

KARADENİZ TEKNİK ÜNİVERSİTESİ

FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

İNŞAAT MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI

TOPRAK DOLGU BARAJLARIN DRUCKER-PRAGER VE EĞRİ TANIMLAMA
YÖNTEMLERİYLE LİNEER OLMAYAN İKİ BOYUTLU DİNAMİK ANALİZİ

İnş. Müh. Kemal HACİFENDİOĞLU

96796

Karadeniz Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsünde

"İnşaat Yüksek Mühendisi"

Ünvanı Verilmesi İçin Kabul Edilen Tezdir

Tezin Enstitüye Verildiği Tarih : 27.07.2000

Tezin Savunma Tarihi : 24.08.2000

Tez Danışmanı : Prof. Dr. A. Aydın DUMANOĞLU

Jüri Üyesi : Prof. Dr. Sami KARADENİZ

Jüri Üyesi : Doç. Dr. Alemdar BAYRAKTAR

A. Aydın Dumanoglu
Samir Karadeniz
Alemdar Bayraktar

T.C. YÜKSEKÖĞRETİM KURULU
DOKÜMANTASYON MERKEZİ

Enstitü Müdürü : Prof. Dr. Asım KADIOĞLU

A. Kadıoğlu

Trabzon 2000

ÖNSÖZ

Bu çalışma Karadeniz Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı'nda Yüksek Lisans tezi olarak hazırlanmaktadır.

Deprem kuşağı üzerinde bulunan ülkemizde inşa edilen barajların güvenliğinin sağlanabilmesinin öncelikli konular arasında yer alması gerekmektedir. Bu sebeple barajlar üzerinde gerçekleştirilen analizlerin ne denli etkili oldukları ortaya çıkmaktadır. Çalışmada, baraj üzerinde gerçekleştirilen lineer olmayan dinamik analizlerin baraj güvenliği için ihmal edilemeyecek derecede önemli olduğunu göstermektedir.

Bu derece önemli ve yapılması gerekli bir çalışmayı bana öneren çalışmalarımı adım adım kontrol ederek yardımcı olan, araştırma, disiplin, sonuca ulaşabilme ve başarı zevki tattıran, doğru bir hayat çizgisinin başarı kaynağını oluşturabilmem için gerekli her konuda büyüklük gösteren ve acının hüznüyle değil yaşamayla kaybolacağını bilen yönetici saygıdeğer hocam **Prof.Dr. A.Aydın DUMANOĞLU**'na minnet ve şükranlarımı sunmayı her zaman için bir borç bilirim.

Çalışmalarım sırasında, bilgilerimi ve desteğini benden esirgemeyen Sayın Doç.Dr. Alemdar BAYRAKTAR'a teşekkürlerimi bir borç bilirim. Bilgisinin sadece kendisinde kalmasından hoşlanmayan oda arkadaşım Araş.Gör. Kurtuluş SOYLUK'a, çalışmamın her aşamasında yardımlarını önüme döken Araş.Gör. Mehmet AKKÖSE'ye ve Araş.Gör. Süleyman ADANUR'a minnettar olduğumu belirtmek isterim. Yardım etmeyi prensip edinen Dr. Talat Şükrü ÖZŞAHİN'e ve oda komşum Araş.Gör. Volkan KAHYA'ya ayrıca değerli arkadaşlarım Arş. Gör. Korhan Özgan ve Yük.İnş.Müh. Mürel İshak'a yardımlarından dolayı teşekkürlerimi sunarım.

Öğrenimim boyunca maddi ve manevi desteklerini esirgemeyen, hayata adımlarımı atışıma temel oluşturan başta anne ve babam olmak üzere ağabeylerim ve tüm aile fertlerine minnettar olduğumu belirtir bu çalışmamın ülkemize faydalı olmasını temenni ederim.

Trabzon, Ağustos 2000

Kemal HACİEFENDİOĞLU

İÇİNDEKİLER

Sayfa No

ÖNSÖZ.....	II
İÇİNDEKİLER.....	III
ÖZET.....	V
SUMMARY.....	VI
ŞEKİLLER DİZİNİ.....	VII
TABLolar DİZİNİ.....	XXI
SEMBOLLER DİZİNİ.....	XXIII
1. GENEL BİLGİLER	1
1.1. Giriş	1
1.1.1. Toprak Dolgu Barajların Tarihi Gelişimi.....	1
1.1.2. Toprak Dolgu Barajlar İle İlgili Daha Önce Yapılmış Çalışmalar.....	3
1.1.3. Çalışmanın İçeriği.....	13
1.2. Toprak Dolgu Barajların Projelendirilmesinde Esas Alınan Kriterler	14
1.3. Toprak Dolgu Barajlara Etki Eden Kuvvetler.....	15
1.3.1. Hidrodinamik Su Basıncı	15
1.4. Toprak Dolgu Barajlara Sonlu Elemanlar Yönteminin Uygulanması.....	18
1.4.1. Rijitlik Matrisi	20
1.4.2. Sönüm Matrisi	25
1.4.3. Kütle Matrisi.....	27
1.5. Sistemlerin Lineer ve Lineer Olmayan Dinamik Analizi	28
1.5.1. Lineer Dinamik Analiz İçin Hareket Denklemleri	29
1.5.1.1. Lineer Sistemlerin Analizi İçin Adım-Adım Çözüm Yöntemleri	29
1.5.1.1.1. Newmark Yöntemi	30
1.5.2. Lineer Olmayan Davranış	33
1.5.2.1. Elasto-Plastik Davranışı İçin Drucker-Prager Kırılma Hipotezi	36
1.5.2.2. Elasto-Plastik Davranışı İçin Eğri Tanımlama Yöntemi.....	40
1.5.3. Lineer Olmayan Dinamik Analiz İçin Hareket Denklemleri	44

1.5.3.1. Lineer Olmayan Sistemlerin Analizi İçin Adım-Adım Çözüm Yöntemleri.....	44
1.5.3.1.1. Değiştirilmiş Newton-Raphson İterasyonu.....	47
1.4.4. Lineer veLineer Olmayan Sistemlerin Çözümünde Kullanılan Wilson-θ Yöntemi	48
2.YAPILAN ÇALIŞMALAR.....	51
2.1. Barajın Yapısal Özellikleri.....	51
2.2. Barajın Malzeme Özellikleri.....	53
2.3. Gördes Barajı'nın Analitik Modeli.....	56
2.4. Yer Hareketinin Seçimi	59
2.5. Barajın Lineer ve Lineer Olmayan Dinamik Analizi	59
2.5.1. Baraj Rezervuar Etkileşimi	64
2.5.2. Baraj Zemin Etkileşimi	64
3. BULGULAR VE İRDELEMELER.....	66
3.1. Lineer Dinamik Analiz Sonuçlarının Karşılaştırılması	66
3.1.1. Gerilmelerin Karşılaştırılması	66
3.1.2. Yerdeğiştirmelerin Karşılaştırılması.....	78
3.2. Lineer Olmayan Dinamik Analiz Sonuçlarının Karşılaştırılması	90
3.2.1. Gerilmelerin Karşılaştırılması	90
3.2.2. Yerdeğiştirmelerin Karşılaştırılması.....	110
3.3. Lineer ve Lineer Olmayan Dinamik Analiz Sonuçlarının Karşılaştırılması.....	131
4. SONUÇLAR VE ÖNERİLER.....	139
5. KAYNAKLAR.....	142
ÖZGEÇMİŞ.....	151

ÖZET

Bu tez çalışmasında, toprak dolgu barajların iki boyutlu lineer ve malzeme bakımından lineer olmayan dinamik analizleri gerçekleştirilmektedir. Gerçekleştirilen analizlerde kullanılan malzemelerin izotropik olduğu varsayılırken, lineer olmayan analizlerde ayrıca malzemenin elasto-plastik davranış gösterdiği varsayılmaktadır. Elasto-plastik malzeme modelinin tanımlanabilmesi için Drucker-Prager hipotezi ve eğri tanımlama yöntemi düşünülmüştür. Örnek toprak dolgu barajın lineer ve lineer olmayan dinamik analizleri arasındaki farklar ve ayrıca lineer olmayan dinamik analizlerde kullanılan iki ayrı yöntem arasındaki farklar ortaya konulmaktadır.

Çalışma, dört bölümden oluşmaktadır. Birinci bölümde toprak dolgu barajların tarihi gelişimi, toprak dolgu barajlar üzerinde daha önceden yapılmış olan değişik çalışmalar, toprak dolgu barajların projelendirme esasları, toprak dolgu barajlara etki eden kuvvetler, Westergaard yönteminin tanıtılması, sonlu eleman yöntemi ile ilgili açıklamalar ve formülasyonlar, rijitlik, sönüm ve kütle matrisinin elde edilmesi, lineer ve lineer olmayan malzeme modellerinin tanıtılması ve dinamik analizlerde kullanılan adım-adım integrasyon formülasyonlarından bahsedilmektedir.

İkinci bölümde, analitik model üzerinde matematik modelin uygulanıp dinamik analizinin gerçekleştirilebilmesi için sonlu eleman modeli tanıtılmaktadır. Ayrıca, analizlerde kullanılan malzeme özellikleri ve El-Centro Depremi hakkında bilgi verilmektedir.

Üçüncü bölümde, elde edilen dinamik analiz sonuçlarının tablolar ve grafikler halinde sunulup değerlendirilmesinden ibaret olmaktadır.

Dördüncü bölümde ise elde edilen sonuçlar ve öneriler sunulmaktadır.

Anahtar Kelimeler: Sonlu Elemanlar Yöntemi, Lineer Dinamik Analiz, Lineer Olmayan Dinamik Analiz, Elasto-Plastik Malzeme Modeli, Drucker-Prager Akma Fonksiyonu, Eğri Tanımlama Modeli, Wilson- θ Yöntemi, Baraj-Zemin Etkileşimi, Baraj-Rezervuar Etkileşimi.

SUMMARY

Linear And Nonlinear Two Dimensional Dynamic Analysis Of Earthfill Dams By Drucker-Prager And Curve Description Methods

In this work, two dimensional linear dynamic analysis and nonlinear dynamic analysis including material nonlinearities are carried out. Material used in analyses is assumed to be isotropic. In nonlinear analysis elasto-plastic material behaviour is taken into account. The Drucker-Prager method and curve description method are considered to describe the elasto-plastic material models. The differences between linear and nonlinear analyses of a sample earthfill dam are performed as well as two different method used in nonlinear dynamic analyses.

This work consists of four chapters. In the first chapter, the historical developments of earthfill dams, previous works employed on the earthfill dams, design criteria of earthfill dams, the forces subjected to earthfill dams, identification of the Westergaard Method, expressions and formulations related the finite element method, stiffness, damping and mass matrices, identification of material models and formulations of step-by-step solution for dynamic analyses are mentioned.

The finite element model is introduced to perform dynamic analysis by applying mathematical model to analytical model. Also, material properties used in analyses and information about El-Centro Earthquake is given.

In the third chapter, the results obtained from the dynamic analyses are given with tables and graphics, and also are evaluated. In the fourth chapter, the conclusions and suggestions drawn from this work are presented.

Keywords: Finite Element Method, Linear Dynamic Analysis, Nonlinear Dynamic Analysis, Elasto-Plastic Material Model, Drucker-Prager Yield Function, Curve Description Model, Wilson- θ Method.

ŞEKİLLER DİZİNİ

	<u>Sayfa No</u>
Şekil 1. İlave kütlelerin gösterimi.....	17
Şekil 2. Hidrodinamik basınç dağılımı.....	17
Şekil 3. Eğri yüzeyler için kütle ekleme.....	18
Şekil 4. Global (a) ve lokal (b) koordinat sistemleri.....	21
Şekil 5. Rayleigh sönüm modelindeki a_0 ve a_1 orantı faktörleri ve kritik sönüm oranı ξ arasındaki ilişki.....	27
Şekil 6. Diagonal toplu kütle.....	28
Şekil 7. Doğrusal olmayan davranışlar.....	33
Şekil 8. Malzemenin elasto-plastik davranışı (a-lineer olmayan elasto-plastik, b-lineer elasto-plastik).....	35
Şekil 9. Üç boyutlu gerilme hali için Drucker-Prager kırılma yüzeyi.....	37
Şekil 10. Drucker-Prager akma kriteri.....	38
Şekil 11. Eğri tanımlama modelinde kullanılan modüller.....	43
Şekil 12. Tanjant ve sekant rijitliği.....	45
Şekil 13. Değiştirilmiş Newton-Raphson iterasyonu.....	47
Şekil 14. Wilson- θ metodu.....	49
Şekil 15. Gördes Barajı boyutları.....	52
Şekil 16. 1 nolu elasto-plastik malzeme için gerilme şekildeğiştirme diyagramı.....	54
Şekil 17. 2 nolu elasto-plastik malzeme için gerilme şekildeğiştirme diyagramı.....	54
Şekil 18. 3 nolu elasto-plastik malzeme için gerilme şekildeğiştirme diyagramı.....	55
Şekil 19. 4 nolu elasto-plastik malzeme için gerilme şekildeğiştirme diyagramı.....	55
Şekil 20. Temelin rijit olması halinde barajın sonlu eleman modeli.....	57
Şekil 21. Temelin eğilebilir olması halinde sonlu eleman modeli.....	58
Şekil 22. 18 Mayıs 1940 El Centro depreminin kuzey-güney (S00E) bileşeni.....	59
Şekil 23. Lineer analiz için baraj üzerinde seçilen düğüm noktaları ve belirlenen kesitler.....	62

Şekil 24. Lineer olmayan analiz için baraj üzerinde seçilen gauss noktaları ve belirlenen kesitler.....	63
Şekil 25. Lineer dinamik analizde, temelin rijit, barajın boş ve dolu olması durumunda menba yüzeyinde Y-doğrultusundaki, mutlak değerce maksimum, gerilmelerin yükseklik boyunca değişimi.....	68
Şekil 26. Lineer dinamik analizde, temelin eğilebilir, barajın boş ve dolu olması durumunda menba yüzeyinde Y-doğrultusundaki, mutlak değerce maksimum, gerilmelerin yükseklik boyunca değişimi.....	68
Şekil 27. Lineer dinamik analizde, temelin rijit, barajın boş ve dolu olması durumunda menba yüzeyinde Z-doğrultusundaki, mutlak değerce maksimum, gerilmelerin yükseklik boyunca değişimi.....	69
Şekil 28. Lineer dinamik analizde, temelin eğilebilir, barajın boş ve dolu olması durumunda menba yüzeyinde Z-doğrultusundaki, mutlak değerce maksimum, gerilmelerin yükseklik boyunca değişimi.....	69
Şekil 29. Lineer dinamik analizde, temelin rijit, barajın boş olması durumunda 1 nolu düğüm noktasında Y-doğrultusunda meydana gelen gerilmelerin zamanla değişimi.....	70
Şekil 30. Lineer dinamik analizde, temelin rijit, barajın dolu olması durumunda 1 nolu düğüm noktasında Y-doğrultusunda meydana gelen gerilmelerin zamanla değişimi.....	70
Şekil 31. Lineer dinamik analizde, temelin eğilebilir, barajın boş olması durumunda 1 nolu düğüm noktasında Y-doğrultusunda meydana gelen gerilmelerin zamanla değişimi.....	71
Şekil 32. Lineer dinamik analizde, temelin eğilebilir, barajın dolu olması durumunda 1 nolu düğüm noktasında Y-doğrultusunda meydana gelen gerilmelerin zamanla değişimi.....	71
Şekil 33. Lineer dinamik analizde, temelin rijit, barajın boş olması durumunda 1 nolu düğüm noktasında Z-doğrultusunda meydana gelen gerilmelerin zamanla değişimi.....	72
Şekil 34. Lineer dinamik analizde, temelin rijit, barajın dolu olması durumunda 1 nolu düğüm noktasında Z-doğrultusunda meydana gelen gerilmelerin zamanla değişimi.....	72

Şekil 35. Lineer dinamik analizde, temelin eğilebilir, barajın boş olması durumunda 1 nolu düğüm noktasında Z-doğrultusunda meydana gelen gerilmelerin zamanla değişimi	73
Şekil 36. Lineer dinamik analizde, temelin eğilebilir, barajın dolu olması durumunda 1 nolu düğüm noktasında Z-doğrultusunda meydana gelen gerilmelerin zamanla değişimi	73
Şekil 37. Lineer dinamik analizde, temelin rijit, barajın boş olması durumunda 5 nolu düğüm noktasında Y-doğrultusunda meydana gelen gerilmelerin zamanla değişimi	74
Şekil 38. Lineer dinamik analizde, temelin rijit, barajın dolu olması durumunda 5 nolu düğüm noktasında Y-doğrultusunda meydana gelen gerilmelerin zamanla değişimi	74
Şekil 39. Lineer dinamik analizde, temelin eğilebilir, barajın boş olması durumunda 5 nolu düğüm noktasında Y-doğrultusunda meydana gelen gerilmelerin zamanla değişimi	75
Şekil 40. Lineer dinamik analizde, temelin eğilebilir, barajın dolu olması durumunda 5 nolu düğüm noktasında Y-doğrultusunda meydana gelen gerilmelerin zamanla değişimi	75
Şekil 41. Lineer dinamik analizde, temelin rijit, barajın boş olması durumunda 5 nolu düğüm noktasında Z-doğrultusunda meydana gelen gerilmelerin zamanla değişimi	76
Şekil 42. Lineer dinamik analizde, temelin rijit, barajın dolu olması durumunda 5 nolu düğüm noktasında Z-doğrultusunda meydana gelen gerilmelerin zamanla değişimi	76
Şekil 43. Lineer dinamik analizde, temelin eğilebilir, barajın boş olması durumunda 5 nolu düğüm noktasında Z-doğrultusunda meydana gelen gerilmelerin zamanla değişimi	77
Şekil 44. Lineer dinamik analizde, temelin eğilebilir, barajın dolu olması durumunda 5 nolu düğüm noktasında Z-doğrultusunda meydana gelen gerilmelerin zamanla değişimi	77

- Şekil 45. Lineer dinamik analizde, temelin rijit, barajın boş olması durumunda menba, mansap yüzeyi ve I-I kesitindeki mutlak değerce maksimum yatay yerdeğiştirmelerin yükseklik boyunca değişimi 80
- Şekil 46. Lineer dinamik analizde, temelin rijit, barajın dolu olması durumunda menba, mansap yüzeyi ve I-I kesitindeki mutlak değerce maksimum yatay yerdeğiştirmelerin yükseklik boyunca değişimi 80
- Şekil 47. Lineer dinamik analizde, temelin rijit, barajın boş olması durumunda menba, mansap yüzeyi ve I-I kesitindeki mutlak değerce maksimum düşey yerdeğiştirmelerin yükseklik boyunca değişimi..... 81
- Şekil 48. Lineer dinamik analizde, temelin rijit, barajın dolu olması durumunda menba, mansap yüzeyi ve I-I kesitindeki mutlak değerce maksimum düşey yerdeğiştirmelerin yükseklik boyunca değişimi..... 81
- Şekil 49. Lineer dinamik analizde, temelin eğilebilir, barajın boş olması durumunda menba, mansap yüzeyi ve I-I kesitindeki mutlak değerce maksimum yatay yerdeğiştirmelerin yükseklik boyunca değişimi 82
- Şekil 50. Lineer dinamik analizde, temelin eğilebilir, barajın dolu olması durumunda menba, mansap yüzeyi ve I-I kesitindeki mutlak değerce maksimum yatay yerdeğiştirmelerin yükseklik boyunca değişimi 82
- Şekil 51. Lineer dinamik analizde, temelin eğilebilir, barajın boş olması durumunda menba, mansap yüzeyi ve I-I kesitindeki mutlak değerce maksimum düşey yerdeğiştirmelerin yükseklik boyunca değişimi..... 83
- Şekil 52. Lineer dinamik analizde, temelin eğilebilir, barajın dolu olması durumunda menba, mansap yüzeyi ve I-I kesitindeki mutlak değerce maksimum düşey yerdeğiştirmelerin yükseklik boyunca değişimi..... 83
- Şekil 53. Lineer dinamik analizde, temelin rijit, barajın boş ve dolu olması durumunda menba yüzeyindeki mutlak değerce maksimum yatay yerdeğiştirmelerin yükseklik boyunca değişimi..... 84
- Şekil 54. Lineer dinamik analizde, temelin eğilebilir, barajın boş ve dolu olması durumunda menba yüzeyindeki mutlak değerce maksimum yatay yerdeğiştirmelerin yükseklik boyunca değişimi..... 84

- Şekil 55. Lineer dinamik analizde, temelin rijit, barajın boş ve dolu olması durumunda II-II kesitindeki mutlak değerce maksimum yatay yerdeğiştirmelerin yatay uzaklık boyunca değişimi 85
- Şekil 56. Lineer dinamik analizde, temelin eğilebilir, barajın boş ve dolu olması durumunda II-II kesitindeki mutlak değerce maksimum yatay yerdeğiştirmelerin yatay uzaklık boyunca değişimi 85
- Şekil 57. Lineer dinamik analizde, temelin rijit, barajın boş olması durumunda 2 nolu düğüm noktasında meydana gelen yatay yerdeğiştirmelerin zamanla değişimi 86
- Şekil 58. Lineer dinamik analizde, temelin rijit, barajın dolu olması durumunda 2 nolu düğüm noktasında meydana gelen yatay yerdeğiştirmelerin zamanla değişimi 86
- Şekil 59. Lineer dinamik analizde, temelin eğilebilir, barajın boş olması durumunda 2 nolu düğüm noktasında meydana gelen yatay yerdeğiştirmelerin zamanla değişimi 87
- Şekil 60. Lineer dinamik analizde, temelin eğilebilir, barajın dolu olması durumunda 2 nolu düğüm noktasında meydana gelen yatay yerdeğiştirmelerin zamanla değişimi 87
- Şekil 61. Lineer dinamik analizde, temelin rijit, barajın boş olması durumunda 4 nolu düğüm noktasında meydana gelen yatay yerdeğiştirmelerin zamanla değişimi 88
- Şekil 62. Lineer dinamik analizde, temelin rijit, barajın dolu olması durumunda 4 nolu düğüm noktasında meydana gelen yatay yerdeğiştirmelerin zamanla değişimi 88
- Şekil 63. Lineer dinamik analizde, temelin eğilebilir, barajın boş olması durumunda 4 nolu düğüm noktasında meydana gelen yatay yerdeğiştirmelerin zamanla değişimi 89
- Şekil 64. Lineer dinamik analizde, temelin eğilebilir, barajın dolu olması durumunda 4 nolu düğüm noktasında meydana gelen yatay yerdeğiştirmelerin zamanla değişimi 89

- Şekil 65. Drucker-Prager Yöntemi ile lineer olmayan dinamik analizde, temel rijit, barajın boş olması durumunda A nolu gauss noktasında Y-doğrultusunda meydana gelen gerilmelerin zamanla değişimi 92
- Şekil 66. Drucker-Prager Yöntemi ile lineer olmayan dinamik analizde, temel rijit, barajın dolu olması durumunda A nolu gauss noktasında Y-doğrultusunda meydana gelen gerilmelerin zamanla değişimi 93
- Şekil 67. Drucker-Prager Yöntemi ile lineer olmayan dinamik analizde, temel eğilebilir, barajın boş olması durumunda A nolu gauss noktasında Y-doğrultusunda meydana gelen gerilmelerin zamanla değişimi 93
- Şekil 68. Drucker-Prager Yöntemi ile lineer olmayan dinamik analizde, temel eğilebilir, barajın dolu olması durumunda A nolu gauss noktasında Y-doğrultusunda meydana gelen gerilmelerin zamanla değişimi 94
- Şekil 69. Drucker-Prager Yöntemi ile lineer olmayan dinamik analizde, temel rijit, barajın boş olması durumunda A nolu gauss noktasında Z-doğrultusunda meydana gelen gerilmelerin zamanla değişimi 94
- Şekil 70. Drucker-Prager Yöntemi ile lineer olmayan dinamik analizde, temel rijit, barajın dolu olması durumunda A nolu gauss noktasında Z-doğrultusunda meydana gelen gerilmelerin zamanla değişimi 95
- Şekil 71. Drucker-Prager Yöntemi ile lineer olmayan dinamik analizde, temel eğilebilir, barajın boş olması durumunda A nolu gauss noktasında Z-doğrultusunda meydana gelen gerilmelerin zamanla değişimi 95
- Şekil 72. Drucker-Prager Yöntemi ile lineer olmayan dinamik analizde, temel eğilebilir, barajın dolu olması durumunda A nolu gauss noktasında Z-doğrultusunda meydana gelen gerilmelerin zamanla değişimi 96
- Şekil 73. Drucker-Prager Yöntemi ile lineer olmayan dinamik analizde, temel rijit, barajın boş olması durumunda E nolu gauss noktasında Y-doğrultusunda meydana gelen gerilmelerin zamanla değişimi 96
- Şekil 74. Drucker-Prager Yöntemi ile lineer olmayan dinamik analizde, temel rijit, barajın dolu olması durumunda E nolu gauss noktasında Y-doğrultusunda meydana gelen gerilmelerin zamanla değişimi 97

- Şekil 75. Drucker-Prager Yöntemi ile lineer olmayan dinamik analizde, temelin eğilebilir, barajın boş olması durumunda E nolu gauss noktasında Y-doğrultusunda meydana gelen gerilmelerin zamanla değişimi 97
- Şekil 76. Drucker-Prager Yöntemi ile lineer olmayan dinamik analizde, temelin eğilebilir, barajın dolu olması durumunda E nolu gauss noktasında Y-doğrultusunda meydana gelen gerilmelerin zamanla değişimi 98
- Şekil 77. Drucker-Prager Yöntemi ile lineer olmayan dinamik analizde, temelin rijit, barajın boş olması durumunda E nolu gauss noktasında Z-doğrultusunda meydana gelen gerilmelerin zamanla değişimi 98
- Şekil 78. Drucker-Prager Yöntemi ile lineer olmayan dinamik analizde, temelin rijit, barajın dolu olması durumunda E nolu gauss noktasında Z-doğrultusunda meydana gelen gerilmelerin zamanla değişimi 99
- Şekil 79. Drucker-Prager Yöntemi ile lineer olmayan dinamik analizde, temelin eğilebilir, barajın boş olması durumunda E nolu gauss noktasında Z-doğrultusunda meydana gelen gerilmelerin zamanla değişimi 99
- Şekil 80. Drucker-Prager Yöntemi ile lineer olmayan dinamik analizde, temelin eğilebilir, barajın dolu olması durumunda E nolu gauss noktasında Z-doğrultusunda meydana gelen gerilmelerin zamanla değişimi 100
- Şekil 81. Eğri Tanımlama Yöntemi ile lineer olmayan dinamik analizde, temelin rijit, barajın boş olması durumunda A nolu gauss noktasında Y-doğrultusunda meydana gelen gerilmelerin zamanla değişimi 100
- Şekil 82. Eğri Tanımlama Yöntemi ile lineer olmayan dinamik analizde, temelin rijit, barajın dolu olması durumunda A nolu gauss noktasında Y-doğrultusunda meydana gelen gerilmelerin zamanla değişimi 101
- Şekil 83. Eğri Tanımlama Yöntemi ile lineer olmayan dinamik analizde, temelin eğilebilir, barajın boş olması durumunda A nolu gauss noktasında Y-doğrultusunda meydana gelen gerilmelerin zamanla değişimi 102
- Şekil 84. Eğri Tanımlama Yöntemi ile lineer olmayan dinamik analizde, temelin eğilebilir, barajın dolu olması durumunda A nolu gauss noktasında Y-doğrultusunda meydana gelen gerilmelerin zamanla değişimi 102

- Şekil 85. Eğri Tanımlama Yöntemi ile lineer olmayan dinamik analizde, temelin rijit, barajın boş olması durumunda A nolu gauss noktasında Z-doğrultusunda meydana gelen gerilmelerin zamanla değişimi 103
- Şekil 86. Eğri Tanımlama Yöntemi ile lineer olmayan dinamik analizde, temelin rijit, barajın dolu olması durumunda A nolu gauss noktasında Z-doğrultusunda meydana gelen gerilmelerin zamanla değişimi 103
- Şekil 87. Eğri Tanımlama Yöntemi ile lineer olmayan dinamik analizde, temelin eğilebilir, barajın boş olması durumunda A nolu gauss noktasında Z-doğrultusunda meydana gelen gerilmelerin zamanla değişimi 104
- Şekil 88. Eğri Tanımlama Yöntemi ile lineer olmayan dinamik analizde, temelin eğilebilir, barajın dolu olması durumunda A nolu gauss noktasında Z-doğrultusunda meydana gelen gerilmelerin zamanla değişimi 104
- Şekil 89. Eğri Tanımlama Yöntemi ile lineer olmayan dinamik analizde, temelin rijit, barajın boş olması durumunda E nolu gauss noktasında Y-doğrultusunda meydana gelen gerilmelerin zamanla değişimi 105
- Şekil 90. Eğri Tanımlama Yöntemi ile lineer olmayan dinamik analizde, temelin rijit, barajın dolu olması durumunda E nolu gauss noktasında Y-doğrultusunda meydana gelen gerilmelerin zamanla değişimi 105
- Şekil 91. Eğri Tanımlama Yöntemi ile lineer olmayan dinamik analizde, temelin eğilebilir, barajın boş olması durumunda E nolu gauss noktasında Y-doğrultusunda meydana gelen gerilmelerin zamanla değişimi 106
- Şekil 92. Eğri Tanımlama Yöntemi ile lineer olmayan dinamik analizde, temelin eğilebilir, barajın dolu olması durumunda E nolu gauss noktasında Y-doğrultusunda meydana gelen gerilmelerin zamanla değişimi 106
- Şekil 93. Eğri Tanımlama Yöntemi ile lineer olmayan dinamik analizde, temelin eğilebilir, barajın dolu olması durumunda I nolu gauss noktasında Y-doğrultusunda meydana gelen gerilmelerin zamanla değişimi 107
- Şekil 94. Eğri Tanımlama Yöntemi ile lineer olmayan dinamik analizde, temelin rijit, barajın boş olması durumunda E nolu gauss noktasında Z-doğrultusunda meydana gelen gerilmelerin zamanla değişimi 108

- Şekil 95. Eğri Tanımlama Yöntemi ile lineer olmayan dinamik analizde, temelin rijit, barajın dolu olması durumunda E nolu gauss noktasında Z-doğrultusunda meydana gelen gerilmelerin zamanla değişimi 108
- Şekil 96. Eğri Tanımlama Yöntemi ile lineer olmayan dinamik analizde, temelin eğilebilir, barajın boş olması durumunda E nolu gauss noktasında Z-doğrultusunda meydana gelen gerilmelerin zamanla değişimi 109
- Şekil 97. Eğri Tanımlama Yöntemi ile lineer olmayan dinamik analizde, temelin eğilebilir, barajın dolu olması durumunda E nolu gauss noktasında Z-doğrultusunda meydana gelen gerilmelerin zamanla değişimi 109
- Şekil 98. Drucker-Prager Yöntemi ile lineer olmayan dinamik analizde, temelin rijit, barajın boş olması durumunda menba, mansap yüzeyindeki mutlak değerce maksimum yatay yerdeğiştirmelerin yükseklik boyunca değişimi 111
- Şekil 99. Drucker-Prager Yöntemi ile lineer olmayan dinamik analizde, temelin rijit, barajın dolu olması durumunda menba, mansap yüzeyindeki mutlak değerce maksimum yatay yerdeğiştirmelerin yükseklik boyunca değişimi 111
- Şekil 100. Drucker-Prager Yöntemi ile lineer olmayan dinamik analizde, temelin rijit, barajın boş olması durumunda menba, mansap yüzeyindeki mutlak değerce maksimum düşey yerdeğiştirmelerin yükseklik boyunca değişimi 112
- Şekil 101. Drucker-Prager Yöntemi ile lineer olmayan dinamik analizde, temelin rijit, barajın dolu olması durumunda menba, mansap yüzeyindeki mutlak değerce maksimum düşey yerdeğiştirmelerin yükseklik boyunca değişimi 112
- Şekil 102. Drucker-Prager Yöntemi ile lineer olmayan dinamik analizde, temelin eğilebilir, barajın boş olması durumunda menba, mansap yüzeyindeki mutlak değerce maksimum yatay yerdeğiştirmelerin yükseklik boyunca değişimi 113

- Şekil 103. Drucker-Prager Yöntemi ile lineer olmayan dinamik analizde, temelin eğilebilir, barajın dolu olması durumunda menba, mansap yüzeyindeki mutlak değerce maksimum yatay yerdeğiştirmelerin yükseklik boyunca değişimi..... 113
- Şekil 104. Drucker-Prager Yöntemi ile lineer olmayan dinamik analizde, temelin eğilebilir, barajın boş olması durumunda menba, mansap yüzeyindeki mutlak değerce maksimum düşey yerdeğiştirmelerin yükseklik boyunca değişimi..... 114
- Şekil 105. Drucker-Prager Yöntemi ile lineer olmayan dinamik analizde, temelin eğilebilir, barajın dolu olması durumunda menba, mansap yüzeyindeki mutlak değerce maksimum düşey yerdeğiştirmelerin yükseklik boyunca değişimi..... 114
- Şekil 106. Drucker-Prager Yöntemi ile lineer olmayan dinamik analizde, temelin rijit, barajın boş ve dolu olması durumunda menba yüzeyindeki mutlak değerce maksimum yatay yerdeğiştirmelerin yükseklik boyunca değişimi..... 115
- Şekil 107. Drucker-Prager Yöntemi ile lineer olmayan dinamik analizde, temelin eğilebilir, barajın boş ve dolu olması durumunda menba yüzeyindeki mutlak değerce maksimum yatay yerdeğiştirmelerin yükseklik boyunca değişimi..... 115
- Şekil 108. Drucker-Prager Yöntemi ile lineer olmayan dinamik analizde, temelin rijit, barajın boş ve dolu olması durumunda II-II kesitindeki mutlak değerce maksimum yatay yerdeğiştirmelerin yatay uzaklık boyunca değişimi..... 116
- Şekil 109. Drucker-Prager Yöntemi ile lineer olmayan dinamik analizde, temelin eğilebilir, barajın boş ve dolu olması durumunda II-II kesitindeki mutlak değerce maksimum yatay yerdeğiştirmelerin yatay uzaklık boyunca değişimi..... 116
- Şekil 110. Drucker-Prager Yöntemi ile lineer olmayan dinamik analizde, temelin rijit, barajın boş olması durumunda 2 nolu düğüm noktasında meydana gelen yatay yerdeğiştirmelerin zamanla değişimi 117

- Şekil 111. Drucker-Prager Yöntemi ile lineer olmayan dinamik analizde, temelin rijit, barajın dolu olması durumunda 2 nolu düğüm noktasında meydana gelen yatay yerdeğiştirmelerin zamanla değişimi 117
- Şekil 112. Drucker-Prager Yöntemi ile lineer olmayan dinamik analizde, temelin eğilebilir, barajın boş olması durumunda 2 nolu düğüm noktasında meydana gelen yatay yerdeğiştirmelerin zamanla değişimi 118
- Şekil 113. Drucker-Prager Yöntemi ile lineer olmayan dinamik analizde, temelin eğilebilir, barajın dolu olması durumunda 2 nolu düğüm noktasında meydana gelen yatay yerdeğiştirmelerin zamanla değişimi 118
- Şekil 114. Drucker-Prager Yöntemi ile lineer olmayan dinamik analizde, temelin rijit, barajın boş olması durumunda 4 nolu düğüm noktasında meydana gelen yatay yerdeğiştirmelerin zamanla değişimi 119
- Şekil 115. Drucker-Prager Yöntemi ile lineer olmayan dinamik analizde, temelin rijit, barajın dolu olması durumunda 4 nolu düğüm noktasında meydana gelen yatay yerdeğiştirmelerin zamanla değişimi 119
- Şekil 116. Drucker-Prager Yöntemi ile lineer olmayan dinamik analizde, temelin eğilebilir, barajın boş olması durumunda 4 nolu düğüm noktasında meydana gelen yatay yerdeğiştirmelerin zamanla değişimi 120
- Şekil 117. Drucker-Prager Yöntemi ile lineer olmayan dinamik analizde, temelin eğilebilir, barajın dolu olması durumunda 4 nolu düğüm noktasında meydana gelen yatay yerdeğiştirmelerin zamanla değişimi 120
- Şekil 118. Eğri Tanımlama Yöntemi ile lineer olmayan dinamik analizde, temelin rijit, barajın boş olması durumunda menba, mansap yüzeyindeki mutlak değerce maksimum yatay yerdeğiştirmelerin yükseklik boyunca değişimi..... 121
- Şekil 119. Eğri Tanımlama Yöntemi ile lineer olmayan dinamik analizde, temelin rijit, barajın dolu olması durumunda menba, mansap yüzeyindeki mutlak değerce maksimum yatay yerdeğiştirmelerin yükseklik boyunca değişimi..... 121

- Şekil 120. Eğri Tanımlama Yöntemi ile lineer olmayan dinamik analizde, temelin rijit, barajın boş olması durumunda menba, mansap yüzeyindeki mutlak değerce maksimum düşey yerdeğiştirmelerin yükseklik boyunca değişimi..... 122
- Şekil 121. Eğri Tanımlama Yöntemi ile lineer olmayan dinamik analizde, temelin rijit, barajın dolu olması durumunda menba, mansap yüzeyindeki mutlak değerce maksimum yatay yerdeğiştirmelerin yükseklik boyunca değişimi..... 122
- Şekil 122. Eğri Tanımlama Yöntemi ile lineer olmayan dinamik analizde, temelin eğilebilir, barajın boş olması durumunda menba, mansap yüzeyindeki mutlak değerce maksimum yatay yerdeğiştirmelerin yükseklik boyunca değişimi..... 123
- Şekil 123. Eğri Tanımlama Yöntemi ile lineer olmayan dinamik analizde, temelin eğilebilir, barajın dolu olması durumunda menba, mansap yüzeyindeki mutlak değerce maksimum yatay yerdeğiştirmelerin yükseklik boyunca değişimi..... 123
- Şekil 124. Eğri Tanımlama Yöntemi ile lineer olmayan dinamik analizde, temelin eğilebilir, barajın boş olması durumunda menba, mansap yüzeyindeki mutlak değerce maksimum düşey yerdeğiştirmelerin yükseklik boyunca değişimi..... 124
- Şekil 125. Eğri Tanımlama Yöntemi ile lineer olmayan dinamik analizde, temelin eğilebilir, barajın boş olması durumunda menba, mansap yüzeyindeki mutlak değerce maksimum düşey yerdeğiştirmelerin yükseklik boyunca değişimi..... 124
- Şekil 126. Eğri Tanımlama Yöntemi ile lineer olmayan dinamik analizde, temelin rijit, barajın boş ve dolu olması durumunda menba yüzeyindeki mutlak değerce maksimum yatay yerdeğiştirmelerin yükseklik boyunca değişimi..... 125
- Şekil 127. Eğri Tanımlama Yöntemi ile lineer olmayan dinamik analizde, temelin eğilebilir, barajın boş ve dolu olması durumunda menba yüzeyindeki mutlak değerce maksimum yatay yerdeğiştirmelerin yükseklik boyunca değişimi..... 125

- Şekil 128. Eğri Tanımlama Yöntemi ile lineer olmayan dinamik analizde, temelin rijit, barajın boş ve dolu olması durumunda II-II kesitindeki mutlak değerce maksimum yatay yerdeğiştirmelerin yatay uzaklık boyunca değişimi..... 126
- Şekil 129. Eğri Tanımlama Yöntemi ile lineer olmayan dinamik analizde, temelin eğilebilir, barajın boş ve dolu olması durumunda II-II kesitindeki mutlak değerce maksimum yatay yerdeğiştirmelerin yatay uzaklık boyunca değişimi..... 126
- Şekil 130. Eğri Tanımlama Yöntemi ile lineer olmayan dinamik analizde, temelin rijit, barajın boş olması durumunda 2 nolu düğüm noktasında meydana gelen yatay yerdeğiştirmelerin zamanla değişimi 127
- Şekil 131. Eğri Tanımlama Yöntemi ile lineer olmayan dinamik analizde, temelin rijit, barajın dolu olması durumunda 2 nolu düğüm noktasında meydana gelen yatay yerdeğiştirmelerin zamanla değişimi 127
- Şekil 132. Eğri Tanımlama Yöntemi ile lineer olmayan dinamik analizde, temelin eğilebilir, barajın boş olması durumunda 2 nolu düğüm noktasında meydana gelen yatay yerdeğiştirmelerin zamanla değişimi 128
- Şekil 133. Eğri Tanımlama Yöntemi ile lineer olmayan dinamik analizde, temelin eğilebilir, barajın dolu olması durumunda 2 nolu düğüm noktasında meydana gelen yatay yerdeğiştirmelerin zamanla değişimi 128
- Şekil 134. Eğri Tanımlama Yöntemi ile lineer olmayan dinamik analizde, temelin rijit, barajın boş olması durumunda 4 nolu düğüm noktasında meydana gelen yatay yerdeğiştirmelerin zamanla değişimi 129
- Şekil 135. Eğri Tanımlama Yöntemi ile lineer olmayan dinamik analizde, temelin rijit, barajın dolu olması durumunda 4 nolu düğüm noktasında meydana gelen yatay yerdeğiştirmelerin zamanla değişimi 129
- Şekil 136. Eğri Tanımlama Yöntemi ile lineer olmayan dinamik analizde, temelin eğilebilir, barajın boş olması durumunda 4 nolu düğüm noktasında meydana gelen yatay yerdeğiştirmelerin zamanla değişimi 130
- Şekil 137. Eğri Tanımlama Yöntemi ile lineer olmayan dinamik analizde, temelin eğilebilir, barajın dolu olması durumunda 4 nolu düğüm noktasında meydana gelen yatay yerdeğiştirmelerin zamanla değişimi 130

- Şekil 138. Lineer ve lineer olmayan dinamik analizde, temelin rijit, barajın boş olması durumunda menba yüzeyindeki mutlak değerce maksimum yatay yerdeğiştirmelerin yükseklik boyunca değişimi 135
- Şekil 139. Lineer ve lineer olmayan dinamik analizde, temelin rijit, barajın dolu olması durumunda menba yüzeyindeki mutlak değerce maksimum yatay yerdeğiştirmelerin yükseklik boyunca değişimi 135
- Şekil 140. Lineer ve lineer olmayan dinamik analizde, temelin eğilebilir, barajın boş olması durumunda menba yüzeyindeki mutlak değerce maksimum yatay yerdeğiştirmelerin yükseklik boyunca değişimi 136
- Şekil 141. Lineer ve lineer olmayan dinamik analizde, temelin eğilebilir, barajın dolu olması durumunda menba yüzeyindeki mutlak değerce maksimum yatay yerdeğiştirmelerin yükseklik boyunca değişimi 136
- Şekil 142. Lineer ve lineer olmayan dinamik analizde, temelin rijit, barajın boş olması durumunda mutlak değerce maksimum yatay yerdeğiştirmelerin II-II kesiti boyunca değişimi 137
- Şekil 143. Lineer ve lineer olmayan dinamik analizde, temelin rijit, barajın dolu olması durumunda mutlak değerce maksimum yatay yerdeğiştirmelerin II-II kesiti boyunca değişimi 137
- Şekil 144. Lineer ve lineer olmayan dinamik analizde, temelin eğilebilir, barajın boş olması durumunda mutlak değerce maksimum yatay yerdeğiştirmelerin II-II kesiti boyunca değişimi 138
- Şekil 145. Lineer ve lineer olmayan dinamik analizde, temelin eğilebilir, barajın dolu olması durumunda mutlak değerce maksimum yatay yerdeğiştirmelerin II-II kesiti boyunca değişimi 138

TABLULAR DİZİNİ

Sayfa No

Tablo 1. Cumhuriyetten önce yapılmış bentler.....	2
Tablo 2. Lineer analiz için malzeme özellikleri.....	53
Tablo 3. Lineer olmayan analiz için malzeme özellikleri.....	53
Tablo 4. Rayleigh sabitleri.....	60
Tablo 5. Lineer dinamik analizde, temelin rijit olması durumunda menba yüzeyindeki yatay ve düşey gerilmelerin maksimum değerlerinin yükseklik boyunca değişimlerinin sayısal değerleri.....	67
Tablo 6. Lineer dinamik analizde, temelin eğilebilir olması durumunda menba yüzeyindeki yatay ve düşey gerilmelerin maksimum değerlerinin yükseklik boyunca değişimlerinin sayısal değerleri.....	67
Tablo 7. Lineer olmayan dinamik analizde, temelin rijit, barajın boş olması durumunda belirlenen gauss noktalarındaki yatay ve düşey gerilmelerin maksimum değerlerinin sayısal değerleri.....	91
Tablo 8. Lineer olmayan dinamik analizde, temelin rijit, barajın dolu olması durumunda belirlenen gauss noktalarındaki yatay ve düşey gerilmelerin maksimum değerlerinin sayısal değerleri.....	91
Tablo 9. Lineer olmayan dinamik analizde, temelin eğilebilir, barajın boş olması durumunda belirlenen gauss noktalarındaki yatay ve düşey gerilmelerin maksimum değerlerinin sayısal değerleri.....	92
Tablo 10. Lineer olmayan dinamik analizde, temelin eğilebilir, barajın dolu olması durumunda belirlenen gauss noktalarındaki yatay ve düşey gerilmelerin maksimum değerlerinin sayısal değerleri.....	92
Tablo 11. Lineer ve lineer olmayan dinamik analizlerde temelin rijit, barajın boş olması durumunda menba yüzeyindeki mutlak değerce maksimum yatay yerdeğiştirmelerin yükseklik boyunca değişimlerinin sayısal değerleri.....	132
Tablo 12. Lineer ve lineer olmayan dinamik analizlerde temelin rijit, barajın dolu olması durumunda menba yüzeyindeki mutlak değerce maksimum yatay yerdeğiştirmelerin yükseklik boyunca değişimlerinin sayısal değerleri.....	132

- Tablo 13. Lineer ve lineer olmayan dinamik analizlerde temelin eğilebilir, barajın boş olması durumunda menba yüzeyindeki mutlak değerce maksimum yatay yerdeğiştirmelerin yükseklik boyunca değişimlerinin sayısal değerler.....133
- Tablo 14. Lineer ve lineer olmayan dinamik analizlerde temelin eğilebilir, barajın dolu olması durumunda menba yüzeyindeki mutlak değerce maksimum yatay yerdeğiştirmelerin yükseklik boyunca değişimlerinin sayısal değerleri.....133
- Tablo 15. Lineer ve lineer olmayan dinamik analizlerde temelin rijit, barajın boş olması durumunda barajın belirlenen seçilen düğüm noktalarında meydana gelen mutlak değerce maksimum yatay yerdeğiştirmelerin sayısal değerleri.....133
- Tablo 16. Lineer ve lineer olmayan dinamik analizlerde temelin rijit, barajın dolu olması durumunda barajın belirlenen seçilen düğüm noktalarında meydana gelen mutlak değerce maksimum yatay yerdeğiştirmelerin sayısal değerleri.....134
- Tablo 17. Lineer ve lineer olmayan dinamik analizlerde temelin eğilebilir, barajın boş olması durumunda barajın belirlenen seçilen düğüm noktalarında meydana gelen mutlak değerce maksimum yatay yerdeğiştirmelerin sayısal değerleri.....134
- Tablo 18. Lineer ve lineer olmayan dinamik analizlerde temelin eğilebilir, barajın dolu olması durumunda barajın belirlenen seçilen düğüm noktalarında meydana gelen mutlak değerce maksimum yatay yerdeğiştirmelerin sayısal değerleri.....134

SEMBOLLER DİZİNİ

a_0, a_1	: Orantı faktörleri
B	: Şekildeğiştirme-yerdeğiştirme ilişkisi
$[C]_{el}$: Eleman sönüm matrisi
$[C_d]$: Seçilen serbestlik derecelerinde uygulanan sönümlerin birleştirilmesiyle elde edilen diagonal matris
C	: Sönüm matrisi
c	: Deprem ivmesinin yerçekimi ivmesine oranı
$[D]$: Gerilme şekildeğiştirme matrisi
D	: Gerilme-şekildeğiştirme ilişkisi
D_{EP}	: Plastik malzeme matrisi
E	: Elastisite modülü
e_g	: Ağırlıktan dolayı meydana gelen şekildeğiştirmeler
e_m	: Ortalama şekildeğiştirme
e_v	: Hacimsel şekildeğiştirme
F	: Akma fonksiyonu
$F_A(t)$: Atalet kuvvetleri
$F_S(t)$: Sönüm kuvvetleri
$F_Y(t)$: Yay kuvvetleri
$F(t)$: Dinamik kuvvetleri
G	: Kayma modülü
g_{ij}	: Sapma şekildeğiştirmeleri
H	: Rezervuar derinliği
h_i	: İnterpolasyon fonksiyonları
J	: Jakobien matrisi
K	: Bulk modülü
K_y	: Pekleşme parametresi
$[M]$: Kütle matrisi

$m(z)$: Birim yükseklik için rezervuar eşdeğer kütlesi
$[N]$: Biçim fonksiyon matrisi
$p(z, t)$: Hidrodinamik basınç dağılımı
$[Q]$: Değişik modlardaki doğal frekansları içeren kare matrisi
S_{ij}	: Sapma gerilmeleri
(s,t)	: Doğal koordinatlar
T	: Çözüm zamanı
U^x	: Elemanın X yönündeki yerdeğiştirmesi
U^y	: Elemanın Y yönündeki yerdeğiştirmesi
U	: Yerdeğiştirme vektörü
U_i	: i anındaki yerdeğiştirme vektörü
U_{i+1}	: i+1 anındaki yerdeğiştirme vektörü
\dot{U}	: Hız vektörü
\dot{U}_i	: i anındaki hız vektörü
\dot{U}_{i+1}	: i+1 anındaki hız vektörü
\ddot{U}	: İvme vektörü
\ddot{U}_i	: i anındaki ivme vektörü
\ddot{U}_{i+1}	: i+1 anındaki ivme vektörü
(x,y)	: Kartezyen koordinatlar
W	: Suyun yoğunluğu
z	: Baraj kretinden başlayan derinlik
Δt	: Zaman aralığı
$\Delta \epsilon$: Toplam şekildeğiştirme
$\Delta \epsilon^e$: Elastik şekildeğiştirme artımı
$\Delta \epsilon^p$: Plastik şekildeğiştirme artımı
α, β	: Rayleigh sönüm sabitleri
δ_{ij}	: Kroneker deltası
ϵ	: Elemanın şekildeğiştirmesi
$\epsilon_{xx}, \epsilon_{yy}, \epsilon_{xy}$: Şekildeğiştirme bileşenleri

ϕ	: İçsel sürtünme açısı
γ, β	: sayısal metodun stabilite ve doğruluk karakteristiklerini belirleyen parametreler
ν	: Poisson oranı
$[\rho]$: Kütle yoğunluğunu gösteren diagonal matris
ρ	: Suyun kütle yoğunluğu
σ	: Elemanın gerilmesi
σ^e	: Elastik şekil değiştirmeye karşılık gelen gerilmeler
σ_m	: Ortalama gerilme
σ^p	: Plastik şekil değiştirmeye karşılık gelen gerilmeler
$\sigma_{xx}, \sigma_{yy}, \sigma_{xy}$: Gerilme bileşenleri
ω	: Doğal frekanslar
ξ	: Kritik sönüm oranı

1. GENEL BİLGİLER

1.1. Giriş

1.1.1. Toprak Dolgu Barajların Tarihi Gelişimi

İnsanların en gerekli ihtiyaçlarından olan içme suyu, kullanma suyu, sanayi, sulama, enerji, ulaştırma ve taşkından koruma gibi çeşitli alanlardaki su eksikliklerinin karşılanması en önemli problemleri oluşturmaktadır. Suyun tabiattaki normal oluşum hali insanların ihtiyaçlarını karşılayamaz. Öyle ki, suyun tabii oluşumunun insan ihtiyaçlarına en uygunca şekilde cevap verebilecek biçimde düzenlenmesi gerekmektedir. Bunun için barajlar inşa etmek zorunluluğu ortaya çıkmaktadır. Barajlar vasıtasıyla sular kontrol altına alınarak boşa giden veya zarar veren su kaynaklarından uygun şekilde faydalanma yoluna gidilir [1].

Su yapıları ile ilgili en eski belgelere Mısır'da rastlanmıştır [1]. Mısır'da bulunan ve M.Ö. 2950-2750 yılları arasında yapıldığı sanılan Sedd-el Kefere Barajı bu yöredeki en eski baraj kalıntısıdır [2]. Hindistan'da inşa edilen ilk toprak dolgu barajlardan birisi olan Maddak-Masar Baraj'ı 30 m yüksekliğinde olup bu baraja taşma savağı yapılmamasından dolayı harap olmuştur [2].

Baraj inşaatı yalnız içinde bulunduğumuz çağın konusu değildir. Nitekim Burdur'un Hacılar köyü yakınında ve M.Ö. 5500 yıllarında yapıldığı tahmin edilen bir baraj kalıntısı bu konunun ne kadar eski tarihlere uzandığını göstermesi bakımından çok ilginçtir [1].

Anadolu'daki kalıntılardan Hititler'e ait olanlardan en önemlileri Gölpınar yakınındaki bir bent, daha doğuda Karakuyu bendi, Beyşehir yakınında Eflatun Pınardaki Savaktaşı sayılabilir [2]. Anadolu'da su yapıları bırakan bir başka topluluk da Urartular'dır [1]. Rusa Gölü'nün hacmini artırmaya yönelik iki bent kalıntısı ile Vankale Kenti civarına sulama suyu temini için Doni Gölü ve mansabında Engizer çayı üzerindeki, hala kullanılan üç küçük bentten ikisi de muhtemelen Urartu döneminden kalmadır. Romalılar'a ait

bentlerin genel özelliği iki kargir duvar arasına birkaç metre kalınlıkta geçirimsiz toprak dolgu yerleştirilmesidir [3].

Orta ağda Batı'da önemli su yapılarına rastlanmamakla birlikte Doğu'da özellikle Japonya'da toprak dolgu barajların yapıldığı görölmektedir. Nitekim M.S. 1400 yılına kadar Japonya'da 12 baraj yapılmış olup 1400-1700 yılları arasında yapılan baraj sayısı 92'dir. Yine aynı zamanlarda az da olsa Emeviler'in etkisi ile Batı Avrupa'da bazı barajların yapıldığı belirtilmiştir [4].

Anadolu'da VI. Yüzyılda yapıldığı sanılan Mardin yakınındaki Dora Barajı dünyada belgelenmiş en eski kemer barajdır [1]. Ayrıca Amasya yakınındaki Löştüğün Toprak Dolgu Barajı (Osmanlı ve Bizans eseridir), Van yakınlarındaki Kargir Faruk Bendi (muhtemelen Urartu eseri) Anadolu'daki en önemli tarihi barajlardır [3].

Osmanlı döneminde en çok su yapısı eseri verilen yer İstanbul'dur. Bu dönemde yapılan barajlar Tablo 1'de verilmiştir.

Tablo 1. Cumhuriyetten önce yapılmış bentler [1].

Adı	Yeri	Göl hacmi (m ³)	Yükseklığı (m)	Yapıldığı devir
Çavdarhisar Bendi	Kütahya	-	-	Bilinmemektedir
Örökkaya Bendi	Çorum	500 000	-	Bilinmemektedir
Büget Bendi	Niğde	-	-	Bilinmemektedir
Löştüğün Bendi	Amasya	-	-	Bilinmemektedir
Semalı Bendi	Amasya	-	-	Bilinmemektedir
Topuz Bendi	İstanbul	70 000	8,60	1620-Sultan II. Osman
Büyük Bent	İstanbul	1 318 000	12,15	1714-Sultan III. Ahmet
Topuzlu Bendi	İstanbul	160 000	16,00	1750-Sultan Mahmut
Ayvat Bendi	İstanbul	156 000	13,45	1765-Sultan III. Mustafa
Valide Bendi	İstanbul	255 000	13,50	1796-III. Selim'in Annesi adına
Kirazlı Bendi	İstanbul	103 080	13,00	1818-Sultan II.Mahmut
Yeni Bent	İstanbul	217 500	17,00	1839-Sultan II. Mahmut
Elmalı Bendi	İstanbul	1 700 000	19,75	1893'te

1.1.2. Toprak Dolgu Barajlar İle İlgili Daha Önce Yapılmış Çalışmalar

1950'lere, hatta 1960'lara kadar baraj projesi yapan mühendislerin elinde güvenebilecekleri bir analiz yöntemi bulunmamaktaydı. Bunun doğal sonucu olarak, deprem etkisini hesaba katmak istediklerinde, başka yapılarda başka mühendislerin yaptıkları gibi sismik katsayı yöntemi kullanmaktaydılar [5].

Bu yöntem dolgu barajların boyutlandırılmasında kullanılan geleneksel şev stabilitesi hesaplarına kolayca dahil edilmesi neticesinde, zamanla yerleşmiştir. Baraj tasarımı yapan mühendislerce sismik katsayı yönteminde kullanılan katsayının nasıl seçildiğini araştıran Seed [6] bu amaçlı kullanılan herhangi bir rasyonel yöntemin bulunmadığını ortaya

koymuştur. Mühendisler katsayıyı seçerken daha çok, başka mühendislerin kullandıkları değerlere dikkat etmekteydiler.

1960'lı yılların tasarım felsefesi içinde mühendisler, baraj dolgularını rijit kütle olarak görmekteydiler. Rijit bir kütle için, kendi titreşimi ve esnekliği yer ivmesiyle aynı olmaktadır. Bu nedenle sismik katsayı "g" cinsinden ifade edilen yer ivmesi olarak anlaşılmıştır. Sismometrelerin yaygınlaşmasıyla deprem ivmeleri ölçmeye başladıktan sonra, o güne kadar makul farzedilen 0.05-0.15 arası katsayıların ölçülen 0.3g-0.4g gibi ivmeler yanında küçük kaldığı dikkat çekmiştir. Bu durum karşısında yoğun araştırma çalışmaları başlamış ve 1960'lardan itibaren dinamik analiz konusunda önemli gelişmeler olmuştur [7].

Japon mühendisler 1950'lerde, kesme kirişi adı verilen dinamik analiz yöntemini geliştirmişlerdir [8]. Ancak bu yöntem çeşitli nedenlerle pratiğe yansımamıştır. O yıllarda bu yöntemin pratiğe yansımamış olması şöyle açıklanabilir. Bir analiz yönteminin geçerliliği, büyük ölçüde, kullanılan malzeme parametrelerinin geçerliliği ile orantılıdır. Zeminlerin (veya dolgu malzemelerinin) dinamik özelliklerini güvenilir bir biçimde saptayacak laboratuvar ve arazi yöntemleri geliştirilmemiş olması nedeni ile analizlerin doğru sonuçları ortaya koyması mümkün olamamıştır [8,9,10].

Keightley [11], Mardin ve Seed [12], toprak dolgu barajlar üzerinde sarsma deneyleri yaparak, bu yapıların rijit olmayıp tıpkı betonarme ve çelik yapılar gibi esnek oldukları dolayısıyla doğal periyotları olduğunu ortaya koymuşlardır. Böylece bu tür bir yapının deprem yer hareketine tepkisinin de dinamik analizlerle hesaplanabileceği anlaşılmıştır.

1965'lerde iki boyutlu sonlu eleman yöntemi Clough ve Chopra [13] tarafından dolgu baraj enkesitine uygulanmıştır. Aynı baraj enkesitine kesme kirişi yönteminde uygulanması ve bu iki yöntemde aynı malzeme özelliklerinin kullanılması ile sonuçların birbirine yakın oldukları görülmüştür. Böylece dolgu malzemelerinin özelliklerinin bilinmesi halinde güvenilir dinamik tepki analizlerinin yapılabilmesi inancı artmıştır.

Baraj gövdesi üzerindeki hidrodinamik etkilerin rasyonel biçimde hesaplanması 1933 yılında Westergaard [14] tarafından yapılan çalışmalar ile başlamış ve 1930-1970 yılları

arasında yapılan barajlarda, özellikle beton ağırlık ve kemer tipi barajlar için, eşdeğer statik yük yöntemi kapsamında gövde kütesine ilave edilen ek su kütleleri ile göz önüne alınmıştır.

Dolgu barajlar için Zangar [15] tarafından yapılan etüdler hidrodinamik etkilerin özellikle yatık şevli dolgular için önemli olmadığını ancak dik şevli barajlarda göz önüne alınması gerektiğini göstermiştir.

Newmark [16]'ın ortaya koyduğu fakat rijit kütle varsayımına dayanması nedeniyle uzun süre uygulamaya geçmeyen "kalıcı deformasyon" kavramı son yıllarda dinamik analizlere dahil edilerek önem kazanmıştır. Dinamik analiz yaklaşımı, depremde hasara uğramış baraj dolgularına da başarıyla uygulanmıştır .

Mejia, Seed ve Lysmer [17], toprak dolgu barajların üç boyutlu dinamik analizini gerçekleştirmişlerdir. Son yıllarda dar kanyonlarda inşa edilen geniş barajların sayısının artması dolayısıyla, bu barajların üç boyutlu dinamik analizlerinin gerçekleştirilmesi için bir çok sayısal teknik üzerinde çalışmalar yapılmıştır. Toprak dolgu baraj ve kaya dolgu barajların dinamik etkileri için sonlu eleman tekniklerini kullanmışlardır. Ayrıca zemin yapıların dinamik yüklemeler altındaki lineer olmayan davranışlarının incelenmesi için FLUSH [18] programı kullanılmaktadır. Eşdeğer lineer yöntemin kullanılmasını sağlayan programla beraber toprak dolgu barajların frekans alanında çözümleri gerçekleştirilmiştir. Bu çalışmalardan elde edilen değerler, Orovilla Barajı üzerinde gerçekleştirilen laboratuvar deney sonuçlarıyla karşılaştırılmış ve bu sonuçların kabul edilebilir yakınlıkta oldukları gözlenmiştir.

Elgamal [19], 1975 ve 1985 depremleri etkisine maruz kalan Meksika'da bir toprak ve kaya dolgu barajı olan La Villita Barajı'nın üç boyutlu dinamik analizini gerçekleştirmiştir. Barajın enine, boyuna düşey titreşimlerinin belirlenebilmesi için basitleştirilmiş işlemler kullanılmıştır. Bu işlem barajın alüvyon tabakasını ve kanyon geometrisini hesaba katmıştır. Zemin davranışı lineer olmayan histeretik artımsal plastik model olarak tanımlanmıştır. Hesaplamalar adım-adım zaman integrasyon yöntemi kullanılarak gerçekleştirilmiştir. İvmeler ve deplasmanlar hesaplanmış ve gerçek gözlenen değerleriyle karşılaştırılmıştır. Hesaplanan (kayma) gerilme ve şekil değiştirme grafikleri

ayrıca gösterilmiştir. Genelde, kullanılan hesaplama modelinin deprem ivme kayıtlarının büyüklüklerinin tahmini için hassas bir doğrulukta olduğu gözlenmiştir.

Mejia ve Seed [20], dar kanyonlardaki barajların özel kesitlerinin düzlem şekil değiştirme analizi için özel kararlar alınması gerekliliğini düşünerek, farklı geometriye sahip kanyonlardaki iki barajın iki boyutlu ve üç boyutlu dinamik analizleri arasında bir karşılaştırma yapmışlardır. Bu karşılaştırmadan barajın dinamik etki altındaki üç boyutlu davranışı belirlenmiştir. Buna ilaveten dik duvarlı kanyonlarda bulunan barajların dinamik davranışlarının belirlenebilmesi için de iki boyutlu analiz uygulaması değerlendirilmiştir.

Prato ve Matheu [21], bent barajlarındaki deprem analizinde kanyon geometrisinin etkisini hesaba katmak için uygulanan sayısal integrasyon yöntemini tanımlamışlardır. Bu yöntem Long Valley Barajı'na uygulanmış ve sonuçlar üç boyutlu sonlu eleman analizi ve deprem etkisi altında kaydedilen arazi ölçümleriyle karşılaştırılmıştır. Analizler basit sayısal integrasyon yöntemini ve Seed ve Idriss [22] tarafından formüle edilen eşdeğer lineer yöntemini temel almaktadır.

Makdisi, Kagawa ve Seed [23], dar ve eğik kanyonlarda bulunan bent barajlarının üç boyutlu sonlu eleman analizini üç boyutlu elemanlarla kompleks sayılar kullanarak frekans alanında çözümler gerçekleştirebilen LUSH [24] programı kullanılmıştır. Programla üçgen ve dörtgen kanyonlardaki toprak dolgu barajların deprem etkisi gerçekleştirilmiştir. Genişliğin yüksekliğe oranıyla incelenen bentlerin analitik sonuçları, belirli kesitlerde düzlem şekil değiştirme çözümlerinin sonuçlarıyla karşılaştırılmış ve her iki çözüm sonuçlarının büyük farklılıklar gösterdiği öğrenilmiştir. Çalışmadan elde edilen sonuçlar incelendiğinde barajların dinamik etkisinin yapılan kanyon şekli ile büyük derecede etkilendiği görülmektedir. Analizlerde frekans alanındaki çözümlerden zaman alanındaki çözümlere gidilmiştir.

Elgamal ve Abdel-Ghaffar [25], maksimum ivme değeri 1.2g olan yer hareketi etkisinde bulunan toprak dolgu barajların üç boyutlu lineer olmayan deprem analizini gerçekleştirmişlerdir. Bu çalışma sonucunda yüksek titreşim sebebiyle oluşan lineer olmayan deprem etkisinin genel özellikleri ortaya konulmuştur. Yapılan karşılaştırmalar, barajın lineer olmayan üç boyutlu sonlu eleman modeliyle çözümünün büyük bir

hassasiyet içerdiğini göstermiştir. Problemlerin çözümlerinde basitleştirilmiş analiz yöntemi kullanılmış ve bu analiz yönteminin deprem etkisi altındaki toprak dolgu barajların zaman alanında çözümünü sonucunda elde edilen sürekli deformasyonlarının tahmini için güvenilir bir yöntem olduğunu göstermiştir.

Seed ve diğ. [26], dinamik etki altında bulunan heterojen toprak dolgu barajlardaki kil çekirdeğinin sürekli deformasyonunu belirlemek için basitleştirilmiş analiz yöntemini kullanmışlardır. Deprem etkisinde bulunan toprak dolgu barajların deformasyon özelliklerini belirleyebilmek için üç boyutlu baraj modelleri oluşturularak birçok çalışma gerçekleştirilmiştir. Bu çalışmalar, toprak dolgu barajların killi ve kumlu bölgelerindeki boşluk oranına bağlı olarak kayma şekil değiştirmesinden etkilendiğini göstermişlerdir. Basitleştirilmiş analiz yönteminde kullanılan tahmini değerlerin deneylerde elde edilen verilere uygun olduğu gözlenmiştir.

Griffiths ve Prevost [27], Long Valley Barajı'nın sonlu eleman modelini kullanarak barajın iki ve üç boyutlu dinamik analizinden elde edilen sonuçları karşılaştırmışlardır. Sonlu elemanlar analizinde girdi ve çıktılar için, tabanda ve değişik kret noktalarındaki ivme değerleri elde edilmiştir. Hesaplanan ve ölçülen kret ivmeleri hem zaman hem de frekans alanında karşılaştırılmıştır. Zaman alanındaki çözümlerde yatay yönde doğruya yakın sonuçlar elde edilmekte fakat düşey yönde ise bu sağlanamamaktadır.

