

139211

KARADENİZ TEKNİK ÜNİVERSİTESİ  
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

İNŞAAT MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI

LAGRANGE YAKLAŞIMI İLE  
KEMER BARAJ-SU-ZEMİN SİSTEMLERİNİN MALZEME BAKIMINDAN  
LİNEER VE LİNEER OLMAYAN DİNAMİK ANALİZİ

İnş. Yük. Müh. Mehmet AKKÖSE

Karadeniz Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsünde  
“Doktor”

Ünvanı Verilmesi İçin Kabul Edilen Tezdir.

Tezin Enstitüye Verildiği Tarih: 16.12.2003

Tezin Savunma Tarihi : 13.01.2004

139211

Tez Danışmanı : Prof. Dr. Alemdar BAYRAKTAR

Jüri Üyesi : Prof. Dr. Ing. Ahmet DURMUŞ

Jüri Üyesi : Prof. Dr. Sami KARADENİZ

Jüri Üyesi : Prof. Dr. Zekai CELEP

Jüri Üyesi : Doç. Dr. Adem DOĞANGÜN

Berrettar  
Doktor  
Karadeniz  
Mühendislik  
Enstitüsü

Enstitü Müdürü : Prof. Dr. Yusuf AYVAZ

AYVAZ

Trabzon 2004

T.C. YÜKSEKÖĞRETİM KURULU  
DOKÜMANTASYON MERKEZİ

## ÖNSÖZ

“Lagrange Yaklaşımı İle Kemer Baraj-Su-Zemin Sistemlerinin Malzeme Bakımından Lineer ve Lineer Olmayan Dinamik Analizi” isimli bu çalışma; Karadeniz Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı’nda Doktora Tezi olarak gerçekleştirilmiştir.

Bu denli önemli ve orijinal bir konuda çalışmamı sağlayan, çalışmamın her aşamasında benimle yakından ilgilenen, çalışmam boyunca araştırma zevki ve bilimsel düşünce disiplini aşılıp ufkumu açan, engin bilgi ve tecrübelerinden daima yararlandığım, 3 Kasım 2002 tarihinde Türkiye Büyük Millet Meclisi 22. Dönem Trabzon Milletvekili seçilen ilk Yönetici Hocam Sayın Prof. Dr. A. Aydın DUMANOĞLU’na minnet ve şükranlarımı sunmayı her zaman için bir borç bilirim.

İlk Yönetici Hocam’ın Trabzon Milletvekili seçilmesinden sonra yoğun işlerine rağmen, Yönetici Hocam olmayı kabul edip tez çalışmamın devamını sağlayan, çalışmalarım sırasında bilgi, tecrübe ve yardımlarını esirgemeyen ve çalışmayı titizlikle inceleyip bilgilerini paylaşan Hocam Sayın Prof. Dr. Alemdar BAYRAKTAR’a teşekkürlerimi sunarım.

Tez çalışmamı inceleyerek bilgi ve tavsiyelerini paylaşan Sayın Hocalarım Prof. Dr. Ing. Ahmet DURMUŞ’a, Prof. Dr. Zekai CELEP’e, Prof. Dr. Sami KARADENİZ’e ve Doç. Dr. Adem DOĞANGÜN’e ayrı ayrı teşekkür ederim.

Çalışmalarım sırasında bilgi ve yardımlarını esirgemeyen Sayın Prof. Dr. Ragıp ERDÖL’e, Prof. Dr. Ümit UZMAN’a, Yrd. Doç. Dr. Kurtuluş SOYLUK’a, Araş. Gör. Dr. Süleyman ADANUR’a, Araş. Gör. Dr. Volkan KAHYA’ya, Araş. Gör. Şevket ATEŞ’e ve Araş. Gör. Kemal HACİEFENDİOĞLU’na teşekkür ederim. Ayrıca, öğrenim hayatım süresince bana bilgi ve emeği geçen, değişik aşamalarda beni yönlendiren tüm hocalarımı saygıyla anar, kendilerine minnettar olduğumu belirtmek isterim.

Öğrenim hayatımın bu önemli aşamasında, yaşamında her türlü imkan ve desteği sağlayan rahmetli babam Ahmet AKKÖSE’yi saygı ve hürmetle anıyorum. Maddi ve manevi desteklerini eksik etmeyen başta annem Huriye AKKÖSE’ye, ağabeyim Mustafa AKKÖSE’ye, kız kardeşim Hatice AKKÖSE’ye ve ayrıca çalışmalarım sırasında gösterdiği sabır ve şefkatinden dolayı eşim Gülsün AKKÖSE’ye müteşekkir olduğumu belirtir, bu çalışmamın ülkemize faydalı olmasını temenni ederim.

Mehmet AKKÖSE

Trabzon 2004

## İÇİNDEKİLER

|   | <u>Sayfa No</u> |
|---|-----------------|
| ÖNSÖZ.....  | II              |
| İÇİNDEKİLER.....  | III             |
| ÖZET .....  | VIII            |
| SUMMARY .....   | IX              |
| ŞEKİLLER DİZİNİ.....  | X               |
| TABLolar DİZİNİ.....  | XIX             |
| SEMBOLLER DİZİNİ.....   | XX              |
| 1. GENEL BİLGİLER.....  | 1               |
| 1.1. Giriş .....  | 1               |
| 1.2. Literatür Araştırması.....   | 2               |
| 1.2.1. Sıvı-Yapı Etkileşimi ile İlgili Çalışmalar .....                     | 2               |
| 1.2.1.1. Westergaard Yaklaşımı.....   | 2               |
| 1.2.1.2. Euler Yaklaşımı .....  | 3               |
| 1.2.1.3. Lagrange Yaklaşımı.....  | 5               |
| 1.2.2. Beton Barajların Lineer Olmayan Davranışı ile İlgili Çalışmalar..... | 7               |
| 1.2.2.1. Çatlak .....   | 7               |
| 1.2.2.2. Kavitasyon .....   | 11              |
| 1.2.2.3. Büzülme Derzleri (Contraction Joint) .....                         | 12              |
| 1.3. Tezin İçeriği.....   | 13              |
| 1.4. Lineer Olmayan Malzeme Davranışı.....                                  | 14              |
| 1.4.1. Akma Teorisi .....   | 14              |
| 1.4.1.1. Akma Kriteri .....   | 15              |
| 1.4.1.2. Akma Kuralı .....  | 17              |
| 1.4.1.3. Akma Teorisinde Aranılan Temel Şartlar.....                        | 18              |
| 1.5. Üç Boyutlu Malzeme Modelleri .....                                     | 19              |
| 1.5.1. Lineer Elastik Malzeme Modeli .....                                  | 19              |
| 1.5.2. Eğri Tanımlama Modeli.....   | 20              |
| 1.5.3. Drucker-Prager Malzeme Modeli .....                                  | 23              |

|              |  |    |
|--------------|--|----|
| 1.6.         | Üç Boyutlu Sıvı-Yapı Etkileşiminde Lagrange Yaklaşımı .....  | 27 |
| 1.6.1.       | Sıvı Davranışının Esasları.....  | 27 |
| 1.6.2.       | Lagrange Sıvı Davranışı ile İlgili Temel Bağıntılar .....  | 29 |
| 1.6.3.       | Sıvı-Yapı Sistemlerinin Lagrange Yaklaşımına Göre Sonlu Eleman Formülasyonu .....                            | 33 |
| 1.6.3.1.     | Sıvı Sistemlerin Formülasyonu.....   | 33 |
| 1.6.3.1.1.   | Sıvı Sonlu Eleman Matrislerinin Elde Edilişi.....  | 38 |
| 1.6.3.1.1.1. | Rijitlik Matrisi .....   | 38 |
| 1.6.3.1.1.2. | Kütle Matrisi.....   | 42 |
| 1.6.3.1.1.3. | Yüzey Rijitlik Matrisi.....  | 43 |
| 1.6.3.2.     | Sıvı Sistemlerin Sonlu Eleman Formülasyonunda İndirgenmiş İntegrasyon Kullanımı .....                        | 43 |
| 1.6.3.2.1.   | Yakınsaklık Şartı .....  | 44 |
| 1.6.3.2.2.   | Tekillik Şartı .....   | 46 |
| 1.6.3.3.     | Sıvı-Yapı Sistemlerin Ortak Formülasyonu .....   | 48 |
| 1.7.         | Lineer ve Lineer Olmayan Sistemlerin Çözümü İçin Direkt İntegrasyon Yöntemleri .....                         | 49 |
| 1.7.1.       | Wilson- $\theta$ Yöntemi .....   | 50 |
| 1.7.2.       | Lineer Olmayan Sistemlerin Çözümünde Runge-Kutta Yöntemi .....   | 53 |
| 2.           | YAPILAN ÇALIŞMALAR .....   | 54 |
| 2.1.         | Giriş .....  | 54 |
| 2.2.         | Üç Boyutlu 8-Düğüm Noktalı Sıvı Sonlu Elemanın NONSAP Yapı Analiz Programına Eklenmesi ve Test Edilmesi..... | 54 |
| 2.2.1.       | Sıvı Elemanın Performansı .....  | 55 |
| 2.2.1.1.     | Stabilite Testi.....   | 55 |
| 2.2.1.2.     | Statik Analiz .....  | 56 |
| 2.2.1.3.     | Modal Analiz .....   | 57 |
| 2.2.2.       | Sıvı Elemanın Sıvı-Yapı Etkileşimindeki Performansı .....  | 58 |
| 2.2.2.1.     | Modal Analiz .....   | 58 |
| 2.2.2.2.     | Dinamik Analiz.....  | 59 |
| 2.3.         | Üç Boyutlu Drucker-Prager Malzeme Modelinin NONSAP Yapı Analiz Programına Eklenmesi ve Test Edilmesi.....    | 63 |
| 2.3.1.       | Birinci Aşama İntegrasyon İşlemleri.....   | 63 |
| 2.3.2.       | İkinci Aşama İntegrasyon İşlemleri.....  | 70 |
| 2.3.3.       | Drucker-Prager Malzeme Modeli ile İki ve Üç Boyutlu Statik Analiz.....                                       | 72 |

|            |   |     |
|------------|---|-----|
| 2.3.4.     | Drucker-Prager Malzeme Modeli ile İki ve Üç Boyutlu Dinamik Analiz...   | 75  |
| 2.4.       | Kemer Barajların Malzeme Bakımından Lineer ve Lineer Olmayan Dinamik Davranışının Lagrange Yaklaşımı ile İncelenmesi..... | 78  |
| 2.4.1.     | Kemer Baraj-Su-Zemin Sistemi .....  | 78  |
| 2.4.1.1.   | Kemer Baraj.....  | 78  |
| 2.4.1.2.   | Rezervuar Suyu.....   | 79  |
| 2.4.1.3.   | Kaya Zemin .....  | 80  |
| 2.4.1.3.1. | Kaya Zemin Modelinin Şekli.....   | 81  |
| 2.4.1.3.2. | Kaya Zemin Modelinin Boyutu.....  | 82  |
| 2.4.2.     | Tip-5 Kemer Baraj-Su-Zemin Sistemi, Sönüm ve Yer Hareketi.....  | 83  |
| 2.4.2.1.   | Barajın Sonlu Eleman Modeli .....   | 84  |
| 2.4.2.2.   | Baraj-Su Etkileşiminin Sonlu Eleman Modeli .....  | 85  |
| 2.4.2.3.   | Baraj-Zemin Etkileşiminin Sonlu Eleman Modeli .....   | 86  |
| 2.4.2.4.   | Baraj-Su-Zemin Etkileşiminin Sonlu Eleman Modeli.....   | 87  |
| 2.4.2.5.   | Sönüm.....  | 89  |
| 2.4.2.6.   | Yer Hareketi.....   | 91  |
| 2.4.3.     | Tip-5 Kemer Barajının Lineer Dinamik Analizi .....  | 91  |
| 2.4.4.     | Tip-5 Kemer Barajının Lineer Olmayan Dinamik Analizi.....   | 93  |
| 3.         | BULGULAR ve İRDELEMELER .....   | 95  |
| 3.1.       | Giriş .....   | 95  |
| 3.2.       | Lineer Analiz Sonuçlarının Değerlendirilmesi.....   | 96  |
| 3.2.1.     | Rijit Zemin Durumunda Baraj-Su Etkileşimi .....   | 96  |
| 3.2.1.1.   | Yerdeğiştirmeler .....  | 96  |
| 3.2.1.2.   | Hidrodinamik Basınçlar.....   | 97  |
| 3.2.1.3.   | Gerilmeler .....  | 98  |
| 3.2.2.     | Esnek Zemin Durumunda Baraj-Su Etkileşimi .....   | 106 |
| 3.2.2.1.   | Yerdeğiştirmeler .....  | 106 |
| 3.2.2.2.   | Hidrodinamik Basınçlar.....   | 107 |
| 3.2.2.3.   | Gerilmeler .....  | 108 |
| 3.2.3.     | Kaya Zemin Özelliklerinin Kemer Baraj Davranışına Etkisi .....  | 116 |
| 3.2.3.1.   | Rezervuarın Boş Olması Durumu.....  | 116 |
| 3.2.3.2.   | Rezervuarın Dolu Olması Durumu .....  | 117 |
| 3.2.4.     | Rezervuar Su Seviyesindeki Değişimin Kemer Baraj Davranışına Etkisi ...   | 124 |

|          |  |     |
|----------|--|-----|
| 3.2.4.1. | Rijit Zemin Durumu .....   | 124 |
| 3.2.4.1. | Esnek Zemin Durumu.....  | 125 |
| 3.3.     | Eğri Tanımlama Modeli ile Lineer Olmayan Analiz Sonuçlarının Değerlendirilmesi .....         | 132 |
| 3.3.1.   | Rijit Zemin Durumunda Baraj-Su Etkileşimi .....  | 132 |
| 3.3.1.1. | Yerdeğiştirmeler .....   | 132 |
| 3.3.1.2. | Hidrodinamik Basınçlar.....  | 133 |
| 3.3.1.3. | Gerilmeler .....   | 134 |
| 3.3.2.   | Esnek Zemin Durumunda Baraj-Su Etkileşimi .....  | 139 |
| 3.3.2.1. | Yerdeğiştirmeler .....   | 139 |
| 3.3.2.2. | Hidrodinamik Basınçlar.....  | 140 |
| 3.3.2.3. | Gerilmeler .....   | 142 |
| 3.3.3.   | Kaya Zemin Özelliklerinin Kemer Baraj Davranışına Etkisi .....                               | 146 |
| 3.3.3.1. | Rezervuarın Boş Olması Durumu.....   | 146 |
| 3.3.3.2. | Rezervuarın Dolu Olması Durumu .....   | 147 |
| 3.3.4.   | Rezervuar Su Seviyesindeki Değişimin Kemer Baraj Davranışına Etkisi ...                      | 154 |
| 3.3.4.1. | Rijit Zemin Durumu .....   | 154 |
| 3.3.4.2. | Esnek Zemin Durumu.....  | 155 |
| 3.4.     | Drucker-Prager Malzeme Modeli ile Lineer Olmayan Analiz Sonuçlarının Değerlendirilmesi ..... | 162 |
| 3.4.1.   | Rijit Zemin Durumunda Baraj-Su Etkileşimi .....  | 162 |
| 3.4.1.1. | Yerdeğiştirmeler .....   | 162 |
| 3.4.1.2. | Hidrodinamik Basınçlar.....  | 164 |
| 3.4.1.3. | Gerilmeler .....   | 164 |
| 3.4.2.   | Esnek Zemin Durumunda Baraj-Su Etkileşimi .....  | 171 |
| 3.4.2.1. | Yerdeğiştirmeler .....   | 171 |
| 3.4.2.2. | Hidrodinamik Basınçlar.....  | 172 |
| 3.4.2.3. | Gerilmeler .....   | 172 |
| 3.4.3.   | Kaya Zemin Özelliklerinin Kemer Baraj Davranışına Etkisi .....                               | 179 |
| 3.4.3.1. | Rezervuarın Boş Olması Durumu.....   | 179 |
| 3.4.3.2. | Rezervuarın Dolu Olması Durumu .....   | 180 |
| 3.4.4.   | Rezervuar Su Seviyesindeki Değişimin Kemer Baraj Davranışına Etkisi ...                      | 185 |
| 3.4.4.1. | Rijit Zemin Durumu .....   | 185 |
| 3.4.4.2. | Esnek Zemin Durumu.....  | 186 |

|        |  |     |
|--------|--|-----|
| 3.5.   | Lineer ve Lineer Olmayan Analiz Sonuçlarının Karşılaştırılması ..... | 191 |
| 3.5.1. | Yerdeğiştirmeler .....   | 191 |
| 3.5.2. | Hidrodinamik Basınçlar .....   | 193 |
| 3.5.3. | Gerilmeler .....   | 194 |
| 4.     | SONUÇLAR ve ÖNERİLER .....   | 197 |
| 5.     | KAYNAKLAR .....  | 202 |
|        | ÖZGEÇMİŞ .....   | 211 |



## ÖZET

Bu tez çalışmasında, kemer barajların malzeme bakımından lineer ve lineer olmayan dinamik davranışı Lagrange yaklaşımı ile incelenmektedir. Baraj betonunun lineer olmayan davranışı, Eğri Tanımlama ve Drucker-Prager modeli ile tanımlanmıştır. Üç boyutlu Drucker-Prager modeli ve üç boyutlu 8-düğüm noktalı Lagrange sıvı sonlu eleman geliştirilip, FORTRAN 77 programlama dilinde kodlanarak NONSAP yapı analiz programına eklenmiştir. Baraj-su etkileşimi, geliştirilen bu program ile incelenmiştir. Kaya zemin ve suyun lineer elastik izotrop malzeme olduğu kabul edilmektedir. Rezervuar su seviyesindeki değişimin ve kaya zemin özelliklerinin baraj davranışına etkisi de ayrıca incelenmektedir. Uygulama amacıyla, 1968 yılında Londra'da düzenlenen "Kemer Barajlar" sempozyumunda önerilen beş tip kemer baraj içerisinde çift eğrilikli olan Tip-5 kemer barajı seçilmiştir.

Bu tez beş bölümden oluşmaktadır. Birinci bölüm, sıvı-yapı etkileşimi ve beton barajların lineer olmayan davranışı ile ilgili literatür araştırmasından ibarettir. Tezde kullanılan üç boyutlu malzeme modelleri, üç boyutlu Lagrange sıvı eleman, lineer ve lineer olmayan sistemlerin çözüm yöntemleri ile ilgili formülasyonlar da bu bölümde verilmektedir. İkinci bölümde, geliştirilen üç boyutlu 8-düğüm noktalı Lagrange sıvı elemanın ve Drucker-Prager modelinin NONSAP programına eklenmesi ve test edilmesi, ayrıca seçilen kemer baraj için hazırlanan baraj, baraj-su, baraj-zemin ve baraj-su-zemin sistemlerine ait sonlu eleman modelleri verilmektedir. Lineer ve lineer olmayan dinamik analiz ile ilgili ayrıntılar da bu bölümdedir. Üçüncü bölüm, gerçekleştirilen analizlerden elde edilen bulgular ve bunların irdelenmesinden oluşmaktadır. Dördüncü bölümde ise, bu tez çalışmasından çıkarılan sonuçlar ve öneriler verilmekte ve kemer barajlar gibi narin yapıların dinamik analizlerinde su ve zemin etkileriyle birlikte lineer olmayan malzeme davranışında Drucker-Prager modelinin dikkate alınması gerektiği belirtilmektedir. Beşinci bölüm, tezde yararlanılan kaynaklara ayrılmıştır.

**Anahtar Kelimeler:** Lineer Dinamik Analiz, Lineer Olmayan Dinamik Analiz, Eğri Tanımlama Modeli, Drucker-Prager Modeli, Baraj-Su-Zemin Etkileşimi, İndirgenmiş İntegrasyon, Runge-Kutta Yöntemi, Hidrodinamik Etki, Sonlu Eleman Yöntemi



## SUMMARY

### **Materially Linear and Nonlinear Dynamic Analyses of Arch Dam-Water-Foundation Systems by Lagrangian Approach**

In this thesis, materially linear and nonlinear dynamic responses of arch dam-water-foundation systems are investigated by Lagrangian approach. Curve description and Drucker-Prager models are used to represent the nonlinear behavior of the dam concrete. Three-dimensional Drucker-Prager model and three-dimensional 8-noded Lagrangian fluid finite element are incorporated into NONSAP, a general-purpose structural analysis program, by coding in the language FORTRAN 77. The modified program was employed in the response calculations. Water and foundation rock are assumed to be linear elastic. As a numerical example, Type-5 arch dam is selected as was suggested in the symposium on Arch Dams, London, 1968.

This thesis consists of five chapters. In the first chapter, a literature survey associated with fluid-structure interaction and the nonlinear behavior of concrete dams is given in detail. This chapter also contains formulations associated with three-dimensional material models, Lagrangian fluid elements and solution techniques of linear and nonlinear equations used in the thesis. In the second chapter, the general performance of three-dimensional Lagrangian fluid finite elements in fluid-structure coupling is evaluated and developed Drucker-Prager model is tested. In addition, three-dimensional finite element models of dam, dam-water interaction, dam-foundation rock interaction and dam-water-foundation rock interaction systems prepared for the selected arch dam are introduced. Third chapter contains the findings obtained from the linear and nonlinear analyses. The conclusions and recommendations deduced from the analyses are given in chapter four. In this chapter, it is emphasized that water in the reservoir and foundation rock should be considered in the dynamic analyses of the slender structures such as arch dams. In addition, it is pointed out that Drucker-Prager model can be used to represent the nonlinear behavior of the concrete material. Finally, the references are presented in the fifth chapter.

**Keywords:** Linear Dynamic Analysis, Nonlinear Dynamic Analysis, Curve Description Model, Drucker-Prager Model, Dam-Water-Foundation Interaction, Reduced Integration, Runge-Kutta Method, Hydrodynamic Effect, Finite Element Method

## ŞEKİLLER DİZİNİ

|   | <u>Sayfa No</u> |
|---|-----------------|
| Şekil 1.1. Tam plastik bir malzeme için akma yüzeyi (Chen ve Mizuno, 1990). ....  | 16              |
| Şekil 1.2. Akma kuralı (Chen ve Mizuno, 1990). ....   | 18              |
| Şekil 1.3. Bir dış etki ile oluşan gerilme yörüngeleri (Chen ve Mizuno, 1990).....  | 18              |
| Şekil 1.4. Eğri tanımlama modelinde yükleme durumu için hacimsel elastisite modülünün tanımı (Bathe vd., 1974).. ....   | 22              |
| Şekil 1.5. Eğri tanımlama modelinde boşalma durumu için hacimsel elastisite modülünün tanımı (Bathe vd., 1974). ....  | 22              |
| Şekil 1.6. Eğri tanımlama modelinde yükleme durumu için kayma modülünün tanımı (Bathe vd., 1974). ....  | 22              |
| Şekil 1.7. Coulomb ve Drucker-Prager kırılma kriteri (Chen ve Mizuno, 1990).....  | 25              |
| Şekil 1.8. Üç boyutlu 8-düğüm noktalı sıvı sonlu eleman .....   | 34              |
| Şekil 1.9. İki boyutlu 4-düğüm noktalı sıvı yüzey elemanı.....  | 34              |
| Şekil 1.10. Wilson- $\theta$ yöntemi (Chopra, 1995). ....   | 50              |
| Şekil 1.11. Runge-Kutta yöntemi (Chen ve Mizuno, 1990).....   | 53              |
| Şekil 2.1. Stabilite testi için kullanılan üç boyutlu sıvı tankı (a) ve 8-düğüm noktalı sıvı elemanlardan oluşan sonlu eleman ağı (b) .....                   | 55              |
| Şekil 2.2. Üç boyutlu sıvı-yapı etkileşim modeli.....   | 59              |
| Şekil 2.3. Üç boyutlu sıvı-yapı etkileşimi için sonlu eleman modeli.....  | 59              |
| Şekil 2.4. Westergaard yaklaşımında basınç dağılımı.....  | 61              |
| Şekil 2.5. Harmonik hareket etkisindeki sıvı-yapı etkileşim modelinin sıvı-yapı ara yüzeyindeki hidrodinamik basınçların çeşitli zaman adımlarındaki değişimi | 62              |
| Şekil 2.6. Çekme gerilmelerinin kontrolü (Chen ve Mizuno, 1990). ....   | 65              |
| Şekil 2.7. Ölçeklendirme işlemi (Chen ve Mizuno, 1990). ....  | 67              |
| Şekil 2.8. Ölçeklendirilmemiş gerilmenin izlediği yörünge (Chen ve Mizuno, 1990)..  | 67              |
| Şekil 2.9. Uzunluğu boyunca dik kuvvetlerle yüklenmiş sonsuz uzunlukta bir yapı.....  | 72              |
| Şekil 2.10. Uzunluğu boyunca dik kuvvetlerle yüklenmiş sonlu uzunlukta bir yapı.....  | 73              |
| Şekil 2.11. Düzlem şekildeğiştirme problemi .....   | 74              |
| Şekil 2.12. Düzlem şekildeğiştirme probleminin üç boyutlu özdeşi.....   | 74              |
| Şekil 2.13. Kemer baraj-su-zemin sistemi (Fok ve Chopra, 1985). ....  | 79              |
| Şekil 2.14. İdealleştirilmiş kemer baraj-su-zemin sistemi (Fok ve Chopra, 1985). ....   | 80              |

|  |     |
|--|-----|
| Şekil 2.15. Kaya zemin bölgesinin idealleştirilmiş şekli (Fok ve Chopra, 1985).....  | 81  |
| Şekil 2.16. Kaya zemin bölgesinde zemin modelinin yarı dairesel düzlemlerle oluşumu (Fok ve Chopra, 1985).....   | 82  |
| Şekil 2.17. Tip-5 kemer barajının kesit özellikleri (Arch Dams, 1968).....   | 83  |
| Şekil 2.18. Tip-5 kemer barajının yerleştirildiği vadinin en kesiti (Arch Dams, 1968)...   | 84  |
| Şekil 2.19. Tip-5 kemer barajının sonlu eleman modeli .....  | 85  |
| Şekil 2.20. Tip-5 kemer baraj-su etkileşim sisteminin sonlu eleman modeli.....   | 86  |
| Şekil 2.21. Tip-5 kemer baraj-su etkileşim sistemine ait sonlu eleman modelinin iki boyutlu görünüşü.....  | 86  |
| Şekil 2.22. Tip-5 kemer baraj-zemin etkileşim sisteminin sonlu eleman modeli .....   | 87  |
| Şekil 2.23. Tip-5 kemer baraj-su-zemin etkileşim sisteminin sonlu eleman modeli.....   | 88  |
| Şekil 2.24. Tip-5 kemer baraj-su-zemin etkileşim sistemine ait sonlu eleman modelinin iki boyutlu görünüşü .....   | 88  |
| Şekil 2.25. Rayleigh sönümü için sönüm oranı ile frekans arasındaki ilişki.....  | 90  |
| Şekil 2.26. 18 Mayıs 1940 Imperial Valley depreminin El-Centro bileşeni .....  | 91  |
| Şekil 2.27. Eğri Tanımlama modelinde baraj betonu için kabul edilen gerilme-şekildeğiştirme ilişkisi.....  | 94  |
| Şekil 3.1. Lineer dinamik analizde; zeminin rijit, rezervuarın boş ve dolu olması durumu için baraj memba yüzeyinde elde edilen yerdeğiştirmeler ile baraj kretinde elde edilen yerdeğiştirmelerin dinamik etki süresince değişimi ..... | 97  |
| Şekil 3.2. Lineer dinamik analizde; zeminin rijit olması durumu için 408, 296, 199, 118, 53 ve 4 nolu sıvı elemanlarda elde edilen hidrodinamik basınçların dinamik etki süresince değişimi .....  | 99  |
| Şekil 3.3. Lineer dinamik analizde; zeminin rijit, rezervuarın boş ve dolu olması durumu için barajın memba ve mansap yüzeyinde x-x doğrultusunda elde edilen maksimum çekme eş gerilme eğrileri .....                                   | 100 |
| Şekil 3.4. Lineer dinamik analizde; zeminin rijit, rezervuarın boş ve dolu olması durumu için barajın memba ve mansap yüzeyinde y-y doğrultusunda elde edilen maksimum çekme eş gerilme eğrileri .....                                   | 101 |
| Şekil 3.5. Lineer dinamik analizde; zeminin rijit, rezervuarın boş ve dolu olması durumu için barajın memba ve mansap yüzeyinde z-z doğrultusunda elde edilen maksimum çekme eş gerilme eğrileri .....                                   | 102 |
| Şekil 3.6. Lineer dinamik analizde; zeminin rijit, rezervuarın boş ve dolu olması durumu için barajın memba ve mansap yüzeyinde x-x doğrultusunda elde edilen minimum basınç eş gerilme eğrileri.....                                    | 103 |
| Şekil 3.7. Lineer dinamik analizde; zeminin rijit, rezervuarın boş ve dolu olması durumu için barajın memba ve mansap yüzeyinde y-y doğrultusunda elde edilen minimum basınç eş gerilme eğrileri.....                                    | 104 |

|  |     |
|--|-----|
| Şekil 3.8. Lineer dinamik analizde; zeminin rijit, rezervuarın boş ve dolu olması durumu için barajın memba ve mansap yüzeyinde z-z doğrultusunda elde edilen minimum basınç eş gerilme eğrileri.....  | 105 |
| Şekil 3.9. Lineer dinamik analizde; zeminin esnek, rezervuarın boş ve dolu olması durumu için baraj memba yüzeyinde elde edilen yerdeğiştirmeler ile baraj kretinde elde edilen yerdeğiştirmelerin dinamik etki süresince değişimi .....   | 107 |
| Şekil 3.10. Lineer dinamik analizde; zeminin esnek olması durumu için 408, 296, 199, 118, 53 ve 4 nolu sıvı elemanlarda elde edilen hidrodinamik basınçların dinamik etki süresince değişimi.....  | 109 |
| Şekil 3.11. Lineer dinamik analizde; zeminin esnek, rezervuarın boş ve dolu olması durumu için barajın memba ve mansap yüzeyinde x-x doğrultusunda elde edilen maksimum çekme eş gerilme eğrileri.....   | 110 |
| Şekil 3.12. Lineer dinamik analizde; zeminin esnek, rezervuarın boş ve dolu olması durumu için barajın memba ve mansap yüzeyinde y-y doğrultusunda elde edilen maksimum çekme eş gerilme eğrileri.....   | 111 |
| Şekil 3.13. Lineer dinamik analizde; zeminin esnek, rezervuarın boş ve dolu olması durumu için barajın memba ve mansap yüzeyinde z-z doğrultusunda elde edilen maksimum çekme eş gerilme eğrileri.....   | 112 |
| Şekil 3.14. Lineer dinamik analizde; zeminin esnek, rezervuarın boş ve dolu olması durumu için barajın memba ve mansap yüzeyinde x-x doğrultusunda elde edilen minimum basınç eş gerilme eğrileri .....  | 113 |
| Şekil 3.15. Lineer dinamik analizde; zeminin esnek, rezervuarın boş ve dolu olması durumu için barajın memba ve mansap yüzeyinde y-y doğrultusunda elde edilen minimum basınç eş gerilme eğrileri .....  | 114 |
| Şekil 3.16. Lineer dinamik analizde; zeminin esnek, rezervuarın boş ve dolu olması durumu için barajın memba ve mansap yüzeyinde z-z doğrultusunda elde edilen minimum basınç eş gerilme eğrileri .....  | 115 |
| Şekil 3.17. Memba tarafından Tip-5 kemer barajının gövdesi.....  | 116 |
| Şekil 3.18. Lineer dinamik analizde; rezervuarın boş olması durumu için baraj memba yüzeyinde elde edilen yerdeğiştirmeler ile $E_f/E_c$ oranının sonsuz, 2.00, 1.00, 0.50 ve 0.25 değerleri için baraj kretinde elde edilen yerdeğiştirmelerin dinamik etki süresince değişimi.....             | 118 |
| Şekil 3.19. Lineer dinamik analizde; rezervuarın boş ve $E_f/E_c$ oranının sonsuz, 2.00, 1.00, 0.50 ve 0.25 değerleri için Tip-5 kemer barajının E-E kesitinde x-x, y-y ve z-z doğrultusunda elde edilen memba yüzeyi maksimum çekme gerilmelerinin sağ yamaçtan sol yamaca doğru değişimi.....  | 119 |
| Şekil 3.20. Lineer dinamik analizde; rezervuarın boş ve $E_f/E_c$ oranının sonsuz, 2.00, 1.00, 0.50 ve 0.25 değerleri için Tip-5 kemer barajının E-E kesitinde x-x, y-y ve z-z doğrultusunda elde edilen mansap yüzeyi maksimum çekme gerilmelerinin sağ yamaçtan sol yamaca doğru değişimi..... | 120 |

- Şekil 3.21. Lineer dinamik analizde; rezervuarın dolu olması durumu için baraj memba yüzeyinde elde edilen yerdeğiştirmeler ile  $E_f/E_c$  oranının sonsuz, 2.00, 1.00, 0.50 ve 0.25 değerleri için baraj kretinde elde edilen yerdeğiştirmelerin dinamik etki süresince değişimi..... 121
- Şekil 3.22. Lineer dinamik analizde; rezervuarın dolu ve  $E_f/E_c$  oranının sonsuz, 2.00, 1.00, 0.50 ve 0.25 değerleri için Tip-5 kemer barajının E-E kesitinde x-x, y-y ve z-z doğrultusunda elde edilen memba yüzeyi maksimum çekme gerilmelerinin sağ yamaçtan sol yamaca doğru değişimi..... 122
- Şekil 3.23. Lineer dinamik analizde; rezervuarın dolu ve  $E_f/E_c$  oranının sonsuz, 2.00, 1.00, 0.50 ve 0.25 değerleri için Tip-5 kemer barajının E-E kesitinde x-x, y-y ve z-z doğrultusunda elde edilen mansap yüzeyi maksimum çekme gerilmelerinin sağ yamaçtan sol yamaca doğru değişimi..... 123
- Şekil 3.24. Lineer dinamik analizde; zeminin rijit olması durumu için baraj memba yüzeyinde elde edilen yerdeğiştirmeler ile rezervuardaki su yüksekliğinin 120, 100, 80, 60 ve 40 m olması durumu için baraj kretinde elde edilen yerdeğiştirmelerin dinamik etki süresince değişimi..... 126
- Şekil 3.25. Lineer dinamik analizde; zeminin rijit ve rezervuardaki su yüksekliğinin 120, 100, 80, 60 ve 40 m olması durumu için Tip-5 kemer barajının E-E kesitinde x-x, y-y ve z-z doğrultusunda elde edilen memba yüzeyi maksimum çekme gerilmelerinin sağ yamaçtan sol yamaca doğru değişimi 127
- Şekil 3.26. Lineer dinamik analizde; zeminin rijit ve rezervuardaki su yüksekliğinin 120, 100, 80, 60 ve 40 m olması durumu için Tip-5 kemer barajının E-E kesitinde x-x, y-y ve z-z doğrultusunda elde edilen mansap yüzeyi maksimum çekme gerilmelerinin sağ yamaçtan sol yamaca doğru değişimi 128
- Şekil 3.27. Lineer dinamik analizde; zeminin esnek olması durumu için baraj memba yüzeyinde elde edilen yerdeğiştirmeler ile rezervuardaki su yüksekliğinin 120, 100, 80, 60 ve 40 m olması durumu için baraj kretinde elde edilen yerdeğiştirmelerin dinamik etki süresince değişimi..... 129
- Şekil 3.28. Lineer dinamik analizde; zeminin esnek ve rezervuardaki su yüksekliğinin 120, 100, 80, 60 ve 40 m olması durumu için Tip-5 kemer barajının E-E kesitinde x-x, y-y ve z-z doğrultusunda elde edilen memba yüzeyi maksimum çekme gerilmelerinin sağ yamaçtan sol yamaca doğru değişimi 130
- Şekil 3.29. Lineer dinamik analizde; zeminin esnek ve rezervuardaki su yüksekliğinin 120, 100, 80, 60 ve 40 m olması durumu için Tip-5 kemer barajının E-E kesitinde x-x, y-y ve z-z doğrultusunda elde edilen mansap yüzeyi maksimum çekme gerilmelerinin sağ yamaçtan sol yamaca doğru değişimi 131
- Şekil 3.30. Eğri Tanımlama modeli ile lineer olmayan dinamik analizde; zeminin rijit, rezervuarın boş ve dolu olması durumu için baraj memba yüzeyinde elde edilen yerdeğiştirmeler ile baraj kretinde elde edilen yerdeğiştirmelerin dinamik etki süresince değişimi..... 133
- Şekil 3.31. Eğri Tanımlama modeli ile lineer olmayan dinamik analizde; zeminin rijit olması durumu için 408, 296, 199, 118, 53 ve 4 nolu sıvı elemanlarda elde edilen hidrodinamik basınçların dinamik etki süresince değişimi ..... 135

|   |     |
|---|-----|
| Şekil 3.32. Eğri Tanımlama modeli ile lineer olmayan dinamik analizde;<br>zeminin rijit, rezervuarın boş ve dolu olması durumu için barajın<br>mamba ve mansap yüzeyinde x-x doğrultusunda elde edilen maksimum<br>çekme eş gerilme eğrileri .....  | 136 |
| Şekil 3.33. Eğri Tanımlama modeli ile lineer olmayan dinamik analizde;<br>zeminin rijit, rezervuarın boş ve dolu olması durumu için barajın<br>mamba ve mansap yüzeyinde y-y doğrultusunda elde edilen maksimum<br>çekme eş gerilme eğrileri .....  | 137 |
| Şekil 3.34. Eğri Tanımlama modeli ile lineer olmayan dinamik analizde;<br>zeminin rijit, rezervuarın boş ve dolu olması durumu için barajın<br>mamba ve mansap yüzeyinde z-z doğrultusunda elde edilen maksimum<br>çekme eş gerilme eğrileri .....  | 138 |
| Şekil 3.35. Eğri Tanımlama modeli ile lineer olmayan dinamik analizde;<br>zeminin esnek, rezervuarın boş ve dolu olması durumu için baraj mamba<br>yüzeyinde elde edilen yerdeğiştirmeler ile baraj kretinde elde edilen<br>yerdeğiştirmelerin dinamik etki süresince değişimi.....   | 139 |
| Şekil 3.36. Eğri Tanımlama modeli ile lineer olmayan dinamik analizde;<br>zeminin esnek olması durumu için 408, 296, 199, 118, 53 ve 4 nolu sıvı<br>elemanlarda elde edilen hidrodinamik basınçların dinamik etki süresince<br>değişimi .....   | 141 |
| Şekil 3.37. Eğri Tanımlama modeli ile lineer olmayan dinamik analizde;<br>zeminin esnek, rezervuarın boş ve dolu olması durumu için barajın mamba<br>ve mansap yüzeyinde x-x doğrultusunda elde edilen maksimum çekme eş<br>gerilme eğrileri .....  | 143 |
| Şekil 3.38. Eğri Tanımlama modeli ile lineer olmayan dinamik analizde;<br>zeminin esnek, rezervuarın boş ve dolu olması durumu için barajın mamba<br>ve mansap yüzeyinde y-y doğrultusunda elde edilen maksimum çekme eş<br>gerilme eğrileri .....  | 144 |
| Şekil 3.39. Eğri Tanımlama modeli ile lineer olmayan dinamik analizde;<br>zeminin esnek, rezervuarın boş ve dolu olması durumu için barajın mamba<br>ve mansap yüzeyinde z-z doğrultusunda elde edilen maksimum çekme eş<br>gerilme eğrileri .....  | 145 |
| Şekil 3.40. Eğri Tanımlama modeli ile lineer olmayan dinamik analizde;<br>rezervuarın boş olması durumu için baraj mamba yüzeyinde elde edilen<br>yerdeğiştirmeler ile $E_f/E_c$ oranının sonsuz, 2.00, 1.00, 0.50 ve 0.25<br>değerleri için baraj kretinde elde edilen yerdeğiştirmelerin dinamik etki<br>süresince değişimi .....           | 148 |
| Şekil 3.41. Eğri Tanımlama modeli ile lineer olmayan dinamik analizde;<br>rezervuarın boş ve $E_f/E_c$ oranının sonsuz, 2.00, 1.00, 0.50 ve 0.25<br>değerleri için Tip-5 kemer barajının E-E kesitinde x-x, y-y ve z-z<br>doğrultusunda elde edilen mamba yüzeyi maksimum çekme<br>gerilmelerinin sağ yamaçtan sol yamaca doğru değişimi..... | 149 |

- Şekil 3.42. Eğri Tanımlama modeli ile lineer olmayan dinamik analizde; rezervuarın boş ve  $E_f/E_c$  oranının sonsuz, 2.00, 1.00, 0.50 ve 0.25 değerleri için Tip-5 kemer barajının E-E kesitinde x-x, y-y ve z-z doğrultusunda elde edilen mansap yüzeyi maksimum çekme gerilmelerinin sağ yamaçtan sol yamaca doğru değişimi..... 150
- Şekil 3.43. Eğri Tanımlama modeli ile lineer olmayan dinamik analizde; rezervuarın dolu olması durumu için baraj memba yüzeyinde elde edilen yerdeğiştirmeler ile  $E_f/E_c$  oranının sonsuz, 2.00, 1.00, 0.50 ve 0.25 değerleri için baraj kretinde elde edilen yerdeğiştirmelerin dinamik etki süresince değişimi ..... 151
- Şekil 3.44. Eğri Tanımlama modeli ile lineer olmayan dinamik analizde; rezervuarın dolu ve  $E_f/E_c$  oranının sonsuz, 2.00, 1.00, 0.50 ve 0.25 değerleri için Tip-5 kemer barajının E-E kesitinde x-x, y-y ve z-z doğrultusunda elde edilen memba yüzeyi maksimum çekme gerilmelerinin sağ yamaçtan sol yamaca doğru değişimi..... 152
- Şekil 3.45. Eğri Tanımlama modeli ile lineer olmayan dinamik analizde; rezervuarın dolu ve  $E_f/E_c$  oranının sonsuz, 2.00, 1.00, 0.50 ve 0.25 değerleri için Tip-5 kemer barajının E-E kesitinde x-x, y-y ve z-z doğrultusunda elde edilen mansap yüzeyi maksimum çekme gerilmelerinin sağ yamaçtan sol yamaca doğru değişimi..... 153
- Şekil 3.46. Eğri Tanımlama modeli ile lineer olmayan dinamik analizde; zeminin rijit olması durumu için baraj memba yüzeyinde elde edilen yerdeğiştirmeler ile rezervuardaki su yüksekliğinin 120, 100, 80, 60 ve 40 m olması durumu için baraj kretinde elde edilen yerdeğiştirmelerin dinamik etki süresince değişimi ..... 156
- Şekil 3.47. Eğri Tanımlama modeli ile lineer olmayan dinamik analizde; zeminin rijit ve rezervuardaki su yüksekliğinin 120, 100, 80, 60 ve 40 m olması durumu için Tip-5 kemer barajının E-E kesitinde x-x, y-y ve z-z doğrultusunda elde edilen memba yüzeyi maksimum çekme gerilmelerinin sağ yamaçtan sol yamaca doğru değişimi..... 157
- Şekil 3.48. Eğri Tanımlama modeli ile lineer olmayan dinamik analizde; zeminin rijit ve rezervuardaki su yüksekliğinin 120, 100, 80, 60 ve 40 m olması durumu için Tip-5 kemer barajının E-E kesitinde x-x, y-y ve z-z doğrultusunda elde edilen mansap yüzeyi maksimum çekme gerilmelerinin sağ yamaçtan sol yamaca doğru değişimi..... 158
- Şekil 3.49. Eğri Tanımlama modeli ile lineer olmayan dinamik analizde; zeminin esnek olması durumu için baraj memba yüzeyinde elde edilen yerdeğiştirmeler ve rezervuardaki su yüksekliğinin 120, 100, 80, 60 ve 40 m olması durumu için baraj kretinde elde edilen yerdeğiştirmelerin dinamik etki süresince değişimi ..... 159
- Şekil 3.50. Eğri Tanımlama modeli ile lineer olmayan dinamik analizde; zeminin esnek ve rezervuardaki su yüksekliğinin 120, 100, 80, 60 ve 40 m olması durumu için Tip-5 kemer barajının E-E kesitinde x-x, y-y ve z-z doğrultusunda elde edilen memba yüzeyi maksimum çekme gerilmelerinin sağ yamaçtan sol yamaca doğru değişimi..... 160

- Şekil 3.51. Eğri Tanımlama modeli ile lineer olmayan dinamik analizde; zeminin esnek ve rezervuardaki su yüksekliğinin 120, 100, 80, 60 ve 40 m olması durumu için Tip-5 kemer barajının E-E kesitinde x-x, y-y ve z-z doğrultusunda elde edilen mansap yüzeyi maksimum çekme gerilmelerinin sağ yamaçtan sol yamaca doğru değişimi..... 161
- Şekil 3.52. Drucker-Prager modeli ile lineer olmayan dinamik analizde; zeminin rijit, rezervuarın boş ve dolu olması durumu için baraj memba yüzeyinde elde edilen yerdeğiştirmeler ile baraj kretinde elde edilen yerdeğiştirmelerin dinamik etki süresince değişimi..... 163
- Şekil 3.53. Drucker-Prager modeli ile lineer olmayan dinamik analizde; zeminin rijit olması durumu için 408, 296, 199, 118, 53 ve 4 nolu sıvı elemanlarda elde edilen hidrodinamik basınçların dinamik etki süresince değişimi ..... 166
- Şekil 3.54. Drucker-Prager modeli ile lineer olmayan dinamik analizde; zeminin rijit, rezervuarın boş ve dolu olması durumu için barajın memba ve mansap yüzeyinde x-x doğrultusunda elde edilen maksimum çekme eş gerilme eğrileri ..... 167
- Şekil 3.55. Drucker-Prager modeli ile lineer olmayan dinamik analizde; zeminin rijit, rezervuarın boş ve dolu olması durumu için barajın memba ve mansap yüzeyinde y-y doğrultusunda elde edilen maksimum çekme eş gerilme eğrileri ..... 168
- Şekil 3.56. Drucker-Prager modeli ile lineer olmayan dinamik analizde; zeminin rijit, rezervuarın boş ve dolu olması durumu için barajın memba ve mansap yüzeyinde z-z doğrultusunda elde edilen maksimum çekme eş gerilme eğrileri ..... 169
- Şekil 3.57. Drucker-Prager modeli ile lineer olmayan dinamik analizde; zeminin rijit, rezervuarın boş ve dolu olması durumu için barajın mansap yüzeyine ait 22 ve 62, memba yüzeyine ait 86 ve 126 nolu elemanda akma fonksiyonunun aldığı değerlerin dinamik etki süresince değişimi..... 170
- Şekil 3.58. Drucker-Prager modeli ile lineer olmayan dinamik analizde; zeminin esnek, rezervuarın boş ve dolu olması durumu için baraj memba yüzeyinde elde edilen yerdeğiştirmeler ile baraj kretinde elde edilen yerdeğiştirmelerin dinamik etki süresince değişimi..... 171
- Şekil 3.59. Drucker-Prager modeli ile lineer olmayan dinamik analizde; zeminin esnek olması durumu için 408, 296, 199, 118, 53 ve 4 nolu sıvı elemanlarda elde edilen hidrodinamik basınçların dinamik etki süresince değişimi ..... 174
- Şekil 3.60. Drucker-Prager modeli ile lineer olmayan dinamik analizde; zeminin esnek, rezervuarın boş ve dolu olması durumu için barajın memba ve mansap yüzeyinde x-x doğrultusunda elde edilen maksimum çekme eş gerilme eğrileri ..... 175



|  |     |
|--|-----|
| Şekil 3.61. Drucker-Prager modeli ile lineer olmayan dinamik analizde; zeminin esnek, rezervuarın boş ve dolu olması durumu için barajın memba ve mansap yüzeyinde y-y doğrultusunda elde edilen maksimum çekme eş gerilme eğrileri .....  | 176 |
| Şekil 3.62. Drucker-Prager modeli ile lineer olmayan dinamik analizde; zeminin esnek, rezervuarın boş ve dolu olması durumu için barajın memba ve mansap yüzeyinde z-z doğrultusunda elde edilen maksimum çekme eş gerilme eğrileri .....  | 177 |
| Şekil 3.63. Drucker-Prager modeli ile lineer olmayan dinamik analizde; zeminin esnek, rezervuarın boş ve dolu olması durumu için barajın mansap yüzeyine ait 22 ve 62, memba yüzeyine ait 86 ve 126 nolu elemanda akma fonksiyonunun aldığı değerlerin dinamik etki süresince değişimi.....                                  | 178 |
| Şekil 3.64. Drucker-Prager modeli ile lineer olmayan dinamik analizde; rezervuarın boş olması durumu için baraj memba yüzeyinde elde edilen yerdeğiştirmeler ve $E_f/E_c$ oranının sonsuz, 2.00, 1.00, 0.50 ve 0.25 değerleri için baraj kretinde elde edilen yerdeğiştirmelerin dinamik etki süresince değişimi .....       | 181 |
| Şekil 3.65. Drucker-Prager modeli ile lineer olmayan dinamik analizde; rezervuarın boş ve $E_f/E_c$ oranının sonsuz, 2.00, 1.00, 0.50 ve 0.25 değerleri için Tip-5 kemer barajının 86 nolu memba yüzeyi elemanındaki akma fonksiyonunun aldığı değerlerin dinamik etki süresince değişimi.....                               | 182 |
| Şekil 3.66. Drucker-Prager modeli ile lineer olmayan dinamik analizde; rezervuarın dolu olması durumu için baraj memba yüzeyinde elde edilen yerdeğiştirmeler ve $E_f/E_c$ oranının sonsuz, 2.00, 1.00, 0.50 ve 0.25 değerleri için baraj kretinde elde edilen yerdeğiştirmelerin dinamik etki süresince değişimi .....      | 183 |
| Şekil 3.67. Drucker-Prager modeli ile lineer olmayan dinamik analizde; rezervuarın dolu ve $E_f/E_c$ oranının sonsuz, 2.00, 1.00, 0.50 ve 0.25 değerleri için Tip-5 kemer barajının 86 nolu memba yüzeyi elemanındaki akma fonksiyonunun aldığı değerlerin dinamik etki süresince değişimi.....                              | 184 |
| Şekil 3.68. Drucker-Prager modeli ile lineer olmayan dinamik analizde; zeminin rijit olması durumu için baraj memba yüzeyinde elde edilen yerdeğiştirmeler ve rezervuardaki su yüksekliğinin 120, 100, 80, 60 ve 40 m olması durumu için baraj kretinde elde edilen yerdeğiştirmelerin dinamik etki süresince değişimi ..... | 187 |
| Şekil 3.69. Drucker-Prager modeli ile lineer olmayan dinamik analizde; zeminin rijit ve rezervuardaki su yüksekliğinin 120, 100, 80, 60 ve 40 m olması durumu için Tip-5 kemer barajının 86 nolu memba yüzeyi elemanındaki akma fonksiyonunun aldığı değerlerin dinamik etki süresince değişimi .....                        | 188 |
| Şekil 3.70. Drucker-Prager modeli ile lineer olmayan dinamik analizde; zeminin esnek olması durumu için baraj memba yüzeyinde elde edilen yerdeğiştirmeler ve rezervuardaki su yüksekliğinin 120, 100, 80, 60 ve 40 m olması durumu için baraj kretinde elde edilen yerdeğiştirmelerin dinamik etki süresince değişimi ..... | 189 |

- Şekil 3.71. Drucker-Prager modeli ile lineer olmayan dinamik analizde; zeminin esnek ve rezervuardaki su yüksekliğinin 120, 100, 80, 60 ve 40 m olması durumu için Tip-5 kemer barajının 86 nolu memba yüzeyi elemanındaki akma fonksiyonunun aldığı değerlerin dinamik etki süresince değişimi ..... 190
- Şekil 3.72. Lineer ve lineer olmayan dinamik analizler sonucu; zeminin rijit, rezervuarın boş ve dolu olması durumu için baraj memba yüzeyinde elde edilen mutlak değerce maksimum yerdeğiştirmelerin baraj yüksekliği boyunca değişimi..... 192
- Şekil 3.73. Lineer ve lineer olmayan dinamik analizler sonucu; zeminin esnek, rezervuarın boş ve dolu olması durumu için baraj memba yüzeyinde elde edilen mutlak değerce maksimum yerdeğiştirmelerin baraj yüksekliği boyunca değişimi..... 192



## TABLolar DİZİNİ

|  | <u>Sayfa No</u> |
|--|-----------------|
| Tablo 1.1. Üç boyutlu 8-düğüm noktalı sıvı sonlu eleman için interpolasyon fonksiyonları.....  | 34              |
| Tablo 1.2. İki boyutlu 4-düğüm noktalı sıvı yüzey eleman için interpolasyon fonksiyonları.....   | 35              |
| Tablo 1.3. İki ve üç boyutlu bazı sonlu elemanlar için optimum ve indirgenmiş integrasyon dereceleri.....  | 45              |
| Tablo 1.4. Zienkiewicz ve Taylor (1989) tarafından yakınsaklık şartı için verilen integrasyon dereceleri ile Wilson ve Khalvati (1983) tarafından önerilen indirgenmiş integrasyon dereceleri..... | 46              |
| Tablo 2.1. Üç boyutlu sıvı tankının modal analizi sonucu elde edilen ilk 8 mod frekansı.....   | 57              |
| Tablo 2.2. Drucker-Prager malzeme modeli ile iki ve üç boyutlu statik analiz sonucu elde edilen yerdeğıştirmeler.....  | 75              |
| Tablo 2.3. Drucker-Prager malzeme modeli ile iki boyutlu dinamik analiz sonucu elde edilen yerdeğıştirmeler.....   | 76              |
| Tablo 2.4. Drucker-Prager malzeme modeli ile üç boyutlu dinamik analiz sonucu elde edilen yerdeğıştirmeler.....  | 77              |
| Tablo 2.5. Lineer dinamik analiz için malzeme özellikleri.....   | 92              |
| Tablo 3.1. Lineer ve lineer olmayan dinamik analizler sonucu; baraj kretinde elde edilen mutlak değerce maksimum yerdeğıştirmeler.....   | 193             |
| Tablo 3.2. Lineer ve lineer olmayan dinamik analizi sonucu; baraj-su ara yüzeyinde elde edilen hidrodinamik basınçlar.....   | 194             |
| Tablo 3.3. Lineer ve lineer olmayan dinamik analizler sonucu; baraj memba ve mansap yüzeyinde elde edilen maksimum çekme gerilmeleri .....   | 195             |
| Tablo 3.4. Lineer ve lineer olmayan dinamik analizleri sonucu; baraj memba ve mansap yüzeyinde elde edilen minimum basınç gerilmeleri.....   | 196             |

## SEMBOLLER DİZİNİ

|                          |   |
|--------------------------|---|
| $a_0$ ve $a_1$           | : Rayleigh sönüm katsayıları  |
| $a_n$                    | : Yüzey normaline doğrultusundaki ivme  |
| $\mathbf{B}_f^e$         | : Sıvı elemanın şekildeğiştirme-yerdeğiştirme matrisi                         |
| $c$                      | : Kohezyon  |
| $C$                      | : Sudaki ses hızı   |
| $C_{11}$                 | : Sıvının hacimsel elastisite modülü  |
| $C_{22}, C_{33}, C_{44}$ | : Dönme yay rijitlik katsayıları veya rijitlik parametreleri                  |
| $\mathbf{C}_c$           | : Sıvı-yapı ortak sistemin sönüm matrisi                                      |
| $C_n$                    | : Sıvı sıkışabilirliği ile ilgili bir terim                                   |
| $\mathbf{C}_f$           | : Sıvının elastisite matrisi  |
| $d\epsilon_{ij}$         | : Toplam şekildeğiştirme artımı   |
| $d\epsilon_{ij}^e$       | : Elastik şekildeğiştirme artımı  |
| $d\epsilon_{ij}^p$       | : Plastik şekildeğiştirme artımı  |
| $\mathbf{D}_{ijkl}^e$    | : Lineer elastik malzeme matrisi  |
| $\mathbf{D}_{ijkl}^{ep}$ | : Elastik-plastik malzeme matrisi   |
| $\mathbf{e}_f$           | : Sıvının şekildeğiştirme vektörü   |
| $\mathbf{e}_f^e$         | : Sıvı elemanın şekildeğiştirme vektörü                                       |
| $e_{ij}$                 | : Deviatorik şekildeğiştirmeler   |
| $E$                      | : Elastisite modülü   |
| $f$                      | : Akma yüzeyi veya fonksiyonu   |
| $f_c$                    | : Tam plastik malzeme için sabit bir değer                                    |
| $g$                      | : Plastik potansiyel fonksiyonu   |
| $g$                      | : Yerçekimi ivmesi  |
| $G$                      | : Kayma modülü  |
| $G_{LD}$                 | : Yükleme durumunda kayma modülü  |
| $G_{UD}$                 | : Boşalma durumunda kayma modülü  |
| $\bar{h}_i$              | : Sıvı sonlu elemanın $i$ . düğüm noktası ile ilgili interpolasyon fonksiyonu |

|                      |  |
|----------------------|--|
| $\bar{\mathbf{h}}_s$ | : Yüzey elemanın interpolasyon fonksiyonlarından oluşan vektör               |
| $H$                  | : Rezervuar derinliği  |
| $\bar{\mathbf{H}}$   | : İnterpolasyon fonksiyonlar matrisi   |
| $I_1$                | : Gerilme tansörünün birinci invaryantı                                      |
| $\mathbf{J}$         | : Jakobian operatörü   |
| $J_2$                | : Deviatorik gerilme tansörünün ikinci invaryantı                            |
| $K$                  | : Hacimsel elastisite modülü   |
| $\mathbf{K}_c$       | : Sıvı-yapı ortak sistemin rijitlik matrisi                                  |
| $K_{LD}$             | : Yükleme durumunda hacimsel elastisite modülü                               |
| $K_{UN}$             | : Boşalma durumunda hacimsel elastisite modülü                               |
| $\mathbf{K}_f^e$     | : Sıvı sonlu eleman rijitlik matrisi   |
| $\mathbf{K}_f$       | : Sıvı sistemin rijitlik matrisi   |
| $\mathbf{K}_f^*$     | : Sıvı serbest yüzey rijitliklerini de içeren sıvı sistemin rijitlik matrisi |
| $m(z)$               | : Baraja ilave edilecek kütle  |
| $\mathbf{M}_c$       | : Sıvı-yapı ortak sistemin kütle matrisi                                     |
| $\mathbf{M}_f^e$     | : Sıvı sonlu eleman kütle matrisi  |
| $\mathbf{M}_f$       | : Sıvı sistemin kütle matrisi  |
| $M_{fi}^e$           | : Köşegenleştirilmiş kütle matrisinin i. terimi                              |
| $M_{fii}^e$          | : Düğüm noktası uyumlu kütle matrisinin i. terimi                            |
| $M_{fi}^e$           | : Sıvı sonlu elemanın toplam kütlesi   |
| $P$                  | : Hidrodinamik su basıncı  |
| $P_x, P_y, P_z$      | : Kartezyen koordinatlarda sıvının dönmeye ait gerilmeleri                   |
| $q$                  | : Eleman düğüm noktası sayısı  |
| $q_i$                | : Lagrange denklemi ile ilgili i. genelleştirilmiş koordinat                 |
| $Q_i$                | : Lagrange denklemi ile ilgili i. genelleştirilmiş kuvvet                    |
| $r_i, s_j, t_k$      | : Yerel koordinatlarda integrasyon noktaları                                 |
| $\mathbf{R}$         | : Dış yük vektörü  |
| $\mathbf{R}_c$       | : Sıvı-yapı ortak sisteme etkiyen ve zamanla değişen yük vektörü             |
| $\mathbf{R}_f$       | : Zaman ile değişen yük vektörü  |
| $s_{ij}$             | : Deviatorik gerilmeler  |

|  |  |
|--|--|
| $S_f^e$                                    | : Sıvı sonlu eleman serbest yüzey rijitlik matrisi   |
| $S_f$                                      | : Sıvı sistemin serbest yüzey rijitlik matrisi   |
| $t$  | : Zaman  |
| $T$  | : Çözüm zamanı   |
| $\bar{T}$                                  | : Yatay yer hareketi titreşim periyodu   |
| $T$  | : Sıvı sistemin kinetik enerjisi   |
| $U$  | : Yerdeğiştirme vektörü  |
| $\dot{U}$                                  | : Hız vektörü  |
| $\ddot{U}$                                 | : İvme vektörü   |
| $U_n$                                      | : Sıvı-yapı ara yüzeyi normal yerdeğiştirmesi  |
| $U_{f_x}, U_{f_y}, U_{f_z}$                | : Kartezyen koordinatlarda sıvının yerdeğiştirme bileşenleri                                     |
| $U_{f_x}, U_{f_y}, U_{f_z}$                | : Kartezyen koordinatlarda sıvı sonlu elemanın herhangi bir noktasının yerdeğiştirme bileşenleri |
| $U_{f_{xi}}^e, U_{f_{yi}}^e, U_{f_{zi}}^e$ | : Sıvı sonlu elemanın i. düğüm noktası koordinatlarının kartezyen bileşenleri                    |
| $U_{sf}$                                   | : Sıvı serbest yüzey düşey yerdeğiştirmesi   |
| $\dot{U}_f$                                | : Sıvı sistemin hız vektörü  |
| $\ddot{U}_f$                               | : Sıvı sistemin ivme vektörü   |
| $U_f^e$                                    | : Sıvı elemanın düğüm noktası yerdeğiştirme vektörü  |
| $U_c$                                      | : Sıvı-yapı ortak sistemin rölatif yerdeğiştirme vektörü   |
| $\dot{U}_c$                                | : Sıvı-yapı ortak sistemin hız vektörü   |
| $\ddot{U}_c$                               | : Sıvı-yapı ortak sistemin ivme vektörü  |
| $U_i$                                      | : 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  |
| $w$  | : Suyun birim hacim ağırlığı   |
| $w_x, w_y, w_z$                            | : Kartezyen koordinatlar etrafındaki rijit cisim dönmeleri                                       |

|                                      |  |
|--------------------------------------|--|
| $w_i, w_j, w_k$                      | : Ağırlık katsayıları  |
| $\omega_i$ ve $\omega_j$             | : i inci ve j inci moda ait doğal frekanslar (rad/sn)          |
| $x^e, y^e, z^e$                      | : Sıvı sonlu elemanın herhangi bir noktasının koordinatları    |
| $x_i^e, y_i^e, z_i^e$                | : Sıvı sonlu elemanın i. düğüm noktasının koordinatları        |
| $z$                                  | : Su yüzeyinden itibaren su derinliği                          |
| $\alpha'$                            | : Yatay yer hareketi ivme katsayısı                            |
| $\epsilon_{ij}$                      | : Elastik şekildeğiştirmeler                                   |
| $\sigma_{ij}$                        | : Elastik şekildeğiştirmelere karşılık gelen gerilmeler        |
| $\delta_{ij}$                        | : Kroneker deltası   |
| $\epsilon_v$                         | : Hacimsel şekildeğiştirme                                     |
| $\sigma_m$                           | : Ortalama gerilme   |
| $\epsilon_m$                         | : Ortalama şekildeğiştirme                                     |
| $\epsilon_{min}$                     | : Minimum ortalama şekildeğiştirme                             |
| $\phi$                               | : İçsel sürtünme açısı   |
| $\alpha$ ve $k$                      | : Kohezyon ve içsel sürtünme açısına bağlı sabitler            |
| $\nu$                                | : Poisson oranı  |
| $\rho_f$                             | : Sıvının kütle yoğunluğu                                      |
| $\epsilon_x, \epsilon_y, \epsilon_z$ | : Kartezyen koordinatlarda sıvının şekildeğiştirme bileşenleri |
| $\sigma_f$                           | : Sıvının gerilme vektörü                                      |
| $\pi_e$                              | : Sıvı sistemin toplam şekildeğiştirme enerjisi                |
| $\pi_s$                              | : Sıvı yüzeyi hareketi ile ilgili enerji                       |
| $\pi_t$                              | : Sıvı sistemin toplam potansiyel enerjisi                     |
| $\Delta t$                           | : Zaman aralığı  |
| $\xi_i$ ve $\xi_j$                   | : i inci ve j inci modlardaki sönüm oranları                   |

# 1. GENEL BİLGİLER

## 1.1. Giriş

Dünya yüzeyinin 3/4'ünün sularla kaplı olması, kütesinin 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 için yapılmış birkaç litrelik su kapları su yapılarının başlangıcını simgelerken, bugün milyonlarca metreküp su depolayabilen barajlar, insanların su ihtiyaçlarını karşılayacak en önemli su yapılarıdır (Yılmaz, 1988).

Barajlar, arkalarında çok miktarda su biriktirmeleri nedeni ile sıvı-yapı etkileşimine maruz yapı grubuna girmektedir. Bu tür yapılarda, deprem gibi dinamik bir etki altında, sıvı ortamda hidrodinamik basınçlar, yapı ortamında ise, hidrodinamik basınçlardan dolayı ilave yükler oluşmaktadır. Bu durumda, yapı sıvının, sıvı da yapının davranışını önemli ölçüde etkilemektedir. Bu nedenle, barajların dinamik analizinde rezervuardaki suyun baraj davranışı üzerindeki etkileri göz önünde bulundurulmalıdır (Calayır, 1994). Barajlar, aynı zamanda zemin ile de sürekli bir etkileşim içerisindedir. Büyük kütlelerinden dolayı, altındaki zeminin dinamik özelliklerini etkiler ve deprem sırasında zeminden geçen sismik dalgaların karakterini değiştirebilirler. Diğer yandan, eğer baraj kayalık ve çok sert bir zemine oturuyorsa, baraj gövdesi sonsuz rijit bir tabana oturduğu kabulü ile analiz edilmektedir. Bu durumda, yapı-zemin etkileşimi ihmal edilmiş olmaktadır. Görüldüğü gibi, yapı-zemin etkileşim probleminin çözüm şeklini daha çok zeminin durumu belirlemektedir. Barajlarda, bu etkileşim de son derece önemlidir.

Deprem etkilerinin yön değiştirebilir olması nedeni ile, beton barajlarda çekme gerilmelerinin oluşacağı açıktır. Betonun basınca oranla çekme gerilmelerine dayanımı çok küçük olduğundan, depremden dolayı beton barajlarda oluşacak çekme gerilmeleri çatlaklara neden olabilmektedir. Etkin deprem bölgesinde yer alan ve 700'den fazla baraj yapılması planlanan ülkemizde barajların deprem hasarlarına karşı duyarlı bir analizle incelenmesi gerekir. Bu analiz, depreme karşı baraj davranışını ayrıntılı olarak verebilecek analitik bir modele dayanmalıdır. Baraj-su, baraj-zemin ve baraj-su-zemin etkileşimlerinin gerçek duruma yakın olarak temsil edildiği bu model üzerinde muhtemel çatlak ve hatta kavitezyon olayları incelenmelidir.



## 1.2. Literatür Araştırması

### 1.2.1. Sıvı-Yapı Etkileşimi ile İlgili Çalışmalar

Sıvı ile etkileşim halindeki yapılarda, deprem gibi dinamik bir etki altında yapı sıvının sıvı da yapının davranışını önemli ölçüde etkiler. Bu etkileşim sonucu, sıvıda hidrostatik basınç fazlası hidrodinamik basınçlar, yapıda ise hidrodinamik basınçlardan dolayı ilave yükler oluşmaktadır. Depremler sırasında rezervuarı dolu barajlar, dinamik yüklere maruz sıvı tankları sıvı-yapı etkileşiminin çok etkin bir biçimde gerçekleştiği yapılardır. Bir sıvı-yapı etkileşim probleminin çözümünde kullanılan yöntemler üç temel grupta toplanabilir: Westergaard Yaklaşımı, Euler Yaklaşımı ve Lagrange Yaklaşımı.

#### 1.2.1.1. Westergaard Yaklaşımı

Bir sıvı-yapı sisteminin ara yüzeyinde oluşan hidrodinamik basınçlar ilk olarak Westergaard (Westergaard, 1933) tarafından ifade edilmiştir. Westergaard, bir beton ağırlık baraj ve arkasındaki rezervuarı dikkate alarak sıvı-yapı etkileşimini incelemiştir. Bu orijinal çalışmada; baraj rijit ve düşey memba yüzeyli, rezervuar dikdörtgen ve sonsuz uzun. suyun sıkışabilir ve yüzey dalgalarının oluşmadığı kabulleri yapılmıştır. Westergaard harmonik yer hareketi için sıvı-yapı ara yüzeyindeki su basınçlarını,

$$P(x, z, t) = \frac{8\alpha'wH}{\pi^2} \cos \frac{2\pi t}{\bar{T}} \sum_{n=1,3,5,\dots} \frac{1}{n^2 C_n} e^{-q_n(x)} \sin \frac{n\pi z}{2H} \quad (1.1)$$

ile ifade etmiştir. Burada  $\alpha'$ , yatay yer hareketi ivme katsayısı;  $w$ , suyun birim hacim ağırlığı;  $H$ , rezervuar derinliği;  $\bar{T}$ , yatay yer hareketi titreşim periyodu;  $z$ , su yüzeyinden itibaren su derinliği;  $t$ , zaman ile temsil edilmektedir. (1.1) denklemindeki  $C_n$ , sıvı sıkışabilirliği ile ilgili bir terim olup,

$$C_n = \sqrt{1 - \frac{16wH^2}{n^2 g C_{11} \bar{T}^2}} \quad (1.2)$$

ile verilmiştir. Burada;  $C_{11}$ , sıvının hacimsel elastisite modülünü,  $g$ , yerçekimi ivmesini göstermektedir. (1.1) denklemindeki  $q_n$  ise,

$$q_n(x) = \frac{n\pi C_n x}{2H} \quad (1.3)$$

ile verilmiştir. (1.1) denklemine göre,  $t=0, T, 2T, \dots$  olduğu zaman baraj yüzeyinde su basınçları,  $P(x=0)$ , maksimum değerine ulaşır. Bu durumda (1.1) denklemi,

$$P(z) = \frac{8\alpha' w H}{\pi^2} \sum_{n=1,3,5,\dots} \frac{1}{n^2 C_n} \sin \frac{n\pi z}{2H} \quad (1.4)$$

şeklini alır. Westergaard (1933), bu şekilde elde ettiği hidrodinamik basınçların yer hareketiyle zıt yönde olduğunu ve bu nedenle, barajla birlikte hareket eden ilave bir kütlelerin atalet kuvvetlerine eşdeğer olduğunu bu çalışmasında göstermiş ve

$$m(z) = \frac{7}{8} \frac{w}{g} \sqrt{Hz} \quad (1.5)$$

yaklaşık formülünü elde etmiştir. Burada,  $m(z)$ , baraja ilave edilecek kütleyi göstermektedir. Kemer barajlar gibi eğri yüzeye sahip yapılarda, Westergaard bağıntısı (1.5) ile hesaplanan kütlelerin ekleneceği düğüm noktasındaki baraj memba yüzeyi normali ile deprem doğrultusundaki açı göz önünde bulundurulmalıdır (Priscu vd., 1985).

Westergaard yaklaşımı, basit kabullere dayanmasına rağmen barajın depreme karşı davranışı hakkında bilgi edinmek için birçok araştırmacı tarafından kullanılmıştır (Priscu vd., 1985; Okomato, 1984; Akköse, 1997; Akköse vd., 1997; Akköse ve Dumanoglu, 1998; Dumanoglu ve Akköse, 1998; Dumanoglu ve Akköse, 1999-a, 1999-b).

### 1.2.1.2. Euler Yaklaşımı

Euler yaklaşımında, barajın davranışı yerdeğiştirmeler, sıvının davranışı ise basınçlar cinsinden ifade edilmektedir. Chopra ve grubunun, Euler yaklaşımını kullanarak suyun sıkışabilirlik etkilerini de içeren baraj-rezervuar etkileşimi ile ilgili birçok çalışmaları

vardır (Chopra, 1968, 1970; Fok ve Chopra ,1985, 1986-a, 1986-b, 1986-c; Hall ve Chopra, 1982, 1983; Porter ve Chopra, 1980, 1981, 1982; Tan ve Chopra, 1995-a, 1995-b, 1996). Bu araştırmacılar, modların süperpozisyonu yöntemini kullanarak frekans alanında çözümler elde etmişlerdir. Chopra'nın 1968 yılındaki çalışması (Chopra, 1968), bu grubun çalışmalarına temel oluşturmaktadır. Başlangıçta, boş barajın sadece temel modu dikkate alınarak (Chopra, 1968, 1970) 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 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. Ağırlık barajlar için başlatılan bu çalışmalar, kemer barajlar için de geliştirilmiştir. Fok ve Chopra (1985, 1986-a, 1986-b, 1986-c), yukarıda bahsedilen çalışmalar ışığında kemer barajlarda kaya zemin esnekliği ve rezervuarın sönümleyici etkilerini dikkate alarak çalışmalarını bu yönde genişletmiştir. Tan ve Chopra (1995-a, 1995-b, 1996), kemer barajlarda baraj-su, baraj-zemin ve baraj-su-zemin etkileşimini kaya zeminin atalet ve sönüm kuvvetlerini göz önüne alarak baraj davranışını incelemiştir. Hall ve Chopra (1982), hidrodinamik etkileri içeren deprem davranışlarını belirlemek üzere, frekans alanında beton ağırlık ve toprak dolgu barajlar için geliştirdikleri analiz yöntemini kemer barajlara uygulamıştır (Hall ve Chopra, 1983).

Saini vd. (1978), rezervuar ortamında sonlu ve sonsuz elemanlar kullanarak yatay yer hareketine maruz baraj-rezervuar sistemlerinin iki boyutlu davranışını suyun sıkışabilirliğini göz önüne alarak araştırmıştır.

Finn ve Varoğlu (1973), bir beton ağırlık baraj-rezervuar sisteminin baraj eksenine dik harmonik bir yer ivmesi altındaki davranışını incelemiştir. Barajı iki boyutlu sonlu eleman sistemi ile, rezervuarı ise sürekli bir ortam olarak temsil etmişlerdir. Baraj memba yüzeyine etkiyen hidrodinamik basıncı, yer ivmesi ve baraj-rezervuar ara yüzeyinin bilinmeyen yerdeğiştirmelerinin bir fonksiyonu olarak kapalı formda ifade etmişlerdir. Kaya zemin esnekliği ve su sıkışabilirliğinin göz önüne alındığı bu çalışmada, hidrodinamik basınçlar atalet kuvvetlerinin fazlası olarak barajın hareket denklemlerine girmektedir.

Lofti vd. (1987), Lysmer ve Waas (1972) geliştirdikleri yarı analitik yöntemi kullanarak katı, sıvı ve katı-sıvı "hiper element" ler elde ettikten sonra, sonlu elemanlarla birlikte bu elemanları kullanarak baraj-su, baraj-zemin ve baraj-su-zemin etkileşimlerini incelemişlerdir.

Sharan ve Gladwell (1985), suyun sıkışabilirliğini dikkate alarak baraj-su etkileşimini, zaman alanında adım adım integrasyon teknikleri ile incelemiştir.

Baraj-rezervuar sisteminin ortak mod ve frekanslarının belirlenmesi yönünde de bazı çalışmalar yapılmıştır. Nath (1981, 1982) geliştirdiği "mapping" sonlu eleman yöntemi ile kemer baraj-rezervuar sisteminin ortak mod ve frekanslarını belirlemiştir. Bu çalışmalarda, suyun sıkışabilirliği dikkate alınmaktadır.

Greeves ve Dumanoğlu (1989), baraj-rezervuar sisteminin modal ve yatay yer hareketi altındaki dinamik davranışını incelemiştir. Bu çalışmada, ortak sistemin öz değerlerinin belirlenmesinde Dungar (1978) algoritması kullanılmaktadır. Baraj ve rezervuar ortamında iki boyutlu, ara yüzeyde ise bir boyutlu sonlu elemanlar kullanılmıştır.

Humar ve Roufaiel (1983) ile Sharan (1992), rijit bir baraj üzerinde oluşacak hidrodinamik basıncı belirlemek için sonlu elemanlar yöntemini kullanmışlardır. Yazarlar yaptıkları çalışmalarında, baraj zeminini rijit kabul edip, rezervuarı sonlu elemanlarla modellendirmişlerdir.

Euler yaklaşımında sıvı ortam basınçlar, yapı ortam ise yerdeğiştirmeler cinsinden ifade edildiği için, sıvı-yapı ara yüzeyinde özel ara yüzey denklemlerine ihtiyaç duyulmaktadır. Bu ara yüzey denklemleri sonlu eleman denklemlerinde büyük bant genişliklerine ve simetrik olmayan denklemlere sebep olmaktadır. Genel amaçlı bilgisayar programları simetrik denklem takımlarının çözüm yöntemlerine göre hazırlandığından, Euler yaklaşımı genellikle özel amaçlı bir bilgisayar programı gerektirmektedir.

### 1.2.1.3. Lagrange Yaklaşımı

Lagrange yaklaşımında, hem sıvı hem de yapıda yerdeğiştirmeler değişken olarak kullanıldığından, özel ara yüzey denklemlerine ihtiyaç olmamaktadır. Sistemin ara yüzeyindeki sonlu eleman düğüm noktalarında uygunluk ve denge denklemleri otomatik olarak sağlanmaktadır (Wilson ve Khalvati, 1983). Ayrıca, katı elemanlar için mevcut program kütüphanelerinin yerdeğiştirmelere dayalı sıvı elemanları içerecek şekilde ortak hale getirilmesi veya söz konusu eleman program kütüphanelerinden sıvı elemanları elde

etmek ve genel amaçlı yapı analiz programlarına uyarlamak kolay olmaktadır. Oluşan matrisler, simetrik ve bant genişlikleri nispeten küçük olduğundan, mevcut denklem çözüm yöntemleri ile verimli bir şekilde kullanılabilir (Olson ve Bathe, 1983).

Lagrange sıvı sonlu elemanların gelişimi, elastisite matrisi uygun bir şekilde değiştirilmiş standart bir katı eleman olarak dikkate alınması fikri ile başladı. Yapılan çalışmalarda, sıvının genelde viskoz olmadığı ve dönmeye karşı kısıtlı olduğu kabul edilmektedir. Böyle bir sıvıyı temsil edebilmek için kayma modülünün sıfır alınması gerekir. Birçok araştırmacı sıvıyı sıfır kayma modüllü bir katı olarak dikkate almıştır (Chopra vd., 1969; Sugar ve Katona, 1975; Akkaş vd., 1979; Bathe ve Hahn, 1979). Akkaş vd. (1979), böyle bir sıvı eleman ile gerçekleştirdikleri modal analizde çok sayıda sıfır enerji modunun oluştuğundan söz etmektedirler.

Zienkiewicz ve Bettles (1978), kayma modülünün sıfır alınması, tekil bir elastisite matrisi verdiği için sıfır-enerji modlarının oluşmasına neden olabileceğinden söz konusu modülün küçük değerde alınmasını önermektedirler. Bu sıfır-enerji modlarını ortadan kaldırmak için sıvının dönmeye kısıtlama getirilmektedir (Hamdi vd., 1978). Bu kısıtlama, değişik elastisite problemlerinde olduğu gibi bir ceza yöntemi ile hesaba katılmaktadır (Zienkiewicz ve Taylor, 1989; Bathe, 1996). Bu yaklaşım birçok araştırmacı tarafından iki boyutlu problemlere uygulanmıştır (Hamdi vd., 1978; Deshpande vd., 1981; Olson ve Bathe, 1983).

Hamdi vd. (1978), lineer üçgen sonlu elemanlar kullanarak sıvı ve sıvı-yapı problemlerini incelemiştir. Bazı sıfır-enerji modları görülmekle birlikte yöntemin elverişli olduğu belirtilmektedir.

Deshpande vd. (1981) ise 8-düğüm noktalı dörtgen sonlu eleman kullanmıştır. Serbest yüzeye sahip rijit sıvı tankının frekans analizinde, sıvı serbest yüzey şartından dolayı bazı sıfır-enerji modlarının oluştuğu, bunun dışında yöntemin iyi sonuçlar verdiği aynı yazarlar tarafından vurgulanmaktadır. Bu araştırmacılar çalışmalarında sıvı serbest yüzey şartını dikkate almamışlardır.

Olson ve Bathe (1983), sıvı-yapı etkileşim problemlerini dört gruba ayırarak incelemiştir. Bu gruplar sırasıyla; sıvı içinde basıncın sabit olduğu statik problemler, rijit bir oyukta (cavity) titreşen sıvının doğal frekanslarının belirlenmesi, esnek sınırlar içinde titreşen sıvıların doğal frekanslarının hesaplanması ve sıvı içinde titreşen esnek katı problemlerinden ibarettir. İlk üç grup için yöntemin iyi sonuçlar verdiği, fakat sıvı içinde titreşen esnek katı problemini içeren son grup için çok hatalı çözümlerin elde edildiği

belirtilmektedir. Bununla birlikte, sonlu eleman matrislerini normal integrasyon mertebeleriyle şekillendiren bu araştırmacılar, sözü edilen probleme indirgenmiş integrasyon tekniği uyguladıklarında gerçek duruma yaklaşan çözümler elde ettiklerini ayrıca ifade etmektedirler.

Wilson ve Khalvati (1983), yerdeğiştirmeler için dönmeye verilen kısıtlama ile birlikte, eleman matrislerinin hesaplanmasında indirgenmiş integrasyon mertebelerini kullanarak gereksiz sıfır-enerji modlarını yok etmişlerdir. Sıvı serbest yüzey salınım hareketinin de içerildiği bu çalışmada, sıvı sonlu elemanların stabilitelerinin sağlandığı teorik olarak gösterilmektedir. Wilson ve Khalvati (1983) tarafından geliştirilen sıvı sonlu elemanlar kullanılarak birçok araştırmacı sıvı, sıvı-yapı, baraj-su ve baraj-su-zemin sistemlerinin davranışını incelemiştir (Greeves, 1990, 1991; Calayır ve Dumanoğlu, 1993; Calayır, 1994; Doğangün, 1995; Bayraktar, 1995; Bayraktar vd., 1996; Bayraktar ve Dumanoğlu, 1998; Akköse ve Dumanoğlu, 2003-a, 2003-b; Akköse vd., 2003).

Calayır (1994), yatay yer hareketini dikkate alarak baraj-su-zemin sisteminin dinamik davranışını araştırmıştır. Yazar, rezervuar ve zeminin dikkate alınmasının baraj davranışını önemli derecede etkilediğini vurgulamaktadır. Calayır ve Dumanoğlu (1993), iki boyutlu değişik sıvı ve sıvı-yapı problemlerinin statik ve dinamik davranışını incelemiştir. Bu çalışmada, dönme kısıtlama parametresinin statik analiz sonuçlarını etkilemediği belirtilmektedir. Ancak, modal analizde dönme kısıtlama parametreleri büyüdükçe dönme ile ilgili frekanslar yukarıya çekilmekte ve hacim değişim frekansları ilk sıralara kaymaktadır. Bu durum ise, modal analizde hesaplanacak frekans sayısında düşme meydana getirmektedir.

Vatani (1997), rezervuardaki su ortamını Lagrange yaklaşımı ile temsil ederek, baraj betonundaki çatlak ve kavitasyon olayını bir ağırlık baraj kesitinde incelemiştir.

## **1.2.2. Beton Barajların Lineer Olmayan Davranışı ile İlgili Çalışmalar**

### **1.2.2.1. Çatlak**

Barajlarda çeşitli nedenlerden dolayı çatlaklar oluşmaktadır. Yapım ve servis aşamasında meydana gelen çatlaklardan çok daha tehlikelisi deprem sırasında meydana gelen çatlaklardır. Çatlaklar, uygulanan yüklerden dolayı oluşan çekme gerilmelerinin betonun taşıyabileceği maksimum çekme mukavemetini aşması durumunda meydana gelir.

Önceleri büyük kütlelere sahip barajların deprem sırasında gövdelerinde çekme gerilmesi oluşabileceğine ihtimal verilmemesinden dolayı dinamik analizlerde çok basit ve yaklaşık yöntemler kullanılmaktaydı. Bu yöntemlerde, deprem yükleri sismik katsayılarla bağlı olarak hesaplanan eşdeğer statik kuvvet olarak dikkate alınmaktaydı. Halbuki deprem, statik kuvvet olarak göz önüne alınmayacak derecede önemli bir dinamik yer hareketidir. Ayrıca, yön değiştirebilir etkilerinden dolayı yapıda çatlaklar türünden ciddi hasara sebep olabilmektedirler. 1967 yılındaki depremde Koyna barajında (Chopra, 1970) meydana gelen büyük hasar, deprem sırasında oluşabilecek çatlaklara çok iyi bir örnek olmuştur. Eşdeğer statik yüklere göre çekme gerilmesi göz ardı edilerek projelendirilen Koyna barajı, depremde büyük hasar gördü. Bu olaydan sonra, 1960'lı yıllarda gelişim gösteren sonlu elemanlar yöntemi ile beton yapılarda oluşacak çatlaklar, modellenmeye ve ayrıntılı incelenmeye başlandı.

Bu yöndeki çalışmalara, betonun mekanik özelliklerinin teorik ve deneysel olarak tespit edilmesi ile başlandı. Betonun iki ve üç boyutlu gerilme haline ait temel bağıntıları elde edilerek, betonun çekme özeliği ve kırılma davranışı tanımlanmaya çalışılmıştır (Gardner, 1969; Kupfer vd., 1969; Liu vd., 1972; Bathe ve Ramaswamy, 1979; Bicanic ve Zienkiewicz, 1983; Bathe vd., 1989). Daha sonra aşağıdaki yayınlarda belirtilen çeşitli modeller geliştirilerek betondaki çatlak olayı incelenmiştir.

Pal (1976), beton ağırlık barajlarda deprem sırasında oluşacak çatlaklar hakkında bir matematik model önermektedir. Bu modelde, tersinir yükler altında şekil değiştirmelerde zamanla oluşacak değişiklikler yer almaktadır. Adım-adım integrasyon tekniği ile baraj betonundaki çatlaklar incelenmiştir.

Ottosen (1979), kısa süreli yüklemeye maruz yapıların kırılma yükünü belirlemek için bir model geliştirdi. Lineer olmayan elastisiteye dayalı bu modelde, elatisite modülü ve Poisson oranının sekant değeri uygun bir şekilde değiştirilmiştir.

Mays ve diğ. (1989), ADINA programını kullanarak kemer barajların lineer ve lineer olmayan statik analizini gerçekleştirdiler. Bloklar arasında lineer olmayan özel malzeme türleri kullanarak kemer barajlarda çatlak olayını incelemiştir.

Mazars ve Pijaudier-Cabot (1989), sürekli hasar teorisine dayanan farklı beton modeller üzerinde anizotropi ve çatlakların kapanması gibi yöne bağlı etkileri araştırmış ve uygun hasar modelleri önermiştir.

Linsbauer ve diğ. (1989-a; 1989-b), Almanya'da Kölnbern kemer barajının topuğunda oluşan çatlakları dört farklı çatlak modeli kullanılarak sonlu elemanlar yöntemi ile statik yükler için incelemiştir.

Pekau ve diğ. (1991), çatlak yüzeyi ve baraj-rezervuar sistemini sınır elemanlar yöntemi ile modelleyerek beton ağırlık barajların deprem sırasındaki kırılma davranışını incelemiştir. Çatlak tipi, gerilme şiddet faktörleri ile tanımlanmış ve çatlak yayılışı adım adım izlenmiştir. Bu işlem gerçekleştirilirken mod süperpozisyon yöntemi kullanılmıştır.

Swoboda ve Lei (1994), baraj ve zemin arasındaki etkileşimi temsil için üç boyutlu lineer olmayan bir temas elemanı geliştirmiştir. Sonlu eleman ve artımsal yük teorisine bağlı olarak, düğüm noktalarında yerdeğiştirme ve temas gerilmelerinin elde edildiği bu elemandan oluşan kemer baraj-zemin etkileşimi elde edilmiştir.

Ghrib ve Tinawi (1995), beton ağırlık barajlarda çatlak probleminin incelenmesinde Bazant (1983)'in beton için ortaya koyduğu ortotrop davranış için verdiği prensipleri kullanarak bir model geliştirmiştir. Çatlakların açılıp kapanması gibi hem izotrop hem de ortotrop hasarı dikkate alabilen bu model elastisite modülü, çekme gerilmesi ve kırılma enerjisi olmak üzere üç temel parametreye bağlıdır.

Beton barajlarda çatlak modellemesi yayılı ve ayrık çatlak modeli üzerinde yoğunlaşmıştır. Birçok araştırmacı, bu çatlak modellerini kullanarak beton barajların lineer olmayan davranışını incelemiştir (Skrikerud ve Bachmann, 1986; Bazant ve Lin, 1988; Vargas-Loli ve Fenves, 1989; El-Aidi ve Hall, 1989-a, 1989-b; Dahlblom ve Ottosen, 1990; Wepf vd., 1993; Kumar ve Nayak, 1994; Vatani, 1997; Vatani vd., 1997; Hall, 1998).

Skrikerud ve Bachmann (1986), beton yapıların dinamik davranışını ayrık çatlak modelini kullanarak elde etmiştir. Bu modelde, bitişik iki elemandaki çekme gerilmesi, yapıyı oluşturan malzemenin emniyetle taşıyabileceği çekme mukavemetini aştığı takdirde elemanlar arası düğümler açılmaktadır. Böylece bir düğüm noktası iki ayrı düğüm noktasına dönüşmektedir.

Bazant ve Lin (1988), beton yapılar için çatlak modellemesinde kullanılan yayılı çatlak modelinin sonlu eleman ağının iyi seçilmesi durumunda daha etkili çözümlere ulaşılabileceğini çeşitli sonlu eleman ağları kullanarak göstermiştir.

Çatlak başladıktan sonra yayılması için gerekli kuvvet ağdaki sonlu elemanların boyutuna bağlıdır. Vargas-Loli ve Fenves (1989), bu gereksinimden (incelikli sonlu



eleman ağından) kurtulmak için çatlak bant modelini kullandılar. Bu model kullanılarak beton ağırlık barajların deprem davranışını incelemiştir.

El-Aidi ve Hall (1989-a, 1989-b), çalışmalarının birinci bölümünde, beton ağırlık barajlarda çatlak ve kavitasyon için model seçimini gerçekleştirmiş, ikinci bölümde ise bu modelin deprem sırasındaki davranışını incelemiştir. Baraj betonunda çatlak oluşumunun baraj davranışını önemli ölçüde etkilediğini belirten yazarlar, oluşması muhtemel kırılma modları hakkında da bilgi vermiştir.

Dahlblom ve Ottosen (1990), çatlak yönü ve eleman boyutu ile ilgili geometrik verilere bağlı hayali bir çatlak modeli geliştirmiştir. Eşdeğer uzunluk yöntemi ile hayali çatlak modelinin yayılı çatlak versiyonunu kurmak mümkündür. Kayma çatlak etkisinin de göz önüne alındığı bu modelin geçerliliği, beton numuneler üzerinde dört farklı eleman tipi kullanılarak gösterilmiştir.

Wepf ve diğ. (1993), baraj-rezervuar etkileşimini dikkate alarak beton ağırlık barajların lineer olmayan deprem davranışını incelemiştir. Baraj betonunda çatlak oluşumu, sonlu elemanlar yöntemi ile ayrık çatlak modeli ile temsil edilmiştir.

Kumar ve Nayak (1994), ayrık çatlak modelini kullanarak beton ağırlık barajlar üzerinde; kaya zemin elastisite modülünün betonun elastisite modülüne oranı ( $E_R/E_C$ ), temel genişliğinin yüksekliğine oranı ( $B/H$ ) ve topuk bölgesindeki tekillikler ile ilgili parametrik bir çalışma gerçekleştirmiştir. 100 ve 200 m yükseklikli ağırlık barajlarda üzerinde yapılan çalışmalarda, çekme gerilmelerinden ve gerilme şiddet faktöründen en çok bu parametrelerin etkilendiğini vurgulanmaktadır.

Vatani (1997) ile Vatani vd. (1997), baraj betonundaki çatlak olayını bir ağırlık baraj kesitinde incelemiştir. Şiddetli depremlerde barajda 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.

Hall (1998), yayılı çatlak modelini kullanarak beton kemer barajların deprem analizini gerçekleştirmiştir. Baraj-su, baraj-zemin etkileşiminin dikkate alındığı bu çalışmada çatlak oluşumu, açılıp kapanması olayları uygun bir şekilde temsil edilmiştir. Bu çalışma sonucunda yazar, kemer barajların güçlü yer hareketi sırasında önemli çatlaklara maruz kaldığını, buna rağmen stabilitesini koruduğunu vurgulamaktadır.

### 1.2.2.2. Kavitasyon

Dinamik yükler etkisinde, serbest yüzeyli sıvı ile yapı arasındaki etkileşim sırasında kavitasyon, sıvının lineer olmayan davranışı sonucu ortaya çıkmaktadır. Sıvı ortamda meydana gelen negatif hidrodinamik basınçlar, sıvı elemanda oluşan hidrostatik ve atmosfer basınçlar toplamının sıvının buhar basıncını aştığı takdirde sıvı elemanda fiziksel olarak kabarcıklar meydana geldiği kabul edilmektedir. Bu olay "Kavitasyon" olarak adlandırılmaktadır.

Niwa ve Clough (1980, 1982) kavitasyon olayını, sarsma tablası kullanılarak dinamik yükleme için test edilen bir ağırlık barajının laboratuvar deneylerinde gözlemlemişlerdir. Bu deneyler, kavitasyonun hareketin doğrultusuna bağlı olarak baraj yüzeyindeki çekme gerilmelerini artırabileceğini veya azaltabileceğini göstermektedir. Bu çalışma ile, kavitasyonun en büyük etkiyi barajın kret bölgelerine yakın kısımlarında oluşturacağını ortaya koyulmuştur. Ayrıca yazarlar, kavitasyon olayının yüksek barajlarda, özellikle şiddetli depremlerde, çok daha etkili olduğunu vurgulamışlardır.

Zienkiewicz ve diğ. (1983), dinamik yükler altında beton ağırlık barajlar üzerinde kavitasyon etkilerini araştırmıştır. Şiddetli depremlerde kavitasyon olayının çok yüksek yapıların yerdeğiştirme ve gerilme değerlerini değiştirdiğini, ayrıca kavitasyonun hidrodinamik basınçları artırdığını ifade etmektedirler.

Fenves ve Vargas-Loli (1988), yapı ve sıvının lineer olmayan davranışını dikkate alarak beton ağırlık barajların deprem davranışını incelemiştir. Bu çalışmada, sıvıdaki kavitasyon etkileri araştırılmış olup, sıvının lineer olmayan davranışı iki eğimli doğru ile modellenmiştir. Sıvı ortam, yerdeğiştirme ve basınca dayalı bir formülasyona sahip iken, yapı ortamda standart sonlu eleman formülasyonu kullanılmıştır. Sıvı formülasyonunda basınç, sıvı yer değiştirmesinden bağımsız olarak yer almıştır. Kavitasyon ve lineer olmayan yapı davranışı ortak sistemde birbirlerini etkilediğini vurgulayan yazarlar, kavitasyonun beton ağırlık barajlarda küçük bir etkiye sahip olduğunu belirtmektedirler.

El-Aidi ve Hall (1989-a, 1989-b), rezervuardaki suda oluşan kavitasyonun beton ağırlık barajlar üzerinde çok az bir etkiye sahip olduğunu belirtmiştir.

### 1.2.2.3. Büzülme Derzleri (Contraction Joint)

Niwa ve Clough (1980, 1982), beton blokların birleşim yerlerindeki düğüm noktalarının açılması olayını, örnek bir barajın yatay kesitine benzeyen dilimlenmiş kemer halka modeli ile temsil etmeye çalışmıştır. Bu mekanizmanın, kemer doğrultusunda çekme gerilmelerinin oluşumunu önlediği ve yapının titreşim periyodunda değişiklik oluşturduğu için dinamik davranışı büyük oranda etkilediği görülmüştür. Bu arada, kemer doğrultusundaki basınç gerilmeleri, düğüm noktasının açılması sonucunda önemli ölçüde artmaktadır. Bunun en önemli nedeni, kısmen açılmış kemer dilimleri arasındaki temas alanının azalmasıdır. Lineer dinamik analiz sonuçlarının yorumlanması esasına dayanan bu deneysel gözlemler, tasarımcıların barajın deprem esnasındaki davranışı ile ilgili sezgilerini doğrulamış ve barajın güvenliği hususunda bir hüküm vermelerine yardımcı olmuştur. Aynı çalışmada, baraj betonunda çatlak oluşumu, bir ağırlık baraj kesiti üzerinde incelenmiştir. Çatlaklı konsol modeller üzerinde yapılan testlerden, kemer ve konsollardan oluşan kemer barajların deprem yüklerine karşı, sadece kemer veya sadece konsollardan oluşan barajlara göre daha dayanıklı olduğu görülmüştür.

