik basınç etkisini de dikkate almış olmaktadır. Burada rezervuar suyu-zemin ve rezervuar suyu-baraj gövdesi arasına temas hedef eleman çiftleri tanımlanarak suyun yapı ile birlikte çalışması sağlanmıştır. Kullanılan

arayüzey elemanlarda “no separation” formu seçilmiştir. Bu modelde 8657 düğüm noktası ve 8620 eleman bulunmaktadır. Eleman ve düğüm noktası sayısında ki artış dinamik çözüm süresini doğrudan etkilemektedir. 181.52 saniyelik Çine depreminin kayıtları kullanılarak yapmış olduğum lineer dinamik analiz bu model için 10 gün sürmektedir. Malzeme parametrelerinde (elastisite modülü, poisson oranı, kohezyon, içsel sürtünme açısı, dilatasyon açısı ve yoğunluk) yapılan her bir değişim analizin tekrarlanmasına sebep olduğu gibi ANSYS yazılımında koşturulan bu modeller zaman adım aralığı açısından da bazen yakınsayamadığından zaman adım aralığını daha küçük aralıklara bölerek analizin tamamlanması sağlanmıştır.



Şekil 2.19. Sık mesh galerili dolu sürtünmeli model malzeme bakımından sonlu eleman ağı

2.3.2 Çine Barajı İçin Oluşturulan Modellerin Malzeme ve Geometrik Özellikleri

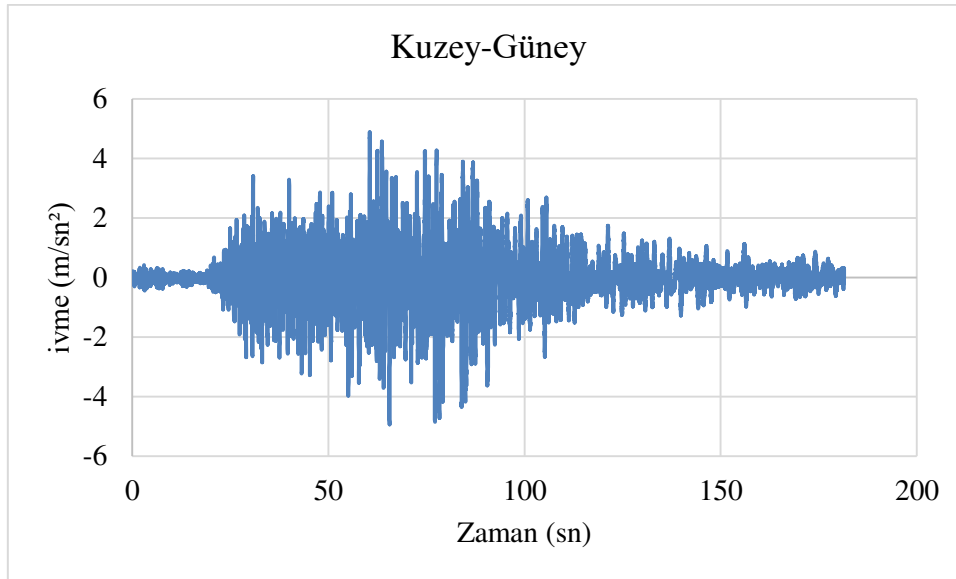
Çine barajının oluşturulan modellerinde baraj gövdesinde kullanılan betonun elastisite modülü değeri 25 GPa, poisson oranı değeri 0.15 ve birim hacim ağırlığı 2.5 tf/m^3 olarak barajdan elde edilen malzemenin gerçek parametre değerleri kullanılmıştır. Bu parametreler lineer ve non-lineer analizlerde için aynıdır.

Betonun sönüm oranı değeri olarak %4 alınmıştır. Çine Barajının bulunduğu bölgenin genel kayaç yapısı gnays olduğu belirlendiğinden analizlerde barajdan gelen gnays malzemesinin mekanik özellikleri kullanılmıştır. Zemine tanımlanan gnays kayasının sönüm oranı %7'dir. Elastisite modülü statik analizlerde 10 GPa, dinamik analizlerde 17.5 GPa olarak alınmıştır. Zemine tanımlanan kayaç elemanın poisson oranı 0.15 ve yoğunluğu 2.5 tf/m^3 dür. Yapılan dinamik analizlerde zeminin kohezyon değeri 4 MPa'dır. Zeminin içsel sürtünme açısı 39 derece iken dilatasyon açısı 9 derecedir. Yapılan non-lineer dinamik analizlerde betonun

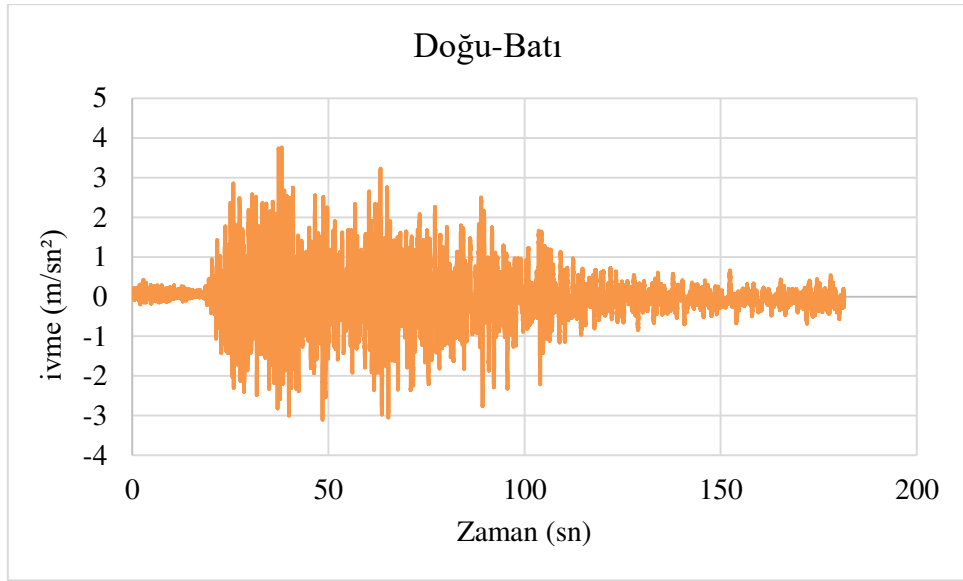
kohezyon değeri 800 KPa, içsel sürtünme açısı 41 derece ve dilatasyon açısı ise 11 derecedir. SSB barajlar için beton kohezyon değeri USACE'nin önerdiği değer aralığından belirlenmiştir. USACE'ye (referans) göre SSB barajlarda betonun kohezyon değeri 900 KPa'dan büyük alınamaz. Yapılan modellerde baraj boyunun üç katı kadar memba tarafına doğru ve baraj boyu kadar da mansap tarafına doğru zemin uzatılarak modelleme yapılmıştır. Baraj yüksekliği kadarda baraj topuk noktasından aşağıya inilerek zeminin yüksekliği oluşturulmuştur.

2.3.3 Dinamik Analizlerde Kullanılan Deprem Kaydı

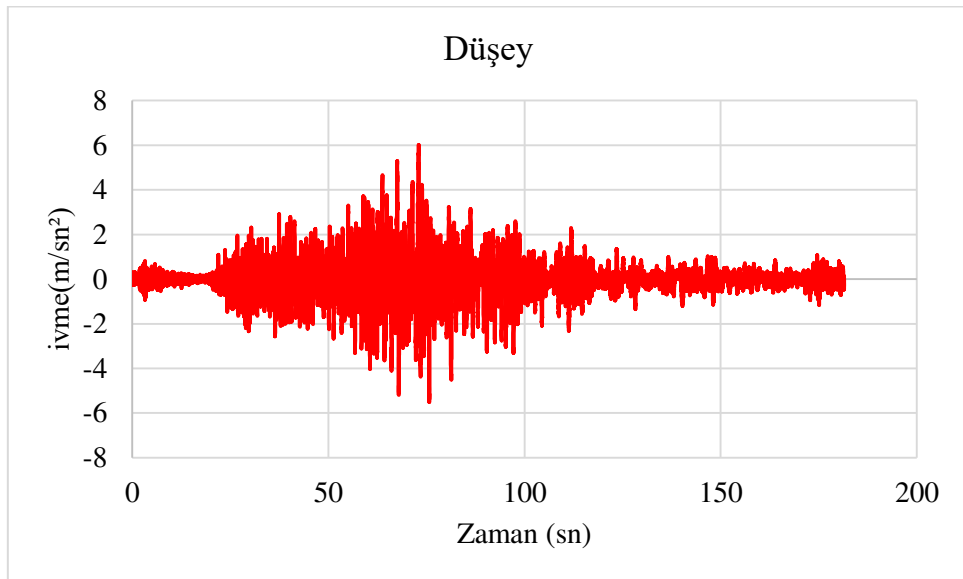
Aydın İlinin Çine İlçesinde 2015/04/16 tarihinde, saat 18:07:37'da merkez üssü 34.86430 kuzey enleminde ve 26.72750 doğu boylamında meydana gelen deprem 181.52 saniye sürmüştür. Depremi derinliği 12.34 km olarak ölçülmüştür. Büyüklüğü ise 5.9 M_w (moment büyüklüğü) olarak belirlenmiştir. Deprem kaydın alındığı istasyon 37.60520 kuzey enlemi ve 28.05840 doğu boylamında bulunmaktadır. Yapılan bu çalışmada depremin kuzey-güney ve düşey doğrultudaki bileşenleri kullanılmıştır. Deprem kaydında ki zaman adım aralığı 0.01'dir. Kullanılan depremin ivme-zaman grafikleri aşağıda verilmektedir:



Şekil 2.20. Kuzey-güney doğrultusu ivme-zaman kaydı



Şekil 2.21. Doğu-batı doğrultusu ivme-zaman kaydı



Şekil 2.22. Düşey doğrultu ivme zaman kaydı

BÖLÜM 3

ANALİZ SONUÇLARI

Oluşturulan modeller ile yapılan statik ve dinamik analizlerde, baraj yüksekliği boyunca oluşan asal gerilme ve deformasyon değerleri irdelenmiştir. Bunun yanı sıra barajın modal davranışı da irdelenmiştir.

3.1 STATİK ANALİZ SONUÇLARI

Yapılan non-lineer statik analizlerde baraj modellerinin 147.5 metre ve 184.5 metre kotundaki yatay ve düşey yerdeğiştirme değerleri aşağıda verilmektedir.

1) Sık ağ galerili boş bitişik model için yapılan statik analizlerde zemin elastisite modülünün 1E7 KPa olarak alındığında 147.5 metre ve 184.5 metre kotundaki yatay ve düşey yerdeğiştirme değerleri:

147.5 m için 1.14 cm

184.5 m için 1.15 cm elde edilmiştir.

Sık ağ galerili boş bitişik model için yapılan non-lineer statik analizlerde zemin elastisite modülünün 0.9E7 KPa olarak alındığında 147.5 metre ve 184.5 metre kotundaki yatay ve düşey yerdeğiştirme değerleri:

147.5 m için 1.19 cm

184.5 m için 1.31 cm elde edilmiştir.

2) Sık ağ galerili boş sürtünmeli model için yapılan non-lineer statik analizlerde zemin elastisite modülünün 1E7 KPa olarak alındığında 147.5 metre ve 184.5 metre kotundaki yatay ve düşey yerdeğiştirme değerleri:

147.5 m için 1.16 cm

184.5 m için 1.22 cm elde edilmiştir.

Sık ağ galerili boş sürtünmeli model için yapılan non-lineer statik analizlerde zemin elastisite modülünün 0.9E7 KPa olarak alındığında 147.5 metre ve 184.5 metre kotundaki yatay ve düşey yerdeğiştirme değerleri:

147.5 m için 1.23 cm

184.5 m için 1.21 cm elde edilmiştir.

3.2 MODAL ANALİZ SONUÇLARI

Sık ağ galerili boş bitişik model için yapılan modal analiz sonuçlarında elde edilen frekans değerleri ve bu baraj için daha önce yapılmış olan bir çalışmadan elde edilen frekans değerleri ile kıyaslanarak hata payı ölçülmüştür. Zemin elastisite modülünün iki farklı değeri için frekans değerleri incelenmiştir. Sık ağ galerili boş bitişik modelde zemin elastisite modülü değeri 1E7 KPa alındığı zaman elde edilen değerler aşağıda verilmektedir:

Çizelge 3.1. Modal Analiz Sonuçları

Mod sayısı	Elde edilen frekans	Ölçülen frekans	Hata payı (%)
1	2.19396	2.08522	4.956334664
2	3.74992	4.68859	-25.03173401
3	5.01278	5.12432	-2.225112612
4	8.92389	9.0173	-1.046740827
5	11.9597	12.4026	-3.703270149
6	13.4723	13.957	-3.597752425
7	14.1677	14.3552	-1.323432879
8	15.8681	15.9162	-0.303123877
9	18.4658	17.4757	5.361803984
10	19.4537	19.1155	1.738486766
11	19.8941	20.4614	-2.851599218
12	23.5928	22.2144	5.842460412
13	24.2285	22.8091	5.858389913
14	26.2728	23.8712	9.141012758
15	27.4927	24.7433	10.00047285
16	28.3774	25.412	10.44986503
17	29.6056	26.5261	10.40174832
18	30.7168	27.186	11.49468695
19	32.379	27.9674	13.62488032
20	33.017	28.7513	12.91970803
21	33.5519	29.6407	11.65716398
22	35.3649	30.0424	15.05023342
23	37.9077	30.8475	18.62471213
24	38.1557	31.8349	16.56580799
25	39.6597	32.4394	18.20563443

Sık ağ galerili boş bitişik modelde zemin elastisite modülü değeri 0.9E7 kPa alındığı zaman elde edilen frekans değerler aşağıda verilmektedir:

Çizelge 3.2. Modal Analiz Sonuçları

Mod sayısı	Elde edilen frekans	Ölçülen frekans	Hata payı(%)
1	2.11854	2.08522	1.572781255
2	3.59002	4.68859	-30.60066518
3	4.8635	5.12432	-5.362804565
4	8.7582	9.0173	-2.958370441
5	11.7449	12.4026	-5.599877394
6	13.2613	13.957	-5.246092012
7	13.9866	14.3552	-2.635379578
8	15.6062	15.9162	-1.986390024
9	18.2957	17.4757	4.481927447
10	19.3296	19.1155	1.10762768
11	19.6703	20.4614	12.91390728
12	23.4956	22.2144	7.390222244
13	23.9871	22.8091	12.54246517
14	26.0802	23.8712	12.72658141
15	27.3522	24.7433	12.46205662
16	28.2658	25.412	13.50019232
17	29.3781	26.5261	13.30518252
18	30.5971	27.186	15.45274733
19	32.1548	27.9674	14.93401222
20	32.8773	28.7513	13.85610575
21	33.3759	29.6407	15.84128336
22	35.22	30.0424	20.4617299
23	37.771	30.8475	18.79522893
24	37.9873	31.8349	16.19593917
25	39.5515	32.4394	17.98187174

Sık ağ galerili boş sürtünmeli model için yapılan modal analiz sonuçlarında elde edilen frekans değerleri ve bu baraj için daha önce yapılmış olan bir çalışmadan elde edilen frekans değerleri ile kıyaslanarak hata payı ölçülmüştür. Zemin elastisite modülünün iki farklı değeri için frekans değerleri incelenmiştir. Sık ağ galerili boş bitişik modelde zemin elastisite modülü değeri 1E7 kPa alındığı zaman elde edilen değerler aşağıda verilmektedir:

Çizelge 3.3. Modal analiz sonuçları

Mod sayısı	Elde edilen frekans	Ölçülen frekans	Hata payı(%)
1	1.97645	2.08522	-5.503301374
2	3.61669	4.68859	-29.63759681
3	4.93922	5.12432	-3.747555282
4	8.76246	9.0173	-2.908315701
5	11.8905	12.4026	-4.306799546
6	13.3636	13.957	-4.440420246
7	14.0778	14.3552	-1.970478342
8	15.5201	15.9162	-2.552174277
9	18.199	17.4757	3.974394197
10	19.0827	19.1155	-0.171883434
11	19.3769	20.4614	12.91390728
12	23.0184	22.2144	7.390222244
13	24.0615	22.8091	12.54246517
14	26.147	23.8712	12.72658141
15	27.3651	24.7433	12.46205662
16	28.3227	25.412	13.50019232
17	29.335	26.5261	13.30518252
18	29.4296	27.186	15.45274733
19	31.9707	27.9674	14.93401222
20	32.726	28.7513	13.85610575
21	33.1201	29.6407	15.84128336
22	35.2043	30.0424	20.4617299
23	37.0008	30.8475	18.79522893
24	37.833	31.8349	15.85414849
25	39.5466	32.4394	17.97170933

Sık ağ galerili boş sürtünmeli modelde zemin elastisite modülü değeri 1E7 kPa alındığı zaman elde edilen frekans değerler aşağıda verilmektedir:

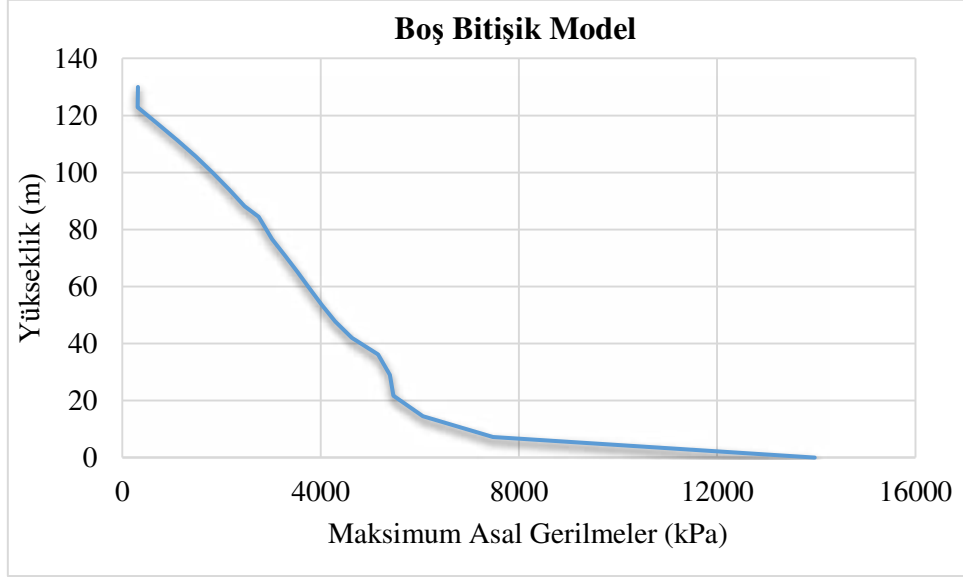
Çizelge 3.4. Modal analiz sonuçları

Mod sayısı	Elde edilen frekans	Ölçülen frekans	Hata payı(%)
1	2.03489	2.08522	-2.47335
2	3.66929	4.68859	-27.7792
3	5.11382	5.12432	-0.20533
4	9.31521	9.0173	3.198103
5	12.6006	12.4026	1.571354
6	14.2229	13.957	1.86952
7	15.11	14.3552	4.995367
8	16.6068	15.9162	4.158537
9	19.5144	17.4757	10.44716
10	20.7127	19.1155	7.711211
11	20.948	20.4614	2.322895
12	24.9794	22.2144	11.06912
13	25.9703	22.8091	12.17237
14	28.287	23.8712	15.6107
15	29.7392	24.7433	16.79904
16	30.7801	25.412	17.44016
17	31.804	26.5261	16.59508
18	32.0715	27.186	15.23315
19	34.7232	27.9674	19.45616
20	35.5904	28.7513	19.21614
21	36.0753	29.6407	17.83658
22	38.2946	30.0424	21.54925

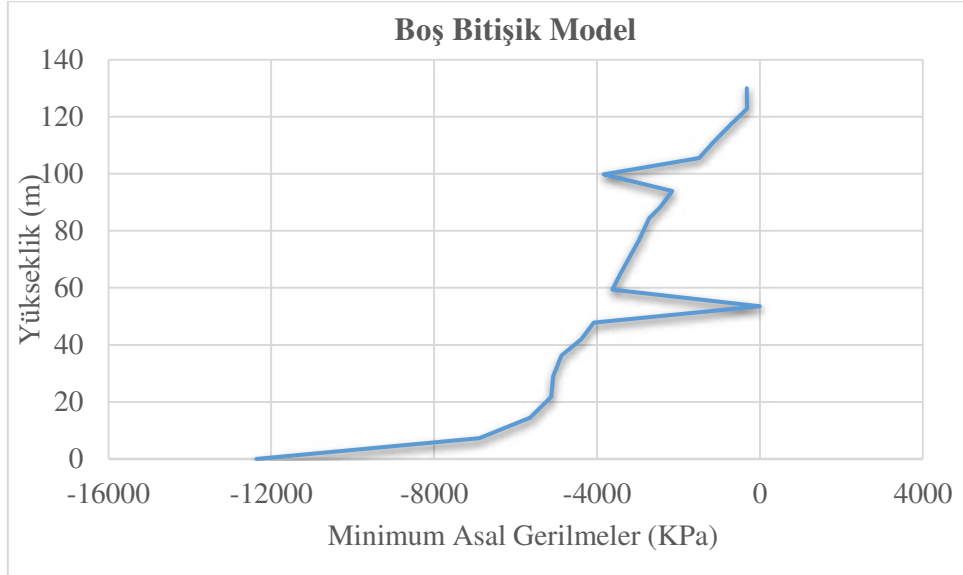
3.3 DİNAMİK ANALİZ SONUÇLARI

1) Boş Bitişik Model Lineer Dinamik Analiz:

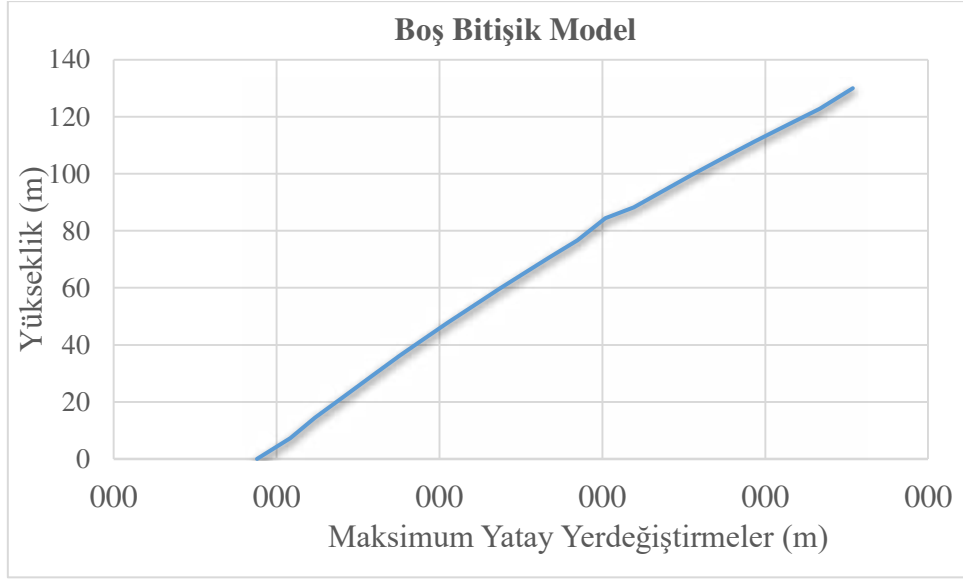
Bu analiz sonucunda baraj yüksekliği boyunca barajda oluşan asal gerilmenin maksimum ve minimum değerleri ile birlikte yerdeğiştirme değerleri aşağıda verilmektedir:



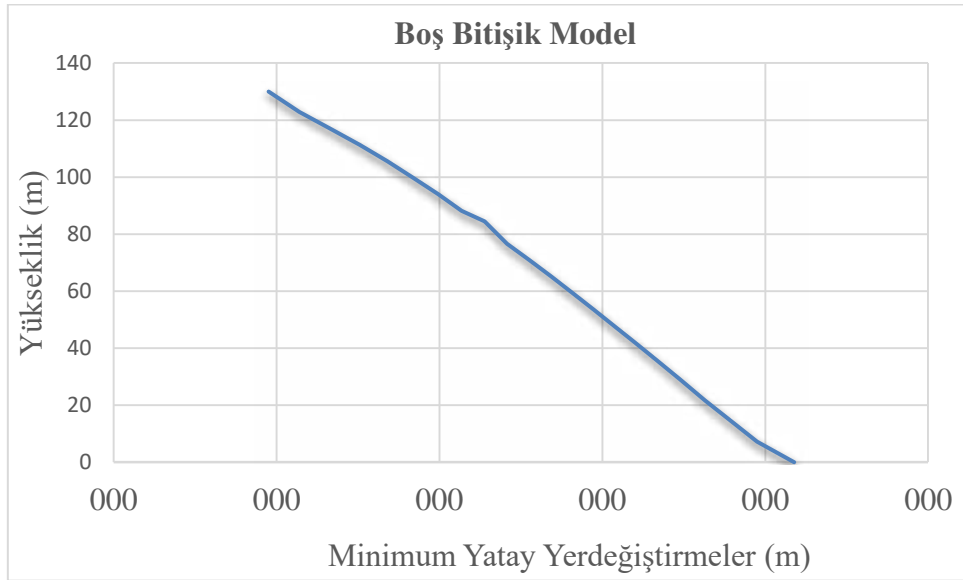
Şekil 3.1. Boş Bitişik Model maksimum asal gerilme değerlerinin yükseklikle değişimi



Şekil 3.2. Boş Bitişik Model minimum asal gerilme değerlerinin yükseklikle değişimi



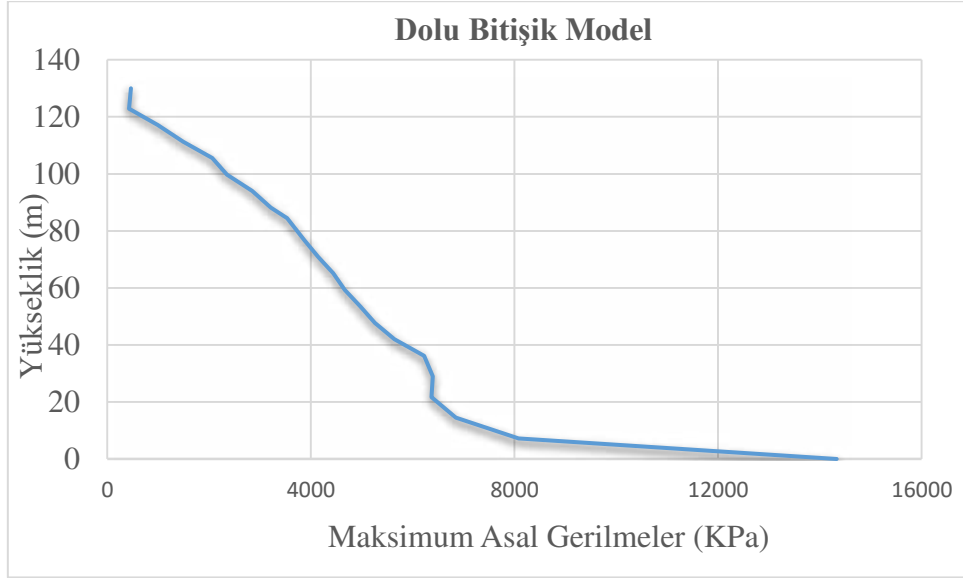
Şekil 3.3. Boş Bitişik Model baraj yükseklik boyunca maksimum yerdeğiştirme değerleri



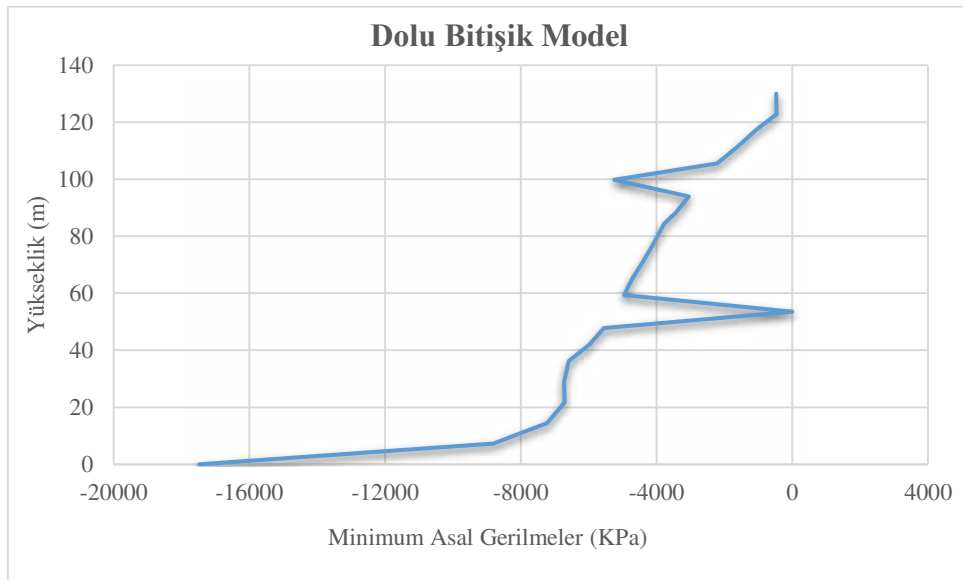
Şekil 3.4. Boş Bitişik Model baraj yükseklik boyunca minimum yerdeğiştirme değerleri

2) Dolu Bitişik Model Lineer Dinamik Analiz:

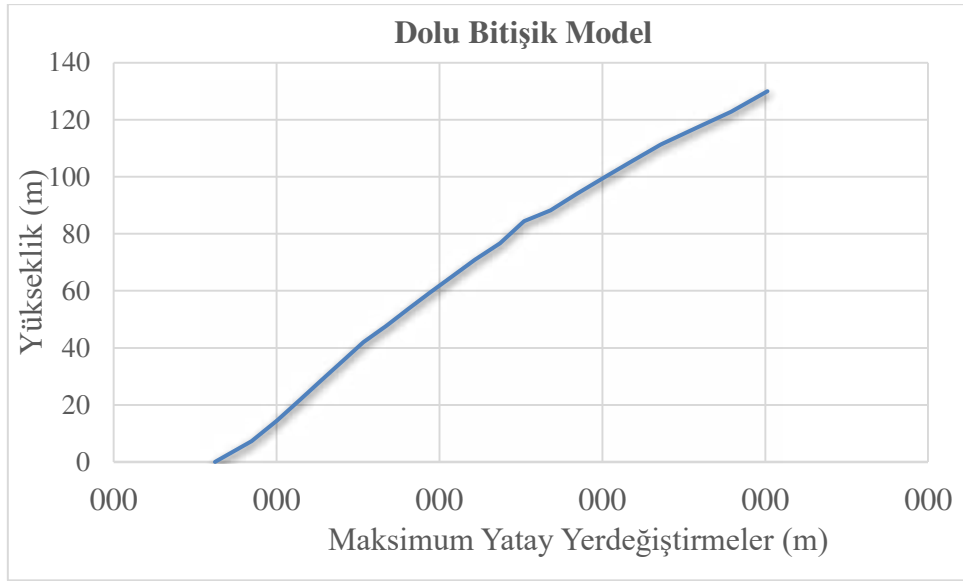
Bu analiz sonucunda baraj yüksekliği boyunca barajda oluşan asal gerilmenin maksimum ve minimum değerleri ile birlikte yerdeğiştirme değerleri aşağıda verilmektedir:



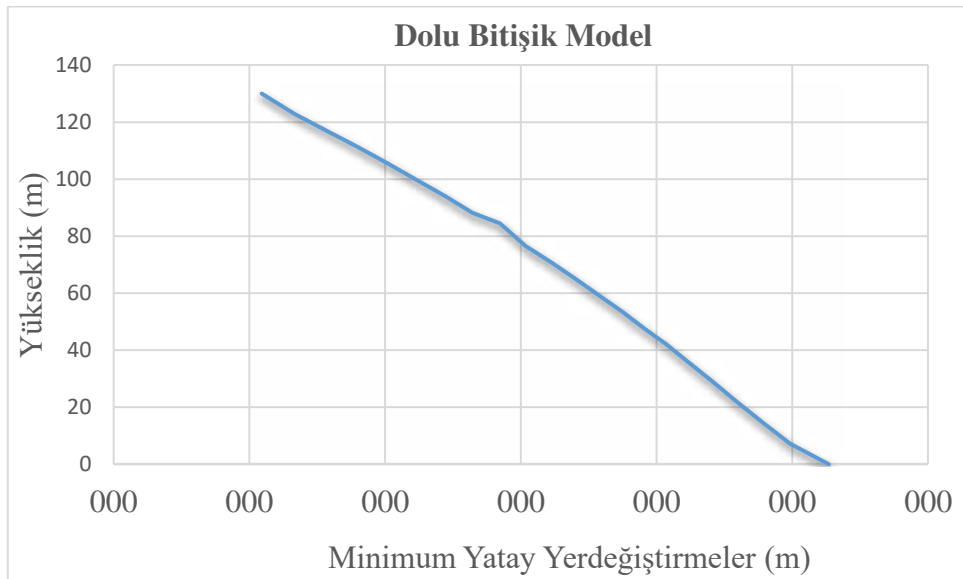
Şekil 3.5. Dolu Bitişik Model maksimum asal gerilme değerlerinin yükseklikle değişimi



Şekil 3.6. Dolu Bitişik Model minimum asal gerilme değerlerinin yükseklikle değişimi



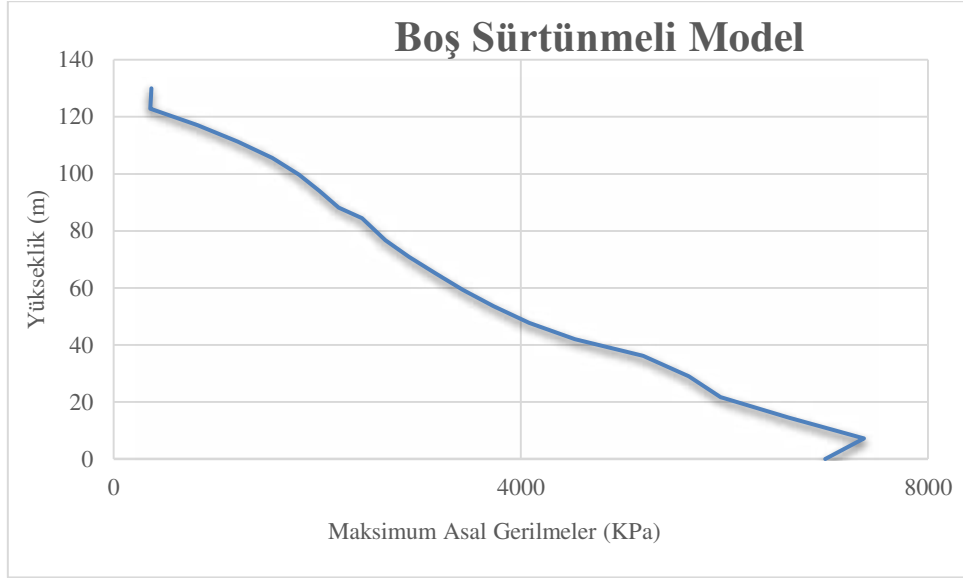
Şekil 3.7. Dolu Bitişik Model baraj yükseklik boyunca maksimum yerdeğiştirme değerleri



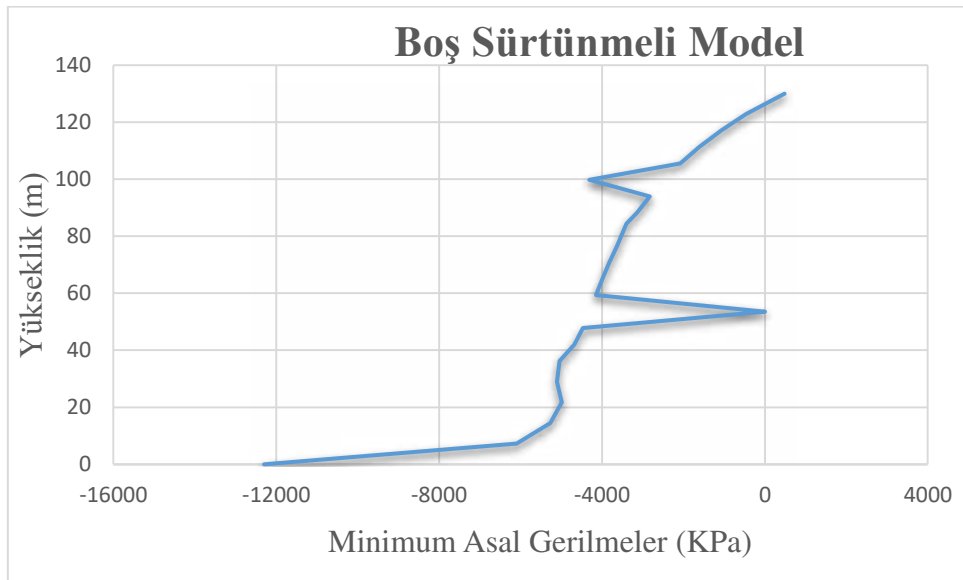
Şekil 3.8. Dolu Bitişik Model baraj yükseklik boyunca minimum yerdeğiştirme değerleri

3)Boş Sürtünmeli Model Lineer Dinamik Analiz:

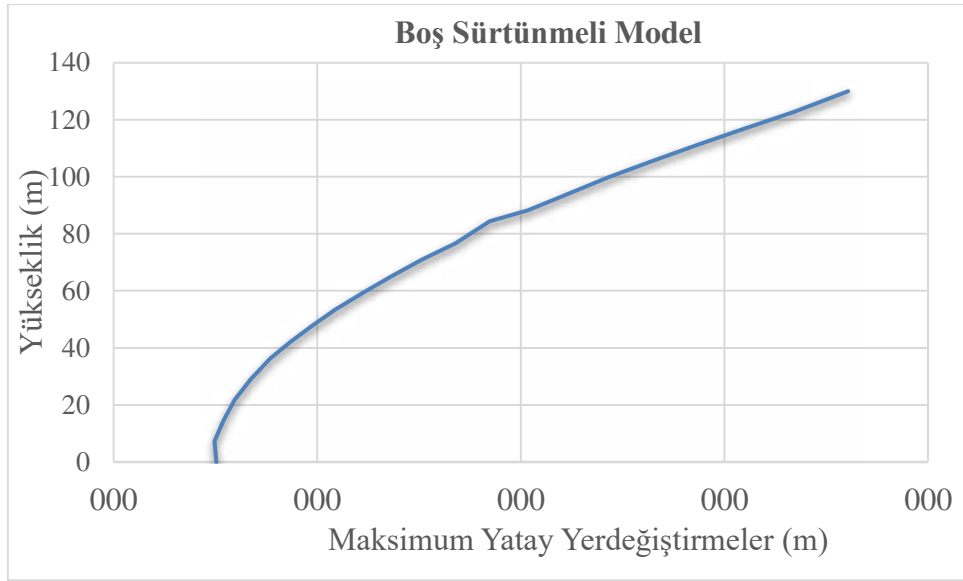
Bu analiz sonucunda baraj yüksekliği boyunca barajda oluşan asal gerilmenin maksimum ve minimum değerleri ile birlikte yerdeğiştirme değerleri aşağıda verilmektedir:



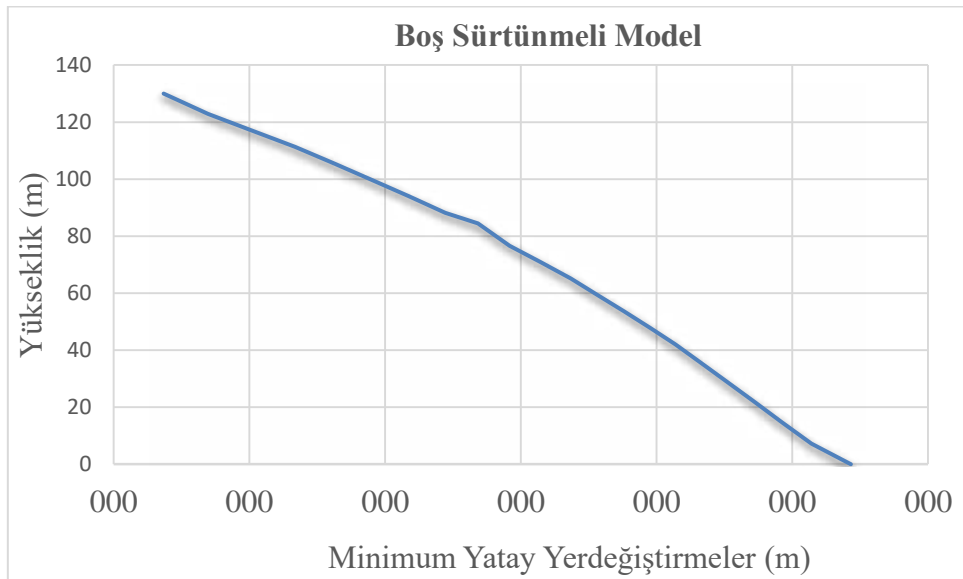
Şekil 3.9. Boş Sürtünmeli Model maksimum asal gerilme değerlerinin yükseklikle değişimi



Şekil 3.10. Boş Sürtünmeli Model minimum asal gerilme değerlerinin yükseklikle değişimi



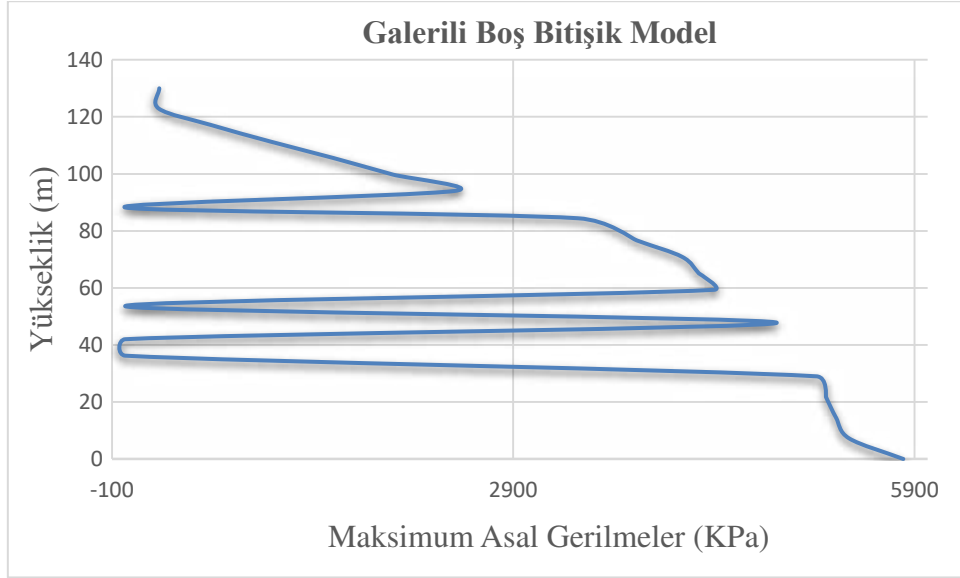
Şekil 3.11. Boş Sürtünmeli Model baraj yükseklik boyunca maksimum yerdeğiştirme değerleri