Monsouri, Nelson ve Thompson [28], dinamik etki altında bulunan toprak dolgu barajların sıvılaşma olayının hesabı için bir model geliştirmişlerdir. Bu model gözenekli kısımlardaki elastik dalgaların yayılımı için, Biot'un teorisini [29] temel almıştır ve uygulanan kayma gerilmesinden ortaya çıkan hacimsel gerilmeler için Finn [30] tarafından deneysel bir ilişki ortaya konulmuştur. Bu model varsayımsal bir toprak dolgu baraja uygulanmıştır. Analiz sonuçları San Fernando Barajı'nda gözlenen sıvılaşma ile karşılaştırılmış ve sonuçların kabul edilebilir doğrulukta olduğu sunulmuştur.

Huang [31], Toprak dolgu barajlarda sabit olmayan yer altı suyunu incelemek için çeşitli çalışmalar gerçekleştirmiştir. Toprak dolgu barajların stabilite analizinde, yeraltı suyu düzeyinin bilinmesi gereklidir. Birçok durumda, bir zaman periyodundan sonra sabit sızma durumunun sonuç olarak artacağı farzedilir ve böylece sabit yer altı suyu düzeyi

analiz için kullanılmak zorunda kalınır. Bu çalışmadaki maksat bir zaman fonksiyonu olarak toprak dolgu barajlarda sabit olmayan yer altı suyu düzeyinin yerinin tahmini için basit bir yöntemin gösterilmesi olmuştur.

Li ve Desai [32], toprak dolgu barajların gerilme, sızma ve stabilite analizlerini gerçekleştirebilmek için sonlu elemanlar yöntemini geliştirmişlerdir. Zemin davranışı, lineer elastik ve lineer olmayan davranış için Drucker-Prager yöntemi kullanılmıştır. İşlem serbest yüzey sızması, stabilite ile gerilme analizi ve her ikisinin kombinasyonunu içeren problemlere uygulanmıştır. Elde edilen arazi sonuçları ve arazi gözlem sonuçları karşılaştırılmıştır.

Chang [33], toprak dolgu barajların sızma analizinde sınır eleman yöntemini kullanarak toprak dolgu baraj rezervuarındaki su seviyesinin aşağıya çekilmesini içeren çalışmalar gerçekleştirmiştir. Sınır eleman yöntemi analizler için yeterli olmasına rağmen gerçekte arazi şartlarında uygulamaya konulan problemlerin sınır eleman yöntemiyle çözümünde geometrik detayların konsolidasyon etkilerinin, zemin etkilerinin, malzeme çeşitliliğinin ve permeabilite gibi etkilerin ihmal edilmiş olması yöntemin bazı eksik taraflarını ortaya koymuştur [34]. Sınır eleman yönteminin uygulanması, sınır eleman yönteminin elde edilen tahmini sonuçlarının laboratuvar modeli test ölçüm sonuçlarının ve toprak dolgu barajın arazi gözlemlerinden elde edilen sonuçların karşılaştırılması ile değerlendirilmiştir.

Abdel-Ghaffar ve Scott [35], depreme karşı toprak dolgu barajların dinamik analizini gerçekleştirilmiştir. Barajın genişletilmiş spektrasının, barajın doğal frekansının belirlenebilmesi, malzeme kayma dalga hızının tahmini ve farklı modlardaki titreşimlerinin birbirleri ile ilişkisinin belirlenebilmesi için farklı iki deprem kaydı kullanılmıştır. Doğal frekanslar ve varolan kesme kiriş yöntemi ile elde edilen bu frekanslar arasındaki karşılaştırmalar barajın malzeme özelliklerini belirlemektedir. Buna ilaveten arazideki hız ölçümleri, barajın alt kret noktalarındaki değişik derinliklerdeki kayma dalga hızı titreşim çalışmalarının kontrol edilmesi için daha iyi bir olanak sağlamaktadır.

Abdel-Ghaffar ve Scott [36], çevreleyen ve zorlanmış titreşim yanında iki deprem kuvveti [37,38] etkisi altında bulunan Güney Kaliforniya'daki Santa Felicia Barajı'nın

analizini gerçekleştirmek için Popper Testi'ni kapsayan tam ölçekli dinamik deneyler üzerinde çalışmışlardır. Dinamik arazi deneylerinin ve sonuçlarının değerlendirilmesi bu çalışmada sunulmuştur. Ayrıca barajlar üzerinden yapılan dinamik ölçümlerle elde edilen dinamik özellikler ve deprem etkisinin ölçümlerinden elde edilen sonuçlar karşılaştırılmıştır [39].

Scott ve Abdel-Ghaffar [40], kısmen toprak dolgu barajların deprem etkisini dikkate alınması bakımından (1971 San Fernando Depremi ve Santa Felicia Barajını örnek olarak) yapı, çift sarsma tablası ile zorlanmış titreşim etkisinde bırakılmıştır. Test işleminin ilk adımı, zorlanmış etkiyi kullanan başlangıç frekans dağılımını içermektedir. İkinci adım ise, frekans dağılımından belirlenen önemli titreşim modlarının ölçümlerini içermektedir. Bu testte iki sarsma tablası kullanılarak gerçekleştirilen zorlanmış titreşim, yapının mod şekillerini ve bunlar arasındaki ilişkileri belirlemek için uygulanmıştır.

Skermer [41], Mica Barajı analizinde kabuk boyunca bulunan çekirdeğin kemerleşmesi sonucu olarak meydana gelebilecek olan çekirdekdeki gerilme azalmasının derecesinin elde edilmesini geniş olarak göstermektedir. Buna ilaveten, karada olan ayakların hızla eğilmesinin ve ek kemerleşmelerinin vadi boyunca oluşmasının beklendiğini vurgulamaktadır.

Prevost, Abdel-Ghaffar ve Lacy [42], iki farklı yer hareketine maruz kalan toprak dolgu barajın iki ve üç boyutlu lineer olmayan dinamik sonlu eleman analizinin sonuçlarını karşılaştırmışlardır ve bu karşılaştırmalar barajın ölçülen ve hesaplanan deprem etkileri için gerçekleştirilmiştir. Çalışma çok yüzeysel plastik teorisinin kullanıldığı lineer olmayan histeretik analizinin temeline dayanmaktadır. Kayma, gerilme ve şekil değiştirme eğrileri orijine yaklaşık hiperbolik ve simetrik olduğu farzedilmektedir. Gerilmelerin, şekil değiştirmelerin, ivmelerin ve sürekli deformasyonların detaylandırılmış karşılaştırmaları barajın değişik noktaları için gerçekleştirilmiştir.

Vrymoed [43], Orovilla Barajı'nın dinamik sonlu eleman modelini oluşturmuştur. Barajın yakınlarında meydana gelen deprem hareketleri boyunca gözlenen dinamik karakteristikler bu modele uygulanmıştır. Gözlenen bu dinamik karakteristiklere ilaveten hesaplanan statik gerilme dağılımları da aynı şekilde gerçekleştirilmiştir. Hesaplanan bu

karşılaştırma, gerilme miktarlarının arasında iyi bir uyum olduğunu göstermiştir. Dinamik sonlu eleman modeli analizleri için LUSH [24] programı ile kullanılabilen lineer eşdeğer yöntem kullanılmış ve kayma modülleri hesaplanmıştır. Dinamik analizler için hareket denklemleri sönümsüz sistemler için gerçekleştirilmiştir.

Zeghal ve Abdel-Ghaffar'ın [44], Long Valley Barajı üzerine gerçekleştirdikleri analiz, sistem tanımlama tekniğine dayanmaktadır. Barajların üç boyutlu lineer olmayan dinamik analizinin gerekliliği ortaya konulmuş ve elde edilen sonuçlarda malzeme davranışının histeretik olarak modellenmesinin analizler için yeterli olduğu görülmüştür.

Lotfi ve diğ. [45], depremin barajlar üzerindeki etkisinin anlaşılabilmesi için bir yöntem geliştirmişlerdir. Sonlu elemanlar yöntemi uygulanarak birbirlerini önemli bir derecede etkileyen baraj-su-temel sistemlerinin iki boyutlu dinamik analizi için geliştirilmiştir. Analizlerin gerçekleştirilmesinde sıvı-yapı etkileşiminin dikkate alınmasının gerekliliği vurgulanmıştır.

Dumanoğlu ve Severn [46] ile Dumanoğlu ve diğ. [47,48], değişik hızlarla yayılan asinkronize yatay ve düşey yer hareketine maruz asma köprülerin yanı sıra toprak, beton ağırlık ve kemer barajların da dinamik davranışını incelediler. Bu çalışmalarda, sonlu elemanlar yöntemi kullanılarak baraj ve model birlikte modellenmiştir. Elde edilen sonuçlara göre, deprem dalgası, yayılma hızının azalması yapıda oluşan gerilmelerde genel olarak bir artış ortaya koymuştur. Böylelikle, yapının tabanına etkiyen yer hareketi hızının hesaplarda bir faktör olarak ele alınması gerekliliği vurgulanmıştır.

Hall ve Chopra [49,50], iki boyutlu beton ağırlık ve toprak dolgu barajların deprem etkisi altındaki davranışlarını belirlemek için, hidrodinamik etkileri de içeren frekans alanında bir analiz yöntemi geliştirdiler [51]. Baraj ve sıkışabilir suyun davranışları lineer olarak kabul edilmektedir. Sıvı ortam ve baraj iki ayrı alt sistem olarak düşünülmekte ve her iki ortam sonlu elemanlarla modellenmektedir. Rezervuar ortamı, düzensiz (sonlu eleman sistemi) ve düzenli (sürekli ortam) bölgeler olmak üzere iki bölge halinde düşünülmektedir. Sabit derinliğe sahip olan düzenli bölge, baraja bitişik olan düzensiz bölgenin bitiminden başlayıp sonsuza uzanmaktadır.

1969 yılında Dibaj ve Penzien [52], iki boyutlu özel bir toprak dolgu barajın yayılan yer hareketine karşı dinamik davranışını sonlu elemanlar yöntemini kullanarak incelemişlerdir. Temel ve rezervuar etkisinin dikkate alınmadığı çalışmada; deprem dalgası yayılma etkisinin, sadece temel genişliğinin dalga hızına oranı (baraj temelini karşıdan karşıya geçmek için gerekli süre) 0.1 saniyeden daha küçük olduğunda ihmal edilebileceğini vurgulamaktadırlar.

Priscu ve diğ. [53], Altınışık [54,55], Altınışık ve Severn [56], asinkronize yer hareketi etkisinin toprak dolgu barajların dinamik analizlerinde göz önüne alınmasının gerekliliği ortaya konulmuştur. Bununla birlikte yukarıda bahsedilen çalışmalarda, toplam davranışın belirlenebilmesi için mesnet noktalarının birbirlerine göre rölatif hareketlerinden oluşan zahiri-statik yerdeğiştirme ve gerilmelerin hesaba katılması gerektiği de vurgulanmaktadır.

Yegian ve diğ. [57], sismik risk analizlerini gerçekleştirmişlerdir. Olabilecek depremi olasılıksal olarak, yoğunluğu ve yer hareketinin devir sayısı (sismik risk analizi) vasıtasıyla belirlemektedirler. Hatta toprak dolgu barajların sürekli deformasyonlarının (sismik işlem analizi) hesaplanması için olasılıksal işlem sunulmuş, ivme, devir sayısı ve hareketin ana periyoduna bağlı sismik olaylar karakterize edilmiştir. Sismik risk ve sismik işlem analizleri barajların hasar ve noksan sismik risklerini belirleyebilmek için birleştirilmiştir.

Dakoulas ve Gazetas [58], üç boyutlu kompleks yapıya sahip olan yatay ve dikey yönlerde değişik malzemeli dar kanyonlardaki toprak dolgu barajların titreşim karakteristiklerini incelemişlerdir. Önceki hesaplamalar ve parametreler için farklı tasarımlar gerçekleştirilmiş, arzu edilen sonuçlar elde edilmiş arazi gözlemlerinden elde edilen verilerle basit, gerçeğe uygun dinamik modeller oluşturulmuştur. Böyle modeller deprem hareketinden elde edilen verilerden barajın rijitlik karakteristiklerinin gösterilebilmesine de olanak sağlayabilmektedir. Yaptıkları çalışma dar kanyonlardaki toprak dolgu barajların titreşim karakteristiklerinde uygulanabilen sonuçlar vermiştir. Araştırmacılar tarafından geliştirilen analitik modeller U biçiminde ve dörtgen vadilerinde yer alan barajların kayma titreşimi için kullanılmaktadırlar. Ayrıca farklı şekillerdeki kanyonlarda toprak dolgu barajlar için bir çok çalışma [59,60] gerçekleştirilmiştir.

Prato ve Delmastro [61], çalışmalarında Seed, Idriss ve çalışma arkadaşlarının [22,62] kullanmış oldukları dinamik zemin özellikleri için lineer eşdeğer yöntemle birleşmiş kesme kiriş modeline dayanan sayısal integrasyon yöntemini incelemişlerdir. Dinamik denge denklemi çözümleri frekans alanında Hızlı Fourier Dönüşüm tekniği kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Baraj modeli yedi tabakaya ayrılmış ve QUAD-4 [62] programı ile uygun sonlu eleman ağı oluşturulmuştur. Sekant elastik kayma modülü ve sönüm oranları herbir iterasyon için QUAD-4 [62] ve SHAKE [63] programlarıyla hesaplanmış ve sonuçlar karşılaştırılmıştır.

Seed, Lysmer ve Hwang [64], zemin-yapı etkileşim analizlerini araştırmışlardır. Analiz olarak son yıllarda asıl çözüm yönteminin sonlu elemanlar yöntemi olduğunu vurgulamışlardır. Çalışmalarında sonlu elemanlar yöntemiyle analizleri gerçekleştirebilen FLUSH [18] programını kullanmışlardır. Ayrıca tabakalı ve yarı boşluklu yüzey yapıları için gerçekleştirdikleri analizlerde frekans alanında integrasyon yönteminin modal analizlerden daha etkili olduğunu göstermişlerdir.

Lacy ve Prevost [65], lineer olmayan sistem olarak düşünülen geoteknik yapıların dinamik etki analizlerini incelemişlerdir. Bu alandaki problemlerin çözümü için sonlu eleman formülasyonları verilmiş ve ayrıca sonlu eleman denklemlerinin lineer olmayan sistem çözümleri için artımsal teknikler kullanılmıştır. Homojen olmayan toprak dolgu barajın elasto-plastik deprem etkisi incelenmiş, barajın taban ve kret noktalarında deprem hareketi kaydedilmiş sayısal hesaplamalar barajın kaydedilen deprem etkisiyle karşılaştırılmıştır.

Abdel-Ghaffar ve Elgamal [66], üç boyutlu homojen olmayan toprak dolgu barajların lineer olmayan histeretik sismik analizi için basitleştirilmiş sayısal işlemler gerçekleştirmişlerdir. Bu işlem zemin ve zemin sistemlerinin lineer olmayan dinamik etki problemleri için yeterli bir uygulama alanı oluşturabilmektedir. Lineer olmayan yaklaşım, malzemenin lineer olmaması durumunu kapsamaktadır. Baraj malzemesinin dinamik davranışı çok yüzeyli artımsal plastisite olarak modellenmiştir. Sonuç olarak analizlerde, üç yönde yer hareketi düşünülmüş ve lineer olmayan dinamik çözümler elde edilmiştir.

1.1.3. Çalışmanın İçeriği

Bu tez çalışmasında, toprak dolgu barajların lineer ve lineer olmayan dinamik analizleri gerçekleştirilmektedir. Toprak dolgu barajların lineer olmayan dinamik analizi için Drucker-Prager [67] ve Eğri Tanımlama Yöntemi [68,69] kullanılmaktadır. Çalışmada toprak dolgu baraj olarak merkezi kil çekirdekli kum-çakıl, mansap yüzeyi ise kaya ile kaplanmış toprak dolgu baraj [70] örnek alınmakta ve analizler bu baraj üzerinde gerçekleştirilmektedir. Numerik uygulama için Gördes Barajı [71] seçilmiş, toprak dolgu barajların lineer olmayan dinamik analizlerinin gerçekleştirilmesi sonucunda lineer ve lineer olmayan dinamik analizlerin karşılaştırılmaları yapılmıştır. Lineer analizler için SAP2000 [72,73], lineer olmayan analizler için ise NONSAP [68] programı kullanılmaktadır.

Birinci bölüm olarak toprak dolgu barajlar hakkında tarihi bir geçmiş ve tarihi bir gelişim gözönüne alınarak bilgiler verilmekte ve toprak dolgu barajlar ile ilgili daha önceden yapılan çalışmalar sunulmaktadır. Ayrıca toprak dolgu barajların projelendirilmesinde esas alınan kriterler ve bunun ardından da toprak dolgu barajlara etki eden kuvvetler hakkında bilgiler verilmektedir. Dinamik analizlerin gerçekleştirilebilmesi için bu çalışmada kullanılan sonlu elemanlar yöntemi [74] ve adım adım çözümün [69,75] formülasyonu yer almaktadır. Malzemenin lineer olmayan davranışı ile ilgili Drucker-Prager akma fonksiyonu [67,69] ve Eğri Tanımlama yöntemleri [69] ile gerilme-şekildeğiştirme bağıntıları üzerinde durulmaktadır.

İkinci bölümde numerik uygulama olarak seçilen Gördes Barajı üzerinde gerçekleştirilen analizlerin sonuçları sunulmaktadır. Bu kısmın başlangıcında Gördes Barajı temelin rijit ve eğilebilir olması durumundaki sonlu eleman modelleri tanıtılmaktadır. Bu tanıtımın ardından analizlerin gerçekleştirilmesinde barajı üzerindeki kritik noktalar gösterilmekte ve baraj temelin rijit ve eğilebilir olması, barajın boş ve dolu olması durumları için ayrı ayrı lineer ve lineer olmayan analizler gerçekleştirilmektedir.

Üçüncü bölümde ise kritik noktalar için analizlerin sonuçları, grafikler ve tablolar halinde sunulmakta ve değerlendirilmektedir.

Dördüncü bölümde ise elde edilen sonuçlar ve öneriler sunulmaktadır. Bu bölümü kaynaklar ve özgeçmiş izlemektedir.

1.2. Toprak Dolgu Barajların Projelendirilmesinde Esas Alınan Kriterler

Toprak ve kaya dolgu barajların seçiminde yer şartları, geniş akıntı vadisi, kaya ayakların bulunmaması, kaya yatağı üzerinde bulunan zeminin derinliği, yapının oturacağı kaya yatağının zayıf sağlamlıkta olması, mevcut ve yeterli kalitede uygun zeminin veya kaya dolgunun bulunması ve yeterli kapasitedeki taşma savağı için uygun mahallinin bulunması etkili olmaktadır [70].

Topoğrafya baraj tipinin seçiminde rol oynayan en önemli faktörlerden biridir. V-şeklinde dar vadiler için kaya yamaçların bulunmaması halinde kemer barajlar seçilebilmektedir. Kaya yamaçları bulunmayan kısmen dar vadilere kaya dolgu veya beton barajların inşası tercih edilmektedir. Buna karşın geniş ve derin toprak veya kaya vadiler için ise toprak dolgu barajlar tercih edilmektedir. Düzensiz vadilerde ise bileşik yapılar kısmen toprak ve kısmen beton yapılabilmektedir [76].

Jeoloji ve temel şartları da barajların seçiminde önemli bir yer almaktadır. Tamamen kaya temellerin yüksek kayma mukavemete sahip olmaları, erozyon ve sızmaya karşı mukavemet göstermeleri nedeni ile üzerlerine her tür baraj inşa edilebilmektedir. Çakıl temeller eğer iyi sıkıştırılmışsa toprak dolgu barajlar için uygun olabilmektedir. Fakat sızma kontrolünün yeterli derecede gerçekleştirilebilmesi için gerekli önlemlerin alınması gerekmektedir. Silt veya ince kum temeller için düşük betonlu baraj veya toprak dolgu baraj inşa edilebilmektedir. Ancak kaya dolgu barajlar için bu temeller uygun olmamaktadır. Silt ya da ince kum temellerde öncelikle sıvılaşma tahkiki, borulanma, doygunluğuna bağlı potansiyel zemin göçmeleri, yer altı suyu durumu, sızma kayıpları, mansap topuğu erozyonu, ciddi bir şekilde incelenmelidir. Kil temeller, sahip oldukları düşük mukavemetleri sebebiyle oldukça yatık dolgu şevlerine ihtiyaç göstermektedirler. Sonuç olarak zayıf temel şartlarında temelin iyileştirilmesine yönelik diğer önlemlerin

yanısına temele mümkün olduğu kadar az yük aktaran baraj tipinin yani dolgu barajların seçilmesi gerekmektedir [70].

Baraj tipinin seçiminde, barajın inşasında kullanılacak malzemenin baraj mevkiine uzaklığı veya baraj temelinin kazımında elde edilen malzemenin kullanılıp kullanılmayacağı önemli birer etkidirler [76,77].

Boyut ve taşma savağının bulunduğu yerin sınırlandırılması baraj tipinin seçimine önemli bir etken olmaktadır. Örneğin taşma savağı kanallarından hafriyat alınacağı durumlarda toprak dolgu barajların seçimi avantajlı olabilmektedir [77].

Ayrıca çevre şartları ve ekonomik şartlar da baraj tipinin seçimini etkileyebilecek önemli etkenlerdir [77].

1.3. Toprak Dolgu Barajlara Etki Eden Kuvvetler

Toprak dolgu barajların stabilite analizlerinin gerçekleştirilebilmesi için, barajın üzerine gelen yüklerin belirlenmesi gerekmektedir. Bu yükler, barajın kendi ağırlığı, hidrostatik basınç, silt basıncı, zemin çökmelerinden gelen kuvvetler, boşluk suyu basıncı ve deprem yükleridir. Bu yüklerin ortak etkisi altında baraj, stabilitesini korumalıdır [53].

Kendi ağırlığı ve hidrostatik basınç zamana göre çok yavaş değişen yüklerdir. Buna karşın deprem yükleri zamana bağlı olarak yön ve şiddet değiştirirler. Bu çalışmada baraj üzerine etkileyen yükler olarak yalnızca dinamik yükler ele alınmaktadır [53].

1.3.1. Hidrodinamik Su Basıncı

Barajlar, sıvı depoları, su kanalları, sıvı boruları, makinalar v.b. tür yapılar sıvı-yapı etkileşimine maruz yapı grubuna girmektedir. Bu tür yapılarda dinamik bir etki altında sıvı yapının, yapı da sıvının davranışını önemli derecede etkiler. Sonuçta, sıvı ortamında hidrodinamik basınçlar, yapı ortamında ise hidrodinamik basınçlardan dolayı ilave yükler oluşmaktadır. Kompleks sıvı-yapı sistemlerini modellemek için yeni tekniklerin geliştirilmesi yönünde önemli çabalar sarfedilmektedir. Sıvı-yapı etkileşimlerinin

1. Yapıda yerdeğiştirmeler, sıvıda basınçlar veya hız potansiyelleri değişkendir (Euler Yöntemi) [78,79,80,81].

2. Hem yapıda hem de sıvı da yerdeğiştirmeler değişkendir (Lagrange Yöntemi) [80,81,82].

Bu yaklaşımlar dışında basitleştirilmiş yaklaşım olarak Westegaard yaklaşımı [14] gözönüne alınmalıdır. Westegaard Yöntemi, Euler Yönteminin ilk yapı-sıvı etkileşimi uygulamalarındandır. Bu yaklaşımda barajın rijit, sonsuz uzun ve düşey menba yüzeyli olduğu, rezervuarın menba doğrultusunda sonsuza uzandığı ve yüzey dalgalarının oluşmadığı (ya da etkilerin ihmal edileceği) kabulleri yapılmıştır. Suyun lineer sıkışabilirliği dikkate alınarak baraj yüzeyine dik doğrultudaki harmonik bir yer hareketi için analitik çözümler elde edilmiştir .

Öyle ki,

$$P = c.g.m \quad (1)$$

olarak gösterilebilir. Buna bağlı olarak da,

$$m(z) = \frac{7}{8} \rho \sqrt{H.z} \quad (2)$$

veya

$$m(z) = \frac{7}{8} \frac{W}{g} \sqrt{H.z} \quad (3)$$

$$p(z) = \frac{7}{8} cW \sqrt{H.z} \quad (4)$$

kütle ve basınç dağılımları (3), (4) denklemleriyle ifade edilebilirler. Bu ifadelerde,

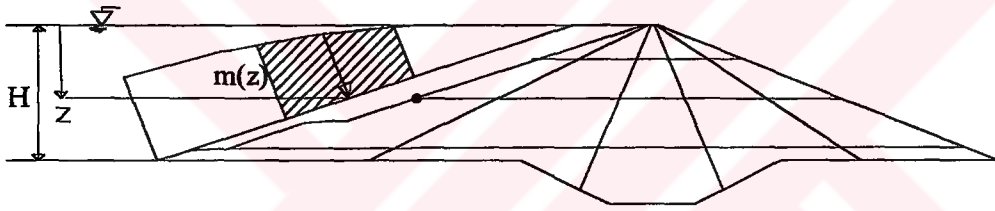
$p(z)$: Hidrodinamik basınç dağılımı,

$m(z)$: Birim yükseklik için rezervuarın eşdeğer kütlesi,

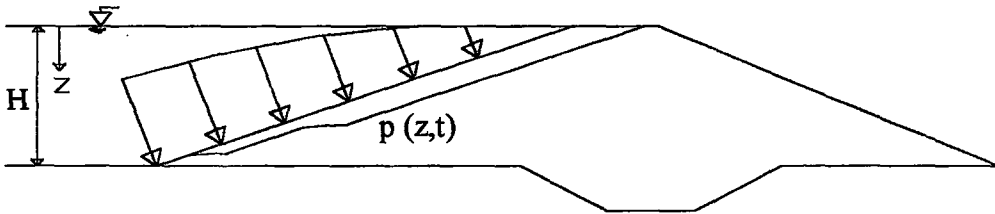
c : Deprem ivmesinin yerçekimi ivmesine oranı,

- $p(z)$: Hidrodinamik basınç dağılımı,
 $m(z)$: Birim yükseklik için rezervuarın eşdeğer kütlesi,
 c : Deprem ivmesinin yerçekimi ivmesine oranı,
 W : Suyun yoğunluğu,
 H : Rezervuar derinliği,
 z : Baraj kretinden başlayan derinlik
 ρ : Suyun kütle yoğunluğunu (1000 kg/m^3) temsil etmektedir.

Ancak toprak dolgu barajlar gibi eğri yüzeye sahip yapılarda, Westergaard bağıntısı [14] ile hesaplanan tekil kütlelerin ekleneceği düğüm noktasındaki baraj menba yüzeyi normali ile deprem doğrultusundaki açı gözönünde bulundurulmalıdır (Şekil 1)[53,83]. Toprak dolgu barajlarda hidrodinamik basınç için de, bu durum söz konusudur (Şekil 2).



Şekil 1. İlave kütlelerin gösterimi



Şekil 2. Hidrodinamik basınç dağılımı

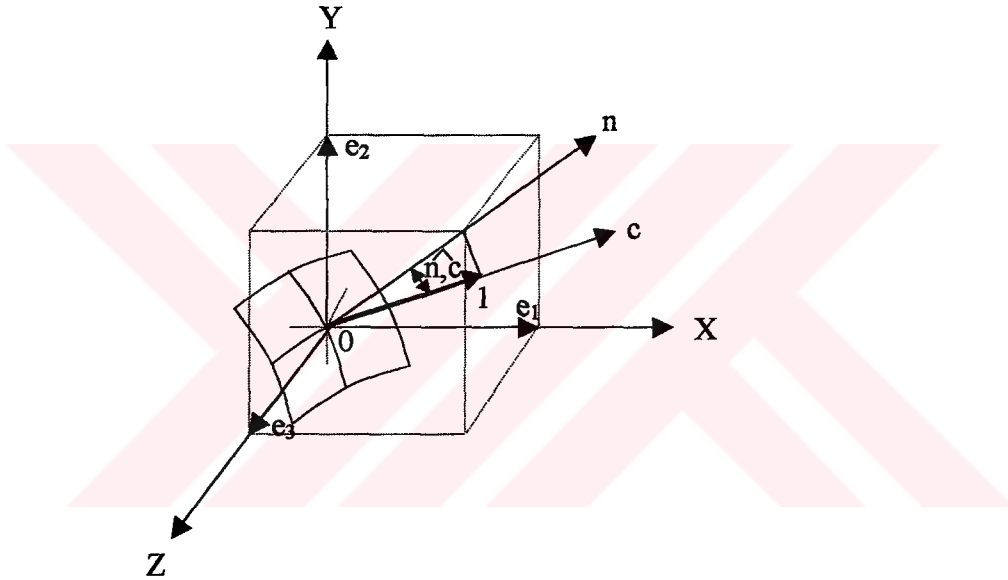
Bu durumda, su yüzeyinden itibaren z kadar derinlikte x,y,z yapı serbestlik derecelerine eklenmesi gereken kütleler, denklem (5)'de verilmektedir.

$$m_{c_x i}^h = m_{n i}^h \text{Cos}(n, c) \text{Cos}(n, x)$$

$$m_{c_y i}^h = m_{n i}^h \cos(n, c) \cos(n, y) \quad (5)$$

$$m_{c_z i}^h = m_{n i}^h \cos(n, c) \cos(n, z)$$

Şekil 3’de deprem yönü (c) ve x,y,z serbestlik dereceleri gösterilmektedir. Burada, $m_{n i}^h$; i düğüm noktasına eklenen kütle değeridir. Bu terim, i düğüm noktasında deprem hareketinden dolayı yüklem yüzeyine dik meydana gelen hidrodinamik kuvveti göstermektedir. $m_{c_x i}^h, m_{c_y i}^h, m_{c_z i}^h$, sırasıyla c yönünde meydana gelen depremden dolayı x,y,z yönünde eklenecek virtüel kütleyi göstermektedir .



Şekil 3. Eğri yüzeyler için kütle ekleme yaklaşımının gösterimi

1.4. Toprak Dolgu Barajlara Sonlu Elemanlar Yönteminin Uygulanması

Toprak dolgu barajların deprem etkisine karşı stabilite analizleri son yarım asırdır yapılmaktadır. Şevlerin ve toprak dolgu barajların stabilite problemi 1964 Alaska ve 1971 San Fernando depremindeki büyük toprak hareketlerinden sonra daha da önem kazanmış ve bu konudaki bilimsel araştırma ve çalışmalara hız verilmiştir [84].

İlk kez 1923 Tokyo depreminden sonra, Monobe Okabe ve diğer Japon mühendisleri [85] istinat duvarları arkasındaki, depremler sırasında oluşan, toprak basınçlarını hesaplamak için statik analiz yöntemini önermişler ve aynı yöntem daha sonraları toprak dolgu barajların ve şevlerin sismik stabilite analizinde de kullanılmıştır [85]. Bu yöntemde varsayılan bir kayma düzlemi boyunca kaydıran ve karşı koyan kuvvetler karşılaştırılmaktadır. Sadece statik yüklere ek olarak deprem etkileri bir sismik katsayının olası kayan kitlenin toplam ağırlığı ile çarpımından elde edilen bir ek yatay yük ile tanımlanmakta ve stabilite hesabına kaydıran yük olarak katılmaktadır. Sismik stabilite analizinde kullanılan sismik katsayının seçilmesinde herhangi bir rasyonel yöntem bulunmamaktaydı. Bu sebeple sismik stabilite yönteminin güvenilirliğinin fazla olmaması araştırmacıları toprak dolgu barajların analizlerinin doğruya yakın bir şekilde gerçekleştirilebilmesi için farklı yöntemler üzerinde çalışmalara yöneltmiştir. Bu yöntemlerden birisi de sonlu elemanlar yöntemidir. [74].

Yapıların analizi için matematik model diferansiyel denklemlerdir. Kapalı matematiksel çözüm olarak bilinen analizle sistemde hesaplanması gereken deplasman ve gerilmelerin değerini bir noktada veren ifadeler elde edilir. Ancak bu yöntemle değişik malzeme özellikleri, sınır şartları ve geometrileri içeren karmaşık problemler için yaklaşık dahi olsa sonuçlara ulaşmak imkansız değilse bile çok zordur. Fakat yeterli doğrulukta sonuçlar veren sayısal çözümlerle sorunları aşmak mümkündür. Sayısal yöntemlerin çoğunda çözüm, düğüm noktaları olarak adlandırılan, belirli noktalarda elde edilmektedir. Bunlardan biri de sonlu elemanlar yöntemidir [74]. Sonlu elemanlar yöntemi ile geniş vadilerde inşa edilen toprak dolgu barajlar, iki boyutlu düzlem şekil değiştirme problemi olarak çözülebilir [74].

Sonlu elemanlar yönteminin kullanımının yaygınlaşmasının iki önemli sebebi bulunmaktadır. Bunlardan birincisi farklı malzemelerdeki her bir zonun kolaylıkla ele alınıp üzerinde işlem yapabilme kapasitesi, ikincisi ise deprem süresince iki boyutlu dinamik gerilmelerin ve yer değiştirmelerin doğru bir şekilde temsil edilebilmesidir [7].

Eleman davranışı düğüm noktalarındaki bilinmeyen serbestlik derecelerini içeren denklemlerle ifade edilir. Gerek düğüm noktalarında, gerekse eleman sınırlarında, sınır şartları sağlanıp yapının gerçeklerle bağdaşan bir matematik modeli elde edilir. Böylece

sonsuz serbestlik derecesi olan bir sürekli ortam, sonlu serbestlik derecesi olan bir modele dönüştürülür ki buna yapının sonlu eleman modeli denir .

Elemanın deforme olması sırasında, geçireceği aşamalar dikkate alınarak deplasman fonksiyonları seçilir. Elde edilen deplasman modeli komşu kenarlar boyunca gerekli uygunluk şartlarının hepsini olmasa bile bir kısmını sağlamalıdır. Bu deplasman fonksiyonu temel alınarak, eleman düğüm noktaları kuvvetleri ile düğüm noktaları arasındaki bağıntıyı sağlayan eleman rijitlik matrisi elde edilir. Bu çalışma da izoparametrik üç ve dört düğüm noktalı elemanlar seçilmiştir.

Sonuçta yapı üzerindeki herhangi bir noktanın deplasmanları, iç gerilmeler ve birim şekil değiştirmeler hesaplanmıştır. Bu çalışmada baraj kesiti dörtgen ve üçgen izoparametrik elemanlar kullanılarak temsil edilmiştir. [69,72,73,74].

1960'lı yıllardan bu yana toprak dolgu barajların sismik etki çalışmalarında sonlu eleman yöntemi sıkça kullanılmaya başlanmıştır [86]. Clough ve Chopra [86,87] 1966 ve 1967 yıllarında iki boyutlu düzlem şekildeğiştirme analizinin ilk tanıtımını viskoelastik zemin davranışı ile birlikte sonlu elemanlar yöntemini kullanarak gerçekleştirmişlerdir. Yapılan benzeri çalışmalarda dolgu malzemeleri için hep lineer elastik özellikler alınmıştır. Bu çalışmaların ardından yapılan yoğun araştırmalar sonucunda lineer olmayan dinamik zemin davranışını gerçekçi bir şekilde modelleyip uygulayabilen sonlu eleman yöntemini kullanarak iki boyutlu ve üç boyutlu dinamik analizler gerçekleştirebilen programlar geliştirilmiştir [18,24,62,68].

1.4.1. Rijitlik Matrisi

Her bir sonlu eleman için rijitlik matrisi genel biçimde denklem (6) ifadesi ile verilmektedir.

$$K = \int_V B^T D B dV \quad (6)$$

Burada B şekildeğiştirme-yerdeğiştirme ilişkisini ve D ise gerilme-şekildeğiştirme ilişkisini göstermektedir.

$$\sigma = D \varepsilon \quad (8)$$

Burada u düğüm noktası yerdeğiştirmesini, ε ve σ ise sırasıyla eleman şekil değıştirmelerini ve benzer şekilde gerilmelerini ifade etmektedir. Bu ifadeler X-Y düzlemi için;

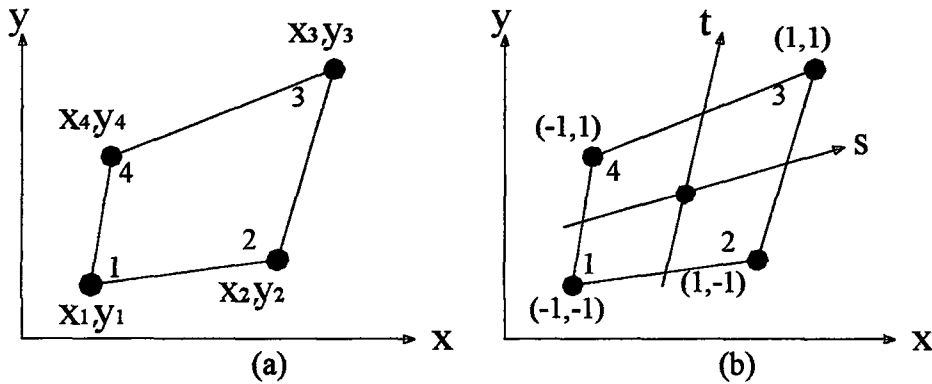
$$\{u\}^T = \langle u_1^x \ u_2^x \ u_3^x \ u_4^x \ u_1^y \ u_2^y \ u_3^y \ u_4^y \rangle \quad (9)$$

$$\varepsilon = \begin{Bmatrix} \varepsilon_{XX} \\ \varepsilon_{YY} \\ \varepsilon_{XY} \end{Bmatrix} \quad (10)$$

$$\sigma = \begin{Bmatrix} \sigma_{XX} \\ \sigma_{YY} \\ \sigma_{XY} \end{Bmatrix} \quad (11)$$

olarak gösterilebilir.

Sonlu elemanlar yönteminde (x,y) kartezyen koordinatları, (s,t) ise -1 ' den 1 'e kadar değışik değerler alabilen doğal koordinatlarıdır (Şekil 4). Bu sistemle hem yerdeğıştirmeleri hem de koordinatları aynı fonksiyonla tanımlanabilmektedir.



Şekil 4. Global (a) ve lokal (b) koordinat sistemleri

Burada (x,y) koordinatları;

$$x = \sum_{i=1}^4 h_i x_i \quad (12)$$

$$y = \sum_{i=1}^4 h_i y_i \quad (13)$$

(s,t)'ye bağlı olarak interpolasyon fonksiyonları ile ((12) ve (13) bağıntıları) gösterilmiştir

Buradaki interpolasyon fonksiyonları,

$$\begin{aligned} h_1 &= (1-s)(1-t)/4 & h_3 &= (1+s)(1+t)/4 \\ h_2 &= (1+s)(1-t)/4 & h_4 &= (1-s)(1+t)/4 \end{aligned} \quad (14)$$

denklemleri ile ifade edilmektedirler.

İki boyutlu izoparametrik eleman [68,72] için aynı interpolasyon fonksiyonları ile yerdeğıştirmeler,

$$u^x(s,t) = \sum_{i=1}^4 h_i u_i^x \quad u^y(s,t) = \sum_{i=1}^4 h_i u_i^y \quad (15)$$

şekildeğıştirme denklemleri ise,

$$\varepsilon_{xx} = \frac{\partial u^x}{\partial x} = \sum_{i=1}^4 h_{i,x} u_i^x \quad (16)$$

$$\varepsilon_{yy} = \frac{\partial u^y}{\partial y} = \sum_{i=1}^4 h_{i,y} u_i^y \quad (17)$$

$$\varepsilon_{xy} = \frac{\partial u^x}{\partial y} + \frac{\partial u^y}{\partial x} = \sum_{i=1}^4 h_{i,y} u_i^x + \sum_{i=1}^4 h_{i,x} u_i^y \quad (18)$$

olarak ifade edilmiştir. Burada ‘,’ kısmi türevi göstermektedir. Denklem (16), (17), (18)’deki ifadeler matris formunda,

$$\varepsilon = \mathbf{B}(s, t) \mathbf{u} = \begin{bmatrix} H_{,x} & 0 \\ 0 & H_{,y} \\ H_{,y} & H_{,x} \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} u^x \\ u^y \end{Bmatrix} \quad (19)$$

yazılabilir. Bu durumda üç şekildeğiştirme 3x8’lik bir matris ile sekiz düğüm noktası yerdeğiştirmesine bağlıdır. (19) nolu denklemde bulunan ifadeler,

$$\begin{aligned} H_{,x} &= \langle h_{1,x} \quad h_{2,x} \quad h_{3,x} \quad h_{4,x} \rangle \\ H_{,y} &= \langle h_{1,y} \quad h_{2,y} \quad h_{3,y} \quad h_{4,y} \rangle \end{aligned} \quad (20)$$

$$\begin{aligned} \{u^x\}^T &= \langle u_1^x \quad u_2^x \quad u_3^x \quad u_4^x \rangle \\ \{u^y\}^T &= \langle u_1^y \quad u_2^y \quad u_3^y \quad u_4^y \rangle \end{aligned} \quad (21)$$

denklemleri ile verilmektedir.

h_i fonksiyonunun s ve t ’ye bağlı olması nedeniyle, x - y sistemine göre türevlerin hesaplanabilmesi için zincir kuralı uygulanmaktadır. Bu kural;

$$\begin{aligned} h_{i,x} &= h_{i,s} s_{,x} + h_{i,t} t_{,x} \\ h_{i,y} &= h_{i,s} s_{,y} + h_{i,t} t_{,y} \end{aligned} \quad (22)$$

olarak açık şekilde yazılabilir. Genel olarak zincir kuralı ,

$$\begin{pmatrix} \frac{\partial}{\partial s} \\ \frac{\partial}{\partial t} \end{pmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{\partial x}{\partial s} & \frac{\partial y}{\partial s} \\ \frac{\partial x}{\partial t} & \frac{\partial y}{\partial t} \end{bmatrix} \begin{pmatrix} \frac{\partial}{\partial x} \\ \frac{\partial}{\partial y} \end{pmatrix} \quad (23)$$

şeklinde veya ters dönüşmüş biçimde,

$$\begin{pmatrix} \frac{\partial}{\partial x} \\ \frac{\partial}{\partial y} \end{pmatrix} = \frac{1}{J} \begin{bmatrix} \frac{\partial y}{\partial t} & -\frac{\partial y}{\partial s} \\ -\frac{\partial x}{\partial t} & \frac{\partial x}{\partial s} \end{bmatrix} \begin{pmatrix} \frac{\partial}{\partial s} \\ \frac{\partial}{\partial t} \end{pmatrix} \quad (24)$$

ifadesi ile gösterilebilir. Burada Jakobien ,

$$J = x_{,s} y_{,t} - x_{,t} y_{,s} \quad (25)$$

şeklinde ifade edilir. (12) ve (13)'nolu denklemden,

$$x_{,s} = \sum_{i=1}^4 h_{i,s} x_i, \quad y_{,s} = \sum_{i=1}^4 h_{i,s} y_i \quad (26)$$

$$x_{,t} = \sum_{i=1}^4 h_{i,t} x_i, \quad y_{,t} = \sum_{i=1}^4 h_{i,t} y_i$$

şeklinde ifadeler tanımlanabilir.

s, t 'nin verilen değerleri için interpolasyon fonksiyonlarının türevleri hesaplanabilir. Daha sonra şekildeğiştirme-yerdeğiştirme matrisinin ((19)'nolu denklem) sayısal değerlendirilmesi için gerekli olan tüm türevler (26) ve (24)'nolu denklemlerden belirlenebilir [88].

1.4.2. Sönüm Matrisi

Dinamik analizde deneysel ölçümlerden elde edilen boyutsuz bir değer olan kritik sönüm oranı ξ kullanılmaktadır. Böylece spektral analiz veya zaman artımı yöntemi kullanıldığı zaman yalnızca ξ parametresini bilmek yeterli olmaktadır. Eğer sayısal integrasyon işlemi uygulanıyorsa, sönüm matrisi $[C]$ 'nin değerlendirilmesi gerekmektedir [53].

Eleman gerilme, $\{\sigma\}$ ve şekildeğiştirme, $\{\epsilon\}$ bağıntılarını,

$$\{\sigma\} = [D] \{\epsilon\} \quad (27)$$

ifadeleri ile vermek mümkündür. $[D]$ ise eleman malzeme özelliklerini gösteren matristir. $[C]_{el}$ bir elemanın sönüm matrisi,

$$[C]_{el} = \int_V ([N])^T [\mu] [N] + [B]^T [D_d] [B] d\xi \quad (28)$$

olarak yazılabilir.

Toplam sönüm matrisi $[C]$, eğer $[\mu] = a_0 \rho$ ve $D_d = a_1 D$ yazılırsa, sönüm matrisi için Rayleigh Modeli,

$$[C] = a_0 [M] + a_1 [K] \quad (29)$$

olarak elde edilebilir.

Burada a_0 ve a_1 orantı faktörleridir. $[B]$ şekildeğiştirme-yerdeğiştirme matrisini, $[N]$ ise her eleman için biçim fonksiyon matrisini, $[M]$ sistem kütle matrisini ve $[K]$ sistem rijitlik matrisini göstermektedir.

Tam veya basitleştirilmiş Rayleigh Modeli, titreşim doğal modları arasında bir bağlantının tanımlanmaması nedeniyle avantajlara sahiptir. Mod şekilleri kütle matrisine,

rijitlik matrisine ve sonuç olarak Rayleigh Modeli tarafından belirlenen sönüm matrisine göre ortogondur [53].

a_1 ve ξ arasındaki ilişkiyi göstermek için,

$$\{\xi\} = \frac{1}{2} [Q] \{a\} \quad (30)$$

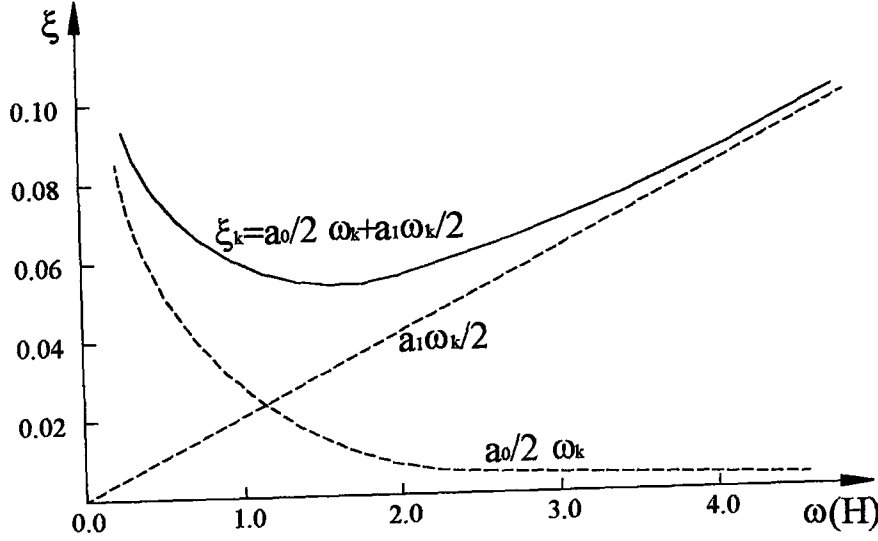
ifadesi yazılabilir [53]. Burada, [Q], değişik kuvvetlerdeki doğal frekansları içeren kare matristir. Örneğin, eğer iki orantı faktörü a_0 ve a_1 'i düşünülürse (31) denklemi,

$$\begin{Bmatrix} \xi_1 \\ \xi_2 \end{Bmatrix} = \frac{1}{2} \begin{bmatrix} 1 & \omega_1 \\ \omega_1 & 1 \\ 1 & \omega_2 \\ \omega_2 & 1 \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} a_0 \\ a_1 \end{Bmatrix} \quad (31)$$

haline gelir. Buradan kolaylıkla,

$$\xi_k = \frac{a_0}{2\omega_k} + \frac{a_1 \omega_k}{2} \quad (32)$$

($k=1,2,3,\dots,n$) yazılabilir. (32) Denklemi arasındaki ilişki grafik olarak Şekil 5'de gösterilmektedir. a_0 ve a_1 parametresinin uygun seçimi önemlidir. Zira rijitlik ile orantılı sönümün, yapının daha yüksek modlarında, daha büyük olabileceğidir [53].

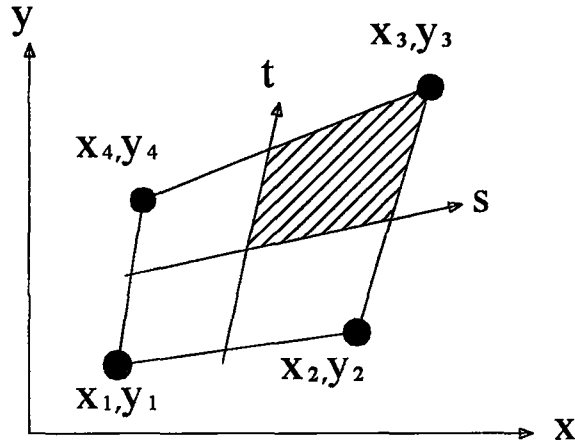


Şekil 5. Rayleigh sönüm modelindeki a_0 ve a_1 orantı faktörleri ve kritik sönüm oranı ξ arasındaki ilişki.

1.4.3. Kütle Matrisi

Dinamik analizde alışılmış olarak, toplanmış kütle matrisi uygulanmaktadır. Gerçekte, düğüm noktası iç kuvvetleri birbirini etkilemektedir. Bu etkinin hesaba katılması diagonal olmayan terimleri içeren $[M]$ matrisinin belirlenmesini yönlendirmektedir. Yayılı kütle matrisi olarak isimlendirilen bu matris sonlu eleman vasıtasıyla kolaylıkla tahmin edilebilir [88].

Şekil 6'da, herbir eleman için düğüm noktalarında kütlelerin nasıl yığıldığı gösterilmektedir. Eleman sınırları ve lokal s, t eksenleri arasında kalan gölgelendirilmiş bölge, çeyrek bölgedeki kapalı düğüm noktaları ile (x_3, y_3) ile birleştirilmiş kütle göstermektedir. Diğer düğüm noktaları için toplanmış kütleler benzer şekilde hesaplanmaktadır.



Şekil 6. Diagonal toplu kütle

Yukarıdaki bilgilerden elde edilen toplu kütle matrisi,

$$[M]_{el.} = \int_V [N]^T [\rho] [N] dV \quad (33)$$

ile ifade edilebilir. Burada $[\rho]$ kütle yoğunluğunu gösteren diagonal matristir. Boyutu her eleman interpolasyon fonksiyonu sayısına eşittir. $[N]$ ise her eleman için biçim fonksiyon matrisidir [88]. Toplanmış kütle matrisi diyagonal olup eleman kütlelerinin her düğüm noktasına eşit olarak dağıtılması ile elde edilir.

1.5. Sistemlerin Lineer ve Lineer Olmayan Dinamik Analizi

Dinamik analizde, cisimlerin kütleleri, malzeme özellikleri ve cisimlere etkiyen kuvvetlerin zamanla değişmesi önemli rol oynar. Dış kuvvetin zamanla değişmesi ile yapı kütlelerine etkiyen atalet kuvvetleri de zamanla değişeceğinden yapının davranışının da değişmesine sebep olacaktır.

1.5.1. Linear Dinamik Analiz İçin Hareket Denklemleri

Çok serbestlik dereceli sistemlerin hareket denklemleri Newton Kanununa göre sistemin her serbestlik derecesine tekabül eden kütleli etkileyen kuvvetlerin dinamik dengesinden,

$$M\ddot{U} + C\dot{U} + K_L U = P \quad (34)$$

olarak yazılabilir [89]. Burada, M , C , K_L sırasıyla, kütle, sönüm, ve rijitlik matrislerini, \ddot{U} , \dot{U} ve U ise lineer sistemin ivme, hız, yerdeğiştirme ve yük vektörlerini göstermektedir.

Bu kuvvetlerin hepsi zaman bağımlıdır ve t anındaki dinamik denge durumu dikkate alınmaktadır. Bu denge durumu, ivmeye bağlı atalet kuvvetleri ile hıza bağlı sönüm kuvvetleri içermektedir [74,90,91].

Burada (34) nolu denklem ikinci dereceden lineer diferansiyel denklem sistemini göstermektedir. Bu denklemlerin çözümü, sabit katsayılı lineer diferansiyel denklemlerin çözümü gibi elde edilebilir. Ancak, diferansiyel denklem sistemlerinin genel çözümü için uygulanan işlemler, eğer matrislerin dereceleri büyük ise çok masraflı ve zaman alıcı olmaktadır [74] Pratikte bu denklemlerin çözümü için etkili birçok yaklaşık sayısal yöntem bulunmaktadır. Burada direkt integrasyon yöntemlerinden bahsedilecektir.

1.5.1.1. Linear Sistemlerin Analizi İçin Adım-Adım Çözüm Yöntemleri

Direkt integrasyonda, (34) ifadesindeki denklem, adım adım sayısal işlem kullanılarak integre edilmektedir. Burada direkt integrasyon teriminden, denklemlerin farklı bir formda dönüştürülmeden işlemlerin adım adım yürütüldüğü anlaşılmalıdır.

Direkt sayısal integrasyon, iki husus dikkate alınarak gerçekleştirilmektedir. Birincisi, herhangi bir t anında dinamik denge denklemini sağlamaya çalışmak yerine, ayrı ayrı Δt zaman aralıklarında bu denklemi sağlamayı amaçlamaktadır.

Direkt integrasyon yöntemlerinde, merkezi farklar yöntemi, Houbolt yöntemi ve Newmark yöntemi en etkili olanlarıdır. Bu çalışmada Wilson- θ yöntemi kullanılmıştır. Wilson- θ yöntemi, Newmark yönteminin özel bir hali şeklinde düzenlenmiştir.

1.5.1.1.1. Newmark Yöntemi

1959 yılında, Newmark tarafından geliştirilen aşağıdaki formüller ile dinamik denge denklemi adım adım çözülebilmektedir [75,90,91]. Bu yöntemde $i+1$ zaman aralığında, ivme, \ddot{U}_{i+1} , hız, \dot{U}_{i+1} , yerdeğiştirme, U_{i+1} vektörleri,

$$\dot{U}_{i+1} = \dot{U}_i + [(1 - \gamma)\Delta t]\ddot{U}_i + (\gamma\Delta t)\ddot{U}_{i+1} \quad (35)$$

$$U_{i+1} = U_i + (\Delta t)\dot{U}_i + [(0.5 - \beta)(\Delta t)^2]\ddot{U}_i + [\beta(\Delta t)^2]\ddot{U}_{i+1} \quad (36)$$

olarak verilmiştir. Burada; U_i , \dot{U}_i , \ddot{U}_i sırasıyla i anındaki yerdeğiştirme, hız ve ivme vektörleridir.

β ve γ parametreleri, Δt zaman aralığındaki ivmenin değişimini tanımlar. Ayrıca bu parametreler, kullanılan yöntemin stabilite ve doğruluk karakteristiklerini belirler. $\gamma = \frac{1}{2}$ ve $\frac{1}{6} \leq \beta \leq \frac{1}{4}$ alınması yöntemin doğruluğu için tatminkardır [75].

Dinamik denge denkleminin i anındaki dengesi dikkate alındığında hareket denklemi,

$$M\ddot{U}_i + C\dot{U}_i + KU_i = P_i \quad (37)$$

şeklinde, $i+1$ anındaki dengesi dikkate alınır,

$$M\ddot{U}_{i+1} + C\dot{U}_{i+1} + KU_{i+1} = P_{i+1} \quad (38)$$

şeklinde yazılabilir. Eğer (38) denkleminde (37) denklemi çıkarılırsa artımsal hareket denklemi elde edilir.

$$M\Delta\ddot{U}_i + C\Delta\dot{U}_i + K\Delta U_i = \Delta P_i \quad (39)$$

Burada;

$$\begin{aligned} \Delta\ddot{U}_i &= \ddot{U}_{i+1} - \ddot{U}_i \\ \Delta\dot{U}_i &= \dot{U}_{i+1} - \dot{U}_i \\ \Delta U_i &= U_{i+1} - U_i \end{aligned} \quad (40)$$

şeklinde (35) ve (36) denklemleri artımsal olarak düzenlenirse;

$$\Delta\dot{U} = (\Delta t)\ddot{U}_i + \gamma(\Delta t)\Delta\ddot{U}_i \quad (41)$$

$$\Delta U_i = (\Delta t)\dot{U}_i + \frac{(\Delta t)^2}{2}\ddot{U}_i + \beta(\Delta t)^2\Delta\ddot{U}_i \quad (42)$$

elde edilir. (42) denkleminde $\Delta\ddot{U}_i$ çekilecek olursa;

$$\Delta\ddot{U}_i = \frac{1}{\beta(\Delta t)^2}\Delta U_i - \frac{1}{\beta(\Delta t)}\dot{U}_i - \frac{1}{2\beta}\ddot{U}_i \quad (43)$$

bulunur. (43) denklemi (41) denkleminde yerine konursa,

$$\Delta\dot{U}_i = \frac{\gamma}{\beta(\Delta t)}\Delta U_i - \frac{\gamma}{\beta}\dot{U}_i + \Delta t\left(1 - \frac{\gamma}{2\beta}\right)\ddot{U}_i \quad (44)$$

elde edilir. (43) ve (44) denklemleri artımsal hareket denkleminde, (39), yerine konur ve düzenlenirse;

$$\left(K_L + \frac{\gamma}{\beta(\Delta t)} C + \frac{1}{\beta(\Delta t)^2} M \right) \Delta U_i = \Delta P_i + \left(\frac{1}{\beta(\Delta t)} M + \frac{\gamma}{\beta} C \right) \dot{U}_i + \left[\frac{1}{2\beta} M + \Delta t \left(\frac{\gamma}{2\beta} - 1 \right) C \right] \ddot{U}_i \quad (45)$$

elde edilir. (45) denklemini şu şekilde yazılabilir.

$$\hat{K}_i \Delta U_i = \Delta \hat{P}_i \quad (46)$$

Burada;

$$\hat{K}_i = K + \frac{\gamma}{\beta(\Delta t)} C + \frac{1}{\beta(\Delta t)^2} M \quad (47)$$

$$\Delta \hat{P}_i = \Delta P_i + \left(\frac{1}{\beta(\Delta t)} M + \frac{\gamma}{\beta} C \right) \dot{U}_i + \left[\frac{1}{2\beta} M + \Delta t \left(\frac{\gamma}{2\beta} - 1 \right) C \right] \ddot{U}_i$$

olarak gösterilmektedir.

Görüldüğü gibi, dinamik hareket denkleminin, her Δt zaman aralığı içinde statik denge konumu sağlanarak çözümü elde edilmektedir. Burada adım adım çözümde ilk önce ΔU_i (46) denkleminde bulunur. Daha sonra, (43) ve (44) denklemleri yardımıyla $\Delta \dot{U}_i$ ve $\Delta \ddot{U}_i$ değerleri elde edilir. Bir sonraki adıma ait değerler,

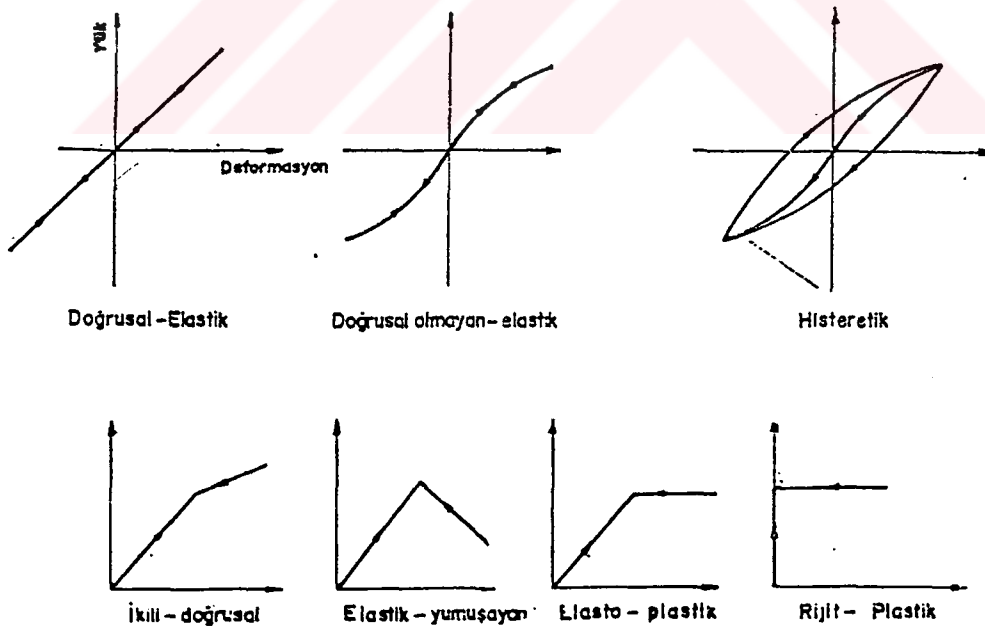
$$\begin{aligned} \Delta U_{i+1} &= U_i + \Delta U_i \\ \Delta \dot{U}_{i+1} &= \dot{U}_i + \Delta \dot{U}_i \\ \Delta \ddot{U}_{i+1} &= \ddot{U}_i + \Delta \ddot{U}_i \end{aligned} \quad (48)$$

denklemleri vasıtasıyla elde edilmektedir. İşlemler bu şekilde çözüm aralığı boyunca devam etmektedir. Newmark Yönteminin, $\gamma = \frac{1}{2}$ ve $\beta = \frac{1}{4}$ alındığı takdirde ortalama ivme

yöntemi, $\gamma = \frac{1}{2}$ ve $\beta = \frac{1}{6}$ olması halinde ise lineer ivme yöntemi olmak üzere iki özel durumu vardır.

1.5.2. Lineer Olmayan Davranış

Yapı malzemesinin gerilme-şekildeğiştirme veya yük-yerdeğiştirme eğrileri doğrusal değil ise lineer olmayan davranış sergilerler. Eğer bu eğriler tek değerli ise ve boşaltma halinde daha önce oluşmuş hareketten etkilenmiyor ise elastik, etkileniyor ise inelastik yani elastik olmayan davranış mevcuttur. Yapının veya yapı elemanlarının elastik olması aynı zamanda yapının lineer olmasını gerektirmez. Elastik limitleri üzerinde deformasyona uğrayan birçok yapı elemanı doğrusal olmayan davranış gösterebilir ve iç sürtünmeler, plastik kaymalar nedeni ile haiz olduğu mekanik enerjinin bir kısmını kaybeder. Bu olaya histeresis, bu gibi elemanlardan oluşan inelastik sistemlere ise histeretik sistemler adı verilir. Bir çok betonarme ve çelik yapı elemanları büyük deformasyonlar karşısında doğrusal olmayan histeretik davranış gösterirler. Şekil 7'de çeşitli yük deformasyon eğri tipleri gösterilmiştir [89].



Şekil 7. Doğrusal olmayan davranışlar

Geoteknik mühendisliği problemlerinin çözümleri bir çok nedenden ötürü standart dışıdır. Bunlardan birincisi, geoteknik problemler genelde homojen olmayan yapılardır. İkincisi ise, zeminlerin genelde çok safhalı katı-sıvı sistemlerini içermeleridir. Ayrıca bizzat zeminin kendisi, lineer olmayan anizotropik ve histeretik davranışa sahiptir [65]. Bu şartlar altında geoteknik problemlerin çözümü için birçok basitleştirilmiş yöntem gerekmektedir. Çözüm tekniklerindeki gelişmeler, zemin sistemlerinin karmaşık davranışlarını modelleyerek çözümlenebilen sayısal tekniklerin kullanımına olanak sağlamışlardır. Geoteknik mühendisliğinin dikkat çeken problemlerin başında toprak dolgu barajların depreme karşı davranışının incelenmesidir [65]. Barajın inşasında olabilecek kusurlarından dolayı depremlerde meydana gelecek hasarların veya yıkılmaların önüne geçilebilmesi için problemlerin doğru bir şekilde çözümü gerekir. Toprak dolgu barajların karmaşık yapısına örnek olarak, malzemenin boşluk miktarı doygunluk bölgesi tanımı, buna ilaveten baraj malzemesinin büyük miktarda çevrimsel yüklemeye maruz kalması ve bu şartların elastik, histeretik davranışı doğurması gibi durumlar gösterilebilir. Zeminin gerilme-şekildeğiştirme davranışı belirsiz bir yapıya sahip olmasından dolayı malzeme davranışının modellenmesi doğru ve yeterli sayısal değerlere bağlı olarak gerçekleştirilmesi gerekmektedir. Bu çalışmada kullanılacak modellemeler ve toprak dolgu barajın lineer olmayan davranışının çözümünün [92] gerçekleştirilebilmesi için gerekli sayısal yöntemler hakkında aşağıdaki bölümlerde bilgi verilmektedir [65].

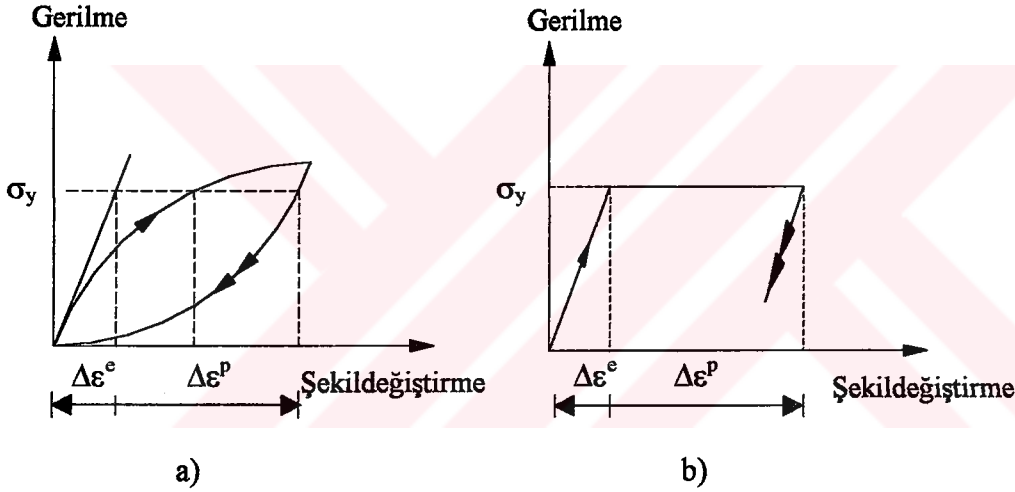
Son yıllarda bilgisayarların gerek hafıza ve gerekse hız olarak gelişmesi ve gerekse numerik programların toprak dolgu barajların kompleks dinamik davranışlarını inceleyebilecek şekilde gerek iki ve gerekse üç boyutlu ve de malzemenin lineer olmayan davranışı içerecek biçimde gelişmiş olması konu ile ilgili pek çok çalışmanın [17,23,43,93,94,95] yapılmasına neden olmuştur.

