

66927

KARADENİZ TEKNİK ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

İNŞAAT MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI

KEMER BARAJLARIN LİNEER VE LİNEER OLMAYAN İKİ VE ÜÇ BOYUTLU
STATİK VE DİNAMİK ANALİZİ

İnş. Müh. Mehmet AKKÖSE

Karadeniz Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsünde

" İnşaat Yüksek Mühendisi "

Ünvanı Verilmesi için Kabul Edilen Tezdir

Tezin Enstitüye Verildiği Tarih : 14.07.1997

Tezin Sözlü Savunma Tarihi : 01.08.1997

Tezin Danışmanı : Prof. Dr. A.Aydın DUMANOĞLU

A. Dumanoglu

Jüri Üyesi : Doç. Dr. Alemdar BAYRAKTAR

Bayraktar

Jüri Üyesi : Yrd. Doç. Dr. Ayşe DALOĞLU

Ayşe Daloğlu

Enstitü Müdürü : Prof. Dr. Fazlı ARSLAN

F. Arslan

Temmuz 1997
TRABZON

T.C. YÜKSEKÖĞRETİM KURULU
DOKÜMANTASYON MERKEZİ

ÖNSÖZ

Bu çalışma, Karadeniz Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalında yüksek lisans tezi olarak hazırlanmaktadır.

Barajların, kendileri için en büyük tehlikeyi oluşturan muhtemel bir deprem sonucu yıkılmaları halinde, buldukları yer için büyük bir felakete sebep olabilecekleri bilinmektedir. Çok narin bir yapıya sahip olan kemer barajlar için, bu konunun önemi daha da artmaktadır. Lineer analizin yanında, lineer olmayan analizin de önem kazandığı günümüzde, artık kemer barajların da lineer olmayan dinamik analizlerinin yapılması gerekmektedir. Bu derece önemli ve orijinal bir konuda çalışmamı sağlayan, çalışmamın başlangıcından sonuna kadar benimle yakından ilgilenen, çalışmam boyunca bana araştırma zevki ve bilimsel düşünce disiplini aşılıp ufkumu açan yönetici hocam, Saygıdeğer **Prof. Dr. A.Aydın DUMANOĞLU**'na, minnet ve şükranlarımı sunmayı her zaman için bir borç bilirim.

Öğrenim hayatım boyunca bana emeği geçen tüm hocalarımı saygıyla anar, kendilerine minnettar olduğumu belirtmek isterim.

Çalışmalarım sırasında bana büyük destek veren, bilgi ve tecrübelerinden yararlandığım Sayın Doç Dr. Alemdar BAYRAKTAR'a ve hiçbir konuda yardımlarını esirgemeyen, kader arkadaşım Araş. Gör. Süleyman ADANUR'a teşekkürlerimi sunarım. Ayrıca, çeşitli konularda yardımlarını gördüğüm Dr. A.Vatani OSKOUËİ, Araş. Gör. Kurtuluş SOYLUK, Araş. Gör. Volkan KAHYA ve İnş. Müh. Şevket ATEŞ'e teşekkür ederim.

Öğrenim hayatım süresince bana en büyük desteği veren ve çalışmalarım sırasında hayata veda eden babamı burada rahmetle anıyorum. Maddi ve manevi desteklerini eksik etmeyen, başta ağabeyim Harita Müh. Mustafa AKKÖSE olmak üzere, ailemin tüm fertlerine müteşekkir olduğumu belirtir, bu çalışmanın ülkemize faydalı olmasını temenni ederim.



Bu yüksek lisans tezi, çalışmalarım sırasında
kaybettiğim babam **Ahmet AKKÖSE**'ye
ithaf edilmiştir.

İÇİNDEKİLER

	<u>Sayfa No</u>
ÖNSÖZ	II
ÖZET	VII
SUMMARY	VIII
ŞEKİL LİSTESİ	IX
TABLO LİSTESİ	XXVIII
SEMBOL LİSTESİ	XXXI
1. GENEL BİLGİLER	1
1.1. Giriş.....	1
1.1.1. Kemer Barajların Tarihi Gelişimi.....	1
1.1.2. Kemer Barajlar İle İlgili Daha Önce Yapılmış Çalışmalar.....	3
1.1.3. Çalışmanın Kapsamı.....	9
1.2. Kemer Barajlar ve Önemi.....	10
1.2.1. Kemer Barajların Sınıflandırılması.....	10
1.2.1.1. Sabit Yarıçaplı Kemer Barajlar.....	11
1.2.1.2. Değişken Yarıçaplı Kemer Barajlar.....	11
1.3. Kemer Barajlara Etki Eden Kuvvetler.....	13
1.3.1. Barajın Kendi Ağırlığı.....	13
1.3.2. Hidrostatik Su Basıncı.....	13
1.3.3. Hidrodinamik Su Basıncı.....	14
1.4. Yapı Malzemesinin Lineer Olmayan Davranışı.....	18
1.4.1. Lineer Olmayan Davranışın Özellikleri.....	18
1.4.1.1. Betonun Gerilme-Deformasyon Özellikleri.....	19
1.4.1.2. Elasto-Plastik Malzeme Modeli.....	20
1.4.1.3. Mohr-Coulomb Hipotezi.....	22
1.4.1.4. Drucker-Prager Akma Fonksiyonu ve Gerilme-Deformasyon Bağıntısı.....	24

1.4.1.5. Eğri Tanımlama (Curve Description) Modeli	26
1.5. Lineer ve Lineer Olmayan Sistemlerin Statik ve Dinamik Analizi.....	30
1.5.1. Lineer Statik ve Dinamik Analiz	30
1.5.1.1. Statik Analiz	30
1.5.1.2. Dinamik Analiz.....	31
1.5.1.3. Lineer Sistemlerin Analizi İçin Adım-Adım (Step-by-Step) Çözüm Yöntemleri	32
1.5.1.3.1. Direkt İntegrasyon Metodları.....	32
1.5.1.3.1.1. Newmark Metodu	33
1.5.2. Lineer Olmayan Statik ve Dinamik Analiz	36
1.5.2.1. Statik Analiz	36
1.5.2.2. Dinamik Analiz.....	37
1.5.2.3. Lineer Olmayan Sistemlerin Analizi İçin Adım-Adım (Step-by-Step) Çözüm	37
1.5.2.3.1. Değiştirilmiş Newton-Raphson İterasyonu.....	39
1.5.3. Lineer ve Lineer Olmayan Sistemlerin Çözümünde Kullanılan Wilson- θ Metodu.....	40
2. YAPILAN ÇALIŞMALAR.....	43
2.1. Baraj-Zemin Etkileşimi	45
2.2. Baraj-Rezervuar Etkileşimi	47
2.3. İki Boyutlu Sonlu Eleman Modeli	47
2.4. Üç Boyutlu Sonlu Eleman Modeli.....	47
2.5. 5.Tip Kemer Barajın Lineer ve Lineer Olmayan Statik ve Dinamik Analizi.....	48
2.5.1. Statik Analiz	52
2.5.2. Dinamik Analiz.....	53

3. BULGULAR ve İRDELEMELER.....	55
3.1. İki Boyutlu Lineer ve Lineer Olmayan Analiz Sonuçlarının Değerlendirilmesi.....	55
3.1.1. Statik Analiz	55
3.1.1.1. Yerdeğiştirmeler.....	55
3.1.1.2. Gerilmeler.....	56
3.1.1.3. İki Boyutlu Lineer ve Lineer Olmayan Statik Analiz Sonuçlarının Çeşitli Durumlar İçin Karşılaştırılması	56
3.1.1.3.1. Yerdeğiştirmelerin Karşılaştırılması	56
3.1.1.3.2. Gerilmelerin Karşılaştırılması.....	66
3.1.2. Dinamik Analiz.....	68
3.1.2.1. Yerdeğiştirmeler.....	68
3.1.2.2. Asal Gerilmeler	68
3.1.2.3. İki Boyutlu Lineer ve Lineer Olmayan Dinamik Analiz Sonuçlarının Çeşitli Durumlar İçin Karşılaştırılması	103
3.1.2.3.1. Yerdeğiştirmelerin Karşılaştırılması	103
3.1.2.3.2. Asal Gerilmelerin Karşılaştırılması.....	103
3.2. Üç Boyutlu Lineer ve Lineer Olmayan Analiz Sonuçlarının Değerlendirilmesi.....	108
3.2.1. Statik Analiz	108
3.2.1.1. Yerdeğiştirmeler.....	108
3.2.1.2. Gerilmeler.....	108
3.2.1.3. Üç Boyutlu Statik Analiz Sonuçlarının Çeşitli Durumlar İçin Karşılaştırılması	109
3.2.1.3.1. Yerdeğiştirmelerin Karşılaştırılması	109
3.2.1.3.2. Gerilmelerin Karşılaştırılması.....	109
3.2.2. Dinamik Analiz.....	122
3.2.2.1. Yerdeğiştirmeler.....	122

3.2.2.2. Gerilmeler	122
3.2.2.3. Üç Boyutlu Lineer ve Lineer Olmayan Dinamik Analiz Sonuçlarının Çeşitli Durumlar İçin Karşılaştırılması	138
3.2.2.3.1. Yerdeğiştirmelerin Karşılaştırılması	138
3.2.2.3.2. Gerilmelerin Karşılaştırılması.....	138
3.3. İki ve Üç Boyutlu Lineer ve Lineer Olmayan analiz Sonuçlarının Karşılaştırılması	143
3.3.1. Statik Analiz	143
3.3.2. Dinamik Analiz.....	144
4. SONUÇLAR ve ÖNERİLER.....	145
5. KAYNAKLAR	147
6. ÖZGEÇMİŞ	155

ÖZET

Bu çalışmada, kemer barajların lineer ve malzeme bakımından lineer olmayan statik ve dinamik analizi incelenmektedir. Lineer olmayan iki boyutlu analizler için, elasto-plastik malzeme modeli ve Drucker-Prager akma yüzeyi, üç boyutlu analizler için ise, eğri tanımlama (curve description) modeli kullanılmaktadır. Bu çalışma ile, kemer barajlar için lineer ve lineer olmayan analizler arasındaki farklar ortaya konulmaktadır. Analizler iki ve üç boyutlu gerçekleştirilip, iki boyutlu analizlerin kemer barajlar için yeterli olup olmayacağı araştırılmaktadır. Uygulama amacı ile, 1968 yılında İngiltere’de düzenlenen “Kemer Barajlar” sempozyumunda önerilen 5 tip kemer baraj içerisinde, çift eğrilikli olan 5.tip kemer baraj seçilmiştir. Analizler, NONSAP ve SAP90 programları ile gerçekleştirilmiştir.

Bu yüksek lisans tez çalışması, beş bölümden oluşmaktadır. Birinci bölüm, kemer barajların tarihi gelişimi, daha önce yapılan çalışmalar, kemer barajlara etki eden kuvvetler ve yapı malzemesinin lineer olmayan davranışı ile malzeme modellerinin tanıtımından oluşmaktadır. Ayrıca, lineer ve lineer olmayan sistemlerin statik ve dinamik analizi için kullanılan adım-adım (step-by-step) çözümün formülasyonu verilmektedir.

İkinci bölümde, seçilen kemer barajın iki ve üç boyutlu sonlu eleman modeli tanıtılmakta ve yapılan çalışmalardan bahsedilmektedir.

Üçüncü bölümde, elde edilen analiz sonuçları değerlendirilmektedir. Dördüncü bölümde ise, çalışmadan çıkartılan sonuçlar ve öneriler verilmektedir.

Anahtar Kelimeler: Statik Analiz, Dinamik Analiz, Lineer Analiz, Lineer Olmayan Analiz, Elasto-Plastik Malzeme Modeli, Drucker-Prager Akma Yüzeyi, Eğri Tanımlama Modeli, Sonlu Eleman, Değiştirilmiş Newton-Raphson İterasyonu, Baraj-Zemin, Baraj-Rezervuar.

SUMMARY

LINEAR AND NONLINEAR TWO AND THREE DIMENSIONAL STATIC AND DYNAMIC ANALYSIS OF ARCH DAMS

In this work, linear and nonlinear static and dynamic analysis of arch dams are performed. For the two dimensional nonlinear analysis, elasto-plastic material model and Drucker-Prager yield surface are used whereas curve description model is utilised for the nonlinear three dimensional both static and dynamic analyses. The differences between linear and nonlinear analysis of arch dams are examined. The two and three dimensional analysis are compared in order to check the validity of the former. For the numerical example, type 5 arch dam is selected as was suggested in the symposium on Arch Dams, London, 1968. The programs NONSAP and SAP90 are employed in the response calculation.

This thesis consist of four chapters. In the first chapter, the historical development of arch dams, the previous works, the forces subjected to arch dams, nonlinear behavior of material, and material models are mentioned. The formulation of step-by-step solution is given for both linear and nonlinear static and dynamic analyses.

In the second chapter, two and three dimensional finite element model of the selected arch dam are introduced.

In the third chapter, the results obtained from the analysis are evaluated.

In the fourth chapter, the conclusions and suggestions drawn from this work are presented.

Keywords : Static Analysis, Dynamic Analysis, Linear Analysis, Nonlinear Analysis, Elasto-Plastic Material Model, Drucker-Prager Yield Surface, Curve Description Model, Finite Element, Modified Newton-Raphson Iteration, Dam-Foundation Interaction, Dam-Reservoir Interaction.

ŞEKİL LİSTESİ

	<u>Sayfa No</u>
Şekil 1. Sabit yarıçaplı kemer baraj.....	12
Şekil 2. Değişken yarıçaplı kemer baraj	12
Şekil 3. Kemer baraja etki eden hidrostatik su kuvvetleri	14
Şekil 4. Hidrodinamik basınç dağılımı	15
Şekil 5. Eğri yüzeyler için kütle ekleme yaklaşımının hesabı	16
Şekil 6. Saf beton için tek eksenli gerilme-deformasyon eğrisi.....	19
Şekil 7. Elasto-plastik malzeme	20
Şekil 8. İdeal elasto-plastik malzeme modelleri	21
Şekil 9. İki boyutlu gerilme düzleminde akma fonksiyonu ve yüzeyi ile diklik prensibi.....	22
Şekil 10. Mohr-Coulomb hipotezi.....	23
Şekil 11. Eğri tanımlama (curve description) modelinde kullanılan modüller	28
Şekil 12. Tanjant ve sekant rijitliği	38
Şekil 13. Değiştirilmiş Newton-Raphson iterasyonu	39
Şekil 14. Wilson- θ metodu	41
Şekil 15. 5.tip kemer barajın yerleştirildiği vadinin enkesiti.....	43
Şekil 16. 5.tip kemer barajın plandaki görünüşü ile anahtar kesiti	44
Şekil 17. Zemin sınıfları	46
Şekil 18. İki boyutlu analizde kullanılan sonlu eleman ağları.....	49
Şekil 19. Üç boyutlu kemer barajın temel rijit olması durumunda sonlu eleman ağı.	50
Şekil 20. Üç boyutlu kemer barajın temel eğilebilir olması durumunda sonlu eleman ağı	51
Şekil 21. 18 Mayıs 1940 El-Centro depreminin kuzey-güney (S00E) bileşeni	53

Şekil 22. İki boyutlu dinamik analizde asal gerilmelerin incelendiği gauss noktaları	54
Şekil 23. İki boyutlu lineer statik analizde, temelin rijit, barajın boş olması durumunda menba ve mansap yüzeyi yatay yerdeğiştirmelerinin yükseklik boyunca değişimi	57
Şekil 24. İki boyutlu lineer statik analizde, temelin rijit, barajın dolu olması durumunda menba ve mansap yüzeyi yatay yerdeğiştirmelerinin yükseklik boyunca değişimi	57
Şekil 25. İki boyutlu lineer statik analizde, temelin eğilebilir, barajın boş olması durumunda menba ve mansap yüzeyi yatay yerdeğiştirmelerinin yükseklik boyunca değişimi	58
Şekil 26. İki boyutlu lineer statik analizde, temelin eğilebilir, barajın dolu olması durumunda menba ve mansap yüzeyi yatay yerdeğiştirmelerinin yükseklik boyunca değişimi	58
Şekil 27. İki boyutlu lineer olmayan statik analizde, temelin rijit, barajın dolu olması durumunda menba ve mansap yüzeyi yatay yerdeğiştirmelerinin yükseklik boyunca değişimi	59
Şekil 28. İki boyutlu lineer olmayan statik analizde, temelin eğilebilir, barajın dolu olması durumunda menba ve mansap yüzeyi yatay yerdeğiştirmelerinin yükseklik boyunca değişimi	59
Şekil 29. İki boyutlu lineer statik analizde, temelin rijit, barajın boş olması durumunda menba ve mansap yüzeyi yatay gerilmelerinin yükseklik boyunca değişimi	60
Şekil 30. İki boyutlu lineer statik Analizde, temelin rijit, barajın dolu olması durumunda menba ve mansap yüzeyi yatay gerilmelerinin yükseklik boyunca değişimi	60
Şekil 31. İki boyutlu lineer statik analizde, temelin rijit, barajın boş olması durumunda menba ve mansap yüzeyi düşey gerilmelerinin yükseklik boyunca değişimi	61

Şekil 32. İki boyutlu lineer statik analizde, temelin rijit, barajın dolu olması durumunda menba ve mansap yüzeyi düşey gerilmelerinin yükseklik boyunca değişimi	61
Şekil 33. İki boyutlu lineer olmayan statik analizde, temelin rijit, barajın dolu olması durumunda menba ve mansap yüzeyi yatay gerilmelerinin yükseklik boyunca değişimi	62
Şekil 34. İki boyutlu lineer olmayan statik analizde, temelin rijit, barajın dolu olması durumunda menba ve mansap yüzeyi düşey gerilmelerinin yükseklik boyunca değişimi	62
Şekil 35. İki boyutlu lineer statik analizde, temelin eğilebilir, barajın boş olması durumunda menba ve mansap yüzeyi yatay gerilmelerinin yükseklik boyunca değişimi	63
Şekil 36. İki boyutlu lineer statik analizde, temelin eğilebilir, barajın dolu olması durumunda menba ve mansap yüzeyi yatay gerilmelerinin yükseklik boyunca değişimi	63
Şekil 37. İki boyutlu lineer statik analizde, temelin eğilebilir, barajın boş olması durumunda menba ve mansap yüzeyi düşey gerilmelerinin yükseklik boyunca değişimi	64
Şekil 38. İki boyutlu lineer statik analizde, temelin eğilebilir, barajın dolu olması durumunda menba ve mansap yüzeyi düşey gerilmelerinin yükseklik boyunca değişimi	64
Şekil 39. İki boyutlu lineer olmayan statik analizde, temelin eğilebilir, barajın dolu olması durumunda menba ve mansap yüzeyi yatay gerilmelerinin yükseklik boyunca değişimi	65
Şekil 40. İki boyutlu lineer olmayan statik analizde, temelin eğilebilir, barajın dolu olması durumunda menba ve mansap yüzeyi düşey gerilmelerinin yükseklik boyunca değişimi	65

Şekil 41.	İki boyutlu lineer dinamik analizde, temelin rijit, barajın boş olması durumunda kret noktasında (19 nolu düğüm noktası) meydana gelen yatay yerdeğiştirmelerin zamanla değişimi.....	69
Şekil 42.	İki boyutlu lineer dinamik analizde, temelin rijit, barajın dolu olması durumunda kret noktasında (19 nolu düğüm noktası) meydana gelen yatay yerdeğiştirmelerin zamanla değişimi.....	69
Şekil 43.	İki boyutlu lineer dinamik analizde, temelin eğilebilir, barajın boş olması durumunda kret noktasında (32 nolu düğüm noktası) meydana gelen yatay yerdeğiştirmelerin zamanla değişimi.....	70
Şekil 44.	İki boyutlu lineer dinamik analizde, temelin eğilebilir, barajın dolu olması durumunda kret noktasında (32 nolu düğüm noktası) meydana gelen yatay yerdeğiştirmelerin zamanla değişimi.....	70
Şekil 45.	İki boyutlu lineer olmayan dinamik analizde, temelin rijit, barajın boş olması durumunda kret noktasında (19 nolu düğüm noktası) meydana gelen yatay yerdeğiştirmelerin zamanla değişimi	71
Şekil 46.	İki boyutlu lineer olmayan dinamik analizde, temelin rijit, barajın dolu olması durumunda kret noktasında (19 nolu düğüm noktası) meydana gelen yatay yerdeğiştirmelerin zamanla değişimi	71
Şekil 47.	İki boyutlu lineer olmayan dinamik analizde, temelin eğilebilir, barajın boş olması durumunda kret noktasında (32 nolu düğüm noktası) meydana gelen yatay yerdeğiştirmelerin zamanla değişimi	72
Şekil 48.	İki boyutlu lineer olmayan dinamik analizde, temelin eğilebilir, barajın dolu olması durumunda kret noktasında (32 nolu düğüm noktası) meydana gelen yatay yerdeğiştirmelerin zamanla değişimi	72

Şekil 49.	İki boyutlu lineer dinamik analizde, temelin rijit, barajın boş olması durumunda A gauss noktasında meydana gelen maksimum asal gerilmelerin zamanla değişimi	73
Şekil 50.	İki boyutlu lineer dinamik analizde, temelin rijit, barajın dolu olması durumunda A gauss noktasında meydana gelen maksimum asal gerilmelerin zamanla değişimi	73
Şekil 51.	İki boyutlu lineer dinamik analizde, temelin rijit, barajın boş olması durumunda A gauss noktasında meydana gelen minimum asal gerilmelerin zamanla değişimi	74
Şekil 52.	İki boyutlu lineer dinamik analizde, temelin rijit, barajın dolu olması durumunda A gauss noktasında meydana gelen minimum asal gerilmelerin zamanla değişimi	74
Şekil 53.	İki boyutlu lineer dinamik analizde, temelin eğilebilir, barajın boş olması durumunda A gauss noktasında meydana gelen maksimum asal gerilmelerin zamanla değişimi	75
Şekil 54.	İki boyutlu lineer dinamik analizde, temelin eğilebilir, barajın dolu olması durumunda A gauss noktasında meydana gelen maksimum asal gerilmelerin zamanla değişimi	75
Şekil 55.	İki boyutlu lineer dinamik analizde, temelin eğilebilir, barajın boş olması durumunda A gauss noktasında meydana gelen minimum asal gerilmelerin zamanla değişimi	76
Şekil 56.	İki boyutlu lineer dinamik analizde, temelin eğilebilir, barajın dolu olması durumunda A gauss noktasında meydana gelen minimum asal gerilmelerin zamanla değişimi	76
Şekil 57.	İki boyutlu lineer dinamik analizde, temelin rijit, barajın boş olması durumunda B gauss noktasında meydana gelen maksimum asal gerilmelerin zamanla değişimi	77

Şekil 58.	İki boyutlu lineer dinamik analizde, temel rijit, barajın dolu olması durumunda B gauss noktasında meydana gelen maksimum asal gerilmelerin zamanla değişimi	77
Şekil 59.	İki boyutlu lineer dinamik analizde, temel rijit, barajın boş olması durumunda B gauss noktasında meydana gelen minimum asal gerilmelerin zamanla değişimi	78
Şekil 60.	İki boyutlu lineer dinamik analizde, temel rijit, barajın dolu olması durumunda B gauss noktasında meydana gelen minimum asal gerilmelerin zamanla değişimi	78
Şekil 61.	İki boyutlu lineer dinamik analizde, temel eğilebilir, barajın boş olması durumunda B gauss noktasında meydana gelen maksimum asal gerilmelerin zamanla değişimi	79
Şekil 62.	İki boyutlu lineer dinamik analizde, temel eğilebilir, barajın dolu olması durumunda B gauss noktasında meydana gelen maksimum asal gerilmelerin zamanla değişimi	79
Şekil 63.	İki boyutlu lineer dinamik analizde, temel eğilebilir, barajın boş olması durumunda B gauss noktasında meydana gelen minimum asal gerilmelerin zamanla değişimi	80
Şekil 64.	İki boyutlu lineer dinamik analizde, temel eğilebilir, barajın dolu olması durumunda B gauss noktasında meydana gelen minimum asal gerilmelerin zamanla değişimi	80
Şekil 65.	İki boyutlu lineer dinamik analizde, temel rijit, barajın boş olması durumunda C gauss noktasında meydana gelen maksimum asal gerilmelerin zamanla değişimi	81
Şekil 66.	İki boyutlu lineer dinamik analizde, temel rijit, barajın dolu olması durumunda C gauss noktasında meydana gelen maksimum asal gerilmelerin zamanla değişimi	81

Şekil 67. İki boyutlu lineer dinamik analizde, temelin rijit, barajın boş olması durumunda C gauss noktasında meydana gelen minimum asal gerilmelerin zamanla değişimi	82
Şekil 68. İki boyutlu lineer dinamik analizde, temelin rijit, barajın dolu olması durumunda C gauss noktasında meydana gelen minimum asal gerilmelerin zamanla değişimi	82
Şekil 69. İki boyutlu lineer dinamik analizde, temelin eğilebilir, barajın boş olması durumunda C gauss noktasında meydana gelen maksimum asal gerilmelerin zamanla değişimi	83
Şekil 70. İki boyutlu lineer dinamik analizde, temelin eğilebilir, barajın dolu olması durumunda C gauss noktasında meydana gelen maksimum asal gerilmelerin zamanla değişimi	83
Şekil 71. İki boyutlu lineer dinamik analizde, temelin eğilebilir, barajın boş olması durumunda C gauss noktasında meydana gelen minimum asal gerilmelerin zamanla değişimi	84
Şekil 72. İki boyutlu lineer dinamik analizde, temelin eğilebilir, barajın dolu olması durumunda C gauss noktasında meydana gelen minimum asal gerilmelerin zamanla değişimi	84
Şekil 73. İki boyutlu lineer olmayan dinamik analizde, temelin rijit, barajın boş olması durumunda A gauss noktasında meydana gelen maksimum asal gerilmelerin zamanla değişimi	85
Şekil 74. İki boyutlu lineer olmayan dinamik analizde, temelin rijit, barajın dolu olması durumunda A gauss noktasında meydana gelen maksimum asal gerilmelerin zamanla değişimi	85
Şekil 75. İki boyutlu lineer olmayan dinamik analizde, temelin rijit, barajın boş olması durumunda A gauss noktasında meydana gelen minimum asal gerilmelerin zamanla değişimi	86

Şekil 76. İki boyutlu lineer olmayan dinamik analizde, temelin rijit, barajın dolu olması durumunda A gauss noktasında meydana gelen minimum asal gerilmelerin zamanla değişimi	86
Şekil 77. İki boyutlu lineer olmayan dinamik analizde, temelin eğilebilir, barajın boş olması durumunda A gauss noktasında meydana gelen maksimum asal gerilmelerin zamanla değişimi	87
Şekil 78. İki boyutlu lineer olmayan dinamik analizde, temelin eğilebilir, barajın dolu olması durumunda A gauss noktasında meydana gelen maksimum asal gerilmelerin zamanla değişimi	87
Şekil 79. İki boyutlu lineer olmayan dinamik analizde, temelin eğilebilir, barajın boş olması durumunda A gauss noktasında meydana gelen minimum asal gerilmelerin zamanla değişimi	88
Şekil 80. İki boyutlu lineer olmayan dinamik analizde, temelin eğilebilir, barajın dolu olması durumunda A gauss noktasında meydana gelen minimum asal gerilmelerin zamanla değişimi	88
Şekil 81. İki boyutlu lineer olmayan dinamik analizde, temelin rijit, barajın boş olması durumunda akma fonksiyonun A gauss noktasında aldığı değerlerin zamanla değişimi	89
Şekil 82. İki boyutlu lineer olmayan dinamik analizde, temelin rijit, barajın dolu olması durumunda akma fonksiyonun A gauss noktasında aldığı değerlerin zamanla değişimi	89
Şekil 83. İki boyutlu lineer olmayan dinamik analizde, temelin eğilebilir, barajın boş olması durumunda akma fonksiyonun A gauss noktasında aldığı değerlerin zamanla değişimi	90
Şekil 84. İki boyutlu lineer olmayan dinamik analizde, temelin eğilebilir, barajın dolu olması durumunda akma fonksiyonun A gauss noktasında aldığı değerlerin zamanla değişimi	90

Şekil 85.	İki boyutlu lineer olmayan dinamik analizde, temelin rijit, barajın boş olması durumunda B gauss noktasında meydana gelen maksimum asal gerilmelerin zamanla değişimi	91
Şekil 86.	İki boyutlu lineer olmayan dinamik analizde, temelin rijit, barajın dolu olması durumunda B gauss noktasında meydana gelen maksimum asal gerilmelerin zamanla değişimi	91
Şekil 87.	İki boyutlu lineer olmayan dinamik analizde, temelin rijit, barajın boş olması durumunda B gauss noktasında meydana gelen minimum asal gerilmelerin zamanla değişimi	92
Şekil 88.	İki boyutlu lineer olmayan dinamik analizde, temelin rijit, barajın dolu olması durumunda B gauss noktasında meydana gelen minimum asal gerilmelerin zamanla değişimi	92
Şekil 89.	İki boyutlu lineer olmayan dinamik analizde, temelin eğilebilir, barajın boş olması durumunda B gauss noktasında meydana gelen maksimum asal gerilmelerin zamanla değişimi	93
Şekil 90.	İki boyutlu lineer olmayan dinamik analizde, temelin eğilebilir, barajın dolu olması durumunda B gauss noktasında meydana gelen maksimum asal gerilmelerin zamanla değişimi	93
Şekil 91.	İki boyutlu lineer olmayan dinamik analizde, temelin eğilebilir, barajın boş olması durumunda B gauss noktasında meydana gelen minimum asal gerilmelerin zamanla değişimi	94
Şekil 92.	İki boyutlu lineer olmayan dinamik analizde, temelin eğilebilir, barajın dolu olması durumunda B gauss noktasında meydana gelen minimum asal gerilmelerin zamanla değişimi	94
Şekil 93.	İki boyutlu lineer olmayan dinamik analizde, temelin rijit, barajın boş olması durumunda akma fonksiyonunun B gauss noktasında aldığı değerlerin zamanla değişimi	95

Şekil 94.	İki boyutlu lineer olmayan dinamik analizde, temelin rijit, barajın dolu olması durumunda akma fonksiyonun B gauss noktasında aldığı değerlerin zamanla değişimi	95
Şekil 95.	İki boyutlu lineer olmayan dinamik analizde, temelin eğilebilir, barajın boş olması durumunda akma fonksiyonun B gauss noktasında aldığı değerlerin zamanla değişimi	96
Şekil 96.	İki boyutlu lineer olmayan dinamik analizde, temelin eğilebilir, barajın dolu olması durumunda akma fonksiyonun B gauss noktasında aldığı değerlerin zamanla değişimi	96
Şekil 97.	İki boyutlu lineer olmayan dinamik analizde, temelin rijit, barajın boş olması durumunda C gauss noktasında meydana gelen maksimum asal gerilmelerin zamanla değişimi	97
Şekil 98.	İki boyutlu lineer olmayan dinamik analizde, temelin rijit, barajın dolu olması durumunda C gauss noktasında meydana gelen maksimum asal gerilmelerin zamanla değişimi	97
Şekil 99.	İki boyutlu lineer olmayan dinamik analizde, temelin rijit, barajın boş olması durumunda C gauss noktasında meydana gelen minimum asal gerilmelerin zamanla değişimi	98
Şekil 100.	İki boyutlu lineer olmayan dinamik analizde, temelin rijit, barajın dolu olması durumunda C gauss noktasında meydana gelen minimum asal gerilmelerin zamanla değişimi	98
Şekil 101.	İki boyutlu lineer olmayan dinamik analizde, temelin eğilebilir, barajın boş olması durumunda C gauss noktasında meydana gelen maksimum asal gerilmelerin zamanla değişimi	99
Şekil 102.	İki boyutlu lineer olmayan dinamik analizde, temelin eğilebilir, barajın dolu olması durumunda C gauss noktasında meydana gelen maksimum asal gerilmelerin zamanla değişimi	99

Şekil 103. İki boyutlu lineer olmayan dinamik analizde, temelin eğilebilir, barajın boş olması durumunda C gauss noktasında meydana gelen minimum asal gerilmelerin zamanla değişimi	100
Şekil 104. İki boyutlu lineer olmayan dinamik analizde, temelin eğilebilir, barajın dolu olması durumunda C gauss noktasında meydana gelen minimum asal gerilmelerin zamanla değişimi	100
Şekil 105. İki boyutlu lineer olmayan dinamik analizde, temelin rijit, barajın boş olması durumunda akma fonksiyonun C gauss noktasında aldığı değerlerin zamanla değişimi	101
Şekil 106. İki boyutlu lineer olmayan dinamik analizde, temelin rijit, barajın dolu olması durumunda akma fonksiyonun C gauss noktasında aldığı değerlerin zamanla değişimi	101
Şekil 107. İki boyutlu lineer olmayan dinamik analizde, temelin eğilebilir, barajın boş olması durumunda akma fonksiyonun C gauss noktasında aldığı değerlerin zamanla değişimi	102
Şekil 108. İki boyutlu lineer olmayan dinamik analizde, temelin eğilebilir, barajın dolu olması durumunda akma fonksiyonun C gauss noktasında aldığı değerlerin zamanla değişimi	102
Şekil 109. İki boyutlu lineer dinamik analizde, barajın boş ve dolu, temelin rijit olması durumunda menba yüzeyindeki mutlak değerce maksimum yerdeğiştirmelerin yükseklik boyunca değişimi	104
Şekil 110. İki boyutlu lineer dinamik analizde, barajın boş ve dolu, temelin eğilebilir olması durumunda menba yüzeyindeki mutlak değerce maksimum yerdeğiştirmelerin yükseklik boyunca değişimi	104

Şekil 111. İki boyutlu lineer olmayan dinamik analizde, barajın boş ve dolu,temelin rijit olması durumunda menba yüzeyindeki mutlak değerce maksimum yerdeğiştirmelerin yükseklik boyunca değişimi	105
Şekil 112. İki boyutlu lineer olmayan dinamik analizde, barajın boş ve dolu,temelin eğilebilir olması durumunda menba yüzeyindeki mutlak değerce maksimum yerdeğiştirmelerin yükseklik boyunca değişimi	105
Şekil 113. Üç boyutlu lineer statik analizde, temelin rijit, barajın boş olması durumunda menba ve mansap yüzeyinin X-doğrultusundaki (menba-mansap doğrultusu) yerdeğiştirmelerinin yükseklik boyunca değişimi	110
Şekil 114. Üç boyutlu lineer statik analizde, temelin rijit, barajın dolu olması durumunda menba ve mansap yüzeyinin X-doğrultusundaki (menba-mansap doğrultusu) yerdeğiştirmelerinin yükseklik boyunca değişimi	110
Şekil 115. Üç boyutlu lineer statik analizde, temelin eğilebilir, barajın boş olması durumunda menba ve mansap yüzeyinin X-doğrultusundaki (menba-mansap doğrultusu) yerdeğiştirmelerinin yükseklik boyunca değişimi	111
Şekil 116. Üç boyutlu lineer statik analizde, temelin eğilebilir, barajın dolu olması durumunda menba ve mansap yüzeyinin X-doğrultusundaki (menba-mansap doğrultusu) yerdeğiştirmelerinin yükseklik boyunca değişimi	111
Şekil 117. Üç boyutlu lineer olmayan statik analizde, temelin rijit, barajın dolu olması durumunda menba ve mansap yüzeyinin X-doğrultusundaki (menba-mansap doğrultusu) yerdeğiştirmelerinin yükseklik boyunca değişimi	112

Şekil 118. Üç boyutlu lineer statik analizde, temelin rijit, barajın boş olması durumunda menba ve mansap yüzeyinde meydana gelen X-doğrultusundaki gerilmelerin yükseklik boyunca değişimi	113
Şekil 119. Üç boyutlu lineer statik analizde, temelin rijit, barajın dolu olması durumunda menba ve mansap yüzeyinde meydana gelen X-doğrultusundaki gerilmelerin yükseklik boyunca değişimi	113
Şekil 120. Üç boyutlu lineer statik analizde, temelin eğilebilir, barajın boş olması durumunda menba ve mansap yüzeyinde meydana gelen X-doğrultusundaki gerilmelerin yükseklik boyunca değişimi	114
Şekil 121. Üç boyutlu lineer statik analizde, temelin eğilebilir, barajın dolu olması durumunda menba ve mansap yüzeyinde meydana gelen X-doğrultusundaki gerilmelerin yükseklik boyunca değişimi	114
Şekil 122. Üç boyutlu lineer statik analizde, temelin rijit, barajın boş olması durumunda menba ve mansap yüzeyinde meydana gelen Y-doğrultusundaki gerilmelerin yükseklik boyunca değişimi	115
Şekil 123. Üç boyutlu lineer statik analizde, temelin rijit, barajın dolu olması durumunda menba ve mansap yüzeyinde meydana gelen Y-doğrultusundaki gerilmelerin yükseklik boyunca değişimi	115
Şekil 124. Üç boyutlu lineer statik analizde, temelin eğilebilir, barajın boş olması durumunda menba ve mansap yüzeyinde meydana gelen Y-doğrultusundaki gerilmelerin yükseklik boyunca değişimi	116
Şekil 125. Üç boyutlu lineer statik analizde, temelin eğilebilir, barajın dolu olması durumunda menba ve mansap yüzeyinde meydana gelen Y-doğrultusundaki gerilmelerin yükseklik boyunca değişimi	116
Şekil 126. Üç boyutlu lineer statik analizde, temelin rijit, barajın boş olması durumunda menba ve mansap yüzeyinde meydana gelen Z-doğrultusundaki gerilmelerin yükseklik boyunca değişimi.....	117

Şekil 127. Üç boyutlu lineer statik analizde, temelin rijit, barajın dolu olması durumunda menba ve mansap yüzeyinde meydana gelen Z-doğrultusundaki gerilmelerin yükseklik boyunca değişimi.....	117
Şekil 128. Üç boyutlu lineer statik analizde, temelin eğilebilir, barajın boş olması durumunda menba ve mansap yüzeyinde meydana gelen Z-doğrultusundaki gerilmelerin yükseklik boyunca değişimi.....	118
Şekil 129. Üç boyutlu lineer statik analizde, temelin eğilebilir, barajın dolu olması durumunda menba ve mansap yüzeyinde meydana gelen Z-doğrultusundaki gerilmelerin yükseklik boyunca değişimi.....	118
Şekil 130. Üç boyutlu lineer statik analizde, temelin rijit, barajın dolu olması durumunda menba ve mansap yüzeyinde meydana gelen Y-doğrultusundaki gerilmelerin yükseklik boyunca değişimi	119
Şekil 131. Üç boyutlu lineer statik analizde, temelin rijit, barajın dolu olması durumunda menba ve mansap yüzeyinde meydana gelen Z-doğrultusundaki gerilmelerin yükseklik boyunca değişimi.....	119
Şekil 132. Üç boyutlu lineer dinamik analizde, temelin rijit, barajın boş olması durumunda kret noktasında (126 nolu düğüm noktası) menba-mansap doğrultusunda meydana gelen yerdeğiştirmelerin zamanla değişimi	123
Şekil 133. Üç boyutlu lineer dinamik analizde, temelin rijit, barajın dolu olması durumunda kret noktasında (126 nolu düğüm noktası) menba-mansap doğrultusunda meydana gelen yerdeğiştirmelerin zamanla değişimi	123
Şekil 134. Üç boyutlu lineer dinamik analizde, temelin eğilebilir, barajın boş olması durumunda kret noktasında (254 nolu düğüm noktası)menba-mansap doğrultusunda meydana gelen yerdeğiştirmelerin zamanla değişimi	124

Şekil 135. Üç boyutlu lineer dinamik analizde, temelin eğilebilir, barajın dolu olması durumunda kret noktasında (254 nolu düğüm noktası) menba-mansap doğrultusunda meydana gelen yerdeğiştirmelerin zamanla değişimi	124
Şekil 136. Üç boyutlu lineer olmayan dinamik analizde, temelin rijit, barajın boş olması durumunda kret noktasında (126 nolu düğüm noktası) menba-mansap doğrultusunda meydana gelen yerdeğiştirmelerin zamanla değişimi	125
Şekil 137. Üç boyutlu lineer olmayan dinamik analizde, temelin rijit, barajın dolu olması durumunda kret noktasında (126 nolu düğüm noktası) menba-mansap doğrultusunda meydana gelen yerdeğiştirmelerin zamanla değişimi	125
Şekil 138. Üç boyutlu lineer dinamik analizde, temelin rijit, barajın boş olması durumunda x-doğrultusunda (menba-mansap doğrultusu) 68 nolu elemanda meydana gelen gerilmelerin zamanla değişimi	126
Şekil 139. Üç boyutlu lineer dinamik analizde, temelin rijit, barajın dolu olması durumunda x-doğrultusunda (menba-mansap doğrultusu) 68 nolu elemanda meydana gelen gerilmelerin zamanla değişimi	126
Şekil 140. Üç boyutlu lineer dinamik analizde, temelin eğilebilir, barajın boş olması durumunda x-doğrultusunda (menba-mansap doğrultusu) 247 nolu elemanda meydana gelen gerilmelerin zamanla değişimi	127
Şekil 141. Üç boyutlu lineer dinamik analizde, temelin eğilebilir, barajın dolu olması durumunda x-doğrultusunda (menba-mansap doğrultusu) 247 nolu elemanda meydana gelen gerilmelerin zamanla değişimi	127

Şekil 142. Üç boyutlu lineer dinamik analizde, temelin rijit, barajın boş olması durumunda X-doğrultusunda (menba-mansap doğrultusu) 76 nolu elemanda meydana gelen gerilmelerin zamanla değişimi	128
Şekil 143. Üç boyutlu lineer dinamik analizde, temelin rijit, barajın dolu olması durumunda X-doğrultusunda (menba-mansap doğrultusu) 76 nolu elemanda meydana gelen gerilmelerin zamanla değişimi	128
Şekil 144. Üç boyutlu lineer dinamik analizde, temelin eğilebilir, barajın boş olması durumunda X-doğrultusunda (menba-mansap doğrultusu) 255 nolu elemanda meydana gelen gerilmelerin zamanla değişimi	129
Şekil 145. Üç boyutlu lineer dinamik analizde, temelin eğilebilir, barajın dolu olması durumunda X-doğrultusunda (menba-mansap doğrultusu) 255 nolu elemanda meydana gelen gerilmelerin zamanla değişimi	129
Şekil 146. Üç boyutlu lineer dinamik analizde, temelin rijit, barajın boş olması durumunda Z-doğrultusunda (düşey doğrultu) 68 nolu elemanda meydana gelen gerilmelerin zamanla değişimi	130
Şekil 147. Üç boyutlu lineer dinamik analizde, temelin rijit, barajın dolu olması durumunda Z-doğrultusunda (düşey doğrultu) 68 nolu elemanda meydana gelen gerilmelerin zamanla değişimi	130
Şekil 148. Üç boyutlu lineer dinamik analizde, temelin eğilebilir, barajın boş olması durumunda Z-doğrultusunda (düşey doğrultu) 247 nolu elemanda meydana gelen gerilmelerin zamanla değişimi	131

Şekil 149. Üç boyutlu lineer dinamik analizde, temelin eğilebilir, barajın dolu olması durumunda Z-doğrultusunda (düşey doğrultu) 247 nolu elemanda meydana gelen gerilmelerin zamanla değişimi	131
Şekil 150. Üç boyutlu lineer dinamik analizde, temelin rijit, barajın boş olması durumunda Z-doğrultusunda (düşey doğrultu) 76 nolu elemanda meydana gelen gerilmelerin zamanla değişimi.....	132
Şekil 151. Üç boyutlu lineer dinamik analizde, temelin rijit, barajın dolu olması durumunda Z-doğrultusunda (düşey doğrultu) 76 nolu elemanda meydana gelen gerilmelerin zamanla değişimi.....	132
Şekil 152. Üç boyutlu lineer dinamik analizde, temelin eğilebilir, barajın boş olması durumunda Z-doğrultusunda (düşey doğrultu) 255 nolu elemanda meydana gelen gerilmelerin zamanla değişimi	133
Şekil 153. Üç boyutlu lineer dinamik analizde, temelin eğilebilir, barajın dolu olması durumunda Z-doğrultusunda (düşey doğrultu) 255 nolu elemanda meydana gelen gerilmelerin zamanla değişimi	133
Şekil 154. Üç boyutlu lineer olmayan dinamik analizde, temelin rijit, barajın boş olması durumunda X-doğrultusunda (menba-mansap doğrultusu) 68 nolu elemanda meydana gelen gerilmelerin zamanla değişimi	134
Şekil 155. Üç boyutlu lineer olmayan dinamik analizde, temelin rijit, barajın dolu olması durumunda X-doğrultusunda (menba-mansap doğrultusu) 68 nolu elemanda meydana gelen gerilmelerin zamanla değişimi	134

Şekil 156. Üç boyutlu lineer olmayan dinamik analizde, temelin rijit, barajın boş olması durumunda X-doğrultusunda (menba-mansap doğrultusu) 76 nolu elemanda meydana gelen gerilmelerin zamanla değişimi	135
Şekil 157. Üç boyutlu lineer olmayan dinamik analizde, temelin rijit, barajın dolu olması durumunda X-doğrultusunda (menba-mansap doğrultusu) 76 nolu elemanda meydana gelen gerilmelerin zamanla değişimi	135
Şekil 158. Üç boyutlu lineer olmayan dinamik analizde, temelin rijit, barajın boş olması durumunda Z-doğrultusunda (düşeydoğrultu) 68 nolu elemanda meydana gelen gerilmelerin zamanla değişimi	136
Şekil 159. Üç boyutlu lineer olmayan dinamik analizde, temelin rijit, barajın dolu olması durumunda Z-doğrultusunda (düşey doğrultu) 68 nolu elemanda meydana gelen gerilmelerin zamanla değişimi	136
Şekil 160. Üç boyutlu lineer olmayan dinamik analizde, temelin rijit, barajın boş olması durumunda Z-doğrultusunda (düşey doğrultu) 76 nolu elemanda meydana gelen gerilmelerin zamanla değişimi	137
Şekil 161. Üç boyutlu lineer olmayan dinamik analizde, temelin rijit, barajın dolu olması durumunda Z-doğrultusunda (düşey doğrultu) 76 nolu elemanda meydana gelen gerilmelerin zamanla değişimi	137
Şekil 162. Üç boyutlu lineer dinamik analizde, barajın boş ve dolu, temelin rijit olması durumunda menba yüzeyindeki mutlak değerce maksimum yerdeğiştirmelerin yükseklik boyunca değişimi	139

Şekil 163. Üç boyutlu lineer dinamik analizde, barajın boş ve dolu, temelin eğilebilir olması durumunda menba yüzeyindeki mutlak değerce maksimum yerdeğişirmelerin yükseklik boyunca değişimi	139
Şekil 164. Üç boyutlu lineer olmayan dinamik analizde, barajın boş ve dolu, temelin rijit olması durumunda menba yüzeyindeki mutlak değerce maksimum yerdeğişirmelerin yükseklik boyunca değişimi	140



TABLO LİSTESİ

	<u>Sayfa No</u>
Tablo 1. Türkiye'deki kemer barajların havzaları ve durumları	2
Tablo 2. Türkiye'deki kemer barajların başlıca özellikleri	3
Tablo 3. Lineer analizler için malzeme özellikleri	52
Tablo 4. Lineer olmayan analizler için malzeme özellikleri	52
Tablo 5. Rayleigh sabitleri	54
Tablo 6. İki boyutlu lineer ve lineer olmayan statik analizde, çeşitli durumlar için kret noktasında meydana gelen yatay yerdeğiştirmeler	56
Tablo 7. İki boyutlu lineer statik analizde, çeşitli durumlar için menba yüzeyinde yatay doğrultuda meydana gelen en büyük çekme ve basınç gerilmeleri	66
Tablo 8. İki boyutlu lineer statik analizde, çeşitli durumlar için menba yüzeyinde düşey doğrultuda meydana gelen en büyük çekme ve basınç gerilmeleri	66
Tablo 9. İki boyutlu lineer olmayan statik analizde, çeşitli durumlar için menba yüzeyinde yatay doğrultuda meydana gelen en büyük çekme ve basınç gerilmeleri	67
Tablo 10. İki boyutlu lineer olmayan statik analizde, çeşitli durumlar için menba yüzeyinde düşey doğrultuda meydana gelen en büyük çekme ve basınç gerilmeler	67
Tablo 11. İki boyutlu lineer ve lineer olmayan dinamik analizde, çeşitli durumlar için kret noktasında meydana gelen maksimum yatay yerdeğiştirmeler	106
Tablo 12. İki boyutlu lineer ve lineer olmayan dinamik analizde çeşitli durumlar için maksimum asal gerilmelerin karşılaştırılması	106
Tablo 13. İki boyutlu lineer ve lineer olmayan dinamik analizde çeşitli durumlar için minimum asal gerilmelerin karşılaştırılması	107

Tablo 14. Üç boyutlu lineer statik analizde, çeşitli durumlar için kret noktasında meydana gelen X-doğrultusundaki (menba-mansap doğrultusu) yerdeğiştirmeler	120
Tablo 15. Üç boyutlu lineer statik analizde, çeşitli durumlar için kret noktasında meydana gelen Z-doğrultusundaki (düşey) yerdeğiştirmeler	120
Tablo 16. Üç boyutlu lineer statik analizde, çeşitli durumlar için menba yüzeyinde X-doğrultusunda meydana gelen en büyük çekme ve basınç gerilmeleri	120
Tablo 17. Üç boyutlu lineer statik analizde, çeşitli durumlar için menba yüzeyinde Y-doğrultusunda meydana gelen en büyük çekme ve basınç gerilmeleri	121
Tablo 18. Üç boyutlu lineer statik analizde, çeşitli durumlar için menba yüzeyinde Z-doğrultusunda meydana gelen en büyük çekme ve basınç gerilmeleri	121
Tablo 19. İki boyutlu lineer ve lineer olmayan dinamik analizde, çeşitli durumlar için kret noktasında meydana gelen maksimum yatay yerdeğiştirmeler	140
Tablo 20. Üç boyutlu lineer dinamik analizde, çeşitli durumlar için menba yüzeyinde X-doğrultusunda meydana gelen en büyük çekme ve basınç gerilmeleri	141
Tablo 21. Üç boyutlu lineer dinamik analizde, çeşitli durumlar için menba yüzeyinde Z-doğrultusunda meydana gelen en büyük çekme ve basınç gerilmeleri	141
Tablo 22. Üç boyutlu lineer olmayan dinamik analizde, çeşitli durumlar için menba yüzeyinde X-doğrultusunda meydana gelen en büyük çekme ve basınç gerilmeleri	142

Tablo 23. Üç boyutlu lineer olmayan dinamik analizde, çeşitli durumlar için menba yüzeyinde Z-doğrultusunda meydana gelen en büyük çekme ve basınç gerilmeleri	142
Tablo 24. İki ve üç boyutlu lineer ve lineer olmayan statik analizde kret noktasında menba-mansap doğrultusunda meydana gelen yerdeğıştirmeler	143
Tablo 25. İki ve üç boyutlu lineer ve lineer olmayan dinamik analizde kret noktasında menba-mansap doğrultusunda meydana gelen mutlak değerce maksimum yerdeğıştirmeler.....	144



SEMBOL LİSTESİ

P	: Baraja etkiyen hidrostatik su kuvvetinin bileşkesi
γ_w	: Suyun birim hacim ağırlığı
H	: Rezervuar yüksekliği
A	: Baraj menba yüzey alanı
$m(z)$: Rezervuar derinliğine bağlı kütle dağılımı
w	: Suyun birim ağırlığı
z	: Su yüzeyinden itibaren su derinliği
m_{ni}^h	: i düğüm noktasına eklenen kütle değeri
$m_{c_x,i}^h$: c yönünde meydana gelen depremden dolayı x yönünde i düğüm noktasına eklenecek virtüel kütle
$m_{c_y,i}^h$: c yönünde meydana gelen depremden dolayı y yönünde i düğüm noktasına eklenecek virtüel kütle
$m_{c_z,i}^h$: c yönünde meydana gelen depremden dolayı z yönünde i düğüm noktasına eklenecek virtüel kütle
e_1, e_2, e_3	: Doğrultman kosinüsleri
F	: Akma Fonksiyonu
ϵ^e	: Elastik şekildeğiştirme
σ^e	: Elastik şekildeğiştirmelere karşılık gelen gerilmeler
ϵ^p	: Plastik şekildeğiştirme
σ^p	: Plastik şekildeğiştirmelere karşılık gelen gerilmeler
ϵ	: Toplam şekildeğiştirme
σ	: Toplam gerilme
κ	: Pekleşme parametresi
c	: Kohezyon
ϕ	: İçsel sürtünme açısı
$\sigma_{11}, \sigma_{22}, \sigma_{33}$: Gerilme bileşenleri
δ_{ij}	: Kroneker deltası
σ_m	: Ortalama gerilme

S_{ij}	: Sapma gerilmeleri
D	: Elastik malzeme matrisi
D_{EP}	: Plastik malzeme matrisi
E	: Elastisite modülü
ν	: Poisson oranı
K	: Hacimsel elastisite modülü
G	: Kayma modülü
e_m	: Ortalama şekildeğiştirme
g_{ij}	: Sapma şekildeğiştirmeleri
e_g	: Ağırlıktan dolayı meydana gelen şekildeğiştirmeler
e_v	: Hacimsel şekildeğiştirme
U	: Yerdeğiştirme vektörü
\dot{U}	: Hız vektörü
\ddot{U}	: İvme vektörü
P	: Dış yük vektörü
M	: Kütle matrisi
C	: Sönüm matrisi
K_L	: Lineer sistemin rijitlik matrisi
K_{NL}	: Lineer olmayan sistemin rijitlik matrisi
$F_I(t)$: Atalet kuvvetleri
$F_D(t)$: Sönüm kuvvetleri
$F_S(t)$: Elastik kuvvetler
U_i	: i anındaki yerdeğiştirme vektörü
U_{i+1}	: $i+1$ anındaki yerdeğiştirme vektörü
\dot{U}_i	: i anındaki hız vektörü
\dot{U}_{i+1}	: $i+1$ anındaki hız vektörü
\ddot{U}_i	: i anındaki ivme vektörü
\ddot{U}_{i+1}	: $i+1$ anındaki ivme vektörü
T	: Çözüm zamanı
Δt	: Zaman aralığı

- l : İterasyon sayısı
 h : Eleman boyutu
 V_s : Kayma dalgası hızı
 f_n : En Büyük doğal frekans
 γ, β : Sayısal metodun stabilite ve doğruluk karakteristiklerine belirleyen parametreler



1. GENEL BİLGİLER

1.1. Giriş

1.1.1. Kemer Barajların Tarihi Gelişimi

Hayatın vazgeçilmez bir unsuru olan su; tarım, sanayi ve enerji gibi birçok alanda kullanılmaktadır. Dünya yüzeyinin 3/4'ünün sularla kaplı olması, kütlelerinin 1/3'ünün su olmasına rağmen, istenilen zaman ve yerde gerektiği kadar su bulunamaması insanoğlunu su biriktirme yapıları yapmak zorunda bırakmıştır. İlk çağlarda yalnız içme ihtiyacını gidermek üzere yapılmış birkaç litrelik su kapları su yapılarının başlangıcını simgelerken, bugün milyonlarca metreküp su depolayabilen barajlar, insanların su ihtiyaçlarını karşılayacak en önemli su yapılarıdır [1].

Bugün için bilinen en eski su yapısı, Ürdün'de M.Ö. 4000 yılından kaldığı tahmin edilen 4 m yüksekliğinde ve 94 m kret uzunluğundaki Jawa barajıdır [2].

Bir ağırlık barajını planda eğri bir şekilde yapmak suretiyle stabilitesini iyileştirme işlemi, 16.yüzyılda İspanya'da Almanza ve Relleu kargir barajlarında uygulanmıştır. Ancak yüksek kaliteden inşa edilen çift eğrilikli kemer baraj 20.yüzyıl ürünüdür [3].

Kemer prensipleri, M.Ö. 2000 yılından beri yapılarda uygulanmaktadır. Bu prensibi, kemer su yapılarına ilk uygulayanların Romalılar olduğu ve hatta Türkiye-Suriye sınırında Bizans imparatoru Justiman zamanında, taşkın kontrolü ve su temini amacına yönelik olarak kemer türü su yapılarının yapıldığı bilinmektedir [4]. Ancak, tarihte bugünkü anlamı ile ilk kemer baraj, 1611 yılında Avusturya'da inşa edilen Pantalto barajıdır [4].

1843-1854 yılları arasında Fransa'da inşa edilen, kret uzunluğu 66 m , maksimum yüksekliği 42.5 m olan Zola barajı hesap esasına dayanan ilk kemer barajdır [5].

Osmanlı döneminde, 1839 yılında Sultan II. Mahmut tarafından İstanbul'da inşa edilen, 217500 m³ gövde hacmine sahip, 17 m yüksekliğindeki Yeni Barajı ilk kemer ağırlık barajıdır [7].

Cumhuriyet tarihinde ise ilk kemer baraj, Sakarya nehri üzerinde inşa edilen ve 1972 yılında işletmeye açılan 145 m yüksekliğindeki Gökçekaya barajıdır [5]. Bu barajın depolama hacmi $910 \times 10^6 \text{ m}^3$ olup, enerji üretmek amacına yöneliktir.

Türkiye’de şu anda mevcut, inşa halinde, projesi hazır ve ön proje aşamasında olan kemer barajlar ile ilgili özellikler Tablo 1 ve Tablo 2’de verilmektedir [6,7].

Tablo 1. Türkiye’deki kemer barajların havzaları ve durumları [6,7].

Kemer Baraj Adı	Akarsuyu	Havzası	Amaç	İnşa Süresi
Gökçekaya	Sakarya	Sakarya	Enerji	1967-1972
Oymapınar	Manavgat	Antalya	Enerji	1977-1984
Karakaya	Fırat	Fırat	Enerji	1976-1987
Gezende	Ermenek	D.Akdeniz	Enerji	1979-1990
Sır	Ceyhan	Ceyhan	Enerji	1987-1991
Berke*	Ceyhan	Ceyhan	Enerji	İnşa halinde
Düzkesme	Ceyhan	Ceyhan	Enerji	Projesi Hazır
Deriner	Çoruh	Çoruh	Enerji	Projesi Hazır
Güllübağ	Çoruh	Çoruh	Enerji	Ön Proje
Yusufeli	Çoruh	Çoruh	Enerji	Ön Proje
Laleli	Çoruh	Çoruh	Enerji	Ön Proje

* İnce Kemer

Tablo 2. Türkiye'deki kemer barajların başlıca özellikleri [6,7].

Kemer Baraj Adı	Yükseklik (m)		Kret Uzunluğu (m)	Kret Kotu (m)	Gövde Hacmi (10 ³ m ³)
	Temelden	Talvegden			
Gökçekaya	158	115	380	392	650
Oymapınar	185	157	360	185	676
Karakaya	173	158	462	698	2000
Gezende	75	71	172	335	83
Sır	116	106	357	443	494
Berke *	201	186		346	7292
Düzkesme	83	68	194	356	103
Deriner	250	209	460		2037
Güllübağ	94	72			154
Yusufeli	259	206	540		2931
Laleli	135	119			701

* İnce Kemer

1.1.2. Kemer Barajlar İle İlgili Daha Önce Yapılmış Çalışmalar

Barajlar ile ilgili ilk çalışmalar, özellikle dinamik analiz, çok basit ve yaklaşık yöntemlerle yapılmaktaydı. Gerek barajların büyük kütleleri dolayısıyla depremlerin baraj gövdelerinde çekme gerilmesi oluşturabileceğine ihtimal verilmemesi, gerekse böyle bir hesabı yapabilecek kapsamda analitik yöntemlerin gelişmiş olmaması, belirtilen yöntemleri yeterli kılmaktaydı.

1915 yılında L.Jorgensen [3], sadece kemer etkisini dikkate alarak, bir kemer barajın analizini gerçekleştirmiştir. Burada bütün yüklerin yamaçlara aktarıldığı kabul

edilmiştir. Aynı çalışmada bir kemer baraj için en ekonomik şeklin, kemer açısının her seviyede 133° - 134° olduğu zaman elde edilebileceği ileri sürülmüştür.

1930'lu yıllarda gelişen deneme-yük metoduna (Trial-Load Method) en büyük katkıyı Westergaard yapmıştır [3]. Bu metod kullanılarak, çeşitli yük durumlarına maruz değişken kalınlıklı kemer ve konsolların çözümü için pek çok integral tablosu hazırlanmıştır. Kemer konsollar arasındaki her kesişme noktasında meydana gelen, düşey eksen etrafındaki dönmenin yanısıra, radyal ve teğetsel deplasmanlar karşılaştırılabilmiştir. Bu metoda göre 1935-1960 yılları arasında birçok kemer baraj projelendirilmiştir [3]. Hatta 1984 yılında işletmeye açılan Oymapınar kemer barajı, bu metoda göre projelendirilmiştir.

1960'lı yıllarda sonlu elemanlar metodunun gelişmesiyle, kemer barajların dinamik analizlerinde, baraj-rezervuar, baraj-temel ve baraj-rezervuar-temel etkileşimleri dikkate alınarak çalışmalar genişletilmiştir.

1967 yılında Hindistan'da Koyna barajının bir depremde çatlaması ve 1971 yılında San Fernando depreminde pek çok barajın ağır hasar görmesi, barajların deprem sırasındaki davranışının çok ciddi bir şekilde incelenmesi gerektiğini ortaya koymuştur. Çok narin bir yapıya sahip olan kemer barajların, deprem sırasındaki davranışı 1960'lı yıllara kadar pek anlaşılmış değildi. 1958 yılında kemer barajlarda sonlu elemanlar yönteminin kullanılmasıyla bu alandaki çalışmalar genişletildi. 1962 yılında izoparametrik sonlu elemanların ortaya atılması, iki boyutlu elemanların yanı sıra üç boyutlu elemanların da gelişimi ile kemer barajların şekilleri üzerindeki bütün sınırlamalar kaldırılmış oldu [3].

Tottenham [9], statik ve sabit sıcaklık yükleri altında, ince kabuk olarak dikkate alınan kemer barajların gerilme analizini gerçekleştirmiştir. Bu çalışmada, varyasyonel metod, integral denklemleri ve kabuk sonlu elemanlar kullanılmıştır. Elde edilen sonuçlar üç boyutlu sonlu eleman çözümleri ile karşılaştırılmıştır. İntegral denklem metodu, daha sonra kemer barajların deprem gibi dinamik yükler altındaki davranışlarını incelemek için genişletilmiştir.

Zienkiewicz ve diğ. [10], dikdörtgen plak elemanların kullanıldığı sonlu eleman metodunu, silindirik kemerlere uyguladılar. Ayrıca, üçgen plak elemanların kullanıldığı

daha genel bir yaklaşım, çift eğrilikli kemer barajlar için verilmiştir. Bu çalışmada üç boyutlu çözümlerin oldukça doğru sonuç verdiği gösterilmiştir.

Ergatoudis ve diğ. [11], sonlu elemanlar yöntemini kullanarak tek ve çift eğrilikli kemer barajlar için üç boyutlu gerilme analizi gerçekleştirmişlerdir. 60 veya 96 serbestlik dereceli izoparametrik elemanların çok iyi sonuçlar verdiğini göstermişlerdir. Ayrıca, bu çalışmada, temelin eğilebilir olması da göz önünde bulundurulmuştur.

