

KARADENİZ TEKNİK ÜNİVERSİTESİ

FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

İNŞAAT MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI

**ASINKRONİZE YER HAREKETİ ETKİSİNDEKİ BARAJ-REZERVUAR-TEMEL
SİSTEMLERİNİN DİNAMİK DAVRANIŞI**

İnş.Yük.Müh. Alemdar BAYRAKTAR

38406

Karadeniz Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsünde

"Doktor"

Ünvanı Verilmesi İçin Kabul Edilen Tezdir

Tezin Enstitüye Verildiği Tarih : 16.06.1995

Tezin Sözlü Savunma Tarihi : 20.07.1995

Tezin Danışmanı : Prof. Dr. A. Aydın DUMANOĞLU



Jüri Üyesi : Prof. Dr. Ragıp ERDÖL



Jüri Üyesi : Prof. Dr. Ruhi AYDIN



Enstitü Müdürü : Prof. Dr. Temel SAVAŞKAN



Temmuz 1995

TRABZON

ÖNSÖZ

Bu çalışma Karadeniz Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalında bir doktora tezi olarak gerçekleştirilmiştir.

Yapılan literatür araştırmasından, asinkronize yer hareketi etkisindeki baraj-rezervuar-temel sistemlerinin dinamik davranışı konusunda daha önce yapılmış çalışmalara rastlanmamıştır. Böylesine orjinal bir konuya yönelmeme sağlayan, rektörlük gibi önemli görevine rağmen çalışmamı başlangıcından sonuna kadar aralıksız takip edip beni sürekli teşvik eden, tezimin her aşamasında bilgi ve tecrübelerinden yararlandığım yönetici Hocam Sayın Prof. Dr. A. Aydın DUMANOĞLU 'na minnet ve şükranlarımı sunmayı zevkli bir görev sayarım.

Burada öğrenimim boyunca bana emeği geçen tüm hocalarımı saygıyla anar, kendilerine minnettar olduğumu da belirtmek isterim.

Tez çalışmam boyunca maddi ve manevi yardımlarını esirgemiyen Doç. Dr. Ümit UZMAN, Y. Doç. Dr. Yusuf CALAYIR, Araş. Gör. Murat MUVAFIK ve Araş. Gör. Mehmet AKKÖSE 'ye teşekkürlerimi sunar, çalışmanın ülkemize yararlı olmasını içtenlikle dilerim.

Bu çalışmadan aşağıdaki yayınlar yapılmıştır:

Bayraktar, A., Muvafık, M. ve Dumanoglu, A.A., Beton Ağırlık Barajların Asinkronize Dinamik Analizi, İnşaat Mühendisliğinde Gelişmeler 1. Teknik Kongre, 1993, Gazimağusa, KKTC, Bildiriler Kitabı, Cilt I, 161-170.

Bayraktar, A. ve Dumanoglu, A.A., Baraj-Rezervuar-Temel Sistemlerinin Asinkronize Dinamik Analizi, İnşaat Mühendisliğinde Bilgisayar Kullanımı IV. Sempozyumu, 1994, İstanbul, Bildiriler Kitabı, 307-316.

Bayraktar, A., Dumanoglu, A.A. ve Calayir, Y., Asinkronize Düşey Yer Hareketine Karşı Baraj-Su-Zemin Sisteminin Deprem Analizi, 3. Ulusal Deprem Mühendisliği Konferansı, TMMOB İnşaat Mühendisleri Odası İstanbul Şubesi, 1995, İstanbul, Bildiriler Kitabı, 75-84.

Bayraktar, A. and Dumanoglu, A.A., The Effect of the Asynchronous Ground Motion on Hydrodynamic Pressures, The Sixth International Conference on Civil and Structural Engineering Computing, 28th-30th August 1995, Cambridge, England (accepted for publication).

Calayir, Y., Bayraktar, A. ve Dumanoglu, A.A., Baraj-Rezervuar Sistemlerinin Lineer Teoriye Göre Dinamik Analizi, 2. Ulusal Deprem Mühendisliği Konferansı, TMMOB İnşaat Mühendisleri Odası İstanbul Şubesi, 1993, İstanbul, Bildiriler Kitabı, 178-187.

Calayir, Y., Dumanoglu, A.A. ve Bayraktar, A., Baraj-Rezervuar Sistemlerinin Lagrange Yaklaşımı Kullanılarak İki ve Üç boyutlu Dinamik Analizi, 3. Ulusal Deprem Mühendisliği Konferansı, TMMOB İnşaat Mühendisleri Odası İstanbul Şubesi, 1995, İstanbul, Bildiriler Kitabı, 95-104.

Muvafık, M., Bayraktar, A. ve Dumanoglu, A.A., Kemer Barajların Üç Boyutlu Statik ve Dinamik Analizi, İnşaat Mühendisliğinde Gelişmeler 1. Teknik Kongre, 1993, Gazimağusa, KKTC, Bildiriler Kitabı, Cilt I, 21-30.

Calayir, Y., Dumanoglu, A.A. and Bayraktar, A., Earthquake Analysis of Gravity Dam-Reservoir Systems Using the Eulerian and Lagrangian Approaches, Computers and Structures, 1995, (accepted for publication).

Bayraktar, A., Dumanoglu, A.A. and Calayir, Y., Asynchronous Dynamic Analysis of Dam-Reservoir-Foundation Systems by the Lagrangian Approach, Computers and Structures, 1995, (accepted for publication).

Trabzon, Temmuz 1995

Alemdar BAYRAKTAR

İÇİNDEKİLER

Sayfa

ÖZET	v
SUMMARY	vi
ŞEKİL LİSTESİ	vii
TABLO LİSTESİ	xxi
SEMBOL LİSTESİ	xxii
1. GENEL BİLGİLER	1
1.1. Konunun Önemi	1
1.2. Barajlarla İlgili Daha Önce Yapılmış Çalışmaların Sınıflandırılması	2
1.2.1. Üniform Yer Hareketi Dikkate Alınarak Yapılmış Çalışmalar	3
1.2.1.1. Kütle Ekleme (Added Mass) Yaklaşımına Göre Yapılmış Çalışmalar	3
1.2.1.2. Euler Yaklaşımına Göre Yapılmış Çalışmalar	4
1.2.1.3. Lagrange Yaklaşımına Göre Yapılmış Çalışmalar	6
1.2.2. Asinkronize (Sonlu Hızla Yayılan) Yer Hareketi Dikkate Alınarak Yapılmış Çalışmalar	7
1.3. Çalışmanın Kapsamı	9
2. ASİNKRONİZE YER HAREKETİ ETKİSİNDEKİ SIVI-YAPI SİSTEMLERİNİN LANGRANGE YAKLAŞIMI İLE DİNAMİK FORMÜLASYONU	10
2.1. Giriş	10
2.2. Sıvı Sistemlerinin Davranışı ve Sonlu Eleman Formülasyonu	10
2.2.1. Sıvı Sistemlerinin Davranışı İle İlgili Temel Bağlıntılar	10
2.2.2. Sıvı Sistemlerinin Sonlu Eleman Formülasyonu	12
2.3. Asinkronize Yer Hareketi Etkisindeki Sıvı-Yapı Sistemlerinin Ortak Formülasyonu	18

3. DEPREMLERİN KUVVETLİ YER HAREKETİ KAYITLARININ DEĞERLENDİRİLMESİ	.30
3.1. Giriş	30
3.2. Kuvvetli Yer Hareketi İvme Kayıtlarının Eksen Düzeltilmesi	31
3.3. Kuvvetli Yer Hareketi İvme Kayıtlarının İntegrasyonu	33
3.4. Kuvvetli Yer Hareketi İvme Kayıtlarının Eksen Düzeltilmesi ve İntegrasyonu İle İlgili Sayısal Uygulamalar	34
4. BARAJ-REZERVUAR-TEMEL SİSTEMLERİNİN LAGRANGE YAKLAŞIMI İLE ASINKRONİZE DİNAMİK ANALİZİNDEN ELDE EDİLEN BULGULAR VE İRDELEME	.43
4.1. Giriş	43
4.2. Modal Analiz	44
4.3. Asinkronize Dinamik Analiz	48
4.3.1. Asinkronize Yatay Yer Hareketine Göre Analiz	50
4.3.1.1. Baraj-Rezervuar-Temel Etkileşimi	50
4.3.1.1.1. Asinkronize Yatay Yer Hareketinin Gerilme Ve Hidrodinamik Basınçların Frekans İçerikleri Üzerindeki Etkisi	54
4.3.1.1.2. Asinkronize Yatay Yer Hareketinin Gerilme Ve Hidrodinamik Basınçların Genlikleri Üzerindeki Etkisi	55
4.3.1.2. Yer Hareketi Yerdeğiştirmesinin Sonuçlar Üzerindeki Etkisi	58
4.3.1.3. Baraj Temelinin Kütleli ve Kütsüz Olmasının Sonuçlar Üzerindeki Etkisi	60
4.3.1.4. Rezervuarın Sonuçlar Üzerindeki Etkisi	61
4.3.2. Asinkronize Düşey Yer Hareketine Göre Analiz	62
5. SONUÇLAR	153
6. KAYNAKLAR	158
7. ÖZGEÇMİŞ	170

ÖZET

Bu çalışmada, asinkronize yer hareketi etkisindeki baraj-rezervuar-temel sistemlerinin dinamik davranışının belirlenmesi amaçlanmaktadır. Bunun için Lagrange yaklaşımı ile iki boyutlu değişken düğüm noktalı katı ve sıvı sonlu elemanlar alt programlar halinde Fortran 77 bilgisayar dilinde kodlanmaktadır. Söz konusu alt programlar yapı sistemlerinin asinkronize dinamik analizini yapan MULSAP programına dahil edilmekte ve MULSAP programı sıvı-yapı sistemleri için geliştirilerek baraj-rezervuar-temel sistemlerinin asinkronize dinamik analizlerinde kullanılmaktadır. Ayrıca, MULSAP programının sonsuz hız durumuna karşılık gelen çözümlerini karşılaştırmak amacıyla yukarıda bahsedilen alt programlar klasik dinamik analiz yapan SAP IV programına da dahil edilmektedir.

Asinkronize yer hareketi etkisindeki baraj-rezervuar-temel sistemlerinin dinamik davranışı konusundaki bu doktora çalışması beş bölümden oluşmaktadır.

Birinci bölümde, konunun öneminden, üniform ve asinkronize yer hareketi dikkate alınarak barajlarla ilgili daha önce yapılmış çalışmalardan ve çalışmanın kapsamından bahsedilmektedir.

İkinci bölümde, önce sıvı sistemlerinin davranışı ile ilgili yerdeğiştirmelere dayalı (Lagrange yaklaşımı) temel bağıntılar ve bu bağıntılardan faydalanılarak elde edilen sıvı sistemlerinin sonlu eleman formülasyonu, daha sonra ise asinkronize yer hareketi etkisindeki sıvı-yapı sistemlerinin sonlu elemanlar yöntemi kullanılarak Lagrange yaklaşımı ile dinamik formülasyonu verilmektedir. Sıvı sisteminin sonlu eleman formülasyonunda sıvının sıkışabilirliği ve sıvı yüzey salınım hareketi dikkate alınmaktadır.

Üçüncü bölümde, kuvvetli yer hareketi ivme kayıtlarının eksen düzeltilmesi ve integrasyonu ile ilgili formülasyonlar ve sözkonusu formülasyonlar kullanılarak değişik ivme kayıtları için yapılmış sayısal uygulamalar sunulmaktadır.

Dördüncü bölümde, ikinci bölümde verilen formülasyonun uygulanması amacıyla örnek bir beton ağırlık baraj seçilmekte ve bu barajla ilgili veriler kullanılarak baraj-rezervuar-temel sisteminin önce modal analizi, daha sonra değişik dalga yayılma hızları için yer hareketinin yatay ve düşey bileşenlerine göre asinkronize dinamik analizi yapılmaktadır. Modal analiz kısmında; Euler ve Lagrange çözümleri, SAP IV ve MULSAP çözümleri, baraj temelinin kütleli ve kütsüz çözümleri ve boş ve dolu baraj çözümleri karşılaştırılarak, baraj-rezervuar-temel sisteminin ilk 30 mod şekli verilmektedir. Asinkronize dinamik analiz kısmında; yatay ve düşey yer hareketi için zemin deplasmanlarının şekil vektörleri (r vektörleri) hesaplanmakta, MULSAP programının sonsuz hız durumuna karşılık gelen sonuçları SAP IV programı sonuçlarıyla karşılaştırılmakta ve asinkronize yatay ve düşey yer hareketinin gerilme ve hidrodinamik basınçların frekans içerikleri ve genlikleri üzerindeki etkisi araştırılmaktadır. Dördüncü bölümde ayrıca, asinkronize yatay yer hareketi durumunda yer hareketi yerdeğiştirmesinin, rezervuarın, baraj temelinin kütleli ve kütsüz olmasının sonuçlar üzerindeki etkisi de incelenmektedir.

Beşinci bölümde bu çalışmanın tümünden çıkartılan sonuçlar ve öneriler ayrıntılı olarak verilmektedir.

Anahtar Kelimeler : Asinkronize Yer Hareketi, Üniform Yer Hareketi, Deprem Dalgası Yayılma Hızı, Asinkronize Dinamik Analiz, Klasik Dinamik Analiz, Beton Ağırlık Baraj, Sıvı-Yapı Etkileşimi, Lagrange Formülasyonu, Sonlu Eleman, Modal Analiz, İndirgenmiş İntegrasyon, Baraj-Temel, Baraj-Rezervuar-Temel.

SUMMARY

DYNAMIC RESPONSE OF DAM-RESERVOIR-FOUNDATION SYSTEMS SUBJECTED TO ASYNCHRONOUS GROUND MOTION

In this work, determining the dynamic response of dam-reservoir-foundation systems subjected to asynchronous ground motion is aimed. In order to do this, two dimensional variable noded solid and fluid finite elements based on Lagrangian approach are coded as subprograms in the programming language Fortran 77. These subprograms are incorporated into the program MULSAP that does the asynchronous dynamic analysis of structure systems, and the program MULSAP, being developed for fluid-solid systems, is used in the asynchronous dynamic analyses of dam-reservoir-foundation systems. In addition, to compare the solutions the infinite velocity case of the program MULSAP, the above mentioned subprograms are incorporated into the program SAP IV which does classical dynamic analysis.

This PhD work on the subject of the dynamic response of dam-reservoir-foundation systems subjected to asynchronous ground motion consists of five chapters.

In the first chapter, the importance of the matter, the previous works related to dams considering uniform and asynchronous ground motion, and the scope of the work are mentioned.

In the second chapter, first the basic relations based on the displacements (Lagrangian approach) related with the behaviour of fluid systems, and profiting by these relations, the finite element formulation of fluid systems is obtained; then the dynamic formulation of fluid-solid systems subjected to asynchronous ground motion is given. In the finite element formulations of fluid systems the compressibility of the fluid, and fluid surface sloshing motions are taken into consideration.

In the third chapter, the formulations related to the base-line correction and integration of the acceleration records of strong ground motion, and using these formulations the numeric applications done for various acceleration records are presented.

In the fourth chapter, a sample concrete gravity dam is considered for the application of the formulation given in Chapter 2, and using the data relating to this dam, first modal analysis and then asynchronous dynamic analysis, for various wave propagation velocities, of the dam-reservoir-foundation systems is done. In modal analysis section; Eulerian and Lagrangian solutions, SAP IV and MULSAP solutions, the solutions of foundation with and without mass, and full and empty dam solutions are compared, and the first 30 mode shapes of the dam-reservoir-foundation system are given. In the asynchronous dynamic analysis section; for horizontal and vertical ground motion the ground displacements shapes vectors (r vectors) are computed, the results of the program MULSAP corresponding infinite velocity case are compared with the results of the program SAP IV, and the effect of the asynchronous horizontal and vertical ground motion on the frequency contents and amplitudes of stresses and hydrodynamic pressures is investigated. In the fourth chapter also the effects of the ground displacements, the reservoir, and the foundation with and without mass on the results are examined.

In the fifth chapter the conclusions drawn from this whole work and the recommendations are given in detail.

Key Words : Asynchronous Ground Motion, Uniform Ground Motion, Seismic Wave Velocity, Asynchronous Dynamic Analysis, Classical Dynamic Analysis, Concrete Gravity Dam, Fluid-Solid Interaction, Lagrangian Formulation, Finite Element, Modal Analysis, Reduced Integration, Dam-Foundation, Dam-Reservoir-Foundation.

ŞEKİL LİSTESİ

Sayfa

- Şekil 1: Bir boyutlu sonlu eleman ve enterpolasyon fonksiyonları [58]26
- Şekil 2: İki boyutlu sonlu eleman ve enterpolasyon fonksiyonları [58]27
- Şekil 3: Asinkronize yatay yer hareketine maruz baraj-rezervuar-temel sistemi29
- Şekil 4: İvme kaydının eksen düzeltilmesi36
- Şekil 5: Doğrusal ivme metodu.36
- Şekil 6: 13 Mart 1992 Erzincan depremi doğu-batı (E-W) bileşeninin düzeltilmemiş ivme kaydı ve bu kaydın integrasyonundan elde edilen hız ve yerdeğiştirme değerlerinin zamanla değişimi37
- Şekil 7: 13 Mart 1992 Erzincan depremi kuzey-güney (N-S) bileşeninin düzeltilmemiş ivme kaydı ve bu kaydın integrasyonundan elde edilen hız ve yerdeğiştirme değerlerinin zamanla değişimi.38
- Şekil 8: 13 Mart 1992 Erzincan depremi düşey (V) bileşeninin düzeltilmemiş ivme kaydı ve bu kaydın integrasyonundan elde edilen hız ve yerdeğiştirme değerlerinin zamanla değişimi39
- Şekil 9: 13 Mart 1992 Erzincan depremi doğu-batı (E-W) bileşeninin düzeltilmiş ivme kaydı ve bu kaydın integrasyonundan elde edilen hız ve yerdeğiştirme değerlerinin zamanla değişimi40
- Şekil 10: 13 Mart 1992 Erzincan depremi kuzey-güney (N-S) bileşeninin düzeltilmiş ivme kaydı ve bu kaydın integrasyonundan elde edilen hız ve yerdeğiştirme değerlerinin zamanla değişimi41
- Şekil 11: 13 Mart 1992 Erzincan depremi düşey (V) bileşeninin düzeltilmiş ivme kaydı ve bu kaydın integrasyonundan elde edilen hız ve yerdeğiştirme değerlerinin zamanla değişimi42
- Şekil 12: Sarıyar barajının boyutları [1]66

Şekil 13: Baraj-rezervuar-temel sisteminin iki boyutlu sonlu eleman modeli . . . . .	.66
Şekil 14: Baraj-rezervuar-temel sisteminin 1. mod şekli . . . . .	.67
Şekil 15: Baraj-rezervuar-temel sisteminin 2. mod şekli . . . . .	.67
Şekil 16: Baraj-rezervuar-temel sisteminin 3. mod şekli . . . . .	.68
Şekil 17: Baraj-rezervuar-temel sisteminin 4. mod şekli . . . . .	.68
Şekil 18: Baraj-rezervuar-temel sisteminin 5. mod şekli . . . . .	.69
Şekil 19: Baraj-rezervuar-temel sisteminin 6. mod şekli . . . . .	.69
Şekil 20: Baraj-rezervuar-temel sisteminin 7. mod şekli . . . . .	.70
Şekil 21: Baraj-rezervuar-temel sisteminin 8. mod şekli . . . . .	.70
Şekil 22: Baraj-rezervuar-temel sisteminin 9. mod şekli . . . . .	.71
Şekil 23: Baraj-rezervuar-temel sisteminin 10. mod şekli. . . . .	.71
Şekil 24: Baraj-rezervuar-temel sisteminin 11. mod şekli. . . . .	.72
Şekil 25: Baraj-rezervuar-temel sisteminin 12. mod şekli. . . . .	.72
Şekil 26: Baraj-rezervuar-temel sisteminin 13. mod şekli. . . . .	.73
Şekil 27: Baraj-rezervuar-temel sisteminin 14. mod şekli. . . . .	.73
Şekil 28: Baraj-rezervuar-temel sisteminin 15. mod şekli. . . . .	.74
Şekil 29: Baraj-rezervuar-temel sisteminin 16. mod şekli. . . . .	.74
Şekil 30: Baraj-rezervuar-temel sisteminin 17. mod şekli. . . . .	.75
Şekil 31: Baraj-rezervuar-temel sisteminin 18. mod şekli. . . . .	.75
Şekil 32: Baraj-rezervuar-temel sisteminin 19. mod şekli. . . . .	.76
Şekil 33: Baraj-rezervuar-temel sisteminin 20. mod şekli. . . . .	.76
Şekil 34: Baraj-rezervuar-temel sisteminin 21. mod şekli. . . . .	.77
Şekil 35: Baraj-rezervuar-temel sisteminin 22. mod şekli. . . . .	.77
Şekil 36: Baraj-rezervuar-temel sisteminin 23. mod şekli. . . . .	.78
Şekil 37: Baraj-rezervuar-temel sisteminin 24. mod şekli. . . . .	.78
Şekil 38: Baraj-rezervuar-temel sisteminin 25. mod şekli. . . . .	.79
Şekil 39: Baraj-rezervuar-temel sisteminin 26. mod şekli. . . . .	.79
Şekil 40: Baraj-rezervuar-temel sisteminin 27. mod şekli. . . . .	.80
Şekil 41: Baraj-rezervuar-temel sisteminin 28. mod şekli. . . . .	.80
Şekil 42: Baraj-rezervuar-temel sisteminin 29. mod şekli. . . . .	.81

Şekil 43: Baraj-rezervuar-temel sisteminin 30. mod şekli. . . . .	.81
Şekil 44: Asinkronize yatay (a) ve düşey (b) yer hareketine maruz baraj-rezervuar-temel sistemi. . . . .	.82
Şekil 45: Asinkronize yatay yer hareketi etkisindeki baraj-rezervuar-temel sisteminin 1. r vektörü (r_1 vektörü) . . . . .	.83
Şekil 46: Asinkronize yatay yer hareketi etkisindeki baraj-rezervuar-temel sisteminin 2. r vektörü (r_2 vektörü) . . . . .	.83
Şekil 47: Asinkronize yatay yer hareketi etkisindeki baraj-rezervuar-temel sisteminin 3. r vektörü (r_3 vektörü) . . . . .	.84
Şekil 48: Asinkronize yatay yer hareketi etkisindeki baraj-rezervuar-temel sisteminin 4. r vektörü (r_4 vektörü) . . . . .	.84
Şekil 49: Baraj-rezervuar-temel sisteminin yatay doğrultuda rijit cisim hareketi . . . .	.85
Şekil 50: Asinkronize yatay yer hareketi (doğu-batı (E-W) bileşeni) etkisindeki baraj-rezervuar-temel sisteminin baraj kretinde sonsuz dalga yayılma hızı için elde edilen zahiri-statik yatay yerdeğiştirmenin zamanla değişimi. . . . .	.85
Şekil 51: SAP IV [100] ve MULSAP [92] (sonsuz hız durumu için) programları kullanılarak baraj-rezervuar-temel sisteminin baraj kretinde elde edilen dinamik yatay yerdeğiştirmenin zamanla değişimi . . . . .	.86
Şekil 52: SAP IV [100] ve MULSAP [92] (sonsuz hız durumu için) programları kullanılarak baraj-rezervuar-temel sisteminin baraj kretinde elde edilen dinamik düşey yerdeğiştirmenin zamanla değişimi . . . . .	.87
Şekil 53: SAP IV [100] ve MULSAP [92] (sonsuz hız durumu için) programları kullanılarak baraj-rezervuar-temel sisteminin baraj mansap topuğundaki D Gauss integrasyon noktasında elde edilen yatay gerilmenin (σ_{yy}) zamanla değişimi. . . . .	.88
Şekil 54: SAP IV [100] ve MULSAP [92] (sonsuz hız durumu için) programları kullanılarak baraj-rezervuar-temel sisteminin baraj mansap topuğundaki D Gauss integrasyon noktasında elde edilen düşey gerilmenin (σ_{zz}) zamanla değişimi. . . . .	.89

- Şekil 55: SAPIV [100] ve MULSAP [92] (sonsuz hız durumu için) programları kullanılarak baraj-rezervuar-temel sisteminin baraj mansap topuğundaki D Gauss integrasyon noktasında elde edilen kayma gerilmesinin (σ_{yz}) zamanla değişimi.90
- Şekil 56: SAP IV [100] ve MULSAP [92] (sonsuz hız durumu için) programları kullanılarak baraj-rezervuar-temel sisteminin baraj memba yüzeyine yakın E Gauss integrasyon noktasında elde edilen hidrodinamik basıncın zamanla değişimi.91
- Şekil 57: Asinkronize yatay yer hareketi (doğu-batı (E-W) bileşeni) etkisindeki baraj-rezervuar-temel sisteminin baraj temeli tabanındaki A Gauss integrasyon noktasında 250 m/s, 2000 m/s ve sonsuz dalga yayılma hızları için elde edilen yatay gerilmelerin (σ_{yy}) zamanla değişimi92
- Şekil 58: Asinkronize yatay yer hareketi (doğu-batı (E-W) bileşeni) etkisindeki baraj-rezervuar-temel sisteminin baraj temeli tabanındaki A Gauss integrasyon noktasında 250 m/s, 2000 m/s ve sonsuz dalga yayılma hızları için elde edilen düşey gerilmelerin (σ_{zz}) zamanla değişimi93
- Şekil 59: Asinkronize yatay yer hareketi (doğu-batı (E-W) bileşeni) etkisindeki baraj-rezervuar-temel sisteminin baraj temeli tabanındaki A Gauss integrasyon noktasında 250 m/s, 2000 m/s ve sonsuz dalga yayılma hızları için elde edilen kayma gerilmelerinin (σ_{yz}) zamanla değişimi94
- Şekil 60: Asinkronize yatay yer hareketi (doğu-batı (E-W) bileşeni) etkisindeki baraj-rezervuar-temel sisteminin baraj memba topuğundaki B Gauss integrasyon noktasında 250 m/s, 2000 m/s ve sonsuz dalga yayılma hızları için elde edilen yatay gerilmelerin (σ_{yy}) zamanla değişimi95
- Şekil 61: Asinkronize yatay yer hareketi (doğu-batı (E-W) bileşeni) etkisindeki baraj-rezervuar-temel sisteminin baraj memba topuğundaki B Gauss integrasyon noktasında 250 m/s, 2000 m/s ve sonsuz dalga yayılma hızları için elde edilen düşey gerilmelerin (σ_{zz}) zamanla değişimi96

- Şekil 62: Asinkronize yatay yer hareketi (doğu-batı (E-W) bileşeni) etkisindeki baraj-rezervuar-temel sisteminin baraj memba topuğundaki B Gauss integrasyon noktasında 250 m/s, 2000 m/s ve sonsuz dalga yayılma hızları için elde edilen kayma gerilmelerinin (σ_{yz}) zamanla değişimi 97
- Şekil 63: Asinkronize yatay yer hareketi (doğu-batı (E-W) bileşeni) etkisindeki baraj-rezervuar-temel sisteminin baraj kretine yakın C Gauss integrasyon noktasında 250 m/s, 2000 m/s ve sonsuz dalga yayılma hızları için elde edilen yatay gerilmelerin (σ_{yy}) zamanla değişimi 98
- Şekil 64: Asinkronize yatay yer hareketi (doğu-batı (E-W) bileşeni) etkisindeki baraj-rezervuar-temel sisteminin baraj kretine yakın C Gauss integrasyon noktasında 250 m/s, 2000 m/s ve sonsuz dalga yayılma hızları için elde edilen düşey gerilmelerin (σ_{zz}) zamanla değişimi 99
- Şekil 65: Asinkronize yatay yer hareketi (doğu-batı (E-W) bileşeni) etkisindeki baraj-rezervuar-temel sisteminin baraj kretine yakın C Gauss integrasyon noktasında 250 m/s, 2000 m/s ve sonsuz dalga yayılma hızları için elde edilen kayma gerilmelerinin (σ_{yz}) zamanla değişimi 100
- Şekil 66: Asinkronize yatay yer hareketi (doğu-batı (E-W) bileşeni) etkisindeki baraj-rezervuar-temel sisteminin baraj memba yüzeyine yakın E Gauss integrasyon noktasında 250 m/s ve 2000 m/s dalga yayılma hızları için elde edilen hidrodinamik basınçların zamanla değişimi 101
- Şekil 67: Asinkronize yatay yer hareketi (doğu-batı (E-W) bileşeni) etkisindeki baraj-rezervuar-temel sisteminin baraj memba yüzeyine yakın F Gauss integrasyon noktasında 250 m/s, 2000 m/s ve sonsuz dalga yayılma hızları için elde edilen hidrodinamik basınçların zamanla değişimi 102
- Şekil 68: Asinkronize yatay yer hareketi (doğu-batı (E-W) bileşeni) etkisindeki baraj-rezervuar-temel sisteminin baraj memba yüzeyine yakın G Gauss integrasyon noktasında 250 m/s, 2000 m/s ve sonsuz dalga yayılma hızları için elde edilen hidrodinamik basınçların zamanla değişimi 103