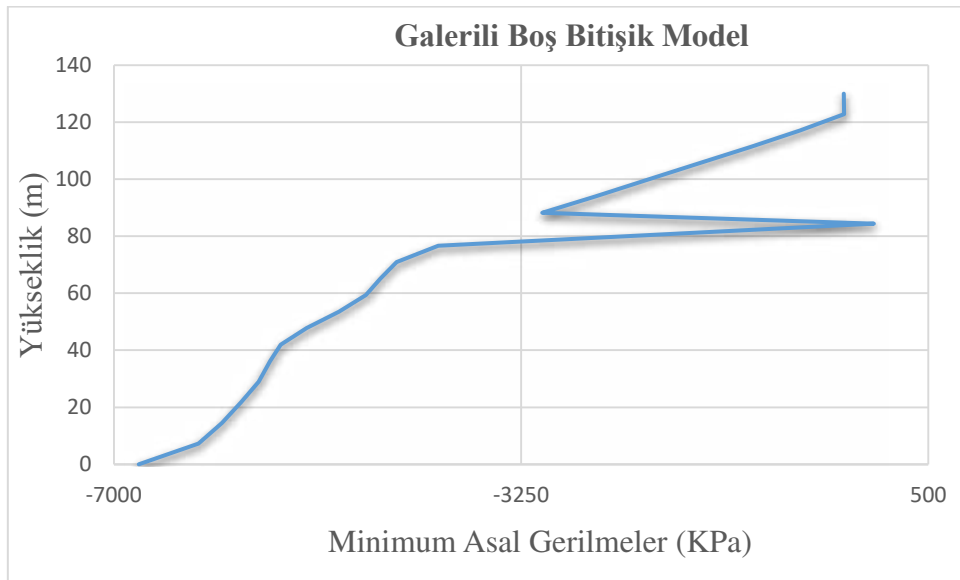
Şekil 3.12. Boş Sürtünmeli Model baraj yükseklik boyunca minimum yerdeğiştirme değerleri

4)Dolu Sürtünmeli Model Lineer Dinamik Analiz:

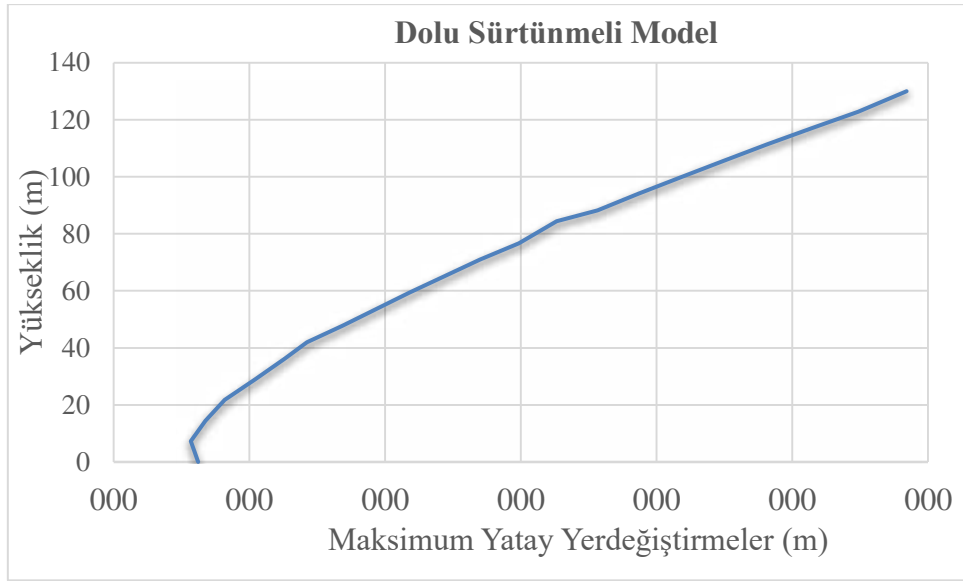
Bu analiz sonucunda baraj yüksekliği boyunca barajda oluşan asal gerilmenin maksimum ve minimum değerleri ile birlikte yerdeğiştirme değerleri aşağıda verilmektedir:



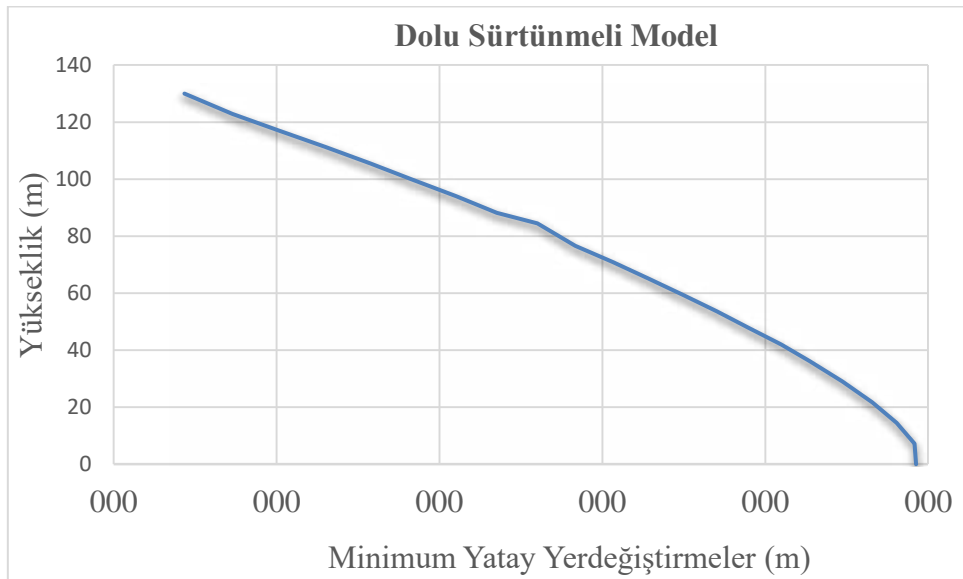
Şekil 3.13. Dolu Sürtünmeli Model maksimum asal gerilme değerlerinin yükseklikle değişimi



Şekil 3.14. Dolu Sürtünmeli Model minimum asal gerilme değerlerinin yükseklikle değişimi



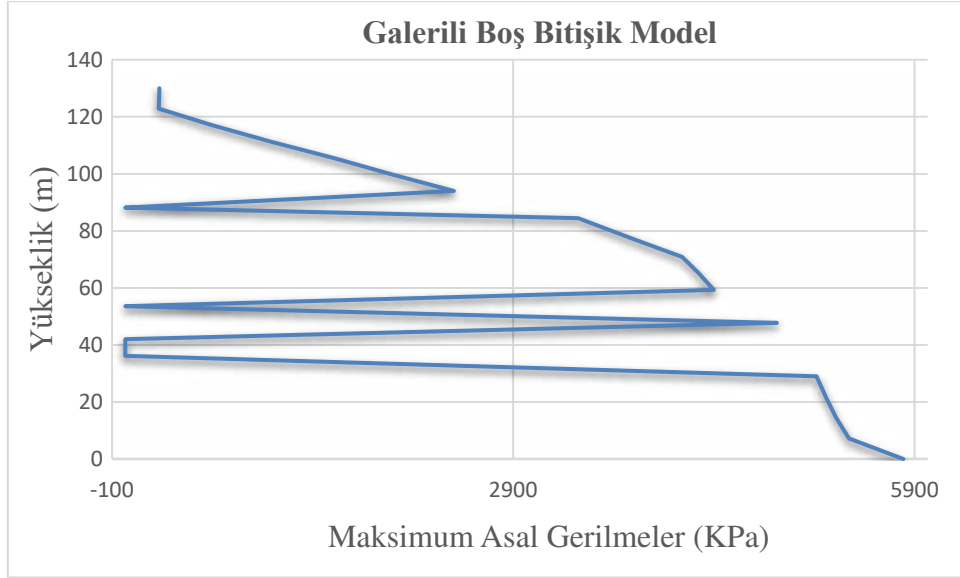
Şekil 3.15. Dolu Sürtünmeli Model baraj yükseklik boyunca maksimum yerdeğiştirme değerleri



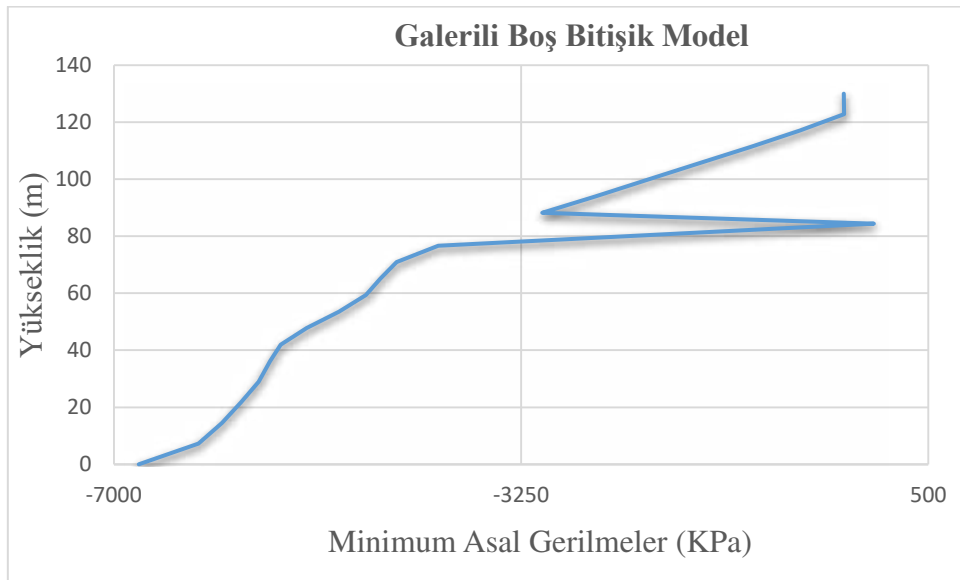
Şekil 3.16. Dolu Sürtünmeli Model baraj yükseklik boyunca minimum yerdeğiştirme değerleri

5)Galerili Boş Bitişik Model Lineer Dinamik Analiz:

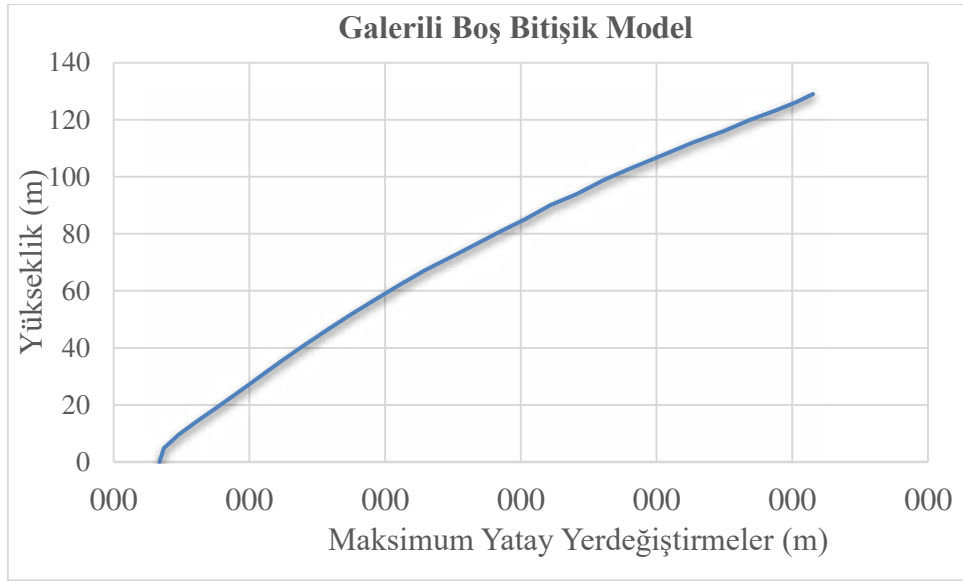
Bu analiz sonucunda baraj yüksekliği boyunca barajda oluşan asal gerilmenin maksimum ve minimum değerleri ile birlikte yerdeğiştirme değerleri aşağıda verilmektedir:



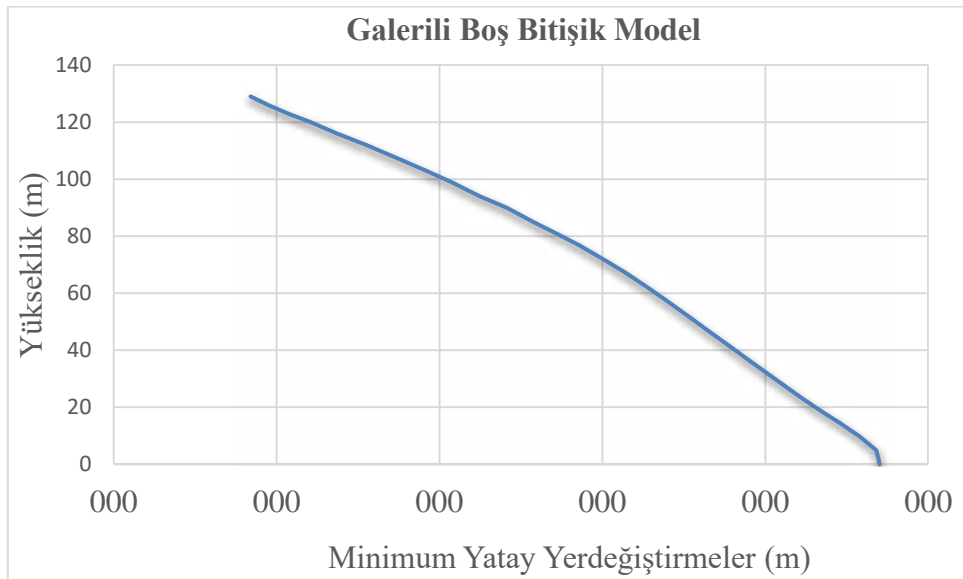
Şekil 3.17. Galerili Boş Bitişik Model maksimum asal gerilme değerlerinin yükseklikle değişimi



Şekil 3.18. Galerili Boş Bitişik Model minimum asal gerilme değerlerinin yükseklikle değişimi



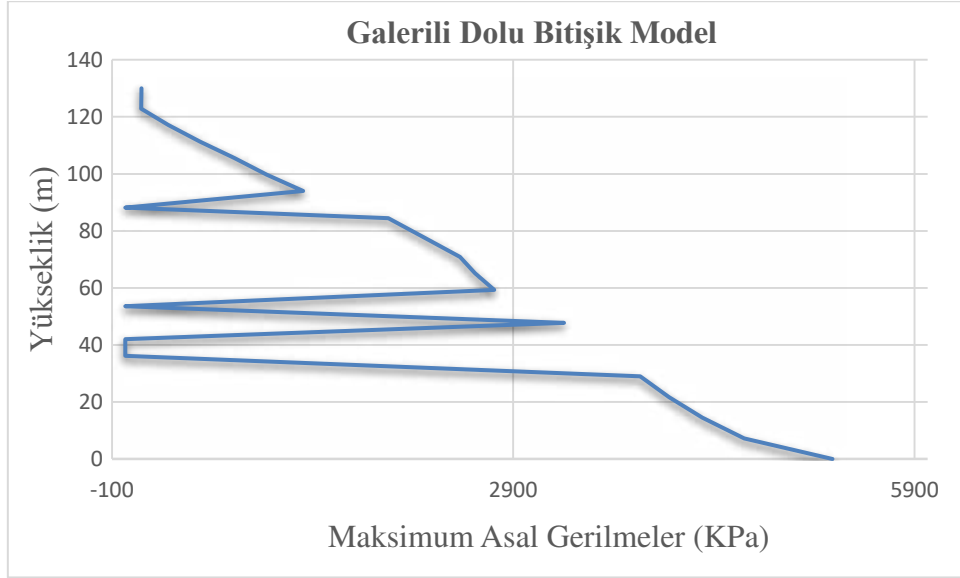
Şekil 3.19. Galerili Boş Bitişik Model baraj yükseklik boyunca maksimum yerdeğiştirme değerleri



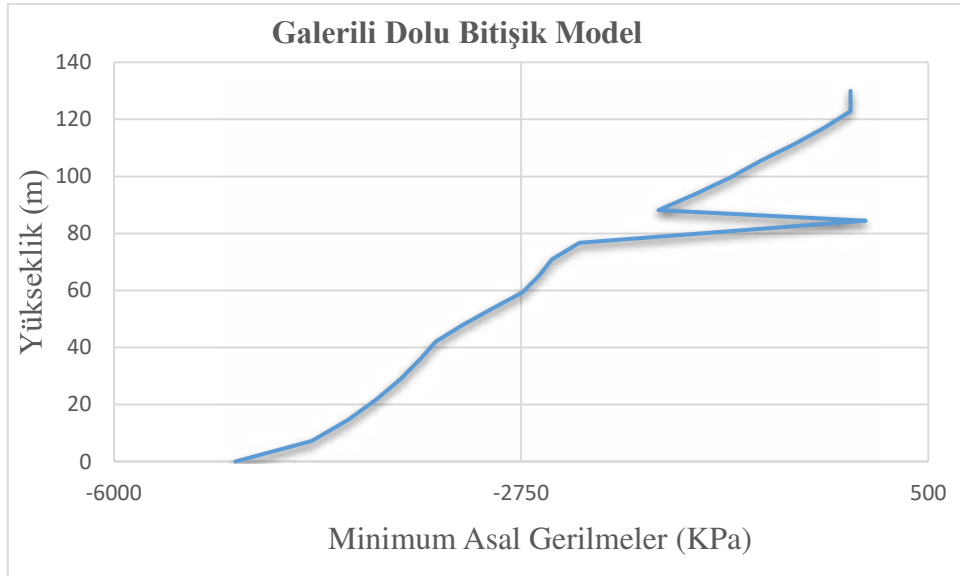
Şekil 3.20. Galerili Boş Bitişik Model baraj yükseklik boyunca minimum yerdeğiştirme değerleri

6) Galerili Dolu Bitişik Model Lineer Dinamik Analiz:

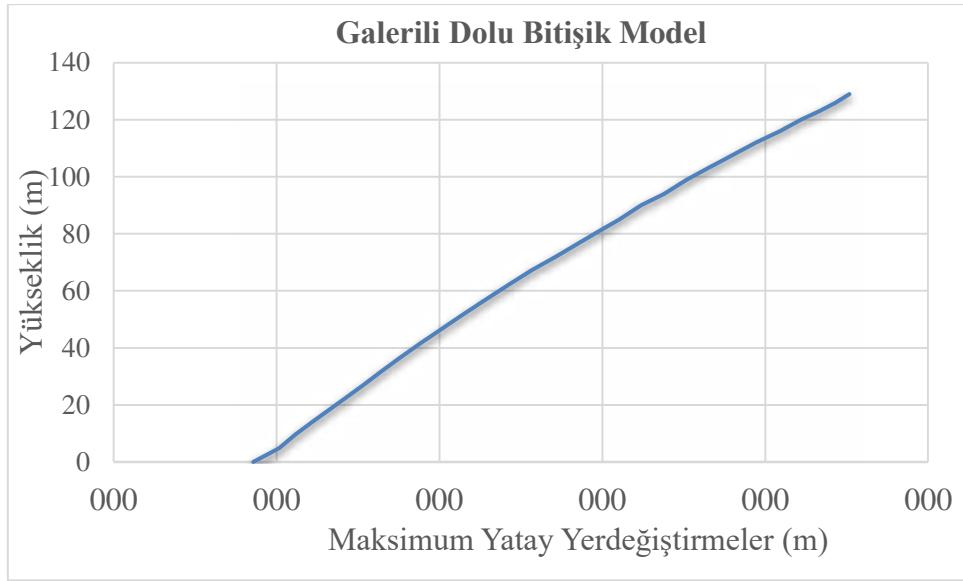
Bu analiz sonucunda baraj yüksekliği boyunca barajda oluşan asal gerilmenin maksimum ve minimum değerleri ile birlikte yerdeğiştirme değerleri aşağıda verilmektedir:



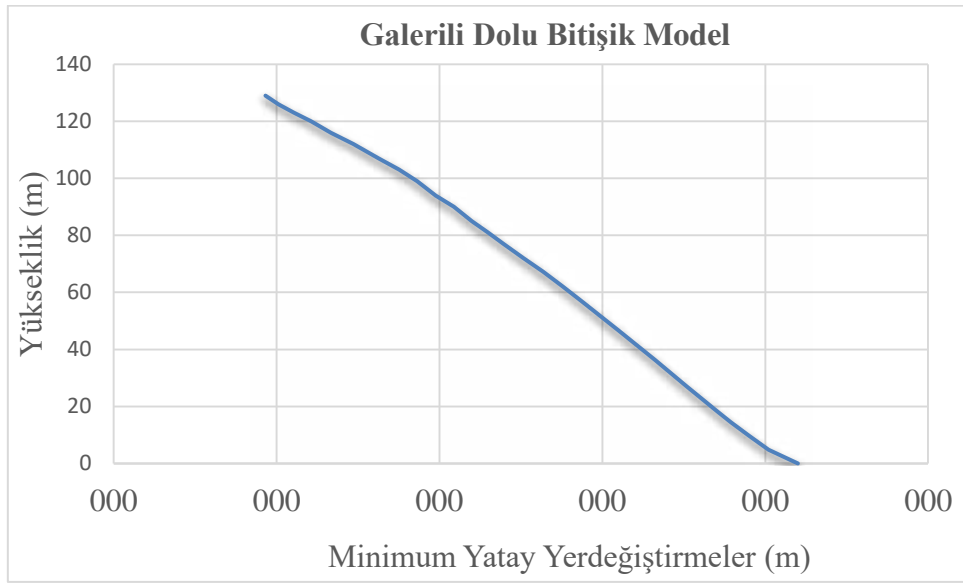
Şekil 3.21. Galerili Dolu Bitişik Model maksimum asal gerilme değerlerinin yükseklikle değişimi