Hall ve Dowling (1985), Dowling (1988) ve Dowling ve Hall (1989), beton blokların birleşim yerlerindeki davranışı tanımlayabilmek için, lineer olmayan davranış gösteren yaylardan oluşan farklı bir düğüm noktası modeli geliştirmişlerdir. Bu model ile yapılan analizler, orta büyüklükteki 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 (1992), statik yüklerden dolayı kemer barajlarda oluşacak çatlakları düşey bloklar arasında yüzey elemanı kullanarak incelemiştir. 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 izotrop 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 (Boggs vd., 1988; Fenves vd., 1992; Mays ve Roehm, 1993). Fenves ve diğ. (1992) ile Mays ve Roehm (1993), beton bloklar arasında düğüm noktası oluşturularak bu gerilmelerin azaltılabileceğini göstermişlerdir.

### 1.3. Tezin İçeriği

Literatür araştırması sonucu, beton barajlar üzerinde yapılan çalışmaların çoğunlukla çatlak, kavitasyon ve büzülme derzleri üzerinde yoğunlaştığı görülmüştür. Deprem hareketinden dolayı beton barajlarda oluşan çekme gerilmelerinin betonun lineer olmayan davranışına etkisini belirleyebilmek amacıyla bu tezde, kemer barajların malzeme bakımından lineer ve lineer olmayan dinamik davranışı Lagrange yaklaşımı ile incelenmektedir.

Rezervuardaki su kütlesi, Wilson ve Khalvati (1983) tarafından önerilen iki boyutlu Lagrange sıvı elemanların üç boyutlu 8-düğüm noktalı versiyonu ile temsil edilmiştir. Bu sıvı eleman, FORTRAN 77 programlama dilinde kodlanarak genel amaçlı NONSAP (Bathe vd., 1974) yapı analiz programına eklenmiş ve baraj-su etkileşimi, geliştirilen bu program ile incelenmiştir. Analizlerde, kaya zemin ve suyun lineer elastik izotrop malzeme olduğu kabul edilmiştir. Baraj betonunun lineer olmayan davranışı, Eğri Tanımlama ve Drucker-Prager modeli ile tanımlanarak kemer barajların lineer olmayan davranışı incelenmiştir. Chen ve Mizuno (1990)'da ayrıntıları iki boyutlu olarak verilen Drucker-Prager modelinin üç boyutlu hali geliştirilerek NONSAP (Bathe vd., 1974) yapı analiz programına eklenmiştir. Rezervuardaki su seviyesindeki değişimin ve kaya zemin özelliklerinin baraj davranışına etkisi de ayrıca incelenmiştir.

Burada, öncelikle örnek bir kemer baraj-su-zemin sistemi tanıtılmakta, daha sonra uygulama amacıyla seçilen Tip-5 kemer barajı için hazırlanan baraj-su, baraj-zemin ve baraj-su-zemin etkileşim modelleri ayrıntılı olarak verilmektedir. Sıvı-yapı gibi iki farklı ortamdaki oluşan sistemlerde sönüm oranının önemi ve bu çalışmada kullanılan Rayleigh sönümünün nasıl belirlendiği açıklanmaktadır. Seçilen yer hareketinin tanıtılmasından sonra, Tip-5 kemer barajının malzeme bakımından lineer ve lineer olmayan dinamik analizine geçilmektedir. Analizlerde, esas olarak kemer baraj-su etkileşimi incelenmiştir. Rezervuarın boş ve dolu olması durumu için analizler yapılarak kemer baraj davranışına su etkisi belirlenmeye çalışılmıştır. Baraj-su etkileşimi, kaya zeminin rijit ve esnek olması durumu için ayrı ayrı ele alınmıştır. Analizler sonucu, baraj-su ara yüzeyinde elde edilen hidrodinamik basınçlar, baraj kretindeki yerdeğiştirmeler ve memba ve mansap yüzeyindeki gerilmeler ayrıntılı olarak verilmiştir.

## 1.4. Lineer Olmayan Malzeme 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 tam olarak 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 (Aksoğan, 1986).

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

Bir mekanik probleminin çözümünde izlenecek yol üç aşamada özetlenebilir; a) Denge koşullarının sağlanması, b) Uygunluk koşullarının sağlanması, c) Malzemeler için gerilme-şekildeğiştirme 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-şekildeğiştirme özellikleri büyük önem taşır (Ersoy, 1987).

Çeşitli yükler altında elastik bölgeden plastik bölgeye geçen bir malzemenin gerilme-şekildeğiştirme bağıntısı gerçeğe yakın olarak akma teorisi ile tanımlanabilmektedir. Bu teori,  $d\epsilon_{ij}^p$  plastik şekildeğiştirme artımı ile  $\sigma_{ij}$  gerilme hali ve  $d\sigma_{ij}$  gerilme artımı arasındaki ilişkiyi belirler. Akma teorisinin en basit şekli, tam plastisitedir.

### 1.4.1. Akma Teorisi

Bir malzemedeki, uygulanan yüklerden dolayı elastik bağıntıların geçerliliğini yitirdiği gerilme halini incelemek plastisite teorisinin alanına girmektedir. Elastik-plastik malzemeler için bu teori, literatürde akma teorisi olarak bilinmektedir. Sünek malzemeler

için akma ifadesi uygun olurken, gevrek malzemeler için ise kırılma ifadesi daha uygun olmaktadır. Burada, genel ifadeler kullanılırken literatürdeki hali ile akma ifadesi kullanılacaktır.

Akma teorisinde; gerilme artımı ile şekil değiştirme artımı arasındaki bağıntı belirlenirken  $d\varepsilon_{ij}$  toplam şekil değiştirme artımı,  $d\varepsilon_{ij}^e$  elastik şekil değiştirme artımı ve  $d\varepsilon_{ij}^p$  plastik şekil değiştirme artımının toplamı şeklinde kabul edilmektedir. Yani,

$$d\varepsilon_{ij} = d\varepsilon_{ij}^e + d\varepsilon_{ij}^p \quad (1.6)$$

Elastik şekil değiştirme artımının Hooke kanunlarına tamamen uyduğu kabul edilmektedir. Yani, malzeme hacimsel elastisite modülü (K) ve kayma modülü (G) ile tanımlanmaktadır. Öte yandan, plastik şekil değiştirme artımını belirlemek için; 1) Akma yüzeyi, 2) Plastik şekil değiştirme artımı ile gerilme arasındaki ilişkinin genel formunu tanımlayan akma kuralı, kavramlarının tanımlanması gerekmektedir.

Elastik-plastik malzemeler için gerilme-şekil değiştirme bağıntılarının belirlenmesindeki temel düşünce, sadece gerilme durumuna bağlı olan bir akma yüzeyinin  $[f(\sigma_{ij})]$  varlığını kabul etmektir.  $f = 0$  ve  $df = 0$  olduğu zaman plastik akma oluşur. Bu bağıntı, tamamen plastik bir malzeme için yükleme kriteri olarak kullanılmaktadır. Böylece,  $f = 0$  ve  $df < 0$  boşalma durumunu,  $f < 0$  ise elastik durumu gösterir. Yükleme sırasında, hem elastik hem de plastik şekil değiştirmeler oluşabilir. Plastik akma, sabit akma yüzeyinin dış normali boyunca gelişir. Bu, çakışık akma kuralına sahip malzemeler için (associated flow rule material) diklik şartı (normality condition) olarak bilinmektedir.

#### 1.4.1.1. Akma Kriteri

Elastik-plastik malzemelerde, plastisite eşiğini veya elastik bağıntıların geçerliliğini kaybettiği noktayı tanımlamak gerekir. Çekme, basınç ve kesme gibi bir boyutlu gerilme halleri için plastisite eşiği akma noktası olarak alınabilir. İki eksenli gerilme durumunda, akma noktaları yerine akma eğrilerinin belirlenmesi gerekmektedir. En genel durumda üç boyutlu gerilme hali için ise, akma yüzeyleri belirlenmelidir. Bu yüzey veya eğriler, matematiksel olarak *Akma Kriteri* olarak adlandırılmaktadır. Bu kriterler, plastik

şekildeğiştirmenin meydana geldiği gerilme halini tanımlamak ve elasto-plastik bölge ile elastik bölgeyi ayırmak için kullanılmaktadır. Akma yüzeyinin içindeki her gerilme halinde bir elastik durum ve akma yüzeyi üzerindeki her noktada ise bir plastik durum söz konusudur. Elastik durumdaki şekildeğiştirmelerin Hooke kanunlarına uyduğu kabul edilmektedir. Plastik durumdaki şekildeğiştirme ise, elastik şekildeğiştirmeler ile kalıcı plastik şekildeğiştirmelerin toplamı olarak tanımlanmaktadır. Bu yüzeyin içinde gerilmenin izlediği yörüngeler tamamen tersinir yerdeğiştirmeler, akma yüzeyi ile kesişen gerilme yörüngeleri ise hem tersinir hem de kalıcı (plastik) yerdeğiştirmeler meydana getirir.

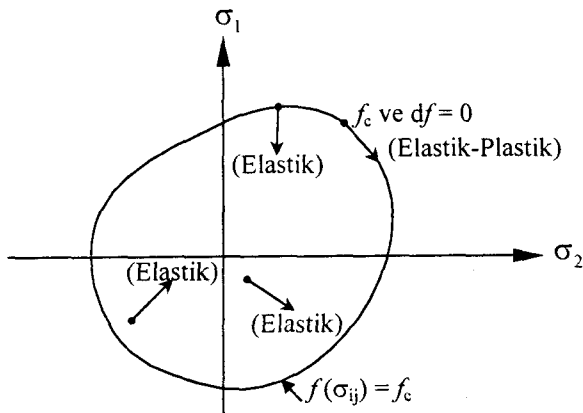
Genel olarak, başlangıç akma fonksiyonu (veya kriteri)  $f$  şu şekilde tanımlanabilir;

$$f(\sigma_{ij}) = f_c \quad (1.7)$$

Burada,  $f_c$  tam plastik malzeme için sabit bir değerken pekleşen malzemeler için değişkendir. İki eksenli gerilme uzayında ilk akma yüzeyi dikkate alınacak olursa; tam plastik malzeme için akma yüzeyi gerilme uzayında sabittir ve dolayısıyla plastik şekildeğiştirme sadece gerilmenin izlediği yörünge akma yüzeyine ulaştığında meydana gelmektedir (Şekil 1.1). Böylece plastik akma için yükleme şartı,

$$f = f_c \text{ ve } df = \frac{\partial f}{\partial \sigma_{ij}} d\sigma_{ij} = 0 \quad (1.8)$$

şeklinde verilmektedir.



Şekil 1.1. Tam plastik bir malzeme için akma yüzeyi (Chen ve Mizuno, 1990).

Öte yandan, gerilmedeki artıştan sonra yeni gerilme hali elastik bölgede kalırsa, elastik davranış söz konusudur. Yani,

$$f < f_c \quad (1.9)$$

Akma yüzeyinde meydana gelen özel bir gerilme yörüngesinde elastik davranışı tanımlayan yükleme şartı,

$$f = f_c \text{ ve } df = \frac{\partial f}{\partial \sigma_{ij}} d\sigma_{ij} < 0 \quad (1.10)$$

şeklinde ifade edilmektedir.

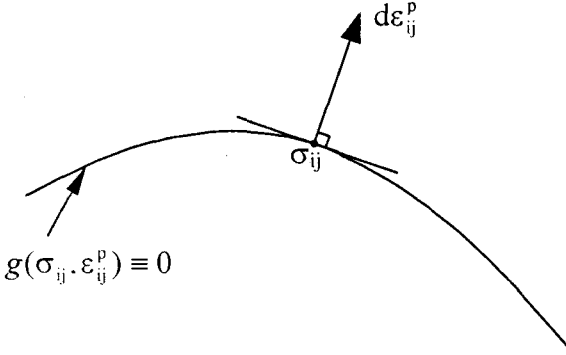
#### 1.4.1.2. Akma Kuralı

Akma kuralı, aşırı yükleme sonucu akmış bir elemanda mevcut  $\sigma_{ij}$  gerilme hali ile bir sonraki plastik gerilme artımı arasındaki ilişkiyi tanımlar. Bu ilişki, plastik potansiyel fonksiyon ( $g$ ) kavramı kullanılarak kurulur. Plastisite teorisinde, plastik şekildeğiştirme artımının yönü plastik potansiyel fonksiyon ( $g$ ) yardımıyla aşağıdaki gibi tanımlanır:

$$d\varepsilon_{ij}^p = d\lambda \frac{\partial g}{\partial \sigma_{ij}} \quad (1.11)$$

Burada,  $d\lambda$ , gerilme hali ve yük geçmişine orantılı olarak bağlı pozitif bir skalerdir. Eğer potansiyel ve akma yüzeyleri çakışırsa ( $f=g$ ), bu durumda akma kuralı çakışık tip (associated type), aksi durumda çakışık olmayan tip (non-associated type) olarak adlandırılır. (1.11) denkleminde anlaşılacağı üzere,  $d\varepsilon_{ij}^p$  plastik şekildeğiştirme artım vektörünün yönü, plastik potansiyel yüzeyine incelenen gerilme noktasında ( $\sigma_{ij}$ ) diktir. Bu durum, Şekil 1.2'de şematik olarak gösterilmiştir.

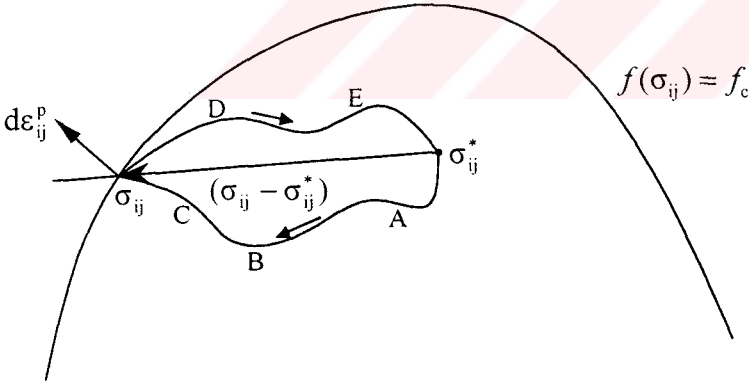




Şekil 1.2. Akma kuralı (Chen ve Mizuno, 1990).

#### 1.4.1.3. Akma Teorisinde Aranılan Temel Şartlar

Plastik şekildeğiştirmelerin tersinir olmayan karakteri, ancak tersinir olmama şartı ile açıklanabilir. Bu şarta göre; plastik şekildeğiştirmede değişim ne zaman meydana gelirse gelsin, plastik şekildeğiştirme değişimi üzerinde gerilmelerin yaptığı iş pozitifdir. Bu durumu açıklamak için, akma yüzeyi üzerinde veya içinde homojen gerilme haline ( $\sigma_{ij}^*$ ) maruz birim hacimli tam plastik malzemeyi ele alalım (Şekil 1.3).



Şekil 1.3. Bir dış etki ile oluşan gerilme yörüngeleri (Chen ve Mizuno, 1990).

Gerilme hali akma yüzeyine ulaşıncaya kadar, yüzey içerisinde uzanan ABC yörüngesi boyunca gerilmeleri sürükleyen bir dış etki düşünelim. Bu dış etkinin kısa bir zaman için akma yüzeyi üzerinde  $\sigma_{ij}$  gerilme haline ulaştığını kabul edelim. Bu durumda plastik akma meydana gelmeli ve bu akma süresince sadece plastik iş yapılmalıdır.

Ardından dış yükün kaldırıldığını ve DE yolu boyunca orijinal ilk  $\sigma_{ij}^*$  gerilme haline döndüğünü düşünelim. Tam elastik bütün değişimler tamamen geri dönecek ve  $\sigma_{ij}^*$  den  $\sigma_{ij}$  ye tanımlanan yörüngeden bağımsız olacaktır. Dolayısıyla bütün elastik enerji geri kazanılacaktır. Bu yükleme ve boşalma çevrimi içinde dış yükün yaptığı plastik iş  $(\sigma_{ij} - \sigma_{ij}^*)$  şeklinde tanımlı gerilme vektörü ile  $d\varepsilon_{ij}^p$  plastik şekildeğiştirme artım vektörünün skaler çarpımına eşittir. Plastik şekildeğiştirmelerdeki değişim için bu işin pozitif olması şartından,

$$(\sigma_{ij} - \sigma_{ij}^*)d\varepsilon_{ij}^p \geq 0 \quad (1.12)$$

elde edilir. Plastik şekildeğiştirme koordinatları ile gerilme koordinatlarının çakışık olması durumunda (1.12) denkleminin geometrik durumu Şekil 1.3'teki gibidir. Pozitif skaler çarpım için  $(\sigma_{ij} - \sigma_{ij}^*)$  gerilme vektörü ile plastik şekildeğiştirme artım vektörü arasındaki açının bilinmesi gereklidir. Plastik akma için diklik şartı dikkate alınır, plastik şekildeğiştirme artım vektörü de akma yüzeyine dik olur. (1.12) denkleminin bütün  $(\sigma_{ij} - \sigma_{ij}^*)$  için sağlanması gerektiğinden akma yüzeyi, *dışbükey* olmalıdır.

## 1.5. Üç Boyutlu Malzeme Modelleri

### 1.5.1. Lineer Elastik Malzeme Modeli

Lineer elastik bir malzeme için üç boyutlu gerilme-şekildeğiştirme bağıntısı,

$$\sigma_{ij} = D_{ijkl}^e \varepsilon_{kl} \quad (1.13)$$

şeklinde yazılabilir. Burada;  $\varepsilon_{kl}$ , elastik şekildeğiştirmeler;  $\sigma_{ij}$ , elastik şekildeğiştirmelere karşılık gelen gerilmeler ve  $D_{ijkl}^e$  lineer elastik malzeme matrisidir. (1.13) denklemi matris formunda yazılacak olursa;

$$\begin{Bmatrix} \sigma_{11} \\ \sigma_{22} \\ \sigma_{33} \\ \sigma_{12} \\ \sigma_{13} \\ \sigma_{23} \end{Bmatrix} = \frac{E}{(1+\nu)(1-2\nu)} \begin{bmatrix} 1-\nu & \nu & \nu & 0 & 0 & 0 \\ \nu & 1-\nu & \nu & 0 & 0 & 0 \\ \nu & \nu & 1-\nu & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & \frac{(1-2\nu)}{2} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & \frac{(1-2\nu)}{2} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \frac{(1-2\nu)}{2} \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \epsilon_{11} \\ \epsilon_{22} \\ \epsilon_{33} \\ \gamma_{12} \\ \gamma_{13} \\ \gamma_{23} \end{Bmatrix} \quad (1.14)$$

şeklinde elde edilir. Lineer elastik bir malzemenin matematik modelinde genellikle aşağıdaki bağıntılar kullanılmaktadır:

$$\left. \begin{array}{l} K = \frac{E}{3(1-2\nu)} \\ G = \frac{E}{2(1+\nu)} \end{array} \right\} \text{(a) veya} \quad \left. \begin{array}{l} E = \frac{9KG}{3K+G} \\ \nu = \frac{3K-2G}{2(3K+G)} \end{array} \right\} \text{(b)} \quad (1.15)$$

(1.15b)'deki denklemler, (1.14) denkleminde yerine yazılırsa, lineer elastik malzemenin üç boyutlu gerilme-şekildeğiştirme bağıntısı,

$$\begin{Bmatrix} \sigma_{11} \\ \sigma_{22} \\ \sigma_{33} \\ \sigma_{12} \\ \sigma_{13} \\ \sigma_{23} \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} K + (4/3)G & K - (2/3)G & K - (2/3)G & 0 & 0 & 0 \\ K - (2/3)G & K + (4/3)G & K - (2/3)G & 0 & 0 & 0 \\ K - (2/3)G & K - (2/3)G & K + (4/3)G & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & G & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & G & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & G \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \epsilon_{11} \\ \epsilon_{22} \\ \epsilon_{33} \\ \gamma_{12} \\ \gamma_{13} \\ \gamma_{23} \end{Bmatrix} \quad (1.16)$$

çok sık kullanılan bu şekliyle elde edilir.

### 1.5.2. Eğri Tanımlama Modeli

Eğri tanımlama modeli, şekildeğiştirme teorisine dayanan “Değişken Modüller Modelleri”nden birisidir. Bu model, üç boyutlu malzeme davranışını belirleyen gerilme-şekildeğiştirme eğrisini basit bir şekilde tanımlar. Kısaca, hacimsel elastisite ve kayma

modülünü, hacimsel şekildeğiştirmeye bağlı olarak belirleyen bir fonksiyondan ibarettir. Bu fonksiyon Şekil 1.4, 1.5 ve 1.6'da gösterildiği gibi parça parça lineer davranış sergilemektedir.

Malzemenin yükleme veya boşalma durumunda olup olmadığı, sadece hacimsel şekildeğiştirmenin aldığı değer ile belirlenmektedir (Bathe vd., 1974). Eğri tanımlama modeli kullanılırken, gerilme-şekildeğiştirme bağıntıları,

$$s_{ij} = 2Ge_{ij} \quad (1.17)$$

ve

$$\sigma_m = 3K\varepsilon_m \quad (1.18)$$

olarak kabul edilir. Burada;  $s_{ij}$  deviatorik gerilmeleri göstermektedir.  $e_{ij}$  ise deviatorik şekildeğiştirme olup,

$$e_{ij} = \varepsilon_{ij} - \varepsilon_m \delta_{ij} \quad (1.19)$$

denklemleri ile verilmektedir. Burada;  $\delta_{ij}$  Kronecker deltası olup,  $i=j$  için 1;  $i \neq j$  için 0 değerine sahiptir.  $\varepsilon_m$  ise ortalama şekildeğiştirme olup ve

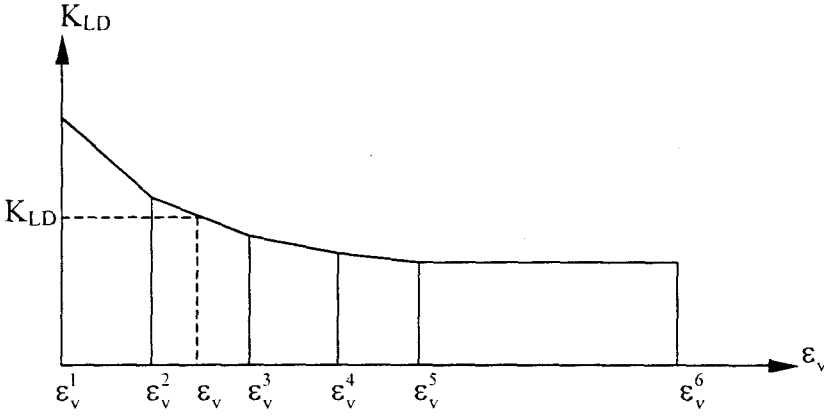
$$\varepsilon_m = \frac{\varepsilon_{11} + \varepsilon_{22} + \varepsilon_{33}}{3} = \frac{\varepsilon_{ii}}{3} \quad (1.20)$$

bağıntısı ile hesaplanmaktadır. Hacimsel elastisite ve kayma modülü ( $K$  ve  $G$ ) yükleme durumunun fonksiyonudurlar. Çözüm sırasında ulaşılan minimum ortalama şekildeğiştirmeye,  $\varepsilon_{min}$ , göre malzemenin yükleme veya boşalmada olduğu dikkate alınır. Eğer  $\varepsilon_m \leq \varepsilon_{min}$  ise malzeme yükleme,  $\varepsilon_m > \varepsilon_{min}$  ise malzeme boşalma durumundadır. Yani,

$$K = \begin{cases} \varepsilon_m \leq \varepsilon_{min} & \text{ise } K_{LD} \\ \varepsilon_m > \varepsilon_{min} & \text{ise } K_{UN} \end{cases} \quad (1.21)$$

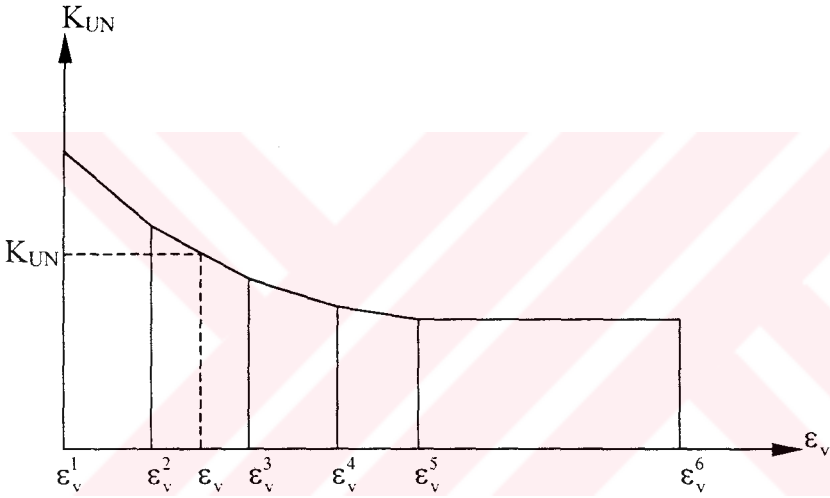
ve

YÜKLEME DURUMUNDA  
HACİMSEL ELASTİSİTE  
MODÜLÜ



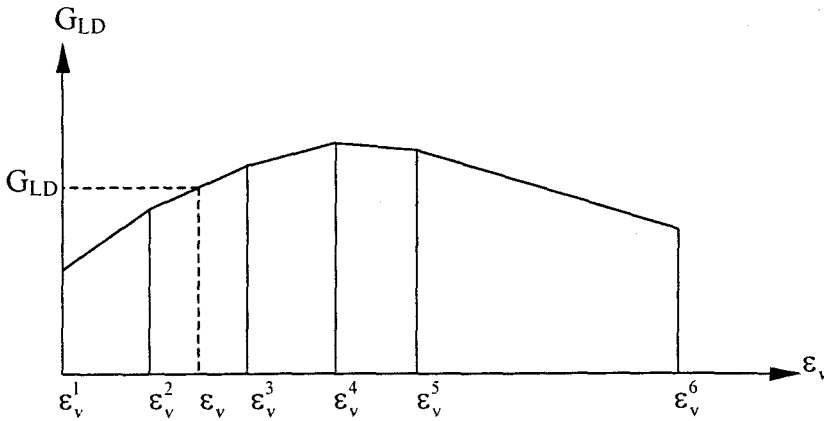
Şekil 1.4. Eğri tanımlama modelinde yükleme durumu için hacimsel elastisite modülünün tanımı (Bathe vd., 1974).

BOŞALMA DURUMUNDA  
HACİMSEL ELASTİSİTE  
MODÜLÜ



Şekil 1.5. Eğri tanımlama modelinde boşalma durumu için hacimsel elastisite modülünün tanımı (Bathe vd., 1974).

YÜKLEME DURUMUNDA  
KAYMA MODÜLÜ



Şekil 1.6. Eğri tanımlama modelinde yükleme durumu için kayma modülünün tanımı (Bathe vd., 1974).

$$G = \begin{cases} \varepsilon_m \leq \varepsilon_{\min} & \text{ise } G_{LD} \\ \varepsilon_m > \varepsilon_{\min} & \text{ise } G_{UN} \end{cases} \quad (1.22)$$

olarak alınır. Boşalma durumunda malzemenin kayma modülü ( $G_{UN}$ ),

$$G_{UN} = G_{LD} \frac{K_{UN}}{K_{LD}} \quad (1.23)$$

bağıntısı ile elde edilmektedir. (1.21), (1.22) ve (1.23) denklemlerinde kullanılan LD alt indisi, yükleme durumunu; UN alt indisi ise boşalma durumunu temsil etmektedir.

### 1.5.3. Drucker-Prager Malzeme Modeli

Drucker-Prager malzeme modeli ile ilgili burada verilen bilgilerin büyük çoğunluğu Chen ve Mizuno (1990)'dan alınmıştır. Bu nedenle, malzeme modelinin tanıtımında ayrıca kaynak gösterilmemiştir.

Elastik-plastik malzemeler için en genel halde gerilme-şekildeğiştirme bağıntısı tansörel formda;

$$d\sigma_{ij} = D_{ijkl}^{ep} d\varepsilon_{kl} \quad (1.24)$$

şeklinde yazılabilir. Burada  $D_{ijkl}^{ep}$  elastik-plastik malzeme matrisidir ve

$$D_{ijkl}^{ep} = 2G\delta_{ik}\delta_{jl} + (K - \frac{2}{3}G)\delta_{ij}\delta_{kl} - \frac{1}{H}H_{ij}H_{kl} \quad (1.25)$$

şeklinde verilmektedir. Burada;

$$H = 9KA^2 + 4GJ_2B^2 + 12GJ_3BC + 2G(s_{ik}s_{kj}s_{il}s_{lj} - \frac{4}{3}J_2)C^2 \quad (1.26)$$

$$H_{ij} = 3KA\delta_{ij} + 2G(Bs_{ij} + Ct_{ij}) \quad (1.27)$$

$$A = \frac{\partial f}{\partial I_1}, \quad B = \frac{\partial f}{\partial J_2} \quad \text{ve} \quad C = \frac{\partial f}{\partial J_3} \quad (1.28)$$

şeklinde. (1.24) denklemini matris formda yazılacak olursa, aşağıdaki gibi elde edilir:

$$\begin{Bmatrix} d\sigma_{11} \\ d\sigma_{22} \\ d\sigma_{33} \\ d\sigma_{12} \\ d\sigma_{13} \\ d\sigma_{23} \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} K + (4/3)G & K - (2/3)G & K - (2/3)G & 0 & 0 & 0 \\ K - (2/3)G & K + (4/3)G & K - (2/3)G & 0 & 0 & 0 \\ K - (2/3)G & K - (2/3)G & K + (4/3)G & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & G & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & G & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & G \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} d\varepsilon_{11} \\ d\varepsilon_{22} \\ d\varepsilon_{33} \\ d\gamma_{12} \\ d\gamma_{13} \\ d\gamma_{23} \end{Bmatrix}$$

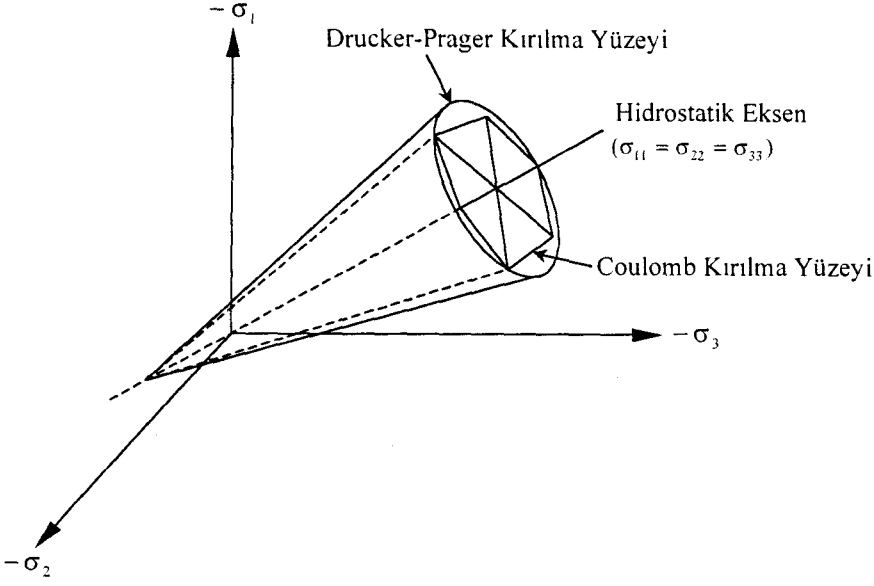
$$- \frac{1}{H} \begin{bmatrix} H_{11}^2 & H_{11}H_{22} & H_{11}H_{33} & H_{11}H_{12} & H_{11}H_{13} & H_{11}H_{23} \\ H_{22}H_{11} & H_{22}^2 & H_{22}H_{33} & H_{22}H_{12} & H_{22}H_{13} & H_{22}H_{23} \\ H_{33}H_{11} & H_{33}H_{22} & H_{33}^2 & H_{33}H_{12} & H_{33}H_{13} & H_{33}H_{23} \\ H_{12}H_{11} & H_{12}H_{22} & H_{12}H_{33} & H_{12}^2 & H_{12}H_{13} & H_{12}H_{23} \\ H_{13}H_{11} & H_{13}H_{22} & H_{13}H_{33} & H_{13}H_{12} & H_{13}^2 & H_{13}H_{23} \\ H_{23}H_{11} & H_{23}H_{22} & H_{23}H_{33} & H_{23}H_{12} & H_{23}H_{13} & H_{23}^2 \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} d\varepsilon_{11} \\ d\varepsilon_{22} \\ d\varepsilon_{33} \\ d\gamma_{12} \\ d\gamma_{13} \\ d\gamma_{23} \end{Bmatrix} \quad (1.29)$$

Coulomb kırılma kriteri, sürtümlü malzemeler için en iyi bilinen modeldir. Ancak, bu kriter üç boyutlu durumlarda matematiksel olarak uygun değildir. Çünkü, kırılma yüzeyindeki köşe noktaları tekilliğe neden olmaktadır (Şekil 1.7). Drucker ve Prager (1952), aşağıdaki kırılma fonksiyonunu geliştirerek,

$$f = \alpha I_1 + \sqrt{J_2} - k \quad (1.30)$$

Coulomb kırılma yüzeyindeki köşe noktalarını kaldırıp düzgün bir yüzey elde etmiştir (Şekil 1.7). (1.30) denklemindeki  $I_1$ , gerilme tansörünün birinci invariantı olup aşağıdaki gibidir:

$$I_1 = \sigma_{11} + \sigma_{22} + \sigma_{33} \quad (1.31)$$



Şekil 1.7. Coulomb ve Drucker-Prager kırılma kriteri (Chen ve Mizuno, 1990).

$J_2$  ise deviatorik gerilme tansörünün ikinci invariantıdır ve

$$J_2 = \frac{1}{2} s_{ij} s_{ij} \quad (1.32)$$

şeklinde elde edilmektedir. Burada  $s_{ij}$  deviatorik gerilmeler,

$$s_{ij} = \sigma_{ij} - \delta_{ij} \sigma_m \quad (i, j = 1, 2, 3) \quad (1.33)$$

şeklinindedir.  $\delta_{ij}$  kronecker deltası olup,  $i=j$  için 1;  $i \neq j$  için 0 değerine sahiptir.  $\sigma_m$  ise ortalama gerilme olup,

$$\sigma_m = \frac{I_1}{3} = \frac{\sigma_{11} + \sigma_{22} + \sigma_{33}}{3} = \frac{\sigma_{ii}}{3} \quad (1.34)$$

gibi elde edilmektedir. Denklem (1.34) yardımıyla (1.33) denklemdeki terimler elde edilip (1.32) denklemine yerine konursa, deviatorik gerilme tansörünün ikinci invariantı,



$$J_2 = \frac{1}{6} [(\sigma_{11} - \sigma_{22})^2 + (\sigma_{22} - \sigma_{33})^2 + (\sigma_{33} - \sigma_{11})^2] + \sigma_{12}^2 + \sigma_{13}^2 + \sigma_{23}^2 \quad (1.35)$$

şeklinde elde edilir.

Drucker-Prager kırılma fonksiyonundaki  $\alpha$  ve  $k$ , kohezyon ( $c$ ) ve içsel sürtünme açısına ( $\phi$ ) bağlı olarak;

$$\alpha = \frac{2 \sin \phi}{\sqrt{3} (3 - \sin \phi)} \quad (1.36)$$

$$k = \frac{6c \cos \phi}{\sqrt{3} (3 - \sin \phi)} \quad (1.37)$$

şeklinde belirlenen sabitlerdir. Drucker-Prager kırılma yüzeyi, zemin ve beton gibi malzemeler için von Mises akma yüzeyinin bir uzantısı şeklinde düşünülebilir. (1.30) denkleminde  $\alpha = 0$  olursa, metaller için çok iyi bilinen von Mises akma fonksiyonu elde edilir. Bu nedenle, bu kriter genişletilmiş von Mises kriteri olarak ta adlandırılabilir.

Drucker-Prager modeli için (1.28) denklemlerindeki katsayılar

$$A = \alpha, \quad B = \frac{1}{2\sqrt{J_2}} \quad \text{ve} \quad C = 0 \quad (1.38)$$

şeklinde elde edilir. (1.26) ve (1.27) denklemleri ise, (1.38) denklemindeki katsayılardan yararlanılarak;

$$H = 9K\alpha^2 + G \quad (1.39)$$

ve

$$H_{ij} = 3K\alpha\delta_{ij} + \frac{G}{\sqrt{J_2}} s_{ij} \quad (1.40)$$

şeklinde elde edilir. (1.40) denklemini yardımıyla Drucker-Prager modeli için, elastik-plastik gerilme-şekildeğiştirme malzeme matrisine ait terimler;

$$H_{11} = 3K\alpha + \frac{G}{\sqrt{J_2}} s_{11}; \quad s_{11} = \sigma_{11} - \frac{1}{3}(\sigma_{11} + \sigma_{22} + \sigma_{33}) \quad (1.41)$$

$$H_{22} = 3K\alpha + \frac{G}{\sqrt{J_2}} s_{22}; \quad s_{22} = \sigma_{22} - \frac{1}{3}(\sigma_{11} + \sigma_{22} + \sigma_{33}) \quad (1.42)$$

$$H_{33} = 3K\alpha + \frac{G}{\sqrt{J_2}} s_{33}; \quad s_{33} = \sigma_{33} - \frac{1}{3}(\sigma_{11} + \sigma_{22} + \sigma_{33}) \quad (1.43)$$

$$H_{12} = \frac{G}{\sqrt{J_2}} s_{12}; \quad s_{12} = \sigma_{12} \quad (1.44)$$

$$H_{13} = \frac{G}{\sqrt{J_2}} s_{13}; \quad s_{13} = \sigma_{13} \quad (1.45)$$

$$H_{23} = \frac{G}{\sqrt{J_2}} s_{23}; \quad s_{23} = \sigma_{23} \quad (1.46)$$

şeklinde elde edilir.

## 1.6. Üç Boyutlu Sıvı-Yapı Etkileşiminde Lagrange Yaklaşımı

Bu kısımda, önce sıvının temel dinamik davranışı, daha sonra Lagrange yaklaşımına göre lineer elastik, dönmesi kısıtlanmış ve viskoz olmayan bir sıvı elemanın küçük yerdeğişiklikler yapması hali için temel bağıntılar, Wilson ve Khalvati (1983) ve Greeves (1991)'teki formülasyona göre verilecektir. İzoparametrik sonlu eleman bağıntıları kullanılarak sıvı-yapı sistemlerinin sonlu eleman formülasyonu, ilk olarak sadece sıvı sistemler için, daha sonra sıvı-yapı ortak sistemler için verilmektedir.

### 1.6.1. Sıvı Davranışının Esasları

Lineer sıkışabilir, viskoz olmayan (inviscid) ve dönmesi kısıtlanmış bir sıvının küçük genlikli hareketler altında üç boyutlu hareketi,

$$\frac{\partial^2 P}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 P}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 P}{\partial z^2} = \frac{1}{C^2} \frac{\partial^2 P}{\partial t^2} \quad (1.47)$$

dalga denklemiyle verilmektedir (Zienkiewicz, 1964). Burada; P hidrodinamik basıncı (hidrostatik basınç fazlası), t zamanı, x, y, z kartezyen koordinatları göstermektedir. C, sudaki ses hızı (veya sudaki basınç dalgalarının hızı) olup,

$$C = \sqrt{\frac{C_{11}}{\rho_f}} \quad (1.48)$$

ile tanımlanmaktadır. Bu denklemde;  $C_{11}$  sıvının hacimsel elastisite modülünü,  $\rho_f$  ise sıvının kütle yoğunluğu temsil etmektedir.

Dinamik etkilere maruz sıvı sistemlerde hidrostatik basınçların yanı sıra oluşan hidrodinamik basınçlar, (1.47) denkleminin uygun sınırı şartları altında çözülmesiyle elde edilir. Bu sınır şartları genel olarak aşağıdaki şekilde tanımlanmaktadır;

1) Sıvı serbest yüzeyinde yüzey dalgalarının oluştuğu kabul edilirse bu yüzeyde

$$\frac{\partial P}{\partial z} = -\frac{1}{g} \frac{\partial^2 P}{\partial t^2} \quad (1.49)$$

bağıntısı geçerli olur. Burada; z, düşey eksen ve g, yerçekimi ivmesidir. Sıvı serbest yüzeyinde yüzey dalgalarının oluşmadığı kabul edilirse bu sınır şartı aşağıdaki gibi olur;

$$P = 0 \quad (1.50)$$

2) Sıvı serbest yüzeyi dışındaki yüzeyler (sıvı-katı temas yüzeyleri) herhangi bir ivmeye maruz ise bu yüzeyler için sınır şartı,

$$\frac{\partial P}{\partial n} = -\rho_f a_n \quad (1.51)$$

şeklinde dir. Burada; n, sıvı yüzeyi normalini,  $a_n$  ise bu normal doğrultusundaki ivmeyi göstermektedir. Eğer bu yüzeyler herhangi bir ivmeye maruz değilse bu yüzeylerde;

$$\frac{\partial P}{\partial n} = 0 \quad (1.52)$$

sınır şartı geçerlidir.

### 1.6.2. Lagrange Sıvı Elemanın Davranışı ile İlgili Temel Bağıntılar

Lagrange yaklaşımına göre dönmesi kısıtlanmış ve viskoz olmayan lineer elastik bir sıvının küçük yerdeğişiklikler yapması durumunda basınç ile hacimsel şekil değiştirme arasında,

$$P = C_{11} \varepsilon_v \quad (1.53)$$

bağıntısı tanımlanmıştır (Wilson ve Khalvati, 1983). Bu ifadede; P basıncı (ortalama gerilmeye eşit),  $C_{11}$  sıvının hacimsel elastisite modülünü,  $\varepsilon_v$  ise hacimsel şekil değiştirme göstermektedir. Hacimsel şekil değiştirme, kartezyen koordinatlarda şekil değiştirme bileşenleri yardımıyla,

$$\varepsilon_v = \varepsilon_x + \varepsilon_y + \varepsilon_z \quad (1.54)$$

şeklinde ifade edilmektedir. Hacimsel şekil değiştirme, yer değiştirme bileşenleri ile,

$$\varepsilon_v = \frac{\partial U_{fx}}{\partial x} + \frac{\partial U_{fy}}{\partial y} + \frac{\partial U_{fz}}{\partial z} \quad (1.55)$$

şeklinde yazılabilir. Burada;  $U_{fx}$ ,  $U_{fy}$ ,  $U_{fz}$  sırasıyla x, y, z doğrultusundaki yer değiştirme bileşenleridir.

Sıvının dönmeye karşı rijitliğini elde etmek için ceza yöntemi (Zienkiewicz ve Taylor, 1989; Bathe, 1996) kullanılmaktadır. Sıvının üç boyutlu durumda her kartezyen eksen etrafındaki dönme rijitliklerini belirleyen dönme denklemleri,

$$\begin{aligned}
w_x &= \frac{1}{2} \left( \frac{\partial U_{fy}}{\partial z} - \frac{\partial U_{fz}}{\partial y} \right) \\
w_y &= \frac{1}{2} \left( \frac{\partial U_{fz}}{\partial x} - \frac{\partial U_{fx}}{\partial z} \right) \\
w_z &= \frac{1}{2} \left( \frac{\partial U_{fx}}{\partial y} - \frac{\partial U_{fy}}{\partial x} \right)
\end{aligned} \tag{1.56}$$

ifadeleri ile tanımlanmıştır (Wilson ve Khalvati, 1983). Burada;  $w_x$ ,  $w_y$ ,  $w_z$  sırasıyla x, y, z eksenleri etrafındaki rijit cisim dönmeleridir. Wilson ve Khalvati (1983), bu şekildeğiştirme terimlerine fiziksel bir rijitlik parametresi eklemektedir. Eklenen bu rijitlik parametresi, bir ucunun ankastre, diğer ucunun elemana veya integrasyon noktasına bağlandığı çok rijit bir yay olarak düşünülebilir. Böylece yayın dönme rijitliği, sıvının dönmesini kısıtlayan bir parametre olarak tanımlanmaktadır. Bu rijitlik ne kadar büyük olursa, o kadar dönmesi kısıtlanmış sıvı elde edilecektir. Eleman şekildeğiştirmesi olarak dikkate alınan rijit cisim dönmeleri ile rijitlik parametreleri birlikte düşünüldüğünde gerilme-şekildeğiştirme bağıntısı,

$$\begin{aligned}
P_x &= C_{22} w_x \\
P_y &= C_{33} w_y \\
P_z &= C_{44} w_z
\end{aligned} \tag{1.57}$$

şeklinde yazılabilir. Burada;  $P_x$ ,  $P_y$ ,  $P_z$  dönmeye ait gerilmelerdir.  $C_{22}$ ,  $C_{33}$ ,  $C_{44}$ , dönel yay rijitlik katsayıları veya rijitlik parametreleridir. Böylece üç boyutlu bir sıvı için gerilme-şekildeğiştirme bağıntıları (1.53) ve (1.57) denklemlerinden matris formda;

$$\begin{Bmatrix} P \\ P_x \\ P_y \\ P_z \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} C_{11} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & C_{22} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & C_{33} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & C_{44} \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \varepsilon_v \\ w_x \\ w_y \\ w_z \end{Bmatrix} \tag{1.58}$$

veya

$$\sigma_f = C_f e_f \tag{1.59}$$

şeklinde yazılabilir. Burada;  $\sigma_f$  ve  $e_f$  sırasıyla sıvının gerilme ve şekildeğiştirme vektörlerini,  $C_f$  ise elastisite matrisini göstermektedir.

Sonlu eleman hareket denklemleri enerji prensiplerinden yararlanarak ta belirlenebileceğinden sıvı sistemlerin davranışları ile ilgili enerji bağıntılarına ihtiyaç duyulmaktadır. Bir sıvı sistemin potansiyel enerjisi iki bileşenden oluşmaktadır. Bunlardan birincisi, sistemin toplam şekildeğiştirme enerjisidir. (1.59) denklemindeki temel bağıntı kullanılarak sıvı sistemin toplam şekildeğiştirme enerjisi,

$$\pi_e = \frac{1}{2} \int_V \mathbf{e}_f^T \mathbf{C}_f \mathbf{e}_f dV \quad (1.60)$$

şeklinde yazılabilir. Burada;  $e_f$

$$\mathbf{e}_f^T = [\epsilon_v \quad w_x \quad w_y \quad w_z] \quad (1.61)$$

ile verilen sıvı sistemin şekildeğiştirme vektörüdür.  $C_f$ , (1.58) denklemindeki sadece köşegen terimlere sahip olan sıvı sistemin elastisite matrisidir.

Sıvı sistemlerin önemli davranışlarından biri de, hacimde bir değişim olmadan yerdeğiştirme yapabilmeleridir (Greeves, 1991). Rezervuar ve su depoları için bu hareket yerdeğiştirmelerin düşey olduğu yüzey dalgaları şeklindedir. Sıvı yüzey dalgalarının etkisini ve salınım davranışını, sıvının potansiyel enerjisi yardımıyla tanımlamak mümkündür. Buna göre sıvı sistemin potansiyel enerjisinin bu ikinci bileşeni,

$$\pi_s = \frac{1}{2} \int_A \mathbf{U}_{sf}^T \rho_f g \mathbf{U}_{sf} dA \quad (1.62)$$

şeklinde yazılabilir. Burada  $U_{sf}$ , sıvı serbest yüzey düşey yerdeğiştirmesini göstermektedir. Böylece, sıvı sistemin toplam potansiyel enerjisi,

$$\pi_t = \pi_e + \pi_s \quad (1.63)$$

olarak elde edilir. Sıvının dinamik davranışı incelendiği için kinetik enerji bağıntısına da ihtiyaç vardır. Böylece sıvı sistemin davranışı ile ilgili gerekli enerji bağıntıları tamamlanmış olur. Bir sıvı sistemin kinetik enerjisi,

$$T = \frac{1}{2} \int_V \dot{\mathbf{U}}_f^T \rho_f \dot{\mathbf{U}}_f dV \quad (1.64)$$

denklemini yardımıyla elde edilir. Burada;  $\dot{\mathbf{U}}_f$ ,

$$\dot{\mathbf{U}}_f^T = [\dot{U}_{fx} \quad \dot{U}_{fy} \quad \dot{U}_{fz}] \quad (1.65)$$

ile verilen genel eksen takımındaki hız vektörüdür.

Yukarıda verilen enerji bağıntılarından sistem hareket denklemlerine geçiş yapmak için aşağıdaki Lagrange denkleminde faydalanılır (Clough ve Penzien, 1993);

$$\frac{\partial}{\partial t} \left( \frac{\partial T}{\partial \dot{q}_i} \right) - \frac{\partial T}{\partial q_i} + \frac{\partial \pi_t}{\partial q_i} = Q_i \quad (i = 1, 2, \dots, n) \quad (1.66)$$

Bu ifadede,  $q_i$  ve  $Q_i$  sırasıyla  $i$ . genelleştirilmiş koordinatı ve kuvveti göstermektedir. Sonlu elemanlar yönteminde genelleştirilmiş koordinat olarak, ortam değişkeninin sonlu eleman düğüm noktalarındaki değerleri alınmaktadır. Örneğin, yerdeğiştirmeye dayalı Lagrange yaklaşımında söz konusu koordinatlar düğüm noktası yerdeğiştirme bileşenleridir. Buna göre, (1.66) denklemini,

$$\frac{\partial}{\partial t} \left( \frac{\partial T}{\partial \dot{U}_{fi}} \right) - \frac{\partial T}{\partial U_{fi}} + \frac{\partial \pi_t}{\partial U_{fi}} = Q_i \quad (i = 1, 2, \dots, n) \quad (1.67)$$

şeklini alır.

### 1.6.3. Sıvı-Yapı Sistemlerinin Lagrange Yaklaşımına Göre Sonlu Eleman Formülasyonu

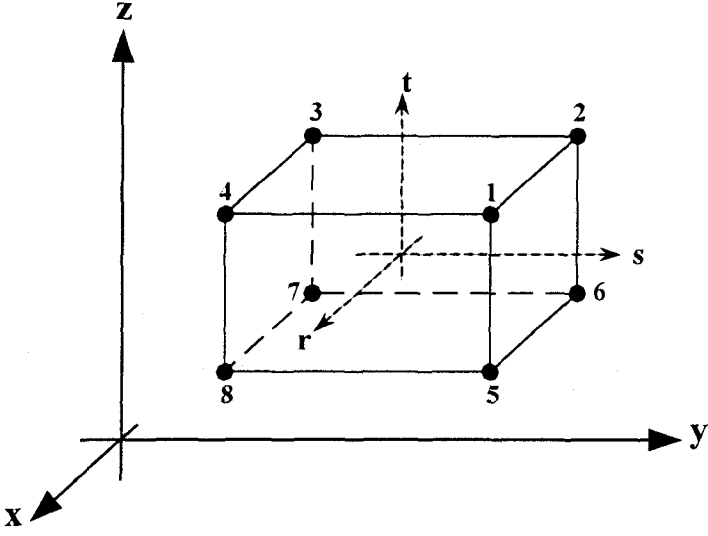
#### 1.6.3.1. Sıvı Sistemlerin Formülasyonu

Sıvı sistemlerin sonlu eleman matrisleri izoparametrik sonlu eleman formülasyonundan elde edilmektedir. İzoparametrik formülasyonda genel ve yerel eksen takımı olmak üzere iki eksen takımı kullanılmaktadır. Genel eksen takımı, (x-y-z) kartezyen eksen takımından, yerel eksen takımı ise (r-s-t) boyutsuz eksen takımından oluşmaktadır. Sonlu eleman düğüm noktası koordinatları genel eksen takımında,

$$\begin{aligned} x^e &= \sum_{i=1}^q \bar{h}_i x_i^e \\ y^e &= \sum_{i=1}^q \bar{h}_i y_i^e \\ z^e &= \sum_{i=1}^q \bar{h}_i z_i^e \end{aligned} \quad (1.68)$$

şeklinde tanımlanmaktadır. Burada;  $x^e, y^e, z^e$  sonlu elemanın herhangi bir noktasındaki koordinatları,  $x_i^e, y_i^e, z_i^e$  ise q düğüm noktalı elemanın i. düğüm noktası koordinatlarını göstermektedir.  $\bar{h}_i$  interpolasyon fonksiyonları olup, her bir değişkeni -1 ile +1 arasında değişen yerel eksen takımında tanımlanmaktadır. İzoparametrik sonlu eleman formülasyonunun en önemli özeliği, eleman koordinat ve yerdeğiştirmelerinin aynı interpolasyon fonksiyonları kullanılarak elde edilmesidir. Buna göre, sonlu elemanın herhangi bir noktasındaki yerdeğiştirmeler, (1.68) denklemindeki interpolasyon fonksiyonları yardımıyla elemanın düğüm noktası yerdeğiştirmeleri cinsinden ifade edilebilmektedir. Şekil 1.8'de, üç boyutlu 8-düğüm noktalı bir sıvı eleman görülmektedir. Bu eleman için interpolasyon fonksiyonları Tablo 1.1'de verilmiştir. Üç boyutlu bu sıvı elemenda yüzey elemanı olarak Şekil 1.9'da verilen iki boyutlu 4-düğüm noktalı eleman kullanılmaktadır. Bu sıvı yüzey eleman için interpolasyon fonksiyonları Tablo 1.2'de verilmektedir.

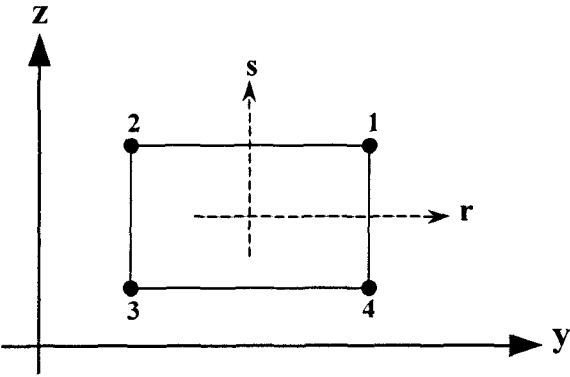




Şekil 1.8. Üç boyutlu 8-düğüm noktalı sıvı sonlu eleman

Tablo 1.1. Üç boyutlu 8-düğüm noktalı sıvı sonlu eleman için interpolasyon fonksiyonları

| Üç Boyutlu 8-Düğüm Noktalı Sıvı Sonlu Eleman İçin İnterpolasyon Fonksiyonları |                              |             |                              |
|---|------------------------------|-------------|------------------------------|
| $\bar{h}_1$   | $\frac{1}{8}(1+r)(1+s)(1+t)$ | $\bar{h}_5$ | $\frac{1}{8}(1+r)(1+s)(1-t)$ |
| $\bar{h}_2$   | $\frac{1}{8}(1-r)(1+s)(1+t)$ | $\bar{h}_6$ | $\frac{1}{8}(1-r)(1+s)(1-t)$ |
| $\bar{h}_3$   | $\frac{1}{8}(1-r)(1-s)(1+t)$ | $\bar{h}_7$ | $\frac{1}{8}(1-r)(1-s)(1-t)$ |
| $\bar{h}_4$   | $\frac{1}{8}(1+r)(1-s)(1+t)$ | $\bar{h}_8$ | $\frac{1}{8}(1+r)(1-s)(1-t)$ |



Şekil 1.9. İki boyutlu 4-düğüm noktalı sıvı yüzey elemanı

Tablo 1.2. İki boyutlu 4-düğüm noktalı sıvı yüzey eleman için interpolasyon fonksiyonları

| İki Boyutlu 4-Düğüm Noktalı Sıvı Yüzey Eleman İçin İnterpolasyon Fonksiyonları |                         |
|--|-------------------------|
| $\bar{h}_1$  | $\frac{1}{4}(1+r)(1+s)$ |
| $\bar{h}_2$  | $\frac{1}{4}(1-r)(1+s)$ |
| $\bar{h}_3$  | $\frac{1}{4}(1-r)(1-s)$ |
| $\bar{h}_4$  | $\frac{1}{4}(1+r)(1-s)$ |

Sıvı elemanın herhangi bir noktasındaki yerdeğiştirmenin x, y ve z eksenleri doğrultusundaki bileşenleri ( $U_{fx}, U_{fy}, U_{fz}$ ), interpolasyon fonksiyonları yardımıyla,

$$\begin{aligned}
 U_{fx} &= \sum_{i=1}^q \bar{h}_i U_{fxi}^e \\
 U_{fy} &= \sum_{i=1}^q \bar{h}_i U_{fyi}^e \\
 U_{fz} &= \sum_{i=1}^q \bar{h}_i U_{fzi}^e
 \end{aligned} \tag{1.69}$$

şeklinde tanımlanmaktadır. Burada;  $U_{fxi}^e, U_{fyi}^e, U_{fzi}^e$  q düğüm noktalı elemanın x, y ve z eksenleri doğrultusundaki düğüm noktası yerdeğiştirmelerini göstermektedir. Sıvı elemanın şekildeğiştirme-yerdeğiştirme bağıntısı,

$$\mathbf{e}_f^e = \mathbf{B}_f^e \mathbf{U}_f^e \tag{1.70}$$

şeklinde yazılabilir. Burada;  $\mathbf{B}_f^e$ , sıvı elemanın şekildeğiştirme-yerdeğiştirme matrisi olup, interpolasyon fonksiyonlarının genel eksen takımındaki türevlerinden oluşmaktadır.  $\mathbf{U}_f^e$  eleman düğüm noktası yerdeğiştirme vektörünü,  $\mathbf{e}_f^e$  ise  $\mathbf{U}_f^e$ 'ye karşılık gelen şekildeğiştirme vektörüdür. (1.70) denklemleri ile verilen şekildeğiştirme-yerdeğiştirme bağıntısı kullanılarak (1.60) denklemindeki sıvı sistemin toplam şekildeğiştirme enerjisi,

$$\pi_e = \frac{1}{2} \mathbf{U}_f^T \mathbf{K}_f \mathbf{U}_f \quad (1.71)$$

şeklinde elde edilir. Burada;  $\mathbf{U}_f$  sıvı sistemin düğüm noktası yerdeğiştirme vektörünü,  $\mathbf{K}_f$  ise,

$$\mathbf{K}_f = \sum \mathbf{K}_f^e \quad (1.72)$$

şeklinde eleman rijitlik matrislerinin toplamından oluşan sıvı sistemin rijitlik matrisidir.  $\mathbf{K}_f^e$  eleman rijitlik matrisi ise,

$$\mathbf{K}_f^e = \int_V \mathbf{B}_f^{eT} \mathbf{C}_f \mathbf{B}_f^e dV \quad (1.73)$$

bağıntısı ile hesaplanmaktadır.

Yüzey sınımlarından dolayı oluşan ve denklem (1.62) ile elde edilen sistemin yüzey potansiyel enerjisi,

$$\pi_s = \frac{1}{2} \mathbf{U}_{sf}^T \mathbf{S}_f \mathbf{U}_{sf} \quad (1.74)$$

şeklinde yazılabilir. Burada;  $\mathbf{U}_{sf}$  sıvı serbest yüzey düğüm noktası düşey yerdeğiştirme vektörünü,  $\mathbf{S}_f$  ise.

$$\mathbf{S}_f = \sum \mathbf{S}_f^e \quad (1.75)$$

şeklinde yüzey eleman rijitlik matrislerinin toplamından oluşan sıvı sistemin serbest yüzey rijitlik matrisidir.  $\mathbf{S}_f^e$  serbest yüzey eleman rijitlik matrisi ise,

$$\mathbf{S}_f^e = \int_A \bar{\mathbf{h}}_s^T \rho_f g \bar{\mathbf{h}}_s dA \quad (1.76)$$

bağıntısı ile hesaplanmaktadır. Bu bağıntıdaki  $\bar{\mathbf{h}}_s$ , yüzey elemanının interpolasyon fonksiyonlarından oluşan vektörü göstermektedir. Aynı şekilde, denklem (1.64) ile verilen sistemin kinetik enerjisi,

$$T = \frac{1}{2} \dot{\mathbf{U}}_f^T \mathbf{M}_f \dot{\mathbf{U}}_f \quad (1.77)$$

şeklinde elde edilir. Bu ifadede;  $\dot{\mathbf{U}}_f$  sistemin düğüm noktası hız vektörünü,  $\mathbf{M}_f$  ise,

$$\mathbf{M}_f = \sum \mathbf{M}_f^e \quad (1.78)$$

şeklinde eleman kütle matrislerinin toplamından oluşan sıvı sistemin kütle matrisidir.  $\mathbf{M}_f^e$  eleman kütle matrisi ise,

$$\mathbf{M}_f^e = \int_v \bar{\mathbf{H}}^T \rho_f \bar{\mathbf{H}} dV \quad (1.79)$$

bağıntısı ile hesaplanmaktadır. Burada  $\bar{\mathbf{H}}$ , interpolasyon fonksiyonlar matrisini göstermektedir.

Sonlu elemanlar yöntemi kullanılarak elde edilen bu enerji bağıntılarından sıvı sistemin hareket denklemlerine geçiş yapmak için (1.66) denklemi ile verilen Lagrange bağıntısı kullanılırsa, sıvı sistemin hareket denklemi,

$$\mathbf{M}_f \ddot{\mathbf{U}}_f + \mathbf{K}_f \mathbf{U}_f + \mathbf{S}_f \mathbf{U}_{sf} = \mathbf{R}_f \quad (1.80)$$

veya

$$\mathbf{M}_f \ddot{\mathbf{U}}_f + \mathbf{K}_f^* \mathbf{U}_f = \mathbf{R}_f \quad (1.81)$$

şeklinde elde edilir. Burada;  $\mathbf{K}_f^*$  sıvı serbest yüzey rijitliklerini de içeren sıvı sistemin rijitlik matrisini,  $\mathbf{R}_f$  ise zaman ile değişen yük vektörünü göstermektedir.

### 1.6.3.1.1. Sıvı Sonlu Eleman Matrislerinin Elde Edilişi

#### 1.6.3.1.1.1. Rijitlik Matrisi

Üç boyutlu bir sıvı elemanın herhangi bir noktasındaki yerdeğiştirmenin x, y ve z eksenleri doğrultusundaki bileşenleri ( $U_{fx}, U_{fy}, U_{fz}$ ), interpolasyon fonksiyonları cinsinden,

$$\begin{aligned} U_{fx} &= \sum_{i=1}^q \bar{h}_i U_{fxi}^e \\ U_{fy} &= \sum_{i=1}^q \bar{h}_i U_{fyi}^e \\ U_{fz} &= \sum_{i=1}^q \bar{h}_i U_{fzi}^e \end{aligned} \quad (1.82)$$

şeklinde tanımlanmaktadır. Burada; q elemanın düğüm noktası sayısını göstermektedir.  $U_{fxi}^e, U_{fyi}^e, U_{fzi}^e$  ise, i. düğüm noktasının x, y ve z eksenleri doğrultusundaki yerdeğiştirmelerini göstermektedir. Sıvının üç boyutlu şekildeğiştirme-yerdeğiştirme bağıntıları,

$$\varepsilon_v = \varepsilon_x + \varepsilon_y + \varepsilon_z = \frac{\partial U_{fx}}{\partial x} + \frac{\partial U_{fy}}{\partial y} + \frac{\partial U_{fz}}{\partial z} \quad (1.83)$$

$$\begin{aligned} w_x &= \frac{1}{2} \left[ \frac{\partial U_{fy}}{\partial z} - \frac{\partial U_{fz}}{\partial y} \right] \\ w_y &= \frac{1}{2} \left[ \frac{\partial U_{fz}}{\partial x} - \frac{\partial U_{fx}}{\partial z} \right] \\ w_z &= \frac{1}{2} \left[ \frac{\partial U_{fx}}{\partial y} - \frac{\partial U_{fy}}{\partial x} \right] \end{aligned} \quad (1.84)$$

şeklinde yazılabilir. Denklem (1.82), denklem (1.83) ve (1.84)'de yerine yazılırsa,

$$\varepsilon_v^e = \frac{\partial \bar{\mathbf{h}}^T}{\partial x} \mathbf{U}_{fx}^e + \frac{\partial \bar{\mathbf{h}}^T}{\partial y} \mathbf{U}_{fy}^e + \frac{\partial \bar{\mathbf{h}}^T}{\partial z} \mathbf{U}_{fz}^e \quad (1.85)$$

$$\begin{aligned} w_x^e &= \frac{1}{2} \left[ \frac{\partial \bar{\mathbf{h}}^T}{\partial z} \mathbf{U}_{fy}^e - \frac{\partial \bar{\mathbf{h}}^T}{\partial y} \mathbf{U}_{fz}^e \right] \\ w_y^e &= \frac{1}{2} \left[ \frac{\partial \bar{\mathbf{h}}^T}{\partial x} \mathbf{U}_{fz}^e - \frac{\partial \bar{\mathbf{h}}^T}{\partial z} \mathbf{U}_{fx}^e \right] \\ w_z^e &= \frac{1}{2} \left[ \frac{\partial \bar{\mathbf{h}}^T}{\partial y} \mathbf{U}_{fx}^e - \frac{\partial \bar{\mathbf{h}}^T}{\partial x} \mathbf{U}_{fy}^e \right] \end{aligned} \quad (1.86)$$

ifadeleri elde edilir. Burada;

$$\begin{aligned} \frac{\partial \bar{\mathbf{h}}^T}{\partial x} &= \left[ \frac{\partial \bar{h}_1}{\partial x}, \frac{\partial \bar{h}_2}{\partial x}, \dots, \frac{\partial \bar{h}_q}{\partial x} \right] \\ \frac{\partial \bar{\mathbf{h}}^T}{\partial y} &= \left[ \frac{\partial \bar{h}_1}{\partial y}, \frac{\partial \bar{h}_2}{\partial y}, \dots, \frac{\partial \bar{h}_q}{\partial y} \right] \\ \frac{\partial \bar{\mathbf{h}}^T}{\partial z} &= \left[ \frac{\partial \bar{h}_1}{\partial z}, \frac{\partial \bar{h}_2}{\partial z}, \dots, \frac{\partial \bar{h}_q}{\partial z} \right] \end{aligned} \quad (1.87)$$

şeklindedir. (1.85) ve (1.86) denklemleri matris formda yazılacak olursa,

$$\begin{Bmatrix} \varepsilon_v^e \\ w_x^e \\ w_y^e \\ w_z^e \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{\partial \bar{\mathbf{h}}^T}{\partial x} & \frac{\partial \bar{\mathbf{h}}^T}{\partial y} & \frac{\partial \bar{\mathbf{h}}^T}{\partial z} \\ 0 & \frac{1}{2} \frac{\partial \bar{\mathbf{h}}^T}{\partial z} & -\frac{1}{2} \frac{\partial \bar{\mathbf{h}}^T}{\partial y} \\ -\frac{1}{2} \frac{\partial \bar{\mathbf{h}}^T}{\partial z} & 0 & \frac{1}{2} \frac{\partial \bar{\mathbf{h}}^T}{\partial x} \\ \frac{1}{2} \frac{\partial \bar{\mathbf{h}}^T}{\partial y} & -\frac{1}{2} \frac{\partial \bar{\mathbf{h}}^T}{\partial x} & 0 \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \mathbf{U}_{fx}^e \\ \mathbf{U}_{fy}^e \\ \mathbf{U}_{fz}^e \end{Bmatrix} \quad (1.88)$$

veya

$$\mathbf{e}_f^e = \mathbf{B}_f^e \mathbf{U}_f^e \quad (1.89)$$

şeklinde elde edilir. Burada;  $\mathbf{B}_f^e$ , sıvı elemanın şekildeğiştirme-yerdeğiştirme matrisini,  $\mathbf{e}_f^e$  ve  $\mathbf{U}_f^e$  ise sırasıyla sıvı elemanın şekildeğiştirme ve yerdeğiştirme vektörüdür.

İnterpolasyon fonksiyonları  $r$ ,  $s$  ve  $t$  koordinatlarında tanımlandığından, söz konusu fonksiyonların genel eksen ( $x$ - $y$ - $z$ ) takımındaki türevlerini hesaplayabilmek için,

$$\begin{aligned}\frac{\partial}{\partial r} &= \frac{\partial}{\partial x} \frac{\partial x}{\partial r} + \frac{\partial}{\partial y} \frac{\partial y}{\partial r} + \frac{\partial}{\partial z} \frac{\partial z}{\partial r} \\ \frac{\partial}{\partial s} &= \frac{\partial}{\partial x} \frac{\partial x}{\partial s} + \frac{\partial}{\partial y} \frac{\partial y}{\partial s} + \frac{\partial}{\partial z} \frac{\partial z}{\partial s} \\ \frac{\partial}{\partial t} &= \frac{\partial}{\partial x} \frac{\partial x}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial y} \frac{\partial y}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial z} \frac{\partial z}{\partial t}\end{aligned}\tag{1.90}$$

ifadesiyle verilen zincir kuralından faydalanılır (Bathe, 1996). Bu denklem matris formda yazılacak olursa,

$$\begin{Bmatrix} \frac{\partial}{\partial r} \\ \frac{\partial}{\partial s} \\ \frac{\partial}{\partial t} \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{\partial x}{\partial r} & \frac{\partial y}{\partial r} & \frac{\partial z}{\partial r} \\ \frac{\partial x}{\partial s} & \frac{\partial y}{\partial s} & \frac{\partial z}{\partial s} \\ \frac{\partial x}{\partial t} & \frac{\partial y}{\partial t} & \frac{\partial z}{\partial t} \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \frac{\partial}{\partial x} \\ \frac{\partial}{\partial y} \\ \frac{\partial}{\partial z} \end{Bmatrix}\tag{1.91}$$

veya

$$\begin{Bmatrix} \frac{\partial}{\partial r} \\ \frac{\partial}{\partial s} \\ \frac{\partial}{\partial t} \end{Bmatrix} = \mathbf{J} \begin{Bmatrix} \frac{\partial}{\partial x} \\ \frac{\partial}{\partial y} \\ \frac{\partial}{\partial z} \end{Bmatrix}\tag{1.92}$$

elde edilir. Burada;  $\mathbf{J}$ , Jakobian operatörüdür. İnterpolasyon fonksiyonlarının genel eksen takımındaki türevleri ancak (1.91) veya (1.92) denkleminin tersi alınarak bulunabilir. Bu işlem gerçekleştirilirse,

$$\begin{Bmatrix} \frac{\partial}{\partial x} \\ \frac{\partial}{\partial y} \\ \frac{\partial}{\partial z} \end{Bmatrix} = \mathbf{J}^{-1} \begin{Bmatrix} \frac{\partial}{\partial r} \\ \frac{\partial}{\partial s} \\ \frac{\partial}{\partial t} \end{Bmatrix} \quad (1.93)$$

elde edilir. Böylece  $\mathbf{B}_f^e$  kolaylıkla hesaplanıp eleman şekildeğiştirmeleri elde edilebilir.

Üç boyutlu bir sıvı eleman rijitlik matrisi genel formda,

$$\mathbf{K}_f^e = \int_V \mathbf{B}_f^{eT} \mathbf{C}_f \mathbf{B}_f^e dV^e \quad (1.94)$$

şeklinde elde edilebilir. Burada;  $\mathbf{C}_f$  elastisite matrisi olup, üç boyutlu eleman için denklem (1.58)'den,

$$\mathbf{C}_f = \begin{bmatrix} C_{11} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & C_{22} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & C_{33} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & C_{44} \end{bmatrix} \quad (1.95)$$

şeklinindedir. Denklem (1.94) ile tanımlanan sıvı eleman rijitlik matrisinin hesaplanması hacim üzerinde alınacak integralleri gerektirir. Bu integrallerin hesaplanması için bir çok sayısal integrasyon tekniğı geliştirilmiştir. Bu integrasyon tekniklerinin en yaygın olanı “Gauss İntegrasyon Tekniğı” dir (Irons, 1971; Helen, 1972). Gauss integrasyon tekniğinde, integral elemanın içinde “Gauss Noktası” adı verilen belirli noktalarda elde edilen bir ağırlıklı toplama eşdeğer alınmaktadır. Bu integrasyon tekniğine göre hesaplanacak üç boyutlu eleman rijitlik matrisi yerel koordinatlarda (r-s-t),

$$\mathbf{K}_f^e = \int_{-1}^{+1} \int_{-1}^{+1} \int_{-1}^{+1} \mathbf{B}_f^{eT} \mathbf{C}_f \mathbf{B}_f^e \det \mathbf{J} dr ds dt \quad (1.96)$$

şeklinde yazılabilir. Sayısal integrasyon ile bu denklem,



$$\mathbf{K}_f^e = \sum_i \sum_j \sum_k w_i w_j w_k \mathbf{B}_{fijk}^e \mathbf{C}_f \mathbf{B}_{fijk}^e \det J_{ijk} \quad (1.97)$$

elde edilir. Burada  $w_i, w_j, w_k$  ağırlık katsayılarıdır. Büyüklüklerin altındaki  $ijk$  indisleri bu büyüklüklerin  $(r_i, s_j, t_k)$  integrasyon noktasındaki değerlerini göstermektedir.

### 1.6.3.1.1.2. Kütle Matrisi

Sonlu eleman analizlerinde, kütle matrisi olarak köşegen kütle matrisi ve düğüm noktası uyumlu kütle matrisi kullanılmaktadır. Düğüm noktası uyumlu eleman kütle matrisi, eleman rijitlik matrisinin elde edilmesinde kullanılan interpolasyon fonksiyonlarından yararlanılarak,

$$\mathbf{M}_f^e = \rho_f \int_V \bar{\mathbf{H}}^T \bar{\mathbf{H}} dV^e \quad (1.98)$$

bağıntısı ile elde edilebilir. Sayısal integrasyon ile bu matris,

$$\mathbf{M}_f^e = \rho_f \sum_i \sum_j \sum_k w_i w_j w_k \bar{\mathbf{H}}_{ijk}^T \bar{\mathbf{H}}_{ijk} \det J_{ijk} \quad (1.99)$$

şeklinde hesaplanabilir.

Köşegen kütle matrisi ise, Hinton vd. (1976) nin kütle matrisini köşegenleştirme prensibi,

$$\mathbf{M}_{\bar{n}}^e = \mathbf{M}_{\bar{n}i}^e \frac{\mathbf{M}_{\bar{n}}^e}{\sum \mathbf{M}_{\bar{n}i}^e} \quad (1.100)$$

kullanılarak elde edilebilir (Sharantam vd., 1976). Bu ifadede;  $\mathbf{M}_{\bar{n}}^e$ , köşegenleştirilmiş kütle matrisinin  $i$ . terimini,  $\mathbf{M}_{\bar{n}i}^e$ , düğüm noktası uyumlu kütle matrisinin  $i$ . köşegen terimini ve  $\mathbf{M}_{\bar{n}}^e$ , elemanın toplam kütle göstermektedir.

### 1.6.3.1.1.3. Yüzey Rijitlik Matrisi

Sıvı eleman yüzey rijitlik matrisi, serbest sıvı yüzeyinde bulunan elemanların sadece yüzeyi üzerinde hesaplanmalıdır. Üç boyutlu bir elemanda bu serbest yüzey iki boyutlu yüzey elemanı olarak düşünülebilir. 8-düğüm noktalı üç boyutlu sıvı elemana iki boyutlu yüzey elemanı olarak 4-düğüm noktalı iki boyutlu sıvı eleman uyum sağlayacaktır. Bu yüzey elemanı daha önce Şekil 1.9'da, interpolasyon fonksiyonları ise Tablo 1.2'de verilmişti.

Üç boyutlu bir sıvı elemanın yüzey rijitlik matrisi,

$$\mathbf{S}_f^e = \rho_f g \int_A \bar{\mathbf{h}}_s^T \bar{\mathbf{h}}_s dA^e \quad (1.101)$$

bağıntısı ile hesaplanabilir. Yüzey rijitlik matrisi yerel koordinatlarda (r-s),

$$\mathbf{S}_f^e = \rho_f g \int_{-1}^{+1} \int_{-1}^{+1} \bar{\mathbf{h}}_s^T \bar{\mathbf{h}}_s \det \mathbf{J} dr ds \quad (1.102)$$

şeklini alır. Yüzey rijitlik matrisi sayısal integrasyon ile,

$$\mathbf{S}_f^e = \rho_f g \sum_i \sum_j w_i w_j \bar{\mathbf{h}}_{sij}^T \bar{\mathbf{h}}_{sj} \det \mathbf{J}_{ij} \quad (1.103)$$

şeklinde hesaplanabilir.

### 1.6.3.2. Sıvı Sistemlerin Sonlu Eleman Formülasyonunda İndirgenmiş İntegrasyon Kullanımı

Sıvı sonlu eleman matrislerinin (rijitlik, kütle ve yüzey rijitlik matrisleri) hesabı, alan ve hacim üzerinde alınacak integrallerden oluşmaktadır. Bu integraller yaklaşık sayısal teknikler kullanılarak elde edilmek zorundadır. Sonlu eleman yönteminin gelişimi, çok sayıda sayısal tekniklerin etkin kullanımına yol açmıştır. Bu sayısal tekniklerin en yaygın olanlarından biri, daha önce de bahsedildiği gibi Gauss Sayısal İntegrasyon tekniğidir. Gauss Sayısal İntegrasyon tekniğinde; integral, eleman içinde bir takım sabit noktalarda

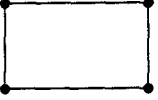
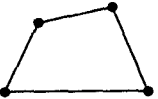
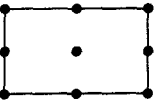


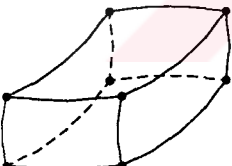
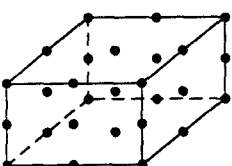
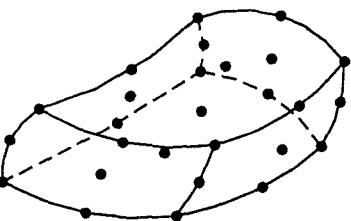
elde edilen bir ağırlıklı toplama eşdeğer alınmaktadır. Bu integrasyon tekniğine göre, iki boyutlu bir eleman için iki eksen boyunca bir ağırlıklı toplam, üç boyutlu bir eleman için üç eksen boyunca bir ağırlıklı toplam mevcuttur. Böyle bir ifadenin elde edilmesi, eğer çok fazla integrasyon noktası (Gauss noktası) kullanılırsa sayısal olarak oldukça uzun zaman alabilir. İki boyutlu bir elemanda bu hesap, sayısal integrasyon derecesinin karesi ile, üç boyutlu bir elemanda ise küpü ile artar. Bu yüzden, eleman hacmi içinde optimum olarak yerleştirilen integrasyon noktası sayısına ek olarak, kullanılan nokta sayısını da optimum hale getirmek çok önemlidir. Bu durum, çeşitli elemanlar için optimum integrasyonun gelişimine yol açmıştır.

Sıvı sonlu eleman üzerinde hesaplanan integraller, katı sonlu elemanlar için geliştirilen optimum integrasyon dereceleri dikkate alınarak elde edilirse, sıvı sonlu eleman yerdeğiştirmeleri ve frekanslarının gerçek çözüme yaklaşımı yavaş olmaktadır. Wilson ve Khalvati (1983), çözüme yavaş yaklaşımdan dolayı sıvı elemanda katı elemandaki optimum integrasyon derecelerinin kullanımının pratik olmadığını vurgulamaktadır. Bunun yanı sıra, daha yüksek mertebeden integrasyon derecesi, düşük frekanslı sıvı salınım modlarının yok olmasına sebep olur. Bu yüzden, sıvı sonlu eleman integrallerinin indirgenmiş integrasyon tekniğı kullanılarak elde edilmesi gerekir. Ayrıca, sıvı sistemlerin rijitliğini azaltmak için de indirgenmiş integrasyon tekniğı kullanılabilir. Tablo 1.3, Bathe (1996) ve Zienkiewicz ve Taylor (1989) tarafından iki ve üç boyutlu bazı elemanlar için verilen optimum integrasyon dereceleri ile Wilson ve Khalvati (1983) tarafından önerilen indirgenmiş integrasyon derecelerini göstermektedir.

#### 1.6.3.2.1. Yakınsaklık Şartı

Sonlu eleman yönteminde doğru çözüm, sonlu eleman ağının yakınsak olması ile doğrudan ilişkilidir. Sonlu eleman ağının yakınsaklığı, aslında sistemin toplam potansiyel enerjisinin minimum olması esasına dayanmaktadır (Wilson ve Khalvati, 1983). Sıvı eleman üzerinde hesaplanan integrallerin hesabında kullanılan indirgenmiş integrasyon derecesinin yakınsaklık şartını sağlaması gerekmektedir. Yakınsaklık şartı Zienkiewicz ve Taylor (1989) tarafından; “*m. mertebeden bir türev ve p. dereceden bir polinom içeren bir problem için integrasyon derecesi  $2(p-m)$  olmak zorundadır*” gibi verilmiştir.

Tablo 1.3. İki ve üç boyutlu bazı sonlu elemanlar için optimum ve indirgenmiş integrasyon dereceleri

| Eleman Tipi   | Optimum İntegrasyon Derecesi | İndirgenmiş İntegrasyon Derecesi |
|---|------------------------------|----------------------------------|
|    | 2x2                          | 1x1                              |
|    | 2x2                          | 1x                               |
|    | 3x3                          | 2x2                              |
|   | 3x3                          | 2x2                              |
|  | 2x2x                         | 1x1x1                            |
|  | 2x2x2                        | 1x1x1                            |
|  | 3x3x3                        | 2x2x2                            |
|   | 3x3x3                        | 2x2x2                            |

Örneğin, 4-düğüm noktalı iki boyutlu sıvı sonlu eleman için, şekildeğiştirme-yerdeğiştirme matrisinin (B matrisi) oluşumunda, şekil fonksiyonlarının birinci mertebeden türevleri ( $m=1$ ) kullanılmaktadır. Bu elemanın şekil fonksiyonlarını birinci dereceden polinomlar ( $p=1$ ) oluşturduğundan, yakınsaklık şartı için integrasyon derecesi sıfır elde edilir. İntegrasyon derecesi, sıfır olamayacağı için buna en uygun olanı tek bir Gauss noktası almaktır. 8-düğüm noktalı üç boyutlu sıvı sonlu eleman için, şekildeğiştirme-yerdeğiştirme matrisinin oluşumunda, yine şekil fonksiyonlarının birinci mertebeden türevleri ( $m=1$ ) kullanılmaktadır. Bu elemanın şekil fonksiyonları da yine birinci mertebeden polinomlardan ( $p=1$ ) oluşmaktadır. Bu sebeple, yakınsaklık şartı için integrasyon derecesi, yine sıfırdır. Ancak, 1 alınır.

Tablo 1.4'te, iki ve üç boyutlu değişik düğüm noktalı sıvı sonlu elemanlar için Wilson ve Khalvati (1983) tarafından önerilen integrasyon dereceleri ile yakınsaklık şartı için Zienkiewicz ve Taylor (1989) tarafından önerilen integrasyon dereceleri verilmektedir. Tablodan da görüleceği gibi, Wilson ve Khalvati tarafından önerilen indirgenmiş integrasyon dereceleri yakınsaklık şartını sağlamaktadır.

Tablo 1.4. Zienkiewicz ve Taylor (1989) tarafından yakınsaklık şartı için verilen integrasyon dereceleri ile Wilson ve Khalvati (1983) tarafından önerilen indirgenmiş integrasyon dereceleri

| Eleman Tipi                                      | Zienkiewicz ve Taylor<br>(1989) | Wilson ve Khalvati<br>(1983) |
|--|---------------------------------|------------------------------|
| 4-düğüm noktalı dörtgen eleman<br>$p=1, m=1$     | $2(p-m)=0$<br>(1×1)             | (1×1)                        |
| 9-düğüm noktalı dörtgen eleman<br>$p=2, m=1$     | $2(p-m)=2$<br>(2×2)             | (2×2)                        |
| 8-düğüm noktalı üç boyutlu eleman<br>$p=1, m=1$  | $2(p-m)=0$<br>(1×1×1)           | (1×1×1)                      |
| 27-düğüm noktalı üç boyutlu eleman<br>$p=2, m=1$ | $2(p-m)=2$<br>(2×2×2)           | (2×2×2)                      |

#### 1.6.3.2.2. Tekillik Şartı

Sonlu eleman yönteminde tek bir çözüme ulaşabilmek için, sistem rijitlik matrisinin tekil olmaması zorunludur. Sayısal integrasyona dayalı sistemlerin çözümünde tekillik,

bazı sınır şartları altında düşük integrasyon derecesinden doğabilmektedir. Sistemdeki bilinmeyenlerin sayısı, sistemin tüm Gauss noktalarında elde edilen bağımsız şekildeğiştirme bağıntılarının sayısını aşarsa, o zaman sistem rijitlik matrisi tekil olmaktadır (Zienkiewicz ve Taylor, 1989). Sistem rijitlik matrisinin tekil olması, ilgili sistemin stabil olmadığını göstermektedir. Yapı mekaniğinde stabilitesizlik, sıfır-enerji modu olarak bilinmektedir. Sıfır-enerji mod terimi, rijit cisim hareketi olmayan, ancak sıfır şekildeğiştirme enerjisi sağlayan bir düğüm noktası yerdeğiştirme vektörünü temsil eder (Cook vd., 1989).

Sonlu eleman rijitlik matrisleri birleştirilmeden önce, her integrasyon noktasında yeni bir şekildeğiştirme-yerdeğiştirme matrisi oluşturulur. Böylece her integrasyon noktasında bir dizi bağımsız şekildeğiştirme bağıntısı elde edilir. Sistem rijitlik matrisinde bu bağımsız şekildeğiştirme bağıntılarının sayısı, tutulu olmayan serbestlik derecesi sayısına eşit veya daha büyük olmak zorundadır. Bu durum gerçekleşirse, sistem sonlu eleman ağı tekil olmayacak ve sıfır-enerji modları oluşmayacaktır. Dolayısıyla teklik şartı için, *"Sistemdeki bilinmeyenlerin sayısı, sistemin tüm Gauss noktalarında elde edilen bağımsız şekil değiştirme bağıntılarının sayısına eşit veya daha küçük olmak zorundadır"* ifadesi kullanılabilir. İndirgenmiş integrasyon tekniğinin kullanılması önerilen sıvı sonlu elemanlarda, yakınsaklık şartına ek olarak teklik şartının da sağlanması büyük önem arz etmektedir.

İki boyutlu bir sıvı sonlu elemanın her integrasyon noktasında, maksimum iki tane bağımsız şekildeğiştirme bağıntısı vardır. Bunlardan biri, hacimsel şekildeğiştirme, diğeri ise dönme şekildeğiştirmesi ile ilgilidir. Buna göre, indirgenmiş integrasyon derecesi ( $1 \times 1$ ) olan, yani 1 adet Gauss noktası bulunan, iki boyutlu 4-düğüm noktalı her bir sıvı sonlu elemanda 2 adet bağımsız şekildeğiştirme bağıntısı mevcuttur. İndirgenmiş integrasyon derecesi ( $2 \times 2$ ) olan, yani 4 adet Gauss noktası bulunan, iki boyutlu 9-düğüm noktalı her bir sıvı sonlu elemanda ise, toplam 8 adet bağımsız şekildeğiştirme bağıntısı bulunmaktadır.

Üç boyutlu bir sıvı sonlu elemanda, her Gauss noktasında 4 adet bağımsız şekildeğiştirme bağıntısı vardır. Bunlardan biri, hacimsel şekildeğiştirme, diğeri üçü ise dönme şekildeğiştirmesine aittir. İndirgenmiş integrasyon derecesi ( $1 \times 1 \times 1$ ) olan, yani 1 adet Gauss noktası bulunan, her bir üç boyutlu 8-düğüm noktalı sıvı sonlu eleman 4 adet bağımsız şekildeğiştirme bağıntısına sahiptir. İndirgenmiş integrasyon derecesi ( $2 \times 2 \times 2$ ) olan, yani 8 adet Gauss noktasına sahip üç boyutlu 27-düğüm noktalı sıvı sonlu elemanın her birinde ise, toplam 32 adet bağımsız şekildeğiştirme bağıntısı bulunmaktadır.

### 1.6.3.3. Sıvı-Yapı Sistemlerinin Ortak Formülasyonu

Sıvı-yapı sistemin ortak hareket denklemleri her iki sisteme ait denklemlerin ara yüzey şartı dikkate alınarak birleştirilmesinden elde edilmektedir. Bu sebeple, ortak sistemin ara yüzey şartını belirlemek gerekir.

Sıvının viskoz olmadığı kabul edildiğinden ortak sistemin ara yüzeyinde, ara yüzeye normal yerdeğiştirmeler sürekli, teğet yerdeğiştirmeler süreksiz olmaktadır. Ortak sistemin ara yüzeyinde, yapı kısmının pozitif yüzeye ve sıvı kısmının negatif yüzeye sahip olduğu kabul edilirse ara yüzey şartı,

$$U_n^- = U_n^+ \quad (1.104)$$

şeklinde yazılabilir (Akkaş vd., 1979). Burada,  $U_n$  ara yüzeye normal yerdeğiştirmeyi göstermektedir. Bu şart, sıvı-yapı ara yüzeyinde ara yüzeye normal doğrultuda karşılıklı düğüm noktaları arasına kısa ve yeteri derecede rijit çubuk elemanlar yerleştirilerek (Akkaş vd., 1979) veya ortak sistemin ara yüzeyindeki düğüm noktalarında ceza yöntemi (Bathe, 1996) kullanılarak ta sağlatılabilir.

Sıvı-yapı sisteminin yer hareketi etkisindeki sönümlü hale ait ortak hareket denklemi, (1.104) denklemi ile verilen ara yüzey şartı göz önüne alınarak,

$$M_c \ddot{U}_c + C_c \dot{U}_c + K_c U_c = R_c \quad (1.105)$$

şeklinde yazılabilir. Burada,  $M_c$ ,  $C_c$  ve  $K_c$  ortak sistemin sırasıyla kütle, sönüm ve rijitlik matrislerini,  $U_c$ ,  $\dot{U}_c$  ve  $\ddot{U}_c$  ise aynı sistemin rölatif yerdeğiştirme, hız ve ivme vektörlerini temsil etmektedir.  $R_c$  ise ortak sisteme etkileyen ve zamanla değışen etkili dış yük vektörüdür. Sıvı-yapı sisteminin hareket denklemi, (1.105), simetrik sistem matrislerine sahip olduğundan herhangi bir yapı sisteminin hareket denklemi ile aynı formdadır. Bu nedenle, yapı analizi için kullanılan çözüm yöntemleri sıvı-yapı sistemi için de kullanılabilir. Sıvı-yapı etkileşiminde Lagrange yaklaşımının tercih edilmesinin en önemli sebebi de budur.

### 1.7. Lineer ve Lineer Olmayan Sistemlerin Çözümü İçin Direkt İntegrasyon Yöntemleri

Matematiksel olarak lineer ve lineer olmayan sistemler için dinamik hareket denklemleri, 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 zor ve zaman alıcı olmaktadır (Bathe, 1996). Pratikte bu denklemlerin çözümü için etkili birçok yaklaşık sayısal yöntem bulunmaktadır. Burada direkt integrasyon yöntemlerinden bahsedilecektir.

Direkt integrasyonda, dinamik hareket denklemi, adım-adım sayısal işlem kullanılarak integre edilmektedir. Burada direkt integrasyon teriminden, denklemlerin farklı bir forma dönüştürülmeden işlemlerin adım adım yürütüldüğü anlaşılmalıdır (Bathe, 1996). Direkt sayısal integrasyon, iki husus dikkate alınarak gerçekleştirilmektedir. Birincisi, herhangi bir  $t$  anında dinamik denge denklemini sağlamaya çalışmak yerine, ayrı ayrı  $\Delta t$  zaman aralıklarında bu denklemi sağlamayı amaçlamaktadır. Bunun anlamı, basit olarak atalet ve sönüm kuvvetlerini içeren statik dengenin, çözüm aralığı içerisinde her  $\Delta t$  zaman aralığında araştırılmasıdır. Bu nedenle, statik analizde kullanılan bütün çözüm tekniklerinin direkt integrasyonda etkili bir şekilde kullanılabildiği gözükmektedir. İkinci husus, her  $\Delta t$  zaman aralığında yerdeğiştirme, hız ve ivme değerlerinin değişim göstermesidir. Bu değişim üzerinde yapılan kabulün şekli, çözümün doğruluğunu ve stabilitesini belirlemektedir (Bathe, 1996).

Çözümde,  $U_0$ ,  $\dot{U}_0$ ,  $\ddot{U}_0$  ile gösterilen,  $t = 0$  anındaki başlangıç yerdeğiştirme, hız ve ivme vektörleri bilinmektedir. Dinamik hareket denkleminin çözümü,  $t = 0$  ile  $t = T$  zaman aralığında dikkate alınır,  $T$  çözüm zamanı  $n$  eşit zaman aralığına bölünür ( $\Delta t = T/n$ ).  $t$  anındaki çözüm bilindiği için,  $t + \Delta t$  anındaki çözüm bulunabilir. Yani, başlangıç şartlarından hareketle,  $\Delta t$  zaman sonraki çözüm elde edilebilmektedir. Bu işlem, çözüm aralığı boyunca devam ettirilir. Direkt integrasyon yöntemlerinden, Merkezi Farklar, Houbolt ve Newmark yöntemi en etkili olanlarıdır. Bu tezde, Wilson- $\theta$  yöntemi kullanılmıştır. Wilson- $\theta$  yöntemi, Newmark yönteminin özel bir hali olan lineer ivme yönteminin koşulsuz stabil durumudur.

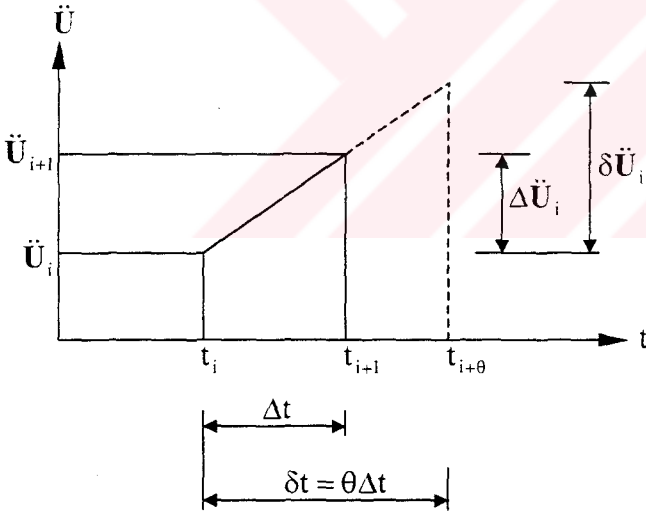


### 1.7.1. Wilson- $\theta$ Yöntemi

Çok serbestlik dereceli sistemlerin analizinde, sayısal yöntemlerin veya adım adım çözümün stabilitesi çok önemlidir. Bu nedenle, böyle sistemlerin analizinde koşulsuz stabil olan yöntemler kullanmak gerekmektedir. Wilson tarafından geliştirilen bu yöntem, koşullu kararlı olan lineer ivme yöntemini koşulsuz kararlı hale getirir. Lineer ivme yönteminde yapılan bu değişiklik, ivmenin genişletilmiş zaman aralığı boyunca lineer olarak değiştiği kabulü dayanmaktadır. Zaman aralığı, Şekil 1.10'da görüldüğü gibi,

$$\delta t = \theta \Delta t \quad (1.106)$$

şeklinde genişletilmiştir. Bu yöntemin doğruluk ve stabilite özellikleri  $\theta$  parametresinin değerine bağlıdır. Bu parametre daima 1 den büyük olup, genellikle 1.4 olarak alınmaktadır.



Şekil 1.10. Wilson- $\theta$  yöntemi (Chopra, 1995).