- Şekil 69: Asinkronize yatay yer hareketi (doğu-batı (E-W) bileşeni) etkisindeki baraj-rezervuar-temel sisteminin baraj temelinde alınan I-I kesitinde değişik dalga yayılma hızları için elde edilen mutlak maksimum yatay gerilmelerin (σ_{yy}) yatay uzaklıkla değişimi 104
- Şekil 70: Asinkronize yatay yer hareketi (doğu-batı (E-W) bileşeni) etkisindeki baraj-rezervuar-temel sisteminin baraj temelinde alınan I-I kesitinde değişik dalga yayılma hızları için elde edilen mutlak maksimum düşey gerilmelerin (σ_{zz}) yatay uzaklıkla değişimi 104
- Şekil 71: Asinkronize yatay yer hareketi (doğu-batı (E-W) bileşeni) etkisindeki baraj-rezervuar-temel sisteminin baraj temelinde alınan I-I kesitinde değişik dalga yayılma hızları için elde edilen mutlak maksimum kayma gerilmelerinin (σ_{yz}) yatay uzaklıkla değişimi 105
- Şekil 72: Asinkronize yatay yer hareketi (doğu-batı (E-W) bileşeni) etkisindeki baraj-rezervuar-temel sisteminin baraj tabanında alınan II-II kesitinde değişik dalga yayılma hızları için elde edilen mutlak maksimum yatay gerilmelerin (σ_{yy}) yatay uzaklıkla değişimi 105
- Şekil 73: Asinkronize yatay yer hareketi (doğu-batı (E-W) bileşeni) etkisindeki baraj-rezervuar-temel sisteminin baraj tabanında alınan II-II kesitinde değişik dalga yayılma hızları için elde edilen mutlak maksimum düşey gerilmelerin (σ_{zz}) yatay uzaklıkla değişimi 106
- Şekil 74: Asinkronize yatay yer hareketi (doğu-batı (E-W) bileşeni) etkisindeki baraj-rezervuar-temel sisteminin baraj tabanında alınan II-II kesitinde değişik dalga yayılma hızları için elde edilen mutlak maksimum kayma gerilmelerinin (σ_{yz}) yatay uzaklıkla değişimi 106
- Şekil 75: Asinkronize yatay yer hareketi (doğu-batı (E-W) bileşeni) etkisindeki baraj-rezervuar-temel sisteminin baraj kretine yakın alınan III-III kesitinde değişik dalga yayılma hızları için elde edilen mutlak maksimum yatay gerilmelerin (σ_{yy}) yatay uzaklıkla değişimi 107

- Şekil 76: Asinkronize yatay yer hareketi (doğu-batı (E-W) bileşeni) etkisindeki baraj-rezervuar-temel sisteminin baraj kretine yakın alınan III-III kesitinde değişik dalga yayılma hızları için elde edilen mutlak maksimum düşey gerilmelerin (σ_{zz}) yatay uzaklıkla değişimi 107
- Şekil 77: Asinkronize yatay yer hareketi (doğu-batı (E-W) bileşeni) etkisindeki baraj-rezervuar-temel sisteminin baraj kretine yakın alınan III-III kesitinde değişik dalga yayılma hızları için elde edilen mutlak maksimum kayma gerilmelerinin (σ_{yz}) yatay uzaklıkla değişimi. 108
- Şekil 78: Asinkronize yatay yer hareketi (doğu-batı (E-W) bileşeni) etkisindeki baraj-rezervuar-temel sisteminin IV-IV kesitinde değişik dalga yayılma hızları için elde edilen mutlak maksimum yatay gerilmelerin (σ_{yy}) yükseklikle değişimi. 108
- Şekil 79: Asinkronize yatay yer hareketi (doğu-batı (E-W) bileşeni) etkisindeki baraj-rezervuar-temel sisteminin IV-IV kesitinde değişik dalga yayılma hızları için elde edilen mutlak maksimum düşey gerilmelerin (σ_{zz}) yükseklikle değişimi. 109
- Şekil 80: Asinkronize yatay yer hareketi (doğu-batı (E-W) bileşeni) etkisindeki baraj-rezervuar-temel sisteminin IV-IV kesitinde değişik dalga yayılma hızları için elde edilen mutlak maksimum kayma gerilmelerinin (σ_{yz}) yükseklikle değişimi. 109
- Şekil 81: Asinkronize yatay yer hareketi (doğu-batı (E-W) bileşeni) etkisindeki baraj-rezervuar-temel sisteminin baraj memba yüzeyi boyunca değişik dalga yayılma hızları için elde edilen mutlak maksimum hidrodinamik basınçların yükseklikle değişimi 110
- Şekil 82: Asinkronize yatay yer hareketi (kuzey-güney (N-S) bileşeni) etkisindeki baraj-rezervuar-temel sisteminin baraj kretinde sonsuz dalga yayılma hızı için elde edilen zahiri-statik yatay yerdeğiştirmenin zamanla değişimi 110
- Şekil 83: Asinkronize yatay yer hareketi (kuzey-güney (N-S) bileşeni) etkisindeki baraj-rezervuar-temel sisteminin baraj temelinde alınan I-I kesitinde

- değişik dalga yayılma hızları için elde edilen mutlak maksimum yatay gerilmelerin (σ_{yy}) yatay uzaklıkla değişimi 111
- Şekil 84: Asinkronize yatay yer hareketi (kuzey-güney (N-S) bileşeni) etkisindeki baraj-rezervuar-temel sisteminin baraj temelinde alınan I-I kesitinde değişik dalga yayılma hızları için elde edilen mutlak maksimum düşey gerilmelerin (σ_{zz}) yatay uzaklıkla değişimi 111
- Şekil 85: Asinkronize yatay yer hareketi (kuzey-güney (N-S) bileşeni) etkisindeki baraj-rezervuar-temel sisteminin baraj temelinde alınan I-I kesitinde değişik dalga yayılma hızları için elde edilen mutlak maksimum kayma gerilmelerin (σ_{yz}) yatay uzaklıkla değişimi 112
- Şekil 86: Asinkronize yatay yer hareketi (kuzey-güney (N-S) bileşeni) etkisindeki baraj-rezervuar-temel sisteminin baraj tabanında alınan II-II kesitinde değişik dalga yayılma hızları için elde edilen mutlak maksimum yatay gerilmelerin (σ_{yy}) yatay uzaklıkla değişimi 112
- Şekil 87: Asinkronize yatay yer hareketi (kuzey-güney (N-S) bileşeni) etkisindeki baraj-rezervuar-temel sisteminin baraj tabanında alınan II-II kesitinde değişik dalga yayılma hızları için elde edilen mutlak maksimum düşey gerilmelerin (σ_{zz}) yatay uzaklıkla değişimi 113
- Şekil 88: Asinkronize yatay yer hareketi (kuzey-güney (N-S) bileşeni) etkisindeki baraj-rezervuar-temel sisteminin baraj tabanında alınan II-II kesitinde değişik dalga yayılma hızları için elde edilen mutlak maksimum kayma gerilmelerinin (σ_{yz}) yatay uzaklıkla değişimi 113
- Şekil 89: Asinkronize yatay yer hareketi (kuzey-güney (N-S) bileşeni) etkisindeki baraj-rezervuar-temel sisteminin baraj kretine yakın alınan III-III kesitinde değişik dalga yayılma hızları için elde edilen mutlak maksimum yatay gerilmelerin (σ_{yy}) yatay uzaklıkla değişimi 114
- Şekil 90: Asinkronize yatay yer hareketi (kuzey-güney (N-S) bileşeni) etkisindeki baraj-rezervuar-temel sisteminin baraj kretine yakın alınan III-III kesitinde

değişik dalga yayılma hızları için elde edilen mutlak maksimum düşey gerilmelerin (σ_{zz}) yatay uzaklıkla değişimi	114
Şekil 91: Asinkronize yatay yer hareketi (kuzey-güney (N-S) bileşeni) etkisindeki baraj-rezervuar-temel sisteminin baraj kretine yakın alınan III-III kesitinde değişik dalga yayılma hızları için elde edilen mutlak maksimum kayma gerilmelerinin (σ_{yz}) yatay uzaklıkla değişimi	115
Şekil 92: Asinkronize yatay yer hareketi (kuzey-güney (N-S) bileşeni) etkisindeki baraj-rezervuar-temel sisteminin baraj memba yüzeyi boyunca değişik dalga yayılma hızları için elde edilen mutlak maksimum hidrodinamik basınçların yükseklikle değişimi	115
Şekil 93: Asinkronize yatay yer hareketi (kuzey-güney (N-S) bileşeni) etkisindeki baraj-rezervuar-temel sisteminin baraj memba topuğundaki B Gauss integrasyon noktasında 2000 m/s ve sonsuz dalga yayılma hızları için elde edilen yatay gerilmelerin (σ_{yy}) zamanla değişimi	116
Şekil 94: Asinkronize yatay yer hareketi (kuzey-güney (N-S) bileşeni) etkisindeki baraj-rezervuar-temel sisteminin baraj memba topuğundaki B Gauss integrasyon noktasında 2000 m/s ve sonsuz dalga yayılma hızları için elde edilen düşey gerilmelerin (σ_{zz}) zamanla değişimi	117
Şekil 95: Asinkronize yatay yer hareketi (kuzey-güney (N-S) bileşeni) etkisindeki baraj-rezervuar-temel sisteminin baraj memba topuğundaki B Gauss integrasyon noktasında 2000 m/s ve sonsuz dalga yayılma hızları için elde edilen kayma gerilmelerinin (σ_{yz}) zamanla değişimi	118
Şekil 96: Asinkronize yatay yer hareketi (kuzey-güney (N-S) bileşeni) etkisindeki baraj-rezervuar-temel sisteminin baraj memba yüzeyine yakın E Gauss integrasyon noktasında 2000 m/s ve sonsuz dalga yayılma hızları için elde edilen hidrodinamik basınçların zamanla değişimi	119
Şekil 97: Baraj temelinin kütleli ve kütsüz olması durumlarında III-III kesitinde 250 m/s ve sonsuz dalga yayılma hızları için elde edilen mutlak	

maksimum yatay gerilmelerin (σ_{yy}) yatay uzaklıkla değişimi	120
şekil 98: Baraj temelinin kütelen ve kütlesiz olması durumlarında III-III kesitinde 250 m/s ve sonsuz dalga yayılma hızları için elde edilen mutlak maksimum düşey gerilmelerin (σ_{zz}) yatay uzaklıkla değişimi	121
şekil 99: Baraj temelinin kütelen ve kütlesiz olması durumlarında III-III kesitinde 250 m/s ve sonsuz dalga yayılma hızları için elde edilen mutlak maksimum kayma gerilmelerinin (σ_{yz}) yatay uzaklıkla değişimi	122
şekil 100: Baraj temelinin kütelen ve kütlesiz olması durumlarında baraj memba yüzeyinde 250 m/s ve sonsuz dalga yayılma hızları için elde edilen mutlak maksimum hidrodinamik basınçların yükseklikle değişimi	123
şekil 101: Barajın boş ve dolu olması durumlarında I-I kesitinde 250 m/s ve sonsuz dalga yayılma hızları için elde edilen mutlak maksimum yatay gerilmelerin (σ_{yy}) yatay uzaklıkla değişimi	124
şekil 102: Barajın boş ve dolu olması durumlarında I-I kesitinde 250 m/s ve sonsuz dalga yayılma hızları için elde edilen mutlak maksimum düşey gerilmelerin (σ_{zz}) yatay uzaklıkla değişimi	125
şekil 103: Barajın boş ve dolu olması durumlarında I-I kesitinde 250 m/s ve sonsuz dalga yayılma hızları için elde edilen mutlak maksimum kayma gerilmelerinin (σ_{yz}) yatay uzaklıkla değişimi	126
şekil 104: Barajın boş ve dolu olması durumlarında II-II kesitinde 250 m/s ve sonsuz dalga yayılma hızları için elde edilen mutlak maksimum yatay gerilmelerin (σ_{yy}) yatay uzaklıkla değişimi	127
şekil 105: Barajın boş ve dolu olması durumlarında II-II kesitinde 250 m/s ve sonsuz dalga yayılma hızları için elde edilen mutlak maksimum düşey gerilmelerin (σ_{zz}) yatay uzaklıkla değişimi	128
şekil 106: Barajın boş ve dolu olması durumlarında II-II kesitinde 250 m/s ve sonsuz dalga yayılma hızları için elde edilen mutlak maksimum kayma gerilmelerinin (σ_{yz}) yatay uzaklıkla değişimi	129

Şekil 107: Barajın boş ve dolu olması durumlarında III-III kesitinde 250 m/s ve sonsuz dalga yayılma hızları için elde edilen mutlak maksimum yatay gerilmelerin (σ_{yy}) yatay uzaklıkla değişimi	130
Şekil 108: Barajın boş ve dolu olması durumlarında III-III kesitinde 250 m/s ve sonsuz dalga yayılma hızları için elde edilen mutlak maksimum düşey gerilmelerin (σ_{zz}) yatay uzaklıkla değişimi	131
Şekil 109: Barajın boş ve dolu olması durumlarında III-III kesitinde 250 m/s ve sonsuz dalga yayılma hızları için elde edilen mutlak maksimum kayma gerilmelerinin (σ_{yz}) yatay uzaklıkla değişimi	132
Şekil 110: Barajın boş ve dolu olması durumlarında IV-IV kesitinde 250 m/s ve sonsuz dalga yayılma hızları için elde edilen mutlak maksimum yatay gerilmelerin (σ_{yy}) yükseklikle değişimi	133
Şekil 111: Barajın boş ve dolu olması durumlarında IV-IV kesitinde 250 m/s ve sonsuz dalga yayılma hızları için elde edilen mutlak maksimum düşey gerilmelerin (σ_{zz}) yükseklikle değişimi	134
Şekil 112: Barajın boş ve dolu olması durumlarında IV-IV kesitinde 250 m/s ve sonsuz dalga yayılma hızları için elde edilen mutlak maksimum kayma gerilmelerinin (σ_{yz}) yükseklikle değişimi	135
Şekil 113: Barajın boş olması durumunda baraj memba topuğundaki B Gauss integrasyon noktasında 250 m/s, 2000 m/s ve sonsuz dalga yayılma hızları için elde edilen yatay gerilmelerin (σ_{yy}) zamanla değişimi	136
Şekil 114: Barajın boş olması durumunda baraj memba topuğundaki B Gauss integrasyon noktasında 250 m/s, 2000 m/s ve sonsuz dalga yayılma hızları için elde edilen düşey gerilmelerin (σ_{zz}) zamanla değişimi	137
Şekil 115: Barajın boş olması durumunda baraj memba topuğundaki B Gauss integrasyon noktasında 250 m/s, 2000 m/s ve sonsuz dalga yayılma hızları için elde edilen kayma gerilmelerinin (σ_{yz}) zamanla değişimi.	138

Şekil 116: Asinkronize düşey yer hareketi etkisindeki baraj-rezervuar-temel sisteminin 1. r vektörü (r_1 vektörü)	139
Şekil 117: Asinkronize düşey yer hareketi etkisindeki baraj-rezervuar-temel sisteminin 2. r vektörü (r_2 vektörü)	139
Şekil 118: Asinkronize düşey yer hareketi etkisindeki baraj-rezervuar-temel sisteminin 3. r vektörü (r_3 vektörü)	140
Şekil 119: Asinkronize düşey yer hareketi etkisindeki baraj-rezervuar-temel sisteminin 4. r vektörü (r_4 vektörü)	140
Şekil 120: Baraj-rezervuar-temel sisteminin düşey doğrultuda rijit cisim hareketi. . . .	141
Şekil 121: Asinkronize düşey yer hareketi (düşey (V) bileşen) etkisindeki baraj-rezervuar-temel sisteminin baraj kretinde sonsuz dalga yayılma hızı için elde edilen zahiri-statik düşey yerdeğiştirmenin zamanla değişimi	141
Şekil 122: Asinkronize düşey yer hareketi (düşey (V) bileşen) etkisindeki baraj-rezervuar-temel sisteminin baraj memba topuğundaki B Gauss integrasyon noktasında 250 m/s, 2000 m/s ve sonsuz dalga yayılma hızları için elde edilen yatay gerilmelerin (σ_{yy}) zamanla değişimi	142
Şekil 123: Asinkronize düşey yer hareketi (düşey (V) bileşen) etkisindeki baraj-rezervuar-temel sisteminin baraj memba topuğundaki B Gauss integrasyon noktasında 250 m/s, 2000 m/s ve sonsuz dalga yayılma hızları için elde edilen düşey gerilmelerin (σ_{zz}) zamanla değişimi	143
Şekil 124: Asinkronize düşey yer hareketi (düşey (V) bileşen) etkisindeki baraj-rezervuar-temel sisteminin baraj memba topuğundaki B Gauss integrasyon noktasında 250 m/s, 2000 m/s ve sonsuz dalga yayılma hızları için elde edilen kayma gerilmelerinin (σ_{yz}) zamanla değişimi	144
Şekil 125: Asinkronize düşey yer hareketi (düşey (V) bileşen) etkisindeki baraj-rezervuar-temel sisteminin baraj memba yüzeyine yakın E Gauss integrasyon noktasında 250 m/s, 2000 m/s ve sonsuz dalga yayılma hızları için elde edilen hidrodinamik basınçların zamanla değişimi	145

- Şekil 126: Asinkronize düşey yer hareketi (düşey (V) bileşen) etkisindeki baraj-rezervuar-temel sisteminin baraj temelinde alınan I-I kesitinde değişik dalga yayılma hızları için elde edilen mutlak maksimum yatay gerilmelerin (σ_{yy}) yatay uzaklıkla değişimi 146
- Şekil 127: Asinkronize düşey yer hareketi (düşey (V) bileşen) etkisindeki baraj-rezervuar-temel sisteminin baraj temelinde alınan I-I kesitinde değişik dalga yayılma hızları için elde edilen mutlak maksimum düşey gerilmenin (σ_{zz}) yatay uzaklıkla değişimi. 146
- Şekil 128: Asinkronize düşey yer hareketi (düşey (V) bileşen) etkisindeki baraj-rezervuar-temel sisteminin baraj temelinde alınan I-I kesitinde değişik dalga yayılma hızları için elde edilen mutlak maksimum kayma gerilmelerinin (σ_{yz}) yatay uzaklıkla değişimi 147
- Şekil 129: Asinkronize düşey yer hareketi (düşey (V) bileşen) etkisindeki baraj-rezervuar-temel sisteminin baraj tabanında alınan II-II kesitinde değişik dalga yayılma hızları için elde edilen mutlak maksimum yatay gerilmelerin (σ_{yy}) yatay uzaklıkla değişimi 147
- Şekil 130: Asinkronize düşey yer hareketi (düşey (V) bileşen) etkisindeki baraj-rezervuar-temel sisteminin baraj tabanında alınan II-II kesitinde değişik dalga yayılma hızları için elde edilen mutlak maksimum düşey gerilmelerin (σ_{zz}) yatay uzaklıkla değişimi 148
- Şekil 131: Asinkronize düşey yer hareketi (düşey (V) bileşen) etkisindeki baraj-rezervuar-temel sisteminin baraj tabanında alınan II-II kesitinde değişik dalga yayılma hızları için elde edilen mutlak maksimum kayma gerilmelerinin (σ_{yz}) yatay uzaklıkla değişimi 148
- Şekil 132: Asinkronize düşey yer hareketi (düşey (V) bileşen) etkisindeki baraj-rezervuar-temel sisteminin baraj kretine yakın alınan III-III kesitinde değişik dalga yayılma hızları için elde edilen mutlak maksimum yatay gerilmelerin (σ_{yy}) yatay uzaklıkla değişimi. 149

- Şekil 133: Asinkronize düşey yer hareketi (düşey (V) bileşen) etkisindeki baraj-rezervuar-temel sisteminin baraj kretine yakın alınan III-III kesitinde değişik dalga yayılma hızları için elde edilen mutlak maksimum düşey gerilmelerin (σ_{zz}) yatay uzaklıkla değişimi. 149
- Şekil 134: Asinkronize düşey yer hareketi (düşey (V) bileşen) etkisindeki baraj-rezervuar-temel sisteminin baraj kretine yakın alınan III-III kesitinde değişik dalga yayılma hızları için elde edilen mutlak maksimum kayma gerilmelerinin (σ_{yz}) yatay uzaklıkla değişimi 150
- Şekil 135: Asinkronize düşey yer hareketi (düşey (V) bileşen) etkisindeki baraj-rezervuar-temel sisteminin IV-IV kesitinde değişik dalga yayılma hızları için elde edilen mutlak maksimum yatay gerilmelerin (σ_{yy}) yükseklikle değişimi 150
- Şekil 136: Asinkronize düşey yer hareketi (düşey (V) bileşen) etkisindeki baraj-rezervuar-temel sisteminin IV-IV kesitinde değişik dalga yayılma hızları için elde edilen mutlak maksimum düşey gerilmelerin (σ_{zz}) yükseklikle değişimi 151
- Şekil 137: Asinkronize düşey yer hareketi (düşey (V) bileşen) etkisindeki baraj-rezervuar-temel sisteminin IV-IV kesitinde değişik dalga yayılma hızları için elde edilen mutlak maksimum kayma gerilmelerinin (σ_{yz}) yükseklikle değişimi 151
- Şekil 138: Asinkronize düşey yer hareketi (düşey (V) bileşen) etkisindeki baraj-rezervuar-temel sisteminin baraj memba yüzeyi boyunca değişik dalga yayılma hızları için elde edilen mutlak maksimum hidrodinamik basınçların yükseklikle değişimi 152

TABLO LİSTESİ

Sayfa

Tablo 1: Değişik düğüm noktalı iki boyutlu sonlu elemanlar için indirgenmiş ve normal integrasyon mertebeleri [50, 58] . . . . .	.28
Tablo 2: 13 Mart 1992 Erzincan depreminin düzeltilmiş doğu-batı (E-W), kuzey-güney (N-S) ve düşey (V) bileşenlerinin mutlak maksimum ivme, hız ve yerdeğiştirmeleri . . . . .	.35
Tablo 3: Baraj temelinin kütleli ve kütsüz olması durumları için elde edilen frekanslar . . . . .	.49
Tablo 4: MULSAP [92] ve SAP IV [100] programları kullanılarak baraj-rezervuar-temel sisteminin baraj kretinde elde edilen mutlak maksimum yatay ve düşey dinamik yerdeğiştirmeler. . . . .	.53
Tablo 5: MULSAP [92] ve SAP IV [100] programları kullanılarak baraj-rezervuar-temel sisteminin baraj memba (B) ve mansap (D) topuklarındaki Gauss integrasyon noktalarında elde edilen mutlak maksimum gerilmeler . . . . .	.53
Tablo 6: Baraj-rezervuar-temel sisteminin baraj memba (B) ve mansap (D) topuklarındaki Gauss integrasyon noktalarında 250 m/s ve sonsuz dalga yayılma hızları (asinkronize yatay yer hareketi) için hesaplanan mutlak maksimum gerilmeler . . . . .	.57
Tablo 7: Baraj-rezervuar-temel sisteminin baraj memba (B) ve mansap (D) topuklarındaki Gauss integrasyon noktalarında 250 m/s ve sonsuz dalga yayılma hızları (asinkronize düşey yer hareket) için hesaplanan mutlak maksimum gerilmeler . . . . .	.64

SEMBOL LİSTESİ

a, b	Katsayılar
B^e	Sıvı elemanı şekildeğiştirme-yerdeğiştirme matrisi
C	Ortak sistemin sönüm matrisi
C_f	Sıvı elastisite matrisi
C_{rr}	DSD ile ilgili sönüm matrisi
$\det J_{\psi}^e$	Jacobian operatörünün determinanı
e	Sıvının şekildeğiştirme vektörü
E	Toplam hata
F	Ortak sistemin dış kuvvet vektörü
F_f	Sıvı sistemi kuvvet vektörü
F_{off}	DSD 'ni etkileyen etkili kuvvet vektörü
$f^k(t)$	$f(t)$ fonksiyonunun k. türevi
g	Yerçekimi ivmesi
h	Enterpolasyon (şekil) fonksiyonları vektörü
h_i	Sıvı elemanı i. düğüm noktası ile ilgili enterpolasyon (şekil) fonksiyonu
h_s	Bir boyutlu yüzey elemanı enterpolasyon (şekil) fonksiyonlarının oluşturduğu vektör
H	Enterpolasyon (şekil) fonksiyonları matrisi
J	Jacobian operatörü
K	Ortak sistemin rijitlik matrisi
K_f	Sıvı sistemi rijitlik matrisi
K_f^e	Sıvı elemanı rijitlik matrisi
K_f^*	Sıvı serbest yüzey rijitliklerini de içeren sıvı sistemi rijitlik matrisi

\mathbf{K}_{rr}	DSD ile ilgili rijitlik matrisi
l_r	Belirli bir referans noktasından her bir bölgenin başlangıcına olan mesafe
\mathbf{M}	Ortak sistemin kütle matrisi
\mathbf{M}_f	Sıvı sistemi kütle matrisi
\mathbf{M}_f^e	Sıvı elemanı kütle matrisi
\mathbf{M}_{rr}	DSD ile ilgili kütle matrisi
$\mathbf{M}_{rg}, \mathbf{C}_{rg}, \mathbf{K}_{rg}$	BZSD 'nin birim hareketinden dolayı DSD 'de meydana gelen kuvvetler
$\mathbf{M}_{gg}, \mathbf{C}_{gg}, \mathbf{K}_{gg}$	BZSD 'nin birim hareketinden dolayı BZSD' de meydana gelen kuvvetler
P	Sıvı basıncı
P_w	Rotasyonel gerilme
$P(t)$	Polinom
q	Eleman düğüm noktası sayısı
q_i	i. genelleştirilmiş koordinat
Q_i	i. genelleştirilmiş kuvvet
\mathbf{r}	Zemin yerdeğıştirmelerinin şekil vektörü (\mathbf{r} vektörü)
\mathbf{r}, \mathbf{s}	Boyutsuz eksen takımı
$\mathbf{r}_i, \mathbf{s}_j$	Doğal koordinatlardaki integrasyon noktaları
\mathbf{R}_{rg}	\mathbf{r} vektörlerinin oluşturduğu matris
\mathbf{S}_f	Sıvı sistemi serbest yüzey rijitlik matrisi
\mathbf{S}_f^e	Sıvı elemanı serbest yüzey rijitlik matrisi
t	Zaman
t_y^e	Eleman kalınlığı
t_t	İvme kaydının toplam süresi
T	Sıvı sistemi kinetik enerjisi
\mathbf{v}	Ortak sistemin toplam yerdeğıştirme vektörü
$\dot{\mathbf{v}}$	Ortak sistemin toplam hız vektörü

$\ddot{\mathbf{v}}$	Ortak sistemin toplam ivme vektörü
$\ddot{\mathbf{v}}_{cg}(t)$	Eksen düzeltmesi yapılmış ivme
\mathbf{v}_{dr}	Dinamik (rölatif) yerdeğiştirme vektörü
\mathbf{v}_f	Sıvı sistemi düğüm noktası yerdeğiştirme vektörü
$\dot{\mathbf{v}}_f$	Sıvı sistemi düğüm noktası hız vektörü
\mathbf{v}_{fy}	Sıvının y eksenini doğrultusundaki yerdeğiştirme bileşeni
$\dot{\mathbf{v}}_{fy}$	Sıvının y eksenini doğrultusundaki hız bileşeni
\mathbf{v}_{fy}^e	Sıvı elemanın y eksenini doğrultusundaki düğüm noktası yerdeğiştirme vektörü
\mathbf{v}_{fyi}^e	Sıvı elemanın i. düğüm noktasında y eksenini doğrultusundaki yerdeğiştirme bileşeni
\mathbf{v}_{fs}	Sıvı serbest yüzey düşey yerdeğiştirmesi
\mathbf{v}_{fs}	Sıvı serbest yüzey düğüm noktası düşey yerdeğiştirme vektörü
\mathbf{v}_{fz}	Sıvının z eksenini doğrultusundaki yerdeğiştirme bileşeni
$\dot{\mathbf{v}}_{fz}$	Sıvının z eksenini doğrultusundaki hız bileşeni
\mathbf{v}_{fz}^e	Sıvı elemanın z eksenini doğrultusundaki düğüm noktası yerdeğiştirme vektörü
\mathbf{v}_{fzi}^e	Sıvı elemanın i. düğüm noktasında z eksenini doğrultusundaki yerdeğiştirme bileşeni
\mathbf{v}_g	BZSD 'nin toplam yerdeğiştirme vektörü
$\dot{\mathbf{v}}_g$	BZSD 'nin toplam hız vektörü
$\ddot{\mathbf{v}}_g$	BZSD 'nin toplam ivme vektörü
\mathbf{v}_r	DSD 'nin toplam yerdeğiştirme vektörü
$\dot{\mathbf{v}}_r$	DSD 'nin toplam hız vektörü
$\ddot{\mathbf{v}}_r$	DSD 'nin toplam ivme vektörü

v_{sr}	Zahiri-statik (quasi-static) yerdeğiştirme vektörü
V_s	Deprem dalgası yayılma hızı
w	Sıvının düzleme dik doğrultudaki dönmesi (rotasyonel Şekildeğiştirme)
W_i, W_j	Ağırlık çarpanları
y, z	Kartezyen eksen takımı
y_i^e, z_i^e	Sıvı elemanın i. düğüm noktası koordinatları
$Y_i(t)$	Zamana bağlı i. modal genlik
DSD	Diğer serbestlik dereceleri
BZSD	Bilinen zemin serbestlik dereceleri
α	Rotasyon kısıtlama parametresi
β	Sıvı hacimsel elastisite modülü (bulk modulus)
β_o	$\beta = 207 \times 10^7 \text{ N/m}^2$
Δt	Zaman aralığı
ϵ_v	Hacimsel Şekildeğiştirme
ξ	Titreşimin tüm modları için geçerli olan sönüm oranı
π_e	Sıvı sistemin toplam Şekildeğiştirme enerjisi
π_s	Sıvı yüzey hareketi ile ilgili enerji
π_t	Sıvı sisteminin toplam potansiyel enerjisi
ρ	Sıvının kütle yoğunluğu
σ	Sıvının gerilme vektörü
σ_{yy}	Yatay gerilme
σ_{zz}	Düşey gerilme
σ_{yz}	Kayma gerilmesi
τ_i	Yer hareketinin belirli bir referans noktasından başlayıp i. mesnet noktasına veya bölgeye varış zamanı
ϕ_i	i. mod vektörü
ω_i	i. açısal frekans

1. GENEL BİLGİLER

1.1. Konunun Önemi

İnsanların en önemli ihtiyaçlarından olan su; içme, kullanma, sanayi, sulama, enerji ve ulaştırma gibi alanlarda kullanılmaktadır [1]. Suyun tabiattaki normal oluşumu, insanların su ihtiyaçlarını sürekli karşılayacak şekilde olmamaktadır. Dolayısıyla, mevcut su kaynaklarının insanların ihtiyaçlarını en iyi karşılayacak şekilde düzenlenmesi gerekmektedir. Bunun sonucu olarak, baraj inşa etme zorunluluğu ortaya çıkmaktadır.