Dungar ve Severn [12,13], statik ve dinamik yükler altında tek ve çift eğrilikli kemer barajların analizini gerçekleştirdiler. Bu çalışmalarda, kalınlığın düğüm noktaları arasında lineer olarak değiştiği üçgen elemanlar kullanılmıştır. Rijitlik matrisinin elde edilmesinde, gerilme bileşenlerinin elemanın içinde ve sınırlarında basit polinom şeklinde değiştiği kabul edilmiştir. Bu şekilde oluşturulan rijitlik matrislerinin, hem dinamik rölaksasyon hem de üç boyutlu sonlu elemanlarda elde edilenler kadar iyi sonuçlar verdiği gösterilmiştir. Yine sonlu elemanlar metodu kullanılarak rijitlik matrisine kütle matrisi eklenmiş ve barajın doğal frekansları ile mod şekilleri hesaplanmıştır. Depreme karşı barajın davranışını tespit etmek için, adım adım integrasyon ve spektral hız eğrileri kullanılmıştır.

O'Conner ve Boot [14], Newmark metodunu kullanarak, üç boyutlu kemer baraj-rezervuar sisteminin deprem analizini gerçekleştiren iki işlem geliştirdiler. Bu işlemlerde suyun sıkışabilirlik etkisi dikkate alınmış, yapı ve sıvı, ayrı ayrı modellenmiştir. Hidrodinamik basınçlar ve atalet kuvvetleri baraj-rezervuar arayüzeyinde kuvvet fonksiyonları şeklinde ifade edilmiştir.

Perumalswami ve Kar [15], deprem sırasında kemer baraj ile rezervuar arasındaki etkileşimi belirlemek için bir metod geliştirdiler. Bu metodda, baraj-rezervuar etkileşimi barajın modal özellikleri ve hidrodinamik basınçların kompleks frekans davranışları kullanılarak tanımlanmıştır. Elde edilen sonuçlar neticesinde rezervuarın varlığının baraj davranışını önemli ölçüde etkilediğini, suyun sıkışabilirliğinin baraj-rezervuar sistemlerinin davranışını büyük oranda değiştirdiğini göstermişlerdir.

Chopra ve grubunun, suyun sıkışabilirlik etkisini de içeren baraj-rezervuar etkileşimi ile ilgili birçok çalışmaları vardır. Bu çalışmalarda modların süperpozisyonu yöntemini kullanarak frekans alanında çözümler önerilmiştir [16-29].

Chopra'nın 1968 yılındaki çalışması [16], bu grubun çalışmalarına temel oluşturmaktadır. Başlangıçta, boş barajın sadece temel modu dikkate alınarak [16,29], incelenmeye başlanan baraj-rezervuar etkileşim problemi, daha sonra ilk birkaç mod içerecek şekilde genişletilmiştir. İlgili çalışmalarda, önce baraj ve rezervuar ortamları tüm sistemin iki alt sistemi olarak göz önüne alınmaktadır. Baraj alt sistemi, rijit temele oturan bir sonlu eleman sistemi, rezervuar alt sistemi ise sabit derinlikli ve sonsuza dek uzanan sürekli bir ortam olarak temsil edilmektedir. Rezervuardaki suyun hidrodinamik etkileri, barajın hareket denklemlerinde frekans bağımlı terimler olarak gözükmektedir. Daha sonra bu denklemler barajın ilk birkaç modu cinsinden ifade edilmektedir. Bu dönüşüm bilinmeyenlerin sayısını önemli ölçüde azalttığından çok etkili çözümlere götürmektedir. Ağırılık barajlar için başlatılan bu çalışmalar, kemer barajlar için de geliştirilmiştir [17-26].

Fok ve Chopra [20-23], yukarıda bahsedilen çalışmalar ışığında, kemer barajlarda temel esnekliği ve rezervuar tabanı absorpsiyon etkilerini dikkate alarak çalışmalarını bu yönde genişlettiler.

Tan ve Chopra [24-26], kemer barajlarda, baraj-rezervuar, baraj-zemin ve baraj-rezervuar-zemin etkileşimini, kaya zeminin atalet ve sönüm kuvvetlerini göz önüne alarak baraj davranışını incelemiştirlerdir.

Hall ve Chopra [28], hidrodinamik etkileri içeren deprem davranışlarını belirlemek üzere, frekans alanında beton ağırılık ve toprak dolgu barajlar için geliştirdikleri analiz metodunu [27] kemer barajlara uygulamışlardır.

Dumanoğlu ve Severn [30] ile Dumanoğlu ve diğ. [31,32], değişik hızlarla yayılan asinkronize yatay ve düşey yer hareketine maruz asma köprülerin yanısıra toprak, beton ağırılık ve kemer barajların da dinamik davranışını incelediler. Bu çalışmalarda, sonlu elemanlar yöntemi kullanılarak baraj ve temel birlikte modellendirilmiştir. Elde edilen sonuçlara göre, deprem dalgası yayılma hızının azalmasıyla yapıda oluşan gerilmelerde genel olarak bir artış olduğu gözlenmiştir. Böylelikle, yapının tabanına etkiyen yer hareketi hızının hesaplarda bir faktör olarak ele alınması vurgulanmıştır.

Zhang ve Mai [33], kemer barajların iki yakası arasındaki zaman gecikmesini dikkate alarak analitik çözümler elde etmiştir. Zaman gecikmesinin gerilmeler üzerindeki etkisi, deprem dalgası yerdeğiştirmesinin genliğine bağlı olarak değişmektedir. Zahiri

statik yerdeğiştirme genlikleri büyükse dinamik gerilmeler daha büyük değerler almaktadır.

Chen ve Hou [34], kemer barajların yayılan yer hareketine karşı davranışını incelediler. Rezervuarın etkisi, hareket denklemlerinde ek kütle olarak dikkate alınmakta ve rezervuar suyunun sıkışamaz olduğu kabul edilmektedir. Nehir yönüne dik doğrultuda yayılan deprem dalgasının etkisi üniform yer hareketi sonuçlarıyla karşılaştırıldığında, maksimum gerilmelerde %40-50 oranlarında artışlar meydana gelmektedir.

Doğada hiçbir şeyin lineer davranış göstermemesi, araştırmacıları yapı sistemlerinin gerçek davranışını incelemeye sevketmiştir. Ancak bu, hafızası büyük bilgisayarlar ve etkili metodlar gerektirmektedir. Yüksek hızlı, geniş kapasiteli bilgisayarların ve buna paralel olarak sonlu elemanlar metodu gibi etkin sayısal metodların gelişmesiyle araştırmacılar son yıllarda lineer olmayan analize yönelmişlerdir.

şimdiye kadar, kemer barajların lineer olmayan davranışlarını inceleyen çalışmalarda, beton blokların birleştiği düğüm noktalarının (contraction joints) açılması, baraj betonunda çatlak oluşumu ve kavitasyon etkileri görölmektedir. Her ne kadar bu çalışmalar daha çok beton ağırlık barajları ile sınırlı ise de, su-baraj etkileşimi, kavitasyon ve lineer olmayan çözümler kemer barajların narinliği nedeni ile önem kazanmaktadır.

Niwa ve Clough [35,36], bu üç durumda sarsma tablasında ölçekli modeller üzerinde incelemiştir. Beton blokların birleşim yerlerindeki düğüm noktalarının açılması olayını, prototip bir barajın yatay kesitine benzeyen dilimlenmiş kemer halka modeli ile temsil etmeye çalıştılar. Bu mekanizmanın, kemer doğrultusunda çekme gerilmelerinin oluşumunu önlediği ve yapının titreşim periyodunda değişiklik oluşturduğu için dinamik davranış büyük oranda etkilediği görölmüştür. Bu arada, kemer doğrultusundaki basınç gerilmeleri, düğüm noktasının açılması sonucunda önemli ölçüde artmaktadır. Bunun en önemli nedeni, kısmen açılmış kemer dilimleri arasındaki değme alanının azalmasıdır. Lineer dinamik analiz sonuçlarının yorumlanması temeline dayanan bu deneysel gözlemler, tasarımcıların barajın deprem esnasındaki davranışını ile ilgili sezgilerini doğrulamış ve barajın güvenliği hususunda bir hüküm vermelerine yardımcı olmuştur. Aynı çalışmada, baraj betonunda çatlak oluşumu ve kavitasyon etkileri bir ağırlık baraj kesiti üzerinde incelenmiştir. Çatlaklı konsol modeller üzerinde yapılan testlerden, oldukça

küçük ivme değerleri için (1.2g) çatlaklı konsolun stabil kalabildiği kanıtlanmıştır. Bu gözlemlerden, kemer ve konsollardan oluşan gerçek kemer barajların deprem yüklerine karşı, sadece kemer veya sadece konsollardan oluşan barajlara göre daha dayanıklı olduğu görülmüştür. Teorik olarak, eğer deprem sırasında barajın menba tarafındaki negatif hidrodinamik basınçlar, deprem öncesi hidrostatik basınçlar ile atmosferik basınçların toplamını aşıyorsa kavitasyon meydana gelir. Negatif basınçlar veya kavitasyonun varlığı, sarsma tablası kullanılarak dinamik yükleme için test edilen bir ağırlık barajının laboratuvar deneylerinde gözlemlenmiştir. Bu deneyler, kavitasyonun hareketin doğrultusuna bağlı olarak baraj yüzeyindeki çekme gerilmelerini artırabileceğini veya azaltabileceğini göstermektedir; kavitasyonun da en büyük etkiyi barajın üst kısmında oluşturacağını ortaya koymuştur.

Oskouei [37-40], baraj betonundaki çatlak ve kavitasyon olayını, bir ağırlık baraj kesitinde incelemiştir. Şiddetli depremlerde sıvı ortamda kavitasyon ve yapıda meydana gelen çatlaklar, bu çatlakların açılıp kapanması, malzeme davranışının lineer olmadığı kabulüne göre dikkate alınmıştır. Barajda oluşan çatlaklar, sabit doğrultulu yayılı çatlak modeli ile temsil edilmiştir.

Dowling [41], Dowling ve Hall [42,43], beton blokların birleşim yerlerindeki davranışı tanımlayabilmek için, lineer olmayan davranış gösteren yaylardan oluşan, farklı bir düğüm noktası modeli geliştirdiler. Bu model ile yapılan analizler, orta şiddetli depremlerde bu düğüm noktalarının, özellikle üst kısımlarının, kemer baraj davranışını önemli derecede etkilediğini göstermiştir. Ayrıca, düğüm noktalarının kapanan kısımlarında büyük basınç gerilmelerinin oluştuğu görülmüştür.

Ahmadi ve Razavi [44], statik yüklerden dolayı kemer barajlarda oluşacak çatlakları, düşey bloklar arasında yüzey elemanı kullanarak incelediler. Yapılan analizler sonucunda, çift eğrilikli kemer barajlarda, kendi ağırlığından dolayı düşey bloklar arası düğüm noktalarının açılmasının radyal yerdeğiştirmeleri artırdığı görülmüştür.

Deprem yükleri altında yapılan lineer analizlerde, barajı oluşturan kemerlerin, monolitik, homojen ve izotropik olduğu kabul edilmekte ve beton blokların birleşim yerlerindeki düğüm noktaları ihmal edilmektedir. Ancak, bu düğüm noktalarının yakın bölgelerinde yatay gerilmelerin büyük değerlere ulaştığı birçok araştırmacı tarafından

gösterilmiştir [45-47]. Mays ve Roehm [45] ile Fenves ve diğ. [47], beton bloklar arasında düğüm noktası oluşturularak bu gerilmelerin azaltılabileceğini gösterdiler.

1.1.3. Çalışmanın Kapsamı

Bu tez çalışmasında, kemer barajların lineer ve malzeme olarak lineer olmayan statik ve dinamik analizi incelenmektedir. Lineer olmayan iki boyutlu analizler için, Drucker-Prager hipotezi, üç boyutlu analizler için ise, eğri tanımlama (curve description) modeli kullanılmaktadır. Yapılan analizler ile, lineer ve lineer olmayan analizler arasındaki farklar ortaya konulmakta ve iki boyutlu sonlu eleman modelinin kemer barajların çözümü için yeterli olup olmayacağı araştırılmaktadır. Uygulama amacı ile, 1968 yılında İngiltere’de düzenlenen “Kemer Barajlar” sempozyumunda önerilen 5 tip kemer baraj içerisinde, çift eğrilikli olan 5.tip kemer baraj seçilmiştir. Analizler NONSAP [48] ve SAP90 [49] programı ile gerçekleştirilmektedir.

Birinci bölümde, önce kemer barajların tarihi gelişimi ve daha önce yapılan çalışmalardan bahsedilmektedir. Daha sonra, kemer barajların sınıflandırılması, kemer barajlara etki eden kuvvetler incelenmektedir. Yapı malzemesinin lineer olmayan davranışı ile ilgili bilgiler, Drucker-Prager akma fonksiyonu, eğri tanımlama modeli ile gerilme-şekildeğiştirme bağıntıları üzerinde durulmaktadır. Ayrıca, lineer ve lineer olmayan sistemlerin statik ve dinamik analizi için kullanılan adım-adım (step-by-step) çözümün formülasyonu yer almaktadır. Burada, değiştirilmiş Newton-Raphson iterasyonu hakkında bilgi verilmekte ve Wilson- θ metodu incelenmektedir.

İkinci bölüm uygulama kısmıdır. Seçilen kemer barajın iki ve üç boyutlu sonlu eleman modeli tanıtılmaktadır. Yapılan analizlerde, baraj temelinin rijit ve eğilebilir olması, barajın boş ve dolu olması durumları ayrı ayrı incelenmektedir.

Üçüncü bölümde, elde edilen analiz sonuçları değerlendirilmektedir. Barajın kret noktası ile topuk böldesine yakın gauss noktası ve diğer bazı kritik noktaların gerilme değerleri, lineer ve lineer olmayan analizler için ayrı ayrı karşılaştırılmaktadır.

Dördüncü bölümde, çalışmadan çıkartılan sonuçlar ve öneriler verilmektedir. Bu bölümü kaynaklar ve özgeçmiş izlemektedir.

1.2. Kemer Barajlar ve Önemi

Barajlar, su kaynakları üzerindeki ana kontrol tesisleridir. Öyle ki; bunların gerisinde meydana gelen rezervuarlar, aşağıda belirtilen amaçların bir veya birkaçına birden hizmet etmektedir [5].

1. Boşa giden suyun biriktirilmesi suretiyle zararın önlenmesi,
2. Suyun seviyesini yükselterek elektrik enerjisinin üretilmesi,
3. Suyun biriktirilmesi sayesinde sulama, içme, kullanma ve sanayi suyunun temin edilmesi,
4. Baraj arkasında meydana gelen gölün ulaştırma, mesire, avcılık ve balıkçılık gayelerine hizmet etmesi,
5. İklimin düzenlenmesi ve erozyonun önlenmesi.

Barajlar yukarıda bahsedilen faydaları sağlamakla birlikte, kendileri için en büyük tehlikeyi oluşturan muhtemel bir deprem sonucunda yıkılmaları halinde, buldukları yer için büyük bir felakete sebebiyet verebilmektedirler.

Kemer barajlar, narin bir yapıya sahip olmalarına karşın, depremlerde iyi performans sergilemektedirler. Japonya'da 27 Şubat 1961 yılında meydana gelen depremde Kamishiiba (H = 110m) ve Ayakita (H = 75m) kemer barajlarında hasar görülmemesi, San Francisco'yu harabeye çeviren 1906 yılındaki depremde, o bölgede bulunan toprak barajların pek çok hasara uğramalarına rağmen, Crystal Springs kemer ağırlık barajında kayda değer bir hasara rastlanmaması, kemer barajların depreme karşı dayanıklı olduklarını gösteren iki örnektir [50]. Ülkemizin çoğunluğunun etkin deprem bölgesinde yer alması nedeni ile, inşa edilecek kemer barajların depremlere karşı güvenli bir şekilde projelendirilmesi gerekmektedir. Bu işlemin gerçekleştirilebilmesi, deprem gibi dinamik yükler altında baraj davranışının çok iyi tespit edilmesi ile olmaktadır.

1.2.1. Kemer Barajların Sınıflandırılması

Kemer barajlar, su basıncını kemer etkisi ile yamaçlara aktaran eğrilikli yapılardır. Ağırlık barajlarına oranla çok narin bir kesite sahip olup, önemli beton tasarrufu

sağlamaktadırlar. Bu açıdan kemer barajlar, kret uzunluğu baraj yüksekliğinin 6, maksimum 10 katını geçmeyen U ve V biçimli vadilerde uygulanabilmektedir [2].

Kemer barajlar, genellikle kalınlıklarına, anahtar kesitine, simetri olup olmasına, menba ve mansap yüzey eğriliklerinin karakteristiklerine bağlı olarak sınıflandırılırlar [4]. Örneğin; sabit kalınlıklı, değişken kalınlıklı, simetrik kemer, simetrik olmayan kemer, tek eğrilikli, çift eğrilikli gibi [4]. Ancak kemer barajlar, genel olarak iki grupta toplanabilirler:

1. Sabit Yarıçaplı Kemer Barajlar,
2. Değişken Yarıçaplı Kemer Barajlar.

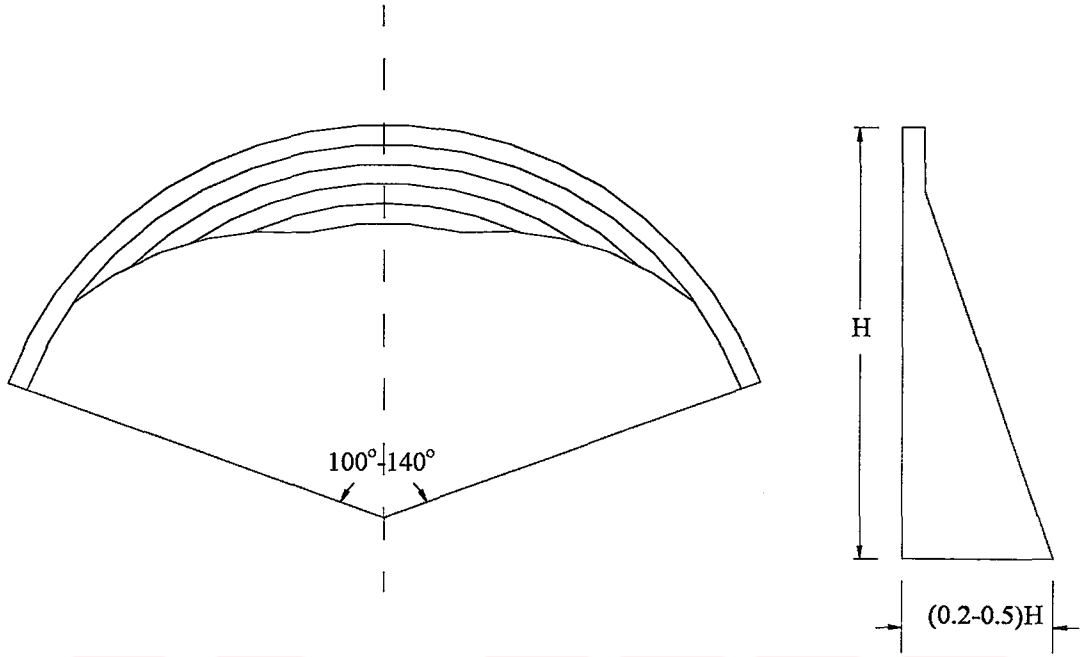
1.2.1.1. Sabit Yarıçaplı Kemer Barajlar

Sabit yarıçaplı kemer baraj, genellikle düşey menba yüzeylidir [4]. Kemer merkezi sabit bir nokta olup, merkez açısı değişen kemer barajlardır. Şekil 1'de görüldüğü gibi merkez açısı 100° - 140° civarında olmaktadır [2].

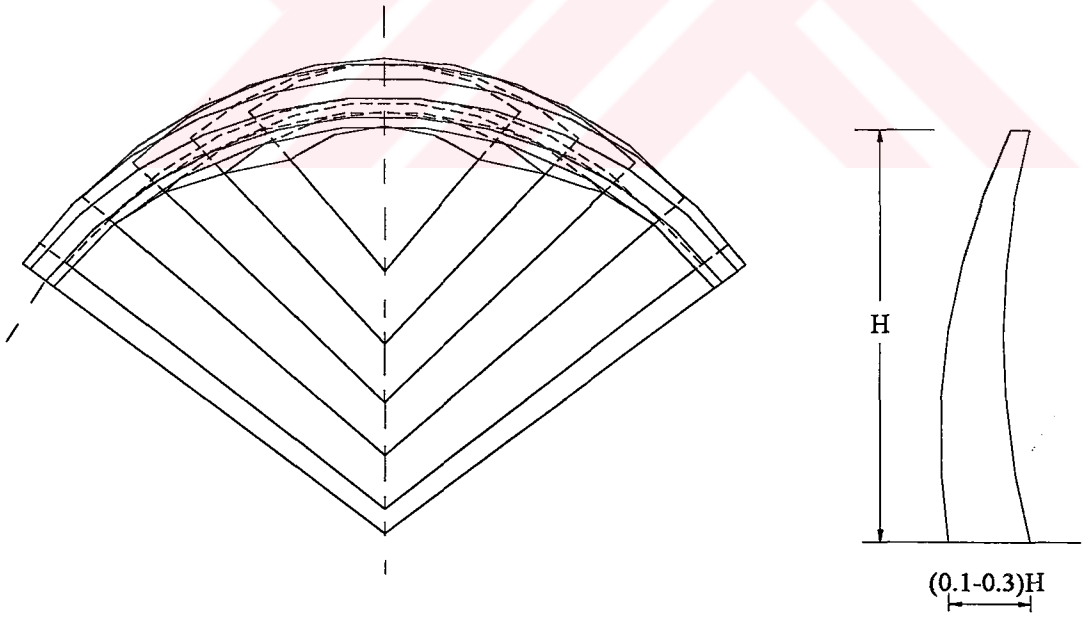
Çok büyük rezervuar basınçlarını karşılamak için, gerekli olan kalınlık artışı, kretten temele doğru gidildikçe, yarıçap azaltılarak sağlanır. Sabit yarıçaplı kemer baraj, özellikle U-tipi vadilerde uygulanılmaktadır. Bu tip vadilerde düşük seviyedeki su yükünün büyük bir kısmı konsol etkisi ile taşınmaktadır [4].

1.2.1.2. Değişken Yarıçaplı Kemer Barajlar

Sabit açılı kemer baraj olarak da bilinen değişken yarıçaplı kemer barajlar, genellikle kretten temele doğru yarıçapın azaldığı menba ve mansap yüzey eğriliklerine sahiptirler [4]. Merkez açısı mümkün olduğunca minimum gövde hacmini veren 133° civarındadır [2]. Bu tip kemer barajlar, çoğunlukla çift eğriliklidirler. Yani hem yatay, hem de düşey planda eğrilikleri mevcuttur. Bu baraj şekli genellikle V-tipi dar vadilerde uygulanmaktadır [4]. Şekil 2'de tipik bir değişken yarıçaplı kemer baraj görülmektedir [2].



Şekil 1. Sabit yarıçaplı kemer baraj [2].



Şekil 2. Değişken yarıçaplı kemer baraj [2].

1.3. Kemer Barajlara Etki Eden Kuvvetler

Bir kemer barajın projelendirilmesinde, ilk olarak baraja etki eden kuvvetlerin belirlenmesi gerekir. Bu kuvvetleri statik ve dinamik olmak üzere iki kısma ayırmak mümkündür. Statik kuvvetler içinde barajın kendi ağırlığı ve suyun etkisi vardır. Dinamik kuvvetler ise, suyun etkisi ile meydana gelen kuvvetler ile deprem kuvvetleridir.

Burada, barajın kendi ağırlığı, hidrostatik su basıncı, deprem kuvveti ve hidrodinamik su basıncı gibi barajın yapısal çözümlemesinde birinci dereceden etkili olan tesirler dikkate alınmaktadır.

1.3.1. Barajın Kendi Ağırlığı

Baraj betonunda kullanılacak betonun birim hacim ağırlığı genel olarak (24-25 kN/m³) tür [51]. Barajın statik analizinde, kendi ağırlığından dolayı oluşan bileşke statik kuvvet, ağırlık merkezine etkittirilir.

1.3.2. Hidrostatik Su Basıncı

Rezervuarda toplanan suyun itkisi ve ağırlığı, hidrostatik basınç kuvvetlerini oluşturur. Suyun birim hacim ağırlığı 10 kN/m³ alınarak su itkisi ;

$$P = \frac{\gamma_w H A}{2} \quad (1)$$

ifadesiyle hesaplanır.

Bu ifadede,

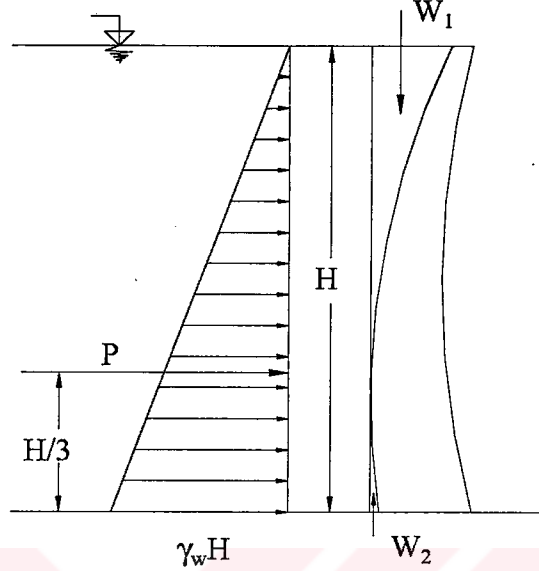
P : Bileşke kuvvet,

γ_w : Suyun birim hacim ağırlığı (10 kN/m³),

H : Su yüksekliği,

A : Baraj menba yüzey alanını göstermektedir.

Çift eğrilikli kemer barajlara etki eden yatay hidrostatik su basıncı, düşey su ağırlığı ile kaldırma kuvveti Şekil 3'te gösterilmektedir.



Şekil 3. Kemer baraja etki eden hidrostatik su kuvvetleri

1.3.3. Hidrodinamik Su Basıncı

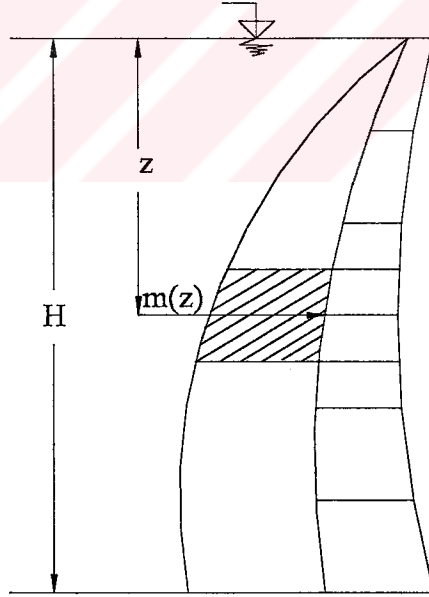
Barajlar, arkalarında çok miktarda su biriktiren rezervuara sahip olmaları nedeni ile sıvı-yapı etkileşimine maruz yapı grubuna girmektedir. Bu tür yapılarda, deprem gibi dinamik bir etki altında, yapı sıvının, sıvı da yapının davranışını önemli ölçüde etkiler. Bu nedenle, barajların dinamik analizinde rezervuarın baraj dinamik özellikleri ve davranışı üzerindeki etkileri göz önünde bulundurulmalıdır [52]. Bu etkileşimin çözümü için geliştirilen yöntemler üç gruba ayrılabilir [53].

1. Euler Yaklaşımı
2. Lagrange Yaklaşımı
3. Kütle Ekleme (Added Mass) Yaklaşımı

Euler ve Lagrange yaklaşımı kullanılarak, beton ağırlık barajlar üzerinde birçok çalışma gerçekleştirilmiştir [52,54-58]. Euler yaklaşımı esas alınarak, sıvı-yapı sistemlerinin analizini yapan bilgisayar programları da hazırlanmıştır [59]. Euler yaklaşımında, barajın davranışı yerdeğiştirmeler, sıvının davranışı ise basınçlar cinsinden

ifade edilmektedir. Bu nedenle, sıvı-yapı ara yüzeyinde özel ara yüzey denklemlerine ihtiyaç vardır [52]. Lagrange yaklaşımında ise, hem baraj, hem de rezervuarın davranışı yerdeğiştirmeler cinsinden ifade edilmektedir. Burada, aynı değişkenler kullanıldığı için özel ara yüzey denklemlerine gerek yoktur [52].

Kütle ekleme yaklaşımı, ilk olarak Westergaard [60] tarafından ortaya atılmıştır. Westergaard'ın bu çalışmasında, barajın rijit, sonsuz uzun ve düşey menba yüzeyli olduğu, rezervuarın menba doğrultusunda sonsuza uzandığı, suyun sıkışamaz olduğu ve sıvı yüzey dalgalarının oluşmadığı kabul edilmiştir. Bu yaklaşımda, dinamik etki sonucunda baraj menba yüzeyi boyunca oluşan hidrodinamik basınç dağılımı, baraj ile birlikte titreşen bir kütle dağılımı olarak göz önüne alınmaktadır. Söz konusu kütle dağılımından tekil kütleler hesaplanıp, sonlu eleman ağı baraj menba yüzeyindeki düğüm noktalarının kütlelerine eklenerek rezervuarın hidrodinamik etkisi dikkate alınmaktadır. Şekil 4, bu yaklaşımdan elde edilen su kütlelerinin derinliğe bağlı olarak değişimini göstermektedir.



Şekil 4. Hidrodinamik basınç dağılımı

Şekil 4'e göre tekil kütleler aşağıdaki ifade ile elde edilmektedir.

$$m(z) = \frac{7}{8} \frac{w}{g} \sqrt{Hz} \quad (2)$$

Burada ;

$m(z)$: Rezervuar derinliğine bağlı kütle dağılımı,

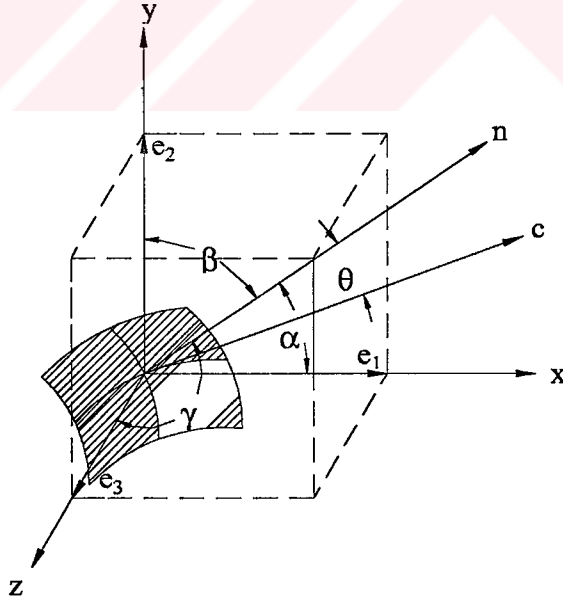
w : Suyun birim ağırlığı,

g : Yerçekimi ivmesi,

H : Rezervuar derinliği,

z : Su yüzeyinden itibaren su derinliğini temsil etmektedir.

Ancak, kemer barajlar gibi eğri yüzeye sahip yapılarda, Westergaard bağıntısı (2) ile hesaplanan tekil kütlelerin ekleneceği düğüm noktasındaki baraj menba yüzeyi normali ile deprem doğrultusundaki açı göz önünde bulundurulmalıdır [50].



Şekil 5. Eğri yüzeyler için kütle ekleme yaklaşımının hesabı [50].

Şekil 5'e göre yapı serbestlik dereceleri x,y,z yönlerinde alınırken, deprem hareketinin c yönünde meydana geldiği kabul edilmiştir. Görüldüğü gibi yapı kütlelerinin değeri, serbestlik derecesinin yönünden bağımsız olmasına karşın, söz konusu kütlelerin değeri, serbestlik derecesinin ve yapıya etki eden hareketin yönüne bağlıdır [50].

Bu durumda, su yüzeyinden itibaren z kadar derinlikte x,y,z yapı serbestlik derecelerine eklenmesi gereken kütleler şu şekilde yazılabilir:

$$\begin{aligned} m_{c_x i}^h &= m_{ni}^h e_1 \\ m_{c_y i}^h &= m_{ni}^h e_2 \\ m_{c_z i}^h &= m_{ni}^h e_3 \end{aligned} \quad (3)$$

Burada ;

m_{ni}^h ; i düğüm noktasına eklenen kütlelerin değeridir. Bu terim, i düğüm noktasında deprem hareketinden dolayı yükleme yüzeyine dik meydana gelen hidrodinamik kuvveti göstermektedir.

$m_{c_x i}^h$; c yönünde meydana gelen depremden dolayı x yönünde eklenecek virtüel kütle, $m_{c_y i}^h$; c yönünde meydana gelen depremden dolayı y yönünde eklenecek virtüel kütle, $m_{c_z i}^h$; c yönünde meydana gelen depremden dolayı z yönünde eklenecek virtüel kütle, göstermektedir. Bu kütleler, c yönündeki birim ivmeden dolayı meydana gelen hidrodinamik kuvvetin x,y,z eksenleri üzerindeki izdüşümüne benzetilebilir [50].

e_1, e_2, e_3 ise aşağıdaki şekilde gösterildiği gibidir;

$$\begin{aligned} e_1 &= \cos\theta \cos\alpha \\ e_2 &= \cos\theta \cos\beta \\ e_3 &= \cos\theta \cos\gamma \end{aligned} \quad (4)$$

Kütle ekleme yaklaşımı, basit kabullere dayanmasına rağmen, barajın depreme karşı davranışı hakkında bilgi edinmek için, birçok araştırmacı tarafından kullanılmıştır [50,51,61-63].

1.4. Yapı Malzemesinin Lineer Olmayan Davranışı

Birçok bilim ve mühendislik konularında olduğu gibi, yapı analizinde de analizcinin en etkili aracı lineerleştirmedir. Ancak şu da bir gerçektir ki; doğada hiçbir şey yüzde yüz lineer davranış göstermemektedir. Sistemlerin davranışı, lineer davranıştan uzaklaştıkça lineer saymanın hesap sonuçlarına getireceği hata oranının artacağı kuşkusuzdur. Bu şekilde ortaya çıkabilecek hata oranının ne olacağı hakkında da kesin bir bilgi sahibi olmak hemen hemen hiçbir zaman mümkün olmayacağı için bu etkin aracı kullanırken çok dikkatli olmak gerekir. Aksi halde lineerleştirme ile yapılan hesapların sonuçlarına göre gerçekleştirilen uygulama, zaman zaman büyük can ve mal kaybına yol açabilir. Günümüzde teknolojinin ilerlemesi ile çok yüksek dayanımlı malzemelerle çok narin yapıların yapılması ve bilgisayarlarla daha çok hesabın daha az zamanda yapılabilmesi mühendisleri lineer olmayan analize yöneltmiştir [64].

Yapı mekaniği problemlerinde lineer olmama, çeşitli nedenlerden kaynaklanabilir. En önemlileri arasında, malzeme davranışının lineer olmaması ve geometri değişiminden dolayı meydana gelen lineer olmama gösterilebilir.

1.4.1. Lineer Olmayan Davranışın Özellikleri

Bir mekanik probleminin çözümünde izlenecek yol üç aşamada özetlenebilir;

- a) Denge koşulunun sağlanması,
- b) Uygunluk koşulunun sağlanması,
- c) Malzeme veya malzemeler için gerilme-deformasyon ilişkilerinin

belirlenmesi.

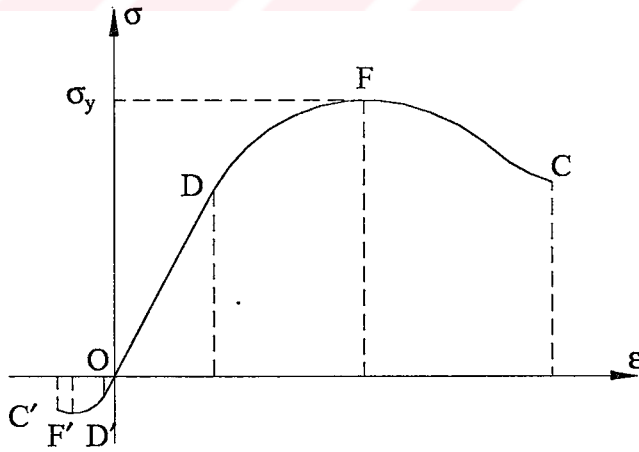
İlk iki aşama malzeme davranışından bağımsız olduğundan, malzeme özellikleri ancak üçüncü aşamada dikkate alınır. Çözüm, malzeme davranışı ne kadar gerçekçi modellenirse, o kadar doğru olacağından, malzemenin gerilme-deformasyon özellikleri büyük önem taşır [65]. Beton, lineer olmayan özelliklere sahip, karmaşık bir yapı davranışı gösterir. Kemer barajlar gibi birçok yapının esas malzemesi olan betonun, gerilme-deformasyon özelliklerinin çok iyi bilinmesi gerekmektedir.

1.4.1.1. Betonun Gerilme-Deformasyon Özellikleri

Betonun gerilme-deformasyon eğrisini çok sayıda değişken etkilediğinden dolayı, her durum için geçerli tek bir eğrinin tanımlanması mümkün değildir. Bu nedenle Şekil 6'da gösterilen σ - ϵ eğrisi, sadece betonun genel davranışı hakkında bir fikir verir. Şekil 6'da saf beton için verilen tek eksenli gerilme-deformasyon eğrisi, görüldüğü gibi farklı bölgelerden oluşur.

Basınç bölgesi için; orijinden D noktasına kadar olan kısımda beton, lineer elastik bir malzeme olarak idealleştirilebilir. Pekleşme D noktasında başlar ve F noktasındaki maksimum gerilme seviyesine kadar devam eder. C noktasında kırılma meydana gelene kadar, F noktasının ötesinde yumuşama meydana gelir. Çekme bölgesi için davranış benzer şekildedir. Ancak pekleşme ve yumuşama bölgeleri çok küçüktür.

O-D-F pekleşme bölgesi, genellikle lineer olmayan elastisite veya pekleşmeye sahip elasto-plastisite ile modellenmektedir. F-C yumuşama bölgesi için yapılacak bir modelleme sadece bir yaklaşım olabilir. Çatlamış beton ise, lineer davranış sergileyen malzemeden çok uzaktır. Bununla birlikte, statik ve dinamik yükler altında çatlak, özellikle lineer olmayan sonlu eleman analizlerinde, değişik şekillerde modellenmiştir.



Şekil 6. Saf beton için tek eksenli gerilme-deformasyon eğrisi [66].

Lineer olmayan analizler, malzeme modellerinin yetersizliği nedeniyle sınırlandırılmıştır. Yukarıda bahsedilen malzeme davranışının karmaşıklığı yüzünden, her durumda yeterli olacak bir malzeme modeli kurmak çok güçtür. Bu nedenle, beton gibi karmaşık yapıya sahip bir malzemenin davranışını en iyi şekilde temsil edecek basit modellere ihtiyaç vardır. Bu yönde yapılan basitleştirmelerde, gerilme-deformasyon bağıntısı üç doğruya ve birçok çalışmada olduğu gibi şekil değiştirme pekleşmesi (strain hardening) iki değişik eğimli doğruya dönüştürmedir. Ancak, uygulanmada en çok kullanılan basitleştirme, lineer elastik tam plastik davranışa dönüştürmedir.

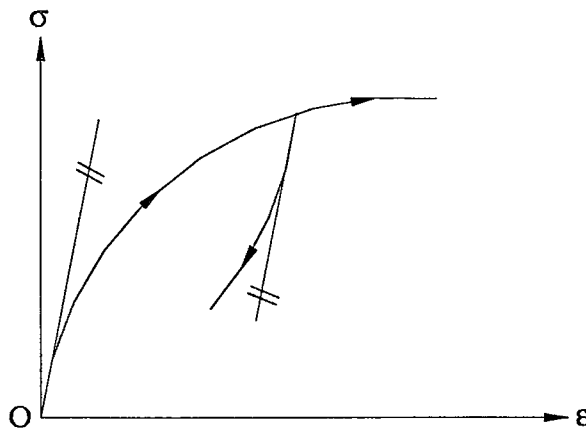
1.4.1.2. Elasto-Plastik Malzeme Modeli

Elasto-plastik malzeme, yükleme ve boşalma eğrileri çakışmayan, fakat Şekil 7’de görüldüğü gibi, boşalma eğrisinin başlangıç teğeti, yükleme eğrisinin başlangıç teğetine paralel olan malzemelerdir [67].

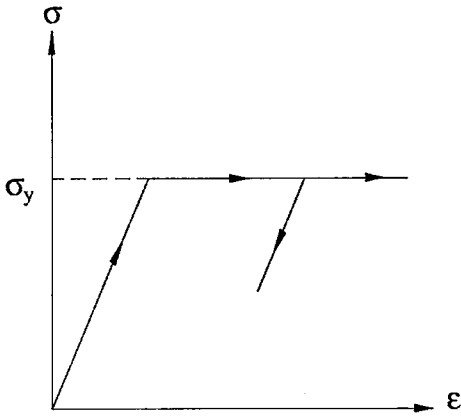
Şekil 7’de verilen elasto-plastik malzeme iki şekilde idealleştirilebilir:

- a) Elastik Tam Plastik Malzeme,
- b) Pekleşen Elasto-Plastik Malzeme.

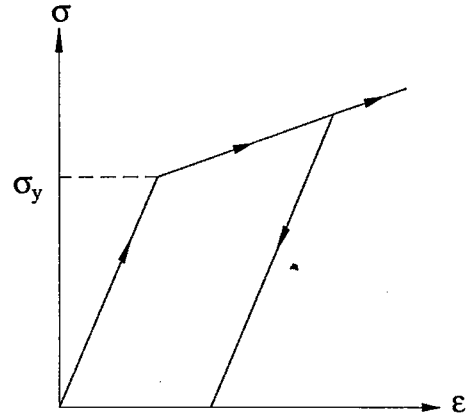
Elasto-plastik malzeme modeli, bir eğimli doğru ile bir yatay doğruya oluşmak üzere idealleştirilirse, elastik tam plastik malzeme modeli elde edilir (Şekil 8a).



Şekil 7. Elasto-plastik malzeme [67].



(a) Elastik tam plastik
malzeme modeli



(b) Pekleşen elasto-plastik
malzeme modeli

Şekil 8. İdeal elasto-plastik malzeme modelleri [67].

Pekleşme özelliği gösteren elasto-plastik malzeme modeli ise iki eğimli doğrudan ibarettir (Şekil 8b).

Elasto-plastik malzeme davranışı, elastik gerilme-deformasyon bağıntılarına ek olarak üç özellik kullanılarak tanımlanmaktadır [48].

(1) **Akma Fonksiyonu (Yield function)** : Plastik akmanın başlangıcına tekabül eden çok eksenli gerilme halini tanımlamaktadır. Bu fonksiyon aşağıdaki gibi yazılabilir ;

$$F(\sigma, \epsilon^p, \kappa) = 0 \quad (5)$$

Burada ;

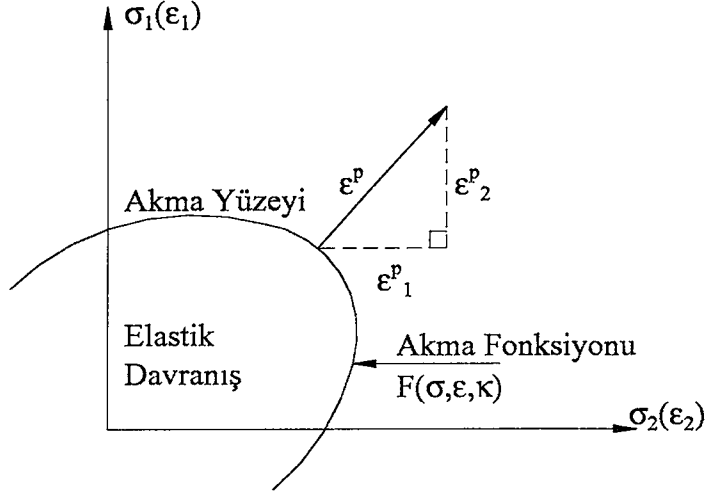
ϵ^p : Plastik şekildeğiştirme,

σ : Plastik şekildeğiştirmeye karşılık gelen gerilmeler,

κ : Plastik şekildeğiştirmenin fonksiyonu olup, pekleşme parametresidir.

(2) **Akma Kuralı (Flow rule)** : Akma halinde, akma yüzeyindeki gerilmelere karşın meydana gelen plastik şekildeğiştirmelerin yönünü ve değerini tanımlar [66]. Diklik

prensibi (normality principle) olarak ta bilinen bu durum Şekil 9'da iki boyutlu gerilme düzlemi için gösterilmektedir.



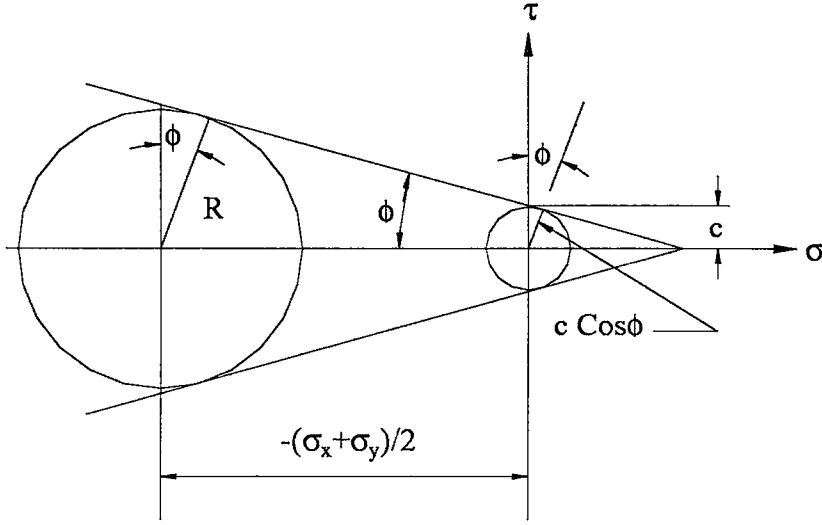
Şekil 9. İki boyutlu gerilme düzleminde akma fonksiyonu ve yüzeyi ile diklik prensibi [68].

(3) **Pekleşme Kuralı (Hardening rule)** : Plastik akma sırasında, akma fonksiyonunun nasıl değiştiğini tanımlar. Betonun modellenmesi hususunda izotropik pekleşme kuralı sadece monotonik yükler için uygulanabilir [66].

Malzemelerin akma yüzeyi veya akma fonksiyonunun belirlenmesinde birçok hipotez bulunmaktadır. Beton gibi sürtünmeli malzemeler için Mohr-Coulomb ve Drucker-Prager hipotezi çok yaygın olarak kullanılanlardır.

1.4.1.3. Mohr-Coulomb Hipotezi

Sürtünmeli malzemeler için, akmaya yol açan normal ve kayma gerilmelerinin ortak etkisini göz önüne alan birçok hipotez geliştirilmiştir. Bunlar içinde en basit olanı ve uygulamada yaygın olarak kullanılanlardan biri Mohr-Coulomb hipotezidir. Şekil 10'da şematik olarak gösterilen bu hipoteze göre, malzemenin mukavemetinin sona ermesinde kayma gerilmesi ile beraber, kayma gerilmesinin etkilediği yüzeydeki normal gerilmenin de iç sürtünme sebebi ile bir rolü olacağı düşünülmektedir.



Şekil 10. Mohr-Coulomb hipotezi [69].

Şekil 10'da, iki boyutlu düzlem için verilen Mohr-Coulomb kırılma hipotezine göre akma anındaki Mohr dairesinin yarıçapı,

$$R = c \cos \phi - \frac{\sigma_x + \sigma_y}{2} \sin \phi \quad (6)$$

şeklindedir. Burada c ve ϕ , sırasıyla malzemenin kohezyonu ve içsel sürtünme açısıdır.

Bir noktada etkiyen gerilme durumunun grafiksel olarak Mohr gerilme daireleri ile Mohr-Coulomb akma zarfı aynı şekil üzerinde gösterilirse, uygulanan yüklerin yol açtığı gerilme durumunun akmaya yol açıp açmayacağını açık olarak görmek mümkün olmaktadır (Şekil 10). Genel olarak akma fonksiyonu bir eğri ile temsil edilmekle beraber, uygulamada bu eğri yaklaşık bir doğru olarak kabul edilmektedir. Bu eğrinin altında kalan gerilme durumları için akma olmazken, eğriye ulaşıldığı anda malzemede akma veya kırılma meydana gelmektedir [70].

1.4.1.4. Drucker-Prager Akma Fonksiyonu ve Gerilme-Deformasyon Bağıntısı

Elasto-plastik davranış gösteren betonun akma durumunu belirleyebilmek için Drucker-Prager [69], Mohr-Coulomb hipotezini genelleştirerek uygun bir akma fonksiyonu elde ettiler. Bu fonksiyon,

$$F = 3\alpha\sigma_m + \bar{\sigma} - \bar{K} = 0 \quad (7)$$

şeklindedir. Burada σ_m ortalama normal gerilme olup,

$$\sigma_m = \frac{J_1}{3} = \frac{\sigma_{11} + \sigma_{22} + \sigma_{33}}{3} \equiv \frac{\sigma_{ii}}{3} \quad (8)$$

ile ifade edilmektedir. $\bar{\sigma}$ ise,

$$\bar{\sigma} = J_2^{1/2} = \left[\frac{1}{2} S_{ij} S_{ij} \right]^{1/2} \quad (9)$$

şeklindedir. Bu ifadede S_{ij} ,

$$S_{ij} = \sigma_{ij} - \delta_{ij}\sigma_m \quad (i, j = 1, 2, 3) \quad (10)$$

olarak verilmektedir. δ_{ij} , Kroneker deltası olup, $i = j$ için 1, $i \neq j$ için 0 değerine sahiptir. σ_{ij} , malzemede oluşan gerilmelerdir. α ve \bar{K} , kohezyon ve içsel sürtünme açısına bağlı olarak malzemenin her yerinde,

$$\alpha = \frac{2 \sin \phi}{\sqrt{3}(3 - \sin \phi)} \quad (11)$$

$$\bar{K} = \frac{6c \cos \phi}{\sqrt{3}(3 - \sin \phi)} \quad (12)$$

şeklinde elde edilecek sabit katsayılardır.

(7) bağıntısı ile verilen akma fonksiyonu, her adımda hesaplanarak malzemenin davranışını belirlemektedir. Eğer $F \leq 0$ ise, malzeme elastik davranış göstermekte ve şekildeğiştirmeler,

$$\varepsilon^e = D^{-1} \sigma^e \quad (13)$$

bağıntısı ile elde edilmektedir. Burada ε^e , elastik şekildeğiştirme, σ^e , elastik şekildeğiştirmelere karşılık gelen gerilmeler, D , elastik malzeme matrisi olup aşağıda verilmektedir.

$$D = \begin{bmatrix} d_{11} & d_{12} & 0 \\ d_{21} & d_{22} & 0 \\ 0 & 0 & d_{33} \end{bmatrix} \quad (14)$$

Burada E , elastisite modülü ve ν , poisson oranı olmak üzere, düzlem şekildeğiştirme durumunda;

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

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

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

şeklindedir.

Akma fonksiyonunun $F > 0$ olması, malzemenin plastik hale geçtiğini gösterir. Elastik şekildeğiştirme bağıntısı (13), elasto-plastik durumda şu şekli alır;

$$\varepsilon^p = D_{EP}^{-1} \sigma^p \quad (15)$$

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,

$$D_{EP} = \begin{bmatrix} K + \frac{4}{3}G - (\beta_1 S_{11} + \beta_2)^2 & & & \text{Simetrik} \\ K - \frac{2}{3}G - (\beta_1 S_{11} + \beta_2)(\beta_1 S_{22} + \beta_2) & K + \frac{4}{3}G - (\beta_1 S_{22} + \beta_2)^2 & & \\ -(\beta_1 S_{11} + \beta_2)(\beta_1 S_{12}) & -(\beta_1 S_{22} + \beta_2)(\beta_1 S_{12}) & G - (\beta_1 S_{12})^2 & \\ & & & \text{3x3} \end{bmatrix} \quad (16)$$

elde edilir [48].

Burada ;

$$\beta_1 = \frac{G}{\sigma(G + 9K\alpha^2)^{1/2}} \quad \beta_2 = \frac{3K\alpha}{(G + 9K\alpha^2)^{1/2}}$$

ile ifade edilmektedir.

Toplam şekildeğiştirme ise,

$$\varepsilon = \varepsilon^e + \varepsilon^p \quad (17)$$

ifadesi ile tanımlanabilir.

1.4.1.5. Eğri Tanımlama (Curve Description) Modeli

Eğri tanımlama modeli, üç boyutlu malzeme davranışını belirleyen gerilme-deformasyon eğrisini, basit bir şekilde tanımlar. Bu model, hacimsel elastisite ve kayma modülünü, hacimsel şekildeğiştirmeye bağlı olarak belirleyen bir fonksiyondan ibarettir. Bu fonksiyon Şekil 11'de gösterildiği gibi parça parça lineer davranış sergilemektedir. Malzemenin yükleme veya boşalma durumunda olup olmadığı, sadece hacimsel şekildeğiştirmenin aldığı değer ile belirlenmektedir [48].

Eğri tanımlama modeli kullanılırken, gerilme-şekildeğiştirme bağıntıları,

$$S_{ij} = 2Gg_{ij} \quad (18)$$

ve

$$\sigma_m = 3Ke_m \quad (19)$$

olarak kabul edilir. Burada g_{ij} , sapma şekildeğiştirmesi olup,

$$g_{ij} = e_{ij} - e_m \delta_{ij} \quad (20)$$

denklemleri ile verilmektedir. σ_m ortalama gerilme, (8) denkleminde tanımlanmıştır. e_m ise ortalama şekildeğiştirme ve

$$e_m = \frac{e_{11} + e_{22} + e_{33}}{3} = \frac{e_{ii}}{3} \quad (21)$$

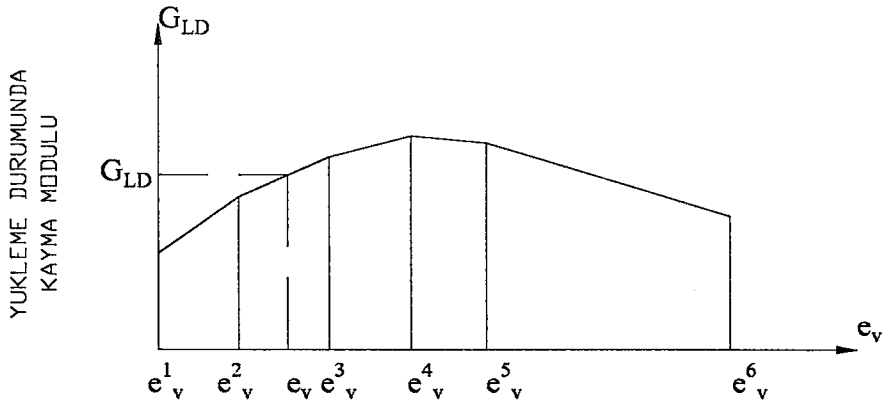
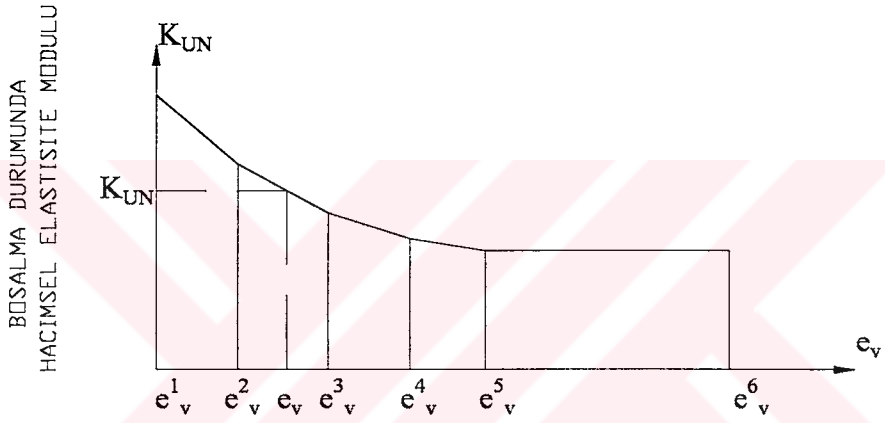
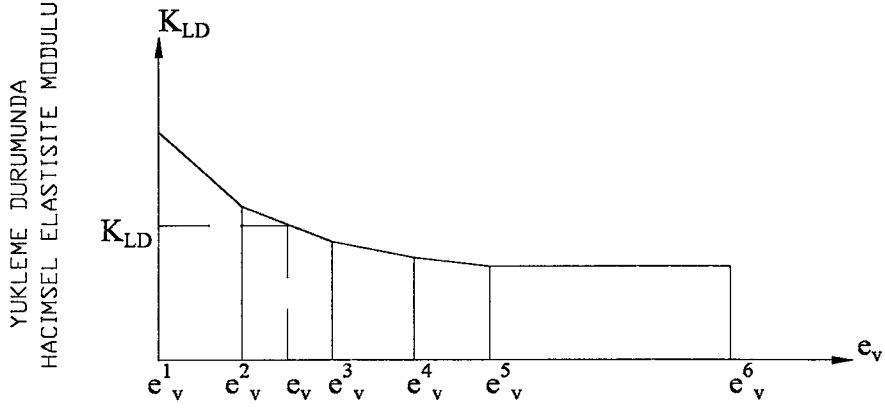
bağıntısı ile hesaplanmaktadır.

Çözüm sırasında kullanılan hacimsel elastisite ve kayma modülü, K ve G , yükleme durumunun fonksiyonudurlar. Hacimsel şekildeğiştirme e_v ,

$$e_v = e_{grav} + (-3e_m) \quad (22)$$

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. Yani,

$$K = \begin{cases} e_m \leq e_{min} & \text{ise } K_{LD} \\ e_m > e_{min} & \text{ise } K_{UN} \end{cases} \quad (23)$$



Şekil 11. Eğri tanımlama (curve description) modelinde kullanılan modüller [48].

ve

$$G = \begin{cases} e_m \leq e_{\min} & \text{ise } G_{LD} \\ e_m > e_{\min} & \text{ise } G_{UN} \end{cases} \quad (24)$$

olarak alınır. Boşalma durumunda kayma modülü,

$$G_{UN} = G_{LD} \frac{K_{UN}}{K_{LD}} \quad (25)$$

bağıntısı ile elde edilmektedir.



1.5. Lineer ve Lineer Olmayan Sistemlerin Statik ve Dinamik Analizi

Matematiksel analizler, uygulanan yüklerden dolayı yapıda meydana gelen yerdeğiştirme ve gerilmeleri belirlemek için kullanılmaktadır. Yapı analizi, statik ve dinamik yükler altında gerçekleştirilmektedir. Günümüzde bu analizler, bilgisayarların gelişmesiyle yaygınlaşan ve çok hızlı sonuç veren sonlu elemanlar metodu ile yapılmaktadır. Bu kısımda, sonlu eleman metoduna göre lineer ve lineer olmayan sistemlerin statik ve dinamik analiz formülasyonu verilmektedir. Burada kullanılan formülasyon, [72]. kaynaktaki notasyon ile paraleldir. Denge denklemlerinin çözümü için yaklaşık yöntemler kullanılmaktadır.

1.5.1. Lineer Statik ve Dinamik Analiz

1.5.1.1. Statik Analiz

Sonlu eleman sistemine sahip bir yapının statik denge durumu ;

$$\mathbf{K}_L \mathbf{U} = \mathbf{P} \quad (26)$$

denklemleri ile ifade edilebilir. Burada ;

\mathbf{K}_L : Lineer sistemin tanjant rijitlik matrisi,

\mathbf{U} : Lineer sistemin yerdeğiştirme vektörü,

\mathbf{P} : Lineer sistemin dış yük vektörü.

\mathbf{U} ve \mathbf{P} , zamana bağlı bir fonksiyon olabildiği için, (26) denklemi, atalet ve hıza bağlı kütle ve sönüm kuvvetlerinin ihmal edildiği sonlu eleman sisteminin dinamik denge denklemi olarak dikkate alınabilir. Yani, esas dinamik denge denkleminde hız ve ivme değerleri ihmal edilirse (26) denklemi ile karşılaşılmaktadır. (26) denklemi ve esas dinamik denge denkleminin çözümü arasındaki bağıntı, (26) denklemindeki \mathbf{U} yerdeğiştirme vektörünün elde edilmişindeki algoritmanın, dinamik analizde kullanılan çözüm algoritmasının bir kısmı olarak kullanılabilmesidir. Daha sonra da görüleceği üzere,

(26) denkleminin çözümü, lineer olmayan sistemlerin analizindeki çözümün çok önemli temel adımını oluşturmaktadır [71].

1.5.1.2. Dinamik Analiz

Yapı sistemlerinin dinamik analizinde, en önemli dinamik etki deprem kuvvetidir. Sonlu eleman metoduna göre analiz edilecek olan sistemin dinamik davranışını temsil eden hareket denklemi veya dinamik denge denklemi;

$$\mathbf{M}\ddot{\mathbf{U}} + \mathbf{C}\dot{\mathbf{U}} + \mathbf{K}_L \mathbf{U} = \mathbf{P} \quad (27)$$

şeklinde yazılabilir. Burada ;

- \mathbf{M} : Lineer sistemin kütle matrisi,
- \mathbf{C} : Lineer sistemin sönüm matrisi,
- \mathbf{K}_L : Lineer sistemin tanjant rijitlik matrisi,
- \mathbf{U} : Lineer sistemin yerdeğiştirme vektörü,
- $\dot{\mathbf{U}}$: Lineer sistemin hız vektörü,
- $\ddot{\mathbf{U}}$: Lineer sistemin ivme vektörü,
- \mathbf{P} : Lineer sistemin dış yük vektörüdür.

(27) denkleminin, t anındaki statik durumundan çıkarıldığı düşünülürse bu denklemi ;

$$\mathbf{F}_I(t) + \mathbf{F}_D(t) + \mathbf{F}_S(t) = \mathbf{P}(t) \quad (28)$$

şeklinde de yazılabilir. Burada ;

- $\mathbf{F}_I(t)$ atalet kuvvetleri olup, $\mathbf{F}_I(t) = \mathbf{M}\ddot{\mathbf{U}}$ ile,
- $\mathbf{F}_D(t)$ sönüm kuvvetleri olup, $\mathbf{F}_D(t) = \mathbf{C}\dot{\mathbf{U}}$ ile,
- $\mathbf{F}_S(t)$ elastik kuvvetleri olup, $\mathbf{F}_S(t) = \mathbf{K}_L \mathbf{U}$ olarak ifade edilir.

Görüldüğü gibi, bu kuvvetlerin hepsi zaman bağımlıdır ve t anındaki statik denge durumu dikkate alınmaktadır. Bu denge durumu, ivmeye bağlı atalet kuvvetleri ile hıza bağlı sönüm kuvvetlerini içermektedir [71]. (27) dekleminde kütle ve sönüm matrisleri ihmal edilirse, daha önce bahsedilen statik denge konumu elde edilmektedir.

Matematiksel olarak (27) denklemini, 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 [71]. Pratikte bu denklemlerin çözümü için etkili birçok yaklaşık sayısal metod bulunmaktadır. Burada direkt integrasyon metodlarından bahsedilecektir.