Mejia ve diğ. [43], Vrymoed [43], eşdeğer lineer zemin özelliklerini kullanarak baraj malzeme davranışının lineer olmayan karakteristikleri için hesaplamalar gerçekleştirmişlerdir ve artımsal işlemle beraber sönüm ve değerlerinin zemin kütlelerinin her bir zonda hesaplanmasını sağlamışlardır. Mejia ve Seed [20], ilk kez toprak dolgu barajların iki ve üç boyutlu eşdeğer lineer dinamik analizleri sonuçları arasında karşılaştırmalar yapılmıştır. Daha sonraki yıllarda ise Prevost ve diğ. [42], çok yüzeyli plastik teoriyi kullanarak şiddetli lineer olmayan histeretik sonlu eleman analizini temel

alan iki ve üç boyutlu karşılaştırmalı analizler gerçekleştirilmiştir. Elgama ve diğ. [96,97,98], üç boyutlu olarak modellendirilecek barajların lineer olmayan histeretik etki analizlerini gerçekleştirmişlerdir.

Bu çalışmada, toprak dolgu baraj malzemesinin yükleme ve boşaltma eğrilerinin çakışmadığı kabul edilerek ve kalıcı şekildeğişirmelerin oluştuğu elasto-plastik davranış dikkate alınarak çözümler bulunmaktadır. Elasto-plastik davranış [99,100,101] gösteren malzeme iki gruba ayrılabilir.

- a) Lineer davranmayan elasto-plastik malzeme (Şekil 8 (a))
- b) Lineer elasto-plastik davranış sergileyen malzeme (Şekil 8 (b))



Şekil 8. Malzemenin elasto-plastik davranışı (a-lineer olmayan elasto-plastik, b-lineer elasto-plastik)

Şekil 8 (a)'da ve Şekil 8 (b)'de verilen malzeme modellerine bakılarak elde edilen toplam şekildeğiştirme,

$$\Delta\epsilon = \Delta\epsilon^e + \Delta\epsilon^p \quad (49)$$

olarak gösterilebilmektedir. Burada $\Delta\epsilon^e$ ve $\Delta\epsilon^p$ sırasıyla, elastik ve plastik şekildeğişirmelerdir.

Sonlu elemanlar yönteminde elasto-plastik malzeme modelinin [102,103,104] kullanılması ile gerçekleştirilen analizlerin sonucunda doğru çözümlerin elde edilmesi için malzemenin gerçeğe çok yakın bir biçimde modellenmesi gerekmektedir. Bunun için malzeme özelliklerinin çeşitli deneylerden elde edilen sonuçlarla mümkün olduğunca doğru bir biçimde değerlendirilmesi gerekmektedir [105]. Bu sebeple, malzeme özelliklerinin ve davranışının dikkate alınmasıyla oluşturulan modelin, akma durumuna kadar olan bölgesinin (malzemenin genelde lineer elastik kabul edilen bölgesi), akma durumu bölgesinin (lineer elastik davranışın sona erip plastik davranışın başladığı nokta), pekleşme bölgesinin (plastik kalıcı deformasyonlar meydana gelmektedir) doğru bir biçimde belirlenerek uygulamaya konulması gerekmektedir. Elasto-plastik analizde malzeme davranışı, elastik gerilme deformasyon bağıntılarına ek olarak üç özellik kullanılarak tanımlanmaktadır [68,69].

Bunlar sırasıyla, plastik akmanın başlangıcına tekabül eden çok eksenli gerilme halini tanımlayan akma şartı, akma halinde akma yüzeyindeki gerilmelere karşın meydana gelen plastik şekildeğiştirmelerin yönünü ve değerini tanımlayan akma kuralı ve plastik akma sırasında, akma fonksiyonunun nasıl değiştiğini tanımlayan pekleşme kuralıdır [106].

Akma fonksiyonu olarak,

$$F(\sigma, \varepsilon^P, K) = 0 \quad (50)$$

tanımlanabilir. Burada;

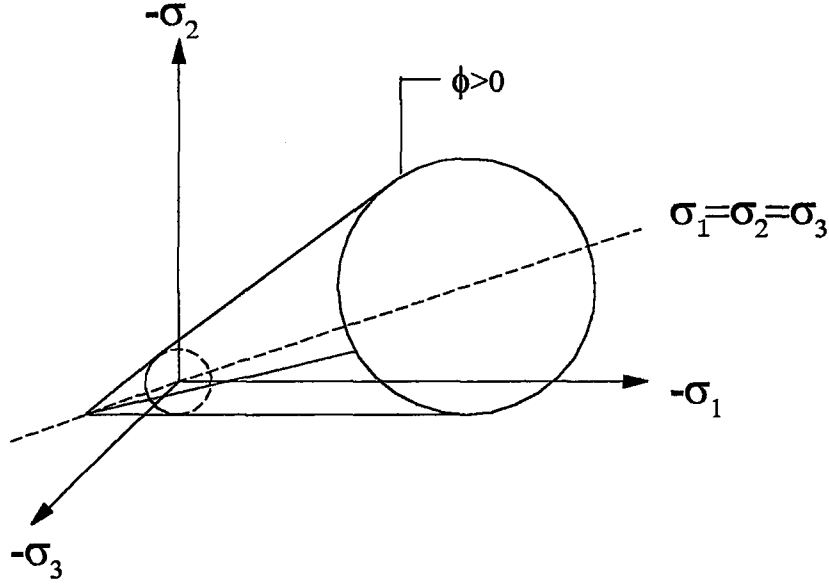
ε^P : Plastik şekildeğiştirme,

σ : Plastik şekildeğiştirmeye karşılık gelen gerilmeler,

K : Plastik şekil değiştirmenin fonksiyonu olup, pekleşme parametresidir.

1.5.2.1. Elasto-Plastik Davranışı İçin Drucker-Prager Kırılma Hipotezi

Sonlu elemanlar yöntemiyle barajın iki boyutlu lineer olmayan dinamik analizini gerçekleştirmek için barajı oluşturan malzemelerin elasto-plastik davranışını nitelendiren Drucker-Prager kırılma hipotezi [74,94,95,99,100,101,102,103,104] kullanılmıştır. Şekil 9'da üç boyutlu gerilme hali için Drucker-Prager kırılma yüzeyi gösterilmektedir.



Şekil 9. Üç boyutlu gerilme hali için Drucker-Prager kırılma yüzeyi

Bu yöntemde her adımda F_u kırılma fonksiyonu;

$$F_u = 3\alpha\sigma_m + \bar{\sigma} - K_y \quad (51)$$

kullanılmaktadır. Bu ifadede σ_m ortalama gerilme olup,

$$\sigma_m = \frac{J_1}{3}(\sigma_{11} + \sigma_{22} + \sigma_{33}) = \frac{1}{3}\sigma_{ii} \quad (52)$$

ifadesi ile verilmektedir. σ_{ii} elemana etkiyen normal gerilmelerdir.

$$\bar{\sigma} = J_2^{1/2} = \left[\frac{1}{2} S_{ij} S_{ij} \right]^{1/2} \quad (53)$$

Bu ifadede S_{ij} ;

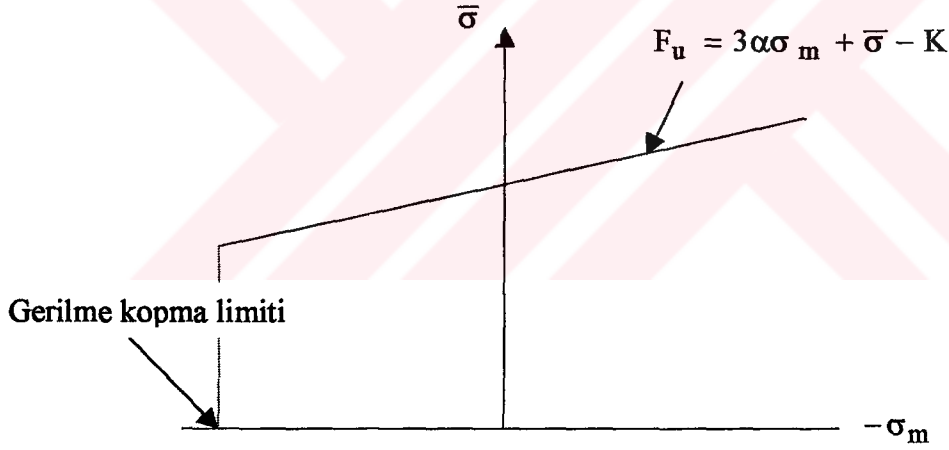
$$S_{ij} = \sigma_{ij} - \delta_{ij}\sigma_m = \sigma_{ij} - \frac{\delta_{ij}\sigma_{ii}}{3} \quad (i=1,2,3, \quad j=1,2,3) \quad (54)$$

ifadesi ile verilmektedir. Bu ifadede; δ_{ij} kroneker deltasıdır. α ve σ_y malzeme iç sürtünme açısına, ϕ , ve malzeme kohezyonuna, c , bağlı olarak;

$$\alpha = \frac{2 \sin \phi}{\sqrt{3}(3 - \sin \phi)} \quad (55)$$

$$\sigma_y = \frac{6 c \cos \phi}{\sqrt{3}(3 - \sin \phi)} \quad (56)$$

şeklinde elde edilmektedir. Drucker-Prager akma kriteri Şekil 10'da gösterilmektedir.



Şekil 10. Drucker-Prager akma kriteri

Her adımda hesaplanan (51) denkleminde elde edilen verilere bağlı olarak eğer, $F_u < 0$ ise malzeme elastik davranış sergilemektedir ve şekildeğişimler,

$$\epsilon^e = D^{-1}\sigma^e \quad (57)$$

denkleminde elde edilmektedir. Burada ε^e , elastik şekildeğiştirmeyi, σ^e , elastik şekildeğiştirmelere karşılık gelen gerilmeleri, D ise, malzeme matrisi olup,

$$D = \begin{bmatrix} d_{11} & d_{12} & 0 \\ d_{21} & d_{22} & 0 \\ 0 & 0 & d_{33} \end{bmatrix} \quad (58)$$

olarak tanımlanmaktadır. Burada, düzlem şekildeğiştirme problemleri için

$$d_{11} = d_{22} = \frac{E(1-\nu)}{(1+\nu)(1-2\nu)} \quad (59)$$

$$d_{12} = d_{21} = \frac{\nu E}{(1+\nu)(1-2\nu)} \quad (60)$$

$$d_{33} = \frac{E}{2(1+\nu)} \quad (61)$$

dir. Elastisite modülü, E ve poisson oranı, ν 'dir.

Akma fonksiyonunun $F_u > 0$ olması, malzemenin plastik hale geçtiğini gösterir. Elastik şekildeğiştirme bağıntısı (57), elasto-plastik durumda,

$$\varepsilon^P = D_{EP}^{-1} \sigma^P \quad (62)$$

ifadesi ile tanımlanabilir [68,69]. Burada; ε^P , plastik şekildeğiştirmeyi, σ^P , bu şekildeğiştirmeye karşılık gelen gerilmeyi, D_{EP} , plastik malzeme matrisidir. $K = \frac{E}{3(1-2\nu)}$

ve $G = \frac{E}{2(1+\nu)}$ alınarak,

$$D_{EP} = \begin{bmatrix} K + \frac{4}{3}G - (\beta_1 S_{11} + \beta_2)^2 & & \text{Simetrik} \\ K - \frac{2}{3}G - (\beta_1 S_{11} + \beta_2)(\beta_1 S_{22} + \beta_2) & K + \frac{4}{3}G - (\beta_1 S_{22} + \beta_2)^2 & \\ -(\beta_1 S_{11} + \beta_2)(\beta_1 S_{12}) & -(\beta_1 S_{22} + \beta_2)(\beta_1 S_{12}) & G - (\beta_1 S_{12})^2 \end{bmatrix} \quad (63)$$

elde edilir. Burada;

$$\beta_1 = \frac{G}{\bar{\sigma}(G + 9K\alpha^2)^{1/2}} \quad (64)$$

$$\beta_2 = \frac{3K\alpha}{(G + 9K\alpha^2)^{1/2}} \quad (65)$$

ile ifade edilmektedir.

Toplam şekildeğiştirme ise,

$$\varepsilon = \varepsilon^e + \varepsilon^p \quad (66)$$

şeklinde gösterilebilir [68,69].

1.5.2.2. Elasto-Plastik Davranışı İçin Eğri Tanımlama Yöntemi

Eğri Tanımlama Yönteminde malzeme davranışını belirleyen gerilme-deformasyon eğrisini basit bir şekilde tanımlar [68,69]. Bu modelde bulk modülü ve kayma modülü o andaki hacimsel şekildeğiştirmenin lineer fonksiyonu olarak tanımlanmaktadır. Kesin bir akma sınırı belirlenmeksizin malzeme davranışı, yükleme veya boşaltma durumunda bulk modülüne göre belirlenmektedir [68,69].

Eğri Tanımlama Yöntemi kullanılırken, gerilme şekildeğiştirme bağıntıları,

$$S_{ij} = 2Gg_{ij} \quad (67)$$

$$\sigma_m = 3Ke_m \quad (68)$$

ile gösterilir [69]. Burada g_{ij} , sapma şekildeğiştirmesi olup,

$$g_{ij} = e_{ij} - e_m \delta_{ij} \quad (69)$$

denklemleri ile verilmektedir. σ_m , ortalama gerilme, (52) denklemleriyle verilmiştir. e_m ise ortalama şekildeğiştirme ve

$$e_m = \frac{e_{11} + e_{22} + e_{33}}{3} = \frac{e_{ii}}{3} \quad (70)$$

şeklinde ifade edilebilmektedir.

Çözümde kullanılan bulk modülü ve kayma modülü, K ve G, yükleme durumunun fonksiyonlarıdır. Hacimsel şekildeğiştirme e_v ,

$$e_v = e_{grav} + (-3e_m) \quad (71)$$

şeklinde tanımlanmaktadır. Burada e_{grav} , ağırlıktan dolayı meydana gelen hacimsel şekildeğiştirme. Çözüm sırasında ulaşılan minimum ortalama şekildeğiştirmeye, e_{min} , göre malzemenin yükleme veya boşalmada olduğu dikkate alınır. Eğer $e_m \leq e_{min}$ ise malzeme, yükleme, $e_m > e_{min}$ ise malzeme, boşalma durumundadır. Diğer bir tanımlama,

$$K = \begin{cases} e_m \leq e_{min} & \text{ise } K_{LD} \\ e_m > e_{min} & \text{ise } K_{UN} \end{cases} \quad (72)$$

ve

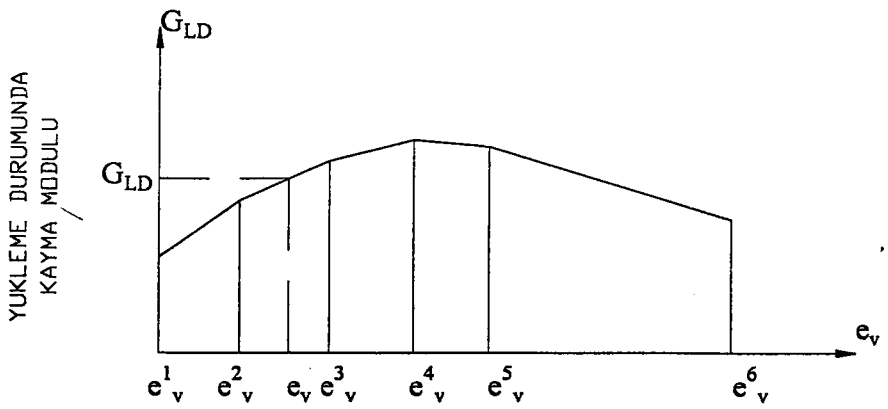
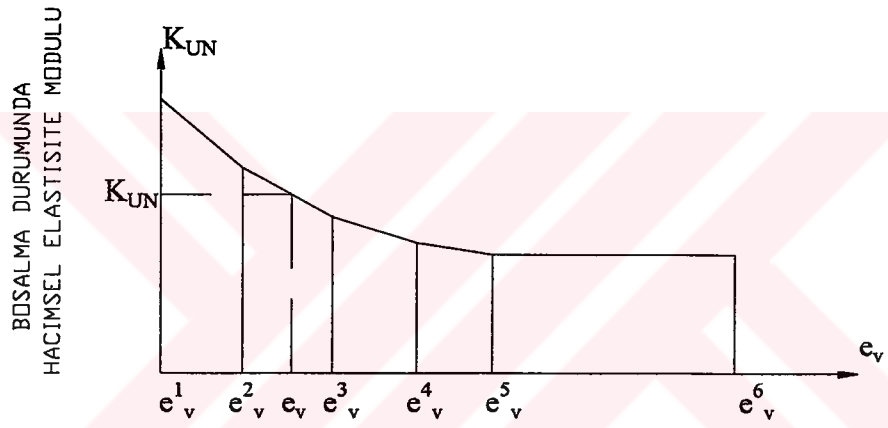
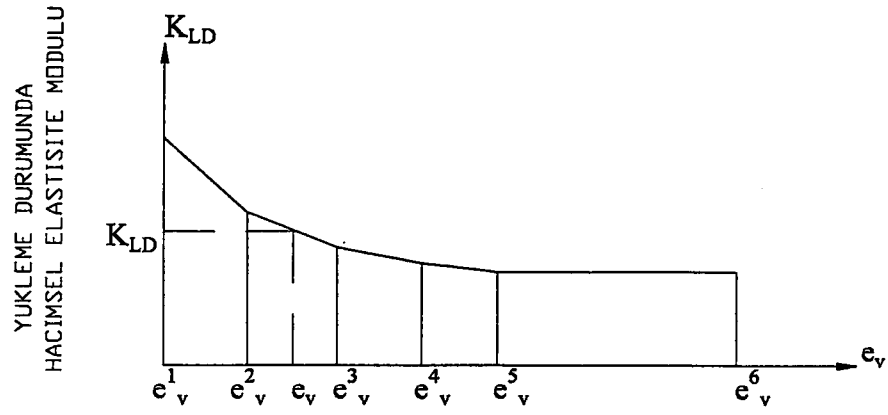
$$G = \begin{cases} e_m \leq e_{\min} & \text{ise } G_{LD} \\ e_m > e_{\min} & \text{ise } G_{UN} \end{cases} \quad (73)$$

olarak alınır. Boşalma durumunda kayma modülü,

$$G_{UN} = G_{LD} \frac{K_{UN}}{K_{LD}} \quad (74)$$

bağıntısı ile elde edilmektedir [68,69].

Şekil 11’de Eğri Tanımlama Yönteminde kullanılan yükleme ve boşaltma durumundaki hacimsel elastisite modülü ve yükleme durumundaki kayma modülü verilmektedir.



Şekil 11. Eğri Tanımlama modelinde kullanılan modüller [68,69].

1.5.3. Linear Olmayan Dinamik Analiz İçin Hareket Denklemleri

Linear olmayan bir sistemin dinamik hareket denklemi [75,107] , atalet, $F_A(t)$, sönüm, $F_S(t)$, rijitlik, $F_Y(t)$ ve etkiyen dinamik dış kuvvetlerin, $F(t)$, dengesindedir,

$$F_A(t) + F_S(t) + F_Y(t) - F(t) = 0 \quad (75)$$

denklemleri ile temsil edilmektedir. Bu denklemler,

$$M\ddot{U} + C\dot{U} + K_{NL}U = F(t) \quad (76)$$

ifadesi ile tanımlanabilir. Burada, M , C ve K_{NL} sırasıyla sistemin kütle, sönüm ve rijitlik matrisini, \ddot{U} , \dot{U} , U ve $F(t)$ ise sırasıyla, lineer olmayan sistemin ivme, hız, yerdeğiştirme ve dış yük vektörünü göstermektedir. Linear olmayan davranışta gerilme deformasyon eğrisi lineer olmadığı için K_{NL} rijitlik matrisi her zaman aralığı için tekrar hesaplanması gerekmektedir [89].

1.5.3.1. Linear Olmayan Sistemlerin Analizi İçin Adım-Adım Çözüm Yöntemleri

Linear olmayan sistemlerin çözümü için i ve $i+1$ zaman aralığında lineerlik varsayımı yapılabileceğinden (76) denklemi artımsal olarak,

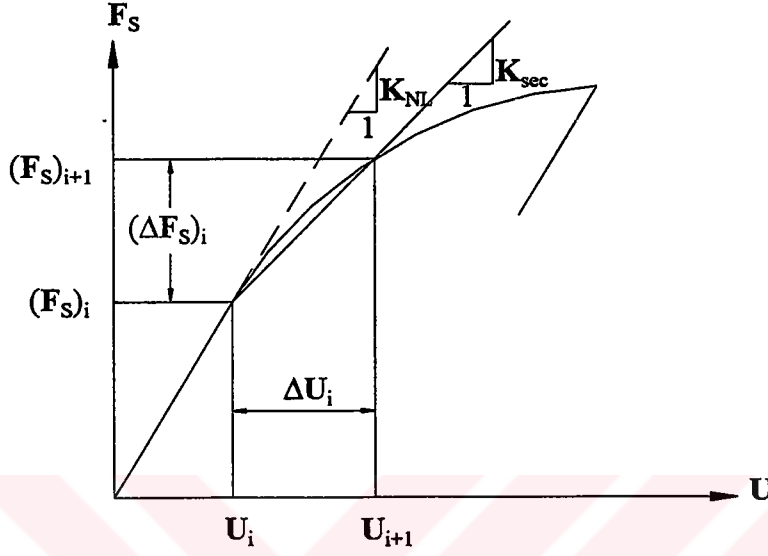
$$M\Delta\ddot{U}_i + C\Delta\dot{U}_i + (\Delta F_S)_i = \Delta P_i \quad (77)$$

denkleme dönüşebilir. Buradaki i indisi t_i zamanındaki artımsal elastik kuvvet davranış konumunu göstermekte olup,

$$(\Delta F_S)_i = (K_i)_{sec} \Delta U_i \quad (78)$$

denklemleri ile gösterilmiştir. Linear olmayan analizin esası t_i zamanındaki değerlerden yararlanılarak t_{i+1} zamanındaki yapı dinamik davranışın hesaplanmasıdır. Şekil 12'de

sekant rijitliği, $(K_i)_{sec}$, U_{i+1} bilinmediği için belirlenememektedir. Eğer Δt aralığını çok küçük olarak alınırsa sekant rijitliği, $(K_i)_{sec}$, yerine tanjant rijitliğini, $(K_i)_t$, alınabilmektedir.



Şekil 12. Tanjant ve sekant rijitliği

Bu durumda (78) denklemini;

$$(\Delta F_s)_i \cong (K_i)_T \Delta U_i \quad (79)$$

haline dönüşür.

(79) denklemini (77) denkleminde yerine konulursa,

$$M\Delta \ddot{U}_i + C\Delta \dot{U}_i + K_i \Delta U_i = \Delta P_i \quad (80)$$

denklemini elde edilir. Bu yöntemde K_i her zaman aralığında elde edilmektedir.

Newmark yöntemi'nde her zaman aralığı için çözülen (46) denklemini,

$$(\hat{K}_{NL})_i \Delta U_i = \Delta \hat{P}_i \quad (81)$$

halini alır. Burada,

$$(\hat{K}_{NL})_i = (K_{NL})_i + \frac{\gamma}{\beta(\Delta t)} C + \frac{1}{\beta(\Delta t)^2} M \quad (82)$$

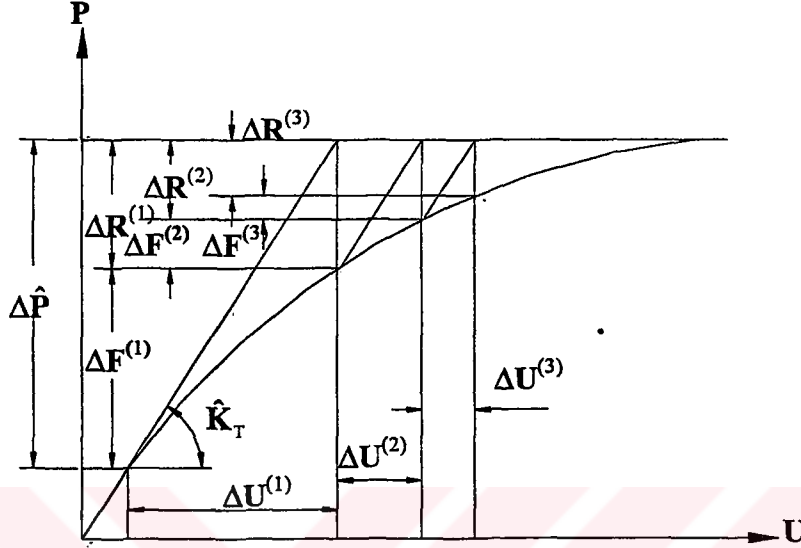
$$\Delta \hat{P}_i = \Delta P_i + \left(\frac{1}{\beta(\Delta t)} M + \frac{\gamma}{\beta} C \right) \dot{U}_i + \left[\frac{1}{2\beta} M + \Delta t \left(\frac{\gamma}{2\beta} - 1 \right) C \right] \ddot{U}_i \quad (83)$$

şeklinde yazılabilir.

Adım adım çözüm sabit Δt zaman aralığında gerçekleştirildiğinden kabul edilemeyecek sonuçlar verebilir. Bunun iki sebebi olabilir: (1) tanjant rijitliğinin, sekant rijitliği yerine kullanılması, (2) Kuvvet-deformasyon eğrisinde geçişlerin tam olarak sağlanamaması. Bu hatalar iterasyon işlemi kullanılarak giderilebilir. Bu amaçla Değiştirilmiş Newton-Raphson iterasyonu kullanılmaktadır [74,75,89].

1.5.3.1.1. Değiştirilmiş Newton-Raphson İterasyonu

Değiştirilmiş Newton-Raphson iterasyon işlemi için şematik gösterim Şekil 14'de verilmektedir.



Şekil 13. Değiştirilmiş Newton-Raphson iterasyonu

ΔU yerdeğiştirmesini elde edinceye kadar yapılacak olan iterasyon,

$$\hat{K}_{NL}\Delta U^{(1)} = \Delta \hat{P} \quad (84)$$

$\Delta U^{(1)}$ 'e karşılık gelen kuvvet $\Delta F^{(1)}$, $\Delta \hat{P}$ 'den azdır ve geriye kalan kuvvet $\Delta R^{(2)} = \Delta \hat{P} - \Delta F^{(1)}$ olarak alınabilir. $\Delta R^{(2)}$ 'den dolayı meydana gelen yerdeğiştirme $\Delta U^{(2)}$,

$$\hat{K}_{NL}\Delta U^{(2)} = \Delta R^{(2)} = \Delta \hat{P} - \Delta F^1 \quad (85)$$

denklemden hesaplanır. Burada \hat{K}_{NL} , tanjant rijitliğini, ΔU toplam yerdeğiştirme vektörünü, $\Delta U^{(1)}, \Delta U^{(2)}, \Delta U^{(3)}$ ise sırasıyla Newton-Raphson Yöntemi'nde, birinci, ikinci ve üçüncü dilimlerdeki yerdeğiştirme artış vektörlerini, $\Delta F^{(1)}$, $\Delta U^{(1)}$ 'e karşılık

gelen kuvvet vektörünü, $\Delta\hat{P}$, toplam kuvvet vektörünü ve ΔR , artık kuvvet vektörünü göstermektedir. Bulunan $\Delta U^{(2)}$ geriye kalan kuvveti elde etmek için kullanılır. Yaklaşıklık sağlanıncaya kadar bu işlem sürdürülür. Yaklaşıklık kriteri olarak,

$$\frac{\Delta U^{(\ell)}}{\Delta U} < \varepsilon \quad (86)$$

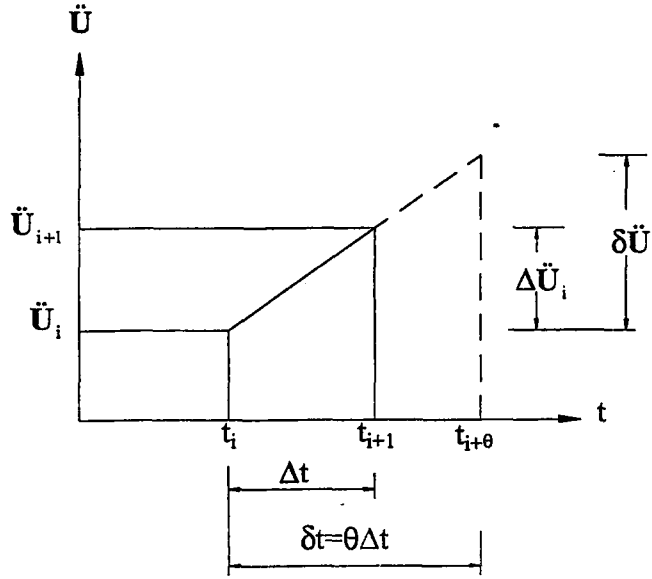
alınmaktadır. Burada (ℓ) iterasyon sayısıdır [74,75].

1.4.4. Lineer ve Lineer Olmayan Sistemlerin Çözümünde Kullanılan Wilson- θ Yöntemi

Çok serbestlik dereceli sistemlerin analizinde, sayısal yöntemlerin veya adım adım çözümün stabilitesi çok önemlidir. Bu nedenle, böyle sistemlerin analizinde koşulsuz stabil olan yöntemler kullanmak gerekmektedir. Wilson tarafından geliştirilen bu yöntem [74], koşullu stabil olan lineer ivme yöntemini koşulsuz stabil hale getirir. Lineer ivme yönteminde yapılan değişiklik, ivmenin genişletilmiş zaman aralığı boyunca lineer olarak değiştiği kabulüne bağlıdır. Zaman aralığı, Şekil 14'de gösterildiği gibi,

$$\delta t = \theta \Delta t \quad (87)$$

şeklinde genişletilmiştir.



Şekil 14. Wilson-θ yöntemi

Bu yöntemin doğruluk ve stabilite özellikleri θ parametresinin değerine bağlıdır. Bu parametre daima 1'den büyüktür.

Her zaman aralığında çözülen (46) denklemini, bu metotta,

$$\hat{K}_i \delta U_i = \delta \hat{P}_i \quad (88)$$

şeklini alır. $\gamma = \frac{1}{2}$ ve $\beta = \frac{1}{6}$ için,

$$\hat{K}_i = K_i + \frac{3}{\theta(\Delta t)} C + \frac{6}{(\theta\Delta t)^2} M \quad (89)$$

$$\delta \hat{P}_i = \theta(\Delta P_i) + \left(\frac{6}{\theta\Delta t} M + 3C \right) \dot{U}_i + \left(3M + \frac{\theta\Delta t}{2} C \right) \ddot{U}_i \quad (90)$$

yazılabilir. $\delta \dot{U}_i$ ve $\delta \ddot{U}_i$ ise,

$$\delta\dot{U}_i = \frac{3}{\delta t}\delta U_i - 3\dot{U}_i - \frac{\delta t}{2}\ddot{U}_i \quad (91)$$

$$\delta\ddot{U}_i = \frac{6}{(\delta t)^2}\delta U_i - \frac{6}{\delta t}\dot{U}_i - 3\ddot{U}_i \quad (92)$$

denklemleri yardımıyla bulunabilir. Normal zaman aralığındaki artımsal ivme ise,

$$\Delta\ddot{U}_i = \frac{1}{\theta}\delta\ddot{U}_i \quad (93)$$

denklemleri ile bulunmaktadır. Artımsal hız ve yerdeğiştirme ise,

$$\Delta\dot{U}_i = (\Delta t)\ddot{U}_i + \frac{\Delta t}{2}\Delta\ddot{U}_i \quad (94)$$

$$\Delta U_i = (\Delta t)\dot{U}_i + \frac{(\Delta t)^2}{2}\ddot{U}_i + \frac{(\Delta t)^2}{6}\Delta\ddot{U}_i \quad (95)$$

denklemleri ile elde edilmektedir [74].

2. YAPILAN ÇALIŞMALAR

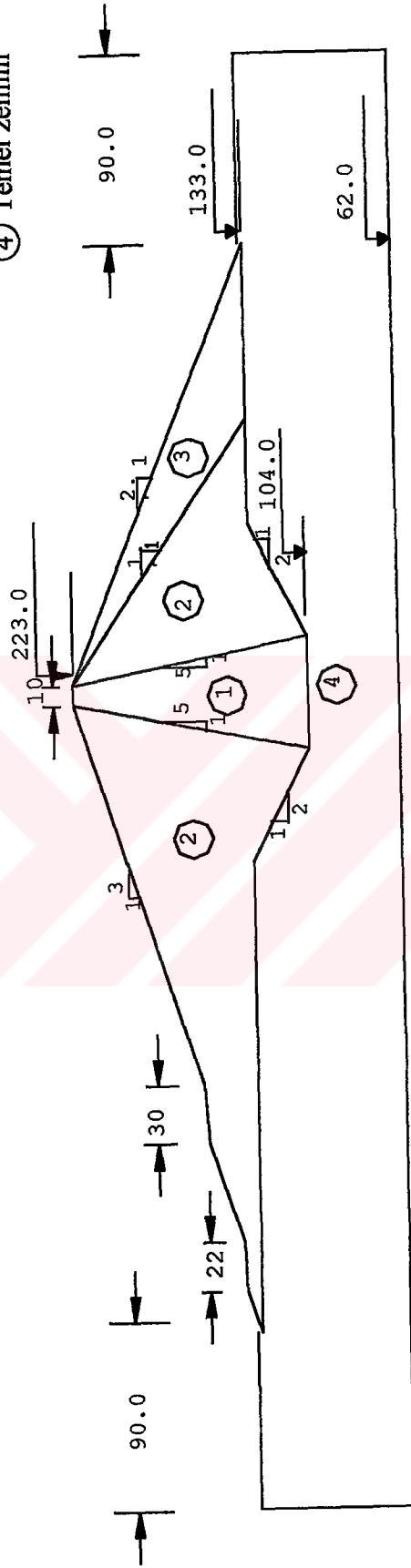
2.1. Barajın Yapısal Özellikleri

Bu çalışmada lineer ve lineer olmayan dinamik analizi gerçekleştirmek amacıyla örnek sistem olarak merkezi kil çekirdekli, kum, çakıl, mansap yüzeyi kaya ile kaplı, toprak dolgu baraj olan Gördes Barajı [71] seçilmiştir. Gördes Barajı boyutları; baraj kret noktası deniz seviyesinden 223.00 m, barajın zeminle birleştiği nokta deniz seviyesinden 133.00 m ve barajın zemine gömülü topuk kısmının zeminle birleştiği nokta deniz seviyesinden 104.00 m olarak belirlenmektedir. Gördes Barajı menba yüzeyi eğimi 1/3, mansap yüzeyi eğimi 2/5 olarak gösterilmektedir. Baraj boyutları ayrıntılı olarak Şekil 15'de gösterilmektedir.

Gördes Barajı için, temelin rijit ve eğilebilir olduğu durumlar gözönüne alınmıştır. Temelin rijit olduğu durumda, baraj üç farklı zondan oluşmaktadır. Şekil 15'de gösterildiği gibi, 1 nolu zon, toprak dolgu barajın kil çekirdekli kısmını, 2 nolu zon, kum çakıl kısmını, 3 nolu zon ise kaya dolgu kısmını göstermektedir. Temelin eğilebilir olduğu durumda ise, baraj dört farklı zondan oluşmaktadır. Temelin rijit olduğu durumdaki zonlara ek olarak bulunan 4 nolu zon ise yumuşak zemin tabakası olarak kabul edilmektedir.

Zon Numaraları

- ① Kil Dolgu
- ② Kum-çakıl dolgu
- ③ Kaya dolgu
- ④ Temel zemini



Şekil 15. Gördes Barajı Boyutları

2.2. Barajın Malzeme Özellikleri

Gördes Barajının lineer ve lineer olmayan dinamik analizinde kullanılan malzeme özellikleri [108] Tablo 2 ve Tablo 3’ de verilmektedir. Lineer dinamik analiz için lineer elastik izotropik malzeme modeli, lineer olmayan dinamik analiz için ise Drucker-Prager hipotezine göre belirlenen malzeme modeli ve eğri tanımlama modeli kullanılmaktadır. Her iki modelde de malzemenin elasto-plastik davranış gösterdiği kabul edilmiştir. Son modelde öncelikle malzemenin gerilme deformasyon eğrisi tanımlanmaktadır. Bu modelde yükleme ve boşaltma durumundaki bulk modülü ve kayma modülü hacimsel şekil değiştirmeye bağlı olarak tespit edilmektedir. Eğri tanımlama yönteminde elasto-plastik davranış gösteren malzemelerin gerilme şekil değiştirme ilişkileri Şekil 16, 17, 18, 19’da gösterilmektedir.

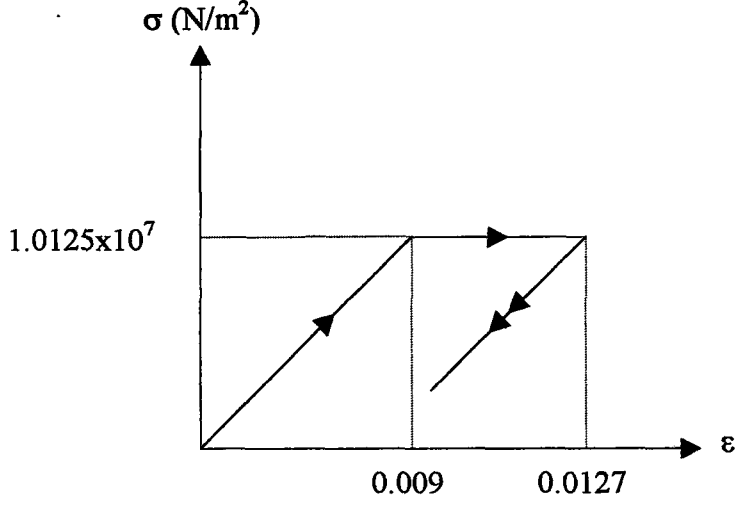
Tablo 2. Lineer analiz için malzeme özellikleri

Malzeme Özellikleri	Zon		
	1	2	3
E (N/m ²)	1.125x10 ⁹	3.24x10 ⁹	2.1x10 ¹⁰
ν	0.45	0.40	0.35
γ (N/m ³)	19100	19000	19500

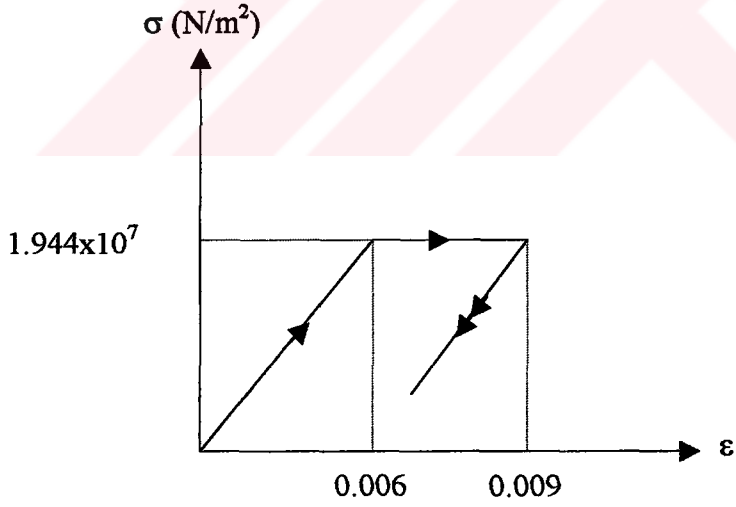
Tablo 3. Lineer olmayan analiz için malzeme özellikleri

Malzeme Özellikleri	Zon			
	1	2	3	4
E (N/m ²)	1.125x10 ⁹	3.24x10 ⁹	2.1x10 ¹⁰	2.183x10 ⁹
ν	0.45	0.40	0.35	0.43
γ (N/m ³)	19100	19000	19500	19000
C (N/m ²)	2.25x10 ⁷	1.35x10 ⁷	1.13x10 ⁷	1.80x10 ⁷
ϕ	20 ⁰	33 ⁰	36 ⁰	26 ⁰

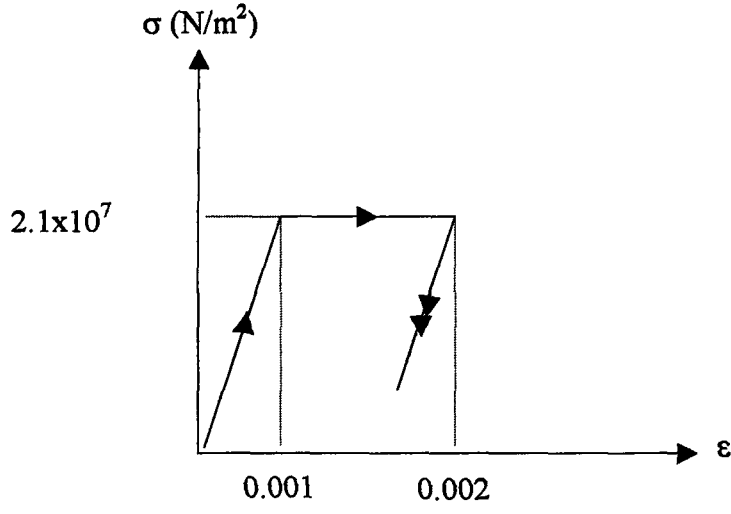
Tablolarda kullanılan, E , malzemenin elastisite modülünü, ν , poisson oranını, γ , birim hacim ağırlığını, ϕ ise içsel sürtünme açısını göstermektedir.



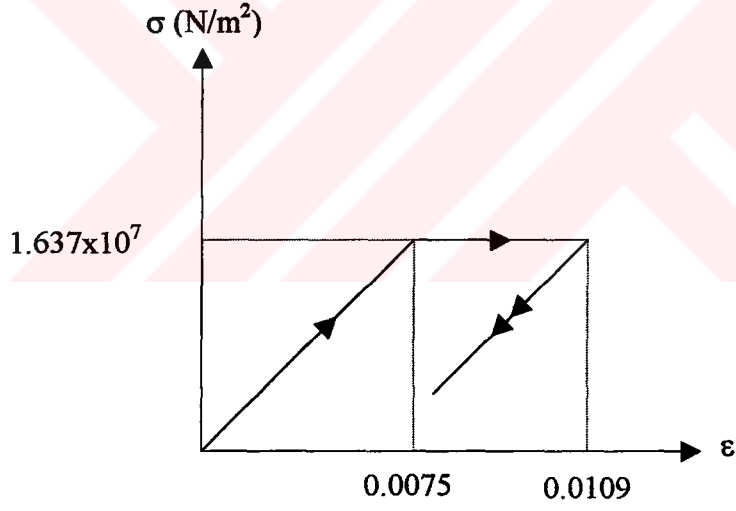
Şekil 16. 1 nolu elasto-plastik malzeme için gerilme şekildeşitirme diyagramı



Şekil 17. 2 nolu elasto-plastik malzeme için gerilme şekildeşitirme diyagramı



Şekil 18. 3 nolu elasto-plastik malzeme için gerilme şekildeşitirme diyagramı



Şekil 19. 4 nolu elasto-plastik malzeme için gerilme şekildeşitirme diyagramı

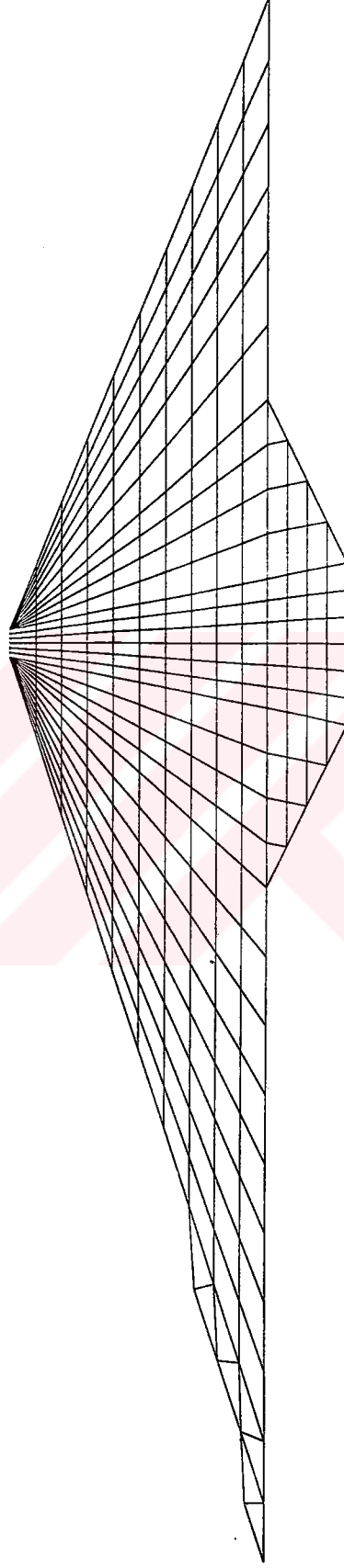
[106].

2.3. Gördes Barajı'nın Analitik Modeli

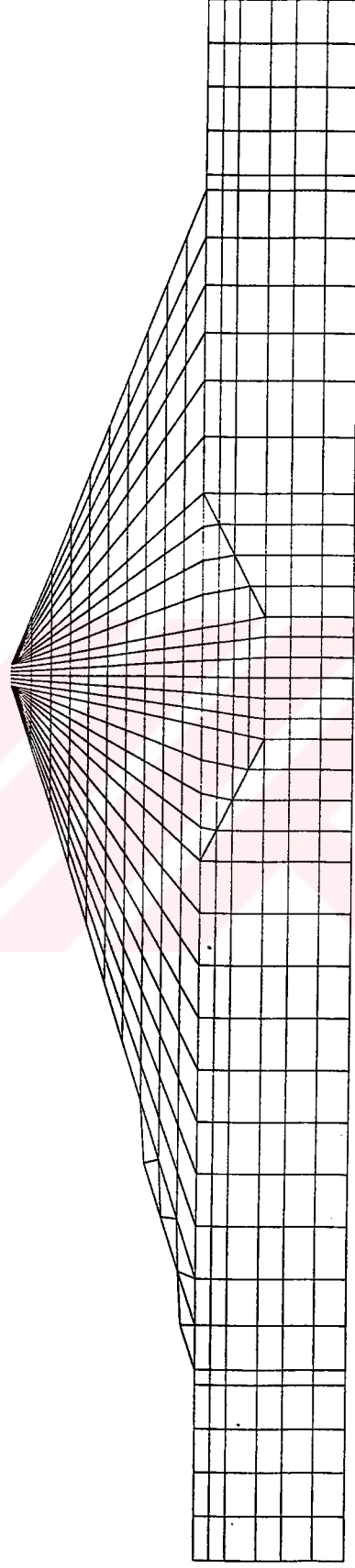
Bu çalışmada Gördes Barajının lineer ve lineer olmayan dinamik analizleri iki boyutlu sonlu eleman modeli kullanılarak gerçekleştirilmiş olup yapının kütlesi toplu kütleli sistem olarak modellenmiştir. Sürekli kütleli sistemlerden, kütlelerin belirli noktalara toplanmasıyla toplu kütleli sistemler meydana getirilebilir. Toplu kütleli sistemlerde, sistemin kütlesi, sönüm ve elastik özellikleri belirli noktalarda ayrık olarak bulunmaktadır. Kütlelerin toplandığı noktaların hareketlerinin bilinmesi ile tüm sistemin her andaki konumu belirlenebilir.

Merkezi kil çekirdekli kum-çakıl, mansap yüzeyi kaya ile kaplı, toprak dolgu barajı olarak Gördes Barajının iki boyutlu sonlu eleman modeli için dört düğüm noktalı ve üç düğüm noktalı elemanlar kullanılmaktadır. Toplam eleman sayısı temelin rijit olması halinde 332, eğilebilir olması halinde ise 544 elemandır.

Bu elemanlara ait her bir düğüm noktasında yatay ve düşey olmak üzere iki serbestlik derecesi alınmaktadır. Temelin rijit olması (Şekil 20) halinde 365, eğilebilir olması (Şekil 21) halinde ise 590 düğüm noktasına sahip sonlu eleman ağı kullanılmaktadır.



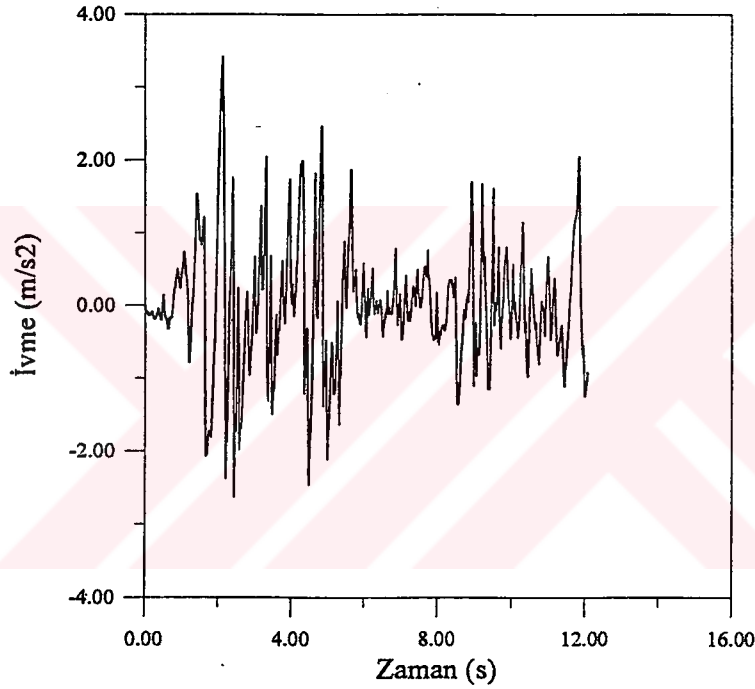
Şekil 20. Temelin rijit olması halinde barajın sonlu eleman modeli



Şekil 21. Temelin eğilebilir olması halinde sonlu eleman modeli

2.4. Yer Hareketinin Seçimi

Dinamik analizlerde örnek yer hareketi olarak, 18 Mayıs 1940 tarihinde meydana gelen El Centro Depreminin Kuzey-Güney bileşeni kullanılmıştır. Şekil 22' de [3] $M=6,7$ kuvvetinde bulunan Kalifornia, El Centro depreminin verileri gösterilmektedir. Maksimum ivmesi $0.32g$, kayıtlardan hesaplanan maksimum hızı 34.8 cm/sn ve maksimum yerdeğiştirme ise 21.1 cm 'dir. Büyük titreşim periyotları ivme için $0.25-0.6$ saniye ve hız için 0.5 ve 1 saniye arasındadır. Bu da deprem ivmesinin kısa periyotlarda geniş dalga sayısını içerdiğinin göstergesidir [8].



Şekil 22. 18 Mayıs 1940 El Centro depreminin kuzey-güney (S00E) bileşeni

Deprem kuvveti baraja menba –mansap doğrultusunda etkittirilmektedir. Lineer ve lineer olmayan analizlerde çözüm zamanının uzun olması nedeniyle depremin ilk 12'saniyelik kısmı dikkate alınmaktadır.

2.5. Barajın Lineer ve Lineer Olmayan Dinamik Analizi

Barajın lineer ve lineer olmayan dinamik analizlerinde baraj-rezervuar ve baraj-zemin etkileşimleri dikkate alınmıştır. Bütün sonlu eleman sistemlerinde %5 sönüm oranı

[75] kabul edilmiş , Rayleigh sabitleri (α, β) barajın boş ve dolu, temelin rijit ve eğilebilir olduğu durumlar için (96) denklemi ile 1. Mod esas alınarak hesaplanmıştır.

$$\alpha = \xi \frac{2\omega_i \omega_j}{\omega_i + \omega_j} \quad \text{ve} \quad \beta = \xi \frac{2}{\omega_i + \omega_j} \quad (96)$$

Burada ξ , sönüm oranını, ω_i ve ω_j sırasıyla i 'inci ($i=1,2,3,\dots$) ve j 'inci ($j=1,2,3,\dots$) modlardaki doğal frekansları göstermektedir. Rayleigh sabitleri Tablo 4'de verilmektedir.

Tablo 4. Rayleigh sabitleri

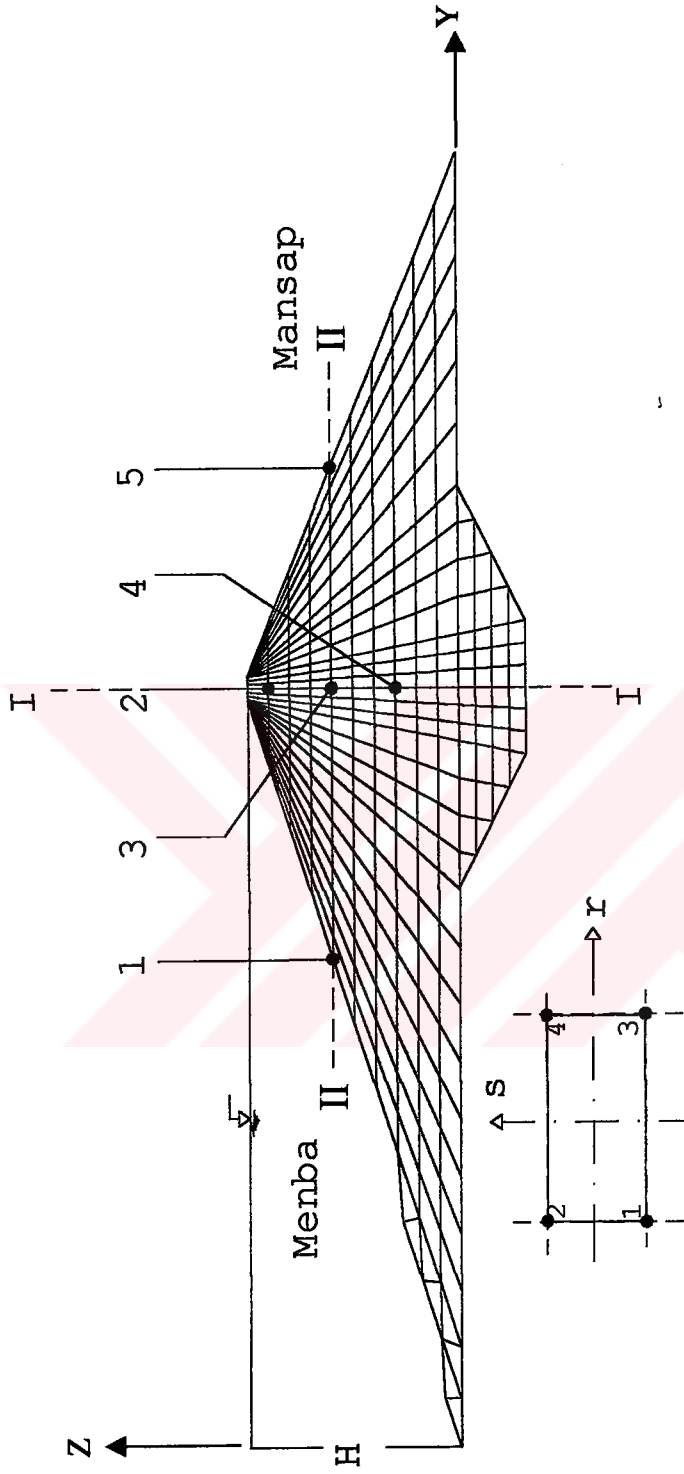
Rayleigh Sabitleri	İki Boyutlu Analiz			
	Rijit Temel		Eğilebilir Temel	
	Baraj Boş	Baraj Dolu	Baraj Boş	Baraj Dolu
α	0.87265	0.87125	0.46116	0.46115
β	0.002865	0.00287	0.005421	0.00542

Adım adım integrasyon yönteminde lineer analizler için zaman adımı 0.02 saniye, lineer olmayan analizler için ise 0.005 saniye olarak seçilmiştir [103]. Lineer olmayan analizler için zaman adımının küçük alınmasının sebebi elasto-plastik malzemeyi tanımlayan gerilme-şekildeğiştirme ilişkisini daha iyi yakalayabilmektir. Lineer analizlerde ise zaman adımının 0.02'saniyeden daha küçük seçilmesi sonuçları etkilememektedir.

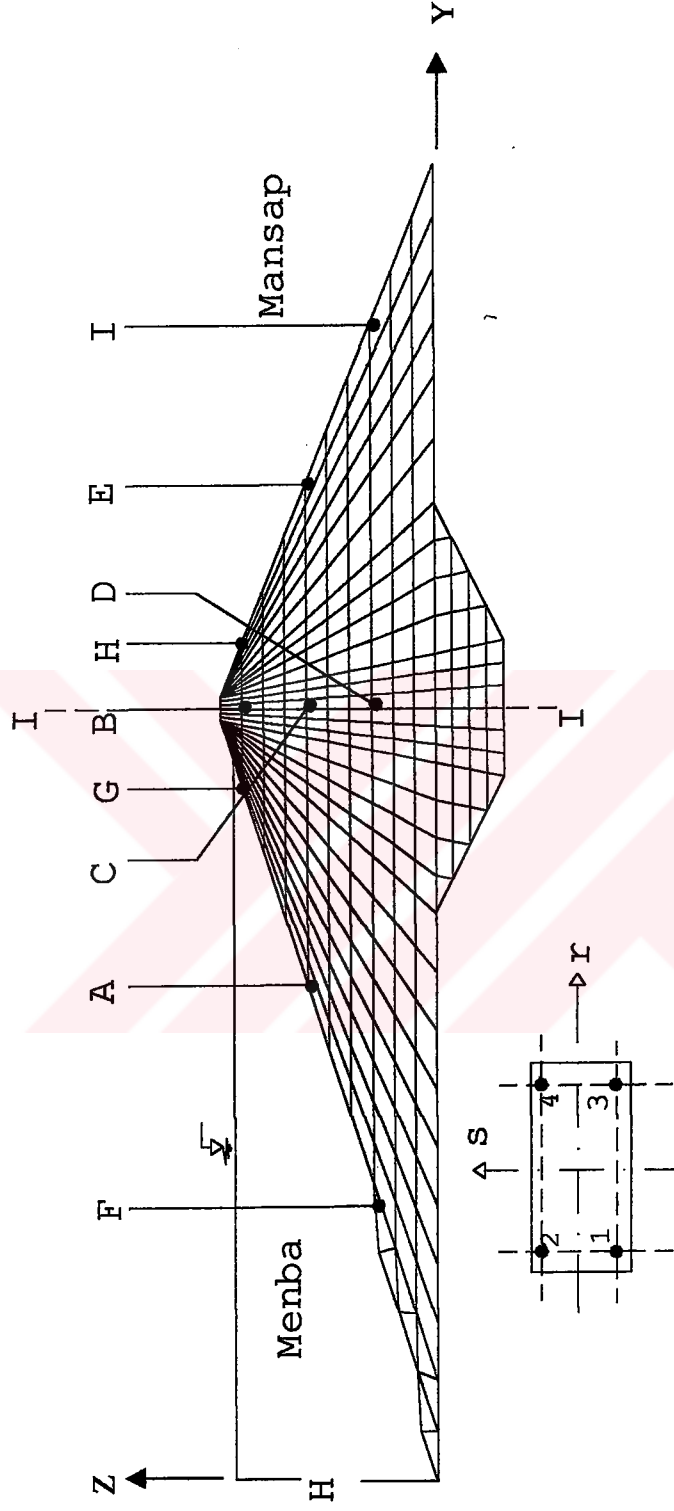
Gerçekleştirilen lineer dinamik analiz ile Şekil 23'de gösterilen barajın seçilen düğüm noktalarındaki yerdeğiştirmeler, yatay ve düşey gerilmeler zamana bağlı olarak hesaplanmıştır. Ayrıca barajın menba, mansap ve I-I kesitlerindeki maksimum yerdeğiştirmelerin yükseklik boyunca değişimi elde edilmektedir. Ayrıca, II-II kesiti boyunca da maksimum yerdeğiştirmeler ve maksimum yatay-düşey gerilmeler hesaplanmıştır. Lineer olmayan dinamik analizlerde ise Şekil 24'de gösterilen gauss noktalarındaki yatay ve düşey gerilmeler zamana bağlı olarak elde edilmektedir. Yerdeğiştirmeler ise lineer analizlerde olduğu gibi seçilen düğüm noktalarında zamana bağlı olarak elde edilmektedir. Ayrıca menba ve mansap yüzeyindeki maksimum

yerdeşiftirmelerin yükseklik boyunca değişimi ve II-II kesiti boyunca maksimum yatay yerdeğiftirmeler hesaplanmıştır. Son olarak da lineer ve lineer olmayan analizlerde elde edilen sonuçlardan barajın menba ve mansap yüzeylerindeki maksimum yerdeğiftirmelerin yükseklik boyunca değişimleri arasındaki ilişkiler grafikler halinde sunulmuştur. Aynı işlem II-II kesiti boyunca meydana gelen yerdeğiftirmeler için de gerçekleştirilmiştir.





Şekil 23. Lineer analiz için baraj üzerinde seçilen düğüm noktaları ve belirlenen kesitler



Şekil 24. Linear olmayan analiz için baraj üzerinde seçilen gauss noktaları ve belirlenen kesitler

2.5.1. Baraj Rezervuar Etkileşimi

Barajlar, sıvı-yapı etkileşimine [49,50,51] maruz yapı grubuna girmeleri sebebiyle analizlerde rezervuar etkisinin dikkate alınması gerekliliği öne sürülmektedir. Rezervuardan dolayı meydana gelecek ilave kütleler barajın dinamik analizi için elde edilen denklemlere ilave edilerek çözümler gerçekleştirilmektedir. Bu ilave kütlelerin hesaplanması için çeşitli yöntemler kullanılmaktadır.

Bu çalışmada gerçekleştirilen analizlerde deprem sırasında barajda meydana gelecek olan hidrodinamik basınçların hesabı için Westergaard Yöntemi [14] kullanılmaktadır. Bu Yöntemden, ilave kütleler yüksekliğe bağlı olarak bulunmakta ve her bir düğüm noktasına ilave edilmektedir. Burada hatırlanması gereken, bu ilave kütlelerin baraj yüksekliğine bağlı olması ve deprem yönünde ilave edilecek olan kütlelerin barajın eğimine bağlı olarak değişmesidir.

2.5.2. Baraj Zemin Etkileşimi

Şiddetli depremler yeryüzünden 15-30 km derinlikte, yerkabuğu içinde uzun sürelerde oluşan gerilme birikimlerinin fay hatlarında meydana gelen ani yırtılmalarla boşalmasından kaynaklanır. Böylece ortaya çıkan sismik dalgalar yerkabuğu içerisinde yayılır ve yeryüzüne ulaşırlar. Eğer sert yerkabuğu ile söz konusu yapının bulunduğu bölgedeki yeryüzü arasında yumuşak bir zemin tabakası mevcut ise sismik dalgalar bu tabaka tarafından belirli bir biçimde filtre edilerek yapıya ulaşırlar. Öte yandan yeryüzündeki yapı, baraj gibi büyük bir kütleyle sahip ise, bu kütle kendi altındaki zeminin dinamik özelliklerini etkileyecek ve zeminden geçen sismik dalgaların karakterini değiştirecektir. Bir başka deyişle barajın yanındaki serbest yüzeyde oluşacak yer hareketinden farklı bir dinamik etki baraj tabanına etkiyecektir. Bu özellik zemin-yapı etkileşimi [52,53] olarak tanımlanmaktadır.

Zemin yapı etkileşim probleminin çözüm şeklini daha çok zeminin durumu belirlemektedir. En genel anlamda zemin tipini üç sınıfa ayırmak mümkündür.

- a) Derin kayalık zemin
- b) Taban kayası üzerine oturan yumuşak zemin tabakası
- c) Derin yumuşak zemin

Eğer baraj ilk sınıftaki kayalık veya çok sert bir zemine oturuyorsa, baraj gövdesi sonlu elemanlar yöntemi ile sonsuz rijit bir tabana oturduğu varsayımı ile zlmektedir. Bu durumda yapı zemin etkileşimi ihmal edilmiş olmaktadır [85]. Zemin tipi ikinci durumdaki gibi taban kayası üzerine oturan yumuşak bir tabakadan meydana geliyorsa en uygun yöntem sonlu elemanlar yönteminin hem yapıyı hem de yumuşak zemin tabakasını temsil edecek şekilde kapsamının genişletilmesidir [53].

Bu çalışmada yapı-zemin etkileşiminin etkisini incelemek için barajın bizzat kendisinin rijit tabakaya oturduğu hem de zemin özelliklerinin yapı davranışını etkilediği düşünceleri ayrı ayrı değerlendirilip sonuçlar karşılaştırılmıştır. Her iki halde de baraj malzemesinin lineer ve lineer olmadığı da göz önüne alınarak araştırmalara dahil edilmiştir.

3. BULGULAR VE İRDELEMELER

3.1. Lineer Dinamik Analiz Sonuçlarının Karşılaştırılması

Bu tez çalışmasında, Gördes Barajı örnek alınarak bu baraj üzerinde lineer ve lineer olmayan dinamik analizler gerçekleştirilmektedir. Her bir analizde, barajın boş ve dolu, olduğu durumlar incelenerek hidrodinamik etkilerin baraj davranışına etkileri, temelin rijit ve eğilebilir olduğu durumlar gözönüne alınarak da yapı-zemin etkileri değerlendirilmiştir. Karşılaştırmalar için, barajın seçilen noktalarında gerilmeler ve yerdeğiştirmeler hesaplanmıştır.

3.1.1. Gerilmelerin Karşılaştırılması

Barajın dinamik analizinde, barajın menba yüzeyindeki gerilmelerin yükseklikle değişimleri Şekil 25-28'de gözlenmekte; ayrıca bu değişimler barajın boş ve dolu, temelin rijit ve eğilebilir olduğu durumlar için de gösterilmiştir. Barajın her durumu için elde edilen gerilmelerin zamanla değişimleri Şekil 29-44'de; maksimum değerlerinin yükseklik boyunca değişimlerinin sayısal değerleri ise Tablo 5-6'da verilmektedir.

İki boyutlu lineer dinamik analizde, temelin rijit, barajın boş ve dolu olması durumunda menba yüzeyinde Y-doğrultusundaki mutlak değerce maksimum gerilmelerin barajın tabanına doğru yaklaştıkça arttığı gözlenmektedir. Kret noktasında ise gerilmelerin taban noktasındaki gerilmelerden çok daha küçük değerler aldıkları gözlenmektedir.

Temelin eğilebilir olması halinde ise, barajın kret noktasına doğru yaklaştıkça Y-doğrultusundaki gerilmelerin azaldığı gözlenmektedir.