Bugün için bilinen en eski su yapısı, Ürdün 'de M.Ö. 4000 yılından kaldığı sanılan 4 m yükseklik ve 94 m kret uzunluğundaki Jawa barajıdır [2]. Mühendislik açısından ise, beton barajların projelendirme esasları ilk olarak Fransız mühendisler tarafından 19. yüzyılın başlarında ele alınmış ve Profesör W. M. Rankine 'nin danışmanlığında 1870 yılında Hindistan 'da Periyar barajı inşa edilmiştir [3].

Ülkemizde ilk baraj 1620 yılında Osmanlı devrinde yaptırılmış olan 10 m yüksekliğindeki Topuz barajıdır [4]. Türkiye Cumhuriyeti döneminde, baraj yapımına 1936 yılında hizmete giren Çubuk I barajı ile başlanmıştır [1]. İkinci Dünya Savaşından sonra Porsuk (1948), Sarıyar (1956) ve Kemer (1958) gibi beton ağırlık barajları inşa edilmiştir [5]. Devlet Su İşleri (DSİ) tarafından yapılan etüdlere göre; Ülkemizin su kaynaklarının en ekonomik biçimde kullanılabilmesi için 684 adet baraj gerekmektedir [6]. Bu barajların %20 'si işletmeye açılmış, %10 'u inşa halinde, %12.5 'nin kesin projesi hazır veya hazırlanmakta, yarısından fazlası ise ancak ön proje aşamasında bulunmaktadır [5].

Barajlar arkalarında rezervuara sahip büyük ve monolitik yapılardır. Deprem sırasında rezervuar, baraj davranışını önemli derecede etkilemekte, barajın hasar görmesine hatta yıkılmasına neden olabilmektedir. 1925 yılında California 'da Santa Barbara yakınlarındaki Sheffield, 1962 yılında Çin Halk Cumhuriyeti 'ndeki Hsinfengkiang, 1967 yılında Hindistan 'da Bombay yakınlarındaki Koyna ve 1971 yılında California 'daki Lower San Fernando barajlarının depremlerden hasar görmesi konunun önemini daha da arttırmıştır [3, 7].

Barajlar gibi mühendislik yapılarının deprem analizleri genellikle zeminle etkileşim yüzeyleri boyunca üniform (sonsuz hızla yayılan) yer hareketine maruz kaldığı kabulüne göre yapılmaktadır. Fakat, deprem dalgaları yayılma ortamının özelliklerine bağlı olarak farklı sonlu hızlarla yayılmaktadır [8]. Deprem dalgası yayılma hızları, yer yüzüne yakın kısımlarda yaklaşık olarak 100 m/s ile 3000 m/s arasında kalmaktadır [9]. Dolayısıyla, kaynağından sonlu hızla yayılan deprem dalgasının frekans içeriği ve genliği yayıldığı ortamın özelliklerine bağlı olarak değişmekte ve farklı noktalara farklı zamanlarda ulaşmaktadır [10]. Örneğin, Ambiesta barajının iki yakasında zemin yüzeyinde aynı deprem sırasında kaydedilen deprem verilerinin farklı olduğu gözlenmiştir [11]. Bu değişimin, yapının depreme karşı davranışında etkili olup olmayacağı, deprem dalgası ve yapı-zemin etkileşim yüzeyinin uzunluğuna bağlıdır [12-13]. Yapı-zemin etkileşim yüzeyi kısa olan yapılar (etkileşim yüzeyi deprem dalgası uzunluğundan küçük olan yapılar) için üniform yer hareketinin kullanılabilirliği kabul edilmektedir [12-13]. Bununla birlikte, köprüler, uzun boru hatları, nükleer güç santralleri ve bu tezin konusu olan barajlar gibi zeminle etkileşim yüzeyi deprem dalgası uzunluğundan büyük yapılar için asinkronize (sonlu hızla yayılan) yer hareketinin dikkate alınması gerekmektedir. Çünkü, asinkronize yer hareketi durumunda dinamik (rölatif) yerdeğiştirmelere ek olarak, mesnet noktalarının birbirlerine göre rölatif hareketlerinin neden olduğu zahiri-statik (quasi-static) yerdeğiştirmeler de oluşmaktadır. Zahiri-statik yerdeğiştirmeler ise, barajın davranışını önemli derecede etkilemektedir. Dolayısıyla, barajların yıkılmaları hem ekonomik hem de can kaybı bakımında vahim sonuçlar doğuracağından; gerek mevcut barajların deprem güvenliklerinin gözden geçirilmesinde ve gerekse inşa edilecek barajların projelendirilmelerinde baraj-rezervuar-temel etkileşimiyle birlikte asinkronize yer hareketinin etkisinin de dikkate alınması kaçınılmaz hale gelmiştir.

1.2. Barajlarla İlgili Daha Önce Yapılmış Çalışmaların Sınıflandırılması

Barajlar, sıvı-yapı-zemin etkileşimine maruz yapı grubuna girmektedir. Dolayısıyla, barajların deprem analizleri sıvı-yapı sistemlerinin etkileşim analizlerinde kullanılan kütle ekleme (added mass), Euler (yapının davranışı yerdeğiştirmeler sıvının davranışı basınçlar cinsinden ifade edilmekte) ve Lagrange (yapı ve sıvının davranışı yerdeğiştirmeler cinsinden ifade edilmekte) yaklaşımları kullanılarak yapılmaktadır. Söz konusu yaklaşımlar kullanılarak yapılan barajların dinamik analizlerinde, dinamik etki olarak genellikle depremden dolayı oluşan yer

hareketi göz önüne alınmaktadır. Daha önce yapılan çalışmalarda kullanılan yer hareketi, *üniform* ve *asinkronize (sonlu hızla yayılan) yer hareketi* olmak üzere iki kısımda sınıflandırılabilir. *Üniform yer hareketinde*, deprem dalgasının sonsuz hızla yayıldığı ve yapı-zemin etkileşim yüzeyi boyunca tüm mesnet noktalarına aynı anda ulaştığı kabul edilmektedir. Üniform yer hareketi dikkate alınarak yapılan dinamik analiz "*klasik dinamik analiz*" olarak isimlendirilmektedir. İki farklı mesnet noktasında dalganın genliği değişmeyip, sadece sonlu yayılma hızının neden olduğu varış zaman farkı dikkate alındığında ise, mesnet noktalarının hareketi *asinkronize hareket* olarak ifade edilmektedir. Asinkronize yer hareketi dikkate alınarak yapılan analiz de "*asinkronize dinamik analiz*" olarak adlandırılmaktadır [14]. Sonlu yayılma hızı yapıda *dinamik (rölatif) yerdeğiştirmelere* ek olarak, *zahiri-statik (quasi-static) yerdeğiştirmeler* de meydana getirir. Dinamik yerdeğiştirmelere atalet kuvvetleri neden olurken, zahiri-statik yerdeğiştirmelere yapı-zemin etkileşim yüzeyindeki mesnet noktaların birbirlerine göre rölatif hareketleri neden olmaktadır.

Kütle ekleme, Euler ve Lagrange yaklaşımları kullanılarak barajlarla ilgili daha önce yapılmış çalışmalarda üniform ve asinkronize (sonlu hızla yayılan) olmak üzere iki tip yer hareketi kullanılmıştır. Bu nedenle, daha önce yapılmış çalışmalar iki gruba ayrılarak yukarıda bahsedilen üç yaklaşım için ayrı ayrı verilecektir.

1.2.1. Üniform Yer Hareketi Dikkate Alınarak Yapılmış Çalışmalar

Üniform yer hareketi dikkate alınarak baraj-rezervuar ve baraj-rezervuar-temel sistemlerinin etkileşim analizleri; kütle ekleme, Euler ve Lagrange yaklaşımları kullanılarak yapılmıştır. Bu üç yaklaşıma göre yapılan çalışmalar aşağıda sırasıyla verilmektedir.

1.2.1.1. Kütle Ekleme (Added Mass) Yaklaşımına Göre Yapılmış Çalışmalar

Kütle ekleme yaklaşımı, ilk olarak Westergaard [15] tarafından ortaya atılmıştır. Westergaard 'ın bu orjinal çalışmasında, barajın rijit, sonsuz uzun ve düşey memba yüzeyli olduğu; rezervuarın memba doğrultusunda sonsuza uzandığı, suyun lineer sıkışabilir olduğu ve sıvı yüzey dalgalarının oluşmadığı (etkisinin ihmal edilebileceği) kabulleri yapılmaktadır. Kütle ekleme yaklaşımında, dinamik etki sonucunda baraj memba yüzeyi boyunca oluşan

hidrodinamik basınç dağılımı, barajla beraber titreşen bir kütle dağılımı olarak göz önüne alınabilmektedir. Söz konusu kütle dağılımından tekil kütleler hesaplanıp, baraj memba yüzeyindeki düğüm noktalarının (sonlu eleman analizi) kütlelerine eklenerek rezervuarın hidrodinamik etkisi dikkate alınmaktadır. Tekil kütlelerin hesabında, tekil kütlelerin ekleneceği düğüm noktasındaki baraj memba yüzeyi normali ile deprem doğrultusu arasındaki açı göz önünde bulundurulmalıdır [16]. Kütle ekleme yaklaşımı basit kabullere dayanmasına rağmen, Euler ve Lagrange yaklaşımlarından elde edilen sonuçları karşılaştırmak ve barajın depreme karşı davranışı hakkında ön bilgi edinmek için bir çok araştırmacı tarafından kullanılmıştır [1, 16-22].

1.2.1.2. Euler Yaklaşımına Göre Yapılmış Çalışmalar

Baraj-rezervuar ve baraj-rezervuar-temel sistemlerinin analizlerinde kullanılan ikinci yaklaşım, sıvı-yapı etkileşim problemlerinde çok yaygın olarak kullanılan Euler yaklaşımıdır. Euler yaklaşımında yapının davranışı yerdeğiştirmeler, sıvının davranışı ise basınçlar (hız potansiyelleri) cinsinden ifade edilmektedir. Chopra [23] Euler yaklaşımını kullanarak, düşey memba yüzeyli rijit bir barajda üniform yatay ve düşey yer hareketinden dolayı oluşan hidrodinamik basınçları analitik olarak elde etmiştir. Yazar çalışmasında ayrıca, rezervuar sisteminin temel doğal frekansı barajın temel doğal frekansına yaklaştığında baraj-rezervuar etkileşiminin dikkate alınması gerektiği vurgulanmaktadır.

Daha sonraki yıllarda yapılan çalışmalarda [24-26] baraj-rezervuar etkileşimi dikkate alınarak analitik çözümler elde edildi. Söz konusu çalışmalarda; baraj memba yüzeyi düşey, rezervuarın sabit derinlikte ve sonsuz uzun olduğu kabul edilmekte ve barajın davranışı boş barajın birinci temel modu dikkate alınarak ifade edilmektedir. Rezervuarın dikkate alınması baraj davranışını önemli derecede etkilemekte ve bunun sonucu olarak, barajda daha büyük yerdeğiştirme ve gerilmeler oluşmaktadır. Rezervuardaki suyun sıkışabilirliğinin ise, rezervuarın temel frekansının barajın temel frekansına oranı (Ω_r) ikiden büyük olması durumunda ($\Omega_r > 2$) ihmal edilebileceği vurgulanmaktadır [24].

1960 'lı yılların ortalarından sonra yüksek hızlı büyük kapasiteli bilgisayarların ve buna paralel olarak sonlu elemanlar metodu gibi etkin sayısal metodların gelişmesiyle, Euler yaklaşımına dayalı bir çok çalışma gerçekleştirilmiştir [19, 20-21, 27-39].

Saini ve diğ. [32], baraj-rezervuar sisteminin üniform yatay yer hareketi altındaki iki boyutlu davranışını sonlu elemanlar yöntemini kullanarak araştırdılar. Suyun sıkışabilirliğinin hesaba katıldığı çalışmada; baraj sonlu elemanlarla, rezervuar ise sonlu ve sonsuz elemanlarla temsil edilmiştir.

Hall ve Chopra [34] iki boyutlu beton ağırlık ve toprak dolgu barajların deprem etkisi altındaki davranışlarını belirlemek için, hidrodinamik etkileri de içeren frekans alanında bir analiz metodu geliştirdiler. Baraj ve sıkışabilir suyun davranışları lineer olarak kabul edilmektedir. Sıvı ortamı ve baraj iki ayrı alt sistem olarak düşünülmekte ve her iki ortam sonlu elemanlarla modellendirilmektedir. Rezervuar ortamı, düzensiz (sonlu eleman sistemi) ve düzenli (sürekli ortam) bölgeler olmak üzere iki bölge halinde düşünülmektedir. Sabit derinliğe sahip olan düzenli bölge, baraja bitişik olan düzensiz bölgenin bitiminden başlayıp sonsuza uzanmaktadır.

Greeves ve Dumanoğlu [19], baraj-rezervuar sisteminin modal ve üniform yatay yer hareketi altındaki dinamik davranışını incelediler. Söz konusu çalışmada, ortak sistemin özdeğerlerinin belirlenmesinde Dungar [40] algoritması kullanılmaktadır. Baraj ve rezervuar ortamında iki boyutlu, arayüzeyde ise bir boyutlu sonlu elemanlar kullanılmıştır.

Karadeniz [41], Euler yaklaşımını kullanarak sıvı-yapı etkileşimini ince dönel kabuk sistemler için dikkate almıştır. Sonlu elemanlar yönteminin kullanıldığı çalışmada, deprem analizi üniform yer hareketine göre yapılmaktadır.

Humar ve Roufaiel [42] ve Sharan [43], rijit bir baraj üzerinde oluşacak hidrodinamik basıncı belirlemek için sonlu elemanlar yöntemini kullanmışlardır. Yazarlar yaptıkları çalışmalarında, barajı rijit kabul edip rezervuarı sonlu elemanlarla modellendirmişlerdir.

Baraj davranışını etkileyen nedenlerden biri de temelin deformasyon yapabilmesidir. Statik ve dinamik yükler etkisi altında temelde deformasyonlar oluşmaktadır. Literatürde, baraj-rezervuar-temel etkileşimini dikkate alan bir çok çalışmaya rastlanmaktadır [37, 44-49].

Chopra ve Chakrabarti [44] baraj-rezervuar-temel etkileşimini dikkate alarak, beton ağırlık barajların üniform yatay ve düşey yer hareketleri altındaki deprem davranışını incelediler. Tüm sistemi üç alt sisteme ayırarak analizi gerçekleştirdiler. Barajı sonlu eleman sistemi, sıvı ortamını memba yönünde sonsuz uzun sürekli ortam ve temel bölgesini ise viskoelastik yarı düzlem olarak temsil etmişlerdir.

Yukarıda verilen çalışmalardan görüldüğü gibi, Euler yaklaşımında sıvı ortamı basınçlar, yapı ortamı ise yerdeğiştirmeler cinsinden ifade edilmektedir. Dolayısıyla, sıvı-yapı arayüzeyinde özel arayüzey denklemlerine ihtiyaç duyulmaktadır. Bu arayüzey 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 Yaklaşımına Göre Yapılmış Çalışmalar

Baraj-rezervuar ve baraj-rezervuar-temel sistemlerinin analizinde kullanılan üçüncü yaklaşım, Lagrange yaklaşımıdır. Bu yaklaşımda, hem sıvı ve hem de yapıda yerdeğıştirmeler değışken olarak kullanıldığından, özel arayüzey denklemlerine ihtiyaç olmamaktadır. Sıvı-yapı arayüzeyindeki sonlu eleman düğüm noktalarında uygunluk ve denge denklemleri otomatik olarak sağlanmaktadır [50]. Ayrıca, yapı elemanlar için mevcut program kütüphanelerinin yerdeğıştirmelere 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. Sıvı-yapı sistemlerinin Lagrange yaklaşımına dayalı analizlerinde oluşan matrisler, simetrik ve bant genişlikleri nispeten küçük olduğundan, mevcut denklem çözüm metodları verimli bir şekilde kullanılabilir [51]. Bunlara rağmen, sıvı sistemlerinin Lagrange yaklaşımına dayalı çözümlerinde sıfır-enerji modları gibi bazı sayısal problemler ortaya çıkabilmektedir. Bu nedenle, önce sayısal problemlerin ortaya çıkış sebepleri ve söz konusu problemlerin giderilmesi için yapılmış çalışmalardan bahsedilecektir.

Lagrange sıvı sonlu elemanların gelişimi bir çok araştırmacının sıvıyı sıfır kayma modüllü bir katı olarak dikkate almasıyla başladı [52-54]. Akkaş ve diğ. [53], kayma modülü sıfır olan sıvı sonlu elemanlar kullanarak yaptıkları modal analizde çok sayıda sıfır-enerji modu elde etmişlerdir. Zienkiewicz ve diğ. [55] kayma modülünün sıfır alınması tekil bir elastisite matrisi vereceğini, bunun da sıfır-enerji modlarının oluşmasına neden olabileceğini vurgulamaktadırlar. Bunun için yazarlar yukarıda bahsedilen çalışmalarında, kayma modülünün küçük değerde alınmasını önermektedirler. Kayma modülünün küçük değerde alınmasına alternatif olarak, sıfır-enerji modlarını yok etmek için yerdeğıştirmelere rotasyonsuzluk kısıtlaması getirilmektedir [56]. Rotasyonsuzluk kısıtlaması, değışik elastisite problemlerinde olduğu gibi bir ceza (penalty) metoduyla hesaba katılmaktadır [57-58]. Yerdeğıştirmelere getirilen rotasyonsuzluk kısıtlaması bir çok araştırmacı tarafından iki boyutlu sıvı problemlerine uygulandı [51,56,59]. Hamdi ve diğ. [56], sıvının rotasyon yapmadığı ilkesini kullanarak sıvı ve sıvı-yapı problemlerini

incelemişlerdir; bazı sıfır enerji modları görülmekle birlikte, metodun elverişli olduğu yazarlar tarafından belirtilmektedir.

Wilson ve Khalvati [50] yerdeğiştirmelere getirilen rotasyonsuzluk kısıtlamasıyla birlikte, eleman matrislerinin hesaplanmasında indirgenmiş integrasyon mertebelerini kullanarak gereksiz sıfır enerji modlarını yok etmişlerdir. Sıvı serbest yüzey salınım hareketinin içerildiği yazarların çalışmasında, sıvı sonlu elemanların stabilitelerinin sağlandığı teorik olarak gösterilmektedir. Wilson ve Khalvati [50] 'nin geliştirdiği sıvı sonlu elemanlar kullanılarak bir çok sıvı, sıvı-yapı, baraj-rezervuar ve baraj-rezervuar-temel sistemlerinin analizi yapılmıştır [17, 38-39, 60-64].

Calayır ve Dumanoglu [62], iki boyutlu değişik sıvı ve sıvı-yapı problemlerinin statik ve dinamik davranışlarını incelediler. Söz konusu çalışmada, rotasyon kısıtlama parametresinin statik analiz sonuçlarını etkilemediği belirtilmektedir. Fakat, modal analizde rotasyon kısıtlama parametresi büyüdükçe rotasyonla ilgili frekanslar yukarıya çekilmekte ve hacim değişim frekansları ilk sıralara kaymaktadır. Bu durum ise modal analizde hesaplanacak frekans sayısında düşme meydana getirmektedir.

Calayır [39], üniform yatay yer hareketini dikkate alarak baraj-rezervuar-temel sisteminin dinamik davranışını araştırmıştır. Yazar, rezervuar ve temelini dikkate alınmasının baraj davranışını önemli derecede etkilediğini vurgulamaktadır.

1.2.2. Asinkronize (Sonlu Hızla Yayılan) Yer Hareketi Dikkate Alınarak Yapılmış Çalışmalar

Asinkronize yer hareketinin yapı davranışı üzerine olan etkisini incelemek için geliştirilmiş teoriler, günümüzde barajlardan başka köprülere [65-81], uzun boru hatlarına [82-83] ve nükleer güç santrallerine [84-85] yaygın olarak uygulanmaktadır. Burada tezin konusu olan barajlarla ilgili yapılmış çalışmalardan bahsedilecektir. Asinkronize yer hareketi durumunda kütle ekleme, Euler ve Lagrange yaklaşımları kullanılarak barajlarla ilgili daha önce yapılmış çalışmaların sayısı az olduğundan, söz konusu çalışmalar bir başlık altında verilmektedir.

1969 yılında Dibaj ve Penzien [12], iki boyutlu özel bir toprak barajın yayılan yer hareketine karşı dinamik davranışını sonlu elemanlar yöntemini kullanarak incelemişlerdir. Temel ve rezervuar etkisinin dikkate alınmadığı çalışmada; deprem dalgası yayılma etkisinin, sadece temel genişliğinin dalga hızına oranı (baraj temelini karşıdan karşıya geçmek için gerekli

süre) 0.1 saniyeden daha küçük olduğunda ihmal edilebileceği vurgulanmaktadır.

Priscu ve diğ. [16], Altınışık [86-87], Altınışık ve Severn [88] ve Altınışık ve diğ. [89] asinkronize yer hareketi etkisinin toprak barajların dinamik analizlerinde göz önüne alınmasının baraj gövdesinde daha küçük ivmelerin oluşmasına neden olduğunu göstermişlerdir. Bununla birlikte yukarıda bahsedilen çalışmalarda, toplam davranışın belirlenebilmesi için mesnet noktalarının birbirlerine göre rölatif hareketinden oluşan zahiri-statik yerdeğiştirme ve gerilmelerin hesaba katılması gerektiği de vurgulanmaktadır.

Haroun ve Abdel-Hafız [90] ve Maugeri ve diğ. [91] analitik yöntemleri kullanarak toprak barajlar için elde ettikleri çözümlerde, baraj davranışının yayılan yer hareketine karşı duyarlı olduğunu göstermişlerdir.

Altınışık [87] ve Altınışık ve diğ. [89] baraj tabanını iki bölgeye ayırarak beton barajlara çok mesnetli titreşimi uygulamışlardır. Rezervuar etkisinin dikkate alınmadığı çalışmalarda; barajın üst kısımlarına doğru gerilmelerde %15-25'lik bir azalma olduğu, barajın tabanına yakın kısımlarda ise zahiri-statik yerdeğiştirmelerden dolayı artış meydana geldiği gözlenmiştir.

Dumanoglu ve Severn [92] ve Dumanoglu ve diğ. [93] değişik hızlarla yayılan asinkronize yatay ve düşey yer hareketine maruz toprak ve beton barajların davranışını incelemişlerdir. Bu çalışmalarda, sonlu elemanlar yöntemi kullanılarak baraj ve temeli birlikte modellendirilmiştir. Baraj temelini dört bölgeye ayrılarak elde edilen sonuçlarda, deprem dalgası yayılma hızının azalmasıyla gerilmelerde genel olarak artış meydana geldiği gözlenmiştir.

Zhang ve Mai [94] kemer barajların iki yakası arasındaki zaman geçikmesini dikkate alarak analitik çözümler elde etmiştir. Zaman gecikmesinin gerilmeler üzerindeki etkisi, deprem dalgası yerdeğiştirmesinin genliğine bağlı olarak değişmektedir. Eğer yerdeğiştirme genlikleri büyükse gerilmeler daha büyük değerler almaktadır.

Chen ve Hou [95] kemer barajların yayılan yer hareketine karşı davranışını incelemişlerdir. Rezervuarın etkisi, hareket denklemlerinde ek kütle olarak dikkate alınmakta ve rezervuar suyunun sıkışamaz olduğu kabul edilmektedir. Nehir yönüne dik doğrultuda yayılan deprem dalgasının etkisi üniform yer hareketi sonuçlarıyla karşılaştırıldığında, maksimum gerilmelerde %40-50 oranlarında artışlar meydana gelmektedir.

Yukarıda sunulan literatür araştırmasından da görüleceği gibi, baraj-rezervuar ve baraj-rezervuar-temel sistemlerinin klasik dinamik analizleri kütle ekleme, Euler ve Lagrange yaklaşımları kullanılarak yapılmıştır. Fakat, söz konusu sistemlerin asinkronize dinamik analizleri ile ilgili çalışmalar hemen hemen yok denecek kadar azdır. Özellikle Lagrange yaklaşımının kullanıldığı çalışmalara, yazar ve grubunun bir kaç çalışmasından [96-99] başka, rastlanmamıştır.

1.3. Çalışmanın Kapsamı

Bu doktora tezinde, baraj-temel ve baraj-rezervuar-temel sistemlerinin Lagrange yaklaşımı kullanılarak asinkronize dinamik analizi, deprem dalgasının çeşitli sonlu yayılma hızları için yapılmıştır. Çalışmalar bilgisayar destekli olarak gerçekleştirilmiştir. Baraj-rezervuar-temel sistemlerinin birlikte dikkate alınabilmesi için, Lagrange yaklaşımına dayalı iki boyutlu değişken düğüm noktalı katı ve sıvı sonlu elemanlar alt programlar halinde FORTRAN 77 bilgisayar dilinde kodlandı. Bu alt programlar, yapı sistemlerinin asinkronize dinamik analizini yapan MULSAP [92] programına dahil edildi ve söz konusu program geliştirilerek sıvı-yapı sistemleri için kullanıldı. Ayrıca, MULSAP [92] programının sonsuz hız durumuna karşılık gelen çözümlerini karşılaştırmak amacıyla, yukarıda sözü edilen alt programlar klasik dinamik analiz yapan SAP IV [100] programına da eklenmiştir.

Birinci bölüm genel bilgiler bölümü olup, üniform ve asinkronize yer hareketi dikkate alınarak barajlarla ilgili daha önce yapılmış çalışmalar bu bölümde sunulmuştur.

İkinci bölümde, asinkronize yer hareketi etkisindeki sıvı-yapı sistemlerinin Lagrange yaklaşımı ile dinamik formülasyonundan bahsedilmektedir. Bu bölümde önce sıvı sistemlerinin davranışı ile ilgili temel bağıntılar ve sıvı sistemlerinin sonlu eleman formülasyonu, daha sonra ise asinkronize yer hareketi etkisindeki sıvı-yapı sistemlerinin ortak formülasyonu verilmektedir.

Üçüncü bölümde, kuvvetli yer hareketi ivme kayıtlarının eksen düzeltilmesi ve integrasyonu ile ilgili formülasyonlar verilmektedir. Söz konusu formülasyonlar kullanılarak, önce analizlerde dikkate alınacak olan ivme kayıtlarının eksen düzeltmeleri yapılmaktadır. Daha sonra düzeltilmiş ivme kayıtlarının integrasyonundan hız ve yerdeğiştirmeler elde edilmektedir.