1.5.1.3. Lineer Sistemlerin Analizi İçin Adım-Adım (Step-by-Step) Çözüm Yöntemleri

1.5.1.3.1. Direkt İntegrasyon Metodları

Direkt integrasyonda, (27) ifadesindeki denklem, adım adım sayısal işlem kullanılarak integre edilmektedir. Burada direkt integrasyon teriminden, denklemlerin farklı bir forma dönüştürülmeden işlemlerin adım adım yürütüldüğü anlaşılmalıdır [71].

Direkt sayısal integrasyon, iki husus dikkate alınarak gerçekleştirilmektedir. Birincisi, herhangi bir t anında (27) denklemini sağlamaya çalışmak yerine, ayrı ayrı Δt zaman aralıklarında bu denklemini sağlamayı amaçlamaktadır. Bunun anlamı, basit olarak atalet ve sönüm kuvvetlerini içeren statik dengenin, çözüm aralığı içerisinde her Δt zaman aralığında araştırılmasıdır. Bu nedenle, statik analizde kullanılan bütün çözüm tekniklerinin direkt integrasyonda etkili bir şekilde kullanılabilirdiği gözükmektedir. İkinci husus, her Δt zaman aralığında yerdeğiştirme, hız ve ivme değerlerinin değişim göstermesidir. Bu değişim üzerinde yapılan kabulün şekli, çözümün doğruluğunu ve stabilitesini belirlemektedir [71].

Çözümde, $U_0, \dot{U}_0, \ddot{U}_0$ ile gösterilen, $t=0$ anındaki yerdeğiştirme, hız ve ivme vektörleri bilinmektedir. (27) denkleminin çözümü, $t=0$ ile $t=T$ zaman aralığında

dikkate alınır, T çözüm zamanı n eşit zaman aralığına bölünür ($\Delta t = \frac{T}{n}$). t anındaki çözüm bilindiği için, $t + \Delta t$ anındaki çözüm bulunabilir. Yani, başlangıç şartlarından hareketle, Δt zaman sonraki çözüm elde edilebilmektedir. Bu işlem, çözüm aralığı boyunca devam ettirilir.

Direkt integrasyon metodlarından, merkezi farklar metodu, Houbolt metodu ve Newmark metodu en etkili olanlarıdır. Burada yapılan çalışmalarda Wilson- θ metodu kullanılmıştır. Wilson- θ metodu, Newmark metodunun özel bir hali olan lineer ivme metodunun koşulsuz stabil durumudur.

1.5.1.3.1.1. Newmark Metodu

1959 yılında, N.M. Newmark tarafından geliştirilen aşağıdaki formüller ile (27) ifadesi ile verilen dinamik denge denklemini adım adım çözülebilmektedir [59].

$$\dot{U}_{i+1} = \dot{U}_i + [(1 - \gamma)\Delta t]\ddot{U}_i + (\gamma\Delta t)\ddot{U}_{i+1} \quad (29a)$$

$$U_{i+1} = U_i + (\Delta t)\dot{U}_i + [(0.5 - \beta)(\Delta t)^2]\ddot{U}_i + [\beta(\Delta t)^2]\ddot{U}_{i+1} \quad (29b)$$

Burada;

U_i : i anındaki yerdeğiştirme vektörü,

U_{i+1} : $i+1$ anındaki yerdeğiştirme vektörü,

\dot{U}_i : i anındaki hız vektörü,

\dot{U}_{i+1} : $i+1$ anındaki hız vektörü,

\ddot{U}_i : i anındaki ivme vektörü,

\ddot{U}_{i+1} : $i+1$ anındaki ivme vektörüdür.

β ve γ parametreleri, Δt zaman aralığındaki ivmenin değişimini tanımlar. Ayrıca bu parametreler, kullanılan metodun stabilite ve doğruluk karakteristiklerini belirler. $\gamma = \frac{1}{2}$ ve $\frac{1}{6} \leq \beta \leq \frac{1}{4}$ alınması metodun doğruluğu için tatminkardır [72].

(27) denkleminin i anındaki dengesi dikkate alındığında hareket denklemi,

$$M\ddot{U}_i + C\dot{U}_i + K_L U_i = P_i \quad (30)$$

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

$$M\ddot{U}_{i+1} + C\dot{U}_{i+1} + K_L U_{i+1} = P_{i+1} \quad (31)$$

şeklinde yazılabilir. Eğer (31) denkleminin (30) denklemini çıkarılırsa artımsal hareket denklemi elde edilir.

$$M\Delta\ddot{U}_i + C\Delta\dot{U}_i + K_L \Delta U_i = \Delta P_i \quad (32)$$

Burada;

$$\Delta\ddot{U}_i = \ddot{U}_{i+1} - \ddot{U}_i$$

$$\Delta\dot{U}_i = \dot{U}_{i+1} - \dot{U}_i$$

$$\Delta U_i = U_{i+1} - U_i$$

şeklindedir. (29a) ve (29b) denklemleri artımsal olarak düzenlenirse;

$$\Delta\dot{U}_i = (\Delta t)\ddot{U}_i + \gamma(\Delta t)\Delta\ddot{U}_i \quad (33a)$$

$$\Delta U_i = (\Delta t)\dot{U}_i + \frac{(\Delta t)^2}{2}\ddot{U}_i + \beta(\Delta t)^2\Delta\ddot{U}_i \quad (33b)$$

elde edilir. (33b) denkleminin $\Delta\ddot{U}_i$ çekilecek olursa;

$$\Delta\ddot{U}_i = \frac{1}{\beta(\Delta t)^2} \Delta U_i - \frac{1}{\beta(\Delta t)} \dot{U}_i - \frac{1}{2\beta} \ddot{U}_i \quad (34)$$

bulunur. (34) denklemi (33a) denkleminde yerine konursa,

$$\Delta\dot{U}_i = \frac{\gamma}{\beta(\Delta t)} \Delta U_i - \frac{\gamma}{\beta} \dot{U}_i + \Delta t \left(1 - \frac{\gamma}{2\beta} \right) \ddot{U}_i \quad (35)$$

elde edilir. (34) ve (35) denklemleri artımsal hareket denkleminde, (32), yerine konur ve düzenlenirse ;

$$\left(\mathbf{K}_L + \frac{\gamma}{\beta(\Delta t)} \mathbf{C} + \frac{1}{\beta(\Delta t)^2} \mathbf{M} \right) \Delta U_i = \Delta P_i + \left(\frac{1}{\beta(\Delta t)} \mathbf{M} + \frac{\gamma}{\beta} \mathbf{C} \right) \dot{U}_i + \left[\frac{1}{2\beta} \mathbf{M} + \Delta t \left(\frac{\gamma}{2\beta} - 1 \right) \mathbf{C} \right] \ddot{U}_i \quad (36)$$

elde edilir. (36) denklemi şu şekilde de yazılabilir;

$$\hat{\mathbf{K}}_i \Delta U_i = \Delta \hat{P}_i \quad (37)$$

Burada ;

$$\hat{\mathbf{K}}_i = \mathbf{K}_L + \frac{\gamma}{\beta(\Delta t)} \mathbf{C} + \frac{1}{\beta(\Delta t)^2} \mathbf{M} \quad (38)$$

$$\Delta \hat{P}_i = \Delta P_i + \left(\frac{1}{\beta(\Delta t)} \mathbf{M} + \frac{\gamma}{\beta} \mathbf{C} \right) \dot{U}_i + \left[\frac{1}{2\beta} \mathbf{M} + \Delta t \left(\frac{\gamma}{2\beta} - 1 \right) \mathbf{C} \right] \ddot{U}_i \quad (39)$$

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 (37) denkleminde bulunur. Daha sonra, (34) ve (35) denklemleri yardımıyla $\Delta\dot{U}_i$ ve $\Delta\ddot{U}_i$ elde edilir. Bir sonraki adıma ait değerler,

$$\left. \begin{aligned} \mathbf{U}_{i+1} &= \mathbf{U}_i + \Delta \mathbf{U}_i \\ \dot{\mathbf{U}}_{i+1} &= \dot{\mathbf{U}}_i + \Delta \dot{\mathbf{U}}_i \\ \ddot{\mathbf{U}}_{i+1} &= \ddot{\mathbf{U}}_i + \Delta \ddot{\mathbf{U}}_i \end{aligned} \right\} \quad (40)$$

denklemleri vasıtasıyla elde edilmektedir. İşlemler bu şekilde çözüm aralığı boyunca devam etmektedir.

Newmark metodunun, $\gamma = \frac{1}{2}$ ve $\beta = \frac{1}{4}$ alındığı takdirde ortalama ivme metodu, $\gamma = \frac{1}{2}$ ve $\beta = \frac{1}{6}$ olması halinde ise lineer ivme metodu olmak üzere iki özel durumu vardır.

1.5.2. Lineer Olmayan Statik ve Dinamik Analiz

1.5.2.1. Statik Analiz

Lineer olmayan sistemlerin statik analizinde denge denklemi,

$$\mathbf{K}_{NL} \mathbf{U} = \mathbf{P} \quad (41)$$

şeklinde yazılabilir. Burada,

- \mathbf{K}_{NL} : Lineer olmayan sistemin tanjant rijitlik matrisi,
- \mathbf{U} : Lineer olmayan sistemin yerdeğiştirme vektörü,
- \mathbf{P} : Lineer olmayan sistemin dış yük vektörüdür.

1.5.2.2. Dinamik Analiz

Lineer olmayan sistemlerin dinamik denge denklemi, lineer sistemlere benzer şekilde;

$$\mathbf{M}\ddot{\mathbf{U}} + \mathbf{C}\dot{\mathbf{U}} + \mathbf{K}_{NL}\mathbf{U} = \mathbf{P} \quad (42)$$

yazılabilir. Burada ;

- \mathbf{M} : Lineer olmayan sistemin kütle matrisi,
- \mathbf{C} : Lineer olmayan sistemin sönüm matrisi,
- \mathbf{K}_{NL} : Lineer olmayan sistemin tanjant rijitlik matrisi,
- \mathbf{U} : Lineer olmayan sistemin yerdeğiştirme vektörü,
- $\dot{\mathbf{U}}$: Lineer olmayan sistemin hız vektörü,
- $\ddot{\mathbf{U}}$: Lineer olmayan sistemin ivme vektörü,
- \mathbf{P} : Lineer olmayan sistemin dış yük vektörüdür.

Görüldüğü gibi (42) denklemi, lineer sistemlerin çözümünde kullanılan denge denklemi ile benzerdir. Yapılan değişiklik, lineer sistemlerin tanjant rijitlik matrisi \mathbf{K}_L 'nin yerine \mathbf{K}_{NL} tanjant rijitlik matrisinin konulması olmuştur. Gerilme-deformasyon eğrisi lineer olmadığı için bu rijitlik matrisi her zaman aralığı başında tekrar hesaplanmaktadır.

1.5.2.3. Lineer Olmayan Sistemlerin Analizi İçin Adım-Adım (Step-by-Step) Çözüm

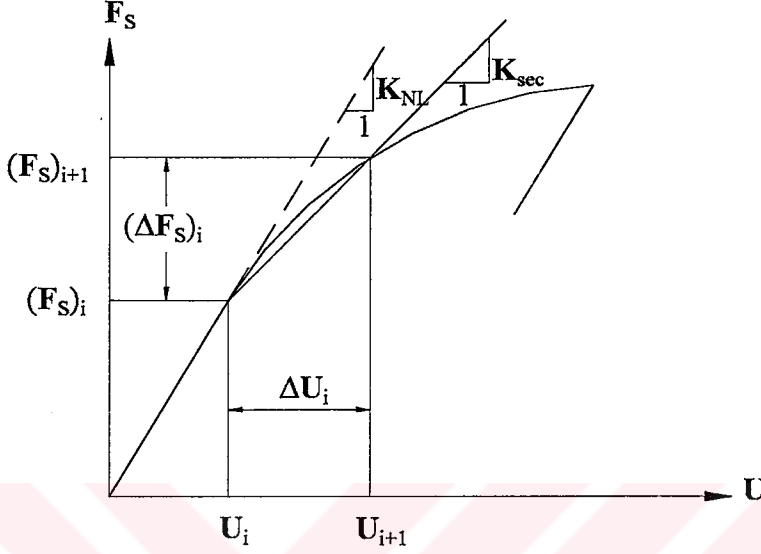
Lineer olmayan sistemlerin analizi için kullanılacak adım-adım çözümün artımsal hareket denklemi,

$$\mathbf{M}\Delta\ddot{\mathbf{U}}_i + \mathbf{C}\Delta\dot{\mathbf{U}}_i + (\Delta\mathbf{F}_s)_i = \Delta\mathbf{P}_i \quad (43)$$

şeklinde yazılabilir. Burada artımsal elastik kuvvet,

$$(\Delta\mathbf{F}_s)_i = (\mathbf{K}_{sec})_i \Delta\mathbf{U}_i \quad (44)$$

şeklindedir. Şekil 12’de gösterilen sekant rijitliği, U_{i+1} bilinmediği için belirlenememektedir. Eğer Δt zaman aralığı çok küçük alınırsa, o zaman sekant rijitliği yerine Şekil 12’de gösterilen tanjant rijitliği alınabilir.



Şekil 12. Tanjant ve sekant rijitliği [72].

Bu durumda (44) denklemi,

$$(\Delta F_s)_i \equiv (K_{NL})_i \Delta U_i \quad (45)$$

olarak yazılabilir. (45) denklemi, (43) denkleminde yerine konursa,

$$M\Delta\ddot{U}_i + C\Delta\dot{U}_i + (K_{NL})_i \Delta U_i = \Delta P_i \quad (46)$$

elde edilir. Newmark metodunda, her zaman aralığında çözülen (37) denklemi şu şekli alır.

$$(\hat{K}_{NL})_i \Delta U_i = \hat{\Delta P}_i \quad (47)$$

Burada,

$$(\hat{\mathbf{K}}_{NL})_i = (\mathbf{K}_{NL})_i + \frac{\gamma}{\beta(\Delta t)} \mathbf{C} + \frac{1}{\beta(\Delta t)^2} \mathbf{M} \quad (48)$$

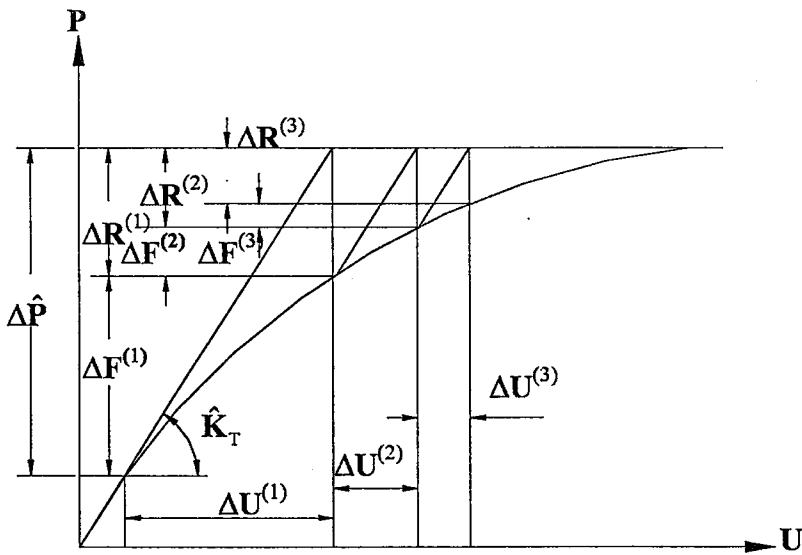
$$\Delta \hat{\mathbf{P}}_i = \Delta \mathbf{P}_i + \left(\frac{1}{\beta(\Delta t)} \mathbf{M} + \frac{\gamma}{\beta} \mathbf{C} \right) \dot{\mathbf{U}}_i + \left[\frac{1}{2\beta} \mathbf{M} + \Delta t \left(\frac{\gamma}{2\beta} - 1 \right) \mathbf{C} \right] \ddot{\mathbf{U}}_i \quad (49)$$

olarak 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.

1.5.2.3.1. Değiştirilmiş Newton-Raphson İterasyonu

(47) denklemi için önerilen iterasyon işlemi, şematik olarak Şekil 13'te gösterilmiştir.



Şekil 13. Değiştirilmiş Newton-Raphson iterasyonu [72].

ΔU yerdeğiştirmesini elde edinceye kadar yapılacak olan iterasyon aşağıdaki gibi başlar.

$$\hat{\mathbf{K}}_{NL} \Delta \mathbf{U}^{(1)} = \Delta \hat{\mathbf{P}} \quad (50)$$

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

$$\hat{\mathbf{K}}_{NL} \Delta \mathbf{U}^{(2)} = \Delta \mathbf{R}^{(2)} = \Delta \hat{\mathbf{P}} - \Delta \mathbf{F}^{(1)} \quad (51)$$

denkleminde hesaplanır. Bulunan $\Delta \mathbf{U}^{(2)}$ geriye kalan kuvveti elde etmek için kullanılır. Yaklaşıklık sağlanıncaya kadar bu işlem sürdürülür. Yaklaşıklık kriteri olarak

$$\frac{\Delta \mathbf{U}^{(1)}}{\Delta \mathbf{U}} < \epsilon \quad (52)$$

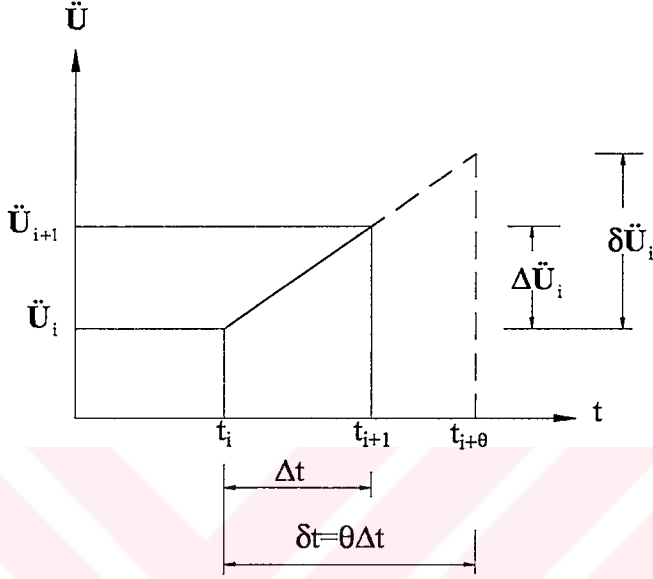
alınmaktadır. Burada (l) iterasyon sayısıdır [72].

1.5.3. Lineer ve Lineer Olmayan Sistemlerin Çözümünde Kullanılan Wilson- θ Metodu

Çok serbestlik dereceli sistemlerin analizinde, sayısal metodların veya adım adım çözümün stabilitesi çok önemlidir. Bu nedenle, böyle sistemlerin analizinde koşulsuz stabil olan metodlar kullanmak gerekmektedir. E.L. Wilson tarafından geliştirilen bu metod, koşullu stabil olan lineer ivme metodunu koşulsuz stabil hale getirir. Lineer ivme metodunda yapılan değişiklik, ivmenin genişletilmiş zaman aralığı boyunca lineer olarak değiştiği kabulüne bağlıdır. Zaman aralığı, Şekil 14'te gösterildiği gibi ,

$$\delta t = \theta \Delta t \quad (53)$$

şeklinde genişletilmiştir. Bu metodun doğruluk ve stabilite özellikleri θ parametresinin değerine bağlıdır. Bu parametre daima 1 den büyüktür.



Şekil 14. Wilson- θ metodu [72].

Her zaman aralığında çözülen (37) veya (47) denklemini, bu methodda,

$$\hat{\mathbf{K}}_i \delta \mathbf{U}_i = \delta \hat{\mathbf{P}}_i \quad (54)$$

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

$$\hat{\mathbf{K}}_i = \mathbf{K}_i + \frac{3}{\theta(\Delta t)} \mathbf{C} + \frac{6}{(\theta \Delta t)^2} \mathbf{M} \quad (55)$$

$$\delta \hat{\mathbf{P}}_i = \theta(\Delta \mathbf{P}_i) + \left(\frac{6}{\theta \Delta t} \mathbf{M} + 3\mathbf{C} \right) \dot{\mathbf{U}}_i + \left(3\mathbf{M} + \frac{\theta \Delta t}{2} \mathbf{C} \right) \ddot{\mathbf{U}}_i \quad (56)$$

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

$$\delta\dot{U}_i = \frac{3}{\delta t}\delta U_i - 3\dot{U}_i - \frac{\delta t}{2}\ddot{U}_i \quad (57)$$

$$\delta\ddot{U}_i = \frac{6}{(\delta t)^2}\delta U_i - \frac{6}{\delta t}\dot{U}_i - 3\ddot{U}_i \quad (58)$$

denklemleri yardımıyla bulunabilir. Normal zaman aralığındaki artımsal ivme ise,

$$\Delta\ddot{U}_i = \frac{1}{\theta}\delta\ddot{U}_i \quad (59)$$

denklemleri ile bulunmaktadır. Artımsal hız ve yerdeğiştirme ise,

$$\Delta\dot{U}_i = (\Delta t)\ddot{U}_i + \frac{\Delta t}{2}\Delta\ddot{U}_i \quad (60)$$

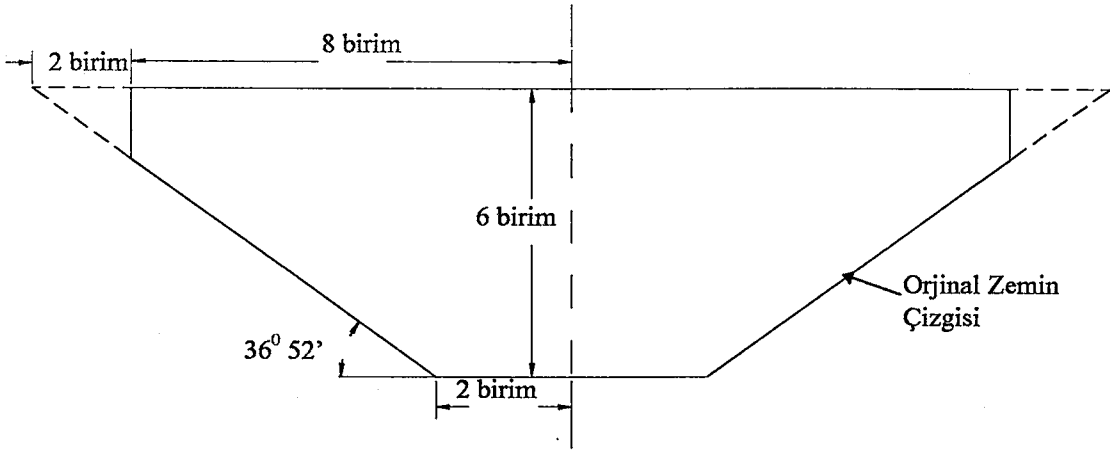
$$\Delta U_i = (\Delta t)\dot{U}_i + \frac{(\Delta t)^2}{2}\ddot{U}_i + \frac{(\Delta t)^2}{6}\Delta\ddot{U}_i \quad (61)$$

denklemleri ile elde edilmektedir.

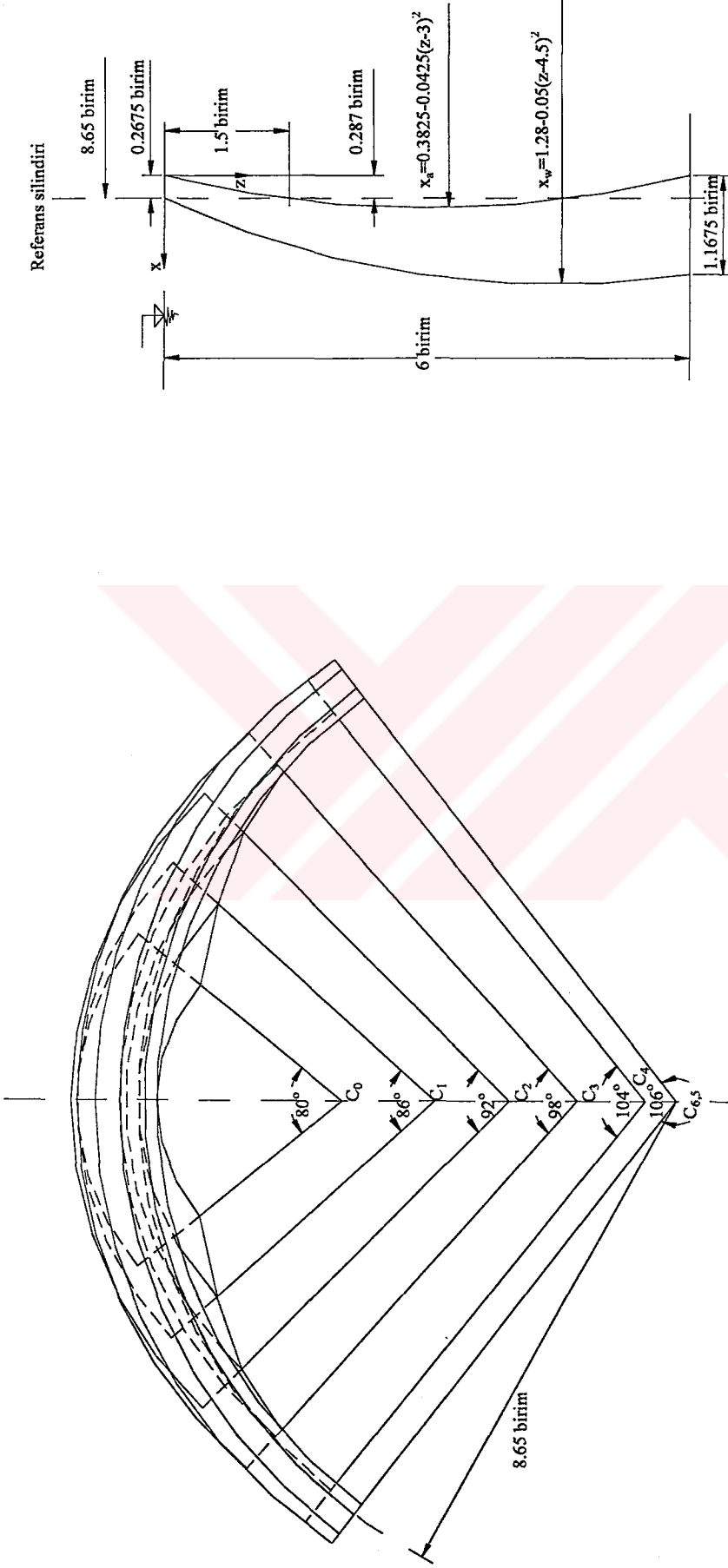
2. YAPILAN ÇALIŞMALAR

Kemer barajların projelendirilmesi ve analizine yönelik, 1963-1967 yılları arasında İngiltere’de yapılan araştırmalarda, farklı profillere sahip idealleştirilmiş 5 tip kemer baraj kullanılmış ve bu barajlar üzerinde yapılan çalışmalar 1968 yılında “Kemer Barajlar” sempozyumunda sunulmuştur [73]. Bu tez çalışmasında, lineer ve lineer olmayan analizi yapılmak üzere, bu 5 tip kemer barajdan 5.tip seçilmiştir. Baraj boyutları, birim olarak verilmiştir. Diğer tip barajlarda olduğu gibi, 5.tip de dairesel bir silindir referans alınarak tanımlanmaktadır. Bu silindirin yüksekliği 6 birim olarak tespit edilmiş ve 106° merkez açısına göre bir yamaçtan diğerine kret uzunluğu, 16 birim olarak belirlenmiştir. Ayrıca referans silindirin yarıçapı 8.65 birimdir.

Barajın yerleştirildiği vadi trapezoidal şekilde olup, enkesiti Şekil 15’te gösterilmektedir. 5.tip, çift eğrilikli bir kemer baraj olup, plandaki görünüşü ve anahtar kesiti Şekil 16’da verilmektedir. Hesaplarda elde edilen sonuçların gerçek durumu yansıtması açısından baraj yüksekliği 120 m alınmış ve diğer boyutlar buna göre düzenlenmiştir.



Şekil 15. 5.tip kemer barajın yerleştirildiği vadinin enkesiti [73].



PLAN

Seviye	0	1	2	3	4	5	6
Yarıçap(birim)	3.67	5.29	6.64	7.72	8.54	8.80	8.50
Merkez Açı	80°	86°	92°	98°	104°	106°	106°

ANAHTAR KESİT

Şekil 16. 5.tip kemer barajın plandaki görünüşü ile anahtar kesiti

Bu çalışmanın temelini, üç boyutlu analiz oluşturmaktadır. Ancak, iki boyutlu analizler de yapılarak, bu çözümlerin yeterli olup olmayacağı araştırılmaktadır. İki ve üç boyutlu analizlerde, baraj-zemin ve baraj-rezervuar etkileşimi dikkate alınmıştır.

2.1. Baraj-Zemin Etkileşimi

Şiddetli depremler, yer yüzeyinden 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 yer yüzeyine ulaşır. Eğer sert yer kabuğu ile söz konusu yapının bulunduğu bölgedeki yer yüzeyi arasında yumuşak bir zemin tabakası mevcut ise, sismik dalgalar bu tabaka tarafından belirli bir biçimde filtre edilerek yapıya ulaşırlar. Öte yandan yer yüzeyindeki yapı, baraj gibi büyük bir kütleyle sahip ise, bu kütle kendi altındaki zeminin dinamik özelliklerini etkileyecek ve zeminden geçen sismik dalgaların karakterini değiştirecektir. Başka bir deyişle, barajın yanındaki serbest yüzeyde oluşan yer hareketi ile aynı seviyede baraj tabanındaki yer hareketi aynı olmayacaktır [74].

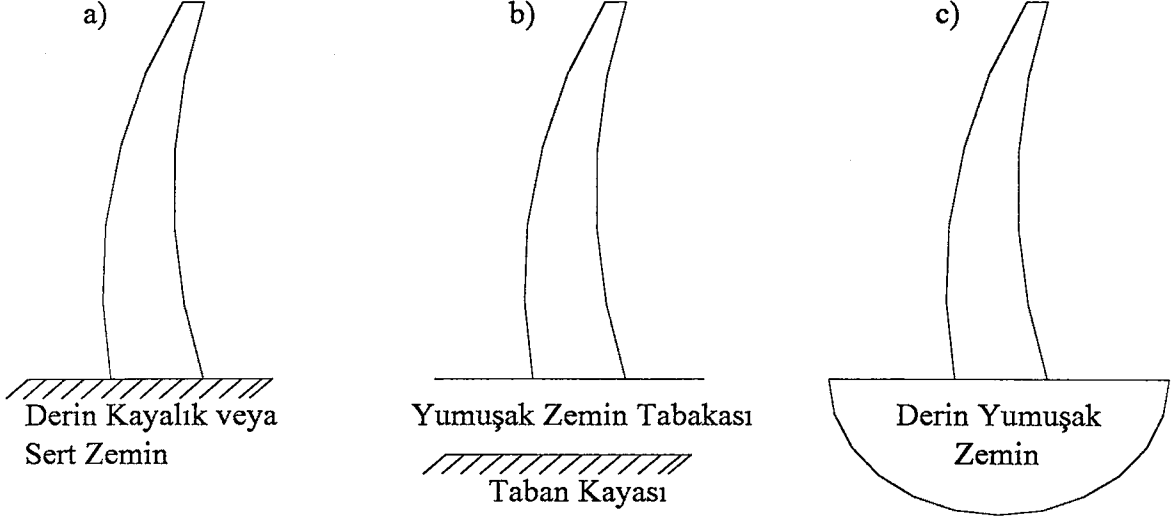
Yapı-zemin etkileşim probleminin çözüm şeklini, daha çok zeminin durumu belirlemektedir. En genel anlamda zemin tipini 3 sınıfa ayırmak mümkündür.

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

Şekil 17'de bu zeminler şematik olarak gösterilmektedir. Geliştirilen çözüm yöntemlerinde, zemin türünden bağımsız olarak baraj gövdesinin sonlu elemanlar yöntemiyle ifade edilmesi artık tartışmasız olarak en geçerli yöntem kabul edilmektedir [74].

Eğer baraj, ilk sınıftaki kayalık veya çok sert bir zemine oturuyorsa, baraj gövdesi sonlu elemanlar yöntemi ile sonsuz rijit bir tabana oturduğu varsayımı ile çözülmektedir. Bu durumda yapı-zemin etkileşimi ihmal edilmiş olmaktadır. Zemin tipi ikinci durumdaki gibi taban kayası üzerine oturan yumuşak bir tabakadan meydana geliyorsa, en uygun

yöntem, sonlu eleman metodunun hem yapıyı, hem de yumuşak zemin tabakasını temsil edecek şekilde kapsamının genişletilmesidir.



Şekil 17. Zemin sınıfları [74].

Buradan hareketle, seçilen kemer barajın kendisi ve oturduğu zemin sonlu elemanlar yöntemine göre modellenmektedir. Sonuçların hassasiyeti ve çözüm zamanı açısından, optimum bir sonlu eleman ağı seçilebilmesi için aşağıdaki kriter göz önünde bulundurulmaktadır [75].

$$h \leq \frac{1}{5} \frac{V_s}{f_n} \quad (62)$$

Bu ifadede;

- h : Eleman boyutu,
- V_s : Kayma dalgası hızı,
- f_n : En büyük doğal frekanstır.

2.2. Baraj-Rezervuar Etkileşimi

Barajlar, çok büyük su kütleleri ile temasta olduklarından sıvı-yapı etkileşimine maruz yapı grubunda dikkate alınmaktadırlar. Deprem gibi dinamik bir etki ile, yapı ve sıvının davranışları önemli ölçüde değişir. Bu yüzden, barajların dinamik analizinde, rezervuarın barajın dinamik özellikleri ve davranışı üzerindeki etkileri ihmal edilmemelidir.

Burada yapılan analizlerde, deprem esnasında oluşan hidrodinamik basınçların hesabı için Westergaard yaklaşımı kullanılmıştır. Rezervuar suyunun birim hacim ağırlığı 10 kN/m^3 alınarak, her bir derinlik için (2) bağıntısı yardımıyla menba yüzeyine etkileyen kütle değerleri bulunmuştur. Ancak 5.tip çift eğrilikli bir kemer baraj olduğu için (2) bağıntısı ile bulunan değerler, (3) bağıntısında yerlerine konup, her üç serbestlik derecesi yönündeki virtüel kütleler düğüm noktası kütlelerine eklenmiştir.

2.3. İki Boyutlu Sonlu Eleman Modeli

5.tip kemer barajın iki boyutlu sonlu eleman modeli için, anahtar kesit dikkate alınmış ve 4 düğüm noktalı dörtgen eleman kullanılmıştır. Toplam eleman sayısı, baraj temelinin rijit olması halinde 12, eğilebilir olması halinde ise 22'dir. Her düğüm noktasında, yatay ve düşey yerdeğiştirme olmak üzere, iki serbestlik derecesi alınarak temelin rijit olması durumunda 36, eğilebilir olması durumunda ise 58 adet serbestlik derecesine sahip sonlu eleman ağı kullanılmıştır. Bu şekilde hazırlanan sonlu eleman modelleri Şekil 18'de görülmektedir. Analizlerde düzlem şekildeğiştirme kabulü kullanılmıştır. Baraj temelinin eğilebilir olması halinde zemin derinliği, hem yatay hem de düşey yönde 60 m alınmıştır.

2.4. Üç Boyutlu Sonlu Eleman Modeli

Gerçekçi bir sonlu eleman çözümlemesi için, üç boyutlu modellendirme gerekmektedir birlikte, dolgu ve beton ağırlık tipi barajlar için iki boyutlu analiz yeterli sonuç vermektedir. Ancak kemer barajlar için üç boyutlu modellemeye ihtiyaç vardır [1].

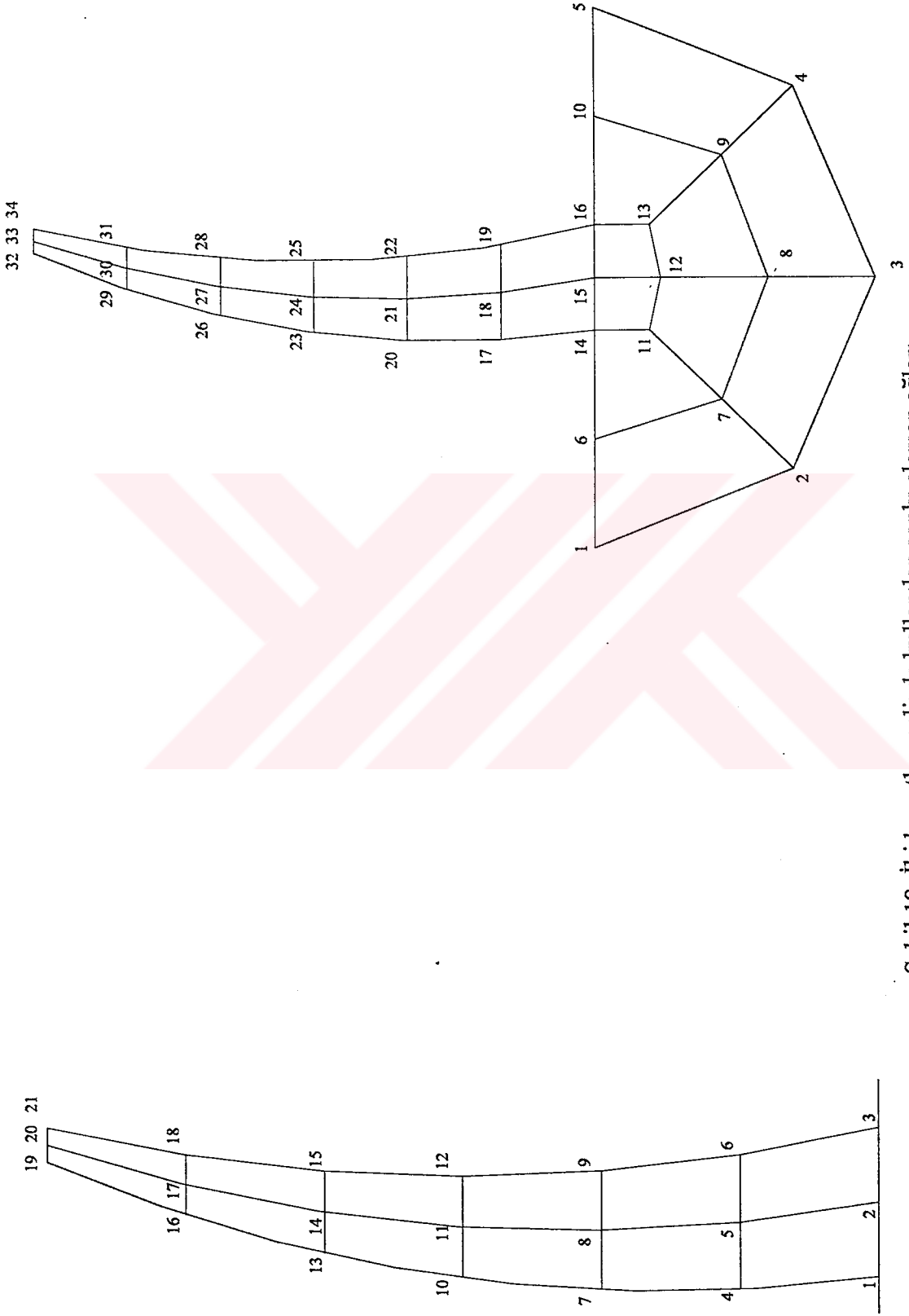
5.tip kemer barajın üç boyutlu sonlu eleman modeli, 8 düğüm noktalı elemanlardan oluşmaktadır. Baraj temelini rijit olması halinde (Şekil 19) 128, eğilebilir olması halinde (Şekil 20) ise 308 adet eleman kullanılmıştır. Her düğüm noktasında, x,y,z yönünde yerdeğiştirme olmak üzere, üç serbestlik derecesi alınarak temelini rijit olması durumunda 522, eğilebilir olması durumunda ise toplam 1149 adet serbestlik derecesine sahip sonlu eleman ağı kullanılmaktadır. Baraj temelini sonlu eleman ağı oluşturulurken, yapı-zemin etkileşimi ve vadi şekli dikkate alınarak barajın orta kesitinden itibaren zemin derinliği 60 m'dir.

2.5. 5.Tip Kemer Barajın Lineer ve Lineer Olmayan Statik ve Dinamik Analizi

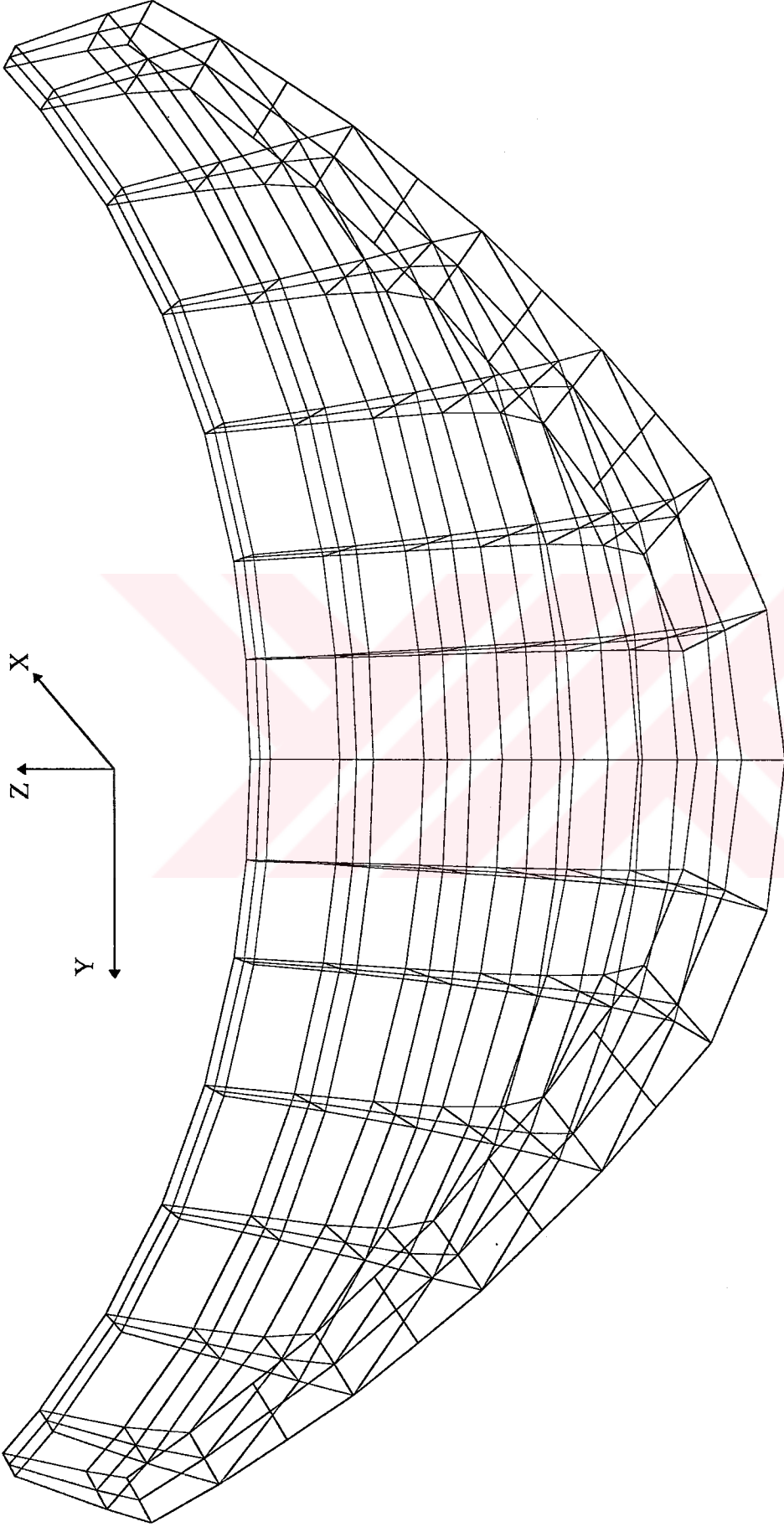
Baraj betonu ve temel zemininin malzeme özellikleri, lineer ve lineer olmayan analizler için Tablo 3 ve Tablo 4'te verilmiştir. İki ve üç boyutlu lineer analizlerde aynı malzeme özellikleri kullanılmıştır.

İki boyutlu lineer olmayan analizlerde baraj betonu ve temel zemini için Şekil 8a'da gösterilen elastik tam plastik malzeme modeli, Drucker-Prager hipotezine göre dikkate alınmıştır. Bu modelde malzeme davranışı, Drucker-Prager akma fonksiyonuna göre belirlenir. Bu fonksiyonun değeri, kohezyon ve içsel sürtünme açısına bağlı olarak (12) denklemi ile bulunan akma gerilmesine ulaştığında malzeme plastik hale geçmektedir. Aksi halde malzeme lineer bölgede kalmaktadır.

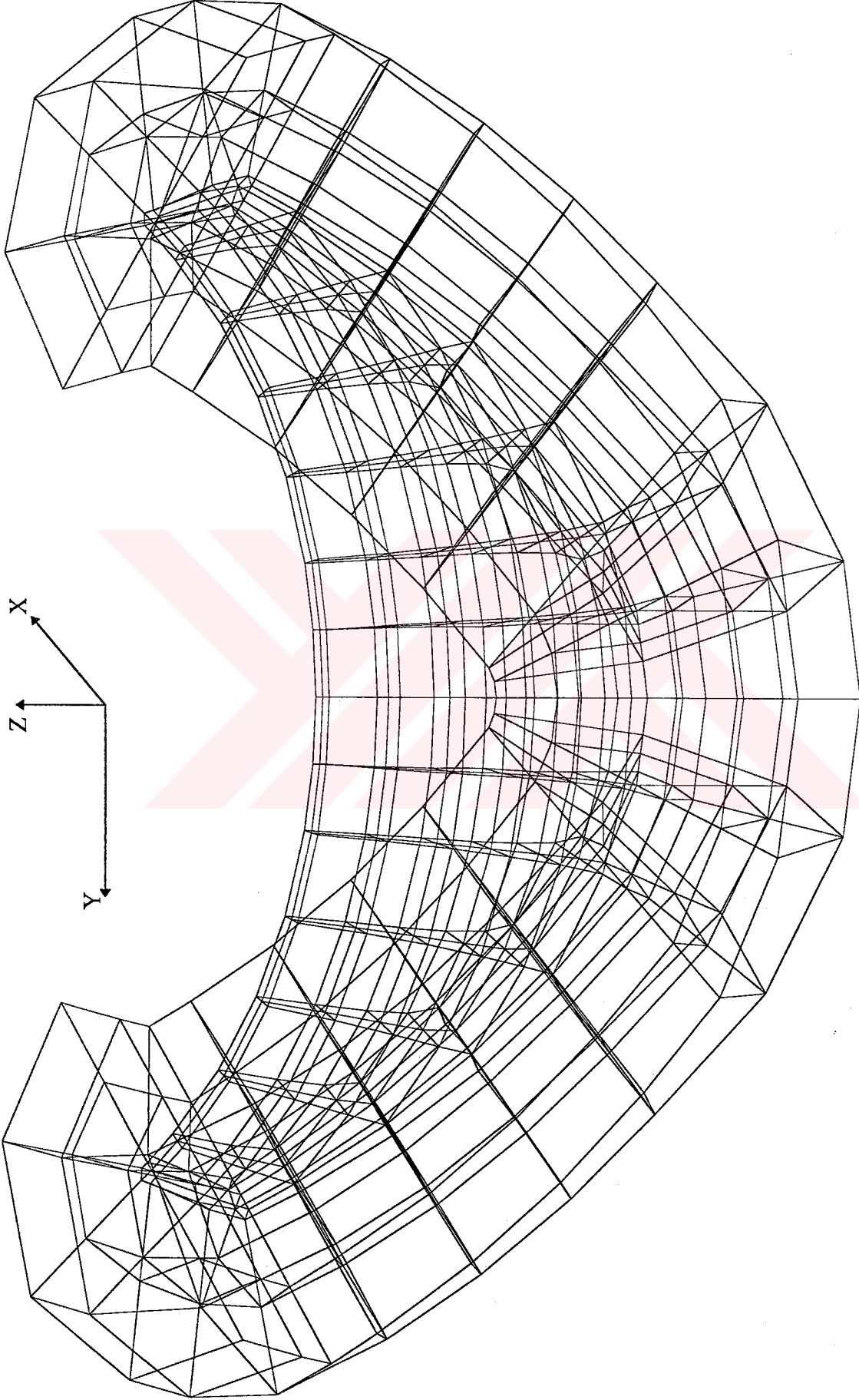
Üç boyutlu lineer olmayan analizlerde ise, baraj betonu için malzeme gerilme-deformasyon eğrisi, Şekil 8b'de görüldüğü gibi iki eğimli doğrudan oluşacak şekilde tanımlanmıştır. Tanımlanan bu eğri ile, yükleme ve boşalma durumundaki hacimsel elastisite ve kayma modülü önceden tesbit edilmektedir. Malzeme davranışı, bu modüller yardımıyla hesaplanan hacimsel şekildeğiştirmeye bağlı olarak belirlenmektedir.



Şekil 18. İki boyutlu analizde kullanılan sonlu eleman ağı



Şekil 19. Üç boyutlu kemer barajın temelini rijit olması durumunda sonlu eleman ağı.



Şekil 20. Üç boyutlu kemer barajın temelini eğilebilir olması durumunda sonlu eleman ağı.

Tablo 3. Lineer analizler için malzeme özellikleri

Malzeme Özellikleri	Baraj Betonu	Temel Zemini
E (N/m ²)	2x10 ¹⁰	1.379x10 ¹⁰
v	0.15	0.24
γ (N/m ³)	24000	26380

Tablo 4. Lineer olmayan analizler için malzeme özellikleri

Malzeme Özellikleri	Baraj Betonu	Temel Zemini
E (N/m ²)	2x10 ¹⁰	1.379x10 ¹⁰
v	0.15	0.24
γ (N/m ³)	24000	26380
c (N/m ²)	6.15x10 ⁶	7x10 ⁶
φ	37 ⁰	30 ⁰

2.5.1. Statik Analiz

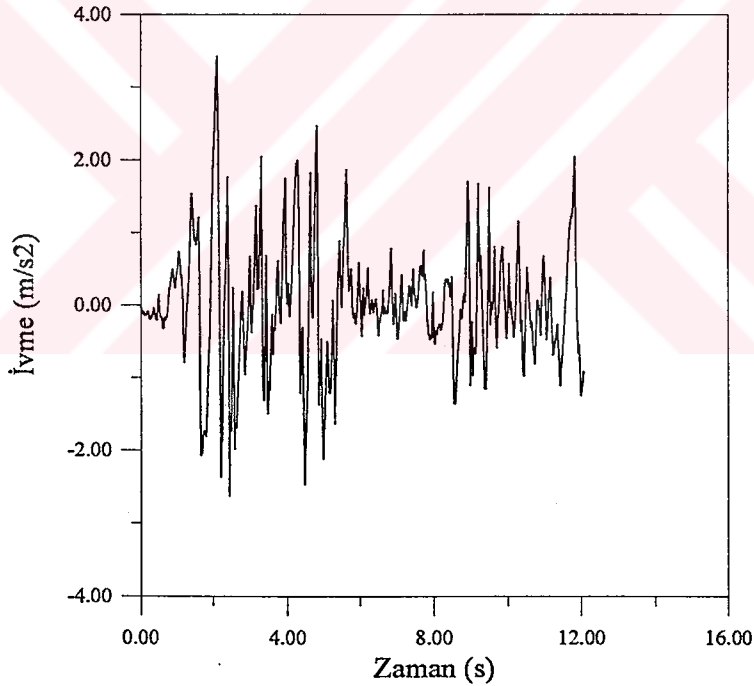
Statik analiz, barajın boş ve dolu, temelin rijit ve eğilebilir olması halleri dikkate alınarak iki ve üç boyutlu olarak gerçekleştirilmektedir. Barajda maksimum su yüksekliği baraj yüksekliği (120 m) kadar alınmıştır. Suyun birim hacim ağırlığı 10 kN/m³ alınarak, hidrostatik su basıncı, tekil kuvvetler halinde menba yüzeyi düğüm noktalarına etkittirilmektedir.

Yapılan analizler neticesinde, menba ve mansap yüzeyinde elde edilen yerdeğiştirmelerin ve eksenler doğrultusundaki gerilmelerin baraj yüksekliği boyunca değişimi incelenmektedir.

2.5.2. Dinamik Analiz

Dinamik analizde yer hareketi olarak, kayalık zeminlerde oluşması muhtemel deprem türüne örnek olması açısından, 18 Mayıs 1940 tarihinde meydana gelen El-Centro depreminin Kuzey-Güney bileşeni kullanılmıştır. Deprem kuvveti baraja menba-mansap doğrultusunda etkittirilmektedir. Lineer ve lineer olmayan analizlerde çözüm zamanının uzun olması nedeni ile, depremin ilk 12 s'lik kısmı dikkate alınmaktadır. Söz konusu deprem kaydı Şekil 21'de verilmiştir.

Bütün sonlu eleman sistemlerinde %5'lik sönüm oranı kabul edilip, buna göre Rayleigh sabitleri (α, β), 1.temel mod esas alınarak, barajın boş ve dolu olmasına göre hesaplanmıştır. Bulunan bu sabitler, Tablo 5'te verilmektedir.



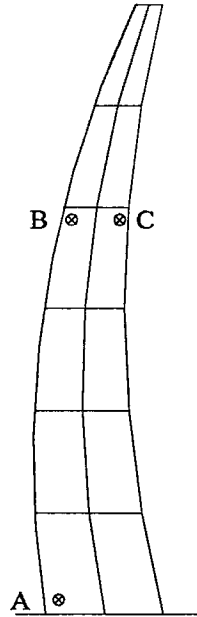
Şekil 21. 18 Mayıs 1940 El-Centro depreminin kuzey-güney (S00E) bileşeni

Lineer ve lineer olmayan analizler, adım-adım integrasyon tekniği ile Wilson- θ metodu kullanılarak gerçekleştirilmektedir. İntegrasyon için zaman adımı 0.001 saniye olarak seçilmiştir.

Tablo 5. Rayleigh Sabitleri (α, β)

Rayleigh Sabitleri	İki Boyutlu Analiz				Üç Boyutlu Analiz			
	Rijit Temel		Eğilebilir Temel		Rijit Temel		Eğilebilir Temel	
	Baraj Boş	Baraj Dolu	Baraj Boş	Baraj Dolu	Baraj Boş	Baraj Dolu	Baraj Boş	Baraj Dolu
α	0.3419	0.2148	0.3073	0.1919	0.8115	0.5175	-	-
β	0.0073	0.0116	0.0081	0.0130	0.0031	0.0048	-	-

Yapılan iki boyutlu analizlerde, baraj için tehlike doğuracak elemanların işaretlenen gauss noktalarında maksimum ve minimum asal gerilme değerlerinin zamanla değişimi incelenmektedir. Bu gauss noktaları Şekil 22'de görülmektedir. Ayrıca barajın menba yüzeyinde meydana gelen maksimum yerdeğiştirmelerin yükseklik boyunca değişimi elde edilmektedir. Üç boyutlu analizlerde ise, barajın topuk ve gövdesinde seçilen iki elemanda, menba-mansap ve düşey doğrultuda oluşan gerilmelerin zamanla değişimi incelenmektedir. Ayrıca menba yüzeyinde meydana gelen yerdeğiştirmelerin mutlak değerce maksimumlarının baraj yüksekliği boyunca değişimi elde edilmektedir.



Şekil 22. İki boyutlu dinamik analizde asal gerilmelerin incelendiği gauss noktaları

3. BULGULAR VE İRDELEMELER

3.1. İki Boyutlu Lineer ve Lineer Olmayan Analiz Sonuçlarının Değerlendirilmesi

Uygulama amacı ile seçilen kemer barajın, iki boyutlu statik ve dinamik analizi, malzeme davranışının lineer ve lineer olmamasına göre yapılmıştır. Bütün analizlerde barajın boş ve dolu, temelin rijit ve eğilebilir olması durumları dikkate alınarak yerdeğiştirme ve gerilmeler elde edilmektedir. Statik analizlerde, barajın menba ve mansap yüzeyi yerdeğiştirme ve gerilmelerin yükseklik boyunca değişimi, dinamik analizlerde ise, kret noktasının yerdeğiştirmesi ile baraj gövdesinde belirlenen elemanların seçilen gauss noktalarındaki gerilmelerin zamanla değişimi incelenmektedir.

3.1.1. Statik Analiz

Barajın menba ve mansap yüzey gerilmeleri, elemanların gauss noktalarındaki değerleri alınarak elde edilmektedir. Barajın boş olması halinde, barağa etkiyen kuvvet sadece kendi ağırlığı, dolu olması halinde ise sadece hidrostatik su kuvveti olmaktadır. Lineer analizde barajın boş ve dolu olması durumunda, lineer olmayan analizde ise NONSAP programındaki kısıtlamadan dolayı sadece barajın dolu olması durumunda analiz gerçekleştirilmiştir.

3.1.1.1. Yerdeğiştirmeler

Her bir düğüm noktasında elde edilen y ve z doğrultularındaki yerdeğiştirmelerden, maksimumunun menba-mansap (y) doğrultusundakiler olduğu ortaya çıkmaktadır. En elverişsiz durum olarak nitelendirilen barajın dolu, temelin eğilebilir olması durumunda en büyük yerdeğiştirme lineer olmayan analizde ve kret noktasında oluşmaktadır. Lineer ve lineer olmayan analizlerde barajın menba ve mansap yüzeyi yerdeğiştirmelerinin yükseklik boyunca değişimi Şekil 23-28'te verilmektedir.

3.1.1.2. Gerilmeler

Çözümü elde edilen her bir durum için, menba ve mansap yüzeyindeki yatay ve düşey gerilmelerin yükseklik boyunca değişimi lineer ve lineer olmayan analizde incelenmektedir. Lineer analizde, barajda oluşan gerilmeler temelin rijit ve eğilebilir olması durumunda pek fazla değişiklik göstermemektedir. Bu durum, barajda oluşan rölatif yerdeğiştirmelerin çok az olmasından kaynaklanmaktadır. Lineer olmayan analizlerde, gerilmeler daha büyük çıkmakta ve temele yakın elemanlarda plastik bölgeye geçildiği görülmektedir. Elde edilen yatay ve düşey gerilmelerin yükseklik boyunca değişimi lineer ve lineer olmayan analizler için Şekil 29-40'ta verilmektedir.

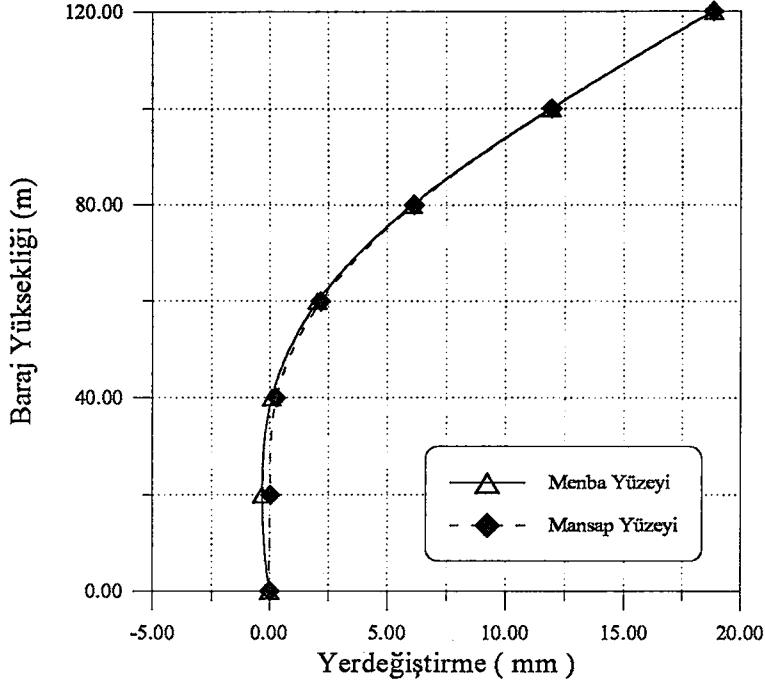
3.1.1.3. İki Boyutlu Lineer ve Lineer Olmayan Statik Analiz Sonuçlarının Çeşitli Durumlar İçin Karşılaştırılması

3.1.1.3.1. Yerdeğiştirmelerin Karşılaştırılması

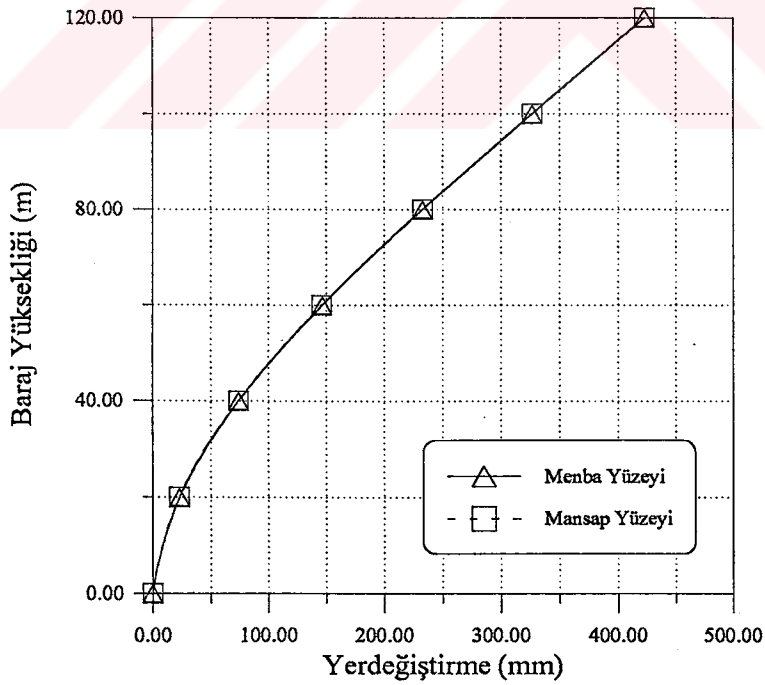
Her bir duruma ait, barajın kret noktasında (Şekil 18'de görüldüğü gibi temelin rijit olması durumunda 19 nolu düğüm, eğilebilir olması durumunda ise 32 nolu düğüm noktası) menba-mansap doğrultusunda meydana gelen yerdeğiştirmeler Tablo 6'da verilmektedir. Tablo 6'dan da anlaşılacağı üzere; baraj için en elverişsiz durum, temelin eğilebilir ve barajın dolu olduğu durumdur. En büyük yerdeğiştirme lineer olmayan analizde meydana gelmektedir.