Şekil 3.22. Galerili Dolu Bitişik Model minimum asal gerilme değerlerinin yükseklikle değişimi



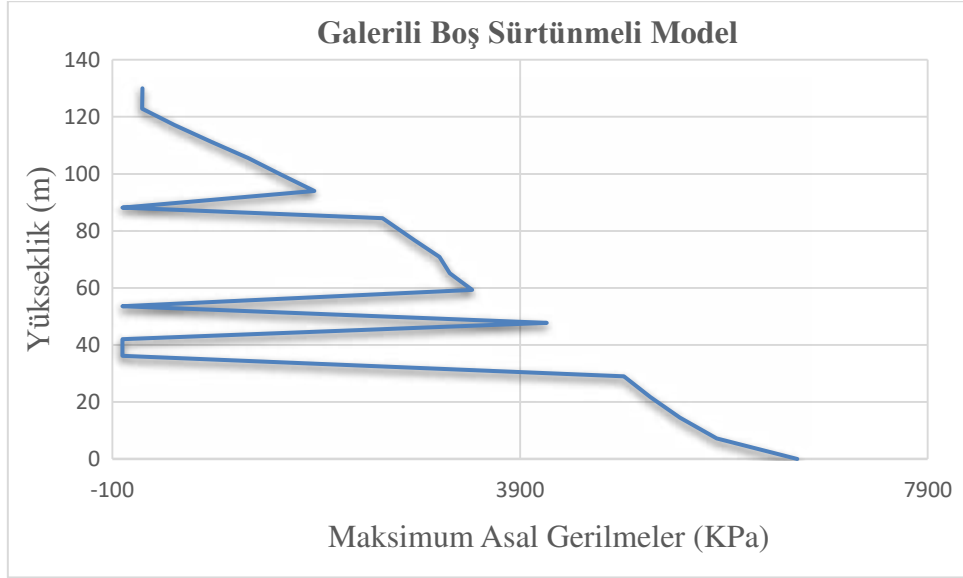
Şekil 3.23. Galerili Dolu Bitişik Model baraj yükseklik boyunca maksimum yerdeğiştirme değerleri



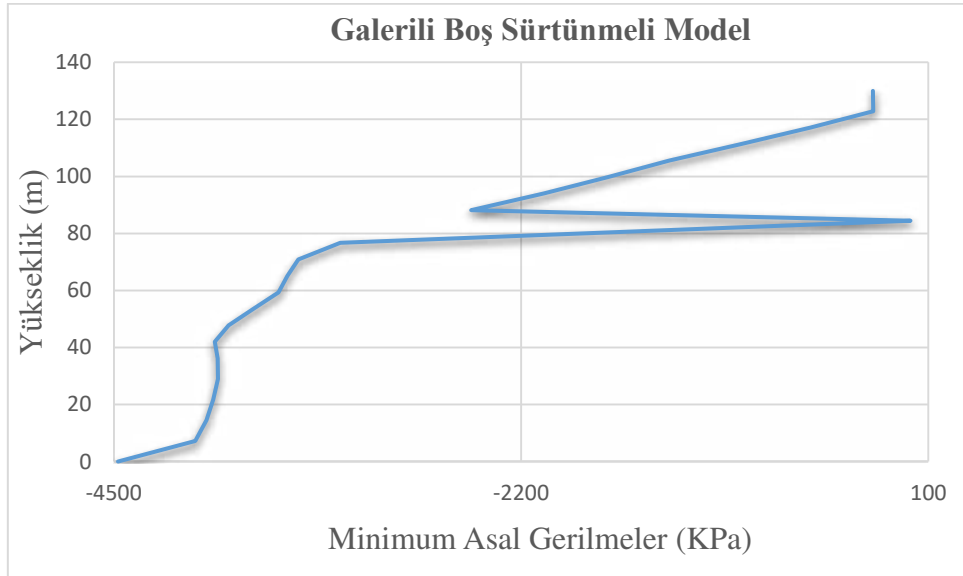
Şekil 3.24. Galerili Dolu Bitişik Model baraj yükseklik boyunca minimum yerdeğiştirme değerleri

7) Galerili Boş Sürtünmeli Model Lineer Dinamik Analiz:

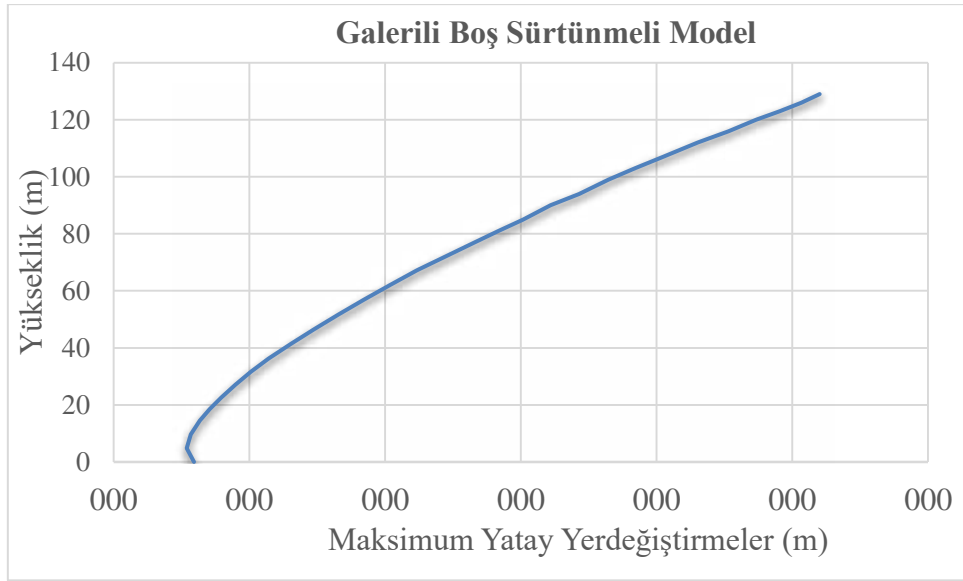
Bu analiz sonucunda baraj yüksekliği boyunca barajda oluşan asal gerilmenin maksimum ve minimum değerleri ile birlikte yerdeğiştirme değerleri aşağıda verilmektedir:



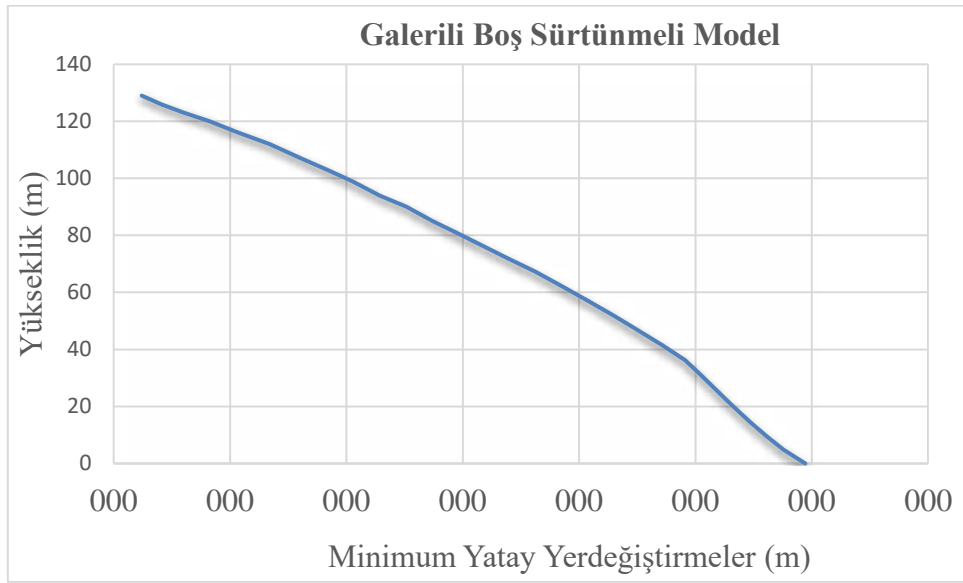
Şekil 3.25. Galerili Boş Sürtünmeli Model maksimum asal gerilme değerlerinin yükseklikle değişimi



Şekil 3.26. Galerili Boş Sürtünmeli Model minimum asal gerilme değerlerinin yükseklikle değişimi



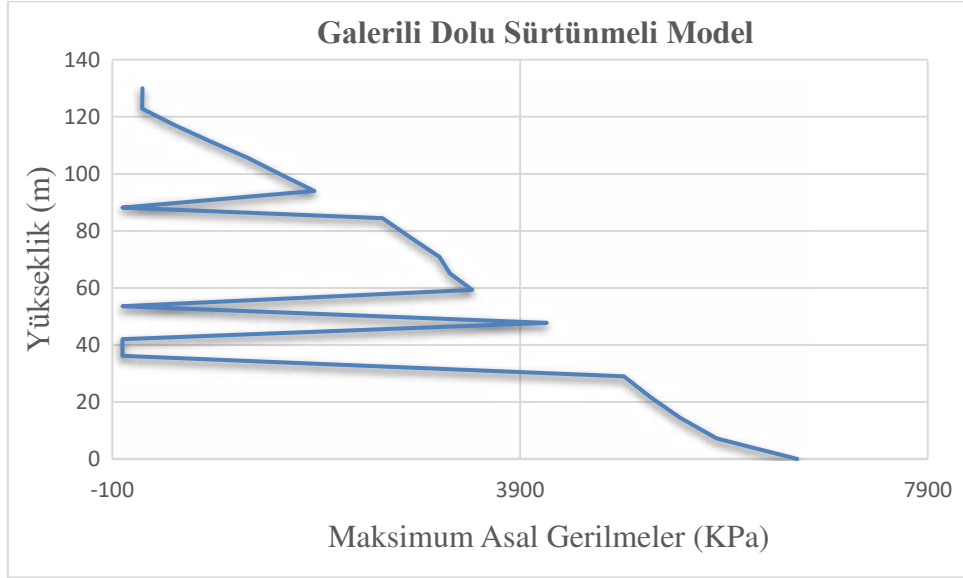
Şekil 3.27. Galerili Boş Sürtünmeli Model baraj yükseklik boyunca maksimum yerdeğiştirme değerleri



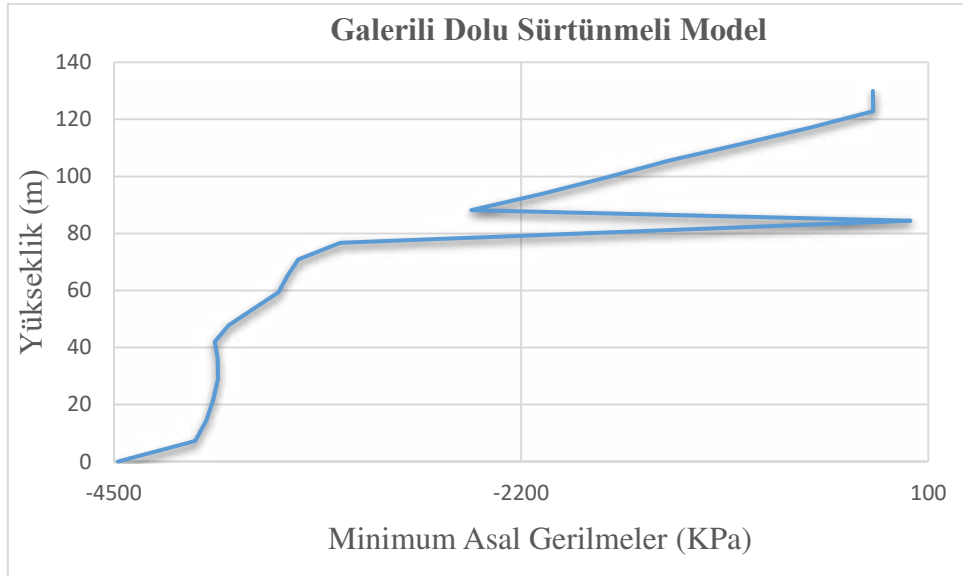
Şekil 3.28. Galerili Boş Sürtünmeli Model baraj yükseklik boyunca minimum yerdeğiştirme değerleri

8)Galerili Dolu Sürtünmeli Model Lineer Dinamik Analiz:

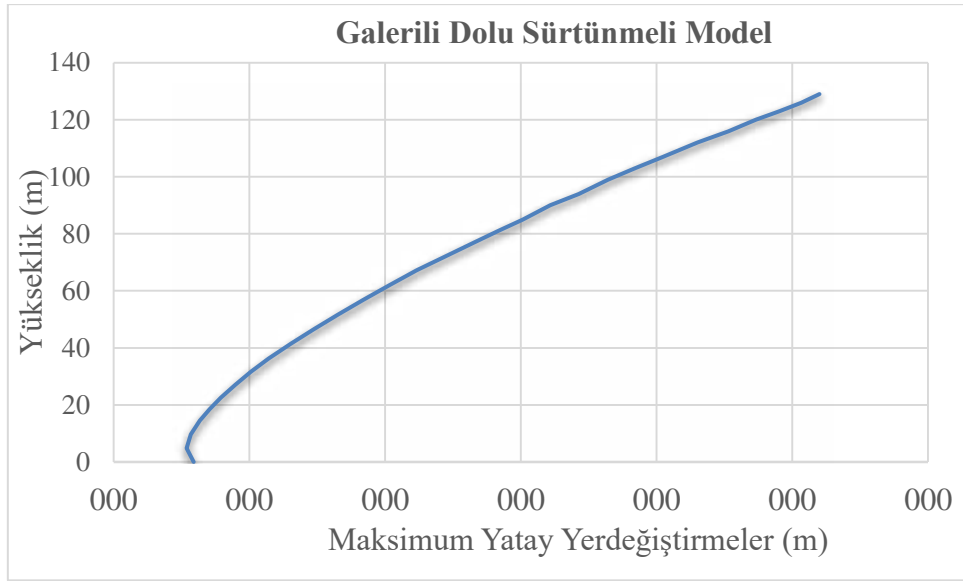
Bu analiz sonucunda baraj yüksekliği boyunca barajda oluşan asal gerilmenin maksimum ve minimum değerleri ile birlikte yerdeğiştirme değerleri aşağıda verilmektedir:



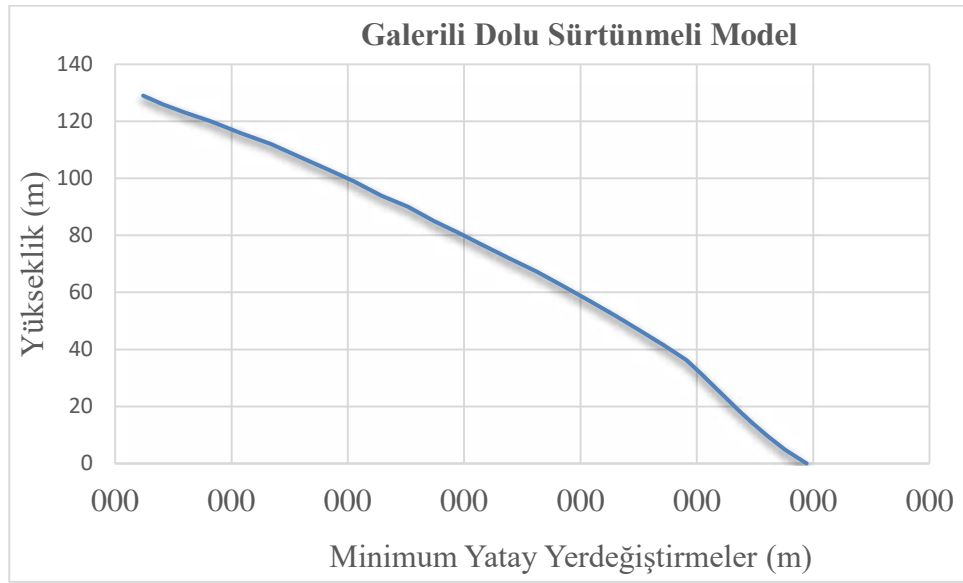
Şekil 3.29. Galerili Dolu Sürtünmeli Model maksimum asal gerilme değerlerinin yükseklikle değişimi



Şekil 3.30. Galerili Dolu Sürtünmeli Model minimum asal gerilme değerlerinin yükseklikle değişimi



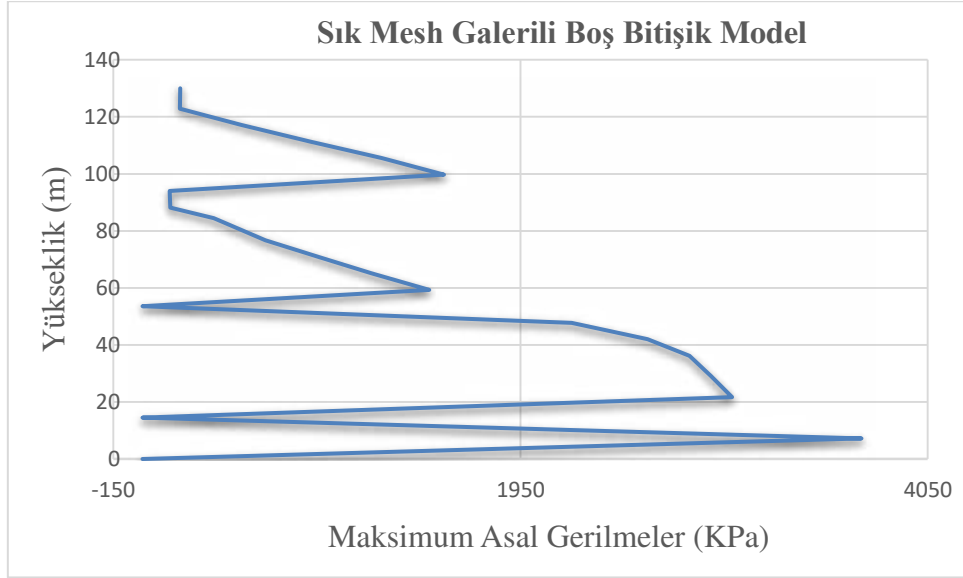
Şekil 3.31. Galerili Dolu Sürtünmeli Model baraj yükseklik boyunca maksimum yerdeğiştirme değerleri



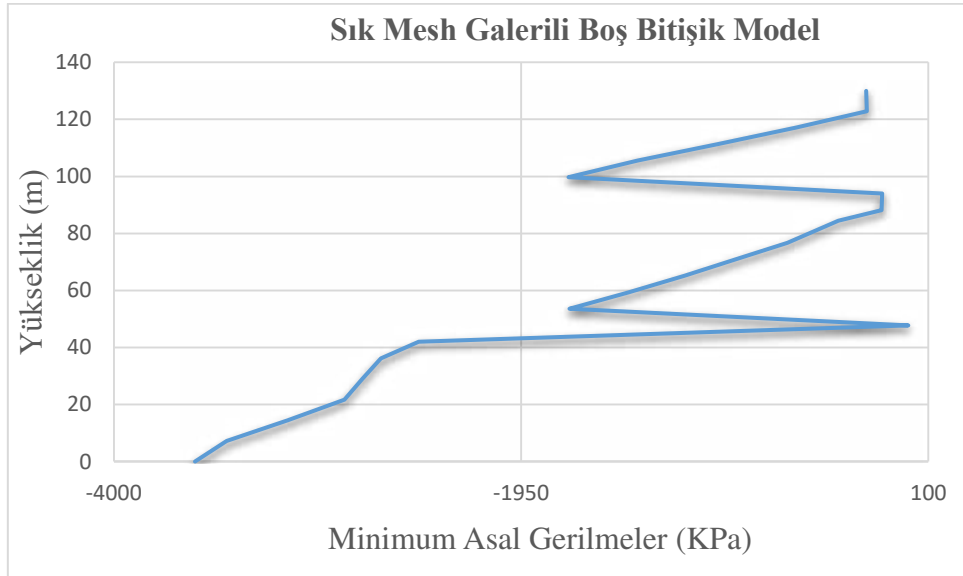
Şekil 3.32. Galerili Dolu Sürtünmeli Model baraj yükseklik boyunca minimum yerdeğiştirme değerleri

9) Sık Ağ Galerili Boş Bitişik Model Lineer Dinamik Analiz:

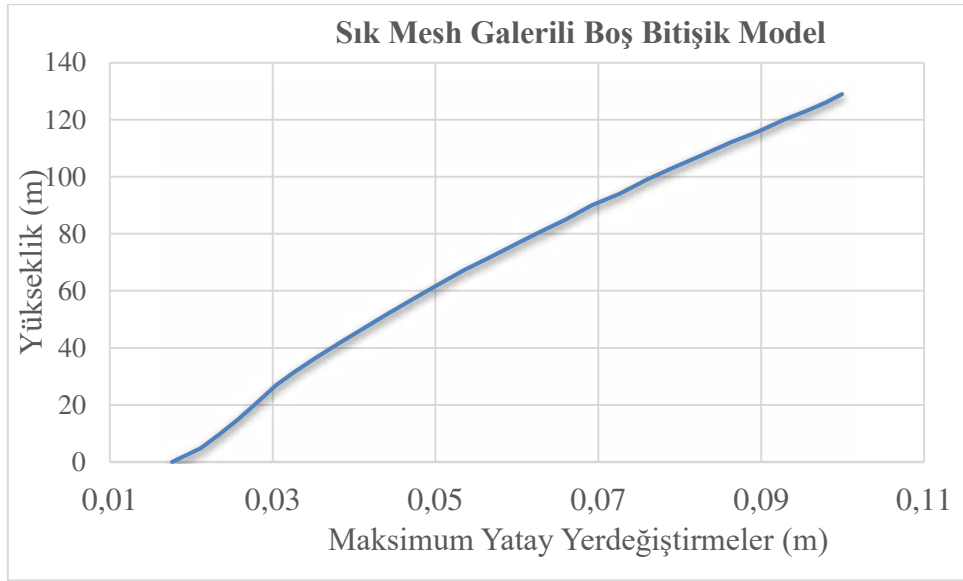
Bu analiz sonucunda baraj yüksekliği boyunca barajda oluşan asal gerilmenin maksimum ve minimum değerleri ile birlikte yerdeğiştirme değerleri aşağıda verilmektedir:



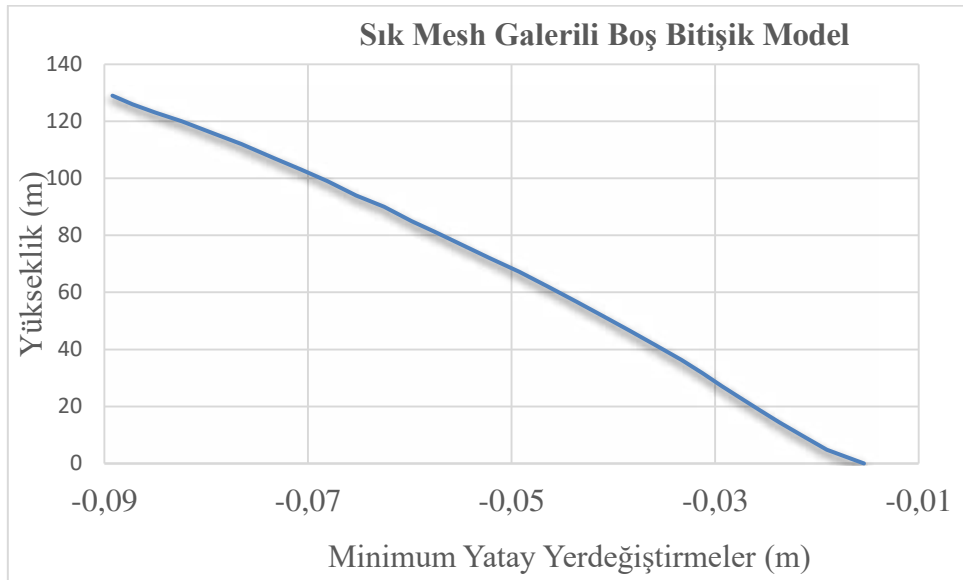
Şekil 3.33. Sık Mesh Galerili Boş Bitişik Model maksimum asal gerilme değerlerinin yükseklikle değişimi



Şekil 3.34. Sık Mesh Galerili Boş Bitişik Model minimum asal gerilme değerlerinin yükseklikle değişimi



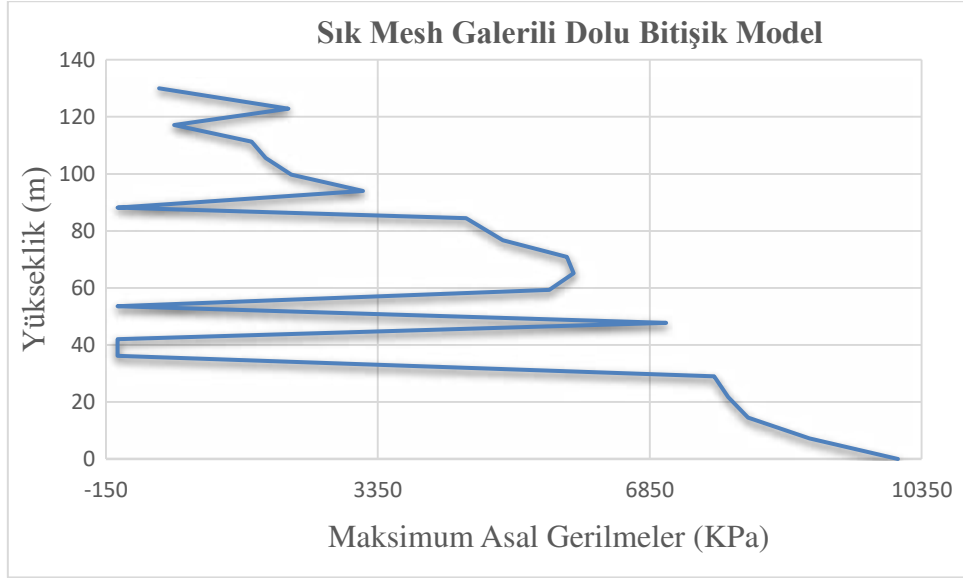
Şekil 3.35. Sık Mesh Galerili Boş Bitişik Model baraj yükseklik boyunca maksimum yerdeğiştirme değerleri



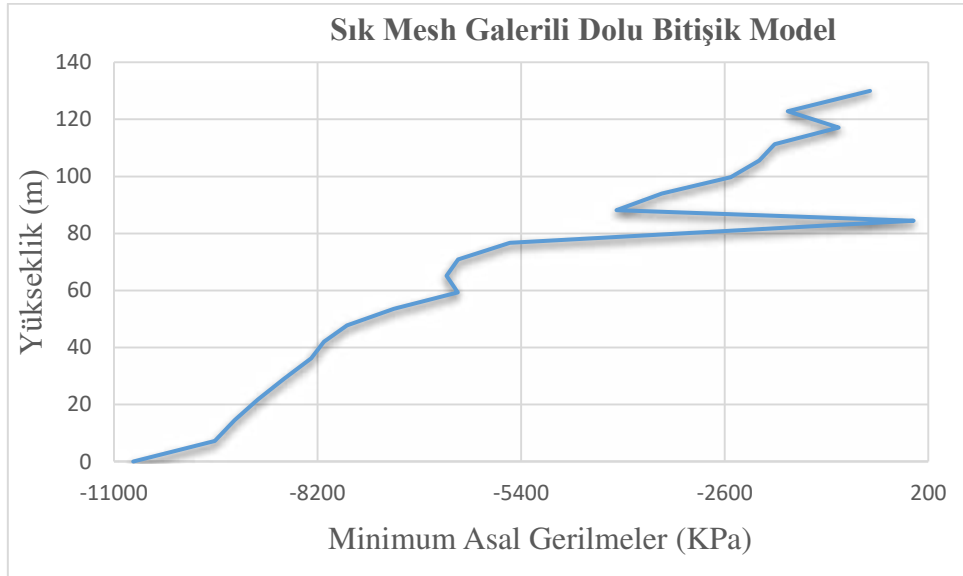
Şekil 3.36. Sık Mesh Galerili Boş Bitişik Model baraj yükseklik boyunca minimum yerdeğiştirme değerleri

10) Sık Mesh Galerili Dolu Bitişik Model Lineer Dinamik Analiz:

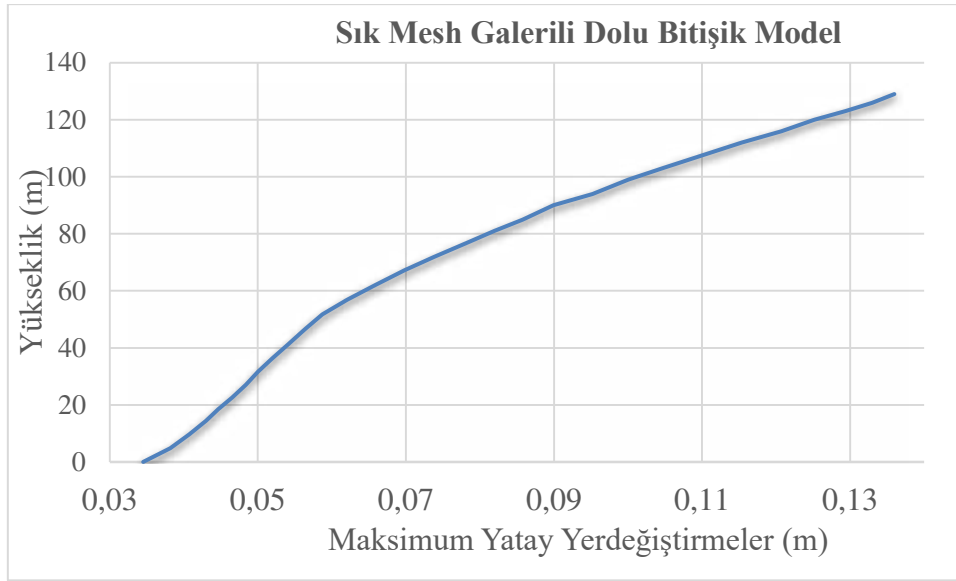
Bu analiz sonucunda baraj yüksekliği boyunca barajda oluşan asal gerilmenin maksimum ve minimum değerleri ile birlikte yerdeğiştirme değerleri aşağıda verilmektedir:



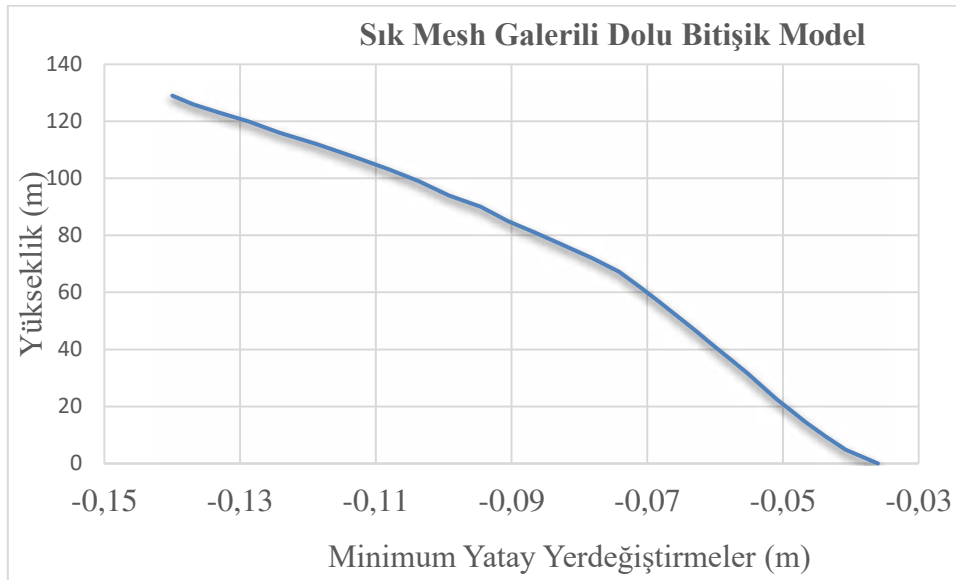
Şekil 3.37. Sık Mesh Galerili Dolu Bitişik Model maksimum asal gerilme değerlerinin yükseklikle değişimi



Şekil 3.38. Sık Mesh Galerili Dolu Bitişik Model minimum asal gerilme değerlerinin yükseklikle değişimi



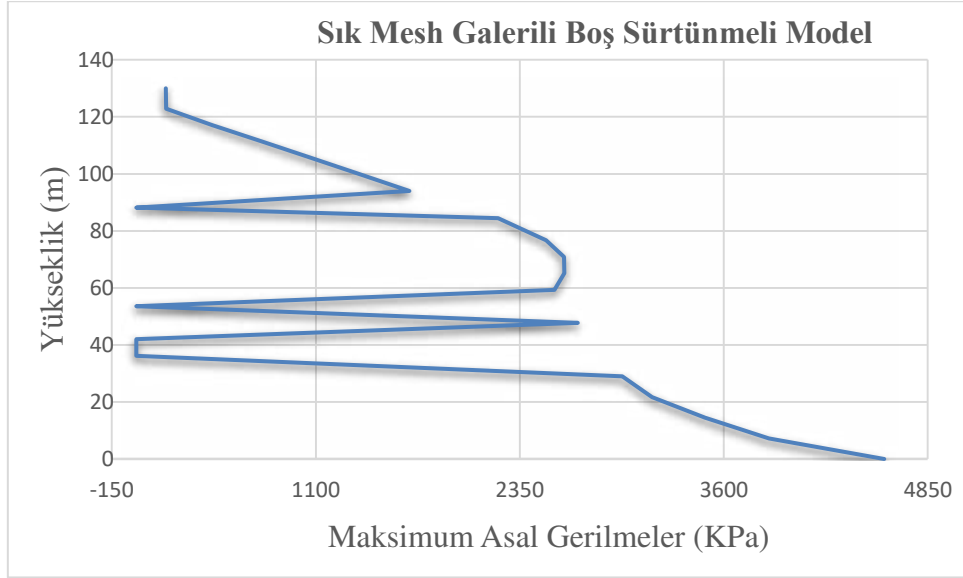
Şekil 3.39. Sık Mesh Galerili Dolu Bitişik Model baraj yükseklik boyunca maksimum yerdeğiştirme değerleri



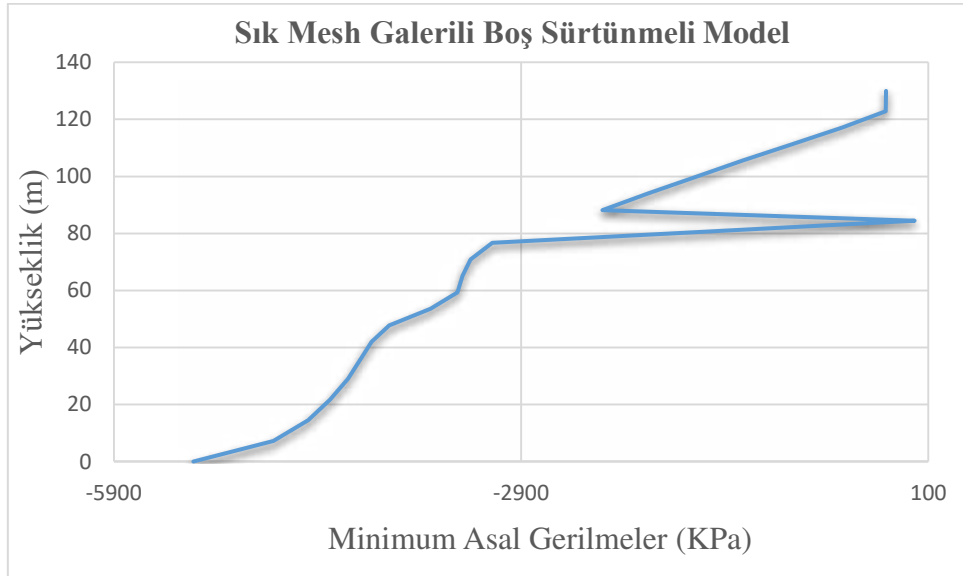
Şekil 3.40. Sık Mesh Galerili Dolu Bitişik Model baraj yükseklik boyunca minimum yerdeğiştirme değerleri

11) Sık Mesh Galerili Boş Sürtünmeli Model Lineer Dinamik Analiz:

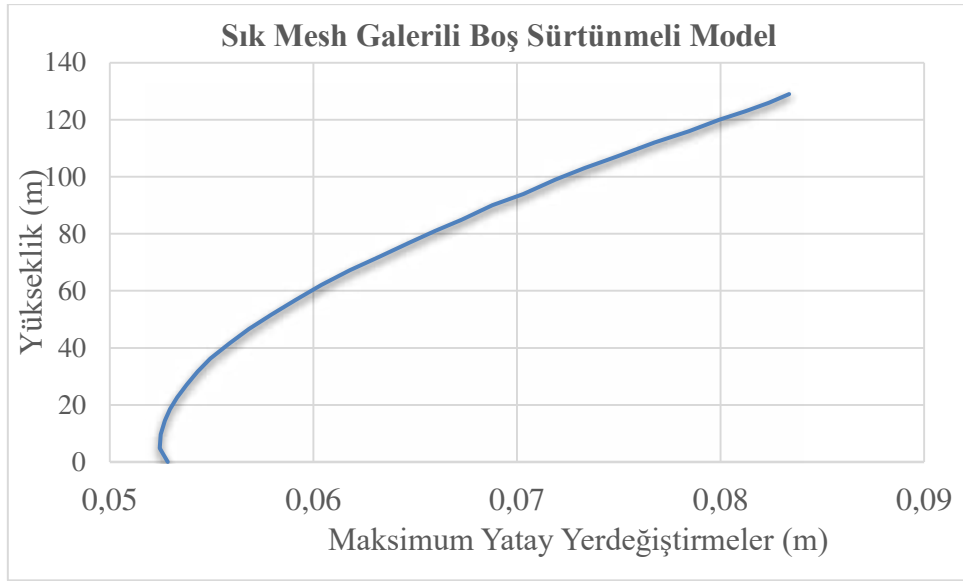
Bu analiz sonucunda baraj yüksekliği boyunca barajda oluşan asal gerilmenin maksimum ve minimum değerleri ile birlikte yerdeğiştirme değerleri aşağıda verilmektedir:



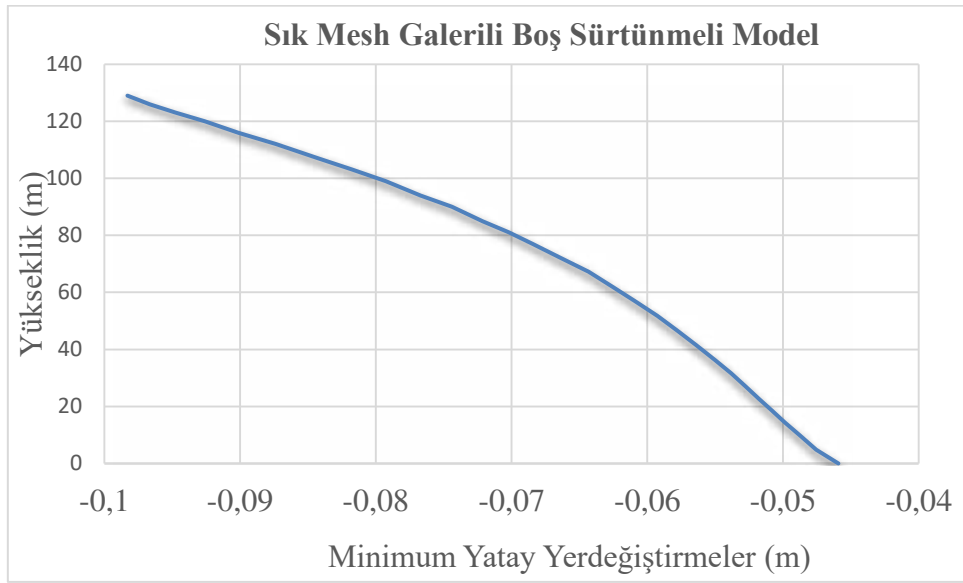
Şekil 3.41. Sık Mesh Galerili Boş Sürtünmeli Model maksimum asal gerilme değerlerinin yükseklikle değişimi



Şekil 3.42. Sık Mesh Galerili Boş Sürtünmeli Model minimum asal gerilme değerlerinin yükseklikle değişimi



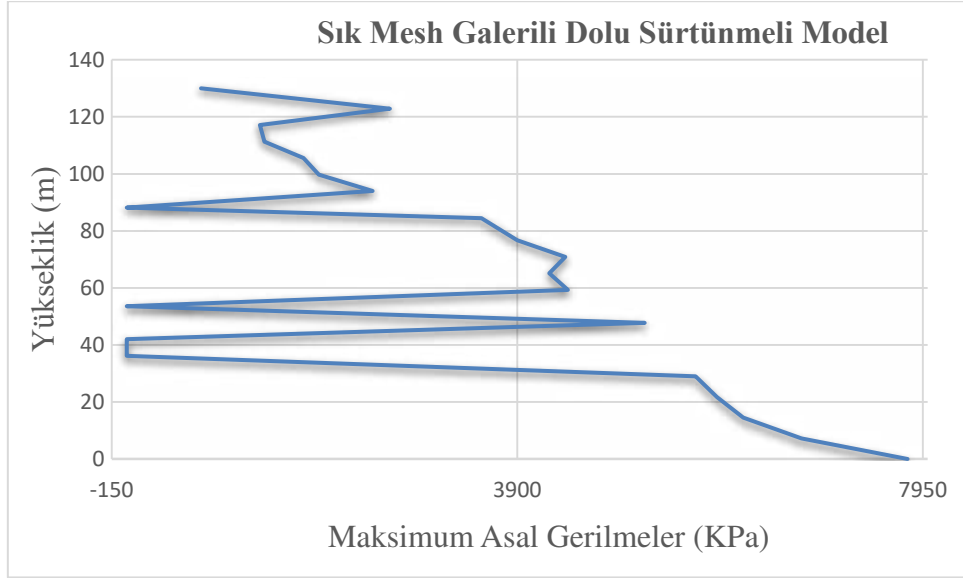
Şekil 3.43. Sık Mesh Galerili Boş Sürtünmeli Model baraj yükseklik boyunca maksimum yerdeğiştirme değerleri