Dördüncü bölüm, ikinci bölümde verilen formülasyonun uygulamasıyla ilgilidir. Uygulama amacıyla örnek bir beton ağırlık baraj seçilmektedir. Bu barajla ilgili veriler kullanılarak baraj-rezervuar-temel sisteminin önce modal analizi, daha sonra değişik dalga yayılma hızları için yatay ve düşey yer hareketine göre asinkronize dinamik analizi yapılmaktadır. Dördüncü bölümde ayrıca, asinkronize yatay yer hareketi durumunda yer hareketi yerdeğiştirmesinin, rezervuarın, baraj temelinin kütleli ve kütsüz olmasının sonuçlar üzerindeki etkisi de incelenmektedir.

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

2. ASINKRONİZE YER HAREKETİ ETKİSİNDEKİ SIVI-YAPI SİSTEMLERİNİN LAGRANGE YAKLAŞIMI İLE DİNAMİK FORMÜLASYONU

2.1. Giriş

Bu bölümde, önce sıvı sistemlerinin davranışları ile ilgili Lagrange yaklaşımına dayalı temel bağıntılar verilmekte ve sonlu elemanlar yöntemi kullanılarak söz konusu bağıntılardan sıvı sistemlerinin hareket denklemlerine geçilmektedir. Daha sonra, asinkronize yer hareketi etkisindeki sıvı-yapı sistemlerinin Lagrange yaklaşımına dayalı ortak dinamik formülasyonu verilmektedir.

2.2. Sıvı Sistemlerinin Davranışı ve Sonlu Eleman Formülasyonu

2.2.1. Sıvı Sistemlerinin Davranışı ile İlgili Temel Bağıntılar

Bu kısımda lineer-elastik, rotasyonsuz ve viskoz olmayan bir sıvının küçük yerdeğişiklikler yapması hali için temel bağıntılar Kaynak [39] 'taki formülasyona göre verilecektir. Böyle bir sıvıda basınçla hacimsel şekildeğişiklik arasında,

$$P = \beta \epsilon_v \quad (1)$$

bağıntısı vardır [50]. Burada, P sıvı basıncını, β sıvının hacimsel elastisite modülünü ve ϵ_v ise hacimsel şekildeğişikliği göstermektedir. Hacimsel şekildeğişiklik iki boyutlu kartezyen koordinatlarda,

$$\epsilon_v = \frac{\partial v_{fy}}{\partial y} + \frac{\partial v_{fz}}{\partial z} \quad (2)$$

şeklinde yazılabilir. Bu ifadede v_{fy} ve v_{fz} sırasıyla y ve z eksenleri doğrultusundaki yerdeğiştirme bileşenlerini göstermektedir.

Sıvının rotasyonsuzluğu; sıvı gerilme-şekildeğiştirme bağıntılarına rotasyonlar ve söz konusu rotasyonlarla ilgili uygun kısıtlama parametreleri (rijitlikler) yerleştirilerek, ceza (penalty) metodlara [57-58] benzer şekilde hesaba katılmaktadır. İki boyutlu durumda bir rotasyonel şekildeğiştirme bağıntısı vardır. Bu bağıntı

$$w = \frac{1}{2} \left(\frac{\partial v_{fy}}{\partial z} - \frac{\partial v_{fz}}{\partial y} \right) \quad (3)$$

ifadesiyle verilebilir. Burada, w sıvının düzleme dik doğrultudaki dönmesini göstermektedir. Denklem (3) 'te verilen rotasyonla ilgili gerilme ise

$$P_w = \alpha w \quad (4)$$

bağıntısıyla hesaplanabilir. Bu ifadede, P_w rotasyonel gerilmeyi, α ise rotasyon kısıtlama parametresini göstermektedir. Denklem (4) 'ten de görüleceği gibi, kısıtlama parametresinin büyük değerde seçilmesi, sıvının rotasyonsuz hale yaklaşmasına neden olacaktır.

Denklem (1) ve denklem (4) kullanılarak sıvının matris formundaki iki boyutlu gerilme-şekildeğiştirme bağıntıları

$$\begin{bmatrix} P \\ P_w \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \beta & 0 \\ 0 & \alpha \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \epsilon_v \\ w \end{bmatrix} \quad (5)$$

veya kısaca

$$\sigma = C_f e \quad (6)$$

şeklinde yazılabilir. Denklem (6) 'da σ ve e sırasıyla sıvının gerilme ve şekildeğiştirme vektörlerini, C_f ise elastisite matrisini temsil etmektedir.

Bu tezde, sıvı sistemlerinin sonlu eleman hareket denklemleri enerji prensiplerinden faydalanılarak belirleneceğinden, aşağıda sıvı sistemlerin davranışları ile ilgili enerji bağıntıları verilecektir. Bir sıvı sisteminin toplam şekildeğiştirme enerjisi,

$$\pi_e = \frac{1}{2} \int e^T C_f e dV \quad (7)$$

bağıntısıyla hesaplanabilir. Burada T ilgili matrisin transpozisini göstermektedir.

Sıvı sistemlerinin önemli davranışlarından biri de hacimde bir değişim olmadan yerdeğiştirme yapabilmeleridir [38-39]. Rezervuar ve su depoları için bu hareket, yerdeğiştirmelerin düşey olduğu yüzey dalgaları şeklindedir. Bir sıvı sisteminin düşük frekanslı yüzey salınım davranışı, büyük yüzey düşey yerdeğiştirmelerin olduğu sıkışamaz yerdeğiştirme modlarını içermektedir [60]. Bu hareketle ilgili potansiyel enerji,

$$\pi_s = \frac{1}{2} \int \rho g v_{fs}^2 dA \quad (8)$$

ifadesiyle verilebilir. Bu bağıntıda, ρ sıvının kütle yoğunluğunu, g yerçekimi ivmesini ve v_{fs} ise sıvı serbest yüzey düşey yerdeğiştirmesini göstermektedir. Denklem (7) ve denklem (8) kullanılarak sıvı sisteminin toplam potansiyel enerjisi,

$$\pi_t = \pi_e + \pi_s \quad (9)$$

şeklinde yazılabilir. Sıvının dinamik davranışı düşünüldüğünden kinetik enerjisinin de verilmesi gerekir. Bu enerji,

$$T = \frac{1}{2} \int \rho (v_{fy}^2 + v_{fz}^2) dV \quad (10)$$

ifadesiyle hesaplanabilir. Burada, v_{fy} ve v_{fz} sırasıyla y ve z eksenleri doğrultusundaki hız bileşenleridir.

2.2.2. Sıvı Sistemlerinin Sonlu Eleman Formülasyonu

Bu çalışmada, sıvı sistemlerinin sonlu eleman matrisleri izoparametrik sonlu eleman formülasyonu kullanılarak elde edilmektedir. İzoparametrik sonlu eleman formülasyonunun

özelliği, eleman koordinat ve yerdeğiştirmelerinin aynı enterpolasyon fonksiyonları kullanılarak elde edilmesidir. İzoparametrik formülasyonda genel (global) ve doğal (natural) olmak üzere iki eksen takımı kullanılmaktadır. İki boyutlu durumda; genel eksen takımı (y,z) kartezyen eksen takımından, doğal eksen takımı ise (r,s) boyutsuz eksen takımından oluşmaktadır. Sonlu eleman düğüm noktası koordinatları genel eksen takımında tanımlanmaktadır. Bunlar,

$$\begin{aligned} y &= \sum_{i=1}^q h_i y_i^e \\ z &= \sum_{i=1}^q h_i z_i^e \end{aligned} \quad (11)$$

bağıntıları yardımıyla doğal koordinatlar cinsinden ifade edilebilir. Burada y, z sonlu elemanın herhangi bir noktasındaki koordinatları, y_i^e ve z_i^e ise q düğüm noktalı elemanın düğüm noktası koordinatlarını göstermektedir. h_i enterpolasyon fonksiyonları (şekil fonksiyonları), her bir değişkeni -1 ve +1 arasında değişen (r,s) doğal koordinat sisteminde tanımlanmaktadır. Değişken düğüm noktalı bir ve iki boyutlu sonlu elemanlar için enterpolasyon fonksiyonları, sırasıyla Şekil 1 ve Şekil 2 'de verilmektedir. Eleman düğüm noktası sayısına bağlı olarak enterpolasyon fonksiyonlarının sayısı değişmektedir. Örneğin, 4 düğüm noktalı eleman kullanılıyorsa Şekil 2a 'daki 4 'ten büyük numaralı enterpolasyon fonksiyonlarının değeri sıfır olmaktadır.

İzoparametrik sonlu eleman formülasyonunda hem eleman koordinat ve hem de eleman yerdeğiştirmeleri aynı enterpolasyon fonksiyonları kullanılarak elde edilmektedir. Dolayısıyla, iki boyutlu bir sıvı elemanın herhangi bir noktasındaki y ve z koordinat eksenleri doğrultusundaki yerdeğiştirme bileşenleri (v_{fy}, v_{fz}) enterpolasyon fonksiyonları cinsinden

$$\begin{aligned} v_{fy} &= \sum_{i=1}^q h_i v_{fyi}^e \\ v_{fz} &= \sum_{i=1}^q h_i v_{fzi}^e \end{aligned} \quad (12)$$

şeklinde tanımlanabilir [39]. Burada v_{fyi}^e ve v_{fzi}^e sıvı elemanın i. düğüm noktasının y ve z eksenleri doğrultusundaki yerdeğiştirme bileşenlerini göstermektedir.

Denklem (12), denklem (2) ve denklem (3) 'te kullanılırsa

$$\epsilon_v^e = \frac{\partial h^T}{\partial y} v_{fy}^e + \frac{\partial h^T}{\partial z} v_{fz}^e \quad (13)$$

$$w^e = \frac{1}{2} \left(\frac{\partial h^T}{\partial z} v_{fy}^e - \frac{\partial h^T}{\partial y} v_{fz}^e \right) \quad (14)$$

denklemleri elde edilir. Burada h enterpolasyon fonksiyonları vektörünü , v_{fy}^e ve v_{fz}^e ise sırasıyla y ve z eksenleri doğrultusundaki eleman düğüm noktası yerdeğiştirme vektörlerini temsil etmektedir. Denklem (13) ve (14) matris formunda

$$e^e = B^e v_f^e \quad (15)$$

şeklinde yazılabilir. Bu ifadede B^e sıvı elemanın şekildeğiştirme-yerdeğiştirme matrisini göstermekte ve

$$B^e = \begin{bmatrix} \frac{\partial h^T}{\partial y} & \frac{\partial h^T}{\partial z} \\ \frac{1}{2} \frac{\partial h^T}{\partial z} & -\frac{1}{2} \frac{\partial h^T}{\partial y} \end{bmatrix} \quad (16)$$

ifadesiyle hesaplanmaktadır.

Enterpolasyon fonksiyonları r ve s koordinatlarında tanımlandığından, söz konusu fonksiyonların y ve z koordinatlarına göre türevlerini hesaplamak için

$$\begin{aligned} \frac{\partial}{\partial r} &= \frac{\partial}{\partial y} \frac{\partial y}{\partial r} + \frac{\partial}{\partial z} \frac{\partial z}{\partial r} \\ \frac{\partial}{\partial s} &= \frac{\partial}{\partial y} \frac{\partial y}{\partial s} + \frac{\partial}{\partial z} \frac{\partial z}{\partial s} \end{aligned} \quad (17)$$

ifadesiyle verilen zincir kuralı türevden faydalanılır [58]. Denklem (17) matris formunda yazılırsa,

$$\begin{bmatrix} \frac{\partial}{\partial r} \\ \frac{\partial}{\partial s} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{\partial y}{\partial r} & \frac{\partial z}{\partial r} \\ \frac{\partial y}{\partial s} & \frac{\partial z}{\partial s} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \frac{\partial}{\partial y} \\ \frac{\partial}{\partial z} \end{bmatrix} \quad (18)$$

veya

$$\begin{bmatrix} \frac{\partial}{\partial r} \\ \frac{\partial}{\partial s} \end{bmatrix} = \mathbf{J} \begin{bmatrix} \frac{\partial}{\partial y} \\ \frac{\partial}{\partial z} \end{bmatrix} \quad (19)$$

ifadesi elde edilir. Burada \mathbf{J} Jacobian operatörünü göstermektedir. Denklem (19) aşağıdaki formda yeniden yazılabilir.

$$\begin{bmatrix} \frac{\partial}{\partial y} \\ \frac{\partial}{\partial z} \end{bmatrix} = \mathbf{J}^{-1} \begin{bmatrix} \frac{\partial}{\partial r} \\ \frac{\partial}{\partial s} \end{bmatrix} \quad (20)$$

Denklem (16)'daki gerekli türevler, denklem (20) dikkate alınarak kolaylıkla hesaplanabilir. Bu durumda sıvı sisteminin toplam şekildeğiştirme enerjisi, denklem (15)'in denklem (7)'de yerine yazılmasıyla

$$\pi_s = \frac{1}{2} \mathbf{v}_f^T \mathbf{K}_f \mathbf{v}_f \quad (21)$$

şeklinde elde edilebilir. Burada \mathbf{v}_f sıvı sisteminin düğüm noktası yerdeğiştirme vektörünü,

$\mathbf{K}_f = \sum \mathbf{K}_f^e$ sıvı sistemin rijitlik matrisini göstermektedir. Eleman rijitlik matrisi olan \mathbf{K}_f^e

$$\mathbf{K}_f^e = \int_V \mathbf{B}^{eT} \mathbf{C}_f \mathbf{B}^e dV \quad (22)$$

bağıntısıyla hesaplanmaktadır.

Yüzey salınımlarından dolayı oluşan potansiyel enerji, denklem (8),

$$\pi_s = \frac{1}{2} \mathbf{v}_{fs}^T \mathbf{S}_f \mathbf{v}_{fs} \quad (23)$$

şeklinde yazılabilir. Bu ifadede v_{fs} sıvı serbest yüzey düğüm noktası düşey yerdeğiştirme vektörünü, $S_f = \sum S_f^e$ sıvı sistemi serbest yüzey rijitlik matrisini göstermektedir. Eleman serbest yüzey rijitlik matrisi S_f^e ,

$$S_f^e = \int_A h_s \rho g h_s^T dA \quad (24)$$

bağıntısıyla hesaplanmaktadır. Bu bağıntıdaki h_s , Şekil 1 'de verilen bir boyutlu yüzey elemanın enterpolasyon fonksiyonlarından oluşan vektörü temsil etmektedir. Aynı şekilde sistemin kinetik enerjisi, denklem (10),

$$T = \frac{1}{2} \dot{v}_f^T M_f \dot{v}_f \quad (25)$$

şeklinde ifade edilebilir. Bu ifadede \dot{v}_f düğüm noktası hız vektörünü, $M_f = \sum M_f^e$ sıvı sisteminin kütle matrisini göstermektedir. Eleman kütle matrisi M_f^e ,

$$M_f^e = \int_V H^T \rho H dV \quad (26)$$

bağıntısıyla hesaplanmaktadır. Burada H enterpolasyon fonksiyonları matrisini göstermekte ve

$$H = \begin{bmatrix} h^T & 0^T \\ 0^T & h^T \end{bmatrix} \quad (27)$$

bağıntısı kullanılarak elde edilmektedir. (27) bağıntısında h , enterpolasyon fonksiyonları vektörünü, T ise ilgili vektörlerin transpozisini göstermektedir.

Sonlu elemanlar yöntemi kullanılarak elde edilen enerji bağıntılarından sıvı sisteminin hareket denklemlerine geçiş yapmak için,

$$\frac{\partial}{\partial t} \left(\frac{\partial T}{\partial \dot{q}_i} \right) - \frac{\partial T}{\partial q_i} + \frac{\partial \pi_i}{\partial q_i} = Q_i \quad (i = 1, 2, \dots, n) \quad (28)$$

ifadesiyle verilen Lagrange denklemi kullanılmaktadır [101]. Bu ifadede q_i ve Q_i sırasıyla i. genelleştirilmiş koordinatı ve kuvveti göstermektedir. Denklem (21), denklem (23) ve denklem (25) 'in Lagrange denkleminde kullanılmasıyla sıvı sisteminin hareket denklemi

$$\mathbf{M}_f \ddot{\mathbf{v}}_f + \mathbf{K}_f \mathbf{v}_f + \mathbf{S}_f \mathbf{v}_{fs} = \mathbf{F}_f \quad (29)$$

veya

$$\mathbf{M}_f \ddot{\mathbf{v}}_f + \mathbf{K}_f^* \mathbf{v}_f = \mathbf{F}_f \quad (30)$$

şeklinde elde edilmektedir. Denklem (30) 'daki \mathbf{K}_f^* sıvı serbest yüzey rijitliklerini de içeren sıvı sistemi rijitlik matrisini, \mathbf{F}_f ise zamanla değişen kuvvet vektörünü göstermektedir.

Denklem (22), denklem (24) ve denklem (26) ile tanımlanan sıvı eleman matrislerinin hesaplanması, alan ve hacim üzerinde alınacak integralleri gerektirir. Söz konusu integrallerin hesaplanması için bir çok sayısal integrasyon tekniği geliştirilmiştir. Bu çalışmada, integrasyon tekniklerinin en yaygın olanlarından biri olan Gauss integrasyon tekniği kullanılmaktadır [102]. Gauss integrasyon tekniğinde integral; eleman içinde Gauss noktaları adı verilen belirli noktalarda elde edilen bir ağırlıklı toplama eşdeğer alınmaktadır. Bu integrasyon tekniği kullanılarak eleman rijitlik ve kütle matrisi, denklem (22) ve denklem (26),

$$\mathbf{K}_f^e = \sum_i \sum_j W_i W_j \mathbf{B}^{eT}(r_i, s_j) \mathbf{C}_f^e \mathbf{B}^e(r_i, s_j) t_{ij}^e \det \mathbf{J}_{ij}^e \quad (31)$$

$$\mathbf{M}_f^e = \rho \sum_i \sum_j W_i W_j \mathbf{H}^T(r_i, s_j) \mathbf{H}(r_i, s_j) t_{ij}^e \det \mathbf{J}_{ij}^e \quad (32)$$

şeklinde hesaplanmaktadır. Burada W_i ve W_j ağırlık çarpanlarını; (r_i, s_j) doğal koordinatlardaki integrasyon noktalarını, t_{ij}^e o noktalardaki eleman kalınlığını ve $\det \mathbf{J}_{ij}^e$ ise o noktalardaki Jacobian operatörünün determinantını göstermektedir. Sıvı yüzey rijitlik matrisi,

sıvı serbest yüzeyinde bulunan elemanların sadece serbest yüzeyi üzerinde hesaplanmalıdır. İki boyutlu durumda serbest yüzey bir boyutlu yüzey elemanı olarak göz önüne alındığından, sıvı serbest yüzey rijitlik matrisi, denklem (24),

$$\mathbf{S}_f^e = \rho g \sum_i W_i \mathbf{h}_s(r_i) \mathbf{h}_s^T(r_i) t_i^e \det \mathbf{J}_i^e \quad (33)$$

bağıntısıyla hesaplanmaktadır.

Sıvı eleman matrislerinin hesaplanmasında Wilson ve Khalvati [50] tarafından önerilen indirgenmiş integrasyon mertebeleri kullanılmaktadır. Çeşitli eleman tipleri için indirgenmiş ve normal integrasyon mertebeleri Tablo 1 'de verilmektedir. Eğer sıvı eleman matrisleri katı elemanlarda olduğu gibi normal integrasyon mertebeleri kullanılarak hesaplanırsa, sistemin sonlu eleman yerdeğiştirme çözümleri bir alt sınır çözümü vermektedir [50]. Bunun yanında, normal integrasyon mertebelerinin kullanımı, düşük frekanslı yüzey salınım modlarının yok olmasına da sebep olmaktadır.

2.3. Asinkronize Yer Hareketi Etkisindeki Sıvı-Yapı Sistemlerinin Ortak Formülasyonu

Sıvı-yapı sistemlerinin ortak formülasyonuna başlamadan önce, sinkronize (üniform veya eşzamanlı) ve asinkronize (üniform olmayan veya eşzamanlı olmayan) mesnet hareketleri arasındaki farkı matematiksel terimleri kullanmadan basit bir sistem üzerinde açıklamak yararlı olacaktır. İlk olarak, düşey düzlemde ankastre mesnetli tek katlı ve tek açıklıklı bir çerçeve dikkate alınmakta ve çerçevenin her iki mesnetinin aynı anda aynı yatay yer hareketine maruz kaldığı düşünülmektedir. Mesnet noktalarına uygulanan yer hareketinden dolayı çerçevenin herhangi bir noktasında oluşan toplam yerdeğiştirme iki bileşenden ibaret olacaktır. Toplam yerdeğiştirmeyi oluşturan bileşenlerden biri mesnet noktalarının hareketinden meydana gelmekte ve çerçevenin tüm noktalarında aynı olmaktadır. Söz konusu bileşenden dolayı çerçevenin yapmış olduğu hareket, rijit cisim hareketi olarak isimlendirilmektedir. İkinci bileşen ise kütlelerin etkisi ile meydana gelen dinamik (rölatif) yerdeğiştirmelerdir. Rijit cisim hareketi, mesnet noktalarına uygulanan yer ivmesinin iki kez integrasyonu ile hesaplanabilir. Fakat, rijit cisim

hareketi çerçevede herhangi bir iç etki oluşturmaz. Dolayısıyla, klasik dinamik analizde bu bileşen toplam yerdeğiştirmeden çıkartılmakta ve sadece dinamik yerdeğiştirme dikkate alınmaktadır. Çerçevenin iki mesnet noktasına farklı varış zamanlı ivme kayıtları uygulandığında ise, yani asinkronize mesnet hareketi durumunda, mesnet noktalarının hareketinden oluşan yerdeğiştirme bileşeni çerçevenin her noktasında aynı olmayacaktır. Çünkü, yer hareketinin sonlu hızla yayılması mesnet noktalarının birbirlerine göre rölatif hareket yapmasına neden olacaktır. Bu hareket ise, çerçevede eğilme momentleri ve kesme kuvvetleri oluşturacaktır. Dolayısıyla, asinkronize yer hareketi dikkate alındığında, toplam yerdeğiştirmeler hesaba katılmalıdır. Şimdi, buraya kadar anlatılanlar sıvı-yapı sistemleri için matematiksel terimler cinsinden ifade edilecektir. Lagrange yaklaşımı kullanılarak sıvı sistemleri için elde edilen hareket denklemi, denklem (30), yapı sisteminin hareket denklemiyle aynı formda olmaktadır. Bu nedenle, sıvı-yapı sistemine ait hareket denklemleri her iki sistemin denklemlerinin direkt birleştirilmesiyle elde edilebilir. Ancak, ortak sistemin arayüzey şartının sağlatılması gerekir. Sıvı-yapı sisteminin arayüzeyinde sadece arayüzeye dik yerdeğiştirmeler sürekli olmaktadır. Bu şart kısıtlama denklemleriyle sağlanmaktadır. Arayüzey şartları dikkate alınarak, sıvı-yapı sisteminin yer hareketi altındaki sönümlü hale ait ortak hareket denklemi,

$$M\ddot{\mathbf{v}} + C\dot{\mathbf{v}} + K\mathbf{v} = \mathbf{F} \quad (34)$$

şeklinde yazılabilir. Burada M , C ve K sırasıyla ortak sistemin kütle, sönüm ve rijitlik matrislerini; $\ddot{\mathbf{v}}$, $\dot{\mathbf{v}}$ ve \mathbf{v} toplam ivme, hız ve yerdeğiştirme vektörlerini ve \mathbf{F} ise dış kuvvet vektörünü göstermektedir. Ortak sistemin hareket denkleminde sisteme direkt olarak uygulanan dış kuvvet olmadığından, \mathbf{F} sıfır vektörüdür.

Sıvı-yapı sistemi bir sonlu eleman modeliyle temsil edildiğinden, ortak sistem sonlu sayıda serbestlik derecesine sahiptir. Bu serbestlik derecelerini bilinen ve bilinmeyen diye iki gruba ayırmak mümkündür. Bilinen serbestlik dereceleri yer hareketinin bilindiği yapı-zemin yüzeyi ile ilgili serbestlik derecelerinin ivme, hız ve yerdeğiştirmeleridir. Yapı-zemin yüzeyi serbestlik derecelerinin ivmesi zamanın fonksiyonu olarak verilmektedir. Buna karşılık gelen hız ve yerdeğiştirmeler ise ivmenin sayısal integrasyonu ile elde edilebilir. Bilinmeyen serbestlik dereceleri sıvı-yapı sisteminin diğer noktaları ile ilgili serbestlik derecelerinin ivme, hız ve yerdeğiştirmeleridir. Denklem (34) teki bilinen ve bilinmeyen serbestlik derecelerini birbirinden ayırmak için, bilinen serbestlik dereceleri \mathbf{v}_g , bilinmeyen serbestlik dereceleri ise \mathbf{v}_r vektörleri

ile gösterilecektir. Bu ifadelerdeki g alt indisi Bilinen Zemin Serbestlik Derecelerini (BZSD), r alt indisi ise sistemin bilinmeyen Diğer Serbestlik Derecelerini (DSD) göstermektedir. Denklem (34), DSD ve BZSD cinsinden alt kısımlara bölünerek

$$\begin{bmatrix} \mathbf{M}_{rr} & \mathbf{M}_{rg} \\ \mathbf{M}_{gr} & \mathbf{M}_{gg} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \dot{\mathbf{v}}_r \\ \dot{\mathbf{v}}_g \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \mathbf{C}_{rr} & \mathbf{C}_{rg} \\ \mathbf{C}_{gr} & \mathbf{C}_{gg} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \dot{\mathbf{v}}_r \\ \dot{\mathbf{v}}_g \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \mathbf{K}_{rr} & \mathbf{K}_{rg} \\ \mathbf{K}_{gr} & \mathbf{K}_{gg} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \mathbf{v}_r \\ \mathbf{v}_g \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \mathbf{0} \\ \mathbf{0} \end{bmatrix} \quad (35)$$

formunda yazılabilir [74]. Burada \mathbf{M}_{rr} , \mathbf{C}_{rr} ve \mathbf{K}_{rr} DSD ile ilgili sırasıyla kütle, sönüm ve rijitlik matrislerini göstermektedir. \mathbf{M}_{rg} , \mathbf{C}_{rg} ve \mathbf{K}_{rg} her BZSD 'nin birim hareketinden dolayı DSD 'de meydana gelen kuvvetleri; \mathbf{M}_{gg} , \mathbf{C}_{gg} ve \mathbf{K}_{gg} ise her BZSD 'nin birim hareketinden dolayı BZSD 'de meydana gelen kuvvetleri ifade etmektedir. \mathbf{M}_{gr} , \mathbf{C}_{gr} ve \mathbf{K}_{gr} ise sırasıyla \mathbf{M}_{rg} , \mathbf{C}_{rg} ve \mathbf{K}_{rg} ifadelerinin transpozelerine karşılık gelmektedir. $\dot{\mathbf{v}}_r$, $\dot{\mathbf{v}}_r$ ve \mathbf{v}_r sırasıyla DSD 'nin toplam ivme, hız ve yerdeğiştirme vektörlerini; $\dot{\mathbf{v}}_g$, $\dot{\mathbf{v}}_g$ ve \mathbf{v}_g ise BZSD 'nin toplam ivme, hız ve yerdeğiştirme vektörlerini göstermektedir. Denklem (35) 'ten DSD denklemlerine karşılık gelen ilk satır çıkartılıp bilinenler sağ tarafta toplanırsa,

$$\mathbf{M}_{rr}\dot{\mathbf{v}}_r + \mathbf{C}_{rr}\dot{\mathbf{v}}_r + \mathbf{K}_{rr}\mathbf{v}_r = -\mathbf{M}_{rg}\dot{\mathbf{v}}_g - \mathbf{C}_{rg}\dot{\mathbf{v}}_g - \mathbf{K}_{rg}\mathbf{v}_g \quad (36)$$

ifadesi elde edilir. Denklem (36) 'nın sağ tarafında deprem etkisi; ivme, hız ve yerdeğiştirmeler cinsinden ifade edilmektedir. Söz konusu denklemi daha basit hale getirmek için, toplam yerdeğiştirme \mathbf{v}_r iki bileşenin toplamı olarak yazılabilir. Bunlardan biri, BZSD 'nin asinkronize hareketinden diğeri ise atalet kuvvetlerinin etkisinden kaynaklanmaktadır. Atalet kuvvetleri düğüm noktaları ivme ve kütlelerinin çarpımından ibaret olduğu için, ikinci yerdeğiştirme bileşeni dinamik olarak tanımlanıp \mathbf{v}_d ile gösterilecektir. Birinci yerdeğiştirme bileşeni üniform (sinkronize) yer hareketi durumunda rijit cisim hareketi olarak oluştuğundan ve yapıda iç kuvvet meydana getirmediğinden hareket denklemlerinden çıkartılmaktadır. Fakat, asinkronize yer hareketi durumunda farklı serbestlik derecelerinde farklı yerdeğiştirmeler gözlenecek ve bundan dolayı iç kuvvetler oluşacaktır. Bu yerdeğiştirmelerin hesaplanmasında

kütlenin etkisi dikkate alınmadığından, söz konusu yerdeğiştirmeler zahiri-statik (quasi-static) olarak isimlendirilmekte ve \mathbf{v}_g ile gösterilmektedir. Yukarıdaki açıklamalardan sonra denklem (35) 'teki yerdeğiştirme vektörleri

$$\begin{bmatrix} \mathbf{v}_r \\ \mathbf{v}_g \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \mathbf{v}_{sr} \\ \mathbf{v}_{sg} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \mathbf{v}_{dr} \\ \mathbf{v}_{dg} \end{bmatrix} \quad (37)$$