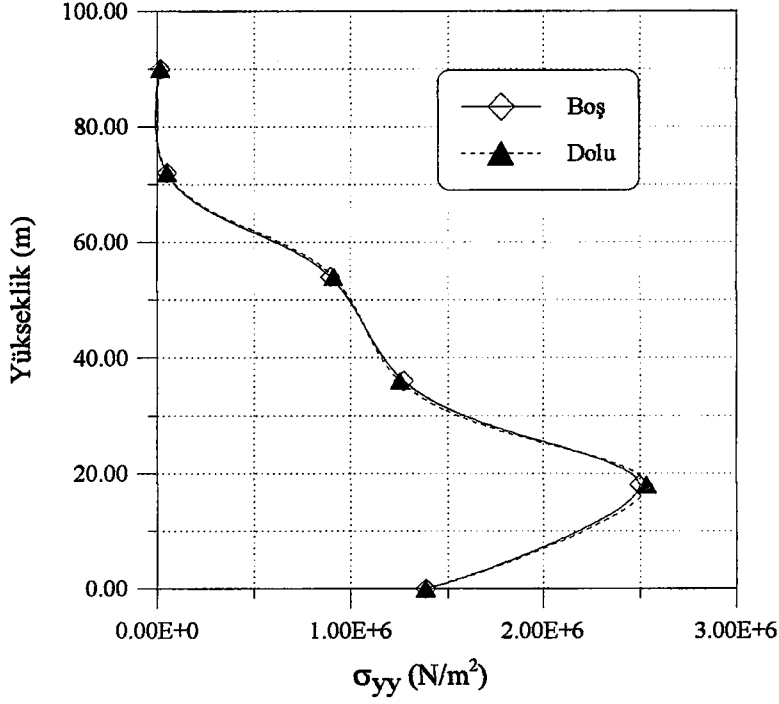
Temelin rijit, barajın boş ve dolu olması durumunda menba yüzeyinde Z-doğrultusundaki mutlak değerce maksimum gerilmelerin barajın tabanına doğru yaklaştıkça arttığı gözlenmektedir. Aynı yorumlar barajın eğilebilir olduğu durum için de yapılabilmektedir. Barajın boş ve dolu olduğu durumlarda sonuçlar birbirine çok yakın değerler almaktadır.

Tablo 5. Lineer dinamik analizde, temelin rijit olması durumunda menba yüzeyindeki yatay ve düşey gerilmelerin maksimum değerlerinin yükseklik boyunca değişimlerinin sayısal değerleri

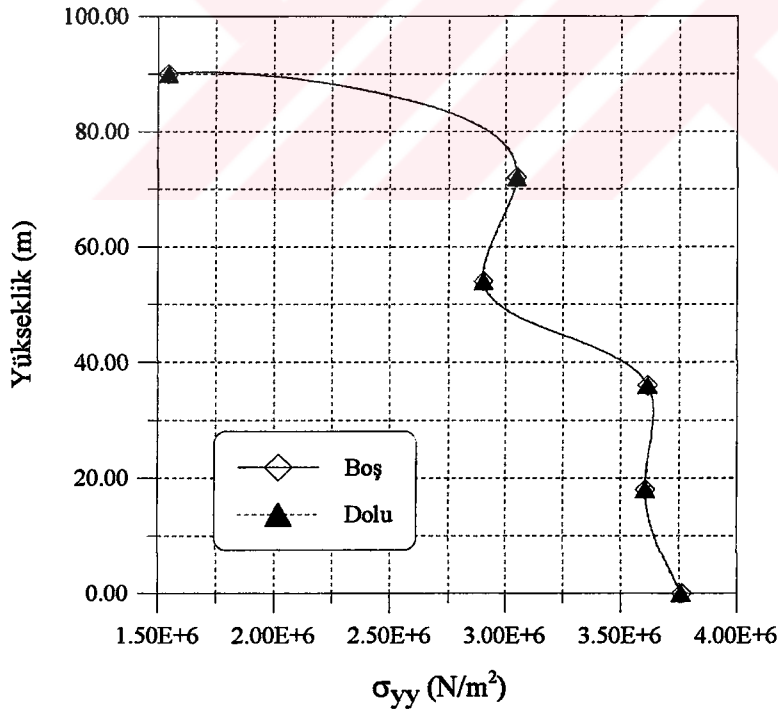
Lineer Dinamik Analiz				
Baraj Boş			Baraj Dolu	
Yükseklik (m)	Yatay Gerilme σ_{yy} (N/m ²)	Düşey Gerilme σ_{zz} (N/m ²)	Yatay Gerilme σ_{yy} (N/m ²)	Düşey Gerilme σ_{zz} (N/m ²)
90	1.412x10 ⁴	2.117x10 ⁴	1.475x10 ⁴	2.212x10 ⁴
72	4.733x10 ⁴	1.060x10 ⁵	5.015x10 ⁴	1.080x10 ⁵
54	8.956x10 ⁵	3.849x10 ⁵	9.104x10 ⁵	4.003x10 ⁵
36	1.272x10 ⁶	7.272x10 ⁵	1.253x10 ⁶	7.322x10 ⁵
18	2.497x10 ⁶	1.741x10 ⁶	2.536x10 ⁶	1.786x10 ⁶
0	1.386x10 ⁶	3.500x10 ⁶	1.385x10 ⁶	3.535x10 ⁶

Tablo 6. Lineer dinamik analizde, temelin eğilebilir olması durumunda menba yüzeyindeki yatay ve düşey gerilmelerin maksimum değerlerinin yükseklik boyunca değişimlerinin sayısal değerleri

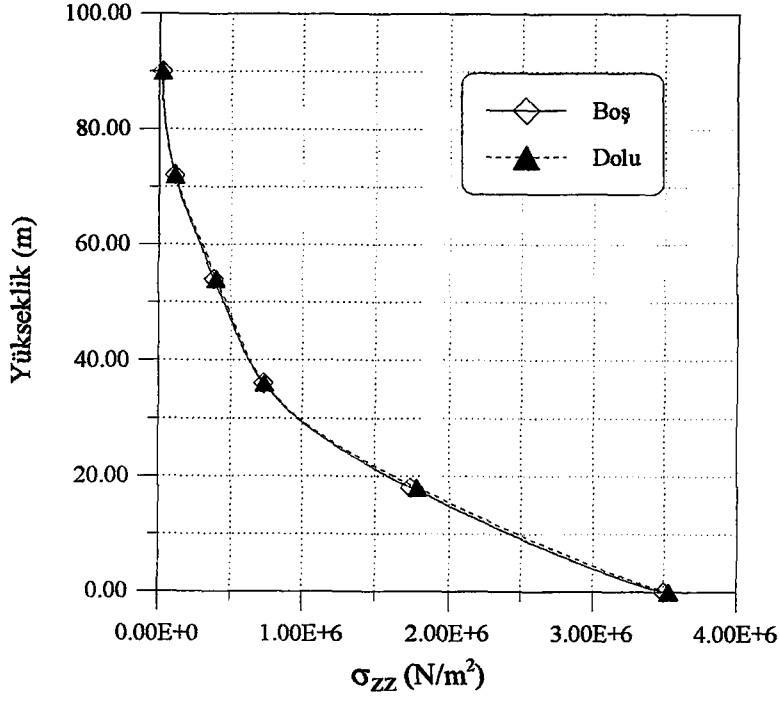
Lineer Dinamik Analiz				
Baraj Boş			Baraj Dolu	
Yükseklik (m)	Yatay Gerilme σ_{yy} (N/m ²)	Düşey Gerilme σ_{zz} (N/m ²)	Yatay Gerilme σ_{yy} (N/m ²)	Düşey Gerilme σ_{zz} (N/m ²)
90	1.544x10 ⁶	2.856x10 ⁵	1.545x10 ⁶	2.818x10 ⁵
72	3.048x10 ⁶	6.698x10 ⁵	3.050x10 ⁶	6.675x10 ⁵
54	2.903x10 ⁶	1.123x10 ⁶	2.905x10 ⁶	1.123x10 ⁶
36	3.616x10 ⁶	1.604x10 ⁶	3.616x10 ⁶	1.604x10 ⁶
18	3.607x10 ⁶	2.223x10 ⁶	3.606x10 ⁶	2.226x10 ⁶
0	3.763x10 ⁶	3.558x10 ⁶	3.760x10 ⁶	3.555x10 ⁶



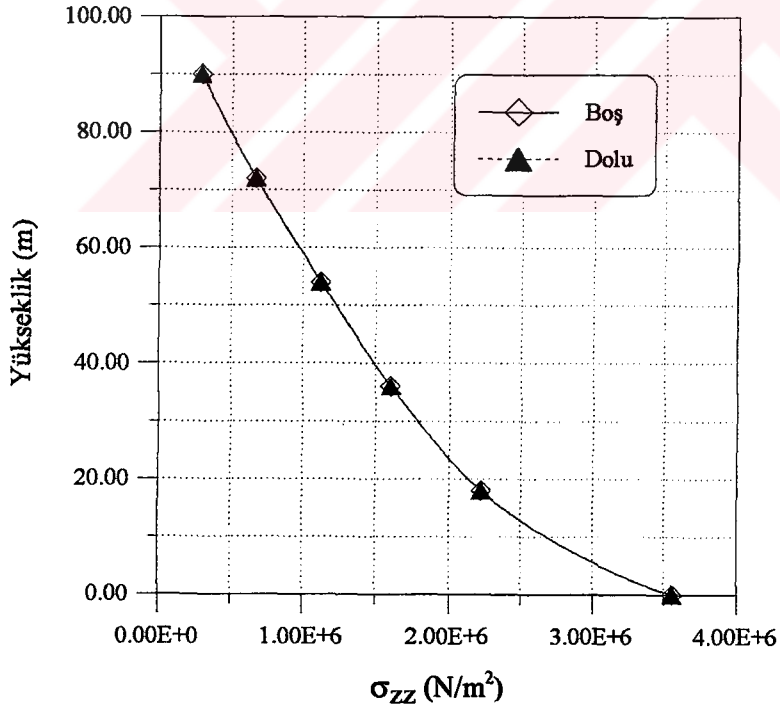
Şekil 25. Lineer dinamik analizde, temelini rijit, barajın boş ve dolu olması durumunda menba yüzeyinde Y-doğrultusundaki, mutlak değerce maksimum, gerilmelerin yükseklik boyunca değişimi



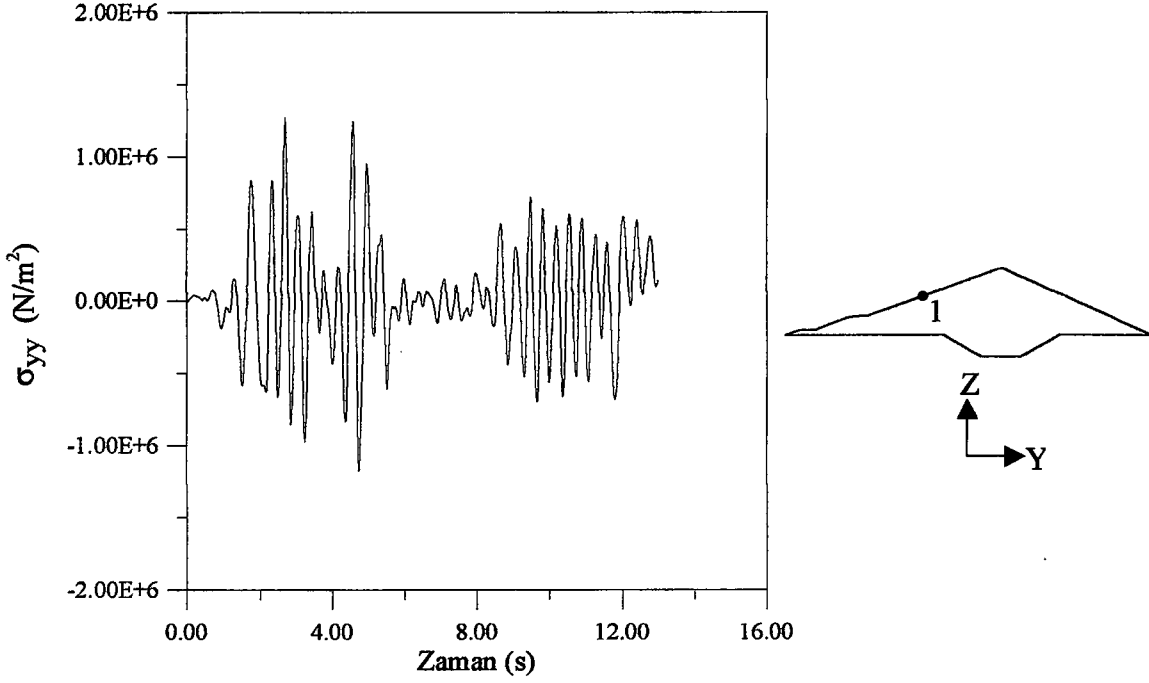
Şekil 26. Lineer dinamik analizde, temelini eğilebilir, barajın boş ve dolu olması durumunda menba yüzeyinde Y-doğrultusundaki, mutlak değerce maksimum, gerilmelerin yükseklik boyunca değişimi



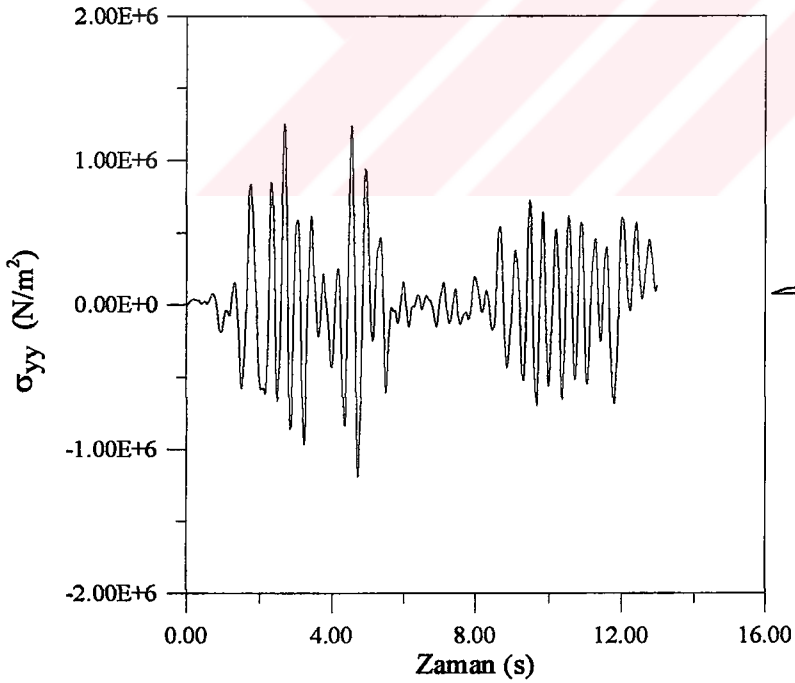
Şekil 27. Lineer dinamik analizde, temelin rijit, barajın boş ve dolu olması durumunda menba yüzeyinde Z-doğrultusundaki, mutlak değerce maksimum, gerilmelerin yükseklik boyunca değişimi



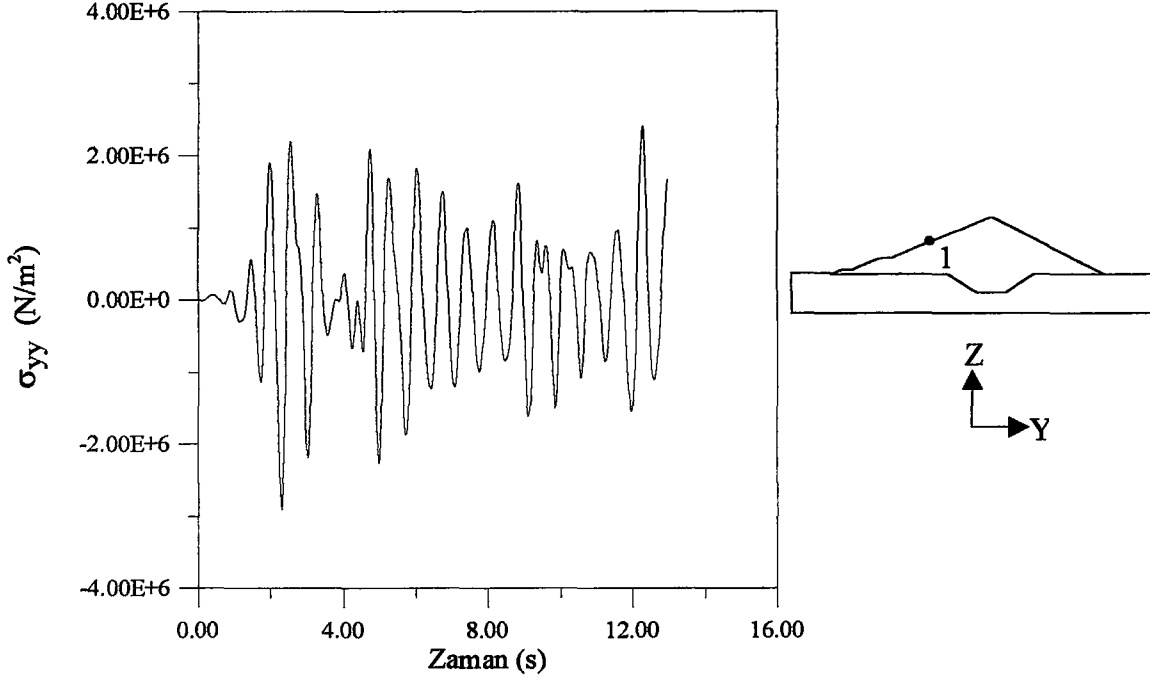
Şekil 28. Lineer dinamik analizde, temelin eğilebilir, barajın boş ve dolu olması durumunda menba yüzeyinde Z-doğrultusundaki, mutlak değerce maksimum, gerilmelerin yükseklik boyunca değişimi



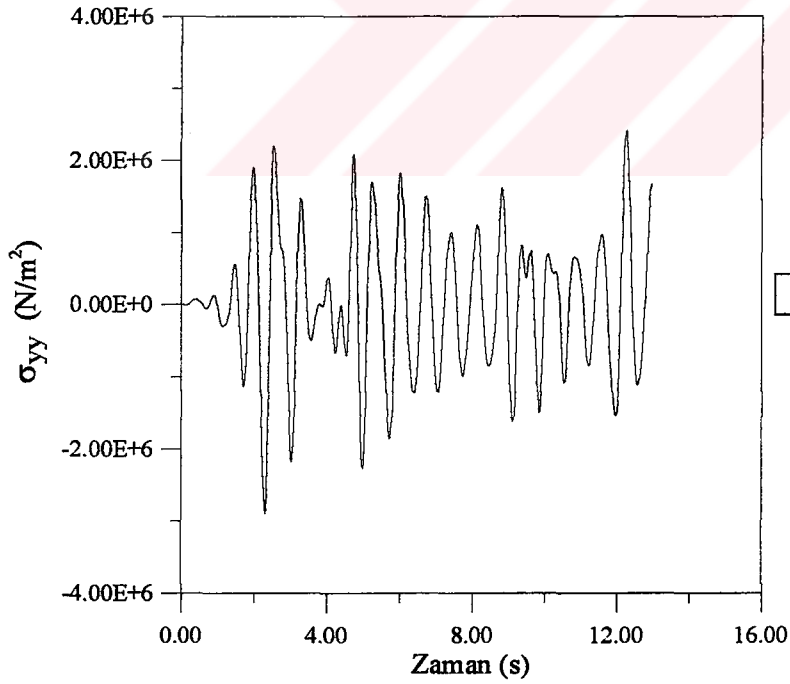
Şekil 29. Lineer dinamik analizde, temel rijit, barajın boş olması durumunda 1 nolu düğüm noktasında Y-doğrultusunda meydana gelen gerilmelerin zamanla değişimi



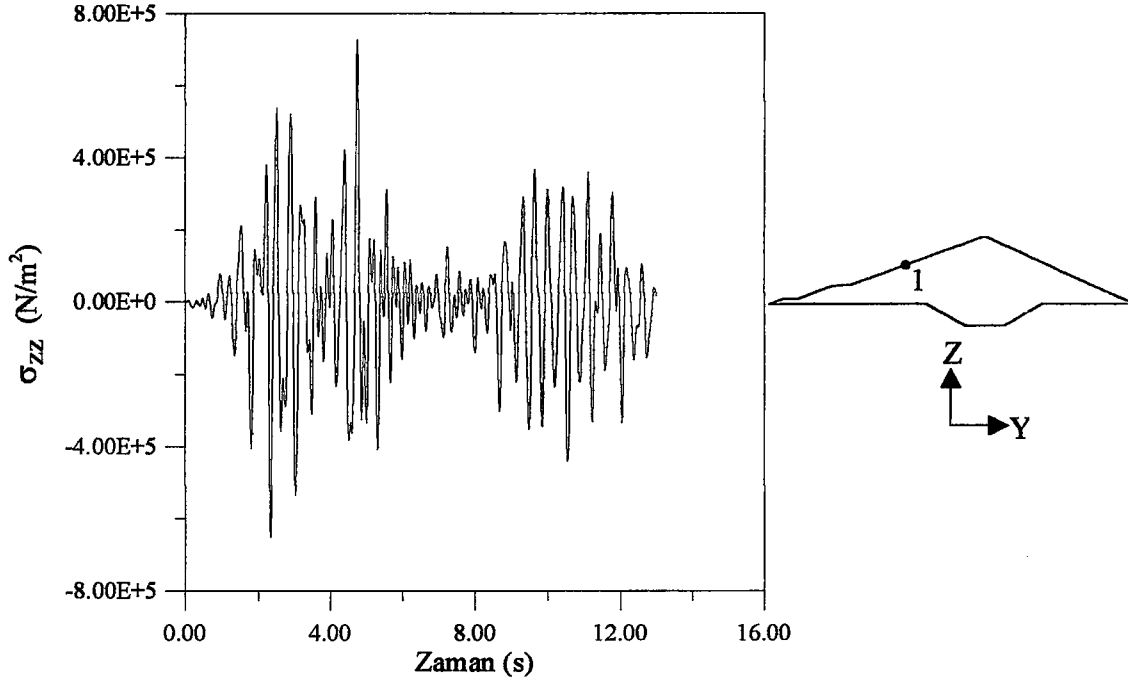
Şekil 30. Lineer dinamik analizde, temel rijit, barajın dolu olması durumunda 1 nolu düğüm noktasında Y-doğrultusunda meydana gelen gerilmelerin zamanla değişimi



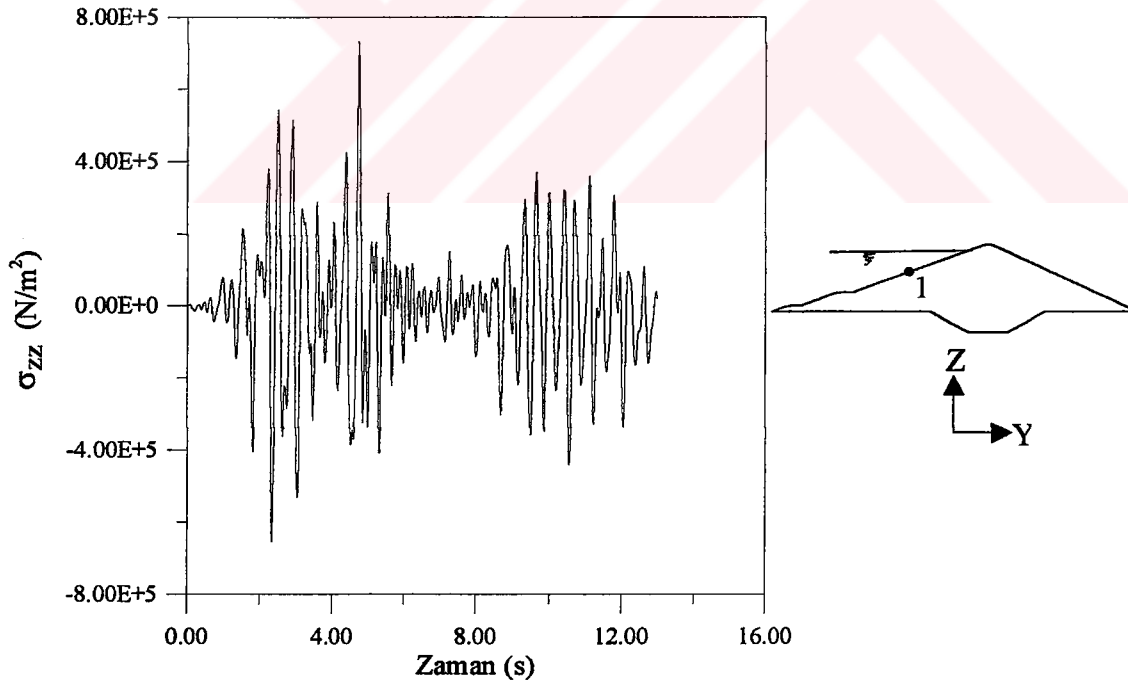
Şekil 31. Lineer dinamik analizde, temelin eğilebilir, barajın boş olması durumunda 1 nolu düğüm noktasında Y-doğrultusunda meydana gelen gerilmelerin zamanla değişimi



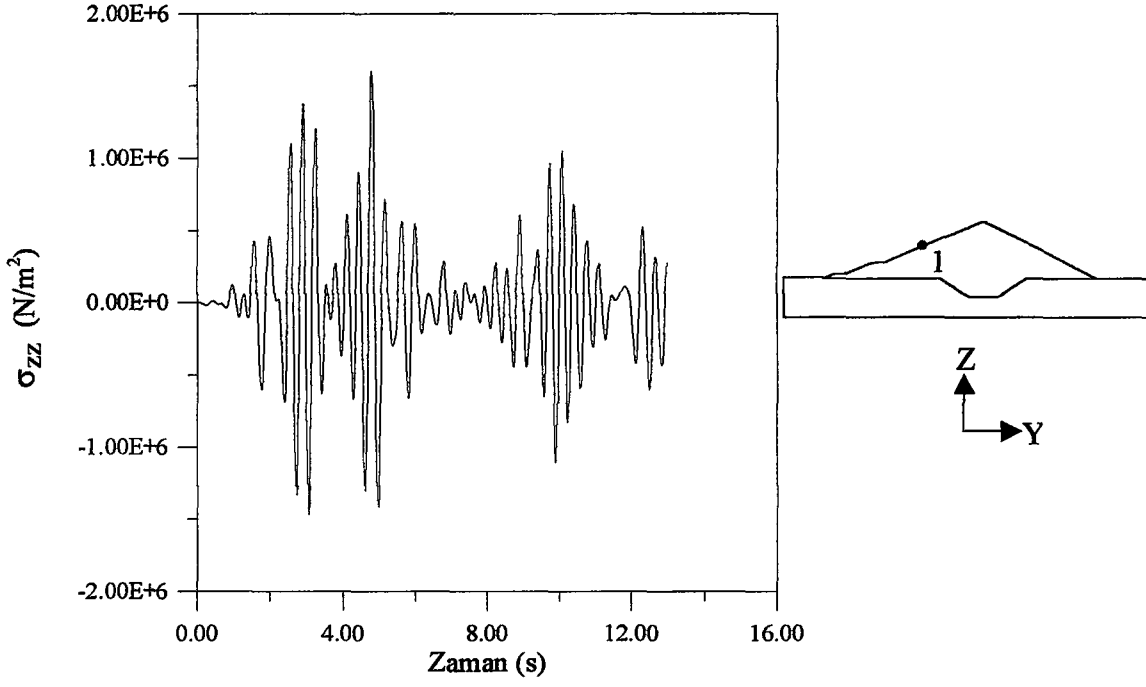
Şekil 32. Lineer dinamik analizde, temelin eğilebilir, barajın dolu olması durumunda 1 nolu düğüm noktasında Y-doğrultusunda meydana gelen gerilmelerin zamanla değişimi



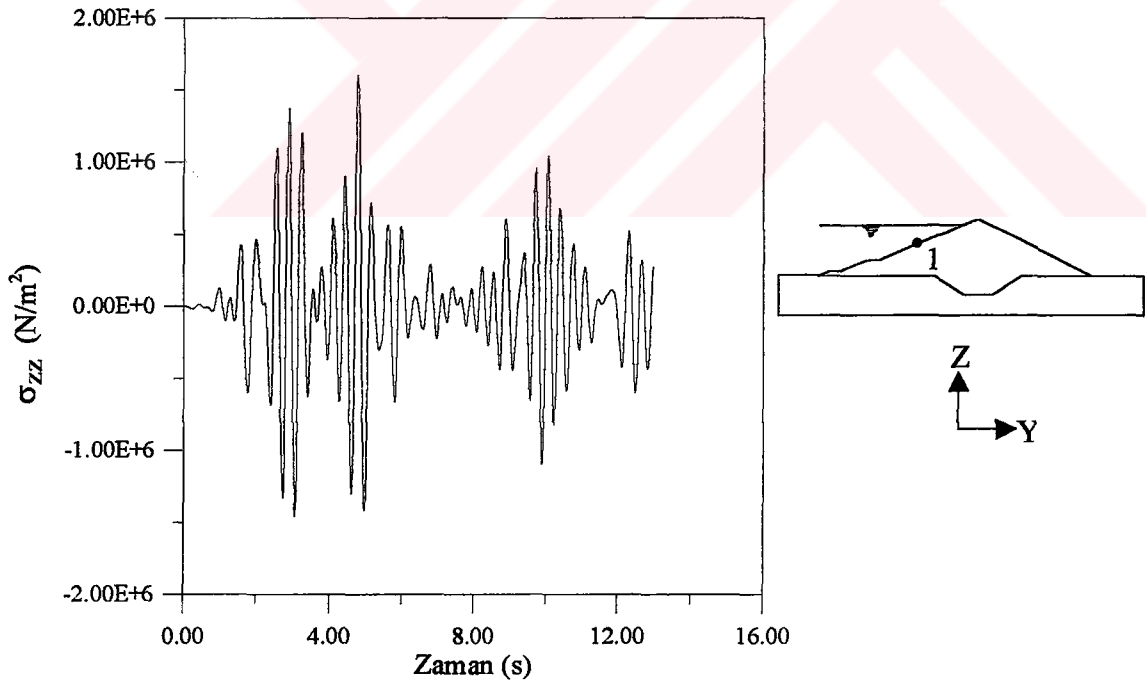
Şekil 33. Lineer dinamik analizde, temelin rijit, barajın boş olması durumunda 1 nolu düğüm noktasında Z-doğrultusunda meydana gelen gerilmelerin zamanla değişimi



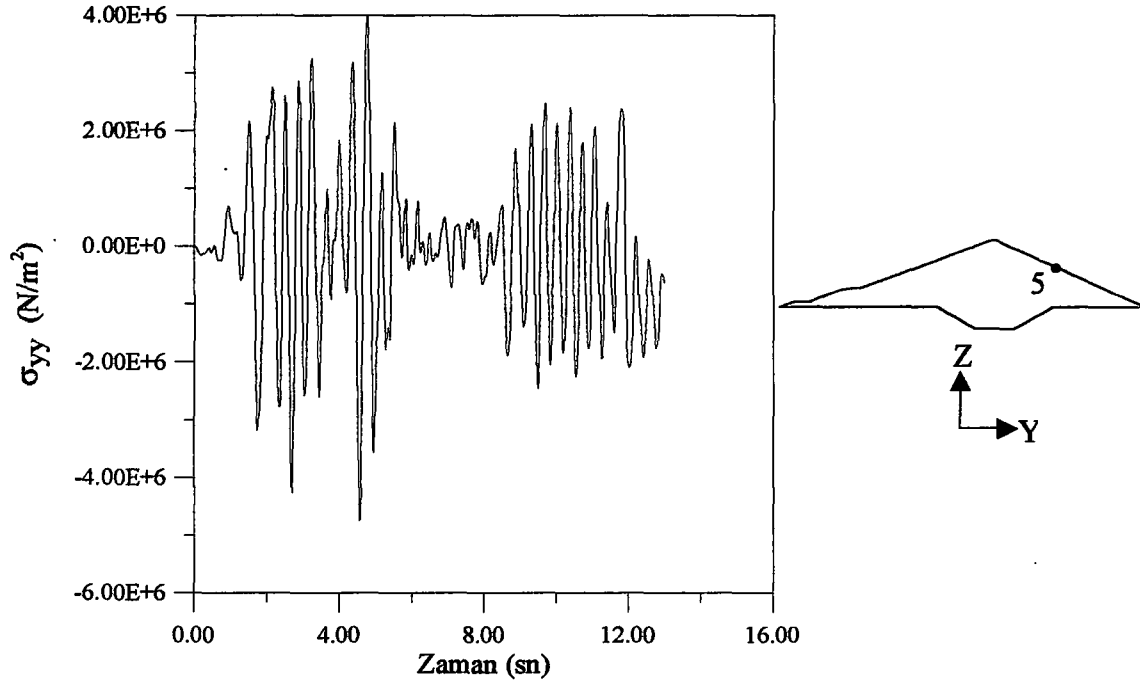
Şekil 34. Lineer dinamik analizde, temelin rijit, barajın dolu olması durumunda 1 nolu düğüm noktasında Z-doğrultusunda meydana gelen gerilmelerin zamanla değişimi



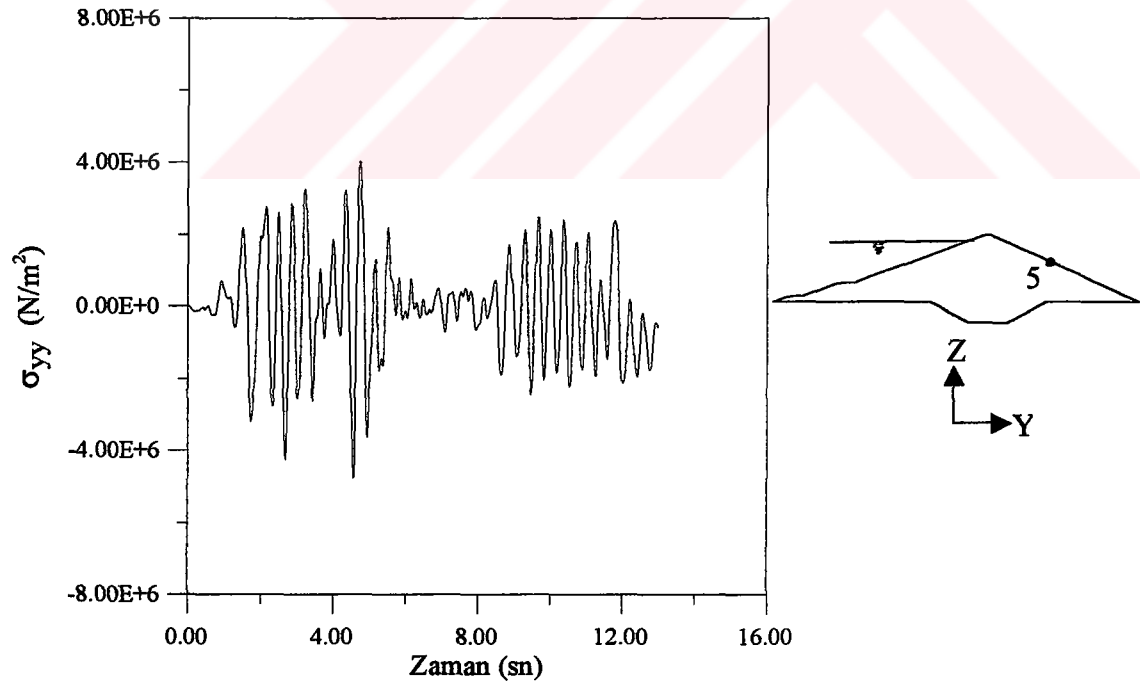
Şekil 35. Lineer dinamik analizde, temelin eğilebilir, barajın boş olması durumunda 1 nolu düğüm noktasında Z-doğrultusunda meydana gelen gerilmelerin zamanla değişimi



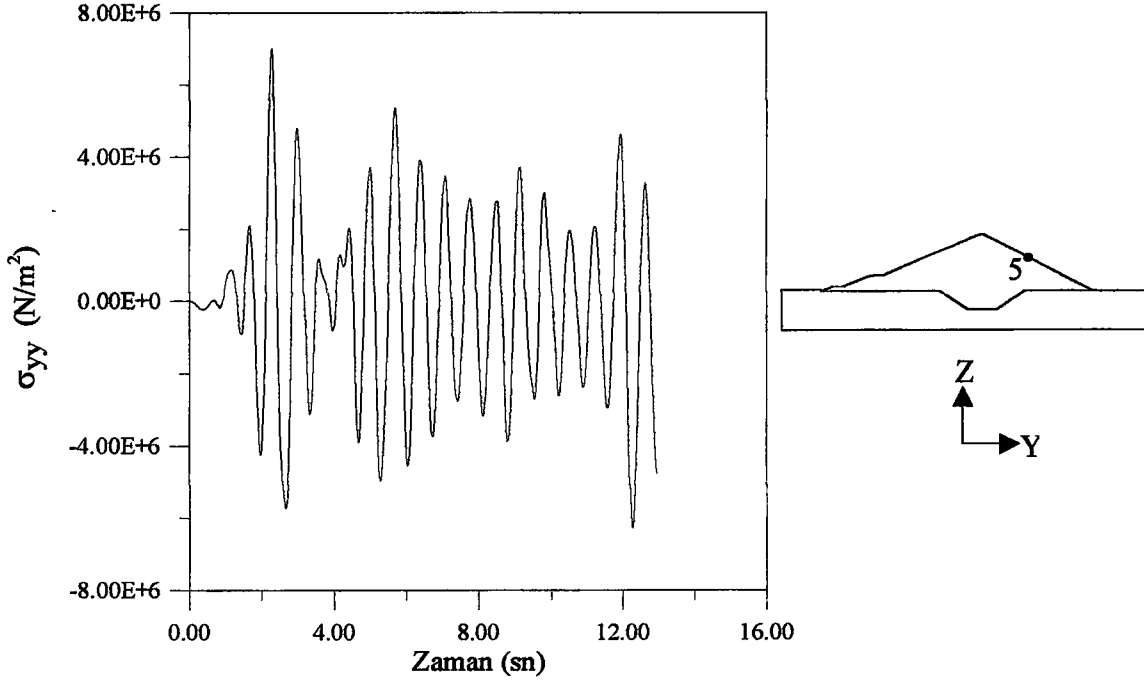
Şekil 36. Lineer dinamik analizde, temelin eğilebilir, barajın dolu olması durumunda 1 nolu düğüm noktasında Z-doğrultusunda meydana gelen gerilmelerin zamanla değişimi



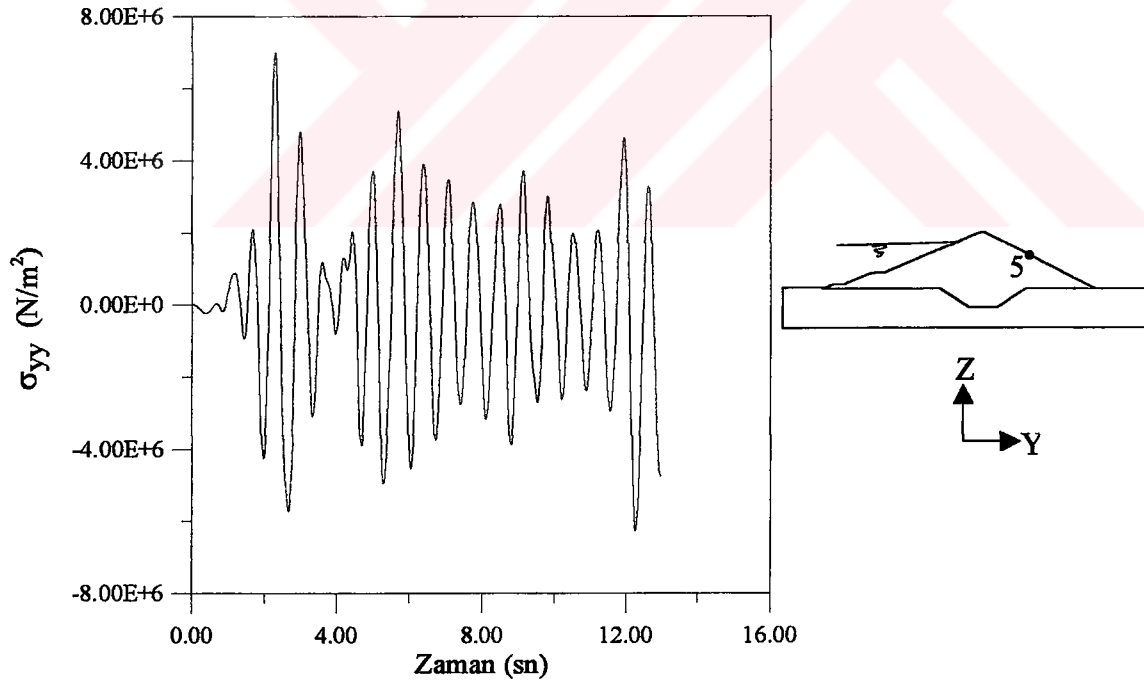
Şekil 37. Lineer dinamik analizde, temelin rijit, barajın boş olması durumunda 5 nolu düğüm noktasında Y-doğrultusunda meydana gelen gerilmelerin zamanla değişimi



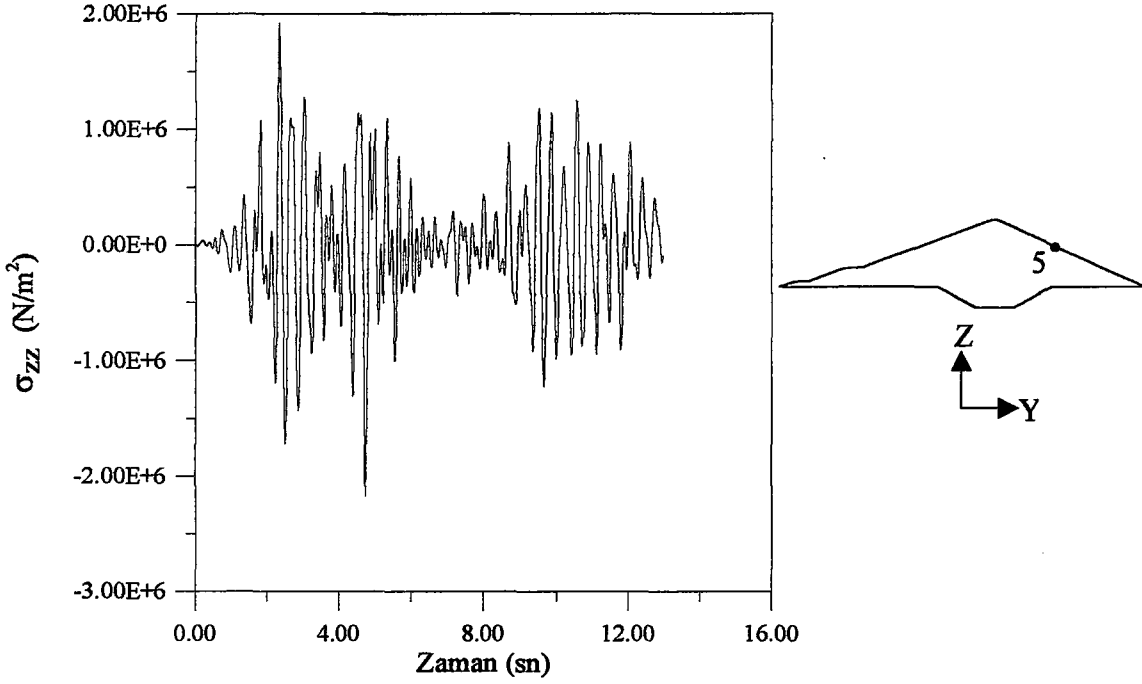
Şekil 38. Lineer dinamik analizde, temelin rijit, barajın dolu olması durumunda 5 nolu düğüm noktasında Y-doğrultusunda meydana gelen gerilmelerin zamanla değişimi



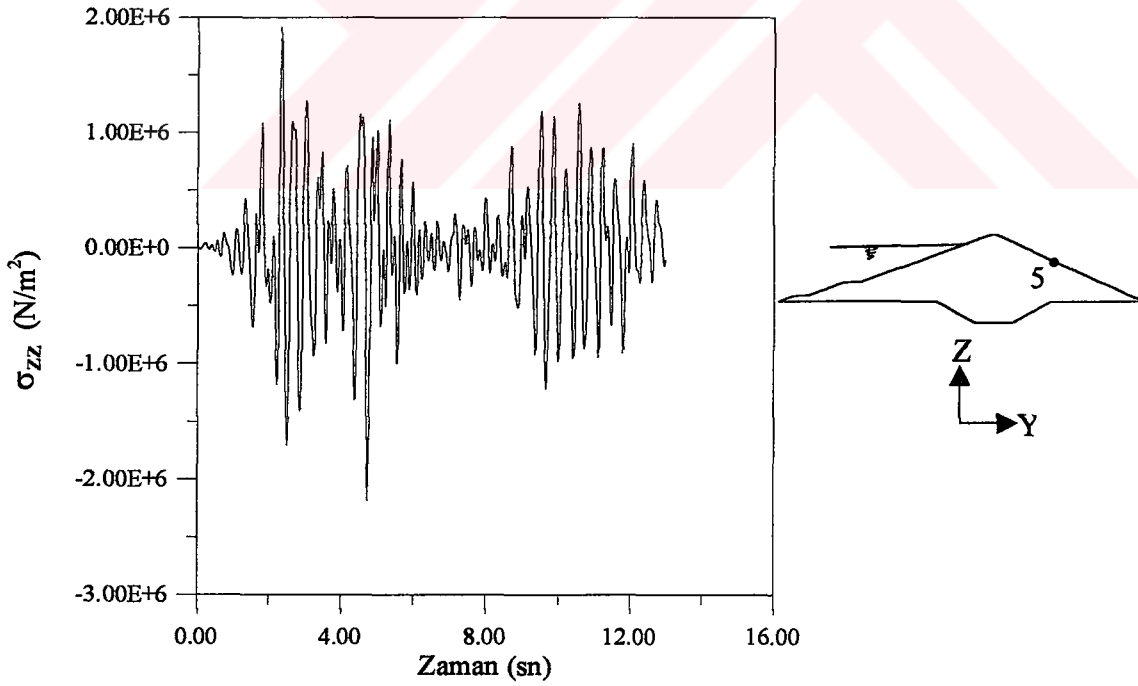
Şekil 39. Lineer dinamik analizde, temelin eğilebilir, barajın boş olması durumunda 5 nolu düğüm noktasında Y-doğrultusunda meydana gelen gerilmelerin zamanla değişimi



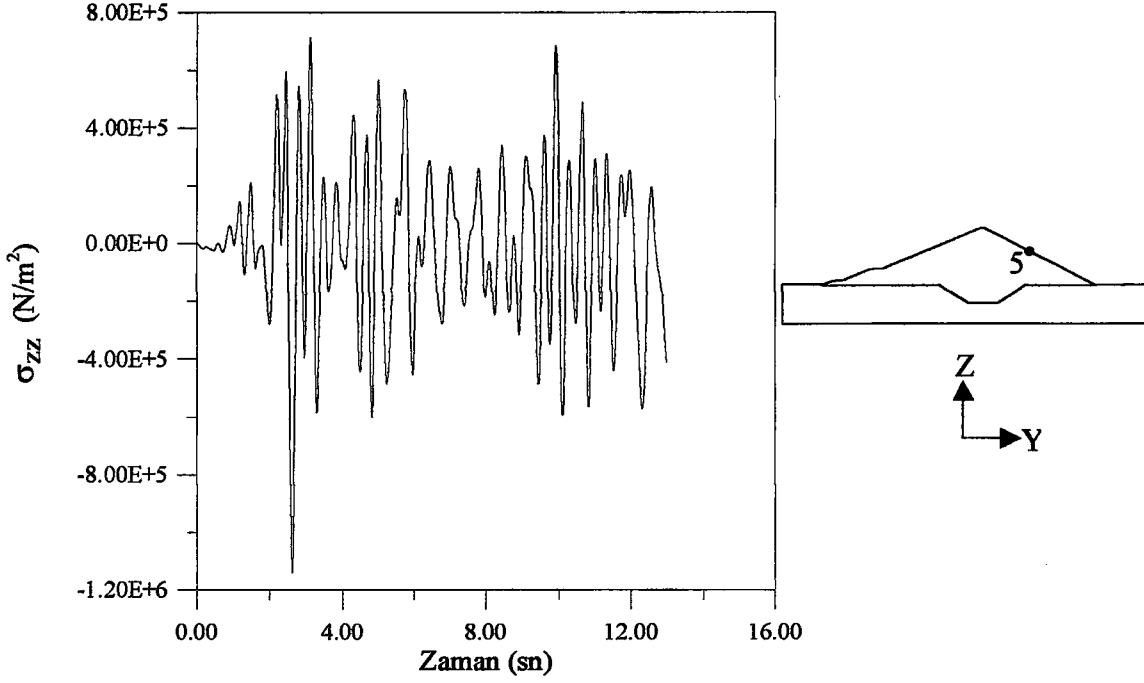
Şekil 40. Lineer dinamik analizde, temelin eğilebilir, barajın dolu olması durumunda 5 nolu düğüm noktasında Y-doğrultusunda meydana gelen gerilmelerin zamanla değişimi



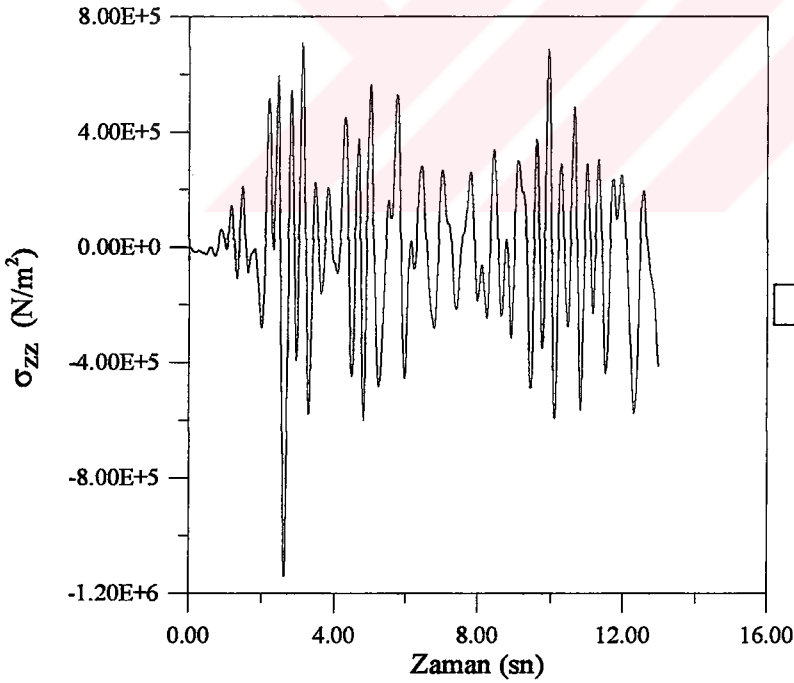
Şekil 41. Lineer dinamik analizde, temelin rijit, barajın boş olması durumunda 5 nolu düğüm noktasında Z-doğrultusunda meydana gelen gerilmelerin zamanla değişimi



Şekil 42. Lineer dinamik analizde, temelin rijit, barajın dolu olması durumunda 5 nolu düğüm noktasında Z-doğrultusunda meydana gelen gerilmelerin zamanla değişimi



Şekil 43. Lineer dinamik analizde, temelin eğilebilir, barajın boş olması durumunda 5 nolu düğüm noktasında Z-doğrultusunda meydana gelen gerilmelerin zamanla değişimi



Şekil 44. Lineer dinamik analizde, temelin eğilebilir, barajın dolu olması durumunda 5 nolu düğüm noktasında Z-doğrultusunda meydana gelen gerilmelerin zamanla değişimi

3.1.2. Yerdeşistirmelerin Karşılaştırılması

Gördes Barajında gerçekleştirilen analizler sonucunda barajın menba, mansap yüzeyindeki ve I-I kesitindeki yerdeşistirmelerin yükseklik boyunca değişimleri Şekil 45-54'de gözlenmektedir. Ayrıca barajın II-II kesitindeki maksimum yatay yerdeşistirmelerin barajın yatay uzaklığı boyunca değişimleri Şekil 55-56'da verilmektedir. El-Centro depremi gözönüne alınarak barajın 2 ve 4 düğüm noktalarındaki yerdeşistirmelerin zamanla değişimleri grafikler halinde Şekil 57-64'de verilmektedir.

İki boyutlu lineer dinamik analizde, temelin rijit, barajın boş olması durumunda, menba, mansap yüzeyi ve I-I kesitindeki mutlak değerce maksimum yatay yerdeşistirmelerin yükseklik boyunca değişimi gözlendiğinde, en fazla yerdeşistirmenin sırasıyla menba yüzeyinde ardından I-I kesiti ve mansap yüzeyinde olduğu gözlenmektedir. Menba yüzeyinde meydana gelen maksimum yerdeşistirme barajın yaklaşık 72'inci metresine dayanmaktadır. Barajın dolu olması durumunda elde edilen sonuçlar barajın boş olması durumundakine çok yakın değerler aldıkları görülmektedir.

Temelin rijit, barajın boş ve dolu olması durumunda menba mansap yüzeyi ve I-I kesitindeki mutlak değerce maksimum düşey yerdeşistirmelerin yükseklikle değişimi incelendiğinde, düşey yerdeşistirmelerin, kret noktasına doğru yaklaştıkça birbirlerinden uzak değerler aldıkları gözlenmektedir.

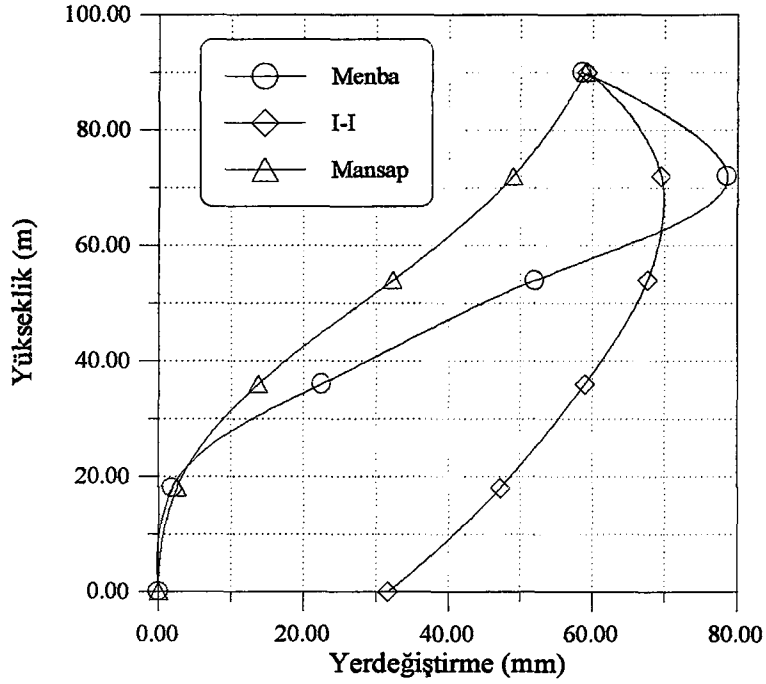
Temelin eğilebilir, barajın boş olması durumunda menba, mansap yüzeyi ve I-I kesitindeki mutlak değerce maksimum yatay yerdeşistirmelerin en büyük değerinin temelin rijit olduğu durumdakine benzer olarak menba yüzeyinde meydana geldiği gözlenmektedir. Ancak temelin eğilebilir olması durumunda yerdeşistirmeler temelin rijit olduğu durumdakine oranla çok fazla artmaktadır. Ayrıca düşey yerdeşistirmeler de kret noktasına yaklaştıkça birbirlerinden çok farklı değerler aldıkları görülmektedir.

İki boyutlu lineer dinamik analizde, temelin rijit, barajın boş ve dolu olması durumunda menba yüzeyindeki mutlak değerce maksimum yatay yerdeşistirmeler karşılaştırıldığında birbirlerine çok yakın değerler aldıkları gözlenmektedir. Bütün bunlara ilaveten barajın seçilen düğüm noktalarındaki yerdeşistirmelerin zamanla değişimlerinin

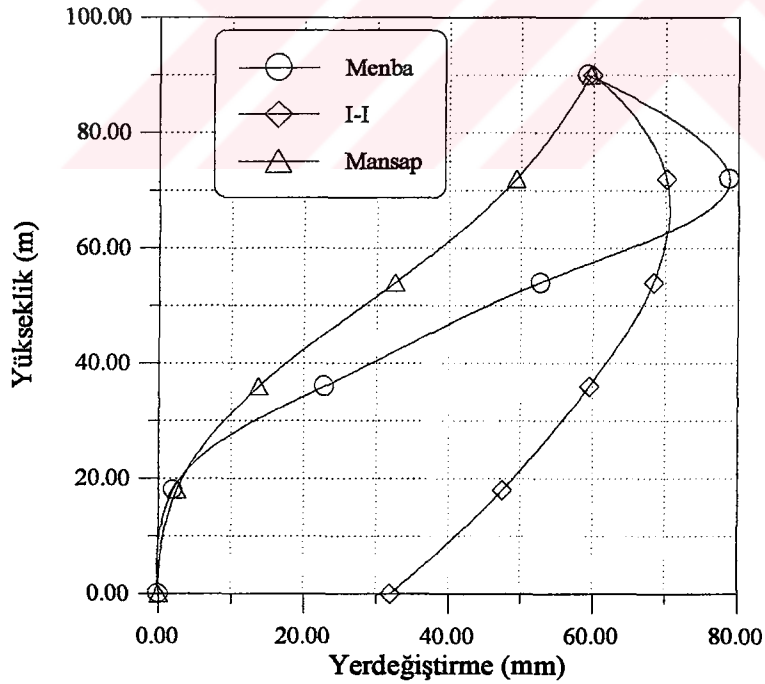
barajın boş ve dolu olması durumlarında birbirlerine çok yakın değerler aldıkları gözlenmektedir.

II-II kesitinde barajın boş ve dolu, temel in rijit ve eğilebilir olduğu durumlarda elde edilen maksimum yatay yerdeğiştirmelerin barajın yaklaşık 300'üncü metresine yakın bölgesinde maksimum değere ulaştığı gözlenmektedir.