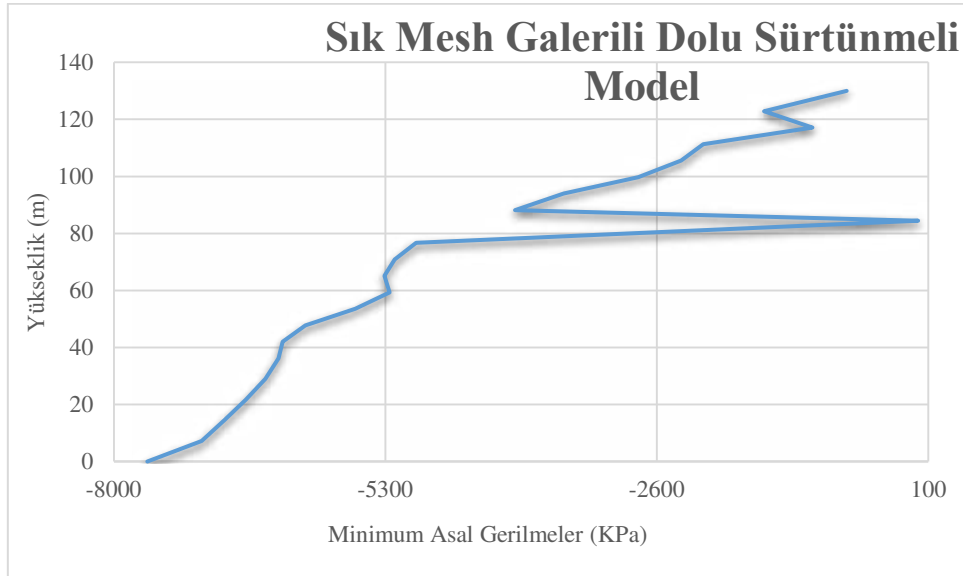
Şekil 3.44. Sık Mesh Galerili Boş Sürtünmeli Model baraj yükseklik boyunca minimum yerdeğiştirme değerleri

12) Sık Mesh Galerili Dolu Sürtünmeli Model Lineer Dinamik Analiz:

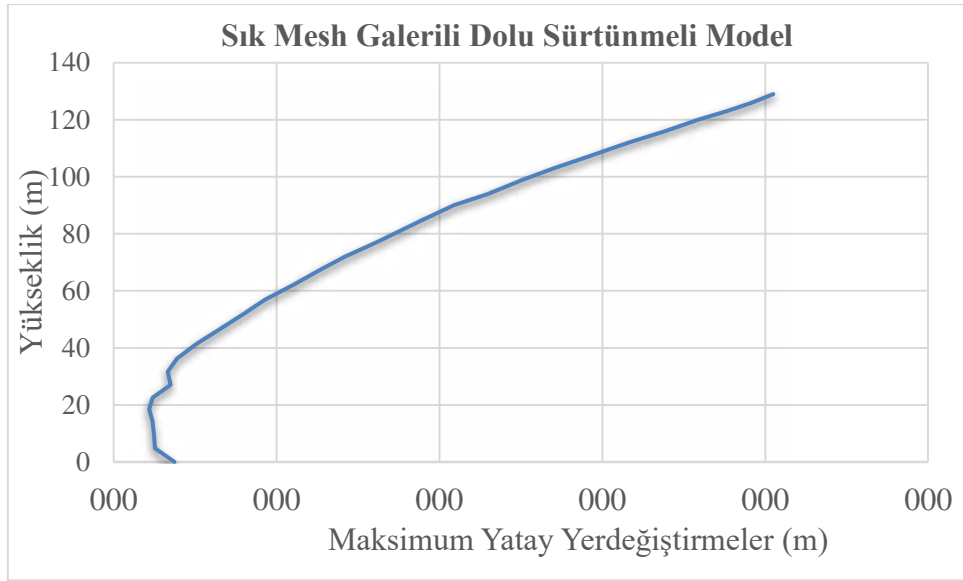
Bu analiz sonucunda baraj yüksekliği boyunca barajda oluşan asal gerilmenin maksimum ve minimum değerleri ile birlikte yerdeğiştirme değerleri aşağıda verilmektedir:



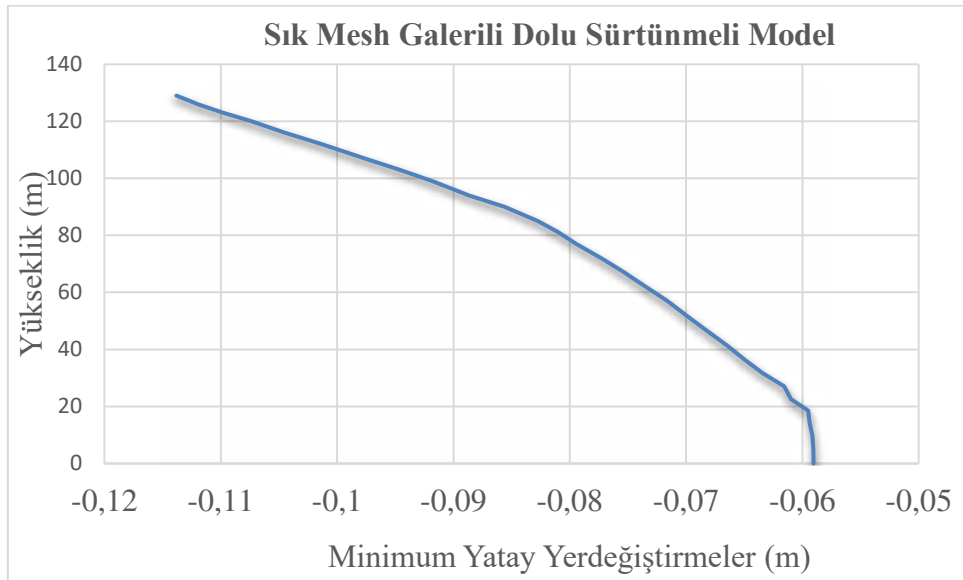
Şekil 3.45. Sık Mesh Galerili Dolu Sürtünmeli Model maksimum asal gerilme değerlerinin yükseklikle değişimi



Şekil 3.46. Sık Mesh Galerili Dolu Sürtünmeli Model minimum asal gerilme değerlerinin yükseklikle değişimi



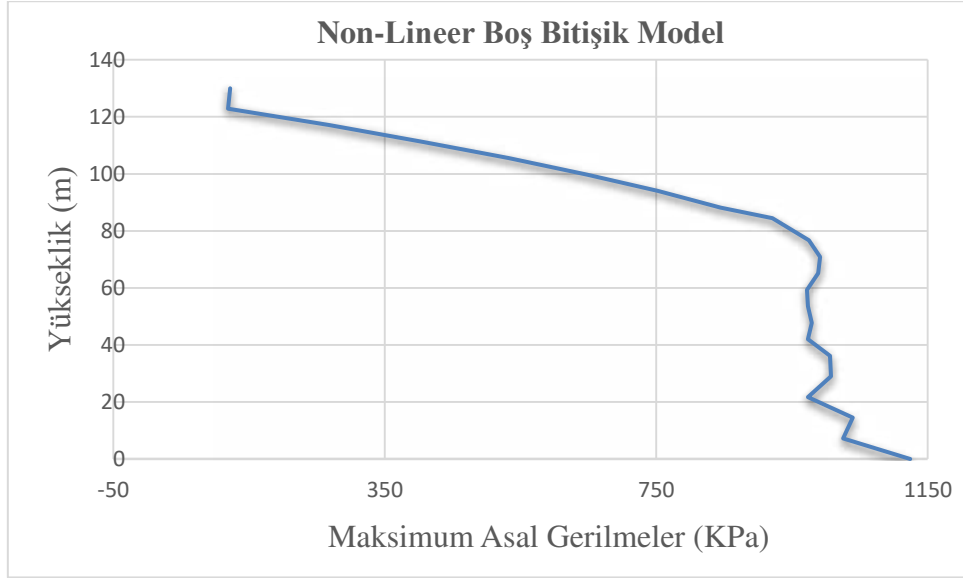
Şekil 3.47. Sık Mesh Galerili Dolu Sürtünmeli Model baraj yükseklik boyunca maksimum yerdeğiştirme değerleri



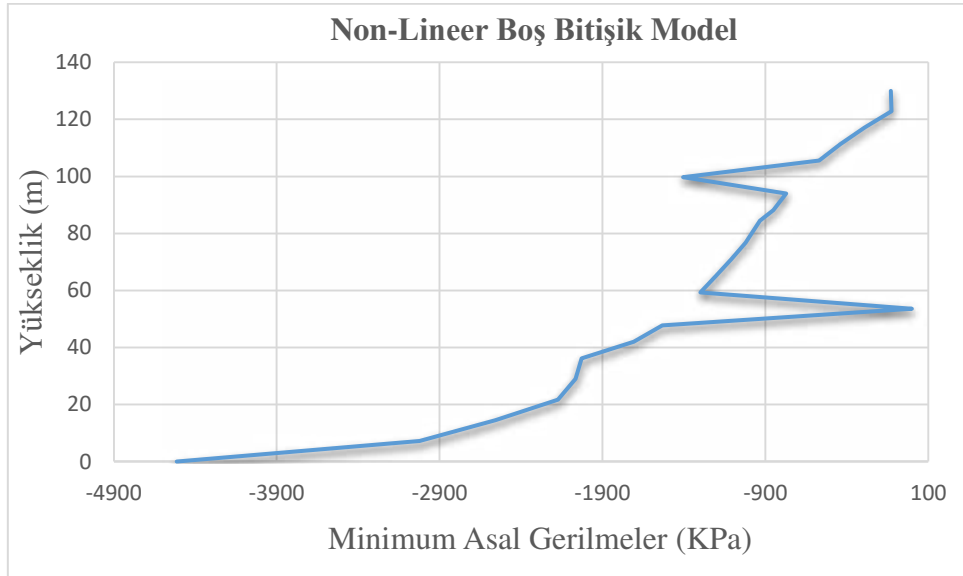
Şekil 3.48. Sık Mesh Galerili Dolu Sürtünmeli Model baraj yükseklik boyunca maksimum yerdeğiştirme değerleri

13) Boş Bitişik Model Non-Linear Dinamik Analiz:

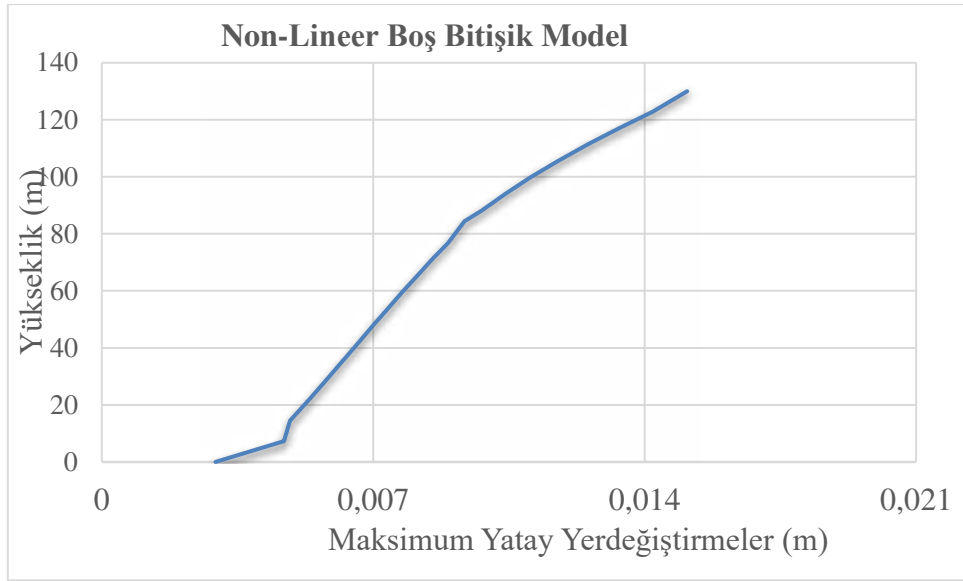
Bu analiz sonucunda baraj yüksekliği boyunca barajda oluşan asal gerilmenin maksimum ve minimum değerleri ile birlikte yerdeğiştirme değerleri aşağıda verilmektedir:



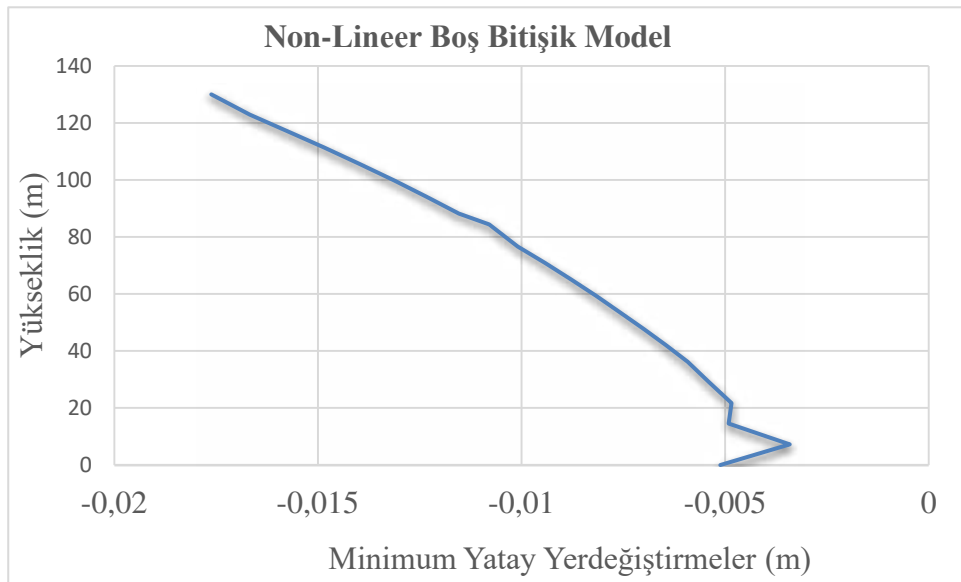
Şekil 3.49. Non-linear Boş Bitişik Model maksimum asal gerilme değerlerinin yükseklikle değişimi



Şekil 3.50. Non-linear Boş Bitişik Model minimum asal gerilme değerlerinin yükseklikle değişimi



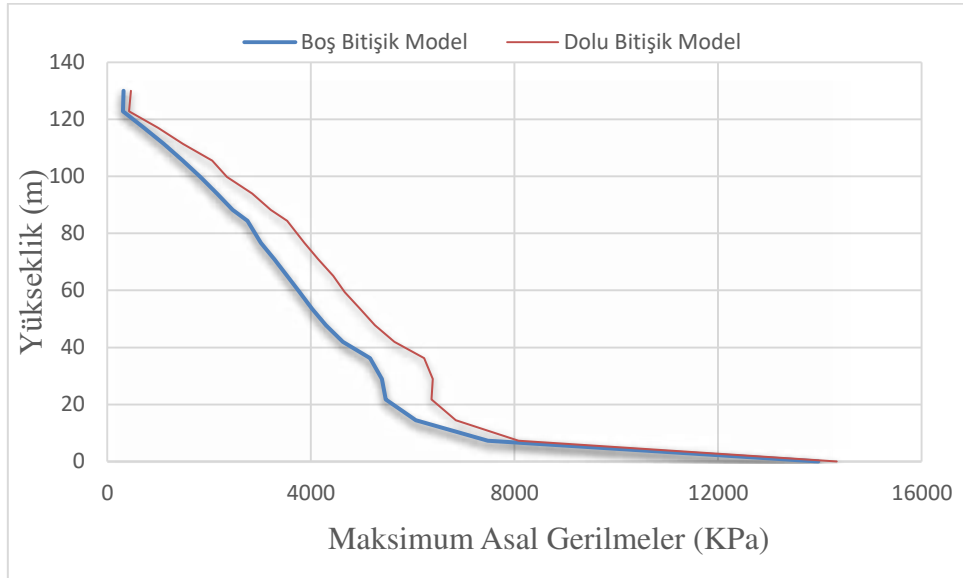
Şekil 3.51. Non-linear Boş Bitişik Model baraj yükseklik boyunca maksimum yerdeğiştirme değerleri



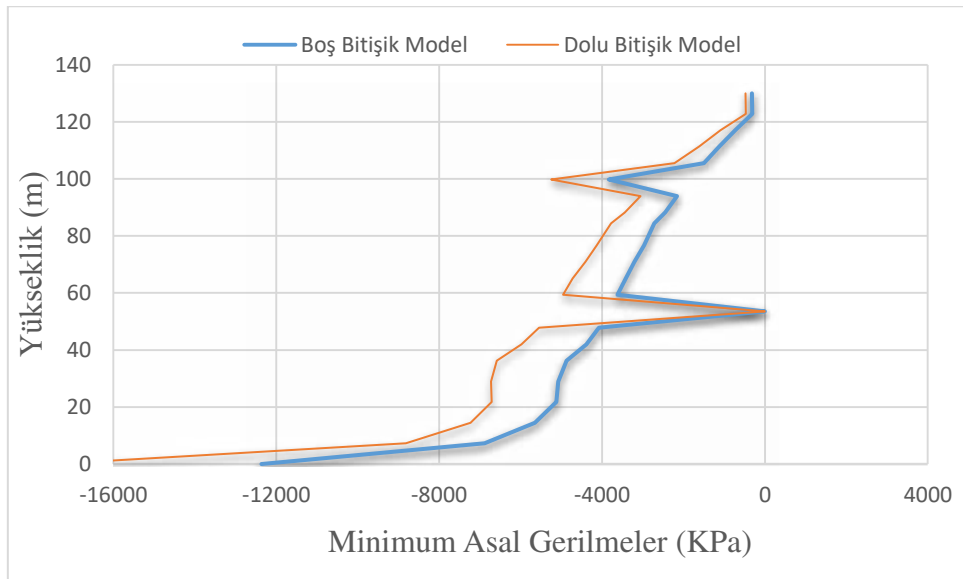
Şekil 3.52. Non-linear Boş Bitişik Model baraj yükseklik boyunca minimum yerdeğiştirme değerleri

3.4 DİNAMİK ANALİZ SONUÇLARININ FARKLI DURUMLAR İÇİN KARŞILAŞTIRILMASI

1) Bitişik modelin rezervuarın boş ve dolu olması durumların da ki asal gerilmeler karşılaştırılması

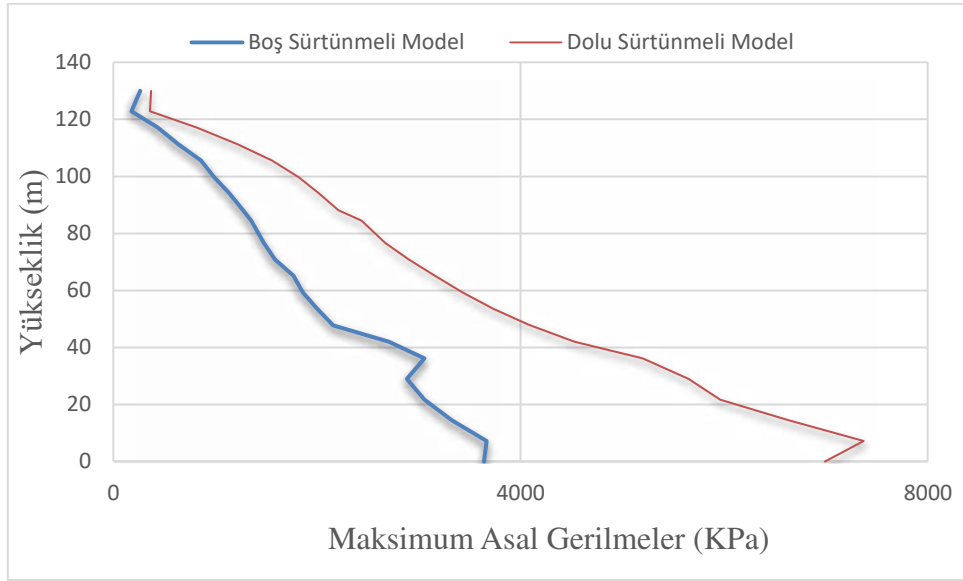


Şekil 3.53. Boş ve Dolu Bitişik Model maksimum asal gerilme değerlerinin yükseklikle değişimi

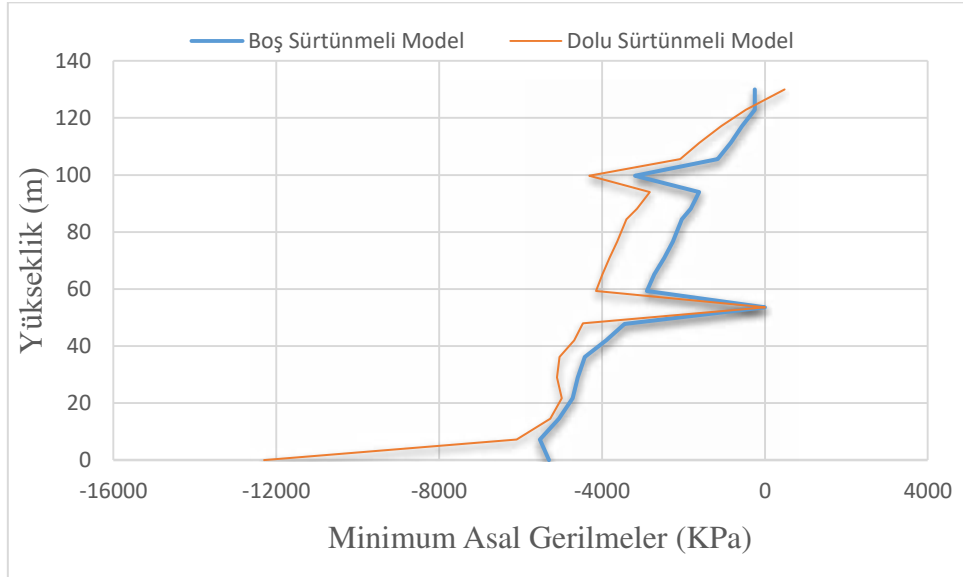


Şekil 3.54. Boş ve Dolu Bitişik Model minimum asal gerilme değerlerinin yükseklikle değişimi