1959 yılında, Newmark tarafından geliştirilen aşağıdaki formüller ile dinamik hareket denklemleri adım adım çözülebilmektedir (Chopra, 1995);

$$\dot{U}_{i+1} = \dot{U}_i + [(1-\gamma)\Delta t]\ddot{U}_i + (\gamma\Delta t)\ddot{U}_{i+1} \quad (1.107)$$

$$\mathbf{U}_{i+1} = \mathbf{U}_i + (\Delta t)\dot{\mathbf{U}}_i + [(0.5 - \beta)(\Delta t)^2]\ddot{\mathbf{U}}_i + [\beta(\Delta t)^2]\ddot{\mathbf{U}}_{i+1} \quad (1.108)$$

Burada;  $\mathbf{U}_i$ ,  $\dot{\mathbf{U}}_i$ ,  $\ddot{\mathbf{U}}_i$  sırasıyla  $i$  anındaki yerdeğiştirme, hız ve ivme vektörünü,  $\mathbf{U}_{i+1}$ ,  $\dot{\mathbf{U}}_{i+1}$ ,  $\ddot{\mathbf{U}}_{i+1}$   $i+1$  anındaki yerdeğiştirme, hız ve ivme vektörünü göstermektedir. Lineer ivme yöntemi için  $\gamma=1/2$  ve  $\beta=1/6$  alınarak (1.107) ve (1.108) denklemleri artımsal olarak düzenlenirse,

$$\Delta\dot{\mathbf{U}}_i = (\Delta t)\ddot{\mathbf{U}}_i + \frac{\Delta t}{2}\Delta\ddot{\mathbf{U}}_i \quad (1.109)$$

$$\Delta\mathbf{U}_i = (\Delta t)\dot{\mathbf{U}}_i + \frac{(\Delta t)^2}{2}\ddot{\mathbf{U}}_i + \frac{(\Delta t)^2}{6}\Delta\ddot{\mathbf{U}}_i \quad (1.110)$$

şeklinde elde edilir. Wilson- $\theta$  yönteminde,  $\Delta t$  yerine  $\delta t$ ,  $\Delta\mathbf{U}_i$ ,  $\Delta\dot{\mathbf{U}}_i$  ve  $\Delta\ddot{\mathbf{U}}_i$  yerine sırasıyla  $\delta\mathbf{U}_i$ ,  $\delta\dot{\mathbf{U}}_i$  ve  $\delta\ddot{\mathbf{U}}_i$  alınırsa, genişletilmiş zaman aralığı için (1.109) ve (1.110) denklemleri,

$$\delta\dot{\mathbf{U}}_i = (\delta t)\ddot{\mathbf{U}}_i + \frac{\delta t}{2}\delta\ddot{\mathbf{U}}_i \quad (1.111)$$

$$\delta\mathbf{U}_i = (\delta t)\dot{\mathbf{U}}_i + \frac{(\delta t)^2}{2}\ddot{\mathbf{U}}_i + \frac{(\delta t)^2}{6}\delta\ddot{\mathbf{U}}_i \quad (1.112)$$

şeklinde yazılabilir. (1.112) denkleminde  $\delta\ddot{\mathbf{U}}_i$  çekilecek olursa,

$$\delta\ddot{\mathbf{U}}_i = \frac{6}{(\delta t)^2}\delta\mathbf{U}_i - \frac{6}{\delta t}\dot{\mathbf{U}}_i - 3\ddot{\mathbf{U}}_i \quad (1.113)$$

elde edilir. (1.113) denklemi (1.111) denkleminde yerine konursa,

$$\delta\dot{\mathbf{U}}_i = \frac{3}{\delta t}\delta\mathbf{U}_i - 3\dot{\mathbf{U}}_i - \frac{\delta t}{2}\ddot{\mathbf{U}}_i \quad (1.114)$$

elde edilir. Daha sonra, (1.113) ve (1.114) denklemi genişletilmiş zaman adımıdaki artımsal hareket denkleminde yerine konur ve düzenlenirse;

$$\left( \mathbf{K}_i + \frac{3}{\theta \Delta t} \mathbf{C} + \frac{6}{(\theta \Delta t)^2} \mathbf{M} \right) \delta \mathbf{U}_i = \theta (\Delta \mathbf{R}_i) + \left( \frac{6}{\theta \Delta t} \mathbf{M} + 3\mathbf{C} \right) \dot{\mathbf{U}}_i + \left( 3\mathbf{M} + \frac{\theta \Delta t}{2} \mathbf{C} \right) \ddot{\mathbf{U}}_i \quad (1.115)$$

şeklinde elde edilir. (1.115) denklemi şu şekilde de yazılabilir;

$$\hat{\mathbf{K}}_i \delta \mathbf{U}_i = \delta \hat{\mathbf{R}}_i \quad (1.116)$$

Burada;

$$\hat{\mathbf{K}}_i = \mathbf{K}_i + \frac{3}{\theta \Delta t} \mathbf{C} + \frac{6}{(\theta \Delta t)^2} \mathbf{M} \quad (1.117)$$

ve

$$\delta \hat{\mathbf{R}}_i = \theta (\Delta \mathbf{R}_i) + \left( \frac{6}{\theta \Delta t} \mathbf{M} + 3\mathbf{C} \right) \dot{\mathbf{U}}_i + \left( 3\mathbf{M} + \frac{\theta \Delta t}{2} \mathbf{C} \right) \ddot{\mathbf{U}}_i \quad (1.118)$$

şeklinde dir. Adım adım çözüm sırasında ilk önce  $\delta \mathbf{U}_i$ , (1.116) denkleminde bulunur. Daha sonra, (1.113) ve (1.114) denklemleri yardımıyla  $\delta \ddot{\mathbf{U}}_i$  ve  $\delta \dot{\mathbf{U}}_i$  elde edilir. Normal zaman aralığındaki artımsal ivme,

$$\Delta \ddot{\mathbf{U}}_i = \frac{1}{\theta} \delta \ddot{\mathbf{U}}_i \quad (1.119)$$

denklemleri ile bulunur. Normal zaman aralığındaki artımsal hız ve yerdeğiştirme ise, (1.109) ve (1.110) denklemleriyle hesaplanmaktadır. Bir sonraki adıma ait değerler,

$$\left. \begin{aligned} \mathbf{U}_{i+1} &= \mathbf{U}_i + \Delta \mathbf{U}_i \\ \dot{\mathbf{U}}_{i+1} &= \dot{\mathbf{U}}_i + \Delta \dot{\mathbf{U}}_i \\ \ddot{\mathbf{U}}_{i+1} &= \ddot{\mathbf{U}}_i + \Delta \ddot{\mathbf{U}}_i \end{aligned} \right\} \quad (1.120)$$

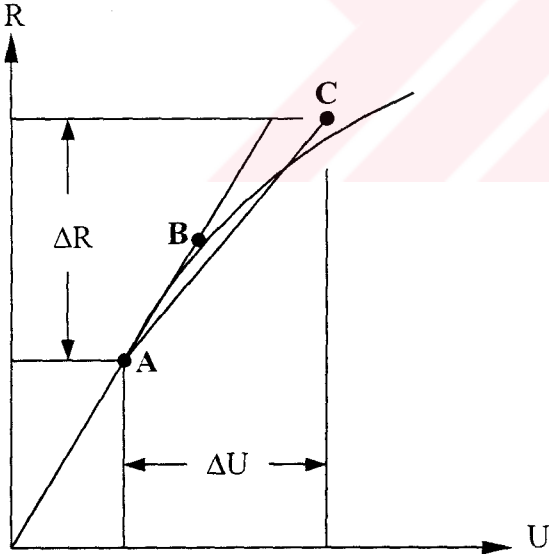
denklemleri vasıtasıyla elde edilmektedir.

### 1.7.2. Lineer Olmayan Sistemlerin Çözümünde Runge-Kutta Yöntemi

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

$$\mathbf{M}\Delta\ddot{\mathbf{U}}_i + \mathbf{C}\Delta\dot{\mathbf{U}}_i + \mathbf{K}\Delta\mathbf{U}_i = \Delta\mathbf{R}_i \quad (1.121)$$

şeklinde yazılabilir. Şekil 1.11'de yük ve yerdeğiştirme arasındaki lineer olmayan ilişki bir boyutlu olarak verilmiştir. A noktasında tanjant rijitliğinin bilindiğini kabul edip,  $\Delta R$  yük artımına karşılık gelen  $\Delta U$  artımsal yerdeğiştirmeyi elde etmeye çalışalım. Bu yöntemle göre ilk olarak,  $\frac{1}{2}\Delta R$  yükü için A noktasının tanjant rijitliğinden yararlanılarak B noktasındaki çözüm elde edilir. Daha sonra, yükün tamamı ve B noktasındaki tanjant rijitliği alınarak C noktasındaki yaklaşık çözüm elde edilir. Buna göre her adımda, iki lineer denklem takımını çözmek gerekmektedir (Chen ve Mizuno, 1990).



Şekil 1.11. Runge-Kutta yöntemi (Chen ve Mizuno, 1990).

Bu yöntem, elasto-plastik ve geometrik olarak lineer olmayan problemlerin çözümünde Felippa (1966), Akyüz ve Merwin (1968) ile Fernandez ve Christian (1971) tarafından daha önce kullanılmıştır (Chen ve Mizuno, 1990).

## 2. YAPILAN ÇALIŞMALAR

### 2.1. Giriş

Bu tez çalışmasında, kemer barajların malzeme bakımından lineer ve lineer olmayan dinamik davranışının belirlenmesinde rezervuardaki su, *Lagrange Sıvı Sonlu Elemanlar* ile, baraj betonunun lineer olmayan davranışı ise *Eğri Tanımlama ve Drucker-Prager Modeli* ile temsil edilmiştir. Bu amaçla, “Genel Bilgiler” bölümünde ayrıntılı olarak açıklanan üç boyutlu 8-düğüm noktalı Lagrange sıvı sonlu eleman ve Drucker-Prager modeli, FORTRAN 77 programlama dilinde kodlanarak genel amaçlı NONSAP (Bathe vd., 1974) yapı analiz programına uyarlanmıştır. Eğri Tanımlama Modeli ise, NONSAP (Bathe vd., 1974) programının içinde mevcuttur.

Bu bölümde, ilk olarak NONSAP (Bathe vd., 1974) programına eklenen üç boyutlu 8-düğüm noktalı Lagrange sıvı sonlu elemanın performansı seçilen bir sıvı tankında ve sıvı-yapı etkileşim modelinde test edilmiştir. İkinci olarak, Drucker-Prager modelinin NONSAP (Bathe vd., 1974) programına nasıl uyarlandığı açıklanmış ve modelin doğruluğu test edilmiştir. Daha sonra, genel olarak bir kemer baraj-su-zemin sistemi tanıtılmaktadır. Bu kısmı takiben, uygulama amacıyla seçilen Tip-5 kemer barajı için hazırlanan baraj, baraj-su, baraj-zemin ve baraj-su-zemin etkileşim modelleri ayrıntılı olarak verilmektedir. Sıvı-yapı gibi iki farklı ortamdan oluşan sistemlerde sönüm oranının önemi ve bu tezde kullanılan Rayleigh sönümünün nasıl belirlendiği açıklanmaktadır. Seçilen yer hareketinin tanıtılmasından sonra, seçilen kemer barajın lineer ve lineer olmayan dinamik analizinin nasıl gerçekleştirildiği, analizlerde yapılan bazı kabuller ile kullanılan malzeme özellikleri anlatılmıştır.

### 2.2. Üç Boyutlu 8-Düğüm Noktalı Sıvı Sonlu Elemanın NONSAP Yapı Analiz Programına Eklenmesi ve Test Edilmesi

Üç boyutlu Lagrange sıvı elemanın sonlu eleman yöntemine göre formülasyonu “Genel Bilgiler” bölümünde verilmiştir. Burada, Wilson ve Khalvati (1983)’nin önerdiği iki boyutlu sıvı elemanın üç boyutlu 8-düğüm noktalı versiyonu geliştirilip, FORTRAN 77 programlama dilinde kodlanan bu eleman genel amaçlı NONSAP (Bathe vd., 1974) yapı

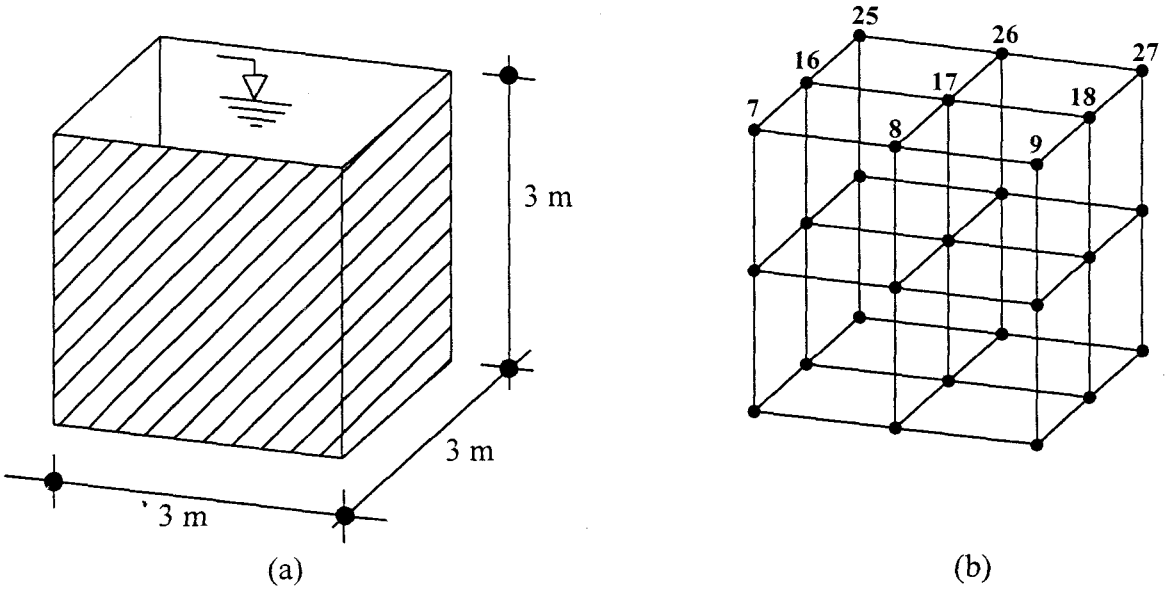
analiz programına uyarlanmıştır. Bu kısımda, önce sadece sıvı elemanın performansı, daha sonra bu sıvı elemanın sıvı-yapı etkileşimindeki performansı değerlendirilmektedir.

### 2.2.1. Sıvı Elemanın Performansı

Burada, öncelikle Wilson ve Khalvati (1983)'nin tekniği ile üç boyutlu 8-düğüm noktalı sıvı sonlu elemanın stabilite testi yapılmaktadır. Daha sonra bu sıvı eleman kullanılarak, bir sıvı tankının kendi ağırlığı etkisinde statik analizi ve modal analizi gerçekleştirilmektedir. Analizlerde, sıvı elemanın kütle yoğunluğu  $1000 \text{ kg/m}^3$ , hacimsel elastisite modülü  $207 \times 10^7 \text{ N/m}^2$  ve yerçekimi ivmesi  $9,81 \text{ m/s}^2$  olarak alınmıştır.

#### 2.2.1.1. Stabilite Testi

Üç boyutlu 8-düğüm noktalı Lagrange sıvı sonlu elemanın stabilite testi için Şekil 2.1(a)'daki sıvı tankı kullanılmıştır. Bu tankın sonlu eleman ağı da Şekil 2.1(b)'de verilmiştir. Sıvı tankının sonlu eleman ağında, toplam 27 adet düğüm noktası ve 81 adet serbestlik derecesi vardır. Serbest yüzeyli ve rijit duvarlı kabul edilen bu sıvı tankının sınır şartlarından dolayı 45 adet tutulu serbestlik derecesi bulunmaktadır. Dolayısıyla geriye 36 adet aktif serbestlik derecesi kalmaktadır.



Şekil 2.1: Stabilite testi için kullanılan üç boyutlu sıvı tankı (a) ve 8-düğüm noktalı sıvı elemanlardan oluşan sonlu eleman ağı (b)

Üç boyutlu Lagrange sıvı sonlu eleman matrislerinde indirgenmiş integrasyon tekniği dikkate alınmaktadır. Buna göre; 8-düğüm noktalı üç boyutlu Lagrange sıvı sonlu elemanın indirgenmiş integrasyon derecesi  $(1 \times 1 \times 1)$ 'dir. Yani, elemanda 1 adet Gauss noktası bulunmaktadır. Üç boyutlu bir sıvı sonlu eleman için her Gauss noktasında 4 adet bağımsız şekildeğiştirme bağıntısı vardır. Böylece 8-düğüm noktalı her elemanda 4 adet bağımsız şekildeğiştirme bağıntısı mevcut olur. 8-düğüm noktalı sonlu eleman ağında 8 adet eleman olduğundan, toplam 32 adet bağımsız şekildeğiştirme bağıntısı oluşur. Sistemin aktif serbestlik derecesi sayısı, bağımsız şekildeğiştirme bağıntı sayısını aştığı için sistemin rijitlik matrisi 4. dereceden tekil olmaktadır. Tekilliği ortadan kaldırmak için, sıvı yüzeyi salınım davranışı hesaba katılmaktadır. Böylece, üç boyutlu 8-düğüm noktalı elemandan oluşan bu sıvı tankının modal analizi sonucu 4 adet düşük frekanslı sıvı yüzey salınım modu, 8 adet hacim değişim modu ve 24 adet dönmeye ait mod oluşması beklenmektedir.

### 2.2.1.2. Statik Analiz

Üç boyutlu 8-düğüm noktalı Lagrange sıvı sonlu elemanın rijitlik performansını değerlendirmek üzere. Şekil 2.1'de boyutları verilen kübik sıvı tankının kendi ağırlığı etkisinde statik analizi yapılmıştır. Sonlu eleman matrislerinin hesabında indirgenmiş integrasyon tekniği kullanılmış ve sıvı sonlu elemanın dönme kısıtlama parametreleri ( $C_{22}$ ,  $C_{33}$ ,  $C_{44}$ ), hacimsel elastisite modülünün 1000 katı alınmıştır.

Sıvı tanklarında sıvı yüzeyi düşey yerdeğiştirmesini aşağıdaki formül ile analitik olarak elde etmek mümkündür (Greeves, 1990);

$$\delta = \frac{1}{C_{11}} \int_0^H \rho g z dz = \frac{\rho g H^2}{2 C_{11}} \quad (2.1)$$

Burada;  $\delta$ , sıvı yüzeyi düşey yerdeğiştirmesini;  $C_{11}$ , sıvının hacimsel elastisite modülünü;  $\rho$ , sıvının kütle yoğunluğunu;  $g$ , yerçekimi ivmesini;  $H$ , sıvı yüksekliğini göstermektedir. Buna göre, kübik sıvı tankının kendi ağırlığından dolayı sıvı yüzeyindeki düşey yerdeğiştirme,  $-0.0213261$  mm olarak hesaplanmaktadır. Statik analiz sonucu ise, sıvı yüzeyi düşey yerdeğiştirmesi,  $-0.0195486$  mm bulunmuştur. Bu sonuç, kapalı çözüme yakındır.

### 2.2.1.3. Modal Analiz

Üç boyutlu sıvı elemanların davranışı ile ilgili literatür bilgileri, iki boyutlu elemanlara göre daha azdır. Literatürde, üç boyutlu sıvı elemanların sayısal olarak test edilmesinden ziyade, stabiliteleri hakkında kısa bilgiler mevcuttur.

Üç boyutlu 8-düğüm noktalı sıvı elemanın modal davranışını incelemek üzere, statik analizde dikkate alınan sonlu eleman ağı kullanılmıştır. Dönme kısıtlama parametreleri, hacimsel elastisite modülünün 1000 katı alınarak modal analiz gerçekleştirilmiştir. 8-düğüm noktalı sonlu eleman ağının modal analizi sonucu elde edilen ilk 8 modun frekansı Tablo 2.1'de verilmiştir.

Tablo 2.1. Üç boyutlu sıvı tankının modal analizi sonucu elde edilen ilk 8 modun frekansı

| Mod Numarası | Frekans Değeri (Hz)     |
|--------------|-------------------------|
| 1            | $0.4584 \times 10^{-7}$ |
| 2            | $0.4908 \times 10^{-7}$ |
| 3            | $0.5073 \times 10^{-7}$ |
| 4            | 0.01152                 |
| 5            | 0.02162                 |
| 6            | 0.03433                 |
| 7            | 0.03433                 |
| 8            | 115.3                   |

Tablodan da görüleceği gibi, ilk üç modun frekansları  $1.0 \times 10^{-7}$  Hz mertebesinde elde edilmiştir. Bu modlar, sıfır frekanslı modlar şeklinde adlandırılabilir yalancı modlardır. Bunlar, rijit cisim modları olmayıp, sıfır enerjiye sahip modlardır. Bu modları izleyen ilk dört mod, sıvı yüzeyi salınım modları olup, frekansları 0.01152-0.03433 Hz arasında değişmektedir. 8. mod ise, sistemin birinci hacim değişim modudur. Bu modun frekansı, 115.3 Hz olarak elde edilmiştir. Kapalı çözümden (Lamb, 1975) bu modun frekansı, 119.9 Hz olarak hesaplanmıştır. Görüldüğü gibi 8-düğüm noktalı eleman ağının birinci hacim değişim modu kapalı çözüme çok yakındır.



## 2.2.2. Sıvı Elemanın Sıvı-Yapı Etkileşimindeki Performansı

NONSAP (Bathe vd., 1974) programına eklenen Lagrange sıvı sonlu elemanın davranışı önceki kısımda, sadece sıvı bir ortam için incelendi. Halbuki, sıvı elemanların sıvı-yapı etkileşimindeki performansları çok daha önemlidir. Burada, üç boyutlu 8-düğüm noktalı Lagrange sıvı sonlu elemanların sıvı-yapı etkileşimindeki davranışı incelenmiştir. Sıvı elemanların gerilme durumu (basınçları) ve yapı davranışına etkisi; sıvı-yapı ara yüzeyindeki basınçlar kontrol edilerek araştırılmıştır. Analizlerde, sıvı elemanın kütle yoğunluğu  $1000 \text{ kg/m}^3$ , hacimsel elastisite modülü  $207 \times 10^7 \text{ N/m}^2$ , yapıya ait beton malzemesi lineer elastik, homojen ve izotrop olup, elastisite modülü  $34.475 \times 10^9 \text{ N/m}^2$ , kütle yoğunluğu  $2482.16 \text{ kg/m}^3$  ve Poisson oranı 0.20 seçilmiştir. Sıvı elemanda indirgenmiş integrasyon tekniği kullanılmıştır. Yerçekimi ivmesi  $9.81 \text{ m/s}^2$  alınmıştır.

### 2.2.2.1. Modal Analiz

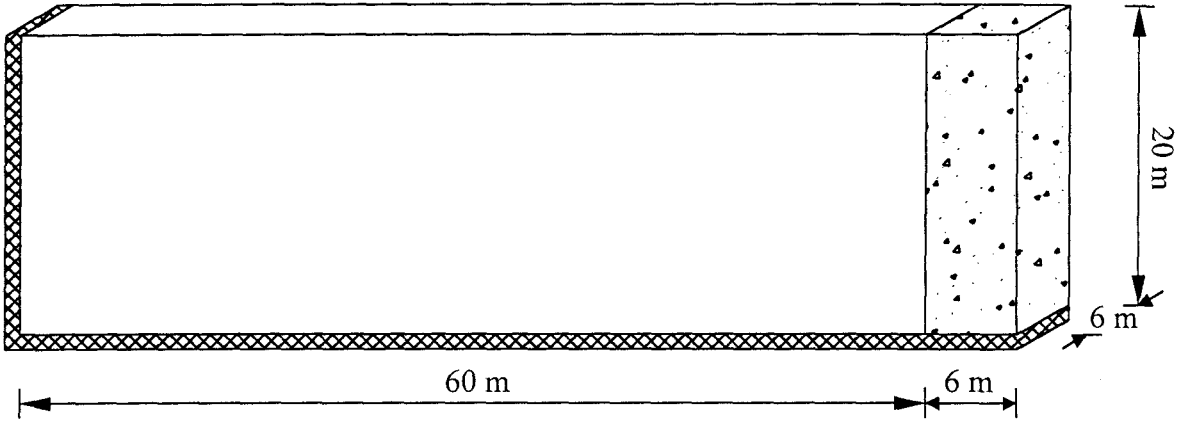
Modal analiz, bir elemanın kütle ve rijitlik özelliklerinin belirlenmesi açısından çok önemlidir. Bu nedenle, sıvı-yapı etkileşiminde üç boyutlu 8-düğüm noktalı Lagrange sıvı elemanın performansını belirlemek için basit bir model seçilmiştir. 20 m yüksekliğinde bir yapı ve arkasında 60 m uzunluğunda bir rezervuardan oluşan bu model Şekil 2.2'de verilmiştir. Bu modelin, sonlu eleman ağı, Şekil 2.3'te görülmektedir. Böyle bir modelin seçimindeki amaç, Lagrange çözümlerinin Westergaard çözümleri (Westergaard, 1933) ile karşılaştırma imkanının olmasıdır. Bilindiği gibi, düz yüzeyli bir duvar arkasındaki sıvı, Westergaard'ın kütle ekleme yaklaşımı ile kolaylıkla dinamik hesaplara katılabilmektedir.

Çalışmalarımızda, sıvının viskoz olmadığı kabulü yapıldığından, sıvı-yapı ara yüzeyinde sadece ara yüzeye dik yer değiştirmeler sürekli alınmıştır. Bu şart, sıvı-yapı ara yüzeyindeki sonlu eleman düğüm noktalarında kısıtlama denklemleri ile sağlanmıştır.

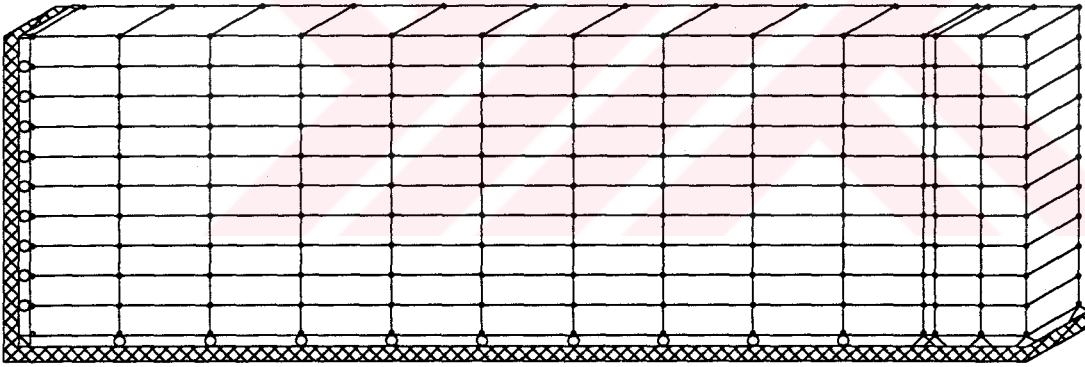
Şekil 2.3'teki sonlu eleman modelin duvar kısmında 20 adet 8-düğüm noktalı katı sonlu eleman, rezervuar kısmında ise 100 adet 8-düğüm noktalı sıvı sonlu eleman bulunmaktadır. Bu modelde toplam, 308 adet düğüm noktası, dolayısıyla 924 adet serbestlik derecesi mevcuttur. Sınır şartlarından dolayı modelde 326 adet tutulu serbestlik derecesi vardır. Böylece sistemde geriye 598 adet aktif serbestlik derecesi mevcuttur.

Analizde, dönme kısıtlama parametreleri ( $C_{22}$ ,  $C_{33}$ ,  $C_{44}$ ), hacimsel elastisite modülünün ( $C_{11}$ ) 1000 katı alınmıştır. Modal analiz sonucu, modelin birinci yanal eğilme

mod frekansı 8.479 Hz olarak elde edilmiştir. Duvar arkasındaki suyun Westergaard'ın kütle ekleme yaklaşımı ile modellenmesinden sonra ise, birinci yanal eğilme mod frekansı 8.198 Hz olarak elde edilmiştir. Görüldüğü gibi, her iki şekilde elde edilen birinci yanal eğilme mod frekansları birbirine oldukça yakındır.



Şekil 2.2. Üç boyutlu sıvı-yapı etkileşim modeli



Şekil 2.3. Üç boyutlu sıvı-yapı etkileşimi için sonlu eleman modeli

#### 2.2.2.2. Dinamik Analiz

Dinamik etkilere maruz sıvı-yapı etkileşim sistemlerinde, üç boyutlu 8-düğüm noktalı Lagrange sıvı sonlu elemanın performansını belirlemek için modal analizi yapılan Şekil 2.2'deki sıvı-yapı etkileşim modeli dikkate alınmıştır.

Bir yapı ve arkasındaki rezervuar ile yatay yer hareketi etkisindeki bu sıvı-yapı sisteminde, yapı üzerinde oluşan hidrodinamik basınçların kapalı çözümü ilk olarak Westergaard tarafından elde edilmiştir (Westergaard, 1933). Bu tip sistemler, rezervuarın

kritik rezonans frekansından daha küçük bir frekansa sahip yer hareketinin etkisinde kalırsa, o zaman sistemde sıkışamaz sıvı etkilerinin dikkate alındığı Westergaard çözümlerine ulaşılabilir. Burada açıklanması gerekli iki husus bulunmaktadır. Bunlardan birincisi, sıvı sıkışabilirliğinde kritik rezonans frekansının önemi, ikincisi ise sıkışamaz sıvı etkilerinin Westergaard çözümünde nasıl dikkate alınacağıdır.

Sıvı sıkışabilirliğinde rezervuarın kritik rezonans frekansı büyük öneme sahiptir (Chopra, 1967). Westergaard'ın rijit yapı üzerine gelen hidrodinamik basınçları belirleyen ifadesindeki sıvı sıkışabilirliği ile ilgili  $C_n$  terimi,

$$C_n = \sqrt{1 - \frac{16wH^2}{n^2gC_{11}\bar{T}^2}} \quad (2.2)$$

şeklinde. Burada;  $w$ , suyun birim hacim ağırlığını;  $H$ , rezervuar yüksekliğini;  $g$ , yerçekimi ivmesini;  $\bar{T}$ , yer hareketinin periyodunu;  $C_{11}$ , suyun hacimsel elastisite modülünü temsil etmektedir. Sıvı sıkışabilirliğini kontrol eden parametre sudaki ses hızıdır. Sudaki ses hızı,

$$C = \sqrt{\frac{C_{11}}{\rho_f}} \quad (2.3)$$

ile ifade edilmektedir. Burada,  $\rho$  suyun kütle yoğunluğudur. Sudaki ses hızı arttıkça suyun sıkışabilirliği azalmakta ve  $C \rightarrow \infty$  olduğunda suyun sıkışamaz olduğu kabul edilmektedir. (2.3) denklemi yardımıyla bu durum (2.2) denkleminde açıkça görülmektedir.  $C \rightarrow \infty$  olursa,  $C_{11} \rightarrow \infty$  olur. Bu durumda (2.2) denkleminde karekök içindeki bölüm ifadesi sıfır olur ve böylece  $C_n=1$  elde edilir. (2.2) denklemini, (2.3) denklemi kullanılarak,

$$C_n = \sqrt{1 - \left(\frac{4H}{nC\bar{T}}\right)^2} \quad (2.4)$$

şeklinde elde etmek mümkündür. Burada, eğer rezervuarın periyodu,

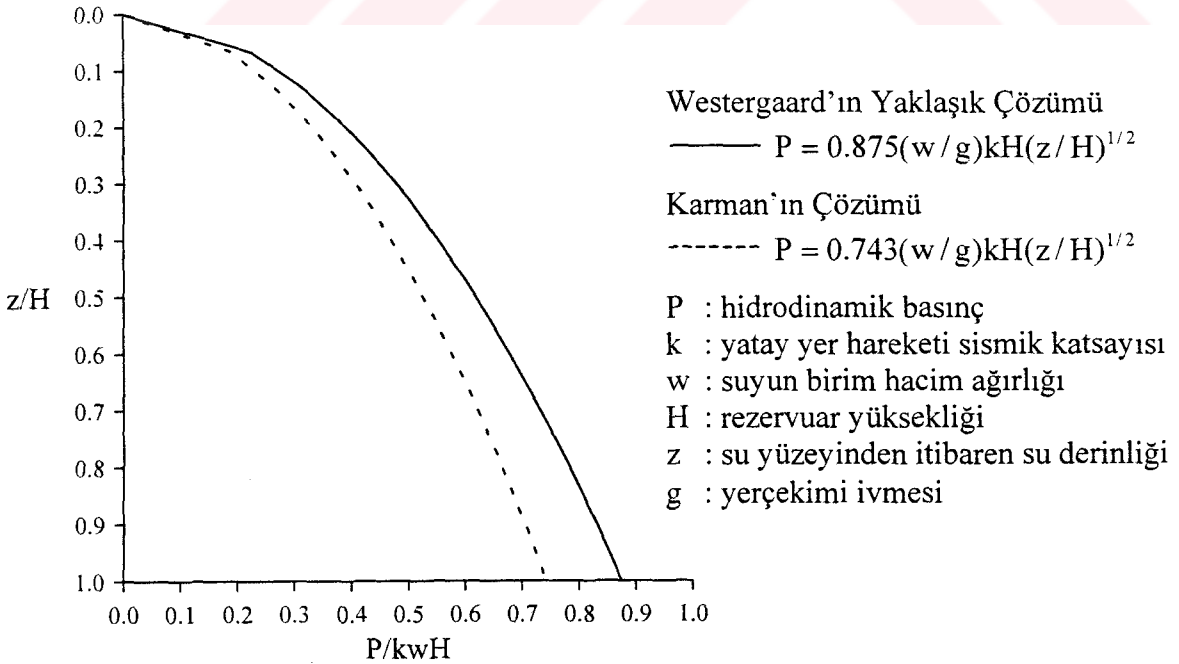
$$\bar{T}_r = \frac{1}{n} \frac{4H}{C} \quad (2.5)$$

olursa,  $C_n=0$  olur. Bu durumda, rezervuarda rezonans meydana gelir, yani çözüm sonsuz olur. Bu nedenle, (2.5) denkleminde *Rezervuarın Kritik Rezonans Periyodu* denir. (2.4) denklemi içerisindeki periyot yer hareketine aittir. Bu periyot değeri, rezervuarın kritik rezonans periyodundan büyük olursa, sıkışamaz sıvı kabulünün yapıldığı sonuçlara ulaşılır. Dolayısıyla bu aşamadaki çalışmalarımızda, rezervuarın kritik rezonans frekansından daha küçük bir frekansa sahip bir yer hareketi dikkate alınmıştır.

Bilindiği gibi, Westergaard'ın orijinal kütle ekleme yaklaşımı, sıvı sıkışabilirliğini içermektedir. Karman (1933), depremin oluşturduğu salınım hareketlerinde sıvı sıkışabilirlik etkilerinin küçük olduğunu kabul ederek Westergaard'ın sıkışamaz sıvı için kütle ekleme yaklaşımını,

$$m(z) = 0.743\rho_f \sqrt{Hz} \quad (2.6)$$

şeklinde elde etmiştir. Westergaard'ın sıkışabilir sıvı çözümü ile Karman'ın sıkışamaz sıvı çözümü Şekil 2.4'te verilmiştir.

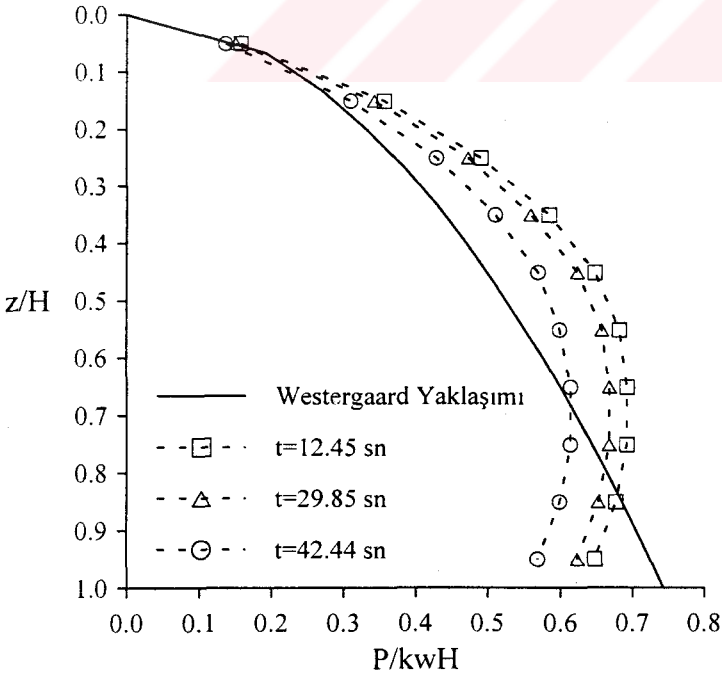


Şekil 2.4. Westergaard yaklaşımında basınç dağılımı

Seçilen sıvı-yapı etkileşim modelinde rezervuarın kritik rezonans frekansı, (2.5) denklemi yardımıyla 18 Hz olarak elde edilir. Sıkışmaz sıvı etkilerinin modelde görünebilmesi için sıvı-yapı etkileşim modeli, 5 Hz'lik bir frekansa sahip sinüs dalgası ile harmonik olarak titreştirilmektedir. Böylece, bulunan sonuçların Karman (1933) tarafından geliştirilen Westergaard'ın kapalı çözümü ile ((2.6) denklemi) karşılaştırılması mümkün olmaktadır.

Şekil 2.3'te verilen sistemde kararlı hal durumunu sağlamak için, harmonik hareket süresi 50 sn alınmıştır. Rayleigh sönüm katsayıları, sıvı-yapı ortak sistemin birinci yanal eğilme mod frekansı ve 50 Hz alınarak hesaplanmıştır. %5'lik sönüm oranının dikkate alındığı sistemde, rezervuar ve yapıda sönüm katsayılarının aynı olduğu kabul edilmiştir. Sistemin davranışı, Wilson- $\theta$  yöntemi kullanılarak adım adım integrasyon ile elde edilmiştir.

Sıvı-yapı ara yüzeyinde oluşan hidrodinamik basınçlar 12.45, 29.85 ve 42.44 sn zaman adımlarında elde edilerek Şekil 2.5'te verilmiştir. Böylece, zaman içerisinde sıvı eleman basınçları kontrol edilmiştir. Sıvı eleman basınçları, Gauss noktalarında elde edilmiş olup, basınçlar normalleştirilmiş değerlerdir. Görüldüğü gibi elde edilen hidrodinamik basınçlar tatminkar seviyededir.



Şekil 2.5. Harmonik hareket etkisindeki sıvı-yapı etkileşim modelinin sıvı-yapı ara yüzeyindeki hidrodinamik basınçların çeşitli zaman adımlarındaki değişimi

### 2.3. Üç Boyutlu Drucker-Prager Malzeme Modelinin NONSAP Yapı Analiz Programına Eklenmesi ve Test Edilmesi

NONSAP (Bathe vd., 1974) programına eklenen Drucker-Prager modeli, çakışık akma kuralı kabulüne (associated flow rule assumption) dayanmaktadır. Malzemenin elastik tam plastik davranış sergilediği kabul edilmiştir. Bu malzemenin kırılma yüzeyini temsil eden kırılma fonksiyonu ( $f$ ), asal gerilme uzayında sabittir. Yani, plastik şekil değiştirme sırasında bu yüzey, hareket etmez veya genişlemez. Bu malzeme modeli ile ilgili burada verilen tüm bilgiler, Chen ve Mizuno (1990)'da ayrıntılı olarak mevcuttur.

Drucker-Prager modelinin NONSAP yapı analiz programına eklemesiyle ilgili ayrıntılar aşağıda verilmiştir. Burada verilen işlemler, "Genel Bilgiler" bölümünde anlatılan iki adımlı Runge-Kutta yöntemine dayanmaktadır. Dolayısıyla, integrasyon işlemi iki aşamada gerçekleştirilmektedir. Bu yöntem, *iterasyona dayalı hesaplama için uygun olması, hesaplama zamanını kısaltması ve aynı zamanda küçük şekil değiştirme artımları için çözümde yeterli doğruluğu sağlaması* dolayısıyla tercih edilmiştir (Chen ve Mizuno, 1990).

#### 2.3.1. Birinci Aşama İntegrasyon İşlemleri

$n$ . yükleme artımı sonundaki gerilme ve şekil değiştirmelerin  $\sigma^n$  ve  $\varepsilon^n$  olduğunu kabul edelim. Elemandaki bu gerilme haline göre (elastik veya plastik olabilir), eleman rijitlik matrisinin hesabı için ya  $\mathbf{D}^e$  elastik malzeme matrisi veya  $\mathbf{D}^{ep}$  elastik-plastik malzeme matrisi kullanılır.

$\mathbf{K}_n$  sistem rijitlik matrisine artımsal yüklerin ilk yarısı uygulanarak  $(n+1/2)$ . adımdaki artımsal şekil değiştirmeler aşağıdaki gibi elde edilir:

$$d\mathbf{U}^{n+1/2} = \mathbf{K}_n^{-1} \left( \frac{1}{2} d\mathbf{R} \right) \quad \text{sistemde} \quad (2.7)$$

$$d\varepsilon^{n+1/2} = \mathbf{B}d\mathbf{U}^{n+1/2} \quad \text{elemanda} \quad (2.8)$$

Burada  $\mathbf{B}$  dönüşüm matrisidir. Bu şekil değiştirmelere karşılık gelen  $d\sigma^{n+1/2}$  gerilme

artımları,  $\mathbf{D}^{e^n}$  veya  $\mathbf{D}^{ep^n}$  malzeme matrisleri kullanılarak,

$$d\sigma^{n+1/2} = \mathbf{D}^{e^n} d\varepsilon^{n+1/2} \text{ veya } d\sigma^{n+1/2} = \mathbf{D}^{ep^n} d\varepsilon^{n+1/2} \quad (2.9)$$

şeklinde elde edilir. Daha sonra,  $(n+1/2)$ . yük artımı sonunda tüm elemanlardaki  $\sigma^{n+1/2}$  gerilmeleri,  $n$ . artımdaki gerilmeler,  $\sigma^n$ , kullanılarak aşağıdaki gibi elde edilir:

$$\sigma^{n+1/2} = \sigma^n + d\sigma^{n+1/2} \quad (2.10)$$

Birinci aşamada yapılan bu hesaplamaların amacı, eğer gerekliyse tüm elemanlarda  $\sigma^{n+1/2}$  gerilmelerini düzeltmek ve her eleman için yeni bir rijitlik matrisi kurmaktır. Bu rijitlik matrisleri, ikinci aşamada, yani  $(n+1)$ . yük artımında,  $d\mathbf{R}$  tüm yük uygulanarak  $(n+1)$ . yük artımı sonundaki nihai  $d\mathbf{U}^{n+1}$  yerdeğiştirme artımlarını elde etmek için kullanılmaktadır. Aşağıda, birinci aşama integrasyon işlemlerinin NONSAP yapı analiz programında nasıl elde edildiği ayrıntılı olarak adım adım verilmiştir.

*1. Adım: Başlangıç Hesaplamalar:* İlk olarak gerilme tansörünün birinci invaryantı ve deviatorik gerilme tansörünün ikinci invaryantı aşağıdaki şekilde hesaplanır:

$$I_1 = (\sigma_{11}^{n+1/2} + \sigma_{22}^{n+1/2} + \sigma_{33}^{n+1/2}) \quad (2.11)$$

$$\begin{aligned} \sqrt{J_2}^{n+1/2} = & \left[ (1/6) \left\{ (\sigma_{11}^{n+1/2} - \sigma_{22}^{n+1/2})^2 + (\sigma_{22}^{n+1/2} - \sigma_{33}^{n+1/2})^2 + (\sigma_{33}^{n+1/2} - \sigma_{11}^{n+1/2})^2 \right. \right. \\ & \left. \left. + (\sigma_{12}^{n+1/2})^2 + (\sigma_{13}^{n+1/2})^2 + (\sigma_{23}^{n+1/2})^2 \right\} \right]^{1/2} \end{aligned} \quad (2.12)$$

*2. Adım: Çekme Çatlaklarının Kontrolü:* Elemandaki gerilme hali kırılma yüzeyini aşarsa, yani;

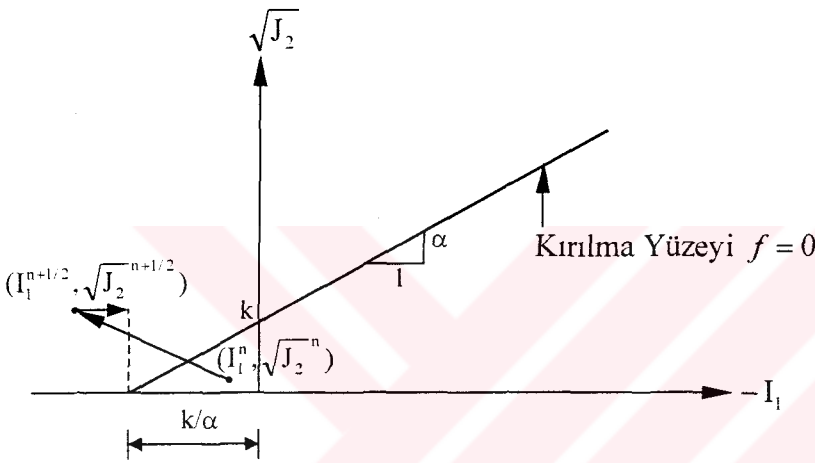
$$-\alpha I_1^{n+1/2} + k = \Delta T < 0 \quad (2.13)$$

ifadesindeki gerilme hali söz konusu olursa, hidrostatik gerilme bileşeni kırılma yüzeyinin aldığı nihai değerde aşağıdaki gibi hidrostatik basınca çevrilir (Şekil 2.6):

$$\sigma_{11}^{n+1/2} = \sigma_{11}^{n+1/2} - \frac{1}{3} \left( I_1^{n+1/2} - \frac{k}{\alpha} \right) \quad (2.14)$$

$$\sigma_{22}^{n+1/2} = \sigma_{22}^{n+1/2} - \frac{1}{3} \left( I_1^{n+1/2} - \frac{k}{\alpha} \right) \quad (2.15)$$

$$\sigma_{33}^{n+1/2} = \sigma_{33}^{n+1/2} - \frac{1}{3} \left( I_1^{n+1/2} - \frac{k}{\alpha} \right) \quad (2.16)$$



Şekil 2.6. Çekme gerilmelerinin kontrolü (Chen ve Mizuno, 1990).

Böylece, kayma gerilmeleri ( $\sigma_{12}^{n+1/2}$ ,  $\sigma_{13}^{n+1/2}$ ,  $\sigma_{23}^{n+1/2}$ ) değişmeden aynen kalırken, düzeltilmiş normal gerilmeler denklem (2.14), (2.15) ve (2.16) yardımıyla elde edilir. Daha sonra aşağıdaki adımlar gerçekleştirilir.

3. Adım: *Evvelce Plastik Durumda Olan Eleman İçin Gerilme Kontrolü:* n. artımın sonunda plastik durumda olan bir eleman için muhtemel bir plastik boşalma,  $d\lambda$  orantılılık faktörü hesaplanarak kontrol edilir. Çünkü, artımsal yükler veya yerdeğiştirmeler monotonik olarak artsa dahi bu durum (plastik boşalma) oluşabilir. Orantılılık faktörünün değeri, aşağıdaki gibi hesaplanmaktadır:

$$d\lambda^{n+1/2} = \frac{1}{H} \left[ 3K\alpha d\varepsilon_v^{n+1/2} + G \frac{1}{\sqrt{J_2^n}} s_{kl}^n d\varepsilon_{kl}^{n+1/2} \right] \quad (2.17)$$



Burada  $s_{kl}^n$ , n. yük artımının sonundaki deviatorik gerilmeler,  $de_{kl}^{n+1/2}$  ( $n+1/2$ ). artımın sonundaki deviatorik şekildeğiştirme artımları olup H, (1.43) denklem ile daha önce verilmişti.  $de_v^{n+1/2}$  ise, ( $n+1/2$ ). adımın sonundaki şekildeğiştirme artımlarının toplamıdır. Yani,

$$de_v^{n+1/2} = de_{11}^{n+1/2} + de_{22}^{n+1/2} + de_{33}^{n+1/2} \quad (2.18)$$

şeklindedir.

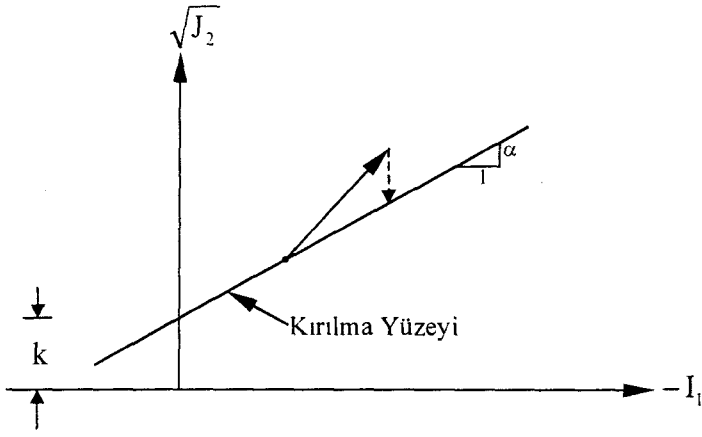
*Plastik Bölgede Boşalma Durumu:*  $d\lambda^{n+1/2}$  negatif bir değere sahipse, eleman plastik boşalmaya maruz kalmaktadır. Bu durumda, yapının rijitlik matrisi için aşağıdaki elastik malzeme matrisi kullanılır:

$$\mathbf{D}^{e^{n+1/2}} = \begin{bmatrix} K + (4/3)G & K - (2/3)G & K - (2/3)G & 0 & 0 & 0 \\ K - (2/3)G & K + (4/3)G & K - (2/3)G & 0 & 0 & 0 \\ K - (2/3)G & K - (2/3)G & K + (4/3)G & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & G & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & G & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & G \end{bmatrix} \quad (2.19)$$

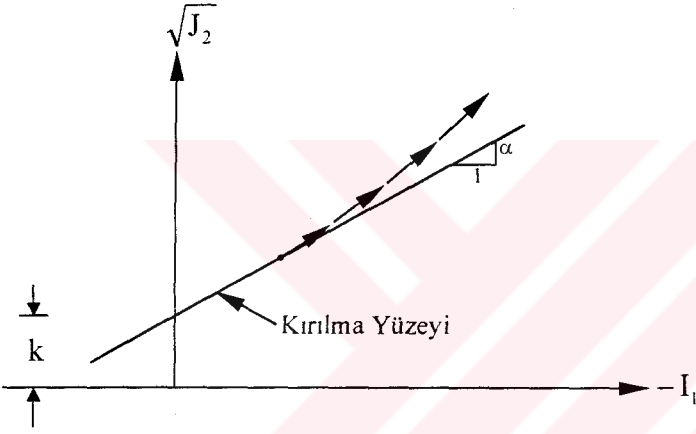
*Plastik Bölgede Yükleme Durumu:* Diğer yandan,  $d\lambda^{n+1/2}$  pozitif bir değere sahipse, elemanın ( $n+1$ ). yükleme boyunca plastik kaldığı kabul edilir. Bu durumda ( $n+1/2$ ). artımdaki  $\sigma_{ij}^{n+1/2}$  gerilme hali, kırılma yüzeyine ölçeklenir. Bu ölçekleme işleminde, deviatorik gerilme bileşenleri  $r$  ölçekleme katsayısı ile orantılı olarak azaltılırken,  $I_1$  hidrostatik bileşen ve gerilme tansörünün asal doğrultuları değişmeden aynen kaldığı kabul edilir. Bu anlatılan işlem, aşağıda verilmiştir.

*Ölçeklendirme İşlemi:* Ölçeklendirme işlemi, şematik olarak Şekil 2.7'de gösterilmiştir. Eğer bu işlem gerçekleştirilmezse, birkaç yük artımından sonra nihai gerilme, kırılma yüzeyinden uzaklaşacaktır (Şekil 2.8). Kırılma yüzeyinden uzaklaşan bu gerilmeler, bir  $r$  ölçeklendirme katsayısı ile kırılma yüzeyine gelecek şekilde aşağıdaki gibi ölçeklendirilir:

$$r = \Delta T / \sqrt{J_2}^{n+1/2} \quad (2.20)$$



Şekil 2.7. Ölçeklendirme işlemi (Chen ve Mizuno, 1990).



Şekil 2.8. Ölçeklendirilmemiş gerilmenin izlediği yörünge (Chen ve Mizuno, 1990).

Burada  $\Delta T$ , 2. adımda denklem (2.13) ile tanımlanan pozitif bir değerdir. Bu katsayı ile ölçeklendirilen gerilmeler aşağıdaki gibi elde edilir:

$$\tilde{\sigma}_{11}^{n+1/2} = r s_{11}^{n+1/2} + \frac{1}{3} I_1^{n+1/2} \quad (2.21)$$

$$\tilde{\sigma}_{22}^{n+1/2} = r s_{22}^{n+1/2} + \frac{1}{3} I_1^{n+1/2} \quad (2.22)$$

$$\tilde{\sigma}_{33}^{n+1/2} = r s_{33}^{n+1/2} + \frac{1}{3} I_1^{n+1/2} \quad (2.23)$$

$$\tilde{\sigma}_{12}^{n+1/2} = r s_{12}^{n+1/2} \quad (2.24)$$

$$\tilde{\sigma}_{13}^{n+1/2} = r s_{13}^{n+1/2} \quad (2.25)$$

$$\tilde{\sigma}_{23}^{n+1/2} = r s_{23}^{n+1/2} \quad (2.26)$$

burada  $I_1^{n+1/2} = \sigma_{11}^{n+1/2} + \sigma_{22}^{n+1/2} + \sigma_{33}^{n+1/2}$  şeklindedir.

*Elastik-Plastik Malzeme Matrisi:* Birinci aşamadaki rijitlik matrisini kurmak için yukarıdaki gerilme bileşenleri kullanılarak elastik-plastik malzeme matrisi aşağıdaki gibi hesaplanabilir:

$$\mathbf{D}^{ep\ n+1/2} = \mathbf{D}^{e\ n+1/2} - \mathbf{D}^{p\ n+1/2} \quad (2.27)$$

Burada  $\mathbf{D}^{e\ n+1/2}$  daha önce denklem (2.19) ile verilen elastik malzeme matrisidir.  $\mathbf{D}^{p\ n+1/2}$  ise aşağıdaki gibi yazılabilir:

$$\mathbf{D}^{p\ n+1/2} = \frac{1}{H} \begin{bmatrix} H_{11}^2 & H_{11}H_{22} & H_{11}H_{33} & H_{11}H_{12} & H_{11}H_{13} & H_{11}H_{23} \\ H_{22}H_{11} & H_{22}^2 & H_{22}H_{33} & H_{22}H_{12} & H_{22}H_{13} & H_{22}H_{23} \\ H_{33}H_{11} & H_{33}H_{22} & H_{33}^2 & H_{33}H_{12} & H_{33}H_{13} & H_{33}H_{23} \\ H_{12}H_{11} & H_{12}H_{22} & H_{12}H_{33} & H_{12}^2 & H_{12}H_{13} & H_{12}H_{23} \\ H_{13}H_{11} & H_{13}H_{22} & H_{13}H_{33} & H_{13}H_{12} & H_{13}^2 & H_{13}H_{23} \\ H_{23}H_{11} & H_{23}H_{22} & H_{23}H_{33} & H_{23}H_{12} & H_{23}H_{13} & H_{23}^2 \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} d\varepsilon_{11} \\ d\varepsilon_{22} \\ d\varepsilon_{33} \\ d\gamma_{12} \\ d\gamma_{13} \\ d\gamma_{23} \end{Bmatrix} \quad (2.28)$$

Bu matrisin bileşenleri ise aşağıda verilmiştir;

$$H_{11} = 3K\alpha + \frac{G}{\sqrt{J_2}^{n+1/2}} \tilde{s}_{11}^{n+1/2}; \quad \tilde{s}_{11}^{n+1/2} = \tilde{\sigma}_{11}^{n+1/2} - \frac{1}{3}(\tilde{\sigma}_{11}^{n+1/2} + \tilde{\sigma}_{22}^{n+1/2} + \tilde{\sigma}_{33}^{n+1/2}) \quad (2.29)$$

$$H_{22} = 3K\alpha + \frac{G}{\sqrt{J_2}^{n+1/2}} \tilde{s}_{22}^{n+1/2}; \quad \tilde{s}_{22}^{n+1/2} = \tilde{\sigma}_{22}^{n+1/2} - \frac{1}{3}(\tilde{\sigma}_{11}^{n+1/2} + \tilde{\sigma}_{22}^{n+1/2} + \tilde{\sigma}_{33}^{n+1/2}) \quad (2.30)$$

$$H_{33} = 3K\alpha + \frac{G}{\sqrt{\tilde{J}_2^{n+1/2}}} \tilde{S}_{33}^{n+1/2}; \quad \tilde{S}_{33}^{n+1/2} = \tilde{\sigma}_{33}^{n+1/2} - \frac{1}{3}(\tilde{\sigma}_{11}^{n+1/2} + \tilde{\sigma}_{22}^{n+1/2} + \tilde{\sigma}_{33}^{n+1/2}) \quad (2.31)$$

$$H_{12} = \frac{G}{\sqrt{\tilde{J}_2^{n+1/2}}} \tilde{S}_{12}^{n+1/2}; \quad \tilde{S}_{12}^{n+1/2} = \tilde{\sigma}_{12}^{n+1/2} \quad (2.32)$$

$$H_{13} = \frac{G}{\sqrt{\tilde{J}_2^{n+1/2}}} \tilde{S}_{13}^{n+1/2}; \quad \tilde{S}_{13}^{n+1/2} = \tilde{\sigma}_{13}^{n+1/2} \quad (2.33)$$

$$H_{23} = \frac{G}{\sqrt{\tilde{J}_2^{n+1/2}}} \tilde{S}_{23}^{n+1/2}; \quad \tilde{S}_{23}^{n+1/2} = \tilde{\sigma}_{23}^{n+1/2} \quad (2.34)$$

burada  $\tilde{S}_{ij}^{n+1/2}$  ölçeklendirilmiş deviatorik gerilmelerdir.  $\tilde{J}_2^{n+1/2}$  ise,  $\tilde{\sigma}_{ij}^{n+1/2}$  ölçeklendirilmiş gerilmelerden hesaplanmaktadır.

4. Adım: *Evvelce Elastik Durumda Olan Eleman İçin Gerilme Kontrolü:* Evvelce elastik durumda olan elemanın (n+1). artımın sonundaki durumu (n+1/2). artımdaki gerilmeler kullanılarak belirlenir. n. artımın sonunda elastik durumda olan eleman için kırılma fonksiyonunun değeri, aşağıdaki gibi verilmiştir:

$$f^n = \alpha I_1^n + \sqrt{J_2^n} - k < 0 \quad (2.35)$$

Burada  $I_1^n$  ve  $J_2^n$  sırasıyla n. yük artımında elde edilen gerilme tansörünün birinci ve deviatorik gerilme tansörünün ikinci invariantıdır. (n+1/2). artımdaki kırılma fonksiyonunun değeri ise aşağıdaki gibidir:

$$f^{n+1/2} = \alpha I_1^{n+1/2} + \sqrt{J_2^{n+1/2}} - k \quad (2.36)$$

(n+1). artımın sonundaki kırılma fonksiyonunun değerinin, aşağıdaki bağıntı kullanılarak belirlendiği kabul edilmektedir:

$$f^{n+1} = f^n + 2(f^{n+1/2} - f^n) \quad (2.37)$$

Eğer  $f^{n+1}$  nin değeri hala negatifse, o zaman  $(n+1)$ . yükleme sırasında elemanın elastik bölgede kaldığı kabul edilir. Böylece,  $(n+1)$ . artımsal hesaplamalar sırasında  $D_{ijkl}^{e\ n+1/2}$  elastik malzeme matrisi kullanılmaktadır.

Diğer yandan, eğer  $f^{n+1}$  pozitif bir değere sahipse, o zaman bu artım sırasında elemanın kırıldığı kabul edilir. Bu durumda, elastik ve elastik-plastik malzeme matrislerinin ağırlıklı bir ortalaması kullanılır. Ortalama malzeme matrisini oluşturmak için  $(n+1/2)$ . artımdaki  $\sigma_{ij}^{n+1/2}$  gerilmeler, 3. adımda tanımlanan işlemle kırılma yüzeyine ölçeklendirilir. Bu sırada, bu gerilme halinin kırılma yüzeyinin içinde veya dışında olup olmadığına bakılmaz. Böylece ortalama malzeme matrisi şu şekilde oluşturulur:

$$D_{ort}^{ep\ n+1/2} = rD^{e\ n+1/2} + (1-r)D^{ep\ n+1/2} \quad (2.38)$$

burada  $r$  ölçekleme katsayısı ve  $D^{ep\ n+1/2}$  ölçeklendirilmiş gerilmelere dayanan elastik-plastik malzeme matrisidir. Bu durumda, ölçekleme katsayısı  $r$  ise, aşağıdaki gibi hesaplanmaktadır:

$$r = -\frac{f^n}{2(f^{n+1/2} - f^n)} \quad (2.39)$$

Böylece,  $(n+1/2)$ . adımdaki gerilme durumu belirlenerek birinci aşama tamamlanmış olmaktadır.

### 2.3.2. İkinci Aşama İntegrasyon İşlemleri

$(n+1/2)$ . adımdan sonra elde edilen  $K^{n+1/2}$  rijitlik matrisi yardımıyla,  $dR$  yük artımının tümü kullanılarak  $dU^{n+1}$  yerdeğiştirme artımlarını elde etmek için  $(n+1)$ . artımsal hesaplamaları gerçekleştirilir.  $(n+1)$ . adımdaki şekildeğiştirmeler aşağıdaki gibi hesaplanır:

$$dU^{n+1} = K_{n+1/2}^{-1}(dR) \quad \text{sistemde} \quad (2.40)$$

$$d\boldsymbol{\varepsilon}^{n+1} = \mathbf{B}d\mathbf{U}^{n+1} \quad \text{elemanda} \quad (2.41)$$

Bu şekildeğiştirmelere karşılık gelen  $d\boldsymbol{\sigma}^{n+1}$  gerilme artımları,  $(n+1/2)$ . artımdaki  $\mathbf{D}^{e^{n+1/2}}$  veya  $\mathbf{D}^{ep^{n+1/2}}$  malzeme matrisleri kullanılarak,

$$d\boldsymbol{\sigma}^{n+1} = \mathbf{D}^{e^{n+1/2}} d\boldsymbol{\varepsilon}^{n+1} \quad \text{veya} \quad d\boldsymbol{\sigma}^{n+1} = \mathbf{D}^{ep^{n+1/2}} d\boldsymbol{\varepsilon}^{n+1} \quad (2.42)$$

şeklinde elde edilir. Daha sonra,  $(n+1)$ . yük artımı sonunda tüm elemanlardaki  $\boldsymbol{\sigma}^{n+1}$  gerilmeleri,  $n$ . artım sonundaki gerilmelere,  $\boldsymbol{\sigma}^n$ ,  $(n+1)$ . artımdaki gerilme artımları,  $d\boldsymbol{\sigma}^{n+1}$ , eklenerek aşağıdaki gibi elde edilir:

$$\boldsymbol{\sigma}^{n+1} = \boldsymbol{\sigma}^n + d\boldsymbol{\sigma}^{n+1} \quad (2.43)$$

İkinci aşamada yapılan hesaplamalar, birinci aşamadakilerle benzer olduğu için kısa olarak hesap adımları aşağıda verilmiştir.

1. *Adım: Başlangıç Hesaplamalar:* İlk olarak  $(n+1)$ . yük artımı için gerilme tansörünün birinci invariantı ( $I_1^{n+1}$ ) ve deviatorik gerilme tansörünün ikinci invariantı ( $\sqrt{J_2}^{n+1}$ ) birinci aşamadaki gibi hesaplanır.

2. *Adım: Çekme Çatlaklarının Kontrolü:* Yine burada da eğer gerilme hali kırılma yüzeyinin alacağı nihai değeri aşarsa, hidrostatik gerilme bileşeni kırılma yüzeyindeki nihai gerilme seviyesine gelecek şekilde değiştirilir. Bu işlem, birinci aşamadaki gibidir.

3. *Adım: Evvelce Plastik Durumda Olan Eleman İçin Gerilme Kontrolü:* Eğer  $(n+1/2)$ . artımda rijitlik matrisini oluşturmak için birinci aşamanın 3. adımındaki elastik-plastik malzeme matrisi veya 4. adımındaki ortalama malzeme matrisi kullanılmışsa, o zaman gerilme halinin kırılma yüzeyinin içinde veya dışında olup olmadığına bakılmaksızın  $(n+1)$ . adımın sonunda elemandaki gerilme halinin plastik olduğu kabul edilir. Daha sonra, nihai gerilme hali kırılma yüzeyine ölçeklendirilir ve daha sonraki hesaplamalar için  $\mathbf{D}^{ep^{n+1}}$  elastik-plastik malzeme matrisi oluşturulur.

4. *Adım: Evvelce Elastik Durumda Olan Eleman İçin Gerilme Kontrolü:*  $(n+1/2)$ . adımda rijitlik matrisi oluşturulurken, elastik malzeme matrisi kullanılan eleman için

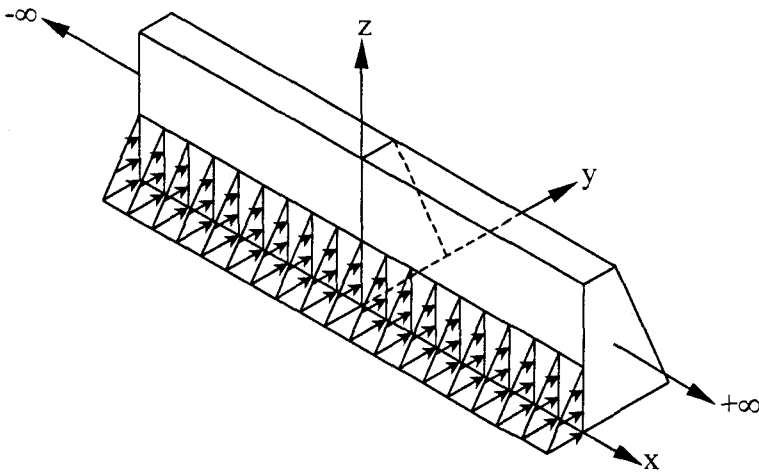
kırılma şartı kontrol edilmek zorundadır. Bu nedenle,

$$f^{n+1} = \alpha I_1^{n+1} + \sqrt{J_2}^{n+1} - k > 0 \quad (2.44)$$

durumu söz konusu ise, o zaman  $\sigma_{ij}^{n+1}$  gerilmeleri kırılma yüzeyine ölçeklendirilir ve sonraki adımlar için  $\mathbf{D}^{ep^{n+1}}$  elastik-plastik malzeme matrisi oluşturulur. Aksi halde, gerilme hali değişmeden kalır ve elastik malzeme matrisi  $\mathbf{D}^{e^{n+1}}$  sonraki artımsal hesaplamalar için kurulur.

### 2.3.3. Drucker-Prager Malzeme Modeli ile İki ve Üç Boyutlu Statik Analiz

Bir boyutu diğer iki boyutunun yanında çok büyük olan Şekil 2.9'daki gibi prizmatik bir yapı, boyuna elemanlarına dik kuvvetlerle yüklenir ve bu kuvvetler uzunluk boyunca değişmezlerse, bütün dik kesitlerin aynı şartlar altında olduğu kabul edilebilir (Timoshenko ve Goodier, 1969). Bu durumda, Şekil 2.9'daki yapı dikkate alınacak olursa, yapıdaki düzlem gerilme halini,  $\sigma_{xx}$ ,  $\sigma_{yy}$ ,  $\sigma_{zz}$  ve  $\sigma_{yz}$  gerilme bileşenleri belirler. Bu gerilme halinde  $\epsilon_{xx}$ ,  $\gamma_{xy}$ ,  $\gamma_{xz}$  şekildeğiştirme bileşenleri sıfır olur. Bu düzlem problem tipi, elastisitede *Düzlem Şekildeğiştirme Problemi* olarak bilinmektedir. Eğer dikkate alınan yapı, Şekil 2.9'daki gibi sonsuz uzunluktaysa ve uzunluğu boyunca x-eksenine dik kuvvetlerle yüklenmişse, bütün dik kesitler simetri düzlemleridir ve bunun sonucu olarak uzunluk boyunca yerdeğiştirmeler yukarıda belirtildiği gibi sıfırdır.



Şekil 2.9. Uzunluğu boyunca dik kuvvetlerle yüklenmiş sonsuz uzunlukta bir yapı

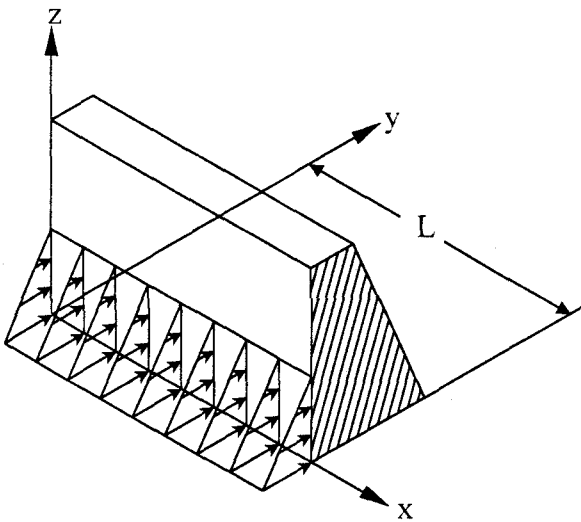
Eğer dikkate alınan yapı, Şekil 2.10'daki gibi sonlu uzunlukta ise, uçlardaki sınır şartları,

$$U(0,y,z)=U(L,y,z)=0; \text{ x}=0 \text{ ve } \text{x}=L \text{ için } \sigma_{xy}=\sigma_{xz}=0 \quad (2.45)$$

şeklindedir. Bu son durum, düzlem şekildeğiştirme hali ile özdeştir (Chou ve Pagano, 1967). Bu özellikten yararlanılarak Drucker-Prager malzeme modeli, hem bir düzlem şekildeğiştirme probleminde hem de bu problemin özdeşi sonlu uzunlukta üç boyutlu problemde kullanılarak modelin doğruluğu test edilmiştir. Seçilen düzlem şekildeğiştirme problemi Şekil 2.11'de boyutları ve sonlu eleman modeli ile birlikte görülmektedir.

Bu problemin üç boyutlu özdeşi üçüncü boyut 30 m alınarak elde edilmiş ve Şekil 2.12'de verilmiştir. Her iki sistemde kullanılan malzeme özellikleri aynıdır. Elastisite modülü  $2 \times 10^{10}$  N/m<sup>2</sup>, Poisson oranı 0.15, kütle yoğunluğu 2446.48 kg/m<sup>3</sup>, içsel sürtünme açısı 37° ve kohezyon  $2.15 \times 10^6$  N/m<sup>2</sup> şeklinde olduğu kabul edilmiştir.

Lineer olmayan davranışın elde edilebilmesi için, P=840 kN alınarak statik analizler gerçekleştirilmiştir. İki boyutlu modelin tüm düğüm noktalarında, üç boyutlu modelin ise simetri eksenine karşılık gelen kesitteki (x=-15 m) düğüm noktalarında elde edilen yerdeğiştirmeler Tablo 2.2'de verilmiştir. Bu tablodan görüleceği gibi, Drucker-Prager malzeme modeli ile iki ve üç boyutlu statik analiz sonuçları birbirine çok yakındır.



Sonlu uzunlukta alınan bir yapının düzlem şekildeğiştirme halini yansıtması için gerekli sınır şartları

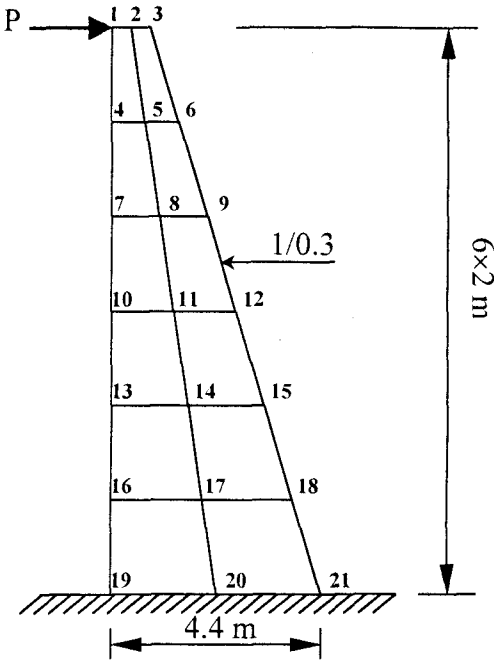
$$U(0,y,z)=U(L,y,z)=0$$

$$\text{x}=0 \text{ için } \sigma_{xy}=\sigma_{xz}=0$$

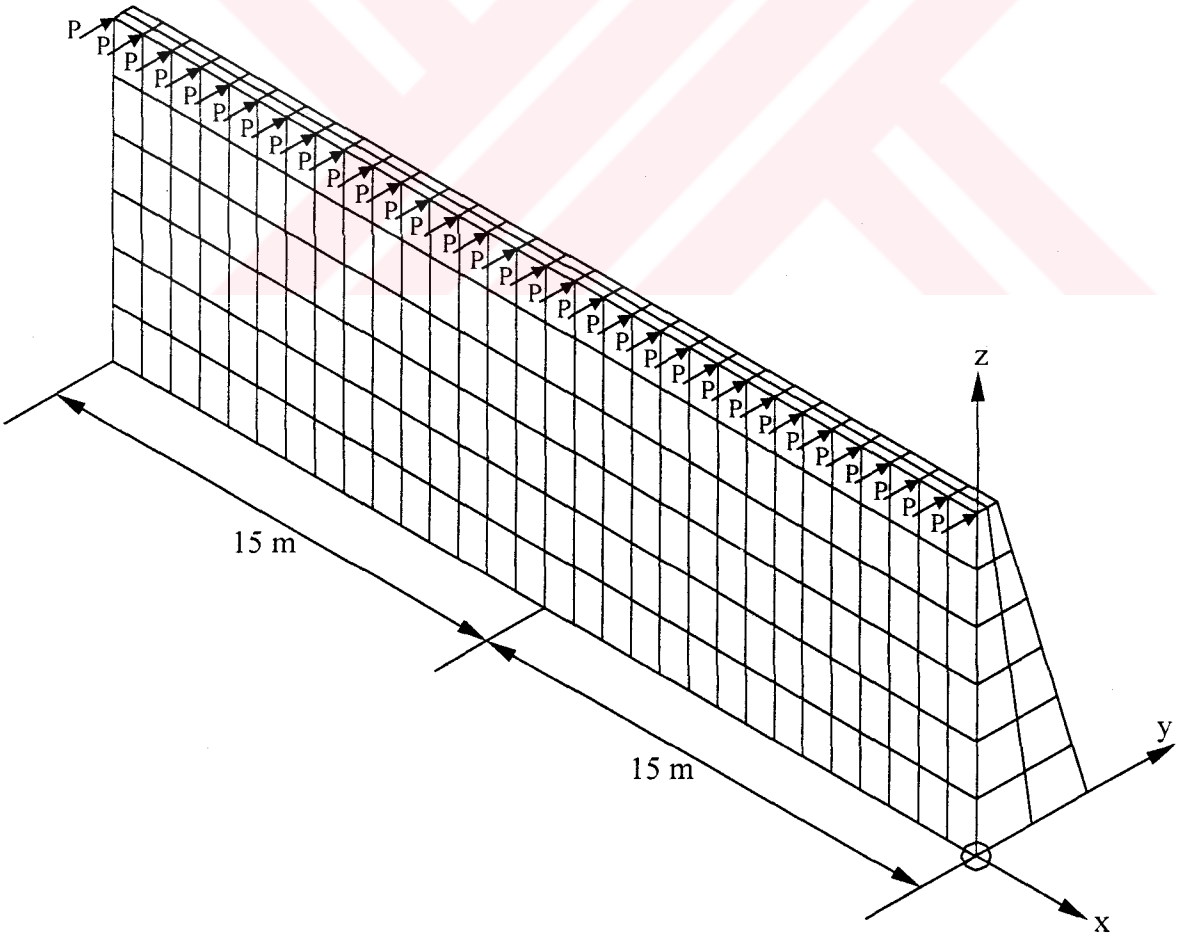
$$\text{x}=L \text{ için } \sigma_{xy}=\sigma_{xz}=0$$

Şekil 2.10. Uzunluğu boyunca dik kuvvetlerle yüklenmiş sonlu uzunlukta bir yapı





Şekil 2.11. Düzlem şekildeğiştirme problemi



Şekil 2.12. Düzlem şekildeğiştirme probleminin üç boyutlu özdeşi

Tablo 2.2. Drucker-Prager malzeme modeli ile iki ve üç boyutlu statik analiz sonucu elde edilen yerdeğıştirmeler

| İki Boyutlu Analiz |                    |                    |                    | Üç Boyutlu Analiz |                    |                    |                    |
|--------------------|--------------------|--------------------|--------------------|-------------------|--------------------|--------------------|--------------------|
| Dn                 | U <sub>x</sub> (m) | U <sub>y</sub> (m) | U <sub>z</sub> (m) | Dn                | U <sub>x</sub> (m) | U <sub>y</sub> (m) | U <sub>z</sub> (m) |
| 1                  | 0.00000E+0         | 8.14291E-3         | 1.72821E-3         | 316               | -1.93767E-17       | 8.19545E-3         | 1.73832E-3         |
| 2                  | 0.00000E+0         | 8.11701E-3         | 1.12360E-3         | 317               | -1.49896E-18       | 8.16950E-3         | 1.13092E-3         |
| 3                  | 0.00000E+0         | 8.10924E-3         | 5.31403E-4         | 318               | 1.36375E-17        | 8.16177E-3         | 5.35939E-4         |
| 4                  | 0.00000E+0         | 5.26856E-3         | 1.60236E-3         | 319               | -1.97339E-17       | 5.30712E-3         | 1.61248E-3         |
| 5                  | 0.00000E+0         | 5.26848E-3         | 7.16587E-4         | 320               | -8.88207E-19       | 5.30691E-3         | 7.21818E-4         |
| 6                  | 0.00000E+0         | 5.27132E-3         | -1.42131E-4        | 321               | 1.73351E-17        | 5.30988E-3         | -1.41721E-4        |
| 7                  | 0.00000E+0         | 3.11431E-3         | 1.30460E-3         | 322               | -1.53121E-17       | 3.13965E-3         | 1.31419E-3         |
| 8                  | 0.00000E+0         | 3.09594E-3         | 4.04544E-4         | 323               | -1.50228E-18       | 3.12108E-3         | 4.07816E-4         |
| 9                  | 0.00000E+0         | 3.10181E-3         | -4.42547E-4        | 324               | 1.14862E-17        | 3.12715E-3         | -4.45376E-4        |
| 10                 | 0.00000E+0         | 1.63236E-3         | 9.63515E-4         | 325               | -9.70401E-18       | 1.64652E-3         | 9.71697E-4         |
| 11                 | 0.00000E+0         | 1.61193E-3         | 1.92093E-4         | 326               | -1.11875E-18       | 1.62581E-3         | 1.93720E-4         |
| 12                 | 0.00000E+0         | 1.62160E-3         | -5.06579E-4        | 327               | 6.19560E-18        | 1.63573E-3         | -5.11022E-4        |
| 13                 | 0.00000E+0         | 7.00067E-4         | 6.27964E-4         | 328               | -5.09550E-18       | 7.06075E-4         | 6.33850E-4         |
| 14                 | 0.00000E+0         | 6.76825E-4         | 6.10966E-5         | 329               | -6.35662E-19       | 6.82545E-4         | 6.15528E-5         |
| 15                 | 0.00000E+0         | 6.88196E-4         | -4.18731E-4        | 330               | 3.00181E-18        | 6.94180E-4         | -4.22902E-4        |
| 16                 | 0.00000E+0         | 1.89967E-4         | 3.11201E-4         | 331               | -2.28614E-18       | 1.91335E-4         | 3.14246E-4         |
| 17                 | 0.00000E+0         | 1.65833E-4         | -4.71897E-6        | 332               | -1.83334E-19       | 1.66939E-4         | -4.85028E-6        |
| 18                 | 0.00000E+0         | 1.90626E-4         | -2.29433E-4        | 333               | 1.30870E-18        | 1.92131E-4         | -2.31814E-4        |

### 2.3.4. Drucker-Prager Malzeme Modeli ile İki ve Üç Boyutlu Dinamik Analiz

Drucker-Prager malzeme modeli ile iki ve üç boyutlu dinamik analiz gerçekleştirilerek, malzeme modelinin dinamik davranıştaki performansı test edilmiştir. Bunun için statik analizdeki sonlu eleman modellerinin aynıları kullanılmıştır. Dinamik etki olarak El Centro depremi (URL-1, 2003) dikkate alınmıştır. Lineer olmayan davranışın gözlenebilmesi için deprem kuvveti, 7 kat artırılmış ve modellere y-y doğrultusunda uygulanmıştır. Bunun sonucunda elde edilen yerdeğıştirmelerin maksimum ve minimum değerleri düzlem şekildeğıştirme hali için Tablo 2.3'te, üç boyutlu durum için ise Tablo 2.4'te sunulmuştur. Bu tablolar incelendiğinde, Drucker-Prager malzeme modeli ile iki ve üç boyutlu dinamik analiz sonuçlarının aynı olduğu görülmektedir.

Tablo 2.3. Drucker-Prager malzeme modeli ile iki boyutlu dinamik analiz sonucu elde edilen yerdeşistirmeler

| İki Boyutlu Analiz |      |                    |           |                    |           |                    |           |
|--------------------|------|--------------------|-----------|--------------------|-----------|--------------------|-----------|
| Dn                 |      | U <sub>x</sub> (m) | Zaman (s) | U <sub>y</sub> (m) | Zaman (s) | U <sub>z</sub> (m) | Zaman (s) |
| 1                  | maks | 0.00000E+0         | 6.500     | 6.01280E-3         | 2.500     | 1.17000E-3         | 2.501     |
|                    | min  | 0.00000E+0         | 6.500     | -3.21500E-3        | 3.363     | -6.08910E-4        | 3.363     |
| 2                  | maks | 0.00000E+0         | 6.500     | 6.01260E-3         | 2.500     | 8.47070E-4         | 2.501     |
|                    | min  | 0.00000E+0         | 6.500     | -3.21490E-3        | 3.363     | -4.36100E-4        | 3.363     |
| 3                  | maks | 0.00000E+0         | 6.500     | 6.01270E-3         | 2.500     | 5.24800E-4         | 2.501     |
|                    | min  | 0.00000E+0         | 6.500     | -3.21500E-3        | 3.363     | -2.73900E-4        | 2.167     |
| 4                  | maks | 0.00000E+0         | 6.500     | 4.42620E-3         | 2.500     | 1.14520E-3         | 2.501     |
|                    | min  | 0.00000E+0         | 6.500     | -2.41010E-3        | 2.166     | -5.96720E-4        | 3.363     |
| 5                  | maks | 0.00000E+0         | 6.500     | 4.42420E-3         | 2.500     | 6.11460E-4         | 2.501     |
|                    | min  | 0.00000E+0         | 6.500     | -2.40940E-3        | 2.166     | -3.17050E-4        | 2.166     |
| 6                  | maks | 0.00000E+0         | 6.500     | 4.42410E-3         | 2.500     | 8.80670E-5         | 2.504     |
|                    | min  | 0.00000E+0         | 6.500     | -2.40930E-3        | 2.166     | -4.81680E-5        | 2.166     |
| 7                  | maks | 0.00000E+0         | 6.500     | 2.97710E-3         | 2.500     | 1.05410E-3         | 2.500     |
|                    | min  | 0.00000E+0         | 6.500     | -1.66600E-3        | 2.165     | -5.52030E-4        | 2.166     |
| 8                  | maks | 0.00000E+0         | 6.500     | 2.96990E-3         | 2.500     | 3.97170E-4         | 2.501     |
|                    | min  | 0.00000E+0         | 6.500     | -1.66300E-3        | 2.165     | -2.07830E-4        | 2.166     |
| 9                  | maks | 0.00000E+0         | 6.500     | 2.97040E-3         | 2.500     | 1.47700E-4         | 3.363     |
|                    | min  | 0.00000E+0         | 6.500     | -1.66310E-3        | 2.165     | -2.47850E-4        | 2.498     |
| 10                 | maks | 0.00000E+0         | 6.500     | 1.77300E-3         | 2.500     | 8.87380E-4         | 2.500     |
|                    | min  | 0.00000E+0         | 6.500     | -1.02440E-3        | 2.165     | -4.77500E-4        | 2.166     |
| 11                 | maks | 0.00000E+0         | 6.500     | 1.75870E-3         | 2.500     | 2.21110E-4         | 2.502     |
|                    | min  | 0.00000E+0         | 6.500     | -1.01740E-3        | 2.165     | -1.15000E-4        | 2.166     |
| 12                 | maks | 0.00000E+0         | 6.500     | 1.76120E-3         | 2.500     | 2.35580E-4         | 3.363     |
|                    | min  | 0.00000E+0         | 6.500     | -1.01820E-3        | 2.165     | -4.10680E-4        | 2.499     |
| 13                 | maks | 0.00000E+0         | 6.500     | 8.69510E-4         | 2.500     | 6.57620E-4         | 2.501     |
|                    | min  | 0.00000E+0         | 6.500     | -5.21420E-4        | 2.164     | -3.63140E-4        | 2.165     |
| 14                 | maks | 0.00000E+0         | 6.500     | 8.47890E-4         | 2.500     | 9.05720E-5         | 2.502     |
|                    | min  | 0.00000E+0         | 6.500     | -5.09830E-4        | 2.164     | -4.34820E-5        | 2.165     |
| 15                 | maks | 0.00000E+0         | 6.500     | 8.50610E-4         | 2.500     | 2.38730E-4         | 2.165     |
|                    | min  | 0.00000E+0         | 6.500     | -5.10600E-4        | 2.164     | -4.12730E-4        | 2.499     |
| 16                 | maks | 0.00000E+0         | 6.500     | 2.84130E-4         | 2.501     | 3.78100E-4         | 2.501     |
|                    | min  | 0.00000E+0         | 6.500     | -1.78780E-4        | 2.163     | -2.08320E-4        | 2.164     |
| 17                 | maks | 0.00000E+0         | 6.500     | 2.54020E-4         | 2.501     | 7.79480E-6         | 4.873     |
|                    | min  | 0.00000E+0         | 6.500     | -1.62220E-4        | 2.163     | -1.27010E-6        | 2.483     |
| 18                 | maks | 0.00000E+0         | 6.500     | 2.73040E-4         | 2.500     | 1.55450E-4         | 2.164     |
|                    | min  | 0.00000E+0         | 6.500     | -1.72920E-4        | 2.163     | -2.60380E-4        | 2.500     |

Tablo 2.4. Drucker-Prager malzeme modeli ile üç boyutlu dinamik analiz sonucu elde edilen yerdeğıştirmeler

| Üç Boyutlu Analiz |      |                    |           |                    |           |                    |           |
|-------------------|------|--------------------|-----------|--------------------|-----------|--------------------|-----------|
| Dn                |      | U <sub>z</sub> (m) | Zaman (s) | U <sub>y</sub> (m) | Zaman (s) | U <sub>z</sub> (m) | Zaman (s) |
| 316               | maks | 4.52340E-18        | 5.096     | 6.01280E-3         | 2.500     | 1.17000E-3         | 2.501     |
|                   | min  | -4.23450E-18       | 5.121     | -3.21500E-3        | 3.363     | -6.08910E-4        | 3.363     |
| 317               | maks | 8.17380E-19        | 2.506     | 6.01260E-3         | 2.500     | 8.47070E-4         | 2.501     |
|                   | min  | -5.31880E-19       | 2.482     | -3.21490E-3        | 3.363     | -4.36100E-4        | 3.363     |
| 318               | maks | 4.65260E-18        | 5.069     | 6.01270E-3         | 2.500     | 5.24800E-4         | 2.501     |
|                   | min  | -4.24470E-18       | 5.033     | -3.21500E-3        | 3.363     | -2.73900E-4        | 2.167     |
| 319               | maks | 5.35620E-18        | 5.095     | 4.42620E-3         | 2.500     | 1.14520E-3         | 2.501     |
|                   | min  | -5.26200E-18       | 5.122     | -2.41010E-3        | 2.166     | -5.96720E-4        | 3.363     |
| 320               | maks | 5.92670E-19        | 2.521     | 4.42420E-3         | 2.500     | 6.11460E-4         | 2.501     |
|                   | min  | -4.32740E-19       | 2.529     | -2.40940E-3        | 2.166     | -3.17050E-4        | 2.166     |
| 321               | maks | 5.53520E-18        | 5.007     | 4.42410E-3         | 2.500     | 8.80670E-5         | 2.504     |
|                   | min  | -5.04700E-18       | 5.094     | -2.40930E-3        | 2.166     | -4.81680E-5        | 2.166     |
| 322               | maks | 4.73440E-18        | 5.095     | 2.97710E-3         | 2.500     | 1.05410E-3         | 2.500     |
|                   | min  | -4.90320E-18       | 5.121     | -1.66600E-3        | 2.165     | -5.52030E-4        | 2.166     |
| 323               | maks | 6.30760E-19        | 2.522     | 2.96990E-3         | 2.500     | 3.97170E-4         | 2.501     |
|                   | min  | -4.78530E-19       | 2.544     | -1.66300E-3        | 2.165     | -2.07830E-4        | 2.166     |
| 324               | maks | 4.98760E-18        | 5.007     | 2.97040E-3         | 2.500     | 1.47700E-4         | 3.363     |
|                   | min  | -4.64230E-18       | 5.092     | -1.66310E-3        | 2.165     | -2.47850E-4        | 2.498     |
| 325               | maks | 3.51130E-18        | 5.092     | 1.77300E-3         | 2.500     | 8.87380E-4         | 2.500     |
|                   | min  | -3.88920E-18       | 5.120     | -1.02440E-3        | 2.165     | -4.77500E-4        | 2.166     |
| 326               | maks | 4.50160E-19        | 2.522     | 1.75870E-3         | 2.500     | 2.21110E-4         | 2.502     |
|                   | min  | -3.87500E-19       | 2.543     | -1.01740E-3        | 2.165     | -1.15000E-4        | 2.166     |
| 327               | maks | 3.77330E-18        | 5.065     | 1.76120E-3         | 2.500     | 2.35580E-4         | 3.363     |
|                   | min  | -3.47490E-18       | 5.093     | -1.01820E-3        | 2.165     | -4.10680E-4        | 2.499     |
| 328               | maks | 2.25630E-18        | 5.036     | 8.69510E-4         | 2.500     | 6.57620E-4         | 2.501     |
|                   | min  | -2.44390E-18       | 5.120     | -5.21420E-4        | 2.164     | -3.63140E-4        | 2.165     |
| 329               | maks | 3.32070E-19        | 2.521     | 8.47890E-4         | 2.500     | 9.05720E-5         | 2.502     |
|                   | min  | -2.87100E-19       | 2.543     | -5.09830E-4        | 2.164     | -4.34820E-5        | 2.165     |
| 330               | maks | 2.36720E-18        | 5.064     | 8.50610E-4         | 2.500     | 2.38730E-4         | 2.165     |
|                   | min  | -2.04210E-18       | 5.093     | -5.10600E-4        | 2.164     | -4.12730E-4        | 2.499     |
| 331               | maks | 1.18650E-18        | 5.035     | 2.84130E-4         | 2.501     | 3.78100E-4         | 2.501     |
|                   | min  | -1.23110E-18       | 5.120     | -1.78780E-4        | 2.163     | -2.08320E-4        | 2.164     |
| 332               | maks | 1.76290E-19        | 2.521     | 2.54020E-4         | 2.501     | 7.79480E-6         | 4.873     |
|                   | min  | -1.49520E-19       | 2.620     | -1.62220E-4        | 2.163     | -1.27010E-6        | 2.483     |
| 333               | maks | 1.11650E-18        | 5.063     | 2.73040E-4         | 2.500     | 1.55450E-4         | 2.164     |
|                   | min  | -9.55870E-19       | 5.090     | -1.72920E-4        | 2.163     | -2.60380E-4        | 2.500     |

## **2.4. Kemer Barajların Malzeme Bakımından Lineer ve Lineer Olmayan Dinamik Davranışının Lagrange Yaklaşımı ile İncelenmesi**

Bu tez çalışmasında, kemer barajların malzeme bakımından lineer ve lineer olmayan dinamik davranışı Lagrange yaklaşımı ile incelenmektedir. Baraj betonunun lineer olmayan davranışı, Eğri Tanımlama ve Drucker-Prager modeli ile tanımlanmıştır. Chen ve Mizuno (1990)'da ayrıntıları iki boyutlu olarak verilen Drucker-Prager modelinin üç boyutlu hali geliştirilerek NONSAP (Bathe vd., 1974) yapı analiz programına eklenmiştir.

Rezervuardaki su kütlesi, "Genel Bilgiler" bölümünde ayrıntılı olarak açıklanan üç boyutlu 8-düğüm noktalı Lagrange sıvı elemanlar ile temsil edilmiştir. Bu sıvı eleman, FORTRAN 77 programlama dilinde kodlanarak genel amaçlı NONSAP (Bathe vd., 1974) yapı analiz programına uyarlanmış ve baraj-su etkileşimi, değiştirilen bu program ile incelenmiştir. Kaya zemin ve suyun lineer elastik izotrop malzeme olduğu kabul edilmiştir. Rezervuardaki su seviyesindeki değişimin ve kaya zemin özelliklerinin baraj davranışına etkisi de ayrıca incelenmiştir.

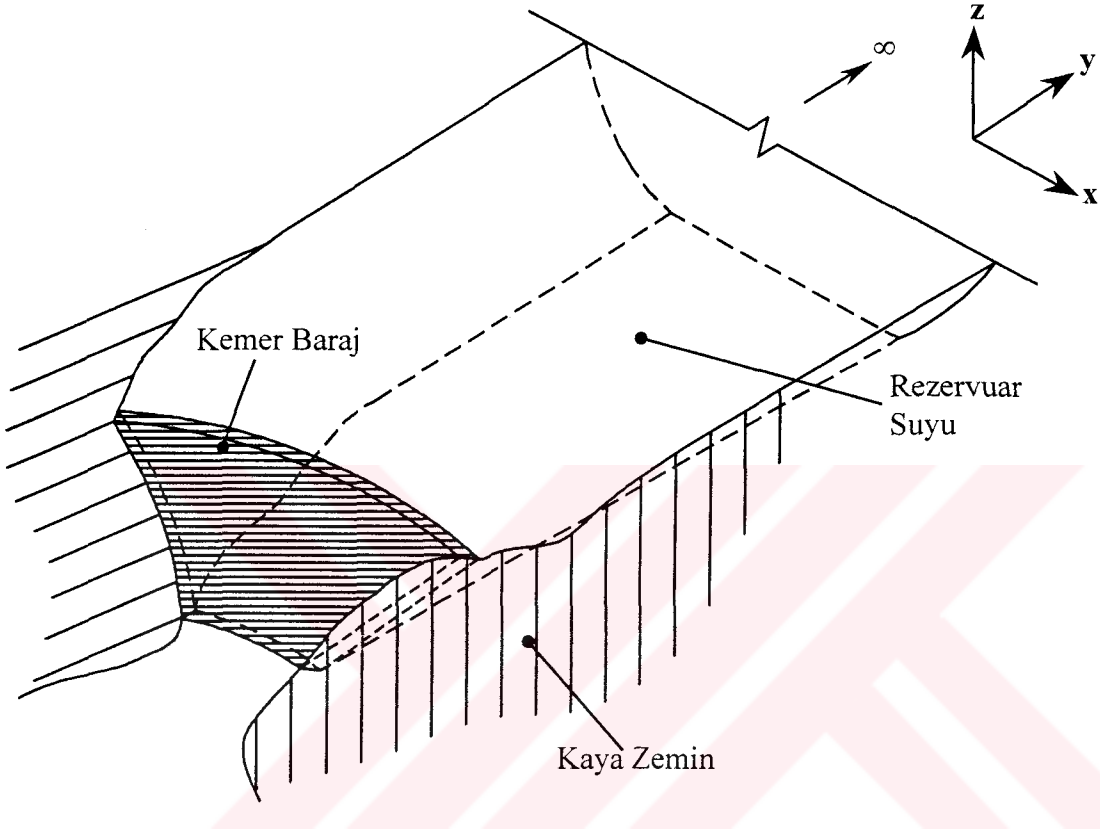
Bu kısımda, öncelikle bir kemer baraj-su-zemin sistemi tanıtılmakta, daha sonra uygulama amacıyla seçilen Tip-5 kemer barajı için hazırlanan baraj-su, baraj-zemin ve baraj-su-zemin etkileşim modelleri ayrıntılı olarak verilmektedir. Sıvı-yapı gibi iki farklı ortamdaki sistemlerde sönüm oranının önemi ve bu tezde kullanılan Rayleigh sönümünün nasıl belirlendiği açıklanmaktadır. Seçilen yer hareketinin tanıtılmasından sonra, Tip-5 kemer barajının lineer ve lineer olmayan dinamik analizine geçilmektedir. Analizlerde, esas olarak kemer baraj-su etkileşimi incelenmiştir. Rezervuarın boş ve dolu olması durumu için analizler yapılarak kemer baraj davranışına su etkisi belirlenmeye çalışılmıştır. Baraj-su etkileşimi, kaya zeminin rijit ve esnek olması durumu için ayrı ayrı ele alınmıştır. Analizler sonucu, baraj-su ara yüzeyinde elde edilen hidrodinamik basınçlar, baraj kretindeki yerdeğiştirmeler ve memba ve mansap yüzeyindeki gerilmeler ayrıntılı olarak verilmiştir.