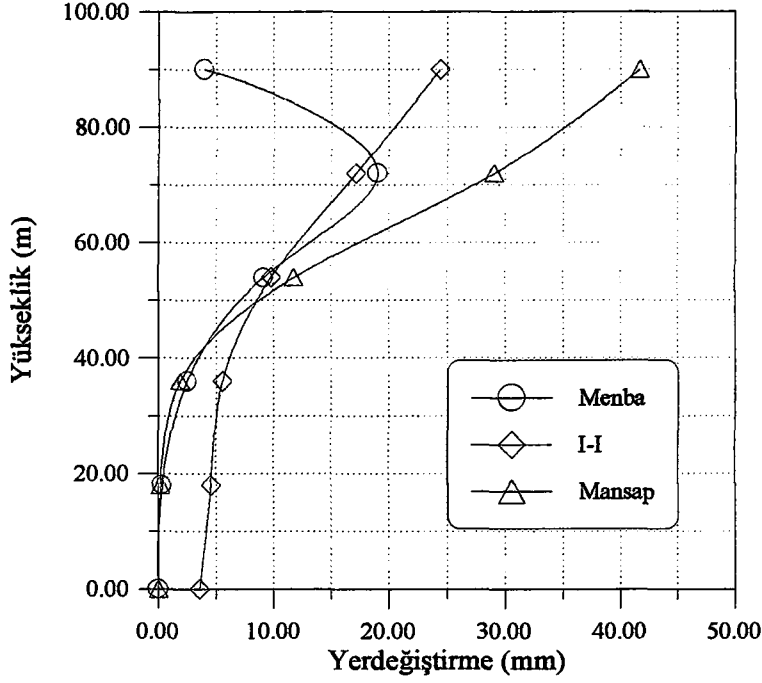




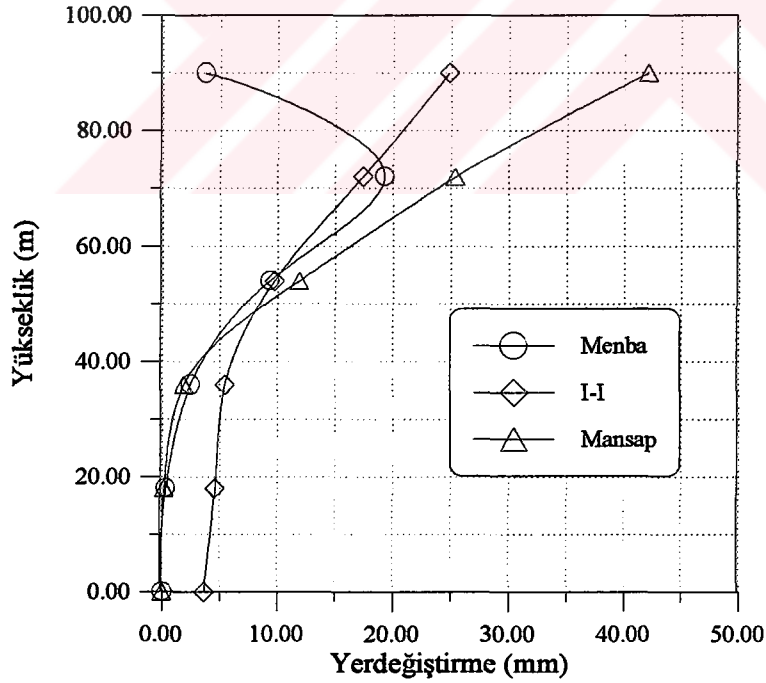
Şekil 45. Lineer dinamik analizde, temelin rijit, barajın boş olması durumunda menba, mansap yüzeyi ve I-I kesitindeki mutlak değerce maksimum yatay yerdeğiştirmelerin yükseklik boyunca değişimi



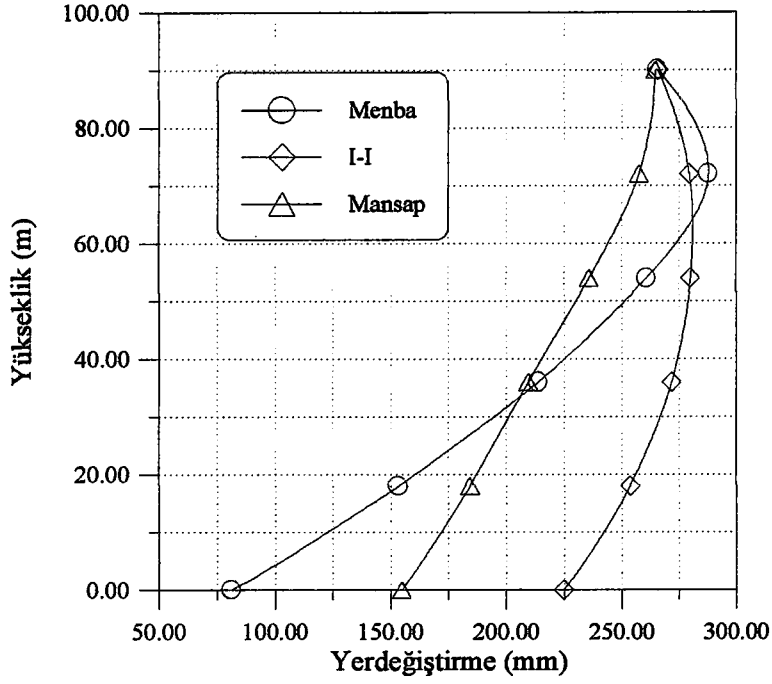
Şekil 46. Lineer dinamik analizde, temelin rijit, barajın dolu olması durumunda menba, mansap yüzeyi ve I-I kesitindeki mutlak değerce maksimum yatay yerdeğiştirmelerin yükseklik boyunca değişimi



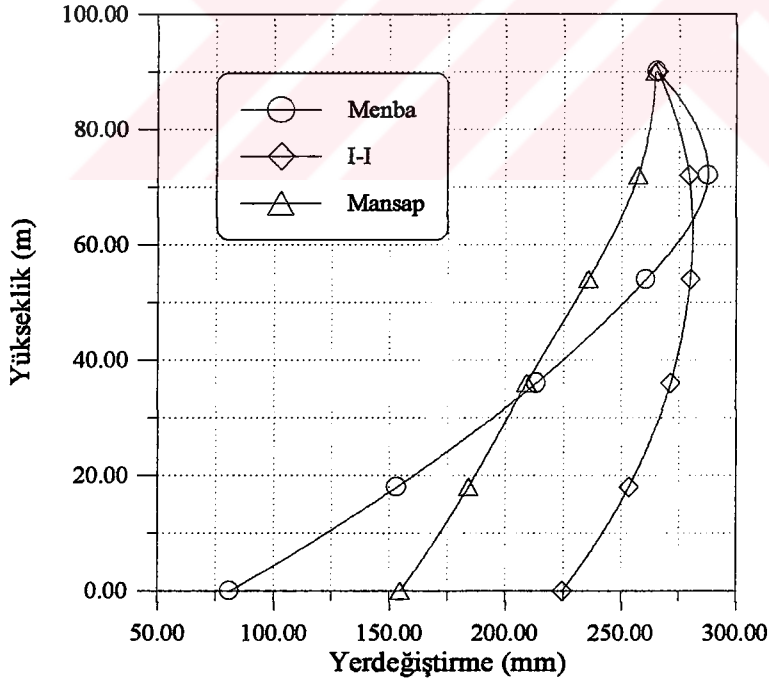
Şekil 47. Linear dinamik analizde, temelin rijit, barajın boş olması durumunda menba, mansap yüzeyi ve I-I kesitindeki mutlak değerce maksimum düşey yerdeğiştirmelerin yükseklik boyunca değişimi



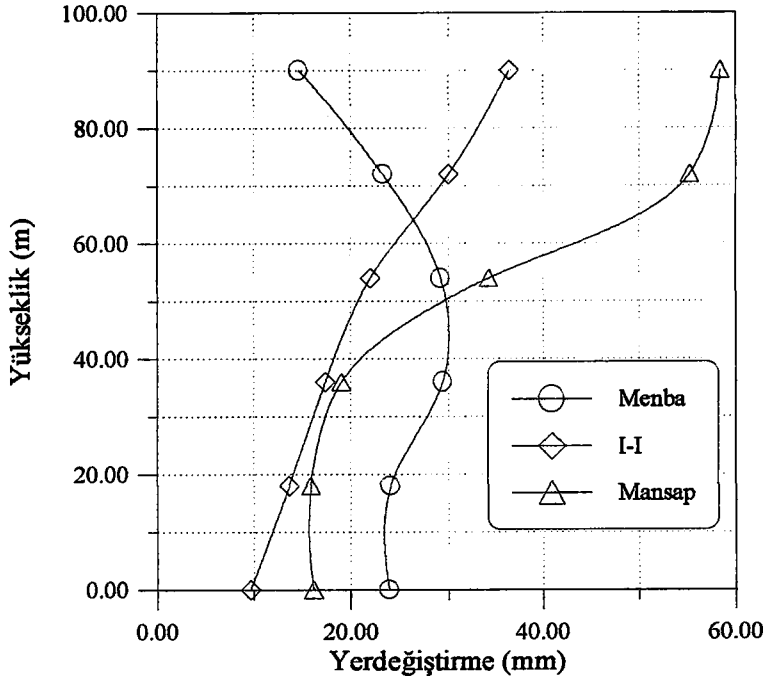
Şekil 48. Linear dinamik analizde, temelin rijit, barajın dolu olması durumunda menba, mansap yüzeyi ve I-I kesitindeki mutlak değerce maksimum düşey yerdeğiştirmelerin yükseklik boyunca değişimi



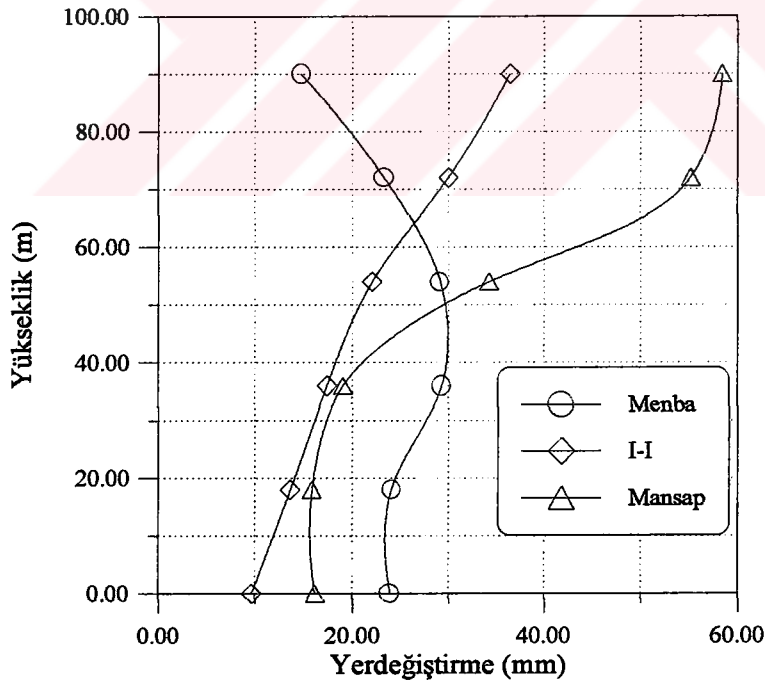
Şekil 49. Lineer dinamik analizde, temelin eğilebilir, barajın boş olması durumunda menba, mansap yüzeyi ve I-I kesitindeki mutlak değerce maksimum yatay yerdeğiştirmelerin yükseklik boyunca değişimi



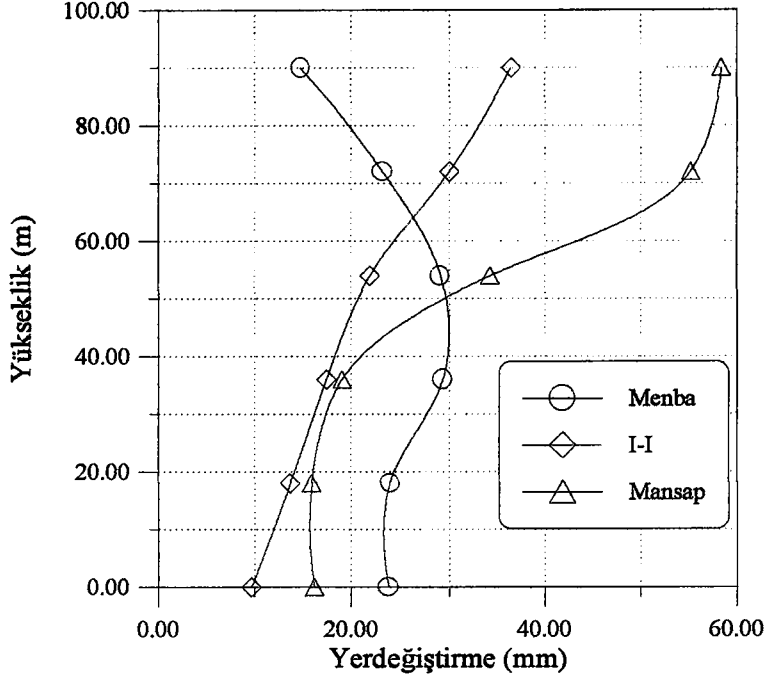
Şekil 50. Lineer dinamik analizde, temelin eğilebilir, barajın dolu olması durumunda menba, mansap yüzeyi ve I-I kesitindeki mutlak değerce maksimum yatay yerdeğiştirmelerin yükseklik boyunca değişimi



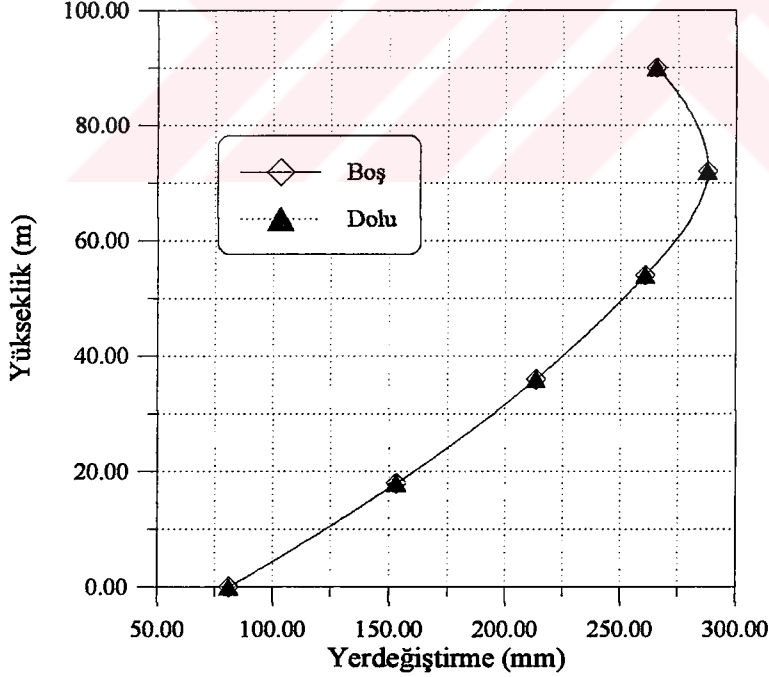
Şekil 51. Lineer dinamik analizde, temelin eğilebilir, barajın boş olması durumunda menba, mansap yüzeyi ve I-I kesitindeki mutlak değerce maksimum düşey yerdeğştirmelerin yükseklik boyunca değişimi



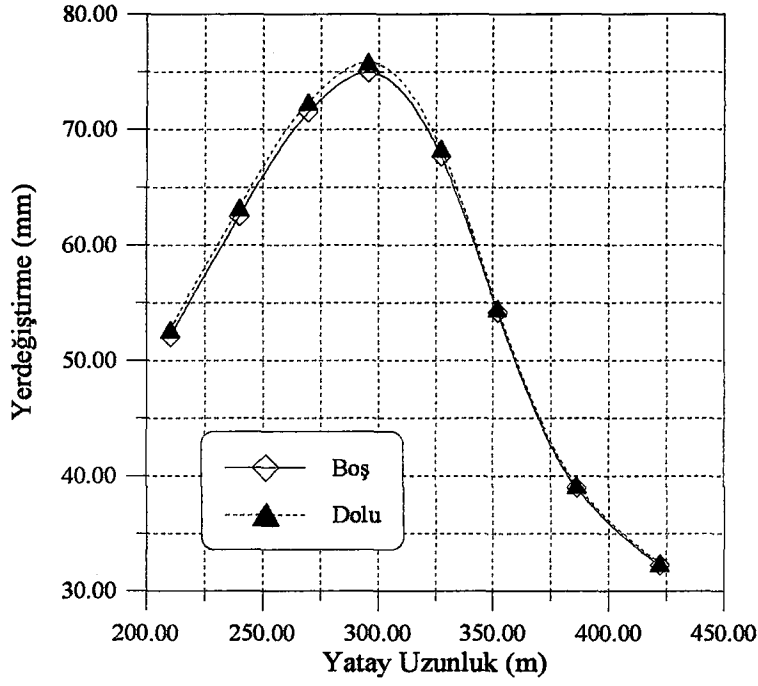
Şekil 52. Lineer dinamik analizde, temelin eğilebilir, barajın dolu olması durumunda menba, mansap yüzeyi ve I-I kesitindeki mutlak değerce maksimum düşey yerdeğştirmelerin yükseklik boyunca değişimi



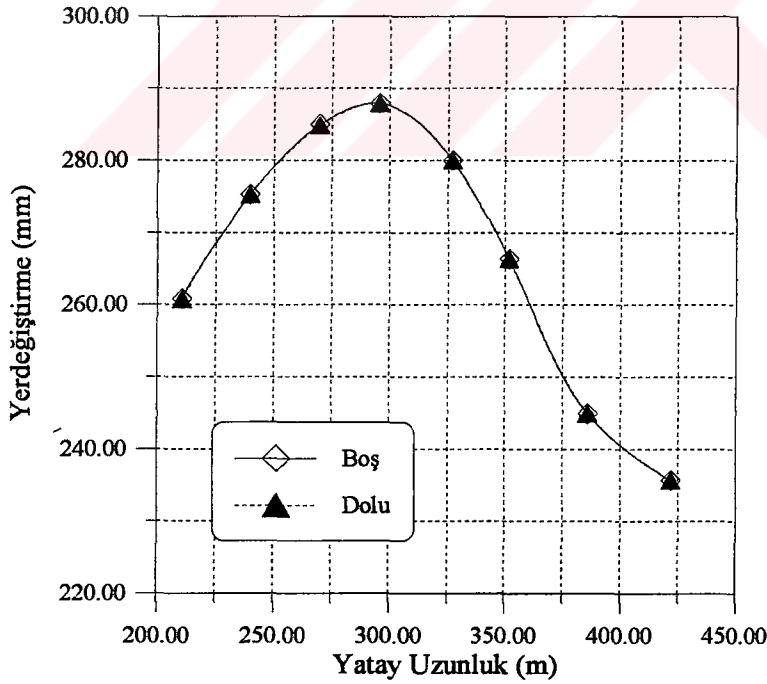
Şekil 53. Lineer dinamik analizde, temelin rijit, barajın boş ve dolu olması durumunda menba yüzeyindeki mutlak değerce maksimum yatay yerdeğiştirmelerin yükseklik boyunca değişimi



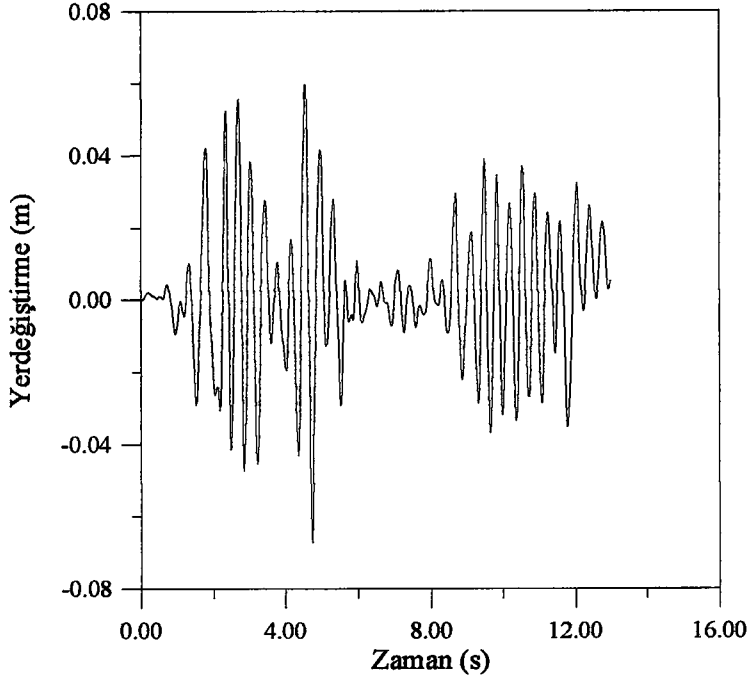
Şekil 54. Lineer dinamik analizde, temelin eğilebilir, barajın boş ve dolu olması durumunda menba yüzeyindeki mutlak değerce maksimum yatay yerdeğiştirmelerin yükseklik boyunca değişimi



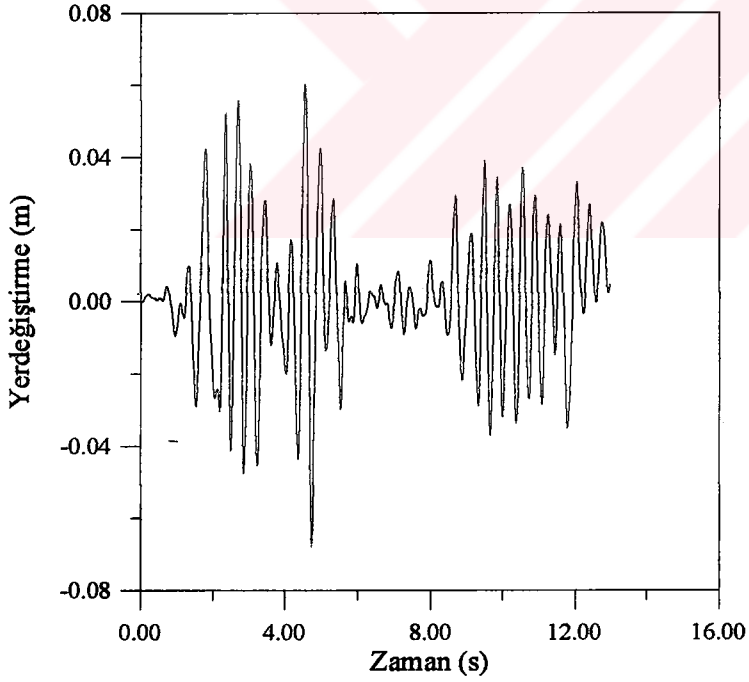
Şekil 55. Lineer dinamik analizde, temelin rijit, barajın boş ve dolu olması durumunda II-II kesitindeki mutlak değerce maksimum yatay yerdeğiştirmelerin yatay uzaklık boyunca değişimi



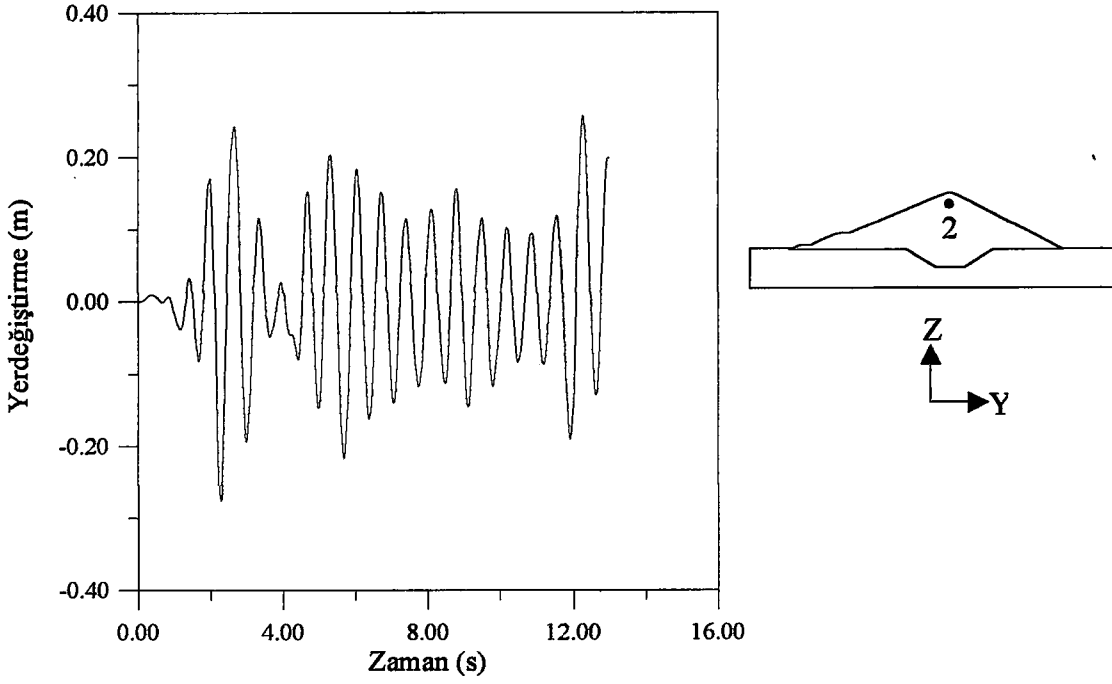
Şekil 56. Lineer dinamik analizde, temelin eğilebilir, barajın boş ve dolu olması durumunda II-II kesitindeki mutlak değerce maksimum yatay yerdeğiştirmelerin yatay uzaklık boyunca değişimi



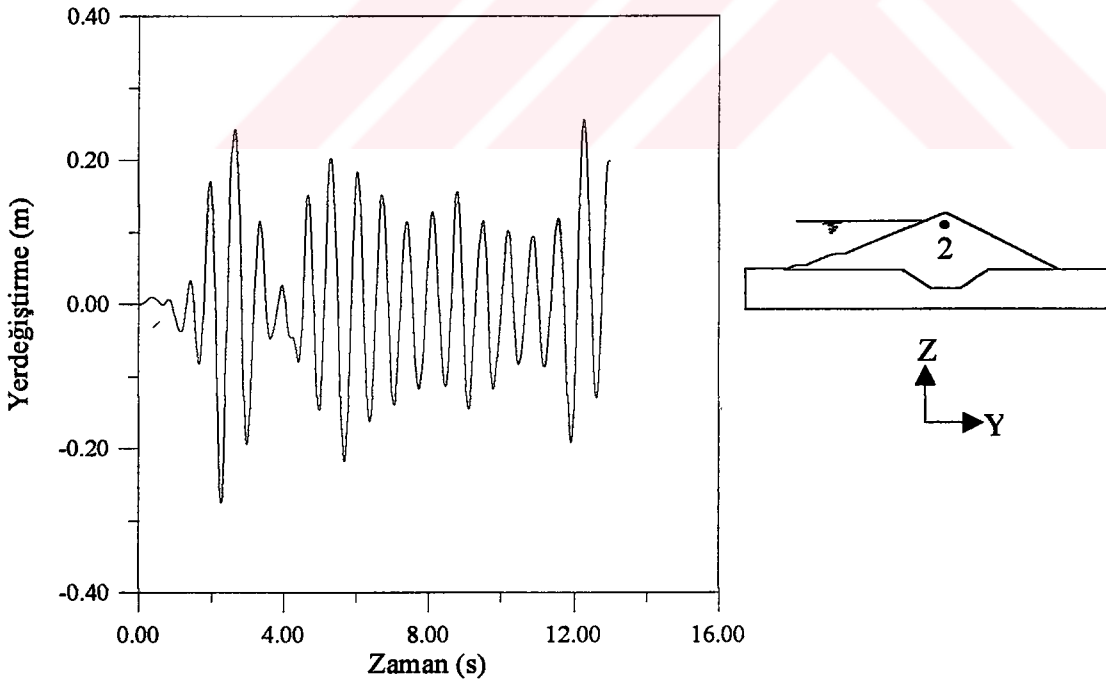
Şekil 57. Lineer dinamik analizde, temelin rijit, barajın boş olması durumunda 2 nolu düğüm noktasında meydana gelen yatay yerdeğiştirmelerin zamanla değişimi



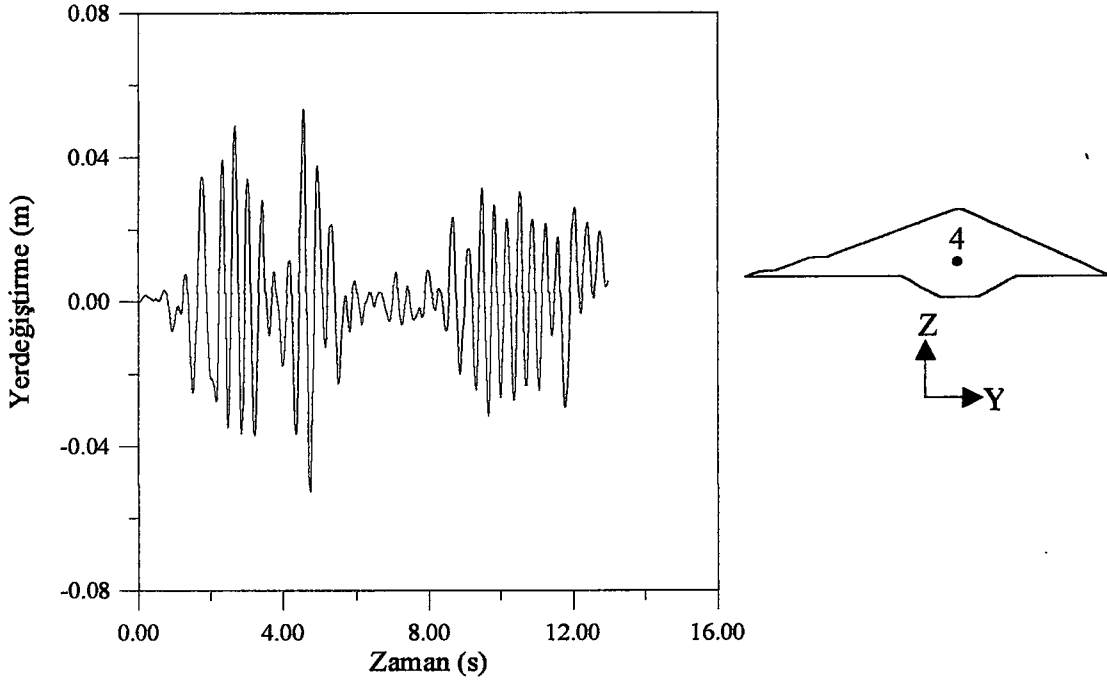
Şekil 58. Lineer dinamik analizde, temelin rijit, barajın dolu olması durumunda 2 nolu düğüm noktasında meydana gelen yatay yerdeğiştirmelerin zamanla değişimi



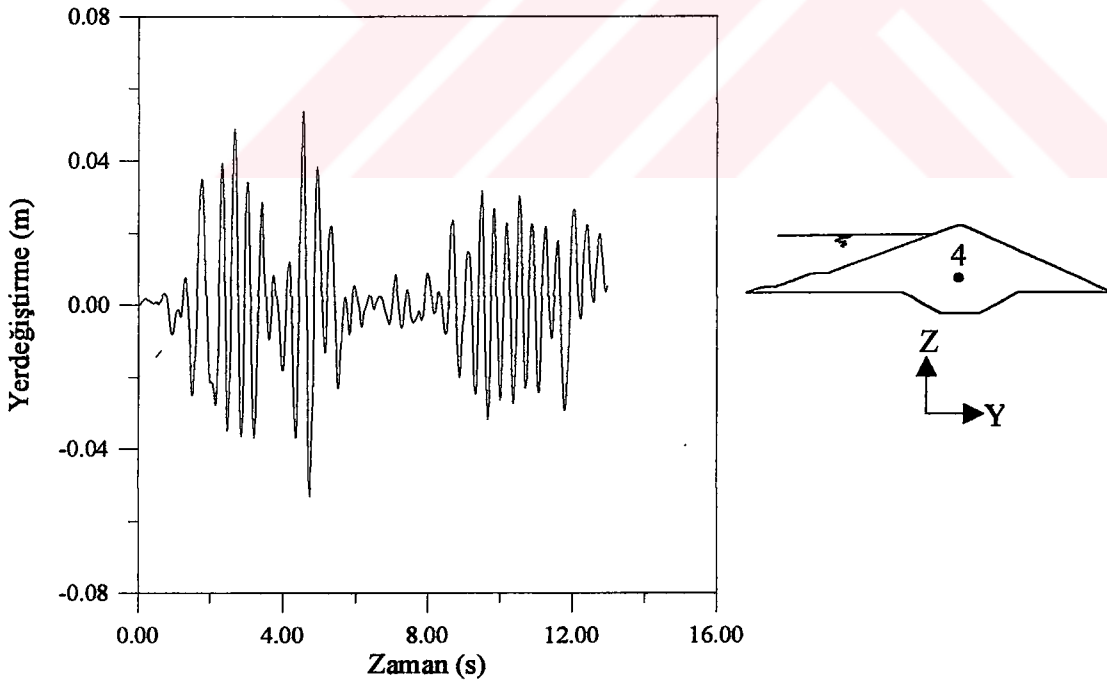
Şekil 59. Lineer dinamik analizde, temelin eğilebilir, barajın boş olması durumunda 2 nolu düğüm noktasında meydana gelen yatay yerdeğiştirmelerin zamanla değişimi



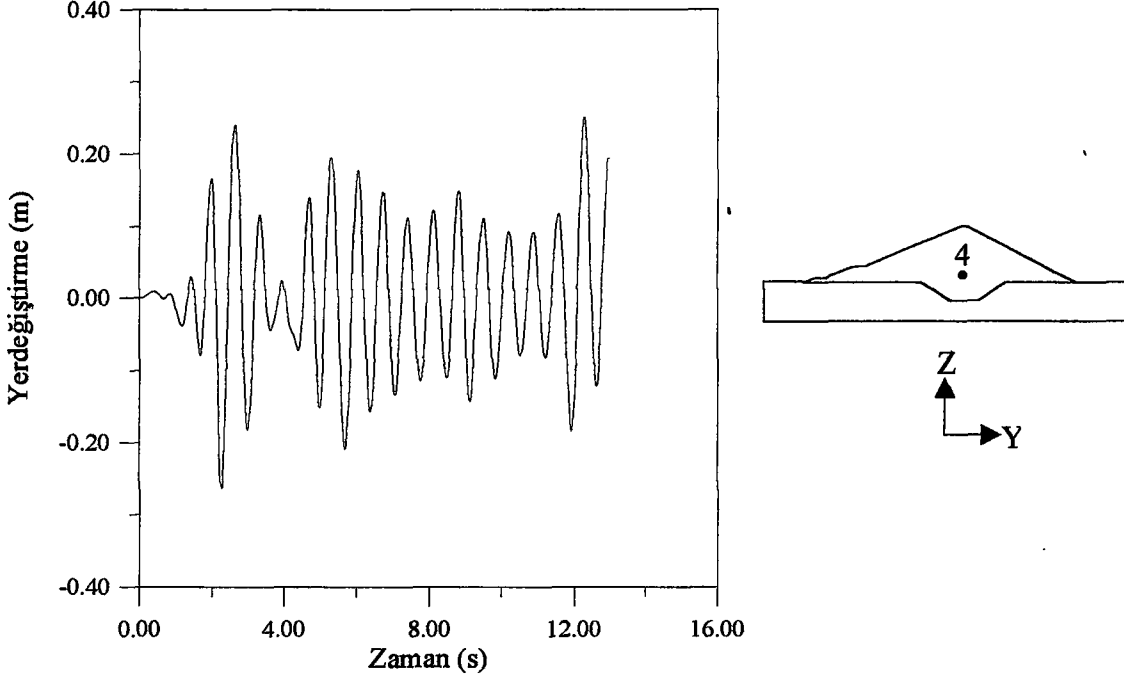
Şekil 60. Lineer dinamik analizde, temelin eğilebilir, barajın dolu olması durumunda 2 nolu düğüm noktasında meydana gelen yatay yerdeğiştirmelerin zamanla değişimi



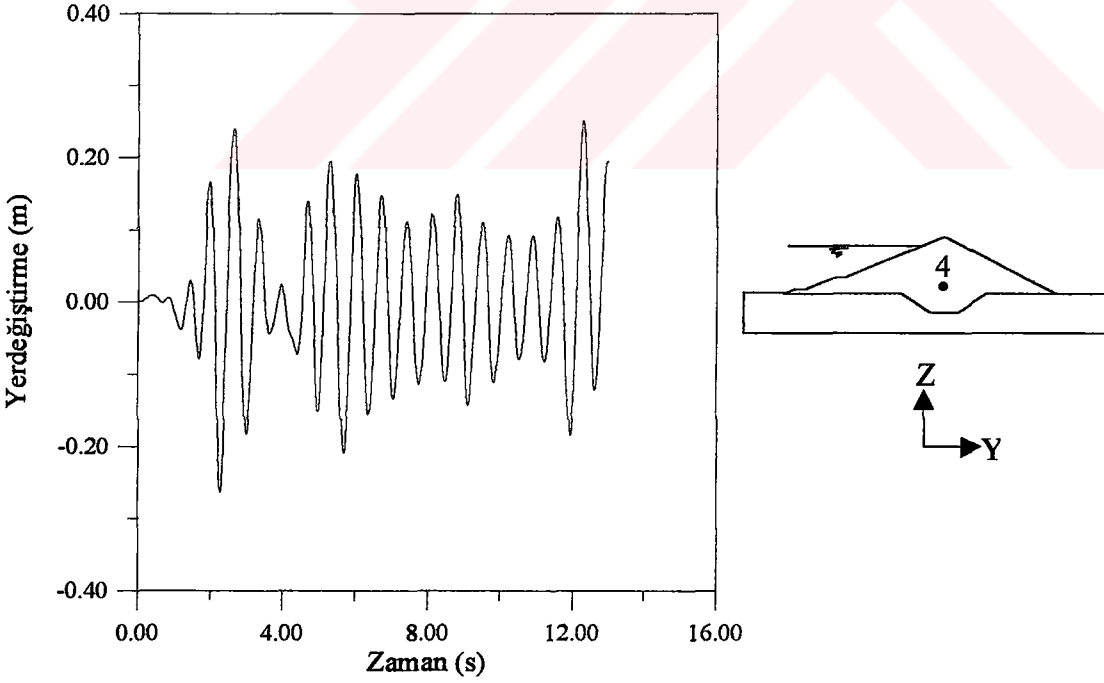
Şekil 61. Lineer dinamik analizde, temelin rijit, barajın boş olması durumunda 4 nolu düğüm noktasında meydana gelen yatay yerdeğiştirmelerin zamanla değişimi



Şekil 62. Lineer dinamik analizde, temelin rijit, barajın dolu olması durumunda 4 nolu düğüm noktasında meydana gelen yatay yerdeğiştirmelerin zamanla değişimi



Şekil 63. Lineer dinamik analizde, temelin eğilebilir, barajın boş olması durumunda 4 nolu düğüm noktasında meydana gelen yatay yerdeğiştirmelerin zamanla değişimi



Şekil 64. Lineer dinamik analizde, temelin eğilebilir, barajın dolu olması durumunda 4 nolu düğüm noktasında meydana gelen yatay yerdeğiştirmelerin zamanla değişimi

3.2. Lineer Olmayan Dinamik Analiz Sonuçlarının Karşılaştırılması

İki boyutlu lineer olmayan dinamik analizler için 1940 yılında meydana gelen El-Centro depremi yer hareketi olarak kullanılmıştır. Deprem hareketi baraja menba-mansap doğrultusunda etkittirilmektedir. Lineer olmayan dinamik analizlerde baraj malzeme davranışı, Drucker-Prager ve Eğri Tanımlama Yöntemleri kullanılarak modellendirilmektedir. Yerdeğiştirmeler baraj gövdesinde alınan düğüm noktalarında, gerilmeler ise seçilen gauss noktalarında elde edilmektedir.

3.2.1. Gerilmelerin Karşılaştırılması

Barajın lineer olmayan dinamik analizinde barajın belirlenen gauss noktalarındaki yatay ve düşey gerilmelerin maksimum değerleri Tablo 7-10'da verilmektedir. Bu gerilmeler malzemenin Drucker-Prager ve Eğri Tanımlama Yöntemleri için elde edilmiştir. Gerilmelerin zamanla değişimleri Şekil 65-97 'da verilmektedir.

Yapılan analizler sonucunda, barajın dolu olması durumunda boş olması durumuna göre, temelin eğilebilir olması rijit olması durumuna göre daha büyük gerilme değerleri elde edilmektedir.

Tablo 7. Lineer olmayan dinamik analizde, temelin rijit, barajın boş olması durumunda belirlenen gauss noktalarındaki yatay ve düşey gerilmelerin maksimum değerlerinin sayısal değerleri

Lineer Olmayan Dinamik Analiz				
Gauss Noktaları	Drucker-Prager Yöntemi		Eğri Tanımlama Yöntemi	
	Yatay Gerilme σ_{yy} (N/m ²)	Düşey Gerilme σ_{zz} (N/m ²)	Yatay Gerilme σ_{yy} (N/m ²)	Düşey Gerilme σ_{zz} (N/m ²)
A	3.061x10 ⁶	9.127 x10 ⁵	3.110 x10 ⁶	8.850 x10 ⁵
B	1.732x10 ⁶	2.871 x10 ⁵	1.780 x10 ⁶	2.830 x10 ⁵
C	1.831x10 ⁶	5.555 x10 ⁵	1.890 x10 ⁶	5.780 x10 ⁵
D	1.310 x10 ⁶	7.874 x10 ⁵	1.350 x10 ⁶	8.200 x10 ⁵
E	1.042 x10 ⁷	7.056 x10 ⁶	1.060 x10 ⁷	7.220 x10 ⁶
F	1.092 x10 ⁶	3.062 x10 ⁵	1.110 x10 ⁶	3.260 x10 ⁵
G	4.239 x10 ⁶	5.073 x10 ⁶	4.310 x10 ⁶	5.130 x10 ⁶
H	3.210 x10 ⁶	7.549 x10 ⁶	3.150 x10 ⁶	7.860 x10 ⁶
I	6.943 x10 ⁶	4.245 x10 ⁶	7.080 x10 ⁶	4.360 x10 ⁶

Tablo 8. Lineer olmayan dinamik analizde, temelin rijit, barajın dolu olması durumunda belirlenen gauss noktalarındaki yatay ve düşey gerilmelerin maksimum değerlerinin sayısal değerleri

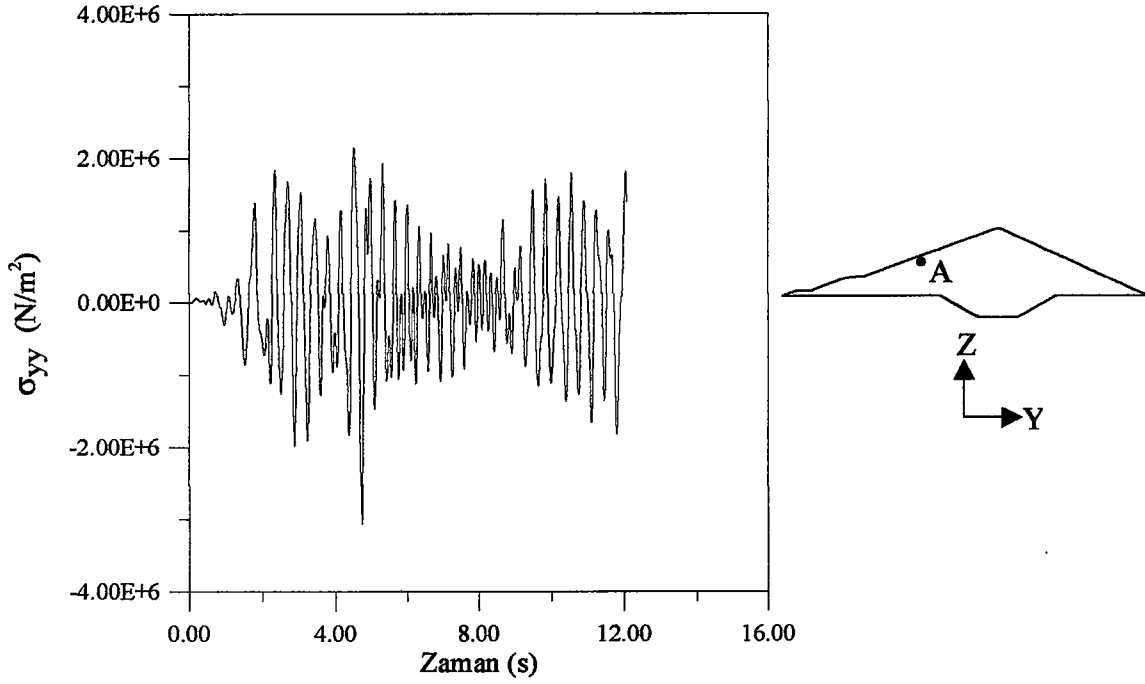
Lineer Olmayan Dinamik Analiz				
Gauss Noktaları	Drucker-Prager Yöntemi		Eğri Tanımlama Yöntemi	
	Yatay Gerilme σ_{yy} (N/m ²)	Düşey Gerilme σ_{zz} (N/m ²)	Yatay Gerilme σ_{yy} (N/m ²)	Düşey Gerilme σ_{zz} (N/m ²)
A	3.074 x10 ⁶	8.547 x10 ⁵	3.120 x10 ⁶	8.410 x10 ⁵
B	1.769 x10 ⁶	3.020 x10 ⁵	1.820 x10 ⁶	2.970 x10 ⁵
C	1.875 x10 ⁶	5.886 x10 ⁵	1.920 x10 ⁶	6.120 x10 ⁵
D	1.345 x10 ⁶	8.169 x10 ⁵	1.370 x10 ⁶	8.410 x10 ⁵
E	1.052 x10 ⁷	7.135 x10 ⁶	1.070 x10 ⁷	7.260 x10 ⁶
F	1.115 x10 ⁶	3.193 x10 ⁵	1.180 x10 ⁶	3.500 x10 ⁵
G	4.242 x10 ⁶	5.037 x10 ⁶	4.340 x10 ⁶	5.110 x10 ⁶
H	3.325 x10 ⁶	7.802 x10 ⁶	3.330 x10 ⁶	7.990 x10 ⁶
I	6.987 x10 ⁶	4.296 x10 ⁶	7.110 x10 ⁶	4.400 x10 ⁶

Tablo 9. Lineer olmayan dinamik analizde, temelin eğilebilir, barajın boş olması durumunda belirlenen gauss noktalarındaki yatay ve düşey gerilmelerin maksimum değerlerinin sayısal değerleri

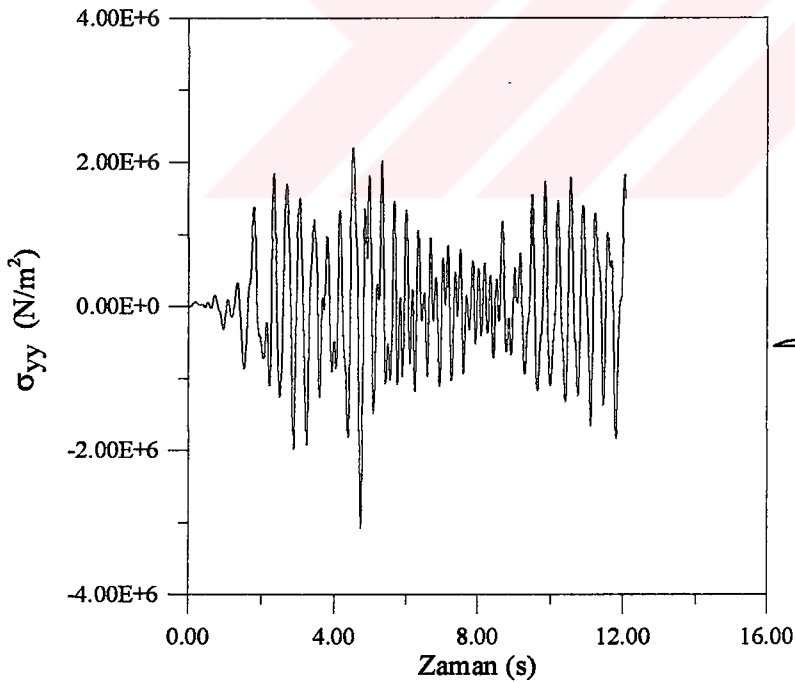
Lineer Olmayan Dinamik Analiz				
Drucker-Prager Yöntemi			Eğri Tanımlama Yöntemi	
Gauss Noktaları	Yatay Gerilme σ_{yy} (N/m ²)	Düşey Gerilme σ_{zz} (N/m ²)	Yatay Gerilme σ_{yy} (N/m ²)	Düşey Gerilme σ_{zz} (N/m ²)
A	4.103 x10 ⁶	2.459 x10 ⁶	4.110 x10 ⁶	2.470 x10 ⁶
B	2.436 x10 ⁶	7.524 x10 ⁵	2.430 x10 ⁶	7.480 x10 ⁵
C	1.880 x10 ⁶	7.392 x10 ⁵	1.880 x10 ⁶	7.220 x10 ⁵
D	1.446 x10 ⁶	8.441 x10 ⁵	1.440 x10 ⁶	8.500 x10 ⁵
E	9.825 x10 ⁶	4.644 x10 ⁶	9.700 x10 ⁶	4.610 x10 ⁶
F	4.127 x10 ⁶	4.942 x10 ⁵	4.100 x10 ⁶	5.010 x10 ⁵
G	4.683 x10 ⁶	5.212 x10 ⁶	4.700 x10 ⁶	5.220 x10 ⁶
H	6.484 x10 ⁶	1.098 x10 ⁷	6.390 x10 ⁶	1.100 x10 ⁷
I	1.209 x10 ⁷	6.912 x10 ⁶	1.240 x10 ⁷	7.090 x10 ⁶

Tablo 10. Lineer olmayan dinamik analizde, temelin eğilebilir, barajın dolu olması durumunda belirlenen gauss noktalarındaki yatay ve düşey gerilmelerin maksimum değerlerinin sayısal değerleri

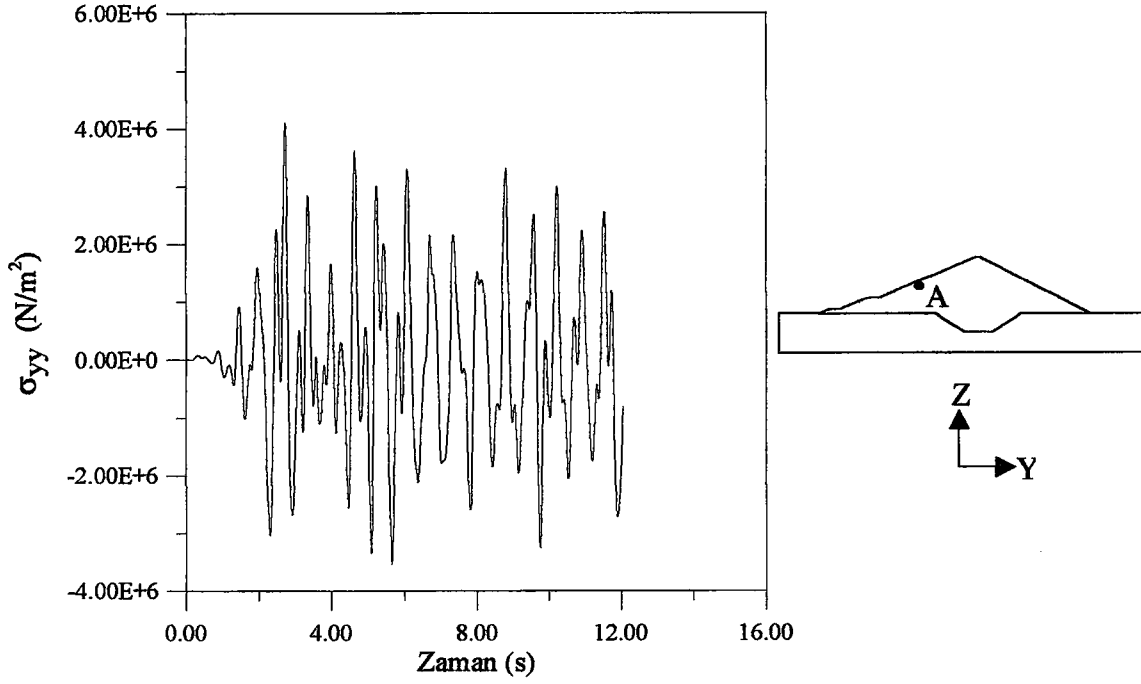
Lineer Olmayan Dinamik Analiz				
Drucker-Prager Yöntemi			Eğri Tanımlama Yöntemi	
Gauss Noktaları	Yatay Gerilme σ_{yy} (N/m ²)	Düşey Gerilme σ_{zz} (N/m ²)	Yatay Gerilme σ_{yy} (N/m ²)	Düşey Gerilme σ_{zz} (N/m ²)
A	4.107 x10 ⁶	2.414 x10 ⁶	4.110 x10 ⁶	2.410 x10 ⁶
B	2.408 x10 ⁶	7.466 x10 ⁵	2.400 x10 ⁶	7.430 x10 ⁵
C	1.871 x10 ⁶	7.377 x10 ⁵	1.880 x10 ⁶	7.210 x10 ⁵
D	1.444 x10 ⁶	8.378 x10 ⁵	1.440 x10 ⁶	8.440 x10 ⁵
E	9.685 x10 ⁶	4.607 x10 ⁶	9.530 x10 ⁶	4.530 x10 ⁶
F	4.107 x10 ⁶	4.757 x10 ⁵	4.080 x10 ⁶	4.820 x10 ⁵
G	4.704 x10 ⁶	5.266 x10 ⁶	4.710 x10 ⁶	5.250 x10 ⁶
H	6.158 x10 ⁶	1.076 x10 ⁷	6.070 x10 ⁶	1.080 x10 ⁷
I	1.206 x10 ⁷	6.890 x10 ⁶	1.230 x10 ⁷	7.090 x10 ⁶



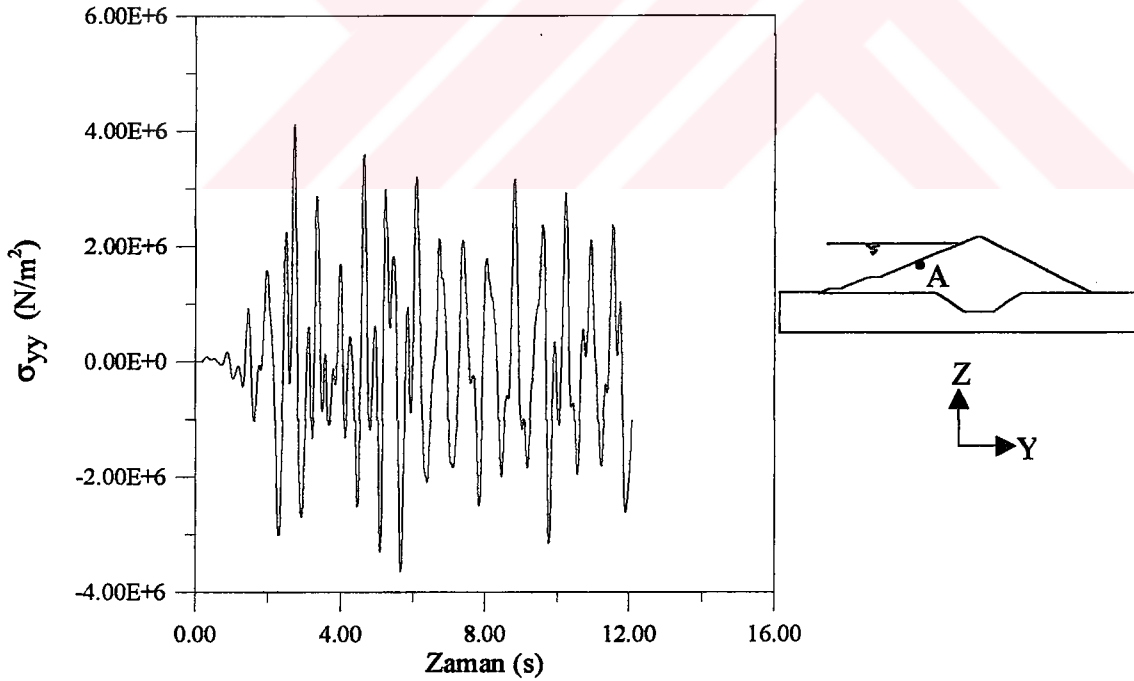
Şekil 65. Drucker-Prager Yöntemi ile lineer olmayan dinamik analizde, temelin rijit, barajın boş olması durumunda A nolu gauss noktasında Y-doğrultusunda meydana gelen gerilmelerin zamanla değişimi



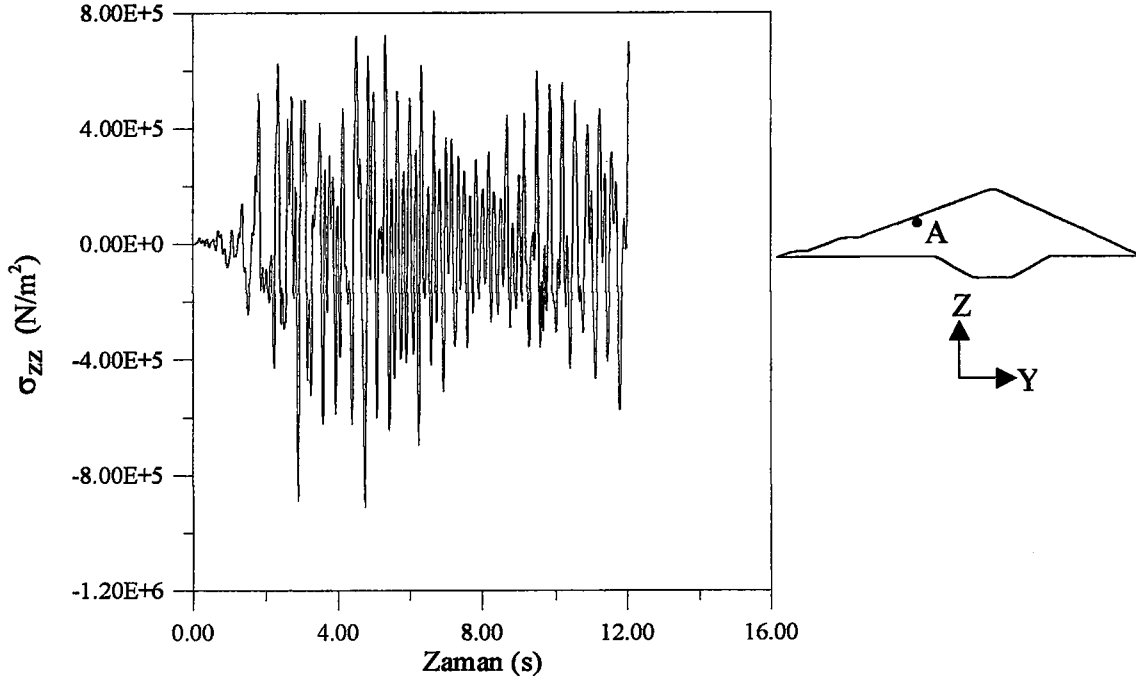
Şekil 66. Drucker-Prager Yöntemi ile lineer olmayan dinamik analizde, temelin rijit, barajın dolu olması durumunda A nolu gauss noktasında Y-doğrultusunda meydana gelen gerilmelerin zamanla değişimi



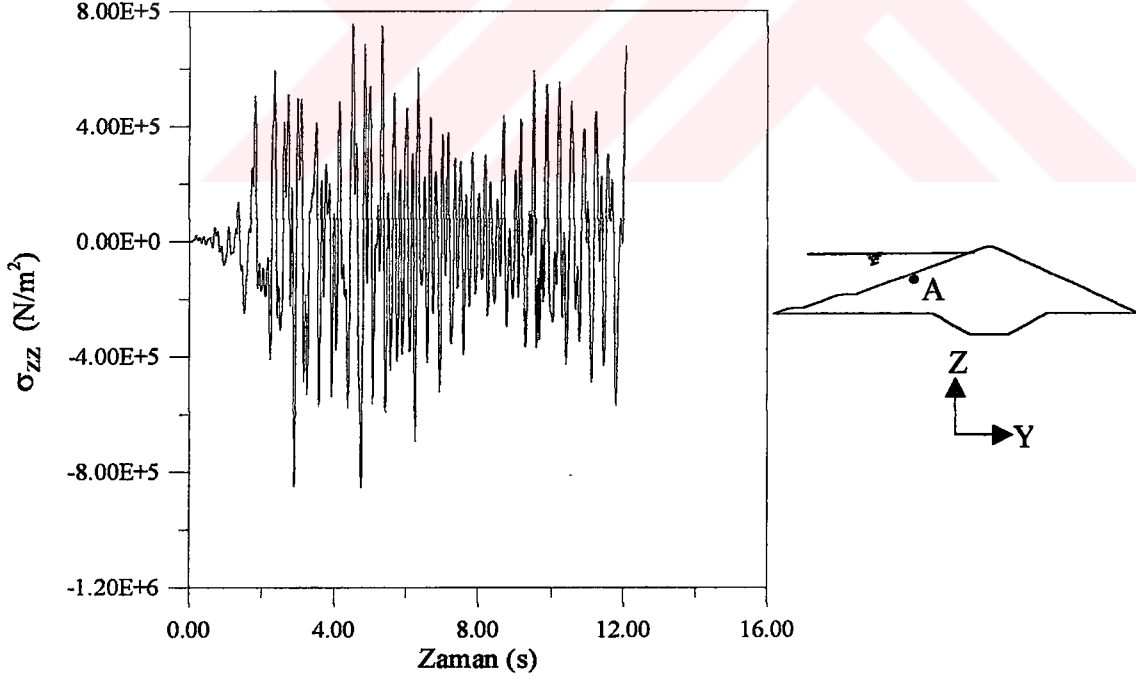
Şekil 67. Drucker-Prager Yöntemi ile lineer olmayan dinamik analizde, temelin eğilebilir, barajın boş olması durumunda A nolu gauss noktasında Y-doğrultusunda meydana gelen gerilmelerin zamanla değişimi



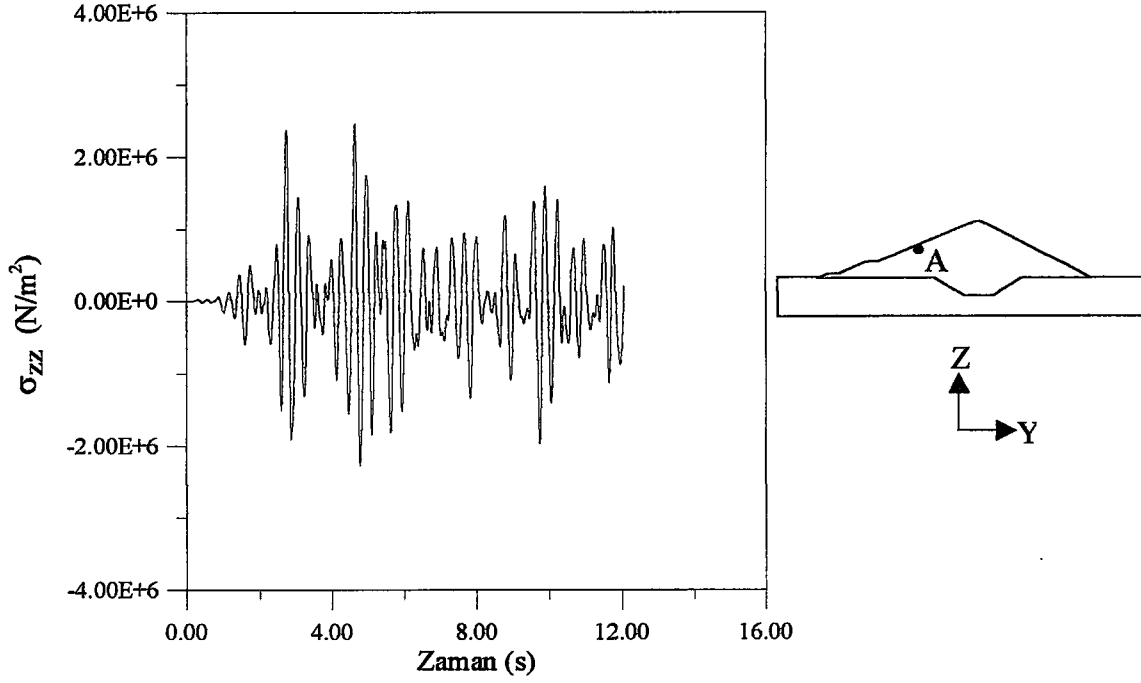
Şekil 68. Drucker-Prager Yöntemi ile lineer olmayan dinamik analizde, temelin eğilebilir, barajın dolu olması durumunda A nolu gauss noktasında Y-doğrultusunda meydana gelen gerilmelerin zamanla değişimi



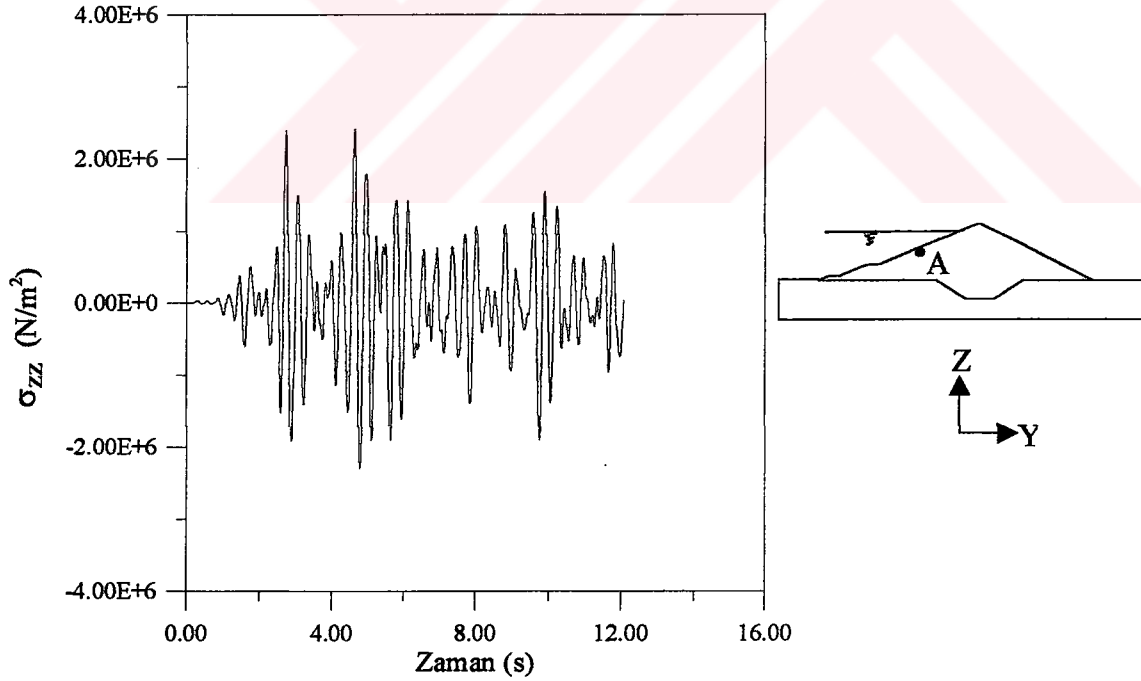
Şekil 69. Drucker-Prager Yöntemi ile lineer olmayan dinamik analizde, temelin rijit, barajın boş olması durumunda A nolu gauss noktasında Z-doğrultusunda meydana gelen gerilmelerin zamanla değişimi



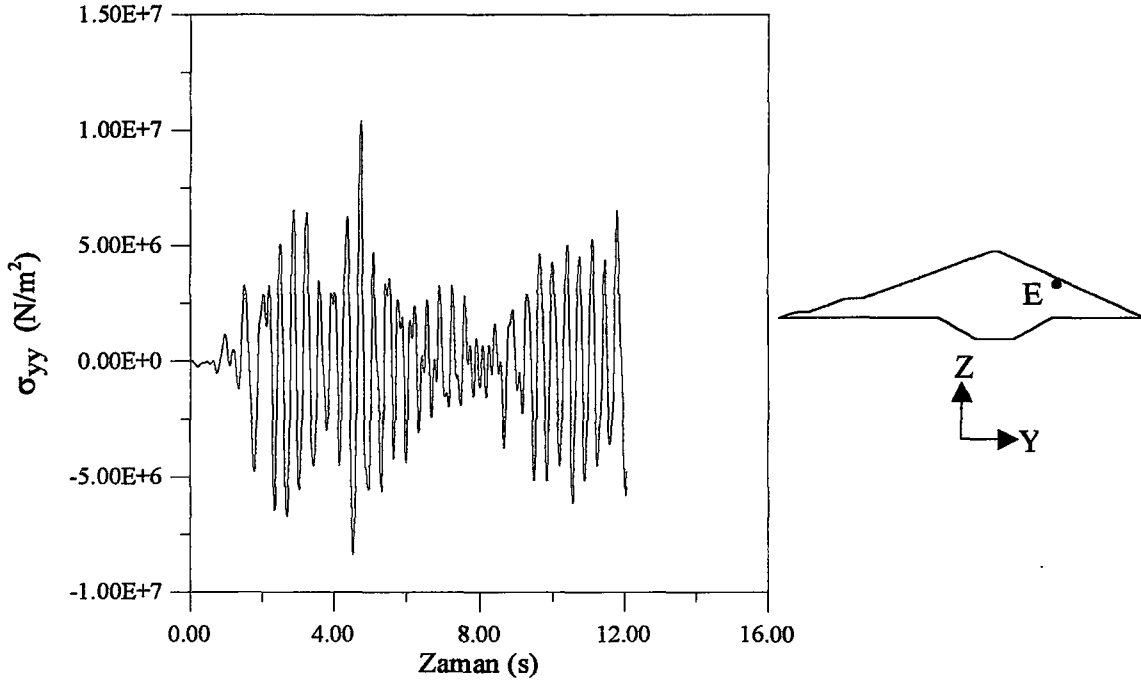
Şekil 70. Drucker-Prager Yöntemi ile lineer olmayan dinamik analizde, temelin rijit, barajın dolu olması durumunda A nolu gauss noktasında Z-doğrultusunda meydana gelen gerilmelerin zamanla değişimi



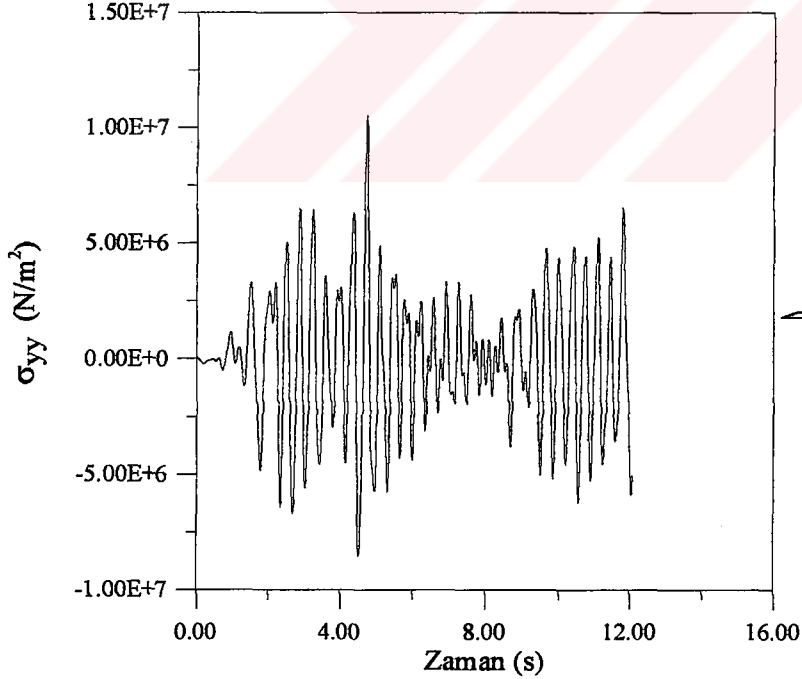
Şekil 71. Drucker-Prager Yöntemi ile lineer olmayan dinamik analizde, temelin eğilebilir, barajın boş olması durumunda A nolu gauss noktasında Z-doğrultusunda meydana gelen gerilmelerin zamanla değişimi



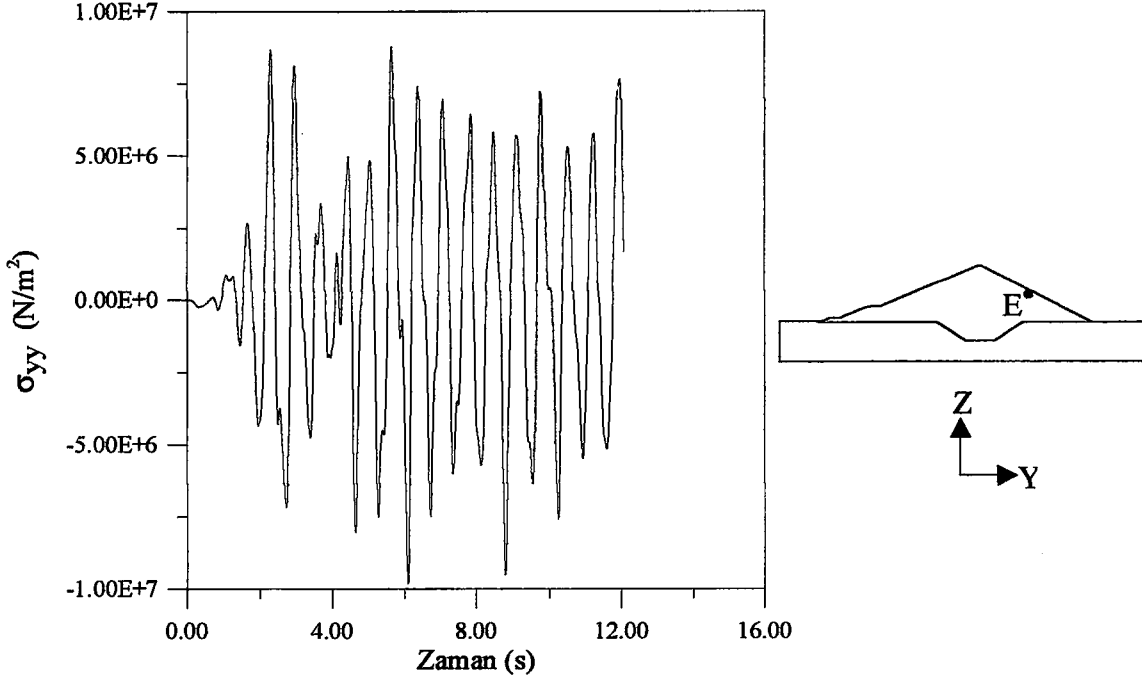
Şekil 72. Drucker-Prager Yöntemi ile lineer olmayan dinamik analizde, temelin eğilebilir, barajın dolu olması durumunda A nolu gauss noktasında Z-doğrultusunda meydana gelen gerilmelerin zamanla değişimi



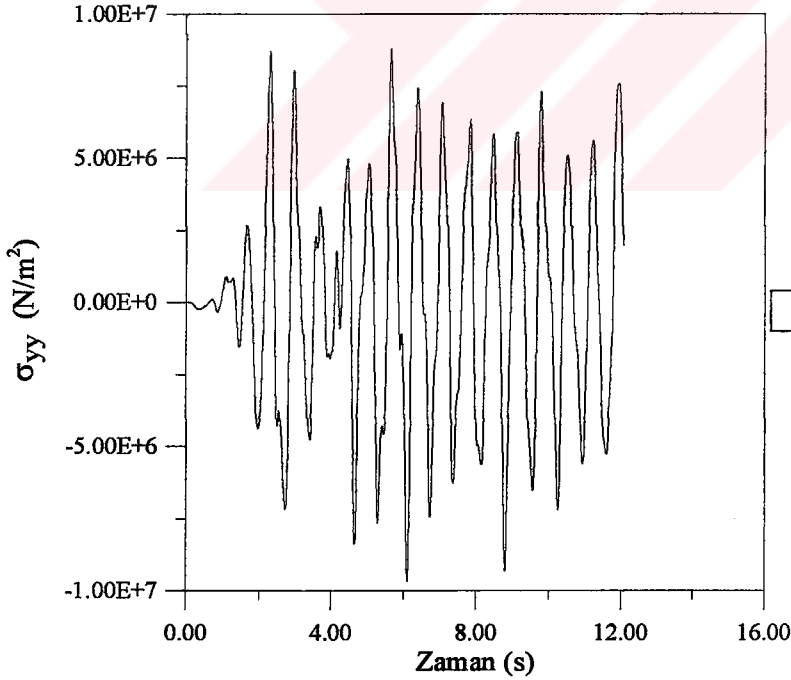
Şekil 73. Drucker-Prager Yöntemi ile lineer olmayan dinamik analizde, temelin rijit, barajın boş olması durumunda E nolu gauss noktasında Y-doğrultusunda meydana gelen gerilmelerin zamanla değişimi