şeklinde yazılabilir [74]. Burada \mathbf{v}_{dg} sıfır, \mathbf{v}_{sg} ise \mathbf{v}_g 'ye eşittir. \mathbf{v}_{sr} ve \mathbf{v}_{dr} sırasıyla zahiri-statik (quasi-static) ve dinamik yerdeğiştirmeleri göstermektedir. Denklem (37) denklem (36) 'da yerine yazılıp zahiri-statik bileşenlerle ilgili terimler sağ tarafa atılırsa

$$\mathbf{M}_{rr} \dot{\mathbf{v}}_{dr} + \mathbf{C}_{rr} \dot{\mathbf{v}}_{dr} + \mathbf{K}_{rr} \mathbf{v}_{dr} = \mathbf{F}_{eff} \quad (38)$$

ifadesi elde edilir. Bu ifadede, \mathbf{F}_{eff} DSD 'ni etkileyen etkili kuvvet vektörünü göstermekte ve

$$- [\mathbf{M}_{rr} \quad \mathbf{M}_{rg}] \begin{bmatrix} \dot{\mathbf{v}}_{sr} \\ \dot{\mathbf{v}}_{sg} \end{bmatrix} - [\mathbf{C}_{rr} \quad \mathbf{C}_{rg}] \begin{bmatrix} \dot{\mathbf{v}}_{sr} \\ \dot{\mathbf{v}}_{sg} \end{bmatrix} - [\mathbf{K}_{rr} \quad \mathbf{K}_{rg}] \begin{bmatrix} \mathbf{v}_{sr} \\ \mathbf{v}_{sg} \end{bmatrix} \quad (39)$$

bağıntısıyla hesaplanmaktadır. Dinamik denge denklemleri statik denge denklemlerini içerdiğinden, etkili kuvvet ifadesi, denklem (39), önemli derecede basitleştirilebilir. şöyleki, eğer denklem (38) ve denklem (39) 'dan zamana bağlı terimler (dinamik terimler) çıkartılırsa, sadece denklem (39) 'ın son terimi kalmakta ve bu terim de sifıra eşit olmaktadır. Böylece etkili kuvvet ifadesi, denklem (39),

$$\mathbf{F}_{eff} = - [\mathbf{M}_{rr} \quad \mathbf{M}_{rg}] \begin{bmatrix} \dot{\mathbf{v}}_{sr} \\ \dot{\mathbf{v}}_{sg} \end{bmatrix} - [\mathbf{C}_{rr} \quad \mathbf{C}_{rg}] \begin{bmatrix} \dot{\mathbf{v}}_{sr} \\ \dot{\mathbf{v}}_{sg} \end{bmatrix} \quad (40)$$

şeklinde yazılabilir. Sönüm matrisi rijitlik matrisi ile orantılı ise denklem (40) 'ın sönümle ilgili terimleri sıfır olmaktadır [101]. Sönümün rijitlikle orantılı olmaması durumunda bile sönüm kuvvetleri, rijitlik ve atalet kuvvetleri ile karşılaştırıldığında çok küçük kalmakta ve ihmal

edilebilmektedir [101]. Yukarıdaki açıklamalardan sonra denklem (40) tekrar düzenlenirse

$$\mathbf{F}_{eff} = - [\mathbf{M}_{rr} \quad \mathbf{M}_{rg}] \begin{bmatrix} \dot{\mathbf{v}}_{sr} \\ \dot{\mathbf{v}}_{sg} \end{bmatrix} \quad (41)$$

ifadesi elde edilmektedir. Denklem (41) 'deki $\dot{\mathbf{v}}_{sg}$, BZSD 'ne uygulanan ivmeleri gösterdiğinden bilinmekte; $\dot{\mathbf{v}}_{sr}$ ise bilinmemektedir. Daha önce belirtildiği gibi, denklem (39) 'un son terimi sıfıra eşit olduğundan

$$\mathbf{K}_{rr} \mathbf{v}_{sr} = -\mathbf{K}_{rg} \mathbf{v}_{sg} \quad (42)$$

şeklinde yazılabilir. Bu ifadeden \mathbf{v}_{sr} ,

$$\mathbf{v}_{sr} = -\mathbf{K}_{rr}^{-1} \mathbf{K}_{rg} \mathbf{v}_{sg} = -\mathbf{R}_{rg} \mathbf{v}_{sg} \quad (43)$$

olarak belirlenebilir. Burada \mathbf{R}_{rg} ; \mathbf{K}_{rr}^{-1} ve \mathbf{K}_{rg} alt matrislerinin çarpımını göstermektedir.

Denklem (43) 'ten yararlanılarak $\dot{\mathbf{v}}_{sr}$ türevle bulunabilmektedir. Denklem (43), denklem (41)

'de yerine konursa \mathbf{F}_{eff}

$$\mathbf{F}_{eff} = - [\mathbf{M}_{rr} \mathbf{R}_{rg} + \mathbf{M}_{rg}] [\dot{\mathbf{v}}_{sg}] \quad (44)$$

şeklinde elde edilir. Bir çok durumlarda \mathbf{M}_{rg} matrisinin sıfırdan farklı terimleri çok azdır.

Dolayısıyla, depremden dolayı meydana gelen etkili kuvvet vektörüne katkısı çok az olacağından ihmal edilebilir [101]. Özellikle diyagonal kütle matrisler için \mathbf{M}_{rg} matrisi sıfır

olmaktadır. Yukarıdaki açıklamalardan sonra denklem (38) tekrar düzenlenirse

$$\mathbf{M}_{rr} \ddot{\mathbf{v}}_{dr} + \mathbf{C}_{rr} \dot{\mathbf{v}}_{dr} + \mathbf{K}_{rr} \mathbf{v}_{dr} = -\mathbf{M}_{rr} \mathbf{R}_{rg} \ddot{\mathbf{v}}_{sg} \quad (45)$$

şeklinde yazılabilir. Asinkronize yer hareketi durumunda DSD 'nin \mathbf{v}_{dr} dinamik yerdeğiştirme

bileşenlerinin bulunmasında kullanılan (45) ifadesi, klasik dinamik analiz için de geçerlidir. Şöyleki, BZSD 'nin tümünde aynı ivme kullanıldığında \dot{v}_{sg} tekil bir terim olup, R_{rg} ise sıfır ve birlerden oluşan bir vektördür. Söz konusu vektör klasik dinamik analizde doğrultu vektörü olarak isimlendirilmektedir. Asinkronize yer hareketi durumunda ise R_{rg} , r vektörlerinden oluşan bir matristir. r vektörü, zahiri-statik etki katsayısı vektörü (quasi-static influence coefficient vector) veya zemin yerdeğıştirmelerinin şekil vektörü (ground-displacement shape vector) diye isimlendirilmektedir [101]. r vektörleri, BZSD 'nin birine yatay veya düşey yönde birim yerdeğıştirme verilip diğeri tüm BZSD tutulmak suretiyle yapının almış olduğı şekli gösterir. Yer hareketinin etkidiğı her mesnet noktası için r vektörleri hesaplanabilir. Fakat, bu işlem mesnet sayısı az olan sistemler için problem oluşturmazken, barajlar gibi etkileşim yüzeyi büyük yapılarda çok fazla bilgisayar zaman kaybına neden olmaktadır. Bunun için, Şekil 3 'te görüldüğü gibi baraj tabanı bölgelere ayrılmakta ve her bir bölgedeki mesnet noktalarına birim yerdeğıştirme verilip diğeri bölgelerdekiler sabit tutulmak suretiyle r vektörleri elde edilmektedir.

r vektörleri, sistem rijitlik matrisindeki K_{rr}^{-1} ve K_{rg} alt matrislerinin çarpımından direkt olarak hesaplanabilir. Fakat, K_{rr} ve K_{rg} alt matrislerinin elde edilmesi için sistem rijitlik matrisini alt matrislere ayıran programlar gerekmektedir. Bunun yerine, r vektörü tanımından hareketle, sistem rijitlik matrisini alt kısımlara ayırmaktan kaçınılabılır. Bu işlem için ceza (penalty) metodu [58] kullanılmaktadır. Şöyleki, sistem rijitlik matrisinde r vektörünün hesaplanacağı BZSD 'ne karşılık gelen diyagonal terime büyük bir rijitlik eklenmekte ve bu rijitlik değerine eşdeğeri bir yük söz konusu serbestlik derecesine uygulanarak statik analiz yapılmaktadır. Böylece, BZSD 'deki yerdeğıştirme seçilen rijitliğin artırılmasıyla birim değeri yaklaşmaktadır. Her bir BZSD veya bölge için hesaplanan r vektörlerinin sistemin her düğüm noktasındaki toplamı yer hareketi yönünde birim olmalıdır [16]. Aksi halde analizlerden elde edilen sonuçlar yanlış olacaktır.

Denklem (45) teki \dot{v}_{sg} ise her BZSD 'ne uygulanan ivme vektörünü göstermektedir. Şekil 3 'te asinkronize yer hareketi durumunda böyle bir ivme kaydının baraj-rezervuar-temel sisteminde bölgelere uygulanışı görülmektedir. Bölgelere sonlu hızla yayılan aynı ivme kaydı veya farklı ivme kayıtları uygulanabilir.

Denklem (45) 'in çözümü, standart sayısal analiz işlemlerinden olan direkt sayısal integrasyon veya modların süperpozisyonu yaklaşımıyla bulunabilir. Burada, modların süperpozisyonu yöntemi kullanılmaktadır. Açısal frekans ω_i ve mod vektörleri ϕ_i ,

$$\mathbf{M}_{rr} \ddot{\mathbf{v}}_{dr} + \mathbf{K}_{rr} \mathbf{v}_{dr} = \mathbf{0} \quad (46)$$

ifadesiyle verilen sönümsüz serbest titreşim denklemlerinden elde edilmektedir. Analizlerde dikkate alınacak mod sayısı yapı tipine göre değişmektedir. Binalar için üç mod yeterli olurken, barajlar için boş baraj dikkate alındığında beş veya altı mod [1, 103] yeterli olmaktadır. Fakat, Lagrange yaklaşımı ile baraj-rezervuar-temel sistemlerinin analizlerinde mod sayısı kullanılan modele göre değişmektedir. Bu nedenle burada belirli bir sayı verilmeyecek, fakat Bölüm 4 'te ayrıntılı bilgi verilecektir.

DSD 'nin dinamik yerdeğiştirme bileşeni, \mathbf{v}_{dr} ,

$$\mathbf{v}_{dr} = \sum_i \phi_i Y_i(t) \quad (47)$$

bağıntısıyla hesaplanmaktadır. Denklem (47) 'de $Y_i(t)$ zamana bağlı i . modal genliği göstermektedir. Denklem (47), denklem (45) 'te yerine konur ve gerekli düzenlemeler yapılırsa

$$\ddot{Y}_i(t) + 2\xi\omega_i\dot{Y}_i(t) + \omega_i^2 Y_i(t) = \left[-\frac{\phi_i^T \mathbf{M}_{rr}}{\phi_i^T \mathbf{M}_{rr} \phi_i} \right] [r_1 \dot{v}_{1g}(\tau_1, t) + r_2 \dot{v}_{2g}(\tau_2, t) + \dots] \quad (48)$$

bağıntısı elde edilmektedir. Burada ξ sönüm oranını göstermekte ve titreşimin tüm modları için aynı alınmaktadır. τ_i ise yer hareketinin belirli bir referans noktasından başlayıp i . mesnet noktasına veya bölgeye varış zamanını göstermektedir. Yer hareketinin mesnet noktalarına veya bölgelere varış zamanı τ , deprem dalgası yayılma hızına ve belirli bir referans noktasından itibaren uzaklığa bağlıdır. Denklem (48) 'in sağ tarafında \mathbf{r} vektörü sayısı kadar terim olacaktır. (48) ifadesindeki $Y_i(t)$, sayısal integrasyon tekniklerinden Wilson- θ metodu [58] kullanılarak her mod için hesaplanmaktadır.

DSD 'nin toplam yerdeğiştirmesinin zahiri-statik bileşeni, \mathbf{v}_{sr} ,

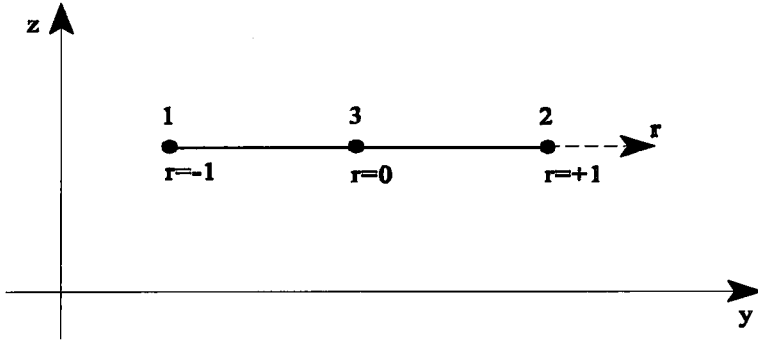
$$\mathbf{v}_{sr} = r_1 \mathbf{v}_{1g}(\tau_1, t) + r_2 \mathbf{v}_{2g}(\tau_2, t) + \dots \quad (49)$$

bağıntısıyla hesaplanmaktadır. Burada \mathbf{v}_{ig} , yer hareketi ivme kayıtlarının yerdeğiştirmelerini göstermekte ve ivme kayıtlarının iki kez integrasyonu ile bulunmaktadır. Yer hareketi yerdeğiştirmelerinin, ivme kayıtlarından elde edildişi Bölüm 3 'te ayrıntılı olarak verilecektir. Denklem (49) 'un sağ tarafında yine r vektörü sayısı kadar terim vardır.

Gerilmelerin hesabında kullanılan toplam yerdeğiştirmeler, \mathbf{v}_r , ise

$$\mathbf{v}_r = \mathbf{v}_{sr} + \mathbf{v}_{dr} \quad (50)$$

bağıntısıyla hesaplanmaktadır. Yerdeğiştirmeler yer ivmesi kaydının her zaman adımında hesaplanırken, gerilmeler istenilen zaman aralıklarında hesaplanmaktadır.



a) 2/3 değişken düğüm noktalı bir boyutlu sonlu eleman

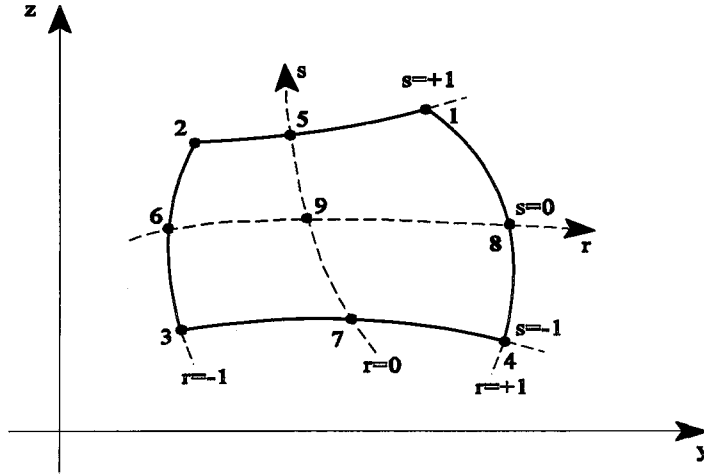
$$h_1 = \frac{1}{2}(1-r) - \frac{1}{2}(1-r^2)$$

$$h_2 = \frac{1}{2}(1+r) - \frac{1}{2}(1-r^2)$$

$$h_3 = \frac{1}{2}(1-r^2)$$

b) Enterpolasyon fonksiyonları

Şekil 1 : Bir boyutlu sonlu eleman ve enterpolasyon fonksiyonları [58].



a) 4/9 değişken düğüm noktalı iki boyutlu sonlu eleman

$$h_1 = \frac{1}{4}(1+r)(1+s) - \frac{1}{2}h_5 - \frac{1}{2}h_8 - \frac{1}{4}h_9$$

$$h_2 = \frac{1}{4}(1-r)(1+s) - \frac{1}{2}h_5 - \frac{1}{2}h_6 - \frac{1}{4}h_9$$

$$h_3 = \frac{1}{4}(1-r)(1-s) - \frac{1}{2}h_6 - \frac{1}{2}h_7 - \frac{1}{4}h_9$$

$$h_4 = \frac{1}{4}(1+r)(1-s) - \frac{1}{2}h_7 - \frac{1}{2}h_8 - \frac{1}{4}h_9$$

$$h_5 = \frac{1}{2}(1-r^2)(1+s) - \frac{1}{2}h_9$$

$$h_6 = \frac{1}{2}(1-s^2)(1-r) - \frac{1}{2}h_9$$

$$h_7 = \frac{1}{2}(1-r^2)(1-s) - \frac{1}{2}h_9$$

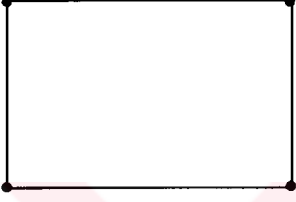
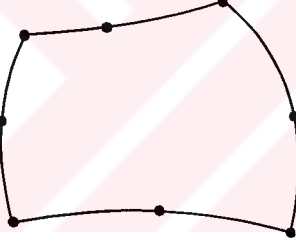
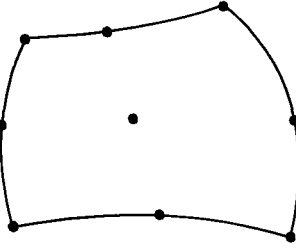
$$h_8 = \frac{1}{2}(1-s^2)(1+r) - \frac{1}{2}h_9$$

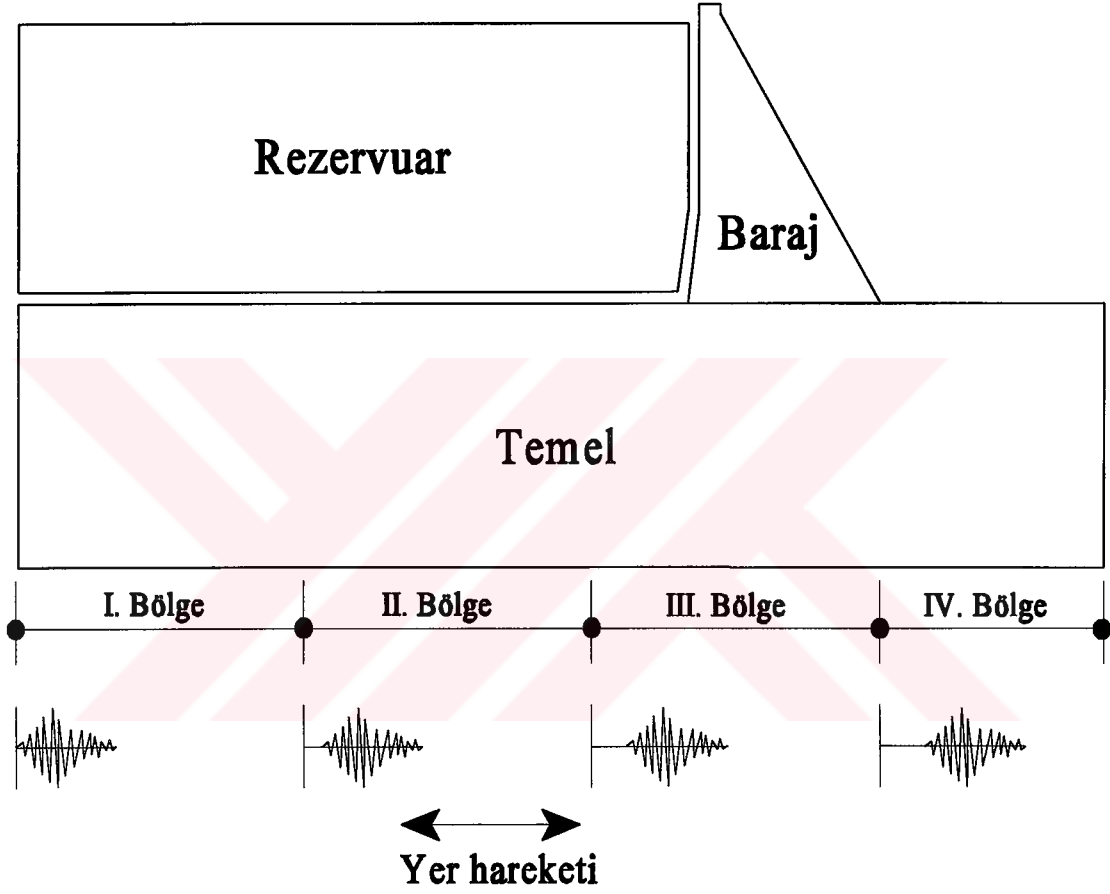
$$h_9 = \frac{1}{2}(1-r^2)(1-s^2)$$

b) Enterpolasyon fonksiyonları

Şekil 2 : İki boyutlu sonlu eleman ve enterpolasyon fonksiyonları [58].

Tablo 1: Değişik düğüm noktalı iki boyutlu sonlu elemanlar için indirgenmiş ve normal integrasyon mertebeleri [50, 58].

Düğüm Noktası Sayısı	Eleman Şekli	Normal İntegrasyon Derecesi	İndirgenmiş İntegrasyon Derecesi
4		2x2	1x1
8		3x3	2x2
9		3x3	2x2



Şekil 3: Asinkronize yatay yer hareketine maruz baraj-rezervuar-temel sistemi.

3. DEPREMLERİN KUVVETLİ YER HAREKETİ KAYITLARININ DEĞERLENDİRİLMESİ

3.1. Giriş

Yer kabuğunda meydana gelen kaymanın bir dalga hareketi olarak yayılması sonucu oluşan yüzey titreşimleri deprem olarak algılanır [104-105]. Depremlerin çok büyük bir bölümü, yer kabuğunda soğuma veya çeşitli etkilerden meydana gelen şekildeğiştirme enerjisinin ani olarak açığa çıkmasından meydana gelir. Böyle bir olay sırasında yer kabuğunu oluşturan plakalar kendisini sınırlayan çizgiler olan faylar boyunca ani olarak kayar. Bu tür tektonik depremlerde ortaya çıkan yerdeğiştirme dalgaları sönmülenerek uzaklara yayılır [105]. Bazı depremler ise, volkanik hareketlere, yer altı mağaralarının çökmesine ve hatta yer altına basılarak uzaklaştırılan kullanılmış suların ortaya çıkardığı gerilmelere bağlı olarak da oluşabilmektedir. Ancak, tektonik olmayan sözkonusu depremlerin sayısı ve şiddetleri azdır.

Depremden dolayı meydana gelen yer hareketinin hassas bir şekilde ölçümü için sismograflar kullanılır. Fakat, sismograflar özellikle yıkıcı bir depremin merkezüstü bölgesinde yer hareketini ölçmek için uygun değildir. Çünkü, sismograflar dünyanın herhangi bir noktasındaki küçük bir yer hareketini kaydetmek için düzenlenmişlerdir. Yer hareketini inceleyen Sismoloji Bilimi açısından bu kayıtlar önemli olmakla beraber, deprem mühendisliği bakımından yapılarda hasar meydana getiren şiddetli deprem kayıtları önem taşır. Şiddetli deprem kayıtları, *kuvvetli yer hareketi kayıtları* olarak isimlendirilirler. Sismograf böyle bir hareketi göstermeye yetmeyebilir ve alet tahrip olabilir. Kuvvetli yer hareketlerinin kaydı, sismograflardan değişiklik yapılarak elde edilen Kuvvetli Hareket İvme Ölçerleri (Strong Motion Accelerograph (SMA)) ile gerçekleştirilir. Bu aletler normal olarak sükunette olup, ancak yer hareketi ivmesinin belirli bir değeri aşmasından sonra harekete geçerler. Kuvvetli Hareket İvme Ölçerleri ile yer hareketinin, iki yatay ve bir düşey olmak üzere üç bileşeni ölçülebilir. 1990 yılı itibariyle Ülkemizde 69 adet Kuvvetli Hareket İvme Ölçeri (SMA) vardır [106]. Bunların tümü SMA-1 (Kinematics) tipidir.

Alınan analog kayıtlarda aletin belirli bir değerden sonra çalışması sebebiyle ve elde olmayarak ortaya çıkan hataların düzeltilmesi gerekir. Ayrıca, sayısallaştırılmış analog deprem kuvvetli yer hareketi kayıtları, yüksek frekans kaydedici hatalarını ve düşük frekans sayısallaştırma hatalarını yok edecek fakat aynı zamanda fiziksel bakımdan gerçek sinyalleri koruyacak şekilde değerlendirme (filtreleme) işlemine tabi tutulmalıdır [107-108]. Yer hareketi ivme kaydının integrasyonu sonucu elde edilen hız ve yerdeğiştirmenin sıfır değeri ile bitmesi gerekir. Bunun sağlanamadığı durumda ivme kaydının eksen düzeltilmesinin yapılması gerekir.

Aşağıda kuvvetli yer hareketi ivme kayıtlarının eksen düzeltilmesi ve integrasyonu ile ilgili formülasyonlar verilmektedir. Bu formülasyonlara göre analizlerde kullanılacak olan ivme kayıtlarının önce eksen düzeltilmesi yapılmakta, daha sonra ise düzeltilmiş ivme kayıtlarının integrasyonundan hız ve yerdeğiştirmeler elde edilmektedir.

3.2. Kuvvetli Yer Hareketi İvme Kayıtlarının Eksen Düzeltilmesi

Daha önceki bölümlerde bahsedildiğı gibi, asinkronize dinamik analizde gerilmeler, zahiri- statik ve dinamik yerdeğiştirmelerin toplamından oluşan toplam yerdeğiştirmeler, v_r , kullanılarak hesaplanmaktadır. Zahiri- statik yerdeğiştirmelerin, v_{sr} , hesabında ise (denklem (49)) yer ivmesinin integrasyonu sonucu elde edilen yerdeğiştirmeler kullanılmaktadır. Kuvvetli Hareket İvme Ölçeri ile kaydedilen ivme verilerinin integrasyonu sonucu elde edilen hız ve yerdeğiştirmelerin zamanla değışimleri, hem frekans içeriğı hem de genlik açısından, gürültü ve alet hatalarından önemli derecede etkilenmektedir [107-110]. Dolayısıyla, integrasyon sonucunda kalıntı hız ve yerdeğiştirmeler oluşmaktadır. Söz konusu kalıntı yerdeğiştirmeler ise hesaplanacak gerilmeleri önemli derecede değışirmektedir. Bu nedenle yukarıda bahsedilen hataların düzeltilmesi için ivme kayıtlarının filtreleme ve eksen düzeltilmesinin (base-line correction) yapılması gerekir. Eksen düzeltilmesi bir eğri uydurma işlemiyle yapılabilmektedir. Eğri uydurma işleminde düşük dereceli polinomlar kullanılmaktadır (Şekil 4). Şekil 4 'ten görüldüğü gibi eksen düzeltilmesi yapılmış ivme değerleri, $\ddot{v}_{cg}(t)$,

$$\ddot{v}_{cg}(t) = \ddot{v}_g(t) - P(t) \quad (51)$$

ifadesiyle bulunabilir. Burada $\dot{v}_g(t)$, eksen düzeltilmesi yapılmamış ivme değerlerini, $P(t)$ ise seçilen polinomu göstermektedir. Bu polinom bir doğru olması durumunda

$$P(t) = a + bt \quad (52)$$

şeklinde ifade edilebilir. Denklem (52), denklem (51) 'de yerine konursa

$$\ddot{v}_{eg}(t) = \dot{v}_g(t) - (a + bt) \quad (53)$$

bağıntısı bulunur. Bu ifadedeki a ve b katsayılarının belirlenmesinde en küçük kareler metodu kullanılmaktadır [111]. En küçük kareler metoduna göre, ivme değerlerinin seçilen polinoma uzaklıklarının karelerinin toplamı minimum olmakta ve denklem (53) kullanılarak,

$$E = \int_0^{t_i} \{\dot{v}_g(t) - (a + bt)\}^2 dt \quad (54)$$

şeklinde ifade edilmektedir. Burada t_i ivme kaydının toplam süresini, E ise toplam hatayı göstermektedir. a ve b katsayıları E 'nin minimum olması şartından elde edilir. Buna göre,

$$\frac{\partial E}{\partial a} = -2 \int_0^{t_i} \{\dot{v}_g(t) - (a + bt)\} dt = 0 \quad (55)$$

$$\frac{\partial E}{\partial b} = -2 \int_0^{t_i} \{\dot{v}_g(t) - (a + bt)\} t dt = 0 \quad (56)$$

olmalıdır. a ve b katsayıları, denklem (55) ve denklem (56) 'da gerekli işlemler yapılarak

$$a = -\frac{1}{t_i} \int_0^{t_i} \dot{v}_g(t) dt - b \frac{t_i}{2} \quad (57)$$

$$b = -\frac{12}{t_i^3} \left\{ \int_0^{t_i} \ddot{v}_g(t) t dt - \frac{t_i}{2} \int_0^{t_i} \ddot{v}_g(t) dt \right\} \quad (58)$$

şeklinde bulunur. Denklem (57) ve denklem (58), denklem (53) 'te yerine konursa, eksen düzeltilmesi yapılmış ivme değerleri elde edilir. Aynı işlemler yüksek dereceli polinom seçilerek de yapılabilir. Fakat, birinci dereceden polinom yeterli hassaslıkta sonuç vermektedir.