### **2.4.1. Kemer Baraj-Su-Zemin Sistemi**

#### **2.4.1.1. Kemer Baraj**

Kemer barajlar, esnek zemin üzerinde ve rezervuar suyunun etkisinde üç boyutlu

sistemlerdir (Şekil 2.13). Deprem gibi dinamik etkiler için, bir kemer baraj-su-zemin sisteminin lineer ve lineer olmayan analizi, kaya zemin ve su etkilerini gerçekçi bir şekilde dikkate alan üç boyutlu analitik bir modele dayanmalıdır. Bu model, genellikle sonlu eleman yöntemi kullanılarak oluşturulmaktadır.



Şekil 2.13. Kemer baraj-su-zemin sistemi (Fok ve Chopra, 1985).

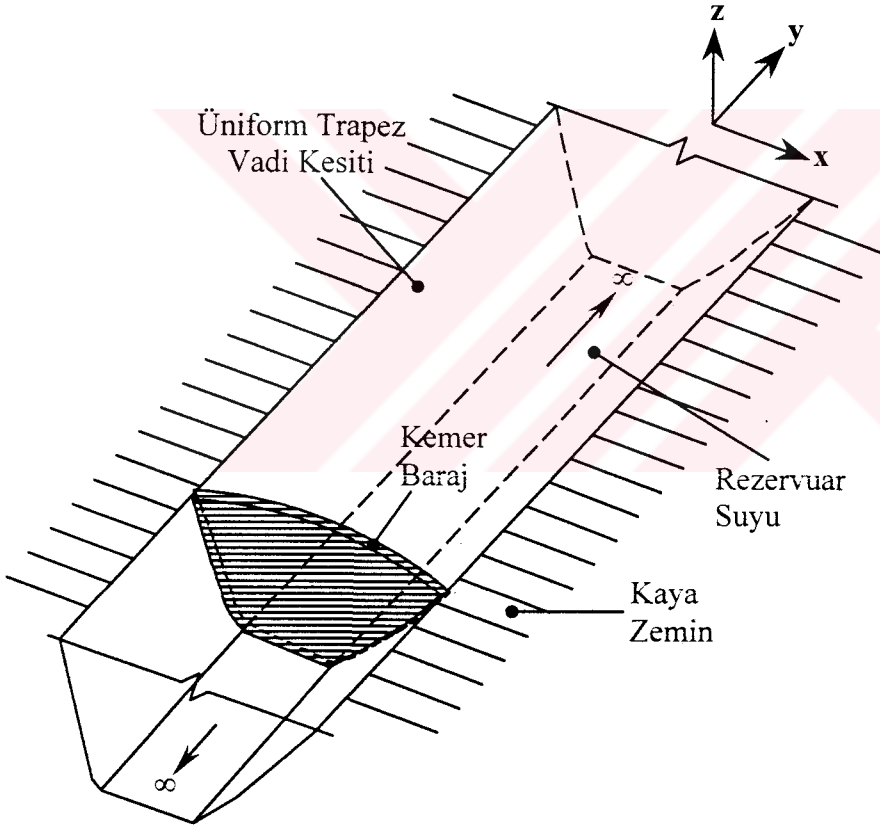
#### 2.4.1.2. Rezervuar Suyu

Baraj ve rezervuar suyu arasındaki etkileşim, deprem yer hareketi sırasında kemer barajların dinamik davranışını etkileyen en önemli faktörlerden biridir. Sıvı-yapı etkileşimine maruz yapı grubuna giren barajlarda, deprem gibi dinamik bir etki altında baraj suyunun, su da barajın davranışını önemli ölçüde etkiler (Fok ve Chopra, 1985).

Bir kemer baraj arkasındaki rezervuar, vadi topografyasından dolayı karmaşık bir şekle ve birkaç kilometre uzunluğa sahiptir. Kemer barajların analizinde, karmaşık vadi topografyası trapez kesitli olarak Şekil 2.14'teki gibi idealleştirilebilir (Fok ve Chopra, 1985).

Dinamik hareket sırasında baraj rezervuarındaki su kütlesi, Westergaard, Euler ve

Lagrange yaklaşımları ile temsil edilebilmektedir. Bu tezde, rezervuar suyu için Lagrange yaklaşımı kullanılmıştır. Lagrange yaklaşımında, memba yönündeki rezervuar genellikle sonlu bir bölge olarak tanımlanmakta ve rezervuar uzunluğu için baraj yüksekliğinin ( $H$ ) üç katı alınarak su ortamının sonlu elemanlar ile modellenmesi uygun olmaktadır. Sıvı-yapı ortak hareket denklemlerinin kullanılabilmesi için, su ile temas halindeki kemer baraj ve vadi yüzeylerinde denklem (1.104) ile verilen ara yüzey şartının sağlanması gerekmektedir. Sıvının viskoz olmadığı kabul edildiğinden, sıvı ile temas eden yüzeylerde ara yüzeye normal yerdeğiştirmeler sürekli, teğet yerdeğiştirmeler süresiz olmaktadır. Kemer baraj ve rezervuarın karmaşık geometrisinden dolayı bu ara yüzey şartının sağlanması için rijit çubuk elemanlar kullanılmaktadır.



Şekil 2.14. İdealleştirilmiş kemer baraj-su-zemin sistemi (Fok ve Chopra, 1985).

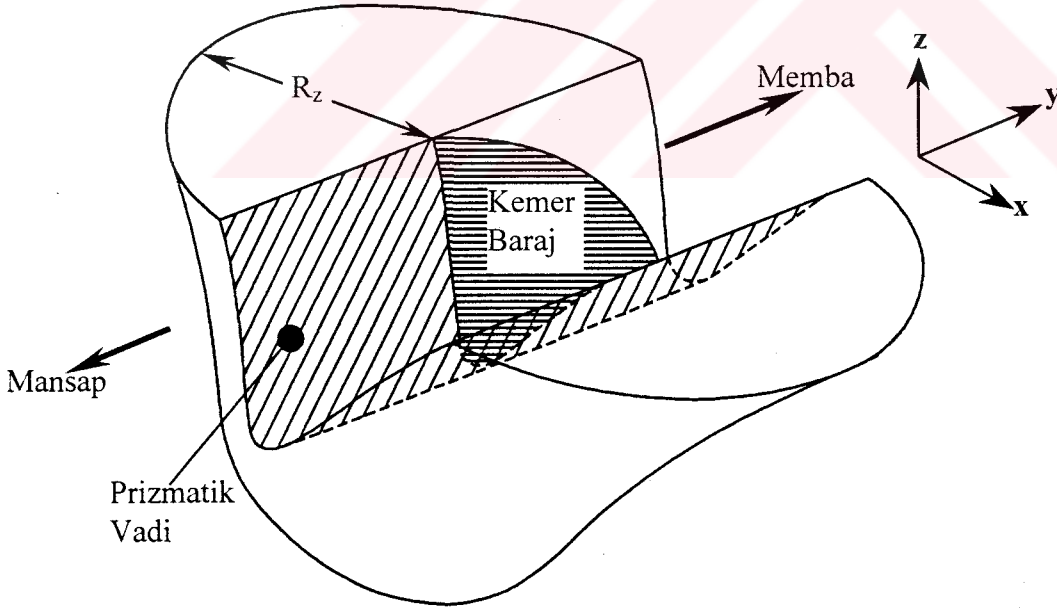
### 2.4.1.3. Kaya Zemin

Kemer barajlar, su basıncını ve diğer yüklerin büyük bir kısmını vadi yamaçlarına kemer etkisi ile aktararak dayanım sağlarlar. Bu nedenle, kemer baraj ile kaya zemin

arasında sürekli bir etkileşim söz konusudur. Bu etkileşimi sonlu eleman yöntemi ile modellerken, kaya zemin bölgesinin şeklini ve boyutunu çok iyi tanımlamak gerekmektedir.

### 2.4.1.3.1. Kaya Zemin Modelinin Şekli

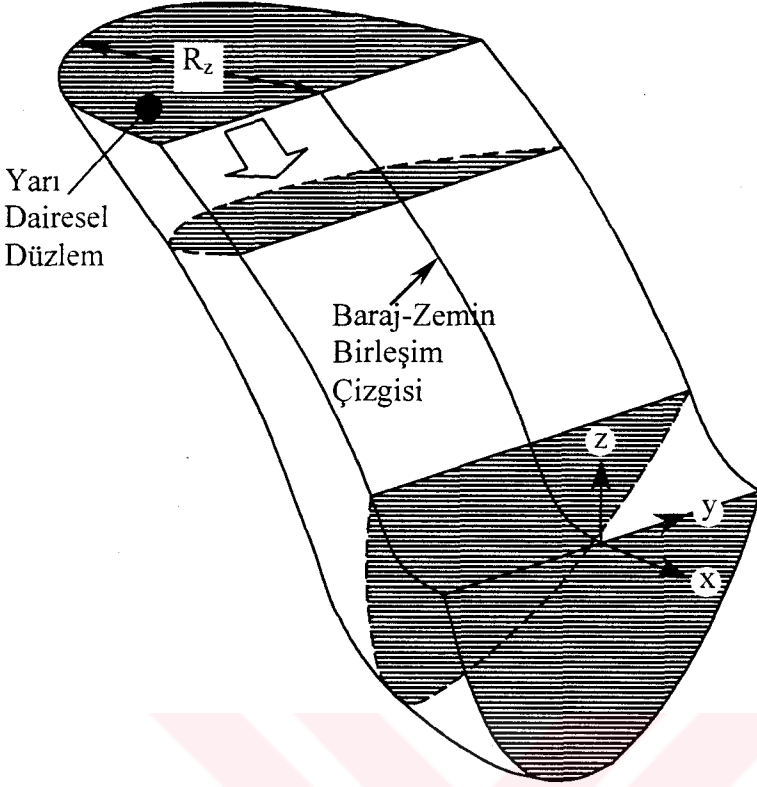
Sonlu eleman yönteminin en önemli özelliklerinden biri, modellenecek sistemin geometrisinden bağımsız olmasıdır. Yani, her çeşit geometrideki sistem bu yöntem ile kolaylıkla modellenebilmektedir. Kaya zeminin modellenmesi için sonlu eleman yöntemi kullanıldığı için, analizde kullanılacak zemin modelinin geometrisinin oluşturulmasında herhangi bir kısıtlama yoktur. Bu yöntem ile, kaya zemin bölgesinin doğal topografyasına uygun bir zemin modeli geliştirilebilir. Ancak, bu durumda çok fazla eleman kullanılması gerekebilir. Çok sayıda eleman kullanımı, işlem hacmini artıracığından genellikle bu şekilde bir model hazırlanması tercih edilmez. Bunun yerine, prizmatik bir model kullanılabilir (Şekil 2.15).



Şekil 2.15. Kaya zemin bölgesinin idealleştirilmiş şekli (Fok ve Chopra, 1985).

Bu zemin modeli, baraj-zemin birleşim yüzeyine dik vadi yamaçlarını kesen yarı dairesel düzlemler şeklinde oluşturulur (Şekil 2.16). Bu düzlemler, tabandan baraj kretine kadar devam eder.





Şekil 2.16. Kaya zemin bölgesinde zemin modelinin yarı dairesel düzlemlerle oluşumu (Fok ve Chopra, 1985).

#### 2.4.1.3.2. Kaya Zemin Modelinin Boyutu

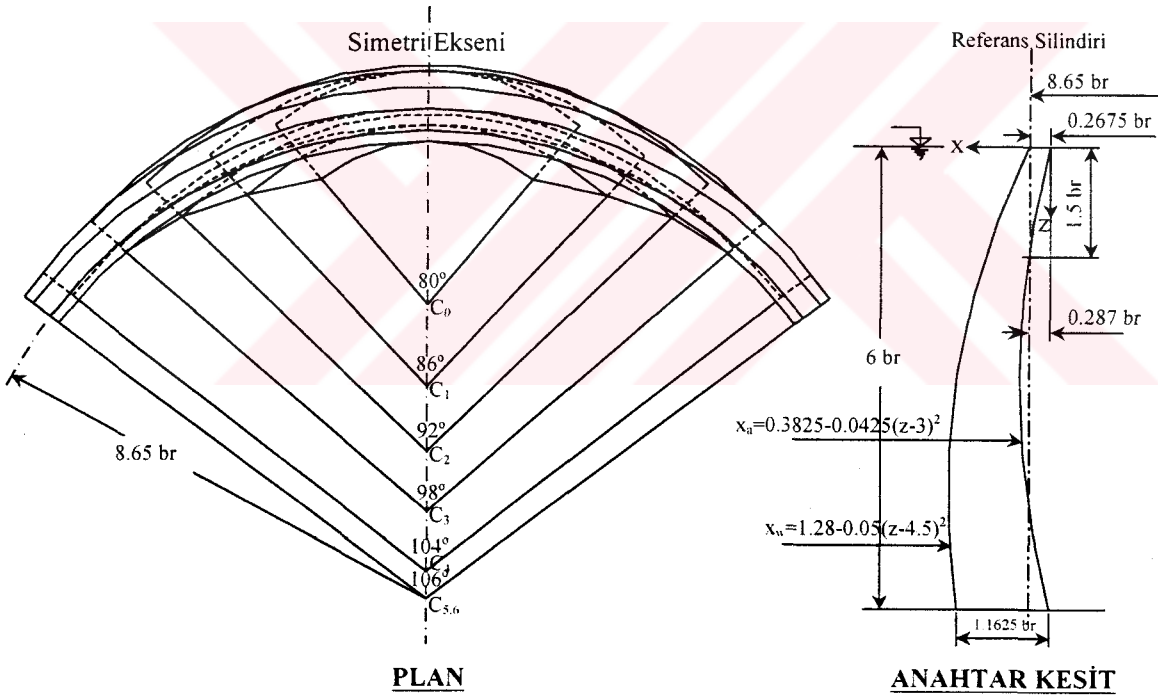
Kemer barajların deprem davranışı üzerinde kaya zeminin esneklik etkisini hesaplara katabilmek için, analiz edilecek baraj-su-zemin sisteminde yeterli bir zemin hacmi göz önünde bulundurulmalıdır. Zemin boyutunun büyük seçilmesi, sonlu eleman ve düğüm noktası sayısını, dolayısıyla çözülecek denklem sayısını artıracığından işlem hacminin artmasına neden olur. Bu nedenle zemin modelinin boyutu, barajda oluşacak yerdeğiştirme ve gerilmelerin zemin boyutunun artırılmasıyla çok az değiştiği değer olarak belirlenmelidir. Bu değeri belirlemede, dinamik analiz için barajın doğal frekansları ve titreşim mod şekilleri; statik analiz için ise gerilme ve yerdeğiştirmeler önemli rol oynar.

Fok ve Chopra (1985), kaya zemin elastisite modülünün ( $E_f$ ) baraj beton elastisite modülüne ( $E_c$ ) oranını dikkate alarak Morrow Point kemer barajı üzerinde parametrik bir çalışma ile baraj için uygun kaya zemin boyutunu belirlemek için  $E_f/E_c$  oranlarını, 1, 1/2 ve 1/4 alarak barajın doğal frekanslarını ve mod şekillerini elde etmiştir. Elde edilen frekans ve mod şekillerine göre uygun zemin boyutunu, dikkate alınan oranlar için sırasıyla  $H$ ,  $1.5H$  ve  $2H$  olarak elde etmiştir. Fok ve Chopra (1985), Morrow Point barajı için

buldukları bu zemin boyutlarının diğer kemer barajlar için de kullanılabilceğini belirtmektedirler.

### 2.4.2. Tip-5 Kemer Baraj-Su-Zemin Sistemi, Sönüm ve Yer Hareketi

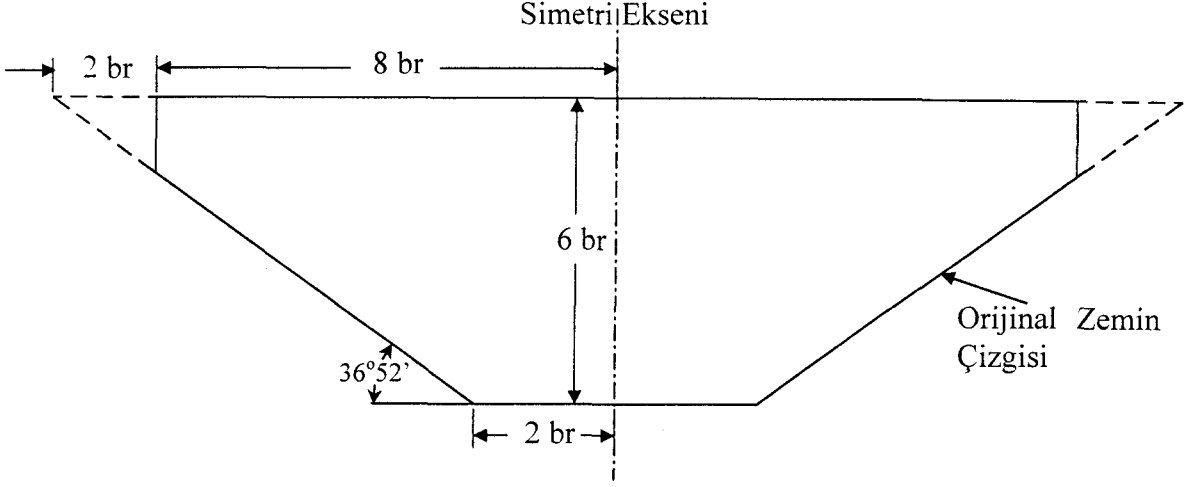
Kemer barajların malzeme bakımından lineer ve lineer olmayan dinamik davranışına su etkisinin Lagrange yaklaşımı ile incelenmesi amacıyla, 1968 yılında Londra'da düzenlenen "Kemer Barajlar" sempozyumunda (Arch Dams, 1968) önerilen beş tip kemer barajdan Tip-5 kemer barajı seçilmiştir. Önerilen diğer baraj tiplerinde olduğu gibi, Tip-5 kemer baraj boyutları da birim olarak verilmiştir. Tip-5 kemer barajı, simetrik ve çift eğriliklidir. Barajın plandaki görünüşü ve anahtar kesiti Şekil 2.17'de görülmektedir.



| Seviye       | C <sub>0</sub> | C <sub>1</sub> | C <sub>2</sub> | C <sub>3</sub> | C <sub>4</sub> | C <sub>5</sub> | C <sub>6</sub> |
|--------------|----------------|----------------|----------------|----------------|----------------|----------------|----------------|
| Yarıçap (br) | 3.67           | 5.29           | 6.64           | 7.72           | 8.54           | 8.80           | 8.50           |
| Merkez Açısı | 80°            | 86°            | 92°            | 98°            | 104°           | 106°           | 106°           |

Şekil 2.17. Tip-5 kemer barajının kesit özellikleri (Arch Dams, 1968).

Barajın yerleştirildiği vadinin trapez kesitli olduğu kabul edilmiş olup, en kesiti Şekil 2.18'de verilmiştir.



Şekil 2.18. Tip-5 kemer barajının yerleştirildiği vadinin en kesiti (Arch Dams, 1968).

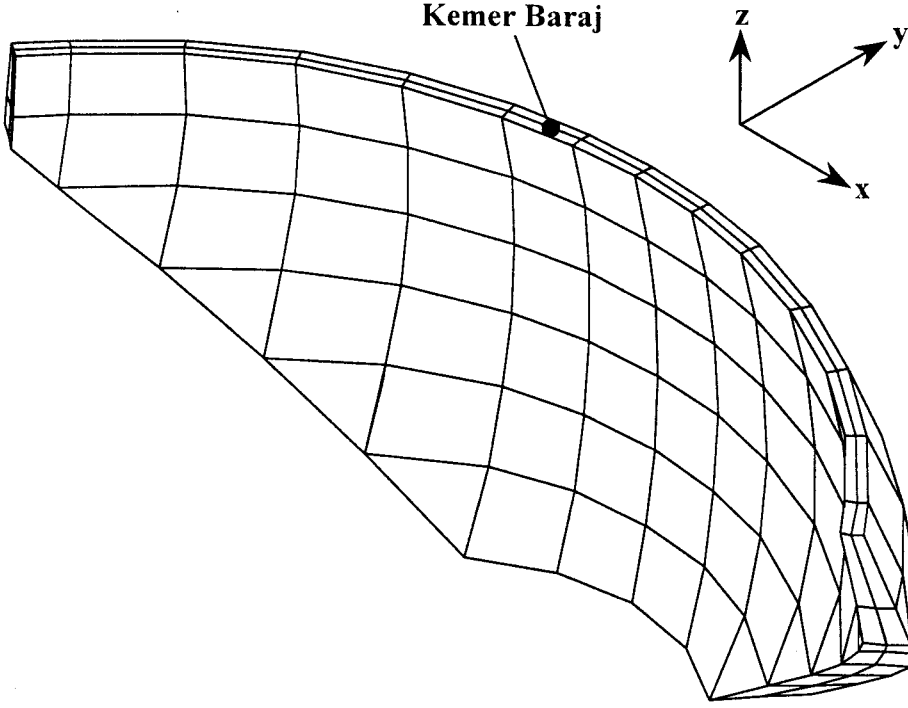
Analizlerde elde edilen sonuçların gerçek durumu yansıtması açısından baraj yüksekliği 120 m alınmış ve diğer boyutlar buna göre düzenlenmiştir.

Bu tezde, sadece baraj betonunun malzeme bakımından lineer ve lineer olmama durumu incelenmektedir. Yekpare bir yapı olarak modellenen kemer barajda büzülme derzlerinin açılması, betonda çatlak oluşumu gibi lineer olmama durumları dikkate alınmamıştır. Lineer analizler için lineer elastik izotropik malzeme modeli, lineer olmayan analizler için ise elasto-plastik malzeme modeli kullanılmıştır.

#### 2.4.2.1. Barajın Sonlu Eleman Modeli

Tip-5 kemer barajının sonlu eleman modeli, Şekil 2.19'da verilmiştir. Bu model, 128 adet 8-düğüm noktalı katı elemandan oluşmaktadır. Modelde toplam 231 adet düğüm noktası bulunmaktadır.

Rijit kaya zemin kabulü yapılan bu modelde, toplam 693 adet serbestlik derecesi mevcuttur. Sınır şartlarından dolayı modelde, 171 adet tutulu serbestlik derecesi mevcuttur. Böylece, sistemde geriye 522 adet aktif serbestlik derecesi kalmaktadır.

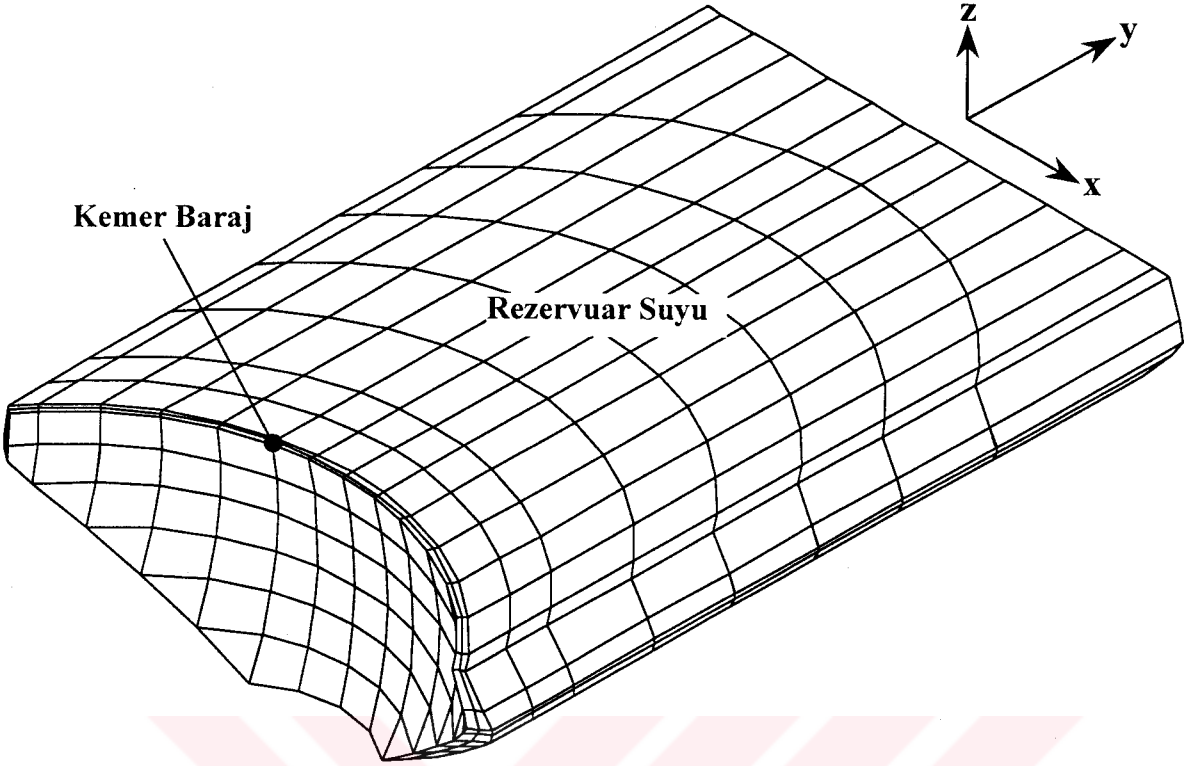


Şekil 2.19. Tip-5 kemer barajının sonlu eleman modeli

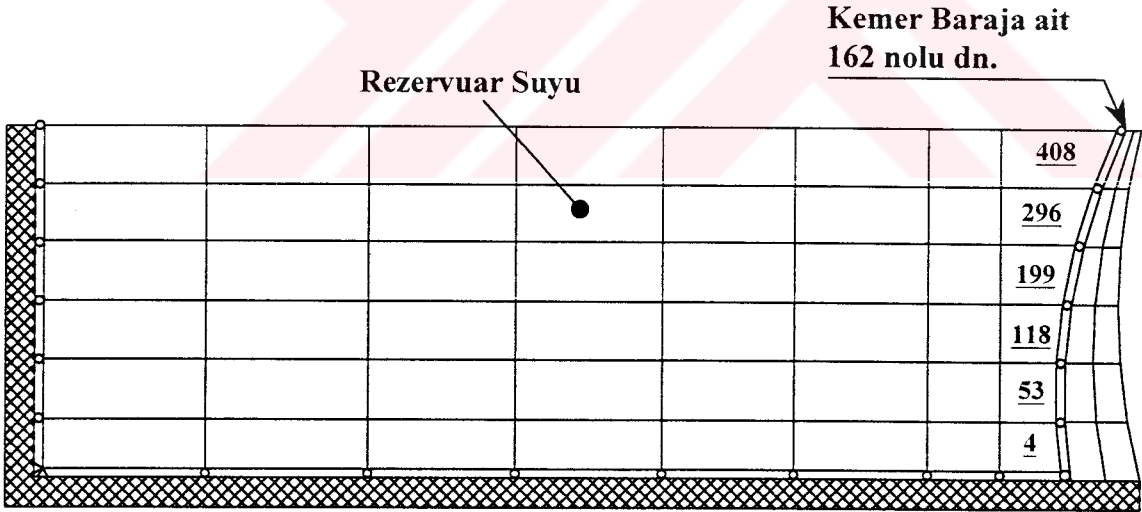
#### 2.4.2.2. Baraj-Su Etkileşiminin Sonlu Eleman Modeli

Tip-5 kemer baraj-su etkileşim sisteminin sonlu eleman ağı Şekil 2.20'de görülmektedir. Bu sonlu eleman ağının barajın simetri eksenini boyunca y-z düzleminde görünüşü iki boyutlu olarak Şekil 2.21'de verilmiştir. Rezervuar su derinliği 120 m ve uzunluğu derinliğinin üç katıdır. Kemer baraj 128 adet 8-düğüm noktalı katı eleman ile, rezervuar suyu ise 512 adet 8-düğüm noktalı sıvı eleman ile temsil edilmiştir. Bu sıvı elemanların 112 tanesi yüzey elemanıdır. Su ile temas halindeki yüzeylerde sınır şartının sağlanması amacıyla toplam 122 adet çubuk eleman kullanılmıştır. Çubuk elemanların uzunluğu 0.001 m ve elastisite modülü  $2 \times 10^{16}$  N/m<sup>2</sup> olarak alınmıştır.

Tüm sistemde toplam 969 adet düğüm noktası vardır. Bu, toplam 2907 adet serbestlik derecesine karşılık gelmektedir. Kemer baraj-su sisteminin sınır şartlarından dolayı 560 adet tutulu serbestlik derecesi vardır. Böylece sistemde 2347 adet aktif serbestlik derecesi mevcuttur.



Şekil 2.20. Tip-5 kemer baraj-su etkileşim sisteminin sonlu eleman modeli



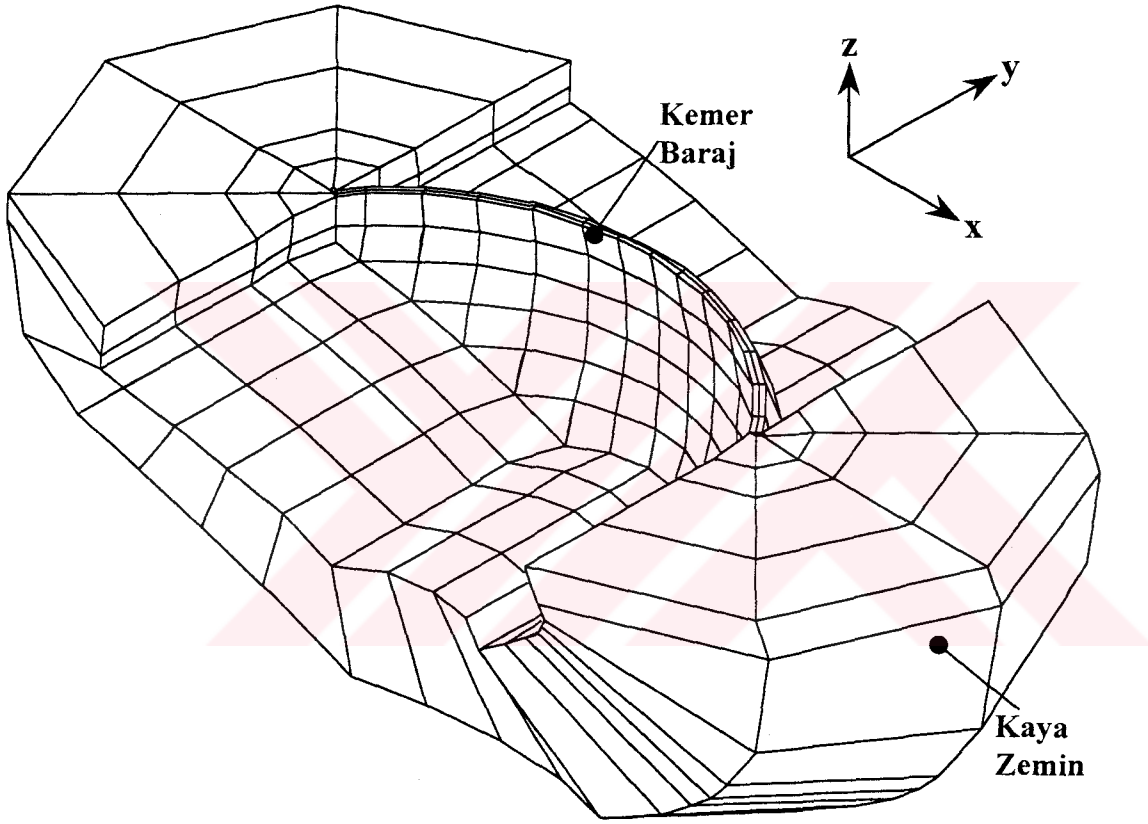
Şekil 2.21. Tip-5 kemer baraj-su etkileşim sistemine ait sonlu eleman modelinin iki boyutlu görünüşü

### 2.4.2.3. Baraj-Zemin Etkileşiminin Sonlu Eleman Modeli

Kaya zeminin esneklik etkisinin kemer baraj davranışına etkisi, Şekil 2.22’de verilen kemer baraj-zemin etkileşim modelinde dikkate alınmıştır. Modelde kaya zemin boyutu,

Fok ve Chopra (1985) tarafından yapılan çalışma göz önüne alınarak baraj orta kesitinden itibaren baraj yüksekliğinin 1.25 katı, yani 150 m, olarak belirlenmiştir. Kemer baraj 128 adet, kaya zemin ise 288 adet 8-düğüm noktalı katı eleman ile temsil edilmiştir.

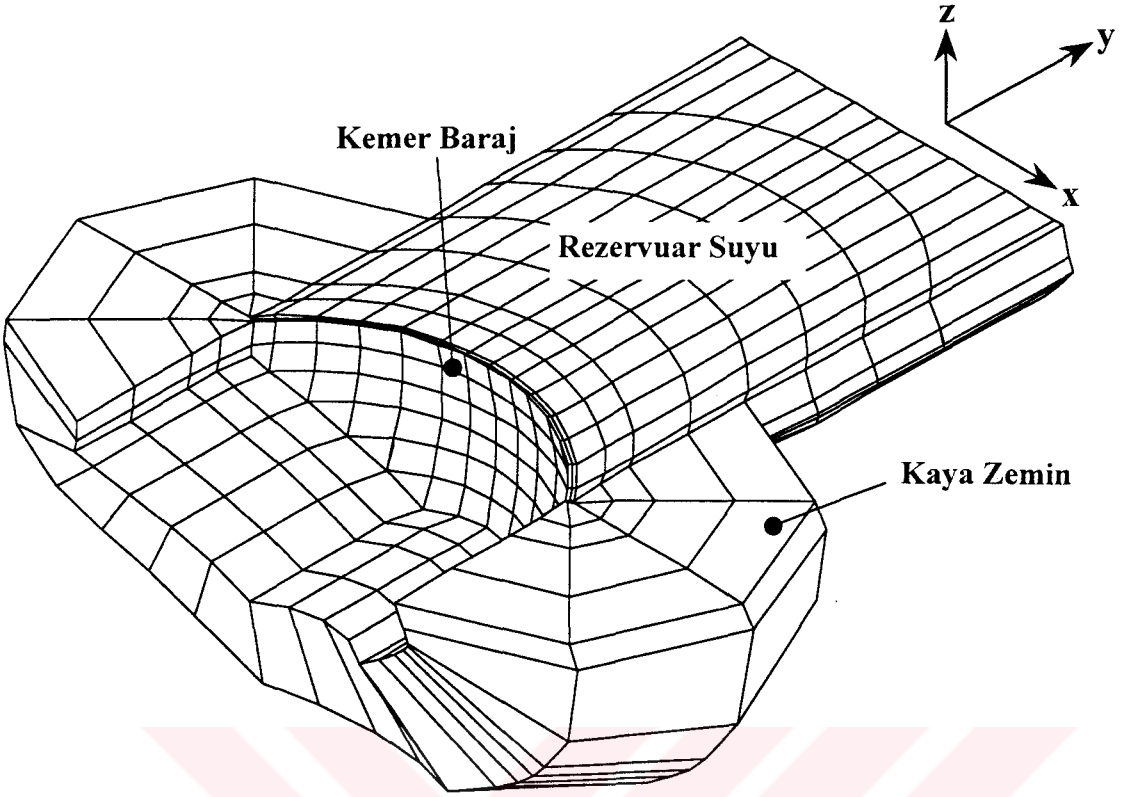
Tüm sistemde toplam 668 adet düğüm noktası vardır. Bu, toplam 2004 adet serbestlik derecesine karşılık gelmektedir. Kemer baraj-zemin sisteminin sınır şartlarından dolayı 285 adet tutulu serbestlik derecesi vardır. Böylece, sistemde geriye 1719 adet aktif serbestlik derecesi kalmaktadır.



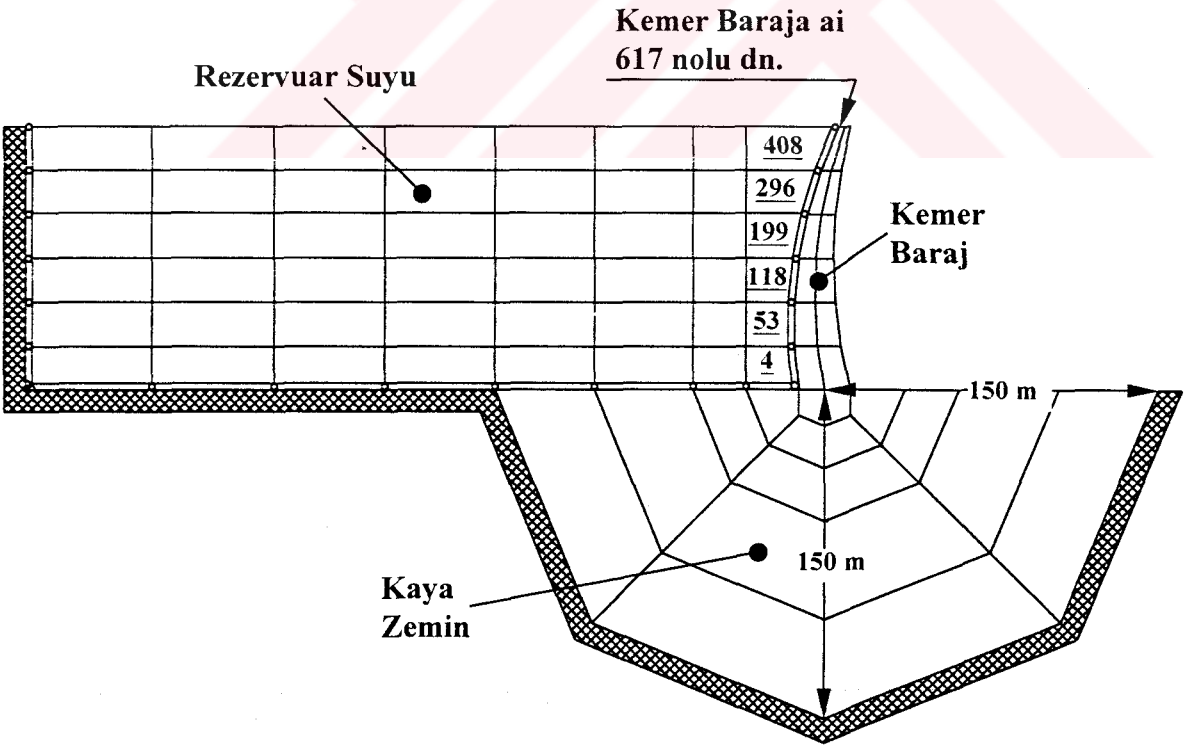
Şekil 2.22. Tip-5 kemer baraj-zemin etkileşim sisteminin sonlu eleman modeli

#### 2.4.2.4. Baraj-Su-Zemin Etkileşiminin Sonlu Eleman Modeli

Tip-5 kemer barajı için hazırlanan baraj-su-zemin etkileşim sisteminin sonlu eleman ağı Şekil 2.23'te görülmektedir. Bu sonlu eleman ağının barajın simetri eksenine boyunca y-z düzleminde görünüşü iki boyutlu olarak Şekil 2.24'te verilmiştir.



Şekil 2.23. Tip-5 kemer baraj-su-zemin etkileşim sisteminin sonlu eleman modeli



Şekil 2.24. Tip-5 kemer baraj-su-zemin etkileşim sistemine ait sonlu eleman modelinin iki boyutlu görünüşü

Rezervuar su derinliği 120 m ve uzunluğu derinliğinin üç katıdır. Kemer baraj 128 adet 8-düğüm noktalı katı eleman ile; rezervuar suyu 512 adet 8-düğüm noktalı sıvı eleman ile; kaya zemin ise 288 adet 8-düğüm noktalı katı eleman ile temsil edilmiştir. Bu sıvı elemanların 112 tanesi yüzey elemanıdır. Su ile temas halindeki yüzeylerde sınır şartının sağlanması amacıyla toplam 166 adet çubuk eleman kullanılmıştır. Çubuk elemanların uzunluğu 0.001 m ve elastisite modülü  $2 \times 10^{16}$  N/m<sup>2</sup> olarak alınmıştır.

Tüm sistemde toplam 1374 adet düğüm noktası vardır. Bu, toplam 4122 adet serbestlik derecesine karşılık gelmektedir. Kemer baraj-su-zemin sisteminin sınır şartlarından dolayı 518 adet tutulu serbestlik derecesi vardır. Böylece sistemde 3604 adet aktif serbestlik derecesi olmaktadır.

#### 2.4.2.5. Sönüm

Sönüm, kemer baraj davranışında önemli bir etkiye sahiptir. Enerji kaybı, beton kemer, kaya zemin ve rezervuar suyunu içine alan birçok kaynaktan doğmaktadır. Beton kemer yapıda enerjinin yutulması, büzülme derzlerindeki ve beton malzemesi içindeki içsel sürtünmeden dolayı olmaktadır. Kaya zeminde enerji kaybı, barajdan uzaklaşan elastik dalgaların yayılışı ve kaya zemin hacmi içindeki çatlak ve yarıklardaki kaymalardan kaynaklanmaktadır. Diğer bir sönüm kaynağı, rezervuar taban malzemelerine hidrodinamik basınç dalgalarının çarparak kırılmasından ve memba doğrultusunda basınç dalgalarının yayılışından dolayı oluşan enerji kaybı ile ilgilidir (Chopra, 1995).

Direkt integrasyon yönteminde orijinal hareket denklemleri, hiçbir değişikliğe uğratılmadan adım-adım integrasyon ile çözülür. Bu yöntem, sönüm matrisinin açık bir formda tanımlanmasını gerektirmektedir. Bunun için direkt integrasyon yönteminin kullanıldığı analizlerde genellikle Rayleigh sönümü kullanılmaktadır. Rayleigh sönümü,

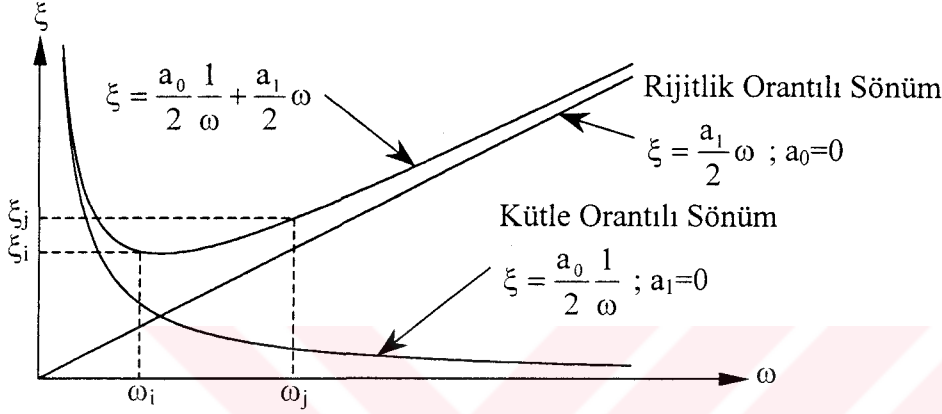
$$C = a_0 M + a_1 K \quad (2.46)$$

şeklinde ifade edilmektedir (Chopra, 1995; Clough ve Penzien, 1993; Bathe, 1996). Burada  $a_0$  ve  $a_1$  katsayıları iki titreşim frekansı ile ilgili iki sönüm oranından elde edilmektedir. Bu şekilde belirlenen sönüm matrisi, diyagonal bir matristir ve hesaplarda kolaylık sağlamaktadır. Rayleigh sönümünde, modal sönüm oranı ile doğal frekans arasında,



$$\xi_n = \frac{a_0}{2} \frac{1}{\omega_n} + \frac{a_1}{2} \omega_n \quad (2.47)$$

şeklinde bir bağıntı mevcuttur. Bu bağıntıdaki birinci terim, kütle orantılı sönüme sahip bir sistem için modal sönüm oranını, ikinci terim ise, rijitlik orantılı sönüme sahip bir sistem için modal sönüm oranını göstermektedir (Şekil 2.25).



Şekil 2.25. Rayleigh sönümü için sönüm oranı ile frekans arasındaki ilişki

Rayleigh sönüm katsayıları  $a_0$  ve  $a_1$ ,  $i$  inci ve  $j$  inci modlardaki  $\xi_i$  ve  $\xi_j$  sönüm oranlarından belirlenebilir. Bu iki mod için (2.47) denklemini matris formunda yazılırsa,

$$\frac{1}{2} \begin{bmatrix} 1/\omega_i & \omega_i \\ 1/\omega_j & \omega_j \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} a_0 \\ a_1 \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} \xi_i \\ \xi_j \end{Bmatrix} \quad (2.48)$$

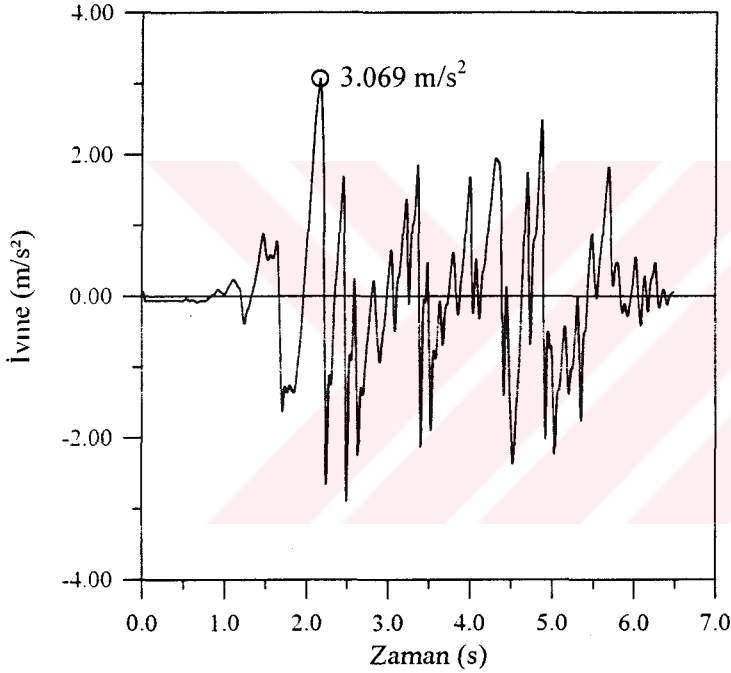
elde edilir. Burada  $\omega_i$  ve  $\omega_j$   $i$  inci ve  $j$  inci moda ait doğal frekanslardır. Bu denklem sistemi çözülerek,  $a_0$  ve  $a_1$  katsayıları belirlenebilir. Eğer her iki mod için aynı sönüm oranı ( $\xi$ ) olduğu kabul edilirse bu durumda  $a_0$  ve  $a_1$  katsayıları,

$$a_0 = \xi \frac{2\omega_i\omega_j}{\omega_i + \omega_j} \text{ ve } a_1 = \xi \frac{2}{\omega_i + \omega_j} \quad (2.49)$$

şeklinde elde edilir. Bu işlemin uygulanmasında,  $i$  inci ve  $j$  inci moddaki bilinen sönüm oranları yapının davranışına önemli ölçüde katkıda bulunan tüm modlardaki sönüm oranları içinden mantıklı değerler seçilmelidir.

### 2.4.2.6. Yer Hareketi

Lineer ve lineer olmayan dinamik analizde, yer hareketi olarak kayalık zeminlerde oluşması muhtemel deprem türüne örnek olması açısından, 18 Mayıs 1940 tarihinde meydana gelen Imperial Valley depreminin El-Centro bileşeni seçilmiştir (URL-1, 2003). Deprem ivmesi baraja memba-mansap doğrultusunda uygulanmaktadır. 53 saniye süren Imperial Valley depreminde en büyük ivmeler ilk 5 saniye içerisinde oluşmuştur. Bu nedenle, analizlerde depremin sadece ilk 6.5 saniyelik kısmı kullanılmıştır. Söz konusu depremin ivme-zaman ilişkisi Şekil 2.26'da verilmiştir.



Şekil 2.26. 18 Mayıs 1940 Imperial Valley depreminin El-Centro bileşeni

### 2.4.3. Tip-5 Kemer Barajının Lineer Dinamik Analizi

Bu tezde, Tip-5 kemer barajının lineer dinamik davranışı Lagrange yaklaşımı kullanılarak incelenmiştir. Kemer barajın su ile olan etkileşimi, zeminin rijit ve esnek olması durumları için ayrı ayrı göz önüne alınmıştır. Ayrıca, kaya zemin özelliklerinin baraj davranışına etkisi, kaya zemin elastisite modülünün ( $E_f$ ) baraj betonu elastisite modülüne ( $E_c$ ) oranının çeşitli değerleri alınarak incelenmiştir.  $E_f/E_c$  için Fok ve Chopra'nın (1985, 1986-a, 1986-b, 1986-c) aldığı 2.00, 1.00, 0.50 ve 0.25 değerleri kullanılmıştır. Rezervuar

su seviyesindeki değişimin rijit ve esnek kaya zemin üzerindeki kemer baraj davranışına etkisi de, rezervuar su seviyesinin 120 m (tam dolu rezervuar), 100 m, 80 m, 60 m ve 40 m olması durumları dikkate alınarak incelenmiştir.

Lineer dinamik analizde, baraj betonu, kaya zemin ve rezervuar suyunun malzeme özellikleri Tablo 2.5’de verilmiştir. Burada beton için kullanılan malzeme özellikleri, Fok ve Chopra (1985, 1986-a, 1986-b, 1986-c) tarafından kullanılan malzeme özellikleridir. Lagrange sıvı eleman için, (1×1×1) integrasyon derecesi kullanılmış ve üç eksen etrafındaki dönme kısıtlama parametreleri ( $C_{22}$ ,  $C_{33}$ ,  $C_{44}$ ), hacimsel elastisite modülünün 1000 katı alınmıştır. Rezervuar suyunun, tüm analizlerde dönmeye karşı kısıtlı ve viskoz olmayan bir davranış sergilediğı kabul edilmiştir.

Tablo 2.5. Lineer dinamik analiz için malzeme özellikleri

| Baraj Betonu                                | Kaya Zemin                                  | Rezervuar Suyu                           |
|---|---|--|
| $E_c = 2.7579 \times 10^{10} \text{ N/m}^2$ | $E_f = 5.5158 \times 10^{10} \text{ N/m}^2$ | $C_{11} = 207 \times 10^7 \text{ N/m}^2$ |
| $\nu_c = 0.20$                              | $\nu_{fn} = 0.20$                           | $\rho_f = 1000 \text{ kg/m}^3$           |
| $\rho_c = 2483 \text{ kg/m}^3$              | $\rho_{fn} = 2643 \text{ kg/m}^3$           |  |

E; Elastisite modülü,  $\nu$ ; Poisson oranı,  $C_{11}$ ; Hacimsel Elastisite modülü,  $\rho$ ; Kütle Yoğunluğu

Bu tezde, analiz edilen kemer baraj, kemer baraj-su, kemer baraj-zemin ve kemer baraj-su-zemin sistemleri için Rayleigh sönüm sabitleri, %5 sönüm oranı için 2 ile 15 Hz frekansları kullanılarak hesaplanmıştır. Analizler, adım-adım integrasyon tekniğı ile Wilson- $\theta$  yöntemi kullanılarak gerçekleştirilmektedir. İntegrasyon için zaman adımı 0.001 saniye seçilmiştir. Analizlerde dinamik etki olarak, Şekil 2.26’da verilen Imperial Valley depreminin El-Centro bileşeni dikkate alınmıştır. Baraj davranışı, tüm durumlar için bu depremin memba-mansap doğrultusunda etkidiğı kabul edilerek belirlenmiştir.

Analizler sonucu, baraj-su ara yüzeyinde hidrodinamik basınçlar, baraj kretinde yerdeğıştirmeler, baraj memba yüzeyindeki yerdeğıştirmelerin baraj yüksekliğı boyunca değişimi ve barajın memba ve mansap yüzeyinde maksimum çekme ve minimum basınç gerilmeleri elde edilmiştir.

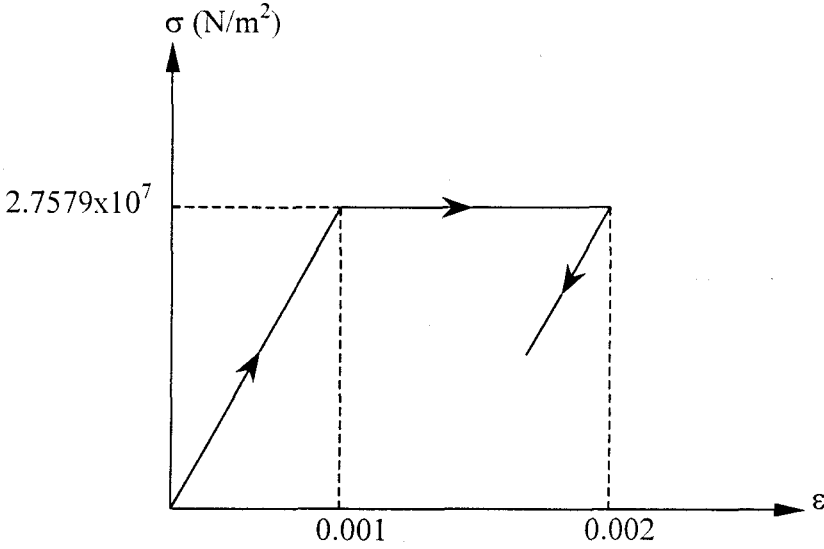
#### 2.4.4. Tip-5 Kemer Barajının Lineer Olmayan Dinamik Analizi

Tip-5 kemer barajının lineer olmayan dinamik davranışı, Lagrange yaklaşımı kullanılarak incelenmiştir. Kemer barajın su ile olan etkileşimi, zeminin rijit ve esnek olması durumları için ayrı ayrı incelenmiştir. Lineer analizde olduğu gibi, kaya zemin özelliklerinin baraj davranışına etkisi, kaya zemin elastisite modülünün baraj betonu elastisite modülüne oranı sonsuz, 2.00, 1.00, 0.50 ve 0.25 alınarak incelenmiştir. Burada sonsuz değeri, rijit zemine karşılık gelmektedir. Rezervuar su seviyesindeki değişimin rijit ve esnek kaya zemin üzerindeki kemer baraj davranışına etkisi de yine, rezervuar su seviyesinin 120 m, 100 m, 80 m, 60 m ve 40 m olması durumları dikkate alınarak incelenmiştir.

Sıvı elemanın hacimsel elastisite modülü ( $C_{11}$ ) ve kütle yoğunluğu ( $\rho_f$ ), sırasıyla  $207 \times 10^7 \text{ N/m}^2$  ve  $1000 \text{ kg/m}^3$  alınmıştır. Lagrange sıvı eleman için,  $(1 \times 1 \times 1)$  integrasyon derecesi kullanılmış ve üç eksen etrafındaki dönme kısıtlama parametreleri ( $C_{22}$ ,  $C_{33}$ ,  $C_{44}$ ), hacimsel elastisite modülünün 1000 katı alınmıştır. Rezervuar suyunun, analizlerde lineer elastik, dönmeye karşı kısıtlı ve viskoz olmayan bir davranış sergilediği kabul edilmiştir. Kaya zemin ve rezervuarın lineer, baraj betonunun lineer olmayan bir davranış gösterdiği kabul edilmiştir. Kaya zemin için kullanılan malzeme özellikleri, daha önce Tablo 2.5'de verilmişti. Baraj betonunun lineer olmayan davranışı Eğri Tanımlama ve Drucker-Prager modeli ile temsil edilip analizler gerçekleştirilmiştir. Eğri tanımlama modelinde esas olarak malzemenin gerilme-şekildeğiştirme eğrisi tanımlanmaktadır. Malzemenin yükleme ve boşalma durumundaki hacimsel elastisite ve kayma modülü, hacimsel şekildeğiştirmeye bağlı olarak tespit edilmektedir. Eğri tanımlama modelinde baraj betonu için kabul edilen gerilme-şekildeğiştirme ilişkisi Şekil 2.27'de verilmiştir.

İşlemlerin Runge-Kutta yöntemi ile gerçekleştirildiği Drucker-Prager modelinde, baraj betonunun elastik tam plastik malzeme özeliği sergilediği kabul edilmektedir. Baraj betonun elastisite modülü ve Poisson oranı, sırasıyla  $2.7579 \times 10^{10} \text{ N/m}^2$  ve 0.20 olarak alınmıştır. Akma teorisine dayanan bu modelde, beton için gerekli kırılma fonksiyonu içsel sürtünme açısı ( $\phi$ ) ve kohezyon ( $c$ ) değerlerine bağlıdır. Doran vd. (1998), beton için gerekli kohezyon değeri için aşağıdaki bağıntıyı önermektedir:

$$c = 0.23 \ln(E d_{\text{maks}}^2) - 0.60 \quad (2.52)$$



Şekil 2.27. Eğri Tanımlama modelinde baraj betonu için kabul edilen gerilme-şekildeğiştirme ilişkisi

Burada, E betonun elastisite modülünü (MPa),  $d_{maks}$  ise betondaki maksimum agrega boyutunu (mm) göstermektedir. EM 1110-2-2000 (1995)'de maksimum agrega boyutu, baraj betonu için 6 inches ( $6 \times 25.4 = 152.4$  mm) olarak alınması tavsiye edilmektedir. Ancak, EM 1110-2-2201 (1994) hem iyi bir karışım elde etmek hem de çimento ihtiyacını düşürmek için maksimum agrega boyutunu 3 inches ( $3 \times 25.4 = 76.2$  mm) olarak alınmasını tavsiye etmektedir. Buna göre,  $2.7579 \times 10^4$  MPa beton elastisite modülü ve 76.2 mm maksimum agrega boyutu için kohezyon değeri  $c = 3.75$  MPa bulunmuştur. Doran vd. (1998), betonun içsel sürtünme açısını  $\phi = 35^\circ$  olarak tavsiye etmektedir.

Analizlerde dinamik etki olarak, yine Imperial Valley depreminin El-Centro bileşeni dikkate alınmıştır. Baraj davranışı, bu depremin memba-mansap doğrultusunda etkidiği kabul edilerek belirlenmiştir. Analizler, adım-adım integrasyon tekniği ile Wilson- $\theta$  yöntemi kullanılarak gerçekleştirilmiştir. İntegrasyon için zaman adımı 0.001 saniye seçilmiştir. Burada analiz edilen kemer baraj, kemer baraj-su, kemer baraj-zemin ve kemer baraj-su-zemin sistemleri için, Rayleigh sönümü kabul edilmiştir. Rayleigh sönüm katsayıları, %5 sönüm için 2 ile 15 Hz frekansları kullanılarak hesaplanmıştır.

Analizler sonucu, baraj-su ara yüzeyinde hidrodinamik basınçlar, baraj kretinde yerdeğiştirmeler, baraj memba yüzeyindeki yerdeğiştirmelerin baraj yüksekliği boyunca değişimi ve barajın memba ve mansap yüzeyinde maksimum çekme ve minimum basınç gerilmeleri elde edilmiştir.

### 3. BULGULAR ve İRDELEMELER

#### 3.1. Giriş

Tezin bu bölümünde, Tip-5 kemer barajının malzeme bakımından lineer ve lineer olmayan dinamik analizi sonucu elde edilen bulgular verilmiştir. Analizlerde sadece baraj betonunun lineer olmayan davranış sergilediği kabul edilmiştir. Betonun bu davranışı, Eğri Tanımlama ve Drucker-Prager modeli ile temsil edilmiş ve her iki model için baraj davranışı ayrı ayrı incelenmiştir. Analizlerde, esas olarak kemer baraj-su etkileşimi incelenmiştir. Rezervuarın boş ve dolu olması durumu için analizler yapılarak kemer barajın lineer ve lineer olmayan dinamik davranışına rezervuardaki suyun etkisi belirlenmeye çalışılmıştır. Baraj-su etkileşimi, kaya zeminin rijit ve esnek olması durumu için ayrı ayrı ele alınmıştır. Analizler sonucu, baraj kretindeki yerdeğişmeler, baraj-su ara yüzeyindeki hidrodinamik basınçlar ve memba ve mansap yüzeyi eş gerilme eğrileri ayrıntılı olarak verilmiş ve elde edilen sonuçlar irdelenmiştir. Dinamik hareket sırasında maksimum ve minimum gerilmeler, genellikle farklı zamanlarda farklı noktalarda meydana gelmektedir. Maksimum eş gerilme eğrilerini belirlemek, maksimum gerilmelere ulaşıldığı veya betonun çekme mukavemetini aşan gerilme yığılım bölgelerinin tanımlanması için uygun bir yoldur. Bu gerilme eğrilerine dayanarak, çekme gerilmelerinin şiddetliliği ve yayılışı belirlenebilmektedir. Minimum eş gerilme eğrileri ise, barajın deprem sırasında karşılaşacağı en büyük basınç gerilmelerini göstermektedir.

Kemer barajlar, su basıncını ve diğer yüklerin büyük bir kısmını vadi yamaçlarına kemer etkisi ile aktararak dayanım sağlarlar. Bu nedenle, kemer baraj ile kaya zemin arasında sürekli bir etkileşim söz konusudur. Ayrıca, baraj ve su arasındaki etkileşim, deprem yer hareketi sırasında kemer barajların dinamik davranışını etkileyen en önemli faktörlerden biridir. Depremler sırasında baraj üzerinde oluşacak hidrodinamik etkinin büyüklüğü, rezervuar su seviyesindeki değişime bağlıdır. Mevsimlere göre değişim gösteren rezervuardaki su seviyesi, depremlerde baraj davranışını önemli ölçüde etkileyebilmektedir. Bu nedenle, barajın lineer ve lineer olmayan dinamik davranışına kaya zeminin esneklik etkisi ile rezervuar su seviyesindeki değişimin etkisi de incelenmiştir.

### 3.2. Lineer Analiz Sonuçlarının Değerlendirilmesi

Tip-5 kemer barajının lineer dinamik davranışına rezervuardaki suyun etkisi, Lagrange yaklaşımı kullanılarak incelenmektedir. Kemer barajın su ile olan etkileşimi, zeminin rijit ve esnek olması durumları için ayrı ayrı göz önüne alınmıştır. Analizler sonucu, baraj kretinde yerdeğiştirmeler, baraj-su ara yüzeyinde hidrodinamik basınçlar ve barajın memba ve mansap yüzeyinde maksimum çekme ve minimum basınç gerilmeleri elde edilmiştir. Hidrodinamik basınçlar, Şekil 2.21 ve 2.24'te iki boyutlu olarak verilen baraj-su etkileşim modeli üzerinde belirtilen 408, 296, 199, 118, 53 ve 4 nolu sıvı elemanların Gauss noktalarında elde edilmiştir. Bu basınçlar, 8-düğüm noktalı sıvı eleman için indirgenmiş integrasyon derecesi ( $1 \times 1 \times 1$ ) olduğundan, her elemanda bir adet bulunan Gauss noktasındaki değerlerdir. Bu Gauss noktası, sıvı elemanın geometrik merkezinde bulunmaktadır. Barajın lineer dinamik davranışına rezervuardaki suyun etkisi, rezervuarın boş ve dolu olması durumları ayrı ayrı dikkate alınarak incelenmiş ve elde edilen sonuçlar aşağıda verilmiştir. Ayrıca, burada verilen tüm gerilmeler elemanın geometrik merkezindeki değerlerdir.

#### 3.2.1. Rijit Zemin Durumunda Baraj-Su Etkileşimi

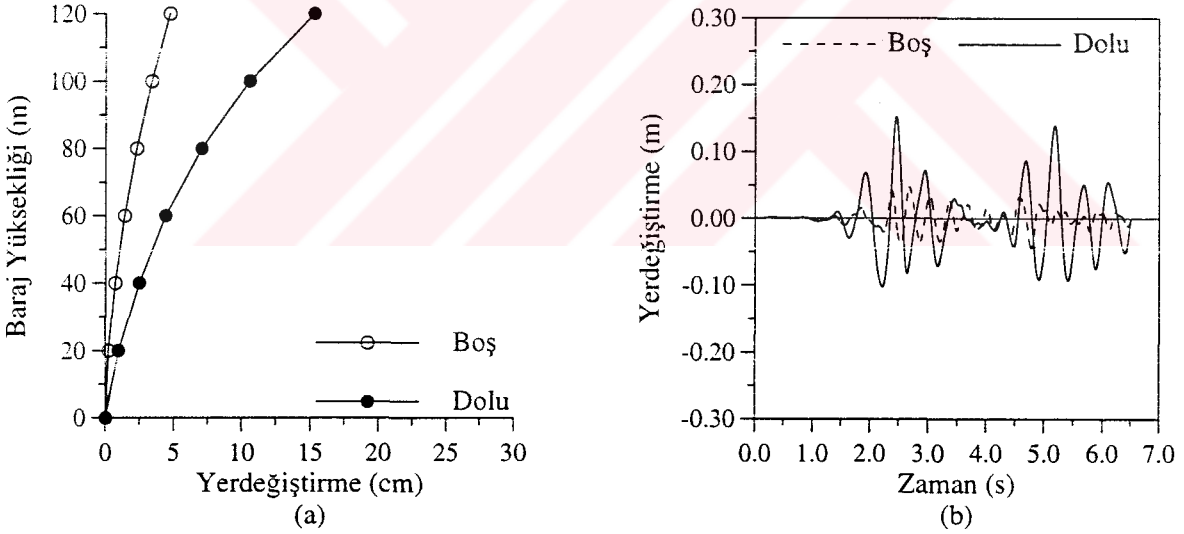
Bu kısımda, Tip-5 kemer barajının lineer dinamik davranışına rezervuardaki suyun etkisi, zeminin rijit olması durumu için rezervuarın boş ve dolu olması hali dikkate alınarak incelenmektedir. Bunun için, Şekil 2.19 ve 2.20'de verilen sonlu eleman modelleri kullanılmıştır. Analizler sonucu elde edilen yerdeğiştirme, hidrodinamik basınç ve gerilmeler aşağıda ayrıntılı olarak verilmektedir.

##### 3.2.1.1. Yerdeğiştirmeler

Rijit zemin durumunda kemer barajının lineer dinamik analizi sonucu, barajda oluşan yerdeğiştirmelere rezervuardaki suyun etkisi, barajın memba yüzeyinde elde edilen yerdeğiştirmelerin mutlak değerce maksimum değerlerinin baraj yüksekliği boyunca değişimi ve baraj kret yerdeğiştirmelerinin dinamik etki süresince değişimi belirlenerek incelenmiştir.

Kemer baraj anahtar kesitinin memba yüzeyinde, memba-mansap doğrultusunda elde edilen yerdeğiştirmelerin mutlak değerce maksimum değerlerinin baraj yüksekliği boyunca değişimi Şekil 3.1(a)'da verilmiştir. Bu yerdeğiştirmeler, yüksekliğe bağlı olarak artmakta ve baraj kretinde en büyük değeri almaktadır. Baraj kretinin mutlak değerce maksimum yerdeğiştirmesi, rezervuarın boş olması durumu için 4.70 cm, dolu olması durumu için 15.29 cm olarak elde edilmiştir. Buna göre; lineer dinamik analizde zeminin rijit olması durumu için baraj-su etkileşimi, baraj kret yerdeğiştirmesini rezervuarın boş olması haline göre %225 artırmıştır.

Baraj davranışının değeriendirilmesinde kret yerdeğiştirmeleri çok önemli olduğundan, bu yerdeğiştirmelerin dinamik etki süresince değişimi de incelenmiştir. Şekil 3.1(b)'de rijit zemin durumu için rezervuarın boş ve dolu olması durumunda baraj kretinde (Şekil 2.21'de 162 nolu dn.) memba-mansap doğrultusunda elde edilen yerdeğiştirmelerin dinamik etki süresince değişimi verilmiştir. Bu şekiller incelendiğinde, kemer baraj davranışına rezervuardaki suyun etkisinin büyük olduğü görülmektedir.



Şekil 3.1. Lineer dinamik analizde; zeminin rijit, rezervuarın boş ve dolu olması durumu için baraj memba yüzeyinde elde edilen yerdeğiştirmeler ile baraj kretinde elde edilen yerdeğiştirmelerin dinamik etki süresince değişimi

### 3.2.1.2. Hidrodinamik Basınçlar

Şekil 2.20'de sonlu eleman modeli verilen kemer baraja ait baraj-su etkileşim sisteminin lineer dinamik analiz sonucu, baraj-su ara yüzeyinde elde edilen hidrodinamik basınçlar Şekil 3.2'de verilmiştir. Bu şekillerden görüldüğü gibi, hidrodinamik basınçlar su

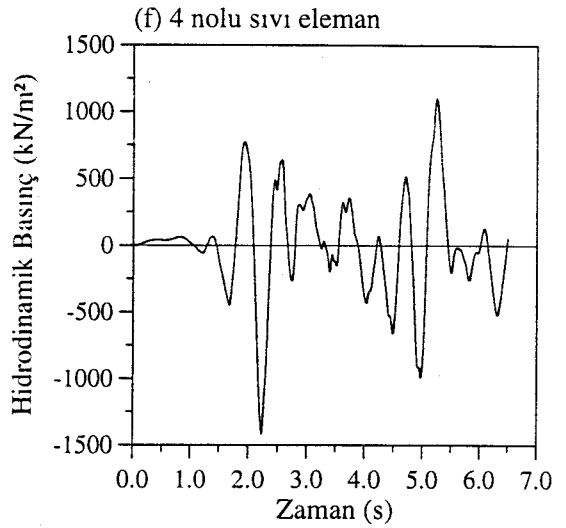
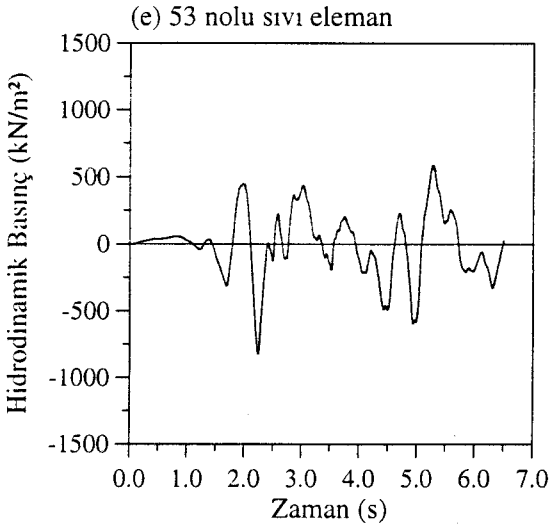
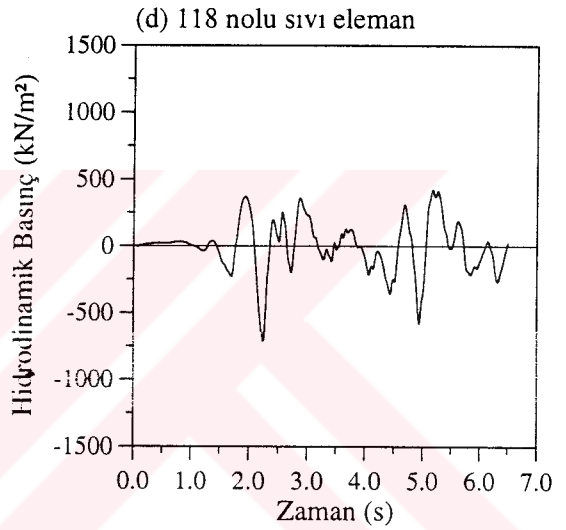
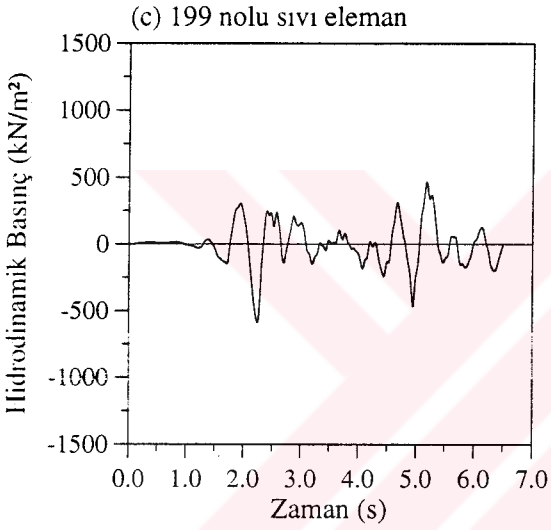
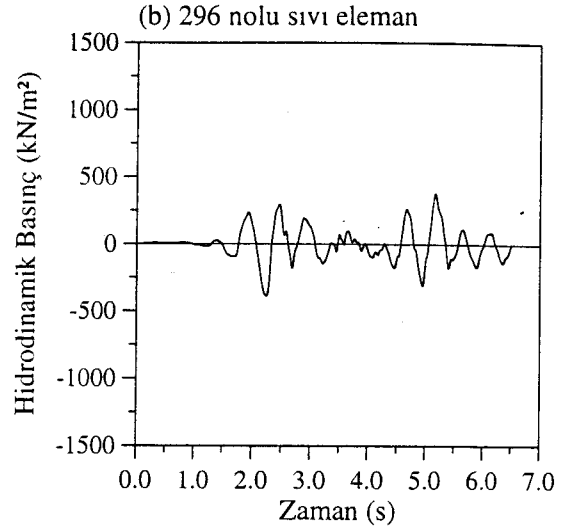
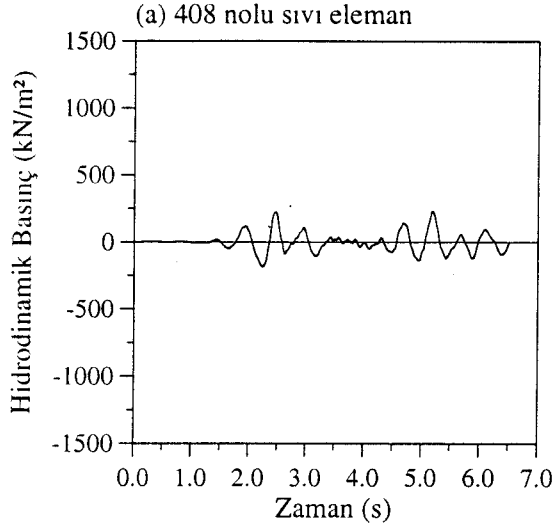


yüzeyinden rezervuar tabanına doğru artmaktadır. Öyle ki, mutlak değerce maksimum hidrodinamik basınç sıvı yüzey elemanında (408 nolu eleman)  $233 \text{ kN/m}^2$  iken, rezervuar tabanındaki sıvı elemanda (4 nolu eleman)  $1420 \text{ kN/m}^2$  değerine ulaşmaktadır.

### 3.2.1.3. Gerilmeler

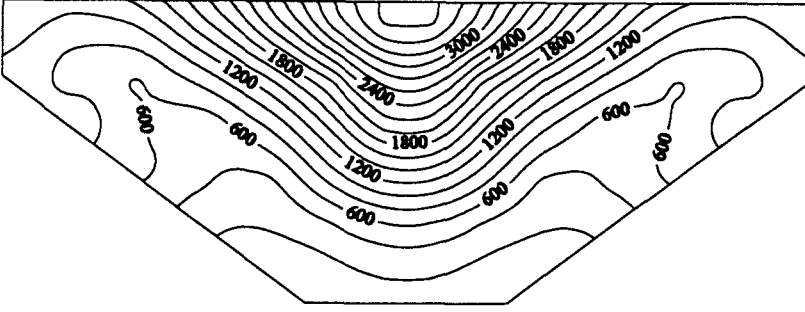
Rijit zemin durumunda kemer barajın lineer dinamik analizi sonucu kemer barajda x-x, y-y ve z-z doğrultusunda oluşan gerilmelere rezervuardaki suyun etkisi, barajın memba ve mansap yüzeyi için maksimum ve minimum gerilmeler elde edilerek incelenmiştir. Şekil 3.3 ile 3.8 arasında bu gerilmeler, rezervuarın boş ve dolu olması durumu için ayrı ayrı verilmiştir. Bu gerilmeler, eş gerilme eğrileri şeklinde gösterilmiştir. Maksimum eş gerilme eğrileri, deprem hareketi sırasında barajda elde edilen en büyük çekme (pozitif) gerilmelerini göstermektedir. Benzer şekilde, minimum eş gerilme eğrileri de barajdaki en büyük basınç (negatif) gerilmelerini göstermektedir.

*Baraj memba yüzeyi maksimum çekme gerilmeleri;* x-x yönünde rezervuarın boş olması durumu için  $3595 \text{ kN/m}^2$ , dolu olması durumu için  $10618 \text{ kN/m}^2$ ; y-y yönünde rezervuarın boş olması durumu için  $758 \text{ kN/m}^2$ , dolu olması durumu için  $3564 \text{ kN/m}^2$ ; z-z yönünde rezervuarın boş olması durumu için  $1345 \text{ kN/m}^2$ , dolu olması durumu için  $5291 \text{ kN/m}^2$  şeklinde elde edilmiştir. Baraj mansap yüzeyi maksimum çekme gerilmeleri ise; x-x yönünde rezervuarın boş olması durumu için  $2657 \text{ kN/m}^2$ , dolu olması durumu için  $6331 \text{ kN/m}^2$ ; y-y yönünde rezervuarın boş olması durumu için  $1292 \text{ kN/m}^2$ , dolu olması durumu için  $3387 \text{ kN/m}^2$ ; z-z yönünde rezervuarın boş olması durumu için  $751 \text{ kN/m}^2$ , dolu olması durumu için  $1971 \text{ kN/m}^2$  şeklinde elde edilmiştir. *Baraj memba yüzeyi minimum basınç gerilmeleri;* x-x yönünde rezervuarın boş olması durumu için  $3764 \text{ kN/m}^2$ , dolu olması durumu için  $7431 \text{ kN/m}^2$ ; y-y yönünde rezervuarın boş olması durumu için  $726 \text{ kN/m}^2$ , dolu olması durumu için  $3132 \text{ kN/m}^2$ ; z-z yönünde rezervuarın boş olması durumu için  $1856 \text{ kN/m}^2$ , dolu olması durumu için  $5078 \text{ kN/m}^2$  şeklinde elde edilmiştir. Baraj mansap yüzeyi minimum basınç gerilmeleri ise; x-x yönünde rezervuarın boş olması durumu için  $2806 \text{ kN/m}^2$ , dolu olması durumu için  $5194 \text{ kN/m}^2$ ; y-y yönünde rezervuarın boş olması durumu için  $1138 \text{ kN/m}^2$ , dolu olması durumu için  $3261 \text{ kN/m}^2$ ; z-z yönünde rezervuarın boş olması durumu için  $870 \text{ kN/m}^2$ , dolu olması durumu için  $2573 \text{ kN/m}^2$  şeklinde elde edilmiştir.

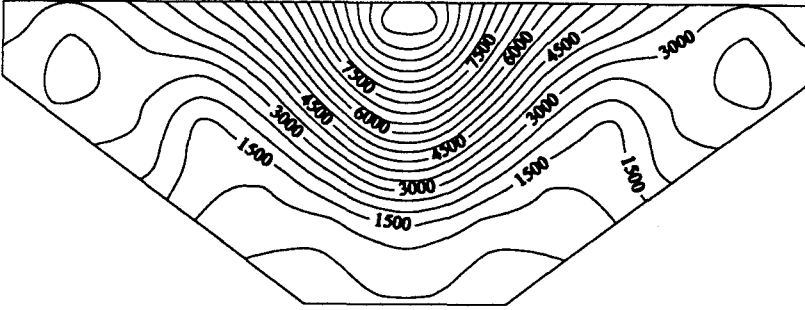


Şekil 3.2. Lineer dinamik analizde; zeminin rijit olması durumu için 408, 296, 199, 118, 53 ve 4 nolu sıvı elemanlarda elde edilen hidrodinamik basınçların dinamik etki süresince değişimi

Rezervuar Boş

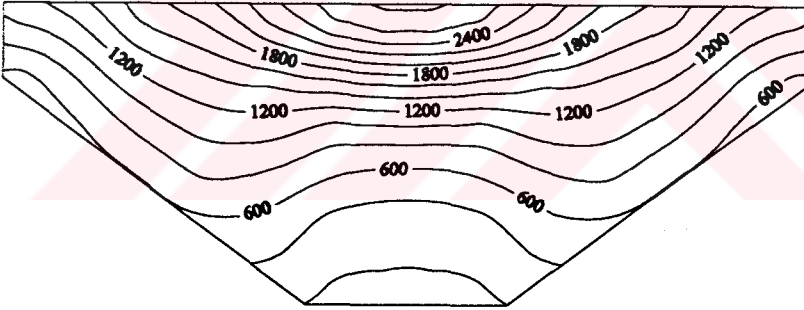


Rezervuar Dolu

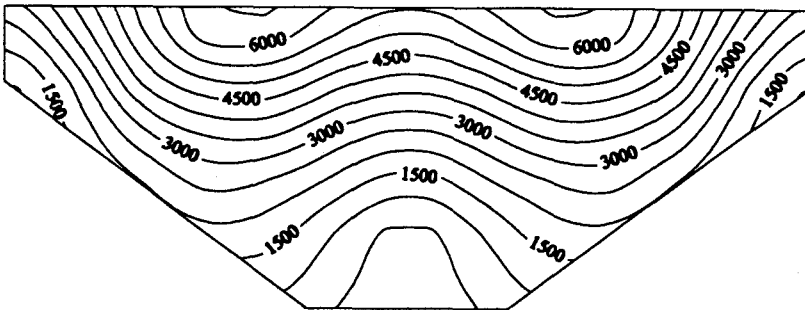


MEMBA YÜZEYİ, Gerilme Birimi:  $\text{kN/m}^2$

Rezervuar Boş



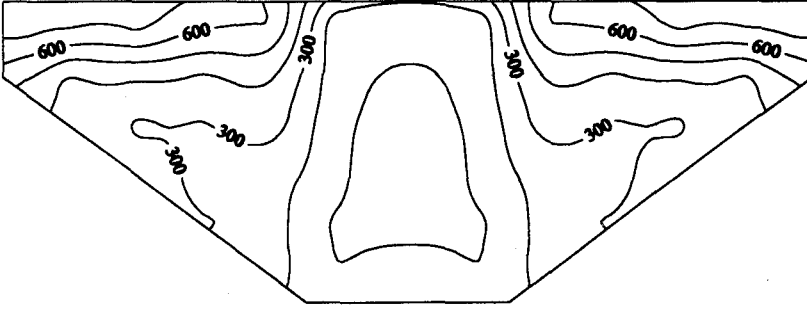
Rezervuar Dolu



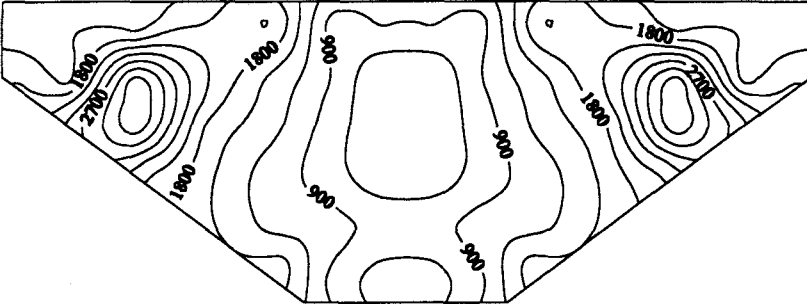
MANSAP YÜZEYİ, Gerilme Birimi:  $\text{kN/m}^2$

Şekil 3.3. Lineer dinamik analizde; zeminin rijit, rezervuarın boş ve dolu olması durumu için barajın memba ve mansap yüzeyinde x-x doğrultusunda elde edilen maksimum çekme eş gerilme eğrileri

Rezervuar Boş

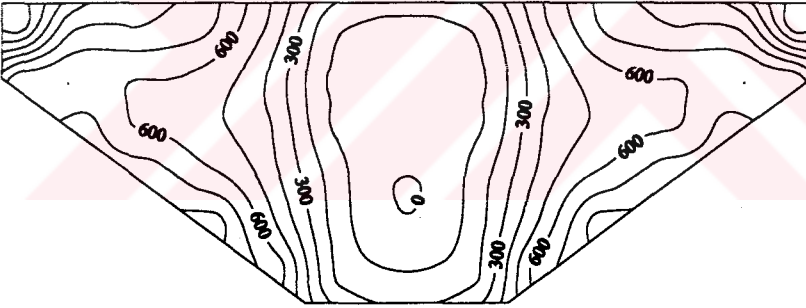


Rezervuar Dolu

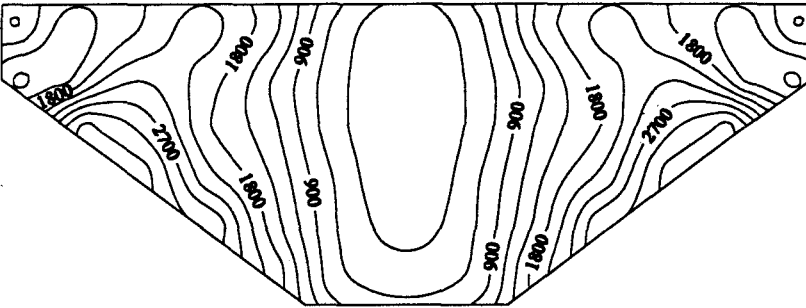


**MEMBA YÜZEYİ**, Gerilme Birimi:  $\text{kN/m}^2$

Rezervuar Boş



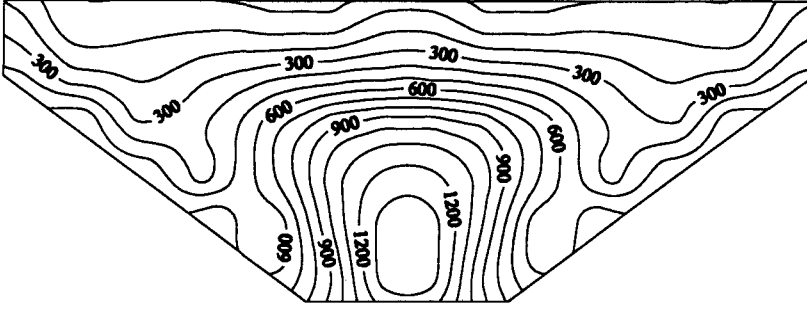
Rezervuar Dolu



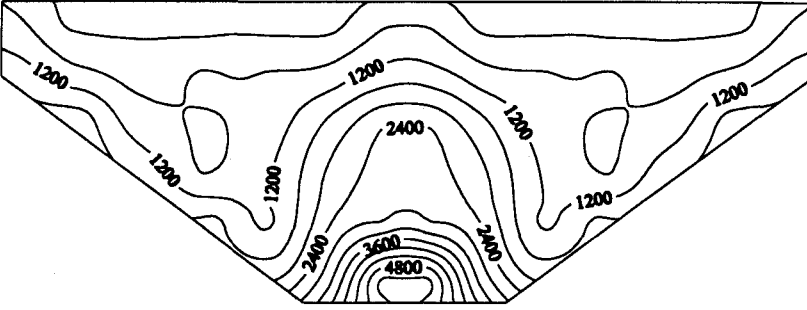
**MANSAP YÜZEYİ**, Gerilme Birimi:  $\text{kN/m}^2$

Şekil 3.4. Lineer dinamik analizde; zeminin rijit, rezervuarın boş ve dolu olması durumu için barajın memba ve mansap yüzeyinde y-y doğrultusunda elde edilen maksimum çekme eş gerilme eğrileri

Rezervuar Boş

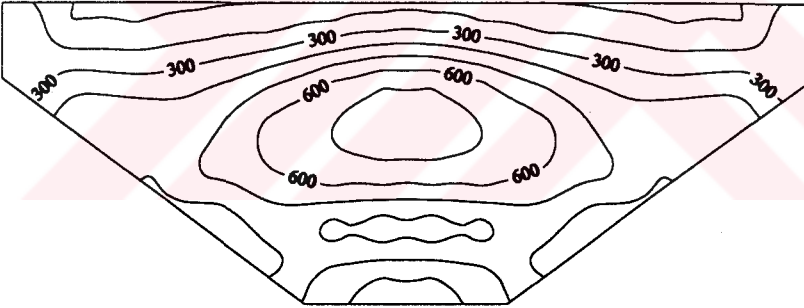


Rezervuar Dolu

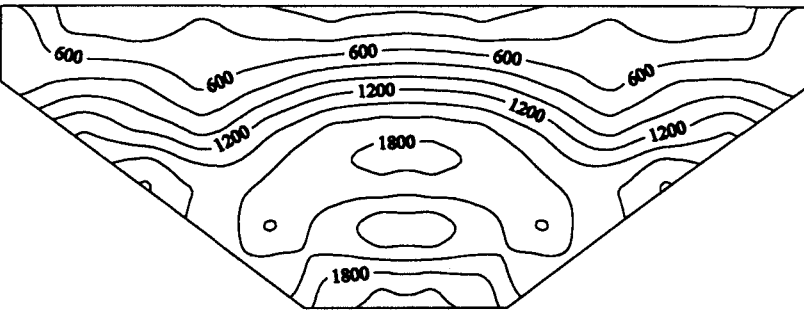


**MEMBA YÜZEYİ**, Gerilme Birimi:  $\text{kN/m}^2$

Rezervuar Boş



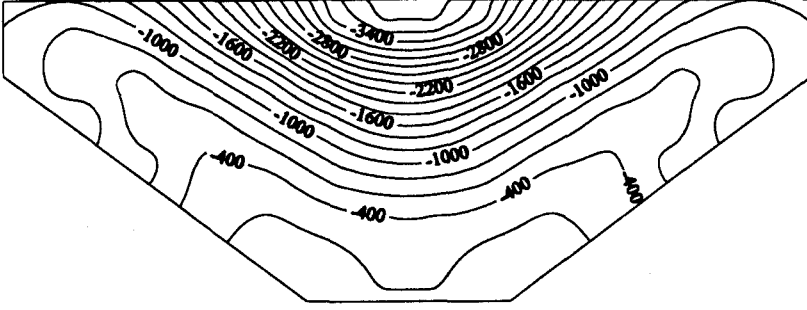
Rezervuar Dolu



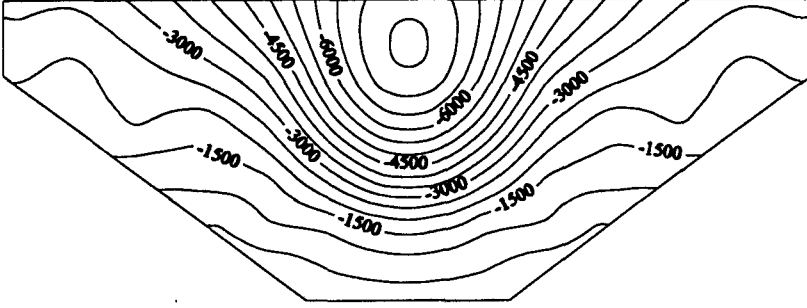
**MANSAP YÜZEYİ**, Gerilme Birimi:  $\text{kN/m}^2$

Şekil 3.5. Lineer dinamik analizde; zeminin rijit, rezervuarın boş ve dolu olması durumu için barajın memba ve mansap yüzeyinde z-z doğrultusunda elde edilen maksimum çekme eş gerilme eğrileri

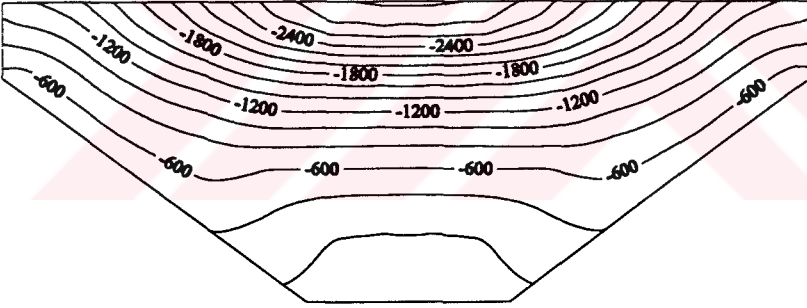
Rezervuar Boş



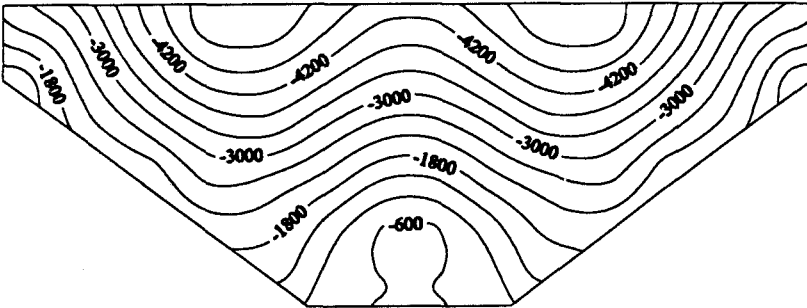
Rezervuar Dolu

MEMBA YÜZEYİ, Gerilme Birimi:  $\text{kN/m}^2$ 

Rezervuar Boş

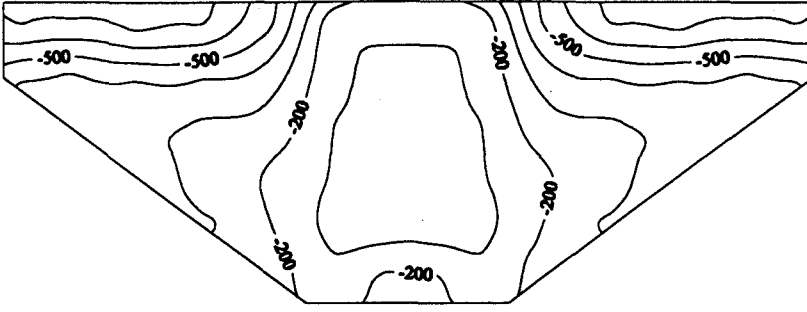


Rezervuar Dolu

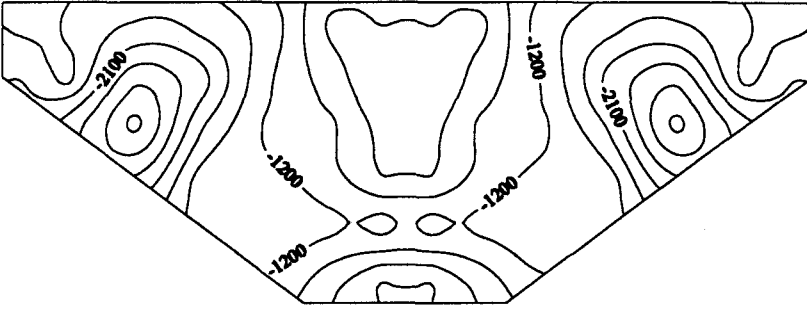
MANSAP YÜZEYİ, Gerilme Birimi:  $\text{kN/m}^2$ 

Şekil 3.6. Lineer dinamik analizde; zeminin rijit, rezervuarın boş ve dolu olması durumu için barajın memba ve mansap yüzeyinde x-x doğrultusunda elde edilen minimum basınç eş gerilme eğrileri

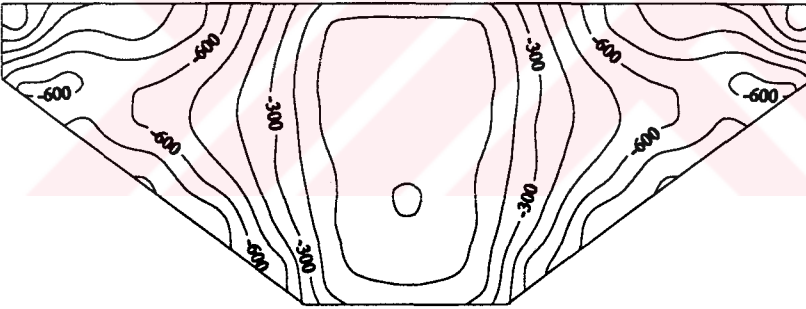
Rezervuar Boş



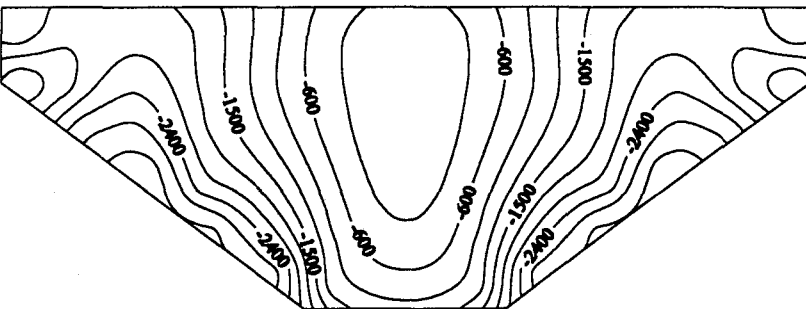
Rezervuar Dolu

MEMBA YÜZEYİ, Gerilme Birimi:  $\text{kN/m}^2$ 

Rezervuar Boş

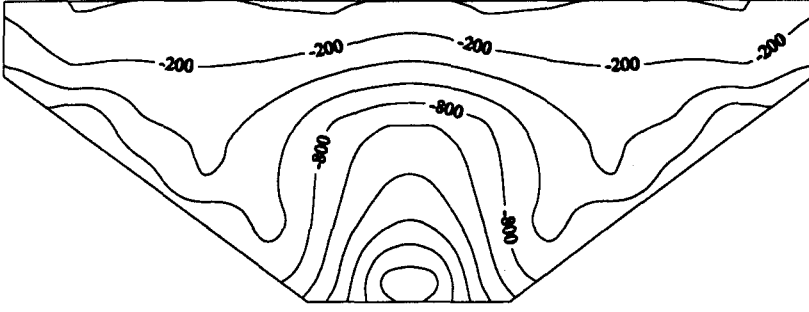


Rezervuar Dolu

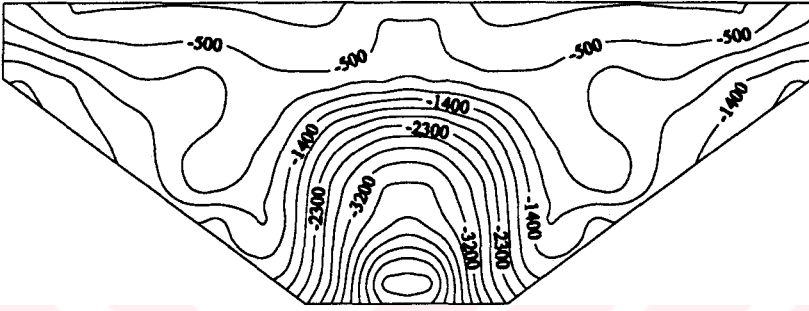
MANSAP YÜZEYİ, Gerilme Birimi:  $\text{kN/m}^2$ 

Şekil 3.7. Lineer dinamik analizde; zeminin rijit, rezervuarın boş ve dolu olması durumu için barajın memba ve mansap yüzeyinde y-y doğrultusunda elde edilen minimum basınç eş gerilme eğrileri

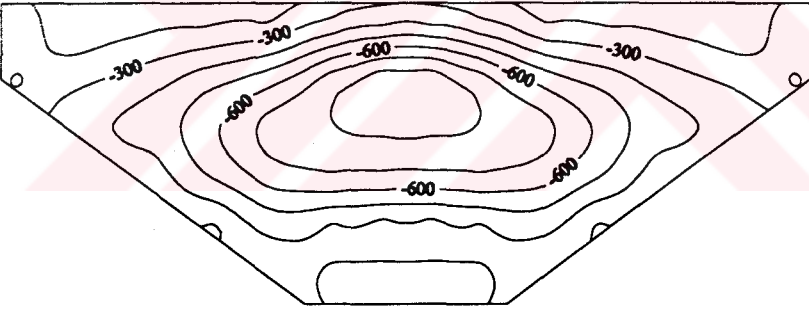
Rezervuar Boş



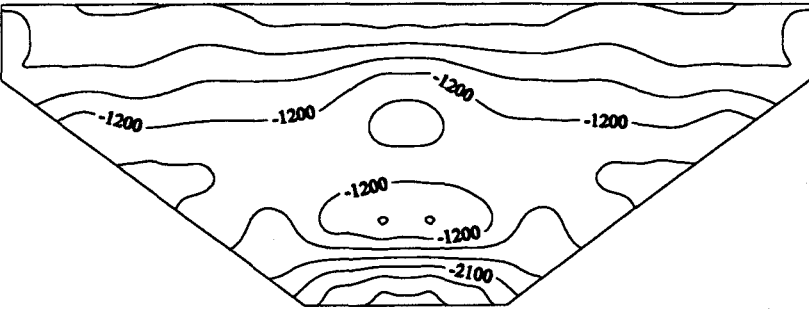
Rezervuar Dolu

MEMBA YÜZEYİ, Gerilme Birimi:  $\text{kN/m}^2$ 

Rezervuar Boş



Rezervuar Dolu

MANSAP YÜZEYİ, Gerilme Birimi:  $\text{kN/m}^2$ 

Şekil 3.8. Lineer dinamik analizde; zeminin rijit, rezervuarın boş ve dolu olması durumu için barajın memba ve mansap yüzeyinde z-z doğrultusunda elde edilen minimum basınç eş gerilme eğrileri



Bu eş gerilme eğrileri incelendiğinde, rijit zemin durumunda baraj-su etkileşiminin barajdaki gerilmeleri önemli derecede artırdığı anlaşılmaktadır. Hidrodinamik etkilerden dolayı, barajın memba ve mansap yüzeylerinin çoğu kısmı büyük çekme gerilmelerinin etkisinde kalmıştır. x-x yönündeki maksimum çekme gerilmeleri incelendiğinde, baraj davranışında kemer etkisini belirgin bir şekilde görmek mümkündür. Çünkü, barajda kemerleşme x-x yönündedir. Ayrıca, barajın hem memba hem de mansap yüzeyinde y-y ve z-z yönlerinde oluşan çekme gerilmelerine kıyasla x-x yönündeki çekme gerilmeleri çok daha büyük değerlere ulaşmıştır. Hidrodinamik etkilerden dolayı, barajda elde edilen minimum basınç gerilmelerinde de önemli artışlar görülmektedir. Ancak, bu değişimler genellikle betonun basınç mukavemetinin altındadır.