2) Sürtünmeli modelin rezervuarın boş ve dolu olması durumların da ki asal gerilmeler karşılaştırılması

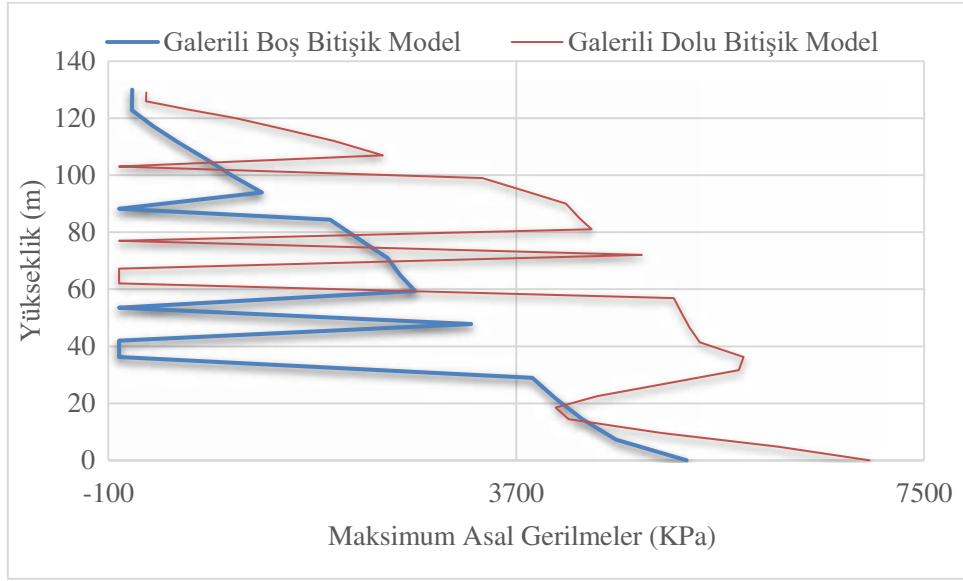


Şekil 3.55. Boş ve Dolu Sürtünmeli Model maksimum asal gerilme değerlerinin yükseklikle değişimi

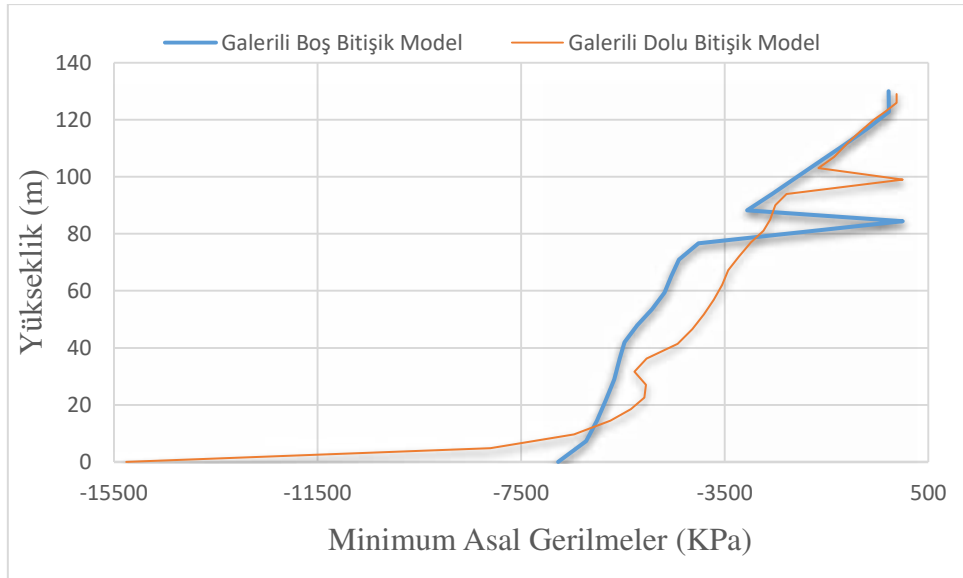


Şekil 3.56. Boş ve Dolu Sürtünmeli Model minimum asal gerilme değerlerinin yükseklikle değişimi

3) Galerili Bitişik modelin rezervuarın boş ve dolu olması durumlarının da ki asal gerilmeler karşılaştırılması

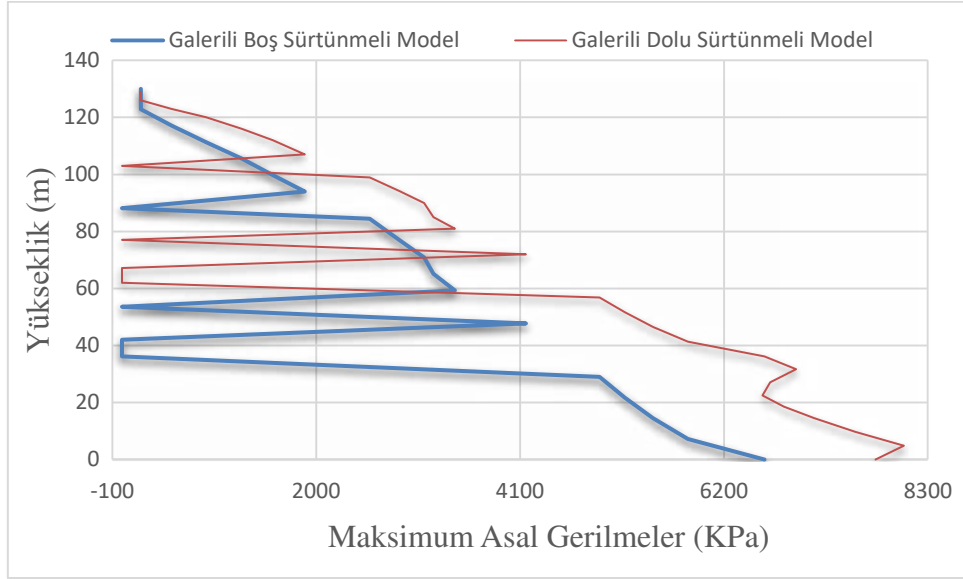


Şekil 3.57. Boş ve Dolu Galerili Bitişik Model maksimum asal gerilme değerlerinin yükseklikle değişimi

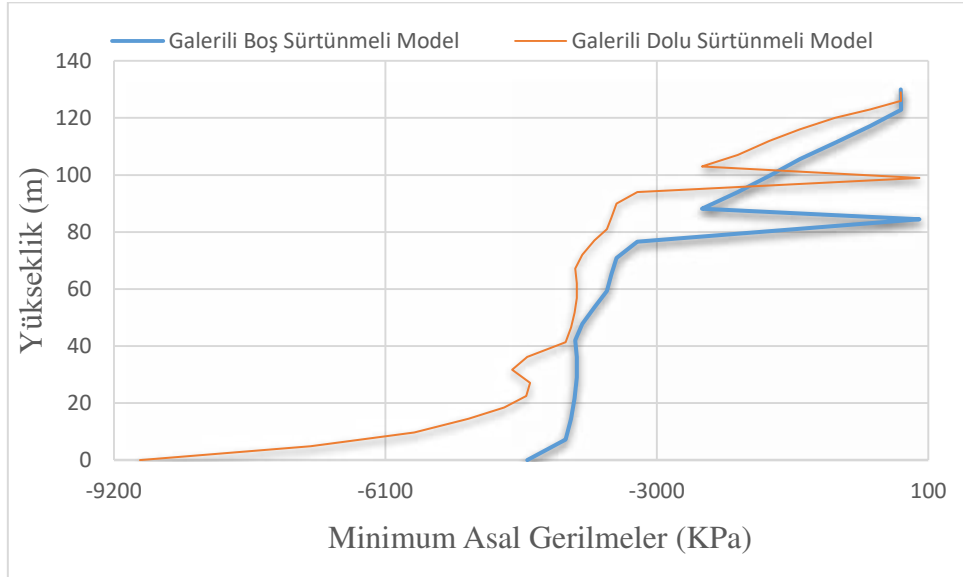


Şekil 3.58. Boş ve Dolu Galerili Bitişik Model minimum asal gerilme değerlerinin yükseklikle değişimi

4) Galerili Sürtünmeli modelin rezervuarın boş ve dolu olması durumların da ki asal gerilmeler karşılaştırılması

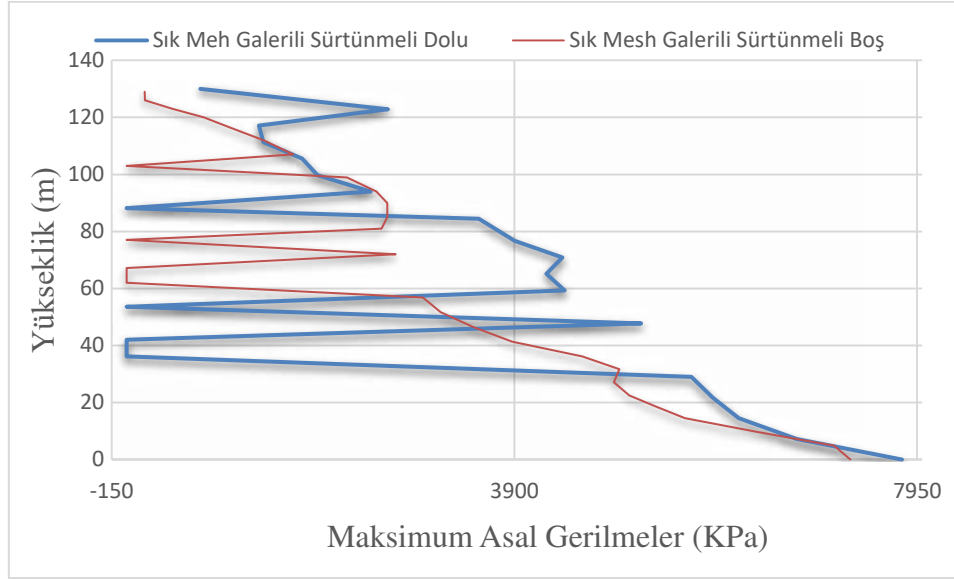


Şekil 3.59. Boş ve Dolu Galerili Sürtünmeli Model maksimum asal gerilme değerlerinin yükseklikle değişimi

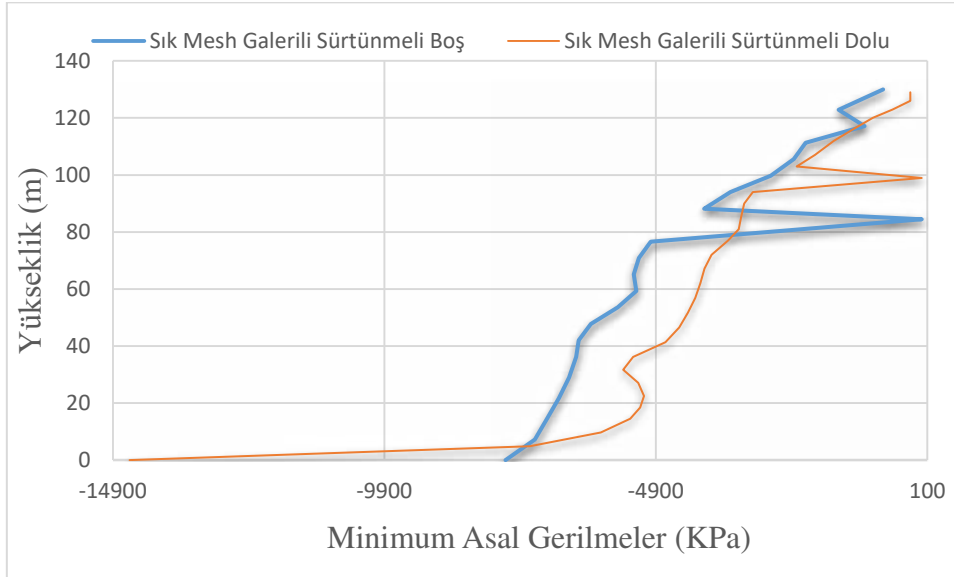


Şekil 3.60. Boş ve Dolu Galerili Sürtünmeli Model minimum asal gerilme değerlerinin yükseklikle değişimi

5) Galerili Sürtünmeli modelin rezervuarın boş ve dolu olması durumların da ki asal gerilmeler karşılaştırılması

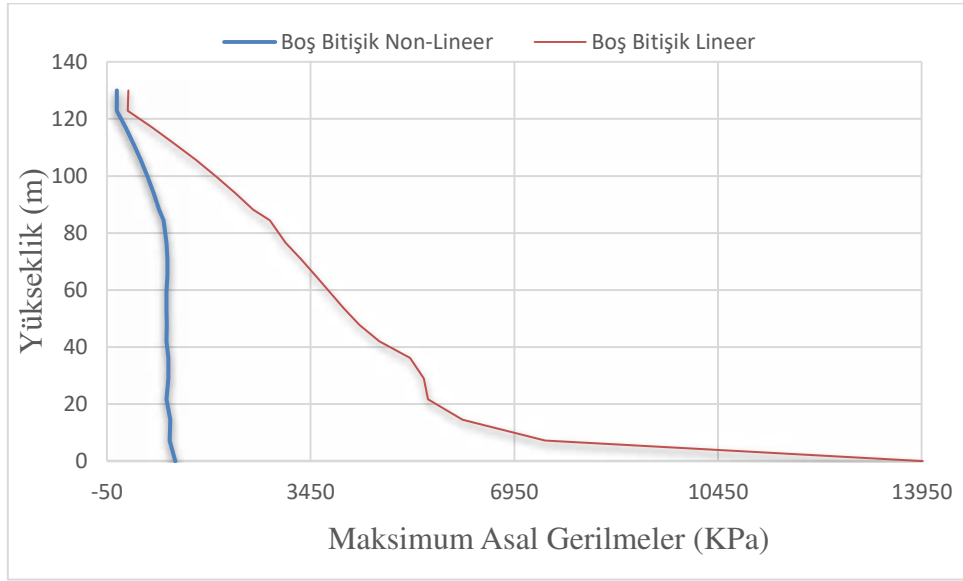


Şekil 3.61. Boş ve Dolu Sık Mesh Galerili Sürtünmeli Model maksimum asal gerilme değerlerinin yükseklikle değışimi

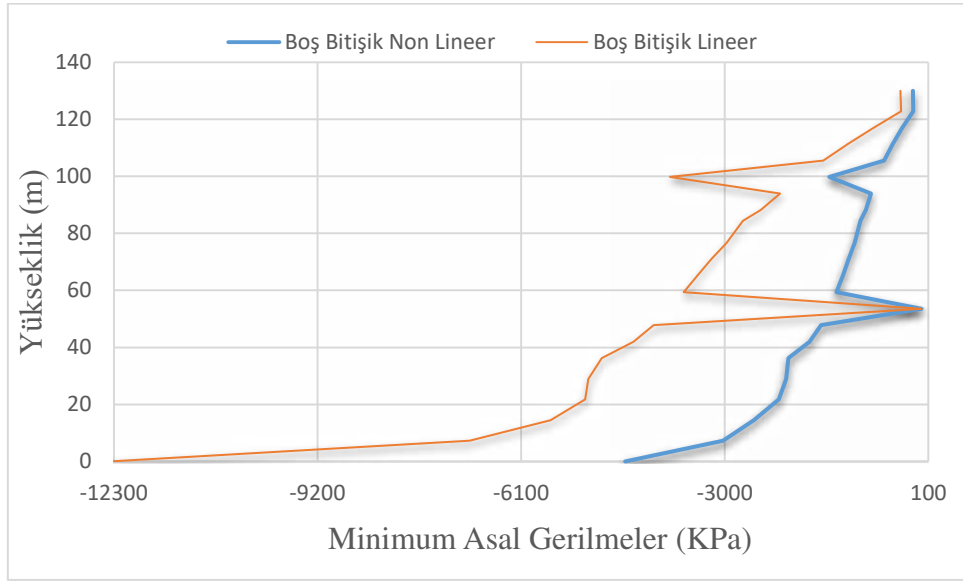


Şekil 3.62. Boş ve Dolu Sık Mesh Galerili Sürtünmeli Model minimum asal gerilme değerlerinin yükseklikle değışimi

6) Boş Bitişik modelin non-lineer ve lineer analiz sonuçlarının karşılaştırılması

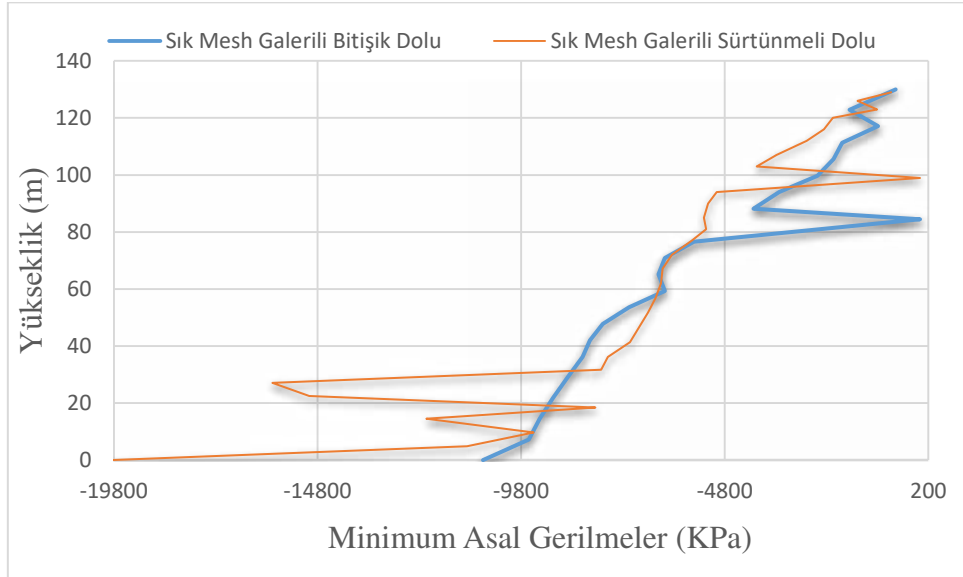
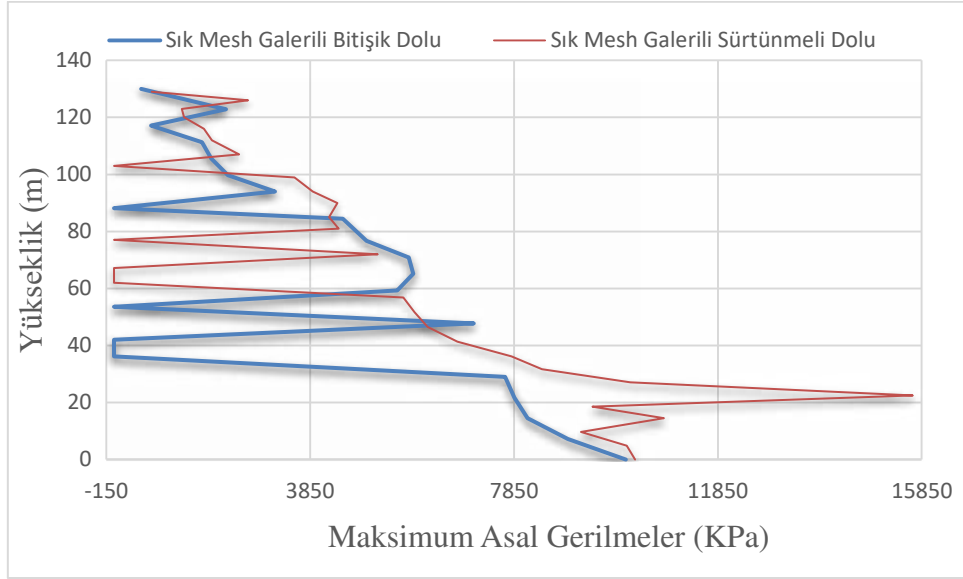


Şekil 3.63. Boş Bitişik modelin maksimum asal gerilme değerlerinin yükseklikle değişimi



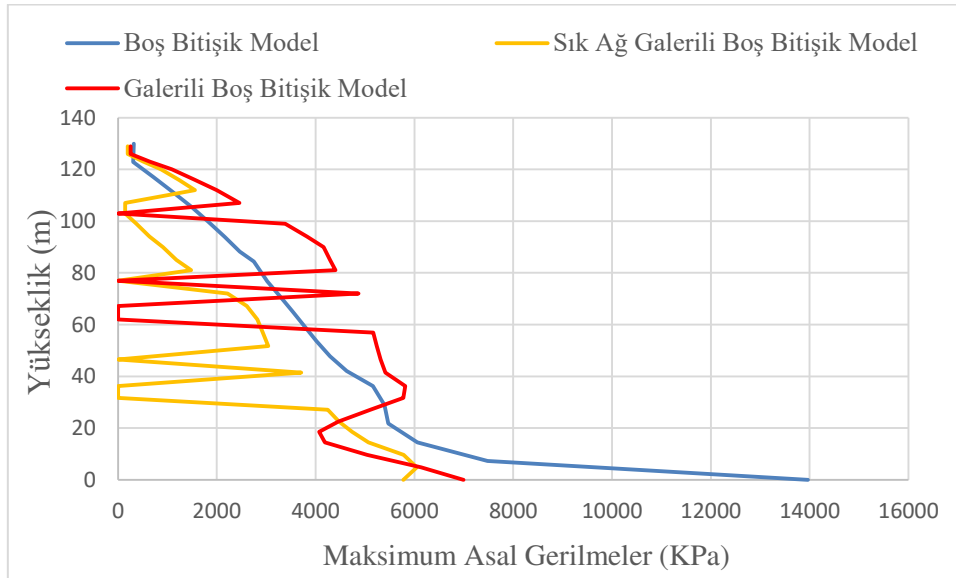
Şekil 3.64. Boş Bitişik modelin minimum asal gerilme değerlerinin yükseklikle değişimi

7) Sık Mesh Galerili Sürtünmeli Dolu ve Sık Mesh Galerili Bitişik Dolu modelin asal gerilmeler karşılaştırılması



8) Galerili Boş Bitişik, Sık Ağ Boş Bitişik ve Boş Bitişik modelin asal gerilmeler karşılaştırılması:

Baraj gövdesine galerilerin modellemeye dahil edilmeyerek modellendiği durum ile baraj gövdesinde var olan galerilerin dahil edildiği modeller arasında bir kıyaslama ile galerilerin asal gerilmeleri nasıl etkilediği gözlemlenmektedir. Baraj kesitindeki süreksizlikten dolayı oluşan ani gerilme değişimleri gözlenebilmektedir. Ayrıca galeri etrafında ki sonlu eleman ağı yoğunluğunun değişimi ile asal gerilmelerin değiştiği gözlemlendi. Sık ağ ile örülen galeri etraflarında ki modellerde oluşan asal gerilme değerleri menba yüzeyinde kret yüksekliği boyunca azaldığı gözlemlendi.