3.3. Kuvvetli Yer Hareketi İvme Kayıtlarının İntegrasyonu

Kuvvetli yer hareketi ivme kayıtlarının integrasyonunda çoğunlukla doğrusal ivme yöntemi (linear acceleration method) kullanılmaktadır [101, 104, 109-110, 112-114]. Doğrusal ivme yönteminde gözönüne alınan zaman aralığında ivmenin lineer olarak değiştiği kabul edilmektedir (Şekil 5). Şekil 5 ten görüldüğü gibi t anındaki yer hareketinin ivmesi $\ddot{v}_g(t)$, $t+\Delta t$ anındaki ise $\ddot{v}_g(t+\Delta t)$ olmaktadır. Aynı şekilde, $t+\Delta t$ anında yer hareketinin hızı ve yerdeğiştirmesi sırasıyla $\dot{v}_g(t+\Delta t)$ ve $v_g(t+\Delta t)$ olur. Bir $f(t)$ fonksiyonunun Taylor açılımı,

$$f(t+\Delta t) = \sum_{k=0}^{\infty} \frac{\Delta t^k}{k!} f^{(k)}(t) \quad (59)$$

şeklinde yazılabilir. Burada $f^{(k)}(t)$, $f(t)$ fonksiyonunun k 'nıncı türevini göstermektedir. Denklem (59) kullanılarak, $\dot{v}_g(t+\Delta t)$ ve $v_g(t+\Delta t)$ 'nin Taylor açılımları

$$\dot{v}_g(t+\Delta t) = \dot{v}_g(t) + \Delta t \ddot{v}_g(t) + \frac{1}{2} \Delta t^2 \ddot{\dot{v}}_g(t) + \dots \quad (60)$$

$$v_g(t+\Delta t) = v_g(t) + \Delta t \dot{v}_g(t) + \frac{\Delta t^2}{2} \ddot{v}_g(t) + \frac{\Delta t^3}{6} \dot{\ddot{v}}_g(t) + \dots \quad (61)$$

olarak yazılabilir. Şekil 5 'ten görüldüğü gibi, Δt zamanı içinde ivme doğrusal olarak değiştiğinden

$$\dot{\ddot{v}}_g(t) = \frac{\ddot{v}_g(t+\Delta t) - \ddot{v}_g(t)}{\Delta t} \quad (62)$$

ifadesi elde edilebilir. (62) ifadesi sabit olarak kabul edilirse, (60) ve (61) ifadelerindeki dördüncü ve daha yüksek türevler sıfır olacaktır. Denklem (62), denklem (60) ve denklem (61) 'de yerine yazılır ve gerekli düzenlemeler yapılırsa

$$\dot{v}_g(t+\Delta t) = \dot{v}_g(t) + \frac{\Delta t}{2} \{\ddot{v}_g(t) + \ddot{v}_g(t+\Delta t)\} \quad (63)$$

$$v_g(t+\Delta t) = v_g(t) + \Delta t \dot{v}_g(t) + \frac{\Delta t^2}{6} \{2\ddot{v}_g(t) + \ddot{v}_g(t+\Delta t)\} \quad (64)$$

ifadeleri bulunur. Yer hareketinin ivme zaman geçmişi verildiğinde, denklem (63) ve denklem (64) kullanılarak yer hareketinin hız ve yerdeğiştirme zaman geçmişleri elde edilebilir.

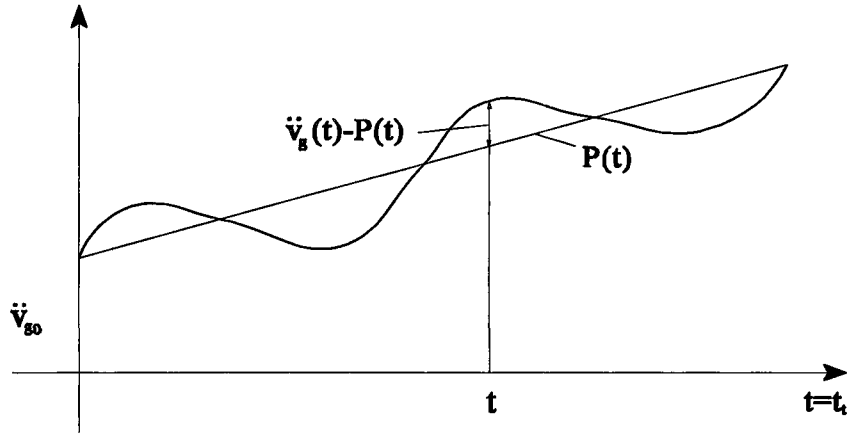
3.4. Kuvvetli Yer Hareketi İvme Kayıtlarının Eksen Düzeltmesi ve İntegrasyonu İle İlgili Sayısal Uygulamalar

Yukarıda anlatılan formülasyonların uygulanması amacıyla, 13 Mart 1992 Erzincan depremi ivme kayıtları seçilmiştir. Bu depremin ivme kayıtları; doğu-batı (E-W), kuzey-güney (N-S) ve düşey (V) olmak üzere üç bileşenden oluşmaktadır. Her üç bileşenin ivme kayıtları 0.01 saniyelik eşit zaman aralıklarına (Δt) sahiptir. 1992 Erzincan depreminin doğu-batı (E-W), kuzey-güney (N-S) ve düşey (V) bileşenlerinin ivme kayıtlarında sırasıyla 2096, 2316 ve 2013

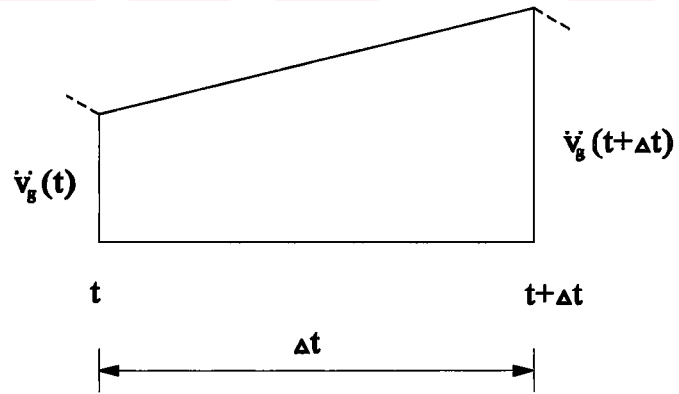
adet veri bulunmaktadır. Yukarıda bahsedilen ivme kayıtlarının ilk ve son değerleri sıfır alınmıştır. İlk olarak, 1992 Erzincan depreminin düzeltilmemiş doğu-batı (E-W), kuzey-güney (N-S) ve düşey (V) ivme bileşenlerinin hız ve yerdeğiştirmeleri sırasıyla denklem (63) ve denklem (64) kullanılarak elde edilmiştir. Her üç bileşenin düzeltilmemiş ivme kayıtları ve söz konusu kayıtların integrasyonundan elde edilen hız ve yerdeğiştirmeler Şekil 6-8 'de verilmektedir. Şekil 6-8 'den görüldüğü gibi her üç bileşenin ivme kaydının integrasyonundan elde edilen hız ve yerdeğiştirmeler sıfır değeri ile bitmemekte ve kalıntı hız ve yerdeğiştirmeler oluşmaktadır. Bu kalıntı yerdeğiştirme değerleri klasik dinamik analizde problem çıkarmazken, asinkronize dinamik analizde çok önemli olmaktadır. Çünkü, denklem (49) 'dan görüleceği gibi, zahiri-statik yerdeğiştirmelerin hesaplanmasında yer hareketinin yerdeğiştirmeleri kullanılmaktadır. Yer hareketinin yerdeğiştirmeleri de ivme kayıtlarının iki kez integrasyonu ile elde edilmektedir. Düzeltilmemiş ivmelerden elde edilen yerdeğiştirmeler gerçekçi olmadığından, analiz sonuçlarında büyük yanlışlıklara neden olmaktadır. Bunun için 1992 Erzincan depreminin doğu-batı (E-W), kuzey-güney (N-S) ve düşey (V) bileşenlerinin filitrelenmiş ivme kayıtlarının Bölüm 3.2 'de verilen formülasyona göre eksen düzeltmeleri yapılarak, tekrar integrasyona tabi tutuldular. Düzeltilmiş ivme kayıtları ve bu kayıtların integrasyonundan elde edilen hız ve yerdeğiştirmeler Şekil 9-11 'de verilmektedir. Şekil 9-11 'den görüldüğü gibi hız ve yerdeğiştirmeler sıfır değeri ile bitmekte, ve kalıntı hız ve yerdeğiştirmeler oluşmamaktadır. Düzeltilmiş ivme kayıtlarının (Şekil 9-11) düzeltilmemiş ivme kayıtlarına (Şekil 6-8) göre yön değiştirmiş olmasının nedeni, integrasyondan önce aletin yön hatasının düzeltilmesinden kaynaklanmaktadır. Her üç bileşenin eksen düzeltmesi sonucu elde edilen mutlak maksimum ivme, hız ve yerdeğiştirme değerleri Tablo 2 'de verilmektedir. Burada parantez içindeki değerler Kaynak [115] 'ten alınmıştır. Tablo 2 'den görüldüğü gibi bulunan sonuçlar Kaynak [115] 'te verilen sonuçlara oldukça yakın çıkmaktadır.

Tablo 2: 13 Mart 1992 Erzincan depreminin düzeltilmiş doğu-batı (E-W), kuzey-güney (N-S) ve düşey (V) bileşenlerinin mutlak maksimum ivme, hız ve yerdeğiştirmeleri.

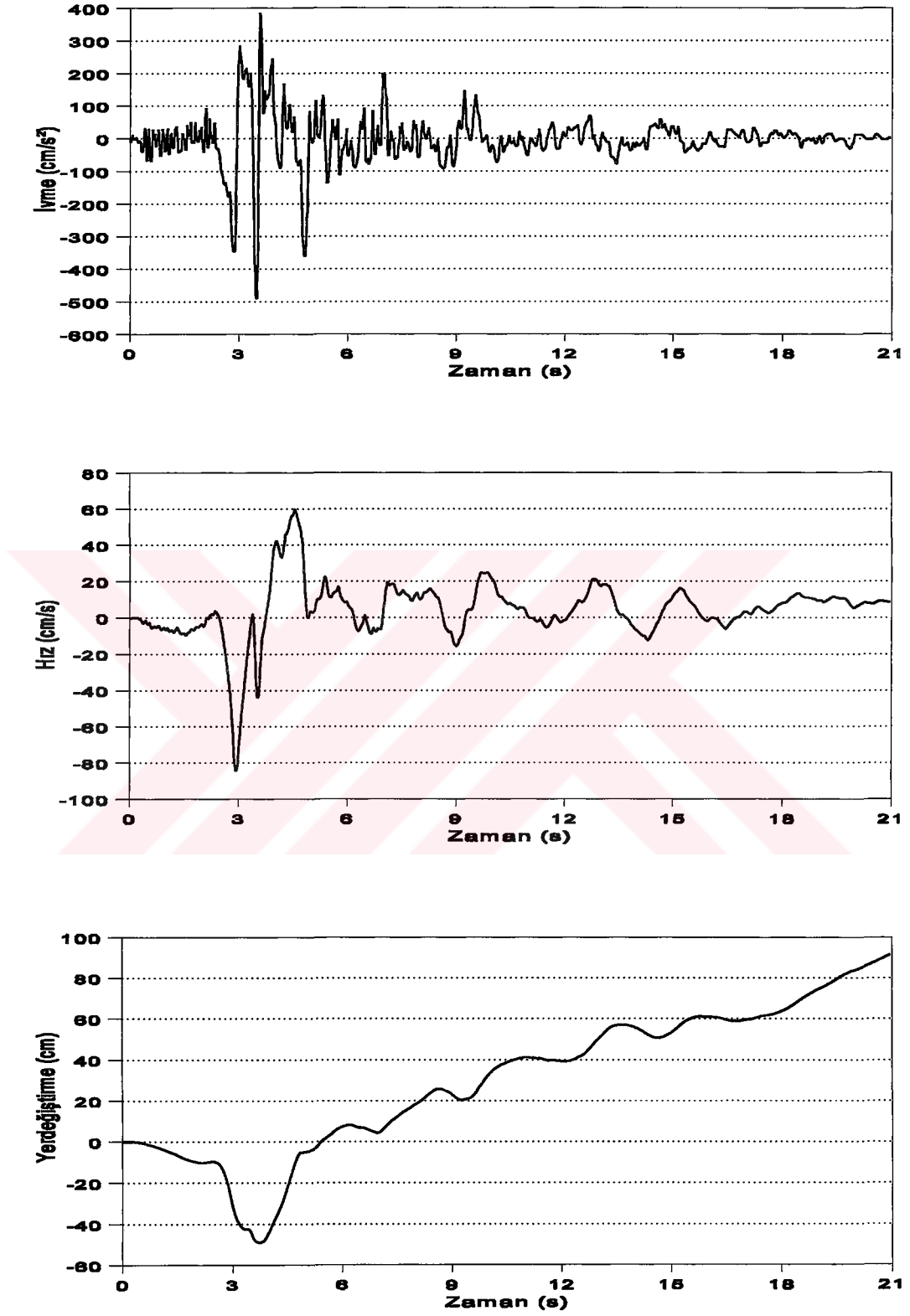
Deprem Bileşenleri	İvme (cm/s ²)	Hız (cm/s)	Yerdeğiştirme (cm)
Doğu-Batı (E-W)	505.2801 (505.3)	74.2872 (74.3)	17.5536 (17.5)
Kuzey-Güney (N-S)	382.2884 (382.3)	102.0283 (101.9)	35.2901 (36.4)
Düşey (V)	240.3672 (240.4)	25.6075 (25.9)	15.6703 (16.5)



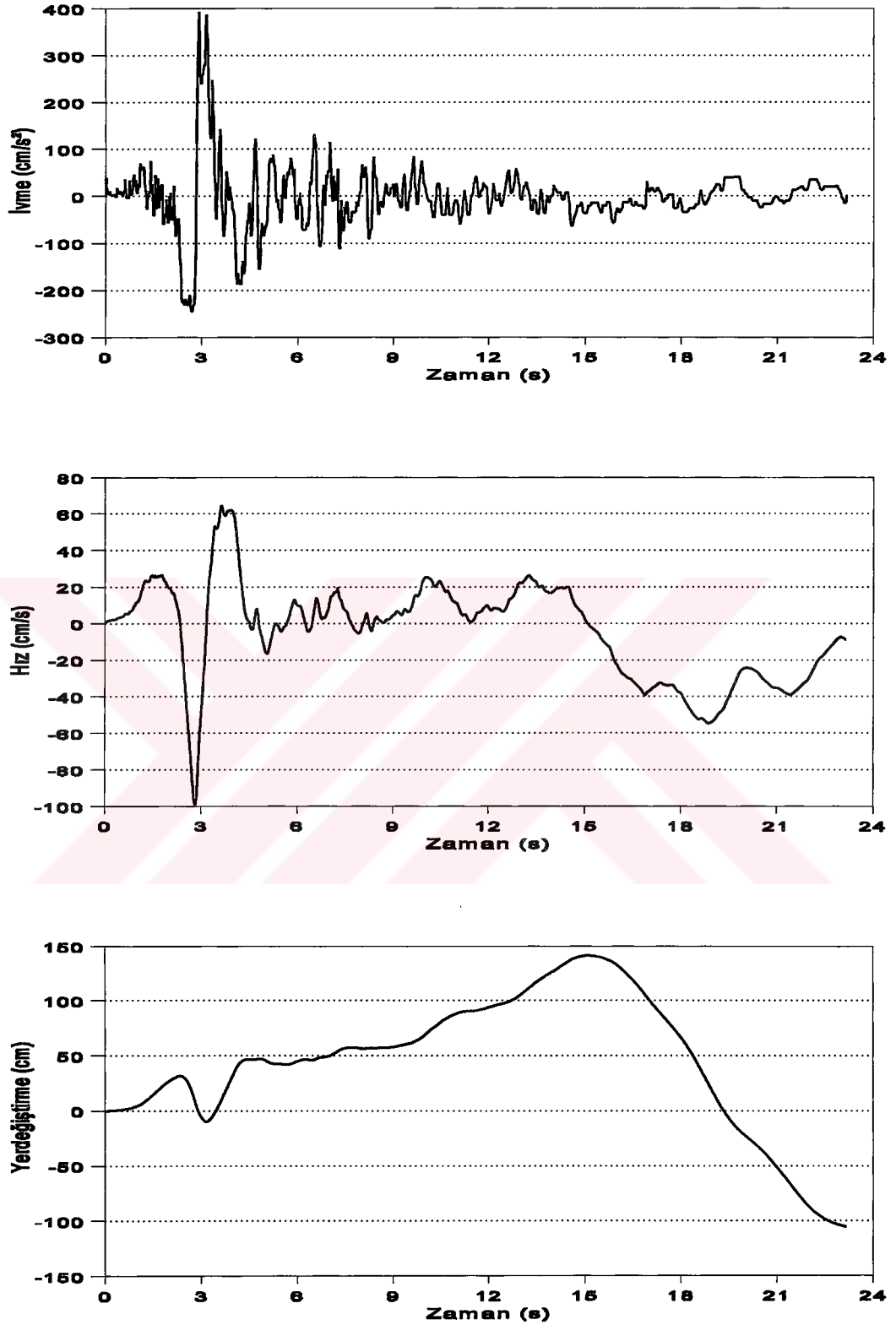
Şekil 4: İvme kaydının eksen düzeltilmesi.



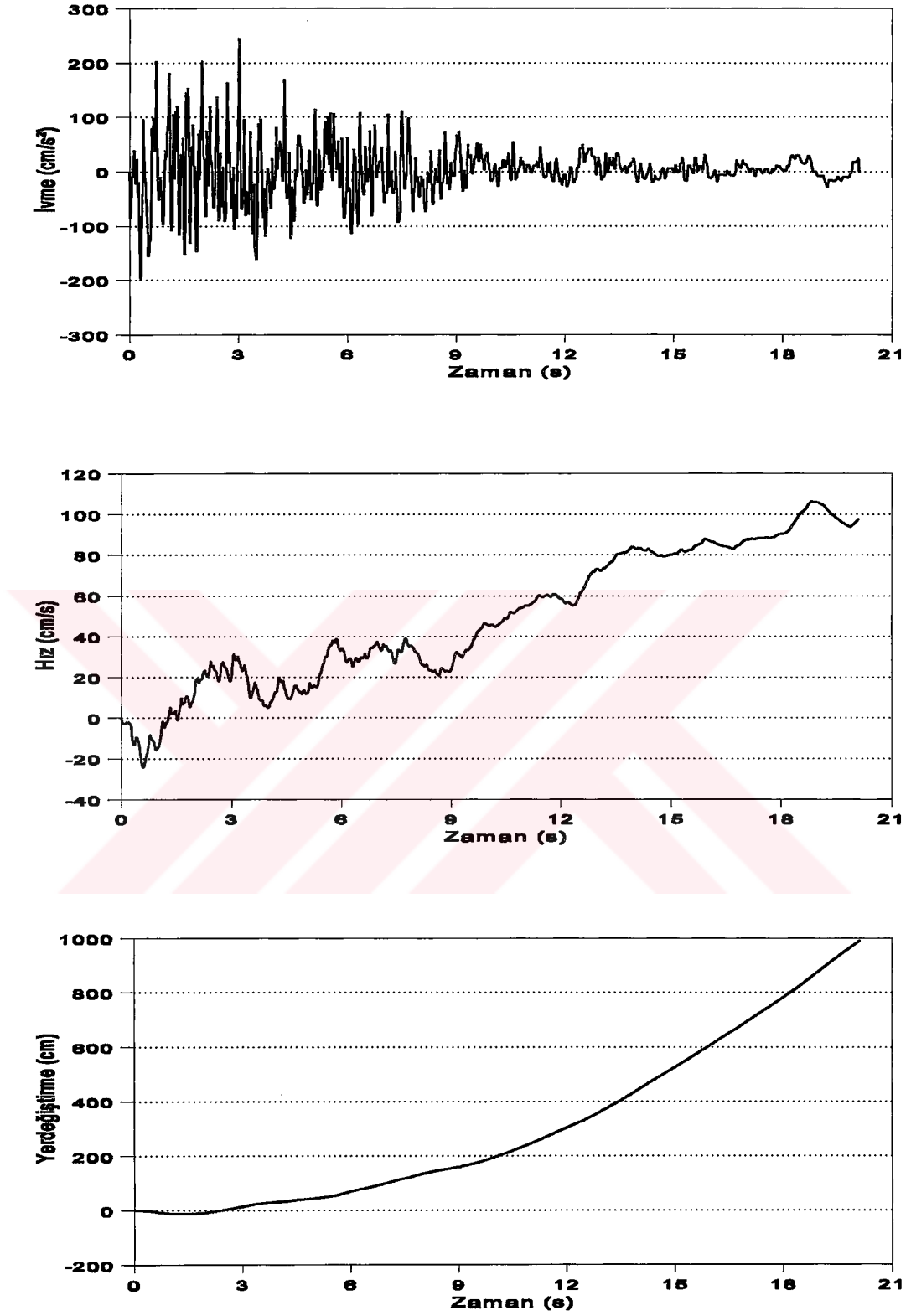
Şekil 5: Doğrusal ivme metodu.



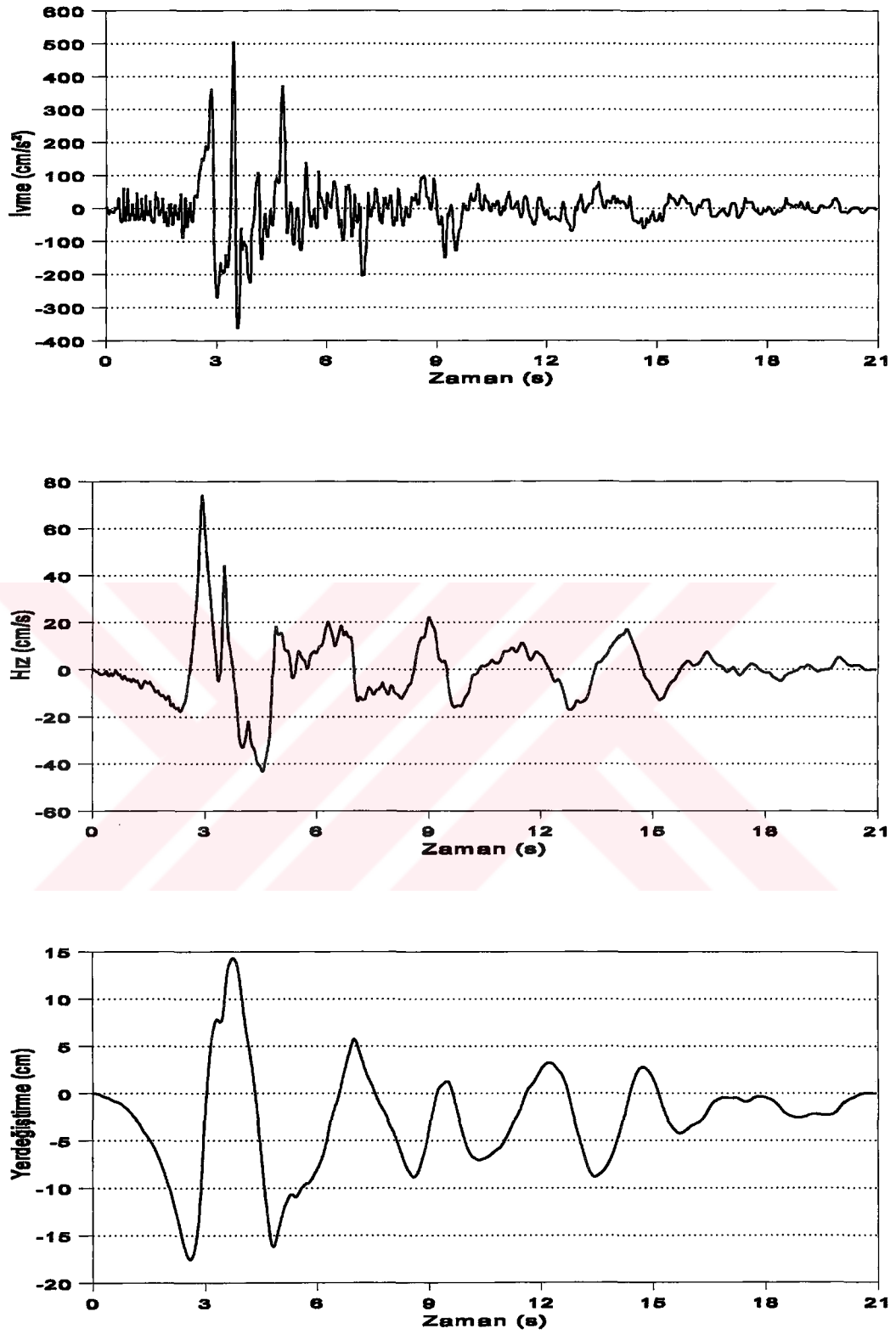
Şekil 6: 13 Mart 1992 Erzincan depremi doğu-batı (E-W) bileşeninin düzeltilmemiş ivme kaydı ve bu kaydın integrasyonundan elde edilen hız ve yerdeğiştirme değerlerinin zamanla değişimi.



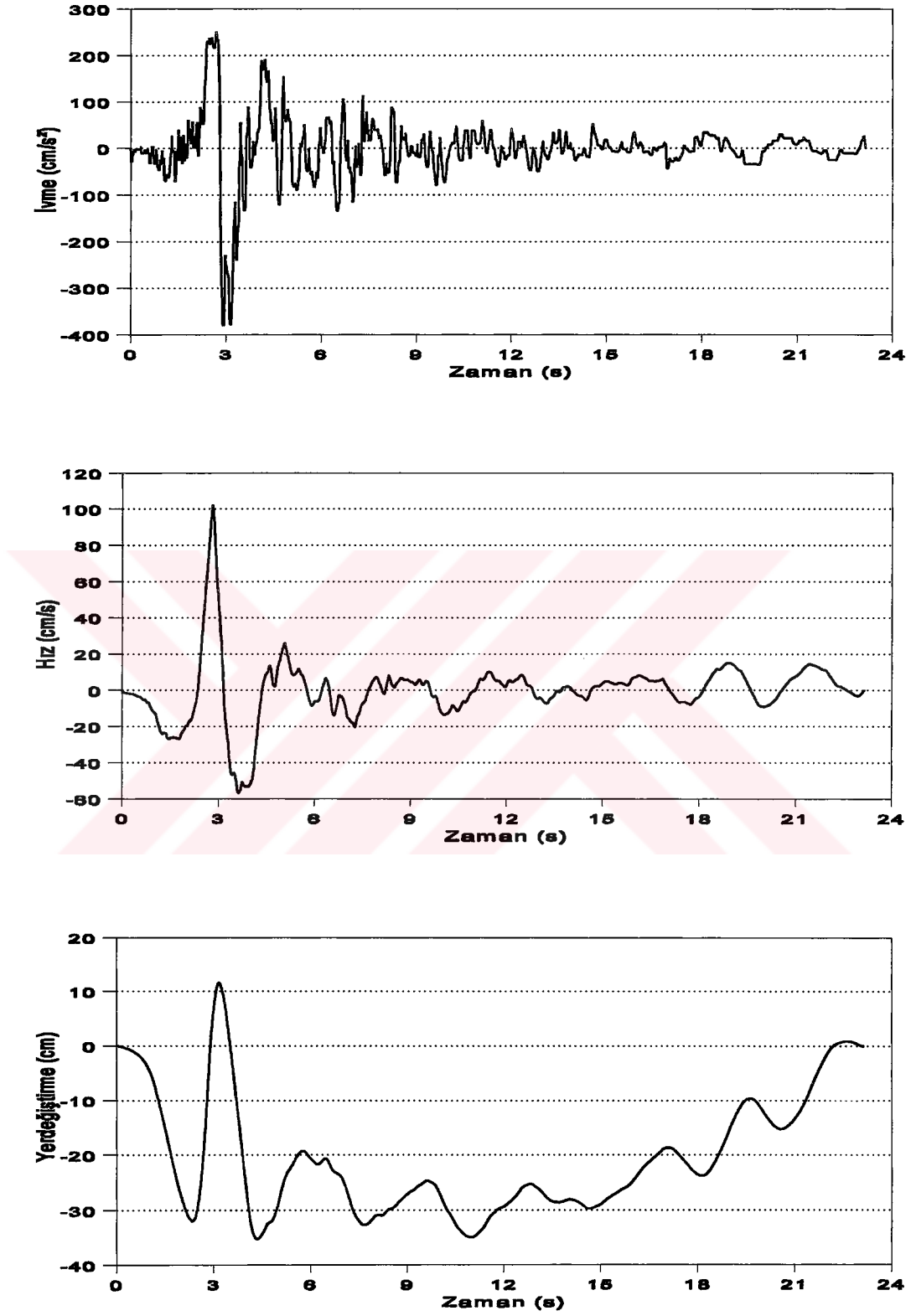
Şekil 7: 13 Mart 1992 Erzincan depremi kuzey-güney (N-S) bileşeninin düzeltilmemiş ivme kaydı ve bu kaydın integrasyonundan elde edilen hız ve yerdeğiştirme değerlerinin zamanla değişimi.