### 3.2.2. Esnek Zemin Durumunda Baraj-Su Etkileşimi

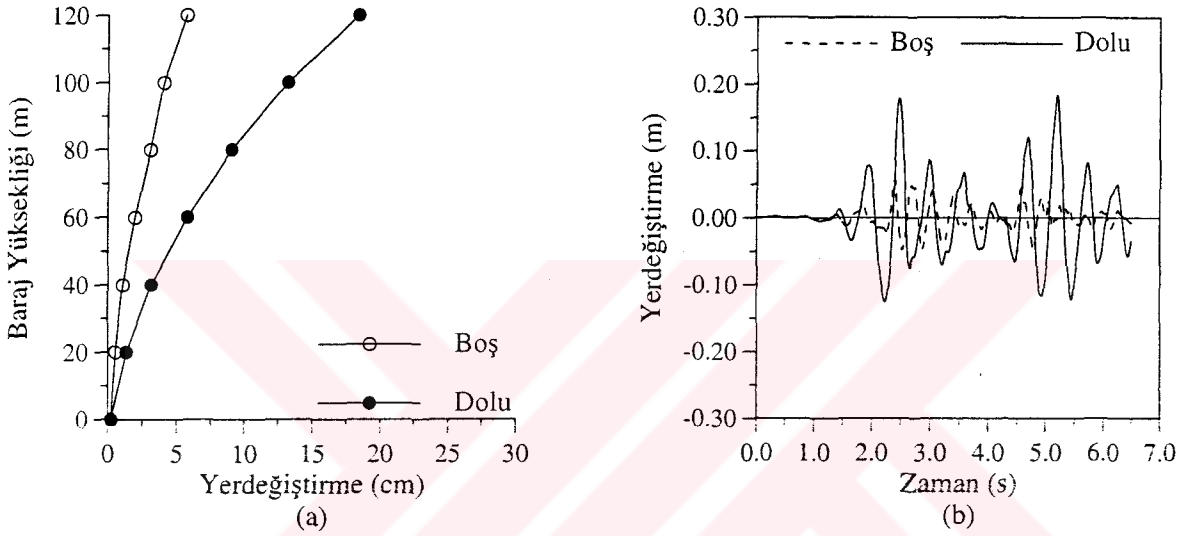
Bu kısımda, Tip-5 kemer barajının lineer dinamik davranışına rezervuardaki suyun etkisi, zeminin esnek olması durumu için rezervuarın boş ve dolu olması hali dikkate alınarak incelenmektedir. Bunun için, Şekil 2.22 ve 2.23'te verilen sonlu eleman modelleri kullanılmıştır. Analizler sonucu elde edilen yerdeğiştirme, hidrodinamik basınç ve gerilmeler aşağıda ayrıntılı olarak verilmektedir.

#### 3.2.2.1. Yerdeğiştirmeler

Esnek zemin durumunda kemer barajın lineer dinamik analizi sonucu, barajda oluşan yerdeğiştirmelere rezervuardaki suyun etkisi, barajın memba yüzeyinde elde edilen yerdeğiştirmelerin mutlak değerce maksimum değerlerinin baraj yüksekliği boyunca değişimi ve baraj kret yerdeğiştirmelerinin dinamik etki süresince değişimi belirlenerek incelenmiştir.

Kemer baraj anahtar kesitinin memba yüzeyinde, memba-mansap doğrultusunda elde edilen yerdeğiştirmelerin mutlak değerce maksimum değerlerinin baraj yüksekliği boyunca değişimi Şekil 3.9(a)'da verilmiştir. Baraj kretinin mutlak değerce maksimum yerdeğiştirmesi, rezervuarın boş olması durumu için 5.70 cm, dolu olması durumu için 18.39 cm olarak elde edilmiştir. Buna göre; lineer dinamik analizde zeminin esnek olması durumu için baraj-su etkileşimi, baraj kret yerdeğiştirmesini rezervuarın boş olması haline göre %223 artırmıştır.

Baraj davranışının değerlendirilmesinde, kret yerdeğiştirmeleri çok önemli olduğundan, bu yerdeğiştirmelerin dinamik etki süresince değişimi de incelenmiştir. Şekil 3.9(b)'de rezervuarın boş ve dolu olması durumunda esnek zemin için baraj kretinde (Şekil 2.24'te 617 nolu dn.) memba-mansap doğrultusunda elde edilen yerdeğiştirmelerin dinamik etki süresince değişimi verilmiştir. Bu Şekiller incelendiğinde, rijit zemin durumunda olduğu gibi kemer baraj davranışına rezervuardaki suyun etkisinin büyük olduğu görölmektedir.



Şekil 3.9. Lineer dinamik analizde; zeminin esnek, rezervuarın boş ve dolu olması durumu için baraj memba yüzeyinde elde edilen yerdeğiştirmeler ile baraj kretinde elde edilen yerdeğiştirmelerin dinamik etki süresince değişimi

### 3.2.2.2. Hidrodinamik Basınçlar

Şekil 2.23'te sonlu eleman modeli verilen kemer baraja ait baraj-su-zemin etkileşim sisteminin lineer dinamik analiz sonucu, baraj-su ara yüzeyinde elde edilen hidrodinamik basınçlar Şekil 3.10'da verilmiştir. Bu Şekillerden göröldüğü gibi, hidrodinamik basınçlarda su yüzeyinden rezervuar tabanına doğru farklılıklar gözlenmektedir. Öyle ki, mutlak değerce maksimum hidrodinamik basınç sıvı yüzey elemanında (408 nolu eleman)  $349 \text{ kN/m}^2$  iken, rezervuar tabanındaki sıvı elemanda (4 nolu eleman)  $1000 \text{ kN/m}^2$  değerine ulaşmaktadır. Sıvı yüzey elemanında elde edilen hidrodinamik basınç değerinde rijit zemin durumuna göre %50'lik bir artış söz konusu iken, tabandaki sıvı elemanda %42'lik bir azalma görölmüştür. Ayrıca, rijit zemin durumunda elde edilen hidrodinamik

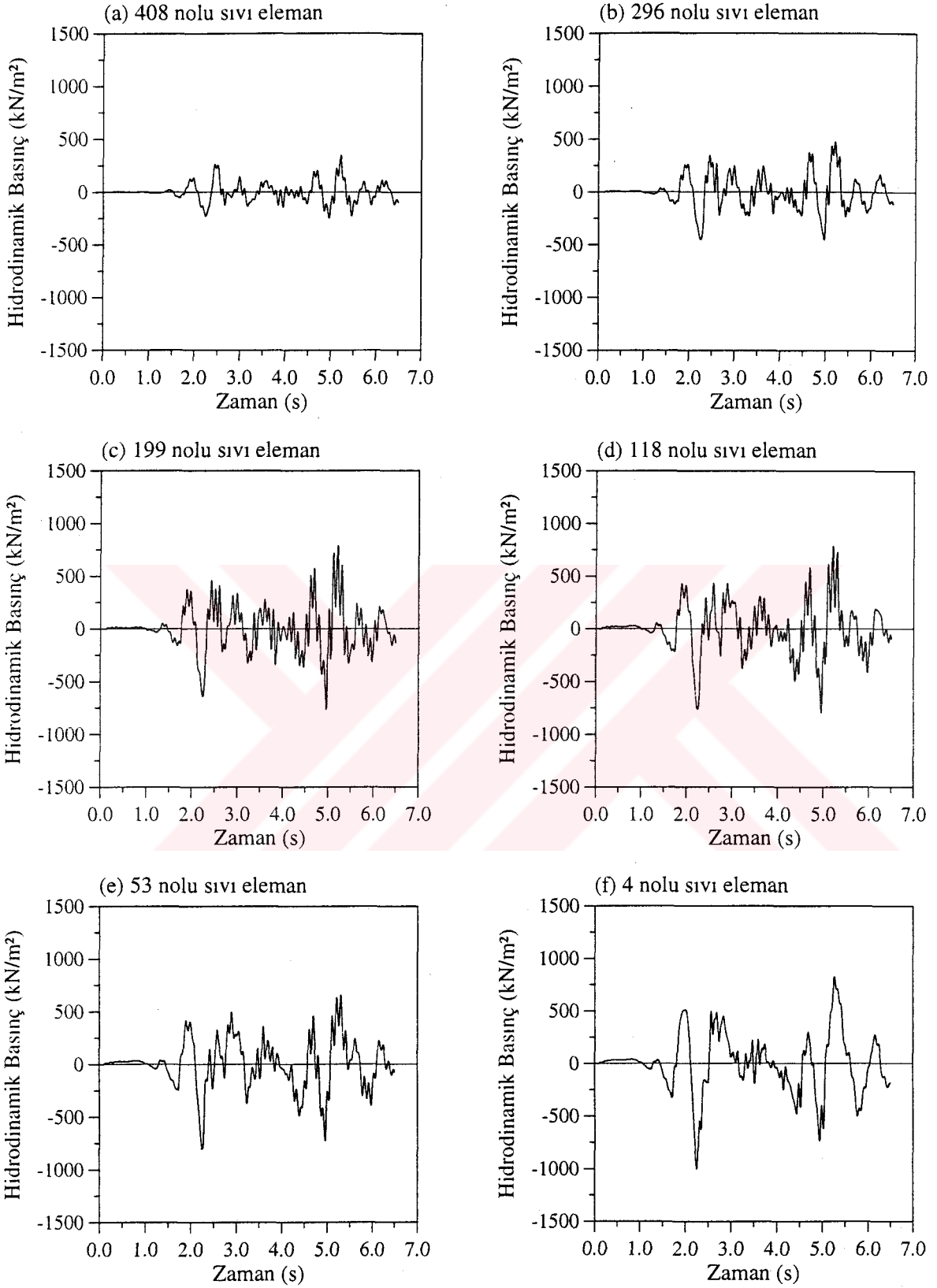
basınçların frekans içeriği açısından esnek zemin durumu ile karşılaştırıldığında, zemin esnekliğinin basınçların frekans içeriklerini değiştirdiğini söylemek mümkündür.

### 3.2.2.3. Gerilmeler

Esnek zemin durumunda kemer barajın lineer dinamik analizi sonucu kemer barajda x-x, y-y ve z-z doğrultusunda oluşan gerilmeler elde edilmiştir. Şekil 3.11 ile 3.16 arasında, kemer barajın memba ve mansap yüzeyindeki maksimum çekme ve minimum basınç eş gerilme eğrileri rezervuarın boş ve dolu olması durumu için ayrı ayrı verilmiştir.

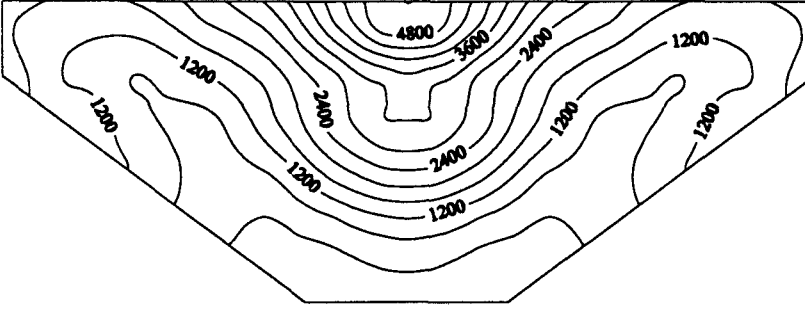
*Baraj memba yüzeyi maksimum çekme gerilmeleri;* x-x yönünde rezervuarın boş olması durumu için  $5112 \text{ kN/m}^2$ , dolu olması durumu için  $12255 \text{ kN/m}^2$ ; y-y yönünde rezervuarın boş olması durumu için  $1362 \text{ kN/m}^2$ , dolu olması durumu için  $3919 \text{ kN/m}^2$ ; z-z yönünde rezervuarın boş olması durumu için  $2114 \text{ kN/m}^2$ , dolu olması durumu için  $5491 \text{ kN/m}^2$  şeklinde elde edilmiştir. Baraj mansap yüzeyi maksimum çekme gerilmeleri ise; x-x yönünde rezervuarın boş olması durumu için  $3292 \text{ kN/m}^2$ , dolu olması durumu için  $8246 \text{ kN/m}^2$ ; y-y yönünde rezervuarın boş olması durumu için  $2343 \text{ kN/m}^2$ , dolu olması durumu için  $3827 \text{ kN/m}^2$ ; z-z yönünde rezervuarın boş olması durumu için  $2539 \text{ kN/m}^2$ , dolu olması durumu için  $2737 \text{ kN/m}^2$  şeklinde elde edilmiştir. *Baraj memba yüzeyi minimum basınç gerilmeleri;* x-x yönünde rezervuarın boş olması durumu için  $3700 \text{ kN/m}^2$ , dolu olması durumu için  $9006 \text{ kN/m}^2$ ; y-y yönünde rezervuarın boş olması durumu için  $1144 \text{ kN/m}^2$ , dolu olması durumu için  $3722 \text{ kN/m}^2$ ; z-z yönünde rezervuarın boş olması durumu için  $2403 \text{ kN/m}^2$ , dolu olması durumu için  $5996 \text{ kN/m}^2$  şeklinde elde edilmiştir. Baraj mansap yüzeyi minimum basınç gerilmeleri ise; x-x yönünde rezervuarın boş olması durumu için  $3086 \text{ kN/m}^2$ , dolu olması durumu için  $6261 \text{ kN/m}^2$ ; y-y yönünde rezervuarın boş olması durumu için  $1450 \text{ kN/m}^2$ , dolu olması durumu için  $3831 \text{ kN/m}^2$ ; z-z yönünde rezervuarın boş olması durumu için  $2096 \text{ kN/m}^2$ , dolu olması durumu için  $2595 \text{ kN/m}^2$  şeklinde elde edilmiştir.

Zeminin esnek olması durumunda baraj-su etkileşimi, baraj davranışını rijit zemin durumundakine benzer şekilde etkilemiştir. Barajda oluşan maksimum çekme ve minimum basınç gerilmeleri, şiddetleri farklı olmakla birlikte rijit zemin durumundaki gibi bir dağılım sergilemiştir.

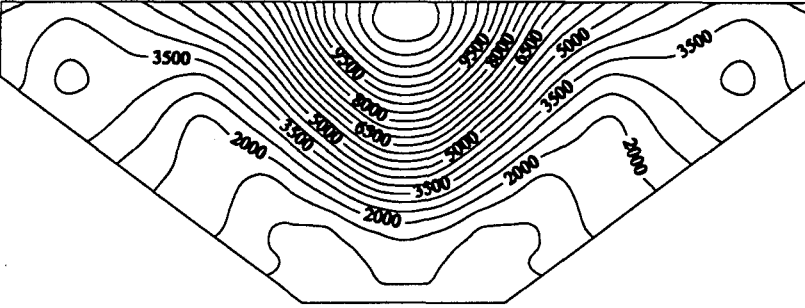


Şekil 3.10. Lineer dinamik analizde; zeminin esnek olması durumu için 408, 296, 199, 118, 53 ve 4 nolu sıvı elemanlarda elde edilen hidrodinamik basınçların dinamik etki süresince değişimi

Rezervuar Boş

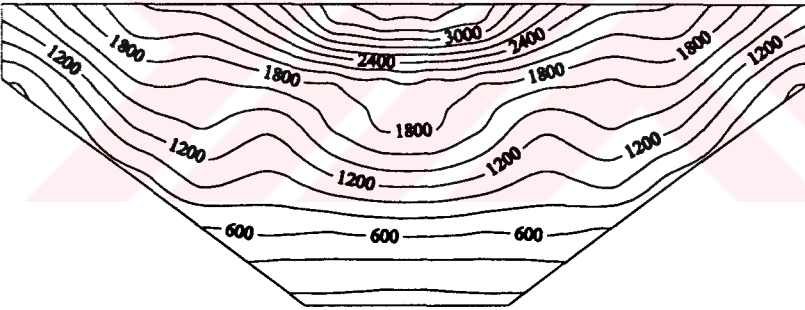


Rezervuar Dolu

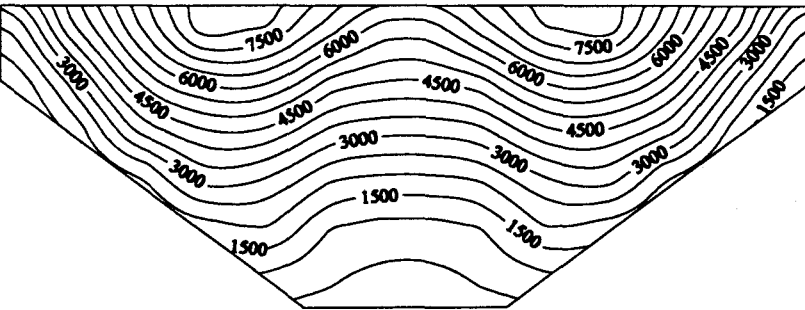


**MEMBA YÜZEYİ**, Gerilme Birimi:  $\text{kN/m}^2$

Rezervuar Boş



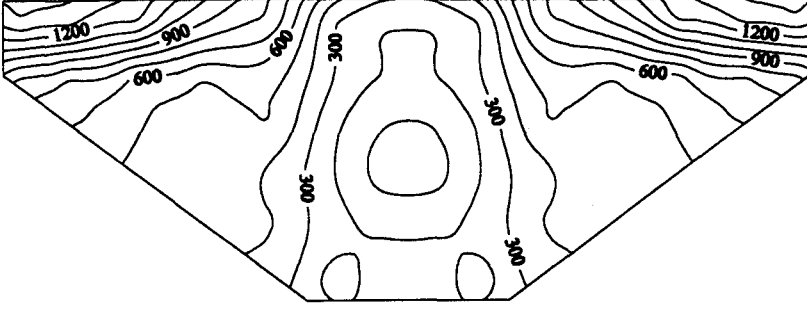
Rezervuar Dolu



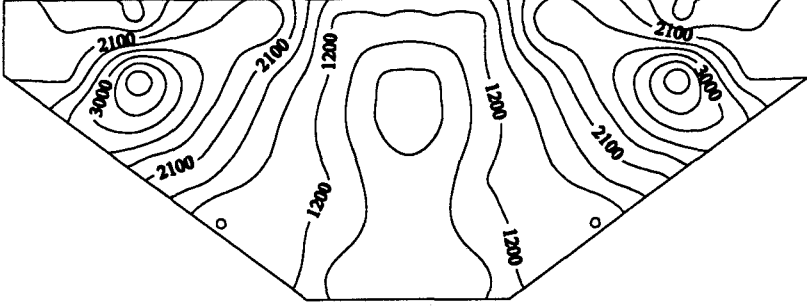
**MANSAP YÜZEYİ**, Gerilme Birimi:  $\text{kN/m}^2$

Şekil 3.11. Lineer dinamik analizde; zeminin esnek, rezervuarın boş ve dolu olması durumu için barajın memba ve mansap yüzeyinde x-x doğrultusunda elde edilen maksimum çekme eş gerilme eğrileri

Rezervuar Boş

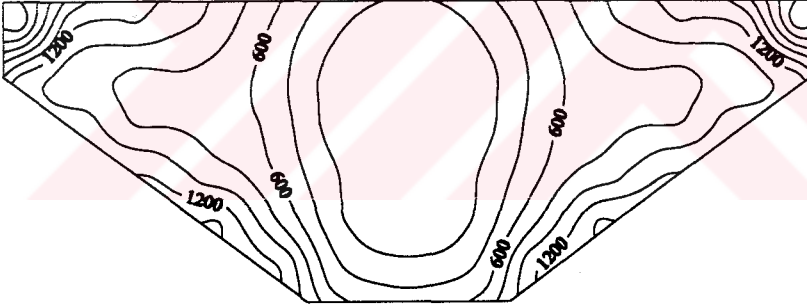


Rezervuar Dolu

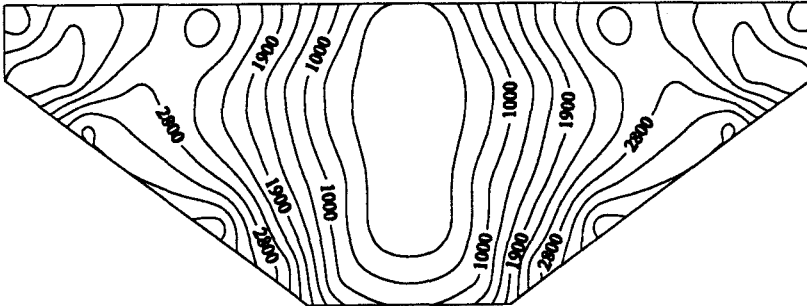


**MEMBA YÜZEYİ**, Gerilme Birimi:  $\text{kN/m}^2$

Rezervuar Boş



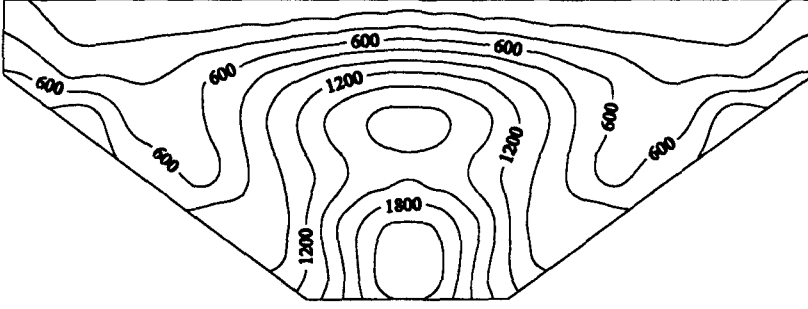
Rezervuar Dolu



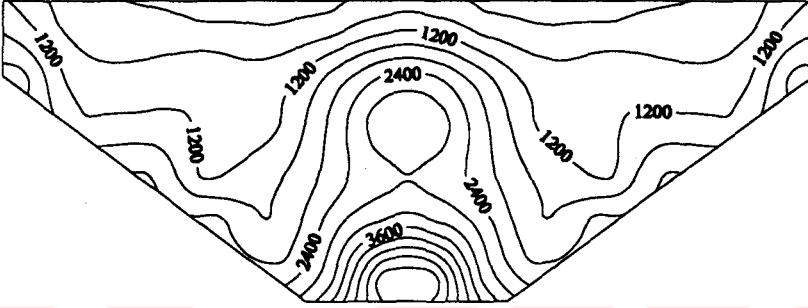
**MANSAP YÜZEYİ**, Gerilme Birimi:  $\text{kN/m}^2$

Şekil 3.12. Lineer dinamik analizde; zeminin esnek, rezervuarın boş ve dolu olması durumu için barajın memba ve mansap yüzeyinde y-y doğrultusunda elde edilen maksimum çekme eş gerilme eğrileri

Rezervuar Boş

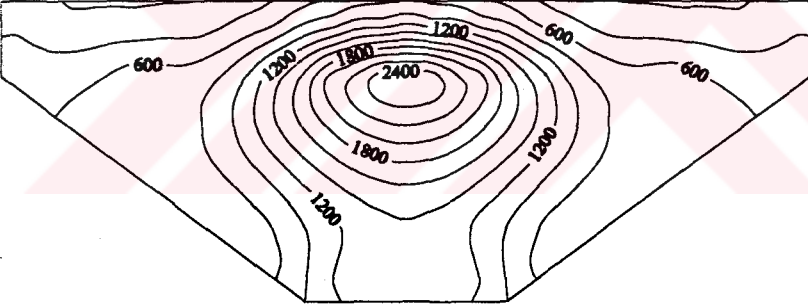


Rezervuar Dolu

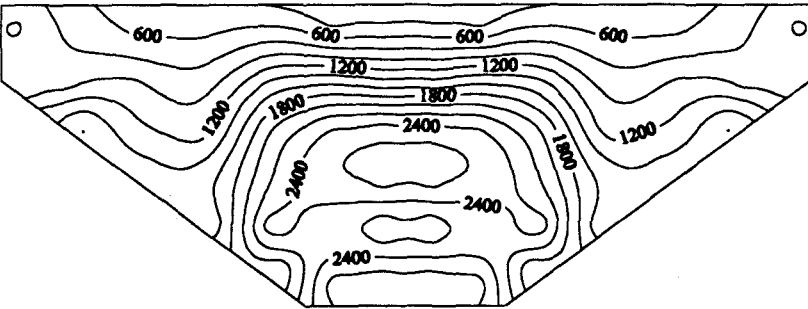


MEMBA YÜZEYİ, Gerilme Birimi:  $\text{kN/m}^2$

Rezervuar Boş



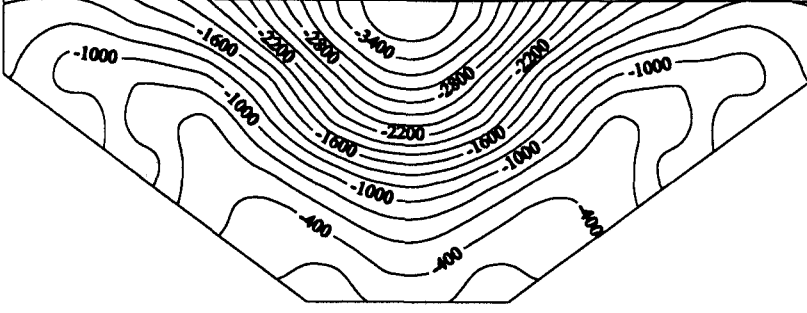
Rezervuar Dolu



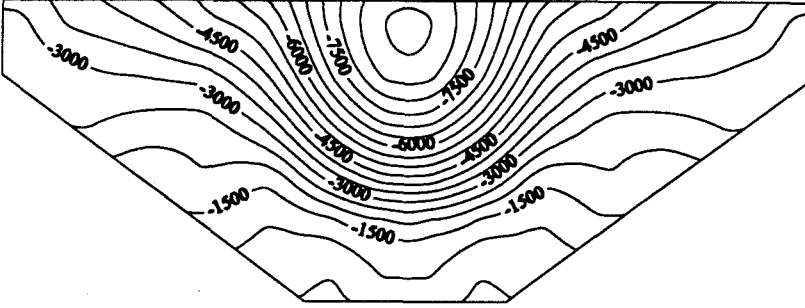
MANSAP YÜZEYİ, Gerilme Birimi:  $\text{kN/m}^2$

Şekil 3.13. Lineer dinamik analizde; zeminin esnek, rezervuarın boş ve dolu olması durumu için barajın memba ve mansap yüzeyinde z-z doğrultusunda elde edilen maksimum çekme eş gerilme eğrileri

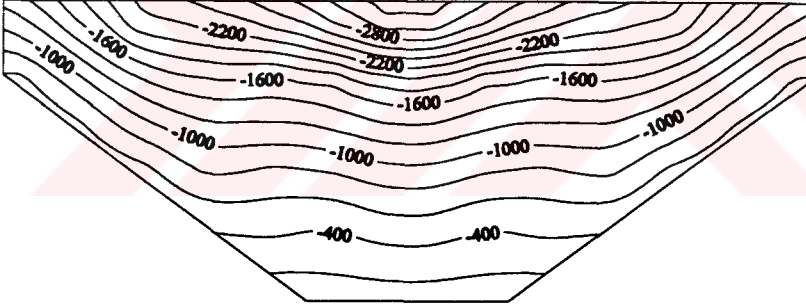
Rezervuar Boş



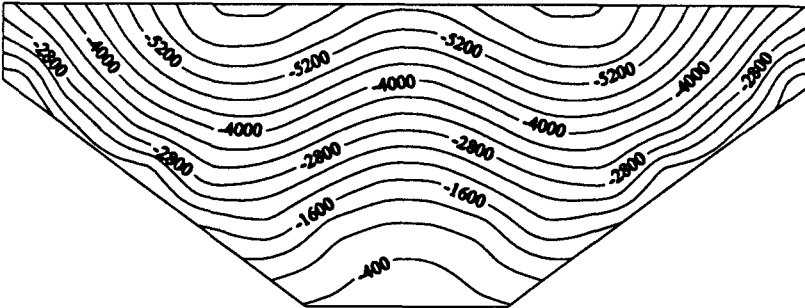
Rezervuar Dolu

MEMBA YÜZEYİ, Gerilme Birimi:  $\text{kN/m}^2$ 

Rezervuar Boş



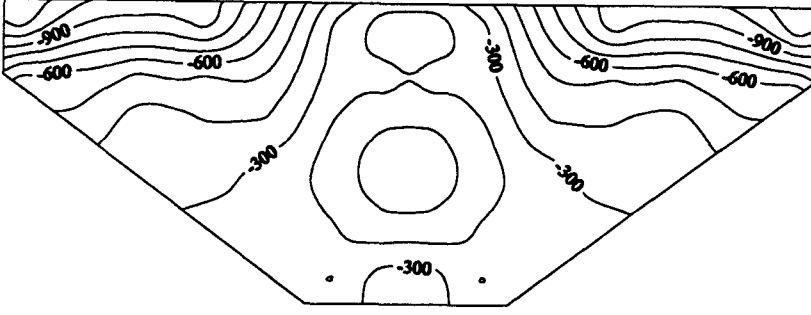
Rezervuar Dolu

MANSAP YÜZEYİ, Gerilme Birimi:  $\text{kN/m}^2$ 

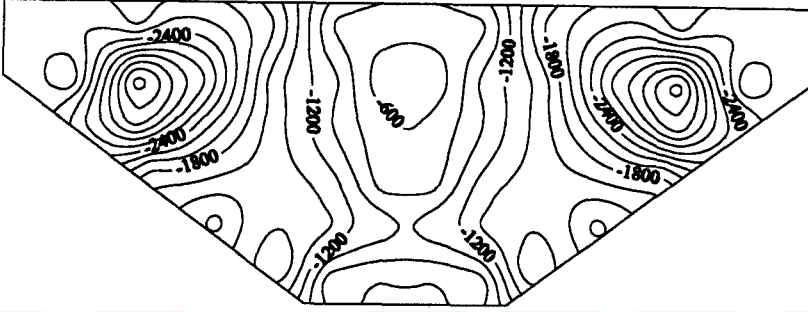
Şekil 3.14. Lineer dinamik analizde; zeminin esnek, rezervuarın boş ve dolu olması durumu için barajın memba ve mansap yüzeyinde x-x doğrultusunda elde edilen minimum basınç eş gerilme eğrileri



Rezervuar Boş

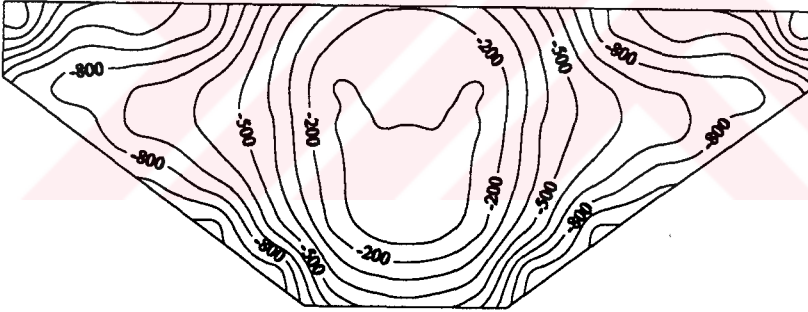


Rezervuar Dolu

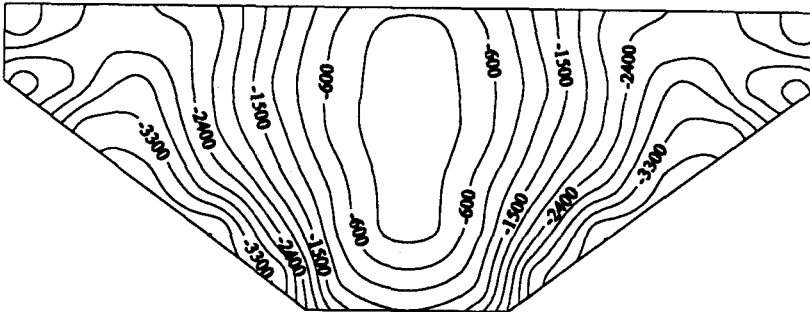


**MEMBA YÜZEYİ, Gerilme Birimi:  $\text{kN/m}^2$**

Rezervuar Boş



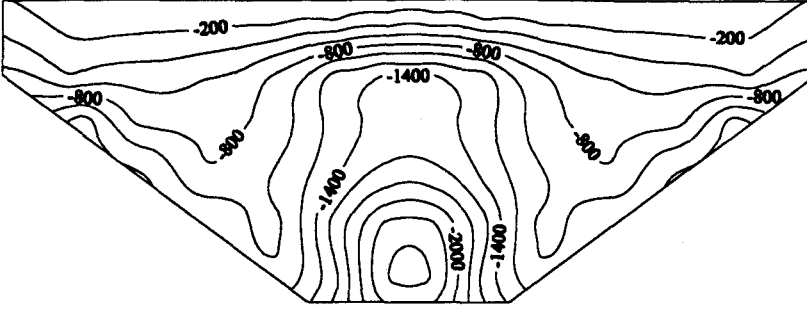
Rezervuar Dolu



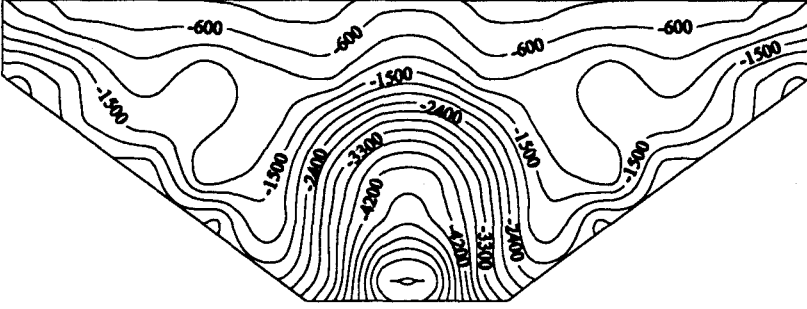
**MANSAP YÜZEYİ, Gerilme Birimi:  $\text{kN/m}^2$**

Şekil 3.15. Lineer dinamik analizde; zeminin esnek, rezervuarın boş ve dolu olması durumu için barajın memba ve mansap yüzeyinde y-y doğrultusunda elde edilen minimum basınç eş gerilme eğrileri

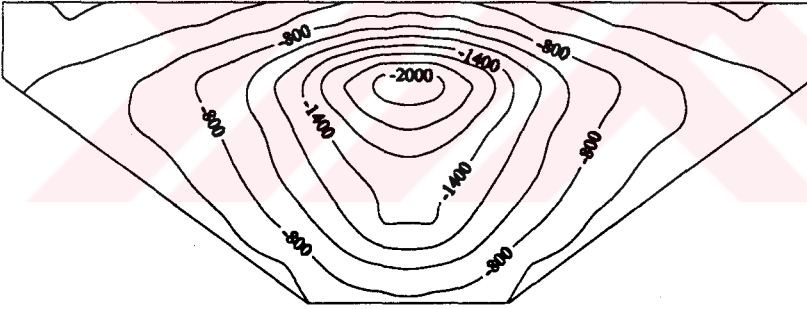
Rezervuar Boş



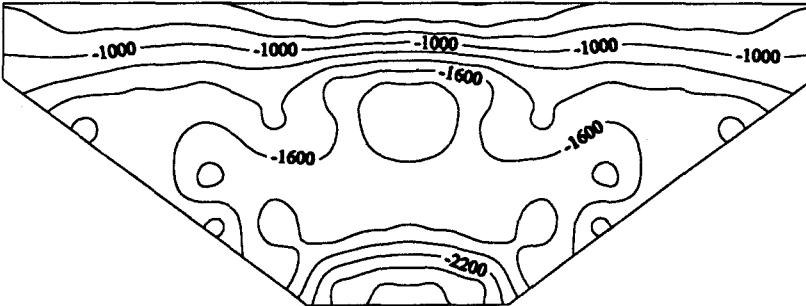
Rezervuar Dolu

MEMBA YÜZEYİ, Gerilme Birimi:  $\text{kN/m}^2$ 

Rezervuar Boş



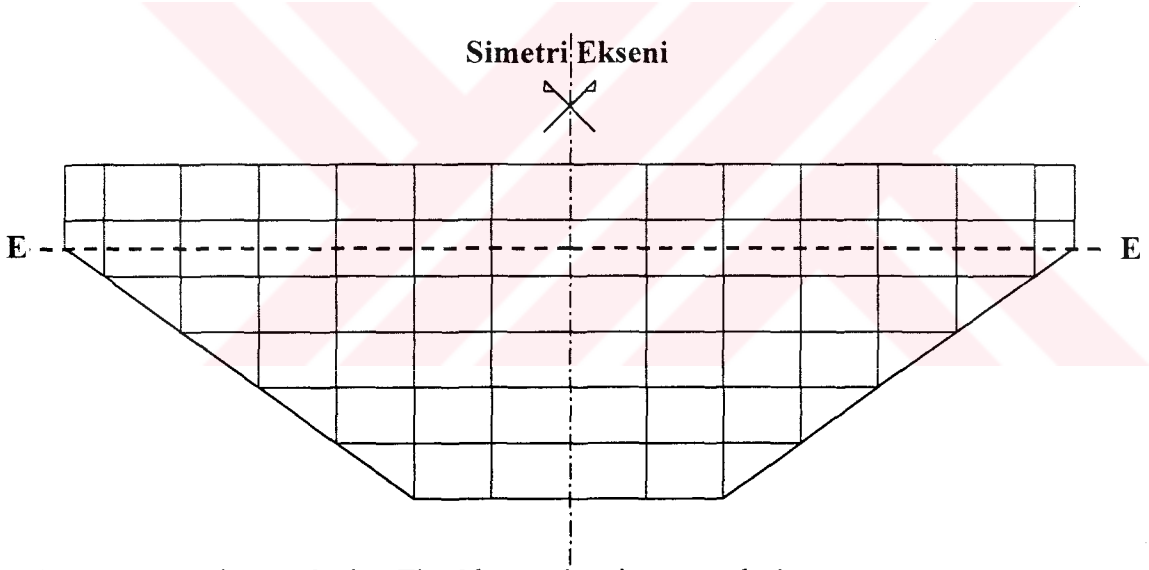
Rezervuar Dolu

MANSAP YÜZEYİ, Gerilme Birimi:  $\text{kN/m}^2$ 

Şekil 3.16. Lineer dinamik analizde; zeminin esnek, rezervuarın boş ve dolu olması durumu için barajın memba ve mansap yüzeyinde z-z doğrultusunda elde edilen minimum basınç eş gerilme eğrileri

### 3.2.3. Kaya Zemin Özelliklerinin Kemer Baraj Davranışına Etkisi

Bu kısımda, lineer dinamik analizde rezervuarın boş ve dolu olması durumu için kaya zemin özelliklerinin Tip-5 kemer baraj davranışına etkisi, parametrik bir çalışma yapılarak incelenmiştir. Bu çalışma, kaya zemin elastisite modülünün ( $E_f$ ) baraj betonunun elastisite modülüne ( $E_c$ ) oranı için çeşitli değerler alınarak gerçekleştirilmektedir.  $E_f/E_c$  oranı için sonsuz, 2.00, 1.00, 0.50 ve 0.25 değerleri kullanılmıştır. Sonsuz değeri, rijit zemine karşılık gelmektedir. Bu değerler dikkate alınarak, kemer baraj anahtar kesitinin memba yüzeyinde memba-mansap doğrultusunda elde edilen yerdeğiştirmelerin mutlak değerce maksimum değerlerinin baraj yüksekliği boyunca değişimi, baraj kreti (Şekil 2.24'te 617 nolu dn.) yerdeğiştirmelerinin dinamik etki süresince değişimi ve Şekil 3.17'de gösterilen E-E kesitindeki x-x, y-y, ve z-z doğrultusundaki memba ve mansap yüzey gerilmeleri incelenmiştir.



Şekil 3.17. Memba tarafından Tip-5 kemer barajının gövdesi

#### 3.2.3.1. Rezervuarın Boş Olması Durumu

Rezervuarın boş olması durumunda kemer barajın lineer dinamik davranışına kaya zeminin özelliklerinin etkisini incelemek üzere Şekil 2.22'de verilen sonlu eleman modeli kullanılmıştır. Kemer baraj anahtar kesitinin memba yüzeyinde, memba-mansap doğrultusunda elde edilen yerdeğiştirmelerin mutlak değerce maksimum değerlerinin baraj yüksekliği boyunca değişimi Şekil 3.18(a)'da verilmiştir. Baraj kretinin mutlak değerce maksimum yerdeğiştirmesi,  $E_f/E_c$  oranının sonsuz, 2.00, 1.00, 0.50 ve 0.25 değerleri için

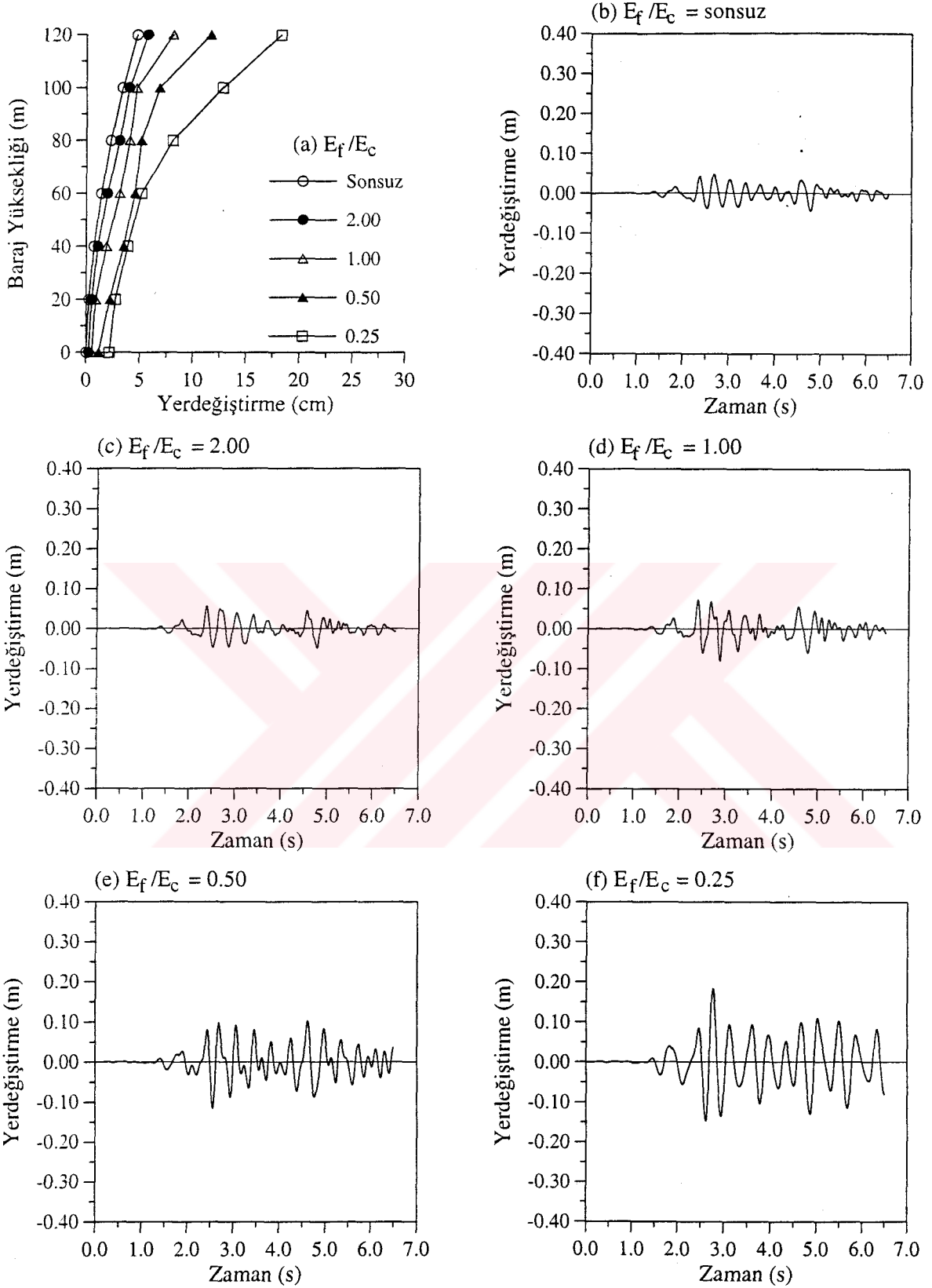
sırasıyla 4.70 cm, 5.70 cm, 8.10 cm, 11.63 cm ve 18.28 cm olarak elde edilmiştir. Görüldüğü gibi, kaya zemin esnekliği arttıkça kret yerdeğiştirmesi de artmaktadır. Ayrıca Şekil 3.18’de, dikkate alınan  $E_f/E_c$  oranları için baraj kretinde elde edilen yerdeğiştirmelerin dinamik etki süresince değişimi verilmiştir. Bu şekiller incelendiğinde, rezervuarın boş olması durumunda kemer baraj davranışı üzerinde kaya zemin esnekliğinin etkisi açıkça görülmektedir.

Şekil 3.19 ve 3.20’de ise,  $E_f/E_c$  oranının sonsuz, 2.00, 1.00, 0.50 ve 0.25 değerleri için Şekil 3.17’de gösterilen E-E kesitinde, x-x, y-y ve z-z doğrultusunda elde edilen memba ve mansap yüzeyi maksimum çekme gerilmelerinin sağ yamaçtan sol yamaca doğru değişimi görülmektedir.

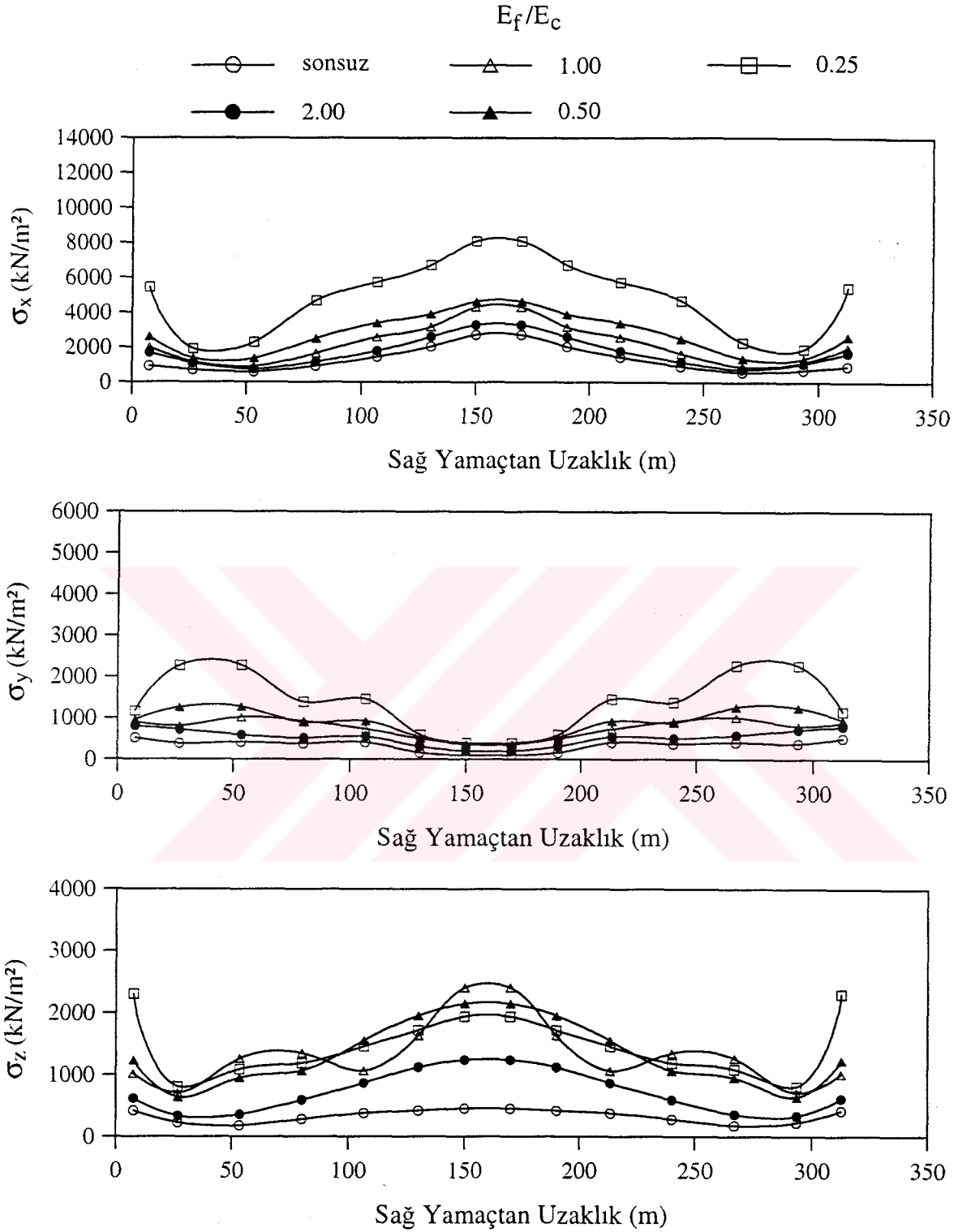
### 3.2.3.2. Rezervuarın Dolu Olması Durumu

Rezervuarın dolu olması durumunda kemer barajın lineer dinamik davranışına kaya zeminin özelliklerinin etkisini incelemek üzere Şekil 2.23’te verilen sonlu eleman modeli kullanılmıştır. Kemer baraj anahtar kesitinin memba yüzeyinde, memba-mansap doğrultusunda elde edilen yerdeğiştirmelerin mutlak değerce maksimum değerlerinin baraj yüksekliği boyunca değişimi Şekil 3.21(a)’da verilmiştir. Baraj kretinin mutlak değerce maksimum yerdeğiştirmesi,  $E_f/E_c$  oranının sonsuz, 2.00, 1.00, 0.50 ve 0.25 değerleri için sırasıyla 15.29 cm, 18.39 cm, 20.59 cm, 24.92 cm ve 29.76 cm olarak elde edilmiştir. Ayrıca Şekil 3.21’de, dikkate alınan  $E_f/E_c$  oranları için baraj kretinde memba-mansap doğrultusunda elde edilen yerdeğiştirmelerin dinamik etki süresince değişimi verilmiştir. Bu şekiller incelendiğinde, rezervuarın dolu olması durumunda da kemer baraj davranışı üzerinde kaya zemin esnekliğinin etkisi açıkça görülmektedir. Burada da yine zemindeki esneklik arttıkça kret yerdeğiştirmeleri artmaktadır.

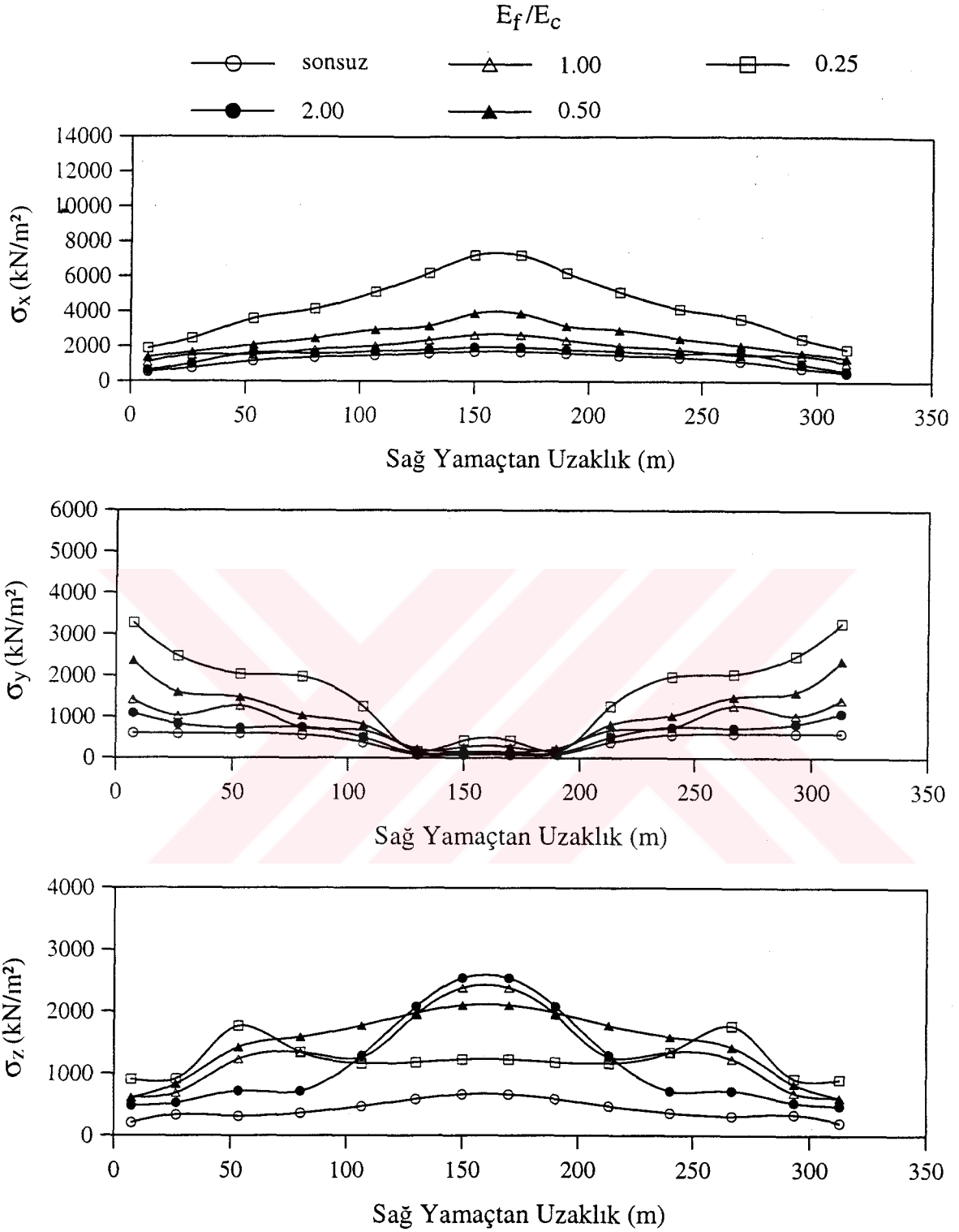
Şekil 3.22 ve 3.23’te ise, dikkate alınan  $E_f/E_c$  oranları için Tip-5 kemer barajının memba ve mansap yüzeyinde x-x, y-y ve z-z eksenleri doğrultusundaki maksimum çekme gerilmelerinin sağ yamaçtan sol yamaca doğru değişimi görülmektedir.



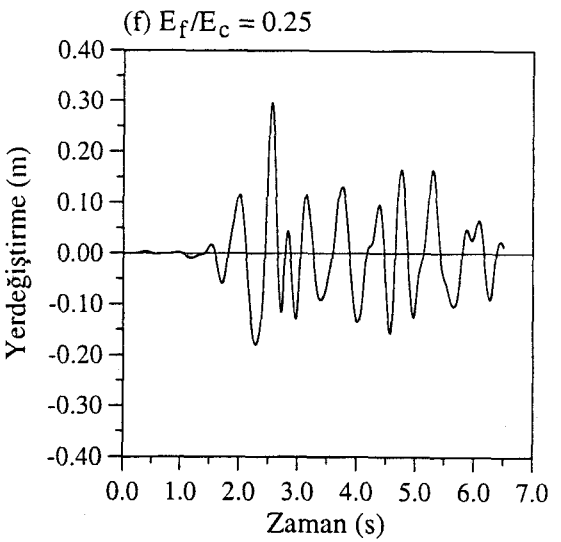
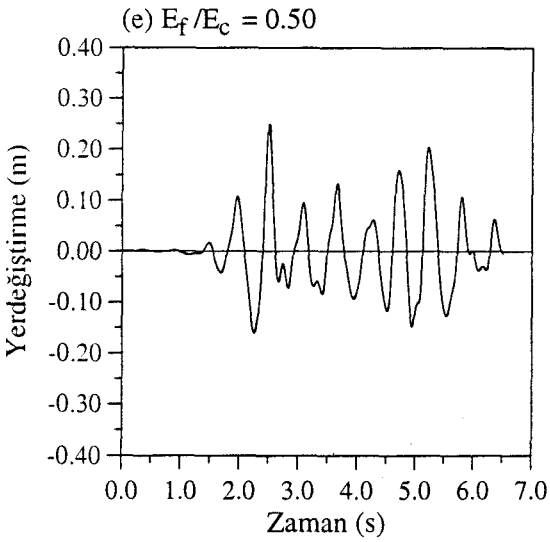
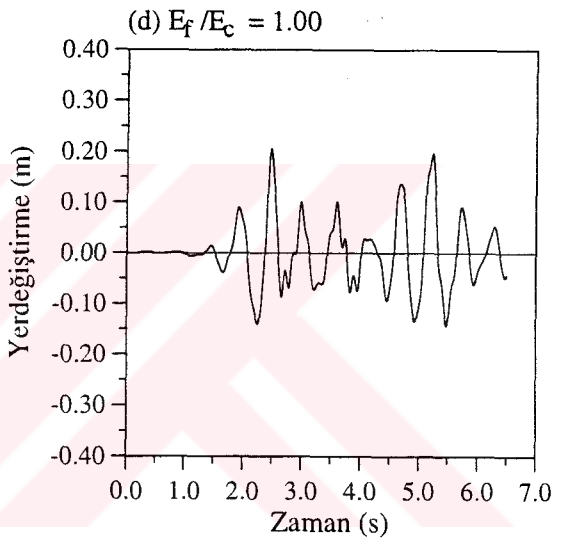
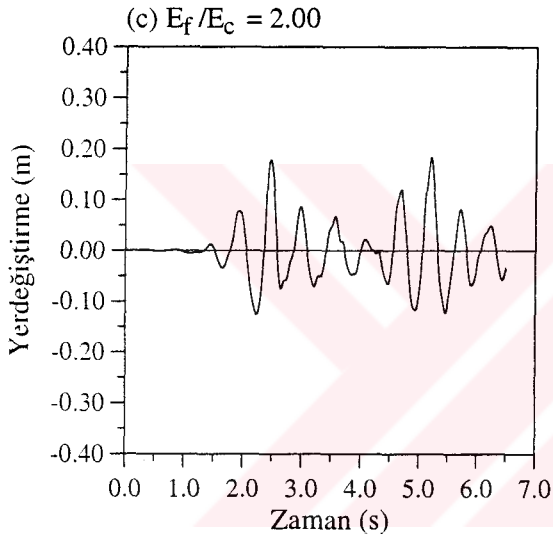
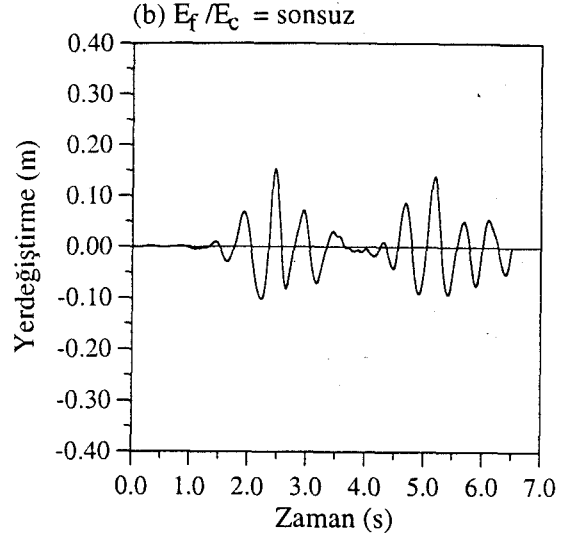
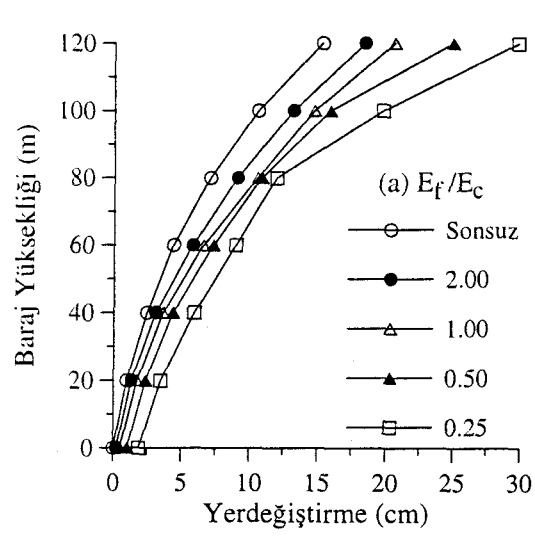
Şekil 3.18. Lineer dinamik analizde; rezervuarın boş olması durumu için baraj memba yüzeyinde elde edilen yerdeğiştirmeler ile  $E_f/E_c$  oranının sonsuz, 2.00, 1.00, 0.50 ve 0.25 değerleri için baraj kretinde elde edilen yerdeğiştirmelerin dinamik etki süresince değişimi



Şekil 3.19. Lineer dinamik analizde; rezervuarın boş ve  $E_f/E_c$  oranının sonsuz, 2.00, 1.00, 0.50 ve 0.25 değerleri için Tip-5 kemer barajının E-E kesitinde x-x, y-y ve z-z doğrultusunda elde edilen memba yüzeyi maksimum çekme gerilmelerinin sağ yamaçtan sol yamaca doğru değişimi

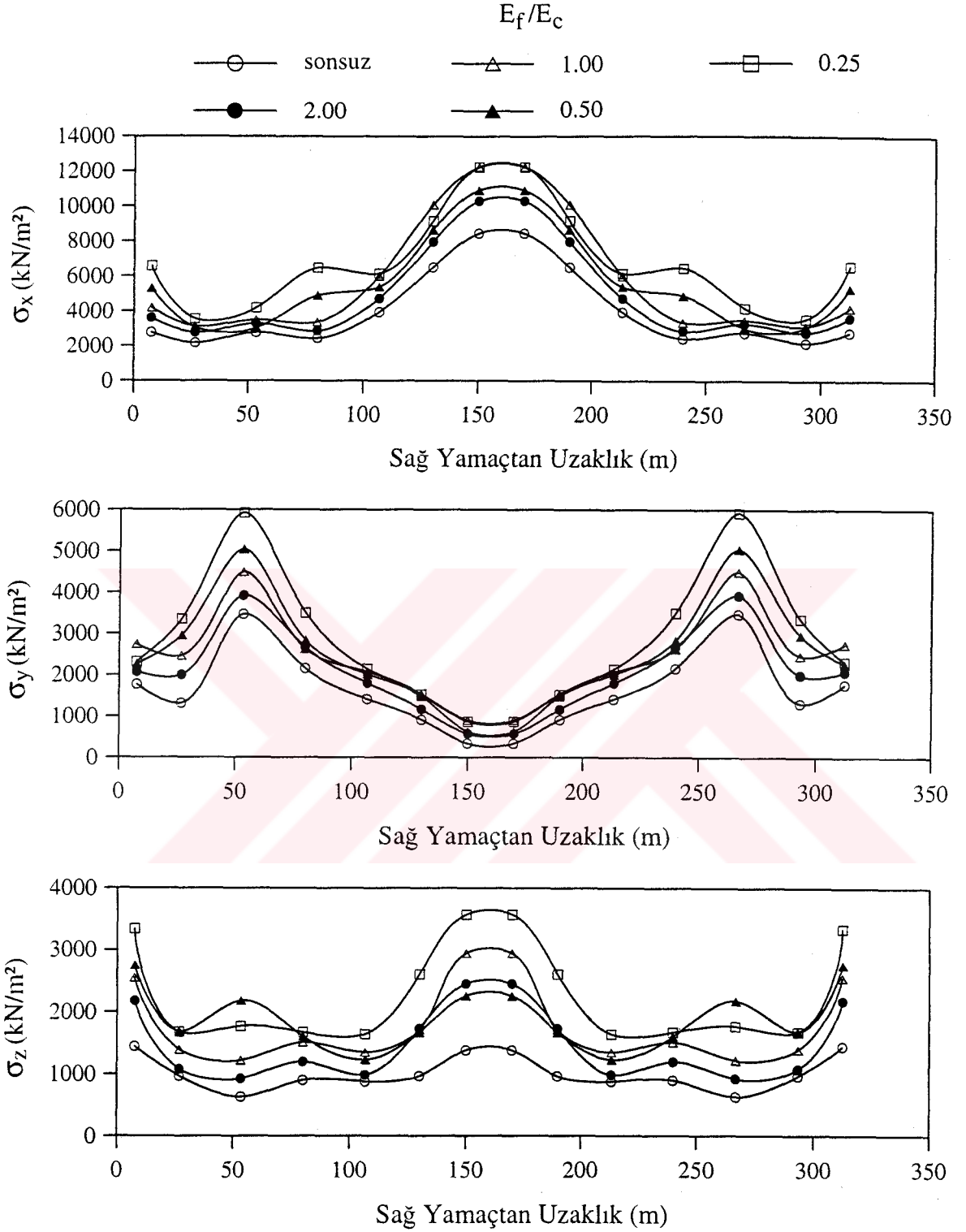


Şekil 3.20. Lineer dinamik analizde; rezervuarın boş ve  $E_f/E_c$  oranının sonsuz, 2.00, 1.00, 0.50 ve 0.25 değerleri için Tip-5 kemer barajının E-E kesitinde x-x, y-y ve z-z doğrultusunda elde edilen mansap yüzeyi maksimum çekme gerilmelerinin sağ yamaçtan sol yamaca doğru değişimi

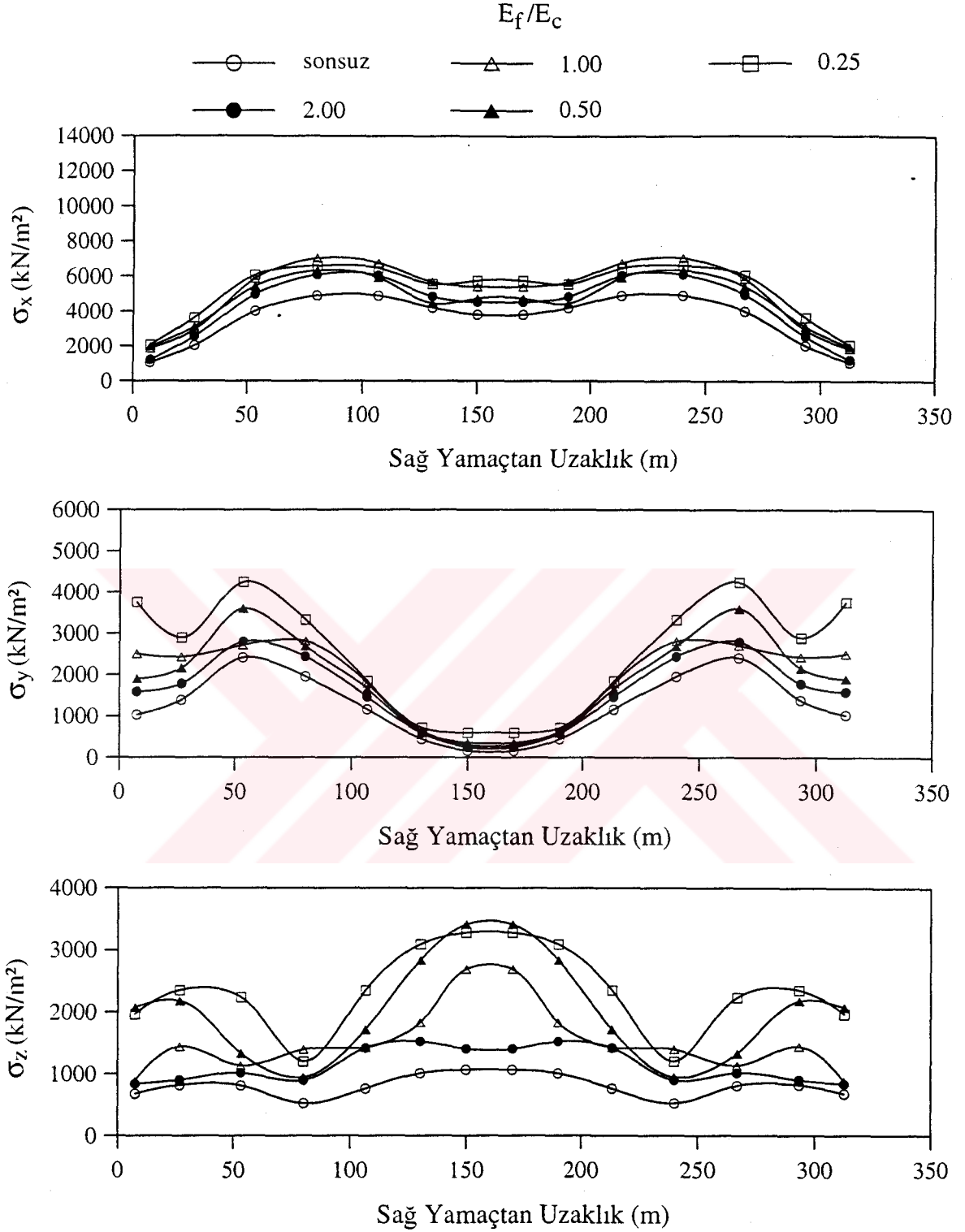


Şekil 3.21. Lineer dinamik analizde; rezervuarın dolu olması durumu için baraj memba yüzeyinde elde edilen yerdeğiştirmeler ile  $E_f/E_c$  oranının sonsuz, 2.00, 1.00, 0.50 ve 0.25 değerleri için baraj kretinde elde edilen yerdeğiştirmelerin dinamik etki süresince değişimi





Şekil 3.22. Lineer dinamik analizde; rezervuarın dolu ve  $E_f/E_c$  oranının sonsuz, 2.00, 1.00, 0.50 ve 0.25 değerleri için Tip-5 kemer barajının E-E kesitinde x-x, y-y ve z-z doğrultusunda elde edilen memba yüzeyi maksimum çekme gerilmelerinin sağ yamaçtan sol yamaca doğru değişimi



Şekil 3.23. Lineer dinamik analizde; rezervuarın dolu ve  $E_f/E_c$  oranının sonsuz, 2.00, 1.00, 0.50 ve 0.25 değerleri için Tip-5 kemer barajının E-E kesitinde x-x, y-y ve z-z doğrultusunda elde edilen mansap yüzeyi maksimum çekme gerilmelerinin sağ yamaçtan sol yamaca doğru değişimi

### 3.2.4. Rezervuar Su Seviyesindeki Değişimin Kemer Baraj Davranışına Etkisi

Bu kısımda; zeminin rijit ve esnek, rezervuardaki su seviyesinin 120, 100, 80, 60 ve 40 m olması dikkate alınarak Tip-5 kemer barajının lineer dinamik analizi gerçekleştirilmiştir. Bu şekilde kemer baraj davranışına rezervuar su seviyesindeki değişimin etkisi belirlenmeye çalışılmıştır. Yapılan analizler sonucu, barajın anahtar kesitinin memba yüzeyinde memba-mansap doğrultusunda elde edilen yerdeğiştirmelerin mutlak değerce maksimum değerlerinin baraj yüksekliği boyunca değişimi, baraj kret yerdeğiştirmelerinin dinamik etki süresince değişimi ve Şekil 3.17'de gösterilen E-E kesitindeki x-x, y-y, ve z-z doğrultusundaki memba ve mansap yüzey gerilmeleri incelenmiştir.

#### 3.2.4.1. Rijit Zemin Durumu

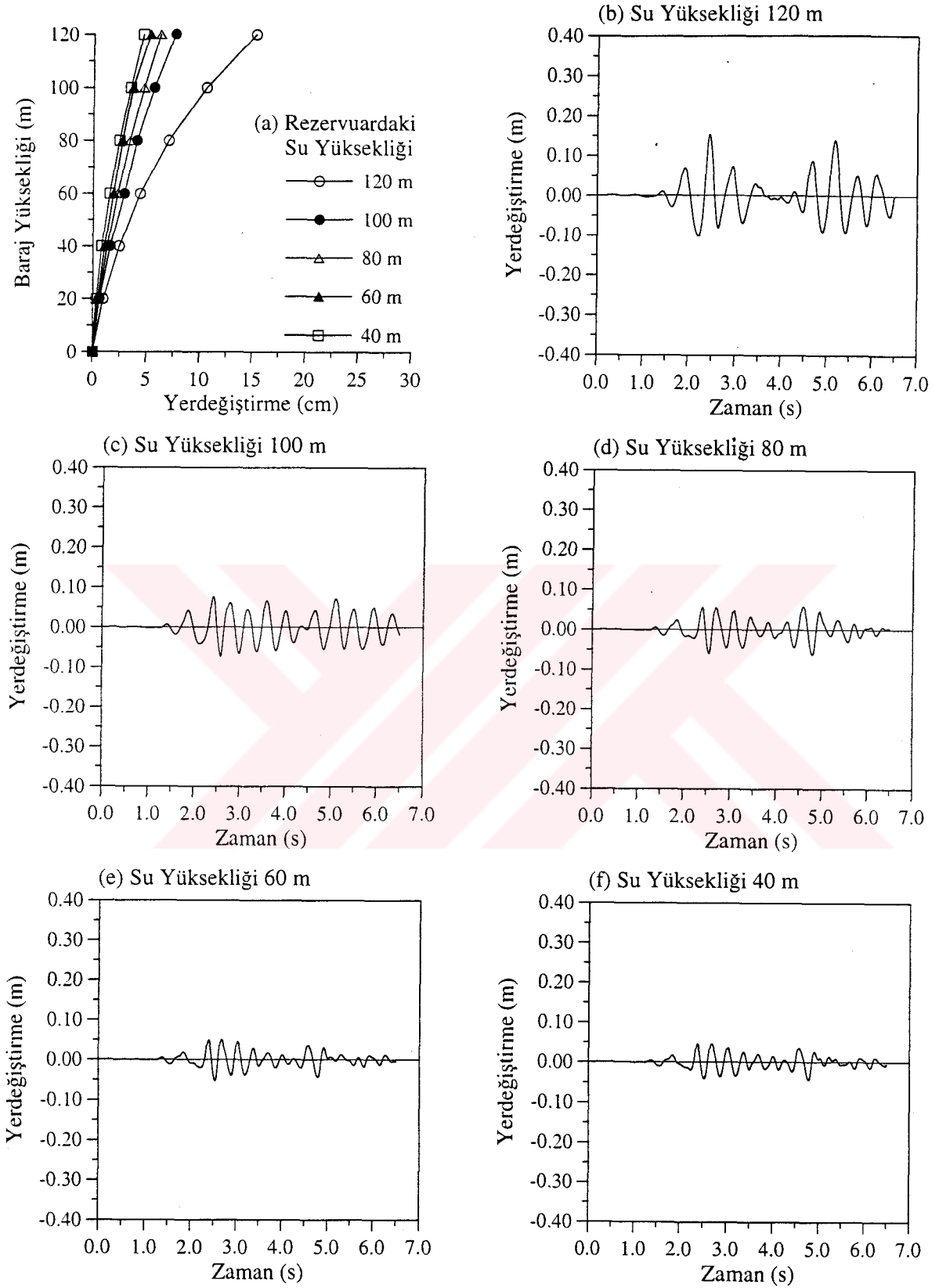
Rijit zemin durumunda kemer barajın lineer dinamik davranışına rezervuar su seviyesindeki değişimin etkisini incelemek için, Şekil 2.20'de verilen sonlu eleman modeli kullanılmıştır. Rezervuardaki su seviyesinin 120, 100, 80, 60 ve 40 m olması durumları için kemer baraj anahtar kesitinin memba yüzeyinde, memba-mansap doğrultusunda elde edilen yerdeğiştirmelerin mutlak değerce maksimum değerlerinin baraj yüksekliği boyunca değişimi Şekil 3.24(a)'da verilmiştir. Baraj kretinin mutlak değerce maksimum yerdeğiştirmesi, rezervuardaki su seviyesinin 120, 100, 80, 60 ve 40 m olması durumları için sırasıyla 15.29 cm, 7.62 cm, 6.21 cm, 5.27 cm ve 4.60 cm olarak elde edilmiştir. Görüldüğü gibi, rezervuar su seviyesi azaldıkça barajın kret yerdeğiştirmesi azalmaktadır. Şekil 3.24'te, ayrıca rezervuardaki su seviyesinin 120, 100, 80, 60 ve 40 m olması durumları için baraj kretinde (Şekil 2.21'de 162 nolu dn.) memba-mansap doğrultusunda elde edilen yerdeğiştirmelerin dinamik etki süresince değişimi verilmiştir. Şekil 3.25 ve 3.26'te ise, Şekil 3.17'de gösterilen E-E kesitinde x-x, y-y ve z-z doğrultusunda elde edilen memba ve mansap yüzeyi maksimum çekme gerilmelerinin sağ yamaçtan sol yamaca doğru değişimi görülmektedir.

Rijit zemin durumunda rezervuar su seviyesine göre baraj-su etkileşimi, kemer barajın deprem davranışını önemli derecede etkilemektedir. Su seviyesi arttıkça, barajdaki yerdeğiştirme ve gerilmeler de artmaktadır. Hatta, su seviyesi 60 metreden sonra barajdaki gerilmelerde önemli artışlar olmaktadır.

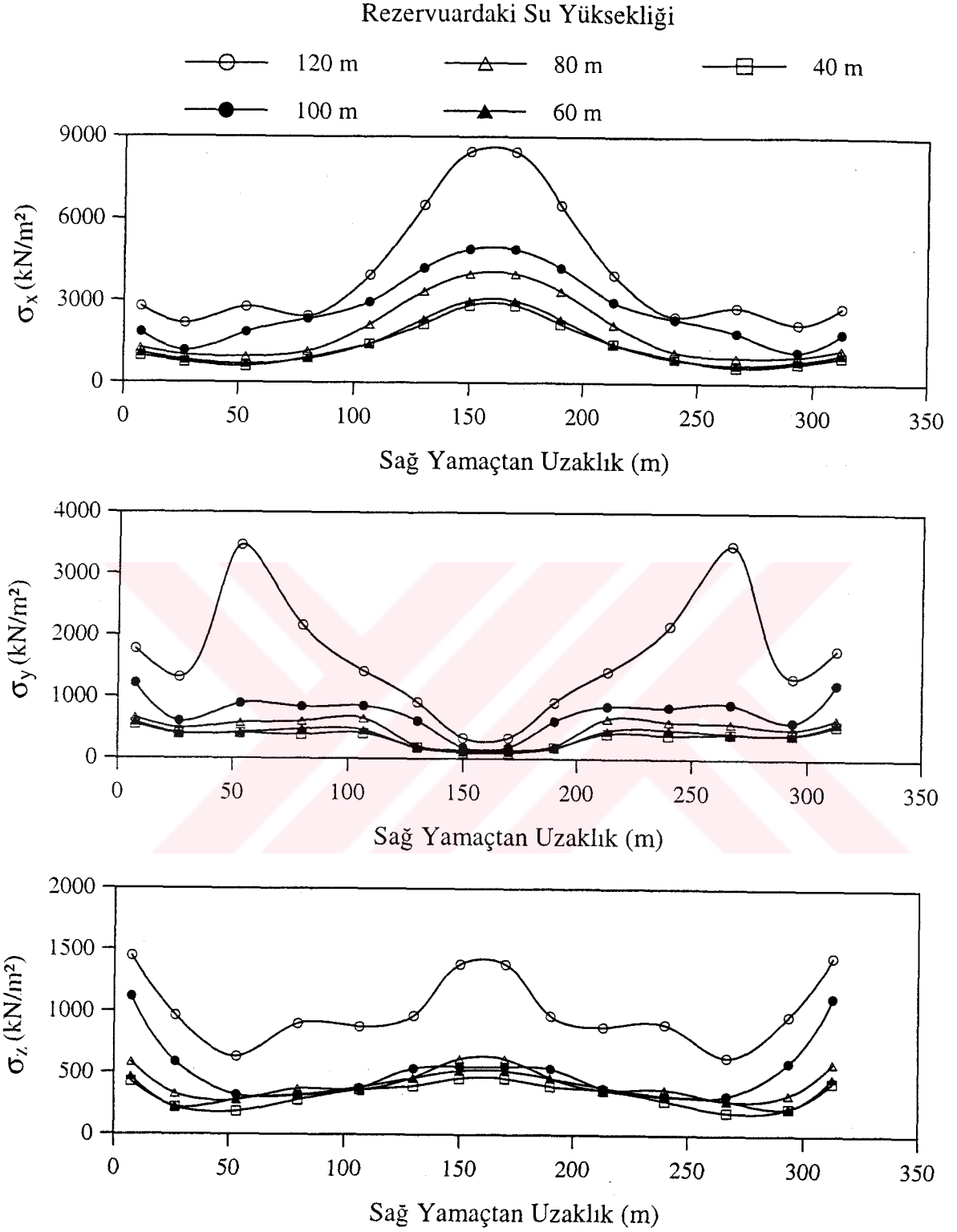
### 3.2.4.2. Esnek Zemin Durumu

Esnek zemin durumunda kemer barajın lineer dinamik davranışına rezervuar su seviyesindeki değişimin etkisini incelemek için Şekil 2.23'teki sonlu eleman modeli kullanılmıştır. Rezervuardaki su seviyesinin 120, 100, 80, 60 ve 40 m olması durumları için kemer baraj anahtar kesitinin memba yüzeyinde, memba-mansap doğrultusunda elde edilen yerdeğiştirmelerin mutlak değerce maksimum değerlerinin baraj yüksekliği boyunca değişimi Şekil 3.27(a)'da verilmiştir. Baraj kretinin mutlak değerce maksimum yerdeğiştirmesi, rezervuardaki su seviyesinin 120, 100, 80, 60 ve 40 m olması durumları için sırasıyla 18.39 cm, 10.29 cm, 8.63 cm, 6.74 cm ve 6.23 cm olarak elde edilmiştir. Burada da, rezervuar su seviyesi azaldıkça barajın kret yerdeğiştirmesi azalmaktadır. Şekil 3.27'de. ayrıca rezervuardaki su seviyesinin 120, 100, 80, 60 ve 40 m olması durumları için baraj kretinde (Şekil 2.24'te 617 nolu dn.) memba-mansap doğrultusunda elde edilen yerdeğiştirmelerin dinamik etki süresince değişimi verilmiştir. Şekil 3.28 ve 3.29'da ise Şekil 3.17'de gösterilen E-E kesitinde x-x, y-y ve z-z doğrultusunda elde edilen memba ve mansap yüzeyi maksimum çekme gerilmelerinin sağ yamaçtan sol yamaca doğru değişimi görülmektedir.

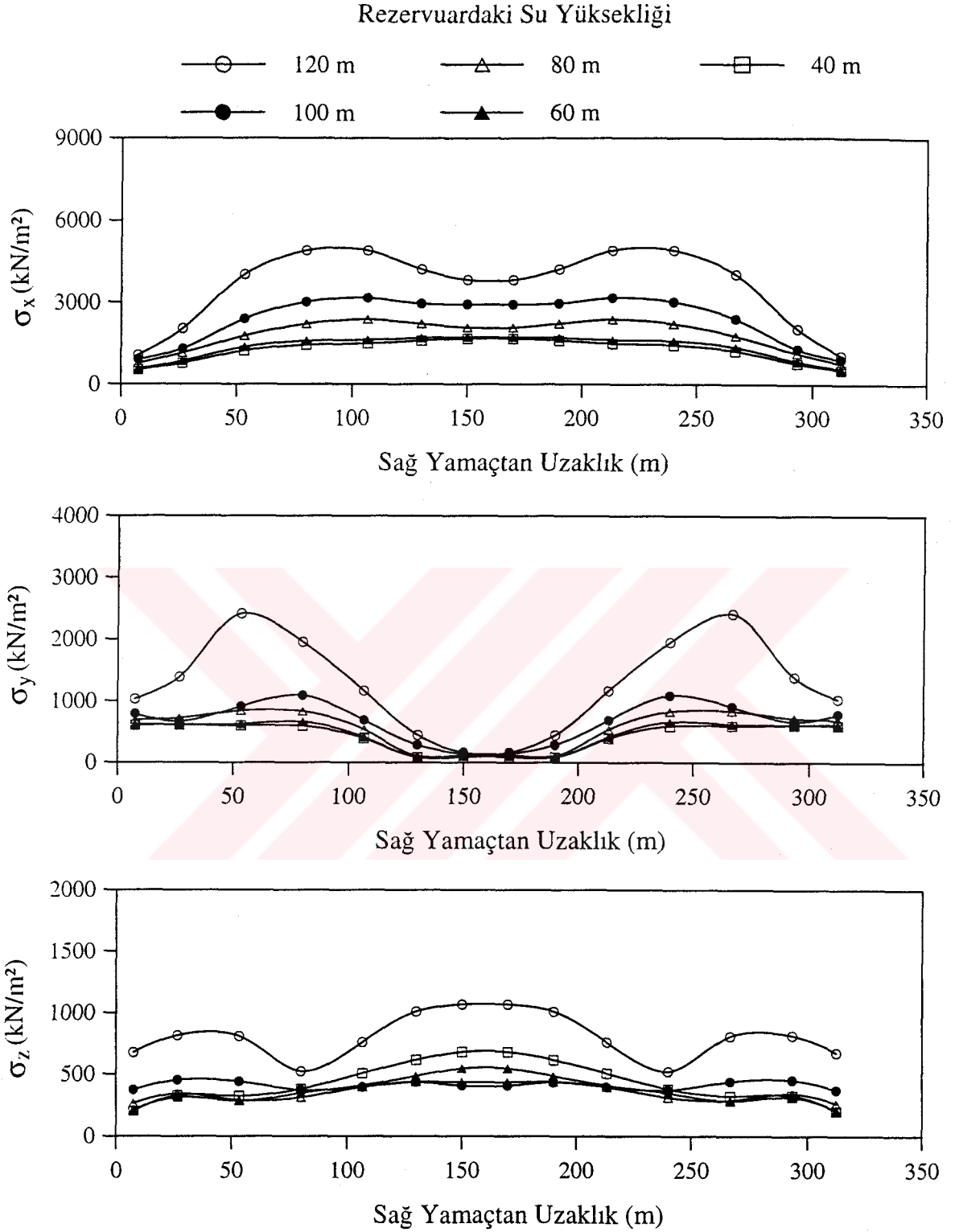
Esnek zemin durumunda da rijit zemin durumunda olduğu gibi, rezervuar su seviyesine göre baraj-su etkileşimi kemer barajın deprem davranışını önemli derecede etkilemiştir.