Tablo 6. İki boyutlu lineer ve lineer olmayan statik analizde, çeşitli durumlar için kret noktasında meydana gelen yatay yerdeğiştirmeler

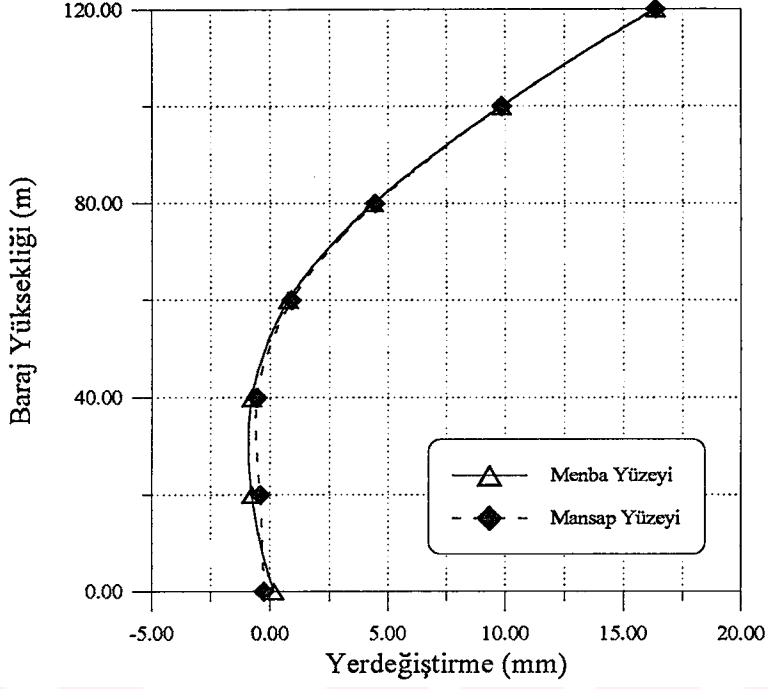
Kret Noktası Yatay Yerdeğiştirmesi (mm)							
Lineer Analiz				Lineer Olmayan Analiz			
Rijit Temel		Eğilebilir Temel		Rijit Temel		Eğilebilir Temel	
Baraj Boş	Baraj Dolu	Baraj Boş	Baraj Dolu	Baraj Boş	Baraj Dolu	Baraj Boş	Baraj Dolu
18.839	423.159	16.342	521.854	-	692.992	-	1312.89



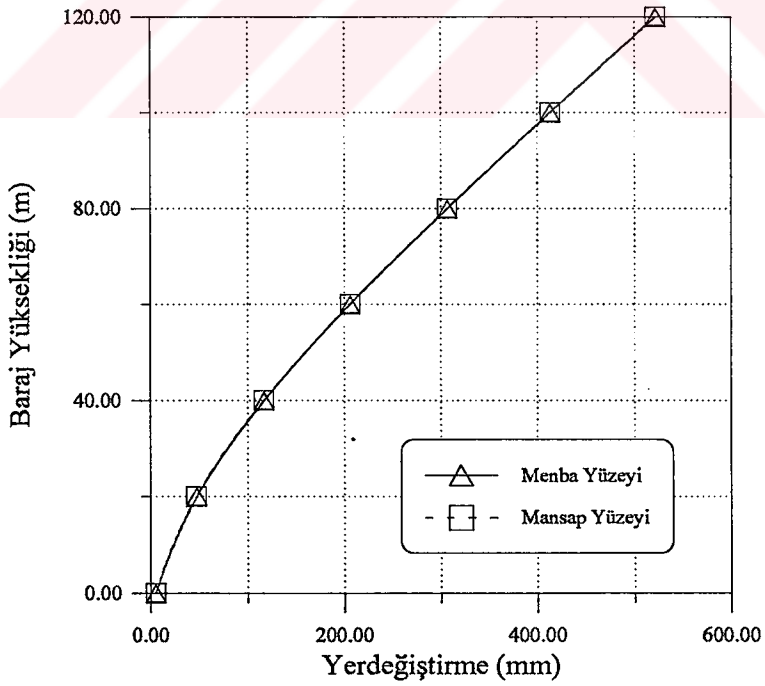
Şekil 23. İki boyutlu lineer statik analizde, temelin rijit, barajın boş olması durumunda menba ve mansap yüzeyi yatay yerdeğiştirmelerinin yükseklik boyunca değişimi



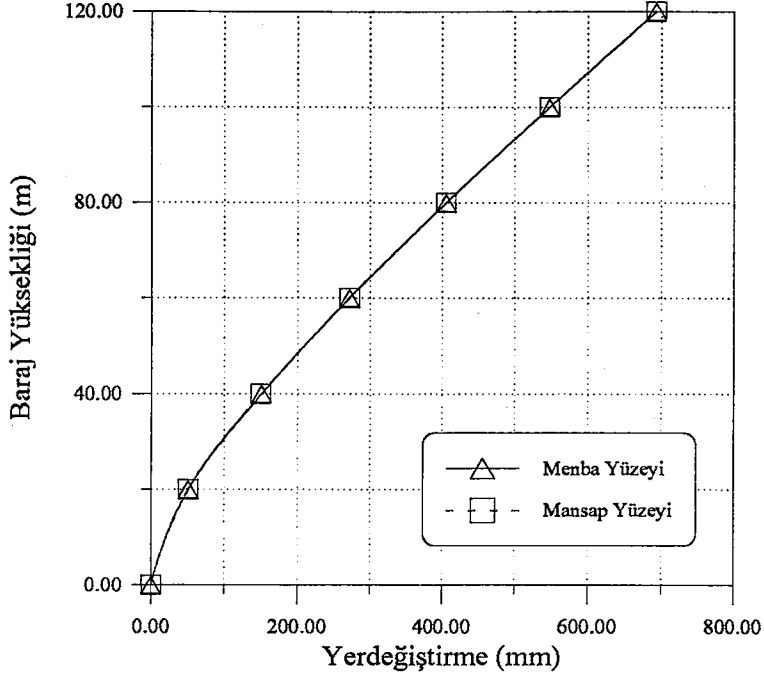
Şekil 24. İki boyutlu lineer statik analizde, temelin rijit, barajın dolu olması durumunda menba ve mansap yüzeyi yatay yerdeğiştirmelerinin yükseklik boyunca değişimi



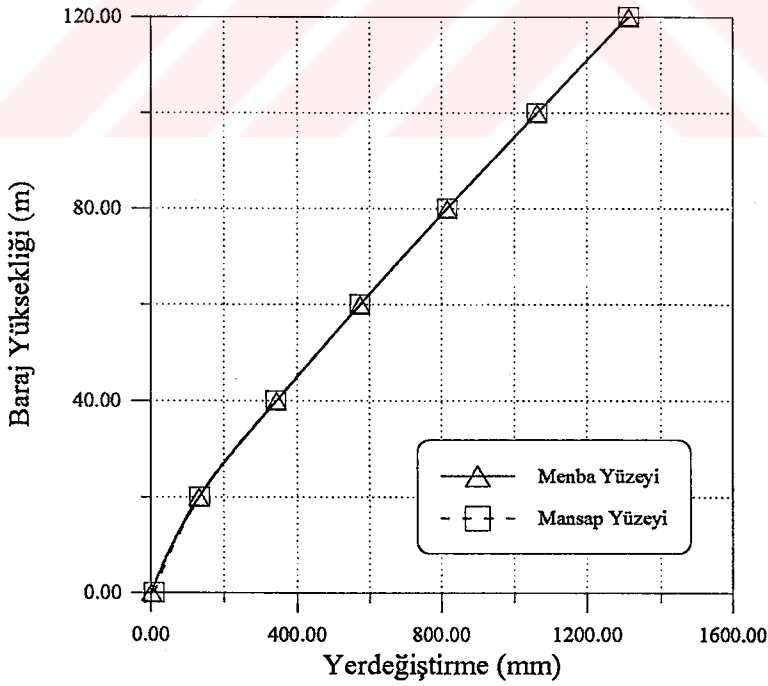
Şekil 25. İki boyutlu lineer statik analizde, temelin eğilebilir, barajın boş olması durumunda menba ve mansap yüzeyi yatay yerdeğiştirmelerinin yükseklik boyunca değişimi



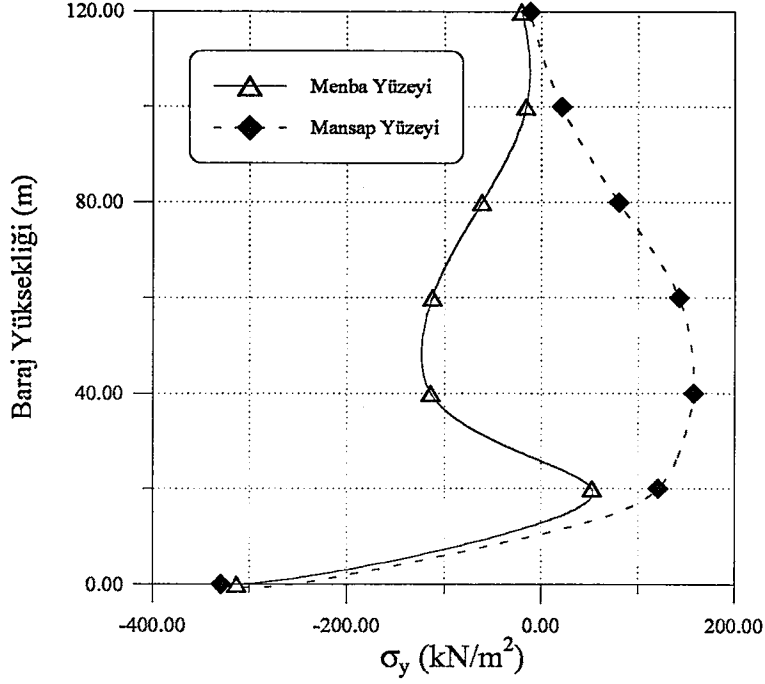
Şekil 26. İki boyutlu lineer statik analizde, temelin eğilebilir, barajın dolu olması durumunda menba ve mansap yüzeyi yatay yerdeğiştirmelerinin yükseklik boyunca değişimi



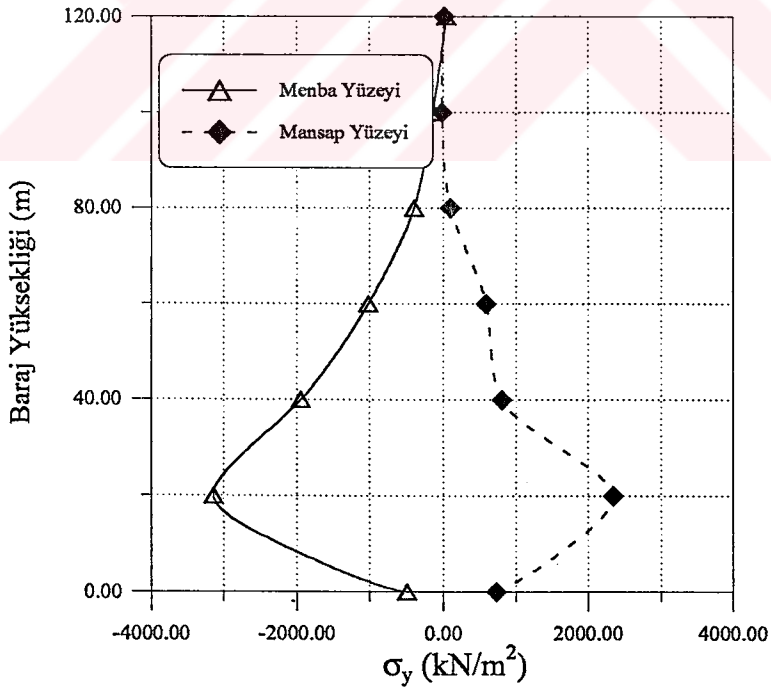
Şekil 27. İki boyutlu lineer olmayan statik analizde, temelin rijit, barajın dolu olması durumunda menba ve mansap yüzeyi yatay yerdeğiştirmelerinin yükseklik boyunca değişimi



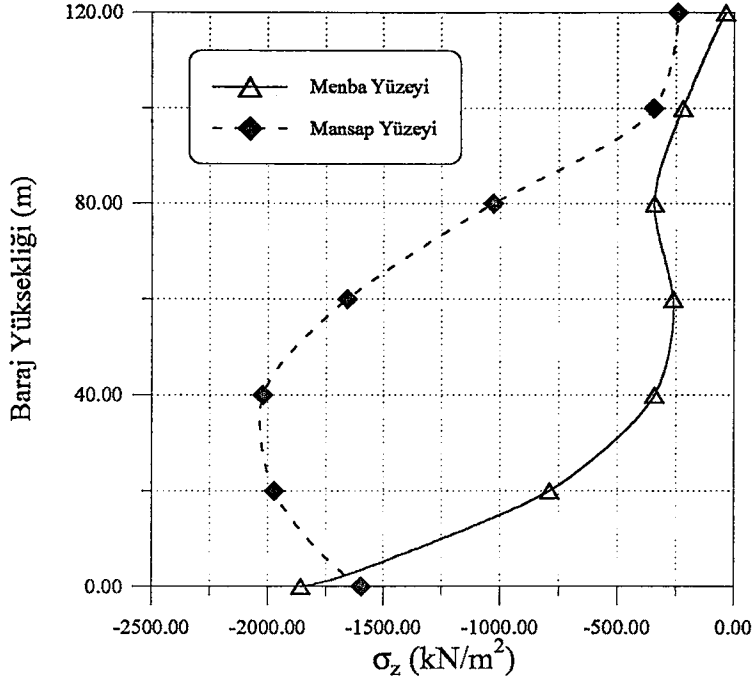
Şekil 28. İki boyutlu lineer olmayan statik analizde, temelin eğilebilir, barajın dolu olması durumunda menba ve mansap yüzeyi yatay yerdeğiştirmelerinin yükseklik boyunca değişimi



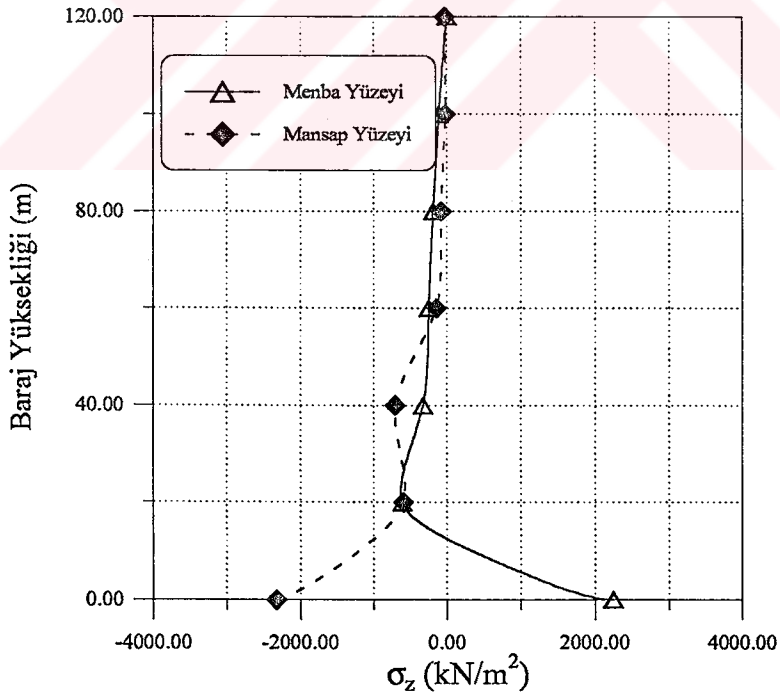
Şekil 29. İki boyutlu lineer statik analizde, temelin rijit, barajın boş olması durumunda menba ve mansap yüzeyi yatay gerilmelerinin yükseklik boyunca değişimi



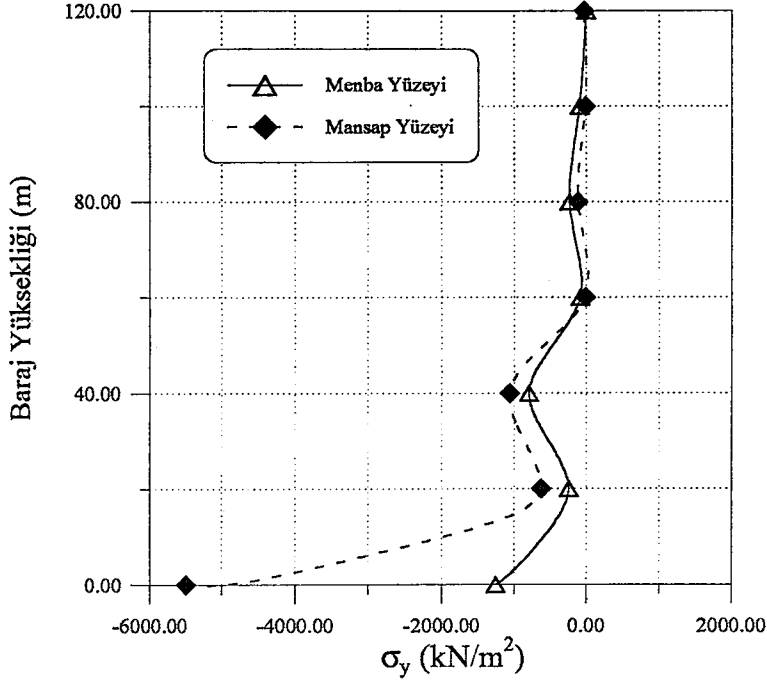
Şekil 30. İki boyutlu lineer statik analizde, temelin rijit, barajın dolu olması durumunda menba ve mansap yüzeyi yatay gerilmelerinin yükseklik boyunca değişimi



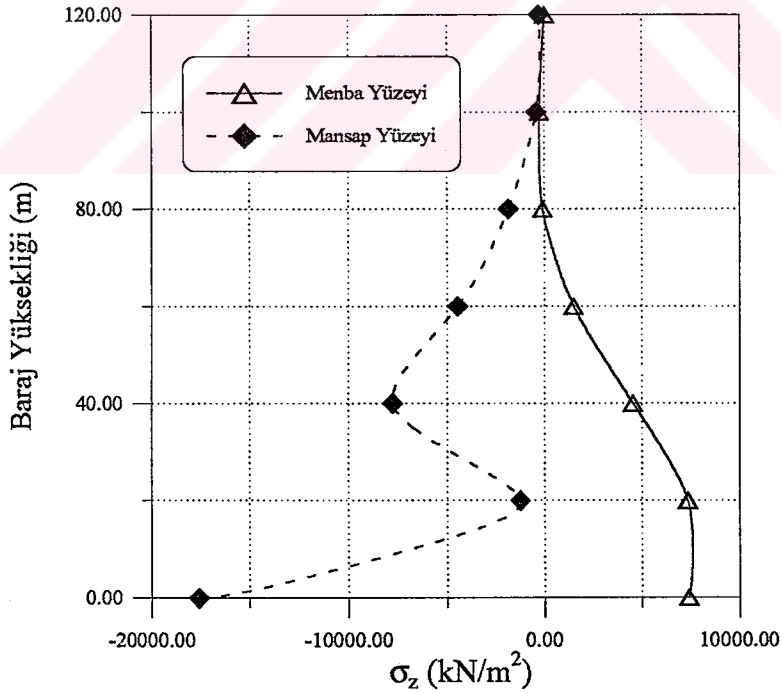
Şekil 31. İki boyutlu lineer statik analizde, temelin rijit, barajın boş olması durumunda menba ve mansap yüzeyi düşey gerilmelerinin yükseklik boyunca değişimi



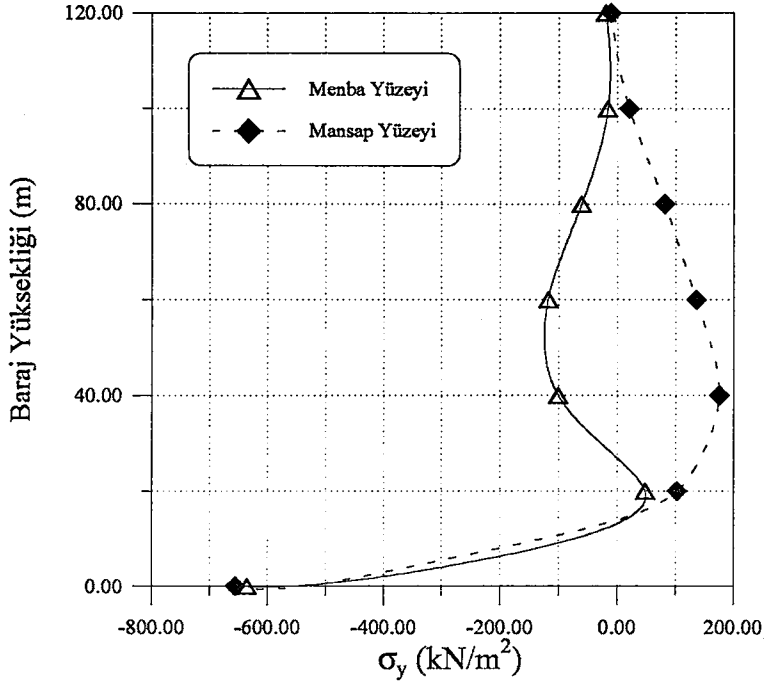
Şekil 32. İki boyutlu lineer statik analizde, temelin rijit, barajın dolu olması durumunda menba ve mansap yüzeyi düşey gerilmelerinin yükseklik boyunca değişimi



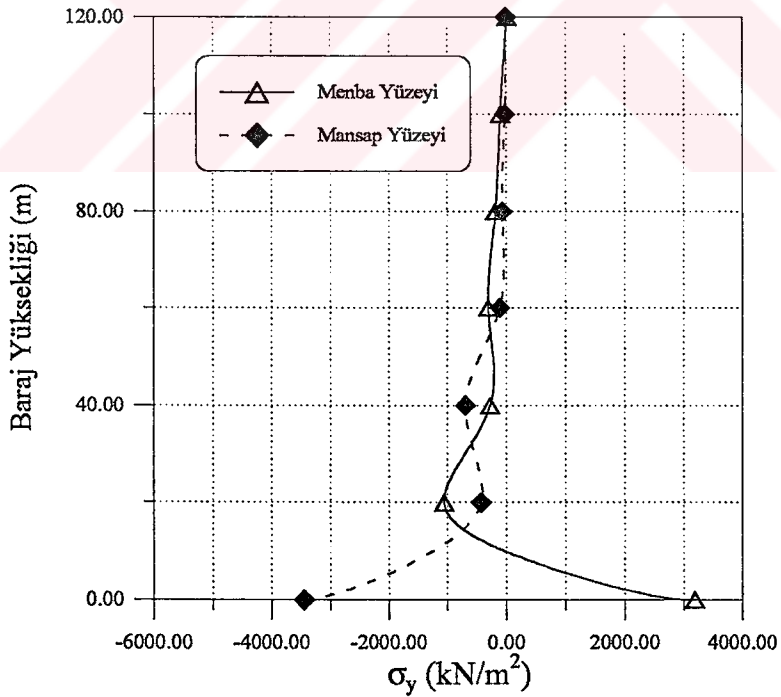
Şekil 33. İki boyutlu lineer olmayan statik analizde, temel rijit, barajın dolu olması durumunda menba ve mansap yüzeyi yatay gerilmelerinin yükseklik boyunca değişimi



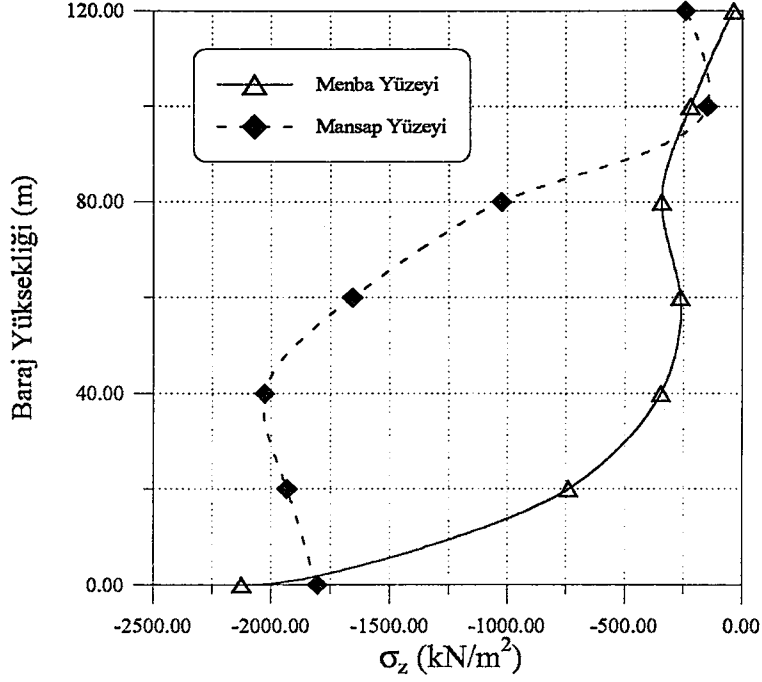
Şekil 34. İki boyutlu lineer olmayan statik analizde, temel rijit, barajın dolu olması durumunda menba ve mansap yüzeyi düşey gerilmelerinin yükseklik boyunca değişimi



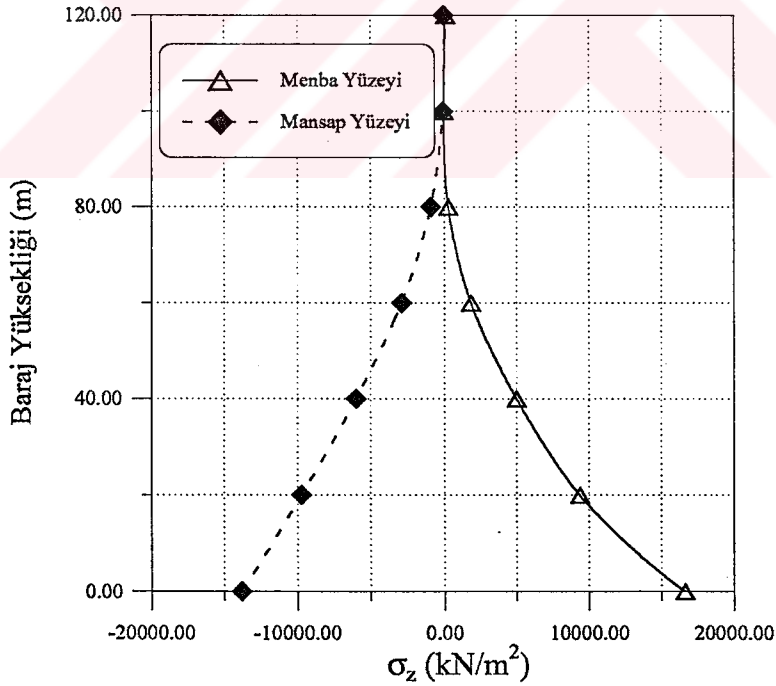
Şekil 35. İki boyutlu lineer statik analizde, temelin eğilebilir, barajın boş olması durumunda menba ve mansap yüzeyi yatay gerilmelerinin yükseklik boyunca değişimi



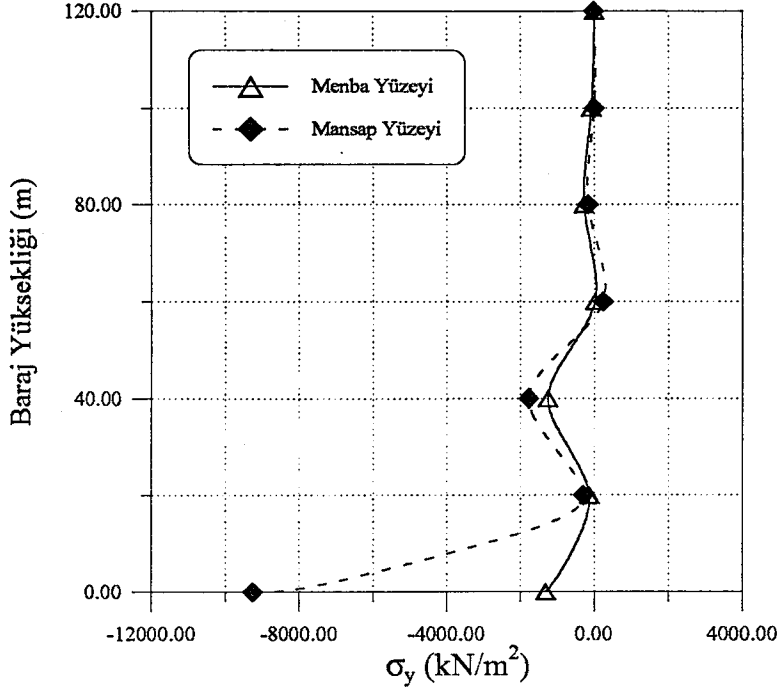
Şekil 36. İki boyutlu lineer statik analizde, temelin eğilebilir, barajın dolu olması durumunda menba ve mansap yüzeyi yatay gerilmelerinin yükseklik boyunca değişimi



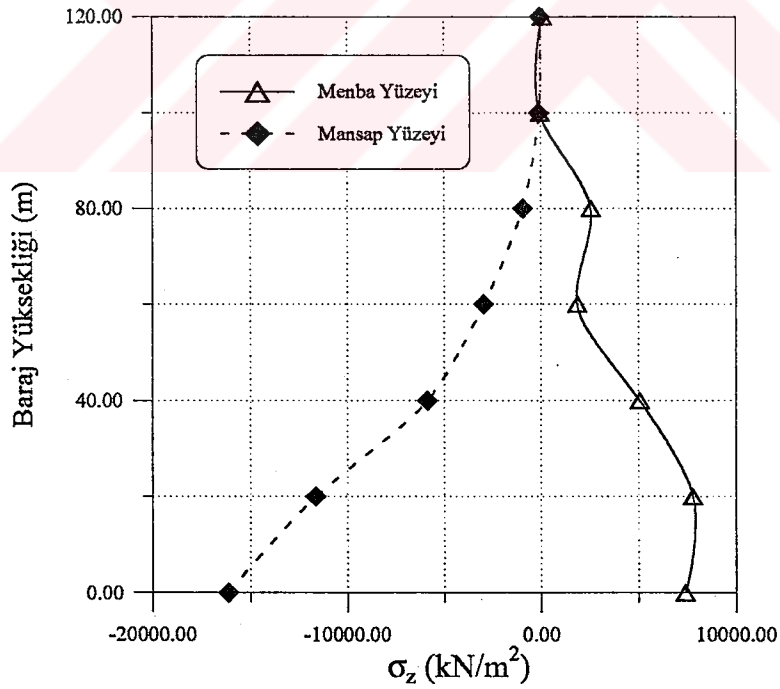
Şekil 37. İki boyutlu lineer statik analizde, temelin eğilebilir, barajın boş olması durumunda menba ve mansap yüzeyi düşey gerilmelerinin yükseklik boyunca değişimi



Şekil 38. İki boyutlu lineer statik analizde, temelin eğilebilir, barajın dolu olması durumunda menba ve mansap yüzeyi düşey gerilmelerinin yükseklik boyunca değişimi



Şekil 39. İki boyutlu lineer olmayan statik analizde, temelin eğilebilir, barajın dolu olması durumunda menba ve mansap yüzeyi yatay gerilmelerinin yükseklik boyunca değişimi



Şekil 40. İki boyutlu lineer olmayan statik analizde, temelin eğilebilir, barajın dolu olması durumunda menba ve mansap yüzeyi düşey gerilmelerinin yükseklik boyunca değişimi

3.1.1.3.2. Gerilmelerin Karşılaştırılması

Lineer analizde çeşitli durumlar için, barajın menba yüzeyinde yatay ve düşey doğrultuda meydana gelen en büyük çekme ve basınç gerilmeler Tablo 7 ve 8'de verilmektedir. Yatay doğrultuda, barajın boş ve dolu olması hallerinde çekme ve basınç gerilmelerinin baraj temeline yakın bölgelerde en fazla olduğu görülmektedir. Ancak temelin rijit, barajın dolu olduğu durumda çekme gerilmeleri krete yakın bölgelerde oluşmaktadır. Düşey doğrultuda, barajın boş olması halinde çekme gerilmeleri çok az oluşurken veya hiç oluşmazken, basınç gerilmeleri elde edilmiştir. Lineer olmayan analizlerde, sadece barajın dolu olması halinde çözüm elde edilebilmiştir. Tablo 9 ve 10'da yatay ve düşey doğrultuda bulunan en büyük çekme ve basınç gerilmeleri görülmektedir.

Tablo 7. İki boyutlu lineer statik analizde, çeşitli durumlar için menba yüzeyinde yatay doğrultuda meydana gelen en büyük çekme ve basınç gerilmeleri

Yatay Doğrultudaki En Büyük Çekme ve Basınç Gerilmeleri (kN/m ²)							
Rijit Temel				Eğilebilir Temel			
Baraj Boş		Baraj Dolu		Baraj Boş		Baraj Dolu	
Çekme	Basınç	Çekme	Basınç	Çekme	Basınç	Çekme	Basınç
53	313	2246	609	48	635	3183	1054

Tablo 8. İki boyutlu lineer statik analizde, çeşitli durumlar için menba yüzeyinde düşey doğrultuda meydana gelen en büyük çekme ve basınç gerilmeleri

Düşey Doğrultudaki En Büyük Çekme ve Basınç Gerilmeleri (kN/m ²)							
Rijit Temel				Eğilebilir Temel			
Baraj Boş		Baraj Dolu		Baraj Boş		Baraj Dolu	
Çekme	Basınç	Çekme	Basınç	Çekme	Basınç	Çekme	Basınç
-	1858	21024	68	-	2125	16619	39

Tablo 9. İki boyutlu lineer olmayan statik analizde, çeşitli durumlar için menba yüzeyinde yatay doğrultuda meydana gelen en büyük çekme ve basınç gerilmeleri

Yatay Doğrultudaki En Büyük Çekme ve Basınç Gerilmeleri (kN/m ²)			
Rijit Temel		Eğilebilir Temel	
Baraj Dolu		Baraj Dolu	
Çekme	Basınç	Çekme	Basınç
1	1252	6	1303

Tablo 10. İki boyutlu lineer olmayan statik analizde, çeşitli durumlar için menba yüzeyinde düşey doğrultuda meydana gelen en büyük çekme ve basınç gerilmeleri

Düşey Doğrultudaki En Büyük Çekme ve Basınç Gerilmeleri (kN/m ²)			
Rijit Temel		Eğilebilir Temel	
Baraj Dolu		Baraj Dolu	
Çekme	Basınç	Çekme	Basınç
7409	238	7823	40

3.1.2. Dinamik Analiz

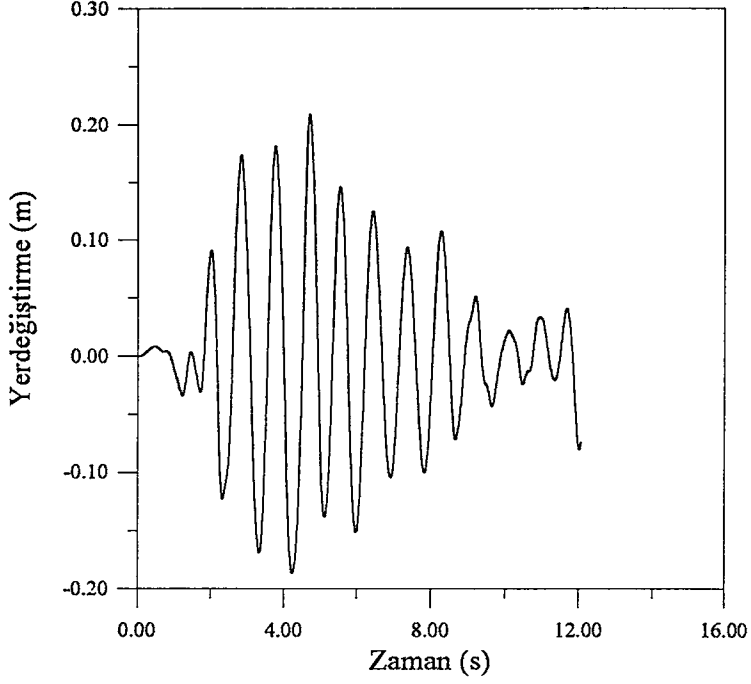
Seçilen kemer barajın dinamik davranışı, 1940 yılında meydana gelen El-Centro depremi kullanılarak aynı sonlu eleman ağı üzerinde tespit edilmeye çalışılmaktadır. Deprem hareketi baraja menba-mansap doğrultusunda etkittirilmektedir. Baraj malzemesinin lineer ve lineer olmama durumu göz önünde bulundurularak yerdeğiştirme ve gerilmeler elde edilmektedir. Lineer olmayan analizde, temelin eğilebilir olması halinde, hem barajın hem de zeminin malzeme davranışı, Drucker-Prager hipotezi kullanılarak modellenmektedir. Gerilmeler baraj gövdesinde seçilen elemanların gauss noktalarında, yerdeğiştirmeler ise düğüm noktalarında elde edilmiştir.

3.1.2.1. Yerdeğiştirmeler

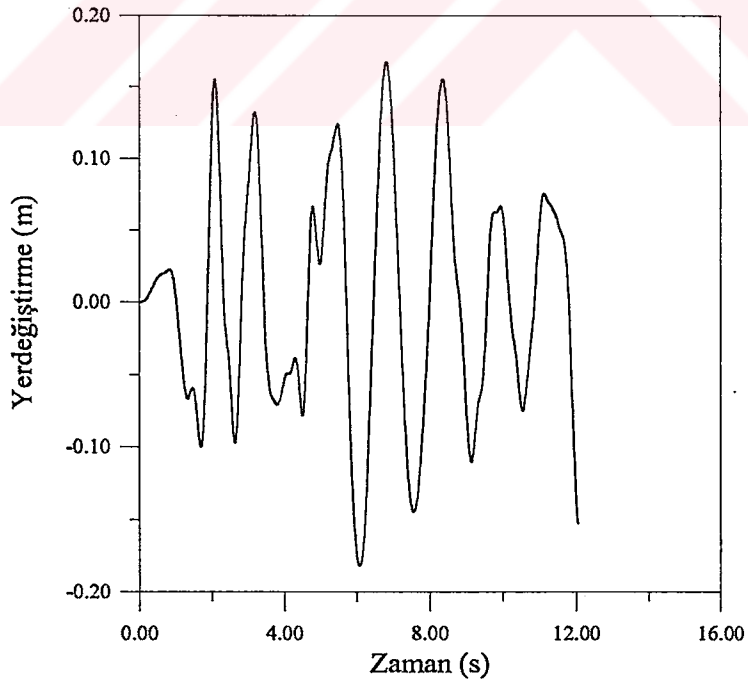
Barajın boş ve dolu, temelin rijit ve eğilebilir olması durumları dikkate alınarak menba yüzeyi yerdeğiştirmesinin zamanla değişimi incelenmektedir. Lineer analizde, baraj kretinde meydana gelen yerdeğiştirmelerin çeşitli durumlar için zamanla değişimi Şekil 41-44'te, lineer olmayan analizde ise Şekil 45-48'de verilmektedir.

3.1.2.2. Asal Gerilmeler

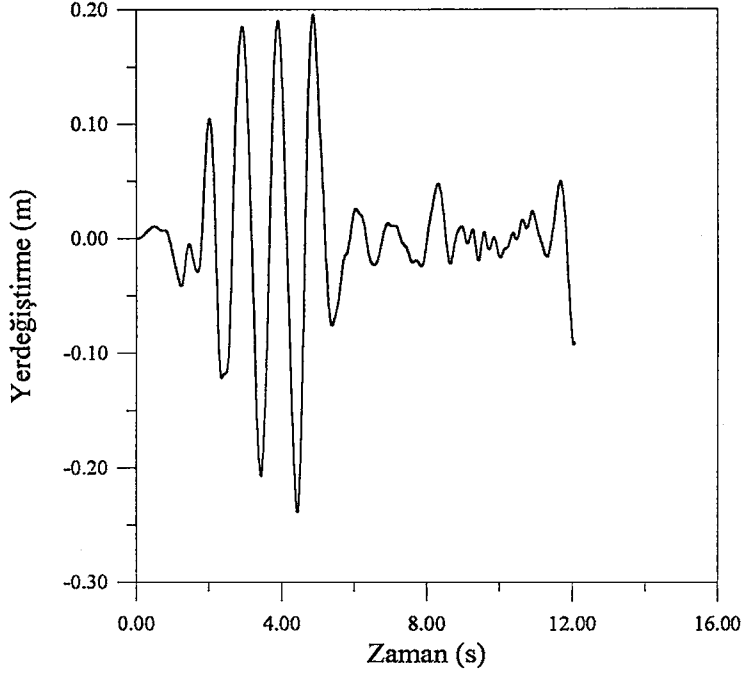
Barajın boş ve dolu, temelin rijit ve eğilebilir olması durumları dikkate alınarak, barajda çekme gerilmeleri bakımından kritik olan elemanların işaretlenen gauss noktalarında (Şekil 22) maksimum ve minimum asal gerilmeleri incelenmektedir. Lineer olmayan analizlerde, (7) denklemi ile verilen akma fonksiyonun işaretlenen gauss noktalarındaki değeri deprem süresi boyunca incelenmiş ve böylelikle bu noktalardaki lineer olmayan davranış belirlenmiştir. Gerilmelerin çeşitli durumlar için zamanla değişimi, lineer analizler için Şekil 49-72'de, lineer olmayan analizde ise Şekil 73-108'de verilmektedir. Barajın topuk bölgesinde ve gövdede seçilen elemanların gauss noktalarında, barajın boş ve dolu olması durumları dikkate alındığında meydana gelen maksimum ve minimum asal gerilmeler arasında büyük farklar bulunmaktadır. Ayrıca, temelin göz önüne alındığı çözümlerde baraj davranışında önemli değişiklikler olmaktadır.



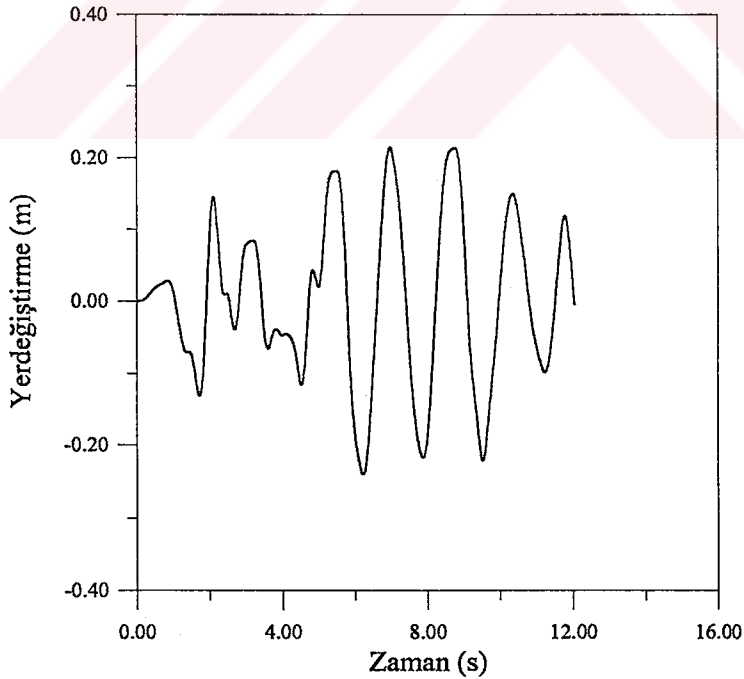
Şekil 41. İki boyutlu lineer dinamik analizde, temelin rijit, barajın boş olması durumunda kret noktasında (19 nolu düğüm noktası) meydana gelen yatay yerdeğiştirmelerin zamanla değişimi



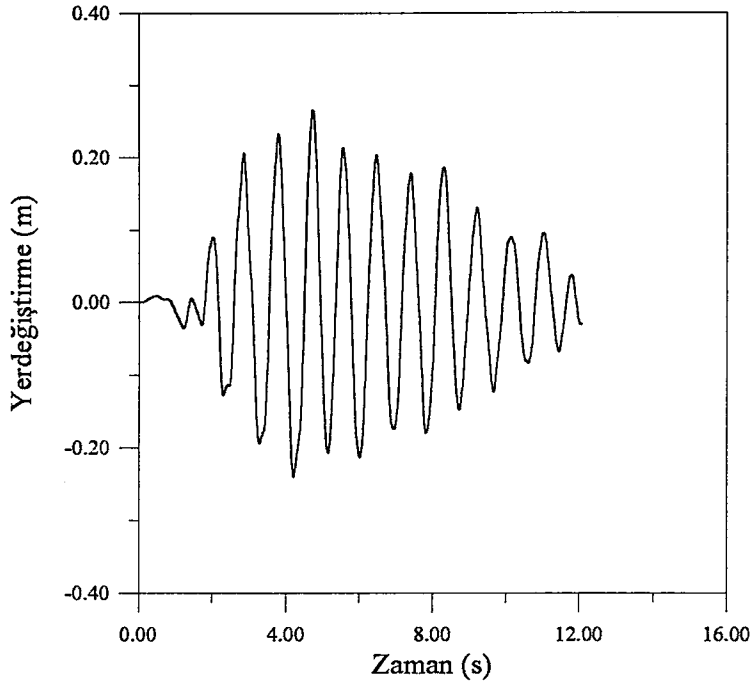
Şekil 42. İki boyutlu lineer dinamik analizde, temelin rijit, barajın dolu olması durumunda kret noktasında (19 nolu düğüm noktası) meydana gelen yatay yerdeğiştirmelerin zamanla değişimi



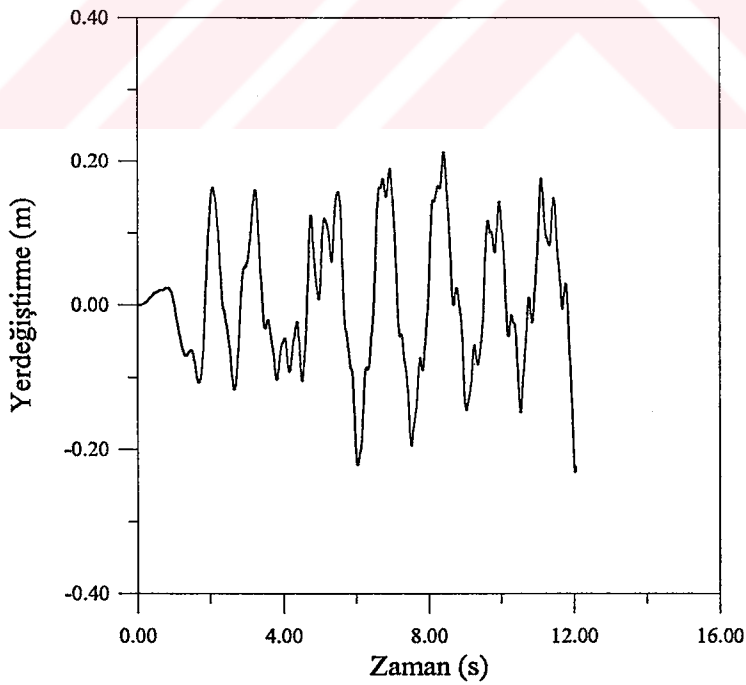
Şekil 43. İki boyutlu lineer dinamik analizde, temelin eğilebilir, barajın boş olması durumunda kret noktasında (32 nolu düğüm noktası) meydana gelen yatay yerdeğiştirmelerin zamanla değişimi



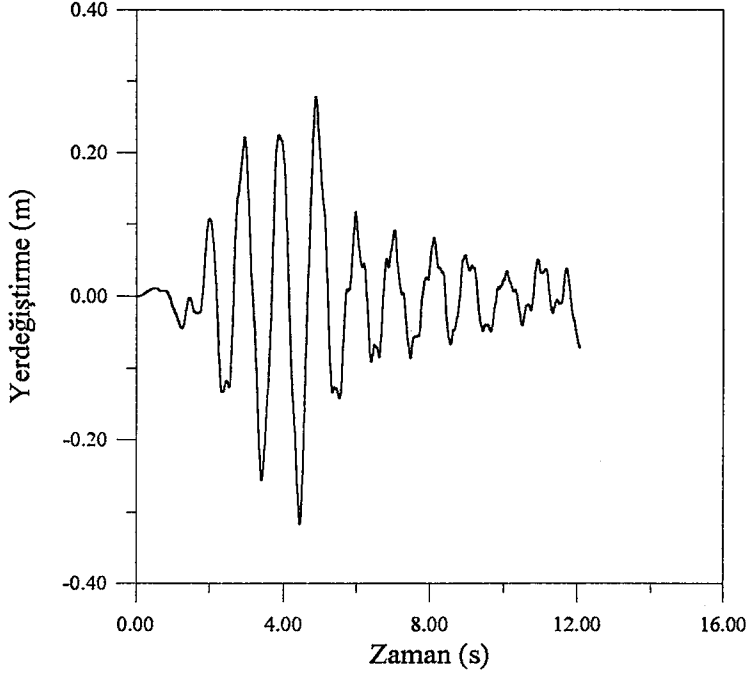
Şekil 44. İki boyutlu lineer dinamik analizde, temelin eğilebilir, barajın dolu olması durumunda kret noktasında (32 nolu düğüm noktası) meydana gelen yatay yerdeğiştirmelerin zamanla değişimi



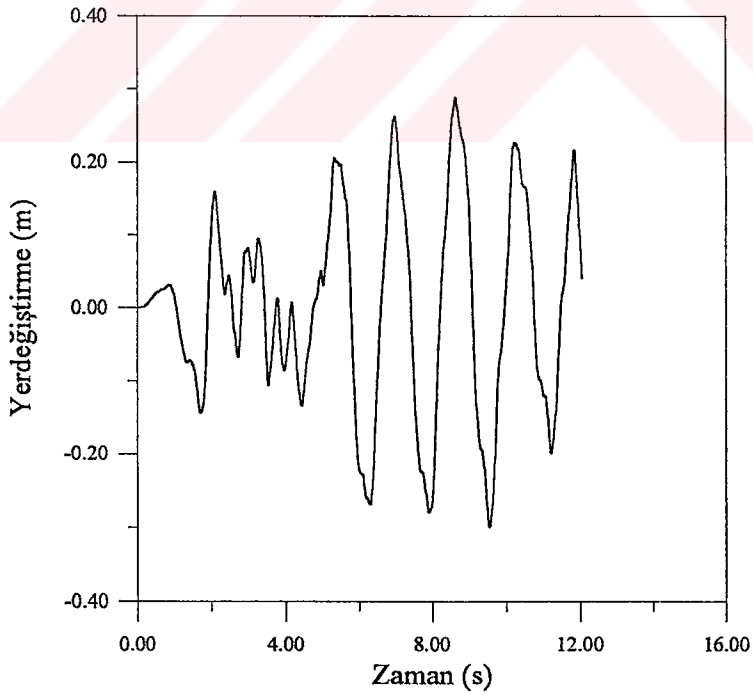
Şekil 45. İki boyutlu lineer olmayan dinamik analizde, temelin rijit, barajın boş olması durumunda kret noktasında (19 nolu düğüm noktası) meydana gelen yatay yerdeğiştirmelerin zamanla değişimi



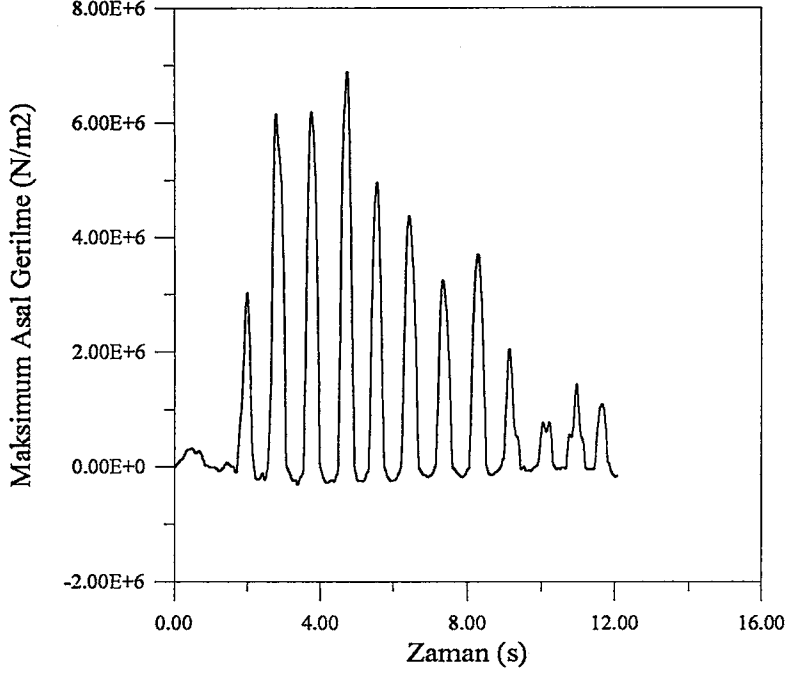
Şekil 46. İki boyutlu lineer olmayan dinamik analizde, temelin rijit, barajın dolu olması durumunda kret noktasında (19 nolu düğüm noktası) meydana gelen yatay yerdeğiştirmelerin zamanla değişimi



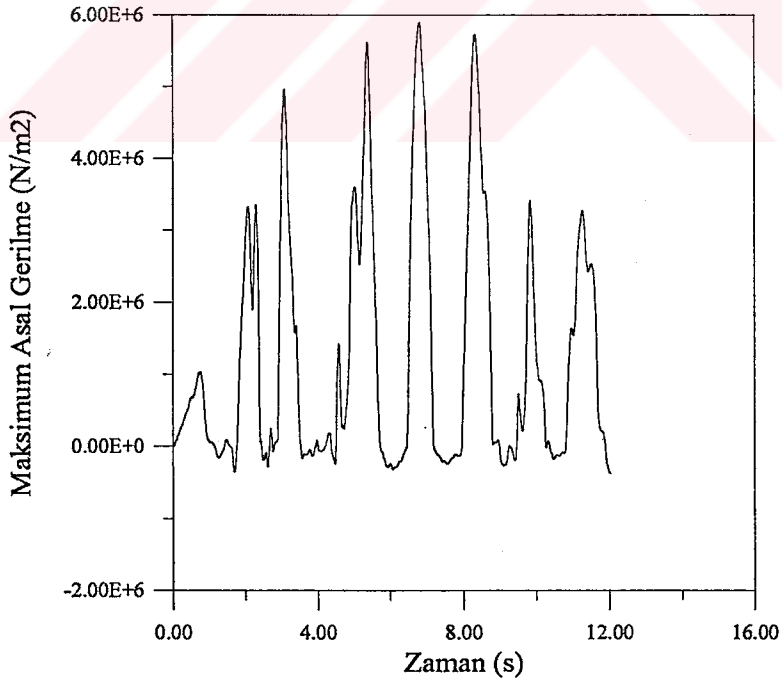
Şekil 47. İki boyutlu lineer olmayan dinamik analizde, temelin eğilebilir, barajın boş olması durumunda kret noktasında (32 nolu düğüm noktası) meydana gelen yatay yerdeğiştirmelerin zamanla değişimi



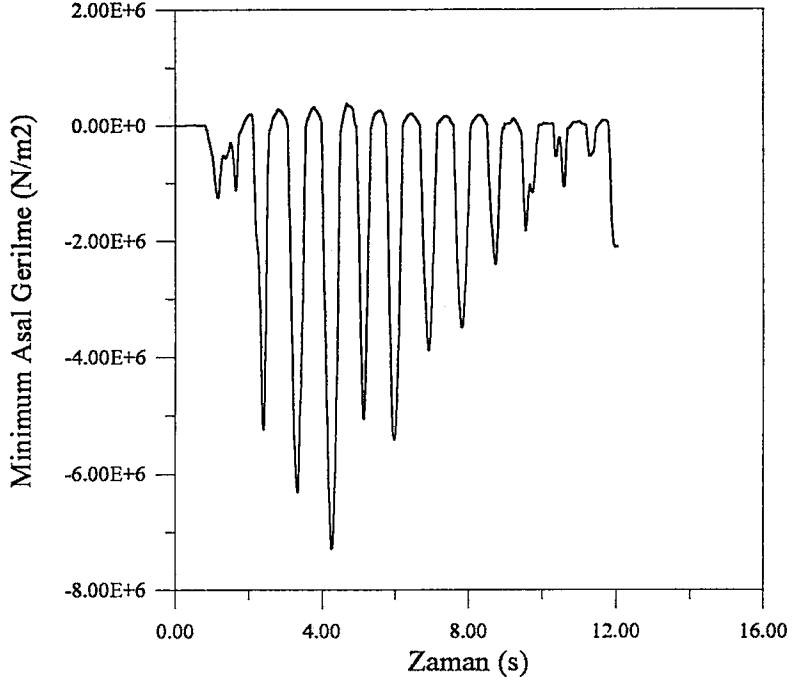
Şekil 48. İki boyutlu lineer olmayan dinamik analizde, temelin eğilebilir, barajın dolu olması durumunda kret noktasında (32 nolu düğüm noktası) meydana gelen yatay yerdeğiştirmelerin zamanla değişimi



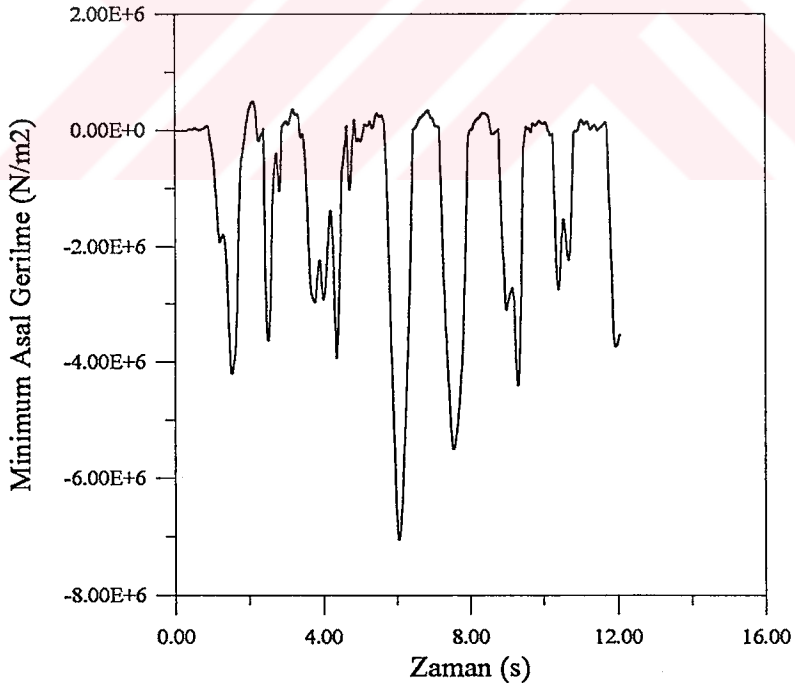
Şekil 49. İki boyutlu lineer dinamik analizde, temelin rijit, barajın boş olması durumunda A gauss noktasında meydana gelen maksimum asal gerilmelerin zamanla değişimi



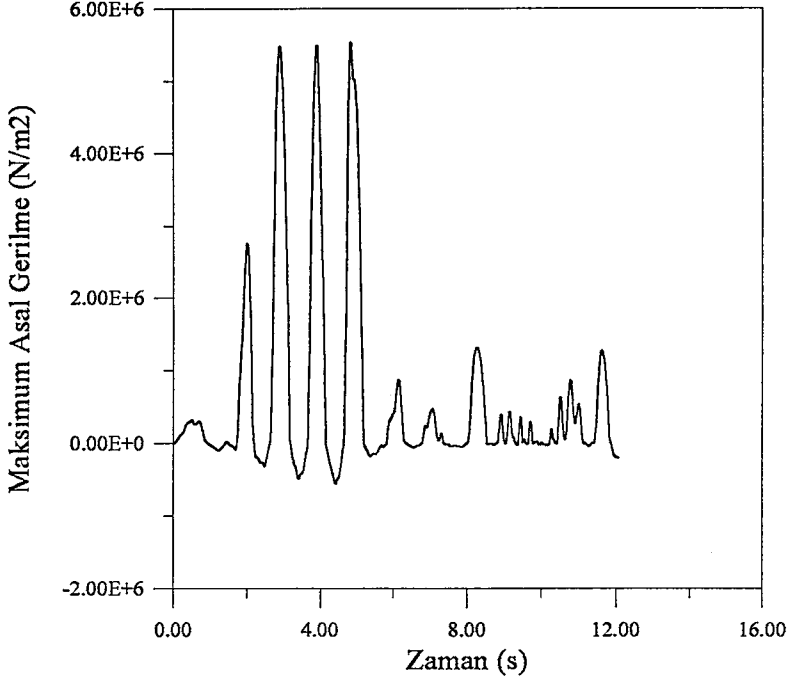
Şekil 50. İki boyutlu lineer dinamik analizde, temelin rijit, barajın dolu olması durumunda A gauss noktasında meydana gelen maksimum asal gerilmelerin zamanla değişimi



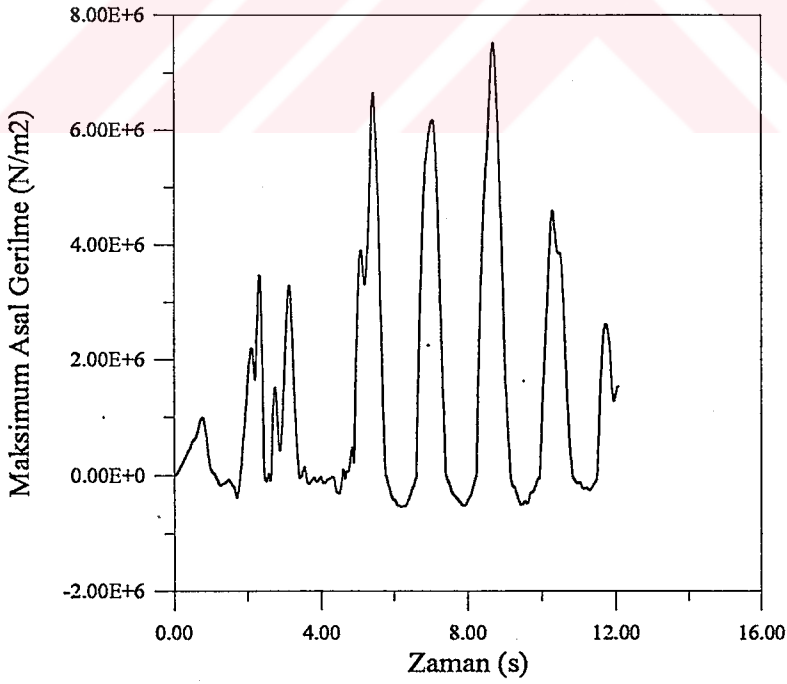
Şekil 51. İki boyutlu lineer dinamik analizde, temelin rijit, barajın boş olması durumunda A gauss noktasında meydana gelen minimum asal gerilmelerin zamanla değişimi



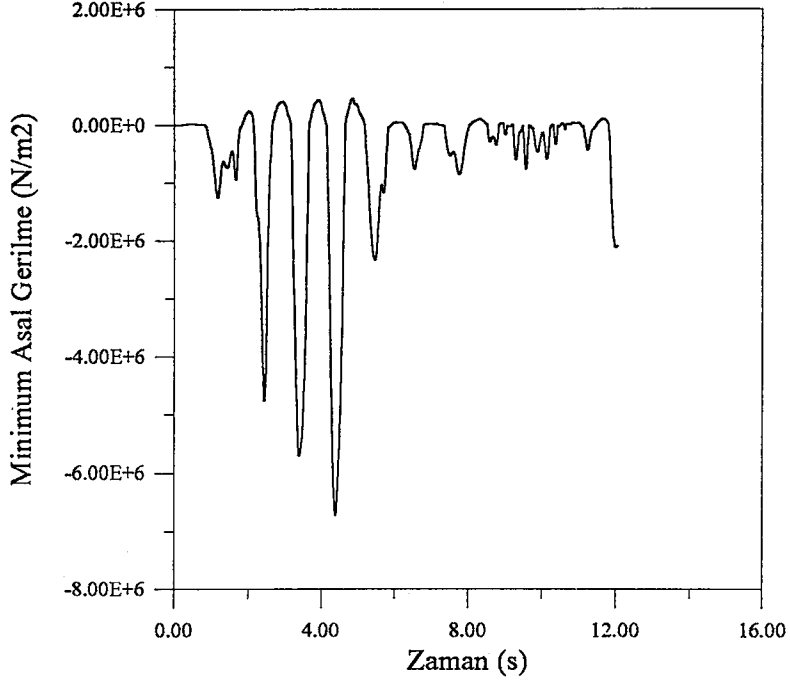
Şekil 52. İki boyutlu lineer dinamik analizde, temelin rijit, barajın dolu olması durumunda A gauss noktasında meydana gelen minimum asal gerilmelerin zamanla değişimi