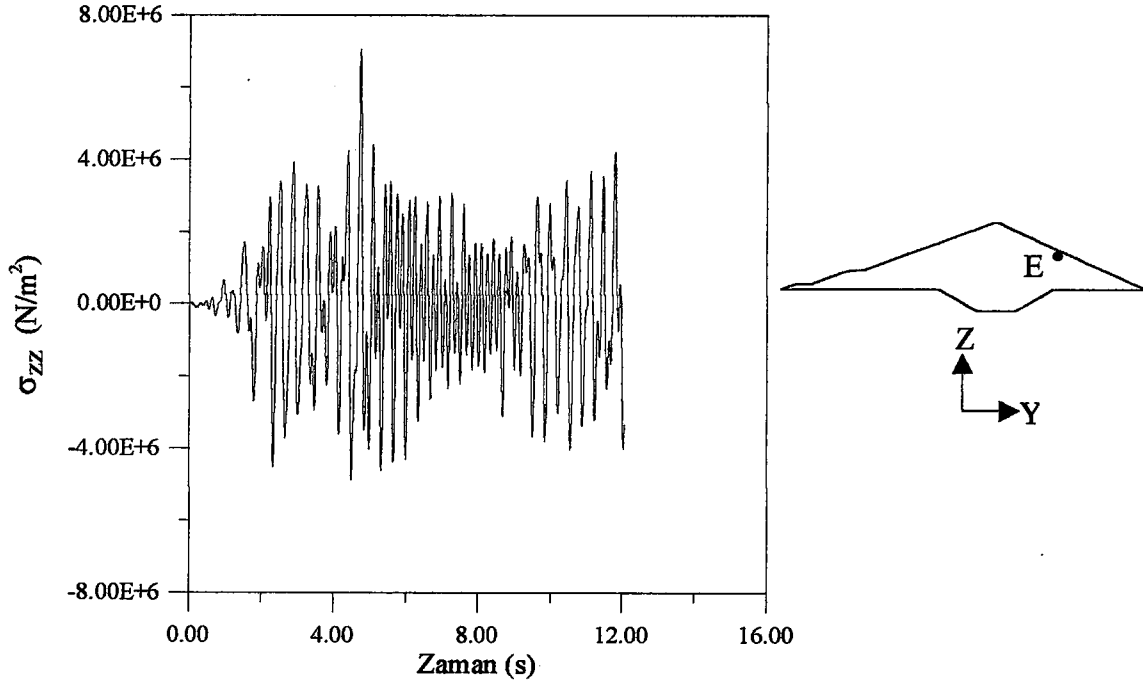
Şekil 74. Drucker-Prager Yöntemi ile lineer olmayan dinamik analizde, temelin rijit, barajın dolu olması durumunda E nolu gauss noktasında Y-doğrultusunda meydana gelen gerilmelerin zamanla değişimi



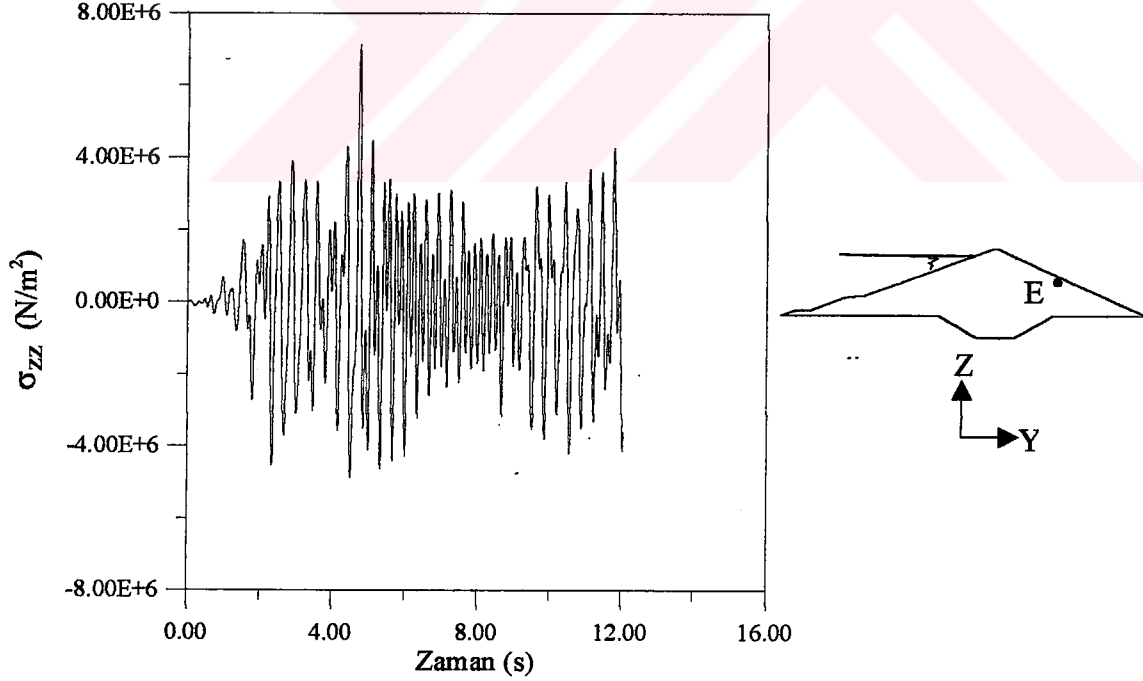
Şekil 75. Drucker-Prager Yöntemi ile lineer olmayan dinamik analizde, temelin eğilebilir, barajın boş olması durumunda E nolu gauss noktasında Y-doğrultusunda meydana gelen gerilmelerin zamanla değişimi



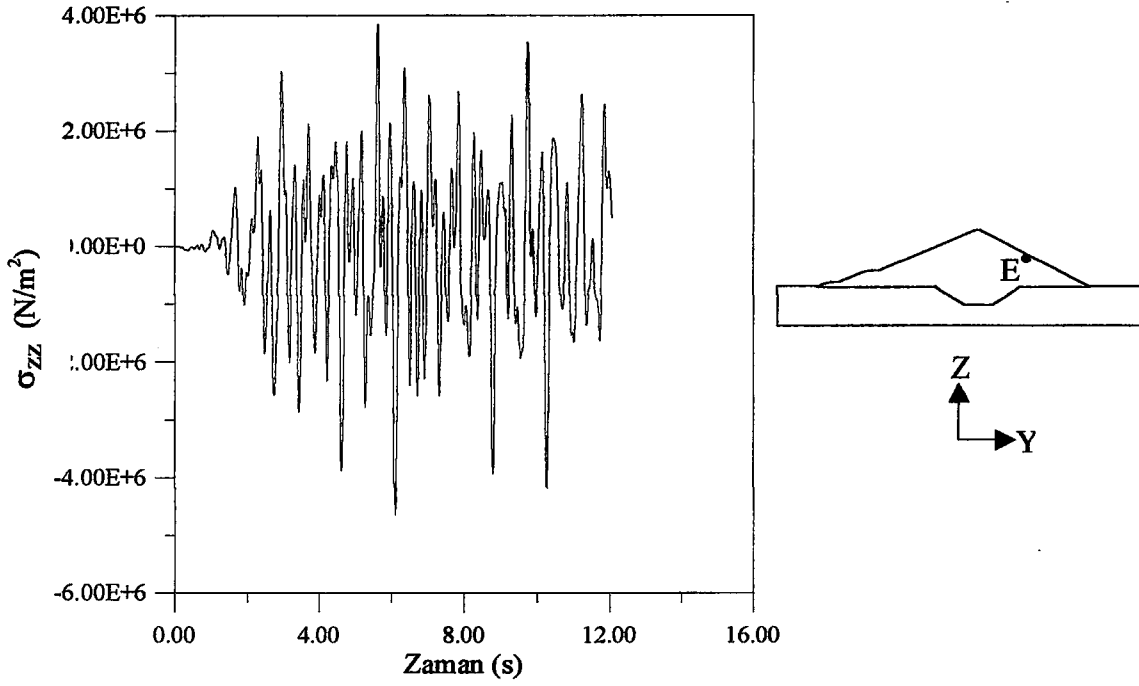
Şekil 76. Drucker-Prager Yöntemi ile lineer olmayan dinamik analizde, temelin eğilebilir, barajın dolu olması durumunda E nolu gauss noktasında Y-doğrultusunda meydana gelen gerilmelerin zamanla değişimi



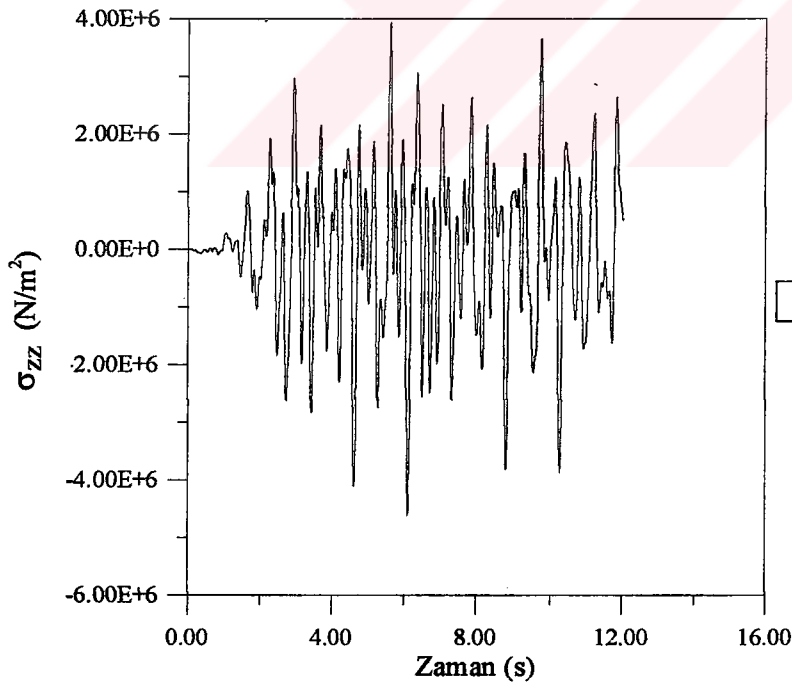
Şekil 77. Drucker-Prager Yöntemi ile lineer olmayan dinamik analizde, temelin rijit, barajın boş olması durumunda E nolu gauss noktasında Z-doğrultusunda meydana gelen gerilmelerin zamanla değişimi



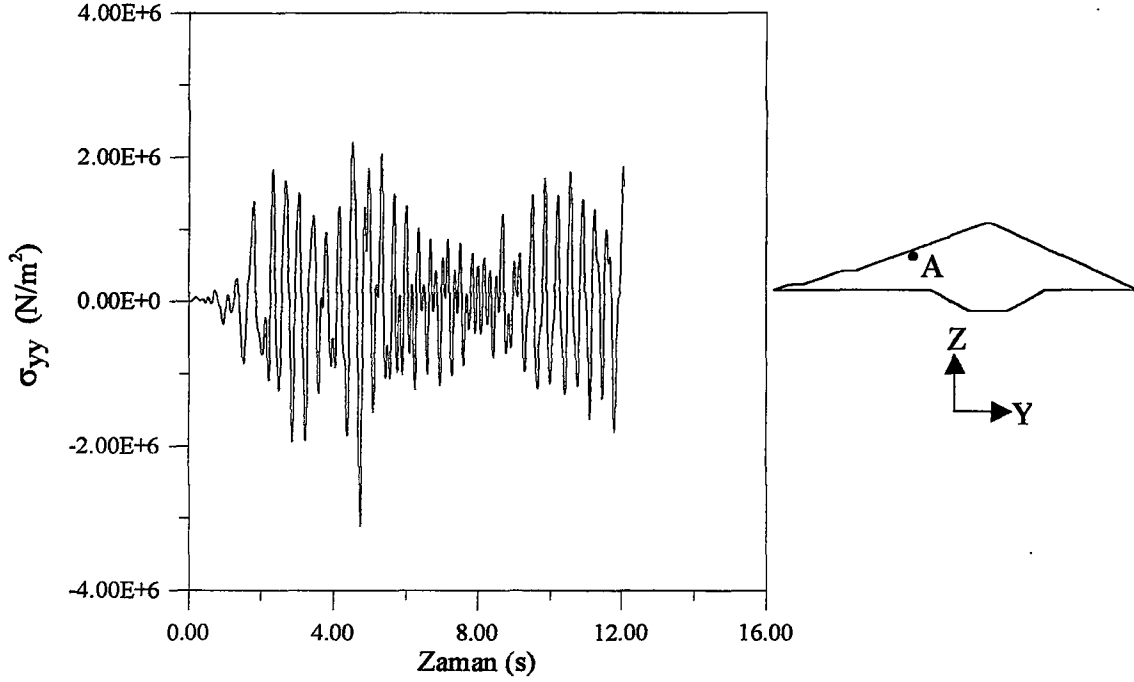
Şekil 78. Drucker-Prager Yöntemi ile lineer olmayan dinamik analizde, temelin rijit, barajın dolu olması durumunda E nolu gauss noktasında Z-doğrultusunda meydana gelen gerilmelerin zamanla değişimi



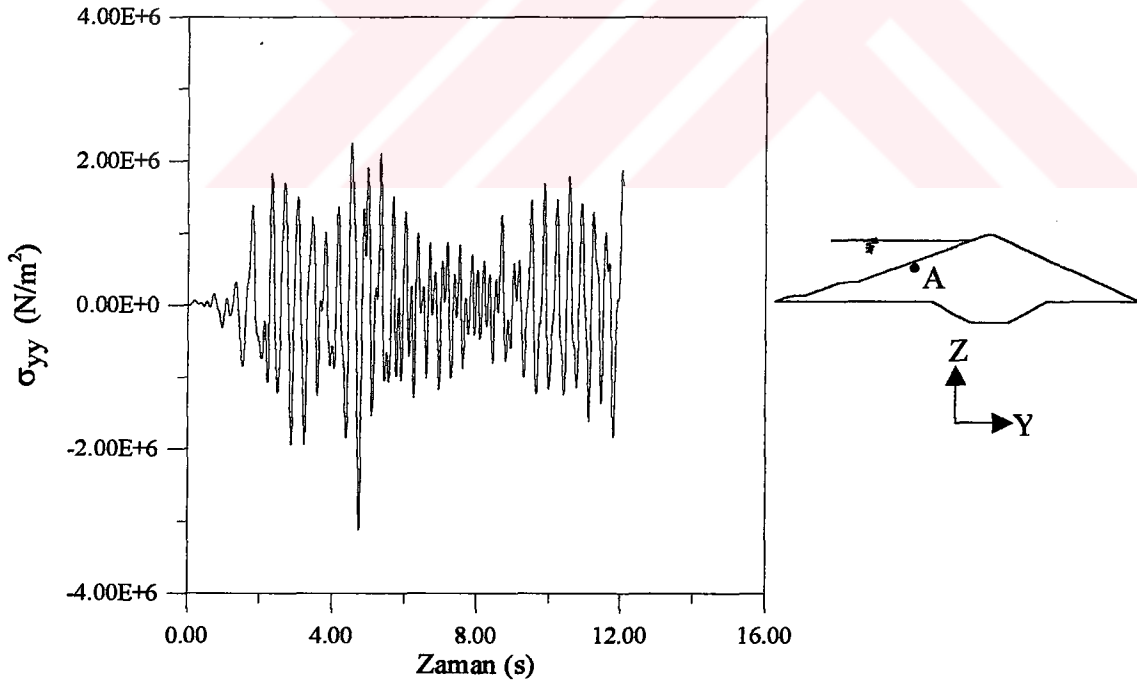
Şekil 79. Drucker-Prager Yöntemi ile lineer olmayan dinamik analizde, temelin eğilebilir, barajın boş olması durumunda E nolu gauss noktasında Z-doğrultusunda meydana gelen gerilmelerin zamanla değişimi



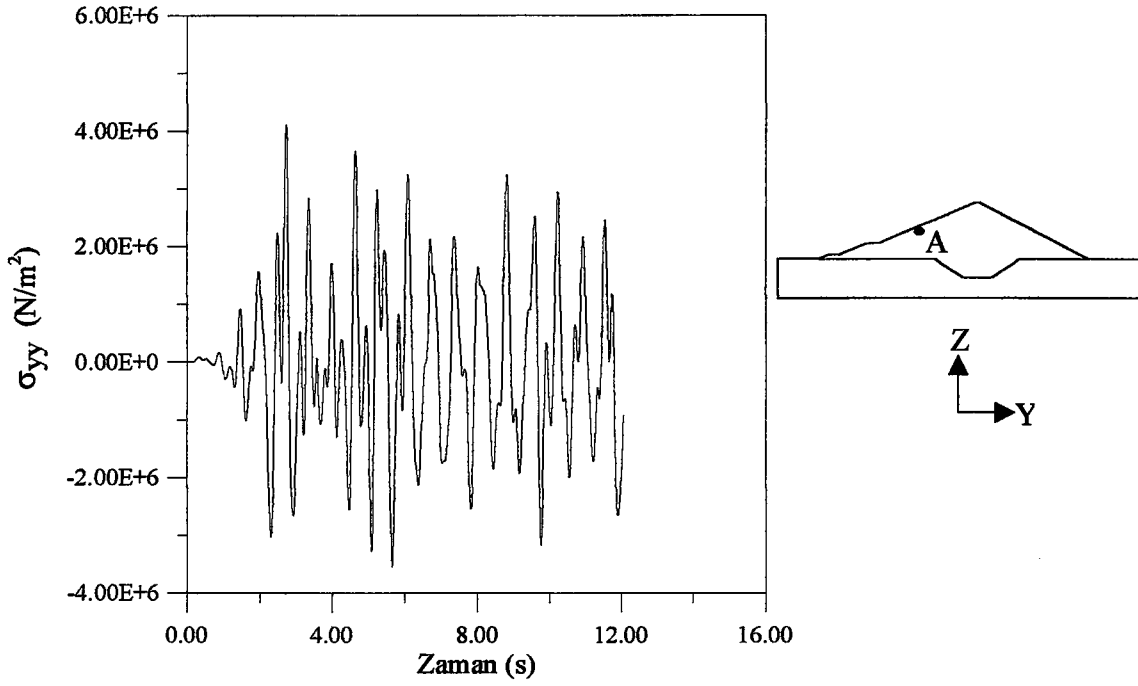
Şekil 80. Drucker-Prager Yöntemi ile lineer olmayan dinamik analizde, temelin eğilebilir, barajın dolu olması durumunda E nolu gauss noktasında Z-doğrultusunda meydana gelen gerilmelerin zamanla değişimi



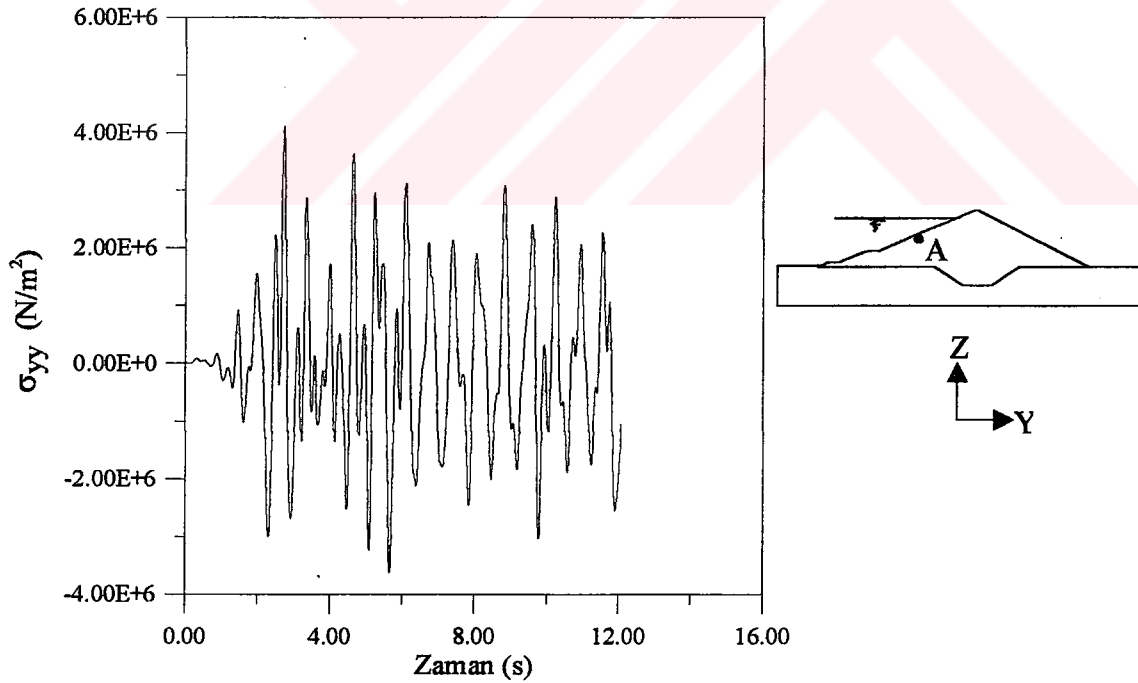
Şekil 81. Eğri Tanımlama Yöntemi ile lineer olmayan dinamik analizde, temelin rijit, barajın boş olması durumunda A nolu gauss noktasında Y-doğrultusunda meydana gelen gerilmelerin zamanla değişimi



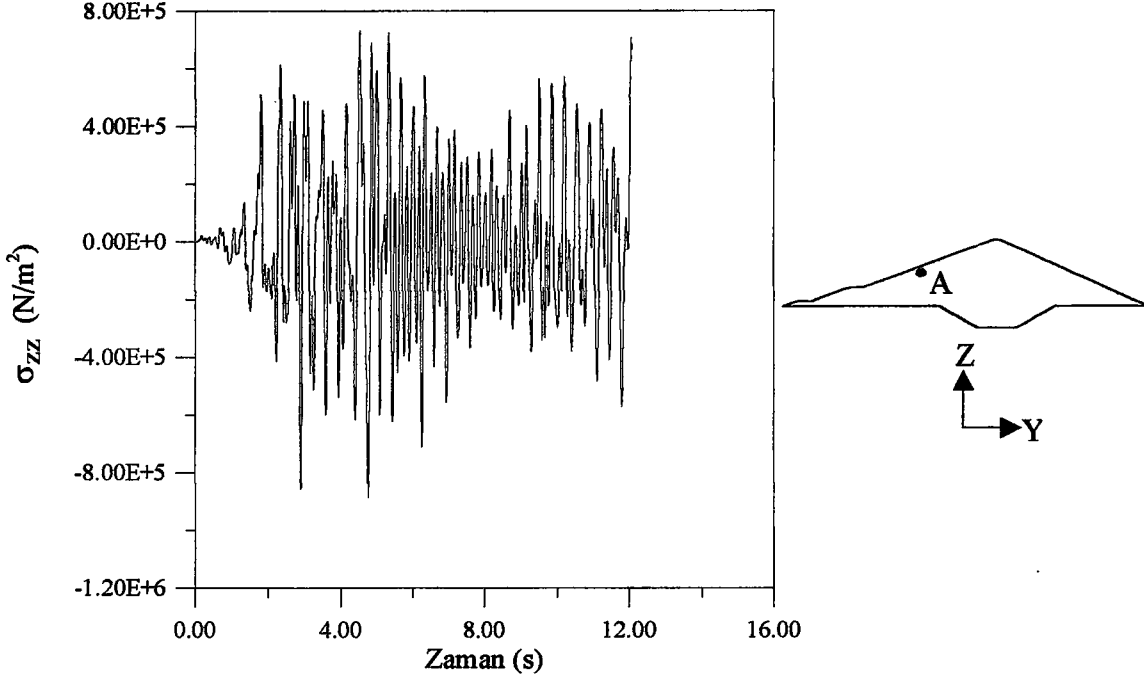
Şekil 82. Eğri Tanımlama Yöntemi ile lineer olmayan dinamik analizde, temelin rijit, barajın dolu olması durumunda A nolu gauss noktasında Y-doğrultusunda meydana gelen gerilmelerin zamanla değişimi



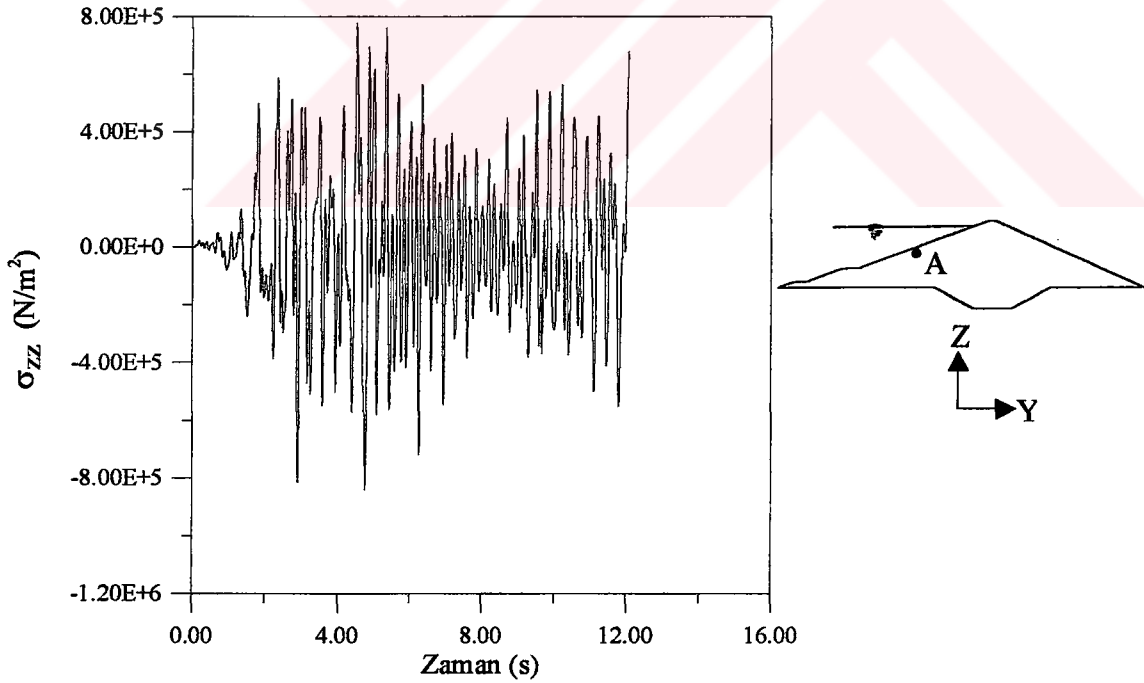
Şekil 83. Eğri Tanımlama Yöntemi ile lineer olmayan dinamik analizde, temelin eğilebilir, barajın boş olması durumunda A nolu gauss noktasında Y-doğrultusunda meydana gelen gerilmelerin zamanla değişimi



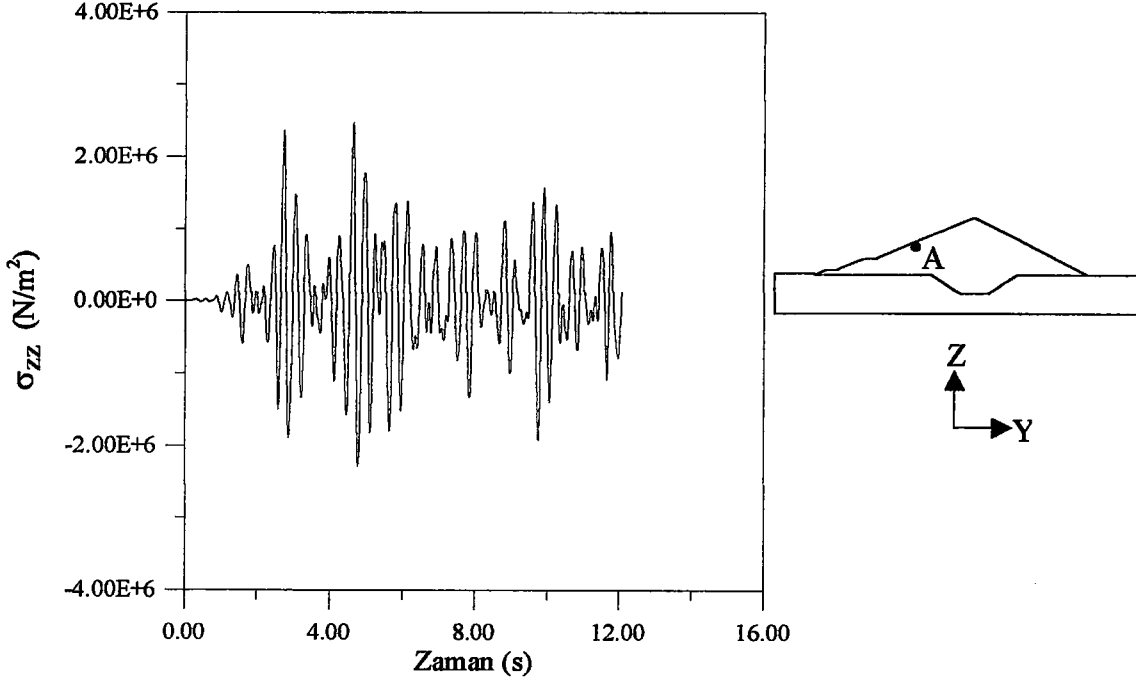
Şekil 84. Eğri Tanımlama Yöntemi ile lineer olmayan dinamik analizde, temelin eğilebilir, barajın dolu olması durumunda A nolu gauss noktasında Y-doğrultusunda meydana gelen gerilmelerin zamanla değişimi



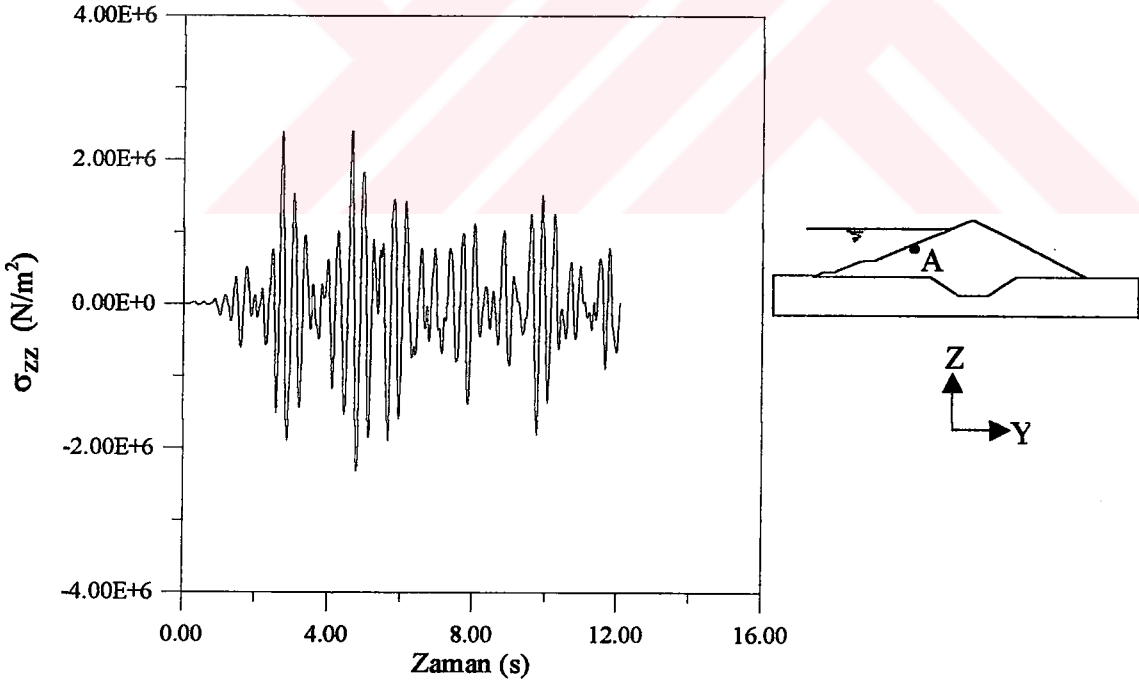
Şekil 85. Eğri Tanımlama Yöntemi ile lineer olmayan dinamik analizde, temelin rijit, barajın boş olması durumunda A nolu gauss noktasında Z-doğrultusunda meydana gelen gerilmelerin zamanla değişimi



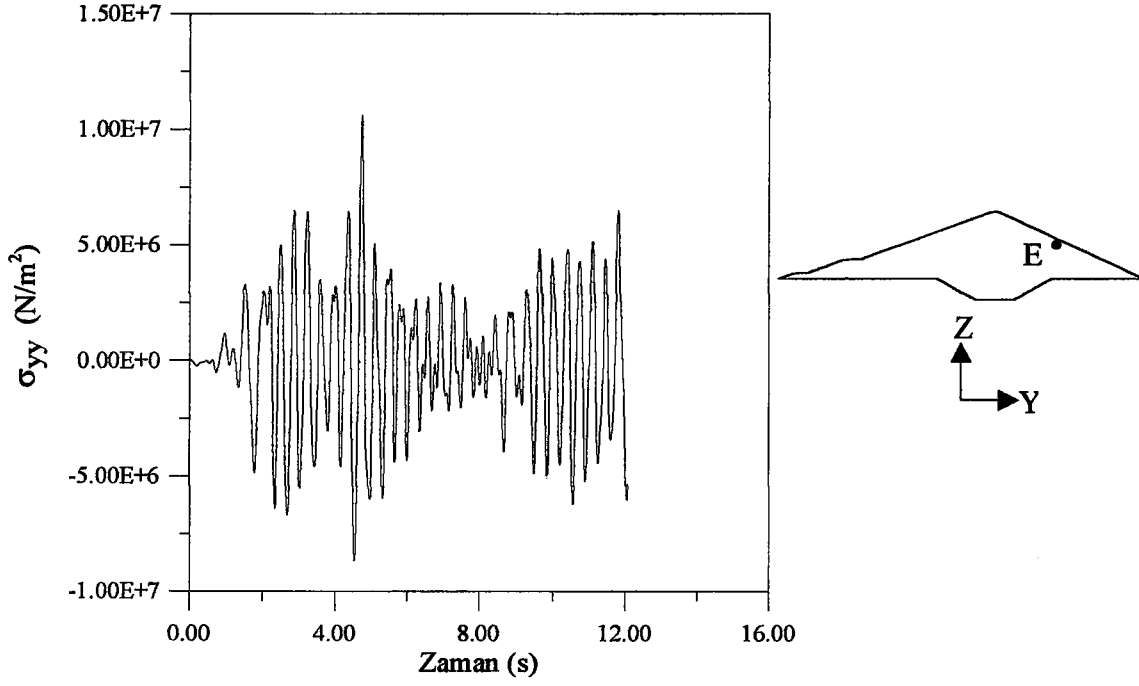
Şekil 86. Eğri Tanımlama Yöntemi ile lineer olmayan dinamik analizde, temelin rijit, barajın dolu olması durumunda A nolu gauss noktasında Z-doğrultusunda meydana gelen gerilmelerin zamanla değişimi



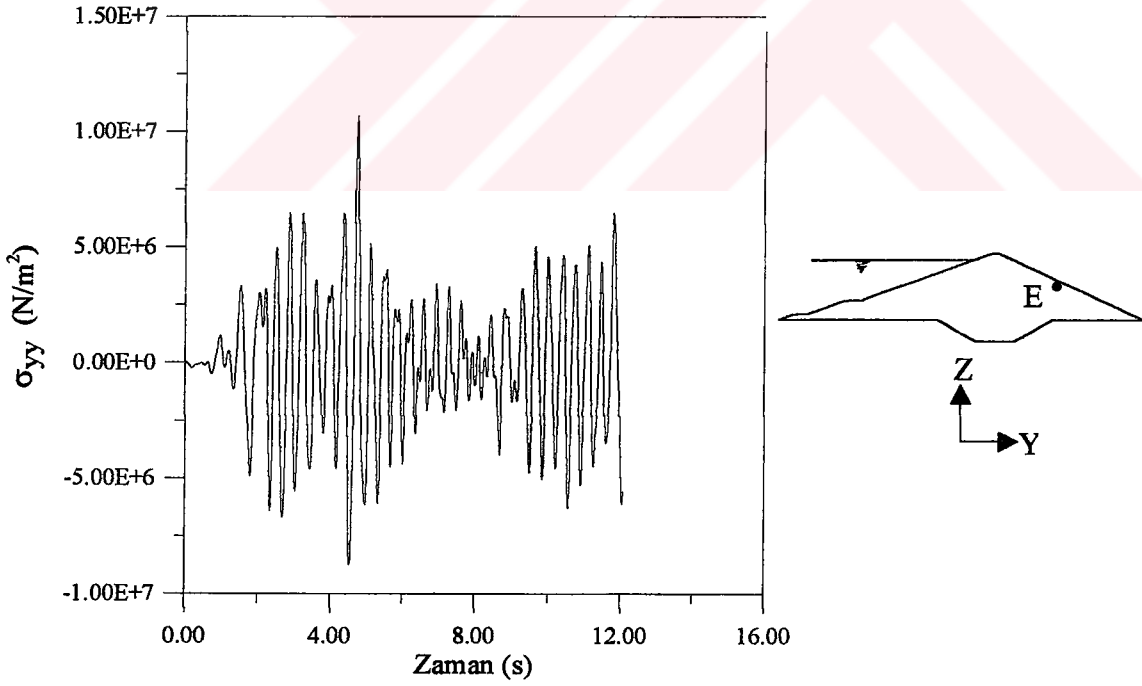
Şekil 87. Eğri Tanımlama Yöntemi ile lineer olmayan dinamik analizde, temelin eğilebilir, barajın boş olması durumunda A nolu gauss noktasında Z-doğrultusunda meydana gelen gerilmelerin zamanla değişimi



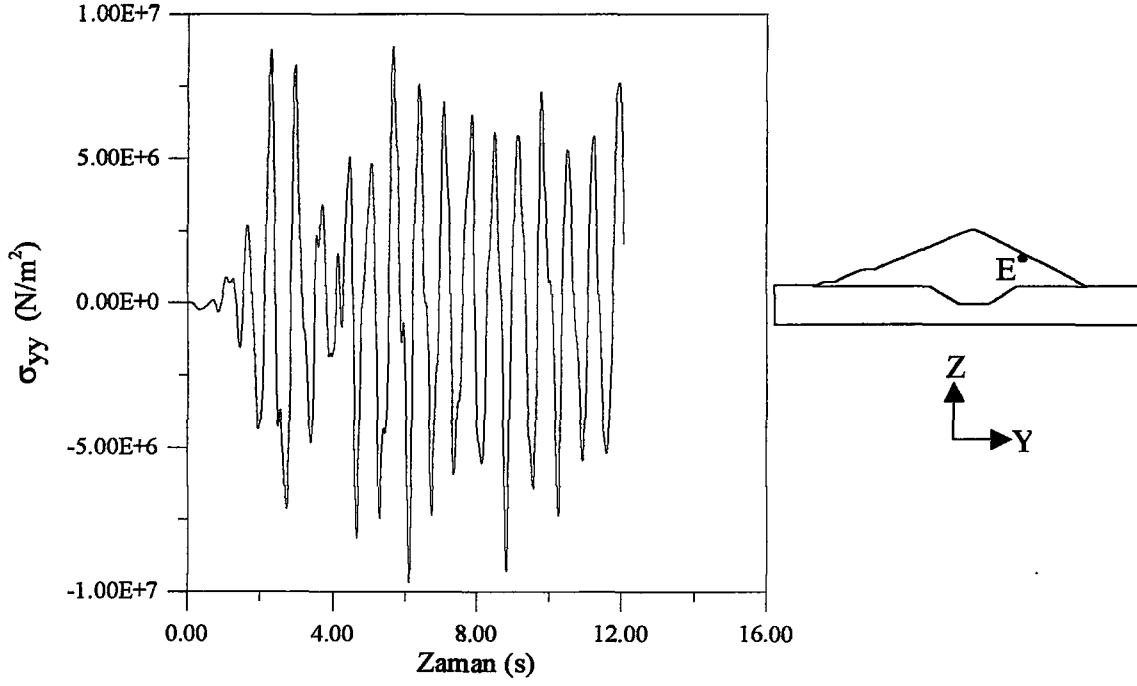
Şekil 88. Eğri Tanımlama Yöntemi ile lineer olmayan dinamik analizde, temelin eğilebilir, barajın dolu olması durumunda A nolu gauss noktasında Z-doğrultusunda meydana gelen gerilmelerin zamanla değişimi



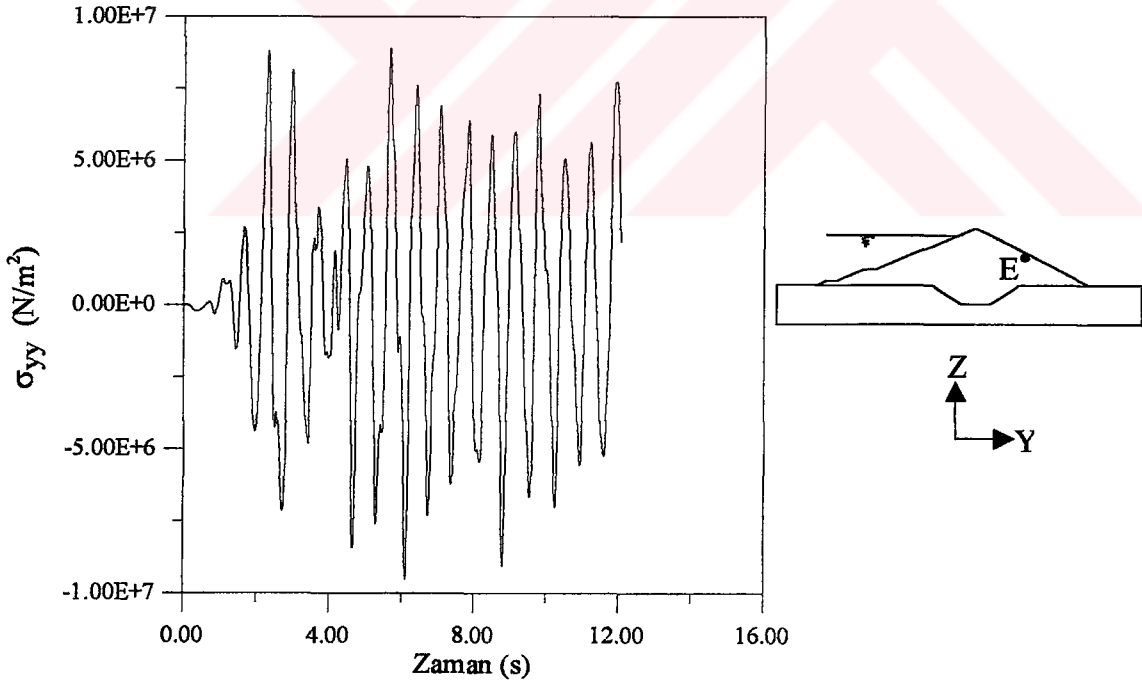
Şekil 89. Eğri Tanımlama Yöntemi ile lineer olmayan dinamik analizde, temelin rijit, barajın boş olması durumunda E nolu gauss noktasında Y-doğrultusunda meydana gelen gerilmelerin zamanla değişimi



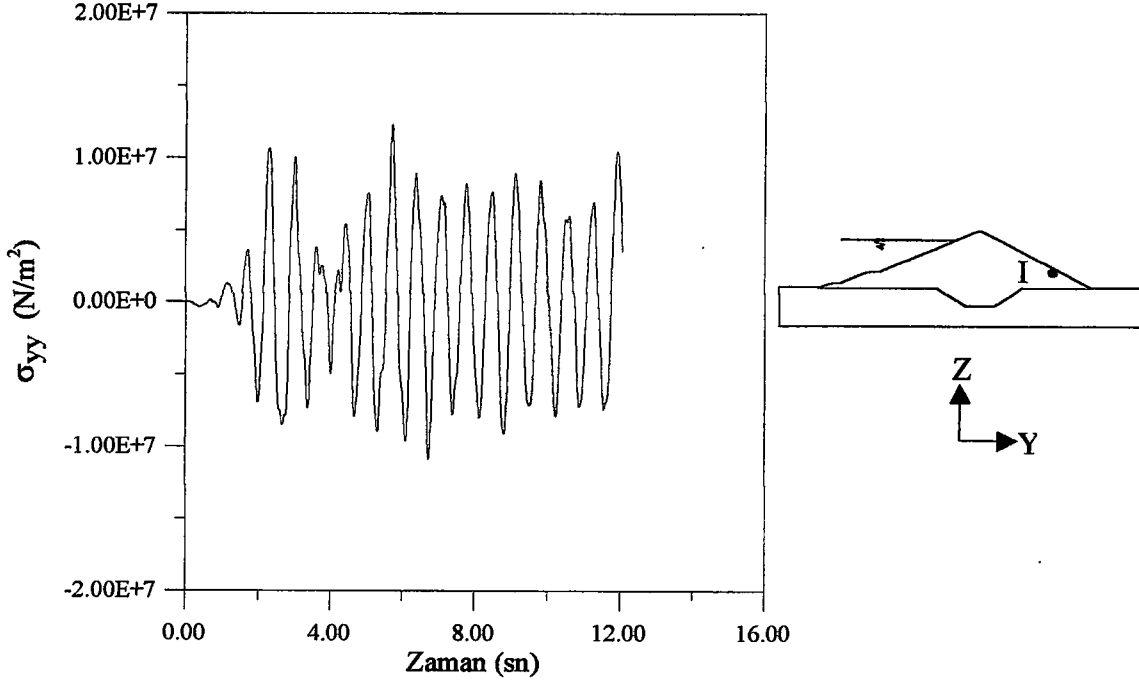
Şekil 90. Eğri Tanımlama Yöntemi ile lineer olmayan dinamik analizde, temelin rijit, barajın dolu olması durumunda E nolu gauss noktasında Y-doğrultusunda meydana gelen gerilmelerin zamanla değişimi



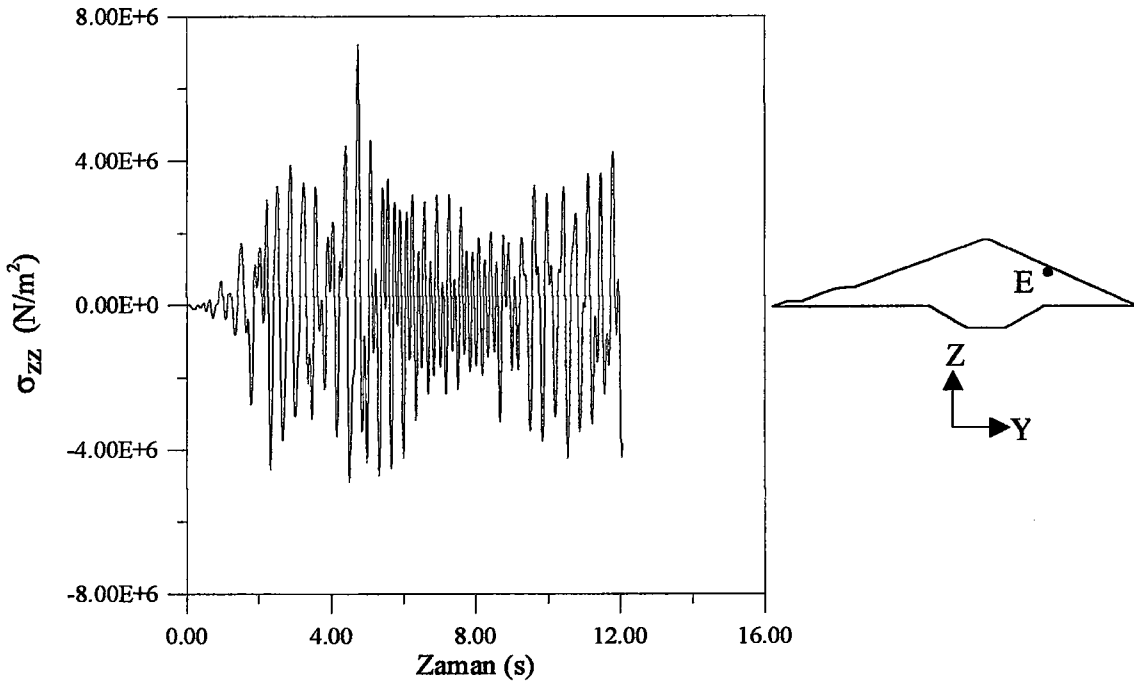
Şekil 91. Eğri Tanımlama Yöntemi ile lineer olmayan dinamik analizde, temelin eğilebilir, barajın boş olması durumunda E nolu gauss noktasında Y-doğrultusunda meydana gelen gerilmelerin zamanla değişimi



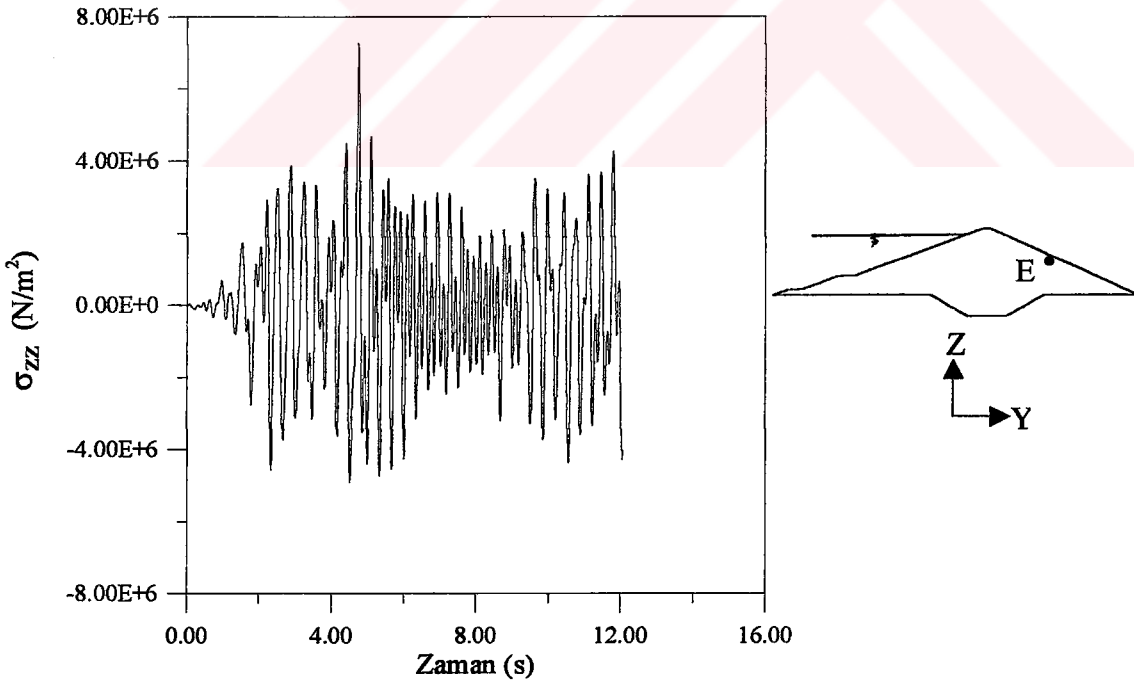
Şekil 92. Eğri Tanımlama Yöntemi ile lineer olmayan dinamik analizde, temelin eğilebilir, barajın dolu olması durumunda E nolu gauss noktasında Y-doğrultusunda meydana gelen gerilmelerin zamanla değişimi



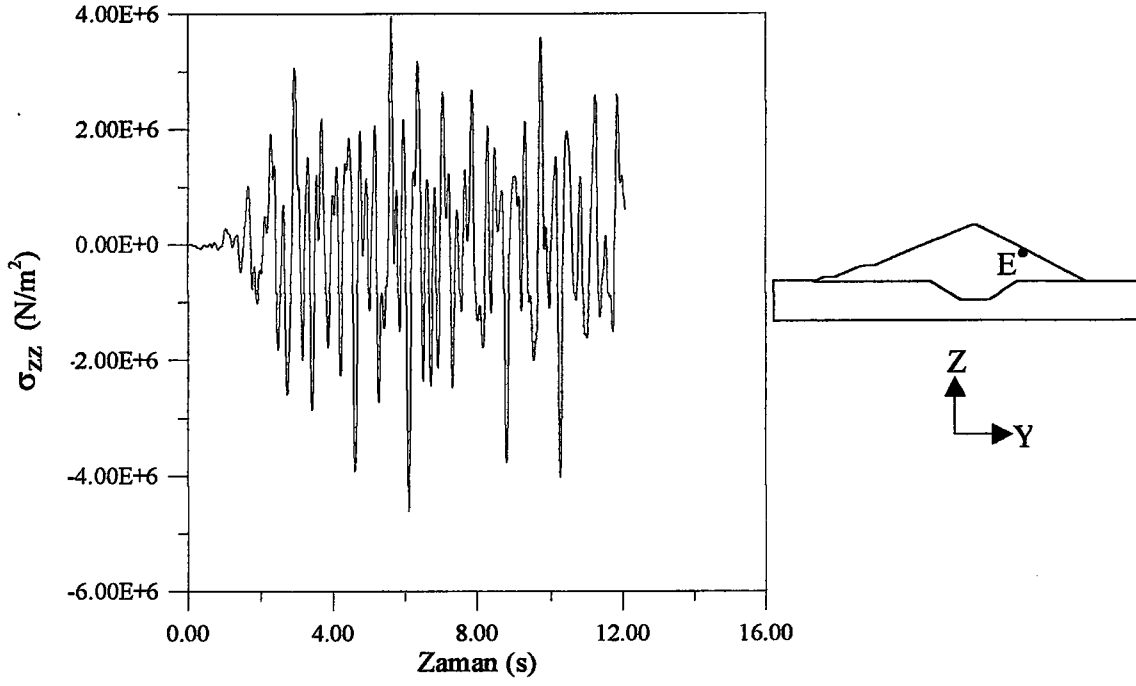
Şekil 93. Eğri Tanımlama Yöntemi ile lineer olmayan dinamik analizde, temelin eğilebilir, barajın dolu olması durumunda I nolu gauss noktasında Y-doğrultusunda meydana gelen gerilmelerin zamanla değişimi



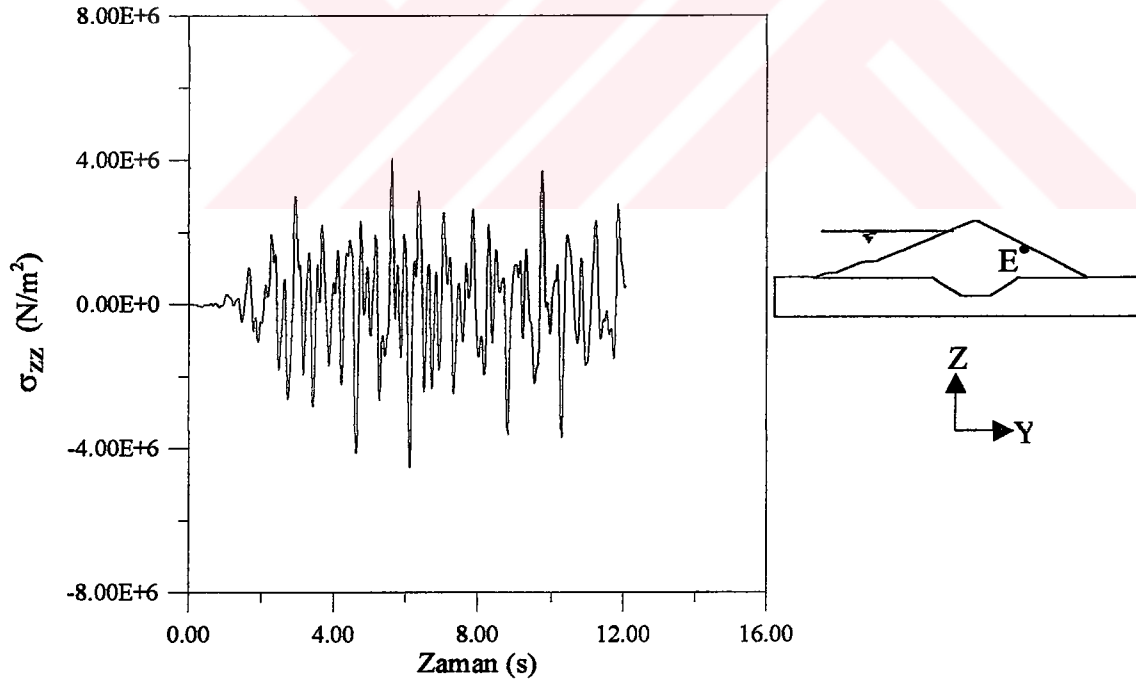
Şekil 94. Eğri Tanımlama Yöntemi ile lineer olmayan dinamik analizde, temelin rijit, barajın boş olması durumunda E nolu gauss noktasında Z-doğrultusunda meydana gelen gerilmelerin zamanla değişimi



Şekil 95. Eğri Tanımlama Yöntemi ile lineer olmayan dinamik analizde, temelin rijit, barajın dolu olması durumunda E nolu gauss noktasında Z-doğrultusunda meydana gelen gerilmelerin zamanla değişimi



Şekil 96. Eğri Tanımlama Yöntemi ile lineer olmayan dinamik analizde, temelin eğilebilir, barajın boş olması durumunda E nolu gauss noktasında Z-doğrultusunda meydana gelen gerilmelerin zamanla değişimi



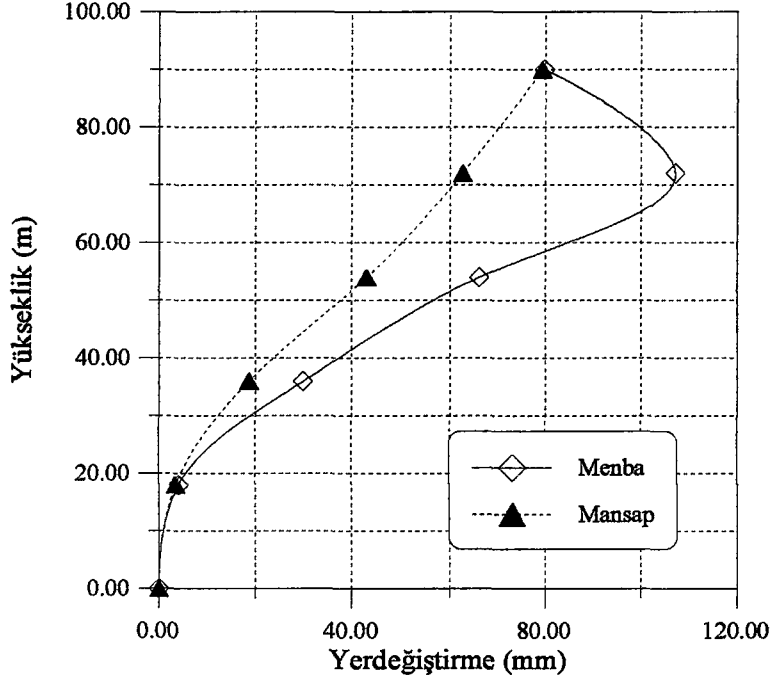
Şekil 97. Eğri Tanımlama Yöntemi ile lineer olmayan dinamik analizde, temelin eğilebilir, barajın dolu olması durumunda E nolu gauss noktasında Z-doğrultusunda meydana gelen gerilmelerin zamanla değişimi

3.2.2. Yerdeşiftirmelerin Karşılaştırılması

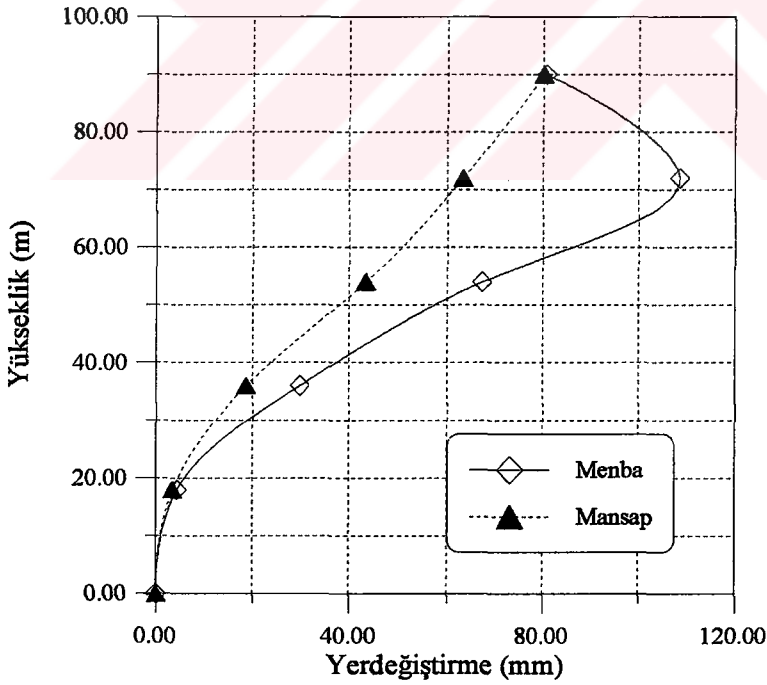
Lineer olmayan dinamik analiz sonuçları olarak Gördes Barajı menba ve mansap yüzeyindeki maksimum yatay ve düşey yerdeşiftirmelerin yükseklik boyunca değişimi Drucker-Prager Yöntemi için Şekil 98-107'da Eğri Tanımlama Yöntemi için Şekil 118-127'da verilmektedir. Ayrıca II-II kesitinde, Şekil 24, meydana gelen maksimum yatay yerdeşiftirmelerin yatay uzaklık boyunca değişimi Drucker-Prager Yöntemi için Şekil 108-109'de, Eğri Tanımlama Yöntemi için Şekil 128-129'de incelenmektedir. Yerdeşiftirmelerin zamanla değişimleri Drucker-Prager ve Eğri Tanımlama Yöntemleri için sırasıyla Şekil 110-117 ve Şekil 130-137'da verilmektedir.

İki boyutlu lineer olmayan dinamik analizlerde, Drucker-Prager ve Eğri Tanımlama Yöntemleri için, temelin rijit, barajın boş olması durumunda, menba ve mansap yüzeyindeki mutlak değerce maksimum yatay yerdeşiftirmelerin yükseklik boyunca değişimi incelendiğinde menba yüzeyinde meydana gelen maksimum yerdeşiftirmelerin mansap yüzeyindeki yerdeşiftirmelere oranla daha büyük değerler aldığı gözlenmektedir.

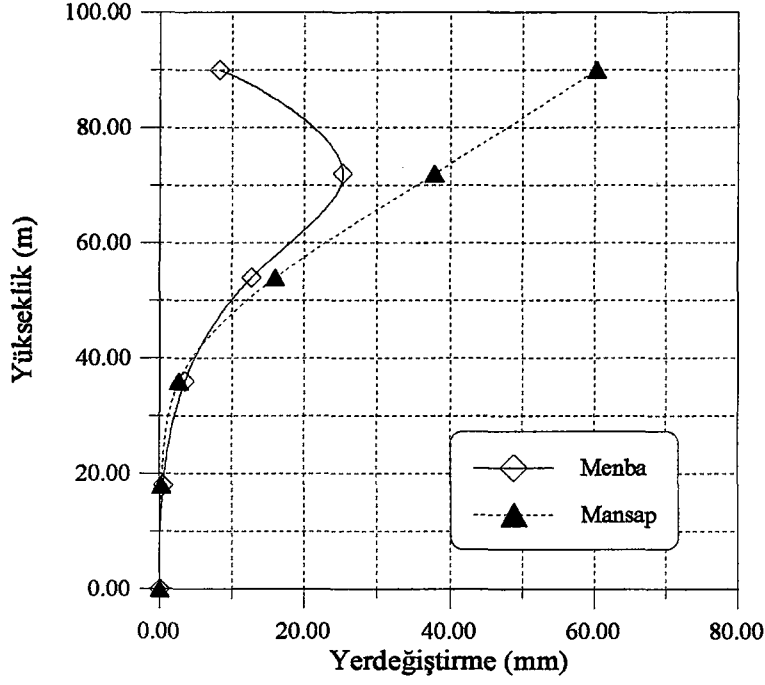
Aynı yorumlar barajın dolu, temelin eğilebilir olduğu durumlar için de yapılabilmektedir. Ancak temelin eğilebilir olması halinde yatay yerdeşiftirmelerin temelin rijit olması halindeki orana çok daha fazla değerler aldıkları gözlenmektedir. Barajın her durumu için menba ve mansap yüzeyinde meydana gelen maksimum düşey yerdeşiftirmeler ise kret noktasına yaklaşılmasıyla çok farklı değerler aldıkları görülmektedir. Düşey yerdeşiftirmelerin, kret noktasındaki mutlak değerce maksimum değerleri mansap yüzeyinde menba yüzeyine oranla çok daha fazladır. Barajın boş ve dolu olması durumunda meydana gelen maksimum yerdeşiftirmelerin birbirlerine çok yakın değerler aldıkları gözlenmektedir.