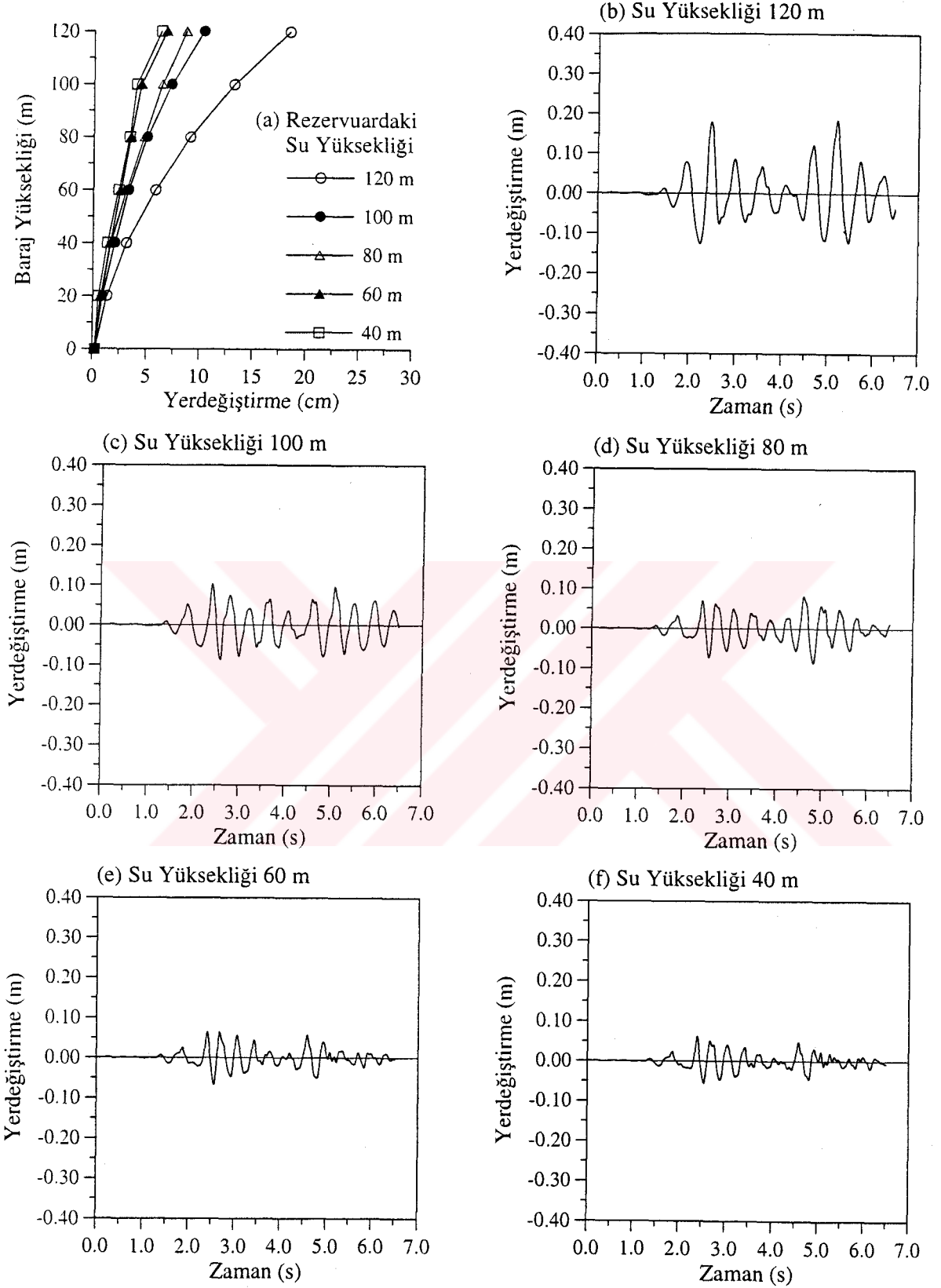
Şekil 3.24. Lineer dinamik analizde; zeminin rijit olması durumu için baraj memba yüzeyinde elde edilen yerdeğiştirmeler ile rezervuardaki su yüksekliğinin 120, 100, 80, 60 ve 40 m olması durumu için baraj kretinde elde edilen yerdeğiştirmelerin dinamik etki süresince değişimi



Şekil 3.25. Lineer dinamik analizde; zeminin rijit ve rezervuardaki su yüksekliğinin 120, 100, 80, 60 ve 40 m olması durumu için Tip-5 kemer barajının E-E kesitinde x-x, y-y ve z-z doğrultusunda elde edilen memba yüzeyi maksimum çekme gerilmelerinin sağ yamaçtan sol yamaca doğru değişimi

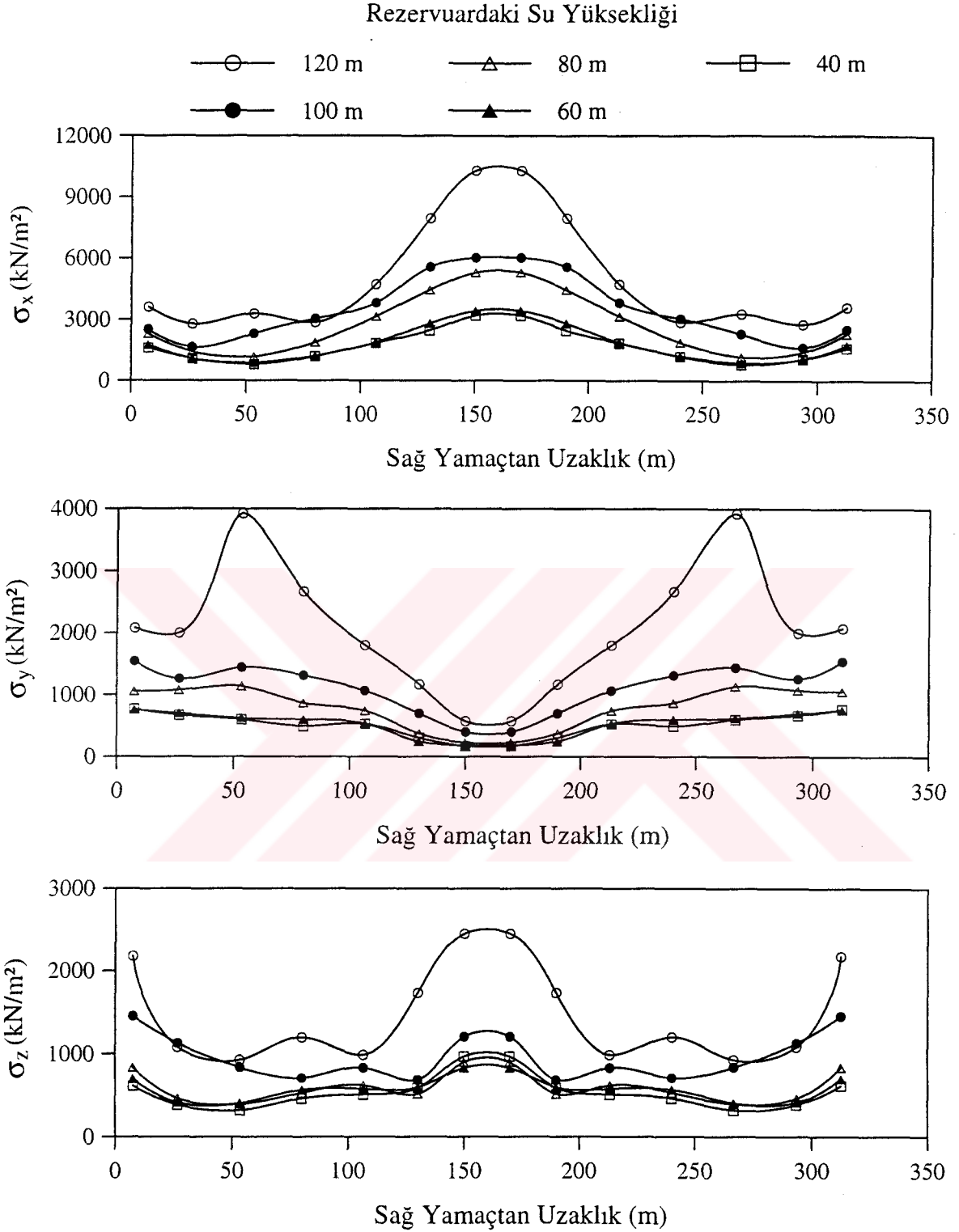


Şekil 3.26. Lineer dinamik analizde; zeminin rijit ve rezervuardaki su yüksekliğinin 120, 100, 80, 60 ve 40 m olması durumu için Tip-5 kemer barajının E-E kesitinde x-x, y-y ve z-z doğrultusunda elde edilen mansap yüzeyi maksimum çekme gerilmelerinin sağ yamaçtan sol yamaca doğru değişimi

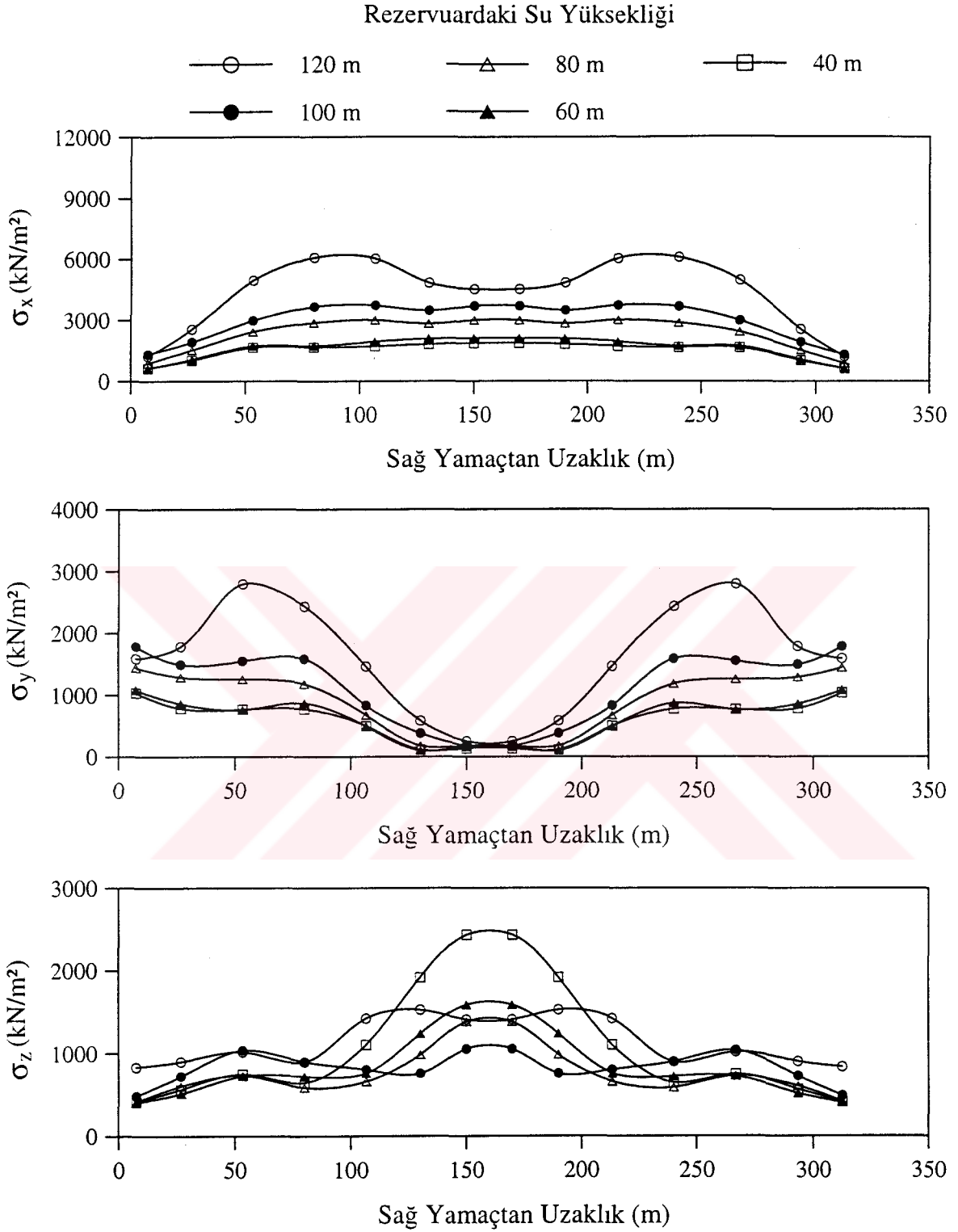


Şekil 3.27. Lineer dinamik analizde; zeminin esnek olması durumu için baraj memba yüzeyinde elde edilen yerdeğiştirmeler ile rezervuardaki su yüksekliğinin 120, 100, 80, 60 ve 40 m olması durumu için baraj kretinde elde edilen yerdeğiştirmelerin dinamik etki süresince değişimi





Şekil 3.28. Lineer dinamik analizde; zeminin esnek ve rezervuardaki su yüksekliğinin 120, 100, 80, 60 ve 40 m olması durumu için Tip-5 kemer barajının E-E kesitinde x-x, y-y ve z-z doğrultusunda elde edilen memba yüzeyi maksimum çekme gerilmelerinin sağ yamaçtan sol yamaca doğru değişimi



Şekil 3.29. Lineer dinamik analizde; zeminin esnek ve rezervuardaki su yüksekliğinin 120, 100, 80, 60 ve 40 m olması durumu için Tip-5 kemer barajının E-E kesitinde x-x, y-y ve z-z doğrultusunda elde edilen mansap yüzeyi maksimum çekme gerilmelerinin sağ yamaçtan sol yamaca doğru değişimi

### 3.3. Eğri Tanımlama Modeli ile Lineer Olmayan Analiz Sonuçlarının Değerlendirilmesi

Tip-5 kemer barajının Eğri Tanımlama modeli ile lineer olmayan dinamik davranışına rezervuardaki suyun etkisi, Lagrange yaklaşımı kullanılarak incelenmektedir. Kemer barajın su ile olan etkileşimi, zeminin rijit ve esnek olması durumları için ayrı ayrı göz önüne alınmıştır. Analizler sonucu, baraj kretinde yerdeğiştirmeler, baraj-su ara yüzeyinde hidrodinamik basınçlar ve barajın memba ve mansap yüzeyinde maksimum çekme gerilmeleri elde edilmiştir. Burada verilen tüm gerilmeler elemanın geometrik merkezindeki değerlerdir. Hidrodinamik basınçlar, Şekil 2.21 ve 2.24'te iki boyutlu olarak verilen baraj-su etkileşim modeli üzerinde belirtilen 408, 296, 199, 118, 53 ve 4 nolu sıvı elemanların Gauss noktalarında elde edilmiştir. Bu basınçlar, 8-düğüm noktalı sıvı eleman için indirgenmiş integrasyon derecesi ( $1 \times 1 \times 1$ ) olduğundan, her elemanda bir adet bulunan Gauss noktasındaki değerlerdir. Bu Gauss noktası, sıvı elemanın geometrik merkezinde bulunmaktadır. Barajın Eğri Tanımlama modeli ile lineer olmayan dinamik davranışına rezervuardaki suyun etkisi, rezervuarın boş ve dolu olması durumları ayrı ayrı dikkate alınarak incelenmiş ve elde edilen sonuçlar aşağıda verilmiştir.

#### 3.3.1. Rijit Zemin Durumunda Baraj-Su Etkileşimi

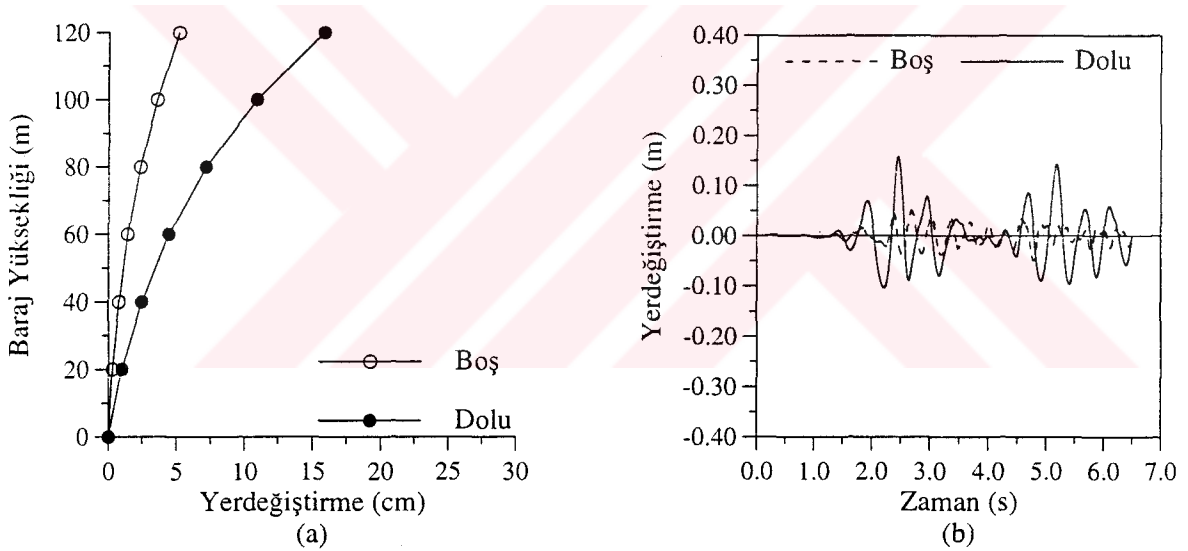
Bu kısımda, Tip-5 kemer barajının Eğri Tanımlama modeli ile lineer olmayan dinamik davranışına rezervuardaki suyun etkisi, zeminin rijit olması durumu için rezervuarın boş ve dolu olması hali dikkate alınarak incelenmektedir. Bunun için, Şekil 2.19 ve 2.20'de verilen sonlu eleman modelleri kullanılmıştır. Analizler sonucu elde edilen yerdeğiştirme, hidrodinamik basınç ve gerilmeler aşağıda ayrıntılı olarak verilmektedir.

##### 3.3.1.1. Yerdeğiştirmeler

Rijit zemin durumunda, kemer barajın Eğri Tanımlama modeli ile lineer olmayan dinamik analizi sonucu barajda oluşan yerdeğiştirmelere rezervuardaki suyun etkisi, barajın memba yüzeyinde elde edilen yerdeğiştirmelerin mutlak değerce maksimum değerlerinin baraj yüksekliği boyunca değişimi ve baraj kret yerdeğiştirmelerinin dinamik etki süresince değişimi belirlenerek incelenmiştir.

Kemer baraj anahtar kesitinin memba yüzeyinde, memba-mansap doğrultusunda elde edilen yerdeğiştirmelerin mutlak değerce maksimum değerlerinin baraj yüksekliği boyunca değişimi Şekil 3.30(a)'da verilmiştir. Bu yerdeğiştirmeler, yüksekliğe bağlı olarak artmakta ve baraj kretinde en bđyđk değeri almaktadır. Baraj kretinin mutlak değerce maksimum yerdeğiştirmesi, rezervuarın boş olması durumu için 5.15 cm, dolu olması durumu için 15.84 cm olarak elde edilmiştir. Buna gđre; Eğri Tanımlama modeli ile lineer olmayan dinamik analizde zeminin rijit olması durumu için baraj-su etkileşimi, baraj kret yerdeğiştirmesini rezervuarın boş olması haline gđre %208 artırmıştır.

Şekil 3.30(b)'de, rijit zemin durumu için rezervuarın boş ve dolu olması durumunda baraj kretinde memba-mansap doğrultusunda elde edilen yerdeğiştirmelerin dinamik etki sđresince değişimi verilmiştir. Bu Şekiller incelendiğinde, kemer barajın lineer olmayan davranışına rezervuardaki suyun etkisinin bđyđk olduğu gđrđlmektedir.



Şekil 3.30. Eğri Tanımlama modeli ile lineer olmayan dinamik analizde; zeminin rijit, rezervuarın boş ve dolu olması durumu için baraj memba yüzeyinde elde edilen yerdeğiştirmeler ile baraj kretinde elde edilen yerdeğiştirmelerin dinamik etki sđresince değişimi

### 3.3.1.2. Hidrodinamik Basınçlar

Şekil 2.20'de sonlu eleman modeli verilen kemer baraja ait baraj-su etkileşim sisteminin Eğri Tanımlama modeli ile lineer olmayan dinamik analizi sonucu, baraj-su ara yüzeyinde elde edilen hidrodinamik basınçlar Şekil 3.31'de verilmiştir. Lineer analizde olduğu gibi, hidrodinamik basınçlar su yüzeyinden rezervuar tabanına doğru artmaktadır.

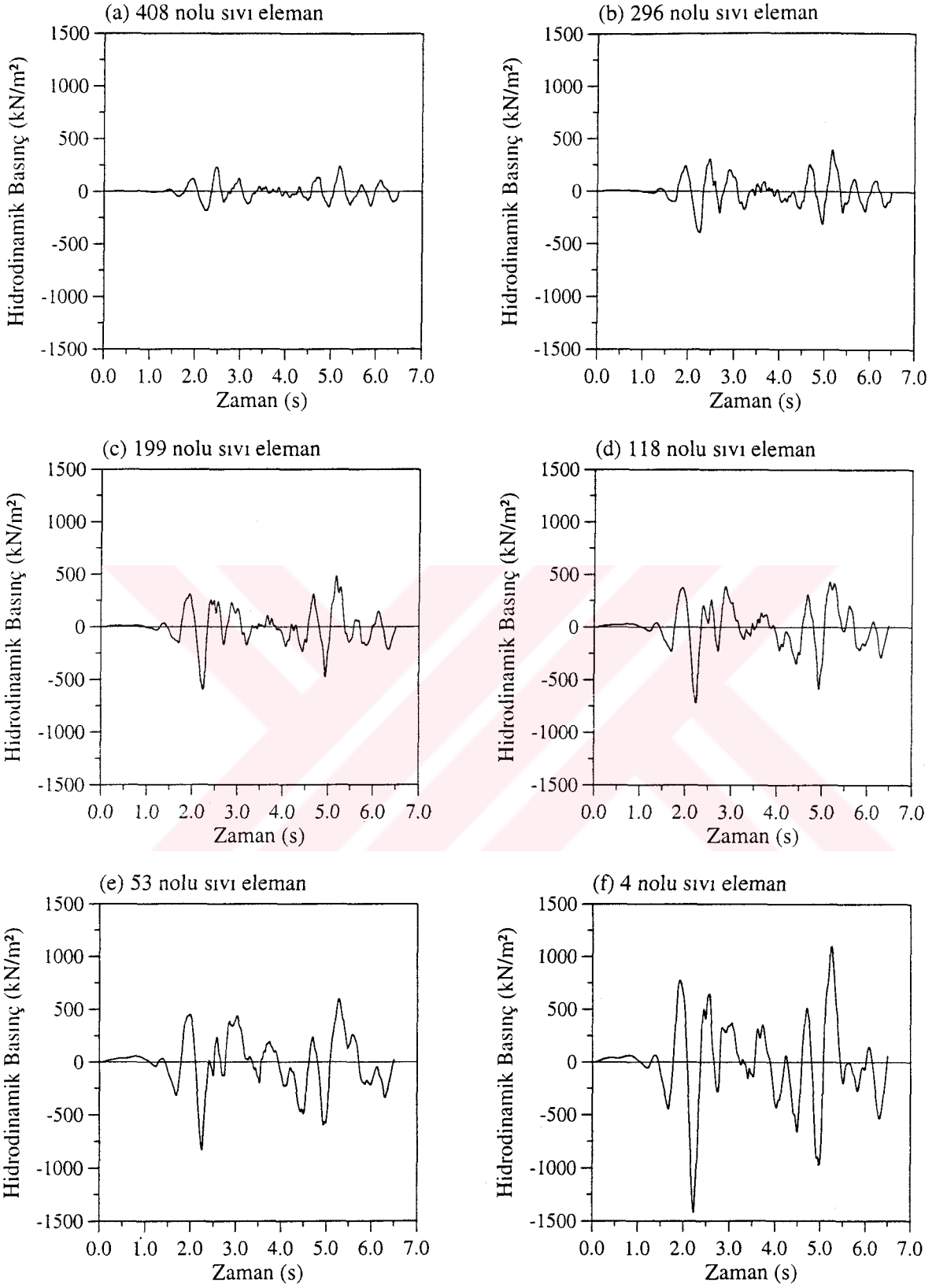
Öyle ki, mutlak değerce maksimum hidrodinamik basınç sıvı yüzey elemanında (408 nolu eleman)  $243 \text{ kN/m}^2$  iken, rezervuar tabanındaki sıvı elemanda (4 nolu eleman)  $1420 \text{ kN/m}^2$  değerine ulaşmaktadır.

### 3.3.1.3. Gerilmeler

Rijit zemin durumunda kemer barajın Eğri Tanımlama modeli ile lineer olmayan dinamik analizi sonucu, kemer barajda x-x, y-y ve z-z doğrultusunda oluşan gerilmelere rezervuardaki suyun etkisi, barajın memba ve mansap yüzeyi için sadece maksimum çekme gerilmeleri dikkate alınarak incelenmiştir. Minimum basınç gerilmeleri, beton basınç mukavemetinin altında kaldığı için verilmemiştir. Şekil 3.32 ile 3.34 arasında bu gerilmeler, rezervuarın boş ve dolu olması durumu için ayrı ayrı çizilmiştir.. Bu gerilmeler, eş gerilme eğrileri şeklinde gösterilmiştir.

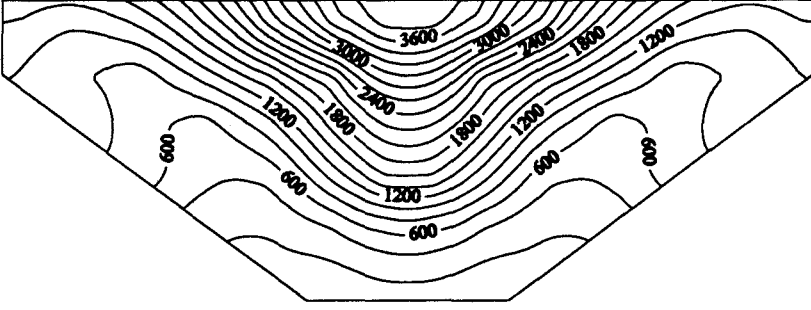
*Baraj memba yüzeyi maksimum çekme gerilmeleri;* x-x yönünde rezervuarın boş olması durumu için  $3846 \text{ kN/m}^2$ , dolu olması durumu için  $11015 \text{ kN/m}^2$ ; y-y yönünde rezervuarın boş olması durumu için  $970 \text{ kN/m}^2$ , dolu olması durumu için  $3609 \text{ kN/m}^2$ ; z-z yönünde rezervuarın boş olması durumu için  $1525 \text{ kN/m}^2$ , dolu olması durumu için  $5359 \text{ kN/m}^2$  şeklinde elde edilmiştir. Baraj mansap yüzeyi maksimum çekme gerilmeleri ise; x-x yönünde rezervuarın boş olması durumu için  $3184 \text{ kN/m}^2$ , dolu olması durumu için  $6469 \text{ kN/m}^2$ ; y-y yönünde rezervuarın boş olması durumu için  $1417 \text{ kN/m}^2$ , dolu olması durumu için  $3437 \text{ kN/m}^2$ ; z-z yönünde rezervuarın boş olması durumu için  $1189 \text{ kN/m}^2$ , dolu olması durumu için  $1994 \text{ kN/m}^2$  şeklinde elde edilmiştir.

Bu eş gerilme eğrileri incelendiğinde, Eğri Tanımlama modeli ile lineer olmayan dinamik analizde rijit zemin durumu için baraj-su etkileşiminin barajdaki gerilmeleri önemli derecede artırdığı anlaşılmaktadır. Hidrodinamik etkilerden dolayı, barajın memba ve mansap yüzeylerinin büyük kısmı lineer analizde olduğu gibi büyük çekme gerilmelerinin etkisinde kalmıştır. Yine, barajın hem memba hem de mansap yüzeyinde y-y ve z-z yönlerinde oluşan çekme gerilmelerine kıyasla x-x yönündeki çekme gerilmeleri çok daha büyük değerlere ulaşmıştır.

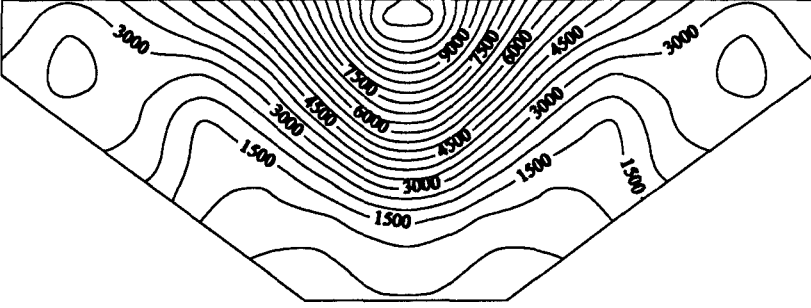


Şekil 3.31. Eğri Tanımlama modeli ile lineer olmayan dinamik analizde; zeminin rijit olması durumu için 408, 296, 199, 118, 53 ve 4 nolu sıvı elemanlarda elde edilen hidrodinamik basınçların dinamik etki süresince değişimi

Rezervuar Boş

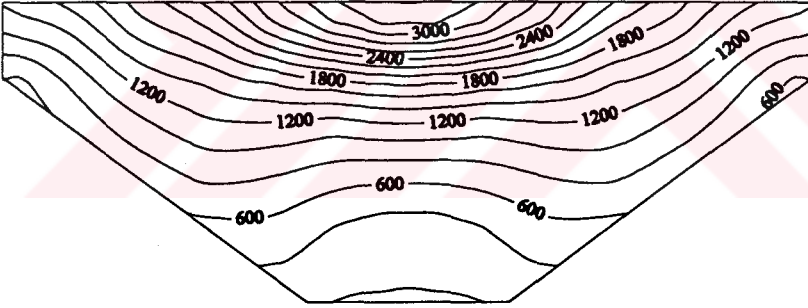


Rezervuar Dolu

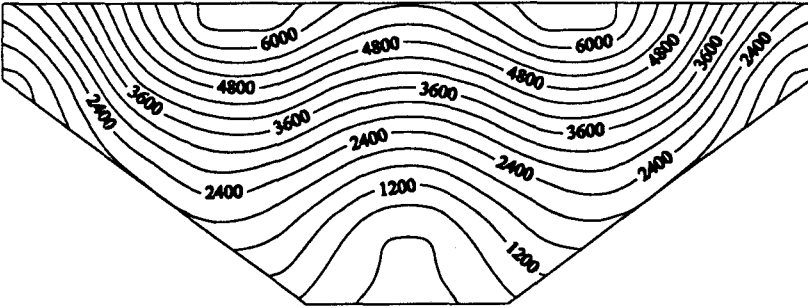


MEMBA YÜZEYİ, Gerilme Birimi:  $\text{kN/m}^2$

Rezervuar Boş



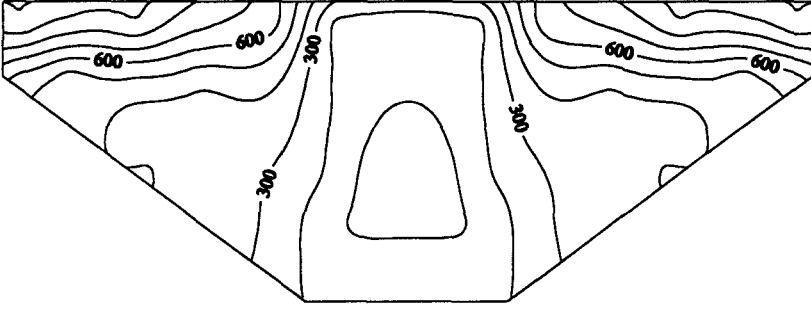
Rezervuar Dolu



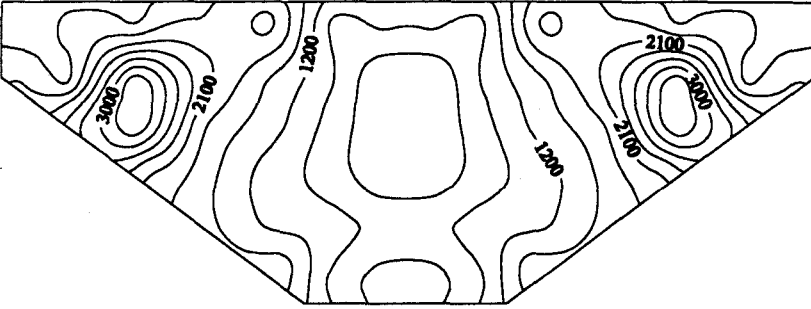
MANSAP YÜZEYİ, Gerilme Birimi:  $\text{kN/m}^2$

Şekil 3.32. Eğri Tanımlama modeli ile lineer olmayan dinamik analizde; zeminin rijit, rezervuarın boş ve dolu olması durumu için barajın memba ve mansap yüzeyinde x-x doğrultusunda elde edilen maksimum çekme eş gerilme eğrileri

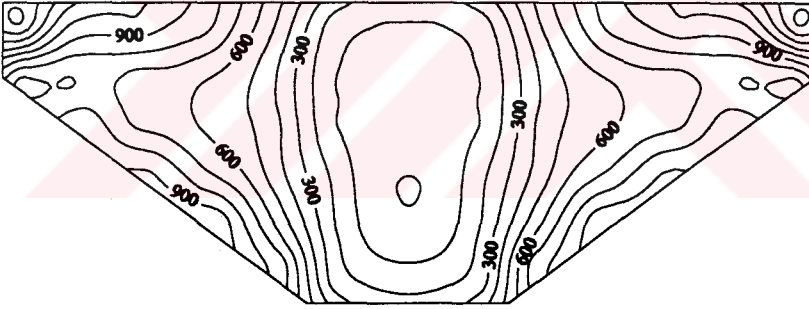
Rezervuar Boş



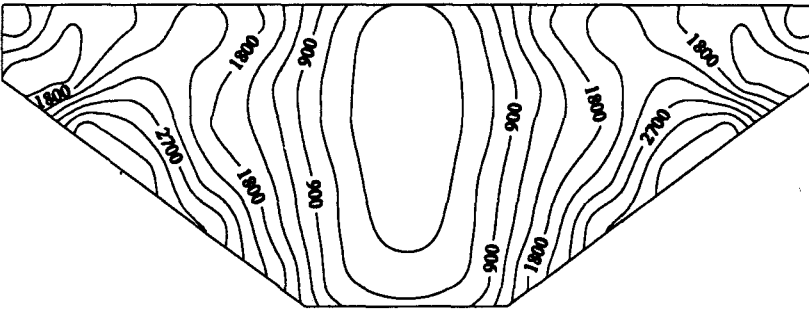
Rezervuar Dolu

MEMBA YÜZEYİ, Gerilme Birimi:  $\text{kN/m}^2$ 

Rezervuar Boş



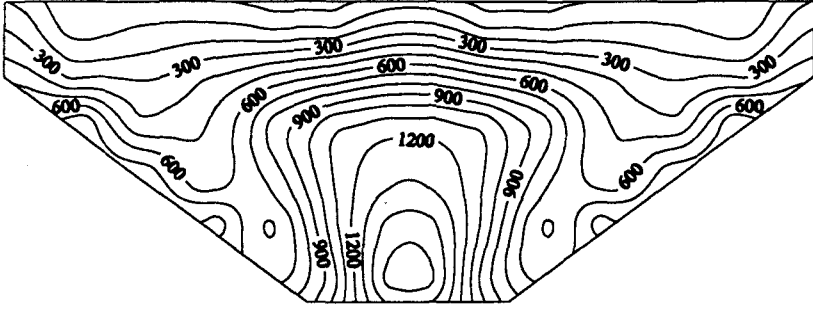
Rezervuar Dolu

MANSAP YÜZEYİ, Gerilme Birimi:  $\text{kN/m}^2$ 

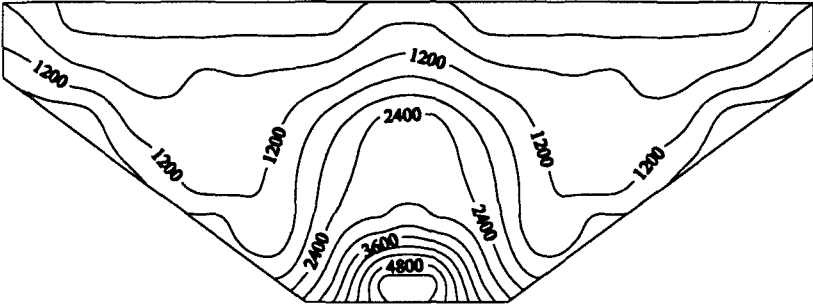
Şekil 3.33. Eğri Tanımlama modeli ile lineer olmayan dinamik analizde; zeminin rijit, rezervuarın boş ve dolu olması durumu için barajın memba ve mansap yüzeyinde y-y doğrultusunda elde edilen maksimum çekme eş gerilme eğrileri



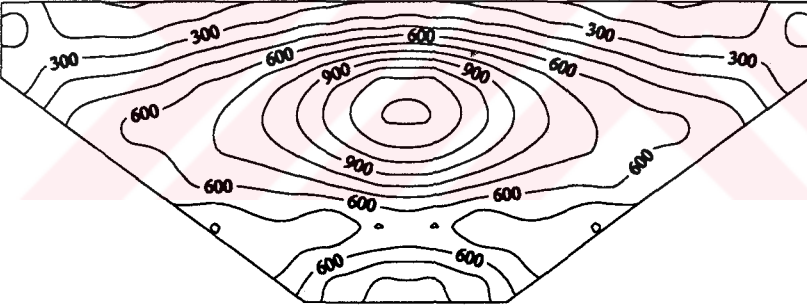
Rezervuar Boş



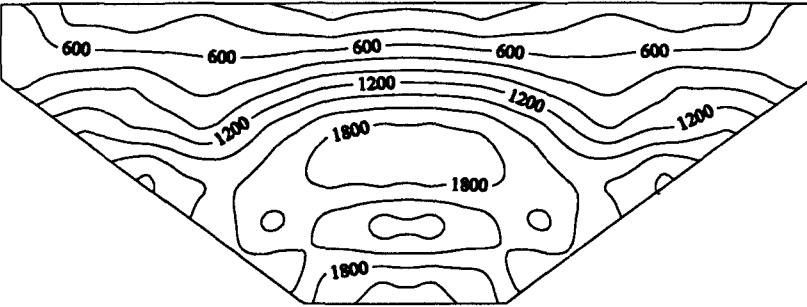
Rezervuar Dolu

MEMBA YÜZEYİ, Gerilme Birimi:  $\text{kN/m}^2$ 

Rezervuar Boş



Rezervuar Dolu

MANSAP YÜZEYİ, Gerilme Birimi:  $\text{kN/m}^2$ 

Şekil 3.34. Eğri Tanımlama modeli ile lineer olmayan dinamik analizde; zeminin rijit, rezervuarın boş ve dolu olması durumu için barajın memba ve mansap yüzeyinde z-z doğrultusunda elde edilen maksimum çekme eş gerilme eğrileri

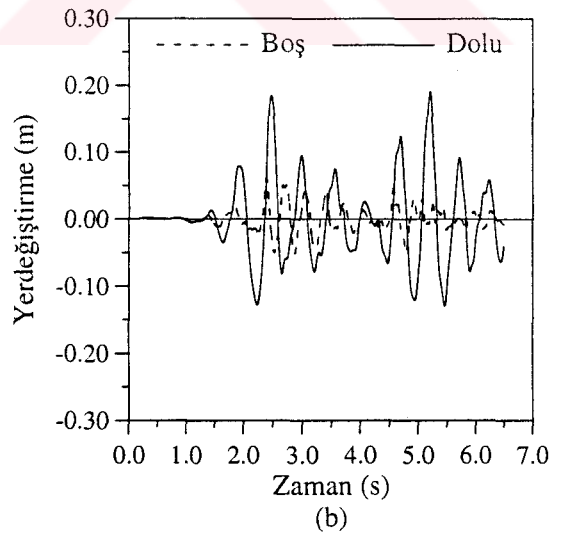
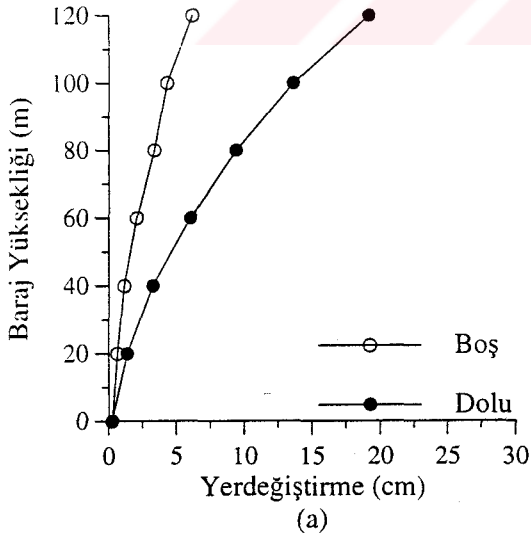
### 3.3.2. Esnek Zemin Durumunda Baraj-Su Etkileşimi

Bu kısımda, Tip-5 kemer barajının Eğri Tanımlama modeli ile lineer olmayan dinamik davranışına rezervuardaki suyun etkisi, zeminin esnek olması durumu için rezervuarın boş ve dolu olması hali dikkate alınarak incelenmektedir. Bunun için, Şekil 2.22 ve 2.23'te verilen sonlu eleman modelleri kullanılmıştır. Analizler sonucu elde edilen yerdeğiştirme, hidrodinamik basınç ve gerilmeler aşağıda ayrıntılı olarak verilmektedir.

#### 3.3.2.1. Yerdeğiştirmeler

Esnek zemin durumunda kemer barajın Eğri Tanımlama modeli ile lineer olmayan dinamik analizi sonucu, barajda oluşan yerdeğiştirmelere rezervuardaki suyun etkisi, barajın memba yüzeyinde elde edilen yerdeğiştirmelerin mutlak değerce maksimum değerlerinin baraj yüksekliği boyunca değişimi ve baraj kret yerdeğiştirmelerinin dinamik etki süresince değişimi belirlenerek incelenmiştir.

Kemer baraj anahtar kesitinin memba yüzeyinde, memba-mansap doğrultusunda elde edilen yerdeğiştirmelerin mutlak değerce maksimum değerlerinin baraj yüksekliği boyunca değişimi Şekil 3.35(a)'da verilmiştir.



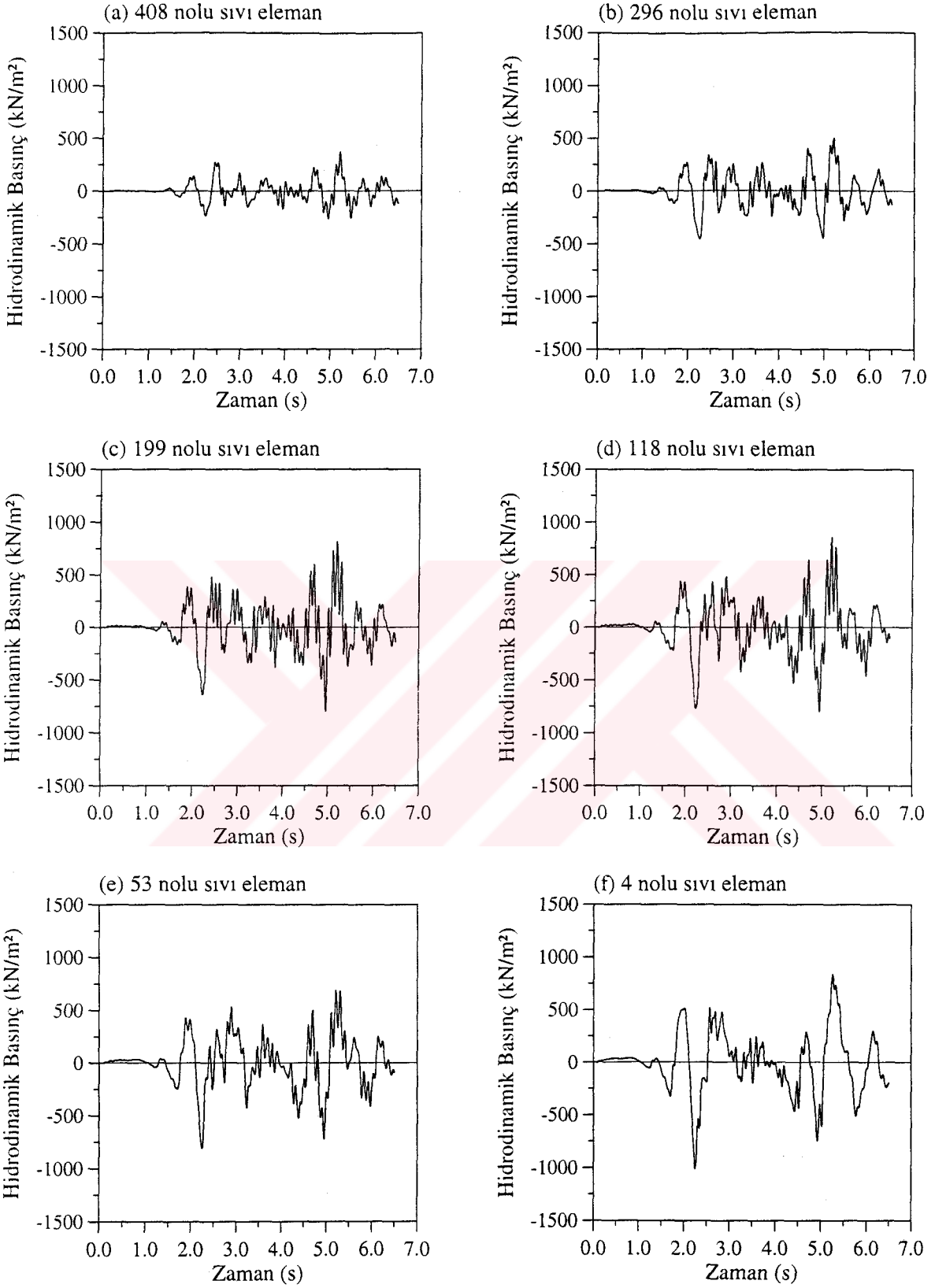
Şekil 3.35. Eğri Tanımlama modeli ile lineer olmayan dinamik analizde; zeminin esnek, rezervuarın boş ve dolu olması durumu için baraj memba yüzeyinde elde edilen yerdeğiştirmeler ile baraj kretinde elde edilen yerdeğiştirmelerin dinamik etki süresince değişimi

Baraj kretinin mutlak değerce maksimum yerdeğiştirmesi, rezervuarın boş olması durumu için 6.15 cm, dolu olması durumu için 19.13 cm olarak elde edilmiştir. Buna göre; Eğri Tanımlama modeli ile lineer olmayan dinamik analizde zeminin esnek olması durumu için baraj-su etkileşimi, baraj kret yerdeğiştirmesini rezervuarın boş olması haline göre %211 artırmıştır.

Şekil 3.35(b)'de rezervuarın boş ve dolu olması durumunda esnek zemin durumunda baraj kretinde (Şekil 2.24'te 617 nolu dn.) memba-mansap doğrultusunda elde edilen yerdeğiştirmelerin dinamik etki süresince değişimi verilmiştir. Bu şekiller incelendiğinde, rijit zemin durumunda olduğu gibi kemer baraj davranışına rezervuardaki suyun etkisinin büyük olduğu görülmektedir.

### 3.3.2.2. Hidrodinamik Basınçlar

Şekil 2.23'te sonlu eleman modeli verilen kemer baraja ait baraj-su-zemin etkileşim sisteminin Eğri Tanımlama modeli ile lineer olmayan dinamik analizi sonucu baraj-su ara yüzeyinde elde edilen hidrodinamik basınçlar Şekil 3.36'da verilmiştir. Lineer analizde olduğu gibi, hidrodinamik basınçlarda su yüzeyinden rezervuar tabanına doğru farklılıklar gözlenmektedir. Öyle ki, mutlak değerce maksimum hidrodinamik basınç sıvı yüzey elemanında (408 nolu eleman)  $370 \text{ kN/m}^2$  iken, rezervuar tabanındaki sıvı elemanda (4 nolu eleman)  $1010 \text{ kN/m}^2$  değerine ulaşmaktadır. Lineer analizdekine benzer şekilde, sıvı yüzey elemanında elde edilen hidrodinamik basınç değerinde rijit zemin durumuna göre %52'lik bir artış söz konusu iken, tabandaki sıvı elemanda %41'lik bir azalma görülmüştür. Ayrıca, rijit zemin durumunda elde edilen hidrodinamik basınçların frekans içeriği açısından esnek zemin durumu ile karşılaştırıldığında, zemin esnekliği basınçların frekans içeriklerini değiştirdiği görülmektedir.



Şekil 3.36. Eğri Tanımlama modeli ile lineer olmayan dinamik analizde; zeminin esnek olması durumu için 408, 296, 199, 118, 53 ve 4 nolu sıvı elemanlarda elde edilen hidrodinamik basınçların dinamik etki süresince değişimi

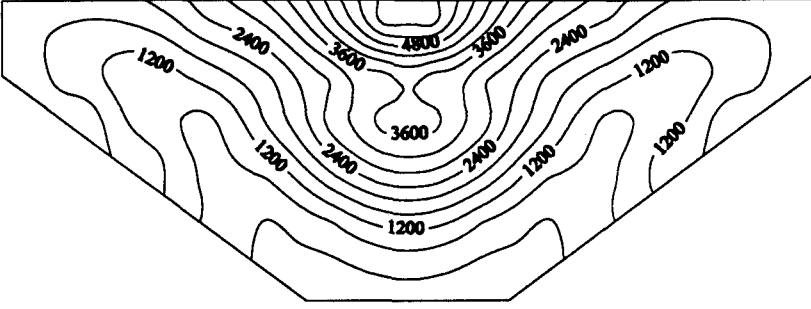
### 3.3.2.3. Gerilmeler

Esnek zemin durumunda kemer barajın Eğri Tanımlama modeli ile lineer olmayan dinamik analizi sonucu, kemer barajda x-x, y-y ve z-z doğrultusunda oluşan gerilmelere rezervuardaki suyun etkisi, barajın memba ve mansap yüzeyi için sadece maksimum çekme gerilmeleri dikkate alınarak incelenmiştir. Minimum basınç gerilmeleri, beton basınç mukavemetinin altında kaldığı için verilmemiştir. Şekil 3.37 ile 3.39 arasında bu gerilmeler, rezervuarın boş ve dolu olması durumu için ayrı ayrı çizilmiştir. Bu gerilmeler, eş gerilme eğrileri şeklinde gösterilmiştir.

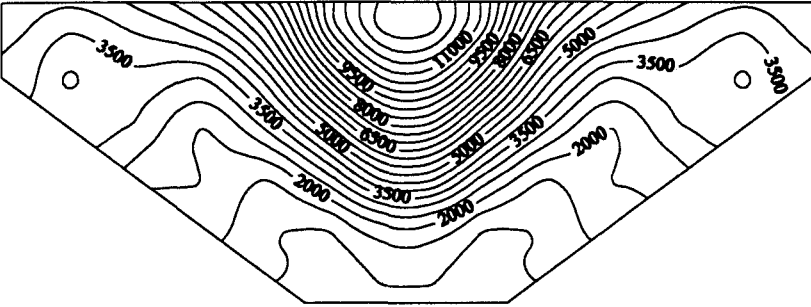
*Baraj memba yüzeyi maksimum çekme gerilmeleri*; x-x yönünde rezervuarın boş olması durumu için  $5697 \text{ kN/m}^2$ , dolu olması durumu için  $12708 \text{ kN/m}^2$ ; y-y yönünde rezervuarın boş olması durumu için  $1732 \text{ kN/m}^2$ , dolu olması durumu için  $3947 \text{ kN/m}^2$ ; z-z yönünde rezervuarın boş olması durumu için  $2260 \text{ kN/m}^2$ , dolu olması durumu için  $5577 \text{ kN/m}^2$  şeklinde elde edilmiştir. Baraj mansap yüzeyi maksimum çekme gerilmeleri ise; x-x yönünde rezervuarın boş olması durumu için  $3679 \text{ kN/m}^2$ , dolu olması durumu için  $8650 \text{ kN/m}^2$ ; y-y yönünde rezervuarın boş olması durumu için  $2629 \text{ kN/m}^2$ , dolu olması durumu için  $3972 \text{ kN/m}^2$ ; z-z yönünde rezervuarın boş olması durumu için  $2759 \text{ kN/m}^2$ , dolu olması durumu için  $2847 \text{ kN/m}^2$  şeklinde elde edilmiştir.

Bu eş gerilme eğrileri incelendiğinde, Eğri Tanımlama modeli ile lineer olmayan dinamik analizde esnek zemin durumu için baraj-su etkileşiminin barajdaki gerilmeleri önemli derecede artırdığı anlaşılmaktadır. Hidrodinamik etkilerden dolayı, barajın memba ve mansap yüzeylerinin büyük kısmı lineer analizde olduğu gibi büyük çekme gerilmelerinin etkisinde kalmıştır. Yine, barajın hem memba hem de mansap yüzeyinde y-y ve z-z yönlerinde oluşan çekme gerilmelerine kıyasla x-x yönündeki çekme gerilmeleri çok daha büyük değerlere ulaşmıştır.

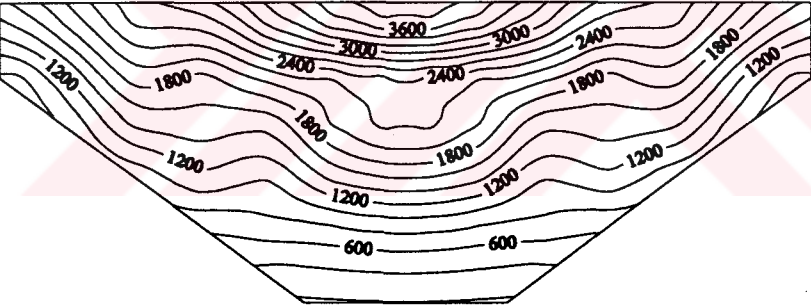
Rezervuar Boş



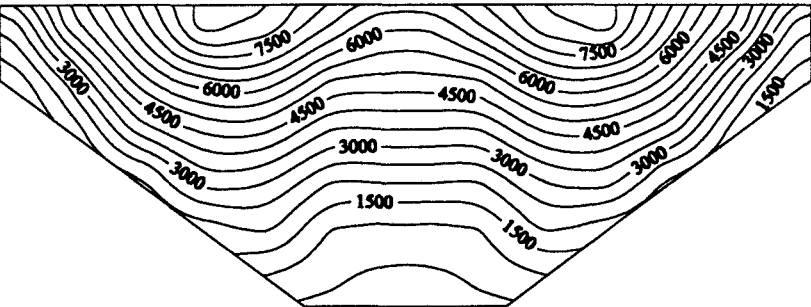
Rezervuar Dolu

MEMBA YÜZEYİ, Gerilme Birimi:  $\text{kN/m}^2$ 

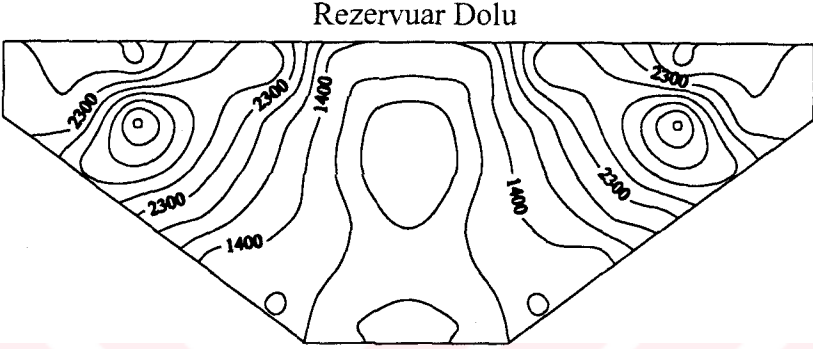
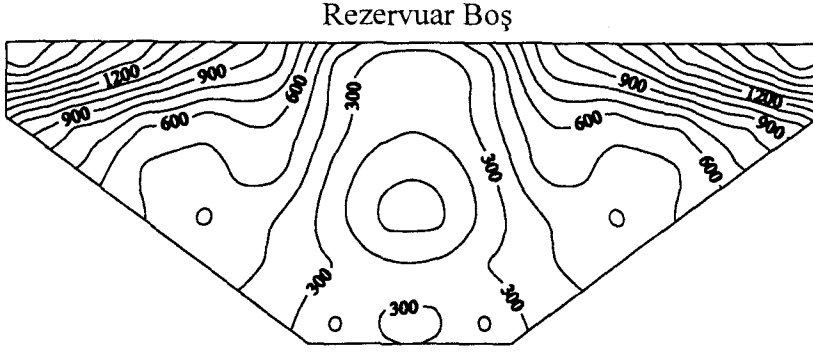
Rezervuar Boş



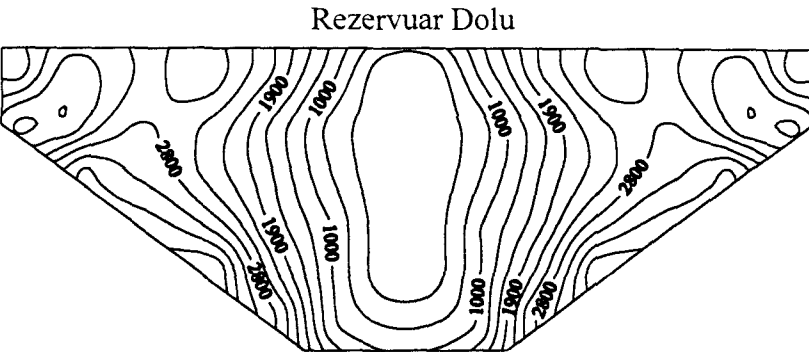
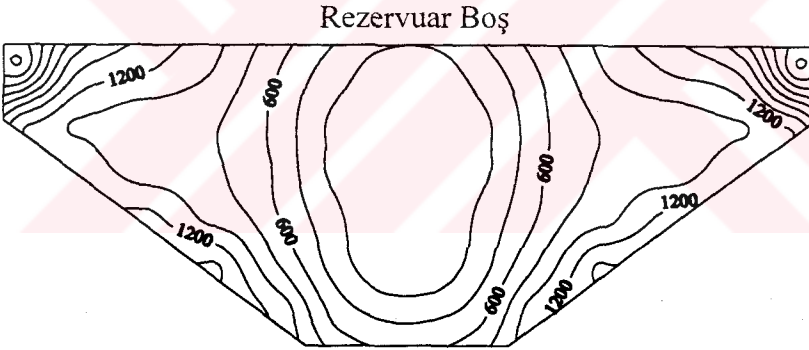
Rezervuar Dolu

MANSAP YÜZEYİ, Gerilme Birimi:  $\text{kN/m}^2$ 

Şekil 3.37. Eğri Tanımlama modeli ile lineer olmayan dinamik analizde; zeminin esnek, rezervuarın boş ve dolu olması durumu için barajın memba ve mansap yüzeyinde x-x doğrultusunda elde edilen maksimum çekme eş gerilme eğrileri



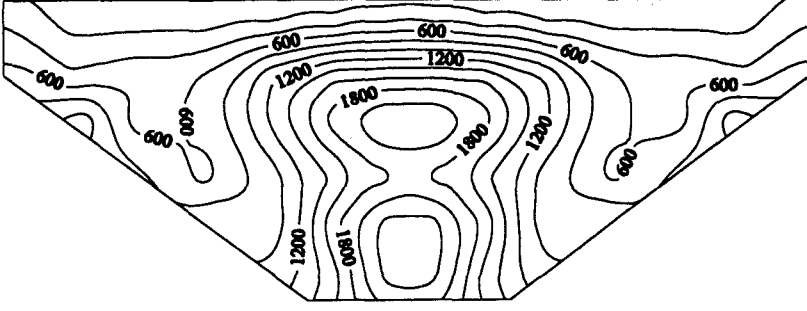
MEMBA YÜZEYİ, Gerilme Birimi:  $\text{kN/m}^2$



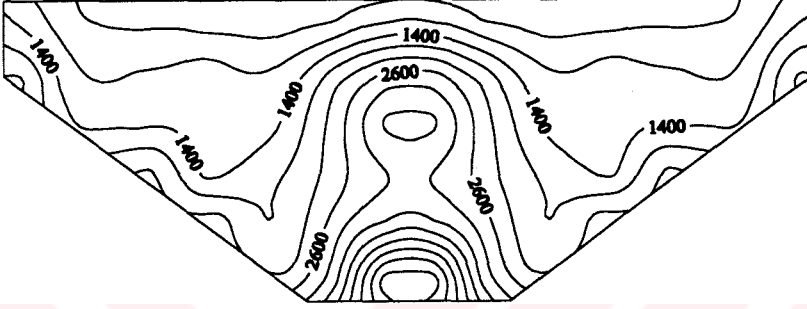
MANSAP YÜZEYİ, Gerilme Birimi:  $\text{kN/m}^2$

Şekil 3.38. Eğri Tanımlama modeli ile lineer olmayan dinamik analizde; zeminin esnek, rezervuarın boş ve dolu olması durumu için barajın memba ve mansap yüzeyinde y-y doğrultusunda elde edilen maksimum çekme eş gerilme eğrileri

Rezervuar Boş

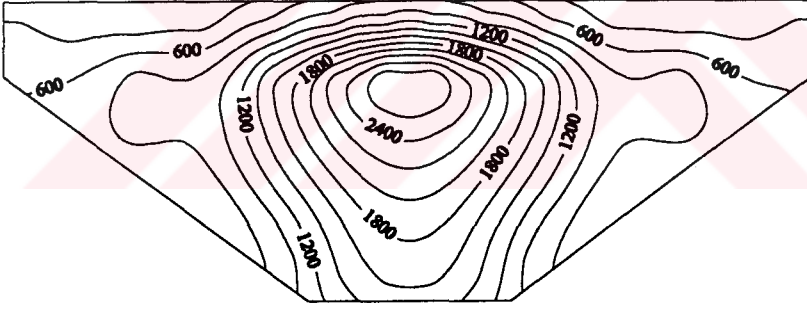


Rezervuar Dolu

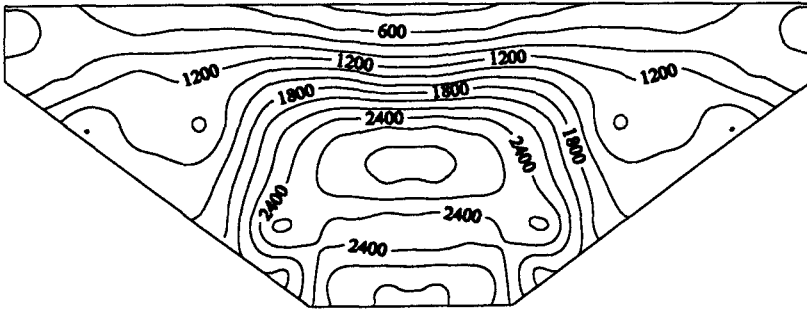


**MEMBA YÜZEYİ, Gerilme Birimi:  $\text{kN/m}^2$**

Rezervuar Boş



Rezervuar Dolu



**MANSAP YÜZEYİ, Gerilme Birimi:  $\text{kN/m}^2$**

Şekil 3.39. Eğri Tanımlama modeli ile lineer olmayan dinamik analizde; zeminin esnek, rezervuarın boş ve dolu olması durumu için barajın memba ve mansap yüzeyinde z-z doğrultusunda elde edilen maksimum çekme eş gerilme eğrileri



### 3.3.3. Kaya Zemin Özelliklerinin Kemer Baraj Davranışına Etkisi

Bu kısımda; lineer analizde olduğu gibi Eğri Tanımlama modeli ile lineer olmayan dinamik analizde de rezervuarın boş ve dolu olması durumu için kaya zemin özelliklerinin Tip-5 kemer baraj davranışına etkisi, parametrik bir çalışma yapılarak incelenmiştir. Kaya zemin elastisite modülünün ( $E_f$ ) baraj betonunun elastisite modülüne ( $E_c$ ) oranı için sonsuz, 2.00, 1.00, 0.50 ve 0.25 değerleri kullanılmıştır. Sonsuz değeri, rijit zemine karşılık gelmektedir. Bu değerler dikkate alınarak, kemer baraj anahtar kesitinin memba yüzeyinde memba-mansap doğrultusunda elde edilen yerdeğiştirmelerin mutlak değerce maksimum değerlerinin baraj yüksekliği boyunca değişimi, baraj kreti (Şekil 2.24'te 617 nolu dn.) yerdeğiştirmelerinin dinamik etki süresince değişimi ve Şekil 3.17'de gösterilen E-E kesitindeki x-x, y-y, ve z-z doğrultusundaki memba ve mansap yüzey gerilmeleri incelenmiştir.

#### 3.3.3.1. Rezervuarın Boş Olması Durumu

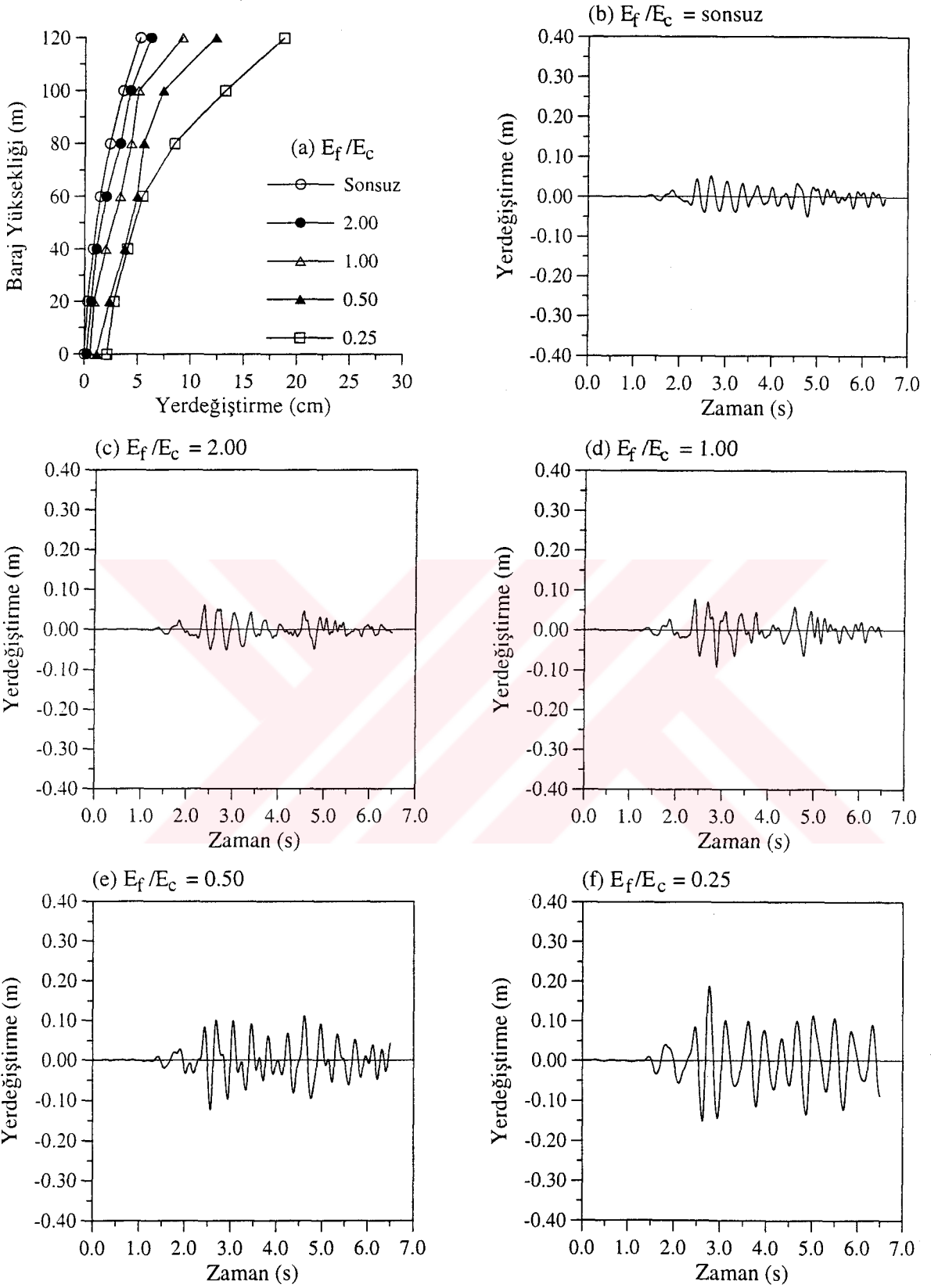
Rezervuarın boş olması durumunda kemer barajın Eğri Tanımlama modeli ile lineer olmayan dinamik davranışına kaya zeminin özelliklerinin etkisini incelemek üzere Şekil 2.22'de verilen sonlu eleman modeli kullanılmıştır. Kemer baraj anahtar kesitinin memba yüzeyinde, memba-mansap doğrultusunda elde edilen yerdeğiştirmelerin mutlak değerce maksimum değerlerinin baraj yüksekliği boyunca değişimi Şekil 3.40(a)'da verilmiştir. Baraj kretinin mutlak değerce maksimum yerdeğiştirmesi,  $E_f/E_c$  oranının sonsuz, 2.00, 1.00, 0.50 ve 0.25 değerleri için sırasıyla 5.15 cm, 6.15 cm, 9.16 cm, 12.27 cm ve 18.72 cm olarak elde edilmiştir. Ayrıca Şekil 3.40'da, dikkate alınan  $E_f/E_c$  oranları için baraj kretinde memba-mansap doğrultusunda elde edilen yerdeğiştirmelerin dinamik etki süresince değişimi verilmiştir. Bu şekiller incelendiğinde, rezervuarın boş olması durumunda kemer barajın lineer olmayan davranışı üzerinde kaya zemin esnekliğinin etkisi açıkça görülmektedir. Esneklik arttıkça kret yerdeğiştirmeleri de artmaktadır.

Şekil 3.41 ve 3.42'de ise,  $E_f/E_c$  oranının sonsuz, 2.00, 1.00, 0.50 ve 0.25 değerleri için Şekil 3.17'de gösterilen E-E kesitinde x-x, y-y ve z-z doğrultusunda elde edilen memba ve mansap yüzeyi maksimum çekme gerilmelerinin sağ yamaçtan sol yamaca doğru değişimi görülmektedir.

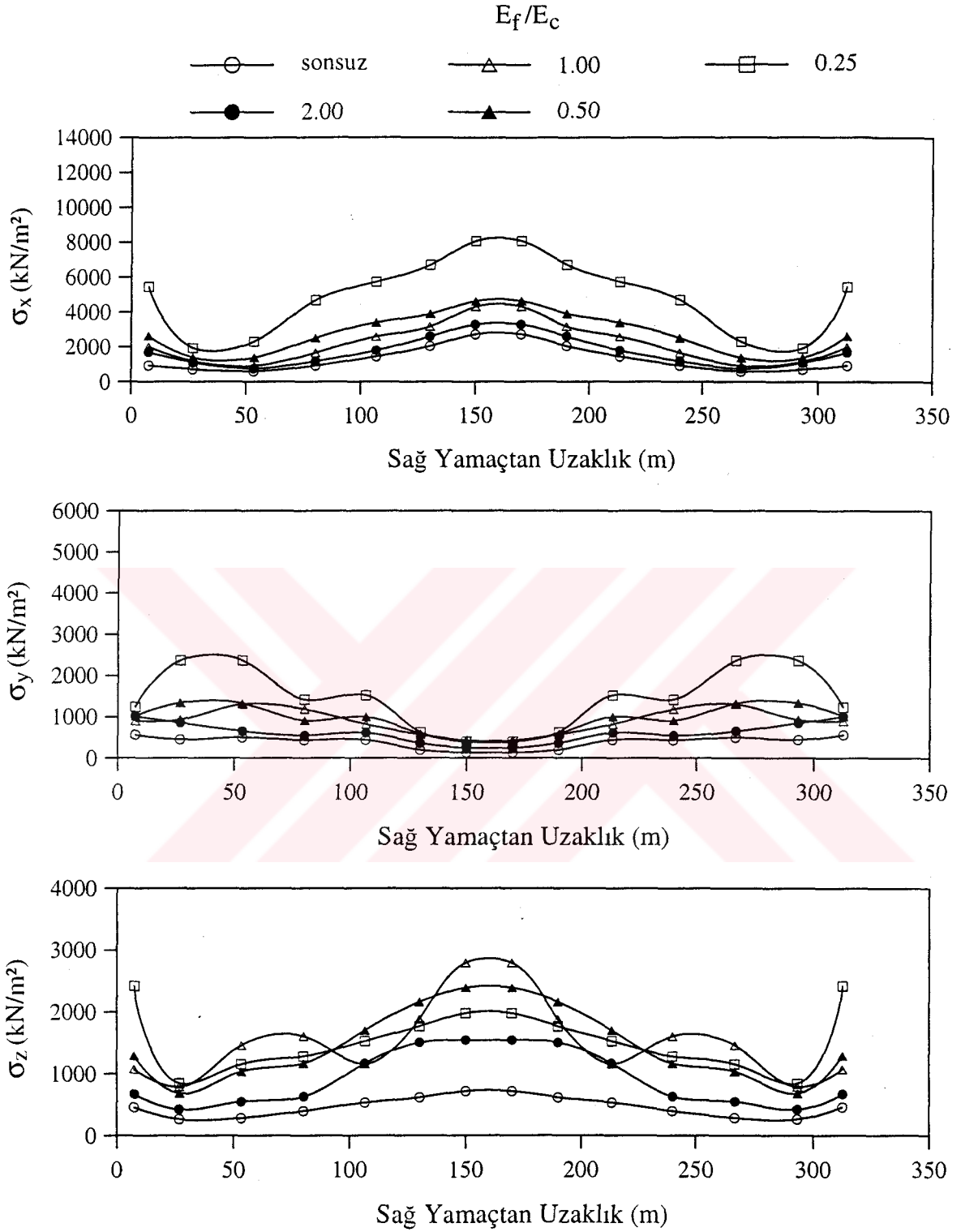
### 3.3.3.2. Rezervuarın Dolu Olması Durumu

Rezervuarın dolu olması durumunda kemer barajın Eğri Tanımlama modeli ile lineer olmayan dinamik davranışına kaya zeminin özelliklerinin etkisini incelemek üzere Şekil 2.23'te verilen sonlu eleman modeli kullanılmıştır. Kemer baraj anahtar kesitinin memba yüzeyinde, memba-mansap doğrultusunda elde edilen yerdeğiştirmelerin mutlak değerce maksimum değerlerinin baraj yüksekliği boyunca değişimi Şekil 3.43(a)'da verilmiştir. Baraj kretinin mutlak değerce maksimum yerdeğiştirmesi,  $E_f/E_c$  oranının sonsuz, 2.00, 1.00, 0.50 ve 0.25 değerleri için sırasıyla 15.84 cm, 19.13 cm, 21.42 cm, 25.68 cm ve 30.51 cm olarak elde edilmiştir. Ayrıca Şekil 3.43'te, dikkate alınan  $E_f/E_c$  oranları için baraj kretinde memba-mansap doğrultusunda elde edilen yerdeğiştirmelerin dinamik etki süresince değişimi verilmiştir. Bu şekiller incelendiğinde, rezervuarın dolu olması durumunda da kemer baraj davranışı üzerinde kaya zemin esnekliğinin etkisi açıkça görölmektedir. Burada da yine zemindeki esneklik arttıka kret yerdeğiştirmeleri artmaktadır.

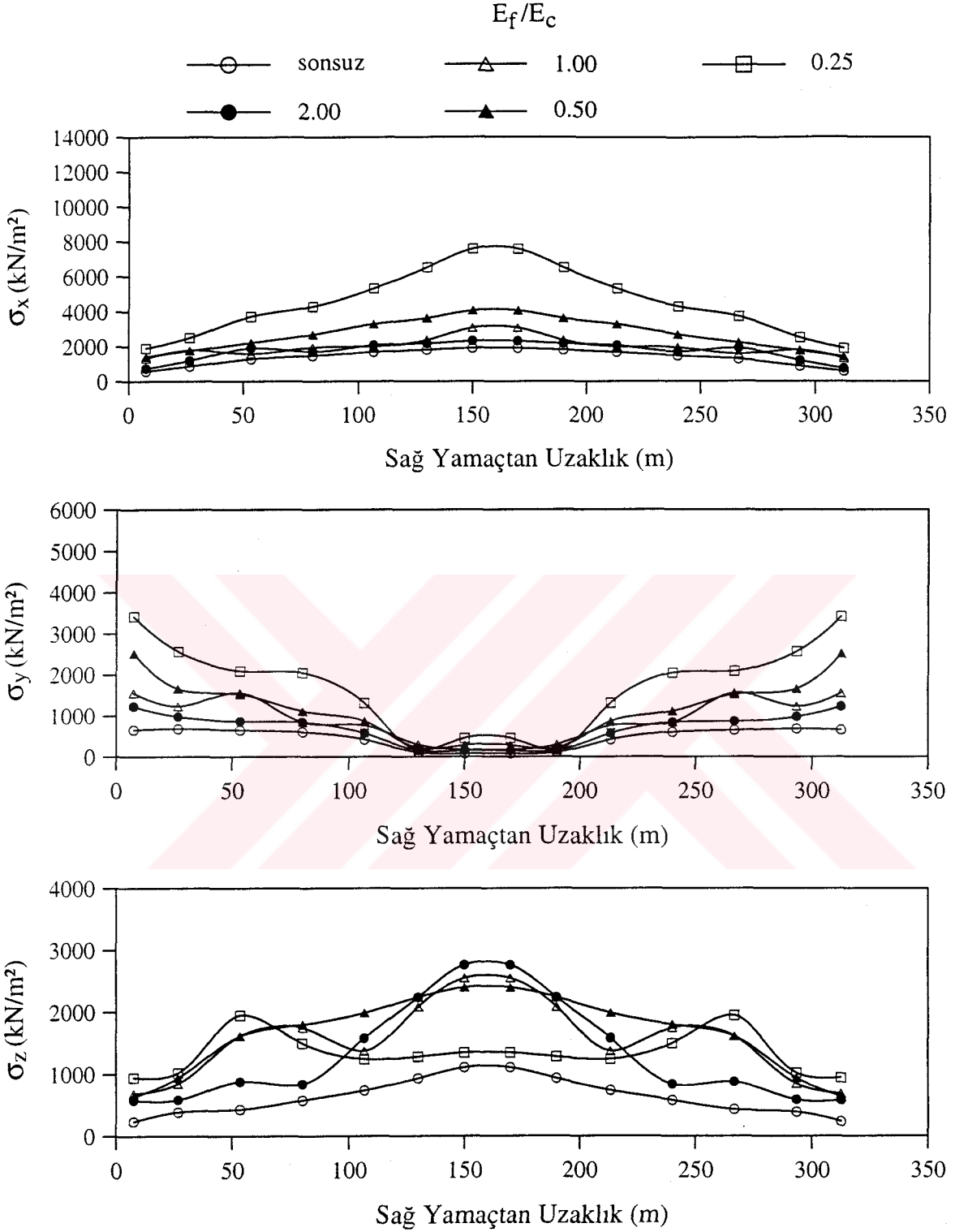
Şekil 3.44 ve 3.45'te ise, dikkate alınan  $E_f/E_c$  oranları için Tip-5 kemer barajının memba ve mansap yüzeyinde x-x, y-y ve z-z eksenleri doğrultusundaki maksimum çekme gerilmelerinin sağ yamaçtan sol yamaca doğru değişimi görölmektedir.



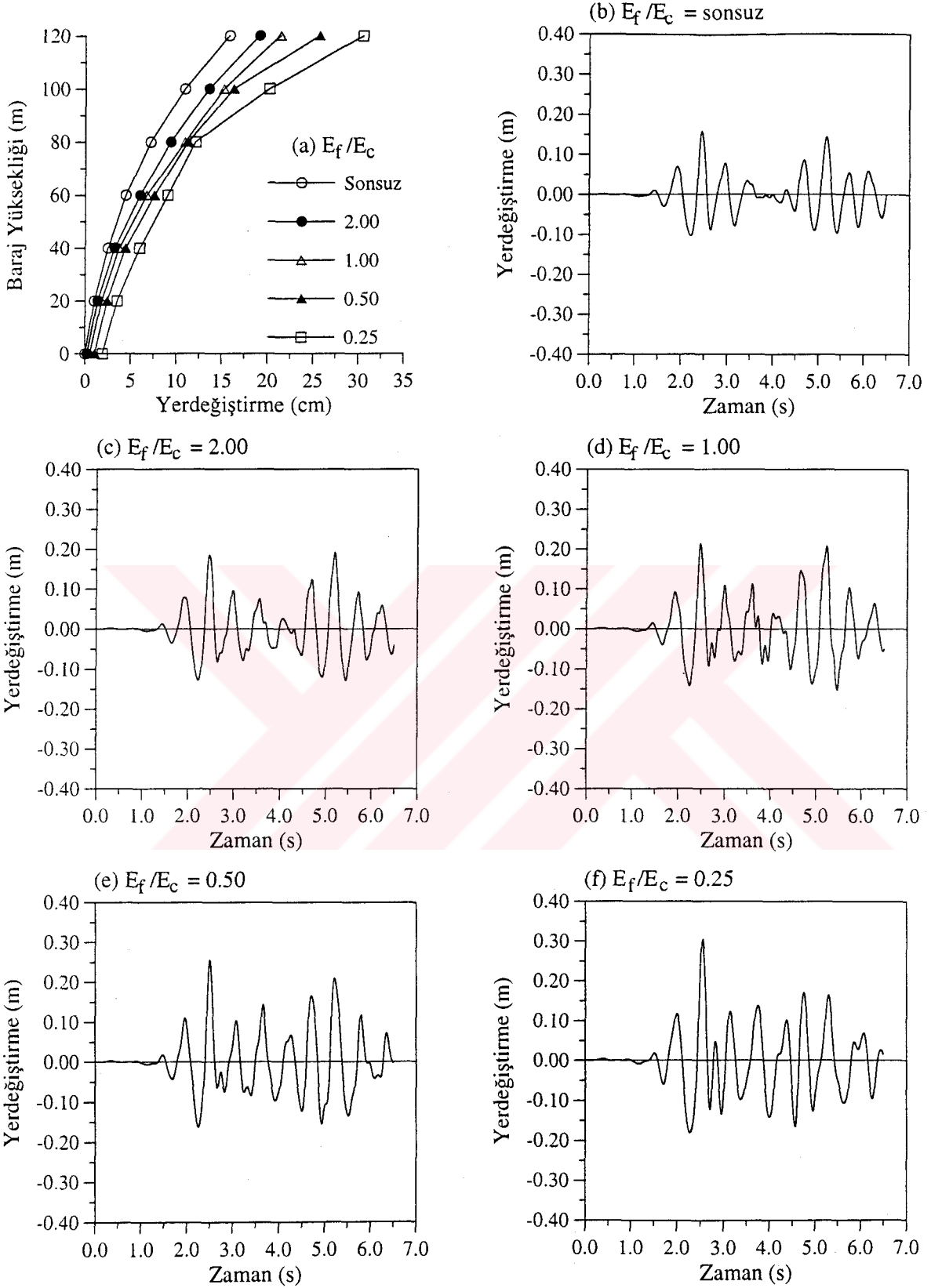
Şekil 3.40. Eğri Tanımlama modeli ile lineer olmayan dinamik analizde; rezervuarın boş olması durumu için baraj memba yüzeyinde elde edilen yerdeğiştirmeler ile  $E_f/E_c$  oranının sonsuz, 2.00, 1.00, 0.50 ve 0.25 değerleri için baraj kretinde elde edilen yerdeğiştirmelerin dinamik etki süresince değişimi



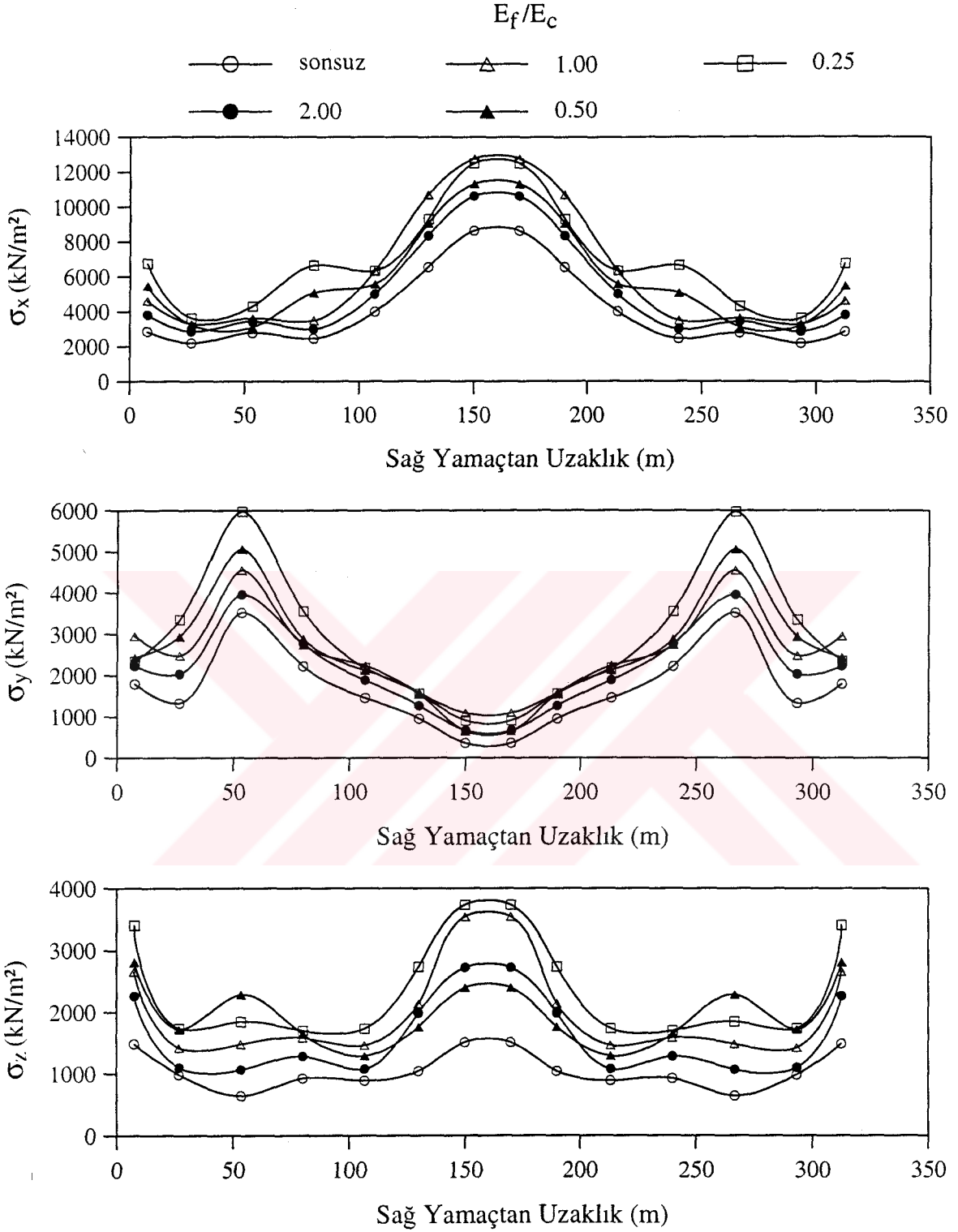
Şekil 3.41. Eğri Tanımlama modeli ile lineer olmayan dinamik analizde; rezervuarın boş ve  $E_f/E_c$  oranının sonsuz, 2.00, 1.00, 0.50 ve 0.25 değerleri için Tip-5 kemer barajının E-E kesitinde x-x, y-y ve z-z doğrultusunda elde edilen memba yüzeyi maksimum çekme gerilmelerinin sağ yamaçtan sol yamaca doğru değişimi



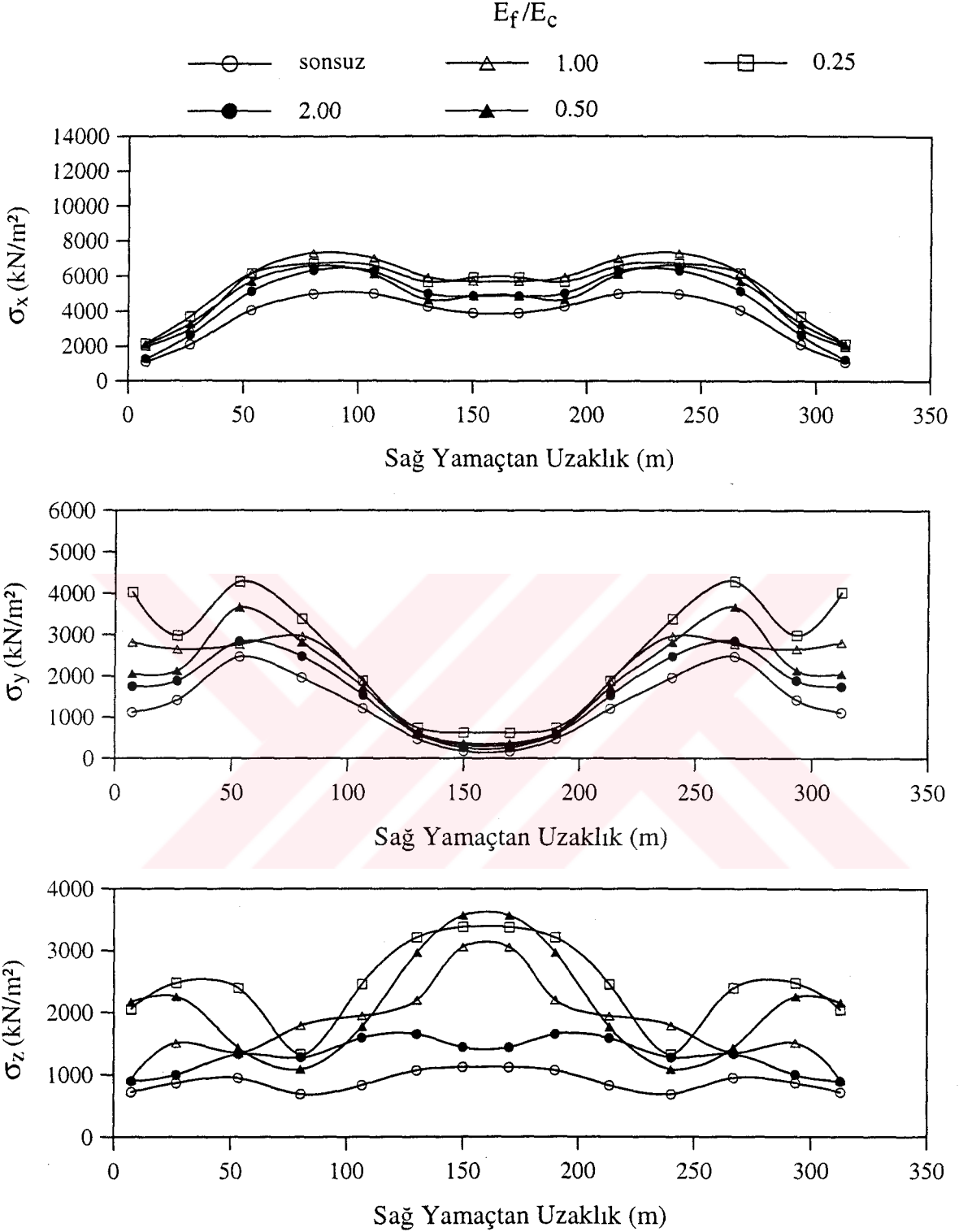
Şekil 3.42. Eğri Tanımlama modeli ile lineer olmayan dinamik analizde; rezervuarın boş ve  $E_f/E_c$  oranının sonsuz, 2.00, 1.00, 0.50 ve 0.25 değerleri için Tip-5 kemer barajının E-E kesitinde x-x, y-y ve z-z doğrultusunda elde edilen mansap yüzeyi maksimum çekme gerilmelerinin sağ yamaçtan sol yamaca doğru değişimi



Şekil 3.43. Eğri Tanımlama modeli ile lineer olmayan dinamik analizde; rezervuarın dolu olması durumu için baraj memba yüzeyinde elde edilen yerdeğiştirmeler ile  $E_f/E_c$  oranının sonsuz, 2.00, 1.00, 0.50 ve 0.25 değerleri için baraj kretinde elde edilen yerdeğiştirmelerin dinamik etki süresince değişimi



Şekil 3.44. Eğri Tanımlama modeli ile lineer olmayan dinamik analizde; rezervuarın dolu ve  $E_f/E_c$  oranının sonsuz, 2.00, 1.00, 0.50 ve 0.25 değerleri için Tip-5 kemer barajının E-E kesitinde x-x, y-y ve z-z doğrultusunda elde edilen memba yüzeyi maksimum çekme gerilmelerinin sağ yamaçtan sol yamaca doğru değişimi



Şekil 3.45. Eğri Tanımlama modeli ile lineer olmayan dinamik analizde; rezervuarın dolu ve  $E_f/E_c$  oranının sonsuz, 2.00, 1.00, 0.50 ve 0.25 değerleri için Tip-5 kemer barajının E-E kesitinde x-x, y-y ve z-z doğrultusunda elde edilen mansap yüzeyi maksimum çekme gerilmelerinin sağ yamaçtan sol yamaca doğru değişimi



### 3.3.4. Rezervuar Su Seviyesindeki Değişimin Kemer Baraj Davranışına Etkisi

Bu kısımda; zeminin rijit ve esnek olması durumu için rezervuardaki su seviyesinin 120, 100, 80, 60 ve 40 m olması dikkate alınarak Tip-5 kemer barajının Eğri Tanımlama modeli ile lineer olmayan dinamik analizi gerçekleştirilmiştir. Bu şekilde kemer baraj davranışına rezervuar su seviyesindeki değişimin etkisi belirlenmeye çalışılmıştır. Yapılan analizler sonucu, barajın anahtar kesitinin memba yüzeyinde memba-mansap doğrultusunda elde edilen yerdeğiştirmelerin mutlak değerce maksimum değerlerinin baraj yüksekliği boyunca değişimi, baraj kret yerdeğiştirmelerinin dinamik etki süresince değişimi ve Şekil 3.17'de gösterilen E-E kesitindeki x-x, y-y, ve z-z doğrultusundaki memba ve mansap yüzey gerilmeleri incelenmiştir.

#### 3.3.4.1. Rijit Zemin Durumu

Rijit zemin durumunda kemer barajın Eğri Tanımlama modeli ile lineer olmayan dinamik davranışına rezervuar su seviyesindeki değişimin etkisini incelemek için Şekil 2.20'deki sonlu eleman modeli kullanılmıştır. Rezervuardaki su seviyesinin 120, 100, 80, 60 ve 40 m olması durumları için kemer baraj anahtar kesitinin memba yüzeyinde, memba-mansap doğrultusunda elde edilen yerdeğiştirmelerin mutlak değerce maksimum değerlerinin baraj yüksekliği boyunca değişimi Şekil 3.46(a)'da verilmiştir. Baraj kretinin mutlak değerce maksimum yerdeğiştirmesi, rezervuardaki su seviyesinin 120, 100, 80, 60 ve 40 m olması durumları için sırasıyla 15.84 cm, 7.80 cm, 6.46 cm, 5.54 cm ve 4.90 cm olarak elde edilmiştir. Görüldüğü gibi, rezervuar su seviyesi azaldıkça baraj-su etkileşiminden dolayı barajın kret yerdeğiştirmesi de azalmaktadır. Şekil 3.46'da, ayrıca rezervuardaki su seviyesinin 120, 100, 80, 60 ve 40 m olması durumları için baraj kretinde (Şekil 2.21'de 162 nolu dn.) memba-mansap doğrultusunda elde edilen yerdeğiştirmelerin dinamik etki süresince değişimi verilmiştir. Şekil 3.47 ve 3.48'de ise, Şekil 3.17'de gösterilen E-E kesitinde x-x, y-y ve z-z doğrultusunda elde edilen memba ve mansap yüzeyi maksimum çekme gerilmelerinin sağ yamaçtan sol yamaca doğru değişimi görülmektedir. Burada verilen gerilme değerleri, eleman orta noktasındaki değerlerdir.

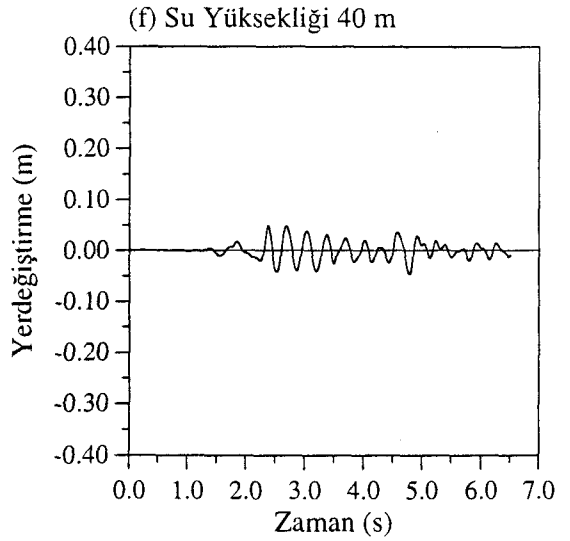
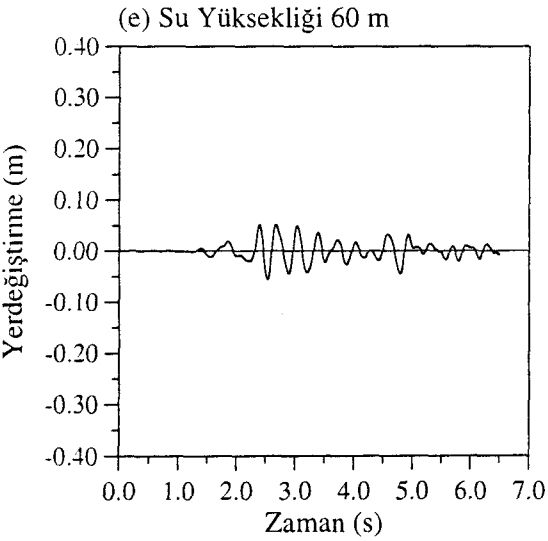
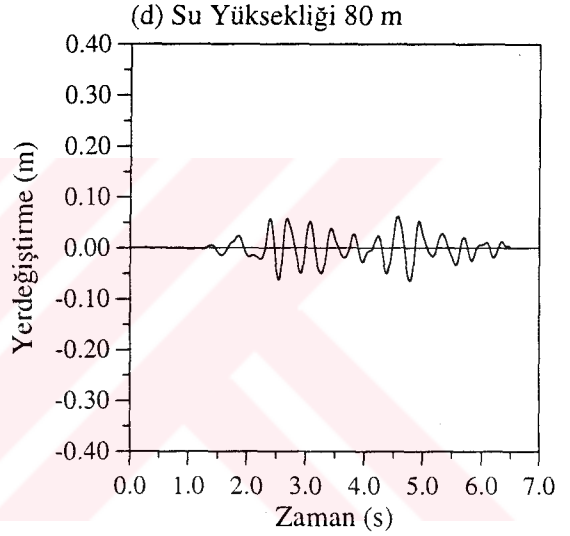
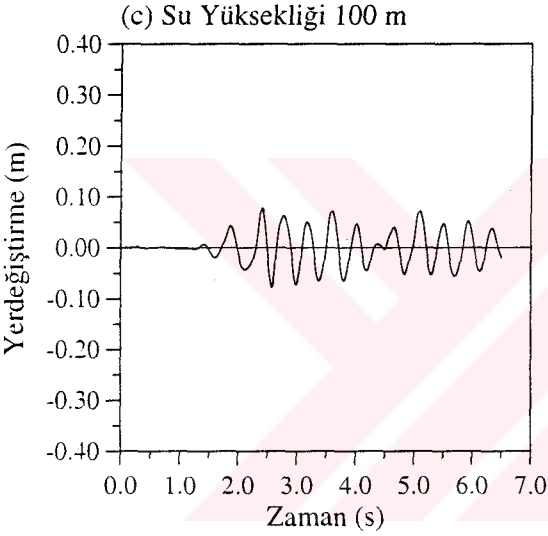
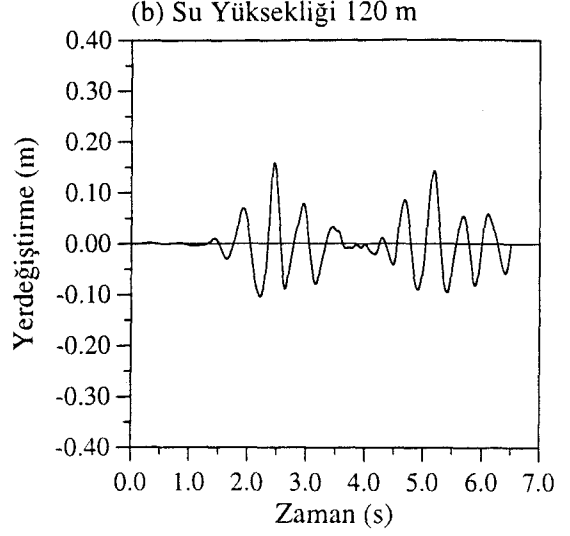
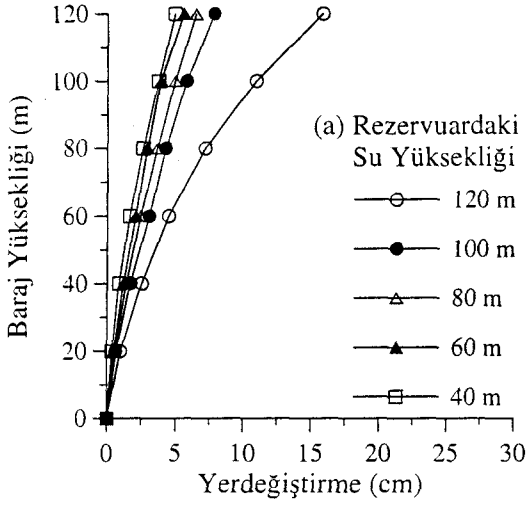
Rijit zemin durumunda rezervuar su seviyesine göre baraj-su etkileşimi, kemer barajın deprem davranışını önemli derecede etkilemiştir. Su seviyesi arttıkça, barajdaki

yerdeğiştirme ve gerilmeler de artmaktadır. Hatta, su seviyesi 60 metreden sonra barajdaki gerilmelerde önemli artışlar olmaktadır.