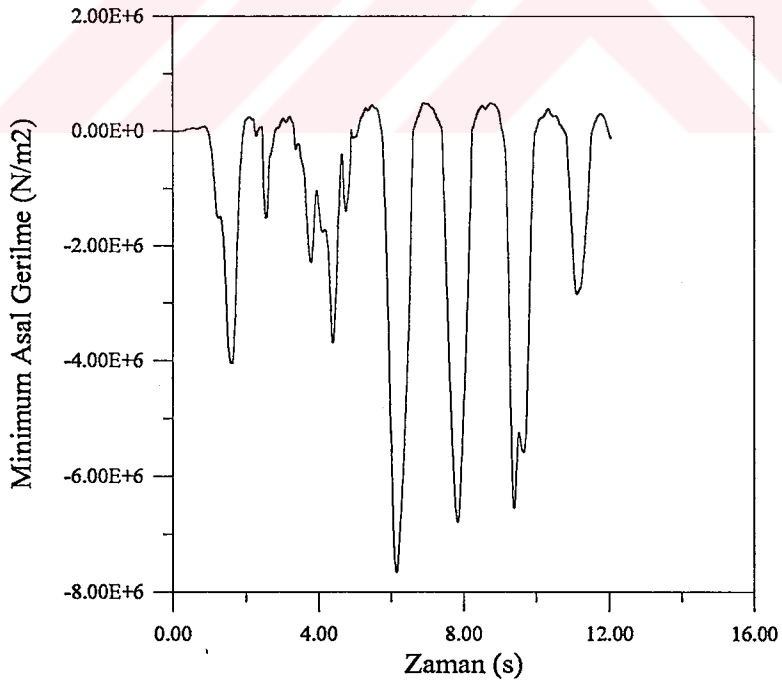
Şekil 53. İki boyutlu lineer dinamik analizde, temelin eğilebilir, barajın boş olması durumunda A gauss noktasında meydana gelen maksimum asal gerilmelerin zamanla değişimi



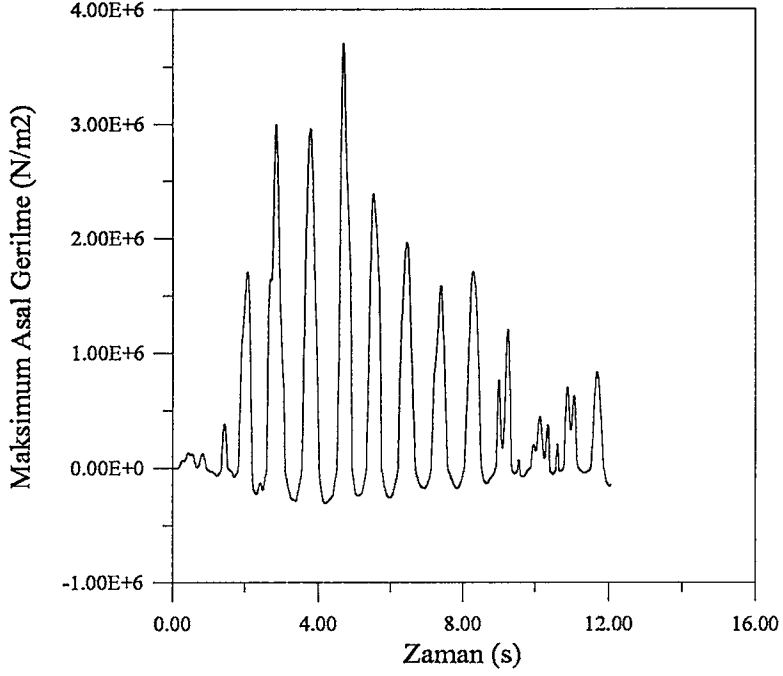
Şekil 54. İki boyutlu lineer dinamik analizde, temelin eğilebilir, barajın dolu olması durumunda A gauss noktasında meydana gelen maksimum asal gerilmelerin zamanla değişimi



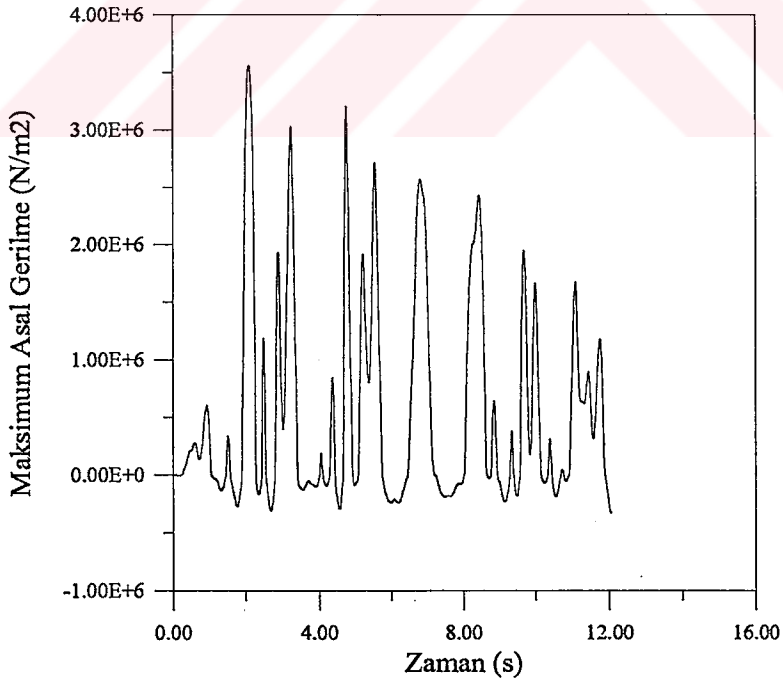
Şekil 55. İki boyutlu lineer dinamik analizde, temelin eğilebilir, barajın boş olması durumunda A gauss noktasında meydana gelen minimum asal gerilmelerin zamanla değişimi



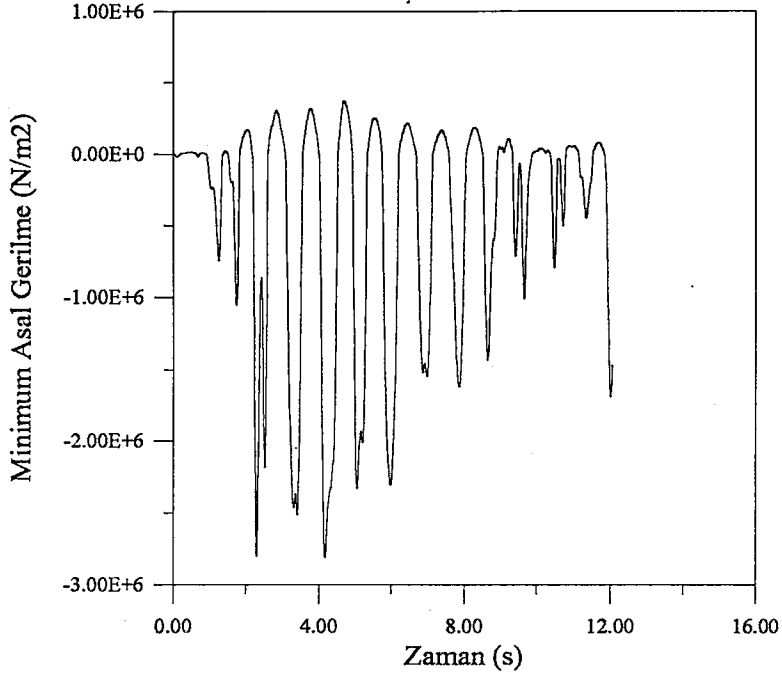
Şekil 56. İki boyutlu lineer dinamik analizde, temelin eğilebilir, barajın dolu olması durumunda A gauss noktasında meydana gelen minimum asal gerilmelerin zamanla değişimi



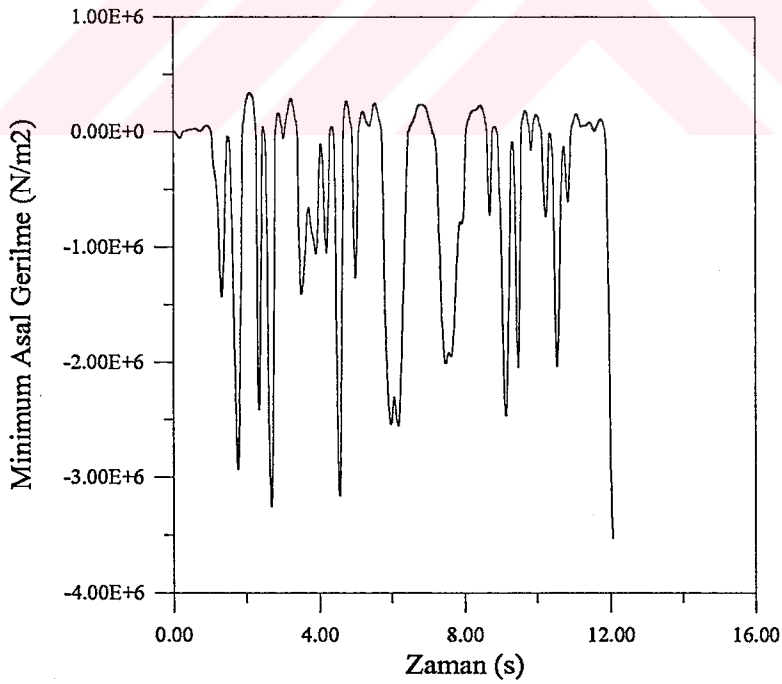
Şekil 57. İki boyutlu lineer dinamik analizde, temelin rijit, barajın boş olması durumunda B gauss noktasında meydana gelen maksimum asal gerilmelerin zamanla değişimi



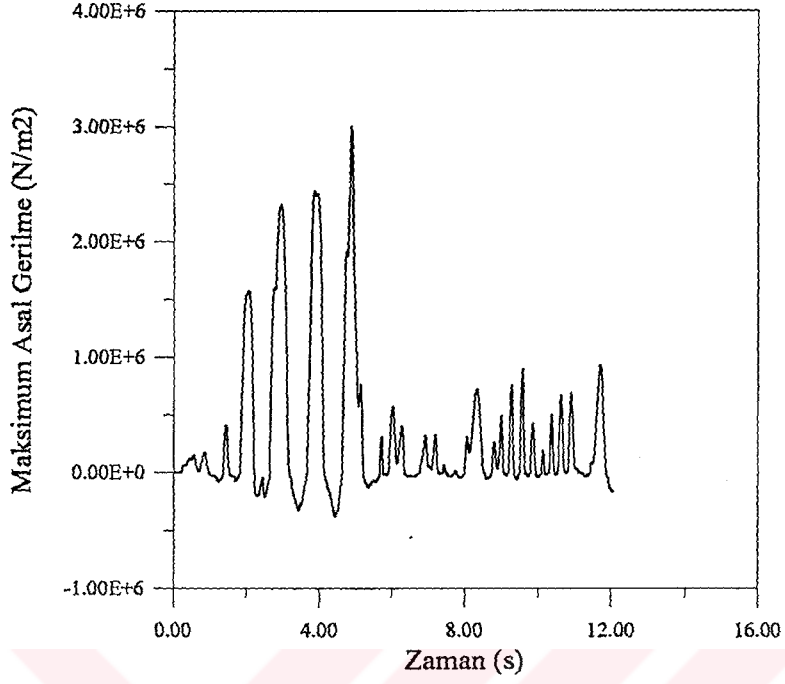
Şekil 58. İki boyutlu lineer dinamik analizde, temelin rijit, barajın dolu olması durumunda B gauss noktasında meydana gelen maksimum asal gerilmelerin zamanla değişimi



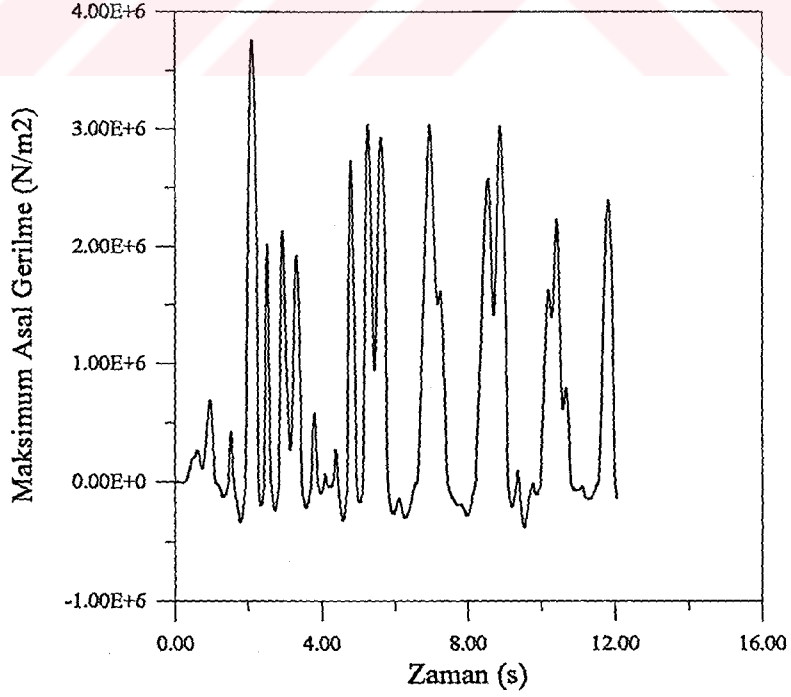
Şekil 59. İki boyutlu lineer dinamik analizde, temelin rijit, barajın boş olması durumunda B gauss noktasında meydana gelen minimum asal gerilmelerin zamanla değişimi



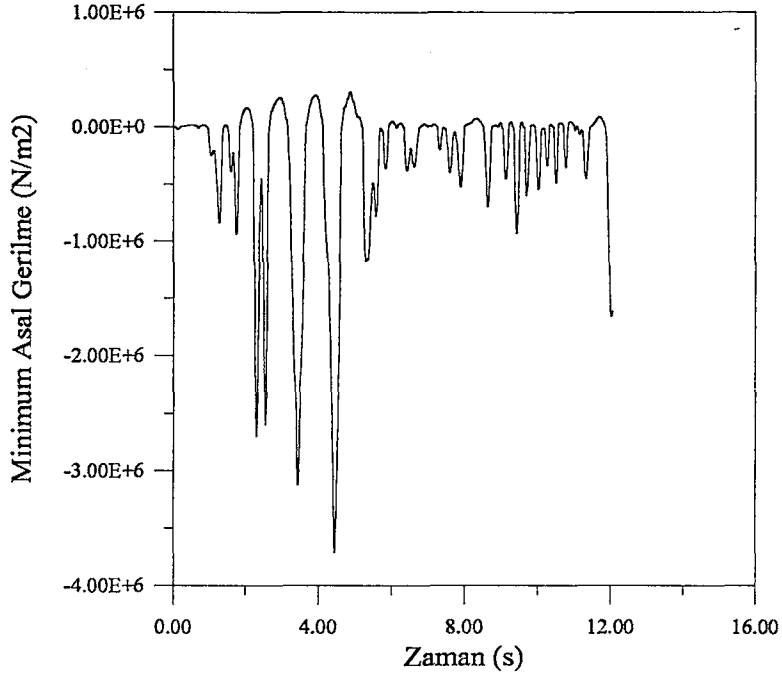
Şekil 60. İki boyutlu lineer dinamik analizde, temelin rijit, barajın dolu olması durumunda B gauss noktasında meydana gelen minimum asal gerilmelerin zamanla değişimi



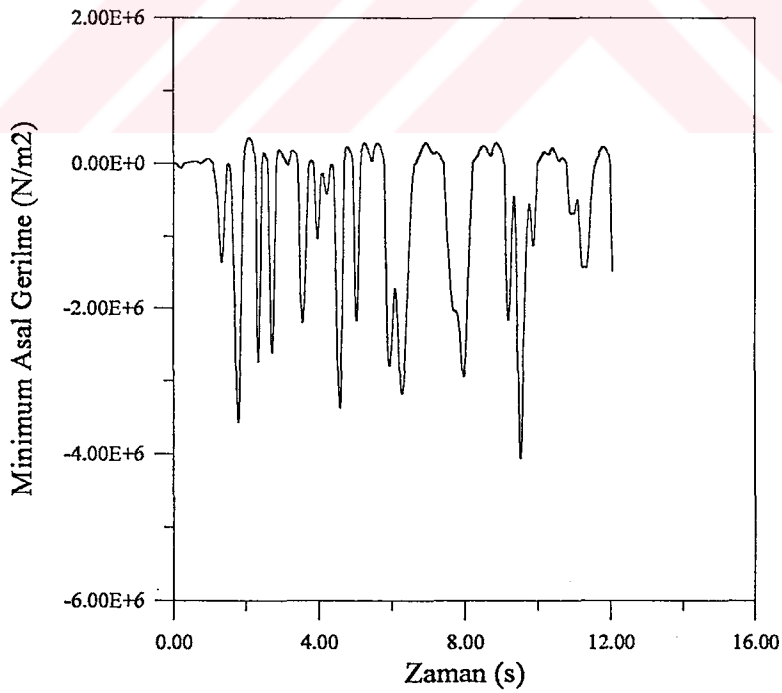
Şekil 61. İki boyutlu lineer dinamik analizde, temelin eğilebilir, barajın boş olması durumunda B gauss noktasında meydana gelen maksimum asal gerilmelerin zamanla değişimi



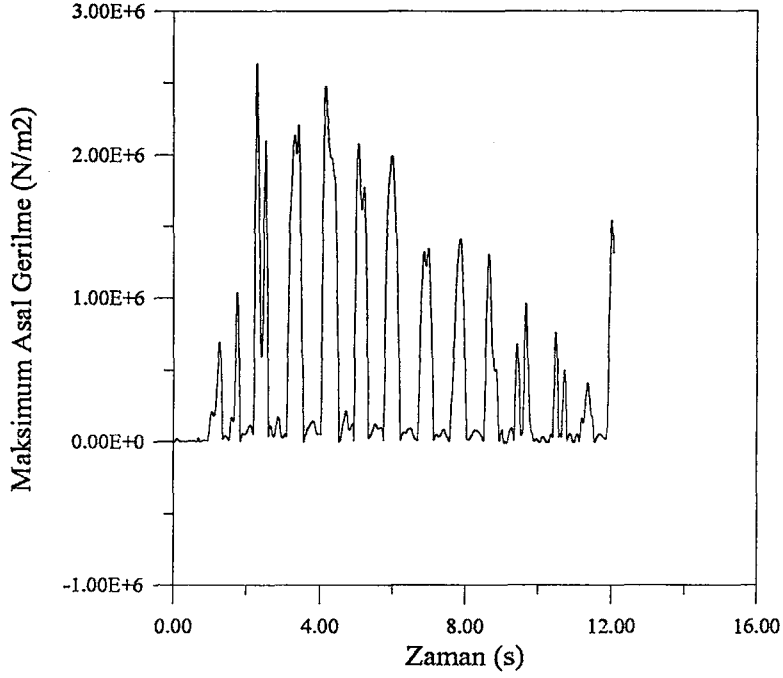
Şekil 62. İki boyutlu lineer dinamik analizde, temelin eğilebilir, barajın dolu olması durumunda B gauss noktasında meydana gelen maksimum asal gerilmelerin zamanla değişimi



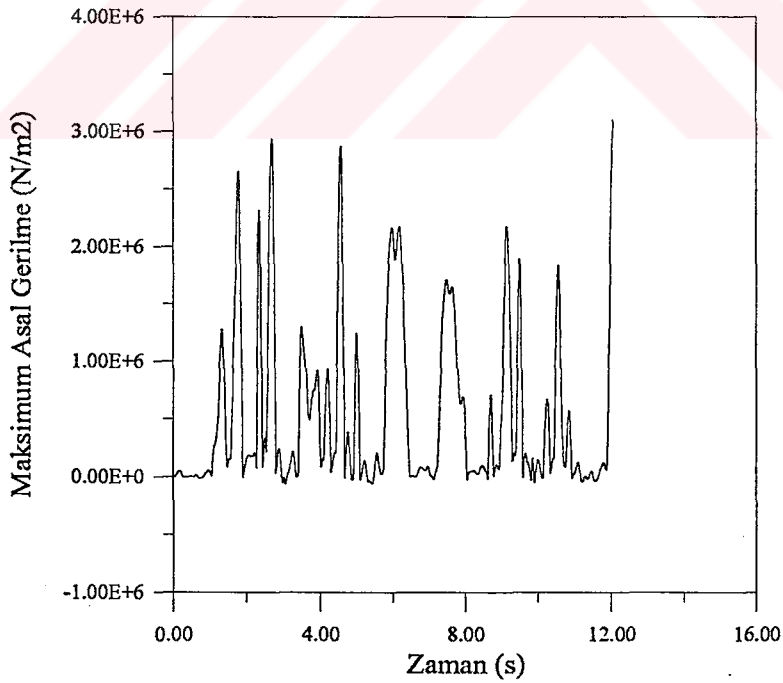
Şekil 63. İki boyutlu lineer dinamik analizde, temelin eğilebilir, barajın boş olması durumunda B gauss noktasında meydana gelen minimum asal gerilmelerin zamanla değişimi



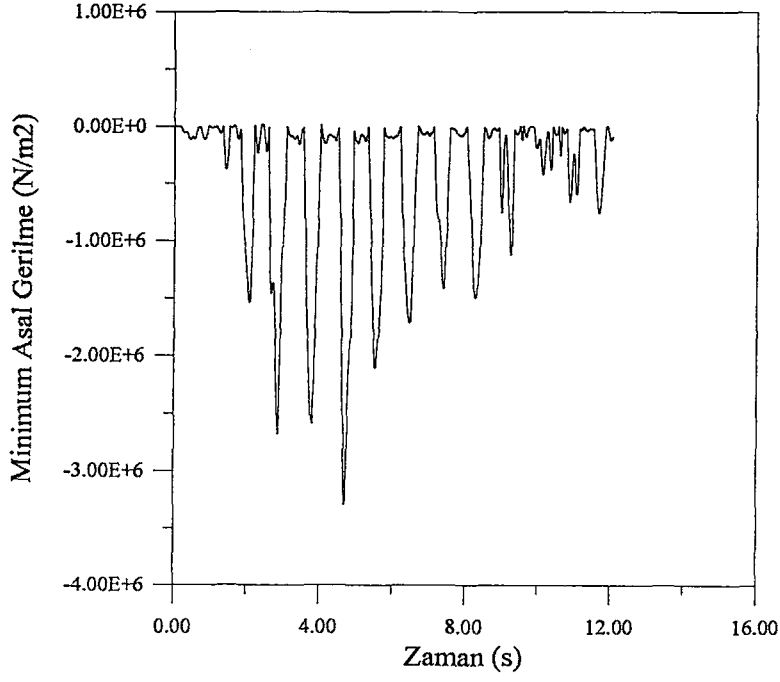
Şekil 64. İki boyutlu lineer dinamik analizde, temelin eğilebilir, barajın dolu olması durumunda B gauss noktasında meydana gelen minimum asal gerilmelerin zamanla değişimi



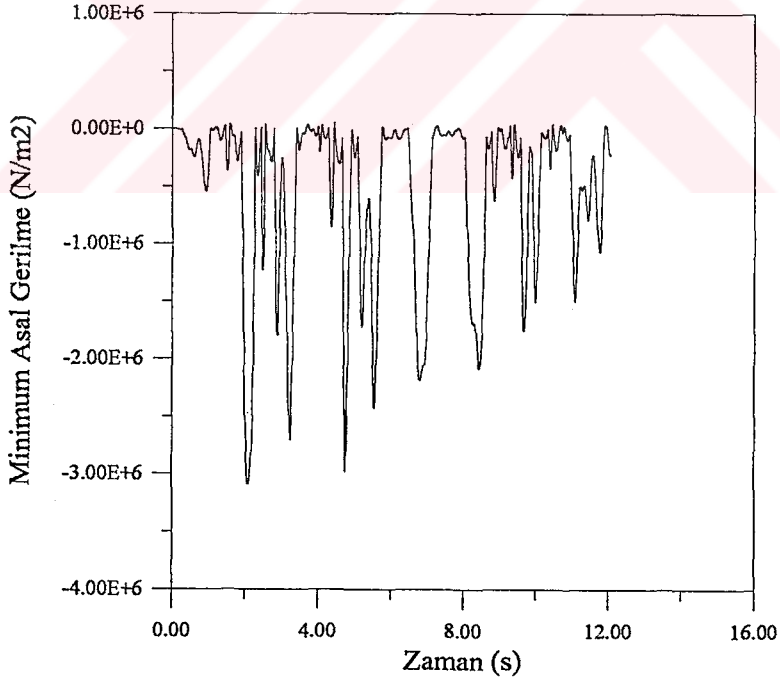
Şekil 65. İki boyutlu lineer dinamik analizde, temelin rijit, barajın boş olması durumunda C gauss noktasında meydana gelen maksimum asal gerilmelerin zamanla değişimi



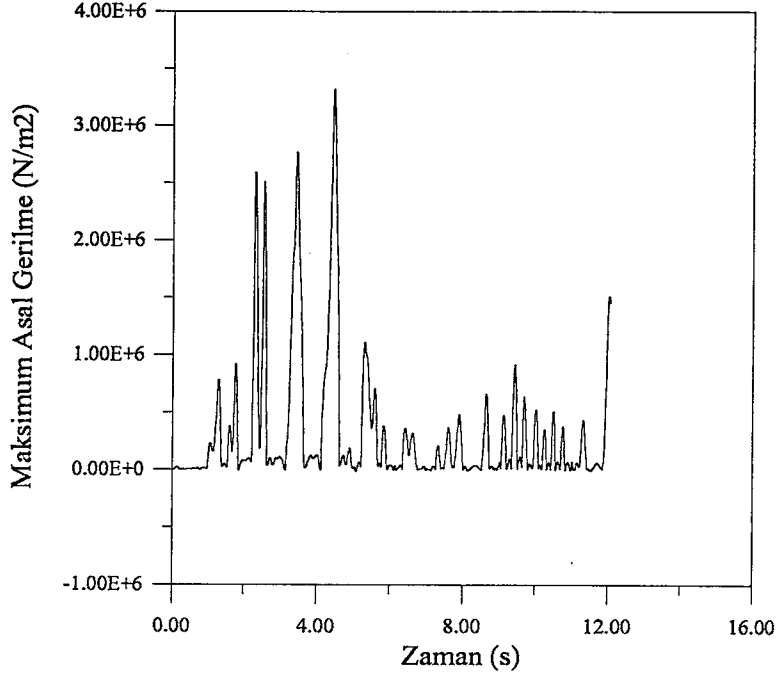
Şekil 66. İki boyutlu lineer dinamik analizde, temelin rijit, barajın dolu olması durumunda C gauss noktasında meydana gelen maksimum asal gerilmelerin zamanla değişimi



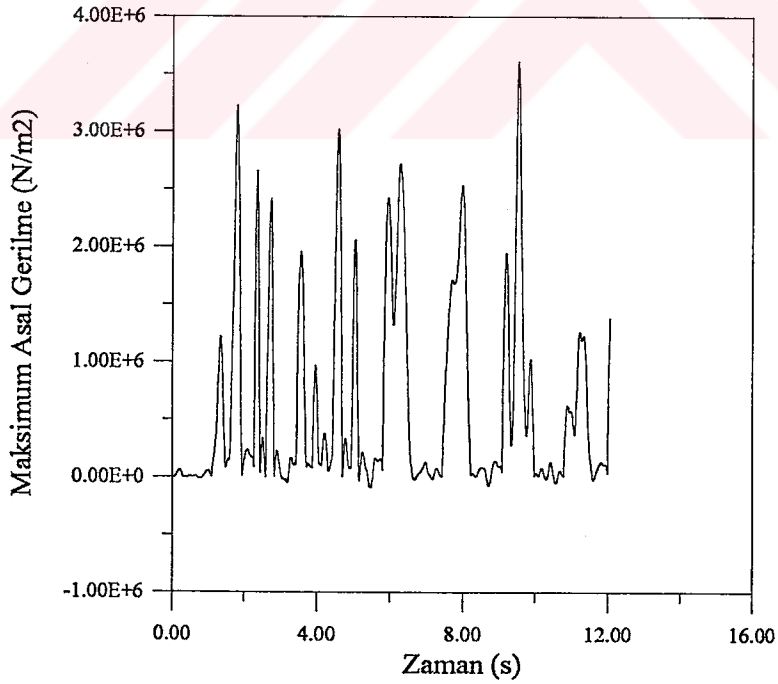
Şekil 67. İki boyutlu lineer dinamik analizde, temelin rijit, barajın boş olması durumunda C gauss noktasında meydana gelen minimum asal gerilmelerin zamanla değişimi



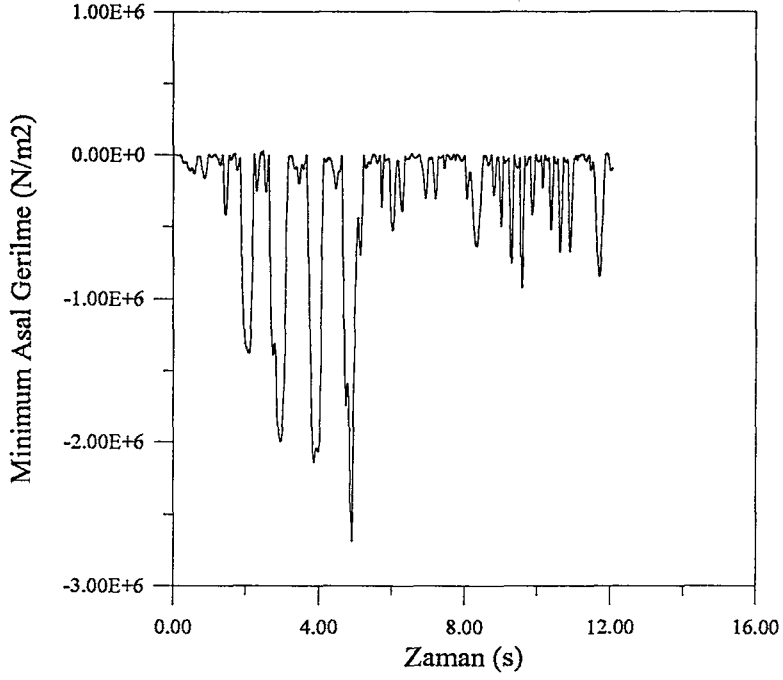
Şekil 68. İki boyutlu lineer dinamik analizde, temelin rijit, barajın dolu olması durumunda C gauss noktasında meydana gelen minimum asal gerilmelerin zamanla değişimi



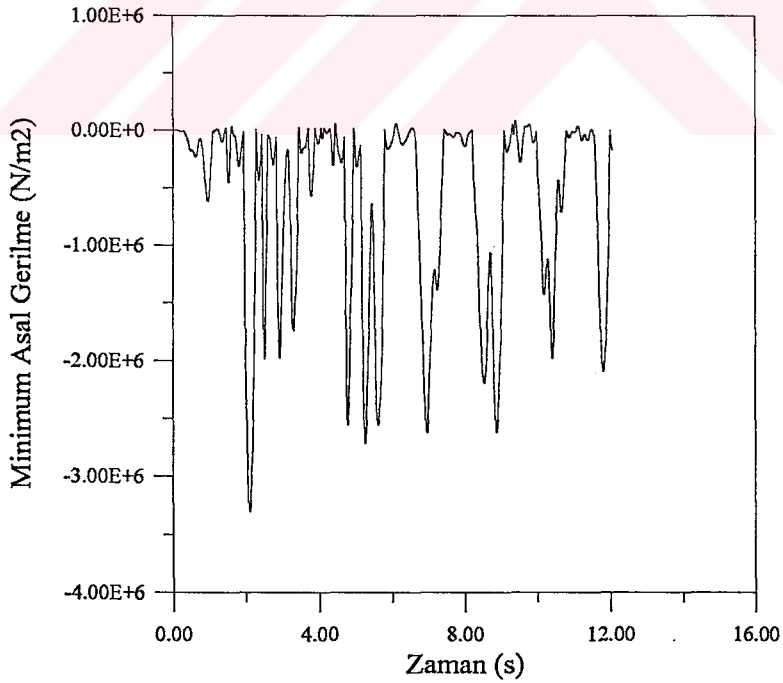
Şekil 69. İki boyutlu lineer dinamik analizde, temelin eğilebilir, barajın boş olması durumunda C gauss noktasında meydana gelen maksimum asal gerilmelerin zamanla değişimi



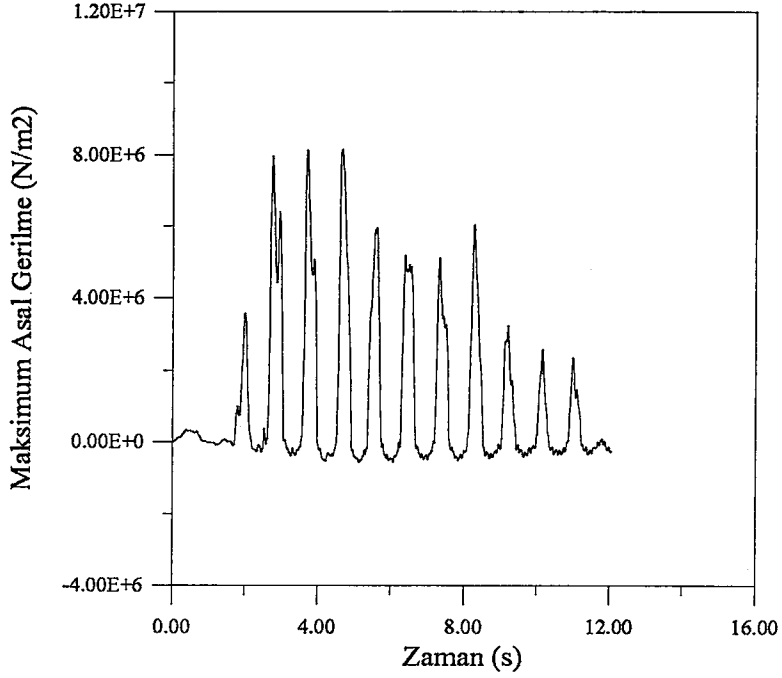
Şekil 70. İki boyutlu lineer dinamik analizde, temelin eğilebilir, barajın dolu olması durumunda C gauss noktasında meydana gelen maksimum asal gerilmelerin zamanla değişimi



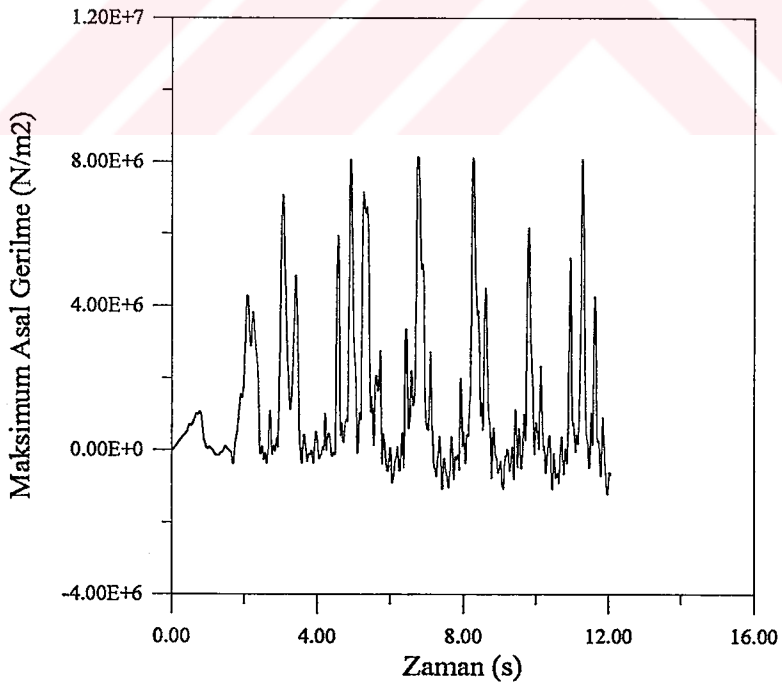
Şekil 71. İki boyutlu lineer dinamik analizde, temelin eğilebilir, barajın boş olması durumunda C gauss noktasında meydana gelen minimum asal gerilmelerin zamanla değişimi



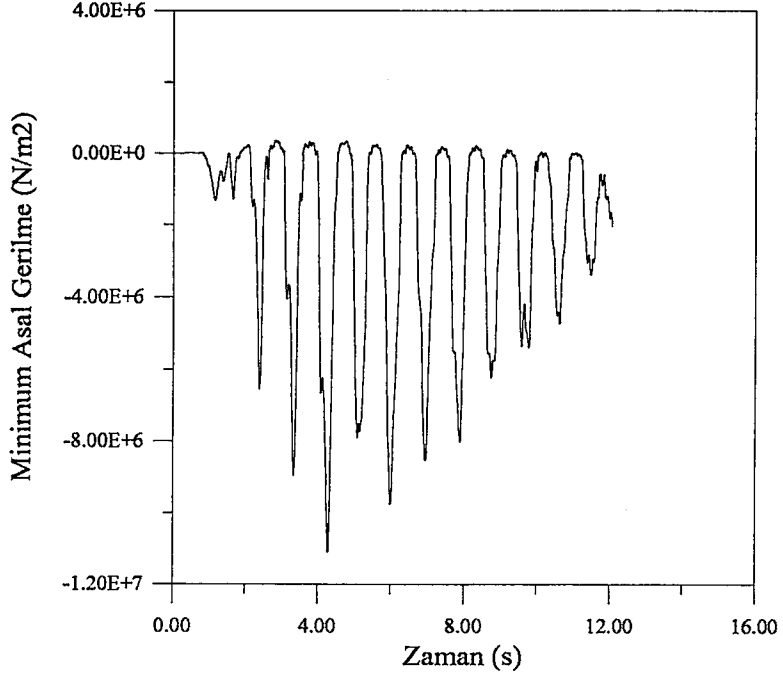
Şekil 72. İki boyutlu lineer dinamik analizde, temelin eğilebilir, barajın dolu olması durumunda C gauss noktasında meydana gelen minimum asal gerilmelerin zamanla değişimi



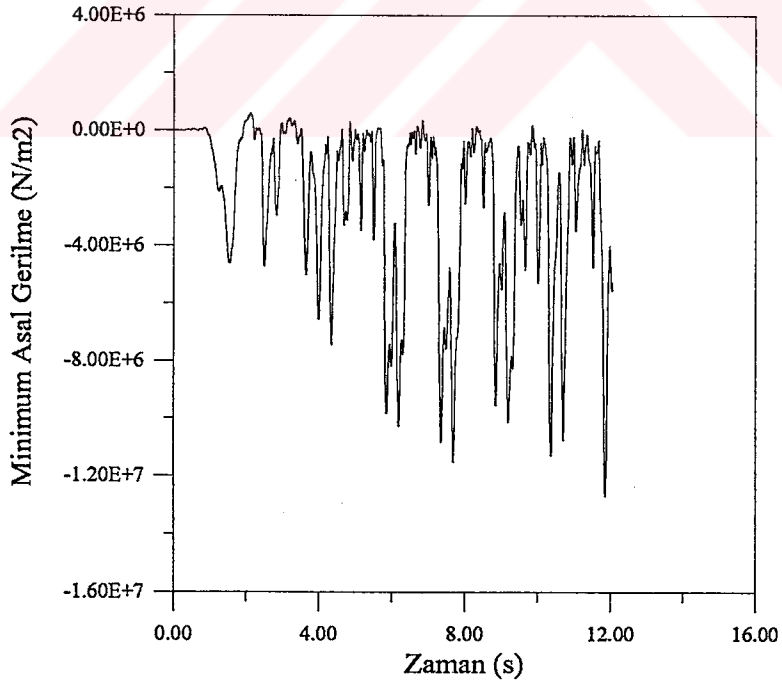
Şekil 73. İki boyutlu lineer olmayan dinamik analizde, temelin rijit, barajın boş olması durumunda A gauss noktasında meydana gelen maksimum asal gerilmelerin zamanla değişimi



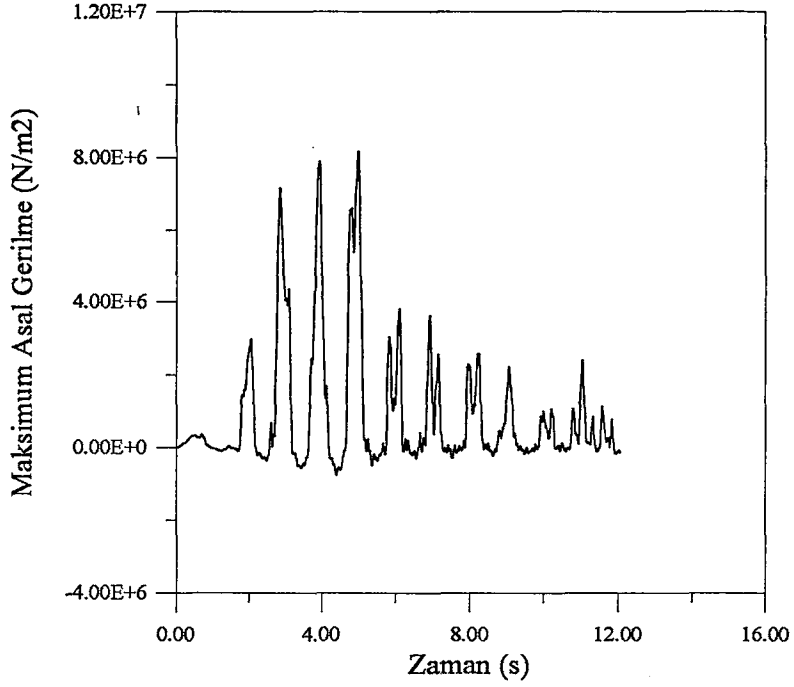
Şekil 74. İki boyutlu lineer olmayan dinamik analizde, temelin rijit, barajın dolu olması durumunda A gauss noktasında meydana gelen maksimum asal gerilmelerin zamanla değişimi



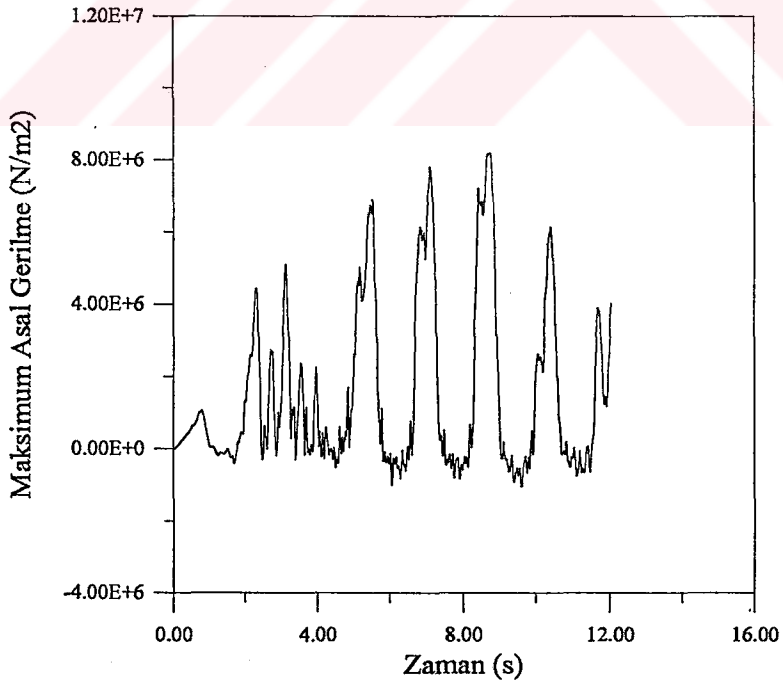
Şekil 75. İki boyutlu lineer olmayan dinamik analizde, temelin rijit, barajın boş olması durumunda A gauss noktasında meydana gelen minimum asal gerilmelerin zamanla değişimi



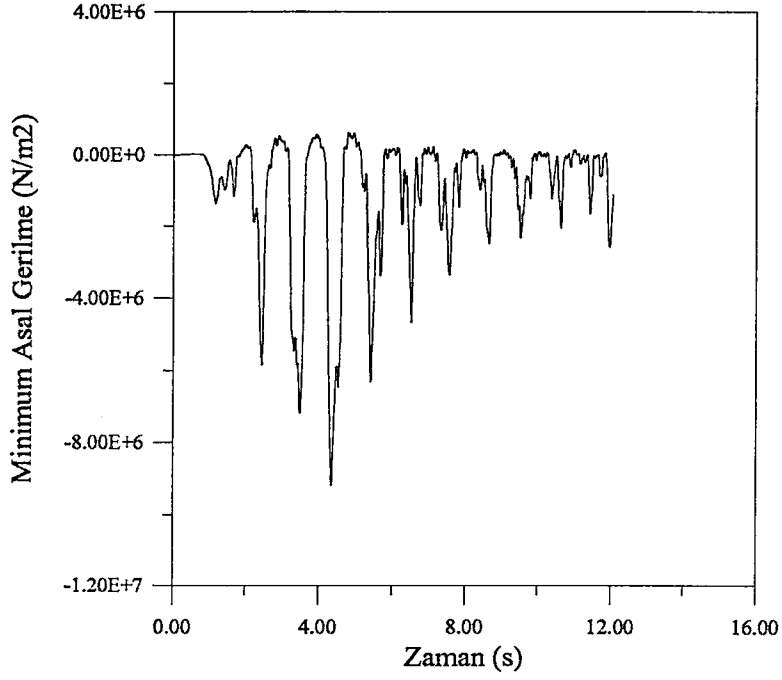
Şekil 76. İki boyutlu lineer olmayan dinamik analizde, temelin rijit, barajın dolu olması durumunda A gauss noktasında meydana gelen minimum asal gerilmelerin zamanla değişimi



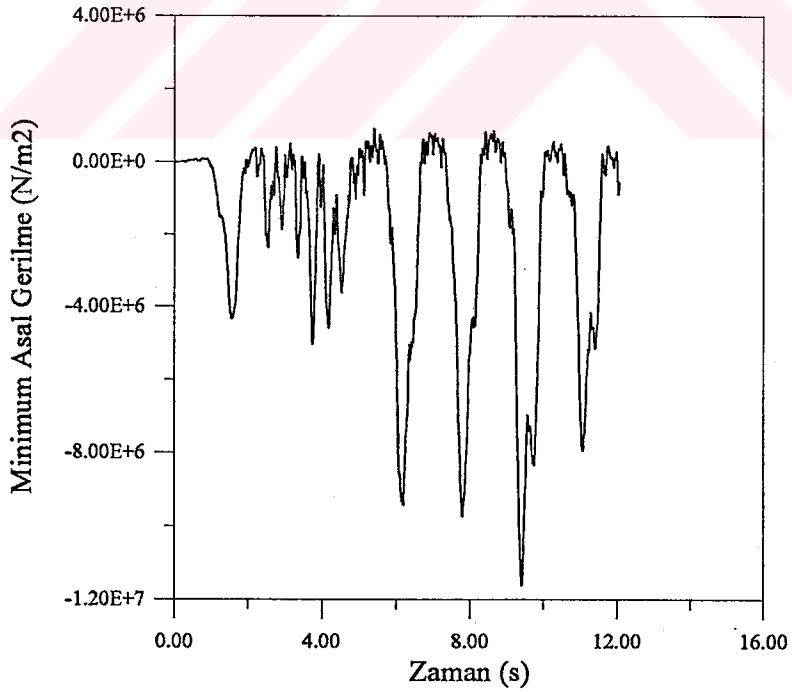
Şekil 77. İki boyutlu lineer olmayan dinamik analizde, temelin eğilebilir, barajın boş olması durumunda A gauss noktasında meydana gelen maksimum asal gerilmelerin zamanla değişimi



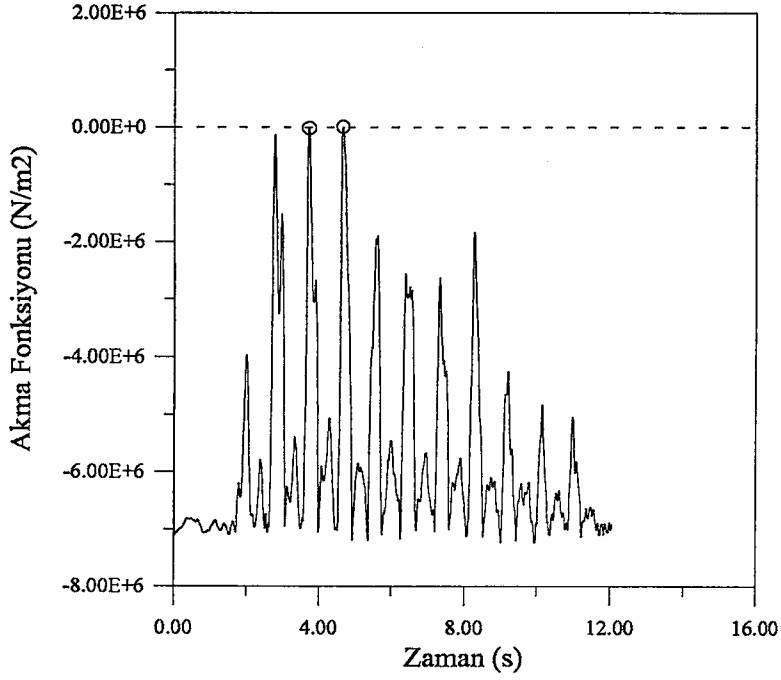
Şekil 78. İki boyutlu lineer olmayan dinamik analizde, temelin eğilebilir, barajın dolu olması durumunda A gauss noktasında meydana gelen maksimum asal gerilmelerin zamanla değişimi



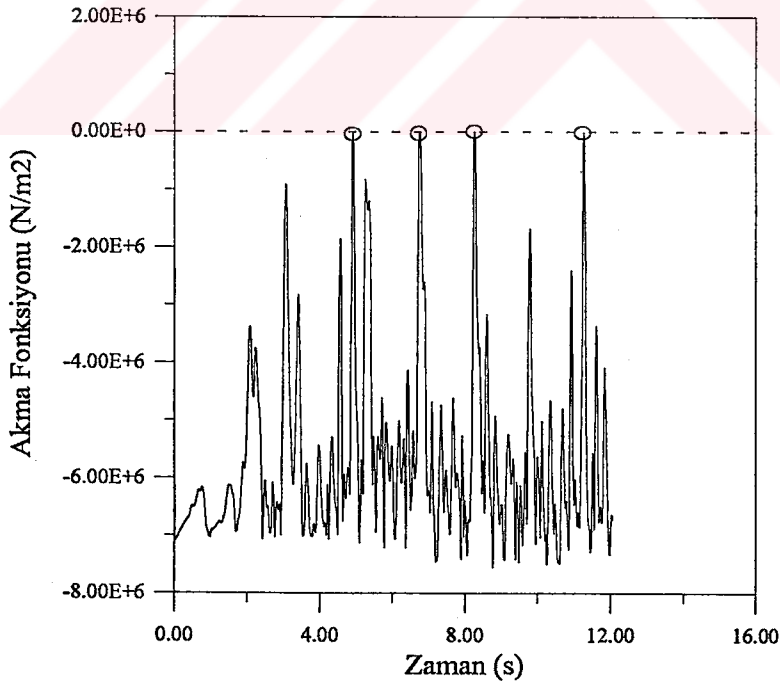
Şekil 79. İki boyutlu lineer olmayan dinamik analizde, temelin eğilebilir, barajın boş olması durumunda A gauss noktasında meydana gelen minimum asal gerilmelerin zamanla değişimi



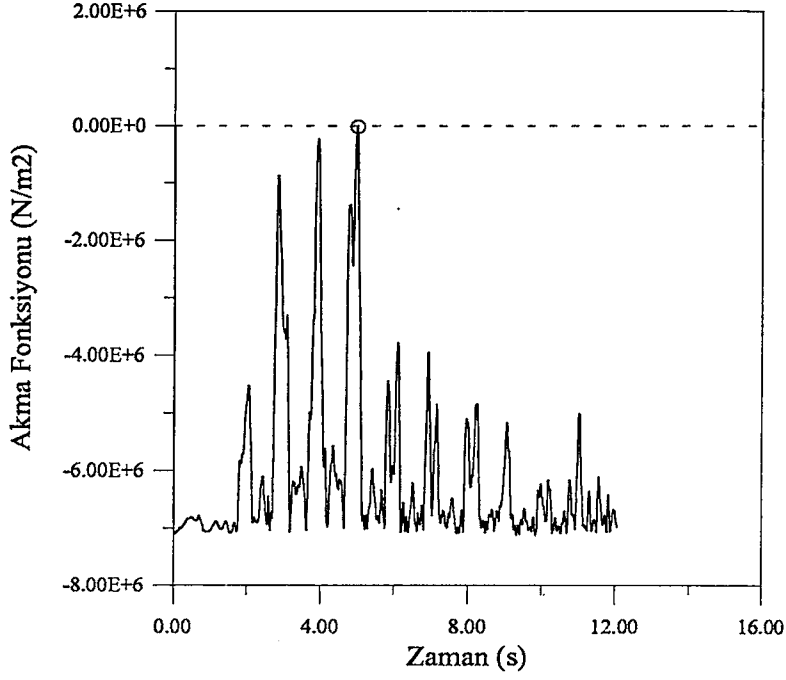
Şekil 80. İki boyutlu lineer olmayan dinamik analizde, temelin eğilebilir, barajın dolu olması durumunda A gauss noktasında meydana gelen minimum asal gerilmelerin zamanla değişimi



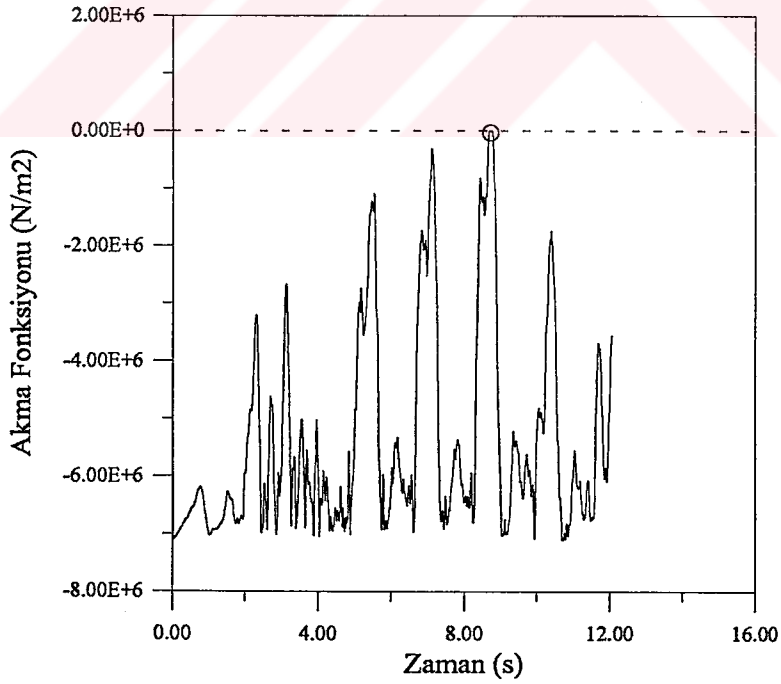
Şekil 81. İki boyutlu lineer olmayan dinamik analizde, temelin rijit, barajın boş olması durumunda akma fonksiyonunun A gauss noktasında aldığı değerlerin zamanla değişimi



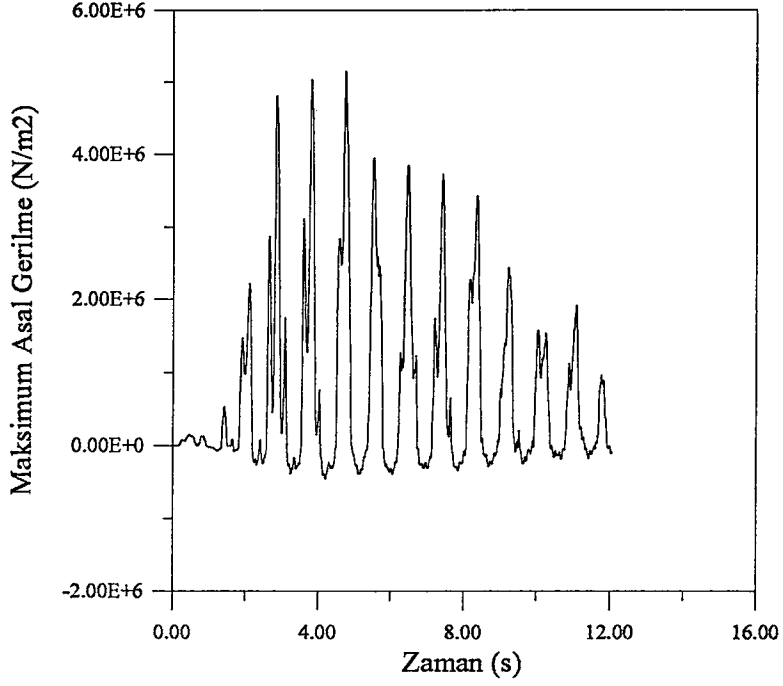
Şekil 82. İki boyutlu lineer olmayan dinamik analizde, temelin rijit, barajın dolu olması durumunda akma fonksiyonunun A gauss noktasında aldığı değerlerin zamanla değişimi



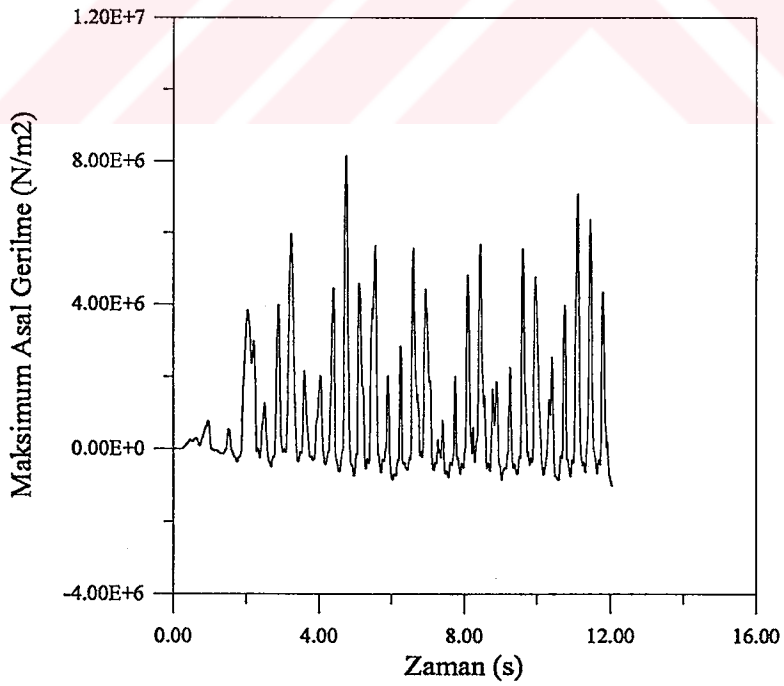
Şekil 83. İki boyutlu lineer olmayan dinamik analizde, temelin eğilebilir, barajın boş olması durumunda akma fonksiyonunun A gauss noktasında aldığı değerlerin zamanla değişimi



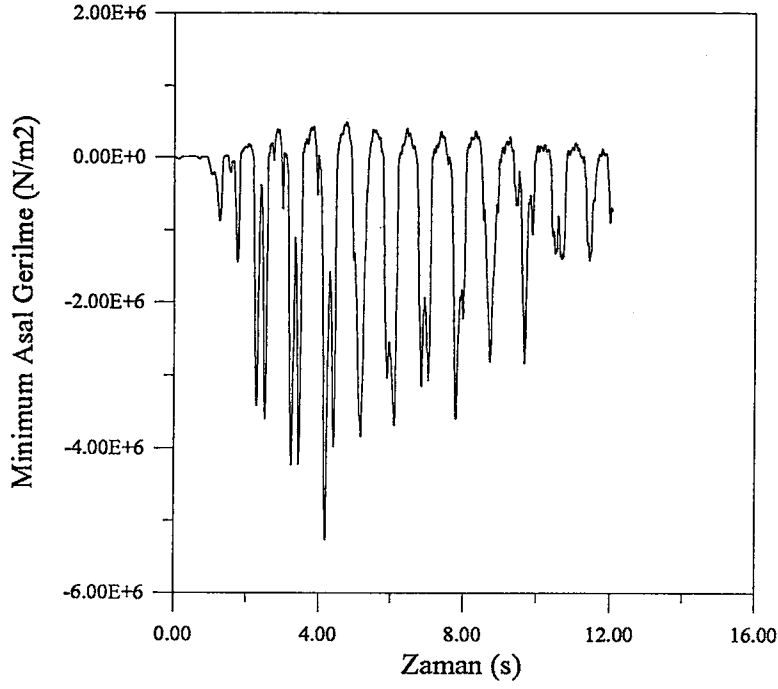
Şekil 84. İki boyutlu lineer olmayan dinamik analizde, temelin eğilebilir, barajın dolu olması durumunda akma fonksiyonunun A gauss noktasında aldığı değerlerin zamanla değişimi



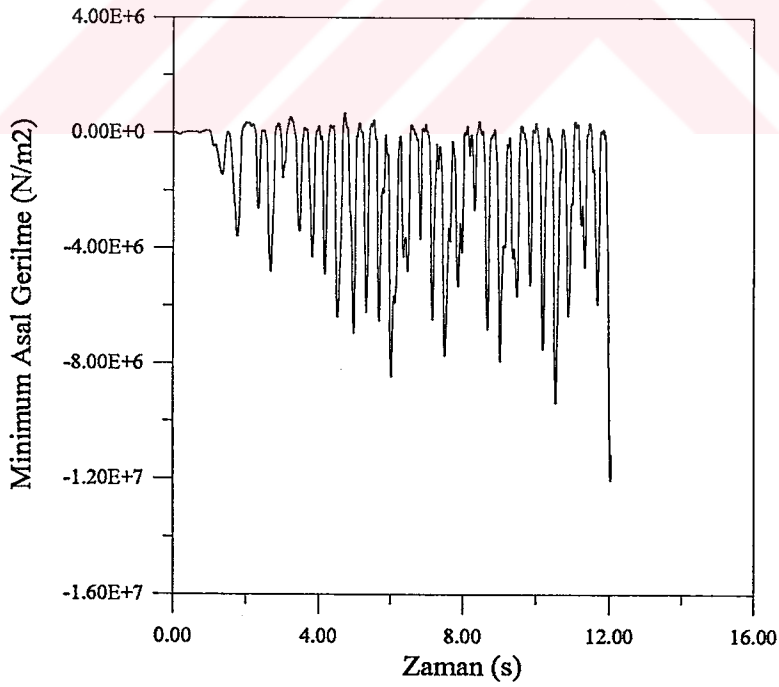
Şekil 85. İki boyutlu lineer olmayan dinamik analizde, temelin rijit, barajın boş olması durumunda B gauss noktasında meydana gelen maksimum asal gerilmelerin zamanla değişimi