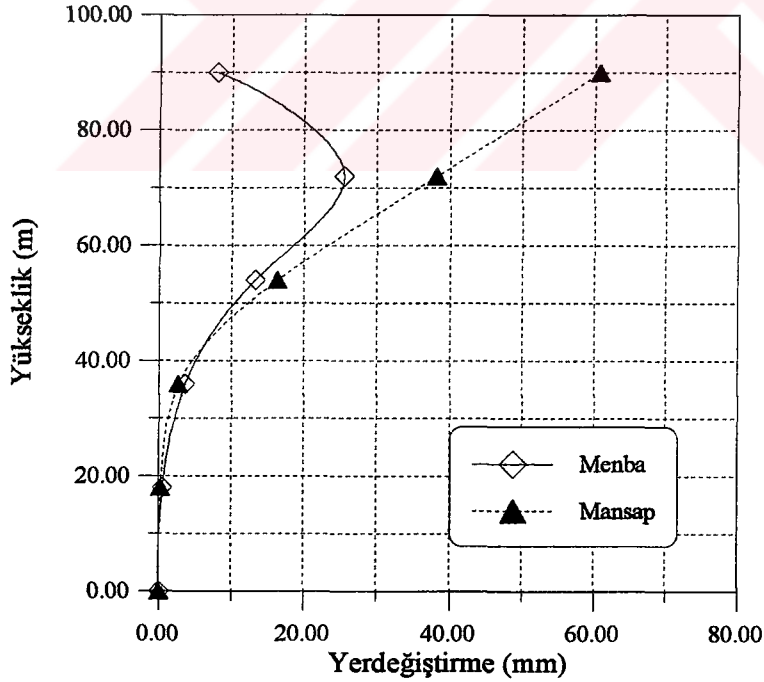
Şekil 98. Drucker-Prager Yöntemi ile lineer olmayan dinamik analizde, temelin rijit, barajın boş olması durumunda menba, mansap yüzeyindeki mutlak değerce maksimum yatay yerdeğiştirmelerin yükseklik boyunca değişimi



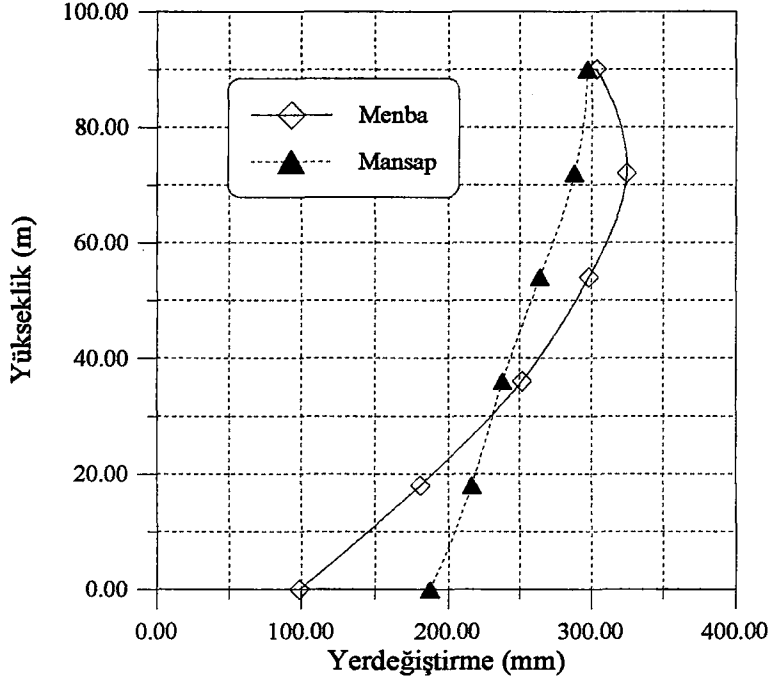
Şekil 99. Drucker-Prager Yöntemi ile lineer olmayan dinamik analizde, temelin rijit, barajın dolu olması durumunda menba, mansap yüzeyindeki mutlak değerce maksimum yatay yerdeğiştirmelerin yükseklik boyunca değişimi



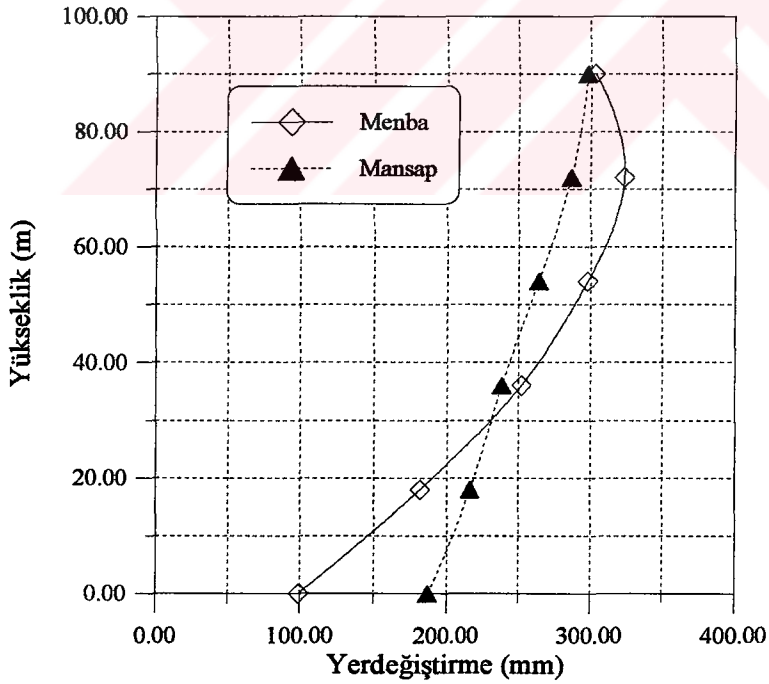
Şekil 100. Drucker-Prager Yöntemi ile lineer olmayan dinamik analizde, temelin rijit, barajın boş olması durumunda menba, mansap yüzeyindeki mutlak değerce maksimum düşey yerdeğistirmelerin yükseklik boyunca değışımi



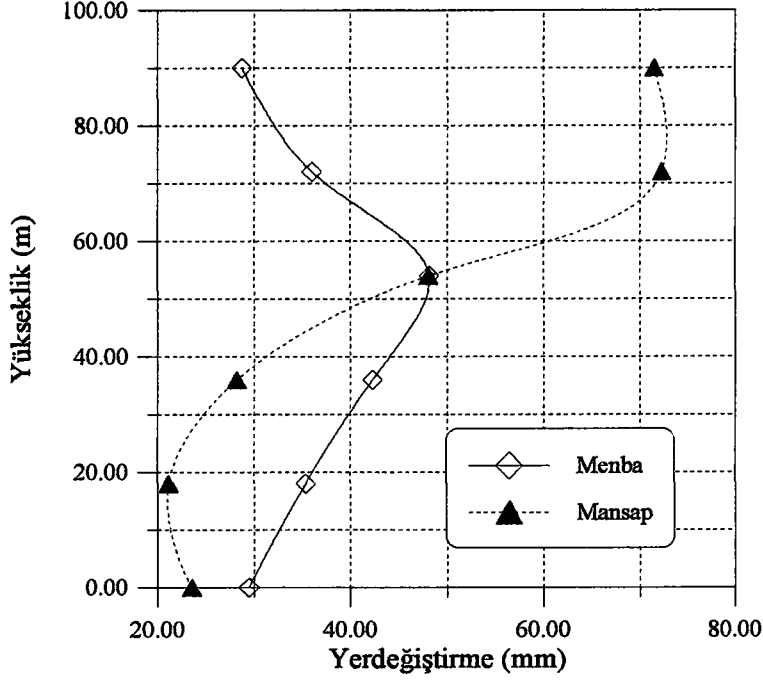
Şekil 101. Drucker-Prager Yöntemi ile lineer olmayan dinamik analizde, temelin rijit, barajın dolu olması durumunda menba, mansap yüzeyindeki mutlak değerce maksimum düşey yerdeğistirmelerin yükseklik boyunca değışımi



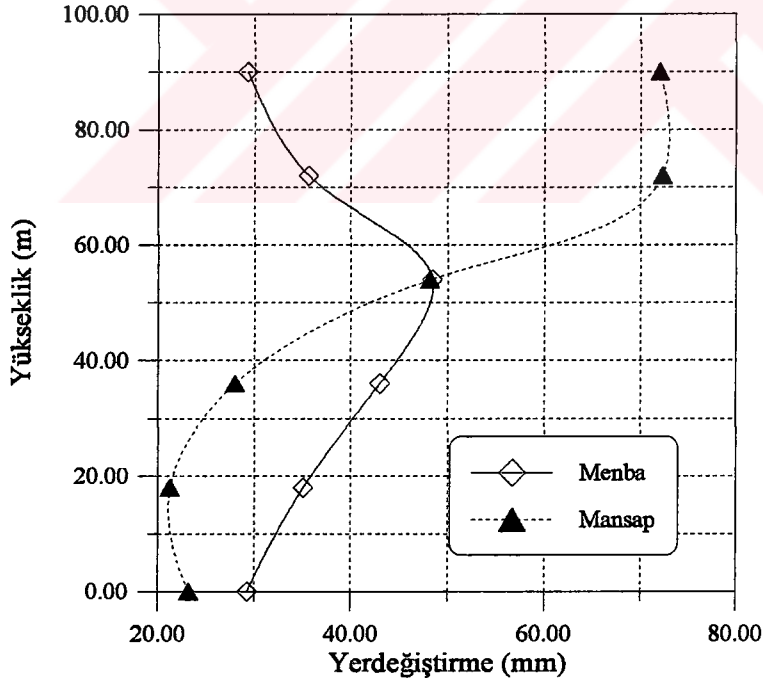
Şekil 102. Drucker-Prager Yöntemi ile lineer olmayan dinamik analizde, temelin eğilebilir, barajın boş olması durumunda menba, mansap yüzeyindeki mutlak değerce maksimum yatay yerdeğiştirmelerin yükseklik boyunca değişimi



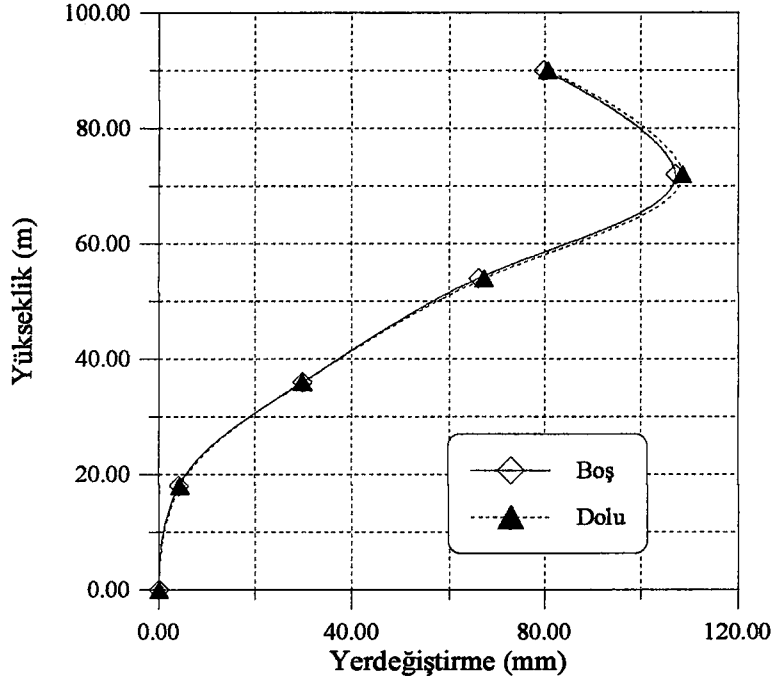
Şekil 103. Drucker-Prager Yöntemi ile lineer olmayan dinamik analizde, temelin eğilebilir, barajın dolu olması durumunda menba, mansap yüzeyindeki mutlak değerce maksimum yatay yerdeğiştirmelerin yükseklik boyunca değişimi



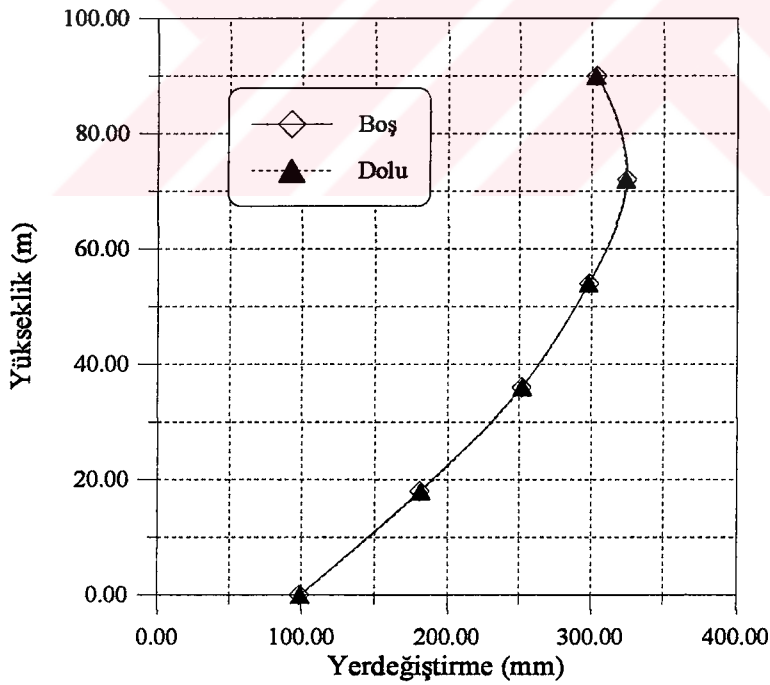
Şekil 104. Drucker-Prager Yöntemi ile lineer olmayan dinamik analizde, temelin eğilebilir, barajın boş olması durumunda menba, mansap yüzeyindeki mutlak değerce maksimum düşey yerdeğiştirmelerin yükseklik boyunca değişimi



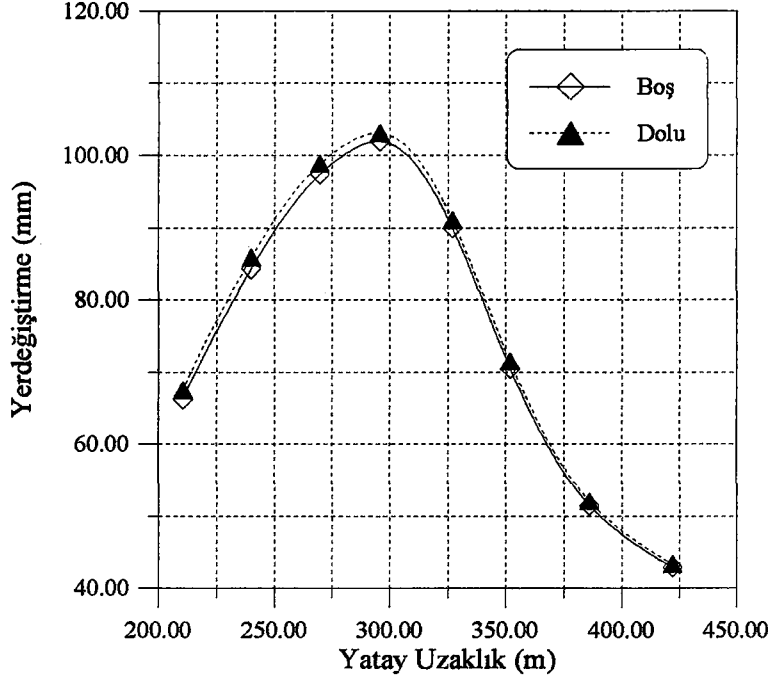
Şekil 105. Drucker-Prager Yöntemi ile lineer olmayan dinamik analizde, temelin eğilebilir, barajın dolu olması durumunda menba, mansap yüzeyindeki mutlak değerce maksimum düşey yerdeğiştirmelerin yükseklik boyunca değişimi



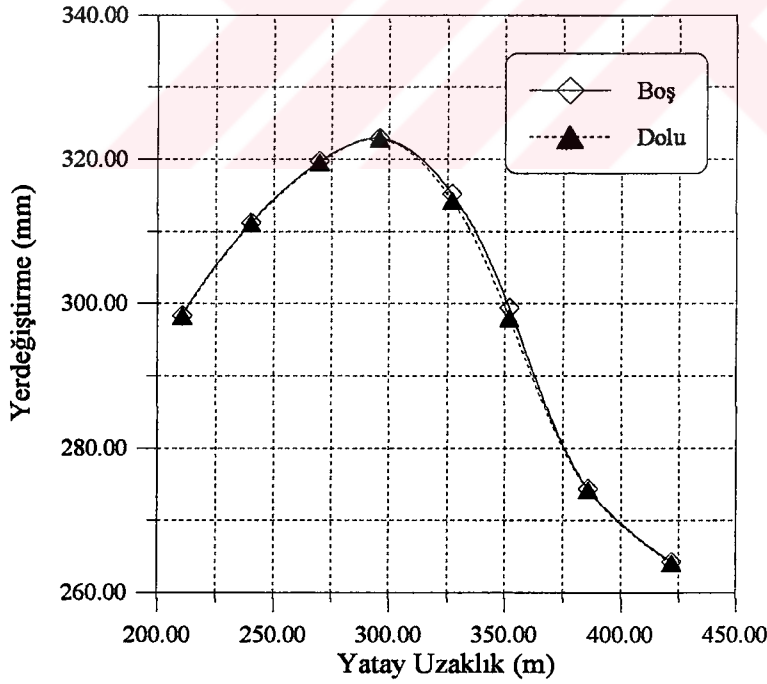
Şekil 106. Drucker-Prager Yöntemi ile lineer olmayan dinamik analizde, temelin rijit, barajın boş ve dolu olması durumunda menba yüzeyindeki mutlak değerce maksimum yatay yerdeğiştirmelerin yükseklik boyunca değişimi



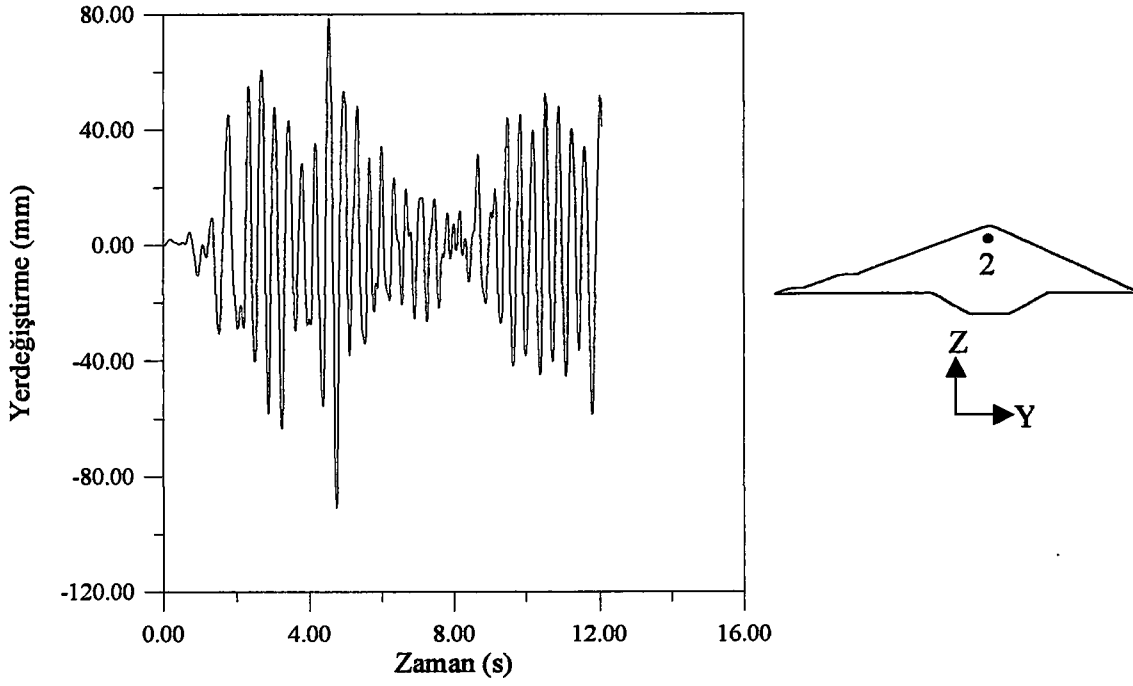
Şekil 107. Drucker-Prager Yöntemi ile lineer olmayan dinamik analizde, temelin eğilebilir, barajın boş ve dolu olması durumunda menba yüzeyindeki mutlak değerce maksimum yatay yerdeğiştirmelerin yükseklik boyunca değişimi



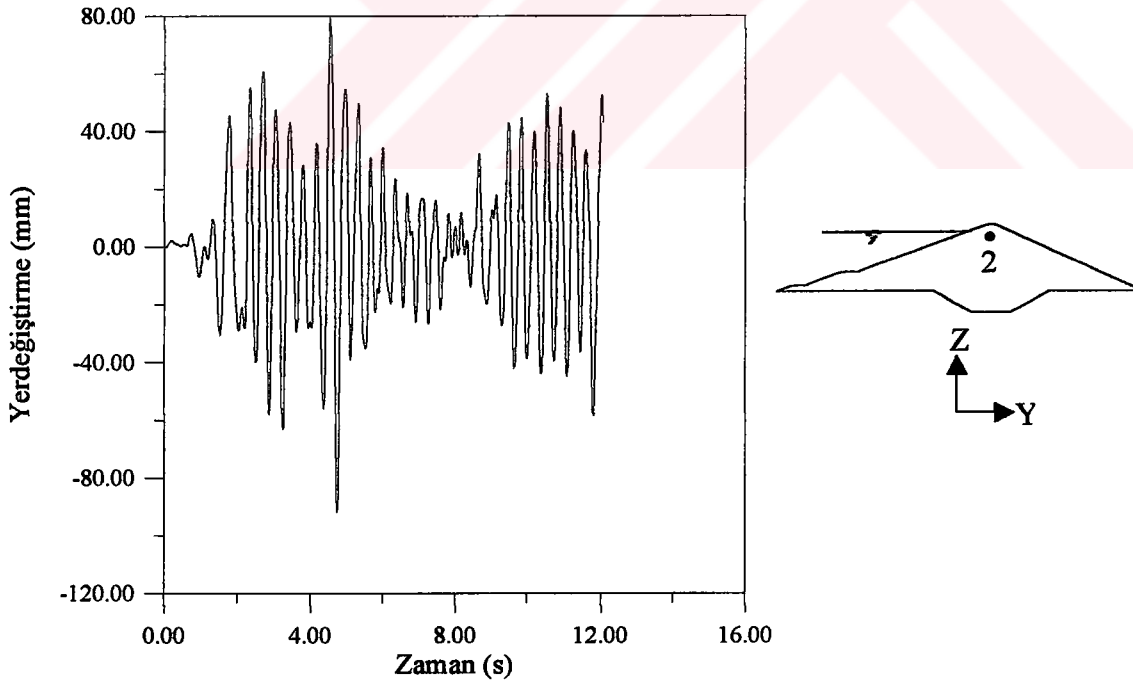
Şekil 108. Drucker-Prager Yöntemi ile lineer olmayan dinamik analizde, temelin rijit, barajın boş ve dolu olması durumunda II-II kesitindeki mutlak değerce maksimum yatay yerdeğiştirmelerin yatay uzaklık boyunca değişimi



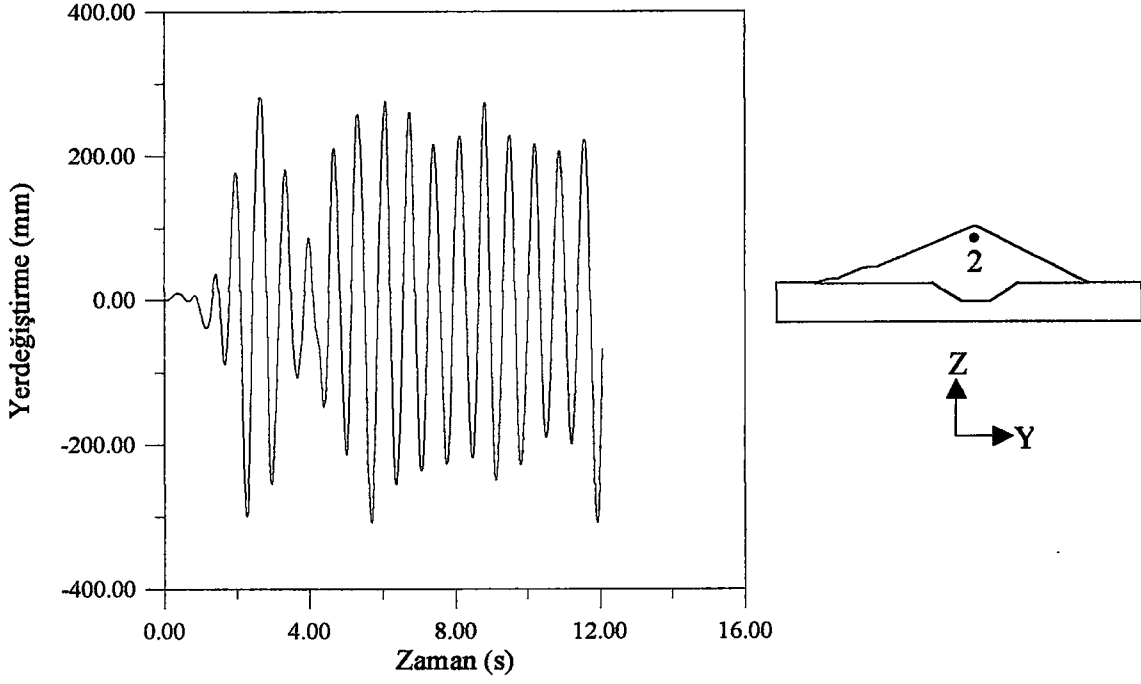
Şekil 109. Drucker-Prager Yöntemi ile lineer olmayan dinamik analizde, temelin eğilebilir, barajın boş ve dolu olması durumunda II-II kesitindeki mutlak değerce maksimum yatay yerdeğiştirmelerin yatay uzaklık boyunca değişimi



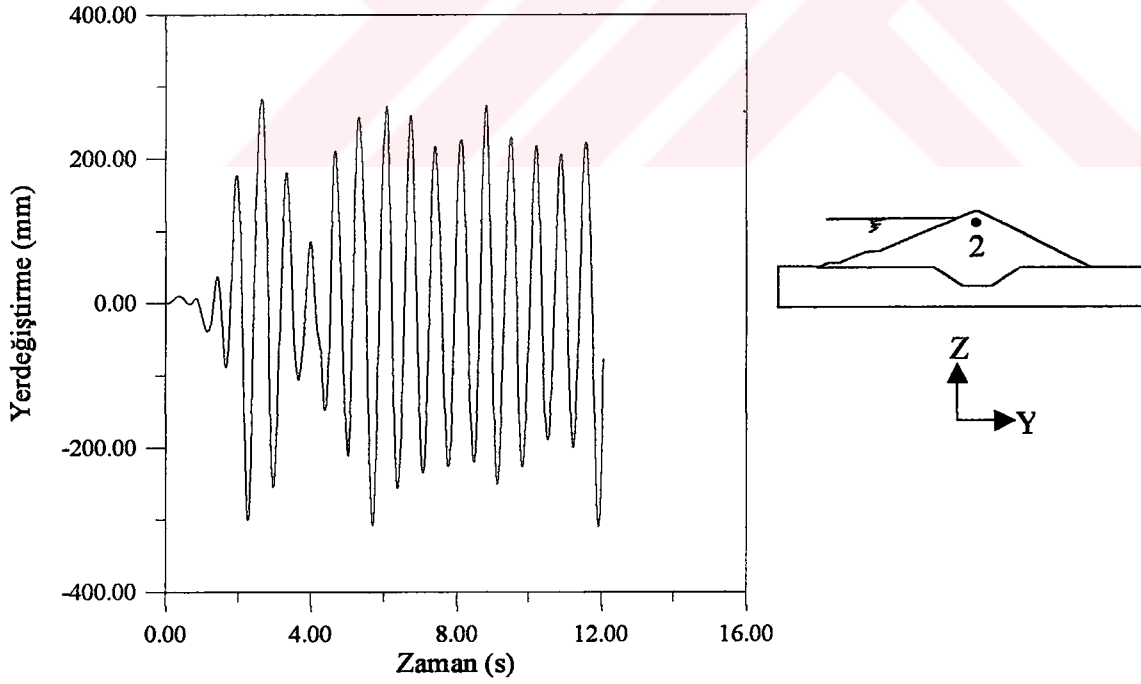
Şekil 110. Drucker-Prager Yöntemi ile lineer olmayan dinamik analizde, temelin rijit, barajın boş olması durumunda 2 nolu düğüm noktasında meydana gelen yatay yerdeğiştirmelerin zamanla değişimi



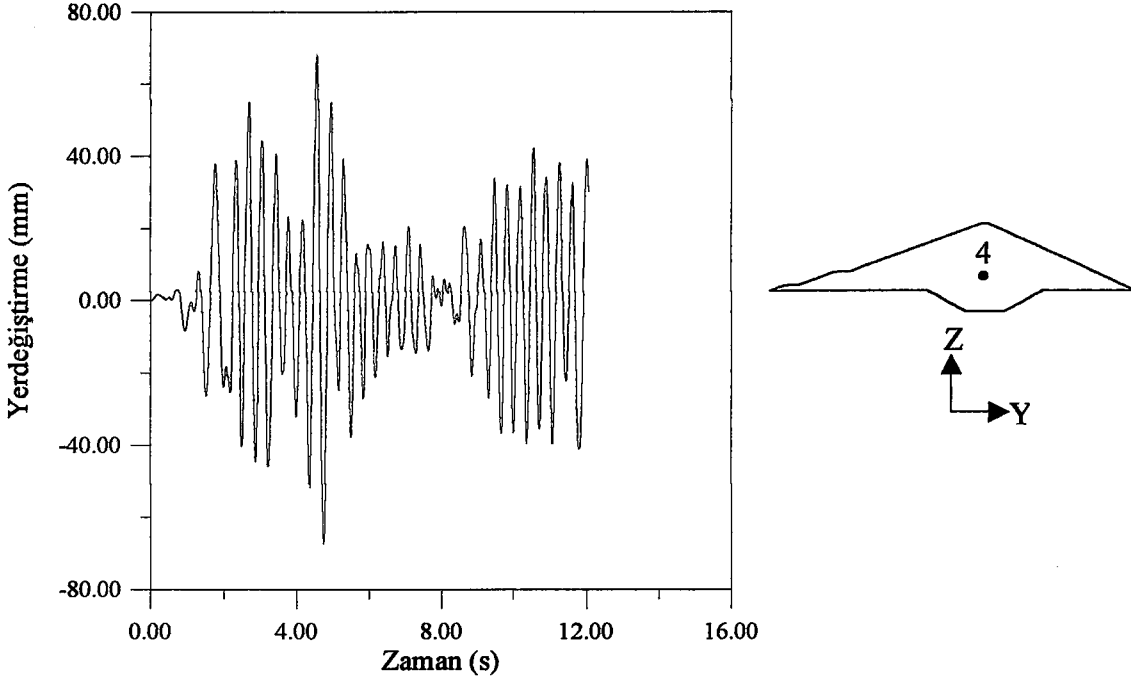
Şekil 111. Drucker-Prager Yöntemi ile lineer olmayan dinamik analizde, temelin rijit, barajın dolu olması durumunda 2 nolu düğüm noktasında meydana gelen yatay yerdeğiştirmelerin zamanla değişimi



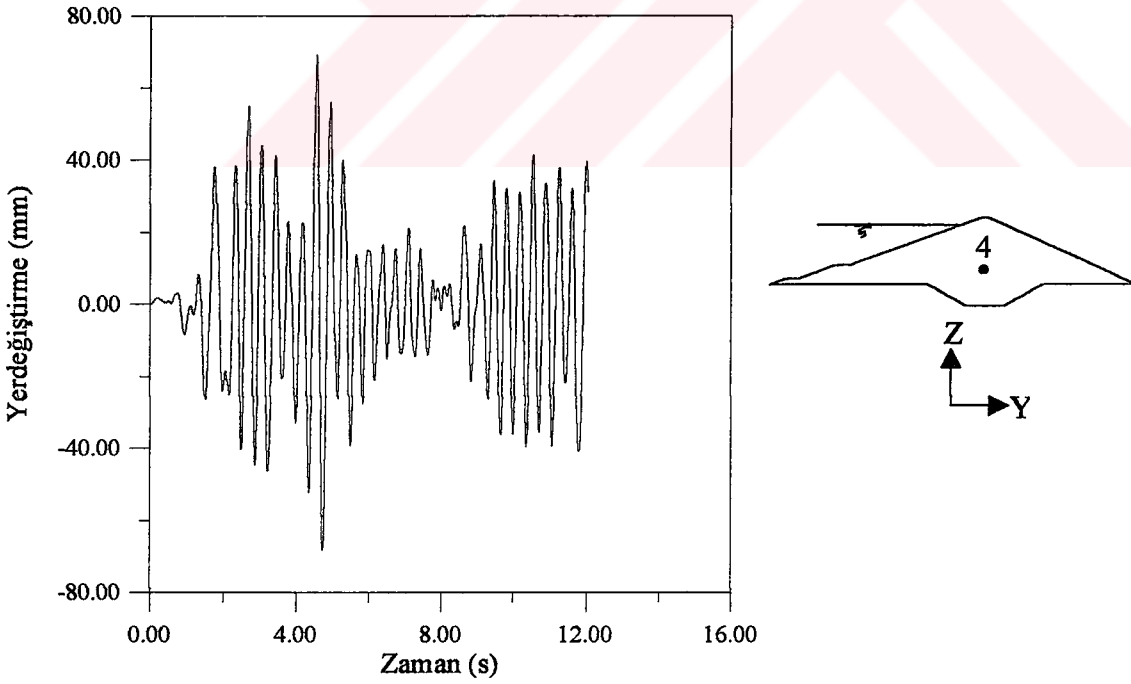
Şekil 112. Drucker-Prager Yöntemi ile lineer olmayan dinamik analizde, temelin eğilebilir, barajın boş olması durumunda 2 nolu düğüm noktasında meydana gelen yatay yerdeğiştirmelerin zamanla değişimi



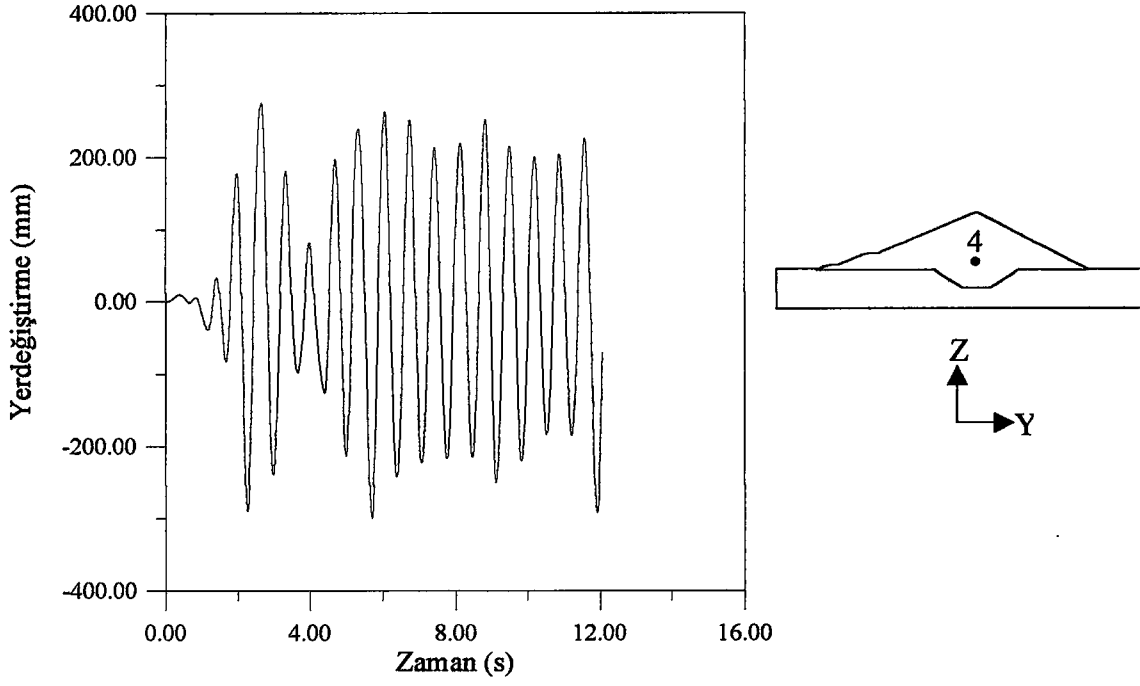
Şekil 113. Drucker-Prager Yöntemi ile lineer olmayan dinamik analizde, temelin eğilebilir, barajın dolu olması durumunda 2 nolu düğüm noktasında meydana gelen yatay yerdeğiştirmelerin zamanla değişimi



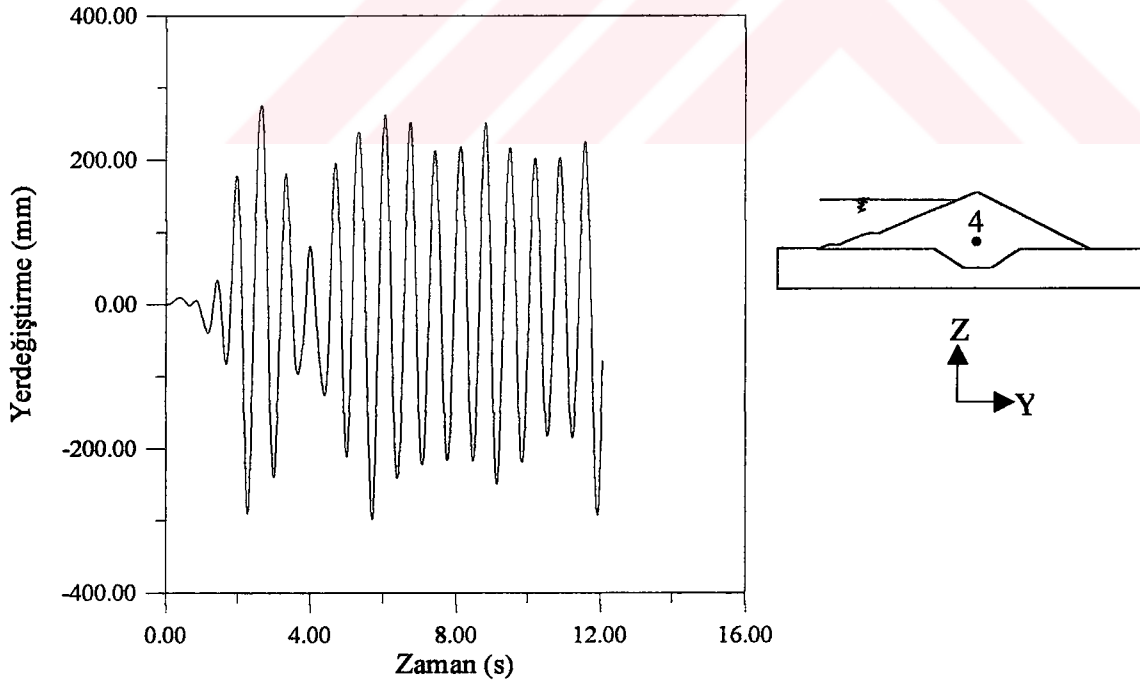
Şekil 114. Drucker-Prager Yöntemi ile lineer olmayan dinamik analizde, temelin rijit, barajın boş olması durumunda 4 nolu düğüm noktasında meydana gelen yatay yerdeğiştirmelerin zamanla değişimi



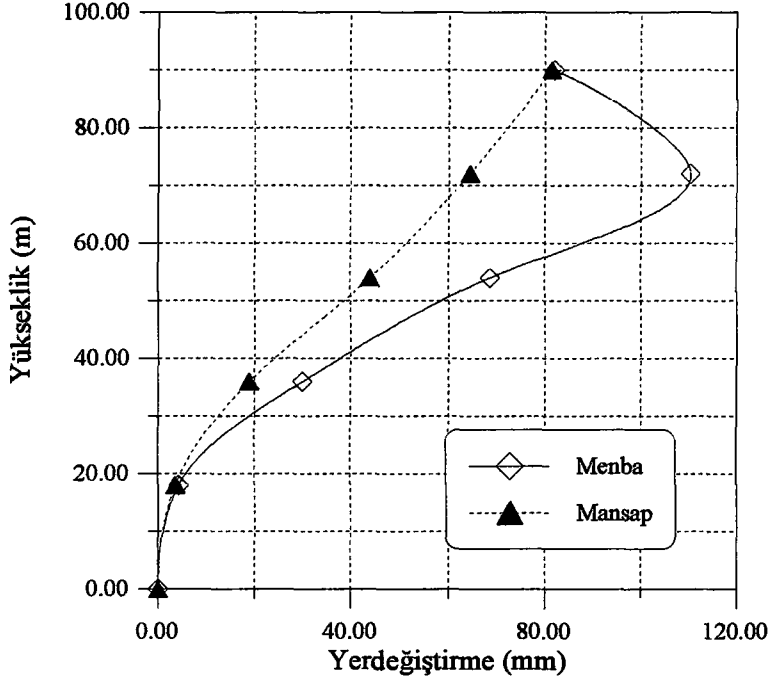
Şekil 115. Drucker-Prager Yöntemi ile lineer olmayan dinamik analizde, temelin rijit, barajın dolu olması durumunda 4 nolu düğüm noktasında meydana gelen yatay yerdeğiştirmelerin zamanla değişimi



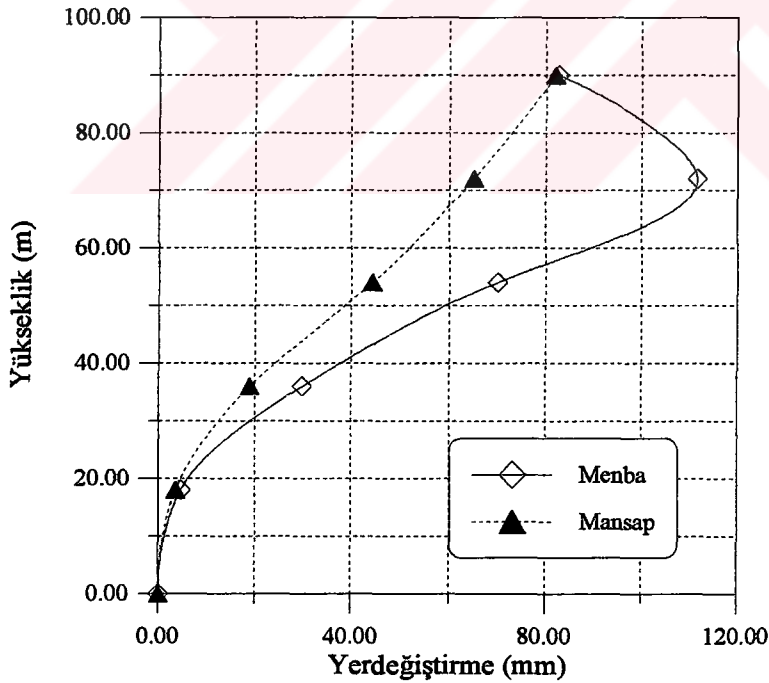
Şekil 116. Drucker-Prager Yöntemi ile lineer olmayan dinamik analizde, temelin eğilebilir, barajın boş olması durumunda 4 nolu düğüm noktasında meydana gelen yatay yerdeğiştirmelerin zamanla değişimi



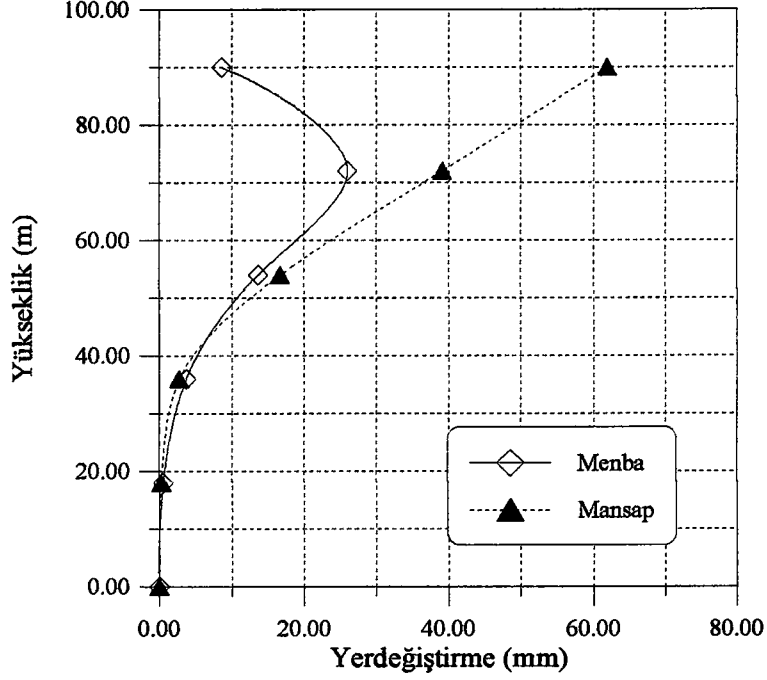
Şekil 117. Drucker-Prager Yöntemi ile lineer olmayan dinamik analizde, temelin eğilebilir, barajın dolu olması durumunda 4 nolu düğüm noktasında meydana gelen yatay yerdeğiştirmelerin zamanla değişimi



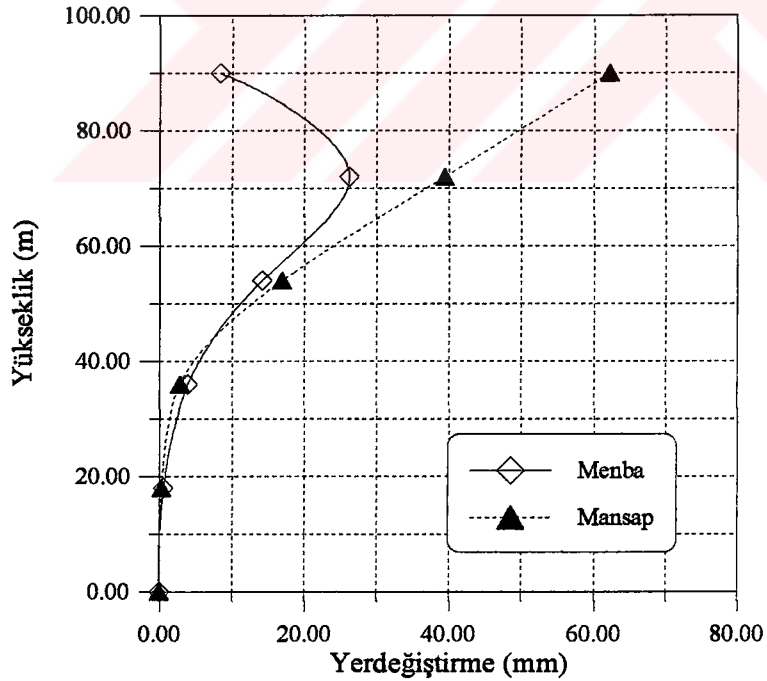
Şekil 118. Eğri Tanımlama Yöntemi ile lineer olmayan dinamik analizde, temelin rijit, barajın boş olması durumunda menba, mansap yüzeyindeki mutlak değerce maksimum yatay yerdeğiştirmelerin yükseklik boyunca değişimi



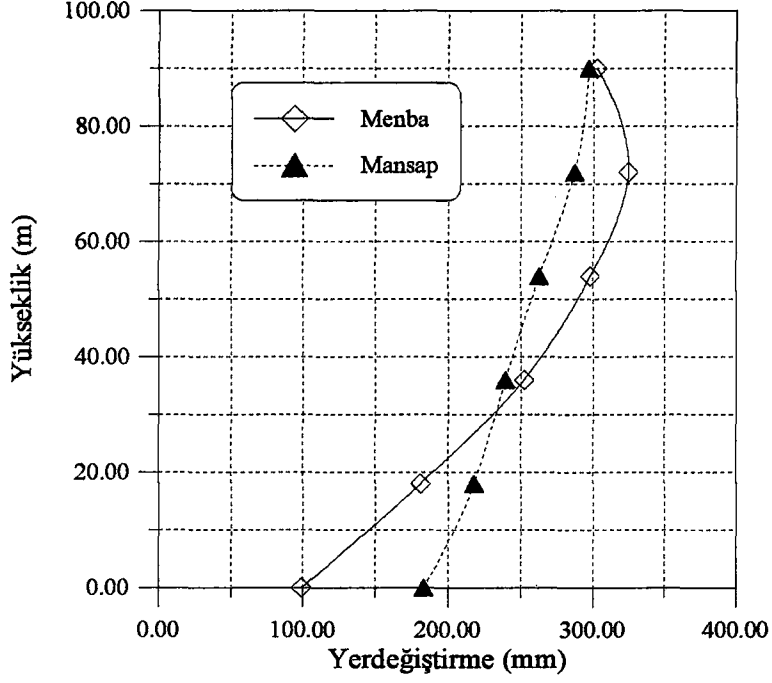
Şekil 119. Eğri Tanımlama Yöntemi ile lineer olmayan dinamik analizde, temelin rijit, barajın dolu olması durumunda menba, mansap yüzeyindeki mutlak değerce maksimum yatay yerdeğiştirmelerin yükseklik boyunca değişimi



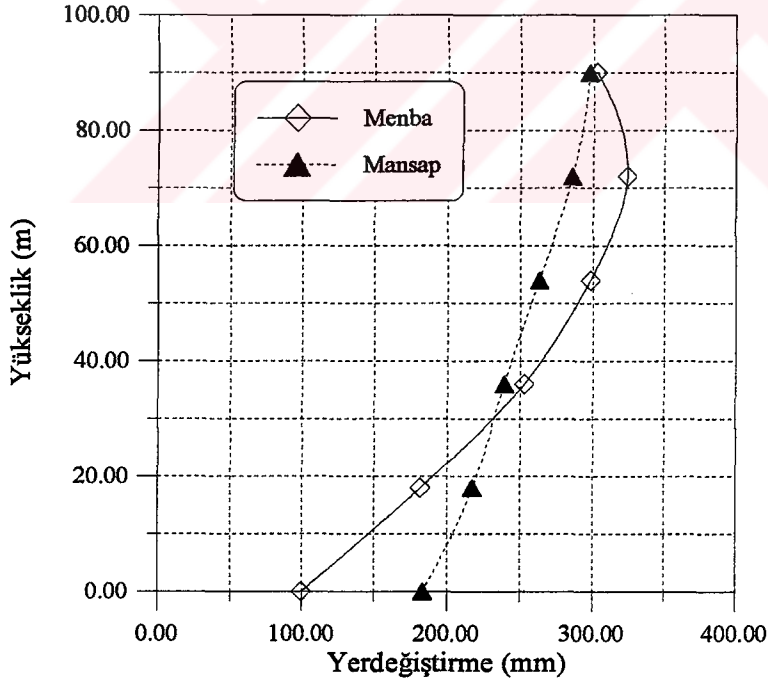
Şekil 120. Eğri Tanımlama Yöntemi ile lineer olmayan dinamik analizde, temelin rijit, barajın boş olması durumunda menba, mansap yüzeyindeki mutlak değerce maksimum düşey yerdeğiştirmelerin yükseklik boyunca değişimi



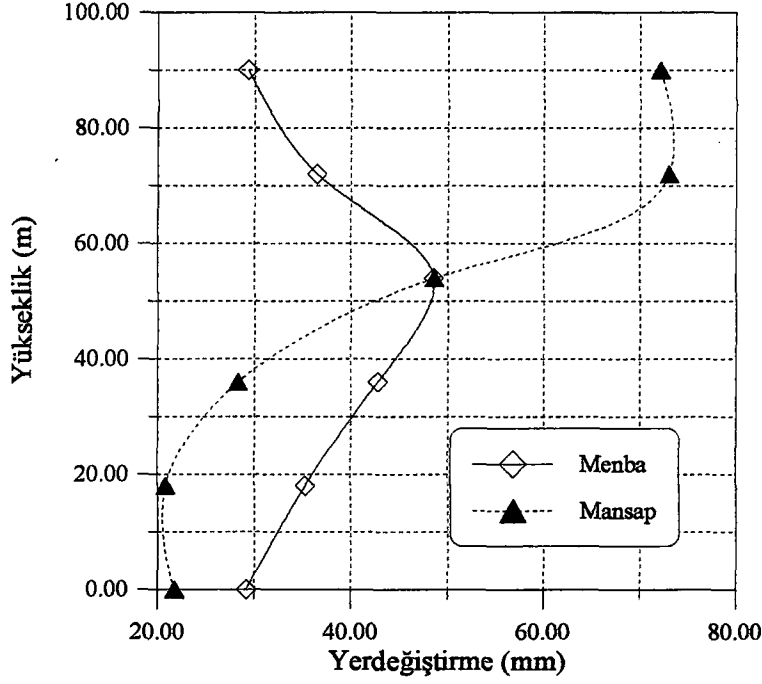
Şekil 121. Eğri Tanımlama Yöntemi ile lineer olmayan dinamik analizde, temelin rijit, barajın dolu olması durumunda menba, mansap yüzeyindeki mutlak değerce maksimum yatay yerdeğiştirmelerin yükseklik boyunca değişimi



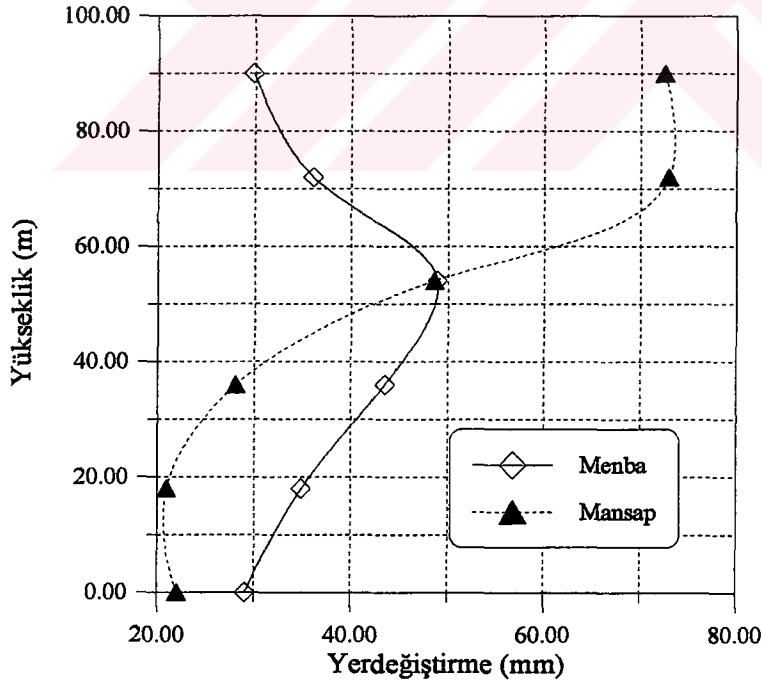
Şekil 122. Eğri Tanımlama Yöntemi ile lineer olmayan dinamik analizde, temelin eğilebilir, barajın boş olması durumunda menba, mansap yüzeyindeki mutlak değerce maksimum yatay yerdeğiştirmelerin yükseklik boyunca değişimi



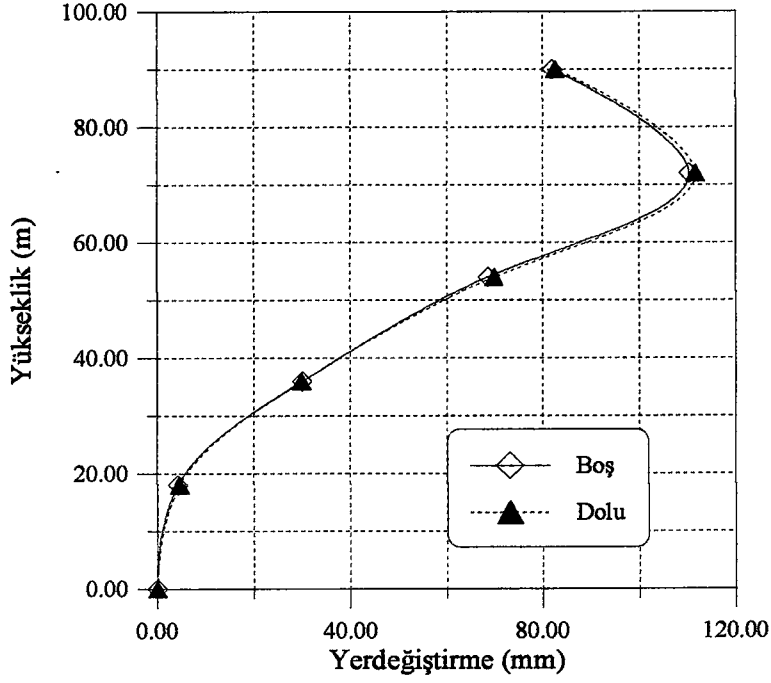
Şekil 123. Eğri Tanımlama Yöntemi ile lineer olmayan dinamik analizde, temelin eğilebilir, barajın dolu olması durumunda menba, mansap yüzeyindeki mutlak değerce maksimum yatay yerdeğiştirmelerin yükseklik boyunca değişimi



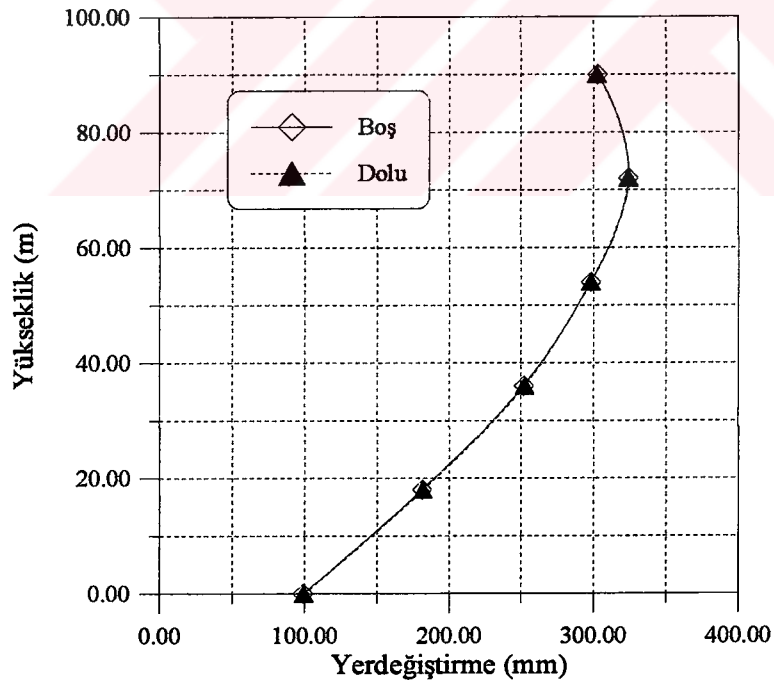
Şekil 124. Eğri Tanımlama Yöntemi ile lineer olmayan dinamik analizde, temelin eğilebilir, barajın boş olması durumunda menba, mansap yüzeyindeki mutlak değerce maksimum düşey yerdeğiştirmelerin yükseklik boyunca değişimi



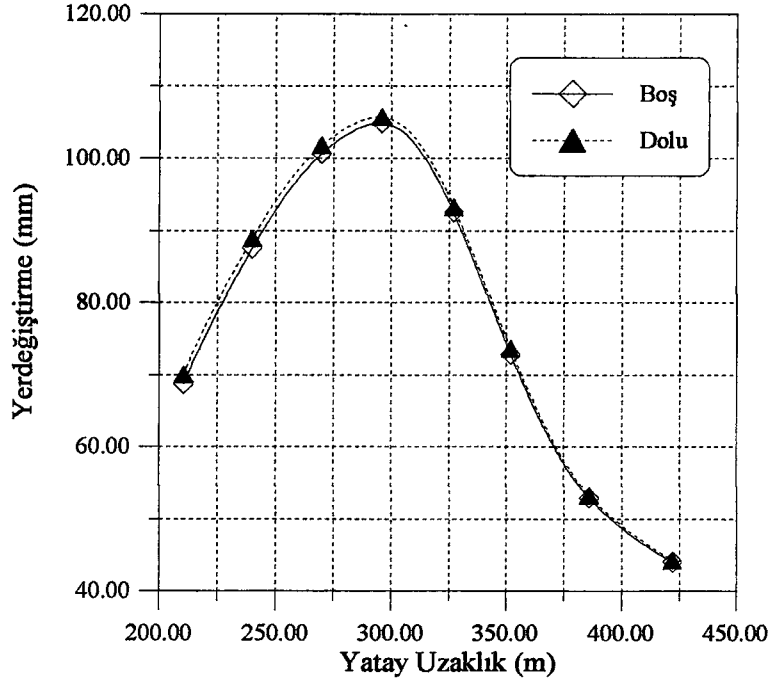
Şekil 125. Eğri Tanımlama Yöntemi ile lineer olmayan dinamik analizde, temelin eğilebilir, barajın boş olması durumunda menba, mansap yüzeyindeki mutlak değerce maksimum düşey yerdeğiştirmelerin yükseklik boyunca değişimi



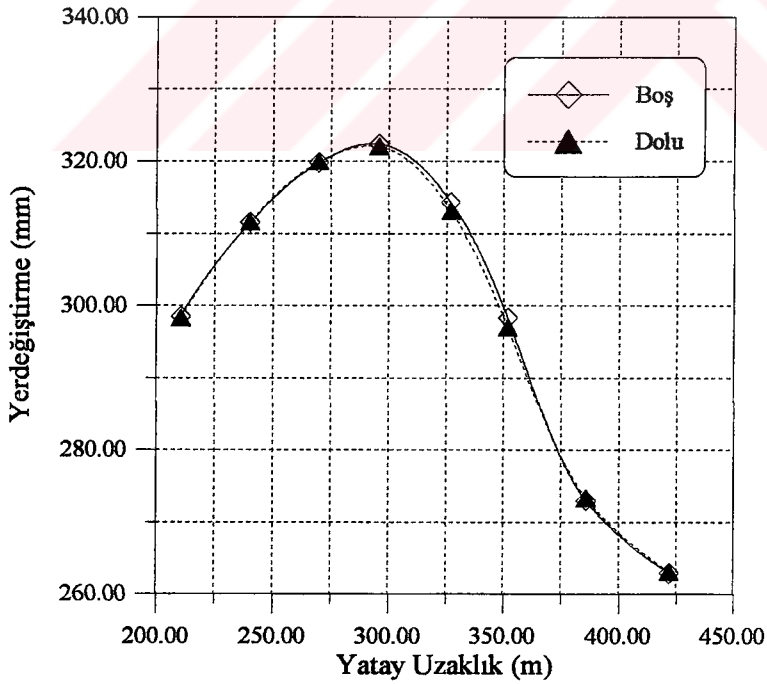
Şekil 126. Eğri Tanımlama Yöntemi ile lineer olmayan dinamik analizde, temelin rijit, barajın boş ve dolu olması durumunda menba yüzeyindeki mutlak değerce maksimum yatay yerdeğiştirmelerin yükseklik boyunca değişimi



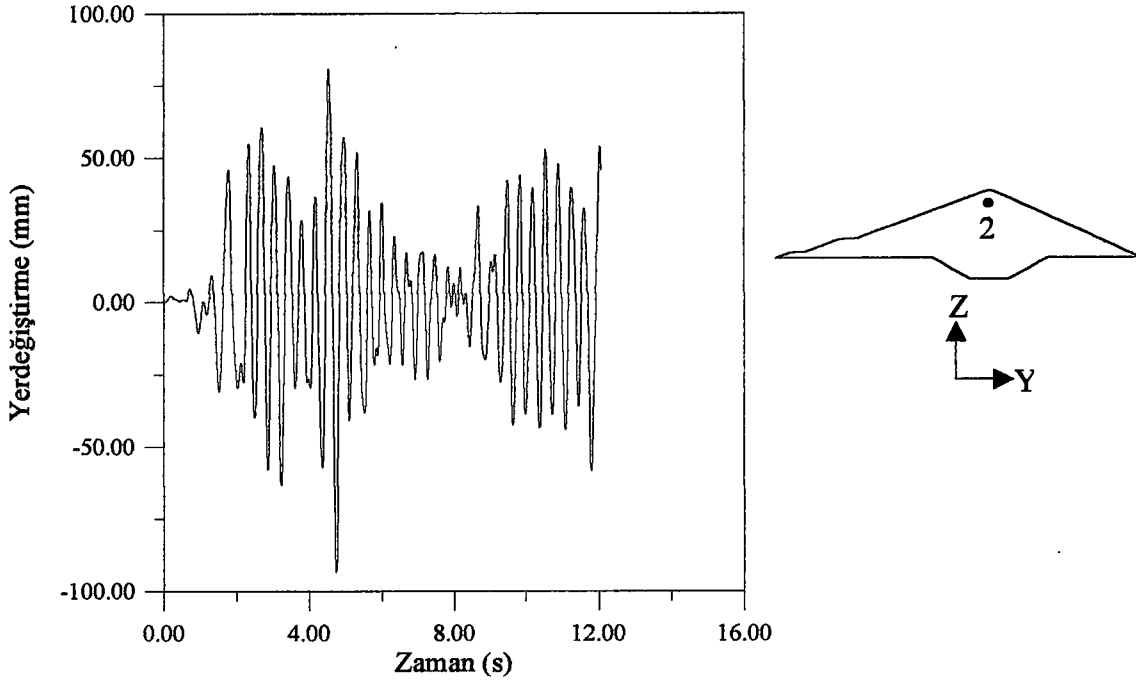
Şekil 127. Eğri Tanımlama Yöntemi ile lineer olmayan dinamik analizde, temelin eğilebilir, barajın boş ve dolu olması durumunda menba yüzeyindeki mutlak değerce maksimum yatay yerdeğiştirmelerin yükseklik boyunca değişimi



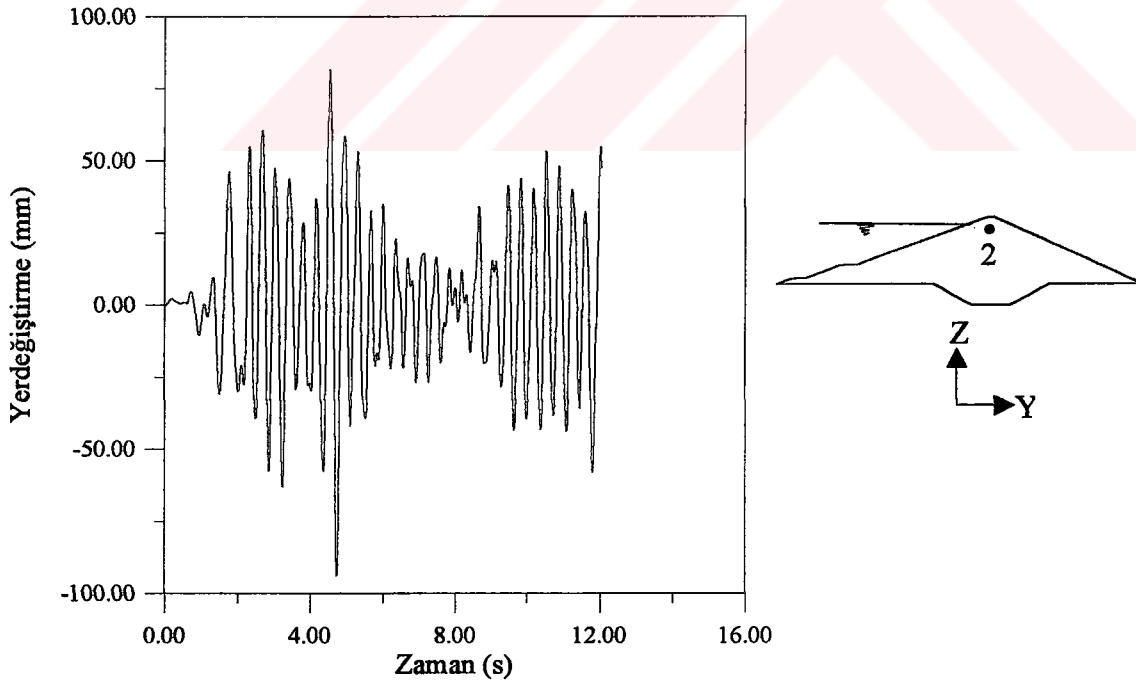
Şekil 128. Eğri Tanımlama Yöntemi ile lineer olmayan dinamik analizde, temelin rijit, barajın boş ve dolu olması durumunda II-II kesitindeki mutlak değerce maksimum yatay yerdeğiştirmelerin yatay uzaklık boyunca değişimi