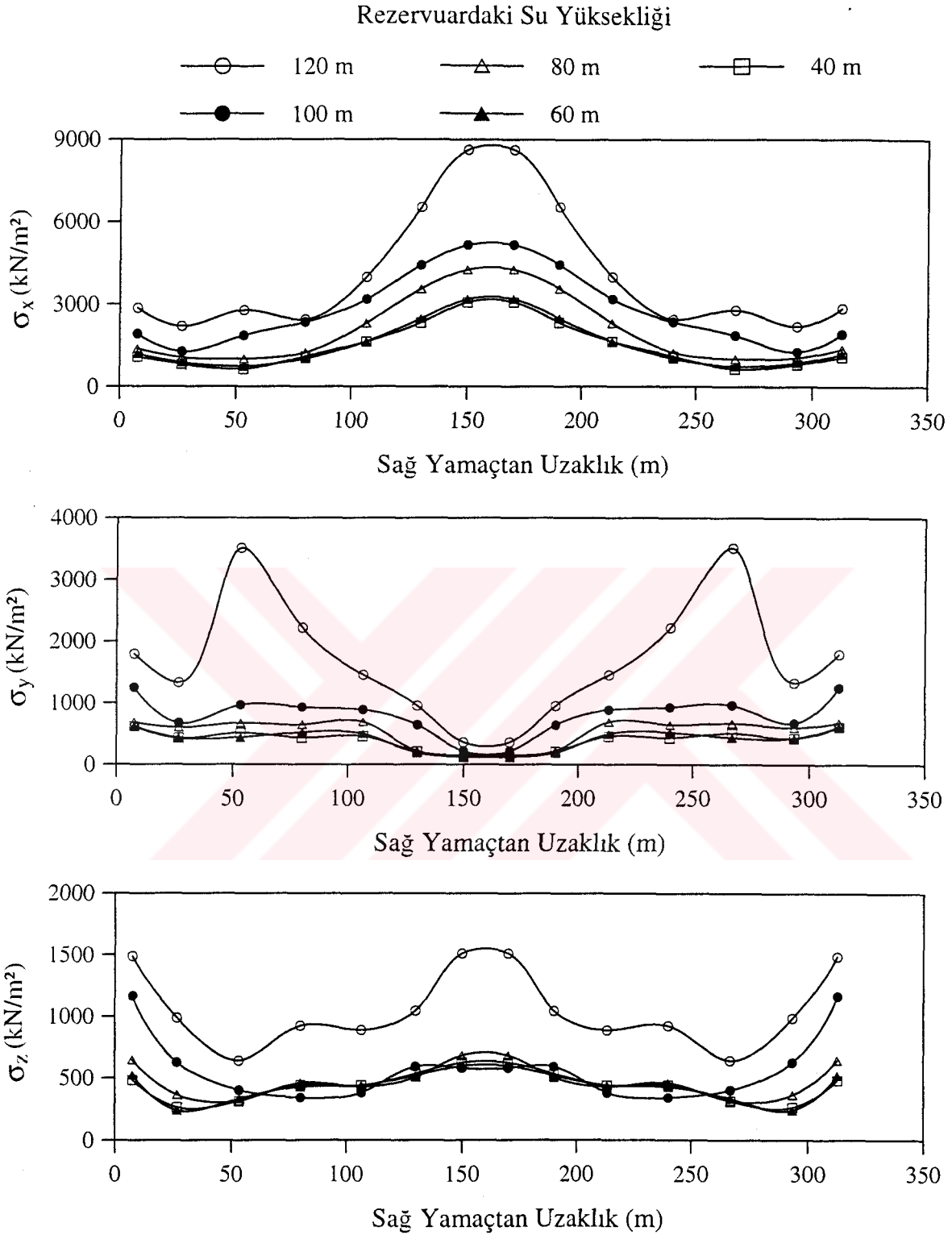
### 3.3.4.2. Esnek Zemin Durumu

Esnek zemin durumunda kemer barajın Eğri Tanımlama modeli ile lineer olmayan dinamik davranışına rezervuar su seviyesindeki değişimin etkisini incelemek için Şekil 2.23'teki rezervuarı tam dolu verilen sonlu eleman modeli kullanılmıştır. Rezervuardaki su seviyesinin 120, 100, 80, 60 ve 40 m olması durumları için kemer baraj anahtar kesitinin memba yüzeyinde, memba-mansap doğrultusunda elde edilen yerdeğiştirmelerin mutlak değerce maksimum değerlerinin baraj yüksekliği boyunca değişimi Şekil 3.49(a)'da verilmiştir. Baraj kretinin mutlak değerce maksimum yerdeğiştirmesi, rezervuardaki su seviyesinin 120, 100, 80, 60 ve 40 m olması durumları için sırasıyla 19.13 cm, 10.68 cm, 9.13 cm, 7.26 cm ve 6.63 cm olarak elde edilmiştir. Görüldüğü gibi, rezervuar su seviyesi azaldıkça baraj-su etkileşiminden dolayı barajın kret yerdeğiştirmesi de azalmaktadır. Şekil 3.49'de, ayrıca rezervuardaki su seviyesinin 120, 100, 80, 60 ve 40 m olması durumları için baraj kretinde (Şekil 2.24'te 617 nolu dn.) memba-mansap doğrultusunda elde edilen yerdeğiştirmelerin dinamik etki süresince değişimi verilmiştir. Şekil 3.50 ve 3.51'de ise Şekil 3.17'de gösterilen E-E kesitinde x-x, y-y ve z-z doğrultusunda elde edilen memba ve mansap yüzeyi maksimum çekme gerilmelerinin sağ yamaçtan sol yamaca doğru değişimi görülmektedir. Burada verilen gerilme değerleri, eleman orta noktasındaki değerlerdir.

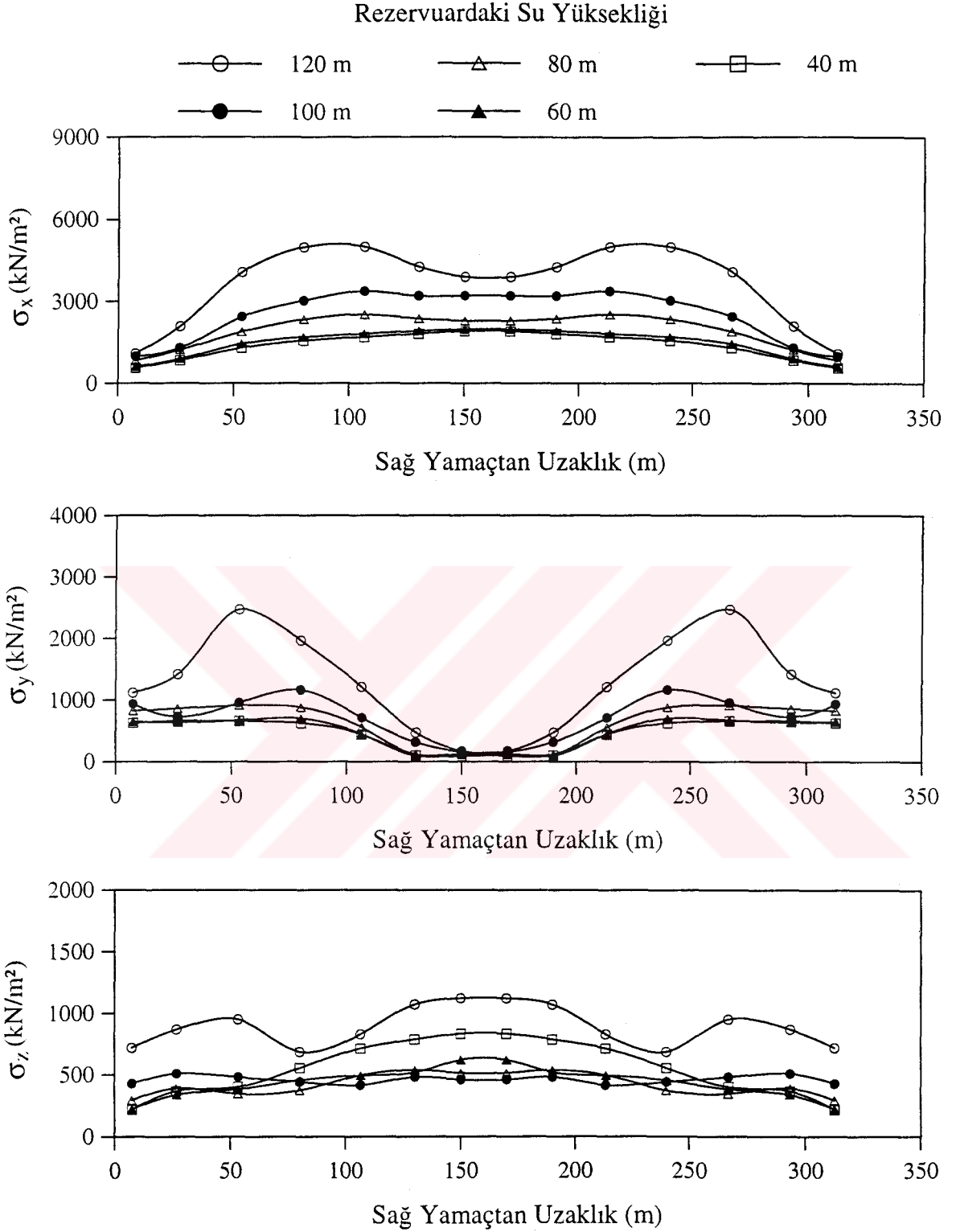
Esnek zemin durumunda da rijit zemin durumunda olduğı gibi, rezervuar su seviyesine göre baraj-su etkileşimi kemer barajların deprem davranışını önemli derecede etkilemiştir.

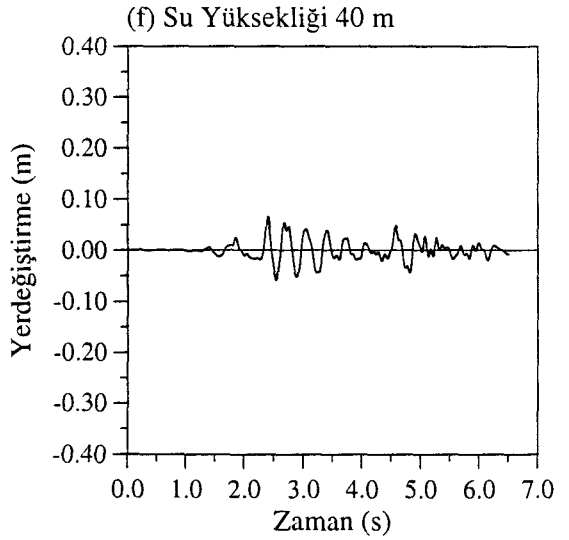
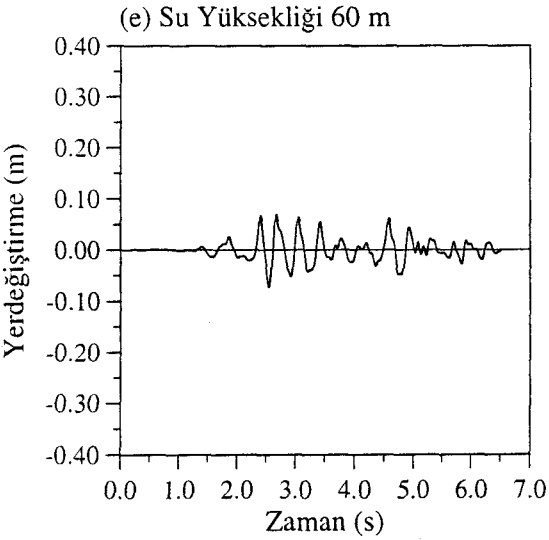
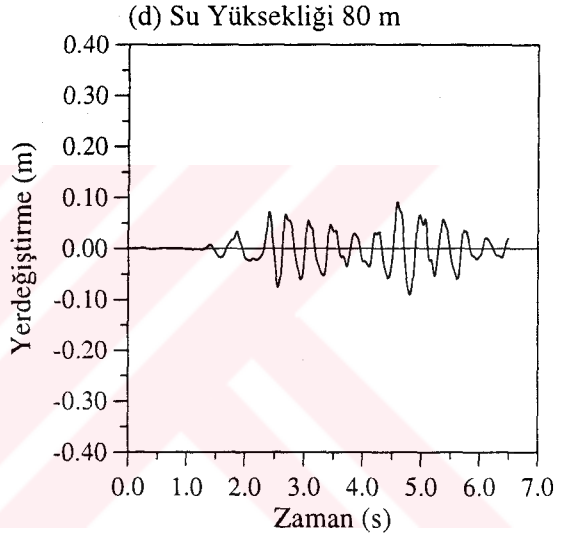
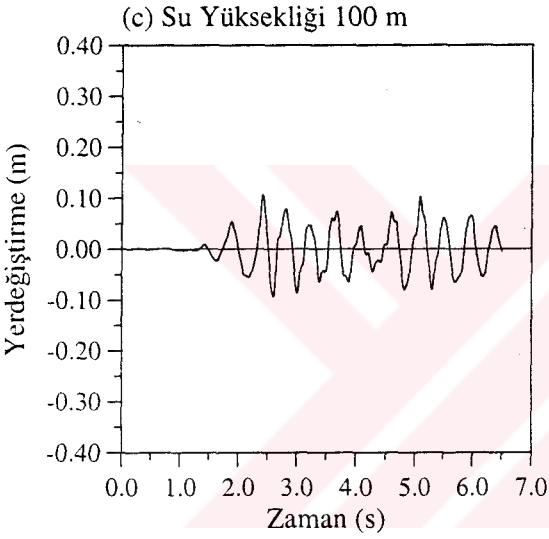
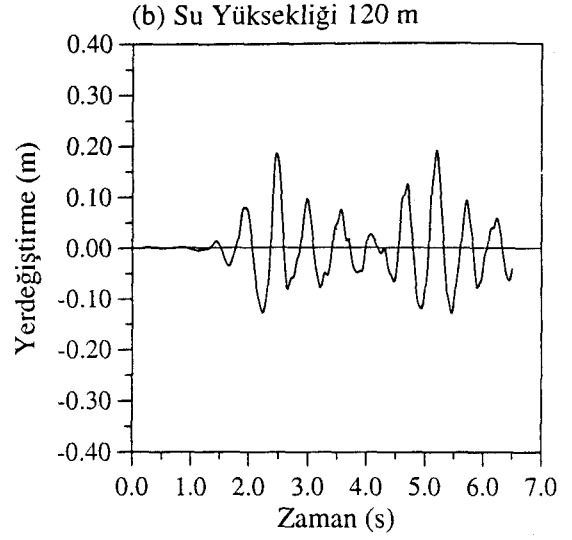
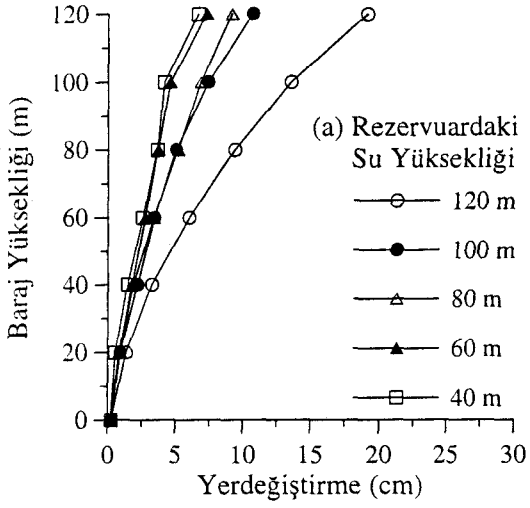


Şekil 3.46. Eğri Tanımlama modeli ile lineer olmayan dinamik analizde; zeminin rijit olması durumu için baraj memba yüzeyinde elde edilen yerdeğiştirmeler ile rezervuardaki su yüksekliğinin 120, 100, 80, 60 ve 40 m olması durumu için baraj kretinde elde edilen yerdeğiştirmelerin dinamik etki süresince değişimi

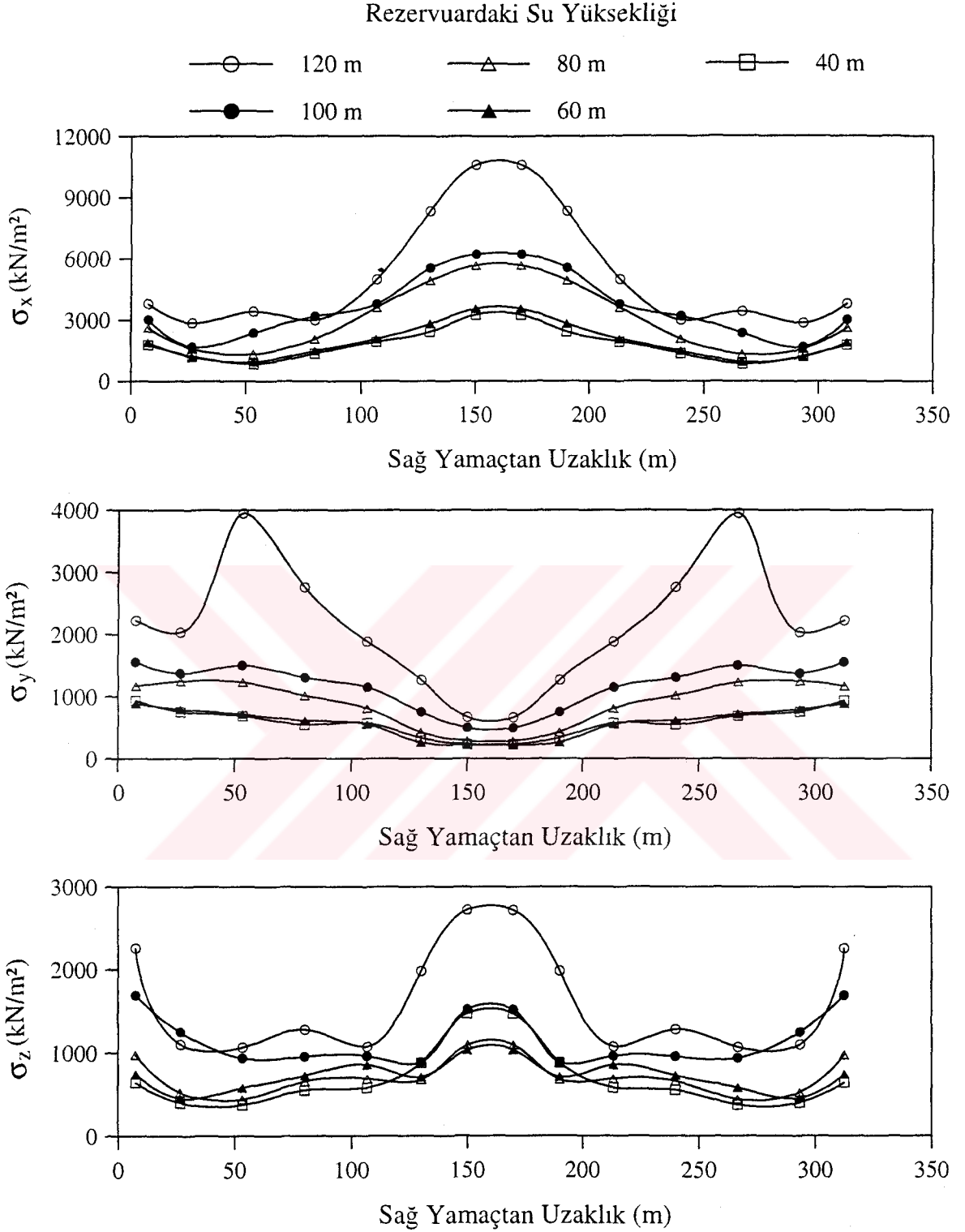


Şekil 3.47. Eğri Tanımlama modeli ile lineer olmayan dinamik analizde; zeminin rijit ve rezervuardaki su yüksekliğinin 120, 100, 80, 60 ve 40 m olması durumu için Tip-5 kemer barajının E-E kesitinde x-x, y-y ve z-z doğrultusunda elde edilen memba yüzeyi maksimum çekme gerilmelerinin sağ yamaçtan sol yamaca doğru değişimi

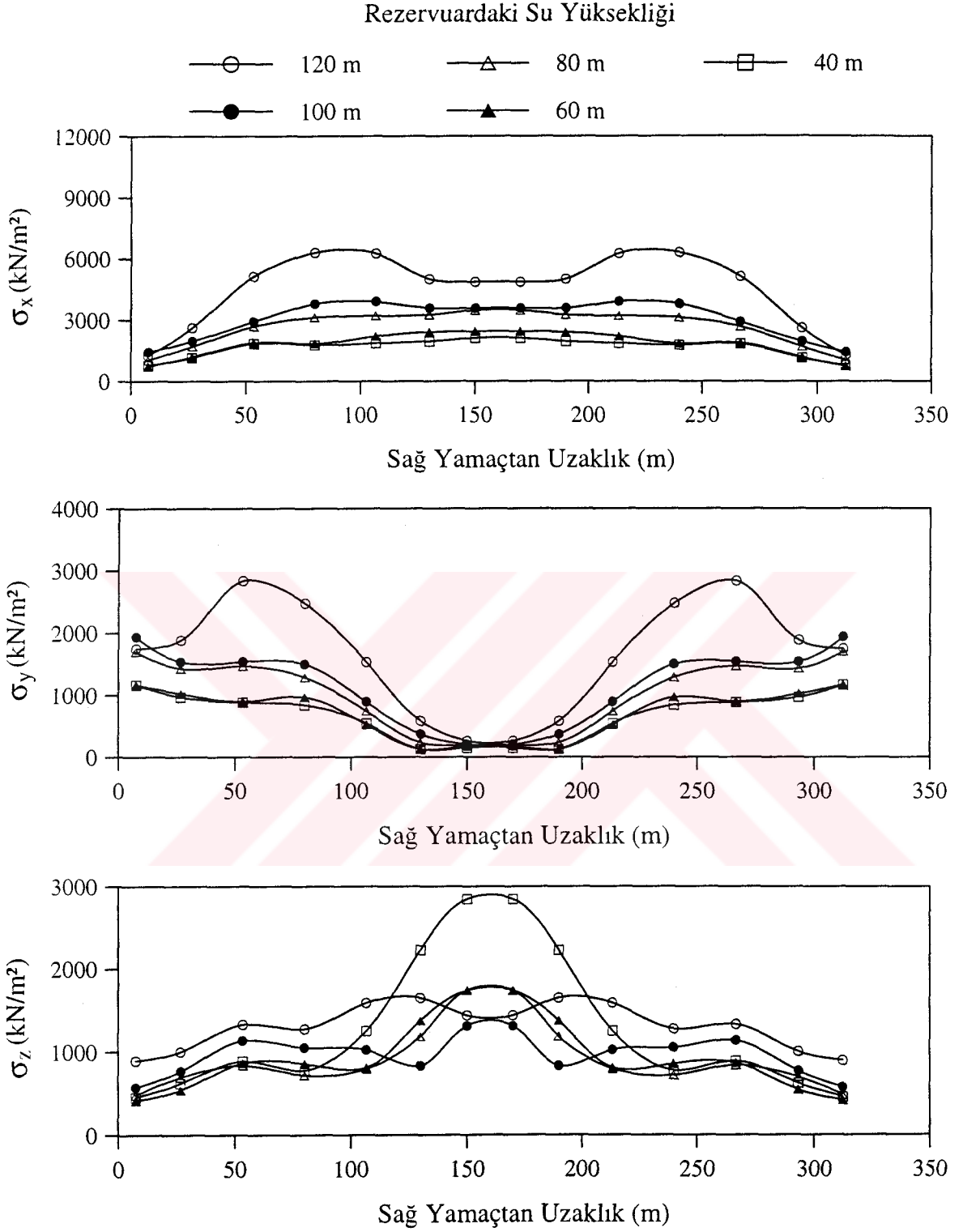




Şekil 3.49. Eğri Tanımlama modeli ile lineer olmayan dinamik analizde; zeminin esnek olması durumu için baraj memba yüzeyinde elde edilen yerdeğiştirmeler ve rezervuardaki su yüksekliğinin 120, 100, 80, 60 ve 40 m olması durumu için baraj kretinde elde edilen yerdeğiştirmelerin dinamik etki süresince değişimi



Şekil 3.50. Eğri Tanımlama modeli ile lineer olmayan dinamik analizde; zeminin esnek ve rezervuardaki su yüksekliğinin 120, 100, 80, 60 ve 40 m olması durumu için Tip-5 kemer barajının E-E kesitinde x-x, y-y ve z-z doğrultusunda elde edilen memba yüzeyi maksimum çekme gerilmelerinin sağ yamaçtan sol yamaca doğru değişimi



Şekil 3.51. Eğri Tanımlama modeli ile lineer olmayan dinamik analizde; zeminin esnek ve rezervuardaki su yüksekliğinin 120, 100, 80, 60 ve 40 m olması durumu için Tip-5 kemer barajının E-E kesitinde x-x, y-y ve z-z doğrultusunda elde edilen mansap yüzeyi maksimum çekme gerilmelerinin sağ yamaçtan sol yamaca doğru değişimi



### 3.4. Drucker-Prager Modeli ile Lineer Olmayan Analiz Sonuçlarının Değerlendirilmesi

Tip-5 kemer barajının Drucker-Prager modeli ile lineer olmayan dinamik davranışına rezervuardaki suyun etkisi, Lagrange yaklaşımı kullanılarak incelenmektedir. Kemer barajın su ile olan etkileşimi, zeminin rijit ve esnek olması durumları için ayrı ayrı göz önüne alınmıştır. Analizler sonucu, baraj kretinde yerdeğiştirmeler, baraj-su ara yüzeyinde hidrodinamik basınçlar ve barajın memba ve mansap yüzeyinde maksimum çekme gerilmeleri elde edilmiştir. Ayrıca, baraj gövdesinde seçilen 4 elemanda akma fonksiyonunun aldığı değerlerin dinamik etki süresince değişimi incelenmiştir. Böylece, elemanların elastik ve plastik durumdaki davranışı dinamik etki süresince izlenmiştir.

Hidrodinamik basınçlar, Şekil 2.21 ve 2.24'te iki boyutlu olarak verilen baraj-su etkileşim modeli üzerinde belirtilen 408, 296, 199, 118, 53 ve 4 nolu sıvı elemanların Gauss noktalarında elde edilmiştir. Bu basınçlar, 8-düğüm noktalı sıvı eleman için indirgenmiş integrasyon derecesi ( $1 \times 1 \times 1$ ) olduğundan, her elemanda bir adet bulunan Gauss noktasındaki değerlerdir. Bu Gauss noktası, sıvı elemanın geometrik merkezinde bulunmaktadır.

Barajın Drucker-Prager modeli ile lineer olmayan dinamik davranışına rezervuardaki suyun etkisi, rezervuarın boş ve dolu olması durumları için ayrı ayrı dikkate alınarak incelenmiş ve elde edilen sonuçlar aşağıda verilmiştir. Ayrıca, burada verilen tüm gerilmeler elemanın geometrik merkezindeki değerlerdir.

#### 3.4.1. Rijit Zemin Durumunda Baraj-Su Etkileşimi

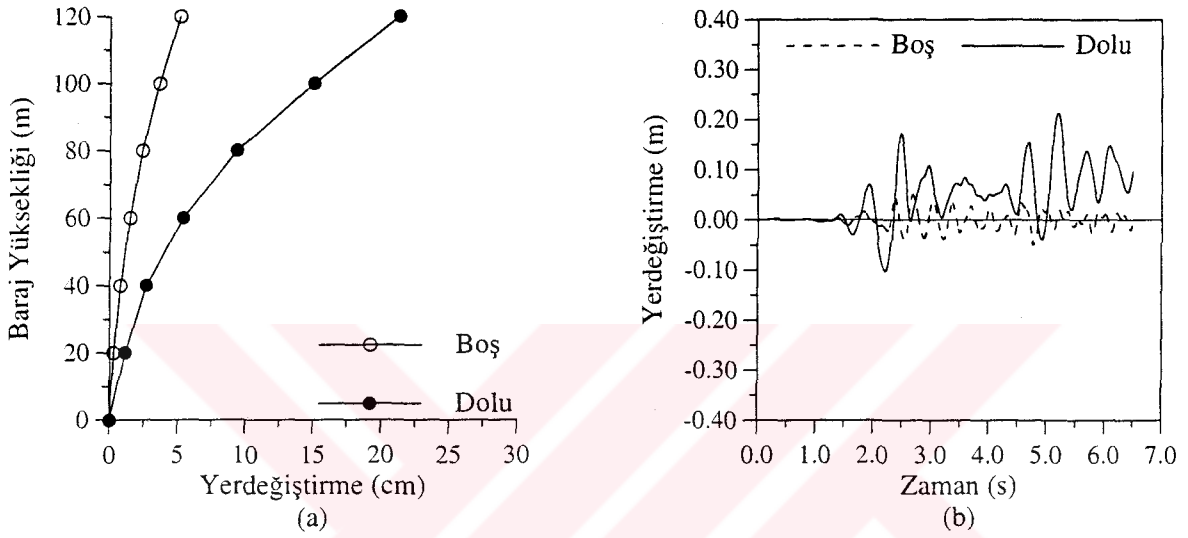
Bu kısımda, Tip-5 kemer barajının Drucker-Prager modeli ile lineer olmayan dinamik davranışına rezervuardaki suyun etkisi, zeminin rijit olması durumu için rezervuarın boş ve dolu olması hali dikkate alınarak incelenmektedir. Bunun için, Şekil 2.19 ve 2.20'de verilen sonlu eleman modelleri kullanılmıştır. Analizler sonucu elde edilen yerdeğiştirme, hidrodinamik basınç ve gerilmeler aşağıda ayrıntılı olarak verilmektedir.

##### 3.4.1.1. Yerdeğiştirmeler

Rijit zemin durumunda, kemer barajın Drucker-Prager modeli ile lineer olmayan dinamik analizi sonucu barajda oluşan yerdeğiştirmelere rezervuardaki suyun etkisi,

barajın memba yüzeyinde elde edilen yerdeğiştirmelerin mutlak değerce maksimum değerlerinin baraj yüksekliği boyunca değişimi ve baraj kret yerdeğiştirmelerinin dinamik etki süresince değişimi belirlenerek incelenmiştir.

Kemer baraj anahtar kesitinin memba yüzeyinde, memba-mansap doğrultusunda elde edilen yerdeğiştirmelerin mutlak değerce maksimum değerlerinin baraj yüksekliği boyunca değişimi şekil 3.52(a)'da verilmiştir.



şekil 3.52. Drucker-Prager modeli ile lineer olmayan dinamik analizde; zeminin rijit, rezervuarın boş ve dolu olması durumu için baraj memba yüzeyinde elde edilen yerdeğiştirmeler ile baraj kretinde elde edilen yerdeğiştirmelerin dinamik etki süresince değişimi

Baraj kretinin mutlak değerce maksimum yerdeğiştirmesi, rezervuarın boş olması durumu için 5.15 cm, dolu olması durumu için 21.30 cm olarak elde edilmiştir. Buna göre; Drucker-Prager modeli ile lineer olmayan dinamik analizde zeminin rijit olması durumu için baraj-su etkileşimi, baraj kret yerdeğiştirmesini rezervuarın boş olması haline göre %314 artırmıştır.

şekil 3.52(b)'de rezervuarın boş ve dolu olması durumunda rijit zemin durumunda baraj kretinde memba-mansap doğrultusunda elde edilen yerdeğiştirmelerin dinamik etki süresince değişimi verilmiştir. Rezervuarın boş olması durumunda barajın lineer davranış, dolu olması durumunda ise barajın lineer olmayan davranış sergilediği ve büyük çekme gerilmelerinin baraj malzemesinin çekme mukavemetini azaltması neticesinde kret yerdeğiştirmelerinin şekil 3.52(b)'deki gibi giderek artan değerler aldığı görölmektedir.

### 3.4.1.2. Hidrodinamik Basınçlar

Şekil 2.20'de sonlu eleman modeli verilen kemer baraja ait baraj-su etkileşim sisteminin Drucker-Prager modeli ile lineer olmayan dinamik analizi sonucu, baraj-su ara yüzeyinde elde edilen hidrodinamik basınçlar Şekil 3.53'te verilmiştir. Lineer ve Eğri Tanımlama modeli ile lineer olmayan analizde olduğu gibi, hidrodinamik basınçlar su yüzeyinden rezervuar tabanına doğru artmaktadır. Öyle ki, mutlak değerce maksimum hidrodinamik basınç sıvı yüzey elemanında (408 nolu eleman)  $201 \text{ kN/m}^2$  iken, rezervuar tabanındaki sıvı elemanda (4 nolu eleman)  $1370 \text{ kN/m}^2$  değerine ulaşmaktadır.

### 3.4.1.3. Gerilmeler

Rijit zemin durumunda kemer barajın Drucker-Prager modeli ile lineer olmayan dinamik analizi sonucu, kemer barajda x-x, y-y ve z-z doğrultusunda oluşan gerilmelere rezervuardaki suyun etkisi, barajın memba ve mansap yüzeyi için sadece maksimum çekme gerilmeleri dikkate alınarak incelenmiştir. Hidrodinamik etkilerden dolayı, barajda elde edilen minimum basınç gerilmeleri, beton basınç mukavemetinin altında kaldığı için verilmemiştir. Şekil 3.54 ile 3.56 arasında bu gerilmeler, rezervuarın boş ve dolu olması durumu için ayrı ayrı verilmiştir. Söz konusu gerilmeler, eş gerilme eğrileri şeklinde gösterilmiştir.

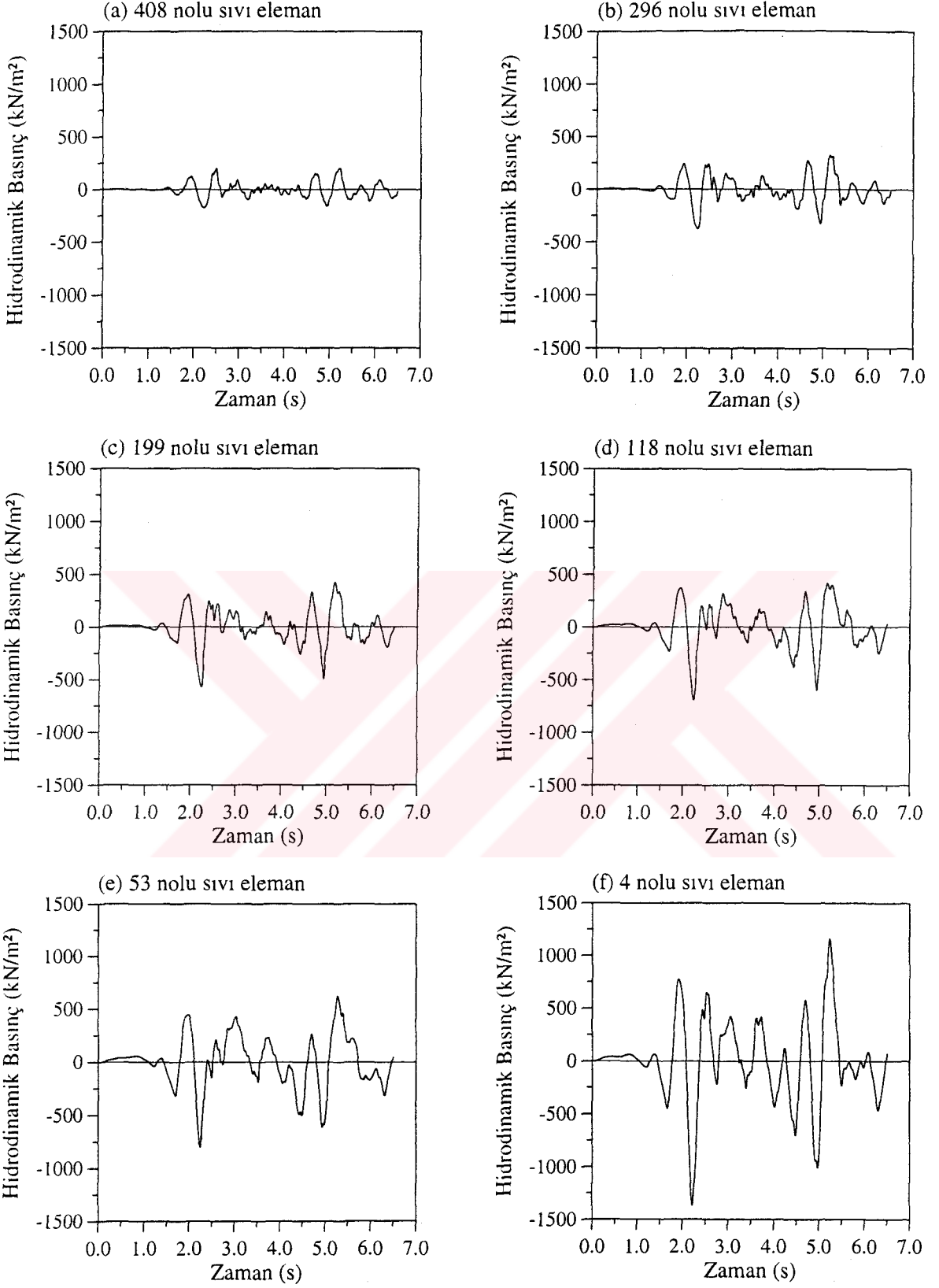
*Baraj memba yüzeyi maksimum çekme gerilmeleri;* x-x yönünde rezervuarın boş olması durumu için  $3846 \text{ kN/m}^2$ , dolu olması durumu için  $6163 \text{ kN/m}^2$ ; y-y yönünde rezervuarın boş olması durumu için  $971 \text{ kN/m}^2$ , dolu olması durumu için  $4920 \text{ kN/m}^2$ ; z-z yönünde rezervuarın boş olması durumu için  $1527 \text{ kN/m}^2$ , dolu olması durumu için  $3046 \text{ kN/m}^2$  şeklinde elde edilmiştir. Baraj mansap yüzeyi maksimum çekme gerilmeleri ise; x-x yönünde rezervuarın boş olması durumu için  $3183 \text{ kN/m}^2$ , dolu olması durumu için  $8288 \text{ kN/m}^2$ ; y-y yönünde rezervuarın boş olması durumu için  $1420 \text{ kN/m}^2$ , dolu olması durumu için  $5193 \text{ kN/m}^2$ ; z-z yönünde rezervuarın boş olması durumu için  $1190 \text{ kN/m}^2$ , dolu olması durumu için  $4247 \text{ kN/m}^2$  şeklinde elde edilmiştir.

Bu eş gerilme eğrileri incelendiğinde, baraj-su etkileşiminin barajdaki gerilmeleri aşırı derecede etkilediği anlaşılmaktadır. Hidrodinamik etkilerden dolayı, barajın memba ve mansap yüzeylerinin çoğu kısmı büyük çekme gerilmelerinin etkisinde kalmıştır. Öyle

ki, bu etkiler barajda plastik bölgelerin oluşmasına ve barajın hasar görmesine neden olmuştur. Barajın hasar görmesi, gerilme dağılışını da önemli ölçüde etkilemiştir.

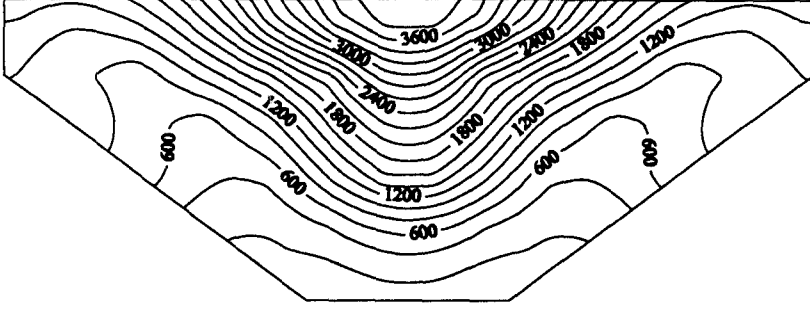
Barajda büyük çekme gerilmelerine maruz kalan 4 elemanda akma fonksiyonunun aldığı değerlerin dinamik etki süresince değişimi Şekil 3.57’de verilmiştir. Bu şekiller incelendiğinde, rezervuarın boş olması durumunda barajın lineer elastik davranış sergilediği anlaşılmaktadır. Çünkü, akma fonksiyonunun aldığı tüm değerler sıfırın altındadır. Bilindiği gibi, elemanda akma fonksiyonunun sıfırdan küçük değerleri elemanın lineer elastik davranış sergilediğini, sıfıra eşit olması ise elemanın plastik davranış sergilediğini göstermektedir. Şekil 3.57’de 22 nolu eleman büyük gerilmelerine maruz kalmış ve plastik duruma çok yaklaşmıştır. 86 nolu eleman ise, 5.113 ile 5.220 saniyeleri arasında plastik davranış sergilemiştir. Bunun sonucunda eleman hasar görmüş ve elemanın çekme gerilmesi taşıma kapasitesi önemli ölçüde azalmıştır. 62 ve 126 nolu elemanlar büyük gerilmelere maruz kalmalarına karşın lineer elastik bölgede kalmışlardır.



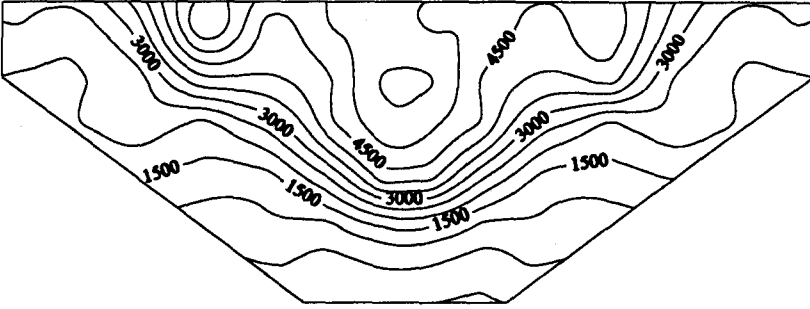


Şekil 3.53. Drucker-Prager modeli ile lineer olmayan dinamik analizde; zeminin rijit olması durumu için 408, 296, 199, 118, 53 ve 4 nolu sıvı elemanlarda elde edilen hidrodinamik basınçların dinamik etki süresince değişimi

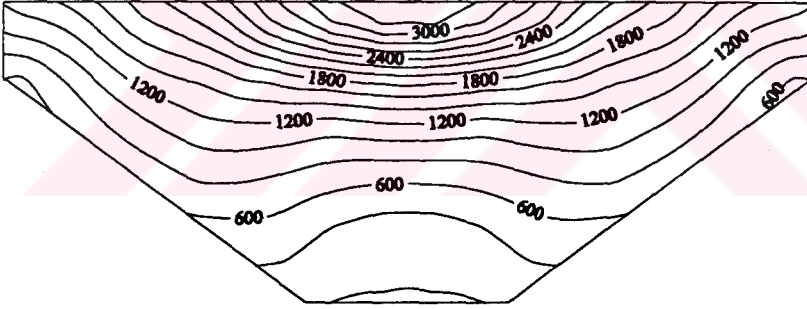
Rezervuar Boş



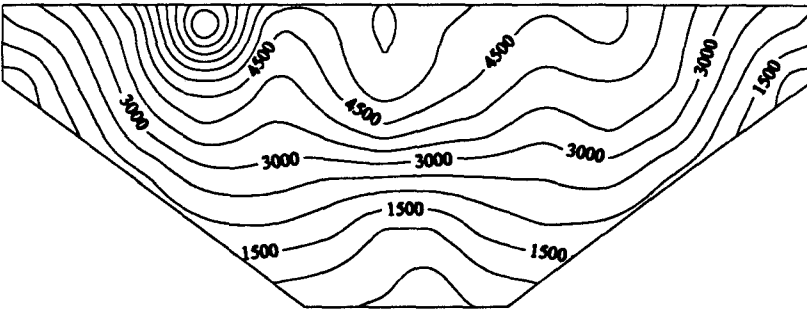
Rezervuar Dolu

MEMBA YÜZEYİ, Gerilme Birimi:  $\text{kN/m}^2$ 

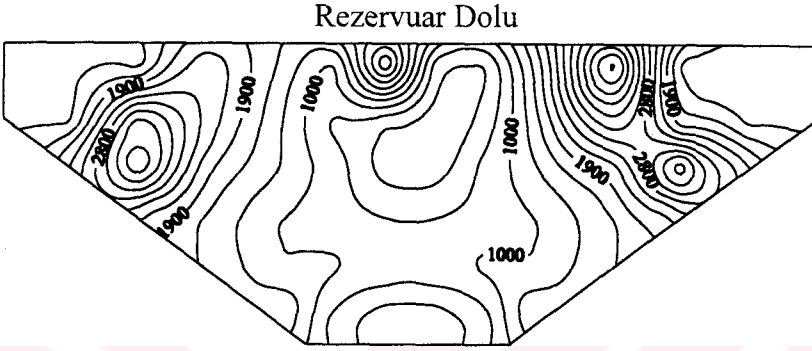
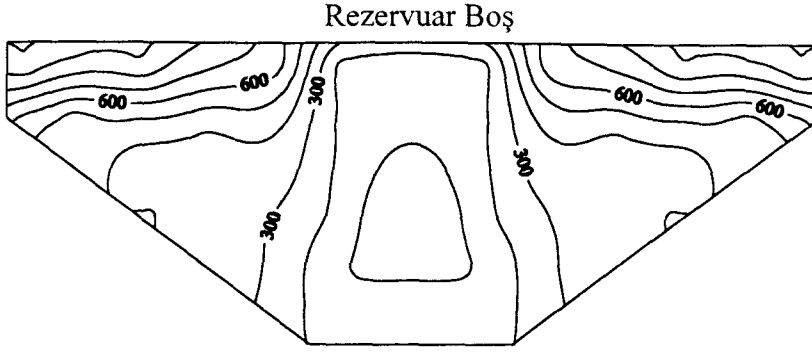
Rezervuar Boş



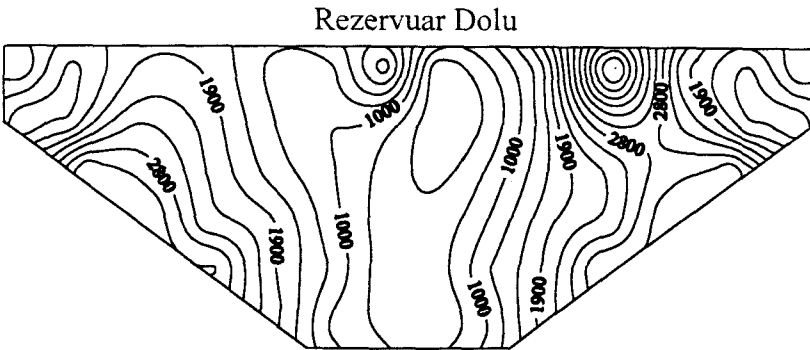
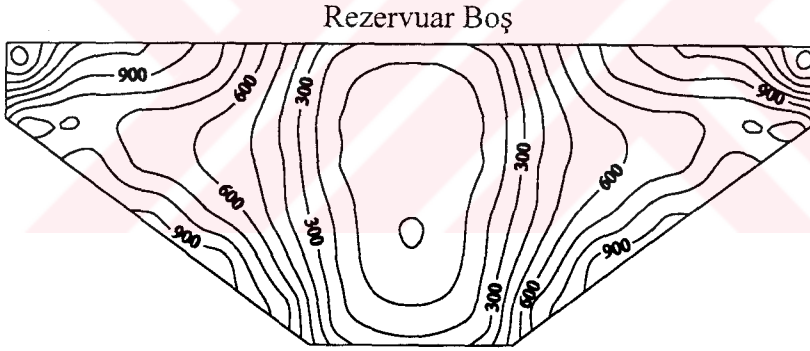
Rezervuar Dolu

MANSAP YÜZEYİ, Gerilme Birimi:  $\text{kN/m}^2$ 

Şekil 3.54. Drucker-Prager modeli ile lineer olmayan dinamik analizde; zeminin rijit, rezervuarın boş ve dolu olması durumu için barajın memba ve mansap yüzeyinde x-x doğrultusunda elde edilen maksimum çekme eş gerilme eğrileri

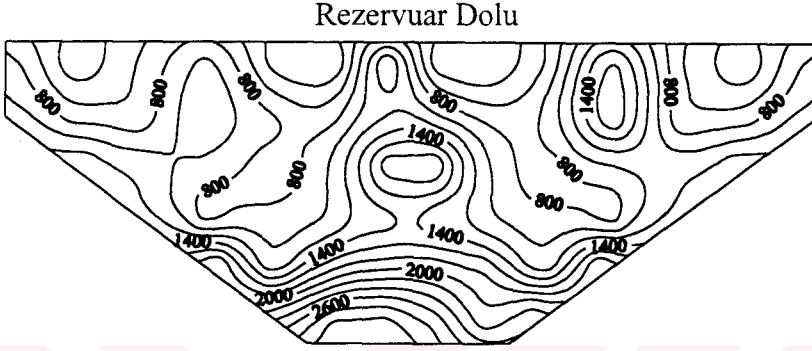
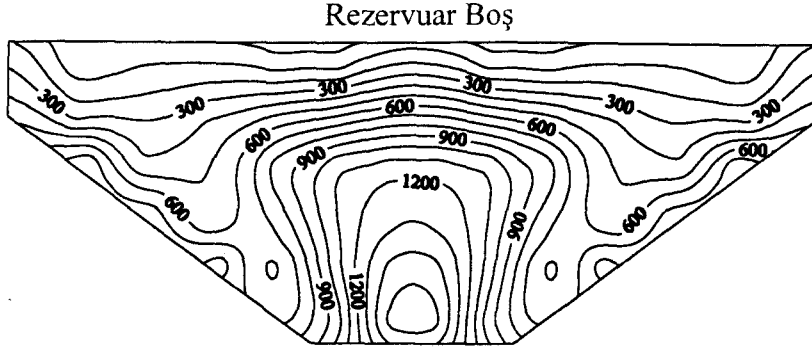


**MEMBA YÜZEYİ**, Gerilme Birimi:  $\text{kN/m}^2$

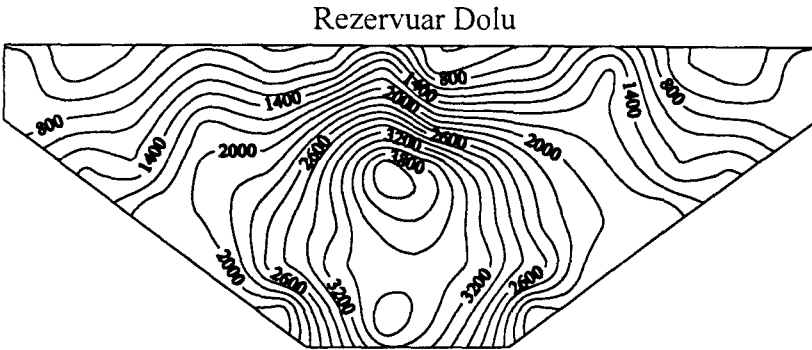
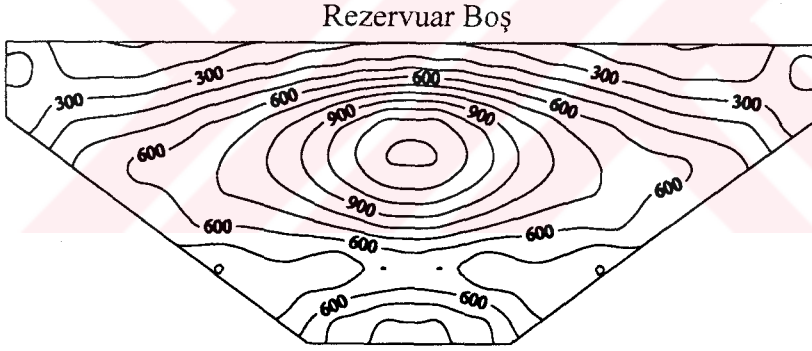


**MANSAP YÜZEYİ**, Gerilme Birimi:  $\text{kN/m}^2$

Şekil 3.55. Drucker-Prager modeli ile lineer olmayan dinamik analizde; zeminin rijit, rezervuarın boş ve dolu olması durumu için barajın memba ve mansap yüzeyinde y-y doğrultusunda elde edilen maksimum çekme eş gerilme eğrileri



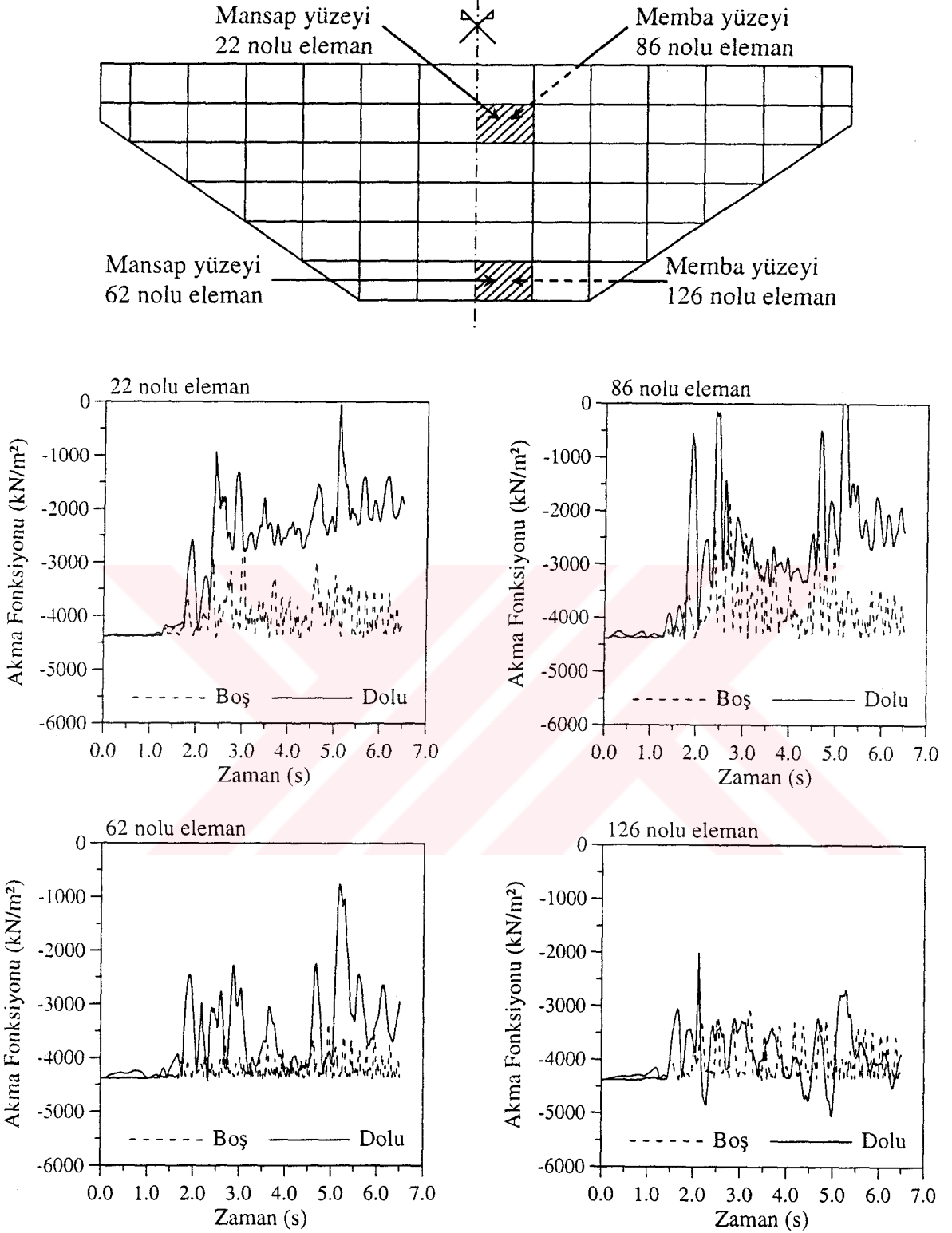
**MEMBA YÜZEYİ**, Gerilme Birimi:  $\text{kN/m}^2$



**MANSAP YÜZEYİ**, Gerilme Birimi:  $\text{kN/m}^2$

Şekil 3.56. Drucker-Prager modeli ile lineer olmayan dinamik analizde; zeminin rijit, rezervuarın boş ve dolu olması durumu için barajın memba ve mansap yüzeyinde z-z doğrultusunda elde edilen maksimum çekme eş gerilme eğrileri





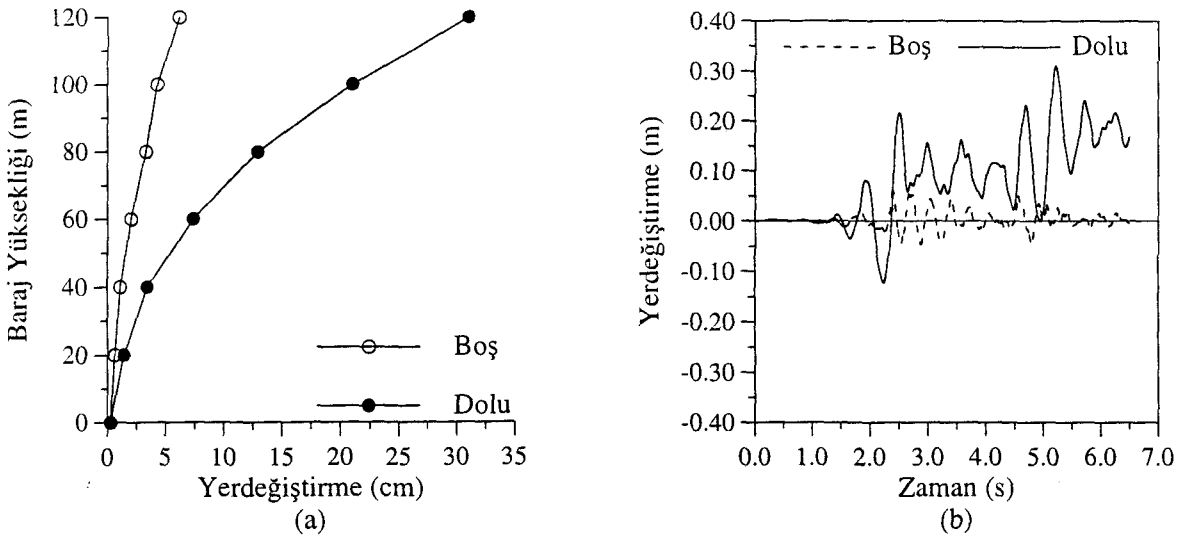
Şekil 3.57. Drucker-Prager modeli ile lineer olmayan dinamik analizde; zeminin rijit, rezervuarın boş ve dolu olması durumu için barajın mansap yüzeyine ait 22 ve 62, mamba yüzeyine ait 86 ve 126 nolu elemanda akma fonksiyonunun aldığı değerlerin dinamik etki süresince değişimi

### 3.4.2. Esnek Zemin Durumunda Baraj-Su Etkileşimi

Bu kısımda, Tip-5 kemer barajının Drucker-Prager modeli ile lineer olmayan dinamik davranışına rezervuardaki suyun etkisi, zeminin esnek olması durumu için rezervuarın boş ve dolu olması hali dikkate alınarak incelenmektedir. Bunun için, Şekil 2.22 ve 2.23'te verilen sonlu eleman modelleri kullanılmıştır. Analizler sonucu elde edilen yerdeğiştirme, hidrodinamik basınç ve gerilmeler aşağıda ayrıntılı olarak verilmektedir.

#### 3.4.2.1. Yerdeğiştirmeler

Esnek zemin durumunda kemer barajın Drucker-Prager modeli ile lineer olmayan dinamik analizi sonucu, barajda oluşan yerdeğiştirmelere rezervuardaki suyun etkisi, barajın memba yüzeyinde elde edilen yerdeğiştirmelerin mutlak değerce maksimum değerlerinin baraj yüksekliği boyunca değişimi ve baraj kret yerdeğiştirmelerinin dinamik etki süresince değişimi belirlenerek incelenmiştir. Kemer baraj anahtar kesitinin memba yüzeyinde, memba-mansap doğrultusunda elde edilen yerdeğiştirmelerin mutlak değerce maksimum değerlerinin baraj yüksekliği boyunca değişimi Şekil 3.58(a)'da, rezervuarın boş ve dolu olması durumunda baraj kretinde memba-mansap doğrultusunda elde edilen yerdeğiştirmelerin dinamik etki süresince değişimi ise Şekil 3.58(b)'de verilmiştir.



Şekil 3.58. Drucker-Prager modeli ile lineer olmayan dinamik analizde; zeminin esnek, rezervuarın boş ve dolu olması durumu için baraj memba yüzeyinde elde edilen yerdeğiştirmeler ile baraj kretinde elde edilen yerdeğiştirmelerin dinamik etki süresince değişimi

Baraj kretinin mutlak değerce maksimum yerdeğiştirmesi, rezervuarın boş olması durumu için 6.18 cm, dolu olması durumu için 31.03 cm olarak elde edilmiştir. Buna göre; Drucker-Prager modeli ile lineer olmayan dinamik analizde zeminin esnek olması durumu için baraj-su etkileşimi, baraj kret yerdeğiştirmesini rezervuarın boş olması haline göre %402 artırmıştır.

### 3.4.2.2. Hidrodinamik Basınçlar

Şekil 2.23'te sonlu eleman modeli verilen kemer baraja ait baraj-su-zemin etkileşim sisteminin Drucker-Prager modeli ile lineer olmayan dinamik analizi sonucu baraj-su ara yüzeyinde elde edilen hidrodinamik basınçlar Şekil 3.59'da verilmiştir. Lineer ve Eğri Tanımlama ile lineer olmayan dinamik analizde olduğu gibi, hidrodinamik basınçlarda su yüzeyinden rezervuar tabanına doğru farklılıklar gözlenmektedir. Öyle ki, mutlak değerce maksimum hidrodinamik basınç sıvı yüzey elemanında (408 nolu eleman)  $265 \text{ kN/m}^2$  iken, rezervuar tabanındaki sıvı elemanda (4 nolu eleman)  $964 \text{ kN/m}^2$  değerine ulaşmaktadır. Sıvı yüzey elemanında elde edilen hidrodinamik basınç değerinde rijit zemin durumuna göre %32'lik bir artış söz konusu iken, tabandaki sıvı elemanda %30'luk bir azalma görülmüştür. Ayrıca, rijit zemin durumunda elde edilen hidrodinamik basınçların frekans içeriği açısından esnek zemin durumu ile karşılaştırıldığında, zemin esnekliği basınçların frekans içeriklerini değiştirdiği görülmektedir.

### 3.4.2.3. Gerilmeler

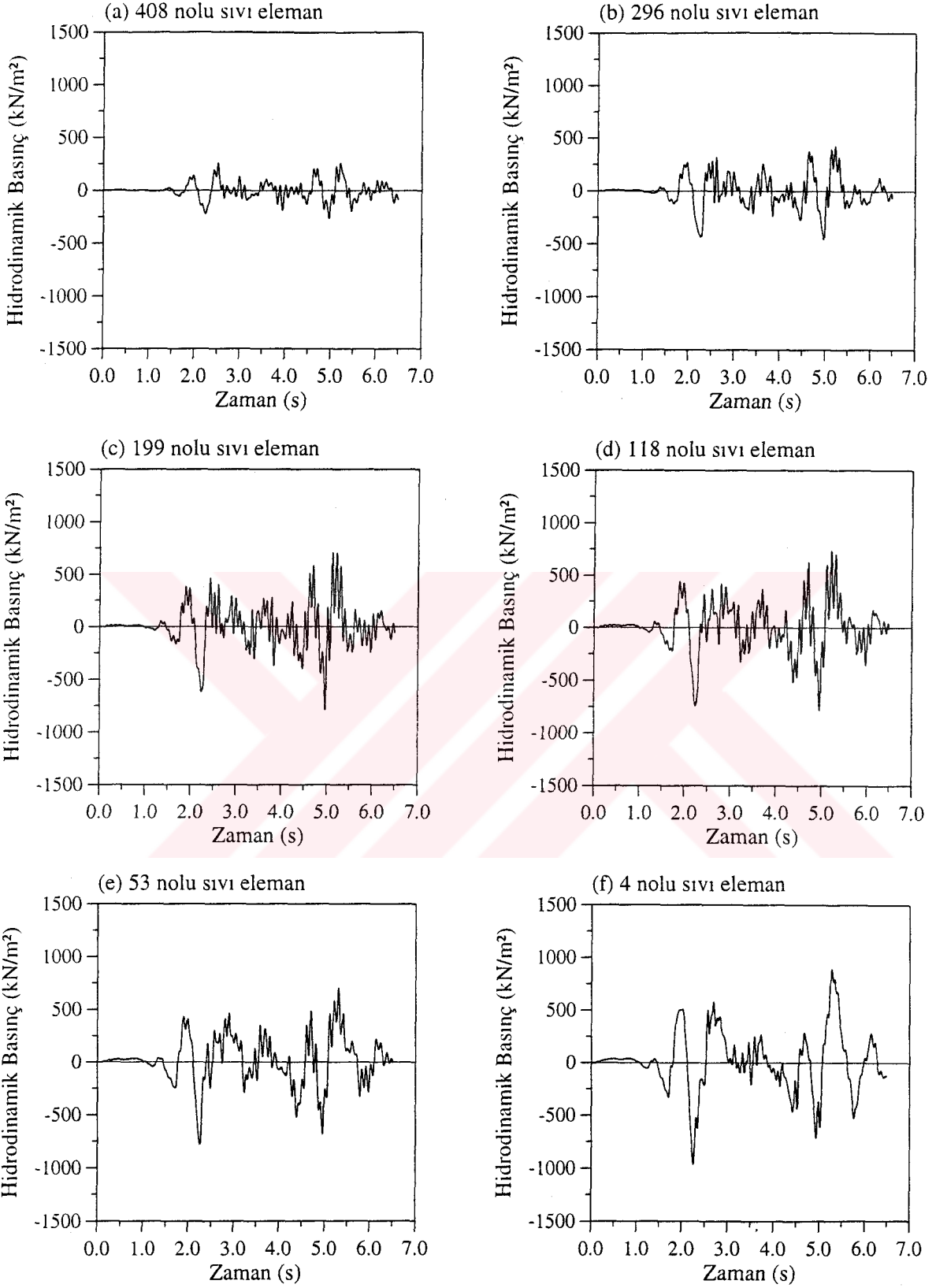
Esnek zemin durumunda kemer barajın Drucker-Prager modeli ile lineer olmayan dinamik analizi sonucu, kemer barajda x-x, y-y ve z-z doğrultusunda oluşan gerilmelere rezervuardaki suyun etkisi, barajın memba ve mansap yüzeyi için sadece maksimum çekme gerilmeleri dikkate alınarak incelenmiştir. Hidrodinamik etkilerden dolayı, barajda elde edilen minimum basınç gerilmeleri, beton basınç mukavemetinin altında kaldığı için verilmemiştir. Şekil 3.60 ile 3.62 arasında bu gerilmeler, rezervuarın boş ve dolu olması durumu için ayrı ayrı verilmiştir. Bu gerilmeler, eş gerilme eğrileri şeklinde gösterilmiştir.

*Baraj memba yüzeyi maksimum çekme gerilmeleri; x-x yönünde rezervuarın boş olması durumu için  $5754 \text{ kN/m}^2$ , dolu olması durumu için  $12889 \text{ kN/m}^2$ ; y-y yönünde rezervuarın boş olması durumu için  $1753 \text{ kN/m}^2$ , dolu olması durumu için  $8171 \text{ kN/m}^2$ ; z-z*

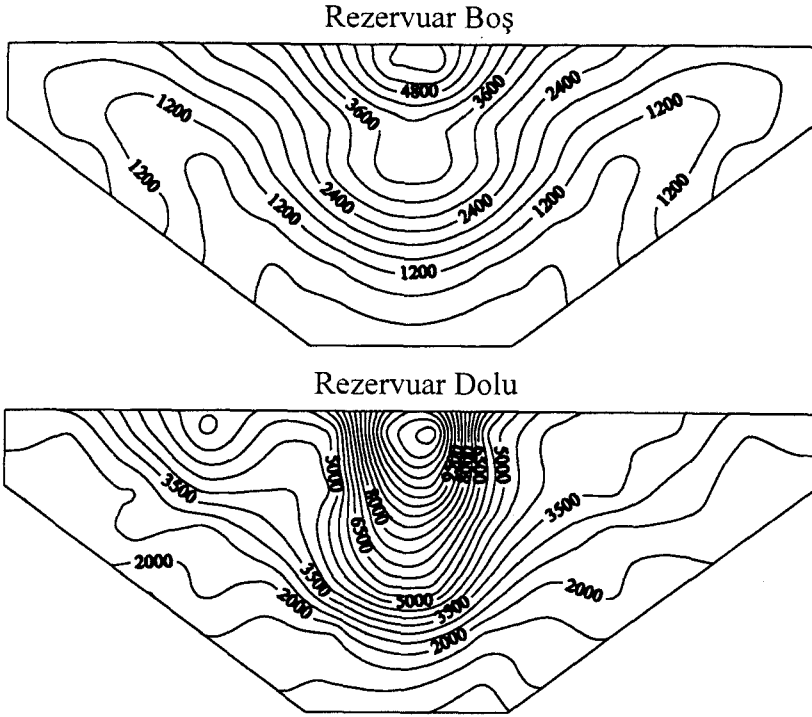
yönünde rezervuarın boş olması durumu için  $2274 \text{ kN/m}^2$ , dolu olması durumu için  $6173 \text{ kN/m}^2$  şeklinde elde edilmiştir. Baraj mansap yüzeyi maksimum çekme gerilmeleri ise; x-x yönünde rezervuarın boş olması durumu için  $4293 \text{ kN/m}^2$ , dolu olması durumu için  $12086 \text{ kN/m}^2$ ; y-y yönünde rezervuarın boş olması durumu için  $2758 \text{ kN/m}^2$ , dolu olması durumu için  $7399 \text{ kN/m}^2$ ; z-z yönünde rezervuarın boş olması durumu için  $2735 \text{ kN/m}^2$ , dolu olması durumu için  $5625 \text{ kN/m}^2$  şeklinde elde edilmiştir.

Bu eş gerilme eğrileri incelendiğinde, baraj-su etkileşiminin barajdaki gerilmeleri aşırı derecede etkilediği anlaşılmaktadır. Hidrodinamik etkilerden dolayı, barajın memba ve mansap yüzeylerinin çoğu kısmı büyük çekme gerilmelerinin etkisinde kalmıştır. Öyle ki, bu etkiler barajda plastik bölgelerin oluşmasına ve barajın hasar görmesine neden olmuştur. Barajın hasar görmesi, gerilme dağılışını da önemli ölçüde etkilemiştir.

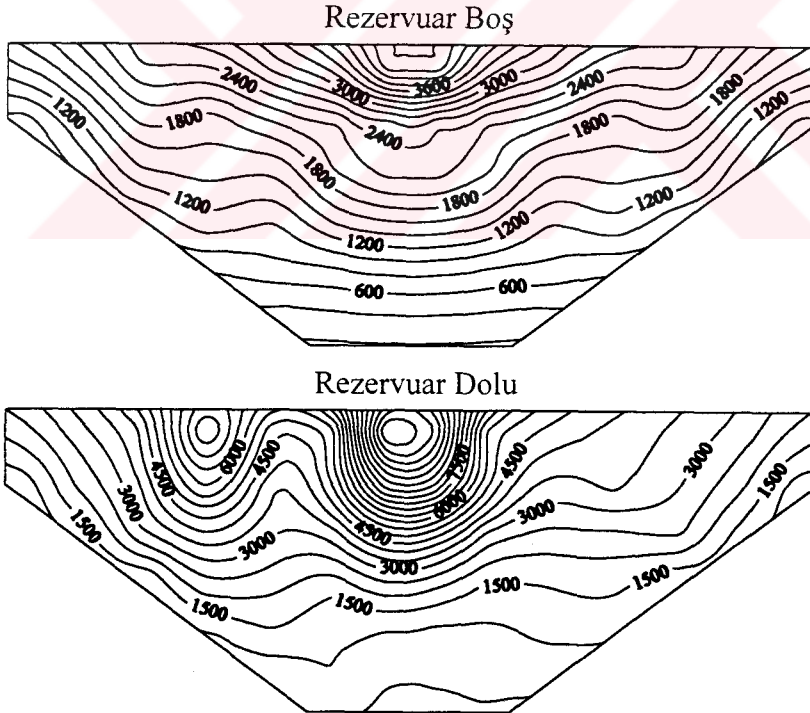
Zemin esnekliğinin etkisiyle barajın tümünde büyük hasarlar oluşmakla birlikte, barajda büyük çekme gerilmelerine maruz kalan 4 elemanda akma fonksiyonunun aldığı değerlerin dinamik etki süresince değişimi Şekil 3.63'te verilmiştir. Bu şekiller incelendiğinde, rijit zemin durumunda olduğu gibi rezervuarın boş olması durumunda barajın lineer elastik davranış sergilediği anlaşılmaktadır. 62 ve 126 nolu elemanlar büyük gerilmelere maruz kalmalarına karşın lineer elastik bölgede kalmışlardır. Ancak, 22 ve 86 nolu elemanlar büyük çekme gerilmelerinin etkisinde kalmış ve plastik davranış sergilemiştir. Sonuçta, bu elemanların çekme gerilmesi taşıma kapasitesi önemli ölçüde azalmıştır.



Şekil 3.59. Drucker-Prager modeli ile lineer olmayan dinamik analizde; zeminin esnek olması durumu için 408, 296, 199, 118, 53 ve 4 nolu sıvı elemanlarda elde edilen hidrodinamik basınçların dinamik etki süresince değişimi

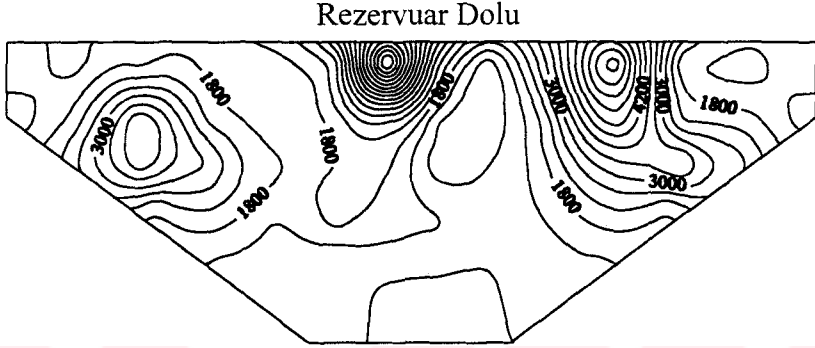
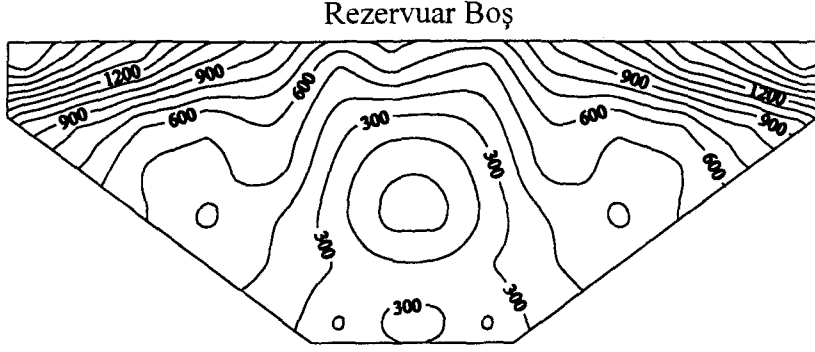


**MEMBA YÜZEYİ**, Gerilme Birimi:  $\text{kN/m}^2$

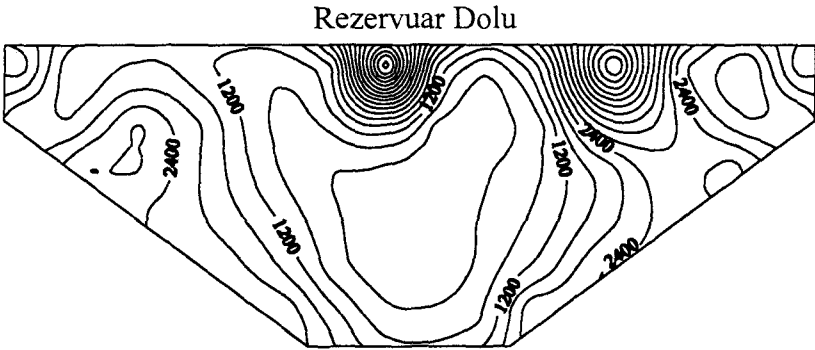
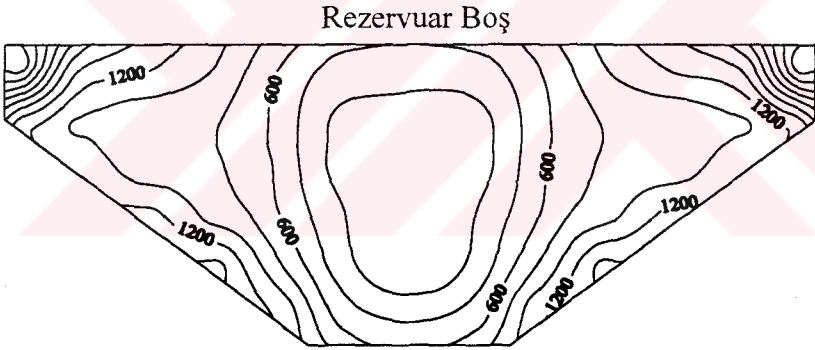


**MANSAP YÜZEYİ**, Gerilme Birimi:  $\text{kN/m}^2$

Şekil 3.60. Drucker-Prager modeli ile lineer olmayan dinamik analizde; zeminin esnek, rezervuarın boş ve dolu olması durumu için barajın memba ve mansap yüzeyinde x-x doğrultusunda elde edilen maksimum çekme eş gerilme eğrileri



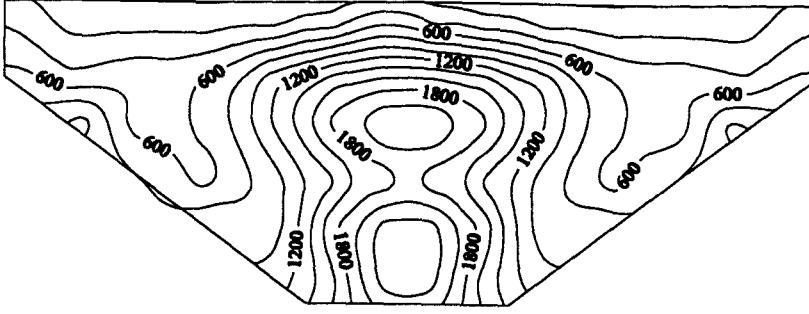
MEMBA YÜZEYİ, Gerilme Birimi:  $\text{kN/m}^2$



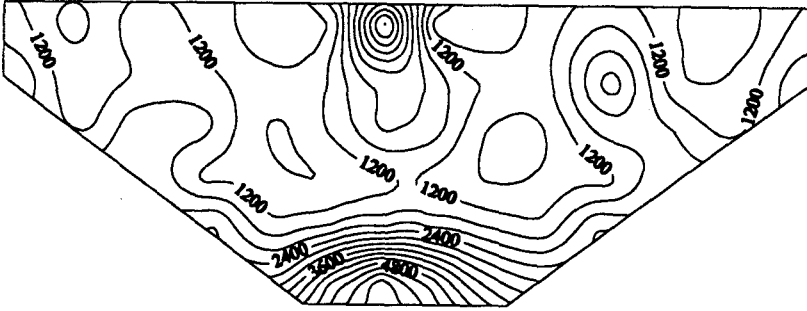
MANSAP YÜZEYİ, Gerilme Birimi:  $\text{kN/m}^2$

Şekil 3.61 Drucker-Prager modeli ile lineer olmayan dinamik analizde; zeminin esnek, rezervuarın boş ve dolu olması durumu için barajın memba ve mansap yüzeyinde y-y doğrultusunda elde edilen maksimum çekme eş gerilme eğrileri

Rezervuar Boş

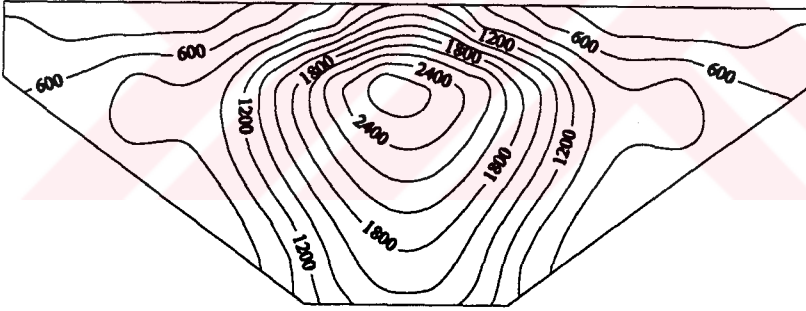


Rezervuar Dolu

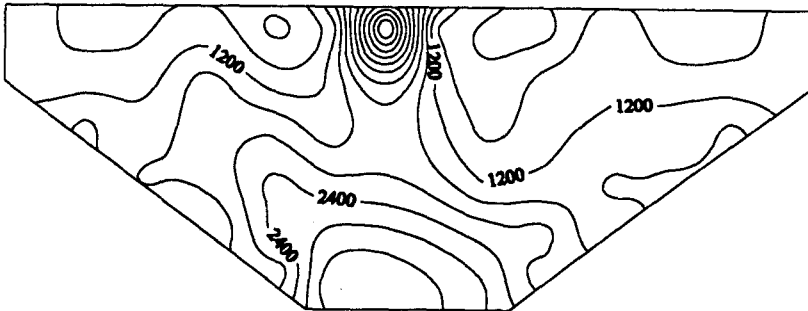


MEMBA YÜZEYİ, Gerilme Birimi:  $\text{kN/m}^2$

Rezervuar Boş



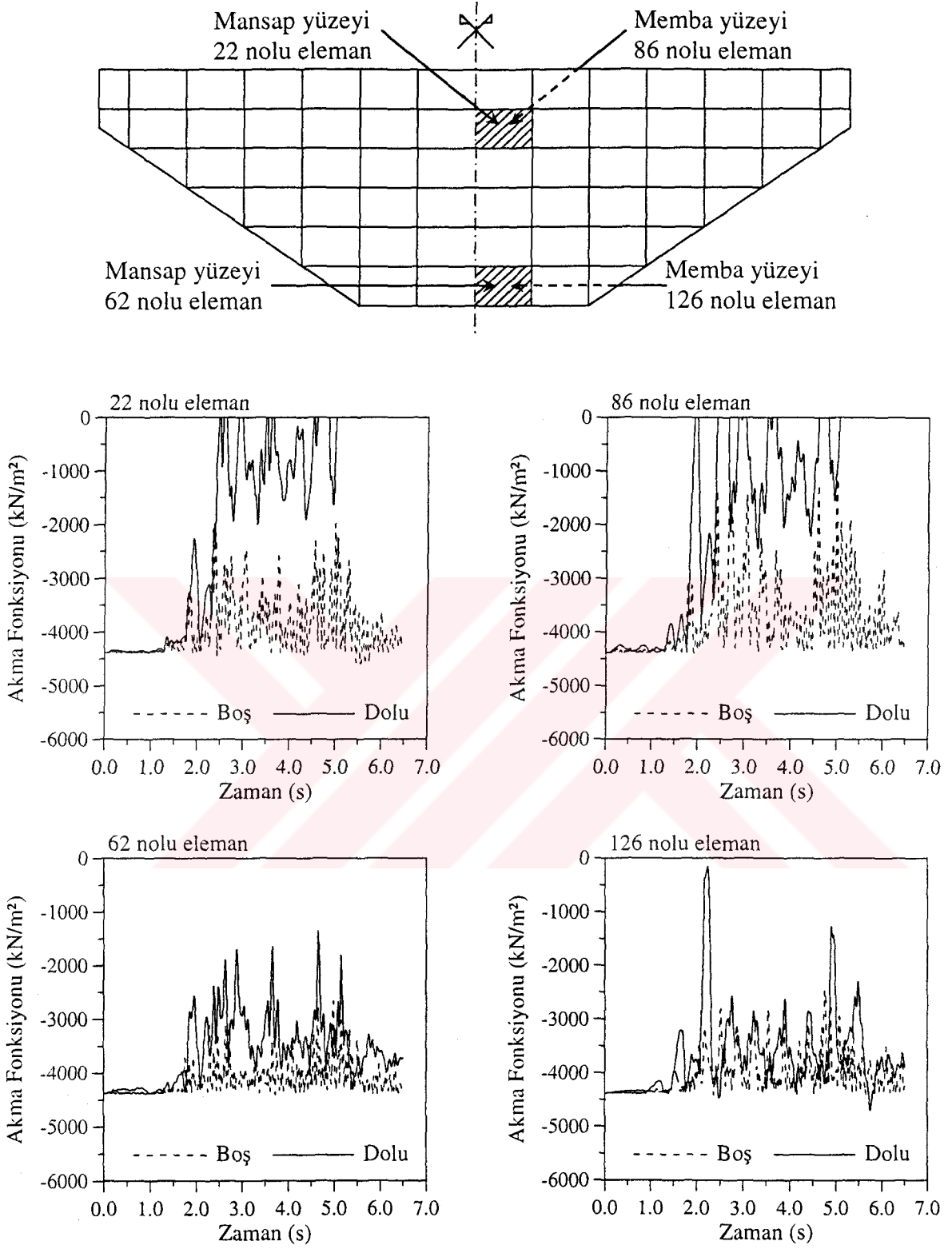
Rezervuar Dolu



MANSAP YÜZEYİ, Gerilme Birimi:  $\text{kN/m}^2$

Şekil 3.62. Drucker-Prager modeli ile lineer olmayan dinamik analizde; zeminin esnek, rezervuarın boş ve dolu olması durumu için barajın memba ve mansap yüzeyinde z-z doğrultusunda elde edilen maksimum çekme eş gerilme eğrileri





Şekil 3.63. Drucker-Prager modeli ile lineer olmayan dinamik analizde; zeminin esnek, rezervuarın boş ve dolu olması durumu için barajın mansap yüzeyine ait 22 ve 62, memba yüzeyine ait 86 ve 126 nolu elemanda akma fonksiyonunun aldığı değerlerin dinamik etki süresince değişimi

### 3.4.3. Kaya Zemin Özelliklerinin Kemer Baraj Davranışına Etkisi

Bu kısımda; Drucker-Prager modeli ile lineer olmayan dinamik analizde rezervuarın boş ve dolu olması durumu için kaya zemin özelliklerinin Tip-5 kemer baraj davranışına etkisi, kaya zemin elastisite modülünün ( $E_f$ ) baraj betonu elastisite modülüne ( $E_c$ ) oranının çeşitli değerleri alınarak incelenmiştir.  $E_f/E_c$  için sonsuz, 2.00, 1.00, 0.50 ve 0.25 değerleri kullanılmıştır. Sonsuz değeri, rijit zemine karşılık gelmektedir. Bu değerler dikkate alınarak, barajın memba yüzeyinde elde edilen yerdeğiştirmelerin mutlak değerce maksimum değerlerinin baraj yüksekliği boyunca değişimi, baraj kret (Şekil 2.24'te 617 nolu dn.) yerdeğiştirmelerinin dinamik etki süresince değişimi ve kemer barajın 86 nolu memba yüzeyi elemanındaki akma fonksiyonunun aldığı değerlerin dinamik etki süresince değişimi incelenmiştir.

#### 3.4.3.1. Rezervuarın Boş Olması Durumu

Rezervuarın boş olması durumunda Tip-5 kemer barajının Drucker-Prager modeli ile lineer olmayan dinamik davranışına kaya zeminin özelliklerinin etkisini incelemek üzere Şekil 2.22'de verilen sonlu eleman modeli dikkate alınmıştır. Baraj anahtar kesitinin memba yüzeyinde, memba-mansap doğrultusunda elde edilen yerdeğiştirmelerin mutlak değerce maksimum değerlerinin baraj yüksekliği boyunca değişimi Şekil 3.64(a)'da verilmiştir. Baraj kretinin mutlak değerce maksimum yerdeğiştirmesi,  $E_f/E_c$  oranının sonsuz, 2.00, 1.00, 0.50 ve 0.25 değerleri için sırasıyla 5.15 cm, 6.18 cm, 8.00 cm, 13.76 cm ve 20.61 cm olarak elde edilmiştir. Ayrıca Şekil 3.64'te, dikkate alınan  $E_f/E_c$  oranları için baraj kretinde memba-mansap doğrultusunda elde edilen yerdeğiştirmelerin dinamik etki süresince değişimi verilmiştir. Bu şekiller incelendiğinde, rezervuarın boş olması durumunda kemer baraj davranışı üzerinde kaya zemin esnekliğinin etkisi açıkça görülmektedir. Esneklik arttıkça kret yerdeğiştirmeleri de artmıştır. Esnekliğin artmasıyla barajdaki elemanlar büyük çekme gerilmelerine maruz kalmıştır.

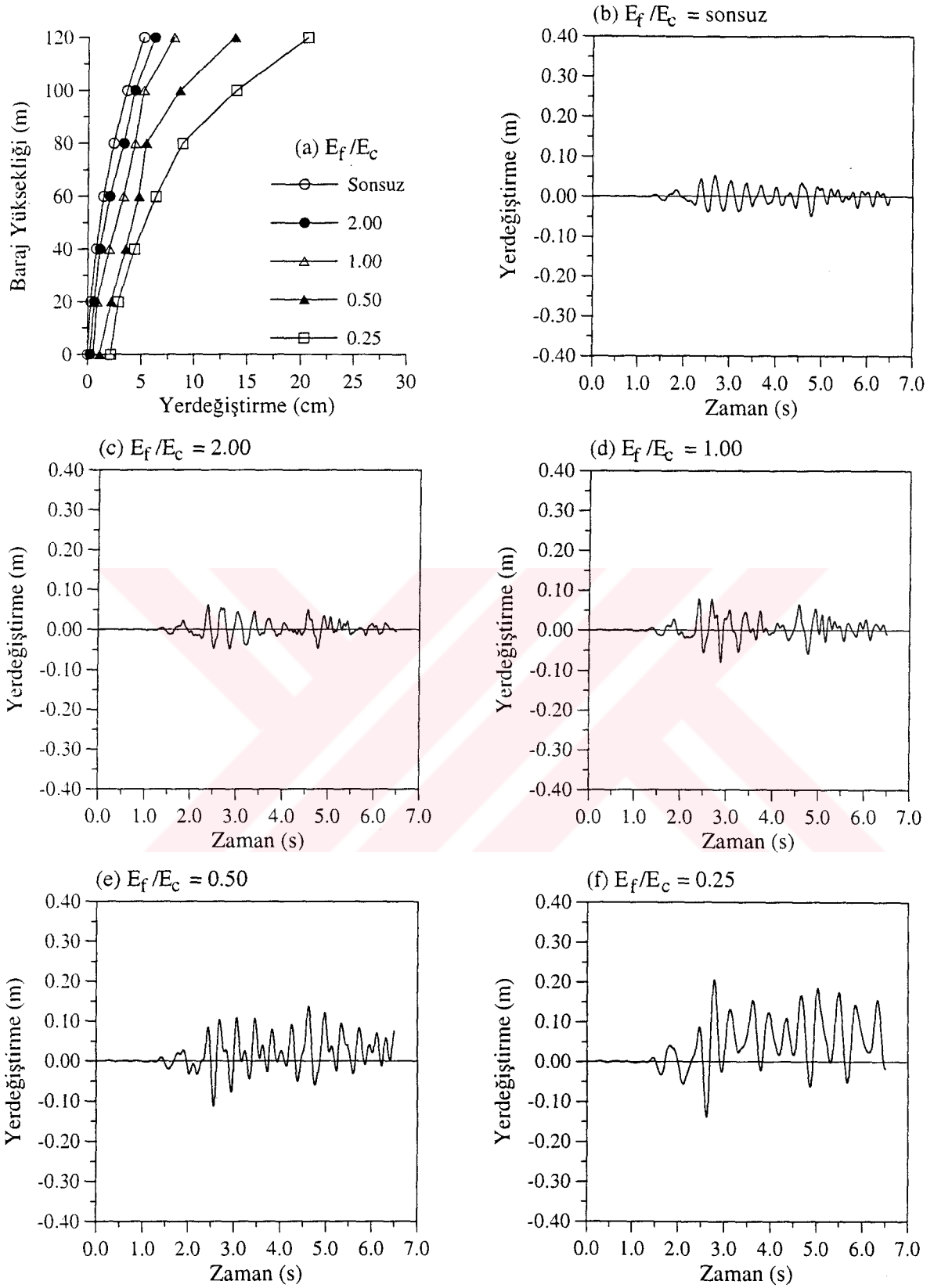
Şekil 3.65'da,  $E_f/E_c$  oranının sonsuz, 2.00, 1.00, 0.50 ve 0.25 değerleri için kemer barajının 86 nolu memba yüzey elemanında akma fonksiyonunun aldığı değerlerin dinamik etki süresince değişimi verilmiştir. Akma fonksiyonunun dinamik etki süresince değişimi, elemanın elastik veya plastik durumunu ortaya koyması bakımından önemlidir. Rezervuarın boş olması durumunda,  $E_f/E_c$  oranının 1.00 değerinden sonra 86 nolu eleman

plastik duruma geçmeye başlamıştır. Bu durum, elemanda hasarların başladığı anlamına gelmektedir.  $E_f/E_c$  oranının azalmasıyla bu hasarlar giderek artmıştır.