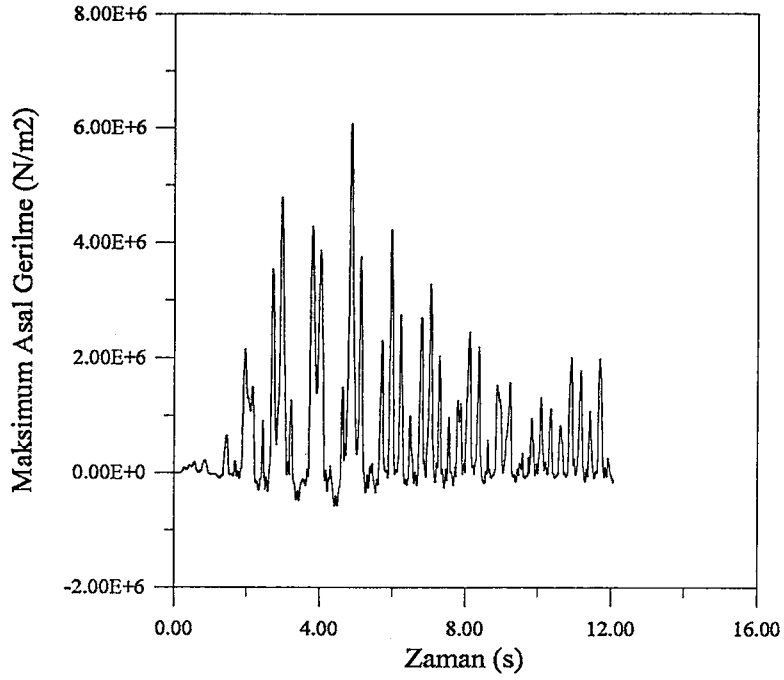
Şekil 86. İki boyutlu lineer olmayan dinamik analizde, temelin rijit, barajın dolu olması durumunda B gauss noktasında meydana gelen maksimum asal gerilmelerin zamanla değişimi



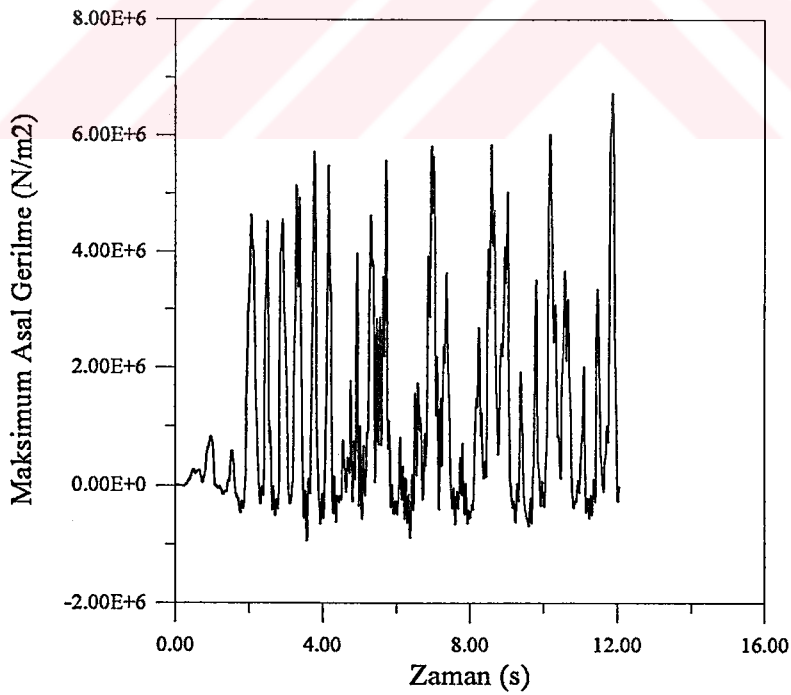
Şekil 87. İki boyutlu lineer olmayan dinamik analizde, temelin rijit, barajın boş olması durumunda B gauss noktasında meydana gelen minimum asal gerilmelerin zamanla değişimi



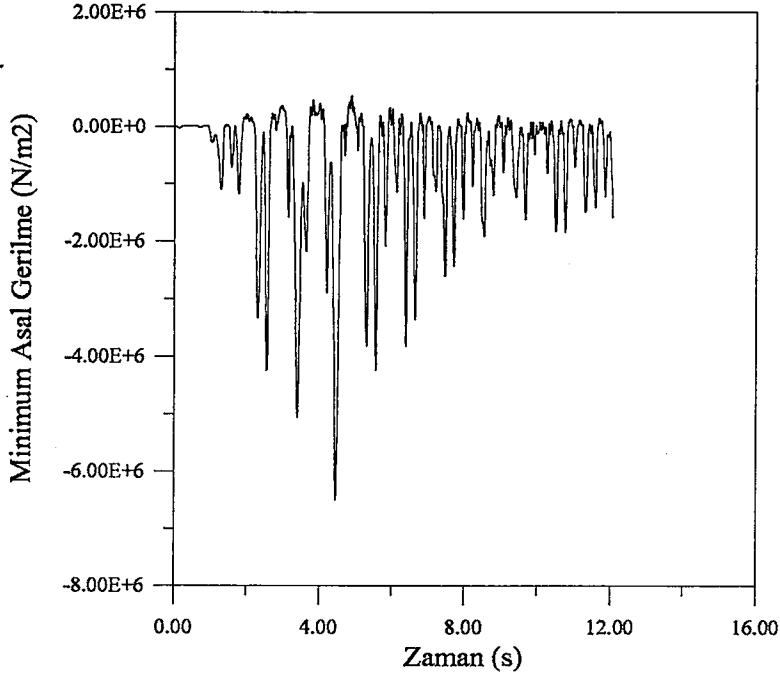
Şekil 88. İki boyutlu lineer olmayan dinamik analizde, temelin rijit, barajın dolu olması durumunda B gauss noktasında meydana gelen minimum asal gerilmelerin zamanla değişimi



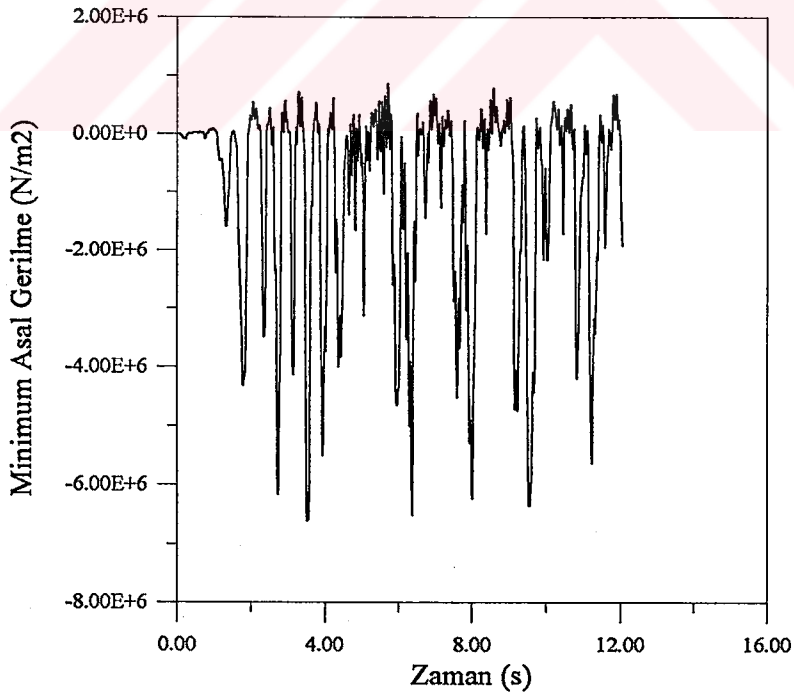
Şekil 89. İki boyutlu lineer olmayan dinamik analizde, temelin eğilebilir, barajın boş olması durumunda B gauss noktasında meydana gelen maksimum asal gerilmelerin zamanla değişimi



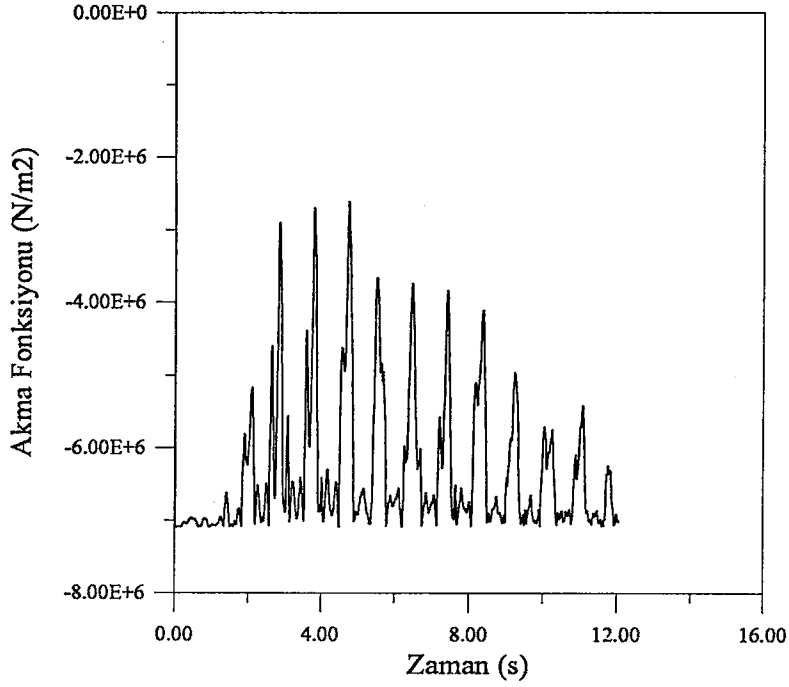
Şekil 90. İki boyutlu lineer olmayan dinamik analizde, temelin eğilebilir, barajın dolu olması durumunda B gauss noktasında meydana gelen maksimum asal gerilmelerin zamanla değişimi



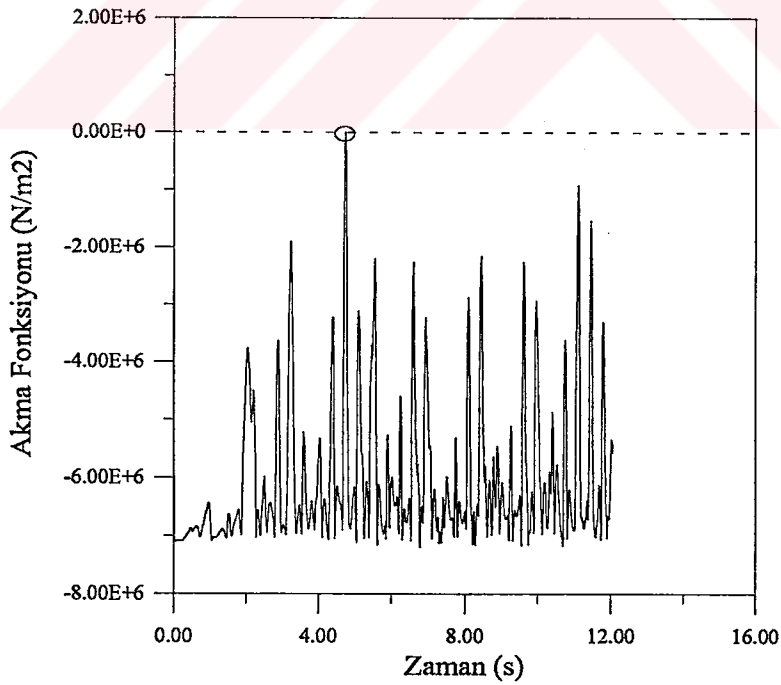
Şekil 91. İki boyutlu lineer olmayan dinamik analizde, temelin eğilebilir, barajın boş olması durumunda B gauss noktasında meydana gelen minimum asal gerilmelerin zamanla değişimi



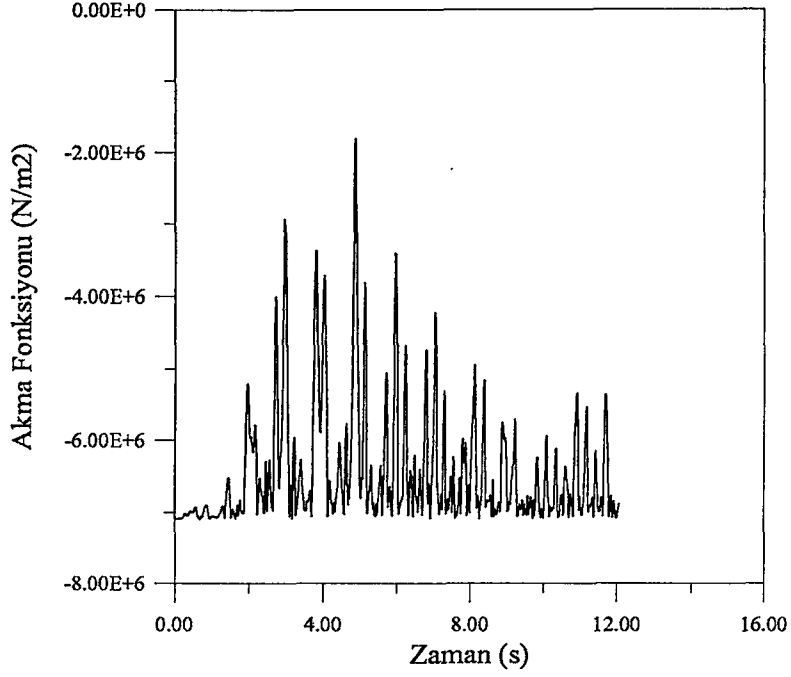
Şekil 92. İki boyutlu lineer olmayan dinamik analizde, temelin eğilebilir, barajın dolu olması durumunda B gauss noktasında meydana gelen minimum asal gerilmelerin zamanla değişimi



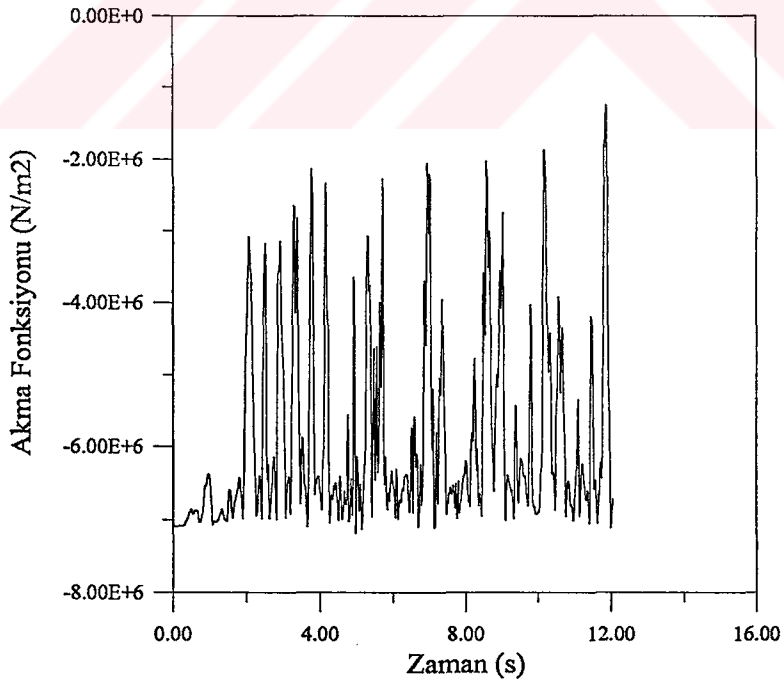
Şekil 93. İki boyutlu lineer olmayan dinamik analizde, temelin rijit, barajın boş olması durumunda akma fonksiyonunun B gauss noktasında aldığı değerlerin zamanla değişimi



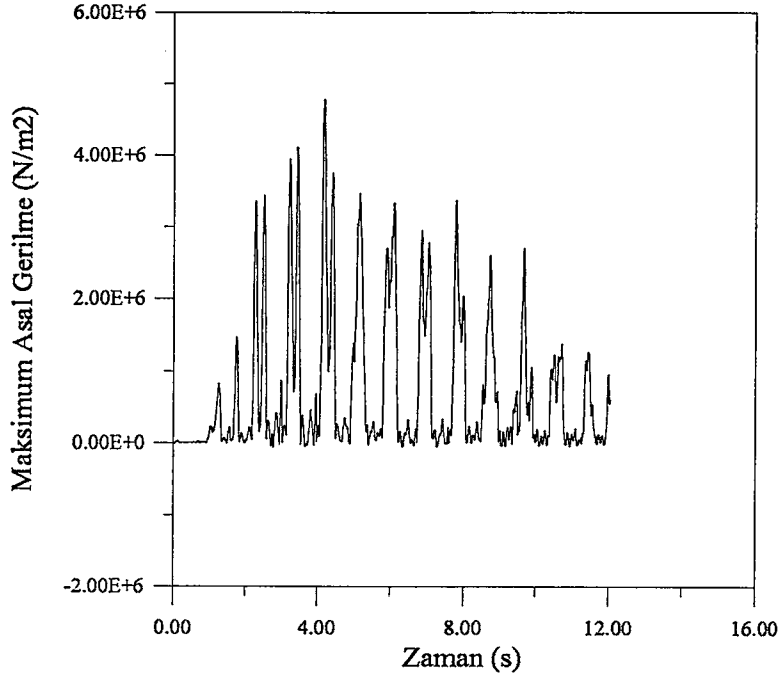
Şekil 94. İki boyutlu lineer olmayan dinamik analizde, temelin rijit, barajın dolu olması durumunda akma fonksiyonunun B gauss noktasında aldığı değerlerin zamanla değişimi



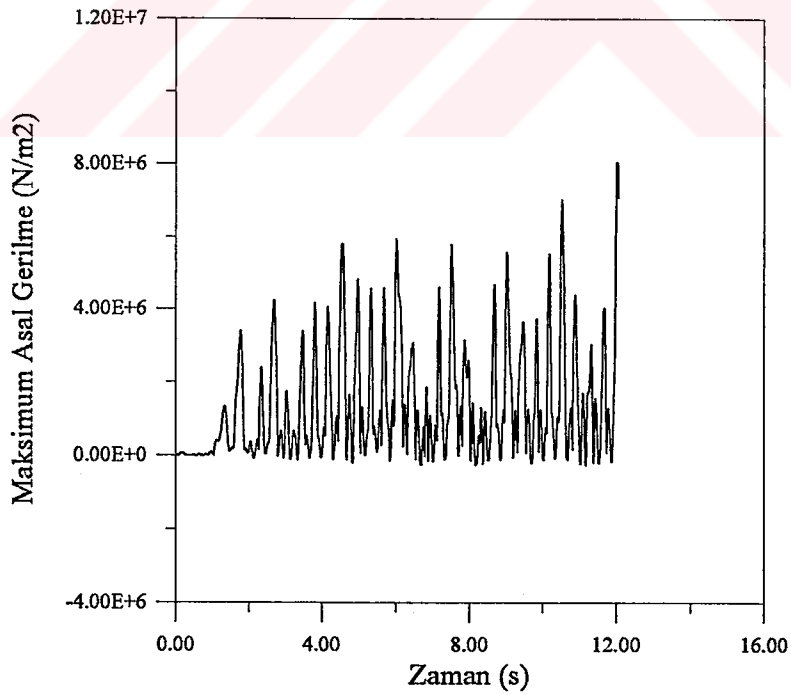
Şekil 95. İki boyutlu lineer olmayan dinamik analizde, temelin eğilebilir, barajın boş olması durumunda akma fonksiyonun B gauss noktasında aldığı değerlerin zamanla değişimi



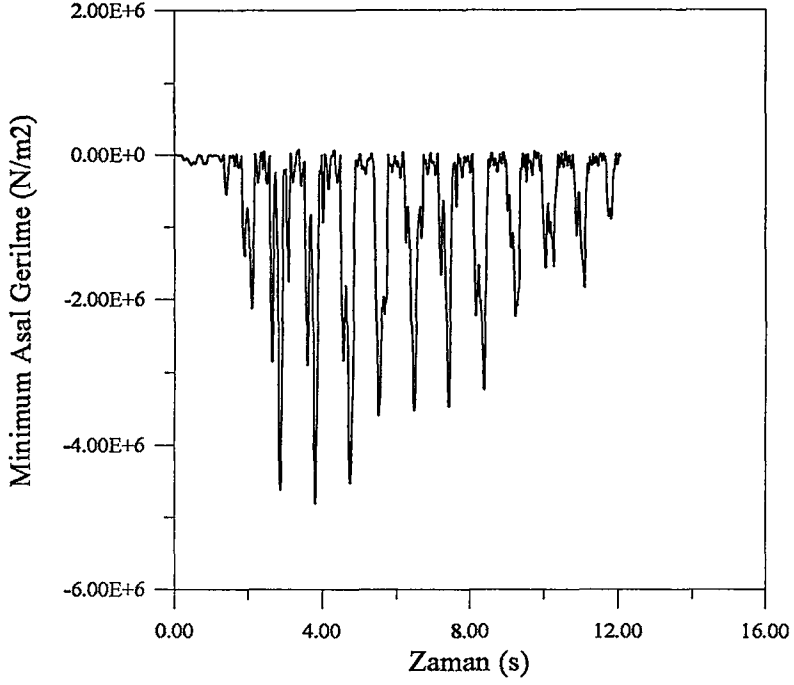
Şekil 96. İki boyutlu lineer olmayan dinamik analizde, temelin eğilebilir, barajın dolu olması durumunda akma fonksiyonun B gauss noktasında aldığı değerlerin zamanla değişimi



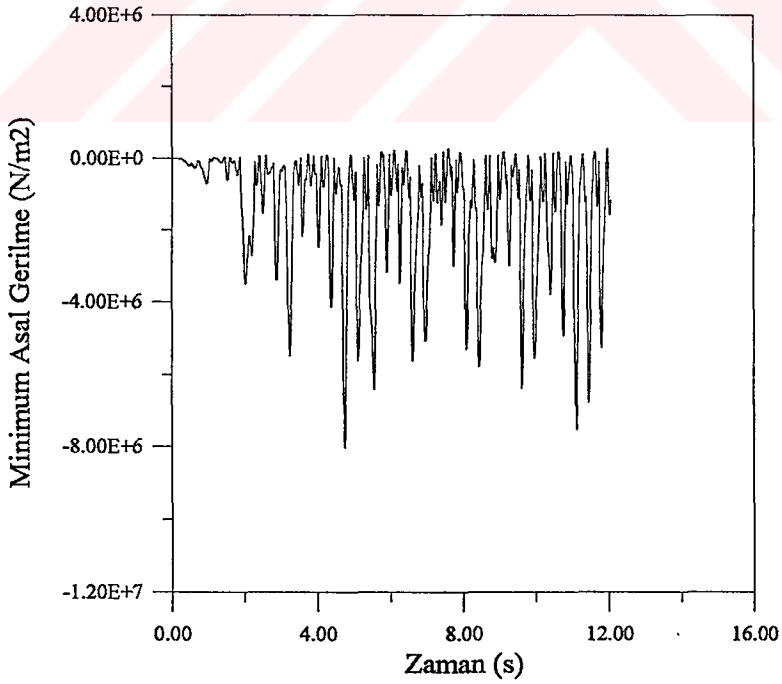
Şekil 97. İki boyutlu lineer olmayan dinamik analizde, temelin rijit, barajın boş olması durumunda C gauss noktasında meydana gelen maksimum asal gerilmelerin zamanla değişimi



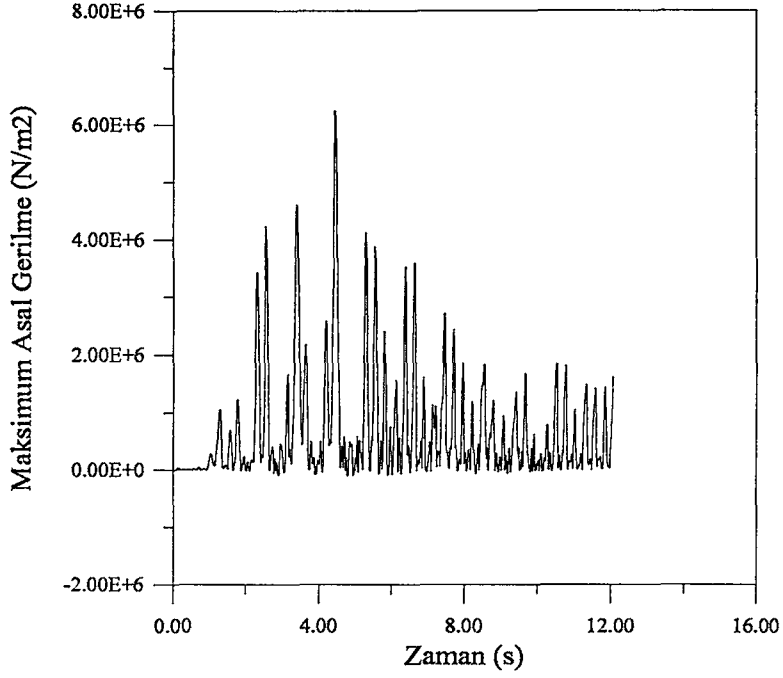
Şekil 98. İki boyutlu lineer olmayan dinamik analizde, temelin rijit, barajın dolu olması durumunda C gauss noktasında meydana gelen maksimum asal gerilmelerin zamanla değişimi



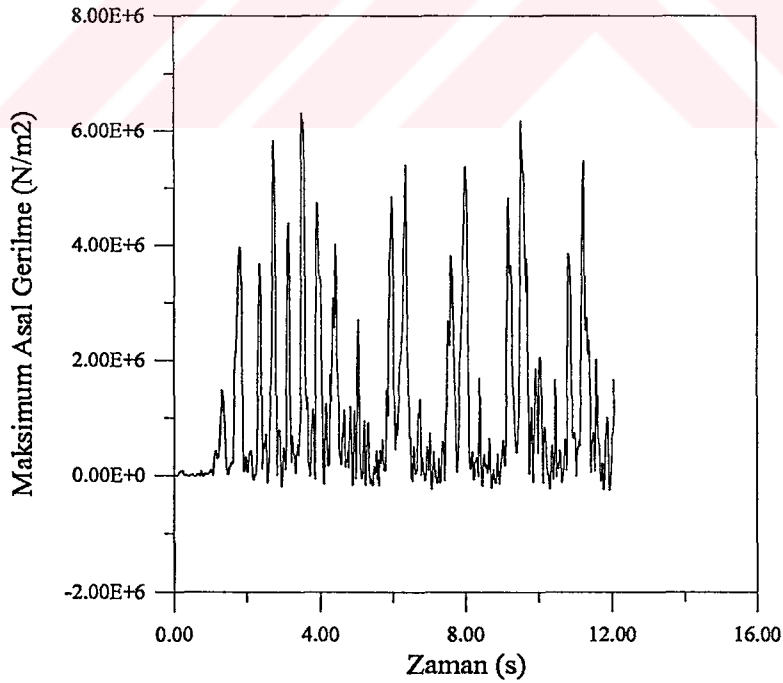
Şekil 99. İki boyutlu lineer olmayan dinamik analizde, temelin rijit, barajın boş olması durumunda C gauss noktasında meydana gelen minimum asal gerilmelerin zamanla değişimi



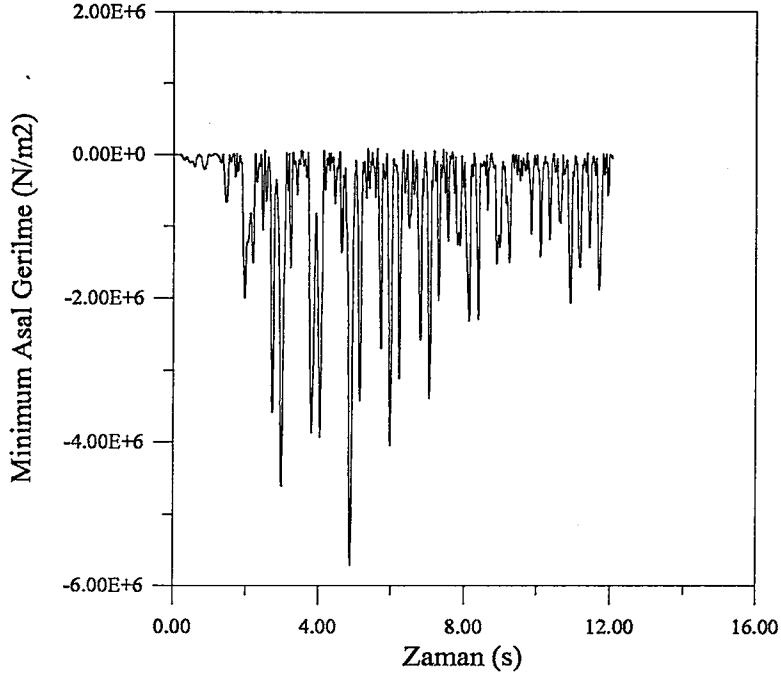
Şekil 100. İki boyutlu lineer olmayan dinamik analizde, temelin rijit, barajın dolu olması durumunda C gauss noktasında meydana gelen minimum asal gerilmelerin zamanla değişimi



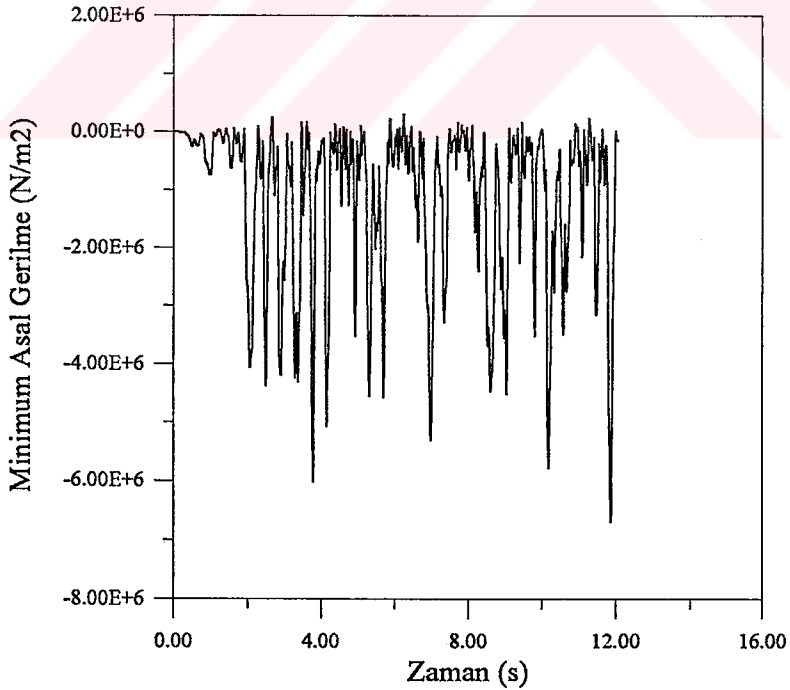
Şekil 101. İki boyutlu lineer olmayan dinamik analizde, temelin eğilebilir, barajın boş olması durumunda C gauss noktasında meydana gelen maksimum asal gerilmelerin zamanla değişimi



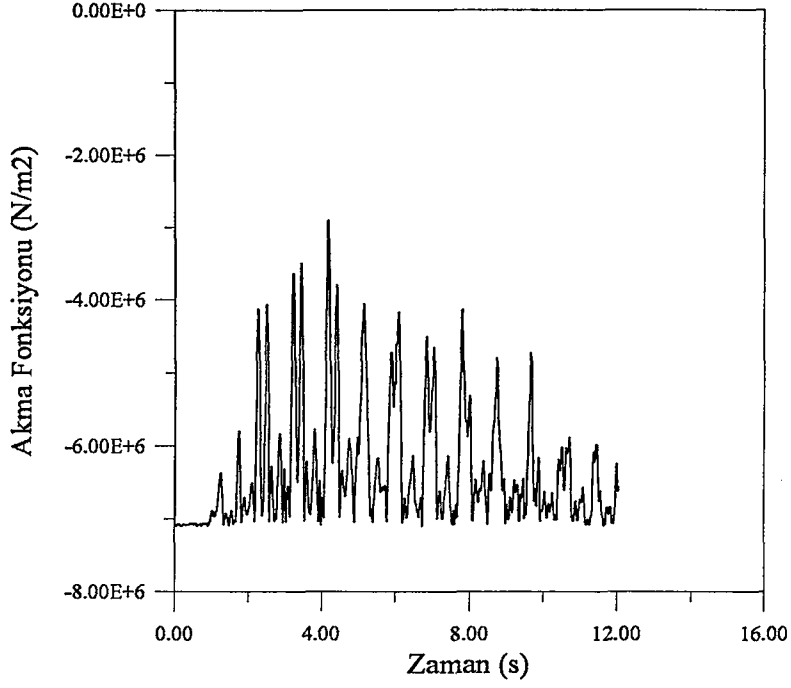
Şekil 102. İki boyutlu lineer olmayan dinamik analizde, temelin eğilebilir, barajın dolu olması durumunda C gauss noktasında meydana gelen maksimum asal gerilmelerin zamanla değişimi



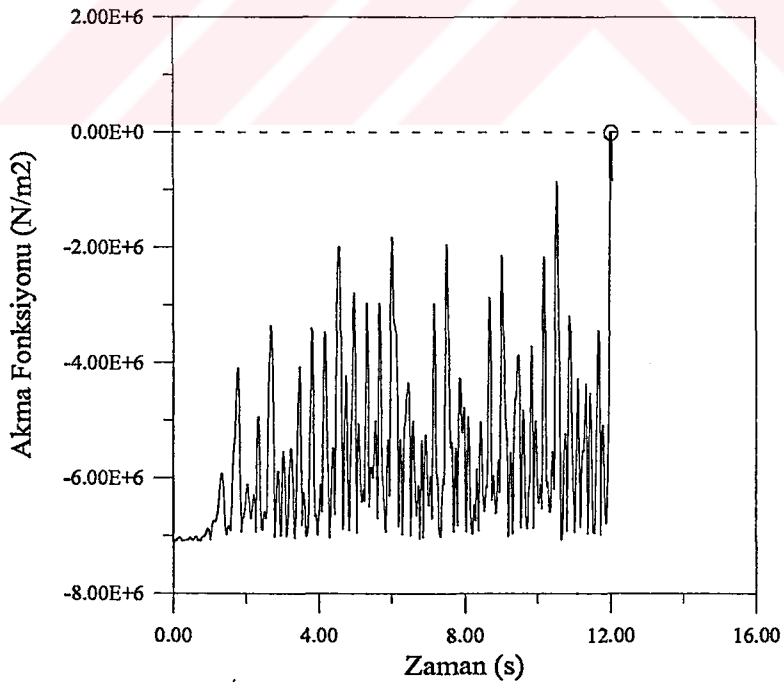
Şekil 103.İki boyutlu lineer olmayan dinamik analizde, temelin eğilebilir, barajın boş olması durumunda C gauss noktasında meydana gelen minimum asal gerilmelerin zamanla değişimi



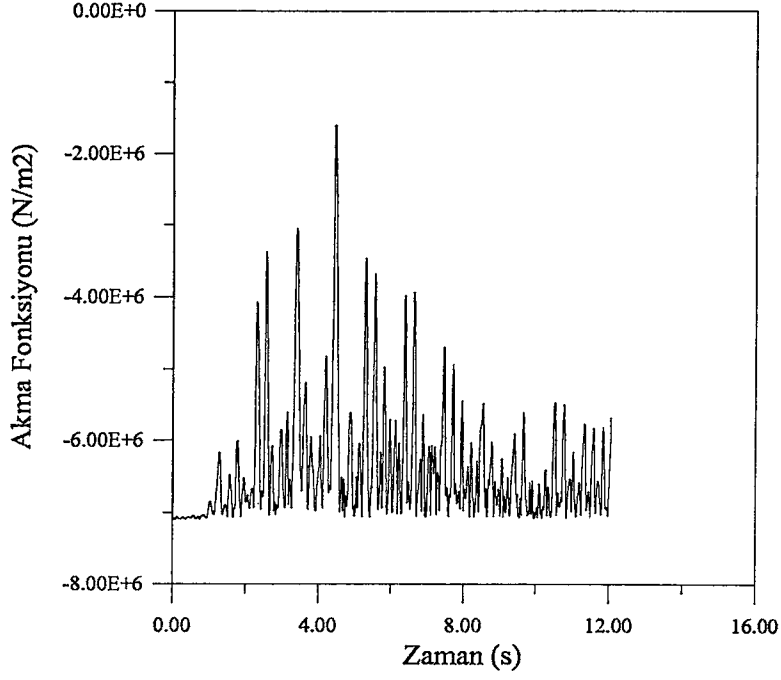
Şekil 104.İki boyutlu lineer olmayan dinamik analizde, temelin eğilebilir, barajın dolu olması durumunda C gauss noktasında meydana gelen minimum asal gerilmelerin zamanla değişimi



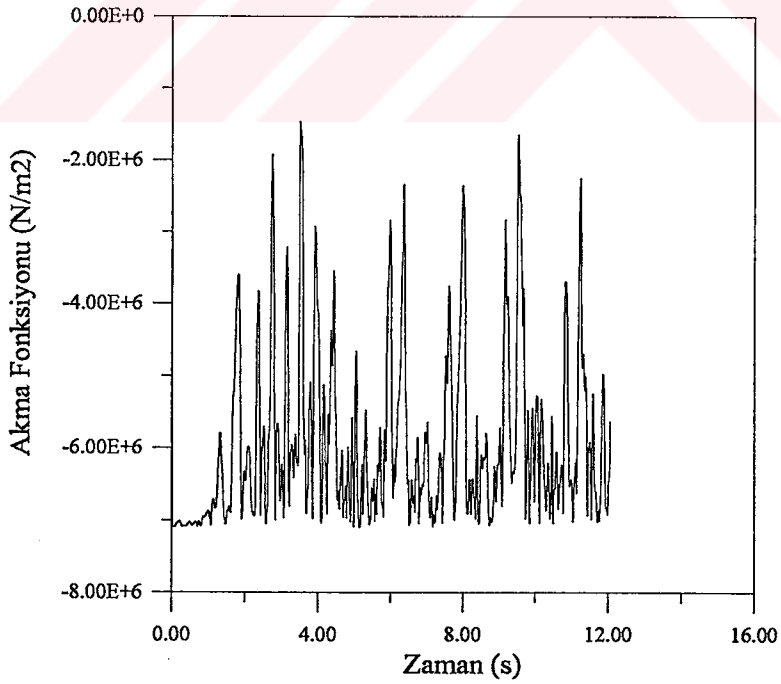
Şekil 105.İki boyutlu lineer olmayan dinamik analizde, temelin rijit, barajın boş olması durumunda akma fonksiyonun C gauss noktasında aldığı değerlerin zamanla değişimi



Şekil 106.İki boyutlu lineer olmayan dinamik analizde, temelin rijit, barajın dolu olması durumunda akma fonksiyonun C gauss noktasında aldığı değerlerin zamanla değişimi



Şekil 107. İki boyutlu lineer olmayan dinamik analizde, temelin eğilebilir, barajın boş olması durumunda akma fonksiyonunun C gauss noktasında aldığı değerlerin zamanla değişimi



Şekil 108. İki boyutlu lineer olmayan dinamik analizde, temelin eğilebilir, barajın dolu olması durumunda akma fonksiyonunun C gauss noktasında aldığı değerlerin zamanla değişimi

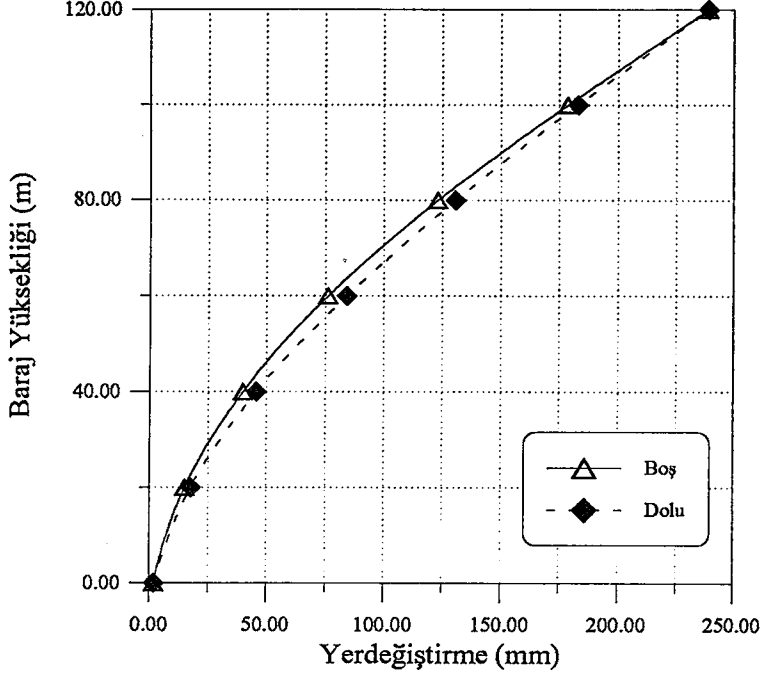
3.1.2.3. İki Boyutlu Lineer ve Lineer Olmayan Dinamik Analiz Sonuçlarının Çeşitli Durumlar İçin Karşılaştırılması

3.1.2.3.1. Yerdeğiştirmelerin Karşılaştırılması

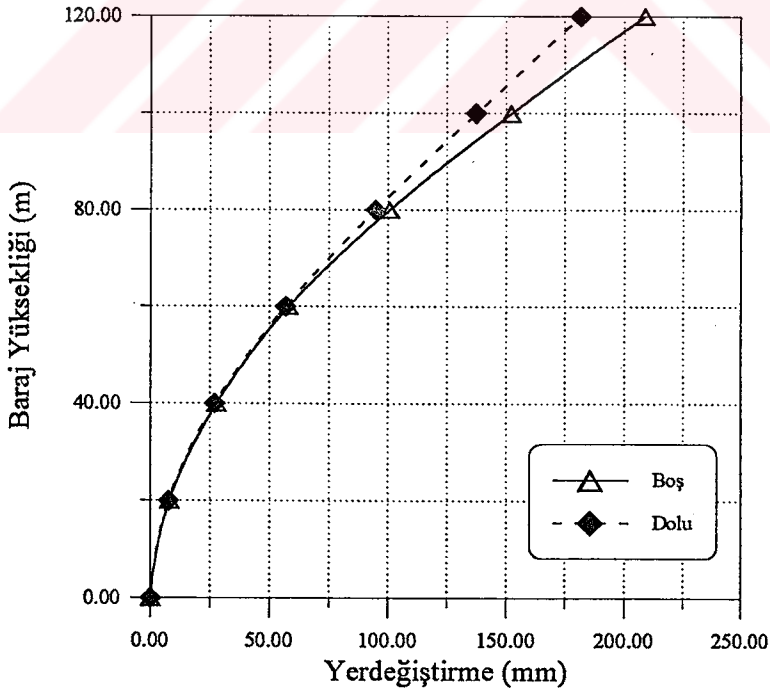
Şekil 109-112’de, lineer ve lineer olmayan dinamik analizde menba yüzeyinde meydana gelen yerdeğiştirmelerin mutlak değerce maksimumlarının, baraj yüksekliği boyunca değışimi gösterilmektedir. Her durum için, barajın dolu olması halinde yerdeğiştirmelerin büyük olması beklenirken küçük çıkmıştır. Bu durum kemerin üzerindeki su yükünün baraj davranışında daha etkili olduğunu göstermektedir. Değişik durumlar için baraj kretinde (Baraj temelinin rijit olması durumunda 19 nolu düğüm, eğilebilir olması durumunda ise 32 nolu düğüm noktası) elde edilen en büyük yerdeğiştirmeler, analizin lineer ve lineer olmamasına göre Tablo 11’de görülmektedir.

3.1.2.3.2. Asal Gerilmelerin Karşılaştırılması

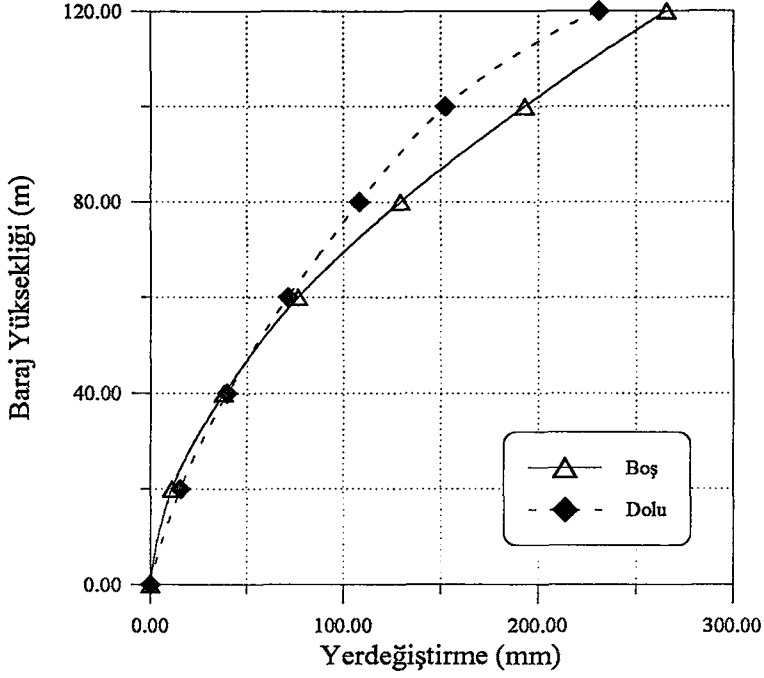
Yapılan analizler sonucunda, barajın dolu olması durumunda boş olmasına göre, temelin eğilebilir olması durumunda rijit olmasına göre daha büyük gerilme değeri elde edilmiştir. Ayrıca lineer olmayan analizlerde, lineer analizlere göre daha büyük gerilme değeri bulunmuştur. Elde edilen maksimum ve minimum asal gerilme değeri Tablo 12 ve 13’te karşılaştırılmaktadır.



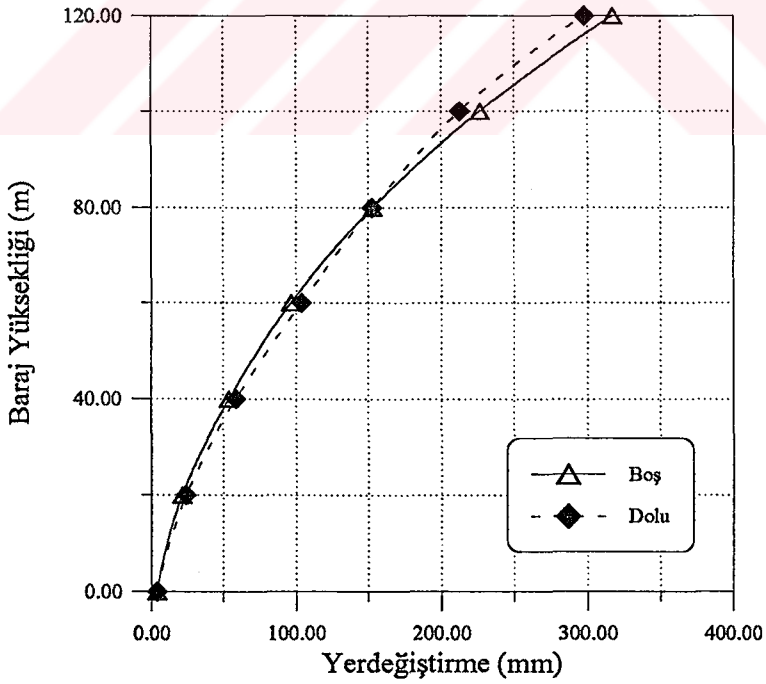
Şekil 109.İki boyutlu lineer dinamik analizde, barajın boş ve dolu, temelin rijit olması durumunda menba yüzeyindeki mutlak değerce maksimum yerdeğiştirmelerin yükseklik boyunca değişimi



Şekil 110.İki boyutlu lineer dinamik analizde, barajın boş ve dolu, temelin eğilebilir olması durumunda menba yüzeyindeki mutlak değerce maksimum yerdeğiştirmelerin yükseklik boyunca değişimi



Şekil 111. İki boyutlu lineer olmayan dinamik analizde, barajın boş ve dolu, temelin rijit olması durumunda menba yüzeyindeki mutlak değerce maksimum yerdeğistirmelerin yükseklik boyunca değışimi



Şekil 112. İki boyutlu lineer olmayan dinamik analizde, barajın boş ve dolu, temelin eğilebilir olması durumunda menba yüzeyindeki mutlak değerce maksimum yerdeğistirmelerin yükseklik boyunca değışimi

Tablo 11. İki boyutlu lineer ve lineer olmayan dinamik analizde, çeşitli durumlar için kret noktasında meydana gelen maksimum yatay yerdeğiştirmeler

Kret Noktası Yatay Yerdeğiştirmesi (mm)							
Lineer Analiz				Lineer Olmayan Analiz			
Rijit Temel		Eğilebilir Temel		Rijit Temel		Eğilebilir Temel	
Baraj Boş	Baraj Dolu	Baraj Boş	Baraj Dolu	Baraj Boş	Baraj Dolu	Baraj Boş	Baraj Dolu
209	182	239	239	266	231	317	298

Tablo 12. İki boyutlu lineer ve lineer olmayan dinamik analizde çeşitli durumlar için maksimum asal gerilmelerin karşılaştırılması

Gauss Noktası	Maksimum Asal Gerilmeler (kN/m ²)							
	Lineer Analiz				Lineer Olmayan Analiz			
	Temel Rijit		Temel Eğilebilir		Temel Rijit		Temel Eğilebilir	
	Baraj Boş	Baraj Dolu	Baraj Boş	Baraj Dolu	Baraj Boş	Baraj Dolu	Baraj Boş	Baraj Dolu
A	6889	5897	5539	7524	8155	8142	8156	8168
B	3704	3563	3001	3758	5155	8165	6073	6728
C	2635	3108	3316	3609	4783	8051	6250	6319

Tablo 13. İki boyutlu lineer ve lineer olmayan dinamik analizde çeşitli durumlar için minimum asal gerilmelerin karşılaştırılması

Gauss Noktası	Minimum Asal Gerilmeler (kN/m ²)							
	Lineer Analiz				Lineer Olmayan Analiz			
	Temel Rijit		Temel Eğilebilir		Temel Rijit		Temel Eğilebilir	
	Baraj Boş	Baraj Dolu	Baraj Boş	Baraj Dolu	Baraj Boş	Baraj Dolu	Baraj Boş	Baraj Dolu
A	7295	7052	6735	7660	11110	12684	9210	11616
B	2810	3530	3713	4051	5275	12061	6503	6615
C	3292	3092	2690	3308	4806	8012	5716	6687

3.2. Üç Boyutlu Lineer ve Lineer Olmayan Analiz Sonuçlarının Değerlendirilmesi

3.2.1. Statik Analiz

Burada, Şekil 19'da gösterilen sonlu eleman ağına sahip kemer barajın lineer ve lineer olmayan statik analizi yapılmıştır. Lineer olmayan statik analiz, sadece barajın dolu, temelin rijit olması halinde gerçekleştirilebilmiştir. Elde edilen sonuçlar, lineer statik analiz ile aynı olmaktadır. Bu durum bize barajın lineer davranıştan uzaklaşmadığını, barajın çok rijit kaldığını göstermektedir. Ayrıca Şekil 20'de görüldüğü gibi baraja zemin ilave edilip, temelin eğilebilir olması durumunda statik yükler altında barajın davranışı incelenmektedir. Ergatoudis ve diğ. [11]'nin elde ettikleri sonuçlar, burada bulunan sonuçlarla karşılaştırmak amacıyla aşağıda verilmektedir. Yine çeşitli durumlar için elde edilen yerdeğiştirme ve gerilme değerlerinin menba ve mansap yüzeyinde yükseklik boyunca değişimi aşağıda verilmektedir.

3.2.1.1. Yerdeğiştirmeler

Her bir düğüm noktasında elde edilen x, y, z doğrultularındaki yerdeğiştirmelerden en büyüğü menba-mansap (x) doğrultusundaki yerdeğiştirmeler olduğu ortaya çıkmaktadır. Barajın boş olduğu durumda, düşey doğrultudaki (z) yerdeğiştirmelerin, x doğrultusundaki yerdeğiştirmelerden büyük olduğu görülmüştür. Barajın dolu olması durumunda ise, hidrostatik basınç kuvveti barajın davranışında daha etkili olduğu için x doğrultusundaki yerdeğiştirmeler daha büyük olmaktadır. Çeşitli durumlar için, barajın menba ve mansap yüzeylerinde meydana gelen x yönündeki yerdeğiştirmelerin yükseklik boyunca değişimi Şekil 113-117'da verilmektedir.

3.2.1.2. Gerilmeler

Çözümü elde edilen her bir durum için, x, y, z yönlerindeki gerilmelerin menba ve mansap yüzeylerinde yükseklik boyunca değişimi incelenmektedir. Çeşitli durumlar için

elde edilen bu gerilmeler, düğüm noktası ortalama gerilmeleri olup Şekil 118-129'de verilmektedir. Ayrıca, temelin rijit, barajın dolu olması halinde Ergatoudis ve diğ. [11]'nin, y ve z doğrultularında elde ettikleri gerilmelerin yükseklik boyunca değişimi, Şekil 130 ve 131'de verilmektedir. Görüldüğü gibi, Ergatoudis ve diğ. [11]'nin buldukları sonuçlar ile, bu tez çalışmasındaki sonuçlar birbirine çok yakındır.

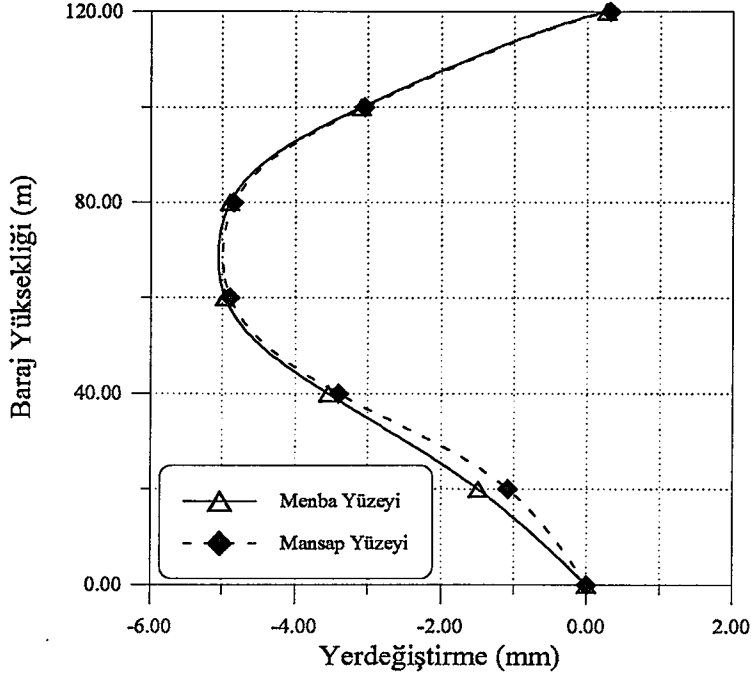
3.2.1.3. Üç Boyutlu Statik Analiz Sonuçlarının Çeşitli Durumlar İçin Karşılaştırılması

3.2.1.3.1. Yerdeğiştirmelerin Karşılaştırılması

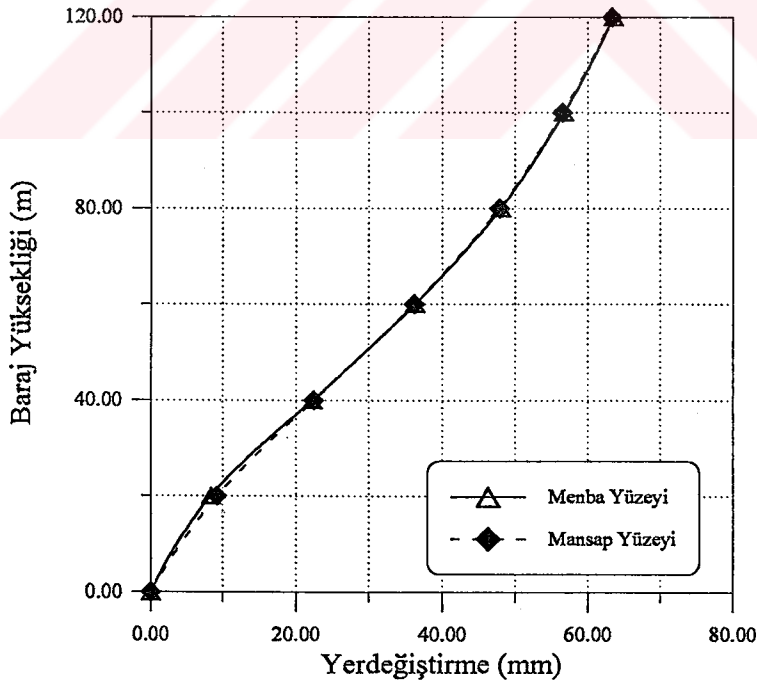
Her bir duruma ait, barajın kret noktasında menba-mansap ve düşey doğrultuda meydana gelen yerdeğiştirmeler Tablo 14 ve 15'te verilmektedir. Görüldüğü gibi, barajın boş olması durumunda, düşey doğrultudaki yerdeğiştirmeler, menba-mansap doğrultusundaki yerdeğiştirmelerden büyük olmaktadır. Barajın en elverişsiz durumu (baraj dolu, temel eğilebilir) için yine bu doğrultudaki yerdeğiştirmeler en büyüktür. Barajın dolu olması durumunda, her durum için menba-mansap doğrultusundaki yerdeğiştirmeler daha fazla olmaktadır.

3.2.1.3.2. Gerilmelerin Karşılaştırılması

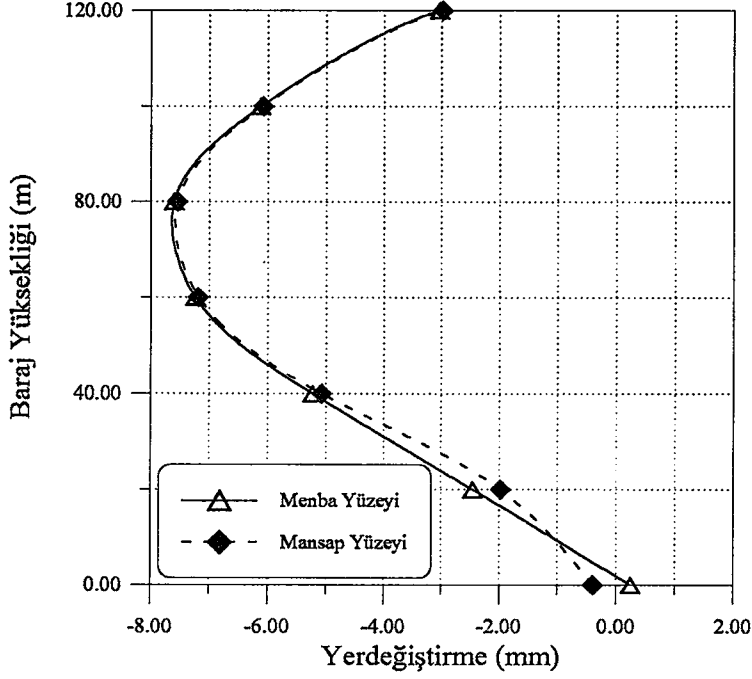
Çeşitli durumlar için, barajın menba yüzeyinde x,y,z doğrultularında meydana gelen en büyük çekme ve basınç gerilmeleri Tablo 16-18'de karşılaştırılmaktadır. X-doğrultusunda en büyük çekme gerilmesi baraj boş durumda iken orta kesimlerde, dolu iken temele yakın bölgelerde oluşmaktadır. Basınç gerilmeleri ise, baraj boşken krete yakın bölgelerde, dolu olduğu zaman gövdede meydana gelmektedir. Y-doğrultusundaki en büyük çekme ve basınç gerilmeleri barajın boş ve dolu olduğu her iki durumdada temele yakın bölgelerde oluşmaktadır. Z-doğrultusunda, baraj boş durum da iken çekme gerilmeleri çok az oluşurken veya hiç oluşmazken, dolu durumda temele yakın bölgelerde elde edilmiştir. Basınç gerilmeleri, baraj boşken temele yakın bölgelerde meydana gelirken, barajın dolu olması halinde gövdede oluşmaktadır.