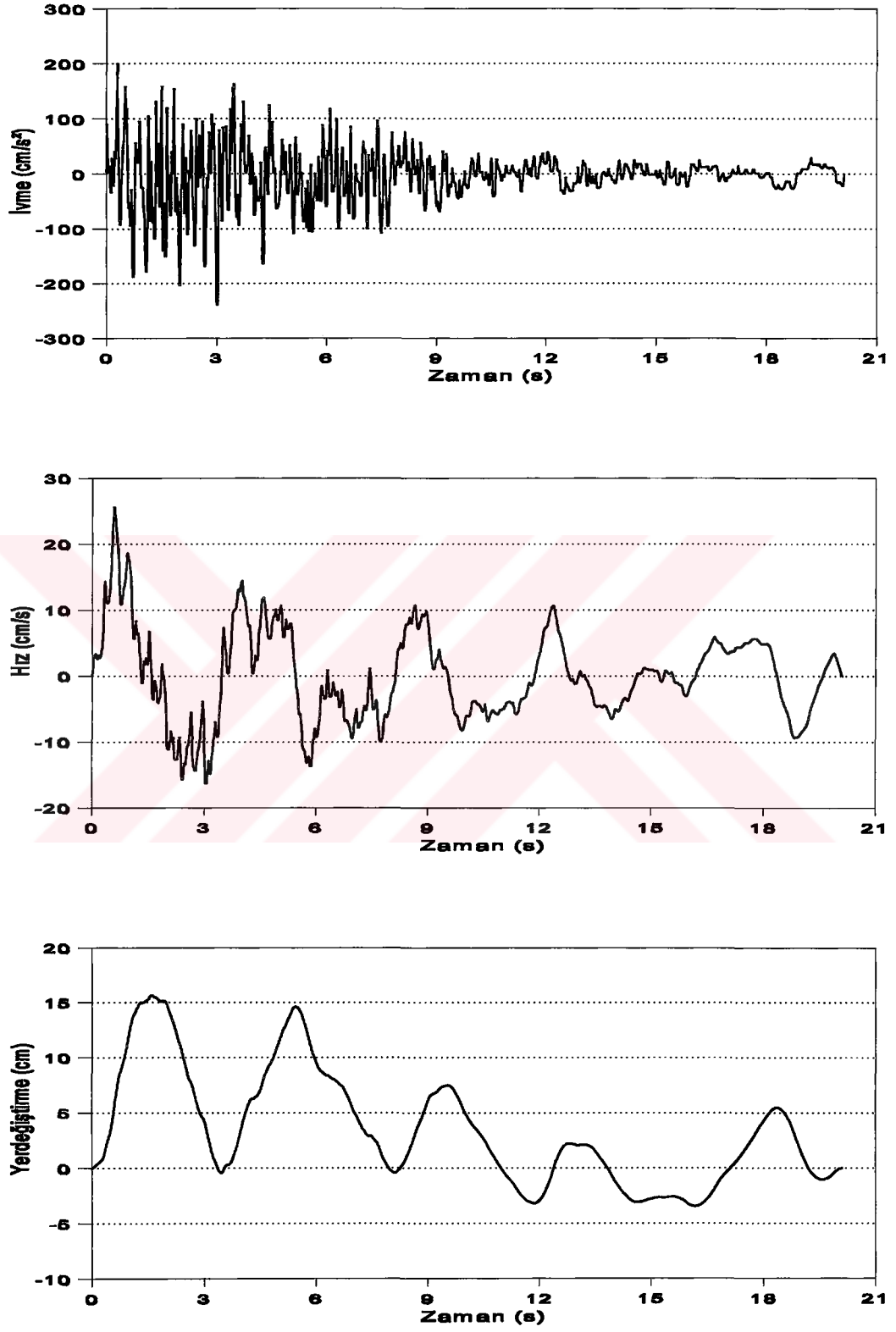
Şekil 8: 13 Mart 1992 Erzincan depremi düşey (V) bileşeninin düzeltilmemiş ivme kaydı ve bu kaydın integrasyonundan elde edilen hız ve yerdeğiştirme değerlerinin zamanla değişimi.



Şekil 9: 13 Mart 1992 Erzincan depremi doğu-batı (E-W) bileşeninin düzeltilmiş ivme kaydı ve bu kaydın integrasyonundan elde edilen hız ve yerdeğiştirme değerlerinin zamanla değişimi.



Şekil 10: 13 Mart 1992 Erzincan depremi kuzey-güney (N-S) bileşeninin düzeltilmiş ivme kaydı ve bu kaydın integrasyonundan elde edilen hız ve yerdeğiştirme değerlerinin zamanla değişimi.



Şekil 11: 13 Mart 1992 Erzincan depremi düşey (V) bileşeninin düzeltilmiş ivme kaydı ve bu kaydın integrasyonundan elde edilen hız ve yerdeğiştirme değerlerinin zamanla değişimi.

4. BARAJ-REZERVUAR-TEMEL SİSTEMLERİNİN LAGRANGE YAKLAŞIMI İLE ASINKRONİZE DİNAMİK ANALİZİNDEN ELDE EDİLEN BULGULAR VE İRDELEME

4.1. Giriş

Bölüm 2 'de verilen sıvı-yapı sistemlerinin Lagrange yaklaşımı ile asinkronize dinamik analiz formülasyonunun uygulanmasına örnek için Ankara'nın 120 km kuzey batısında Sakarya nehri üzerinde 1956 yılında inşa edilmiş olan Sarıyar beton ağırlık barajı seçilmiştir. Beton ağırlık barajların depreme karşı davranışını belirlemede iki boyutlu analiz yeterli olmaktadır [31, 87]. Bu nedenle, Sarıyar barajının iki boyutlu analizi yapılmaktadır. Analiz için barajın en elverişsiz kesiti seçilmiştir. Söz konusu kesitin boyutları Şekil 12 'de verilmektedir. Analizlerde barajın düzlem şekildeğiştirmeye maruz kaldığı kabul edilmektedir. Baraj malzemesinin lineer-elastik, homojen ve izotrop olduğu kabul edilmiştir. Yapılan araştırmalardan, Sarıyar barajının baraj betonu ve temel zemini ile ilgili elastik özellikleri temin edilememiştir. Bu nedenle, baraj betonu elastik özelliklerinin seçiminde Karakaya barajının [116] elastik özellikleri dikkate alınarak; baraj betonunun elastisite modülü $35 \times 10^9 \text{ N/m}^2$, birim hacim ağırlığı 24000 N/m^3 ve Poisson oranı 0.15 olarak seçilmiştir. Baraj temelinin elastik özellikleri ise, baraj betonunun elastik özelliklerinin aynısı olduğu kabul edilmiştir. Rezervuardaki suyun hacimsel elastisite modülü $207 \times 10^7 \text{ N/m}^2$ (β_0), birim hacim ağırlığı 9810 N/m^3 ve kütle yoğunluğu 1000 kg/m^3 olarak alınmıştır.

Baraj-rezervuar-temel sisteminin Lagrange yaklaşımı ile klasik ve asinkronize dinamik analizleri için geliştirilen değişik nodlu katı ve sıvı izoparametrik sonlu elemanlar Fortran 77 dilinde kodlanarak SAP IV [100] ve Mulsap [92] programlarına dahil edilmiştir. Klasik dinamik analizler SAP IV [100] programı ile, asinkronize dinamik analizler ise geliştirilmiş Mulsap [92] programı ile yapılmaktadır.

Bu bölümde önce baraj-rezervuar-temel sisteminin modal davranışı, daha sonra deprem dalgasının farklı yayılma hızları için asinkronize yatay ve düşey yer hareketi altındaki dinamik davranışı incelenmektedir. Tüm modlar için %5 'lik sönüm oranı kabul edilmiştir.

4.2. Modal Analiz

Baraj-rezervuar-temel sisteminin modal analizi, Şekil 13 'te verilen sonlu eleman modeli kullanılarak yapılmıştır. Baraj-rezervuar-temel sisteminin sonlu eleman modelinde, rezervuarın sabit derinlikte olduğu kabul edilmekte ve uzunluğu yüksekliğinin üç katı ($3H=255$ m) alınmaktadır [117-118]. Baraj temelini derinliği ve mansap tarafındaki uzunluğu rezervuar yüksekliği kadardır. Ortak sistemin sonlu eleman modeli, baraj ve temelde toplam 51 adet 8 düğüm noktalı katı, rezervuarda ise 24 adet 9 düğüm noktalı sıvı eleman kullanılarak oluşturulmuştur. Rezervuarda 9 düğüm noktalı sıvı sonlu eleman kullanılmasının nedeni; Kaynak [39, 50] 'de belirtildiği gibi, sıvı-yapı sistemlerinin modal analizlerinde 9 düğüm noktalı sıvı eleman 4 düğüm noktalı sıvı elemana göre daha iyi çözümler vermesinden kaynaklanmaktadır. Baraj, rezervuar ve temel malzeme özellikleri bu bölümün giriş kısmında verilmektedir.

Ortak sistemin özdeğer analizinde gereksiz sıfır enerji modlarının yok edilmesi için, sıvının yerdeğıştirmelerine rotasyonsuzluk kısıtlaması getirilmekte ve sıvı eleman matrislerinin hesaplanmasında indirgenmiş integrasyon mertebeleri kullanılmaktadır. İndirgenmiş integrasyon kullanımı sıvı sisteminin rijitliğini azaltmaktadır. Eğer, sıvı eleman üzerinde hesaplanan integraller, katı elemanlarda olduğu gibi tam olarak elde edilirse (normal integrasyon mertebeleri kullanılarak), sistemin sonlu eleman yerdeğıştirme çözümleri bir alt sınır çözümü verecektir [50]. Ayrıca, daha yüksek mertebeli integrasyon kullanımı, düşük frekanslı sıvı salınım modlarının yok olmasına da sebep olmaktadır. Bu nedenle, sıvı sonlu eleman integrallerinin indirgenmiş integrasyon tekniği kullanılarak elde edilmesi gerekir [50]. Rezervuarda kullanılan 9 düğüm noktalı sıvı sonlu eleman matrislerinin hesaplanmasında 2×2 'lik indirgenmiş integrasyon mertebeleri dikkate alınmaktadır [50]. Baraj ve temelde kullanılan 8 düğüm noktalı katı sonlu eleman matrislerinin hesaplanmasında ise 3×3 'lük normal integrasyon mertebeleri dikkate alınmaktadır [58]. Çeşitli eleman tipleri için indirgenmiş ve normal integrasyon mertebeleri Tablo 1 'de verilmiştir.

Bir sıvı sisteminin modal analizi yüzey salınım, hacim değışim ve rotasyonla ilgili modları vermektedir [39]. Sıvının rotasyonsuzluğunun ceza (penalty) metodlara benzer şekilde gözönüne alındığı formülasyonlarda, rotasyon kısıtlama parametresinin değışimi frekans dağılımını etkilemektedir [62]. Rotasyon kısıtlama parametresinin değışiminden yüzey salınım ve hacim değışim modları çok az etkilenmektedir. Buna karşılık, rotasyonel modlar kısıtlama

parametresine karşı duyarlıdır. Rotasyonel kısıtlama parametresi büyüdükçe rotasyonla ilgili frekanslar hızlı bir şekilde büyümekte ve hacim değişim frekanslarından daha büyük mertebeye ulaşabilmektedir. Dolayısıyla, büyük değerli rotasyon kısıtlama parametresi sayesinde rotasyonel frekanslar frekans tablosunun üst sıralarına kaymakta; hacim değişim frekansları ise genellikle alt sıralarda yer almaktadır [62]. Bununla birlikte, rotasyon kısıtlama parametresinin büyük değerleri rijit cisim modları (rigid body modes) gibi nümerik problemler doğurabilmektedir. Söz konusu parametre nümerik problemlere sebep olmayacak ve yeteri kadar rotasyonel kısıtlamayı sağlayacak şekilde seçilmelidir. Wilson ve Khalvati [50], kısıtlama parametresinin hacimsel elastisite modülünün 100 katı alınmasını önermektedir. Baraj-rezervuar-temel sisteminin (Şekil 13) modal analizinde kısıtlama parametresi, hacimsel elastisite modülünün 100 katı alınmıştır.

Bu çalışmada sıvının viskoz olmadığı kabulü yapıldığından, rezervuar-baraj ve rezervuar-temel arayüzeylerinde sadece arayüze dik doğrultudaki yerdeğişmeler sürekli olmaktadır. Bu şart, rezervuar-baraj ve rezervuar-temel arayüzeylerindeki sonlu eleman düğüm noktalarında yüzey normali doğrultusunda rijit kafes elemanlar kullanılarak sağlanmaktadır. Kafes elemanların rijitliği, süreklilik sağlanıncaya kadar arttırılmalıdır. Sıvı-yapı sistemlerinin Lagrange yaklaşımına dayalı modal analizlerinde kafes elemanların rijitliğinin arttırılması rijit cisim modları gibi bazı sayısal problemler ortaya çıkartmaktadır. Dolayısıyla, istenilen sayıda özdeğer hesaplanamamaktadır. Söz konusu sorunlar rezervuar için seçilen sonlu eleman modeli ve kafes elemanların rijitlikleri değiştirilerek giderilebilmektedir.

Baraj-rezervuar-temel sisteminin modal analizinden elde edilecek frekansların doğruluğunu kontrol etmek amacıyla, ilk olarak baraj-rezervuar sisteminin modal analizi yapılmıştır. Baraj-rezervuar sisteminin modal analizinde kullanılan sonlu eleman modeli Şekil 13 'te verilen sonlu eleman modelinin temelsiz haline karşılık gelmektedir. Baraj-rezervuar sistemi ile ilgili malzeme özellikleri baraj-rezervuar-temel (Şekil 13) sistemi için seçilenlerin aynısıdır. Baraj-rezervuar sisteminin modal analizinde rezervuarın tabanında sıvının yatay, sonunda ise düşey yöndeki hareketleri serbest bırakılmıştır. Sonlu eleman çözümlerinden rezervuarın 1. yüzey salınım frekansı 0.04829 Hz (2. Mod) olarak elde edilirken, analitik çözümden [119] 0.04889 Hz olarak elde edilmiştir. 1. yüzey salınım frekansı analitik çözümden elde edilene çok yakın çıkmaktadır. Her iki yöntemden elde edilen sonuçlar arasındaki farkın; sonlu eleman analizinde rezervuarın memba yüzeyindeki eğimin dikkate alınması, analitik çözümde ise söz konusu eğimin ihmal edilmesinden kaynaklandığı düşünülmektedir. Baraj-rezervuar sisteminin 1. yanal eğilme frekansı 4.024 Hz olarak elde edilmiştir. Aynı model için Euler yaklaşımı kullanılarak

elde edilen 1. yanal eğilme frekansı 4.494 Hz 'dir [18]. Lagrange yaklaşımı kullanılarak elde edilen 1. yanal eğilme frekansı, Euler yaklaşımı kullanılarak elde edilene göre yaklaşık %10.46 daha küçük çıkmaktadır. Çünkü, Euler çözümlerinde rezervardaki su sıkışamaz kabul edilmektedir. Lagrange çözümlerinde ise suyun sıkışabilirliği göz önüne alınmaktadır. Suyun sıkışamaz kabul edilmesi frekans değerlerini arttırmaktadır [18]. Lagrange yaklaşımında sıvı hacimsel elastisite modülünün değeri artırılarak sıvı sıkışamaz duruma yaklaştırılabilmektedir [120]. Bu nedenle, baraj-rezervuar sisteminin modal analizinde rezervardaki suyun hacimsel elastisite modülü $2\beta_0$ alınarak çözümler tekrarlanmıştır. Her iki hacimsel elastisite modülü değeri için de 11 sıvı yüzey salınım modu elde edilmekte ve söz konusu modların frekans değerleri 0.0447-0.1772 Hz arasında kalmaktadır. Rezervardaki suyun hacimsel elastisite modülünün artırılması baraj-rezervuar sisteminin yüzey salınım frekanslarını değer ve sayı bakımından etkilememektedir. Çünkü, sıvı yüzey salınımı ile ilgili yüzey salınım modları sıkışamaz sıvı modu özelliği gösterirler [60]. Hacimsel elastisite modülü $2\beta_0$ alınarak 1. yanal eğilme frekansı 4.462 Hz olarak elde edilmiştir. Görüldüğü gibi hacimsel elastisite modülünün artırılması rezervardaki suyu sıkışamaz hale yaklaştırmakta (sesin sudaki yayılma hızı büyümekte) ve Lagrange yaklaşımından elde edilen çözümler sıkışamaz sıvı kabulüne dayalı Euler çözümlerine yaklaşmaktadır. Söz konusu durum Lagrange yaklaşımı kullanılarak elde edilen sonuçların güvenilirliğini göstermektedir.

Baraj-rezervuar sistemi ile ilgili yapılan karşılaştırmalardan sonra şimdi baraj-rezervuar-temel sisteminin modal analizi yapılacaktır. Baraj-rezervuar-temel sisteminin modal analizi için kullanılan sonlu eleman modelinde (Şekil 13), rezervuar sonundaki sonlu eleman düğüm noktalarının düşey doğrultuda hareket etmesine müsaade edilirken (kayıcı mesnet kullanılmakta), baraj temeli kenarlarındaki sonlu eleman düğüm noktalarının hareket etmesine müsaade edilmemiştir (sabit mesnet kullanılmakta).

Lagrange yaklaşımına dayalı çözümlerde mod sayısının seçimi baraj-rezervuar-temel sistemlerinin modal analizinde önemli olmaktadır. Çünkü, daha önce de bahsedildiği gibi Lagrange yaklaşımı ile sıvı-yapı sistemlerinin modal analizlerinden yüzey salınım, hacim değişim ve rotasyonla ilgili modlar elde edilmektedir. Rotasyonla ilgili modlar, daha önce yapılan çalışmalarda [39, 50] önerilen uygun kısıtlama parametreleri kullanılarak önemli derecede giderilebilmektedir. Sıvı yüzey salınım hareketinin oluşturduğu modların sayısı ise oldukça fazla olmaktadır. Frekans tablosunda ilk sıraları oluşturan yüzey salınım modlarının baraj davranışına

etkileri yok denecek kadar az olmaktadır. Bunların dışındaki modlar hem rezervuar hem de baraj davranışı üzerinde etkili olmaktadır. Bu nedenle Lagrange yaklaşımına dayalı sıvı-yapı etkileşim problemlerinin dinamik analizlerinde yeterli sayıda mod dikkate alınmalıdır. Calayır ve Dumanoglu [62], sıvı-yapı sistemlerinin modal analizlerinde mod sayısının 20 ila 30 arasında alınmasının uygun olacağını vurgulamaktadırlar. Baraj-rezervuar-temel sisteminin (Şekil 13) modal analizinde ilk 30 mod göz önüne alınmıştır.

Baraj-rezervuar-temel sisteminin modal analizinden elde edilen ilk 30 mod şekli Şekil 14-43 'te noktalı çizgi ile gösterilmektedir. Şekil 14-24 'ten görüldüğü gibi ilk 11 mod sıvı yüzey salınım modlarıdır. Bunların frekans değerleri 0.04395-0.17830 Hz arasında değişmektedir. Sayısı rezervuar için seçilen sonlu eleman modeline bağlı olarak değişen yüzey salınım modları genelde rezervuar yüzeyinde etkilerini göstermektedirler. Analitik çözümlere karşılık gelen 1. yüzey salınım frekansı 2. modda oluşmaktadır (Şekil 15). 1. yüzey salınım frekansının değeri 0.04883 Hz olarak elde edilmiştir. Barajın 1. yanal eğilme hareketi 12. modda meydana gelmektedir (Şekil 25). Söz konusu modun frekans değeri 3.387 Hz olmaktadır. Ortak sistemin 13 ve 14. modlarında (Şekil 26-27) da 12. modda olduğu gibi baraj yanal eğilme hareketi yapmaktadır. 12-14. modların her birinde rezervuar kısmında değişik davranışlar gözlenirken, baraj kısmında her üç mod için benzer davranış meydana gelmektedir. Şekil 28-30 'dan görüldüğü gibi 15-17. modlarda barajda uzama hareketi oluşmaktadır. 17. modun baraj üzerindeki etkisi, rezervuar üzerindeki etkisinden daha büyüktür. 15-17. modlarda barajda oluşan uzama hareketinden sonra, 18-19. modlarda (Şekil 31-32) barajda tekrar yanal eğilme hareketi gözlenmektedir. 20-23. modların (Şekil 33-36) rezervuar üzerindeki etkisi baraj üzerindeki etkisinden fazla olmaktadır. Söz konusu modlar rezervuarın her tarafında etkili olmaktadır. 20-23. modların rezervuarın her tarafında etkili olmaları sıvı sıkışabilirliğinden kaynaklanmaktadır. 24-25. modlarda (Şekil 37-38) barajda yanal eğilme hareketi gözlenirken, 26. modda (Şekil 39) uzama hareketi gözlenmektedir. 27-29. modlarda (Şekil 40-42) barajda tekrar yanal eğilme hareketi meydana gelmekte, 30. modda (Şekil 43) ise barajda kısalma hareketi oluşmaktadır.

Baraj-rezervuar-temel sisteminin klasik dinamik analizleri SAP IV [100] programı, asinkronize dinamik analizleri ise MULSAP [92] programı kullanılarak yapıldığından her iki programdan elde edilen ilk 30 frekans karşılaştırılmıştır. Karşılaştırmalar sonucunda beklendiği gibi tüm frekanslar birbirinin aynısı çıkmıştır. Örneğin, 1. yanal eğilme frekansı her iki programdan 12. modda 3.387 Hz olarak elde edilmiştir.

Baraj temelinin kütsüz (temelin sadece rijitlik etkisi dikkate alınmakta) olmasının frekansları etkileyip etkilemeyeceğini görmek için Şekil 13 'te verilen sonlu eleman modeli kullanılarak kütsüz çözümler bulunmuştur. Tablo 3 'te baraj temelinin kütleli (temelin atalet ve rijitlik etkileri dikkate alınmakta) ve kütsüz (temelin sadece rijitlik etkisi dikkate alınmakta) olması halleri için elde edilen çözümler karşılaştırılmaktadır. Söz konusu çözümlerde rezervuardaki suyun hacimsel elastisite modülü $1\beta_0$ alınmıştır. Tablodan görüleceği gibi temelin kütsüz olması yüzey salınım frekanslarını etkilememektedir. Her iki durum için elde edilen yüzey salınım frekanslarının sayısı 11 olup, bunlar birbirlerinin aynısıdır. Temelin kütsüz alınması yüzey salınım frekansları dışındaki frekans değerlerinde artış meydana getirmektedir.

Rezervuarın frekanslar üzerindeki etkisini görmek için Şekil 13 'te verilen sonlu eleman modelinin boş hali dikkate alınarak baraj-temel sisteminin modal analizi yapılmıştır. Baraj-temel sisteminin 1. yanal eğilme frekansı 4.134 Hz olarak elde edilmiştir. Aynı frekans baraj-rezervuar-temel sistemi için 3.387 Hz olarak hesaplanmıştır. Sonuçlardan görüldüğü gibi rezervuarın dikkate alınması frekansları küçültmektedir.

4.3. Asinkronize Dinamik Analiz

Bu kısımda baraj-rezervuar-temel sisteminin asinkronize dinamik analizi, yer hareketinin yatay ve düşey bileşenleri için ayrı ayrı yapılmıştır. Asinkronize yatay ve düşey yer hareketinin baraj-rezervuar-temel sistemi sonlu eleman modeline (Şekil 13) uygulanışı Şekil 44 a ve b 'de gösterilmektedir. Baraj-rezervuar-temel sisteminin sonlu eleman modeliyle ilgili malzeme özellikleri Bölüm 4.1 'de verilmiştir. Yer hareketi olarak 13 Mart 1992 Erzincan depreminin doğu-batı (E-W), kuzey-güney (N-S) ve düşey (V) ivme bileşenleri seçilmiştir (Şekil 9-11). 1992 Erzincan depreminin yukarıda bahsedilen kayıtları ile ilgili ayrıntılı bilgi Bölüm 3.4 'te verilmiştir. Doğru-batı (E-W) ve kuzey-güney (N-S) bileşenleri asinkronize yer hareketinin yatay yönde etkimesi durumunda, düşey (V) bileşen ise asinkronize yer hareketinin düşey yönde etkimesi durumunda dikkate alınmaktadır. Asinkronize dinamik analizler Mulsap [92] programı kullanılarak 250 m/s, 500 m/s, 1000 m/s, 2000 m/s ve sonsuz deprem dalgası yayılma hızları için yapılmıştır. Ayrıca, sonsuz hız durumu sonuçlarıyla karşılaştırmak amacıyla söz konusu depremin her üç ivme bileşeni için SAP IV [100] programı kullanılarak klasik dinamik analizler de yapılmıştır. Hem Mulsap [92] ve hem de SAP IV [100] programları kullanılarak

Tablo 3: Baraj temelinin kütleli ve kütsüz olması durumları için elde edilen frekanslar.

Mod Numarası	Frekans (Hz)	
	Kütleli	Kütsüz
1	0.04395	0.04395
2	0.04883	0.04883
3	0.07673	0.07673
4	0.08687	0.08687
5	0.09368	0.09368
6	0.10330	0.10330
7	0.11140	0.11140
8	0.12290	0.12290
9	0.13680	0.13680
10	0.15440	0.15440
11	0.17830	0.17830
12	3.387	3.415
13	4.161	4.188
14	5.033	5.072
15	6.670	6.803
16	7.753	8.599
17	8.346	9.571
18	9.018	9.798
19	9.871	10.770
20	10.760	11.440
21	10.780	12.150
22	11.250	12.600
23	11.780	13.410
24	12.090	14.530
25	12.950	14.640
26	13.770	15.490
27	14.090	16.280
28	14.410	16.340
29	14.760	16.600
30	14.910	17.470

yapılan analizlerde yerdeğiştirmeler 0.002 saniyelik, gerilmeler 0.01 saniyelik zaman aralığında hesaplanmıştır. Önce, asinkronize yer hareketinin gerilme ve hidrodinamik basınçların zamanla değişimleri üzerindeki etkisini görmek için seçilen değişik Gauss integrasyon noktalarında karşılaştırmalar yapılmıştır. Daha sonra elde edilen gerilmelerin maksimumları ortak sistemin çeşitli kesitlerinde karşılaştırılmıştır. Söz konusu karşılaştırmalar I-I, II-II, III-III ve IV-IV kesitlerinde yapılmıştır (şekil 44). I-I, II-II ve III-III kesitleri; gerilmelerin sırasıyla baraj temelinde, baraj tabanında ve baraj kretine yakın kısımda yatay uzaklıkla değişimini görmek için, IV-IV kesiti ise gerilmelerin yükseklik boyunca değişimini görmek için gözönüne alınmıştır. IV-IV kesiti baraj temelinden başlayıp baraj kretine kadar devam etmektedir. I-I, II-II ve III-III kesitlerindeki değişimler eleman orta noktalarında hesaplanan mutlak maksimum gerilmeler dikkate alınarak çizilmiştir. IV-IV kesitindeki değişimler ise elemanların memba tarafı köşe Gauss integrasyon noktalarında hesaplanan mutlak maksimum gerilmelerin ortalaması alınarak çizilmiştir. Ayrıca baraj memba yüzeyinde meydana gelen hidrodinamik basınç eğrileri de çizilmiştir. Bu eğriler, rezervuarın baraj memba yüzeyine bitişik elemanlarının söz konusu yüzeye yakın Gauss integrasyon noktalarında oluşan mutlak maksimum hidrodinamik basınçlar dikkate alınarak çizilmiştir. Baraj memba yüzeyi hidrodinamik basınç eğrilerinin çiziminde, iki elemanın birleştiği yere yakın Gauss integrasyon noktalarındaki hidrodinamik basınçların ortalaması alınmaktadır.