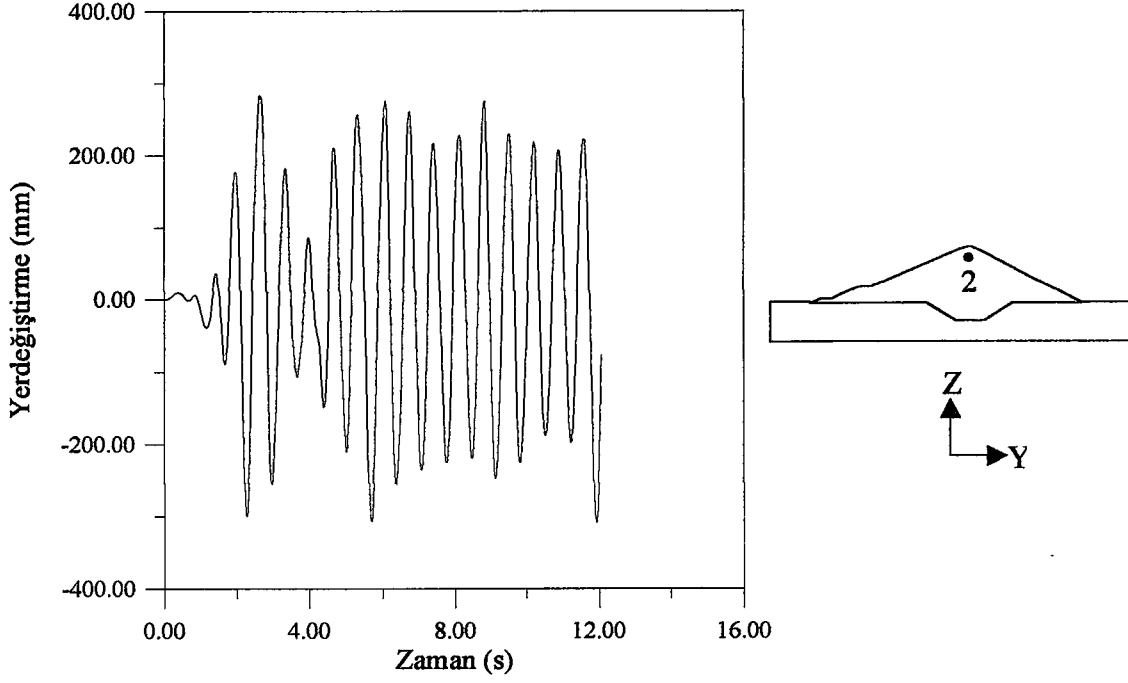
Şekil 129. Eğri Tanımlama Yöntemi ile lineer olmayan dinamik analizde, temelin eğilebilir, barajın boş ve dolu olması durumunda II-II kesitindeki mutlak değerce maksimum yatay yerdeğiştirmelerin yatay uzaklık boyunca değişimi



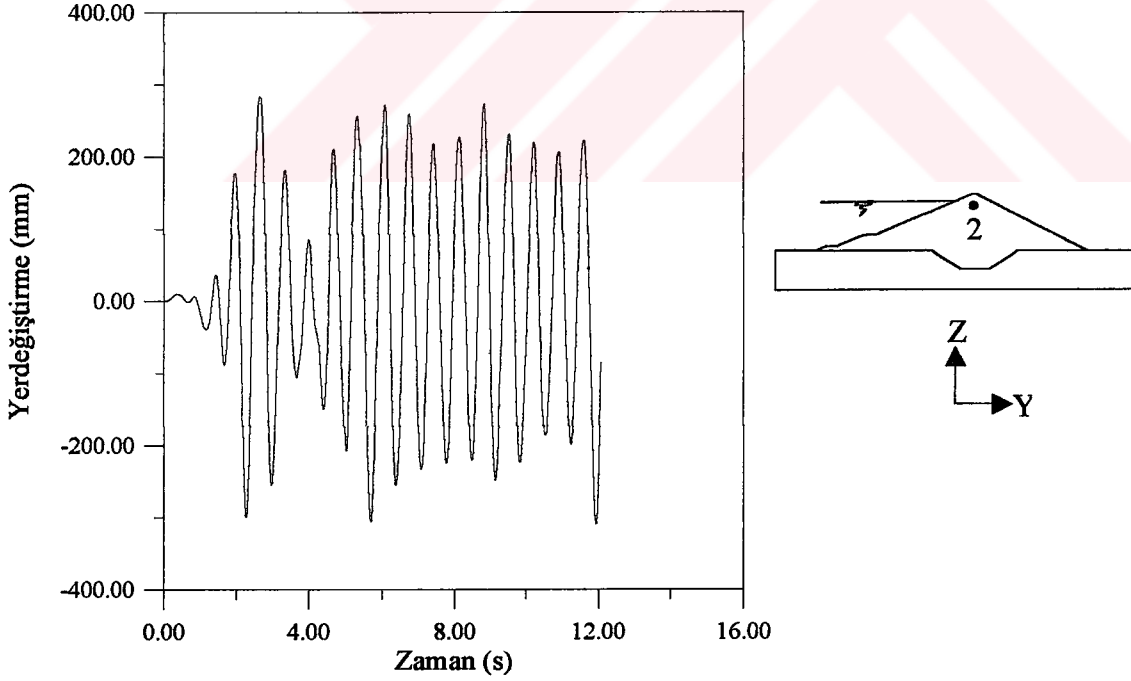
Şekil 130. Eğri Tanımlama Yöntemi ile lineer olmayan dinamik analizde, temelin rijit, barajın boş olması durumunda 2 nolu düğüm noktasında meydana gelen yatay yerdeğiştirmelerin zamanla değişimi



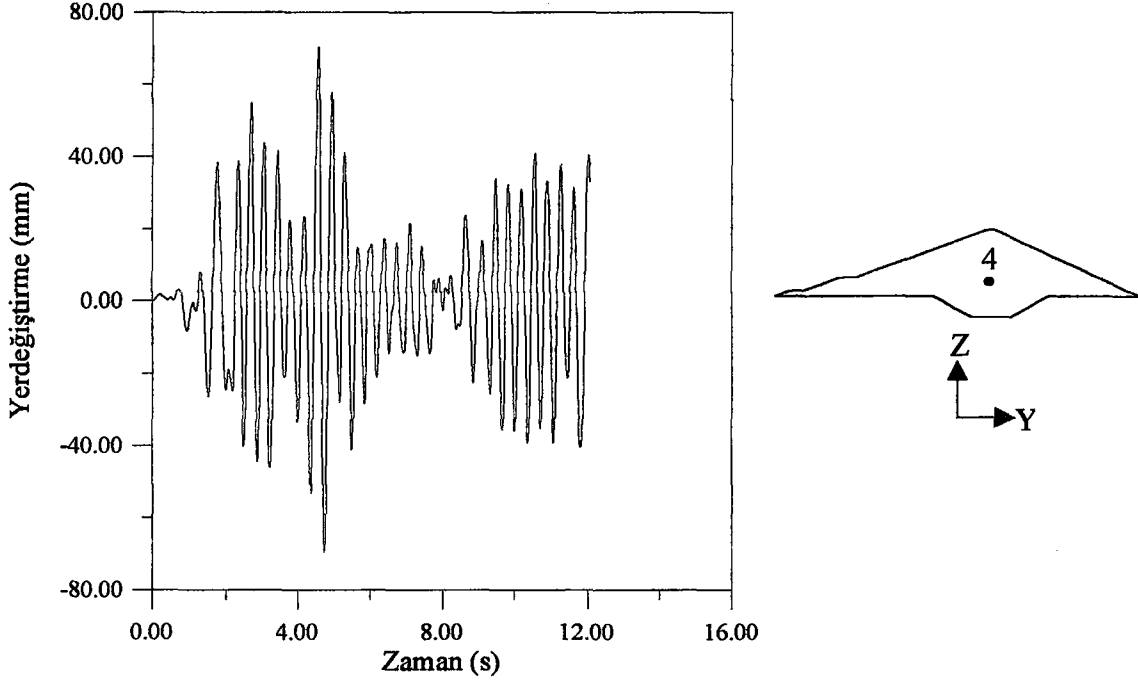
Şekil 131. Eğri Tanımlama Yöntemi ile lineer olmayan dinamik analizde, temelin rijit, barajın dolu olması durumunda 2 nolu düğüm noktasında meydana gelen yatay yerdeğiştirmelerin zamanla değişimi



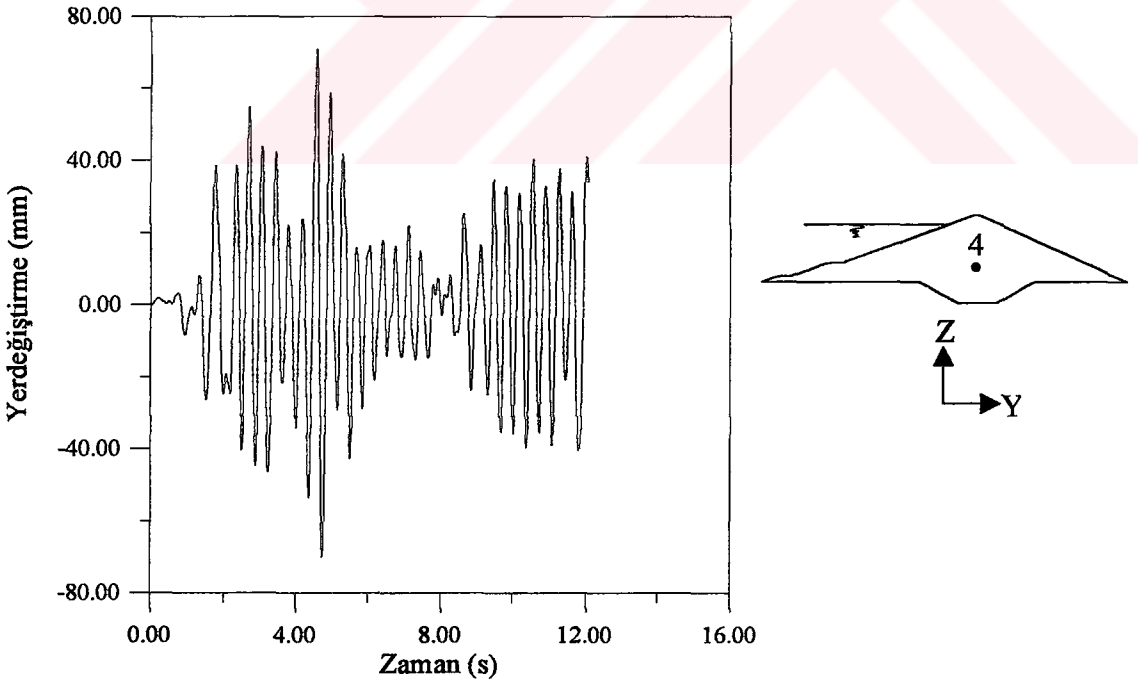
Şekil 132. Eğri Tanımlama Yöntemi ile lineer olmayan dinamik analizde, temelin eğilebilir, barajın boş olması durumunda 2 nolu düğüm noktasında meydana gelen yatay yerdeğiştirmelerin zamanla değişimi



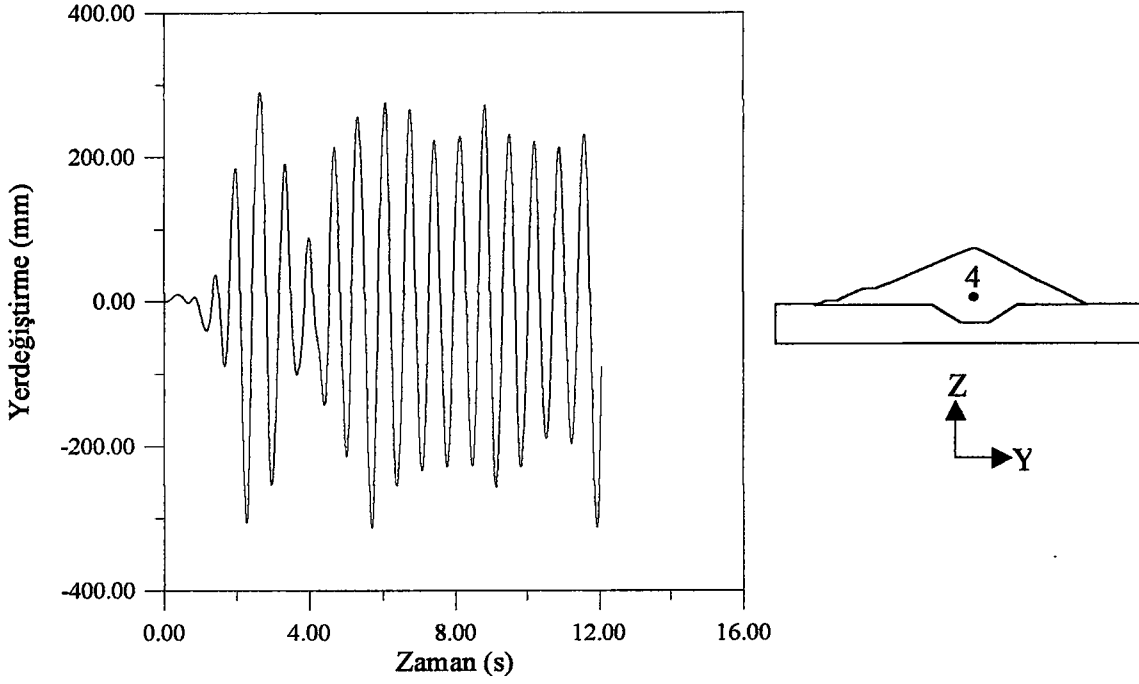
Şekil 133. Eğri Tanımlama Yöntemi ile lineer olmayan dinamik analizde, temelin eğilebilir, barajın dolu olması durumunda 2 nolu düğüm noktasında meydana gelen yatay yerdeğiştirmelerin zamanla değişimi



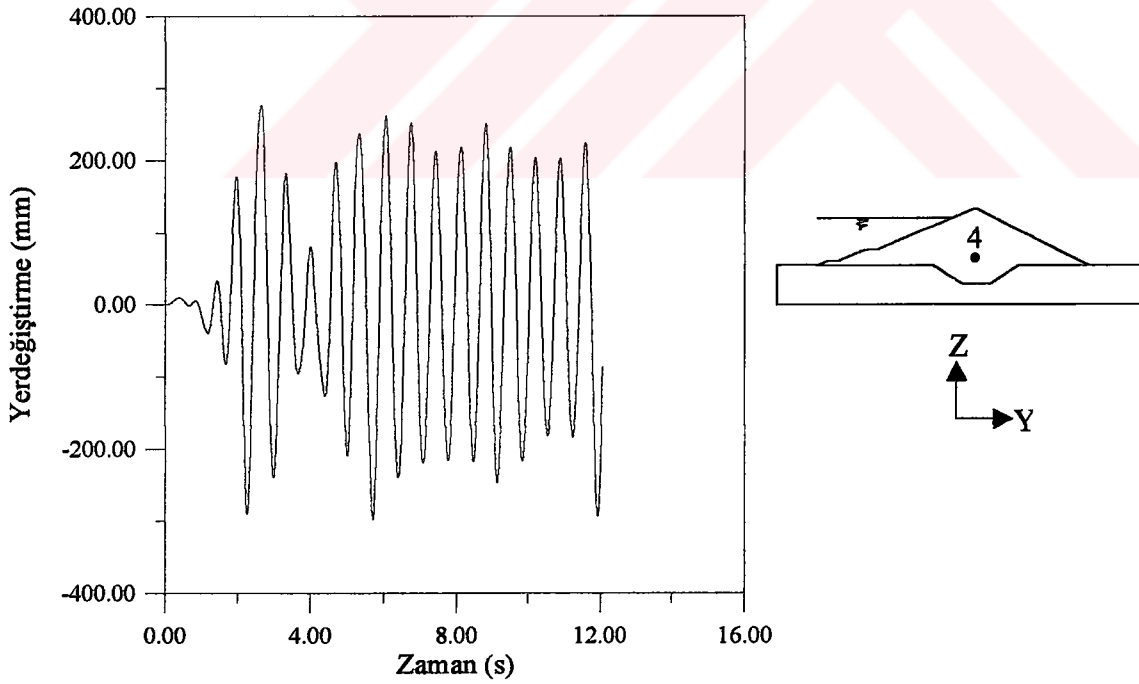
Şekil 134. Eğri Tanımlama Yöntemi ile lineer olmayan dinamik analizde, temelin rijit, barajın boş olması durumunda 4 nolu düğüm noktasında meydana gelen yatay yerdeğiştirmelerin zamanla değişimi



Şekil 135. Eğri Tanımlama Yöntemi ile lineer olmayan dinamik analizde, temelin rijit, barajın dolu olması durumunda 4 nolu düğüm noktasında meydana gelen yatay yerdeğiştirmelerin zamanla değişimi



Şekil 136. Eğri Tanımlama Yöntemi ile lineer olmayan dinamik analizde, temelin eğilebilir, barajın boş olması durumunda 4 nolu düğüm noktasında meydana gelen yatay yerdeğiştirmelerin zamanla değişimi



Şekil 137. Eğri Tanımlama Yöntemi ile lineer olmayan dinamik analizde, temelin eğilebilir, barajın dolu olması durumunda 4 nolu düğüm noktasında meydana gelen yatay yerdeğiştirmelerin zamanla değişimi

3.3. Lineer ve Lineer Olmayan Dinamik Analiz Sonuçlarının Karşılaştırılması

Bu kısımda barajın boş ve dolu, temelin rijit ve eğilebilir olması durumlarında menba yüzeyinde yükseklik boyunca, Şekil 23-24, meydana gelen maksimum yatay yerdeğiştirmelerin lineer ve lineer olmayan dinamik analizler için karşılaştırılmaları Şekil 138-141'de, yatay uzaklık boyunca II-II kesitinde meydana gelen maksimum yatay yerdeğiştirmelerin karşılaştırmaları ise Şekil 142-145'de gösterilmektedir. Ayrıca seçilen düğüm noktalarında Drucker-Prager ve Eğri Tanımlama Yöntemleri ile lineer olmayan dinamik analizde elde edilen yerdeğiştirmeler birbirleriyle karşılaştırılmaktadırlar (Tablo 11-18).

Elde edilen sonuçlar değerlendirildiğinde, barajın boş ve dolu, temelin rijit ve eğilebilir olması durumunda menba yüzeyinde meydana gelen yerdeğiştirmeler lineer olmayan dinamik analizde lineer dinamik analizdekine oranla çok daha büyük değerler aldıkları gözlenmektedir. Eğri Tanımlama Yöntemi ile tanımlanan malzeme modeliyle lineer olmayan dinamik analiz sonucunda elde edilen yerdeğiştirmelerin Drucker-Prager Yöntemine göre elde edilen değerlere oranla bir miktar daha büyük olduğu gözlenmektedir. Lineer olmayan dinamik analizlerde elde edilen gerilmelerin de yerdeğiştirmelere benzer olarak, Eğri Tanımlama Yönteminde daha büyük değerler aldıkları görülmektedir.

Tablo 11. Lineer ve lineer olmayan dinamik analizlerde temelin rijit, barajın boş olması durumunda menba yüzeyindeki mutlak değerce maksimum yatay yerdeğıştirmelerin yükseklik boyunca değışimlerinin sayısal değeri

Yükseklik (m)	Yatay Yerdeğıştirme (mm)		
	Lineer Dinamik Analiz	Lineer Olmayan Dinamik Analiz	
		Drucker-Prager Yöntemi	Eğri Tanımlama Yöntemi
90	58.51	79.8668	82.0651
72	77.86	107.253	110.364
54	52.07	66.2516	68.7287
36	22.41	29.7869	29.9259
18	1.913	4.06496	4.23075
0	0	0	0

Tablo 12. Lineer ve lineer olmayan dinamik analizlerde temelin rijit, barajın dolu olması durumunda menba yüzeyindeki mutlak değerce maksimum yatay yerdeğıştirmelerin yükseklik boyunca değışimlerinin sayısal değeri

Yükseklik (m)	Yatay Yerdeğıştirme (mm)		
	Lineer Dinamik Analiz	Lineer Olmayan Dinamik Analiz	
		Drucker-Prager Yöntemi	Eğri Tanımlama Yöntemi
90	59.08	80.7036	82.7609
72	78.85	108.6790	111.6530
54	52.67	67.4588	70.0068
36	22.81	29.7424	29.8361
18	1.984	4.35765	4.5975
0	0	0	0

Tablo 13. Lineer ve lineer olmayan dinamik analizlerde temelin eğilebilir, barajın boş olması durumunda menba yüzeyindeki mutlak değerce maksimum yatay yerdeğiştirmelerin yükseklik boyunca değişimlerinin sayısal değerler

Yükseklik (m)	Yatay Yerdeğiştirme (mm)		
	Lineer Dinamik Analiz	Lineer Olmayan Dinamik Analiz	
		Drucker-Prager Yöntemi	Eğri Tanımlama Yöntemi
90	265.4	303.274	302.8930
72	287.9	324.612	324.2890
54	260.8	298.363	298.509
36	213.4	251.625	252.133
18	153.0	180.737	180.967
0	81.06	98.510	98.6762

Tablo 14. Lineer ve lineer olmayan dinamik analizlerde temelin eğilebilir, barajın dolu olması durumunda menba yüzeyindeki mutlak değerce maksimum yatay yerdeğiştirmelerin yükseklik boyunca değişimlerinin sayısal değerleri

Yükseklik (m)	Yatay Yerdeğiştirme (mm)		
	Lineer Dinamik Analiz	Lineer Olmayan Dinamik Analiz	
		Drucker-Prager Yöntemi	Eğri Tanımlama Yöntemi
90	265.4	302.911	302.579
72	287.8	323.994	324.180
54	260.7	298.233	298.324
36	213.4	252.175	252.789
18	152.9	181.507	181.722
0	81.0	99.000	99.144

Tablo 15. Lineer ve lineer olmayan dinamik analizlerde temelin rijit, barajın boş olması durumunda barajın belirlenen seçilen düğüm noktalarında meydana gelen mutlak değerce maksimum yatay yerdeğiştirmelerin sayısal değerleri

Düğüm Noktası	Yatay Yerdeğiştirme (mm)		
	Lineer Dinamik Analiz	Lineer Olmayan Dinamik Analiz	
		Drucker-Prager Yöntemi	Eğri Tanımlama Yöntemi
1	52.07	66.2516	68.7287
3	67.68	89.9909	92.5010
5	32.28	42.9680	44.0561

Tablo 16. Lineer ve lineer olmayan dinamik analizlerde temelin rijit, barajın dolu olması durumunda barajın belirlenen seçilen düğüm noktalarında meydana gelen mutlak değerce maksimum yatay yerdeğıştirmelerin sayısal değerleri

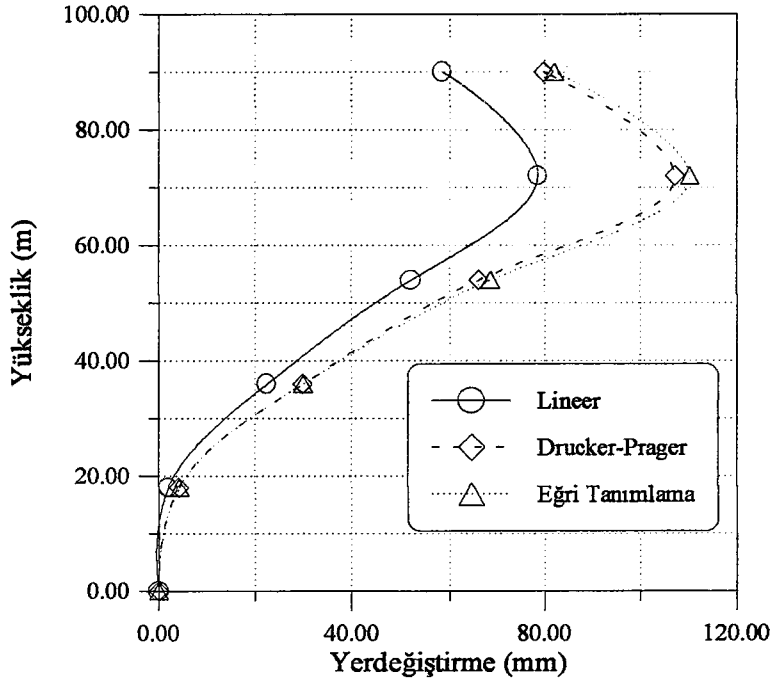
Düğüm Noktası	Yatay Yerdeğıştirme (mm)		
	Lineer Dinamik Analiz	Lineer Olmayan Dinamik Analiz	
		Drucker-Prager Yöntemi	Eğri Tanımlama Yöntemi
1	52.67	67.4588	70.0068
3	68.35	91.0288	93.2633
5	32.47	43.3864	44.316

Tablo 17. Lineer ve lineer olmayan dinamik analizlerde temelin eğilebilir, barajın boş olması durumunda barajın belirlenen seçilen düğüm noktalarında meydana gelen mutlak değerce maksimum yatay yerdeğıştirmelerin sayısal değerleri

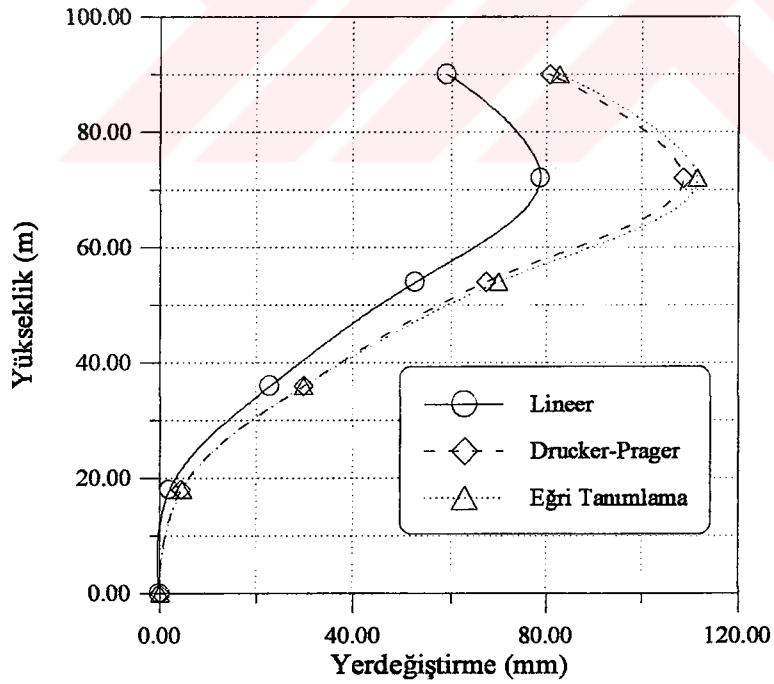
Düğüm Noktası	Yatay Yerdeğıştirme (mm)		
	Lineer Dinamik Analiz	Lineer Olmayan Dinamik Analiz	
		Drucker-Prager Yöntemi	Eğri Tanımlama Yöntemi
1	260.8	298.363	298.509
3	280.0	315.199	314.335
5	235.7	264.259	262.910

Tablo 18. Lineer ve lineer olmayan dinamik analizlerde temelin eğilebilir, barajın dolu olması durumunda barajın belirlenen seçilen düğüm noktalarında meydana gelen mutlak değerce maksimum yatay yerdeğıştirmelerin sayısal değerleri

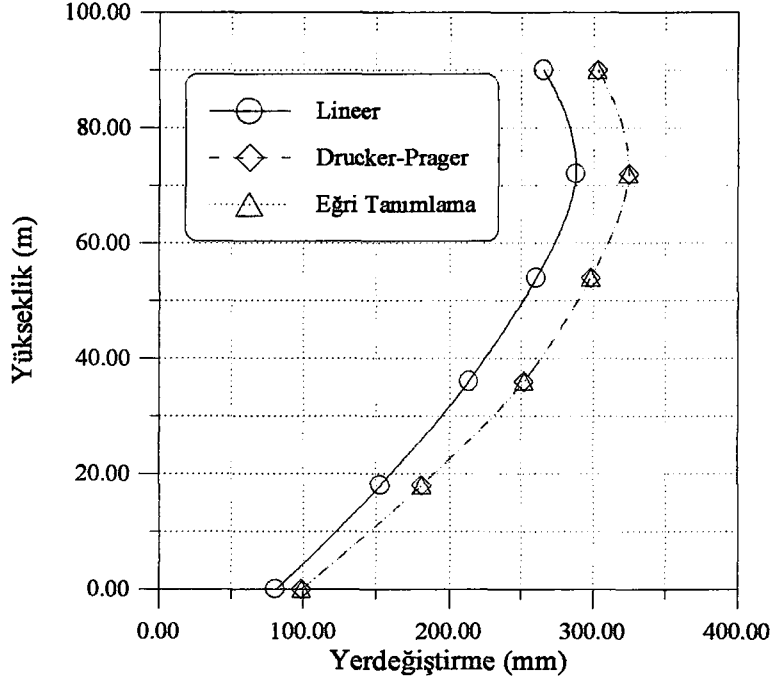
Düğüm Noktası	Yatay Yerdeğıştirme (mm)		
	Lineer Dinamik Analiz	Lineer Olmayan Dinamik Analiz	
		Drucker-Prager Yöntemi	Eğri Tanımlama Yöntemi
1	260.7	298.233	298.324
3	280.0	314.253	313.108
5	235.7	264.088	263.119



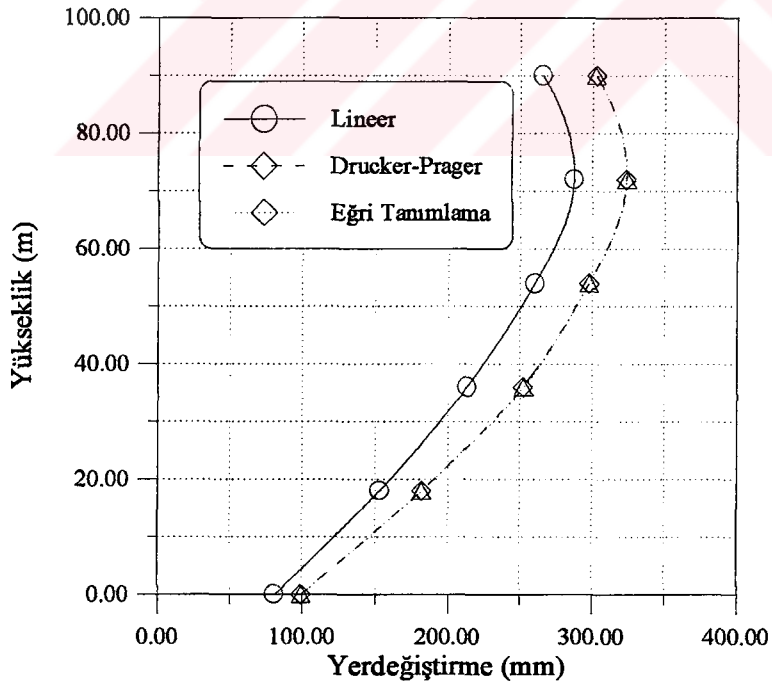
Şekil 138. Lineer ve lineer olmayan dinamik analizde, temelin rijit, barajın boş olması durumunda menba yüzeyindeki mutlak değerce maksimum yatay yerdeğiştirmelerin yükseklik boyunca değişimi



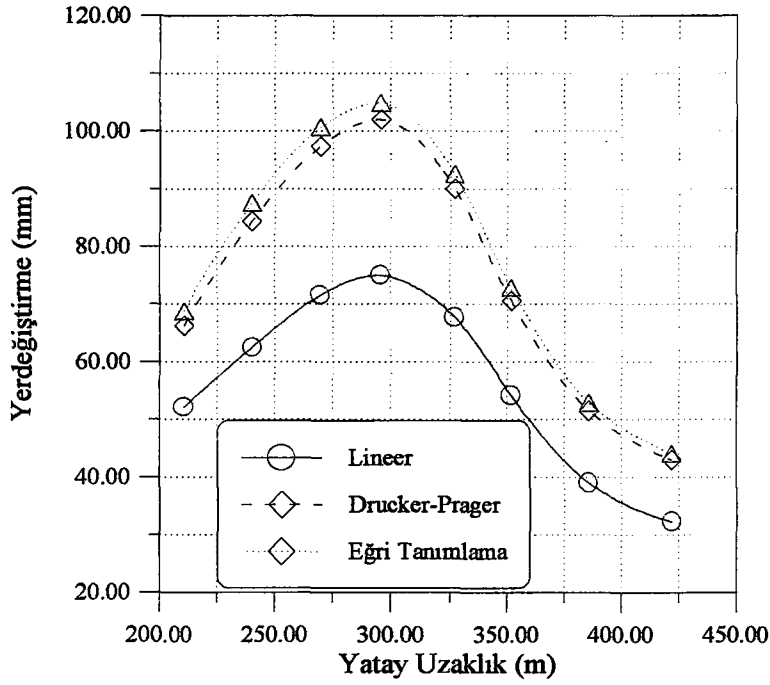
Şekil 139. Lineer ve lineer olmayan dinamik analizde, temelin rijit, barajın dolu olması durumunda menba yüzeyindeki mutlak değerce maksimum yatay yerdeğiştirmelerin yükseklik boyunca değişimi



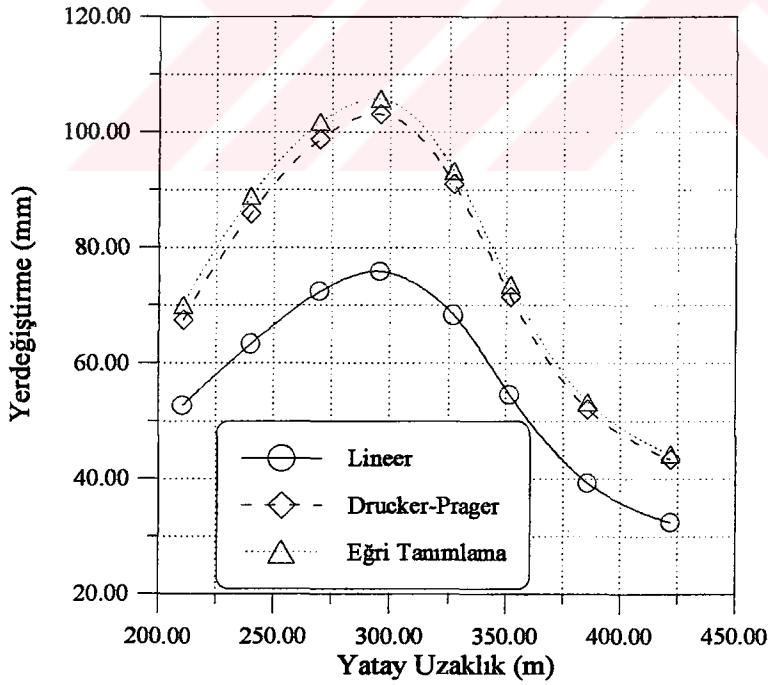
Şekil 140. Lineer ve lineer olmayan dinamik analizde, temelin eğilebilir, barajın boş olması durumunda menba yüzeyindeki mutlak değerce maksimum yatay yerdeğiştirmelerin yükseklik boyunca değişimi



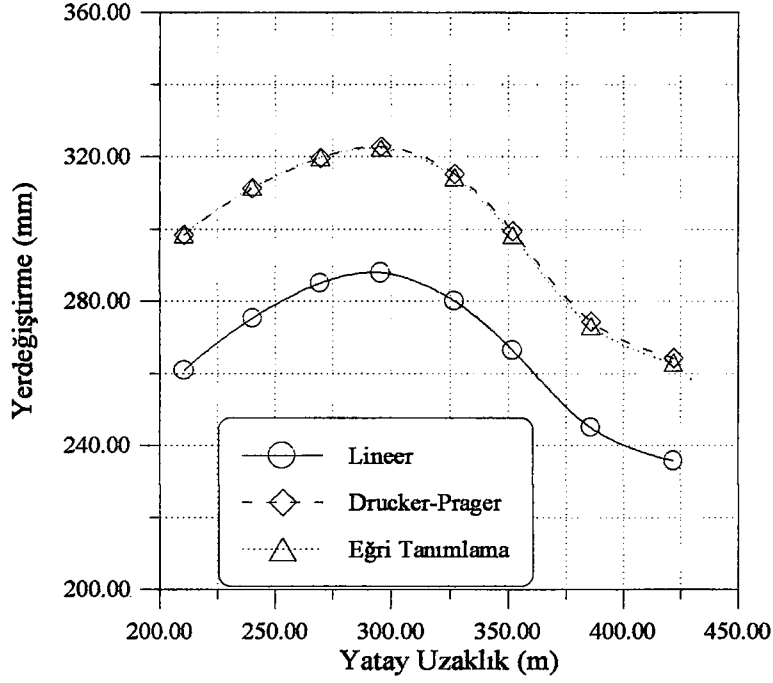
Şekil 141. Lineer ve lineer olmayan dinamik analizde, temelin eğilebilir, barajın dolu olması durumunda menba yüzeyindeki mutlak değerce maksimum yatay yerdeğiştirmelerin yükseklik boyunca değişimi



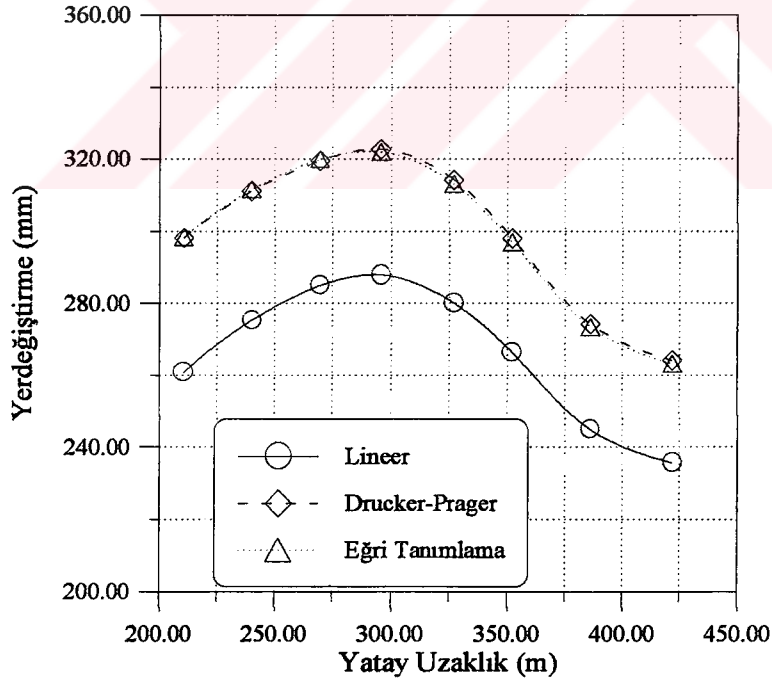
Şekil 142. Lineer ve lineer olmayan dinamik analizde, temelin rijit, barajın boş olması durumunda mutlak değerce maksimum yatay yerdeğiştirmelerin II-II kesiti boyunca değişimi



Şekil 143. Lineer ve lineer olmayan dinamik analizde, temelin rijit, barajın dolu olması durumunda mutlak değerce maksimum yatay yerdeğiştirmelerin II-II kesiti boyunca değişimi



Şekil 144. Lineer ve lineer olmayan dinamik analizde, temelin eğilebilir, barajın boş olması durumunda mutlak değerce maksimum yatay yerdeğiştirmelerin II-II kesiti boyunca değişimi



Şekil 145. Lineer ve lineer olmayan dinamik analizde, temelin eğilebilir, barajın dolu olması durumunda mutlak değerce maksimum yatay yerdeğiştirmelerin II-II kesiti boyunca değişimi

4. SONUÇLAR VE ÖNERİLER

Tarih boyunca insanın gereksinimi suyu biriktirmesine zorlamış; bu nedenle önceleri günlük ihtiyaçları giderecek su kapları yapan insan, daha sonraları bilhassa su kaynaklarının kıt olduğu yörelerde su biriktirme yapıları yapmak zorunda kalmıştır. Bu yapıların en önemlisi barajlardır.

Baraj düşünceden yapım haline geçinceye kadar birçok araştırma ve emek gerektirir. Araştırmalar, proje geliştirilmesinin hem pahalı hem de zaman alıcı kısmıdır. Ayrıca yapılması düşünülen projeler ekonomik veya teknik bakımdan mümkün olmayabilir. Bu bakımdan en kısa zamanda, en ekonomik olarak güvenli projelerin oluşturulması gerekir. Baraj gibi önemli yapıların güvenilirliği için gerçekleştiren analizlerin barajın gerçek davranışına uygun olmalıdır. Bu nedenle yapının gerçek davranışını ortaya koyabilecek uygun modellerin kullanılması gerekmektedir. Barajın deprem gibi dinamik yükler altındaki analizleri de bu modellere göre gerçekleştirilmelidir.

Bu çalışmada, toprak barajların lineer ve malzeme bakımından lineer olmayan dinamik analizleri yapılmıştır. Analizler üç ve dört noktalı elemanlardan oluşan iki boyutlu sonlu elemanlarla gerçekleştirilmiştir. Barajın deprem gibi dinamik yükler altında davranışının gerçeğe yakın olabilmesi için lineer ve lineer olmayan dinamik analizleri bizzat barajın kendisi için yapıldığı gibi baraj-su ve baraj-zemin ve su etkileşimini göz önüne alarak realize edilmiştir.

Analizlerde deprem etkisi baraja menba-mansap doğrultusunda etkittirilmektedir. Deprem yer hareketi olarak 1940 yılında meydana gelmiş olan El-Centro depremi kullanılmış ve baraj için %5'lik sönüm oranı kabul edilmiştir. Rayleigh sabitleri 1. Temel mod esas alınarak barajın boş ve dolu, temelin rijit ve eğilebilir hallerinde hesaplanmıştır.

Malzeme bakımından lineer olmayan dinamik analizler Drucker-Prager ve Eğri Tanımlama Yöntemleri kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Drucker-Prager Yönteminde malzeme davranışı, akma fonksiyonunun aldığı değere göre belirlenmiştir. Akma fonksiyonu ise kohezyon, içsel sürtünme açısı ve malzemede oluşan gerilmelere bağlı bir

fonksiyondur. Eğri Tanımlama Yöntemi ise malzeme davranışını belirleyen gerilme deformasyon eğrisini ifade etmektedir. Bu model bulk modülü ve kayma modülünü, hacimsel şekil değiştirmeye bağlı olarak belirleyen bir fonksiyondan ibarettir.

Analizlerin doğruya yakın sonuçlar verebilmesi ve birbirleriyle karşılaştırılabilmesi için baraj-rezervuar, baraj-zemin ve baraj-rezervuar-zemin etkileşimleri gözönüne alınmıştır. Analizler adım-adım integrasyon tekniği kullanılarak gerçekleştirilmiştir.

Çalışmadan elde edilen sonuçlar;

- 1.) Lineer ve lineer olmayan dinamik analiz sonuçları karşılaştırıldığında, yer değiştirmelerin lineer olmayan dinamik analizlerde lineer dinamik analizlere göre daha büyük değerler aldıkları ortaya çıkmıştır.
- 2.) Lineer olmayan dinamik analiz sonuçlarına göre, Drucker-Prager Yöntemine göre gerçekleştirilen analiz sonuçlarının, eğri tanımlama yöntemine göre gerçekleştirilen analiz sonuçlarına çok yakındır. Barajların, malzeme davranışının hassasiyet derecesine varan doğrulukta modellendiği düşünülürse lineer olmayan dinamik analizler için her iki modelin kullanılabilirliğini göstermektedir.
- 3.) Lineer ve lineer olmayan analizlerin hangisi uygulanırsa uygulansın, barajın boş ve dolu olması halinde sonuçların birbirlerine çok yakın değerler aldıkları görülmektedir. Bunun sebebi, barajın kütlelerinin, hidrodinamik etkiye haiz su kütlelerine göre büyük olması, baraj menba yüzeyinin eğiminin fazla olması nedeniyle yatay yönde etkiyen su kütlelerinin az olmasıdır. Dolayısıyla gerçekleştirilen analizlerde yapı-sıvı etkileşiminin toprak barajlarda az olduğu görülmüştür.
- 4.) Lineer ve lineer olmayan dinamik analiz sonuçları değerlendirildiğinde, en büyük gerilme ve yer değiştirmelerin yapı-zemin etkileşiminin mevcut olması halinde meydana geldiği görülmüştür. Bu durum barajların dinamik analizlerinde temelin sadece rijit olarak değil, eğilebilir olması halinde de gözönüne alınması gerekliliğini ortaya koyar.
- 5.) Gerçekleştirilen dinamik analizlerin her birinde en büyük yatay yer değiştirmelerin menba tarafında ve bu maksimum yer değiştirmelerin barajın kret noktasına yakın bölgede meydana geldiği gözlenmiştir.
- 6.) Dinamik analiz sonuçlarında en büyük düşey yer değiştirmelerin mansap tarafındaki tepe noktasında meydana geldiği görülmüştür.

7.) Yatay ve düşey maksimum yerdeğiştirmeler karşılaştırıldığında yatay doğrultudaki deprem hareketinde, düşey yerdeğiştirmelerin yatay yerdeğiştirmelere oranla daha küçük değerler aldıkları anlaşılmaktadır.

8.) Barajların dinamik analizinde malzeme özelliklerinin dikkatle değerlendirilmesi zorunludur. Boşluk su basıncının etkisi, sızma problemi, problemin üç boyutlu özelliğine bağlı olarak lineer olmayan analizi ve toprak barajların titreşimi sırasında dalga yayılımı ile enerji kaybı ve büyük sönüm kuvvetlerinin incelenmesi ileriki araştırmalara öneridir.

9.) Sönüm kuvvetlerinin toprak barajlar üzerindeki çözümleri zaman alanından frekans alanına taşıması zorunlu olabilir. Frekans alanı çözümleri de ileriki araştırmaların konusudur.



5. KAYNAKLAR

1. Turfan, M., Özetle Baraj Nedir?, Devlet Su işleri Genel Müdürlüğü, Ankara, 1996.
2. Thomas, H.H., The Engineering of Large Dams, Part II, John Wiley and Sons Ltd., London, 1976.
3. Uzel, T., Barajların Güvenliği, Sayı: 221, Yıldız Üniversitesi Yayınları, İstanbul, 1991.
4. Smith, N., A History of Dams, First Edition, The Chaucer Press, Britain, 1971.
5. Yılmaz, Ç., Barajların Deprem Analizi, Su Yapıları Semineri, 28-30 Haziran 1988, Samsun, 183-205.
6. Seed, H.B., Martin, G.R., The Seismic Coefficient in Earth Dam Design, JSMFD., ASCE, 1966.
7. Gazetas, G., Seismic Response of Earth Dams: Some Recent Developments, Soil Dynamics and Earthquake Engineering, 6,1 (1987) 1-47.
8. Okomoto, S., Introduction to Earthquake Engineering, Second Edition University of Tokyo Press, Japan, 1984.
9. Ambraseys, N., The Seismic Stability of Earth Dams, Proc., 2nd WCEE., 2 (1960) 1345-1363.
10. Ambraseys, N., On The Seismic Behaviour of Earth Dams, Proc. 2nd WCEE., 1: Tokyo, 331-356.
11. Keightley, W., A Dynamic Investigation of Bouquet Canyon Dam, EERI, Cal., Inst. Tech., 1964.
12. Martin, G.R., Seed, H.B., An Investigation of The Dynamic Response Characteristics of The Bon Tempe Dam, California, Report. Soil Mech and Bitum, Mtls., Lab., Univ., of Cal., Berkeley, 1966.

13. Clough, R., Chopra, A., Earthquake Stress Analysis of Earth Dams, Struct. Eng. Lab. Report No. 65-68, Univ. of California, 1965.
14. Westegaard, H.M., Water Pressures on Dams During Earthquakes, Transactions, ASCE, 98, 1835 (1933) 418-433.
15. Zangar, C.N., Hydrodynamic Pressures on Dams due to Earthquake Effects, Engineering Monograph 11, Bureau of Reclamation, Washington D.C., 1952.
16. Newmark, N., Effects of Earthquakes on Dams and Embankments, Geotechnique, 5, 2 (1965).
17. Mejia, L.H., Seed, H.B., Lysmer, J., Dynamic Analysis of Earth Dams in Three-Dimensions, Journal of the Geotechnical Engineering Division, ASCE, 108 (1982) 1586-1603.
18. Lysmer, J., Udaka, T., Tsai, C.F., Seed, H.B., FLUSH-A Computer Program for Approximate 3-D Analysis of Structure-Soil-Structure Interaction, Report No. EERC 75-30, Earthquake Engineering Research Center, University of California, Berkeley, Calif., 1975.
19. Elgamal, A.-W., Three-Dimensional Seismic Analysis of La Villita Dam, Journal of Geotechnical Engineering, ASCE, 118, 12 (1992) 1937-1959.
20. Mejia, L.H., Seed, H.B., Comparison of 2-D and 3-D Dynamic Analyses of Earth Dams, Journal of Geotechnical Engineering, ASCE, 109, 11 (1983) 1383-1397.
21. Prato, C.A., Matheu, E.E., Simplified, Seismic Analysis of Embankment Dams-Canyon-Wall Configuration, Journal of Geotechnical Engineering, ASCE, 117 (1991) 1802-1808.
22. Seed, H.B., Idriss, I.M., Soil Moduli and Damping Factors for Dynamic Response Analysis, Report No. EERC 70-10, Earthquake Engineering Research Center, University of California, Berkeley, Calif., 1970.
23. Makdisi, F.I., Kagava, T., Seed, H.B., Seismic Response of Earth Dams In Triangular Canyons, Journal of the Geotechnical Engineering Division, ASCE, 108, GT10 (1982) 1328-1337.
24. Lysmer, J., Udaka, T., Seed, H.B., Hwang, R., LUSH-A Computer Program for Complex Response Analysis of Soil-Structure Systems, Report No. EERC-74-4, Earthquake Engineering Research Center, University of California, Berkeley, 1974.

25. Elgamal A.-W.M., Abdel-Ghaffar, A.M., Elasto-Plastic Seismic Response of 3-D Earth Dams Application , Journal of Geotechnical Engineering, ASCE, 113, 11 (1987) 1309-1325.
26. Arulanandan, K., Seed, H.B., Yogachandran, C., Muraleetharan, Seed, R.B., Kabilamany, K., Ceatrifuge Study on Volume Changes and Dynamic Stability of Earth Dams, Journal of Geotechnical Engineering, ASCE, 119, 11 (1993) 1717-1731.
27. Griffiths, D.V., Prevost, J.H., Two-and Three -Dimensional Dynamic Finite Element Analysis of the Long Valley Dam, Geotechnique, 38, 3 (1988) 367-388.
28. Mansouri, T.A., Nelson, J.D., Thompson, E.G., Dynamic Response and Liquefaction of Earth Dams, Journal of Geotechnical Engineering, ASCE, 109, 1 (1983) 89-101.
29. Biot, M.A., Mechanics of Deformation and Acoustic Propagation in Porous Media, Journal of Applied Physics, 3, 4 (1962) 1482-1498.
30. Finn, W.D.L., Byrne, P.M. Martin, G.R., Seismic Response and Liquefaction of Sands, Journal of the Geotechnical Engineering Division, ASCE, 102, GT8 (1976) 841-856.
31. Huang, Y.H., Unsteady State Phreatic Surface in Earth Dams, Journal of Geotechnical Engineering, ASCE, 112, 1 (1986) 93-98.
32. Li, G.C., Desai, C.S., Stresses and Seepage Analysis of Earth Dams, Journal of Geotechnical Engineering, ASCE, 109, 7 (1983) 946-947.
33. Chang, C.S., Boundary Element Method in Drawdown Seepage Analysis for Earth Dams, Journal Computing in Civil Engineering, ASCE, 1, 2 (1987) 83-98.
34. Beskos, D.F., Boundary Element Methods in Mechanics, Elsevier Science Publishers, Netherlands, 1991.
35. Abdel-Ghaffar, A.M., Scott, R.F., Analysis of Earth Dam Response to Earthquakes, Journal of the Geotechnical Engineering Division, ASCE, 105, GT12 (1979) 1379-1403.
36. Abdel-Ghaffar, A.M., Scott, R.F., Vibration Tests of Full-Scale Earth Dam, Journal of the Geotechnical Engineering Division, ASCE, 107, GT3 (1981) 241-269.
37. Abdel-Ghaffar, A.M., Scott, R.F., Analysis of Earth Dam Response to Earthquakes, Journal of the Geotechnical Engineering Division, ASCE, 105, GT12 (1979) 1379-1425.

38. Abdel-Ghaffar, A.M., Scott, R.F., Shear Moduli and damping Factors of Earth Dam, Journal of the Geotechnical Engineering Division, ASCE, 105, GT12 (1979) 1405-1427.
39. Abdel-Ghaffar, A.M., Scott, R.F., Comparative Study of Dynamic Response Earth Dam, Journal of the Geotechnical Engineering Division, ASCE, 107, GT3 (1981) 271-287.
40. Scott, R.F., Abdel- Ghaffar, A.M., Forced Vibration Tests of an Earth Dam, Water Power and Dam Construction, (1978) 41-45.
41. Skermer, N.A., Mica Dam Embankment Stress Analysis, Journal of the Geotechnical Engineering Div., ASCE, 101, GT3 (1975) 229-242.
42. Prevost, J.H., Abdel-Ghaffar, A.M., Lacy, S.J., Nonlinear Dynamic Analysis of an Earth Dam, Journal of Geotechnical Engineering, ASCE, 111, 7 (1985) 882-897.
43. Vrymoed, J., Dynamic FEM Model of Droville Dam, Journal of the Geotechnical Engineering Division, ASCE, 107, GT8 (1981) 1057-1077.
44. Zeghal, M., Abdel Ghaffar, A.M., analysis of Behaviour of Earth Dam Using Strong-Motion Earthquake Records, Journal of Geotechnical Engineering, ASCE, 118, 2 (1992) 266-277.
45. Lotfi, V., Roesset, J.M., Tassoulas, J.L., A Technique for the Analysis of the Response of Dams to Earthquakes, Earthquake Engineering and Structural Dynamics, 15 (1987) 463-490.
46. Dumanoğlu, A.A., Severn, R.T., Dynamic Response of Dams and Other Structures to Differential Ground Motion, Proceedings of the Enstitution of Civil Engineers, 77 (1984) 333-352.
47. Dumanoğlu, A.A., Severn, R.T., Taylor, C.A., Effect of Asynchronous Input on the Response of Dams, Proceedings the Eighth World Conference on Earthquake Engineering, 6 (1984) 127-133.
48. Dumanoğlu, A.A., Severn, R.T., Brown John, J.M.W., Asynchronous Seismic Analysis of Bosphorus and Humber Suspension Bridges, Proceedings the Eighth European Conference on Earthquake Engineering, 3 (1986) 1-8.
49. Hall, J.F., Chopra, A.K., Hydrodynamic Effects in the Dynamic Response of Concrete Gravity Dams, Earthquake Engineering and Structural Dynamics, 10 (1982) 333-345.

50. Hall, J.F., Chopra, A.K., Dynamic Analysis of Arch Dams Including Hydrodynamic Effects, Journal of Engineering Mechanics, ASCE, 109, 1 (1983) 149-167.
51. Hall, J.F., Chopra, A.K., Two-Dimensional Dynamic Analysis of Concrete Gravity and Embankment Dams Including Hydrodynamic Effects, Earthquake Engineering and Structural Dynamics, 10 (1982) 305-322.
52. Dibaj, M., Penzien, J., Response of Earth Dams to Travelling Seismic Waves, Journal of the Soil Mechanics and Foundations Division, ASCE, 95, SM2 (1969) 541-560.
53. Priscu, R., Popovici, A., Stenatiu, D., Stere, C., Earthquake Engineering for Large Dams, Second Edition, Editura Academia, Bucuresti, 1985.
54. Altınışık, D., Yaygın Temelli Yapıların Dinamik Analizleri, Deprem Araştırma Bülteni, 34 (1981) 45-64.
55. Altınışık, D., Aseismic Design of Concrete Dams, Ph.D. Thesis University of Bristol, 1980.
56. Altınışık, D., Severn, R.T., Natural Frequencies and Response Characteristics of Gravity Dams, Conference on Design of Dams to Resist Earthquake, ICE, R.23, 1980, London, 167-174.
57. Yegian, M.K., Marciano, E.A., Ghahraman, V.G., Seismic Risk Analysis for Earth Dams, Journal of Geotechnical Engineering, ASCE, 117, 1 (1991) 18-34.
58. Dakoulas, P., Gazetas, G., Vibration Characteristics of Dams in Narrow Canyons, Journal of Geotechnical Engineering, ASCE, 113, 8 (1987) 899-904.
59. Makdisi, F.I., Kagawa, T., Seed, H.B., Seismic Response of Earth Dams in Triangular Canyons, Journal of the Geotechnical Engineering Division, ASCE, 108, 10 (1982) 1328-1337.
60. Mejia, L.H., Seed, H.B., Lysmer, J., Dynamic Analysis of Earth Dam in Three Dimensions, Journal of the Geotechnical Engineering Division, ASCE, 108, 12 (1982) 1586-1604.
61. Prato, C.A., Delmastro, E., 1-D Seismic Analysis of Embankment Dams, Journal of Geotechnical Engineering, ASCE, 8 (1987) 904-909.

62. Idriss, I.M., Lysmer, J., Hwang, R., Seed, H.B., QUAD-4: A Computer Program for Evaluating the Seismic Response of Soil Structures by Variable Damping Finite Element Procedures, Report No. EERC 73-16, University of California, Berkeley, California, 1973.
63. Schnabel, P.B., Lysmer, J., Seed, H.B., SHAKE: A Computer Program for Earthquake Response Analysis of Horizontally Layered Sites, Report No. EERC 72-12, University of California, Berkeley, Calif., 1972.
64. Seed, H.B., Lysmer, J., Hwang, R., Soil-Structure Interaction Analysis for Seismic Response, Technical Note Proc. Paper 11318, ASCE, GT4 (1975) 341-346.
65. Lacy, J., Prevost, J.H., Nonlinear Seismic Response Analysis of Earth Dams, Soil Dynamics and Earthquake Engineering, 6, 1 (1987) 48-63.
66. Abdel-Ghaffar, A.M., Elgamal, A.-W.M., Elasto-Plastic Seismic Response of 3-D Earth Dams: Theory, Journal of Geotechnical Engineering, 113, 11 (1987) 1293-1308.
67. Drucker, D.C., Prager, W., Soil Mechanics and Plastic Analysis on Limit Design, Quarterly Journal of Applied Math., 10 (1952) 157-165.
68. Bathe, K.J., Wilson, E.L., Iding, R., NONSAP: A Structural Analysis Program for Static and Dynamic Response of Nonlinear Systems, Report No. UC SESM 74-3, Structural Engineering and Structural Mechanics, Department of Civil Engineering, University of California, Berkeley, California, 1974.
69. Bathe, K.J., Özdemir, H., Wilson, E.L., Static and Dynamic Geometric and Material Nonlinear Analysis, Report No. UC SESM 74-4, Structures and Materials Research, Department of Civil Engineering, University of California, Berkeley, California, 1974.
70. Brown, W.D., Earth and Rock-Fill Dams- General Design and Construction Considerations, Engineering and Design, U.S. Army Corps of Engineers, Washington, 1994.
71. Bayındırlık ve İskan Bakanlığı Devlet Su İşleri Genel Müdürlüğü Barajlar ve HES Dairesi Başkanlığı, Gövde Max Tip Enkesitleri, Ankara, 1987.
72. Wilson, E.L., SAP2000: Integrated Finite Element Analysis and Design of Structures, Volume I-II, Computers and Structures, Berkeley, California, 1997.
73. Wilson, E.L., SAP2000: Integrated Finite Element Analysis and Design of Structures, Verification Manual, Computers and Structures, Berkeley, California, 1997.

74. Zeinkiewicz, O.C., Taylor, R.C., The Finite Element Method, Cilt II, McGraw-Hill, 1991.
75. Chopra, A.K., Dynamics of Structures, Prentice-Hall, Englewood Cliffs, New Jersey 07632, USA, 1995.
76. Parker, A.D., Planning and Estimating Dam Construction, McGraw-Hill Book Company Printed in California, 1971.
77. Dominy, F.E., Design of Small Dams, Second Edition, United States Government Printing Office, Washington, 1961.
78. Nitikitpaiboon, C., Bathe, K.J., An Arbitrary Lagrangian-Eularian Velocity Potential Formulation for Fluid-Structure Interaction, Computers and Structures, 47, 4/5 (1993) 871-891.
79. Zienkiewicz, D.C., Bettess, P., Fluid-Structure Dynamic Interaction and Wave Forces an Interaction to Numerical Treatment, International Journal for Numerical Method in Engineering, 13 (1978) 1-16.
80. Calayir, Y., Beton Ağırlık Barajların Euler ve Lagrange Yaklaşımları Kullanılarak Dinamik Analizi, Doktora Tezi, KTÜ Fen Bilimleri Enstitüsü, Trabzon, 1994.
81. Bayraktar, A., Dumanoğlu, A.A., The Effect of the Asynchronous Ground Motion on Hydrodynamic Pressures, The Sixth International Conference on Civil and Structural Engineering Computing, 20th-30th August 1995, Combridge, England.
82. Wilson, E.L., Khalvati, M., Finite Elements for The Dynamic Analysis of Fluid-Solid System, International Journal for Numerical Methods in Engineering, 19 (1983) 1657-1668.
83. Bathe, K.J., Finite Element Procedures in Engineering Analysis, Prentice-Hall, Englewood Cliffs, New Jersey, 1982.
84. Tezcan, S., Earthquake Resistance of Dams, Türkiye Deprem Vakfi, Teknik Rapor, TDV/TR 024-38, 1999.
85. Lane, R.G.T., Howells, D.A., Nash, K.T.L., Poskitt, F.F., Dams and Earthquake, First Adition, Thomas Telford Limited, London, 1981.
86. Chopra, A.K., Earthquake Response of Earth Dams, Journal of Soil Mechanics and Foundations Div., ASCE, 93, SM2 (1967).

87. Clough, R.W., and Chopra, A.K., Earthquake Stress Analysis in Earth Dams, Journal of Engineering Mech., ASCE, 92, EM2 (1966).
88. Chakrabarti, P., Chopra, A.K., Earthquake Response of Gravity Dams Including Reservoir Interaction Effects, Report No. EERC 72-6, Earthquake Engineering Research Center, College of Engineering, University of California, Berkeley, California, 1972.
89. Çelebi, M., Erdik, M., Yapı Dinamiğine Giriş, Ankara, 1977.
90. Clough, R.W., Penzien, J., Dynamics of Structures, McGraw-Hill, USA, 1975.
91. Clough, R.W., Penzien, J., Dynamics of Structures, Second Addition, McGraw-Hill, Singapore, 1993.
92. Prevost, J.H., Abdel-Ghaffar, A.M., Lacy, S.J., Nonlinear Dynamic Analyses of an Earth Dam, Journal of Geotechnical Engineering, ASCE, 111,7 (1985) 882-897.
93. Taylor, C., Hinton, E., Owen, D.R.J., Numerical Methods for Nonlinear Problems of Proceedings of the International Conference Held at the University College, 1980, Swansea, Volume 1, 505-563.
94. Dumanoğlu, A.A., Akköse, M., Kemer Barajların Lineer ve Lineer Olmayan İki ve Üç Boyutlu Dinamik Analizi, Teknik Dergi, TMMOB İnşaat Mühendisleri Odası, Cilt 10, Sayı 4 (1999) 1993-2009.
95. Dumanoğlu, A.A., Akköse, M., Linear and Nonlinear Two and Three Dimensional Dynamic Analyses of Arch Dams, Technical Journal, Turkish Chamber of Civil Engineers, Vol.10 (1999) 599-506.
96. Elgamal, A.M., Abdel-Ghaffar, A.M., Prevost, J.H., Elasto-Plastic Earthquake Shear-Response of One-Dimensional Earth Dam Models, Introduction J. Earthquake Engrg. And Struct. Dynamics, 13 (1985) 617-633.
97. Elgamal, A.-W.M., Abdel-Ghaffar, A.M., Prevost, J.H., 2-D Elasto-Plastic Seismic Shear-Response of Earth Dams. I. Theory., Journal of Engineering Mechanics, ASCE, 113, 5 (1987a) 689-701.
98. Elgamal, A.-W.M., Abdel-Ghaffar, A.M., Prevost, J.H., 2-D Elasto-Plastic Seismic Shear-Response of Earth Dams. II. Applications., Journal of Engineering Mechanics, ASCE, 113, 5 (1987b) 701-719.

99. Akköse, M., Dumanoglu, A.A., Bayraktar, A., Kemer Barajların Elasto-Plastik Dinamik Analizi, Dördüncü Ulusal Deprem Mühendisliği Konferansı, 17-19 Eylül 1997, Sayfa 277-284, Ankara.
100. Oskouei, V., A., Su, Çatlak ve Kavitasyon Etkileri Altındaki Beton Ağırlık Barajların Lineer Olmayan Dinamik Analizi, Doktora Tezi, KTÜ Fen Bilimleri Enstitüsü, Haziran, 1997.
101. Oskouei, V., Dumanoglu, A.A., Bayraktar, A., Consideration of Cracks in Nonlinear Dynamic Analysis of Concrete Gravity Dams, Fourth International Conference on Civil Engineering, May 4-6 1997, Sarif University of Technology, Tehran, Iran.
102. Akköse, M., Dumanoglu, A.A., Rezevuvar-Kemer Baraj-Zemin Sistemlerinin Lineer Olmayan Üç Boyutlu Dinamik Analizi, III. Ulusal Hesaplamalı Mekanik Konferansı, 16-19 Kasım 1998, Sayfa 57-64, İstanbul.
103. Dumanoglu, A.A., Oskouei, V., Beton Ağırlık Barajların Lineer ve Lineer Olmayan Dinamik Davranışına Su ve Kavitasyon Etkisi, Türkiye Deprem Vakfı, Teknik Rapor TDV/TR 019-33, 1999.
104. Dumanoglu, A.A., Akköse, M., Kemer Barajların Lineer ve Lineer Olmayan Statik ve Dinamik Analizi, Türkiye Deprem Vakfı, Teknik Rapor TDV/016-27, 1998.
105. Lambe, T.W., Whitman, R.V., Soil Mechanics, John Wiley and Sons Inc., USA, 1979.
106. Chen, W.F., Mizuno, E., Nonlinear Analysis in Soil Mechanics, Elsevier Science Publishers Company Inc., Netherlands, USA, 1990.
107. Hu, Y-X., Liu, S-C., Dong, W., Earthquake Engineering, First Adition, E and FN Spon, London, 1996.
108. Ataman, T., Kaya Mekaniğine Giriş, ODTÜ Mühendislik Fakültesi Dekanlığı Baskı İşliğı, ODTÜ, Ankara, 1982.

ÖZGEÇMİŞ

Kemal HACİEFENDİOĞLU, 1976 yılında Trabzon'un Köprübaşı İlçesinde doğdu. İlköğrenimini Köprübaşı İlçesi Fidanlı İlköğretim Okulu'nda, orta öğrenimini Trabzon Cumhuriyet Ortaokulu'nda, lise öğrenimini ise Trabzon Lisesi'nde tamamladı. 1993 yılında girdiği üniversite sınavlarını kazanarak Karadeniz Teknik Üniversitesi Mühendislik-Mimarlık Fakültesi İnşaat Mühendisliği Bölümü'ne başladı. Lisans öğrenimini 1996-1997 öğretim yılı Haziran döneminde tamamladı ve aynı yıl Yüksek Lisans sınavını kazanarak Yüksek Lisans öğrenimine başladı. 1999 yılında Ondokuzmayıs Üniversitesi'nin açmış olduğu sınavı kazanarak, Kasım 1999'da bu üniversitenin Mühendislik Fakültesi İnşaat Mühendisliği Bölümü Yapı Anabilim Dalı'na Araştırma Görevlisi olarak atandı. Burada bir dönem görev yaptıktan sonra Yüksek Lisans ve Doktora öğrenimini tamamlamak üzere görevlendirme alarak mezun olduğu üniversitenin Fen Bilimleri Enstitüsü Araştırma Görevlisi kadrosuna atandı. İngilizce bilmekte olan Kemal HACİEFENDİOĞLU halen Araştırma Görevliliği ile birlikte Lisansüstü çalışmalarına devam etmektedir.