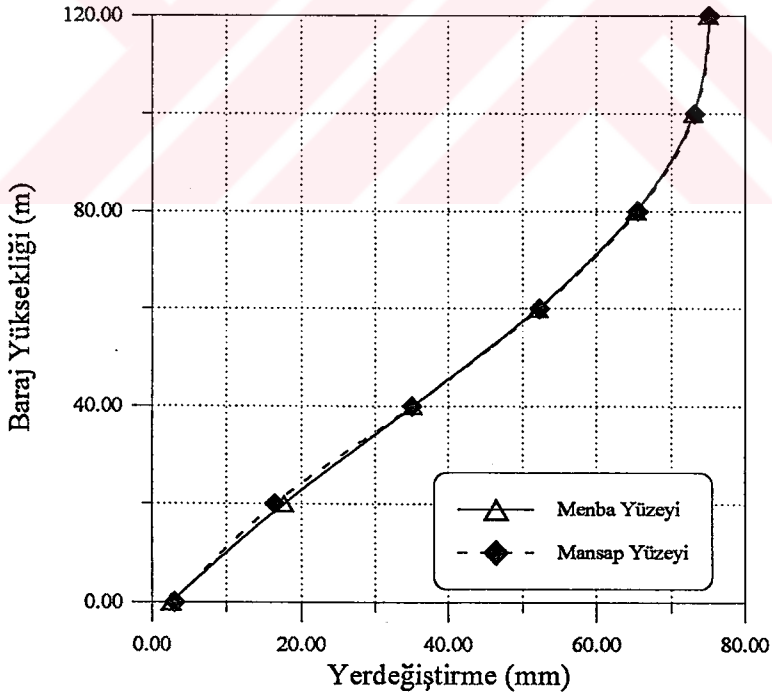
Şekil 113.Üç boyutlu lineer statik analizde, temelin rijit, barajın boş olması durumunda menba ve mansap yüzeyinin X-doğrultusundaki (menba-mansap doğrultusu) yerdeğıştirmelerinin yükseklik boyunca değişimi



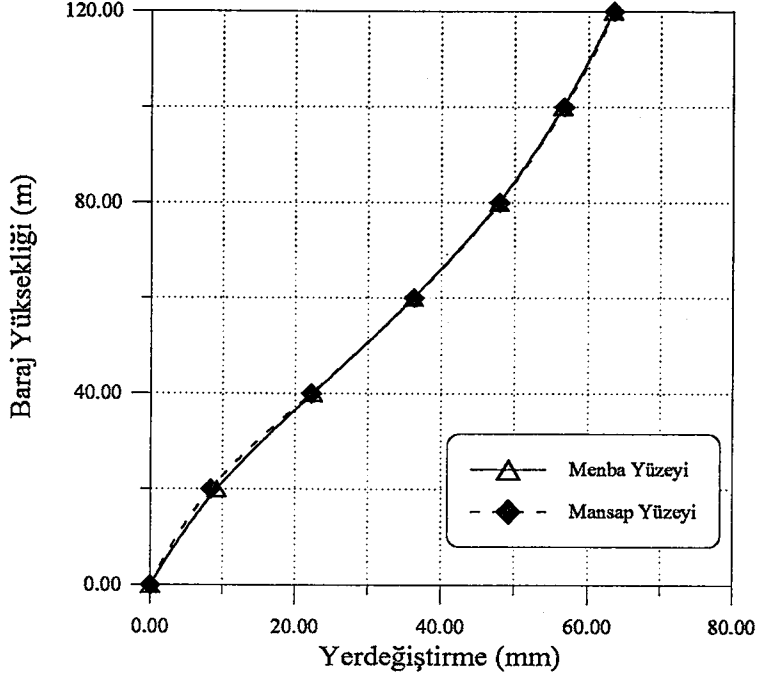
Şekil 114.Üç boyutlu lineer statik analizde, temelin rijit, barajın dolu olması durumunda menba ve mansap yüzeyinin X-doğrultusundaki (menba-mansap doğrultusu) yerdeğıştirmelerinin yükseklik boyunca değişimi



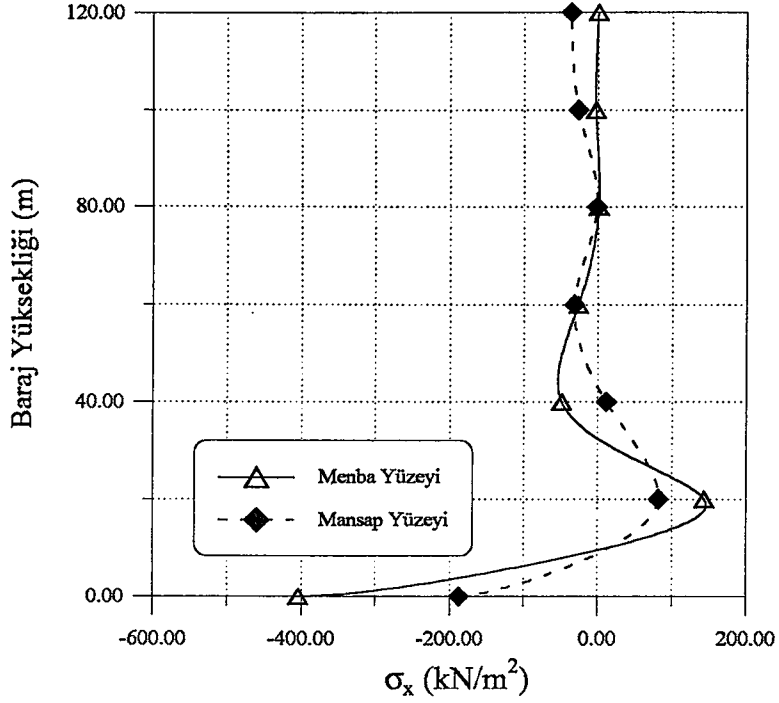
Şekil 115.Üç boyutlu lineer statik analizde, temelin eğilebilir, barajın boş olması durumunda menba ve mansap yüzeyinin X-doğrultusundaki (menba-mansap doğrultusu) yerdeğiştirmelerinin yükseklik boyunca değişimi



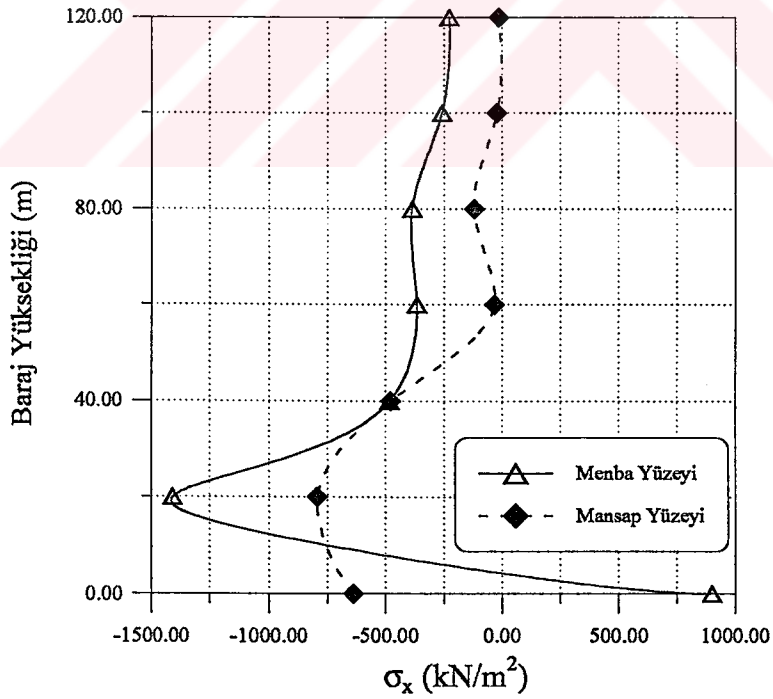
Şekil 116.Üç boyutlu lineer statik analizde, temelin eğilebilir, barajın dolu olması durumunda menba ve mansap yüzeyinin X-doğrultusundaki (menba-mansap doğrultusu) yerdeğiştirmelerinin yükseklik boyunca değişimi



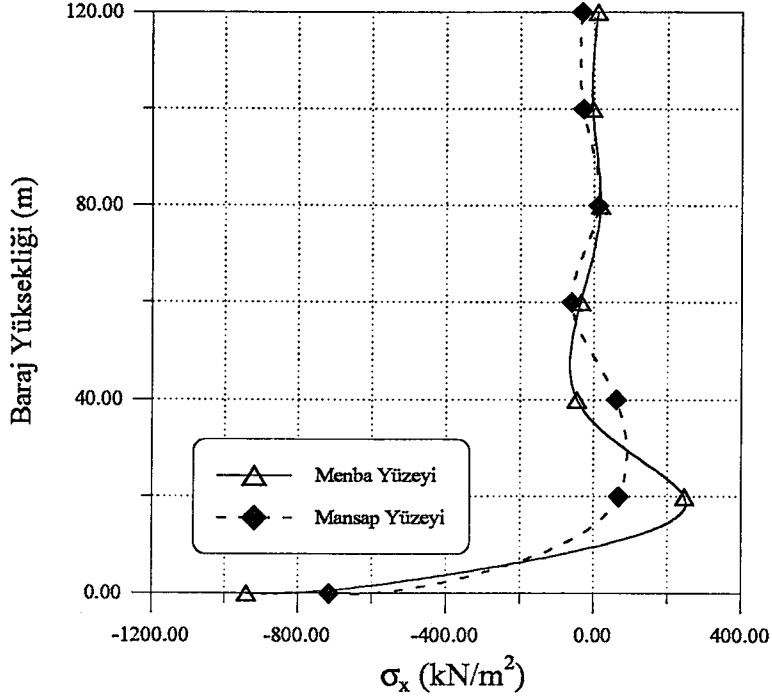
Şekil 117.Üç boyutlu lineer olmayan statik analizde, temelin rijit, barajın dolu olması durumunda menba ve mansap yüzeyinin X-doğrultusundaki (menba-mansap doğrultusu) yerdeğiştirmelerinin yükseklik boyunca değişimi



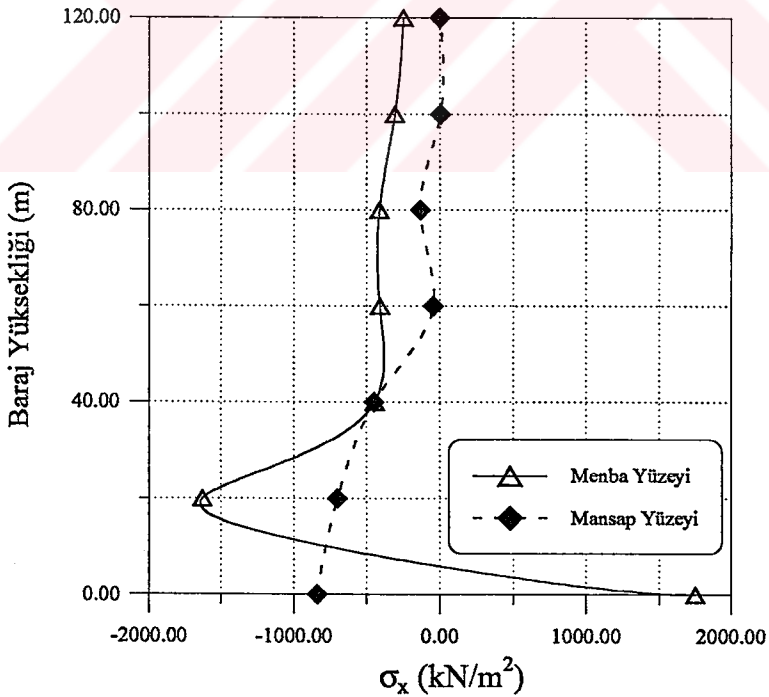
Şekil 118.Üç boyutlu lineer statik analizde, temelin rijit, barajın boş olması durumunda menba ve mansap yüzeyinde meydana gelen X-doğrultusundaki gerilmelerin yükseklik boyunca değişimi



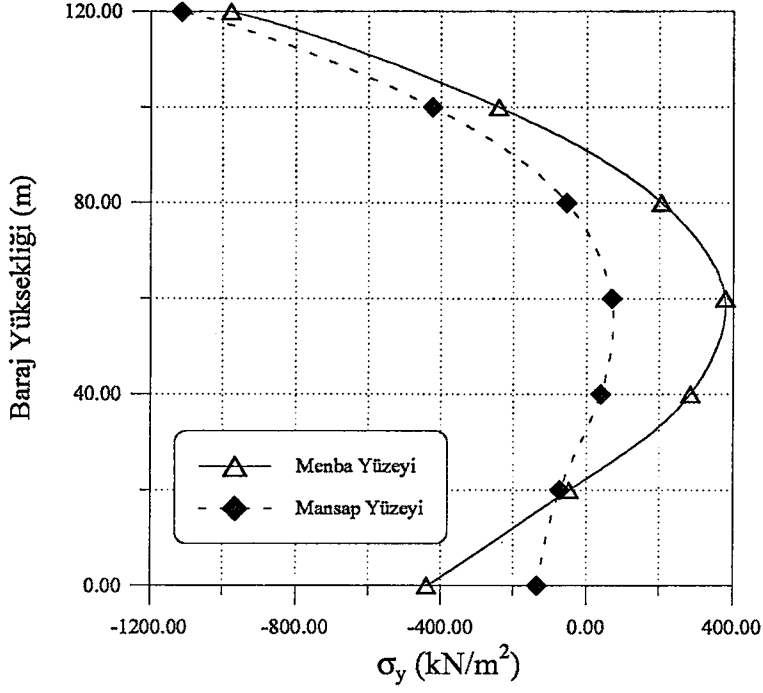
Şekil 119.Üç boyutlu lineer statik analizde, temelin rijit, barajın dolu olması durumunda menba ve mansap yüzeyinde meydana gelen X-doğrultusundaki gerilmelerin yükseklik boyunca değişimi



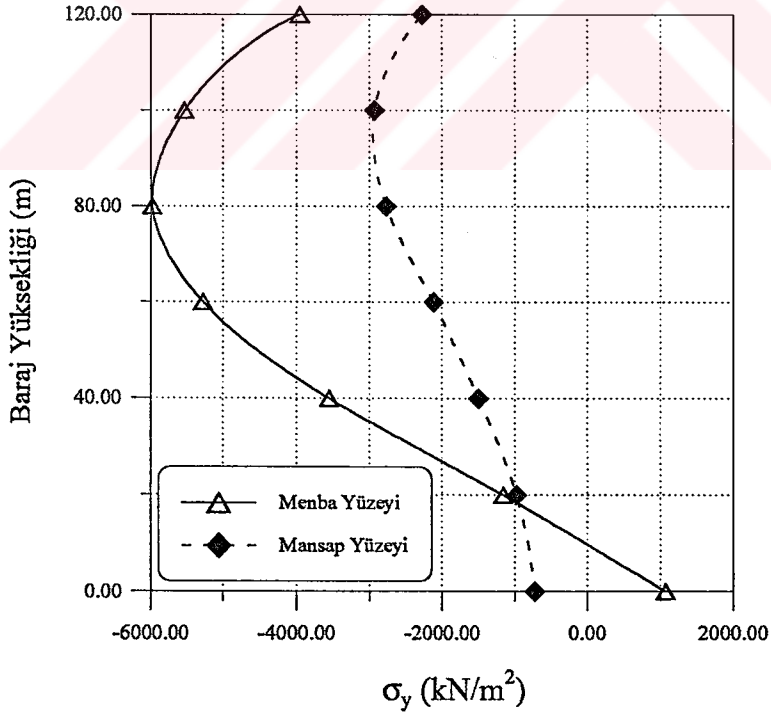
Şekil 120.Üç boyutlu lineer statik analizde, temelin eğilebilir, barajın boş olması durumunda menba ve mansap yüzeyinde meydana gelen X-doğrultusundaki gerilmelerin yükseklik boyunca değişimi



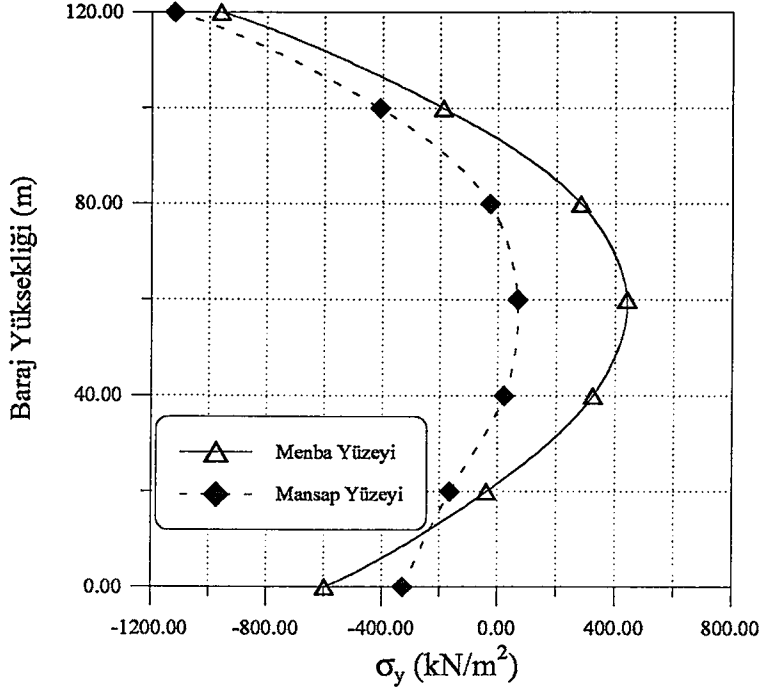
Şekil 121.Üç boyutlu lineer statik analizde, temelin eğilebilir, barajın dolu olması durumunda menba ve mansap yüzeyinde meydana gelen X-doğrultusundaki gerilmelerin yükseklik boyunca değişimi



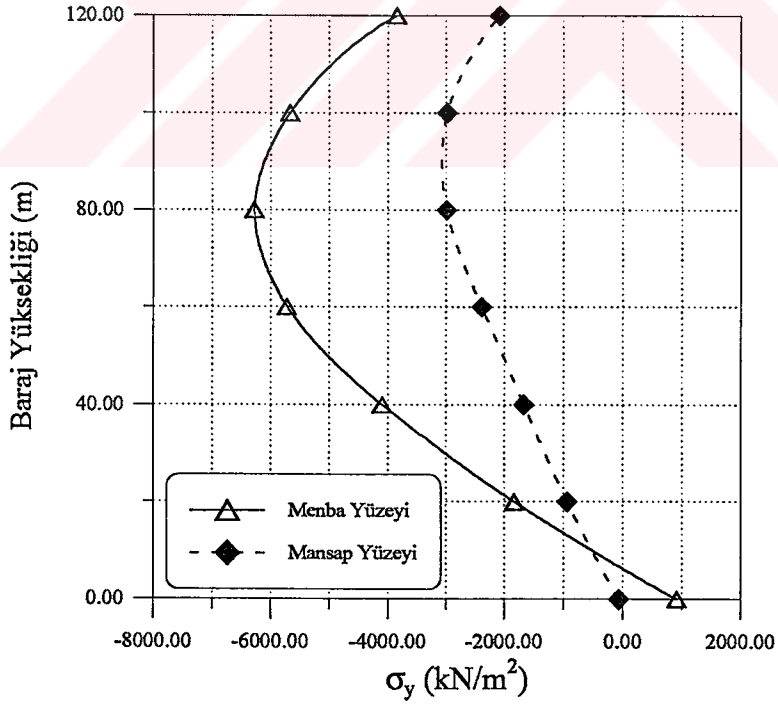
Şekil 122. Üç boyutlu lineer statik analizde, temelin rijit, barajın boş olması durumunda menba ve mansap yüzeyinde meydana gelen Y-doğrultusundaki gerilmelerin yükseklik boyunca değişimi



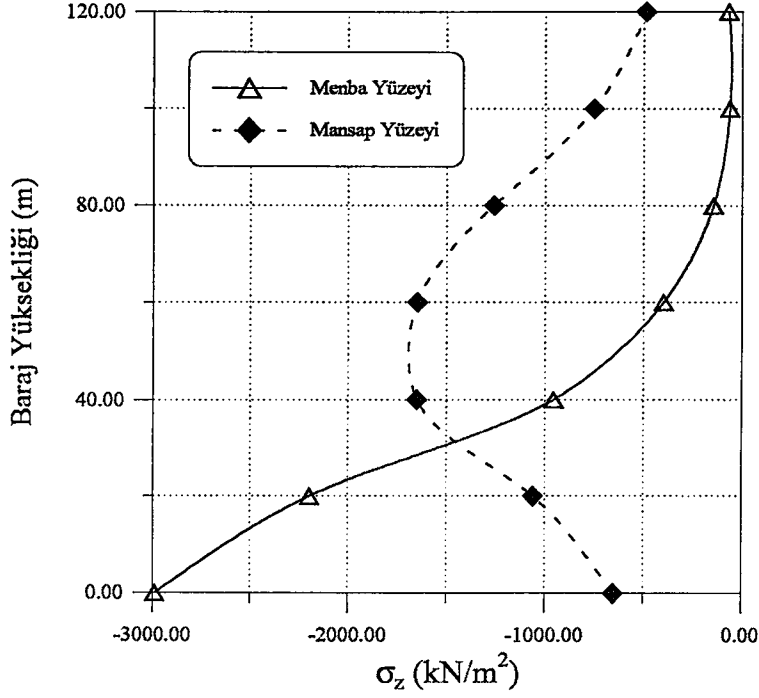
Şekil 123. Üç boyutlu lineer statik analizde, temelin rijit, barajın dolu olması durumunda menba ve mansap yüzeyinde meydana gelen Y-doğrultusundaki gerilmelerin yükseklik boyunca değişimi



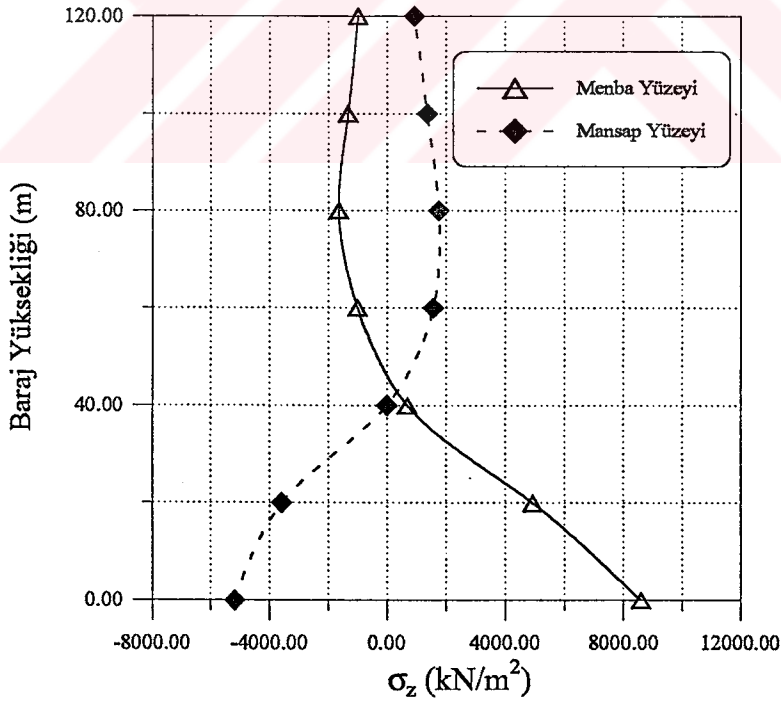
Şekil 124.Üç boyutlu lineer statik analizde, temelin eğilebilir, barajın boş olması durumunda menba ve mansap yüzeyinde meydana gelen Y-doğrultusundaki gerilmelerin yükseklik boyunca değişimi



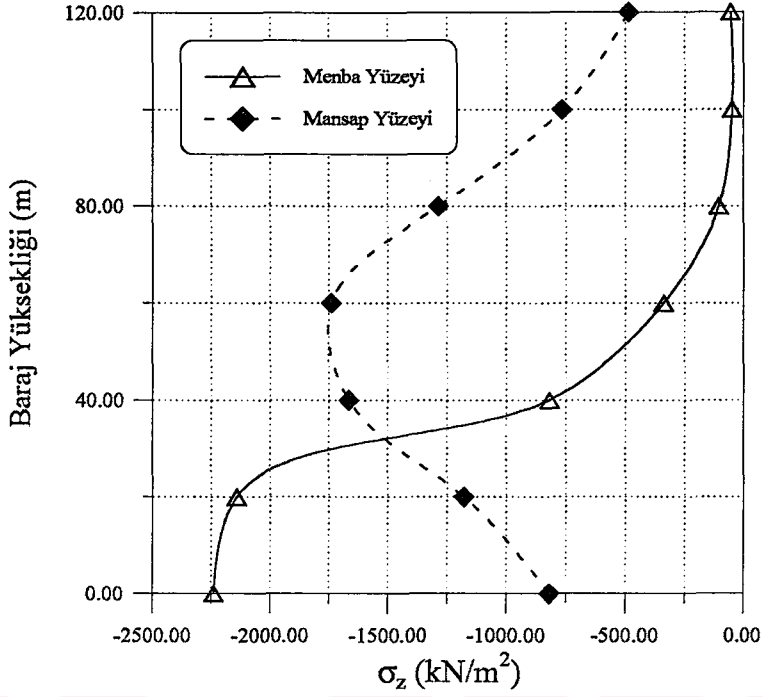
Şekil 125.Üç boyutlu lineer statik analizde, temelin eğilebilir, barajın dolu olması durumunda menba ve mansap yüzeyinde meydana gelen Y-doğrultusundaki gerilmelerin yükseklik boyunca değişimi



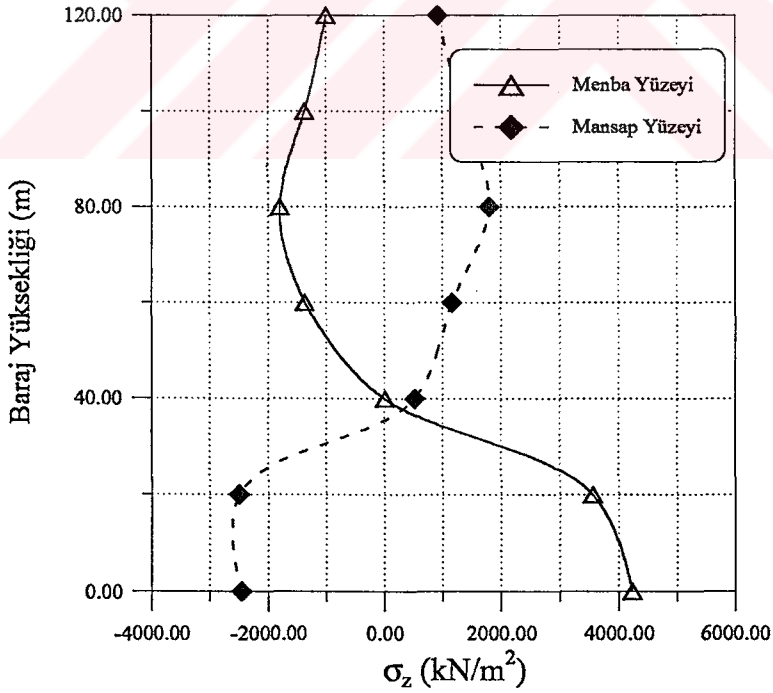
Şekil 126.Üç boyutlu lineer statik analizde, temelin rijit, barajın boş olması durumunda menba ve mansap yüzeyinde meydana gelen Z-doğrultusundaki gerilmelerin yükseklik boyunca değişimi



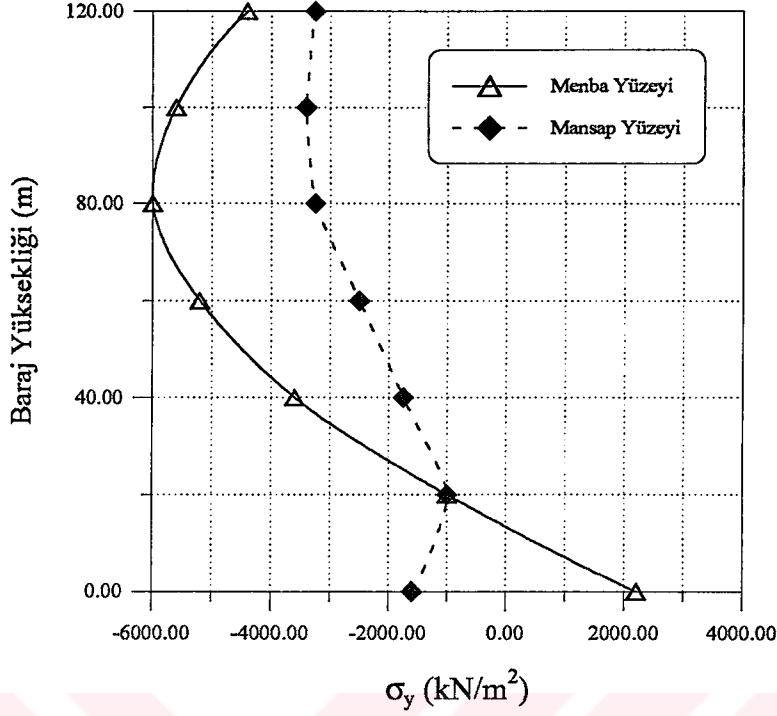
Şekil 127.Üç boyutlu lineer statik analizde, temelin rijit, barajın dolu olması durumunda menba ve mansap yüzeyinde meydana gelen Z-doğrultusundaki gerilmelerin yükseklik boyunca değişimi



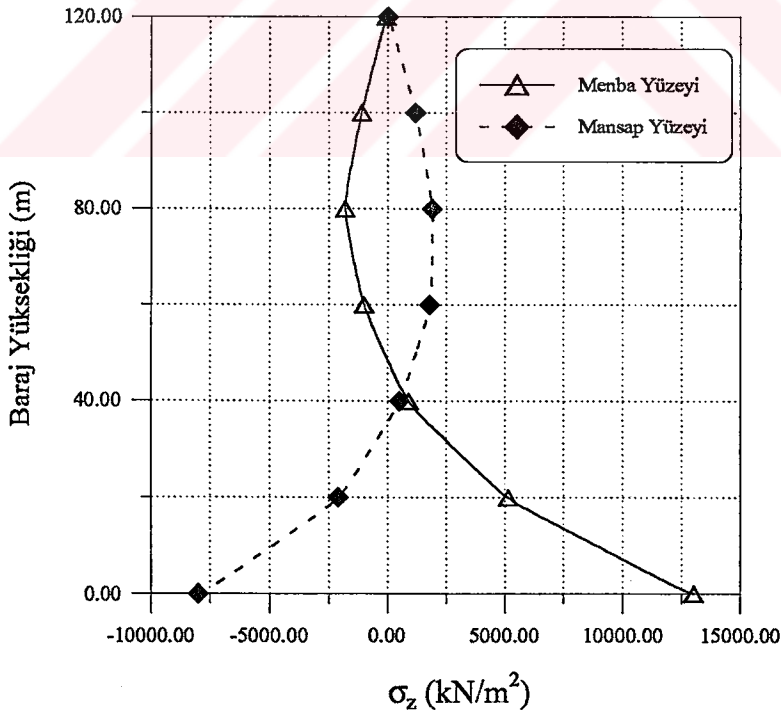
Şekil 128.Üç boyutlu lineer statik analizde, temelin eğilebilir, barajın boş olması durumunda menba ve mansap yüzeyinde meydana gelen Z-doğrultusundaki gerilmelerin yükseklik boyunca değişimi



Şekil 129.Üç boyutlu lineer statik analizde, temelin eğilebilir, barajın dolu olması durumunda menba ve mansap yüzeyinde meydana gelen Z-doğrultusundaki gerilmelerin yükseklik boyunca değişimi



Şekil 130.Üç boyutlu lineer statik analizde, temelin rijit, barajın dolu olması durumunda menba ve mansap yüzeyinde meydana gelen Y-doğrultusundaki gerilmelerin yükseklik boyunca değişimi [11].



Şekil 131.Üç boyutlu lineer statik analizde, temelin rijit, barajın dolu olması durumunda menba ve mansap yüzeyinde meydana gelen Z-doğrultusundaki gerilmelerin yükseklik boyunca değişimi [11].

Tablo 14. Üç boyutlu lineer statik analizde, çeşitli durumlar için kret noktasında meydana gelen X-doğrultusundaki (menba-mansap doğrultusu) yerdeğiştirmeler

Kret Noktasında Menba-Mansap Doğrultusundaki Yerdeğiştirme (mm)			
Rijit Temel		Eğilebilir Temel	
Baraj Boş	Baraj Dolu	Baraj Boş	Baraj Dolu
0.268	63.392	-3.030	75.037

Tablo 15. Üç boyutlu lineer statik analizde, çeşitli durumlar için kret noktasında meydana gelen Z-doğrultusundaki (düşey) yerdeğiştirmeler

Kret Noktasında Düşey Doğrultudaki Yerdeğiştirme (mm)			
Rijit Temel		Eğilebilir Temel	
Baraj Boş	Baraj Dolu	Baraj Boş	Baraj Dolu
-7.127	0.6679	-12.301	4.225

Tablo 16. Üç boyutlu lineer statik analizde, çeşitli durumlar için menba yüzeyinde X-doğrultusunda meydana gelen en büyük çekme ve basınç gerilmeleri

X-Doğrultusundaki En Büyük Çekme ve Basınç Gerilmesi (kN/m ²)							
Rijit Temel				Eğilebilir Temel			
Baraj Boş		Baraj Dolu		Baraj Boş		Baraj Dolu	
Çekme	Basınç	Çekme	Basınç	Çekme	Basınç	Çekme	Basınç
144	405	899	1407	247	941	1754	1631

Tablo 17. Üç boyutlu lineer statik analizde, çeşitli durumlar için menba yüzeyinde Y-doğrultusunda meydana gelen en büyük çekme ve basınç gerilmeleri

Y-Doğrultusundaki En Büyük Çekme ve Basınç Gerilmesi (kN/m ²)							
Rijit Temel				Eğilebilir Temel			
Baraj Boş		Baraj Dolu		Baraj Boş		Baraj Dolu	
Çekme	Basınç	Çekme	Basınç	Çekme	Basınç	Çekme	Basınç
379	977	1073	5977	441	959	910	6278

Tablo 18. Üç boyutlu lineer statik analizde, çeşitli durumlar için menba yüzeyinde Z-doğrultusunda meydana gelen en büyük çekme ve basınç gerilmeleri

Z-Doğrultusundaki En Büyük Çekme ve Basınç Gerilmesi (kN/m ²)							
Rijit Temel				Eğilebilir Temel			
Baraj Boş		Baraj Dolu		Baraj Boş		Baraj Dolu	
Çekme	Basınç	Çekme	Basınç	Çekme	Basınç	Çekme	Basınç
-	2991	8591	1650	-	2241	4234	1799

3.2.2. Dinamik Analiz

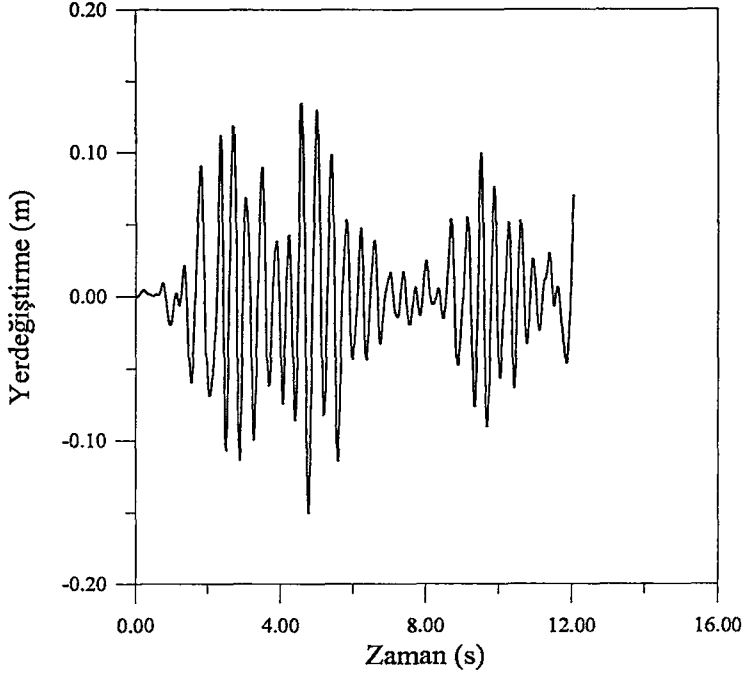
5.tip kemer barajın üç boyutlu dinamik analizi, malzeme davranışının lineer ve lineer olmaması durumları göz önüne alınarak gerçekleştirilmiştir. Lineer analizler, Şekil 19 ve 20'deki sonlu eleman ağları kullanılarak; baraj temelinin hem rijit, hem de eğilebilir olması halinde yapılmıştır. Lineer olmayan analiz ise sadece baraj temelinin rijit olması durumunda gerçekleştirilmiştir. Malzeme modeli olarak, eğri tanımlama modeli kullanılmıştır. Bu model, yapılan çalışmalar bölümünde açıklanmıştır. Analizler sonucunda, menba yüzeyinde meydana gelen yerdeğişirmelerin mutlak değerce maksimumunun baraj yükseliği boyunca değişimi ile kret noktasında meydana gelen yerdeğişirmelerin zamanla değişimi incelenmektedir. Ayrıca, baraj gövdesinde seçilen iki elemanın menba yüzeyine yakın gauss noktasındaki gerilmelerinin zamanla değişimi incelenmiştir.

3.2.2.1. Yerdeğişirmeler

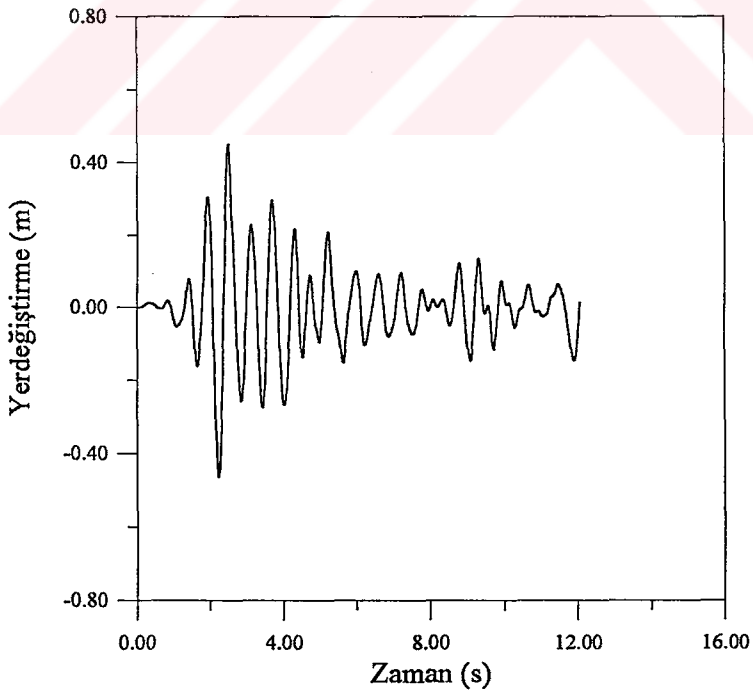
Lineer ve lineer olmayan analizlerde, kret noktası yerdeğişirmesinin zamanla değişimi incelenmektedir. Çeşitli durumlar için elde edilen değerler Şekil 132-137'de verilmektedir.

3.2.2.2. Gerilmeler

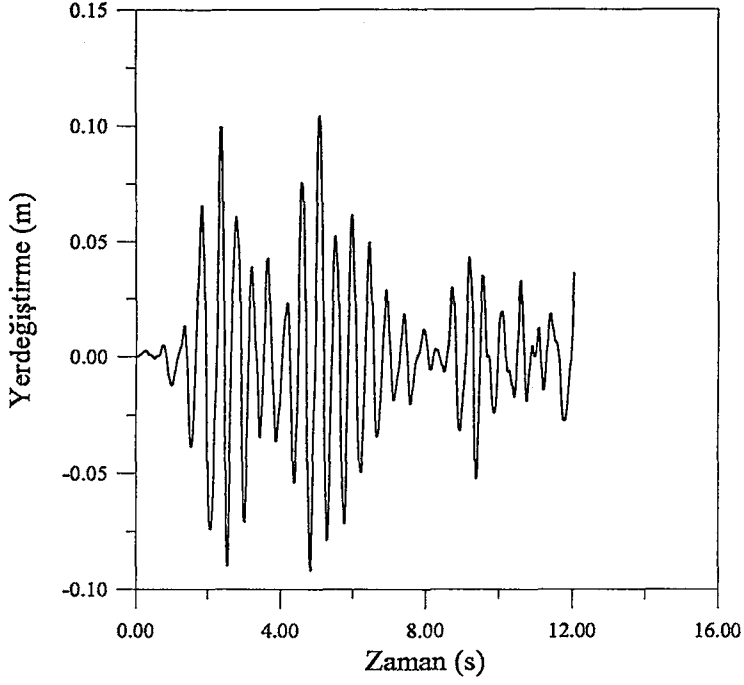
Kemer barajın topuk bölgesi ve gövdede seçilen bir elemanın menba-mansap doğrultusunda (x-ekseni doğrultusu) ve düşey doğrultuda (z-ekseni doğrultusu) oluşan gerilmelerin zamanla değişimi incelenmektedir. Topuk bölgesinde seçilen eleman, temelin rijit olması halinde 76, eğilebilir olması halinde ise 255 nolu eleman olmaktadır. Gövdedeki ise temelin rijit olması durumunda 68, eğilebilir olması durumunda ise 247 nolu eleman olmaktadır. Lineer ve lineer olmayan analizlerde gerilmeler, elemanın 2 nolu gauss noktasında verilmektedir. Bu, menba yüzeyine yakın olan gauss noktasıdır. Çeşitli durumlar için elde edilen gerilmelerin zamanla değişimi Şekil 138-161'de verilmektedir.



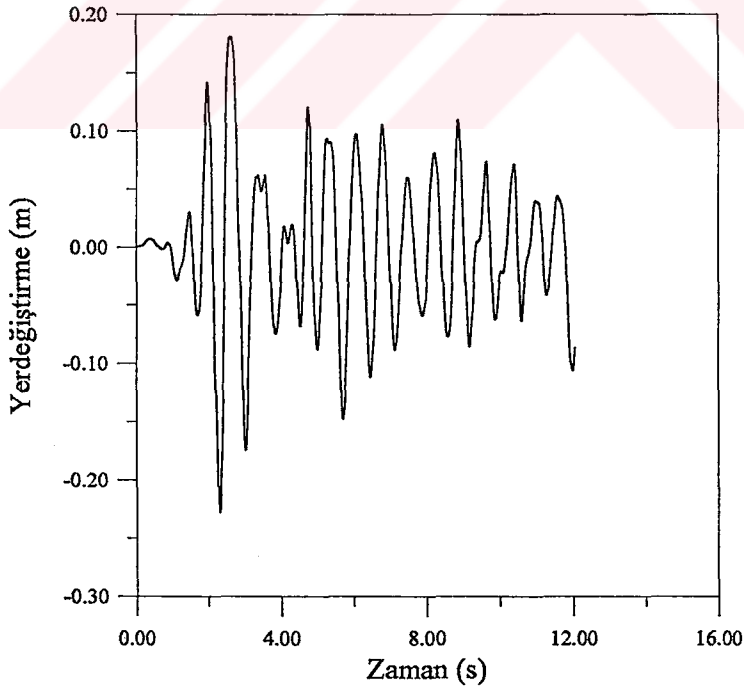
Şekil 132.Üç boyutlu lineer dinamik analizde, temelin rijit, barajın boş olması durumunda kret noktasında (126 nolu düğüm noktası) menba-mansap doğrultusunda meydana gelen yerdeğıştirmelerin zamanla değişimi



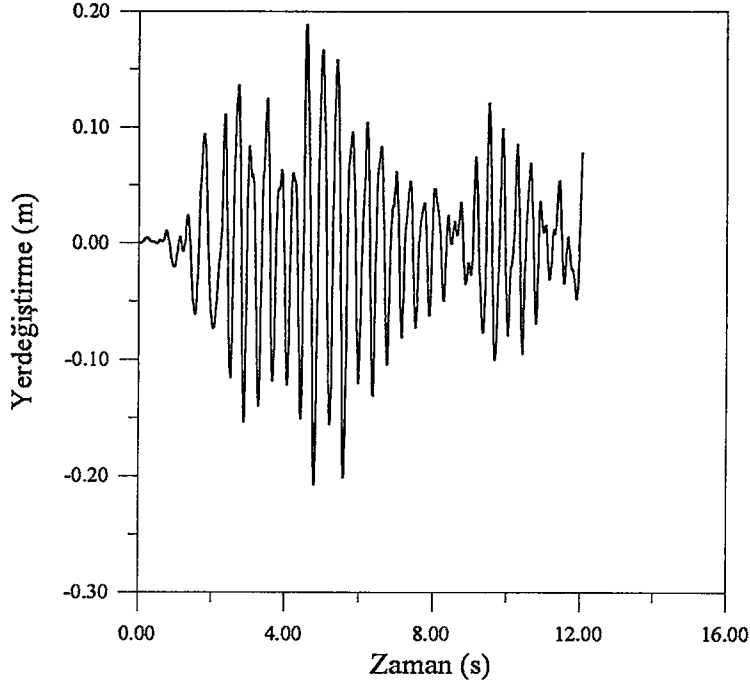
Şekil 133.Üç boyutlu lineer dinamik analizde, temelin rijit, barajın dolu olması durumunda kret noktasında (126 nolu düğüm noktası) menba-mansap doğrultusunda meydana gelen yerdeğıştirmelerin zamanla değişimi



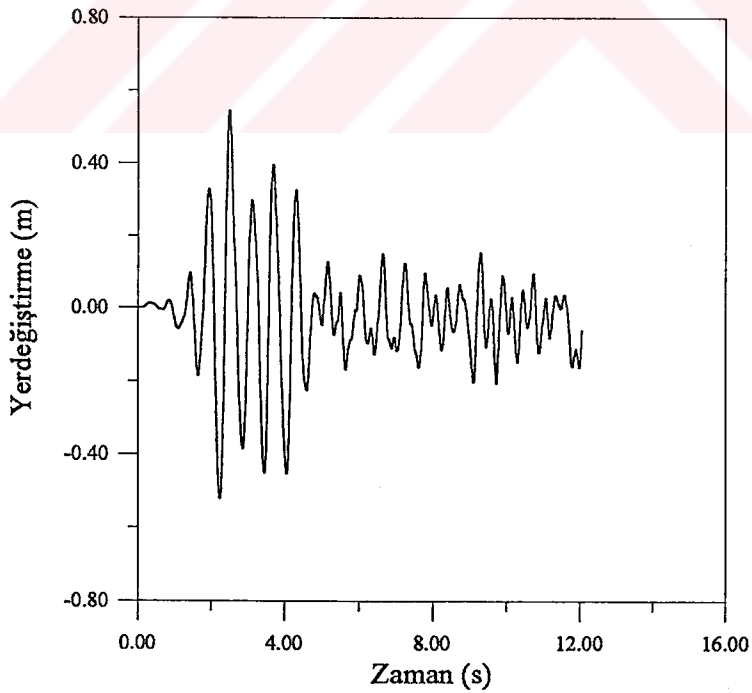
Şekil 134.Üç boyutlu lineer dinamik analizde, temelin eğilebilir, barajın boş olması durumunda kret noktasında (254 nolu düğüm noktası) menba-mansap doğrultusunda meydana gelen yerdeğiştirmelerin zamanla değişimi



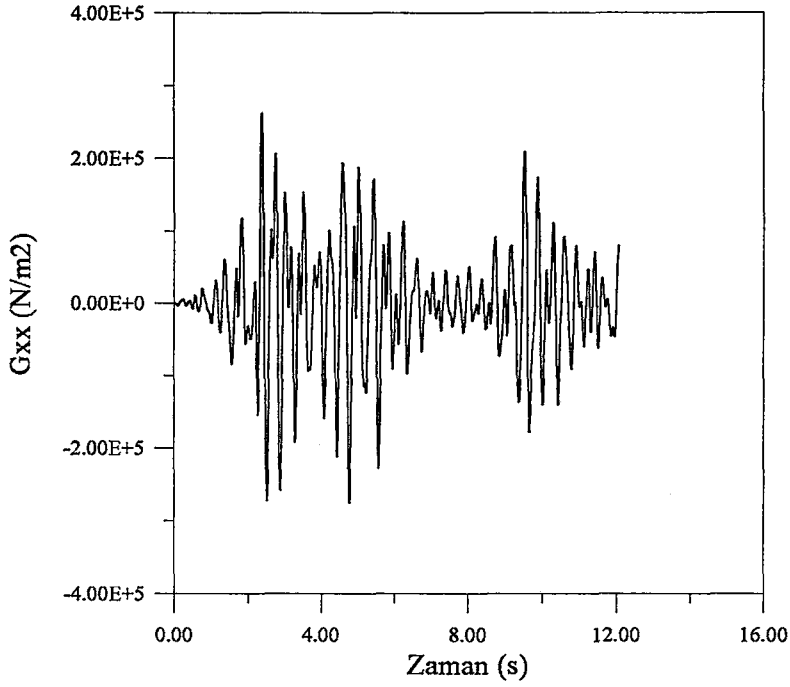
Şekil 135.Üç boyutlu lineer dinamik analizde, temelin eğilebilir, barajın dolu olması durumunda kret noktasında (254 nolu düğüm noktası) menba-mansap doğrultusunda meydana gelen yerdeğiştirmelerin zamanla değişimi



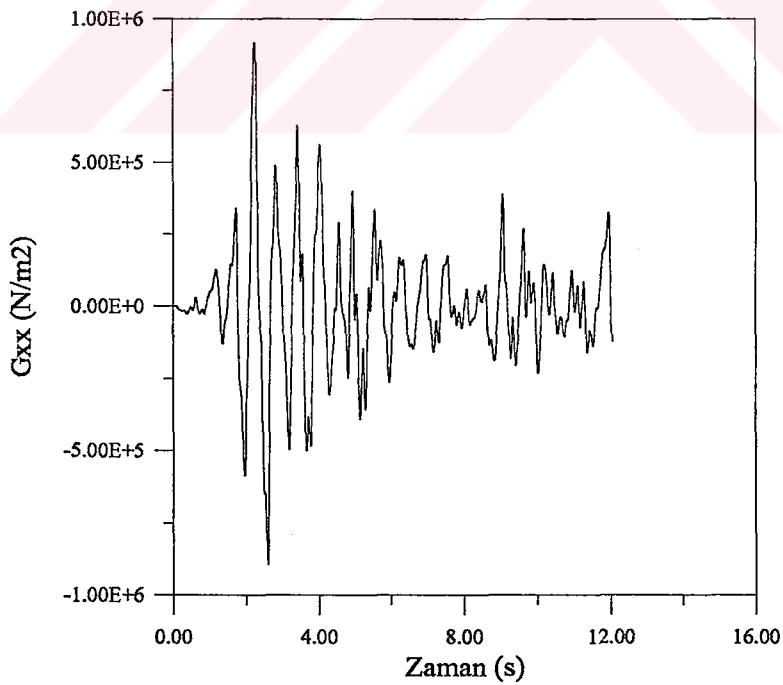
Şekil 136.Üç boyutlu lineer olmayan dinamik analizde, temelin rijit, barajın boş olması durumunda kret noktasında (126 nolu düğüm noktası) menba-mansap doğrultusunda meydana gelen yerdeğiştirmelerin zamanla değişimi



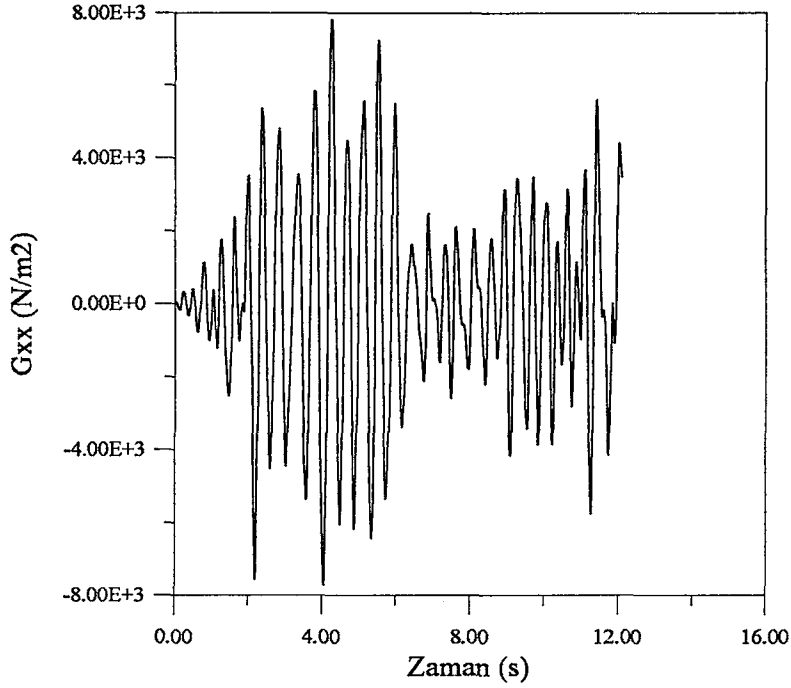
Şekil 137.Üç boyutlu lineer olmayan dinamik analizde, temelin rijit, barajın dolu olması durumunda kret noktasında (126 nolu düğüm noktası) menba-mansap doğrultusunda meydana gelen yerdeğiştirmelerin zamanla değişimi



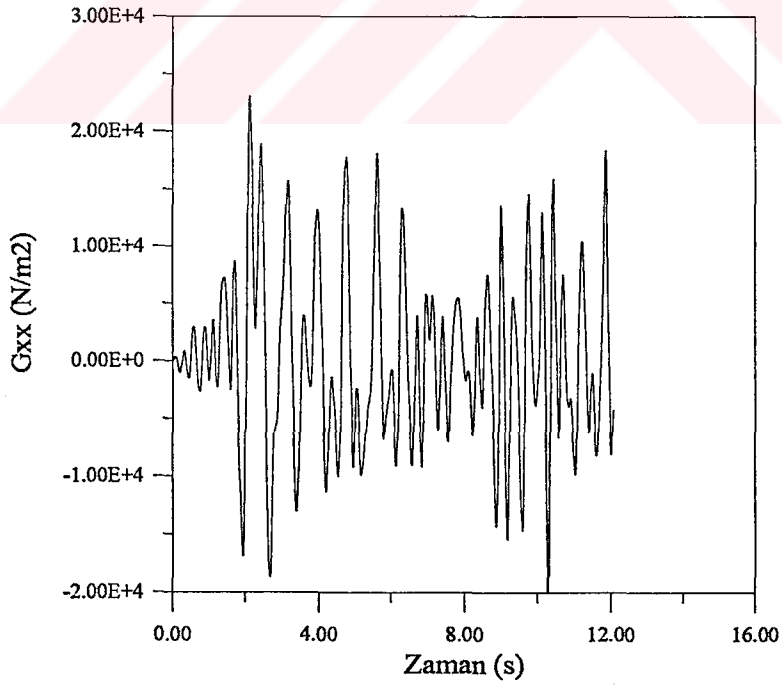
Şekil 138.Üç boyutlu lineer dinamik analizde, temelin rijit, barajın boş olması durumunda X-doğrultusunda (menba-mansap doğrultusu) 68 nolu elemanda meydana gelen gerilmelerin zamanla değişimi



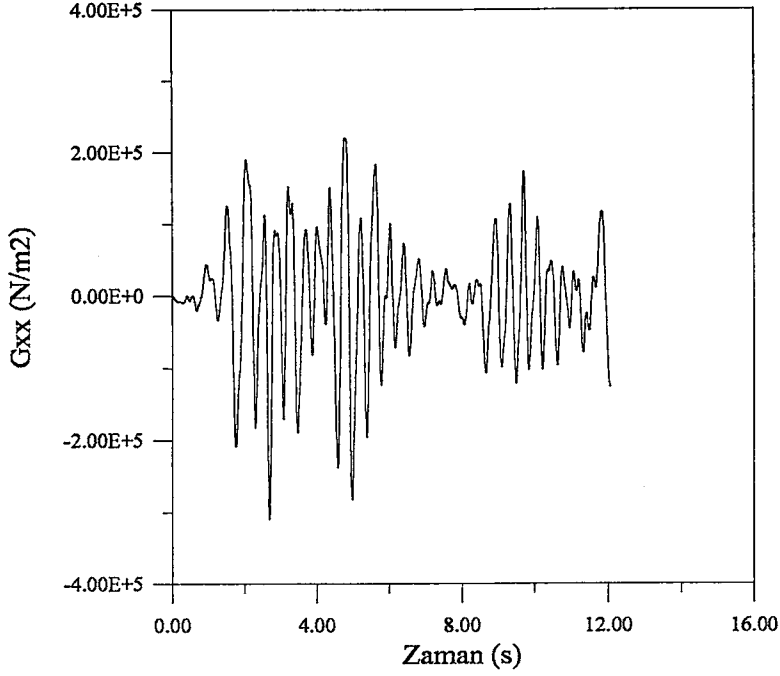
Şekil 139.Üç boyutlu lineer dinamik analizde, temelin rijit, barajın dolu olması durumunda X-doğrultusunda (menba-mansap doğrultusu) 68 nolu elemanda meydana gelen gerilmelerin zamanla değişimi



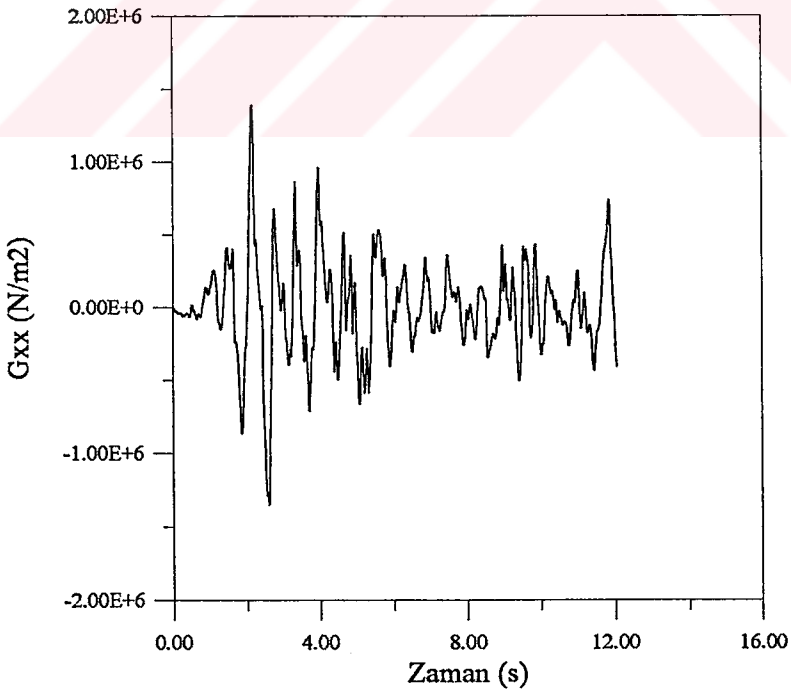
Şekil 140.Üç boyutlu lineer dinamik analizde, temelin eğilebilir, barajın boş olması durumunda X-doğrultusunda (menba-mansap doğrultusu) 247 nolu elemanda meydana gelen gerilmelerin zamanla değişimi



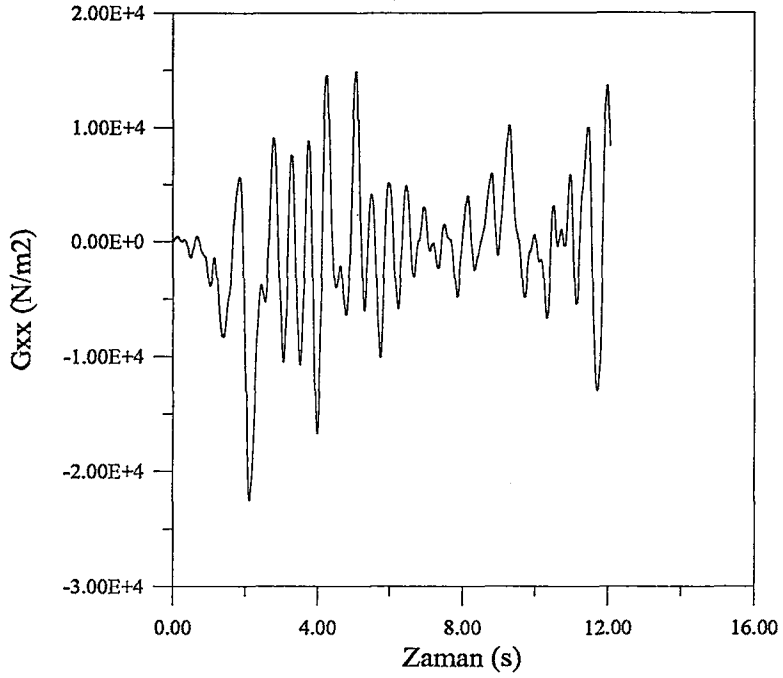
Şekil 141.Üç boyutlu lineer dinamik analizde, temelin eğilebilir, barajın dolu olması durumunda X-doğrultusunda (menba-mansap doğrultusu) 247 nolu elemanda meydana gelen gerilmelerin zamanla değişimi



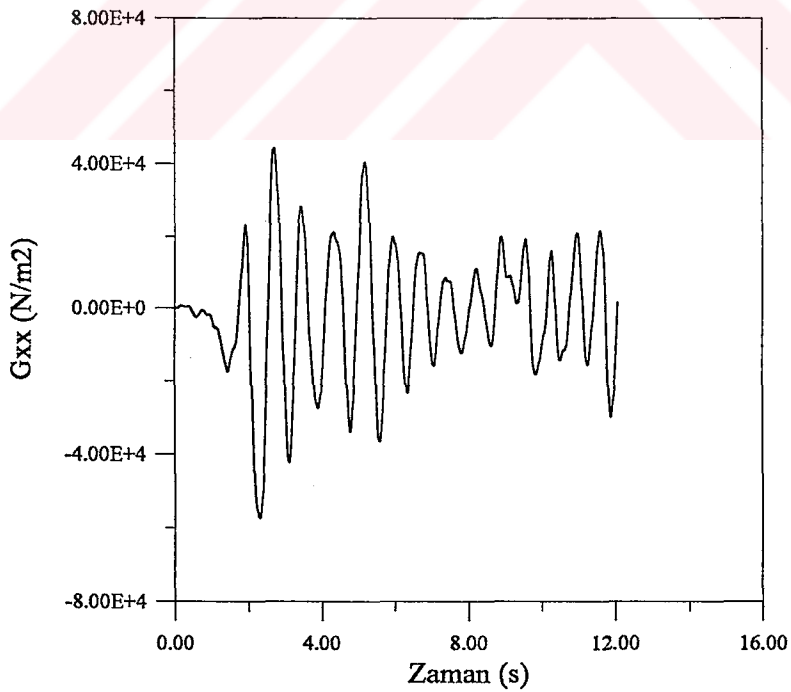
Şekil 142. Üç boyutlu lineer dinamik analizde, temelin rijit, barajın boş olması durumunda X-doğrultusunda (menba-mansap doğrultusu) 76 nolu elemanda meydana gelen gerilmelerin zamanla değişimi



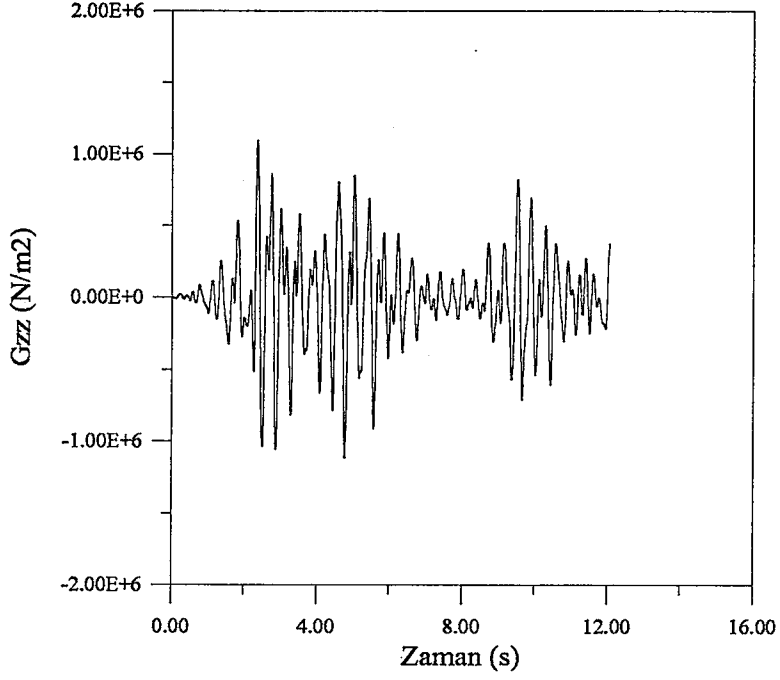
Şekil 143. Üç boyutlu lineer dinamik analizde, temelin rijit, barajın dolu olması durumunda X-doğrultusunda (menba-mansap doğrultusu) 76 nolu elemanda meydana gelen gerilmelerin zamanla değişimi



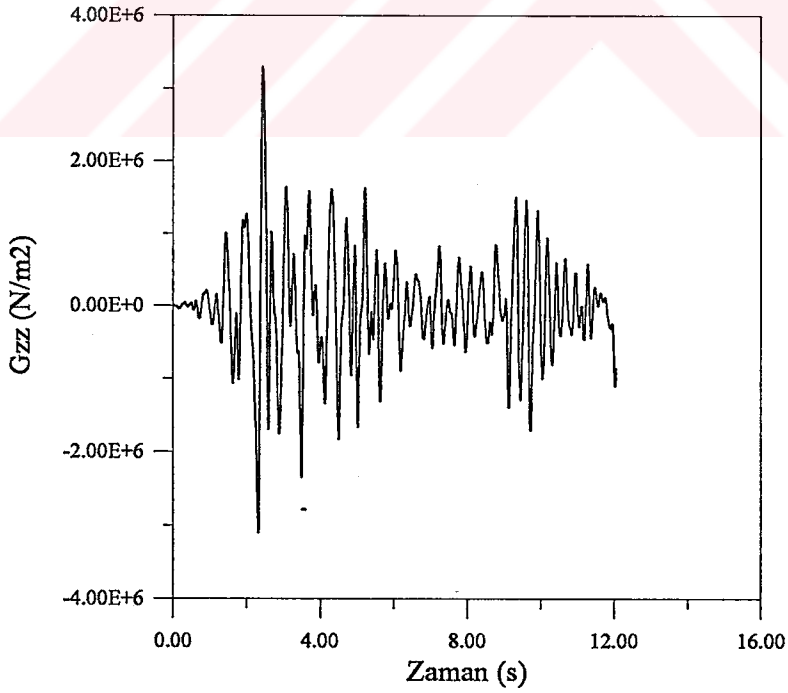
Şekil 144.Üç boyutlu lineer dinamik analizde, temelin eğilebilir, barajın boş olması durumunda X-doğrultusunda (menba-mansap doğrultusu) 255 nolu elemanda meydana gelen gerilmelerin zamanla değişimi