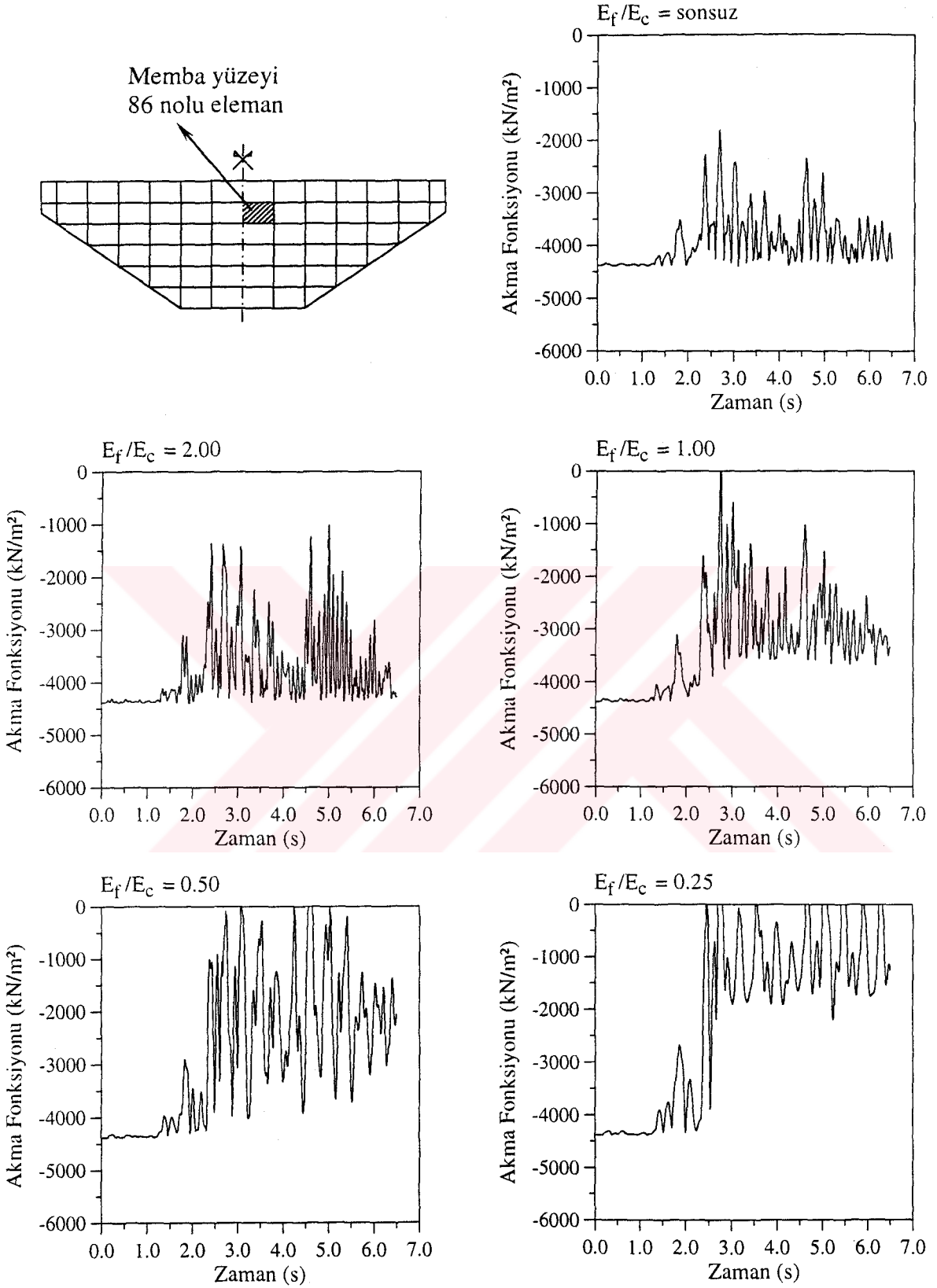
### 3.4.3.2. Rezervuarın Dolu Olması Durumu

Rezervuarın dolu olması durumunda Tip-5 kemer barajının Drucker-Prager modeli ile lineer olmayan dinamik davranışına kaya zeminin özelliklerinin etkisini incelemek üzere Şekil 2.23'te verilen sonlu eleman modeli dikkate alınmıştır. Kemer baraj anahtar kesitinin memba yüzeyinde, memba-mansap doğrultusunda elde edilen yerdeğiştirmelerin mutlak değerce maksimum değerlerinin baraj yüksekliği boyunca değişimi Şekil 3.66(a)'da verilmiştir. Baraj kretinin mutlak değerce maksimum yerdeğiştirmesi,  $E_f/E_c$  oranının sonsuz, 2.00, 1.00, 0.50 ve 0.25 değerleri için sırasıyla 21.30 cm, 31.03 cm, 36.79 cm, 40.54 cm ve 43.83 cm olarak elde edilmiştir. Ayrıca Şekil 3.66'da,  $E_f/E_c$  oranının sonsuz, 2.00, 1.00, 0.50 ve 0.25 değerleri için baraj kretinde memba-mansap doğrultusunda elde edilen yerdeğiştirmelerin dinamik etki süresince değişimi rezervuarın dolu olması durumu için verilmiştir. Bu şekiller incelendiğinde, rezervuarın dolu olması durumunda kemer baraj davranışı üzerinde kaya zemin esnekliğinin etkisi açıkça görülmektedir. Görüldüğü gibi, kaya zemin esnekliği arttıkça kret yerdeğiştirmesi de artmaktadır.

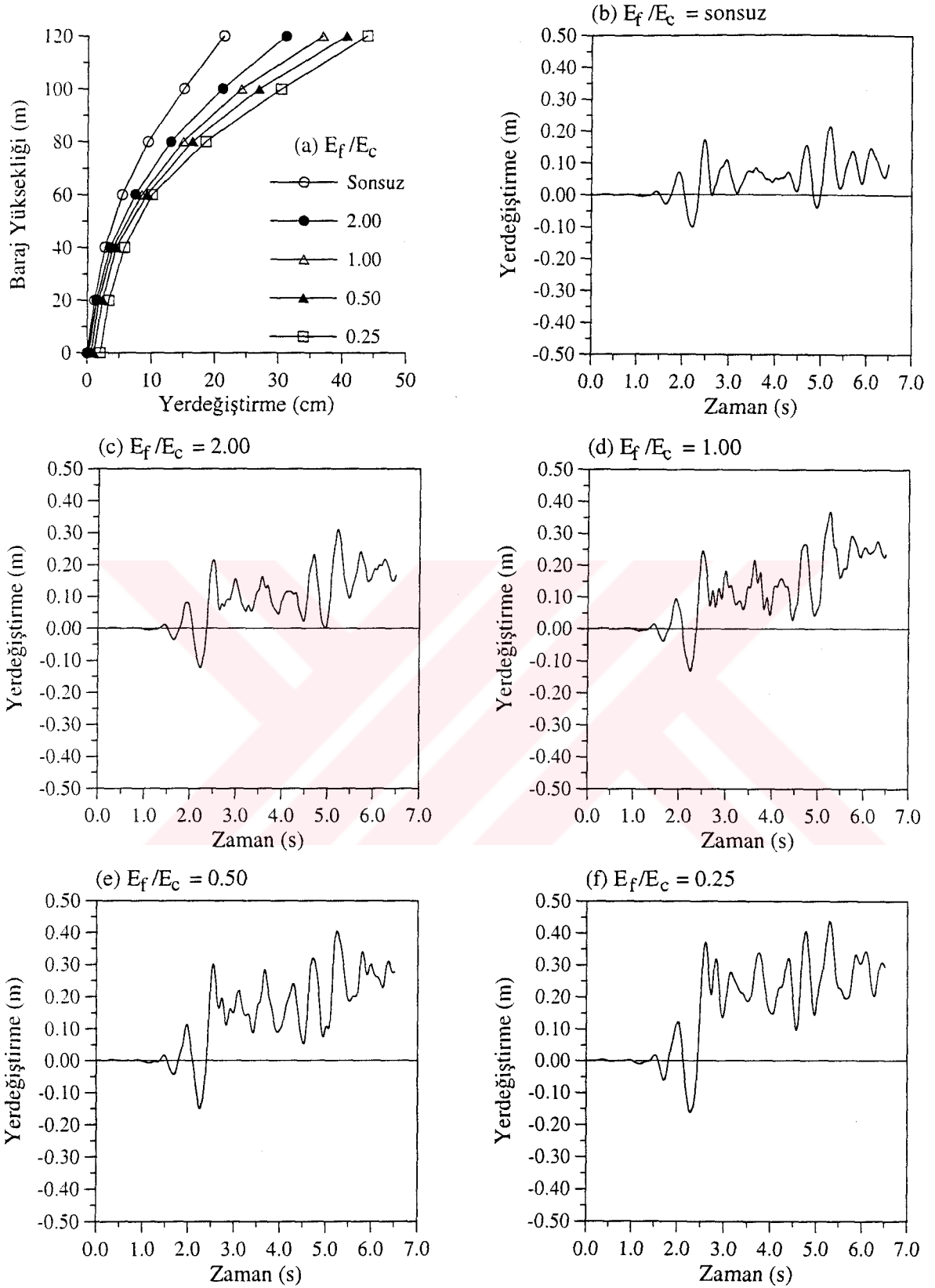
Şekil 3.67'de,  $E_f/E_c$  oranının sonsuz, 2.00, 1.00, 0.50 ve 0.25 değerleri için kemer barajının 86 nolu memba yüzey elemanında akma fonksiyonunun aldığı değerlerin dinamik etki süresince değişimi verilmiştir. Rezervuarın dolu olması durumunda, tüm  $E_f/E_c$  oranları için plastik hale geçen 86 nolu elemanda çekme gerilmesi taşıma kapasitesi azaldığı için hasar meydana gelmiştir.  $E_f/E_c$  oranının azalmasıyla bu hasarlar giderek tehlikeli boyutlara ulaşmıştır.



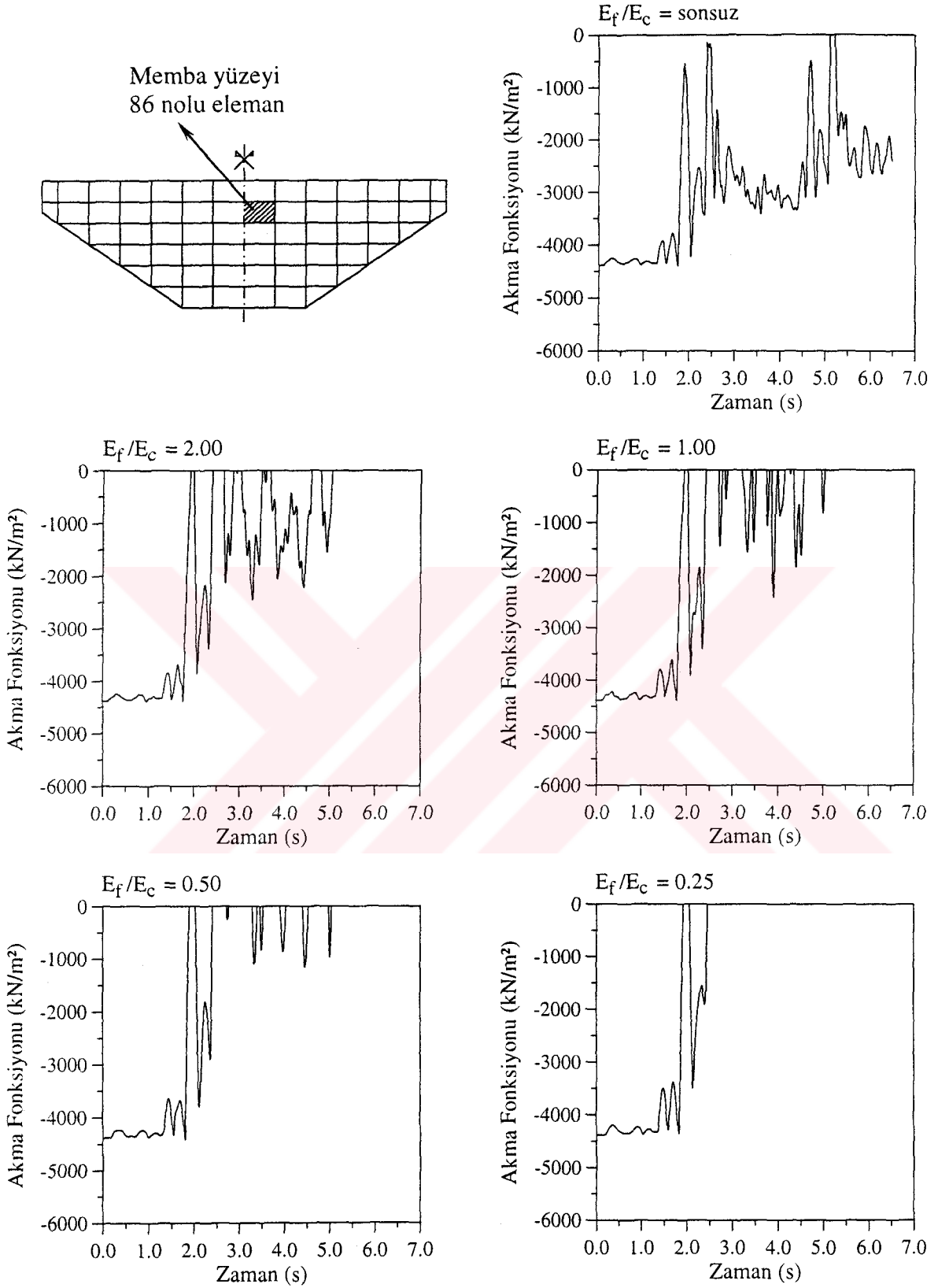
Şekil 3.64. Drucker-Prager modeli ile lineer olmayan dinamik analizde; rezervuarın boş olması durumu için baraj memba yüzeyinde elde edilen yerdeğiştirmeler ve  $E_f/E_c$  oranının sonsuz, 2.00, 1.00, 0.50 ve 0.25 değerleri için baraj kretinde elde edilen yerdeğiştirmelerin dinamik etki süresince değişimi



Şekil 3.65. Drucker-Prager modeli ile lineer olmayan dinamik analizde; rezervuarın boş ve  $E_f/E_c$  oranının sonsuz, 2.00, 1.00, 0.50 ve 0.25 değerleri için Tip-5 kemer barajının 86 nolu memba yüzeyi elemanındaki akma fonksiyonunun aldığı değerlerin dinamik etki süresince değişimi



Şekil 3.66. Drucker-Prager modeli ile lineer olmayan dinamik analizde; rezervuarın dolu olması durumu için baraj memba yüzeyinde elde edilen yerdeğiştirmeler ve  $E_f/E_c$  oranının sonsuz, 2.00, 1.00, 0.50 ve 0.25 değerleri için baraj kretinde elde edilen yerdeğiştirmelerin dinamik etki süresince değişimi



Şekil 3.67. Drucker-Prager modeli ile lineer olmayan dinamik analizde; rezervuarın dolu ve  $E_f/E_c$  oranının sonsuz, 2.00, 1.00, 0.50 ve 0.25 değerleri için Tip-5 kemer barajının 86 nolu memba yüzeyi elemanındaki akma fonksiyonunun aldığı değerlerin dinamik etki süresince değişimi

### 3.4.4. Rezervuar Su Seviyesindeki Değişimin Kemer Baraj Davranışına Etkisi

Bu kısımda; zeminin rijit ve esnek olması durumu için rezervuardaki su seviyesinin 120, 100, 80, 60 ve 40 m olması durumları dikkate alınarak Tip-5 kemer barajının Drucker-Prager modeli ile lineer olmayan dinamik analizi gerçekleştirilmiştir. Bu şekilde kemer barajın lineer olmayan davranışına rezervuar su seviyesindeki değişimin etkisi belirlenmeye çalışılmıştır. Yapılan analizler sonucu, barajın memba yüzeyinde elde edilen yerdeğiştirmelerin mutlak değerce maksimum değerlerinin baraj yüksekliği boyunca değişimi, baraj kret yerdeğiştirmelerinin dinamik etki süresince değişimi ve kemer barajın 86 nolu memba yüzeyi elemanındaki akma fonksiyonunun aldığı değerlerin dinamik etki süresince değişimi incelenmiştir.

#### 3.4.4.1. Rijit Zemin Durumu

Rijit zemin durumunda kemer barajın Drucker-Prager modeli ile lineer olmayan dinamik davranışına rezervuar su seviyesindeki değişimin etkisini incelemek için Şekil 2.20'deki sonlu eleman modeli dikkate alınmıştır. Rezervuardaki su seviyesinin 120, 100, 80, 60 ve 40 m olması durumları için kemer baraj anahtar kesitinin memba yüzeyinde, memba-mansap doğrultusunda elde edilen yerdeğiştirmelerin mutlak değerce maksimum değerlerinin baraj yüksekliği boyunca değişimi Şekil 3.68(a)'da verilmiştir. Baraj kretinin mutlak değerce maksimum yerdeğiştirmesi, rezervuardaki su seviyesinin 120, 100, 80, 60 ve 40 m olması durumları için sırasıyla 21.30 cm, 7.90 cm, 6.44 cm, 5.53 cm ve 4.90 cm olarak elde edilmiştir. Görüldüğü gibi, rezervuar su seviyesi azaldıkça baraj-su etkileşiminden dolayı barajın kret yerdeğiştirmesi de azalmıştır. Şekil 3.68'de, ayrıca rezervuardaki su seviyesinin 120, 100, 80, 60 ve 40 m olması durumları için baraj kretinde (Şekil 2.21'de 162 nolu dn.) memba-mansap doğrultusunda elde edilen yerdeğiştirmelerin dinamik etki süresince değişimi verilmiştir. Su seviyesi arttıkça, barajdaki yerdeğiştirmeler de artmaktadır.

Şekil 3.69'da ise, kemer barajının 86 nolu memba yüzey elemanında akma fonksiyonunun aldığı değerlerin dinamik etki süresince değişimi verilmiştir. Rezervuar su seviyesine göre, rijit zemin durumunda baraj-su etkileşimi kemer barajların deprem davranışını önemli derecede etkilemektedir. Belli bir su seviyesinden sonra barajdaki gerilmelerde göz ardı edilmemesi gereken değişiklikler olmaktadır. Bu durum, Şekil

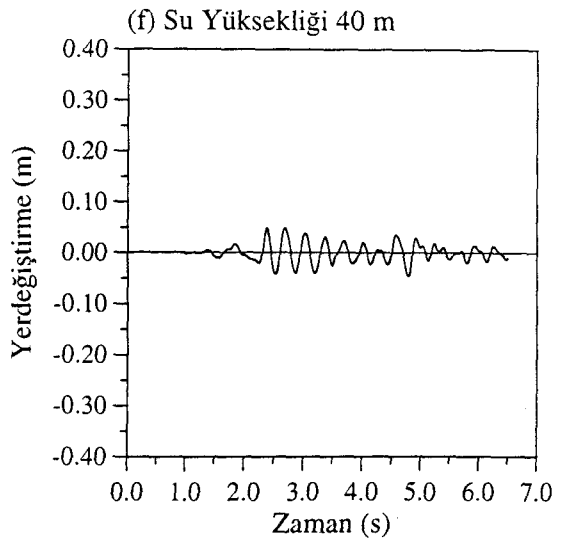
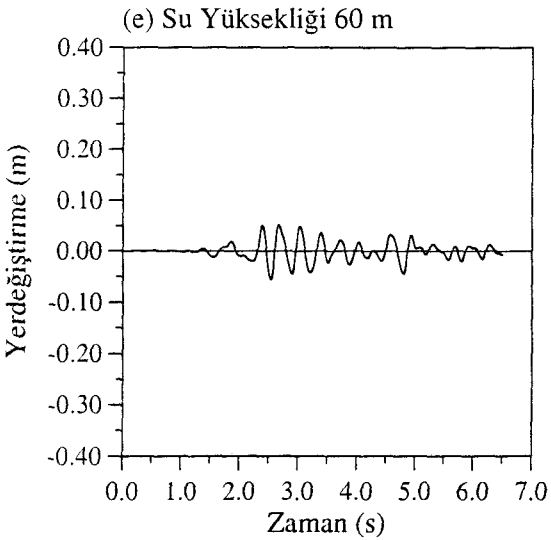
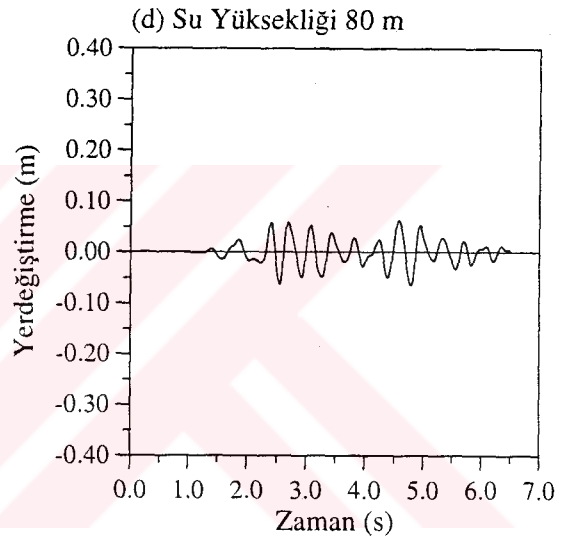
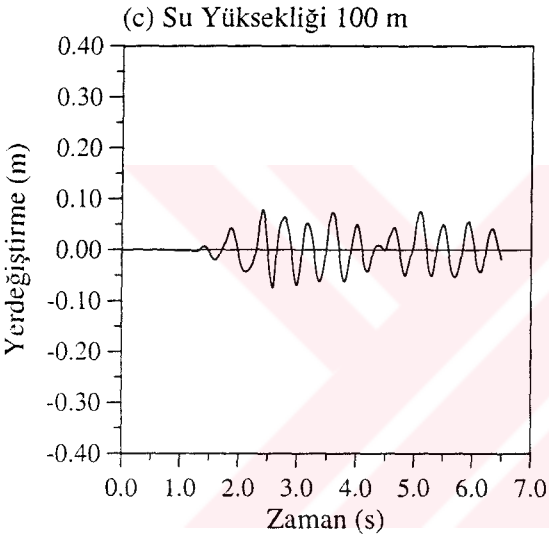
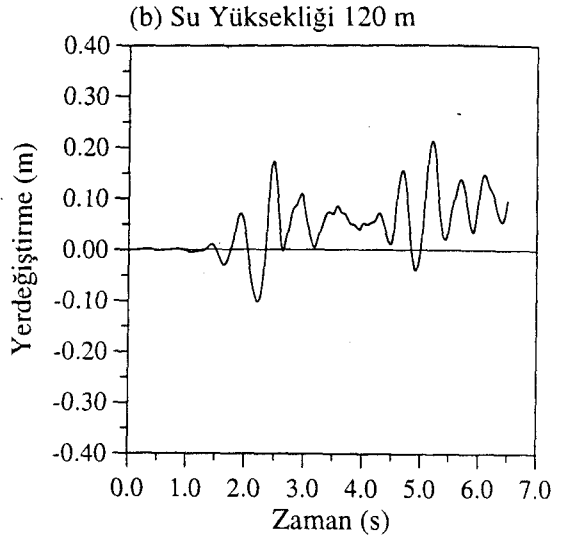
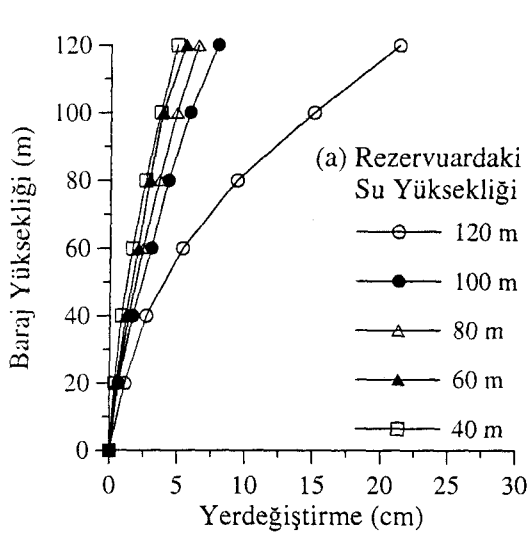


3.69'da verilen akma fonksiyonları incelendiğinde görülmektedir. Rezervuardaki su seviyesi 60 metreyi geçtikten sonra 86 nolu elemanın büyük çekme gerilmelerine maruz kaldığı görülmektedir. Su seviyesi 120 m olduğu zaman elemanda plastik davranışlar gözlenmektedir.

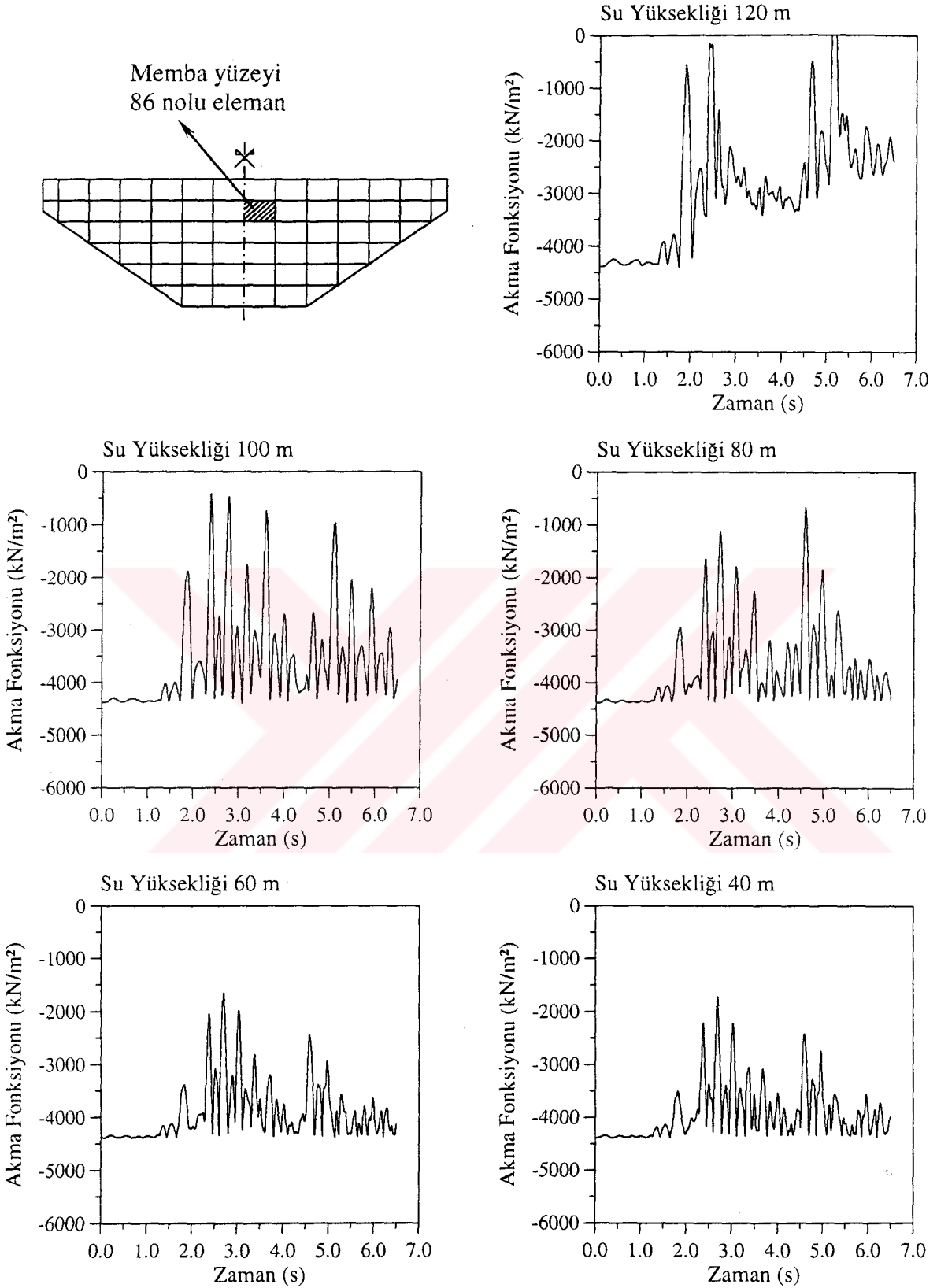
#### 3.4.4.2. Esnek Zemin Durumu

Esnek zemin durumunda kemer barajın Drucker-Prager modeli ile lineer olmayan dinamik davranışına rezervuar su seviyesindeki değişimin etkisini incelemek için Şekil 2.23'teki sonlu eleman modeli kullanılmıştır. Rezervuardaki su seviyesinin 120, 100, 80, 60 ve 40 m olması durumları için kemer baraj anahtar kesitinin memba yüzeyinde, memba-mansap doğrultusunda elde edilen yerdeğiştirmelerin mutlak değerce maksimum değerlerinin baraj yüksekliği boyunca değişimi Şekil 3.70(a)'da verilmiştir. Baraj kretinin mutlak değerce maksimum yerdeğiştirmesi, rezervuardaki su seviyesinin 120, 100, 80, 60 ve 40 m olması durumları için sırasıyla 31.03 cm, 11.86 cm, 9.63 cm, 7.40 cm ve 6.69 cm olarak elde edilmiştir. Esnek zemin durumunda, rezervuar su seviyesinin değişimi barajın kret yerdeğiştirmesini çok daha fazla etkilemiştir. Şekil 3.70'de, ayrıca rezervuardaki su seviyesinin 120, 100, 80, 60 ve 40 m olması durumları için baraj kretinde memba-mansap doğrultusunda elde edilen yerdeğiştirmelerin dinamik etki süresince değişimi verilmiştir. Su seviyesi arttıkça, barajdaki yerdeğiştirmeler de artmaktadır.

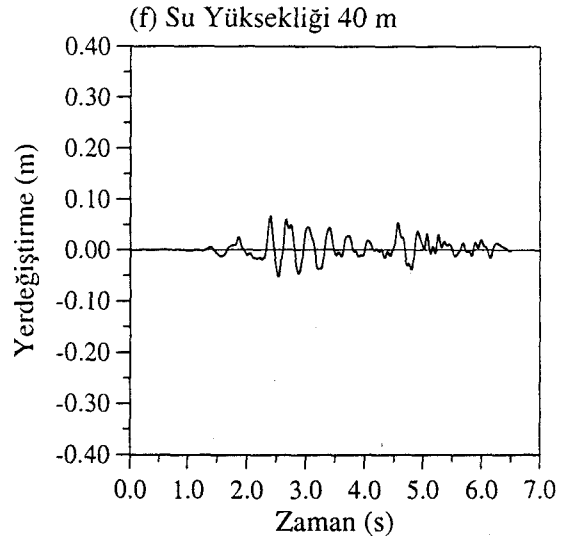
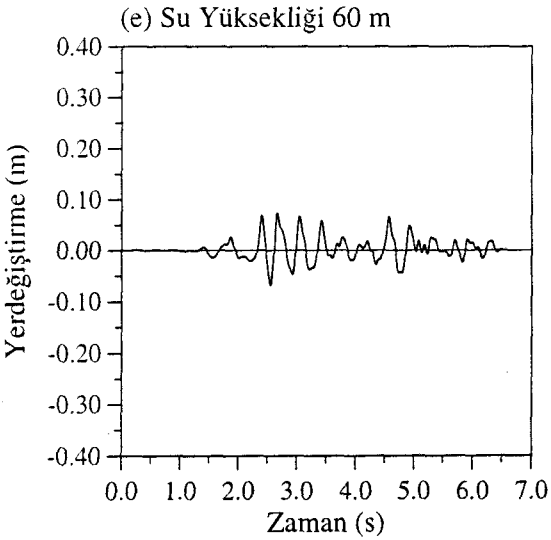
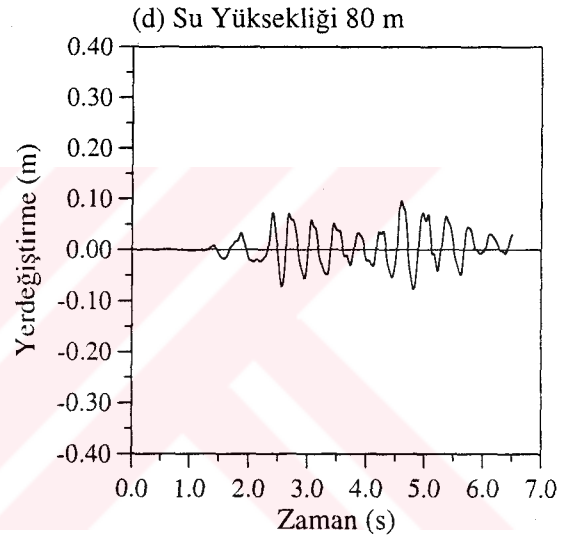
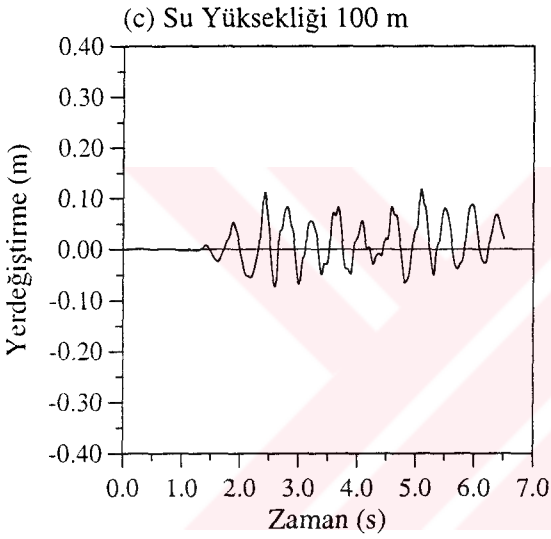
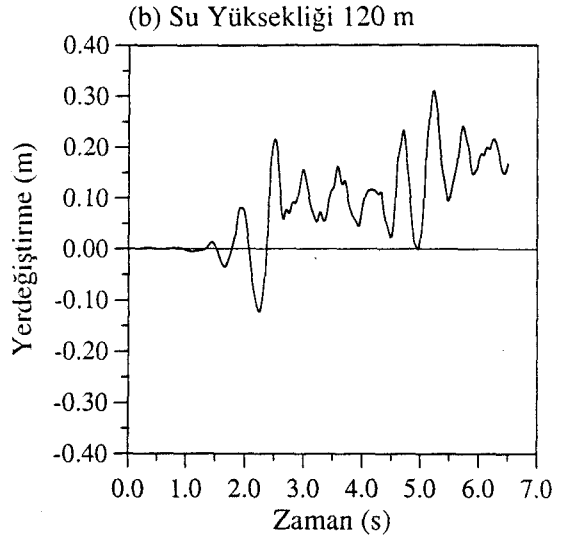
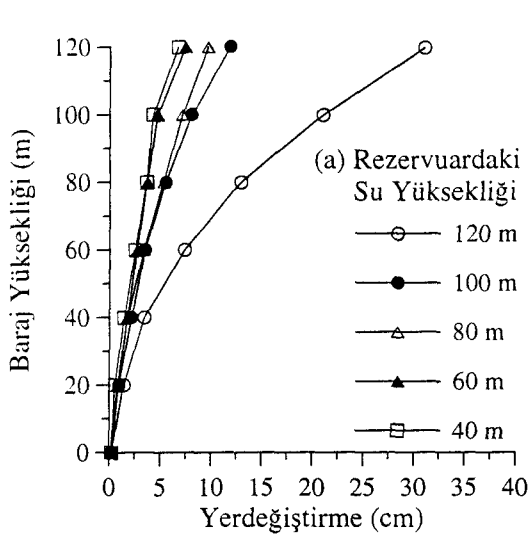
Şekil 3.71'de ise, kemer barajının 86 nolu memba yüzey elemanında akma fonksiyonunun aldığı değerlerin dinamik etki süresince değişimi verilmiştir. Esnek zemin durumunda da, su seviyesi 60 metreyi geçtikten sonra, barajdaki yerdeğiştirme ve gerilmelerde göz ardı edilmemesi gereken değişiklikler olmaktadır. 86 nolu elemandaki akma fonksiyonunun dinamik etki süresince değişimi incelendiğinde, bu durum açıkça görülmektedir.



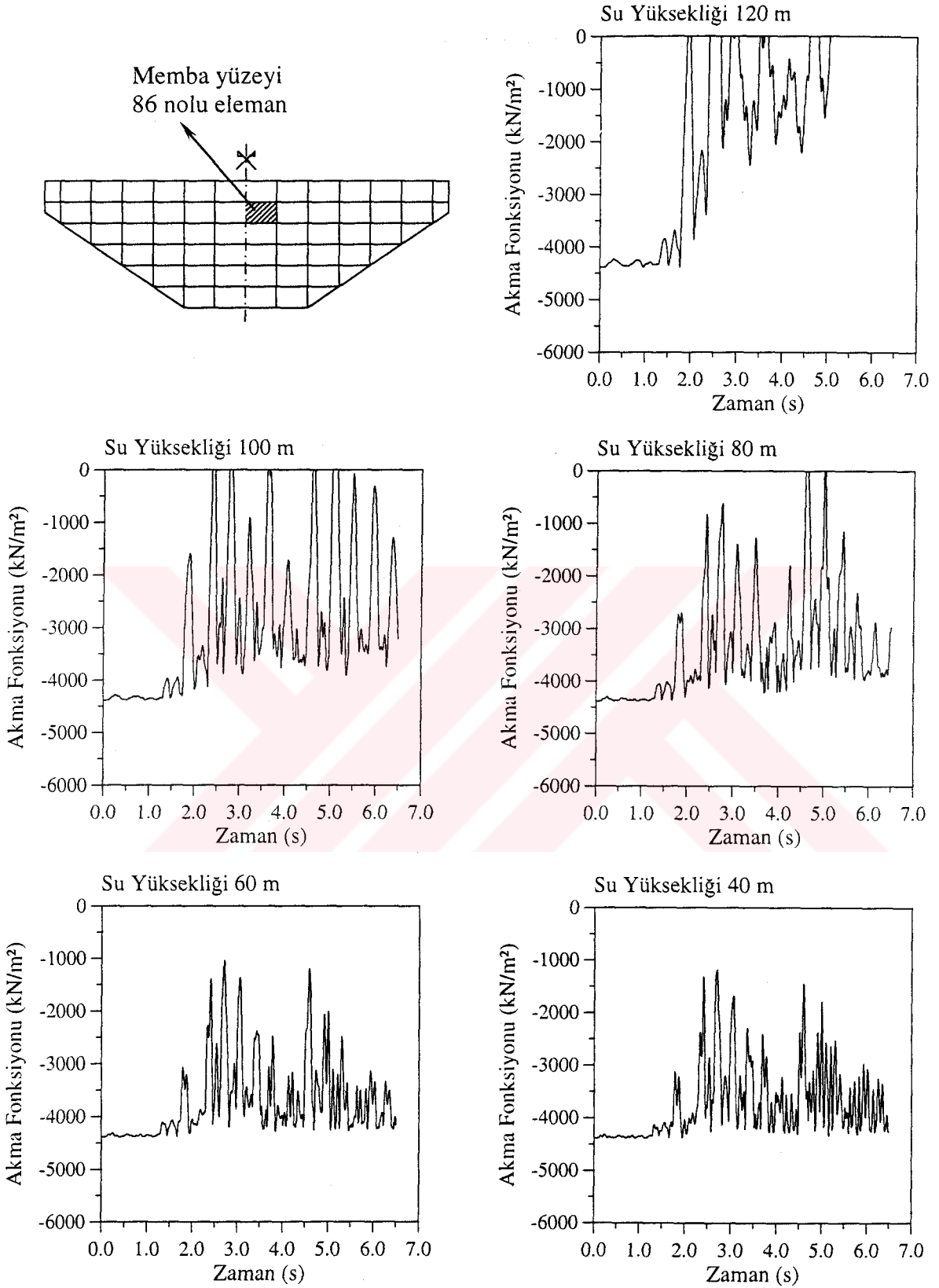
Şekil 3.68. Drucker-Prager modeli ile lineer olmayan dinamik analizde; zeminin rijit olması durumu için baraj memba yüzeyinde elde edilen yerdeğiştirmeler ve rezervuardaki su yüksekliğinin 120, 100, 80, 60 ve 40 m olması durumu için baraj kretinde elde edilen yerdeğiştirmelerin dinamik etki süresince değişimi



Şekil 3.69. Drucker-Prager modeli ile lineer olmayan dinamik analizde; zeminin rijit ve rezervuardaki su yüksekliğinin 120, 100, 80, 60 ve 40 m olması durumu için Tip-5 kemer barajının 86 nolu mamba yüzeyi elemanındaki akma fonksiyonunun aldığı değerlerin dinamik etki süresince değişimi



Şekil 3.70. Drucker-Prager modeli ile lineer olmayan dinamik analizde; zeminin esnek olması durumu için baraj memba yüzeyinde elde edilen yerdeğiştirmeler ve rezervuardaki su yüksekliğinin 120, 100, 80, 60 ve 40 m olması durumu için baraj kretinde elde edilen yerdeğiştirmelerin dinamik etki süresince değişimi



Şekil 3.71. Drucker-Prager modeli ile lineer olmayan dinamik analizde; zeminin esnek ve rezervuardaki su yüksekliğinin 120, 100, 80, 60 ve 40 m olması durumu için Tip-5 kemer barajının 86 nolu memba yüzeyi elemanındaki akma fonksiyonunun aldığı değerlerin dinamik etki süresince değişimi

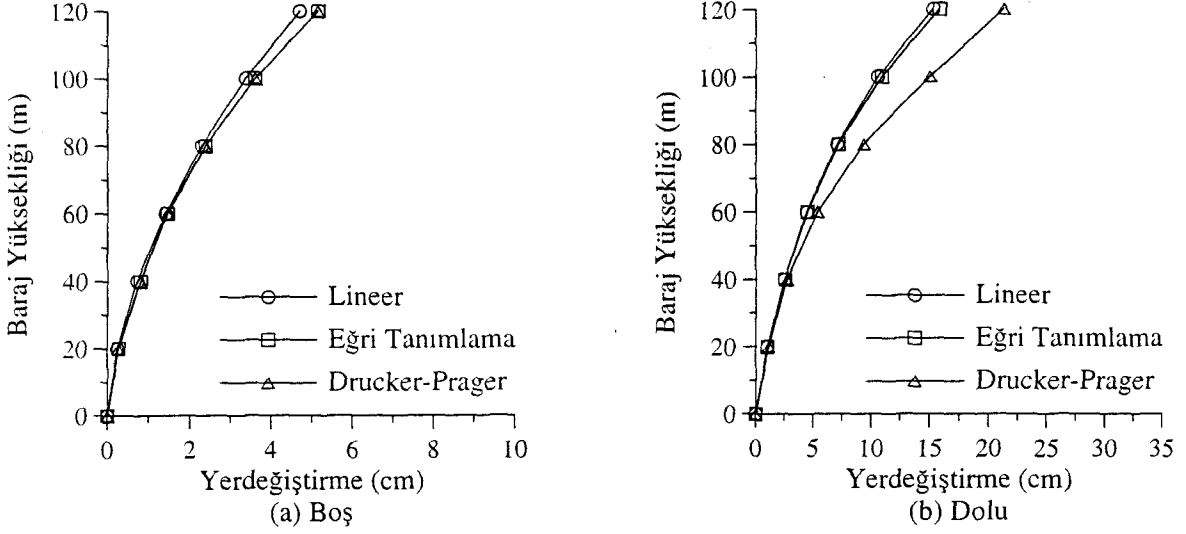
### 3.5. Lineer ve Lineer Olmayan Analiz Sonuçlarının Karşılaştırılması

Bu kısımda, Tip-5 kemer barajının malzeme bakımından lineer ve lineer olmayan dinamik analiz sonuçları karşılaştırılmaktadır. Bilindiği gibi, lineer olmayan dinamik analizde Eğri Tanımlama ve Drucker-Prager modeli kullanılmıştır. Zeminin rijit ve esnek olması, rezervuarın boş ve dolu olması durumları dikkate alınarak sonuçlar değerlendirilmiştir. Baraj kretinde (rijit zemin durumu için Şekil 2.21'de 162 nolu dn., esnek zemin durumu için Şekil 2.24'te 617 nolu dn.) memba-mansap doğrultusunda elde edilen mutlak değerce maksimum yerdeğiştirmeler, baraj-su ara yüzeyinde bulunan sıvı yüzey (Şekil 2.21'de 408 nolu el.) ile taban (Şekil 2.21'de 4 nolu el.) elemanında elde edilen hidrodinamik basınçlar ve barajın memba ve mansap yüzeyindeki maksimum çekme ve minimum basınç gerilmeleri tablolar halinde verilerek, lineer ve lineer olmayan analiz sonuçları aşağıda ayrıntılı olarak karşılaştırılmaktadır.

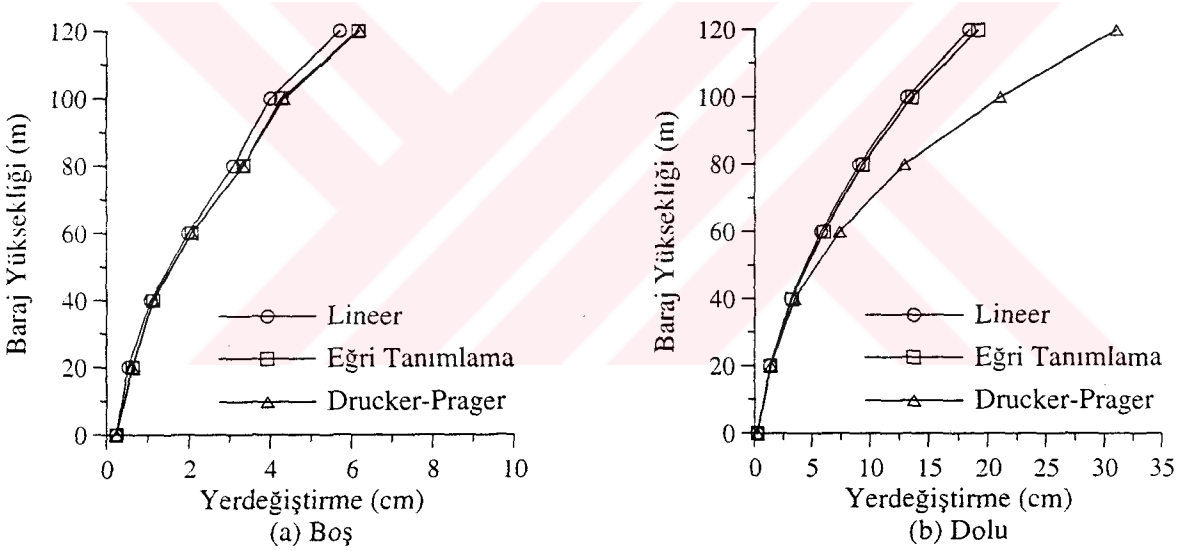
#### 3.5.1. Yerdeğiştirmeler

Kemer barajın lineer ve lineer olmayan dinamik analizleri sonucu, baraj memba yüzeyinde elde edilen yerdeğiştirmelerin mutlak değerce maksimum değerlerinin baraj yüksekliği boyunca değişimi, rijit zemin için Şekil 3.72'de, esnek zemin için Şekil 3.73'te karşılaştırılmıştır. Ayrıca, bu analizler sonucu baraj kretinde elde edilen mutlak değerce maksimum yerdeğiştirmeler Tablo 3.1'de verilmiştir.

Şekil 3.72, 3.73 ve Tablo 3.1 incelendiğinde, lineer olmayan analizler sonucu elde edilen baraj kretinin yerdeğiştirmesi, lineer analize göre daha büyük değer aldığı görülmektedir. Eğri Tanımlama ve Drucker-Prager modeli ile lineer olmayan analizde, rezervuarın boş olması durumunda kret yerdeğiştirmesi lineer analizden daha büyük olmakla birlikte hemen hemen aynıdır. Ancak, rezervuarın dolu olması için bu durum söz konusu değildir. Kret yerdeğiştirmesi, Drucker-Prager modelinde en büyük değeri almaktadır. Lineer analiz ve Eğri Tanımlama modeli ile lineer olmayan analiz sonucu hem rijit hem de esnek zemin durumunda %4'lük bir fark meydana gelmiştir. Lineer analiz ile Drucker-Prager modeli ile lineer olmayan analiz arasındaki fark ise, rezervuarın boş olması durumunda hem rijit hem de esnek zemin için %4, rezervuarın dolu olması halinde rijit zemin için %39, esnek zemin için %69'dur.



Şekil 3.72. Lineer ve lineer olmayan dinamik analizler sonucu; zeminin rijit, rezervuarın boş ve dolu olması durumu için baraj memba yüzeyinde elde edilen mutlak değerce maksimum yerdeğiştirmelerin baraj yüksekliği boyunca değişimi



Şekil 3.73. Lineer ve lineer olmayan dinamik analizler sonucu; zeminin esnek, rezervuarın boş ve dolu olması durumu için baraj memba yüzeyinde elde edilen mutlak değerce maksimum yerdeğiştirmelerin baraj yüksekliği boyunca değişimi

Rezervuarın boş olması durumunda baraj elemanlarındaki gerilmeler elastik bölgede kaldığı için, lineer analiz ile Eğri tanımlama modeli ile lineer olmayan analiz sonucu kret yerdeğiştirmesi hemen hemen aynı elde edilmiştir. Rezervuarın dolu olması durumunda Drucker-Prager modeli ile lineer olmayan analizde, deprem ve su yükünden dolayı barajın memba ve mansap yüzeylerindeki gerilmelerde artışlar sonucu bazı elemanların plastik bölgeye geçmelerine sebep olmuştur. Lineer olmayan davranış sonucu Drucker-Prager

modelinde kret yerdeşiştirmeleri daha büyük elde edilmiştir. Eğri Tanımlama modeli ile lineer olmayan analizde bu durum görülememiştir. Çünkü, bu modelde malzeme davranışını belirleyen gerilme-şekildeğiştirme ilişkisi analizin başında tanımlanmakta ve malzeme bu ilişkinin dışında bir davranış sergileyememektedir. Drucker-Prager modelinde ise, malzeme davranışı akma fonksiyonunun aldığı değer ile belirlenmektedir. Malzemedeki gerilme durumuna göre elastik veya plastik davranış kabul edilmekte ve elemanın malzeme matrisi buna göre oluşturulmaktadır.

Tablo 3.1. Lineer ve lineer olmayan dinamik analizler sonucu; baraj kretinde elde edilen mutlak değerce maksimum yerdeğiştirmeler

| Mutlak Değerce Maksimum Kret Yerdeğiştirmesi (cm) |           |      | Lineer Analiz | Lineer Olmayan Analiz |                       |
|---|-----------|------|---------------|-----------------------|-----------------------|
|   |           |      |               | Eğri Tanımlama Modeli | Drucker-Prager Modeli |
| Rijit Zemin Durumu                                | Rezervuar | Boş  | 4.70          | 5.15                  | 5.15                  |
|   |           | Dolu | 15.29         | 15.84                 | 21.30                 |
| Esnek Zemin Durumu                                | Rezervuar | Boş  | 5.70          | 6.15                  | 6.18                  |
|   |           | Dolu | 18.39         | 19.13                 | 31.03                 |

### 3.5.2. Hidrodinamik Basınçlar

Tip-5 kemer barajının lineer ve lineer olmayan dinamik analizi sonucu, baraj-su ara yüzeyinde 408 nolu sıvı yüzey elemanında ve rezervuar tabanındaki 4 nolu sıvı elemanda elde edilen hidrodinamik basınçlar Tablo 3.2’de verilmiştir. Bu basınçlar, 8-düğüm noktalı sıvı eleman için indirgenmiş integrasyon derecesi (1×1×1) olduğundan, her elemanda bir adet Gauss noktasıda elde edilmiştir. Bu Gauss noktası da sıvı elemanın geometrik merkezinde bulunmaktadır. Lineer analize göre Eğri Tanımlama modeli ile lineer olmayan analiz sonucu elde edilen hidrodinamik basınçlarda genel olarak bir artış gözlenirken, Drucker-Prager modeli ile lineer olmayan analizde bir azalma söz konusudur. Bu durum, Drucker-Prager modeli ile lineer olmayan analizde barajın plastik bölgedeki davranışı sonucu, malzemenin zayıflaması neticesinde baraj-su etkileşiminin azalması ile açıklanabilir.



Tablo 3.2. Lineer ve lineer olmayan dinamik analizi sonucu; baraj-su ara yüzeyinde elde edilen hidrodinamik basınçlar

| Mutlak Değerce Maksimum Hidrodinamik Basınç (kN/m <sup>2</sup> ) |                |     | Lineer Analiz | Lineer Olmayan Analiz |                       |
|--|----------------|-----|---------------|-----------------------|-----------------------|
|  |                |     |               | Eğri Tanımlama Modeli | Drucker-Prager Modeli |
| Rijit Zemin Durumu   | Sıvı Eleman No | 408 | 233           | 243                   | 201                   |
|  |                | 4   | 1420          | 1420                  | 1370                  |
| Esnek Zemin Durumu   | Sıvı Eleman No | 408 | 349           | 370                   | 265                   |
|  |                | 4   | 1000          | 1010                  | 964                   |

### 3.5.3. Gerilmeler

Tip-5 kemer barajının lineer ve lineer olmayan dinamik analizi sonucu, barajın memba ve mansap yüzeyinde ve x-x, y-y ve z-z eksenleri doğrultusunda elde edilen maksimum çekme gerilmeleri Tablo 3.3'te, minimum basınç gerilmeleri ise Tablo 3.4'te verilmiştir. Burada verilen gerilmeler, elemanın geometrik merkezindeki değerlerdir.

Eğri Tanımlama modeli ile lineer olmayan analizde, rezervuarın boş ve dolu olması durumunda elde edilen maksimum çekme ve minimum basınç gerilmeleri lineer analizden daha büyüktür. Drucker-Prager modeli ile lineer olmayan analizde rezervuarın boş olması durumunda elde edilen gerilmeler lineer analizden büyük ve Eğri Tanımlama modelindekilerle hemen hemen aynıdır. Bu, rezervuarın boş olması durumunda barajın lineer bölgede davranış sergilemesinden kaynaklanmaktadır. Rezervuarın dolu olması durumunda ise, deprem ve su yükünden dolayı barajdaki bazı elemanların plastik bölgedeki davranışları barajdaki gerilmelere yansımıştır. Büyük çekme gerilmelerinin etkisinde kalan ve plastik davranış sergileyen elemanların sonuçta çekme gerilmesi taşıma kapasitesi azalmıştır.

Drucker-Prager modelinde barajda kullanılan malzeme özellikleri için izin verilebilir maksimum çekme gerilmesi 5356 kN/m<sup>2</sup> dir. Tablo 3.3'te verilen maksimum çekme gerilmeleri incelendiğinde, rijit zemin durumu için sadece rezervuarın dolu olması durumunda ve x-x doğrultusundaki gerilmeler bu değeri aşmaktadır. Diğer gerilmeler, bu değer altındadır. Esnek zemin durumunda ise, rezervuarın boş olması durumu için sadece x-x doğrultusundaki gerilme, betonun çekme mukavemetini aşarken, rezervuarın dolu

olması durumunda ise tüm doğrultulardaki gerilmeler betonun çekme mukavemetini aşmıştır. Barajda oluşan minimum basınç gerilmelerinde de çeşitli değişimler söz konusudur. Ancak, bu değişimler betonun basınç mukavemetinin altındadır.

Tablo 3.3. Lineer ve lineer olmayan dinamik analizler sonucu; baraj memba ve mansap yüzeyinde elde edilen maksimum çekme gerilmeleri

| Maksimum Çekme Gerilmeleri<br>(kN/m <sup>2</sup> ) |           |               |              |       | Lineer Analiz | Lineer Olmayan Analiz |                       |
|--|-----------|---------------|--------------|-------|---------------|-----------------------|-----------------------|
|  |           |               |              |       |               | Eğri Tanımlama Modeli | Drucker-Prager Modeli |
| Rijit Zemin Durumu                                 | Rezervuar | Boş           | Memba Yüzeyi | x-x   | 3595          | 3846                  | 3846                  |
|  |           |               |              | y-y   | 758           | 970                   | 971                   |
|  |           |               |              | z-z   | 1345          | 1525                  | 1527                  |
|  |           | Mansap Yüzeyi | x-x          | 2657  | 3184          | 3183                  |                       |
|  |           |               | y-y          | 1292  | 1417          | 1420                  |                       |
|  |           |               | z-z          | 751   | 1189          | 1190                  |                       |
|  | Dolu      | Memba Yüzeyi  | x-x          | 10618 | 11015         | 6163                  |                       |
|  |           |               | y-y          | 3564  | 3609          | 4920                  |                       |
|  |           |               | z-z          | 5291  | 5359          | 3046                  |                       |
|  |           | Mansap Yüzeyi | x-x          | 6331  | 6469          | 8288                  |                       |
|  |           |               | y-y          | 3387  | 3437          | 5193                  |                       |
|  |           |               | z-z          | 1971  | 1994          | 4247                  |                       |
| Esnek Zemin Durumu                                 | Rezervuar | Boş           | Memba Yüzeyi | x-x   | 5112          | 5697                  | 5754                  |
|  |           |               |              | y-y   | 1362          | 1732                  | 1753                  |
|  |           |               |              | z-z   | 2114          | 2260                  | 2274                  |
|  |           | Mansap Yüzeyi | x-x          | 3292  | 3679          | 4293                  |                       |
|  |           |               | y-y          | 2343  | 2629          | 2758                  |                       |
|  |           |               | z-z          | 2539  | 2759          | 2735                  |                       |
|  | Dolu      | Memba Yüzeyi  | x-x          | 12255 | 12708         | 12889                 |                       |
|  |           |               | y-y          | 3919  | 3947          | 8171                  |                       |
|  |           |               | z-z          | 5491  | 5577          | 6173                  |                       |
|  |           | Mansap Yüzeyi | x-x          | 8246  | 8650          | 12086                 |                       |
|  |           |               | y-y          | 3827  | 3972          | 7399                  |                       |
|  |           |               | z-z          | 2737  | 2847          | 5625                  |                       |

Tablo 3.4. Lineer ve lineer olmayan dinamik analizleri sonucu; baraj memba ve mansap yüzeyinde elde edilen minimum basınç gerilmeleri

| Minimum Basınç Gerilmeleri<br>(kN/m <sup>2</sup> ) |           |               | Linear Analiz |      | Lineer Olmayan Analiz |                       |      |
|--|-----------|---------------|---------------|------|-----------------------|-----------------------|------|
|  |           |               |               |      | Eğri Tanımlama Modeli | Drucker-Prager Modeli |      |
| Rijit Zemin Durumu                                 | Rezervuar | Boş           | Memba Yüzeyi  | x-x  | 3764                  | 4412                  | 4396 |
|  |           |               |               | y-y  | 726                   | 852                   | 852  |
|  |           |               |               | z-z  | 1856                  | 1989                  | 1981 |
|  |           | Mansap Yüzeyi | x-x           | 2806 | 3442                  | 3431                  |      |
|  |           |               | y-y           | 1138 | 1459                  | 1462                  |      |
|  |           |               | z-z           | 870  | 1205                  | 1203                  |      |
|  | Dolu      | Memba Yüzeyi  | x-x           | 7431 | 7587                  | 11375                 |      |
|  |           |               | y-y           | 3132 | 3199                  | 5078                  |      |
|  |           |               | z-z           | 5078 | 5106                  | 11346                 |      |
|  |           | Mansap Yüzeyi | x-x           | 5194 | 5290                  | 5267                  |      |
|  |           |               | y-y           | 3261 | 3407                  | 3172                  |      |
|  |           |               | z-z           | 2573 | 2601                  | 2256                  |      |
| Esnek Zemin Durumu                                 | Rezervuar | Boş           | Memba Yüzeyi  | x-x  | 3700                  | 3967                  | 3767 |
|  |           |               |               | y-y  | 1144                  | 1326                  | 1351 |
|  |           |               |               | z-z  | 2403                  | 2708                  | 2690 |
|  |           | Mansap Yüzeyi | x-x           | 3086 | 3383                  | 3119                  |      |
|  |           |               | y-y           | 1450 | 1705                  | 1680                  |      |
|  |           |               | z-z           | 2096 | 2271                  | 2768                  |      |
|  | Dolu      | Memba Yüzeyi  | x-x           | 9006 | 9764                  | 10042                 |      |
|  |           |               | y-y           | 3722 | 3856                  | 5321                  |      |
|  |           |               | z-z           | 5996 | 6220                  | 6026                  |      |
|  |           | Mansap Yüzeyi | x-x           | 6261 | 6415                  | 10846                 |      |
|  |           |               | y-y           | 3831 | 3887                  | 6341                  |      |
|  |           |               | z-z           | 2595 | 2609                  | 3297                  |      |

#### 4. SONUÇLAR ve ÖNERİLER

Bu çalışmada, kemer barajların malzeme bakımından lineer ve lineer olmayan dinamik davranışı Lagrange yaklaşımı ile incelenmiştir. Kaya zemin ve suyun lineer elastik izotropik malzeme olduğu kabul edilmiştir. Baraj betonunun lineer olmayan davranışı, Eğri Tanımlama ve Drucker-Prager modeli ile tanımlanmıştır. Baraj ve kaya zemin standart katı elemanlar ile temsil edilirken, rezervuardaki su kütlesi, Wilson ve Khalvati (1983) tarafından önerilen iki boyutlu Lagrange sıvı elemanların üç boyutlu 8-düğüm noktalı versiyonu ile temsil edilmiştir. Bu sıvı eleman, FORTRAN 77 programlama dilinde kodlanarak genel amaçlı NONSAP (Bathe vd., 1974) yapı analiz programına uyarlanmıştır. Ayrıca, Chen ve Mizuno (1990)'da ayrıntıları iki boyutlu olarak verilen Drucker-Prager modelinin üç boyutlu hali geliştirilerek NONSAP (Bathe vd., 1974) yapı analiz programına eklenmiştir. Böylece baraj-su etkileşimi, değiştirilen bu program ile incelenmiştir. Rezervuar su seviyesinin 120 m (tam dolu rezervuar), 100 m, 80 m, 60 m ve 40 m olması durumları dikkate alınarak su seviyesindeki değişimin ve kaya zemin elastisite modülünün baraj betonu elastisite modülüne oranı sonsuz, 2.00, 1.00, 0.50 ve 0.25 alınarak kaya zemin özelliklerinin baraj davranışına etkisi de ayrıca incelenmiştir.

Uygulama amacıyla, 1968 yılında İngiltere'de düzenlenen "Kemer Barajlar" sempozyumunda (Arch Dams, 1968) önerilen beş tip kemer barajdan Tip-5 kemer barajı seçilmiştir. Yer hareketi olarak kayalık zeminlerde oluşması muhtemel deprem türüne örnek olması açısından, 18 Mayıs 1940 tarihinde meydana gelen Imperial Valley depreminin El-Centro bileşeni tercih edilmiştir. Deprem ivmesi baraja memba-mansap doğrultusunda uygulanmıştır. 53 saniye süren Imperial Valley depreminde en büyük ivmeler ilk 5 saniye içerisinde oluşmuştur. Bu nedenle, analizlerde depremin sadece ilk 6.5 saniyelik kısmı kullanılmıştır.

Bu çalışmada, analiz edilen kemer baraj, kemer baraj-su, kemer baraj-zemin ve kemer baraj-su-zemin sistemleri için Rayleigh sönüm sabitleri, %5 sönüm oranı kabul edilerek 2 ile 15 Hz frekans aralığı için hesaplanmıştır. Analizler, adım-adım integrasyon tekniği ile Wilson- $\theta$  metodu kullanılarak gerçekleştirilmiştir. İntegrasyon için zaman adımı 0.001 saniye seçilmiştir.

Yapılan analizler sonucu elde edilen bulgulardan aşağıdaki sonuçlara ulaşılmıştır:

- 1) Lineer ve lineer olmayan analiz sonuçları karşılaştırıldığında, lineer olmayan analizlerde elde edilen yerdeğiştirme ve gerilmelerin lineer analize göre daha büyük değerler almıştır.
- 2) Lineer ve lineer olmayan dinamik analiz sonuçlarına göre, en büyük gerilme ve yerdeğiştirmeler zemin esnekliğinin dikkate alındığı durumlarda meydana gelmiştir.
- 3) Lineer dinamik analizde, memba-mansap doğrultusunda yer hareketine maruz kemer baraj davranışı üzerinde suyun etkisi, rijit ve esnek zemin durumları için benzer şekilde olmaktadır.
- 4) Baraj beton malzemesi için kabul edilen gerilme-şekildeğiştirme bağıntısı Eğri Tanımlama modeli ile temsil edilerek Tip-5 kemer barajının lineer olmayan dinamik analizi yapılmıştır. Bu model, malzemenin hacimsel elastite ve kayma modülünü hacimsel şekildeğiştirmeye bağlı olarak belirleyen bir fonksiyondan ibarettir. Dolayısıyla, hacimsel şekildeğiştirmenin aldığı değere göre malzemenin yükleme ve boşalma durumunda olduğuna karar verilir ve ilgili modüller buna göre belirlenerek malzeme matrisinde kullanılır. Eğri Tanımlama modelinde; beton için kabul edilen gerilme-şekildeğiştirme ilişkisi, malzeme özellikleri ve baraja uygulanan deprem kuvveti dikkate alınarak gerçekleştirilen lineer olmayan analiz sonucu, baraj betonunun elastik bölgede davranış sergilediği anlaşılmıştır.
- 5) Beton malzemesi belirli bir yük düzeyine kadar lineer davranış gösterir. Ancak, yük arttıkça beton lineer davranmaktan uzaklaşıp, lineer olmayan davranış sergilemektedir. Bunun sonucunda betonda çatlaklar ve kırılmalar meydana gelmektedir. Tip-5 kemer barajının lineer analizi sonucu, barajın bazı elemanlarında elde edilen maksimum çekme gerilmeleri betonun emniyetle taşıyabileceği çekme gerilmesini aştığından çatlama olayının meydana geldiği anlaşılmaktadır. Bu nedenle, betonun elastik bölgenin ötesindeki davranışını dikkate alan Drucker-Prager modelinin kullanılması uygun olmuştur.
- 6) Tip-5 kemer barajının Drucker-Prager modeli ile lineer olmayan dinamik analizi sonucu, barajın memba ve mansap yüzeylerinin büyük çekme gerilmelerine maruz kaldığı görülmüştür. Bu durum, bazı elemanların plastik bölgede davranış sergilemesine ve çekme gerilmesi taşıma kapasitesinin azalmasına neden olmuştur. Dolayısıyla, baraj kreti büyük yerdeğiştirmeler yapmıştır.

- 7) Lineer olmayan analiz sonuçlarına göre, rezervuarın boş olması durumunda kemer baraj davranışı genellikle elastik bölgede kalmıştır. Rezervuarın dolu olması durumu için Drucker-Prager modeli ile lineer olmayan analizde, deprem ve su yükünden dolayı barajın memba ve mansap yüzeylerindeki gerilmelerde artışlar sonucu bazı elemanların plastik bölgede davranış sergilemesine neden olmuştur.
- 8) Rezervuar su seviyesindeki değişimin baraj davranışına etkisi, su yüksekliği 120 m, 100 m, 80 m, 60 m ve 40 m alınarak incelenmiştir. Rezervuar su seviyesine göre, baraj-su etkileşimi kemer barajların hem lineer hem de lineer olmayan dinamik davranışını önemli derecede etkileyebilmektedir. Su seviyesi arttıkça, barajdaki yerdeğiştirme ve gerilmeler de artmaktadır. Bu çalışmada, 60 m su seviyesinden sonra barajdaki yerdeğiştirme ve gerilmelerde önemli artışlar olmuş, bunun sonucunda barajdaki bazı elemanların hasar gördüğü anlaşılmıştır.
- 9) Zemin özelliklerinin baraj davranışına etkisini incelemek üzere, zemin elastisite modülünün baraj betonunun elastisite modülüne oranı sonsuz, 2.00, 1.00, 0.50 ve 0.25 alınarak yapılan parametrik çalışma sonucu, zemin esnekliği arttıkça barajdaki yerdeğiştirme ve gerilmelerin de arttığı görülmüştür.
- 10) Hidrodinamik etkilerden dolayı, barajın hem memba hem de mansap yüzeyinin çoğu kısmı büyük çekme gerilmelerinin etkisinde kalmıştır. Barajın hem memba hem de mansap yüzeyinde y-y ve z-z yönlerinde oluşan çekme gerilmelerine kıyasla x-x yönündeki çekme gerilmeleri çok daha büyük değerlere ulaşmıştır. x-x yönündeki maksimum çekme gerilmeleri incelendiğinde, baraj davranışında kemer etkisini belirgin bir şekilde görmek mümkündür. Çünkü, barajda kemerleşme x-x yönündedir.
- 11) Lineer ve lineer olmayan dinamik analizlerde, hidrodinamik etkilerden dolayı barajda elde edilen basınç gerilmelerinde de önemli artışlar olmuştur. Ancak, bu gerilmeler genellikle betonun basınç mukavemetinin altındadır.

El-Centro depremine maruz Tip-5 kemer barajının malzeme bakımından lineer ve lineer olmayan dinamik analizlerinden çıkarılan yukarıdaki sonuçlar, tüm kemer barajlar için uygun olmayabilir. Çünkü, baraj-zemin, baraj-su ve baraj-su-zemin etkileşimi, baraj ve yer hareketine bağlı olarak farklılık gösterebilir. Bununla birlikte, elde edilen genel sonuçlar çoğu durum için geçerlidir.

Burada sunulan sonuçlar göstermiştir ki; basitleştirici kabuller yapılarak gerçekleştirilen lineer olmayan analizler, barajın gerçek davranışını yansıtmamaktadır. Bu

nedenle, baraj malzemesinin lineer olmayan davranışına uygun modeller seçilerek analizler yapılmalıdır. Buna ek olarak, rijit ve esnek zemin durumunda hem lineer hem de lineer olmayan analizler için baraj-su etkileşimi kemer barajların dinamik davranışını önemli derecede etkilediği için, baraj-zemin, baraj-su ve baraj-su-zemin etkileşimi yeni kemer barajların tasarımında ve mevcut barajların sismik güvenlik araştırmasında göz önünde bulundurulmalıdır. Bu etkiler için kemer barajların lineer ve lineer olmayan dinamik analizi, üç boyutlu Lagrange sıvı eleman ve üç boyutlu Drucker-Prager modeli eklenerek sıvı-yapı problemlerinin lineer ve lineer olmayan çözümüne etkinlik kazandırılan NONSAP yapı analiz programı ile gerçekleştirilebilir.

Tip-5 kemer barajının lineer ve lineer olmayan dinamik analizlerinden elde edilen sonuçlardan sonra, aşağıdaki hususların da üzerinde durulması ve araştırma ve incelemelerin devam ettirilmesi tavsiye edilmektedir:

- 1) Bu çalışma ile, deprem etkilerinin yön değiştirebilir olması nedeni ile beton malzemedan inşa edilen kemer barajların büyük çekme gerilmelerine maruz kaldığı hem lineer hem de lineer olmayan analizler sonucu görülmüştür. Betonun basınca oranla çekme gerilmelerine dayanımı çok küçüktür. Kendi ağırlığından dolayı hemen hemen her noktasında basınç gerilmesi oluşan kemer barajlarda, hidrostatik etki sonucu çekme ve basınç gerilmelerine maruz kemer barajlarda hidrodinamik etki ile oluşacak muhtemel çekme gerilmelerinin oluşturacağı çatlaklar ve bunların yayılımı detaylı olarak incelenmesi bu barajlar için kaçınılmazdır.
- 2) Deprem sırasında hidrodinamik etkilerin hidrostatik etkilerden büyük olduğu, özellikle kret bölgelerinde kavitasyon olayına rastlandığı ve bu olayın barajdaki gerilmeleri artırdığı beton ağırlık barajlar üzerinde yapılan bazı çalışmalar ile anlaşılmıştır. Kemer barajlar gibi, ağırlık barajlara göre daha narin fakat üç boyutlu incelenmesi gereken yapılarda bu etkinin hiç de ihmal edilebilir bir mertebede olmayacağı hissedilir olmakla birlikte, büyüklüğü hakkında yine detaylı bir inceleme yapılmalıdır.
- 3) Bu çalışmada, rezervuar uzunluğu baraj yüksekliğinin üç katı alınarak analizler yapılmıştır. Gerçekte çok daha uzun olan rezervuar etkileri dikkate alınarak lineer ve lineer olmayan dinamik analiz sonuçlarının değerlendirilmesi daha iyi olacaktır.
- 4) Bu çalışmada, kemer barajın lineer ve lineer olmayan dinamik analizinde deprem yer hareketinin sadece yatay bileşeni dikkate alınmıştır. Yer hareketinin düşey bileşeni de dikkate alınarak, yatay ve düşey yer hareketine maruz kemer barajın lineer olmayan analizi yapılmalıdır.

- 5) Rezervuar tabanında biriken sediment tabakasının kemer barajın lineer ve lineer olmayan dinamik davranışına etkisi de incelenmelidir.
- 6) Bu çalışmada, barajdaki beton malzemesi ve rezervuardaki su için tek bir sönüm kullanılmıştır. Ancak, barajı oluşturan malzeme ile rezervuardaki su farklı özelliklere sahip olduklarından her ortam için farklı sönüm kullanılmalıdır.
- 7) Deprem hareketinin belirsizliğini dikkate alan stokastik yöntemlerle kemer barajların lineer olmayan dinamik davranışının incelenmesi, daha gerçekçi bir yaklaşım olacaktır. Çünkü, deprem kuvvetlerinin önceden bilinmesi mümkün değildir.





## 5. KAYNAKLAR

- Ahmadi, M.T. ve Razavi, S., 1992. A Three-Dimensional Joint Opening Analysis of An Arch Dam, Computers and Structures, 44 (1/2), 187-192.
- Akkaş, N., Akay, H.U. ve Yılmaz, Ç., 1979. Applicability of General-Purpose Finite Element Programs in Solid-Fluid Interaction Problems, Computers and Structures, 10, 773-783.
- Akköse, M., 1997. Kemer Barajların Lineer ve Lineer Olmayan İki ve Üç Boyutlu Statik ve Dinamik Analizi, Yüksek Lisans Tezi, KTÜ Fen Bilimleri Enstitüsü, Trabzon.
- Akköse, M. ve Dumanoglu, A.A., 1998. Rezervuar-Kemer Baraj-Zemin Sistemlerinin Lineer Olmayan Üç Boyutlu Dinamik Analizi, III. Ulusal Hesaplamalı Mekanik Konferansı, 16-19 Kasım, İstanbul, 57-64.
- Akköse, M., Dumanoglu, A.A. ve Bayraktar, A., 1997. Kemer Barajların Elasto-Plastik Dinamik Analizi, Dördüncü Ulusal Deprem Mühendisliği Konferansı, 17-19 Eylül, Ankara, 277-284.
- Akköse, M. ve Dumanoglu, A. A., 2003-a. Su Sıkışabilirlik Etkisi Dikkate Alınarak Kemer Baraj-Rezervuar-Zemin Sistemlerinin Deprem Davranışının İncelenmesi, Beşinci Ulusal Deprem Mühendisliği Konferansı, 26-30 Mayıs, İstanbul, Bildiri No: AT-010.
- Akköse, M. and Dumanoglu, A. A., 2003-b. Foundation Flexibility Effects on Nonlinear Earthquake Response of Arch Dams, ZM2003 International Conference on New Developments in Soil Mechanics and Geotechnical Engineering, 29-31 May, Near East University, Lefkoşa, Northern Cyprus, Vol. 1, pp. 219-224.
- Akköse, M., Adanur, S. ve Dumanoglu, A. A., 2003. Kemer Barajların Lineer Olmayan Dinamik Davranışına Rezervuar Su Seviyesindeki Değişimin Etkisi, XIII. Ulusal Mekanik Kongresi, 8-12 Eylül, Gaziantep.
- Aksoğan, O., 1986. Nonlinear Yapı Analizi, Yapı Mekaniğinde Son Gelişmeler, 225-233, Ed: Ertepinar, A., Wasti, S. T. ve Aksoğan, O., Trabzon.
- Bathe, K. J., 1996. Finite Element Procedures in Engineering Analysis, Prentice-Hall, New Jersey.
- Bathe, K.J. ve Hahn, W.F., 1979. On Transient Analysis of Fluid-Structure Systems, Computers and Structures, 10, 383-391.
- Bathe, K.J. ve Ramaswamy, S., 1979. On Three-Dimensional Nonlinear Analysis of Concrete Structures, Nuclear Engineering and Design, 52, 385-409.

- Bathe. K.J., Walczak, J., Welch, A. ve Mistry, N., 1989. Nonlinear Analysis of Concrete Structures, Computers and Structures, 32 (3/4), 563-590.
- Bathe. K.J., Wilson, E.L. ve Iding, R., 1974. 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 California, Berkeley, California.
- Bayraktar, A., 1995. Asinkronize Yer Hareketi Etkisindeki Baraj-Rezervuar-Temel Sistemlerinin Dinamik Davranışı, Doktora Tezi, KTÜ Fen Bilimleri Enstitüsü, Trabzon.
- Bayraktar, A., Dumanoglu, A.A. ve Calayir, Y., 1996. Asynchronous Dynamic Analysis of Dam-Reservoir-Foundation Systems by the Lagrangian Approach, Computers and Structures, 58 (5), 925-935.
- Bayraktar, A. ve Dumanoglu, A.A., 1998. The Effect of the Asynchronous Ground Motion on Hydrodynamic Pressures, Computers and Structures, 68, 271-282.
- Bazant, Z.P., 1983. Comment on Orthotropic Models for Concrete and Geomaterials, Journal of Engineering Mechanics Division, ASCE, 109 (3), 849-863.
- Bazant, Z.P. ve Lin, Feng-Bao, 1988. Nonlocal Smeared Cracking Model for Concrete Fracture, Journal of Structural Engineering, 114 (11), 2493-2510.
- Bicanic, N. ve Zienkiewicz, O.C., 1983. Constitutive Model for Concrete Under Dynamic Loading, Earthquake Engineering and Structural Dynamics, 11, 689-710.
- Boggs, H.L., Tarbox, G.S. ve Jansen, R.B., 1988. Arch Dams Design and Analysis Advanced Dam Engineering for Design, Construction, and Rehabilitation, Ed: Jansen, R.B., New York, 493-539.
- Calayir, Y., 1994. Beton Ağırlık Barajların Euler ve Lagrange Yaklaşımları Kullanılarak Dinamik Analizi, Doktora Tezi, KTÜ Fen Bilimleri Enstitüsü, Trabzon.
- Calayir, Y. ve Dumanoglu, A.A., 1993. Static and Dynamic Analysis of Fluid and Fluid-Structure Systems by the Lagrangian Method, Computers and Structures, 49 (4), 625-632.
- Chen, W.F. ve Mizuno, E., 1990. Nonlinear Analysis in Soil Mechanics, Elsevier Science Publishers B. V., Amsterdam, Netherlands.
- Chou, C.P. ve Pagano, N.J., 1967. Elasticity, D. Van Nostrand Company, USA.
- Chopra, A.K., 1967. Hydrodynamic Pressures on Dams During Earthquakes, Journal of Engineering Mechanics Division, ASCE, 93, No. EM6, 205-223.
- Chopra, A.K., 1968. Earthquake Behavior of Reservoir-Dam Systems, Journal of Engineering Mechanics Division, ASCE, 94 (EM6), 1475-1500.

- Chopra, A.K., 1970. Earthquake Response of Concrete Gravity Dams, Journal of Engineering Mechanics Division, ASCE, 96 (EM4), Paper No. 7485, 443-454.
- Chopra, A.K., Wilson, E.L. ve Farhoomand, I., 1969. Earthquake Analysis of Reservoir-Dam Systems. Proceedings the Fourth World Conference on Earthquake Engineering, 2, B-4, 1-10, Santiago, Chile.
- Chopra, A.K., 1995. Dynamics of Structures, Prentice-Hall, New Jersey, USA.
- Clough, R.W. ve Penzien, J., 1993. Dynamics of Structures, Second Edition, McGraw-Hill Book Company, Singapore.
- Cook, R.D., Malkus, D.S. ve Plesha, M.E., 1989. Concepts and Applications of Finite Element Analysis, Third Edition, John Wiley and Sons., Singapore.
- Dahlblom, O. ve Ottosen, N.S., 1990. Smeared Crack Analysis Using Generalised Fictitious Crack Model, Journal of Engineering Mechanics, 116 (1), 55-76.
- Despande, S.S., Belkune, R.M. ve Ramesh, C.K., 1981. Dynamic Analysis of Coupled Fluid-Structure Interaction Problems, Numerical Methods for Coupled Problems, Ed: E. Hinton, P. Bettes and R. W. Lewis, 367-378, Pineridge Press, Swansea, U.K..
- Doğangün, A., 1995. Dikdörtgen Kesitli Su Depolarının Sonlu Elemanlar Yöntemiyle Depo-Sıvı-Zemin Etkileşimini Dikkate Alarak Analitik Yöntemlerle Karşılaştırılmalı Deprem Hesabı, Doktora Tezi, KTÜ Fen Bilimleri Enstitüsü, Trabzon.
- Doran, B., Köksal, H.O., Polat Z. ve Karakoç, C., 1998. Betonarme Elemanlarda Sonlu Eleman Uygulamalarında Drucker-Prager Akma Kriterinin Kullanılması, Teknik Dergi, TMMOB İnşaat Mühendisleri Odası, Cilt 9, Sayı 2, 1617-1625, Nisan 1998.
- Dowling, M.J., 1988. Nonlinear Seismic Response of Arch Dams, Ph. D. Thesis, California Institute of Technology, Pasadena, California.
- Dowling, M.J. ve Hall, J.F., 1989. Nonlinear Seismic Response of Arch Dams, Journal of Engineering Mechanics, 115 (4), Paper No. 23366, 768-789, April.
- Drucker, D.C. ve Prager, W., 1952. Soil Mechanics and Plastic Analysis on Limit Design, Quarterly Journal of Applied Math., 10, 157-165.
- Dumanoğlu, A.A. ve Akköse, M., 1998. Kemer Barajların Lineer ve Lineer Olmayan Statik ve Dinamik Analizi, Türkiye Deprem Vakfı, Yayın No: TDV/TR 016-27, Ekim 1998.
- Dumanoğlu, A.A. ve Akköse, M., 1999-a. Kemer Barajların Lineer ve Lineer Olmayan İki ve Üç Boyutlu Dinamik Analizi, Teknik Dergi, TMMOB İnşaat Mühendisleri Odası, Cilt 10, Sayı 4, 1993-2009, Ekim 1999.

- Dumanoğlu, A.A. ve Akköse, M., 1999-b. Linear and Nonlinear Two and Three Dimensional Dynamic Analyses of Arch Dams, Technical Journal, Turkish Chamber of Civil Engineers, Digest 1999, 10, 599-606.
- Dungar, R., 1978. An Efficient Method of Fluid-Structure Coupling in the Dynamic Analysis of Structures, International Journal for Numerical Methods in Engineering, 13, 93-107.
- El-Aidi, B. ve Hall, J.F., 1989-a. Non-Linear Earthquake Response of Concrete Gravity Dams Part 1: Modelling, Earthquake Engineering and Structural Dynamics, 18, 837-851.
- El-Aidi, B. ve Hall, J.F., 1989-b. Non-Linear Earthquake Response of Concrete Gravity Dams Part 2: Behaviour, Earthquake Engineering and Structural Dynamics, 18, 853-865.
- EM 1110-2-2200, 1995. Gravity Dam Design, Engineering and Design, Department of the Army, US Army Corps of Engineers, Washington, D.C.
- EM 1110-2-2201, 1994. Arch Dam Design, Engineering and Design, Department of the Army, US Army Corps of Engineers, Washington, D.C.
- Ersoy, U., 1987. Betonarme Temel İlkeler ve Taşıma Gücü Hesabı, Cilt 1, 2.Basım, Evrim Yayınevi ve Tic. Ltd. Şti., İstanbul.
- Fenves, G.L. ve Vargas-Loli, L.M., 1988. Nonlinear Dynamic Analysis of Fluid-Structure Systems, Journal of Engineering Mechanics, 114 (2), Paper No. 22165, 219-240.
- Fenves, G.L., Mojtahedi, S. ve Reimer, R.B., 1992. Effects of Contraction Joints on Earthquake Response of An Arch Dam, Journal of Structural Engineering, 118 (4), Paper No. 739, 1039-1055.
- Finn, W.D.L. ve Varoğlu, E., 1973. Dynamics of Gravity Dam-Reservoir Systems, Computers and Structures, 3, 913-924.
- Fok, K.L. ve Chopra, A.K., 1985. Earthquake Analysis and Response of Concrete Arch Dams, Earthquake Engineering Research Center Report No. UCB/EERC-85/07, University of California, Berkeley, California.
- Fok, K.L. ve Chopra, A.K., 1986-a. Earthquake Analysis of Arch Dams Including Dam-Water Interaction, Reservoir Boundary Absorption and Foundation Flexibility, Earthquake Engineering and Structural Dynamics, 14, 155-184.
- Fok, K.L. ve Chopra, A.K., 1986-b. Frequency Response Functions for Arch Dams: Hydrodynamic and Foundation Flexibility Effects, Earthquake Engineering and Structural Dynamics, 14, 769-795.

- Fok, K.L. ve Chopra, A.K., 1986-c. Hydrodynamic and Foundation Flexibility Effects in Earthquake Response of Arch Dams, Journal of Structural Engineering, 112 (8), Paper No. 20837, 1810-1828.
- Gardner, N.J., 1969. Triaxial Behavior of Concrete, Journal of American Concrete Institute, Title No. 66-15, 136-146, February.
- Ghrib, F. ve Tinawi, R., 1995. An Application of Damage Mechanics for Seismic Analysis of Concrete Gravity Dams, Earthquake Engineering and Structural Dynamics, 24, 157-173.
- Greeves, E.J., 1990. The Investigation and Calibration of a Novel Lagrangian Fluid Finite Element with Particular Reference to Dynamic Fluid-Structure Interaction, Report No. UBCE-EE-90-05, Department of Civil Engineering, University of Bristol, Bristol.
- Greeves, E.J., 1991. The Modelling and Analysis of Linear and Nonlinear Fluid-Structure Systems with Particular Reference to Concrete Dams, Ph. D. Thesis, Department of Civil Engineering, University of Bristol.
- Greeves, E.J. ve Dumanoğlu, A.A., 1989. 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.
- Hall, J.F., 1998. Efficient Non-Linear Seismic Analysis of Arch Dams, Earthquake Engineering and Structural Dynamics, 27, 1425-1444.
- Hall, J.F. ve Chopra, A.K., 1982. Two-Dimensional Dynamic Analysis of Concrete Gravity and Embankment Dams Including Hydrodynamic Effects, Earthquake Engineering and Structural Dynamics, 10, 305-322.
- Hall, J.F. ve Chopra, A.K., 1983. Dynamic Analysis of Arch Dams Including Hydrodynamic Effects, Journal of Engineering Mechanics, ASCE, 109 (1), Paper No. 17696, 149-167.
- Hall, J.F. ve Dowling, M.J., 1985. Response of Jointed Arches to Earthquake Excitation, Earthquake Engineering and Structural Dynamics, 13, 779-798.
- Hamdi, M.A., Ousset, Y. ve Verchery, G., 1978. A Displacement Method for the Analysis of Vibration of Coupled Fluid-Structure Systems, International Journal for Numerical Methods in Engineering, 13, 139-150.
- Helen, T.K., 1972. Effective Quadrature Rules for Quadratic Solid Isoparametric Finite Elements, International Journal for Numerical Methods in Engineering, 4, 597-599.
- Hinton, E., Rock, T. ve Zienkiewicz, O.C., 1976. A Note on Mass Lumping and Related Processes in the Finite Element Method, Earthquake Engineering and Structural Dynamics, 4, 245-249.

- Humar, J. ve Roufaiel, M., 1983. Finite Element Analysis of Reservoir Vibration, Journal of Engineering Mechanics, ASCE, 109 (1), 215-230.
- Irons, B.M., 1971. Quadrature Rules for Brick Based Finite Elements, International Journal for Numerical Methods in Engineering, 3, 293-294.
- Karman, T., 1933. Water Pressures on Dams During Earthquakes, Transactions, ASCE, 98, Paper No. 1835, 434-436.
- Kumar, R. ve Nayak, G.C., 1994. Numerical Modelling of Tensile Crack Propagation in Concrete Dams, Journal of Structural Engineering, 120 (4), 1053-1074.
- Kupfer, H., Hilsdorf, H.K. ve Rusch, H., 1969. Behavior of Concrete Under Biaxial Stresses, Journal of American Concrete Institute, Title No. 66-52, 656-666, August.
- Lamb, H., 1975. Hydrodynamics, Sixth Edition, Cambridge University Press, London.
- Linsbauer, H.N., Ingraffea, A.R., Rossmannith, H.P. ve Wawrzynek, P.A., 1989-a. Simulation of Cracking in Large Arch Dam: Part I, Journal of Structural Engineering, 115 (7), 1599-1615.
- Linsbauer, H.N., Ingraffea, A.R., Rossmannith, H.P. ve Wawrzynek, P.A., 1989-b. Simulation of Cracking in Large Arch Dam: Part II, Journal of Structural Engineering, 115 (7), 1616-1630.
- Liu, T.C.Y., Nilson, A.H. ve Slate, F.O., 1972. Biaxial Stress-Strain Relations for Concrete, Journal of Structural Division, Proceedings of the American Society of Civil Engineering, 98 (ST5), 1025-1034.
- Lofti, V., Roesset, J.M. ve Tassoulas, J.L., 1987. A Technique for the Analysis of the Response of Dams to Earthquake, Earthquake Engineering and Structural Dynamics, 15, 463-490.
- Lysmer, J. ve Wass, G., 1972. Shear Waves in Plane Infinite Structures, Journal of Engineering Mechanics Division, ASCE, 98, 85-105.
- Mays, J.R. ve Roehm, L.H., 1993. Effect of Vertical Contraction Joints in Concrete Arch Dams, Computers and Structures, 47 (4/5), 615-627.
- Mays, J.R., Dollar, D.A. ve Roehm, L.H., 1989. A Concrete Cracking Analysis for the Proposed Arch Raise of Roosevelt Dam, Computers and Structures, 32 (3/4), 679-689.
- Mazars, J. ve Pijaudier-Cabot, G., 1989. Continuum Damage Theory-Application to Concrete, Journal of Engineering Mechanics, 115 (2), 345-365.

- Nath, B., 1981. Coupled Natural Frequencies of Arch Dam Reservoir Systems by a Mapping Finite Element Method, *Numerical Methods for Coupled Problems*, Ed: E. Hinton, P. Bettes and R. W. Lewis, 222-233, Pineridge Press, Swansea, U.K..
- Nath, B., 1982. Natural Frequencies of Arch Dam Reservoir Systems-by a Mapping Finite Element Method, *Earthquake Engineering and Structural Dynamics*, 10, 719-734.
- Niwa, A. ve Clough, R.W., 1980. Shaking Table Research on Concrete Dams Models, Earthquake Engineering Research Center Report No. UCB/EERC-80/05, University of California, Berkeley, California.
- Niwa, A. ve Clough, R.W., 1982. Non-Linear Seismic Response of Arch Dams, *Earthquake Engineering and Structural Dynamics*, 10, 267-281.
- Okomato, S., 1984. Introduction to Earthquake Engineering, Second Edition, University of Tokyo Press, Tokyo.
- Olson, L.G. ve Bathe, K.J., 1983. A Study of Displacement-Based Fluid Finite Elements for Calculating Frequencies of Fluid and Fluid-Structure Systems, *Nuclear Engineering and Design*, 76, 137-151.
- Ottosen, N.S., 1979. Constitutive Model for Short-Time Loading of Concrete, *Journal of Engineering Mechanics Division*, 105 (EM1), 127-141, February.
- Pal, N., 1976. Seismic Cracking of Concrete Gravity Dams, *Journal of Engineering Mechanics Division*, 102 (ST9), 1827-1844.
- Pekau, O.A., Chuhan, Z. ve Lingmin, F., 1991. Seismic Fracture Analysis of Concrete Gravity Dams, *Earthquake Engineering and Structural Dynamics*, 20, 335-354.
- Porter, C.S. ve Chopra, A.K., 1980. Dynamic Response of Simple Arch Dams Including Hydrodynamic Interaction, Earthquake Engineering Research Center Report No. UCB/EERC-80/17, University of California, Berkeley, California.
- Porter, C.S. ve Chopra, A.K., 1981. Dynamic Analysis of Simple Arch Dams Including Hydrodynamic Interaction, *Earthquake Engineering and Structural Dynamics*, 9, 573-597.
- Porter, C.S. ve Chopra, A.K., 1982. Hydrodynamic Effects in Dynamic Response of Simple Arch Dams, *Earthquake Engineering and Structural Dynamics*, 10, 417-431.
- Priscu, R., Popovici, A., Stematiu, D. ve Stere, C., 1985. Earthquake Engineering for Large Dams, Second Edition, Editura Academiei, București.
- Saini, S.S., Bettes, P. ve Zienkiewicz, O.C., 1978. Coupled Hydrodynamic Response of Concrete Gravity Dams Using Finite and Infinite Elements, *Earthquake Engineering and Structural Dynamics*, 6, 363-374.

- Sharan, S.K., 1992. Efficient Finite Element Analysis of Hydrodynamic Pressures on Dams, Computers and Structures, 42 (5), 713-723.
- Sharan, S.K. ve Gladwell, G.M.L., 1985. A General Method for the Dynamic Response Analysis of Fluid-Structure Systems, Computers and Structures, 21 (5), 937-943.
- Shantaram, D., Owen, D.R.J. ve Zienkiewicz, O.C., 1976. Dynamic Transient Behaviour of Two- and Three-Dimensional Structures Including Plasticity, Large Deformation Effects and Fluid Interaction, Earthquake Engineering and Structural Dynamics, 4, 561-578.
- Shugar, T.A. ve Katona, M.G., 1975. Development of Finite Element Head Injury Model, Journal of Engineering Mechanics Division, ASCE, 101 (EM3), Paper No. 11367, 223-239.
- Skrikerud, P.E. ve Bachman, H., 1986. Discrete Crack Modelling for Dynamically Loaded Unreinforced Concrete Structures, Earthquake Engineering and Structural Dynamics, 14, 297-315.
- Swoboda, G. ve Lei, X.Y., 1994. Simulation of Arch Dam-Foundation Interaction with a New Friction Interface Element, International Journal for Numerical and Analytical Methods in Geomechanics, 17, 601-617.
- Tan, H. ve Chopra, A.K., 1995-a. Earthquake Analysis of Arch Dams Including Dam-Water-Foundation Rock Interaction, Earthquake Engineering and Structural Dynamics, 24, 1453-1474.
- Tan, H. ve Chopra, A.K., 1995-b. Dam-Foundation Rock Interaction Effects in Frequency-Response Functions of Arch Dams, Earthquake Engineering and Structural Dynamics, 24, 1475-1489.
- Tan, H. ve Chopra, A.K., 1996. Dam-Foundation Rock Interaction Effects in Earthquake Response of Arch Dams, Journal of Structural Engineering, 122 (5), Paper No. 11032, 528-538.
- Timoshenko, S. ve Goodier, J.N., 1969. Elastisite Teorisi, Çeviri: Kayan, İ. ve Şuhubi, E., arı Kitabevi Matbaası.
- URL-1, 2003. <http://peer.berkeley.edu/smcat/data/ath/IMPVALL/I-ELC180.AT2>, PEER Strong Motion Database, 02.04.2003.
- Vargas-Loli, L.M. ve Fenves, G.L., 1989. Effects of Concrete Cracking on the Earthquake Response of Gravity Dams, Earthquake Engineering and Structural Dynamics, 18, 575-592.
- Vatani O.A., 1997. Su, Çatlak ve Kavite Etkileri Altındaki Beton Ağırlık Barajların Lineer Olmayan Dinamik Analizi, Doktora Tezi, KTÜ Fen Bilimleri Enstitüsü, Trabzon.



- Vatani O.A., Dumanoğlu, A.A. ve Bayraktar, A., 1997. Consideration of Cracks in Nonlinear Dynamic Analysis of Concrete Gravity Dams, Fourth International Conference on Civil Engineering, Sarif University of Technology, Tehran, Iran, May 4-6.
- Wepf, D.H., Feltrin. G. ve Bachmann, H., 1993. Influence of Time-Domain Dam-Reservoir Interaction on Cracking of Concrete Gravity Dams, Earthquake Engineering and Structural Dynamics, 22, 573-582.
- Westergaard, H.M., 1933. Water Pressures on Dams During Earthquakes, Transactions, ASCE, 98, Paper No. 1835, 418-433.
- Wilson, E.L. ve Khalvati, M., 1983. Finite Elements for The Dynamic Analysis of Fluid-Solid Systems, International Journal for Numerical Methods in Engineering, 19, 1657-1668.
- Yılmaz, Ç., 1988. Barajların Deprem Analizi, Su Yapıları Semineri, Samsun, 183-205,. 28-30 Haziran.
- Zienkiewicz, O.C., 1964. Hydrodynamic Pressures Due to Earthquakes, Water Power, 16 (9), 382-388.
- Zienkiewicz, O.C. ve Bettles, P., 1978. Fluid-Structure Dynamic Interaction and wave Forces. An Introduction to Numerical Treatment, International Journal for Numerical Methods in Engineering, 13, 1-16.
- Zienkiewicz, O.C. ve Taylor, R.L., 1989. The Finite Element Method, Volume I, Mc Graw-Hill.
- Zienkiewicz, O.C., Paul, D.K. ve Hinton, E., 1983. Cavitation in Fluid-Structure Response (With Particular Reference to Dams Under Earthquake Loading), Earthquake Engineering and Structural Dynamics, 11, 463-481.

## 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 yılında başlamış olduğu Karadeniz Teknik Üniversitesi, Mühendislik Mimarlık Fakültesi, İnşaat Mühendisliği Bölümü’nden 1994 yılında bölüm altıncısı olarak mezun oldu. Aynı yıl girdiği sınavı kazanarak mezun olduğu bölümde Yüksek Lisans öğrenimine başladı. Mart 1995’te Karadeniz Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı’nda Araştırma Görevlisi olarak göreve başladı. Daha sonra, Temmuz 1996’da Karadeniz Teknik Üniversitesi, Mühendislik-Mimarlık Fakültesi, İnşaat Mühendisliği Bölümü, Yapı Anabilim Dalı’na Araştırma Görevlisi olarak atandı. Ağustos 1997’de hazırladığı “Kemer Barajların Lineer ve Lineer Olmayan İki ve Üç Boyutlu Statik ve Dinamik Analizi” isimli tez ile Yüksek Lisans öğrenimini tamamladı. Şubat 1998’de Karadeniz Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı’nda Doktora çalışmalarına başladı. Evli ve iki çocuk babası olan Mehmet AKKÖSE, İngilizce bilmekte ve halen Karadeniz Teknik Üniversitesi, Mühendislik-Mimarlık Fakültesi, İnşaat Mühendisliği Bölümü’ndeki görevine devam etmektedir.