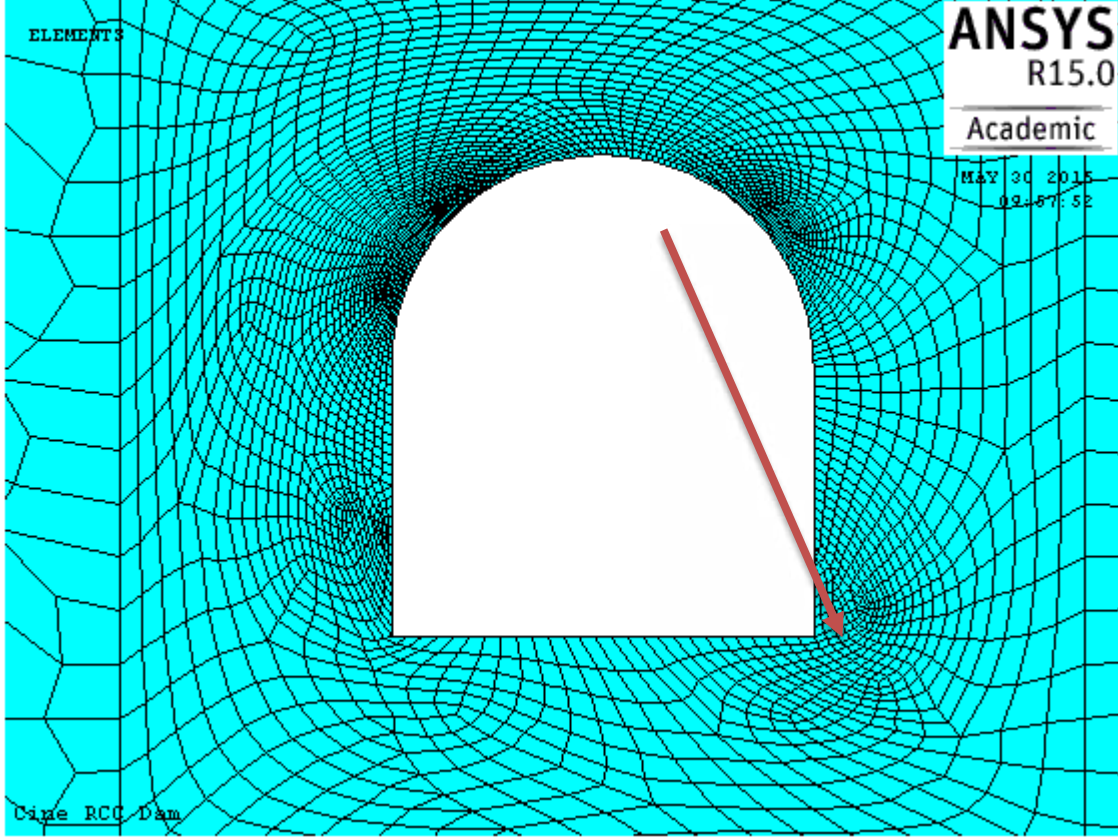


Şekil 3.67. Farklı yoğunlukta ağ sıklığına sahip galerili modeller ile galerisiz modellerde kret yüksekliği boyunca maksimum asal gerilme değişimi

9) Ağ yoğunluğunun değişmesi ile asal gerilme değerlerinin değişimi:

Farklı yoğunluklarda sonlu eleman ağları ile oluşturulan modellerde aynı malzeme parametreleri, aynı deprem ivmeleri ve aynı sınır şartları kullanılmasına rağmen süreksizliğin meydana geldiği galerilerde incelenmek üzere seçilen elemanda mesh sıklığının artması halinde asal gerilme değerlerinin de arttığı gözlenmiştir. Bu durumda modelleme yapılacak herhangi bir yapı için sonlu eleman ağı yoğunluğunun önemi ortaya çıkmaktadır. Galeride ok işareti ile gösterilen ve incelemeler için seçilmiş olan elemanın üzerinde ki gerilme yoğunluğunun

etrafında ki ve iç kısımlara doğru elemanlara oranla bir anda 5-6 katlarına kadar çıktığı gözlenmektedir.



Şekil 3.68. Galeri etrafında ki farklı sıklıklardaki mesh yoğunluğuna sahip modeller de ki asal gerilme değişiminin incelendiği eleman

BÖLÜM 4

SONUÇLAR VE ÖNERİLER

4.1 SONUÇLAR VE ÖNERİLER

Silindirle sıkıştırılmış beton bir barajın statik ve dinamik davranışının incelendiği bu çalışmada elde edilen asal gerilme bileşenlerinin değerlerine ve yatay yerdeğiştirme değerlerine göre baraj gövdesi yüksekliği boyunca farklı durumlar altında nasıl değiştiği irdelenmiştir.

Yapılan bu çalışmada galerili modellerin galerisiz modellere göre asal gerilme değerlerinde ki ani değişimleri gözlemlenmiştir. Bu gerilme sıçramalarının galeri etraflarında oluşturabileceği hasarlar iyice irdelenmelidir. Ciddi hasarların meydana gelmesi ihtimalinden dolayı yapılacak modellemelerde galerilerin modellere dahil edilmesi önerilmektedir.

Çalışma için seçilen Çine Barajının yapılan modellerinin rezervuarın boş ve dolu olması durumları için ayrı ayrı gerilme ve şekil değiştirme değerleri barajın zeminle bitişik ve sürtünmeli çalıştığı durumlar düşünülerek analizler yapılmıştır. Yapılan bu analizler sonucunda baraj gövdesinin zeminle bitişik ve sürtünmeli çalıştığı düşünülen durum için elde edilen asal gerilme değerlerinin beklenildiği gibi rezervuarın dolu olması halinde rezervuarın boş olması haline göre daha büyük olduğu verilen grafiklerde gözlenmektedir.

Sürtünmeli olarak oluşturulan modellerde elde edilen gerilme değerlerinin bitişik olarak modellenen durumlarla karşılaştırıldığında sürtünmeli modellerin daha düşük gerilme değerlerine sahip olduğu maksimum ve minimum asal gerilme değerleri için gözlenmektedir. Galerilerin olduğu modellerde baraj gövdesinde oluşan asal gerilme değerlerinde süreksizlikten dolayı meydana gelen ani değişimler galerili olarak verilen model grafiklerinde gözlenmektedir. Bu değişimler rezervuarın dolu olduğu durumlarda rezervuarın boş olduğu durumlara göre daha fazla olduğu görülmektedir.

Ankastre sınır şartlarına göre modellenen iki boyutlu Çine baraj modelinin zeminle bitişik çalıştığı ve rezervuarın boş olduğu düşünülen durumun non-lineer analiz sonucunda elde edilen gerilme değerlerinin lineer analizle elde edilen gerilme değerleri ile kıyaslandığında non-lineer analiz sonuçlarının çok küçük olduğu görülmekte ve oluşturulan bu modellerin non-lineer analizi yapılarak gerilmeler hakkında daha doğru sonuçlar elde edilmelidir.

Ayrıca sadece sonlu eleman ağı yoğunluğunu değişmesiyle oluşturulan modellerin aynı koordinatlara sahip ve süreksizliğin meydana geldiği düğüm noktalarında oluşan gerilme değerlerinde ki büyük değişim dikkat çekmiştir. Bu durumu daha iyi anlamak için süreksizliğin meydana geldiği galerilerin etrafında ki elemanlarda gerilme değişiminin daha sonra yapılacak çalışmalarda ağı sıklığı ile değişimini iyice görebilmek için oluşturulan model sayısı arttırılmalıdır. Bilgisayar yazılımlarından elde edilen gerilme değerlerinin daha gerçekçi olabilmesi için barajlardan cihazlarla alınacak ölçümler ile farklı ağı yoğunluklarına sahip modellerden hangisinin daha tutarlı sonuçlar verdiği gözlemlenmelidir. Ayrıca daha sonra yapılacak baraj modellerinde ki sonlu eleman ağı yoğunluğunda bu durum dikkate alınmalıdır.

Galeri etrafındaki sonlu eleman ağı sıklığının değişmesi ile baraj kret yüksekliği boyunca oluşan asal gerilme değerlerinde ki değişim gözlemlenebilmektedir. Galerideki sonlu eleman ağı yoğunluğunun artması ile menba yüzeyi tarafında baraj gövdesi yüksekliği boyunca elde edilen asal gerilme değerleri azaldığı gözlemlendi.

Yapılan bu çalışmada galerilerin olduğu bölgelerde meydana gelen gerilme artışlarını daha alt seviyelere düşürebilmek için barajlarda yapılacak galerilerin optimum büyüklüğünün ve geometrik şeklinin gerilmeleri nasıl etkilediği irdelenerek elde edilecek sonuçlar doğrultusunda daha sonra yapılacak olan barajlarda önerilerde bulunulabilir.

Bu çalışmada oluşturulan modellerde baraj sınırları ankastre tutuluymuş gibi modellenmiştir. Ancak bu modellerin viskoz sınır şartlarında deprem altında asal gerilme değerlerinde ki ve yatay deformasyonların nasıl bir davranış sergileyeceği de diğer bir araştırma konusudur.

Üç boyutlu sonlu eleman modellemesi yapılarak benzer araştırmalar yeniden yapılabilir.

Bu çalışmada zemin kütlesiz kabul edilmiş ve deprem yeryüzünden etkitilmiştir. Daha gerçekçi sonuçlar için deprem kaydı temel modelinin tabanına indirgenerek zeminin kütlesi dahil edilerek çözüm yapılmalıdır.

Baraj temel ara yüzünde farklı birleşim modelleri üzerinde çalışmalar yapılabilir

Yatay birleşim derzleri dikkate alınabilir, üç boyutlu modellerde ise hem yatay hem düşey derzler dikkate alınılabilir.

Barajın konumu dikkate alınarak farklı deprem senaryoları için özümmler irdelenebilir

KAYNAKLAR

- [1] **Orhon M** (1997) *Baraj Tipleri ve Yapım Kriterleri*. Türkiye Mühendislik Haberleri 391 Ekim 97.
- [2] **Andriolo R F** (1998) *The use of roller compacted concrete*. Past-Press, ISSMFE, SaoPaulo, Brazil, 554p
- [3] **Engineering Manual** (2000) *Roller Compacted Concrete*, Manual No. 1110,2,2006, US Army Corps ofEngineers, Washington, DC,50 p
- [4] **Gambhir M L** (1986) *Concrete technology*, Tata McGraw-Hill Publishing Company Limited, New Delhi,470 p.
- [5] **Yazıcı Ş** (2008) *Silindirle Sıkıştırılmış Beton*, Beton Köşesi İMA İzmir Şubesi Bülteni - Ocak 2008 - Sayı: 138
- [6] **Emiroğlu M E** (1998) *RCC Barajlarda Yeni Tasarım Kavramları*, Türkiye Mühendislik Haberleri, Şubat 98-Sayı:393
- [7] **Noorzaei J, Bayagoob K H, Thanoon W A and Jaafar M S** (2006) *Thermal and stress analysis of Kinta RCC dam*, Engineering Structures, Volume 28, Issue 13, November 2006, Pages 1795–1802, doi:10.1016/j.engstruct.2006.03.027
- [8] **Jaafar M S, Bayagoob K H, Noorzaei J and Thanoon W A** (2007) *Development of finite element computer code for thermal analysis of roller compacted concrete dams*, Advances in Engineering Software, Volume 38, Issues 11–12, November–December 2007, Pages 886–895, doi:10.1016/j.advengsoft.2006.08.040
- [9] **Yilmazturk M S, Arici Y and Binici B** (2015) *Seismic assessment of a monolithic RCC gravity dam including three dimensional dam–foundation–reservoir interaction*, Engineering Structures, Volume 100, 1 October 2015, Pages 137–148, doi:10.1016/j.engstruct.2015.05.041
- [10] **Li M, Guo X, Shi J and Zhu Z** (2015) *Seepage and stress analysis of anti-seepage structures constructed with different concrete materials in an RCC gravity dam*, Water Science and Engineering, Volume 8, Issue 4, October 2015, Pages 326–334, doi:10.1016/j.wse.2015.10.001
- [11] **Huang H and Chen B** (2012) *Dam Seepage Monitoring Model Based on Dynamic Effect Weight of Reservoir Water Level*, Energy Procedia, Volume 16, Part A, 2012, Pages 159-165, doi:10.1016/j.egypro.2012.01.027

KAYNAKLAR (devam ediyor)

- [12] **Hariri M A, Kolbadi S M and Kianoush M R** (2016) *FEM-based parametric analysis of a typical gravity dam considering input excitation mechanism*, Engineering Geology, Volume 84, May 2016, Pages 22–43, doi:10.1016/j.soildyn.2016.01.013
- [13] **Lin P, Huang B, Li Q and Wang R** (2014) *Hazard and seismic reinforcement analysis for typical large dams following the Wenchuan earthquake*, Soil Dynamics and Earthquake Engineering, Volume 194, 26 August 2015, Pages 86–97, doi:10.1016/j.enggeo.2014.05.011
- [14] **Jiang S and Du C** (2012) *Hazard and seismic reinforcement analysis for typical large dams following the Wenchuan earthquake*, Soil Dynamics and Earthquake Engineering, Volume 194, 26 August 2015, Pages 86–97, doi:10.1016/j.enggeo.2014.05.011
- [15] **Xiong K and Weng Y** (2013) *Seismic failure modes and seismic safety of Hardfill dam*, Water Science and Engineering, Volume 6, Issue 2, April 2013, Pages 199–214, doi:10.3882/j.issn.1674-2370.2013.02.008
- [16] **Cai X and Wu Y, Yi J and Ming Y** (2011) *Research on shape optimization of CSG dams*, Water Science and Engineering, Volume 4, Issue 4, December 2011, Pages 445–454, doi:10.3882/j.issn.1674-2370.2011.04.008
- [17] **Cheng L and Zheng D** (2013) *The identification of a dam's modal parameters under random support excitation based on the Hankel matrix joint approximate diagonalization technique*, Mechanical Systems and Signal Processing, Volume 42, Issues 1–2, January 2014, Pages 42–57, doi:10.1016/j.ymssp.2013.07.015
- [18] **Zhong H, Lin G, Li X and Li J** (2011) *Seismic failure modeling of concrete dams considering heterogeneity of concrete*, Soil Dynamics and Earthquake Engineering, Volume 31, Issue 12, December 2011, Pages 1678–1689, doi:10.1016/j.soildyn.2011.07.001
- [19] **Gaspar A, Lopez-Caballero F, Modarresi-Farahmand-Razavi A and Gomes-Correia A** (2011) *Methodology for a probabilistic analysis of an RCC gravity dam construction. Modelling of temperature, hydration degree and ageing degree fields*, Engineering Structures, Volume 65, 15 April 2014, Pages 99–110, doi:10.1016/j.engstruct.2014.02.002
- [20] **Zhuo L, He J D and Xie H Q** (2013) *Seismic deformation and seismic resistance analysis of Shapai Roller Compacted Concrete Arch Dam based on field monitoring and dynamic finite element method*, Journal of Mountain Science, Volume 10, Issue 1, 2013, Pages 137–148, DOI: 10.1007/s11629-013-2324-2
- [21] **Liang R Y, Nusier O K and Malkawi A H** (1999) *A Reliability based approach for evaluating the slope stability of embankment dams*, Engineering Geology, Volume 54, Issues 3–4, October 1999, Pages 271–285, doi:10.1016/S0013-7952(99)00017-4.

KAYNAKLAR (devam ediyor)

- [22] **Araujo J M and Awruch A M** (1996) *An objective cracking criterion for the analysis of concrete dams*, Computers & Structures, Volume 59, Issue 4, 17 May 1996, Pages 751-756, doi:10.1016/0045-7949(95)00295-2
- [23] **Westergaard M** (1993) *Water Pressures on Dams During Earthquakes*, Transactions, ASCE, 98, 418-433.
- [24] **Calayır Y** (1994) *Beton Ağırlık Barajların Euler ve Lagrange Yaklaşımları Kullanılarak Dinamik Analizi*, Doktora Tezi, K.T.Ü., Fen Bilimleri Enstitüsü, Trabzon.
- [25] **Bayraktar A** (1995) *Asinkronize Yer Hareketi Etkisindeki Baraj-Rezervuar-Temel Sistemlerinin Dinamik Davranışı*, Doktora Tezi, K.T.Ü., Fen Bilimleri Enstitüsü, Trabzon.
- [26] **Wilson, E.L. and Khalvati, M** (1983) *Finite Elements for the Dynamic Analysis of Fluid-Solid Systems*, International Journal for Numerical Methods in Engineering., Volume 19, Issue 11, November 1983 ,Pages 1657–1668, DOI: 10.1002/nme.1620191105
- [27] **Akkas N, Akay H U and Yilmaz C** (1979) *Applicability of general-purpose finite element programs in solid-fluid interaction problems*, Computers & Structures., Volume 10, Issue 5, October 1979, Pages 773-783, doi:10.1016/0045-7949(79)90041-5
- [28] **Bathe K J** (1996) *Finite Element Procedures*, Prentice-Hall Inc. Englewood Cliffs., New Jersey, 1037 s.
- [29] **Hacıfendioğlu K** (2004) *Değişerek Yayılan Yer Hareketi Etkisindeki Toprak Dolgu Barajların Linear Olmayan Stokastik Analizi*, Doktora Tezi, K.T.Ü., Fen Bilimleri Enstitüsü, Trabzon.
- [30] **Drucker D C and Prager W** (1952) *Soil Mechanics and Plastic Analysis on Limit Design.*, Quarterly Journal of Applied Mathematics., Volume 10, Issue 2, Pages 157-165,
- [31] **Chen W F ve Mizuno E** (1990) *Nonlinear Analysis in Soil Mechanics*, Elsevier Science Amsterdam, Netherlands, 672 s.
- [32] **Aksoğan O** (1986) *Nonlinear Yapı Analizi*, Yapı Mekaniğinde Son gelişmeler, Ed: Ertepinar, A., Wasti, S.T, Aksoğan O., KTÜ Basımevi, 225-233. Trabzon.
- [33] **ANSYS 11.0** (2009) *Swanson Analysis Systems Inc., Houston PA, USA.*
- [34] **Wriggers P** (2006) *Computational Contact Mechanics*, Second Edition, Springer Verlag, Netherlands, 518 s.

KAYNAKLAR (devam ediyor)

- [35] **Kartal M E** (2012) *Three-dimensional earthquake analysis of roller-compacted concrete dams*, Natural Hazards and Earth System Sciences, Volume 12, issue 7, doi:10.5194/nhess-12-2369-2012
- [36] **Lowe J** (1962) *Utilization of Soil Cement as Slope Protection for Earth Dams*, First ASCE Water Resources Engineering Conference-Omaha Nebraska, May
- [37] **Gentile G** (1964) *Study, Preparation and Placement of Low Cement Concrete, with Special Regards to its Use in Solid Gravity Dams*, VIII. ICOLD Congress, Edimburg,1964
- [38] **Kenneth D H and Reinhardt W G** (1991) *Roller Compacted Concrete Dams*.
- [39] **Andriolo F R** (1998) *The Use of RCC.*, Sao Paulo : Oficina de textos, 1998.
- [40] **Polat O** (2002) *Silindirle Sıkıştırılmış Beton Baraj Uygulamaları*

ÖZGEÇMİŞ

Muhammet KARABULUT, 1989 yılında Iğdır’da doğdu. İlköğrenimini Gaziler İlkokulunda, orta öğrenimini Gaziler Ortaokulunda, lise öğrenimini de Tuzluca 100.Yıl Lisesi’nde tamamladı. 2007 yılında Karadeniz Teknik Üniversitesi İnşaat Mühendisliği Bölümünü kazandı. 2011 yılında lisans öğrenimini bu bölümde tamamladı. 2013 yılında Bülent Ecevit Üniversitesi İnşaat Mühendisliği Bölümü’nde Araştırma Görevlisi kadrosuna atandı. Aynı yıl, Zonguldak Bülent Ecevit Üniversitesi İnşaat Mühendisliği Bölümünde yüksek lisans öğrenimine başladı. Bekar olan Muhammet KARABULUT iyi derecede İngilizce bilmektedir. Bugüne kadar birçok akademik çalışma yapan KARABULUT’ a ait yayın listesi aşağıda sunulmaktadır.

ADRES BİLGİLERİ:

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

Tel : (+90) 372 291 19 35

E-posta : karabulut@beun.edu.tr