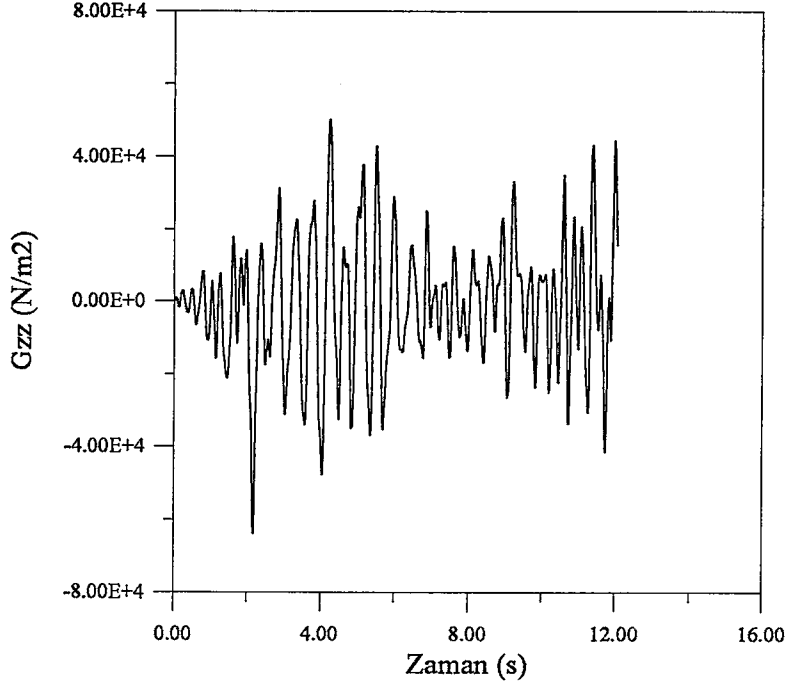
Şekil 145.Üç boyutlu lineer dinamik analizde, temelin eğilebilir, barajın dolu olması durumunda X-doğrultusunda (menba-mansap doğrultusu) 255 nolu elemanda meydana gelen gerilmelerin zamanla değişimi



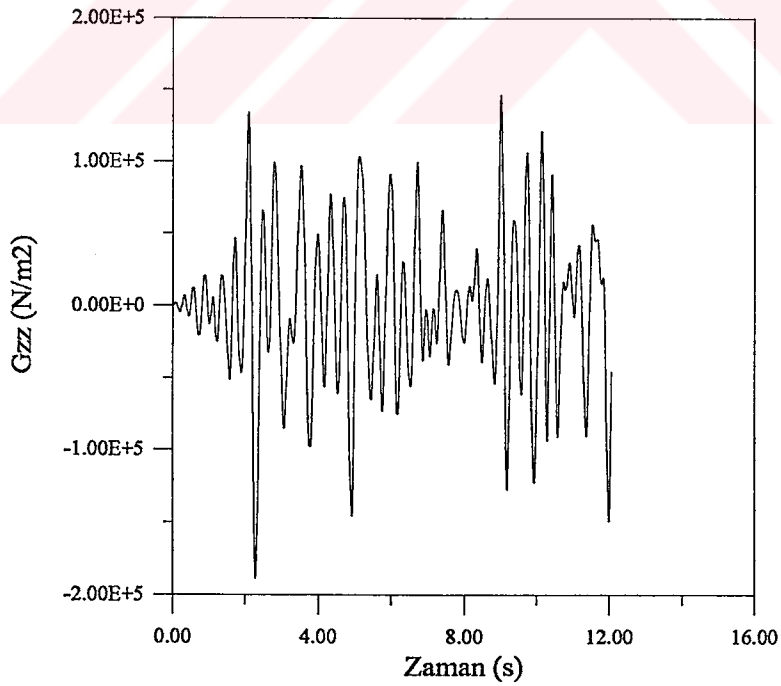
Şekil 146.Üç boyutlu lineer dinamik analizde, temelin rijit, barajın boş olması durumunda Z-doğrultusunda (düşey doğrultu) 68 nolu elemanda meydana gelen gerilmelerin zamanla değişimi



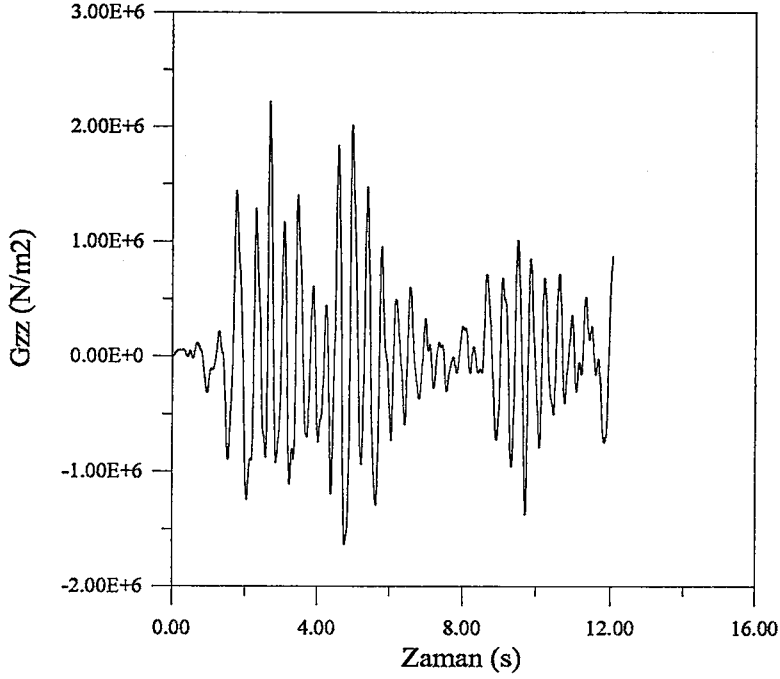
Şekil 147.Üç boyutlu lineer dinamik analizde, temelin rijit, barajın dolu olması durumunda Z-doğrultusunda (düşey doğrultu) 68 nolu elemanda meydana gelen gerilmelerin zamanla değişimi



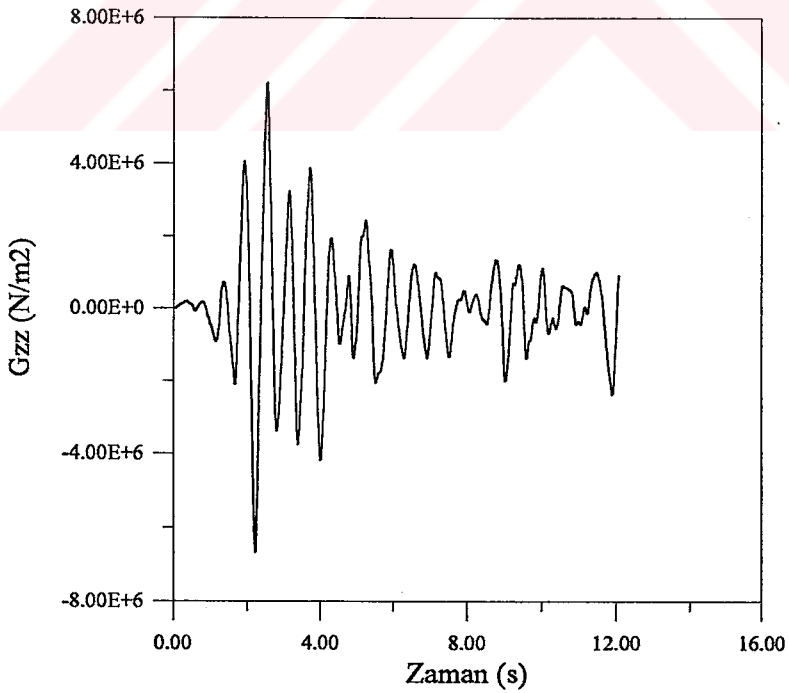
Şekil 148.Üç boyutlu lineer dinamik analizde, temelin eğilebilir, barajın boş olması durumunda Z-doğrultusunda (düşey doğrultu) 247 nolu elemanda meydana gelen gerilmelerin zamanla değişimi



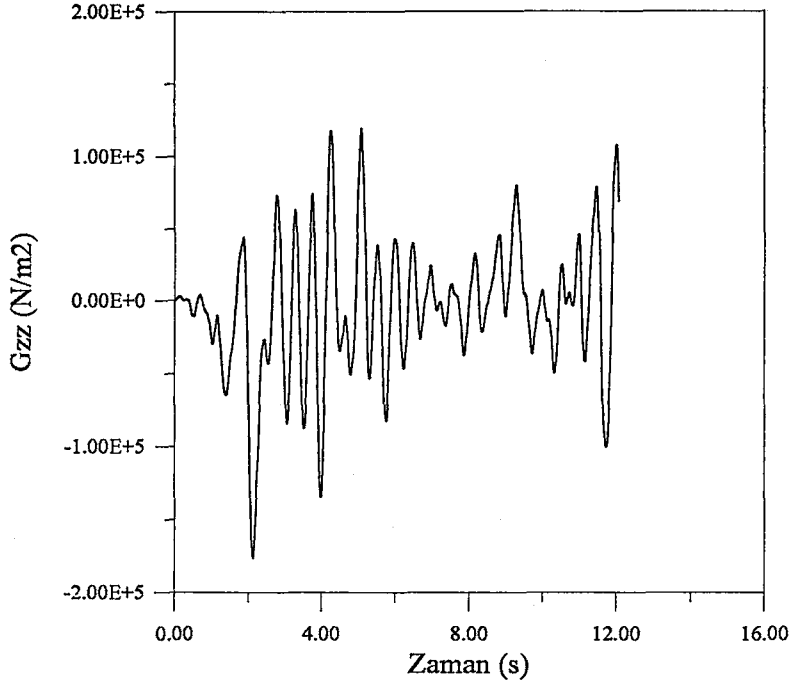
Şekil 149.Üç boyutlu lineer dinamik analizde, temelin eğilebilir, barajın dolu olması durumunda Z-doğrultusunda (düşey doğrultu) 247 nolu elemanda meydana gelen gerilmelerin zamanla değişimi



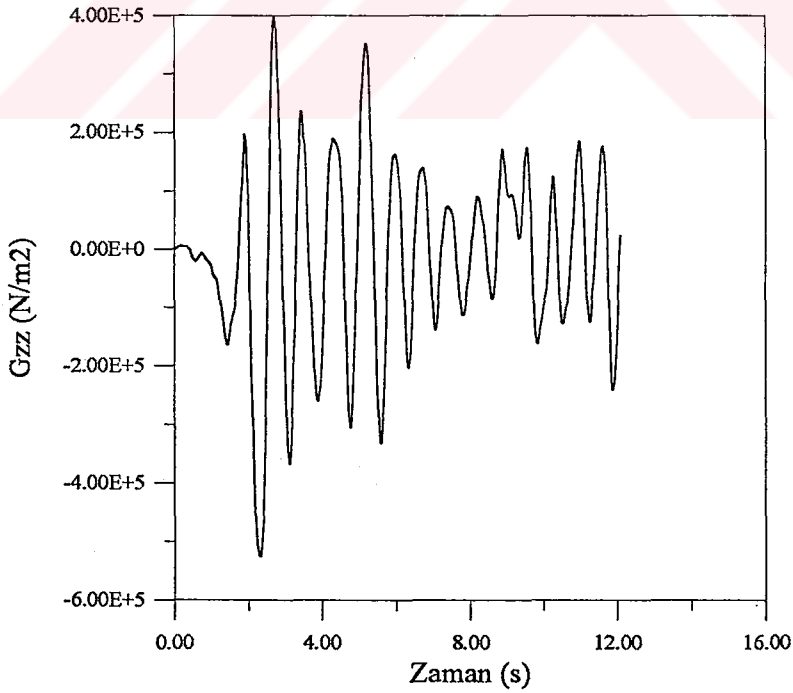
Şekil 150. Üç boyutlu lineer dinamik analizde, temelin rijit, barajın boş olması durumunda Z-doğrultusunda (düşey doğrultu) 76 nolu elemanda meydana gelen gerilmelerin zamanla değişimi



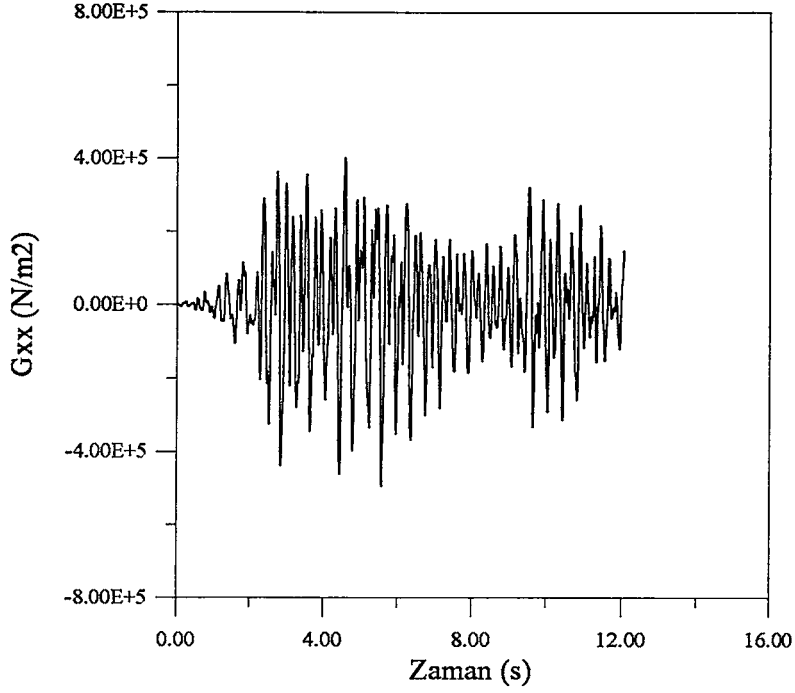
Şekil 151. Üç boyutlu lineer dinamik analizde, temelin rijit, barajın dolu olması durumunda Z-doğrultusunda (düşey doğrultu) 76 nolu elemanda meydana gelen gerilmelerin zamanla değişimi



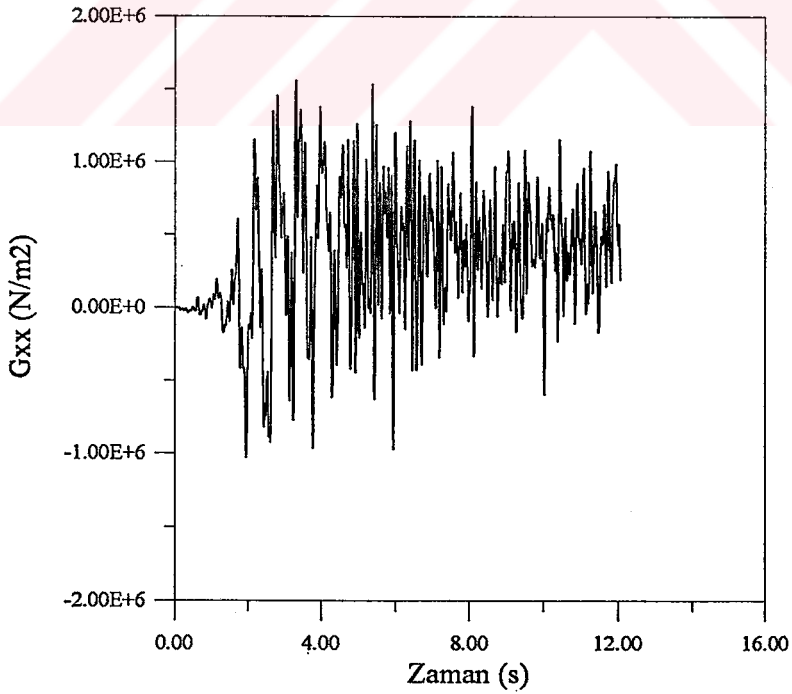
Şekil 152.Üç boyutlu lineer dinamik analizde, temelin eğilebilir, barajın boş olması durumunda Z-doğrultusunda (düşey doğrultu) 255 nolu elemanda meydana gelen gerilmelerin zamanla değişimi



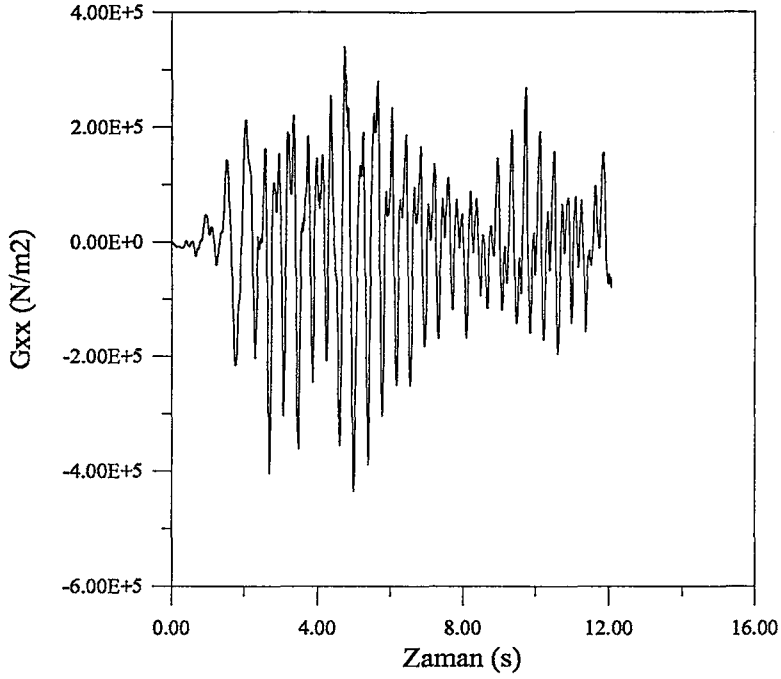
Şekil 153.Üç boyutlu lineer dinamik analizde, temelin eğilebilir, barajın dolu olması durumunda Z-doğrultusunda (düşey doğrultu) 255 nolu elemanda meydana gelen gerilmelerin zamanla değişimi



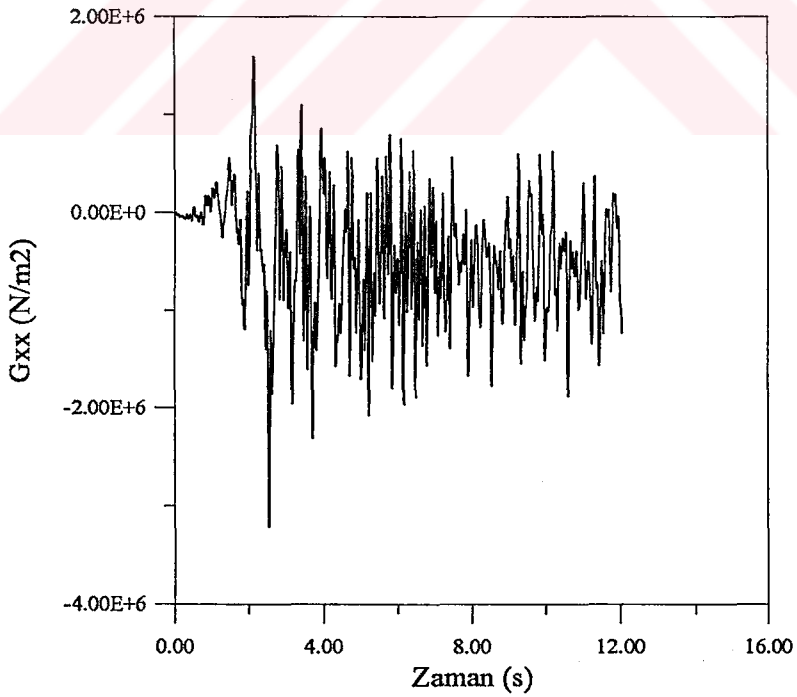
Şekil 154.Üç boyutlu lineer olmayan dinamik analizde, temelin rijit, barajın boş olması durumunda X-doğrultusunda (menba-mansap doğrultusu) 68 nolu elemanda meydana gelen gerilmelerin zamanla değişimi



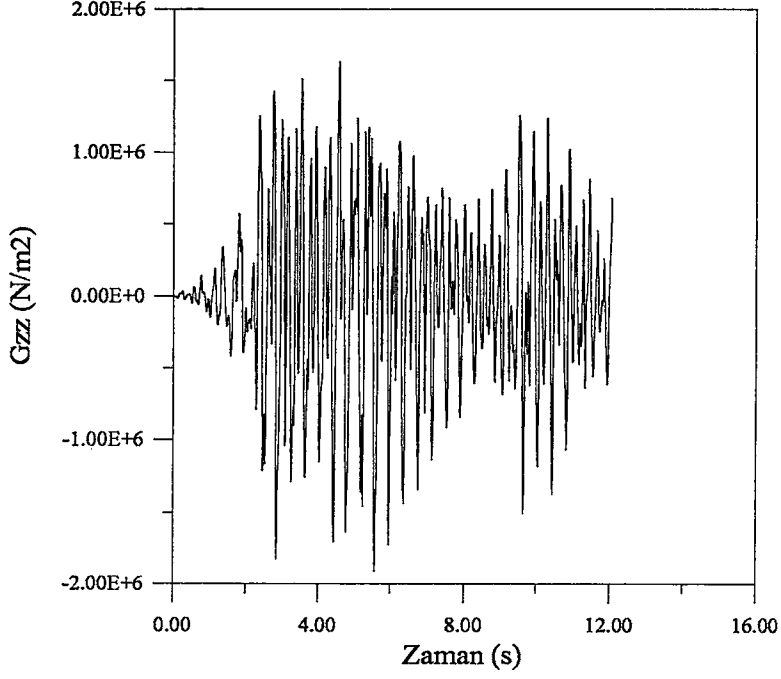
Şekil 155.Üç boyutlu lineer olmayan dinamik analizde, temelin rijit, barajın dolu olması durumunda X-doğrultusunda (menba-mansap doğrultusu) 68 nolu elemanda meydana gelen gerilmelerin zamanla değişimi



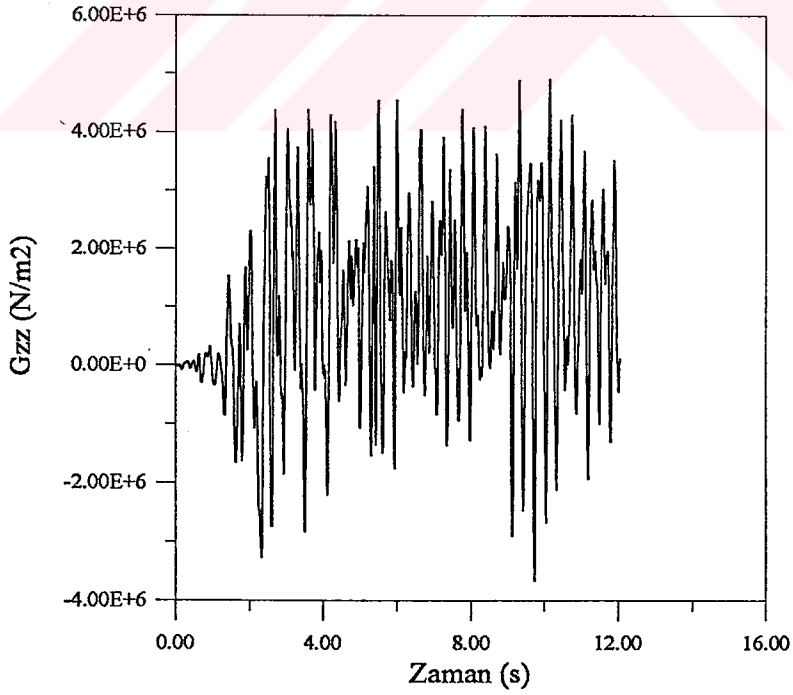
Şekil 156.Üç boyutlu lineer olmayan dinamik analizde, temelin rijit, barajın boş olması durumunda X-doğrultusunda (menba-mansap doğrultusu) 76 nolu elemanda meydana gelen gerilmelerin zamanla değişimi



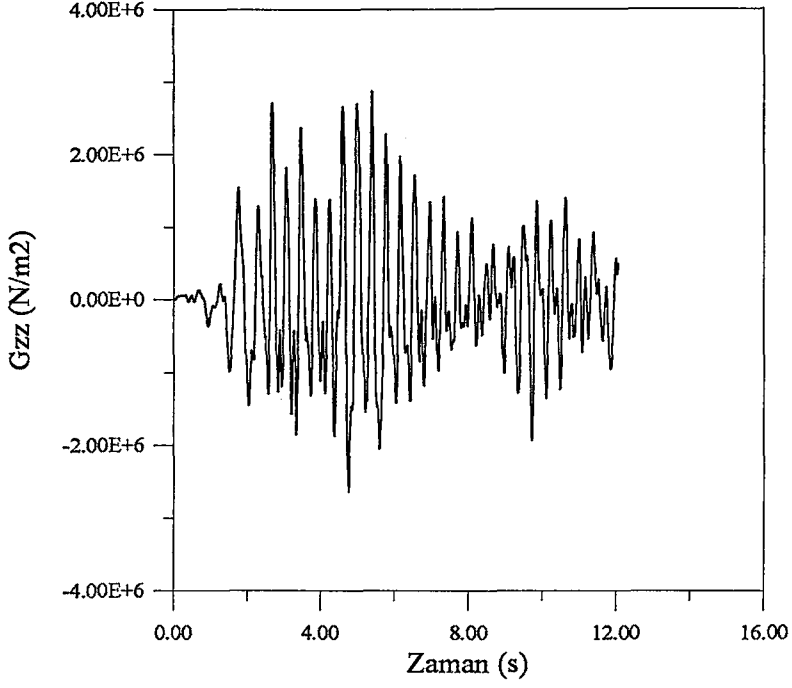
Şekil 157.Üç boyutlu lineer olmayan dinamik analizde, temelin rijit, barajın dolu olması durumunda X-doğrultusunda (menba-mansap doğrultusu) 76 nolu elemanda meydana gelen gerilmelerin zamanla değişimi



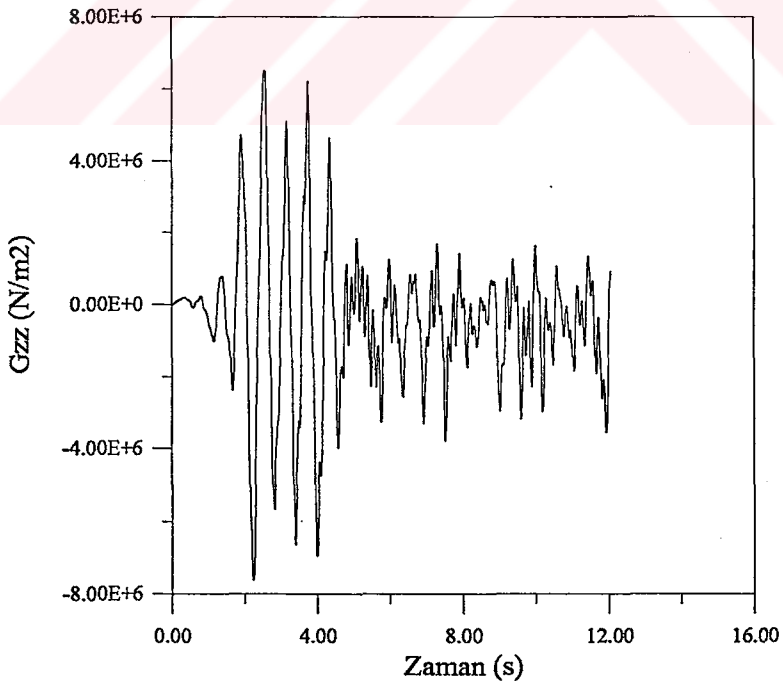
Şekil 158.Üç boyutlu lineer olmayan dinamik analizde, temelin rijit, barajın boş olması durumunda Z-doğrultusunda (düşeydoğrultu) 68 nolu elemanda meydana gelen gerilmelerin zamanla değişimi



Şekil 159.Üç boyutlu lineer olmayan dinamik analizde, temelin rijit, barajın dolu olması durumunda Z-doğrultusunda (düşey doğrultu) 68 nolu elemanda meydana gelen gerilmelerin zamanla değişimi



Şekil 160.Üç boyutlu lineer olmayan dinamik analizde, temelin rijit, barajın boş olması durumunda Z-doğrultusunda (düşey doğrultu) 76 nolu elemanda meydana gelen gerilmelerin zamanla değişimi



Şekil 161.Üç boyutlu lineer olmayan dinamik analizde, temelin rijit, barajın dolu olması durumunda Z-doğrultusunda (düşey doğrultu) 76 nolu elemanda meydana gelen gerilmelerin zamanla değişimi

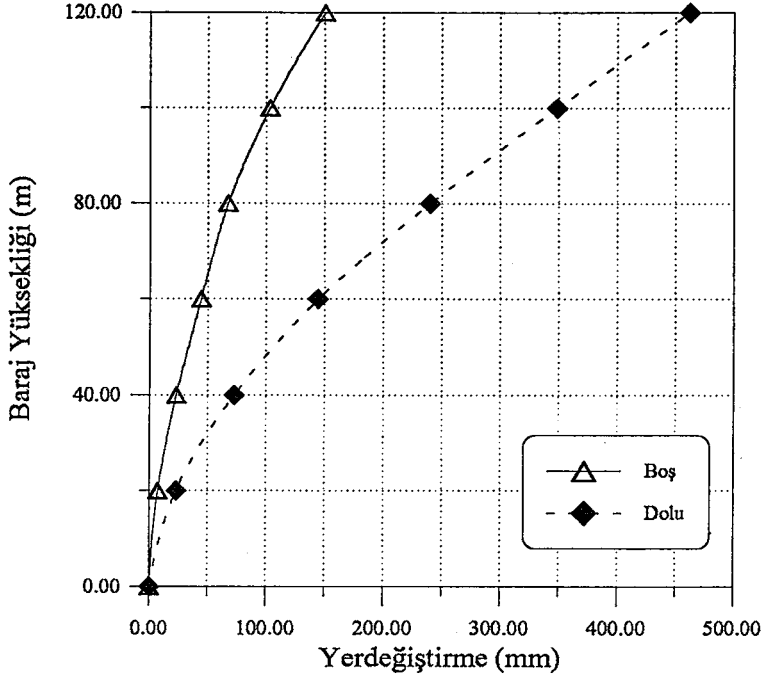
3.2.2.3. Üç Boyutlu Lineer ve Lineer Olmayan Dinamik Analiz Sonuçlarının Çeşitli Durumlar İçin Karşılaştırılması

3.2.2.3.1. Yerdeğiştirmelerin Karşılaştırılması

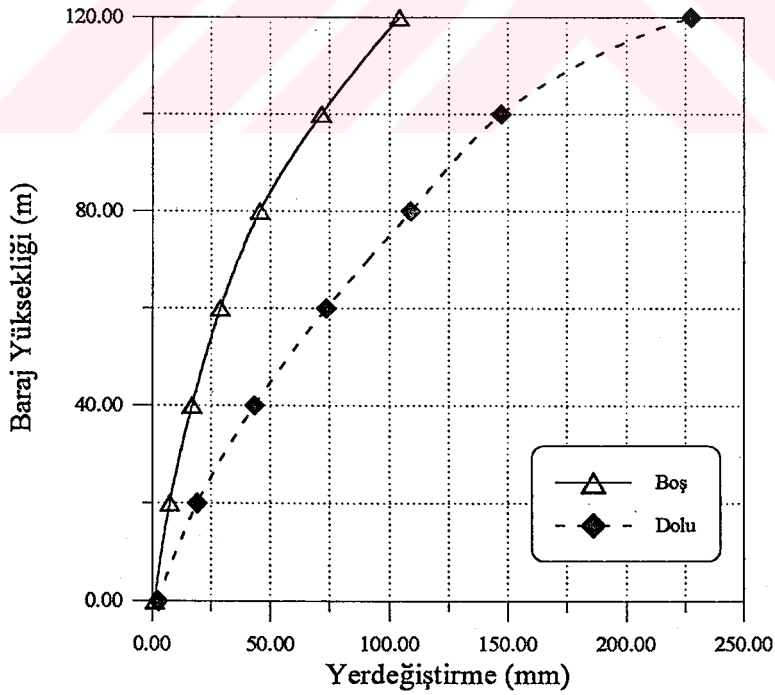
Lineer ve lineer olmayan dinamik analizde, menba yüzeyinde meydana gelen yerdeğiştirmelerin mutlak değerce maksimumlarının baraj yüksekliği boyunca değişimi çeşitli durumlar için Şekil 162-164'te verilmektedir. Ayrıca, değişik durumlar için baraj kretinde (Baraj temelinin rijit olması durumunda 126 nolu düğüm, eğilebilir olması durumunda ise 254 nolu düğüm noktası) elde edilen mutlak değerce en büyük yerdeğiştirmeler, analizin lineer ve lineer olmamasına göre Tablo 19'da verilmektedir. En büyük yerdeğiştirme lineer olmayan analizde, temelin rijit, barajın dolu olması halinde meydana gelmiştir.

3.2.2.3.2. Gerilmelerin Karşılaştırılması

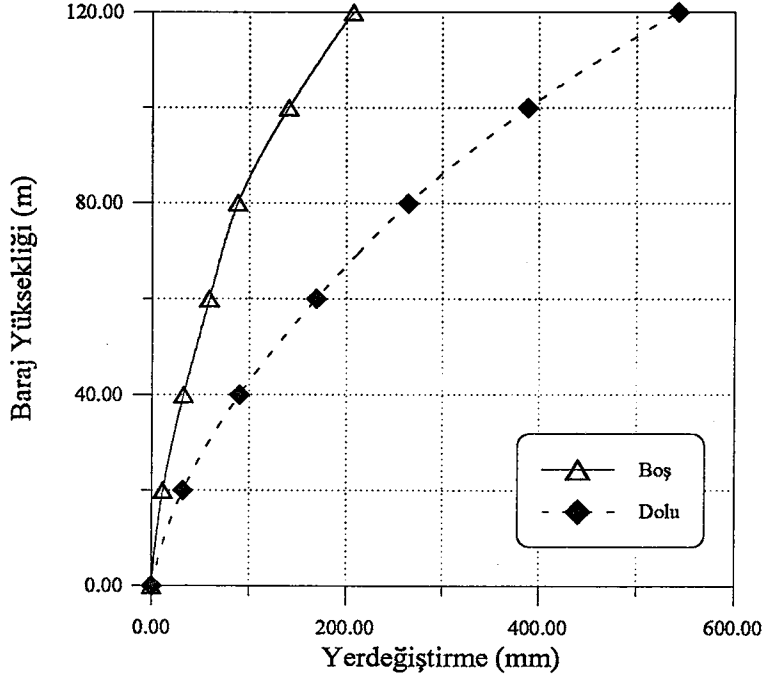
Lineer analizler sonucunda x ve z-doğrultularında elde edilen en büyük çekme ve basınç gerilmeleri Tablo 20 ve 21'de verilmektedir. Görüldüğü gibi en büyük gerilmeler temelin eğilebilir, barajın dolu olması durumunda oluşmaktadır. Lineer olmayan analizler sonucunda elde edilen en büyük çekme ve basınç gerilmeleri Tablo 22 ve 23'te verilmiştir. Elde edilen sonuçlara göre, en büyük gerilmeler barajın dolu olması durumunda elde edilmektedir.



Şekil 162. Üç boyutlu lineer dinamik analizde, barajın boş ve dolu, temelin rijit olması durumunda menba yüzeyindeki mutlak değerce maksimum yerdeğiştirmelerin yükseklik boyunca değişimi



Şekil 163. Üç boyutlu lineer dinamik analizde, barajın boş ve dolu, temelin eğilebilir olması durumunda menba yüzeyindeki mutlak değerce maksimum yerdeğiştirmelerin yükseklik boyunca değişimi



Şekil 164. Üç boyutlu lineer olmayan dinamik analizde, barajın boş ve dolu, temelin rijit olması durumunda menba yüzeyindeki mutlak değerce maksimum yerdeğıştirmelerin yükseklik boyunca değişimi

Tablo 19. Üç boyutlu lineer ve lineer olmayan dinamik analizde, çeşitli durumlar için kret noktasında meydana gelen maksimum yatay yerdeğıştirmeler

Kret Noktası Yatay Yerdeğıştirmesi (mm)							
Lineer Analiz				Lineer Olmayan Analiz			
Rijit Temel		Eğilebilir Temel		Rijit Temel		Eğilebilir Temel	
Baraj Boş	Baraj Dolu	Baraj Boş	Baraj Dolu	Baraj Boş	Baraj Dolu	Baraj Boş	Baraj Dolu
150.82	462.71	104.20	227.50	207.361	543.058	-	-

Tablo 20. Üç boyutlu lineer dinamik analizde, çeşitli durumlar için menba yüzeyinde X-doğrultusunda meydana gelen en büyük çekme ve basınç gerilmeleri

X-Doğrultusundaki En Büyük Çekme ve Basınç Gerilmeleri (kN/m ²)									
El.No	Temel Rijit				El.No	Temel Eğilebilir			
	Baraj Boş		Baraj Dolu			Baraj Boş		Baraj Dolu	
	Çekme	Basınç	Çekme	Basınç		Çekme	Basınç	Çekme	Basınç
68	0.261	0.275	0.917	0.896	247	9	8	23	20
76	0.220	0.310	1393	1347	255	15	23	44	57

Tablo 21. Üç boyutlu lineer dinamik analizde, çeşitli durumlar için menba yüzeyinde Z-doğrultusunda meydana gelen en büyük çekme ve basınç gerilmeleri

Z-Doğrultusundaki En Büyük Çekme ve Basınç Gerilmeleri (kN/m ²)									
El.No	Temel Rijit				El.No	Temel Eğilebilir			
	Baraj Boş		Baraj Dolu			Baraj Boş		Baraj Dolu	
	Çekme	Basınç	Çekme	Basınç		Çekme	Basınç	Çekme	Basınç
68	1096	1115	3296	3100	247	50	64	147	189
76	2220	1634	6202	6676	255	119	177	399	526

Tablo 22. Üç boyutlu lineer olmayan dinamik analizde, çeşitli durumlar için menba yüzeyinde X-doğrultusunda meydana gelen en büyük çekme ve basınç gerilmeleri

X-Doğrultusundaki En Büyük Çekme ve Basınç Gerilmeleri (kN/m ²)				
El.No	Temel Rijit			
	Baraj Boş		Baraj Dolu	
	Çekme	Basınç	Çekme	Basınç
68	401	493	1562	1030
76	340	436	1596	3208

Tablo 23. Üç boyutlu lineer olmayan dinamik analizde, çeşitli durumlar için menba yüzeyinde Z-doğrultusunda meydana gelen en büyük çekme ve basınç gerilmeleri

Z-Doğrultusundaki En Büyük Çekme ve Basınç Gerilmeleri (kN/m ²)				
El.No	Temel Rijit			
	Baraj Boş		Baraj Dolu	
	Çekme	Basınç	Çekme	Basınç
68	1636	1909	4908	3657
76	2880	2627	6506	7621

3.3. İki ve Üç Boyutlu Lineer ve Lineer Olmayan Analiz Sonuçlarının Karşılaştırılması

3.3.1. Statik Analiz

Statik analiz sonucunda barajın ve temelin çeşitli durumları için elde edilen yerdeğiştirmelere göre, hem iki boyutlu hem de üç boyutlu analiz için en elverişsiz durum, barajın dolu, temelin eğilebilir olması halidir ve en büyük yerdeğiştirme kret noktasında meydana gelmektedir. Yapılan iki ve üç boyutlu statik analiz sonuçlarına göre kret noktasında meydana gelen yerdeğiştirmeler Tablo 24'te toplu olarak görülmektedir. İki boyutlu lineer analizde, temelin eğilebilir barajın dolu olması durumunda, kret noktasında 521.85 mm, üç boyutlu lineer analizde 75.037 mm yerdeğiştirme elde edilmiştir. Bu değer, iki boyutlu lineer olmayan analizde 1312.89 mm olarak elde edilmiştir. Görüldüğü gibi iki ve üç boyutlu analizler arasında çok büyük farklar oluşmaktadır. Bu durum, kemer barajlar için iki boyutlu statik çözümlerin yeterli olmayacağını göstermektedir.

Tablo 24. İki ve üç boyutlu lineer ve lineer olmayan statik analizde kret noktasında menba-mansap doğrultusunda meydana gelen yerdeğiştirmeler

Kret Noktasının Menba-Mansap Doğrultusundaki Yerdeğiştirmeleri (mm)								
Sonlu Eleman Modeli	Lineer Analiz				Lineer Olmayan Analiz			
	Temel Rijit		Temel Eğilebilir		Temel Rijit		Temel Eğilebilir	
	Baraj Boş	Baraj Dolu	Baraj Boş	Baraj Dolu	Baraj Boş	Baraj Dolu	Baraj Boş	Baraj Dolu
İki Boyutlu	18.839	423.16	16.342	521.85	-	692.99	-	1312.9
Üç Boyutlu	0.268	63.392	-3.030	75.037	-	63.370	-	-

3.3.2. Dinamik Analiz

İki ve üç boyutlu dinamik analizlerde barajın kret noktasında elde edilen mutlak değerce maksimum yerdeğiştirmeler Tablo 25'te toplu olarak verilmektedir. İki boyutlu analiz sonuçlarına dikkat edildiği zaman, barajın dolu olması halinde temelin hem rijit hem de eğilebilir olması durumunda kret noktası yerdeğiştirmesinin daha fazla olması beklenirken kret noktası yerdeğiştirmesi küçük çıkmıştır. Burada, suyun düşey yönde eklenen kütleinin baraj davranışında daha etkili olduğu tahmin edilmektedir. Ancak, üç boyutlu analiz sonuçları incelendiği taktirde beklenildiği gibi, barajın dolu olması durumunda kret noktasındaki yerdeğiştirmelerde artış meydana gelmektedir. Bu durum ise dinamik analizlerde kemer barajlar için üç boyutlu çözümlerin gerekliliğini göstermektedir.

Tablo 25. İki ve üç boyutlu lineer ve lineer olmayan dinamik analizde kret noktasında menba-mansap doğrultusunda meydana gelen mutlak değerce maksimum yerdeğiştirmeler

Kret Noktasının Menba-Mansap Doğrultusundaki Yerdeğiştirmeleri (mm)								
Sonlu Eleman Modeli	Lineer Analiz				Lineer Olmayan Analiz			
	Temel Rijit		Temel Eğilebilir		Temel Rijit		Temel Eğilebilir	
	Baraj Boş	Baraj Dolu	Baraj Boş	Baraj Dolu	Baraj Boş	Baraj Dolu	Baraj Boş	Baraj Dolu
İki Boyutlu	208.89	181.83	239.12	239.14	265.72	231.18	317.15	298.16
Üç Boyutlu	150.82	462.71	104.20	227.50	207.36	543.06	-	-

4. SONUÇLAR ve ÖNERİLER

Barajlar arkalarında çok miktarda su depolayan büyük ve monolitik yapılardır. Bu yapıların kendileri için en büyük tehlikeyi oluşturan muhtemel bir deprem sonucunda yıkılmaları halinde, hem ekonomik kayba hem de can kaybına sebep olabileceği bilinmektedir. Bu nedenle barajların, özellikle narin bir yapıya sahip kemer barajların, deprem gibi dinamik yükler altındaki davranışının belirlenmesi gerekmektedir.

Bu çalışmada, kemer barajların lineer ve malzeme bakımından lineer olmayan statik ve dinamik analizi yapılmıştır. Sonlu eleman modeli, iki ve üç boyutlu olarak oluşturulmuş ve çözümler bu modeller üzerinde gerçekleştirilmiştir. İki boyutlu sonlu eleman modeli 4, üç boyutlu sonlu eleman modeli ise 8 düğüm noktalı elemanlardan oluşmaktadır. Lineer ve lineer olmayan statik ve dinamik analizler, barajın boş ve dolu, temelin rijit ve eğilebilir olması halleri dikkate alınarak gerçekleştirilmiştir.

Lineer ve lineer olmayan dinamik analizlerde %5'lik sönüm oranı kabul edilip, Rayleigh sabitleri 1.temel mod esas alınarak barajın boş ve dolu olmasına göre hesaplanmıştır.

Lineer olmayan iki boyutlu analizlerde malzeme modeli, Drucker-Prager hipotezine göre dikkate alınmıştır. Bu modelde, malzeme davranışı, akma fonksiyonunun aldığı değere göre belirlenmiştir. Akma fonksiyonu, kohezyon ve içsel sürtünme açısına bağlı olarak hesaplanan akma gerilmesi değerine ulaştığında malzemenin plastik hale geçtiği anlaşılmıştır. Üç boyutlu lineer olmayan analizlerde ise eğri tanımlama modeli kullanılmıştır. Bu malzeme modelinde, hacimsel şekildeğiştirmeye bağlı olarak bulunan hacimsel elastisite ve kayma modülüne göre malzeme davranışı belirlenmiştir.

Çözümlerde, baraj-rezervuar, baraj-zemin ve baraj-rezervuar-zemin etkileşimleri dikkate alınmıştır. Dinamik analizlerde rezervuarın etkisi, kütle ekleme yaklaşımı ile temsil edilmiştir. Lineer ve lineer olmayan analizler adım-adım integrasyon tekniği ile Wilson- θ metodu kullanılarak gerçekleştirilmiştir.

Bu çalışmadan çıkarılan sonuçları maddeler halinde sıralamak gerekirse;

1) Lineer ve lineer olmayan iki ve üç boyutlu, hem statik hem de dinamik analiz sonuçlarına göre, baraj için en elverişsiz durum; barajın dolu, temelin eğilebilir olması halidir.

- 2) Lineer ve lineer olmayan iki ve üç boyutlu statik ve dinamik analizlerin hepsinde, en büyük yerdeğiştirmeler kret noktasında meydana gelmektedir.
- 3) İki boyutlu lineer ve lineer olmayan dinamik analizde, baraj davranışı çok değişik bir durum sergilemektedir. Barajın dolu olması durumunda, boş olduğu zamankine göre daha büyük yerdeğiştirme beklenirken, beklenenin aksine daha küçük çıkmıştır. Bunun sebebi olarak, düşey yönde eklenen su kütesinin baraj davranışını önemli ölçüde etkilediği düşünölmektedir. Üç boyutlu dinamik analizlerde, böyle bir durum sözkonusu olmayıp sonuçlar beklenildiği gibi elde edilmiştir. Bu durumda da yine kemer barajlar için üç boyutlu analiz gerekliliği ortaya çıkmaktadır.
- 4) Üç boyutlu lineer statik analiz ile lineer olmayan statik analizden aynı sonuçlar elde edilmiştir. Bu durum bize hidrostatik yükler altında kemer barajların, lineer davranıştan uzaklaşmadığını göstermektedir.
- 5) Analizlerde görölmüştür ki; rezervuar ve zeminin varlığı baraj davranışını önemli ölçüde etkilemektedir. Bu nedenle, lineer ve lineer olmayan statik ve dinamik analizlerde; baraj-rezervuar, baraj-zemin ve baraj-rezervuar-zemin etkileşimi dikkate alınmalıdır.
- 6) İki ve üç boyutlu analiz sonuçlarına göre;, kemer barajlar için iki boyutlu çözümün yeterli olmadığı görölmüştür.
- 7) Lineer analize göre projelendirilen kemer barajların, lineer olmayan analizlerinin de yapılması gerekmekte ve projelendirilmede bu analiz sonuçları muhakkak göz önünde bulundurulmalıdır.

5. KAYNAKLAR

1. Yılmaz, Ç., Barajların Deprem Analizi, Su Yapıları Semineri, 28-30 Haziran 1988, Samsun, 183-205.
2. Öziş, Ü., Su Yapıları, Dokuz Eylül Üniversitesi Mühendislik-Mimarlık Yayınları, No.54, Bornova-İzmir, 1983.
3. Bulson, P.S., Caldwell, J.B. and Severn, R.T., Engineering Structures Development in the Twentieth Century, University of Bristol Press, Bristol, 1983.
4. Ivan, E.H. and Roman, P.W., Arch Dams, Handbook of Applied Hydraulics, Ed.: Davis, C.V. and Sorensen, K.E., Mc Graw-Hill Book Company, Tokyo, 1984.
5. Ertaş, B., Su Kaynaklar I, Ders Notları, KTÜ, 1987.
6. Öziş, Ü. ve Alsan, M., Beton Baraj İnşaatının Türkiye’de Gelişmesi, Teknik Dergi, TMMOB İnşaat Mühendisleri Odası, Sayı 3, Cilt 1, (1990) 147-158.
7. Turfan, M., Özetle Baraj Nedir?, Devlet Su İşleri Genel Müdürlüğü, Ankara, 1996.
8. Thomas, H.H., The Engineering of Large Dams, Part I, John Wiley and Sons., London, 1976.
9. Tottenham, H., The Analysis of Static and Dynamic Stresses and Displacements in Arch Dams, Symposium on Arch Dams, ICE, paper 1, London, (1968) 9-12.
10. Zienkiewicz, O.C., Parekh, C. and King, I.P., Arch Dams Analysed by A Linear Finite Element Shell Solution Program, Symposium on Arch Dams, ICE, paper 3, London, (1968) 19-22.
11. Ergatoudis, J., Irons, B.M. and Zienkiewicz, O.C., Three Dimensional Analysis of Arch Dams and Their Foundations, Symposium on Arch Dams, ICE, paper 4, London, (1968) 37-50.

12. Dungar, R. and Severn, R.T., The Analysis of Arch Dams Under Static Loading by The Finite Element Method, Symposium on Arch Dams, ICE, paper 6, London, (1968) 61-74.
13. Dungar, R. and Severn, R.T., Dynamic Analysis of Arch Dams, Symposium on Arch Dams, ICE, paper 7, London, (1968) 75-82.
14. O'Conner, J.P.H. and Boot, J.C., A Solution Procedure for The Earthquake Analysis of Arch Dams-Reservoir Systems with Compressible Water, Earthquake Engineering and Structural Dynamics, Vol.16, (1988) 757-773.
15. Perumalswami, P.R. and Kar, L., Earthquake Behavior of Arch Dams-Reservoir Systems, Fifth World Conference on Earthquake Engineering, Rome, 1973.
16. Chopra, A.K., Earthquake Behavior of Reservoir-Dam Systems, Journal of the Engineering Mechanics Division, ASCE, 94, EM6 (1968) 1475-1500.
17. Porter, C.S. and Chopra, A.K., Dynamic Response of Simple Arch Dams Including Hydrodynamic Interaction, Earthquake Engineering Research Center Report No. UCB/EERC-80/17, University of California, Berkeley, California, 1980.
18. Porter, C.S. and Chopra, A.K., Dynamic Analysis of Simple Arch Dams Including Hydrodynamic Interaction, Earthquake Engineering and Structural Dynamics, Vol.9, (1981) 573-597.
19. Porter, C.S. and Chopra, A.K., Hydrodynamic Effects in Dynamic Response of Simple Arch Dams, Earthquake Engineering and Structural Dynamics, Vol.10, (1982) 417-431.
20. Fok, K.L. and Chopra, A.K., Earthquake Analysis and Response of Concrete Arch Dams, Earthquake Engineering Research Center Report No. UCB/EERC-85/07, University of California, Berkeley, California, 1985.
21. Fok, K.L. and Chopra, A.K., Earthquake Analysis of Arch Dams Including Dam-Water Interaction, Reservoir Boundary Absorbtion and Foundation Flexibility, Earthquake Engineering and Structural Dynamics, Vol.14, (1986) 155-184.

22. Fok, K.L. and Chopra, A.K., Frequency Response Functions for Arch Dams: Hydrodynamic and Foundation Flexibility Effects, Earthquake Engineering and Structural Dynamics, Vol.14, (1986) 769-795.
23. Fok, K.L. and Chopra, A.K., Hydrodynamic and Foundation Flexibility Effects in Earthquake Response of Arch Dams, Journal of Structural Engineering, Vol.112, No.8, August, (1986) 1810-1828.
24. Tan, H. and Chopra, A.K., Earthquake Analysis of Arch Dams Including Dam-Water-Foundation Rock Interaction, Earthquake Engineering and Structural Dynamics, Vol.24, (1995) 1453-1474.
25. Tan, H. and Chopra, A.K., Dam-Foundation Rock Interaction Effects in Frequency-Response Functions of Arch Dams, Earthquake Engineering and Structural Dynamics, Vol.24, (1995) 1474-1489.
26. Tan, H. and Chopra, A.K., Dam-Foundation Rock Interaction Effects in Earthquake Response of Arch Dams, Journal of Structural Engineering, Vol.122, No.5, May, (1996) 528-538.
27. Hall, J.F. and Chopra, A.K., Two-Dimensional Dynamic Analysis of Concrete Gravity and Embankment Dams Including Hydrodynamic Effects, Earthquake Engineering and Structural Dynamics, Vol.10, (1982) 305-322.
28. Hall, J.F. and Chopra, A.K., Dynamic Analysis of Arch Dams Including Hydrodynamic Effects, Journal of Engineering Mechanics, ASCE, 109, 1, 17696 (1983) 149-167.
29. Chopra, A.K., Earthquake Response of Concrete Gravity Dams, Journal of the Engineering Mechanics Division, ASCE, 96, EM4, 7485 (1970) 443-454.
30. Dumanoglu, A.A. and Severn, R.T., Dynamic Response of Dams and Other Structures to Differential Ground Motions, Proc. Instn Civ. Engrs., Part 2, 77, (1984) 333-352.
31. Dumanoglu, A.A. and Severn, R.T. and Taylor, C.A., Effect of Asynchronous Input on the Response of Dams, Proceedings the Eighth World Conference on Earthquake Engineering, 1984, San Francisco, Volume 6, 127-133.

32. Dumanoğlu, A.A., Severn, R.T. and Brownjohn, J.M.W., Asynchronous Seismic Analysis of Bosphorus and Humber Suspension Bridges, Proceedings of the Eighth European Conference on Earthquake Engineering, 1986, Lisbon, Volume 3, 1-8.
33. Zhang, X. and Mai, J., Vibration-Response of Arch Dams with Time-Lag Between Abutments, International Congress on Large Dams (ICOLD), 1987, Beijing, China, Vol.1, 219-232.
34. Chen, H. and Hou, S., Effect of Seismic Travelling Wave on the Response of Arch Dams, Proceedings of China-U.S. Workshop on Earthquake Behaviour of Arch Dams, 1987, Beijing, China, 73-91.
35. Niwa, A. and Clough, R.W., Shaking Table Research on Concrete Dams Models, Earthquake Engineering Research Center Report No. UCB/EERC-80/05, University of California, Berkeley, California, 1980.
36. Niwa, A. and Clough, R.W., Non-Linear Seismic Response of Arch Dams, Earthquake Engineering and Structural Dynamics, Vol.10, (1982) 267-281.
37. Vatani Oskouei, A., Su, Çatlak ve Kavitasyon Etkileri Altındaki Beton Ağırlık Barajların Lineer Olmayan Dinamik Analizi, Doktora Tezi, KTÜ Fen Bilimleri Enstitüsü, Haziran, 1997.
38. Vatani Oskouei, A. and Dumanoğlu, A.A., Consideration of Cracks in Nonlinear Dynamic Analysis of Concrete Gravity Dams, Computers and Structures, (to be published).
39. Vatani Oskouei, A. and Dumanoğlu, A.A., Effect of Cavitation on Earthquake Response of Fluid-Structure Systems, Computers and Structures, (to be published).
40. Vatani Oskouei, A., Dumanoğlu, A.A. and 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.
41. Dowling, M.J., Nonlinear Seismic Response of Arch Dams, Ph. D. Thesis, California Institute of Technology, Pasadena, California, 1988.

42. Dowling, M.J. and Hall, J.F., Nonlinear Seismic Response of Arch Dams, Journal of Engineering Mechanics, Vol.115, No.4, April, (1989) 768-789.
43. Hall, J.F. and Dowling, M.J., Response of Jointed Arches to Earthquake Excitation, Earthquake Engineering and Structural Dynamics, Vol.13, (1985) 779-798.
44. Ahmadi, M.T. and Razavi, S., A Three-Dimensional Joint Opening Analysis of An Arch Dam, Computers and Structures, Vol.44, No.1/2, (1992) 187-192.
45. Mays, J.R. and Roehm, L.H., Effect of Vertical Contraction Joints in Concrete Arch Dams, Computers and Structures, Vol.47, No.4/5, (1993) 615-627.
46. Boggs, H.L., Tarbox, G.S. and Jansen, R.B., Arch Dams Design and Analysis, Advanced Dam Engineering for Design, Construction, and Rehabilitation, Ed: Jansen, R.B., New York, (1988) 493-539.
47. Fenves, G.L., Mojtahedi, S. and Reimer, R.B., Effects of Contraction Joints on Earthquake Response of An Arch Dam, Journal of Structural Engineering, Vol.118, No.4, April, (1992) 1039-1055.
48. Bathe, K.J., Wilson, E.L., Iding, R., NONSAP: A Structural Analysis Program for Static and Dynamic Response of Nonlinear Systems, Structural Engineering and Structural Mechanics, Department of Civil Engineering, Report No. UC SESM 74-3, University of Colifornia, Berkeley, California, 1974.
49. Wilson, E.L. and Habibullah, A., SAP90 Structural Analysis Programs, Computers and Structures Inc., Berkeley, California, USA, 1992.
50. Priscu, R., Popovici, A., Stematiu, D. and Stere, C., Earthquake Engineering for Large Dams, Second Edition, Editura Academiei, București, 1985.
51. Bayraktar, A., Beton Ağırlık Barajlarda Baraj-Su-Zemin Etkileşiminin Statik ve Dinamik Analizde Değerlendirilişi, Yüksek Lisans Tezi, KTÜ Fen Bilimleri Enstitüsü, Trabzon, 1991.

52. Calayır, Y., Beton Ağırlık Barajların Euler ve Lagrange Yaklaşımları Kullanılarak Dinamik Analizi, Doktora Tezi, KTÜ Fen Bilimleri Enstitüsü, Trabzon, 1994.
53. Wilson, E.L. and Khalvati, M., Finite Elements for The Dynamic Analysis of Fluid-Solid Systems, International Journal for Numerical Methods in Engineering, Vol.19, (1983) 1657-1668.
54. Bayraktar. A., Asinkronize Yer Hareketi Etkisindeki Baraj-Rezervuar-Temel Sistemlerinin Dinamik Davranışı, Doktora Tezi, KTÜ Fen Bilimleri Enstitüsü, Trabzon, 1995.
55. Calayır, Y. and Dumanoglu, A.A., Static and Dynamic Analysis of Fluid and Fluid-Structure Systems by the Lagrangian Method, Computers and Structures, Vol.49, No.4, (1993) 625-632.
56. Bayraktar, A., Dumanoglu, A.A. and Calayır, Y., Asynchronous Dynamic Analysis of Dam-Reservoir-Foundation Systems by the Lagrangian Approach, Computers and Structures, Vol.58, No.5, (1996) 925-935.
57. Calayır, Y., Dumanoglu, A.A. and Bayraktar, A., Earthquake Analysis of Gravity Dam-Reservoir Systems Using the Eulerian and Lagrangian Approaches, Computers and Structures, Vol.59, No.5, (1996) 877-890.
58. Bayraktar, A. and Dumanoglu, A.A., The Effect of the Asynchronous Ground Motion on Hydrodynamic Pressures, The Sixth International Conference on Civil and Structural Engineering Computing, 28th-30th August 1995, Cambridge, England.
59. Greeves, E.J. and Dumanoglu, A. A., The Implementation of an Efficient Computer Analysis for Fluid-Structure Systems Using the Eulerian Approach within SAP IV, Report No. UBCE-EE-89-10, University of Bristol, Department of Civil Engineering, Bristol, 1989
60. Westergaard, H.M., Water Pressures on Dams During Earthquakes, Transactions, ASCE, 98, 1835 (1933) 418-433.
61. Okomato, S., Introduction to Earthquake Engineering, Second Edition, University of Tokyo Press, Tokyo, 1984.

62. Muvafık, M., Kemer Barajların Statik ve Dinamik Analizi, Yüksek Lisans Tezi, KTÜ Fen Bilimleri Enstitüsü, Trabzon, 1993.
63. Muvafık, M., Bayraktar, A. and Dumanoglu, A.A., Kemer Barajların Üç Boyutlu Statik ve Dinamik Analizi, İnşaat Mühendisliğinde Gelişmeler 1.Teknik Kongre, 1993, Gazimağusa, KKTC, Cilt I, 21-30.
64. Aksoğan, O., Nonlinear Yapı Analizi, Yapı Mekaniğinde Son Gelişmeler, Ed: Ertepinar, A., Wasti, S.T. ve Aksoğan, O., Trabzon, (1986) 225-233.
65. Ersoy, U., Betonarme Temel İlkeler ve Taşıma Gücü Hesabı, Cilt 1, 2.Basım, Evrim Yayınevi ve Tic. Ltd. Şti., İstanbul, 1987.
66. Bicanic, N. and Zienkiewicz, O.C., Constitutive Model for Concrete Under Dynamic Loading, Earthquake Engineering and Structural Dynamics, Vol.11, (1983) 689-710.
67. Çakıroğlu, A., Özer, E., Malzeme ve Geometri Değişimi Bakımından Lineer Olmayan Sistemler, Cilt I, Matbaa Teknisyenleri Basımevi, İstanbul, 1980.
68. Zienkiewicz, O.C. and Taylor, R.L., The Finite Element Method, Cilt II, Mc Graw-Hill, 1991.
69. Drucker, D.C. and Prager, W., Soil Mechanics and Plastic Analysis on Limit Design, Quarterly Journal of Applied Math., 10, (1952) 157-165.
70. Özaydın, K., Zemin Mekaniği, Meya Matbaacılık ve Yayıncılık Ltd. Şti., İstanbul, 1989.
71. Bathe, K.J., Finite Element Procedures in Engineering Analysis, Prentice-Hall, Englewood Cliffs, New Jersey, 1982.
72. Chopra, A.K., Dynamics of Structures, Prentice-Hall, Englewood Cliffs, New Jersey 07632, USA, 1995.

73. Arch Dams; A Review of British Research and Development, Proceedings of the Symposium Held at the Institution of Civil Engineers, London, England, 1968.
74. Sucuoğlu, H., Barajlarda Yapı-Zemin Sisteminin Sonlu Elemanlar Yöntemi ile Dinamik Analizi, Su Yapıları Semineri, 28-30 Haziran 1988, Samsun, 140-158.
75. Dumanoğlu, A.A., The Accuracy of The Finite Element Method for Non-Reflecting Boundaries, Sakarya D.M.M. Akademisi Dergisi, Sayı MMA-7, (1980) 72-82.



6. ÖZGEÇMİŞ

Mehmet AKKÖSE, 1972 yılında İstanbul Bakırköy’de doğdu. İlk öğrenimini 1978-1983, orta ve lise öğrenimini ise 1983-1989 yılları arasında İstanbul’da tamamladı. 1990-1991 öğretim yılında Karadeniz Teknik Üniversitesi Mühendislik Mimarlık Fakültesi İnşaat Mühendisliği Bölümüne başladı. 1993-1994 öğretim yılında bu bölümden 6. sırada mezun oldu. Aynı yıl girdiği sınavı kazanarak mezun olduğu bölümde yüksek lisans öğrenimine başladı. Mart 1995’de Karadeniz Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsünde Araştırma Görevlisi olarak göreve başladı. Daha sonra Temmuz 1996’da Karadeniz Teknik Üniversitesi Mühendislik Mimarlık Fakültesi İnşaat Mühendisliği Bölümü Yapı Anabilim Dalına Araştırma Görevlisi olarak atandı. Bekar olan Mehmet AKKÖSE, İngilizce bilmekte ve halen yüksek lisans öğrenimi ile birlikte K.T.Ü İnşaat Mühendisliği Bölümünde görevine devam etmektedir.