4.3.1. Asinkronize Yatay Yer Hareketine Göre Analiz

4.3.1.1. Baraj-Rezervuar-Temel Etkileşimi

Baraj-rezervuar-temel sisteminin asinkronize yatay yer hareketine göre asinkronize dinamik analizi için ortak sistemin temeli dört bölgeye (şekil 44-a) ayrılmıştır [121]. 0-105 m arası 1. bölge, 105-223.125 m arası 2. bölge, 223.125-335.75 m arası 3. bölge ve 335.75-408.25 m arası 4. bölge olarak dikkate alınmıştır. Bölge uzunlukları sırasıyla 105 m, 118.125 m, 112.625 m ve 72.5 m' dir. Yukarıda uzunlukları verilen bölgeler boyunca deprem yer hareketi ivmesinin genliği ve frekans içeriğinin değişmediği kabul edilmektedir. Ayrıca, deprem dalgasının yayılma hızı tüm bölgeler boyunca sabit alınmaktadır. Her bölgeye varış zamanı (τ), l_r/W_g ifadesi ile hesaplanmaktadır. Bu ifadedeki l_r belirli bir referans noktasından her bir

bölgenin başlangıcına olan mesafeyi, V_s ise deprem dalgasının yayılma hızını göstermektedir. Deprem dalgası yayılma hızının azalması varış zamanlarını arttırmaktadır. Örneğin, 250 m/s dalga yayılma hızı için 1., 2., 3. ve 4. bölgelere varış zamanları sırasıyla 0.0, 0.42 s, 0.8925 s ve 1.343 saniyedir. Deprem dalgasının sonsuz hızla yayılması durumunda ise tüm bölgeler için 0.0 saniyelik varış zamanları dikkate alınmaktadır. Bu ise bir bölgeci duruma yani klasik dinamik analize karşılık gelmektedir.

Baraj-rezervuar-temel sisteminin zemin yerdeğiştirmelerinin Şekil vektörleri (r vektörleri); bir bölgedeki mesnet noktalarına yatay doğrultuda birim yerdeğiştirme verilip diğer bölgelerdeki mesnet noktaları sabit tutulmak suretiyle elde edilmektedir. Mesnet noktalarındaki yerdeğiştirimin birim olarak elde edilmesi için formülasyon kısmında da bahsedildiği gibi ceza (penalty) metodu [57-58] kullanılmaktadır. Şöyleki, sistem rijitlik matrisinde r vektörünün hesaplanacağı BZSD 'ne karşılık gelen diyagonal terime büyük bir rijitlik eklenmekte ve bu rijitlik değerine eşdeğer bir yük söz konusu seberstlik derecesine uygulanarak statik analiz yapılmaktadır. Mesnet noktalarının yatay yöndeki yerdeğiştirmesi birim olarak elde edilinceye kadar bölgelerdeki mesnet noktalarının yatay yöndeki rijitlikleri artırılmalıdır. Mesnet noktalarının rijitliklerinin artırılması söz konusu noktalarda kullanılan sınır elemanların (boundary elements) yay rijitliğinin artırılmasıyla sağlanmaktadır. Yay rijitliği değerinin artırılması baraj-rezervuar-temel sisteminin Lagrange yaklaşımına dayalı özdeğer analizinde rijit cisim modları (rigid body modes) gibi sayısal problemlerin ortaya çıkmasına sebep olmaktadır. Bu nedenle, Lagrange yaklaşımına dayalı sıvı-yapı sistemlerinin çözümlerinde yay rijitliği değerinin seçimi hassasiyet gerektirmekte ve kullanılan modele ve malzeme özelliklerine göre değişmektedir. Şekil 44-a 'da verilen sonlu eleman modeli için yay rijitliğinin $1.0E14$ N/m seçilmesi yeterli olmaktadır. Rezervuarın sonuçlar üzerindeki etkisini görmek için dikkate alınan baraj-temel sisteminin (Şekil 44-a 'da verilen sonlu eleman modelinin rezervuarsız haline karşılık gelmektedir) özdeğer analizinde ise yay rijitliğinin artırılması problem çıkartmamaktadır. Dolayısıyla, problemin çıkışına sıvı ortam sebep olmaktadır.

Baraj-rezervuar-temel sistemi için hesaplanan dört r vektörü Şekil 45-48 'de noktalı çizgi ile gösterilmektedir. Şekillerden görüldüğü gibi rezervuar-temel ve rezervuar-baraj arayüzeylerinde yüzey normali doğrultusundaki yerdeğiştirmeler sürekli olmaktadır. Söz konusu yüzeylerde yüzey normali doğrultusundaki sürekliliğin sağlanması için formülasyon kısmında da bahsedildiği gibi rijit kafes elemanlar kullanılmıştır. Priscu ve diğer. [16], r vektörlerinin toplamı sonucunda sistemin her düğüm noktasında bir birimlik hareket olması gerektiğini vurgulamaktadır. Söz konusu durumu kontrol amacıyla baraj-rezervuar-temel sisteminin dört

bölgesi için hesaplanan r vektörleri toplandığında, baraj-rezervuar-temel sisteminin her düğüm noktasında bir birimlik yatay yerdeğiştirme meydana gelmektedir. Düşey doğrultuda ise yok denecek kadar küçük yerdeğiştirmeler oluşmaktadır. Asinkronize yatay yer hareketi durumunda r vektörleri toplandığında baraj-rezervuar-temel sistemi yatay yönde rijit cisim hareketi yapmaktadır (Şekil 49).

Asinkronize dinamik analizde kullanılacak olan yer hareketi ivme kaydının integrasyonu sonucunda elde edilen yerdeğiştirme, kayıt süresi sonunda sıfırla bitmelidir. Çünkü, zahiri-statik yerdeğiştirmelerin hesabında, denklem (49), ivme kaydının integrasyonu sonucunda elde edilen yerdeğiştirmeler kullanılmaktadır. Dolayısıyla, ivme kaydının eksen düzeltilmesi yapılmalıdır. Deprem kayıtlarının kayıt sonrası değerlendirilmesi ile ilgili ayrıntılı bilgi Bölüm 3 'te verildiğinden burada bahsedilmeyecektir.

Deprem dalgası yayılma hızının sonsuz olması durumunda baraj-rezervuar-temel sisteminin herhangi bir düğüm noktasında elde edilecek zahiri-statik yatay yerdeğiştirme hem frekans içeriği hem de genlik bakımından analizde kullanılan yer ivmesi kaydının yerdeğiştirmesine eşit olması gerekir. Kontrol amacıyla baraj-rezervuar-temel sisteminin baraj kretinde sonsuz hız durumunda 1992 Erzincan depremi doğu-batı (E-W) bileşeninden dolayı meydana gelen zahiri-statik yatay yerdeğiştirmenin zamanla değişimi Şekil 50 'de çizilmiştir. Şekilden görüldüğü gibi zahiri-statik yatay yerdeğiştirmenin zamanla değişimi, doğu-batı (E-W) bileşeni ivme kaydının integrasyonu sonucu elde edilen yerdeğiştirmenin değişimiyle (Şekil 9) hem frekans içeriği hem de genlik açısından aynı olmaktadır. Sonsuz hız durumunda baraj kretinde elde edilen maksimum zahiri-statik yatay yerdeğiştirme 17.56 cm' dir. 1992 Erzincan depremi doğu-batı bileşeninin integrasyonu sonucu elde edilen maksimum yerdeğiştirme ise 17.55 cm' dir. Görüldüğü gibi sonuçlar birbirine çok yakın çıkmaktadır. Ayrıca, sonsuz hız durumunda zahiri-statik düşey yerdeğiştirmelerin tüm düğüm noktalarında $1.0E-32$ mertebesinde çıkması r vektörlerinin doğru hesaplandığını göstermektedir.

MULSAP [92] programı kullanılarak sonsuz hız durumu için elde edilen sonuçlar, SAP IV [100] programı sonuçlarına çok yakın çıkması gerekir. Çünkü, sonsuz hız durumu klasik dinamik analize karşılık gelmektedir. Söz konusu durumu kontrol amacıyla bir kaç karşılaştırma yapılmıştır. Erzincan depreminin doğu-batı (E-W) bileşeni kullanılarak MULSAP [92] ve SAP IV [100] programlarından elde edilen baraj kreti yatay ve düşey dinamik yerdeğiştirmelerinin mutlak maksimumları Tablo 4 'te, zamanla değişimleri ise Şekil 51 ve 52 'de verilmektedir. Her iki programdan hesaplanan yerdeğiştirmeler frekans içeriği ve genlik açısından birbirine çok

yakın çıkmaktadır. Benzer karşılaştırma baraj memba (B) ve mansap (D) topuğu Gauss integrasyon noktalarında elde edilen mutlak maksimum yatay (σ_{yy}), düşey (σ_{zz}) ve kayma (σ_{yz}) gerilmeleri üzerinde de yapılmış ve sonuçlar Tablo 5 'te verilmiştir. Tablonun incelenmesinden gerilme değerlerinin tümünün birbirine çok yakın çıktığı gözlenmiştir.

Tablo 4: MULSAP [92] ve SAP IV [100] programları kullanılarak baraj-rezervuar-temel sisteminin baraj kretinde elde edilen mutlak maksimum yatay ve düşey dinamik yerdeğişirmeler.

Program	Baraj kreti yatay dinamik yerdeğişirmesi (cm)	Baraj kreti düşey dinamik yerdeğişirmesi (cm)
MULSAP [92]	8.2289	2.5818
SAP IV [100]	8.2283	2.5816

Tablo 5: MULSAP [92] ve SAP IV [100] programları kullanılarak baraj-rezervuar-temel sisteminin baraj memba (B) ve mansap (D) topuklarındaki Gauss integrasyon noktalarında elde edilen mutlak maksimum gerilmeler.

Program	Baraj memba topuğu (B) gerilmeleri (kN/m ²)			Baraj mansap topuğu (D) gerilmeleri (kN/m ²)		
	σ_{yy}	σ_{zz}	σ_{yz}	σ_{yy}	σ_{zz}	σ_{yz}
MULSAP [92]	3687.6	11764.0	4549.1	4662.3	5962.7	4580.0
SAP IV [100]	3687.4	11764.0	4548.9	4662.1	5962.3	4579.7

Ayrıca her iki programdan elde edilen gerilme ve hidrodinamik basınçların zamanla değişimlerini görmek için de karşılaştırmalar yapılmıştır. Baraj mansap topuğu Gauss integrasyon noktasında (D) her iki program kullanılarak elde edilen gerilme bileşenlerinin zamanla değişimleri Şekil 53-55 te verilmektedir. Şekillerden görüldüğü gibi yatay (σ_{yy}), düşey (σ_{zz}) ve kayma (σ_{yz}) gerilmeleri frekans içeriği ve genlik bakımından birbirine çok yakın

çıkılmaktadır. Aynı durum E Gauss integrasyon noktasında çizilen hidrodinamik basınçlar için de geçerlidir (Şekil 56). Sonuçların aynı veya birbirine çok yakın çıkması, geliştirilerek kullanılan MULSAP [92] programının güvenilirliğini teyit etmektedir.

4.3.1.1.1. Asinkronize Yatay Yer Hareketinin Gerilme ve Hidrodinamik Basınçların Frekans İçerikleri Üzerindeki Etkisi

Asinkronize yatay yer hareketinin ilk olarak gerilme ve hidrodinamik basınçların frekans içerikleri üzerindeki etkisi araştırılmıştır. Daha sonra ise, çeşitli kesitlerdeki maksimum gerilme ve baraj memba yüzeyindeki maksimum hidrodinamik basınçların değişimleri incelenmiştir. Analizlerde 1992 Erzincan depreminin doğu-batı (E-W) bileşeni kullanılmıştır.

Asinkronize yatay yer hareketi durumunda gerilme ve hidrodinamik basınçların frekans içeriklerinin yükseklik boyunca değişip değişmediğini görmek amacıyla gerilmeler için A, B, C Gauss integrasyon noktaları; hidrodinamik basınçlar için ise E, F, G Gauss integrasyon noktaları seçilmiştir (Şekil 44-a). Gerilme ve hidrodinamik basınçların zamanla değişimlerinin karşılaştırılmalarında 250 m/s, 2000 m/s ve sonsuz dalga yayılma hızları dikkate alınmıştır. Baraj temeli tabanındaki A Gauss integrasyon noktasında yukarıda verilen dalga yayılma hızları için elde edilen yatay (σ_{yy}), düşey (σ_{zz}) ve kayma (σ_{yz}) gerilmelerinin zamanla değişimleri Şekil 57-59 'da verilmektedir. Şekil 57-59 'dan görüldüğü gibi her üç gerilme bileşeninin zamanla değişimleri deprem dalgası yayılma hızından etkilenmektedir. Deprem dalgası yayılma hızının azalması gerilmelerin hem genliğini hem de frekans içeriğini değiştirmektedir. Gerilmelerin zamanla değişimleri zahiri-statik yatay yerdeğiştirmelerin zamanla değişimlerine benzemektedir. Özellikle 250 m/s dalga yayılma hızı için hesaplanan tüm gerilme bileşenlerinde söz konusu durum açık olarak görülmektedir.

Baraj memba topuğundaki B Gauss integrasyon noktasında 250 m/s, 2000 m/s ve sonsuz dalga yayılma hızları için hesaplanan gerilme bileşenlerinin zamanla değişimleri Şekil 60-62 'de verilmektedir. Baraj temelinden yükseldikçe gerilme bileşenlerinin zamanla değişimleri frekans içeriği açısından baraj temelindeki A Gauss integrasyon noktasında elde edilenlerden biraz farklı olmaktadır. Özellikle düşey gerilmelerin zamanla değişimleri deprem dalgasının yayılma hızı arttıkça sonsuz hız durumundakine yaklaşmaktadır. Bu durum, baraj temelinden yükseldikçe zahiri-statik yerdeğiştirmelerin özellikle düşey gerilmeler üzerindeki etkisinin azalmasından kaynaklanmaktadır.

Baraj kreti yakınındaki C Gauss integrasyon noktasında elde edilen gerilmelerin zamanla değişimleri Şekil 63-65 'te çizilmiştir. Şekil 64 'ten görüldüğü gibi, C Gauss integrasyon noktasında zahiri-statik yerdeğiştirmelerin özellikle düşey gerilmelerin (σ_{zz}) frekans içeriği üzerindeki etkisi yok denecek kadar azdır. Zahiri-statik yerdeğiştirmelerin, yatay (σ_{yy}) ve kayma (σ_{yz}) gerilmelerinin (Şekil 63 ve 65) frekans içerikleri üzerindeki etkisinde ise düşey (σ_{zz}) gerilmelerdeki kadar olmasada yine azalma gözlenmektedir. B Gauss integrasyon noktasında olduğu gibi, baraj temelinden yükseldikçe ve deprem dalgası yayılma hızı arttıkça C Gauss integrasyon noktasındaki gerilmeler de frekans içeriği bakımından sonsuz hız durumundakine yaklaşmaktadır.

E Gauss integrasyon noktasındaki hidrodinamik basıncın zamanla değişimi 250 m/s ve 2000 m/s dalga yayılma hızları için Şekil 66 'da, sonsuz dalga yayılma hızı için ise Şekil 56-b 'de verilmektedir. Hidrodinamik basıncın frekans içeriğinin yükseklik boyunca asinkronize yer hareketinden etkilenip etkilenmediğini görmek amacıyla F ve G Gauss integrasyon noktalarındaki değişimleri de çizilmiştir (Şekil 67-68). Asinkronize yer hareketi frekans içeriği bakımından hidrodinamik basınçları çok az etkilemektedir. Söz konusu durum ise, zahiri-statik yerdeğiştirmelerin hidrodinamik basınçlar üzerindeki etkisinin çok az olduğunu göstermektedir.

4.3.1.1.2. Asinkronize Yatay Yer Hareketinin Gerilme ve Hidrodinamik Basınçların Genlikleri Üzerindeki Etkisi

Buraya kadar asinkronize yatay yer hareketinin hem gerilme hem de hidrodinamik basınçların frekans içerikleri üzerindeki etkisi incelendi. Şimdi ise yukarıda bahsedilen Gauss integrasyon noktalarına yakın alınan çeşitli kesitlerdeki mutlak maksimum gerilmeler ve baraj memba yüzeyindeki mutlak maksimum hidrodinamik basınçlar genlik açısından incelenecektir. Bu incelemeler için yapılan asinkronize dinamik analizlerde deprem dalgası yayılma hızları 250 m/s, 500 m/s, 1000 m/s, 2000 m/s ve sonsuz olarak seçilmiştir. Yukarıda verilen dalga yayılma hızlarına göre baraj-rezervuar-temel sisteminin I-I kesitinde hesaplanan yatay (σ_{yy}), düşey (σ_{zz}) ve kayma (σ_{yz}) gerilmeleri Şekil 69-71 'de verilmektedir. Şekil 69 'dan görüldüğü gibi yatay gerilme (σ_{yy}), 250 m/s dalga yayılma hızı için tüm kesit boyunca en büyük değerleri almaktadır. Dalga yayılma hızının artması gerilme değerlerini sonsuz hız durumuna yaklaştırmaktadır.

Sonsuz hız durumunda elde edilen yatay gerilme (σ_{yy}) değerleri özellikle 250 m/s dalga yayılma hızı kullanılarak bulunanlarla karşılaştırıldığında aradaki fark çok büyük olmaktadır. Bunun I-I kesitinin temele çok yakın olmasından ve yer hareketinin yatay yönde etkimesinden kaynaklandığı düşünülmektedir. Çünkü, baraj temeline yakın kısımlarda mesnet noktalarının birbirine göre rölatif hareketlerinden meydana gelen zahiri-statik etkiler çok büyük olmaktadır. Düşey gerilmelerde (σ_{zz}) de dalga yayılma hızının azalmasıyla özellikle baraj tabanına yakın kısımlarda sonsuz hız durumuna göre büyük artışlar meydana geldiği Şekil 70 'ten görülmektedir. Fakat, buradaki fark yatay gerilmelerdeki kadar çok bariz olmamaktadır. Çünkü, ortak sistemin asinkronize dinamik analizinde yatay yöndeki hareket dikkate alınmıştır. Dolayısıyla, mesnet noktalarının birbirlerine göre rölatif hareketinden meydana gelen zahiri-statik yerdeğiştirmelerin düşey gerilmeler üzerindeki etkisi yatay yöndeki kadar olmamaktadır. I-I kesitindeki kayma gerilmelerinde (σ_{yz}) de yatay gerilmelerde olduğu gibi önemli derecede artışlar meydana gelmektedir (Şekil 71).

II-II kesitinde meydana gelen gerilmelerin yatay uzaklıkla değişimini incelemeyden önce, baraj memba (B) ve mansap topuğu (D) gerilmelerinde asinkronize yatay yer hareketinden dolayı meydana gelen artışlar araştırılmıştır. 250 m/s ve sonsuz dalga yayılma hızları için baraj memba (B) ve mansap (D) topuğu Gauss integrasyon noktalarında hesaplanan mutlak maksimum yatay (σ_{yy}), düşey (σ_{zz}) ve kayma (σ_{yz}) gerilmeleri Tablo 6 'da verilmektedir. Tablo 6 'da parantez içersindeki değerler, 250 m/s dalga yayılma hızı için elde edilen gerilmelerin sonsuz hız durumundakilere bölümünden hesaplanmıştır. Tablo 6 'dan görüldüğü gibi yatay (σ_{yy}) ve kayma (σ_{yz}) gerilmelerinde deprem dalgasının asinkronize hareketinden dolayı büyük artışlar meydana gelmektedir. Özellikle baraj memba topuğu yatay gerilmesinde (σ_{yy}) 6 katına varan artışlar olmaktadır. Düşey gerilmelerde (σ_{zz}) ise baraj memba topuğunda azalma gözlenmektedir. Bunun ise baraj temelinden yükseldikçe zahiri-statik yerdeğiştirmelerin düşey gerilmeler üzerindeki etkisinin azalmasından kaynaklanabileceği düşünülmektedir.

Asinkronize yatay yer hareketinin baraj tabanına yakın kısımdaki gerilmeler üzerindeki etkisini görmek için II-II kesiti gözönüne alınmıştır. Söz konusu kesit boyunca elde edilen gerilme bileşenlerinin değişimleri Şekil 72-74 'te verilmektedir. Şekil 72 'den görüldüğü gibi yatay gerilmeler (σ_{yy}) deprem dalgası yayılma hızının azalmasıyla tüm kesit boyunca artmakta,

Tablo 6: Baraj-rezervuar-temel sisteminin baraj memba (B) ve mansap (D) topuklarındaki Gauss integrasyon noktalarında 250 m/s ve sonsuz dalga yayılma hızları (asinkronize yatay yer hareketi) için hesaplanan mutlak maksimum gerilmeler.

Hızlar (m/s)	Baraj memba topuğu (B) gerilmeleri (kN/m ²)			Baraj mansap topuğu (D) gerilmeleri (kN/m ²)		
	σ_{yy}	σ_{zz}	σ_{yz}	σ_{yy}	σ_{zz}	σ_{yz}
250	22185.0 (6.02)	10290.0 (0.87)	13040.0 (2.87)	26023.0 (5.58)	8006.1 (1.34)	13337.0 (2.91)
Sonsuz	3687.6	11764.0	4549.1	4662.3	5962.7	4580.0

özellikle 250 m/s dalga yayılma hızı için en büyük değerlere ulaşmaktadır. II-II kesitindeki düşey gerilmelerin (σ_{zz}) yatay uzaklıkla değişiminde aynı durum gözlenmemektedir (Şekil 73).

Burada baraj tabanının memba ve mansap tarafında sonsuz hız durumunda elde edilen düşey gerilmeler sonlu hız durumunda elde edilen gerilmelerden daha büyük çıkmaktadır. II-II kesitinde meydana gelen kayma gerilmelerinde (σ_{yz}) ise, deprem dalgasının sonlu hızla yayılması durumunda barajın memba ve mansap tarafında artışlar gözlenmektedir (Şekil 74). Barajın ortasına yakın kısımda ise sonsuz hız durumunda daha büyük gerilme meydana gelmektedir.

Baraj kretine yakın alınan III-III kesitindeki gerilme bileşenlerinin yatay uzaklıkla değişimleri Şekil 75-77 'de verilmektedir. Yatay (σ_{yy}) ve kayma (σ_{yz}) gerilmelerinin memba tarafından mansap tarafına doğru tüm hız durumları için arttığı Şekil 75 ve 77 'den gözlenmektedir. Düşey gerilmeler ise (σ_{zz}) memba tarafından baraj ortasına doğru azalmakta ve baraj ortasından mansap tarafına doğru artmaktadır (Şekil 76). III-III kesitinde meydana gelen tüm gerilme bileşenleri sonsuz hız durumunda daha büyük çıkmaktadır. Söz konusu durum ise zahiri-statik yerdeğiştirmelerin baraj temelinden itibaren yükseldikçe gerilmeler üzerindeki etkisinin azaldığını göstermektedir. Dolayısıyla, dinamik yerdeğiştirmeler ön plana çıkmaktadır. Kaynak [16] 'da belirtildiği gibi deprem dalgasının sonlu hızla yayılması dinamik yerdeğiştirmeleri azaltmaktadır. Dinamik yerdeğiştirmelerin azalması ise gerilmelerin azalmasına

neden olmaktadır.

Baraj-rezervuar-temel sisteminde gerilmelerin yükseklik boyunca değişimini görmek için IV-IV kesiti dikkate alınmıştır (Şekil 44-a). IV-IV kesitindeki yatay (σ_{yy}), düşey (σ_{zz}) ve kayma (σ_{yz}) gerilmelerinin yükseklikle değişimleri sırasıyla Şekil 78-80 'de verilmektedir. Şekil 78-80, 250 m/s, 500 m/s ve sonsuz dalga yayılma hızları dikkate alınarak çizilmiştir. Deprem dalgasının sonlu hızla yayılması yatay gerilmelerde (σ_{yy}) özellikle baraj tabanına yakın kısımlarda çok büyük artışlar meydana getirmektedir (Şekil 78). Baraj tabanına yakın kısımdan sonra sonlu ve sonsuz hız durumları arasındaki fark azalmaktadır. Düşey gerilmelerde (σ_{zz}) baraj tabanına kadar sonlu hız durumunda elde edilen gerilmeler daha büyük olurken, bu yükseklikten sonra daha küçük olmaktadır (Şekil 79). Bunun ise daha önce belirtildiği gibi deprem dalgasının yatay yönde dikkate alınmasından kaynaklandığı düşünülmektedir. IV-IV kesitindeki kayma gerilmelerinde (σ_{yz}) ise baraj temeli ortasına kadar sonlu hız durumu için çok büyük artışlar meydana gelirken, söz konusu kısımdan sonra aradaki fark çok azalmaktadır (Şekil 80).

Baraj memba yüzeyinde 250 m/s, 500 m/s, 1000 m/s, 2000 m/s ve sonsuz dalga yayılma hızları için meydana gelen hidrodinamik basınçların yükseklikle değişimleri Şekil 81 'de verilmektedir. Şekil 81 'den görüldüğü gibi deprem dalgası yayılma hızının azalması hidrodinamik basınçları azaltmaktadır. Bunun ise, mesnet noktalarının birbirlerine göre rölatif hareketinden meydana gelen zahiri-statik yerdeğiştirmelerin rezervuarda etkilerinin az olmasından ve asinkronize yer hareketi durumunda dinamik yerdeğiştirmelerin azalmasından kaynaklandığı düşünülmektedir.

4.3.1.2. Yer Hareketi Yerdeğiştirmesinin Sonuçlar Üzerindeki Etkisi

Yer hareketi yerdeğiştirmesinin sonuçlar üzerindeki etkisini görmek için, baraj-rezervuar-temel sisteminin asinkronize dinamik analizi 1992 Erzincan depreminin kuzey-güney (N-S) bileşeni ivme kaydı (Şekil 10) kullanılarak yapılmıştır. Analizlerde Şekil 44-a 'da verilen sonlu eleman modeli kullanılmakta ve ortak sistemin tabanı dört bölgeye ayrılmaktadır. Yukarıda sözü edilen ivme bileşeni ortak sistemin asinkronize dinamik analizinde yatay etki olarak dikkate alınmıştır.

Sonsuz hız durumunda baraj kretinde kuzey-güney (N-S) bileşeni ivme kaydından dolayı meydana gelen zahiri-statik yatay yerdeğiştirmenin zamanla değişimi Şekil 82 'de verilmektedir. Zahiri-statik yatay yerdeğiştirmenin zamanla değişimi, Şekil 10 'da verilen kuzey-güney bileşenin (N-S) yerdeğiştirilmesiyle üst üste çakışmaktadır. Maksimum zahiri-statik yerdeğiştirme 35.30 cm elde edilirken, yer hareketinin integrasyonu sonucu hesaplanan mutlak maksimum yerdeğiştirme 35.29 cm 'dir. Görüldüğü gibi sonuçlar birbirine çok yakın çıkmaktadır.

Kuzey-güney (N-S) ivme bileşenin gerilmeler üzerindeki etkisini görmek için I-I, II-II ve III-III kesitleri dikkate alınmıştır (Şekil 44-a). I-I kesitinde 250 m/s, 500 m/s ve sonsuz dalga yayılma hızları için meydana gelen yatay (σ_{yy}), düşey (σ_{zz}) ve kayma (σ_{yz}) gerilmeleri Şekil 83-85 'te verilmektedir. Şekillerden görüldüğü gibi, deprem dalgasının sonlu hızla yayılması durumunda I-I kesiti boyunca meydana gelen gerilmeler sonsuz hız durumuna göre daha büyük olmaktadır. Gerilmelerin yatay uzaklıkla değişimleri doğu-batı (E-W) bileşeni kullanılarak elde edilen gerilmelerin değişimlerine (Şekil 69-71) benzemektedir. Fakat, I-I kesiti boyunca elde edilen tüm gerilme bileşenlerinin değerleri, doğu-batı (E-W) bileşeni kullanılarak elde edilenlerden daha büyük olmaktadır. Bu durum ise, kuzey-güney (N-S) bileşeni ivme kaydının integrasyonu sonucu elde edilen yerdeğiştirme değerlerinin (Şekil 10), doğu-batı (E-W) bileşeni yerdeğiştirme değerlerinden (Şekil 9) daha büyük olmasından kaynaklanmaktadır. Çünkü, zahiri-statik yerdeğiştirmelerin hesabında ivme kayıtlarının integrasyonundan elde edilen yerdeğiştirme değerleri kullanılmakta ve özellikle yer hareketinin etkidiği bölgelere yakın kısımlarda söz konusu yerdeğiştirmeler çok etkili olmaktadır. Dolayısıyla, yer hareketi yer değiştirmesinin zamanla değişimi asinkronize dinamik analizde çok önemli olmaktadır.

Baraj tabanına yakın II-II kesitinde meydana gelen yatay (σ_{yy}), düşey (σ_{zz}) ve kayma (σ_{yz}) gerilmelerinin yatay uzaklıkla değişimleri Şekil 86-88 'de çizilmiştir. II-II kesitinde elde edilen gerilme bileşenleri yatay uzaklıkla değişim bakımından doğu-batı (E-W) ivme bileşeni kullanılarak elde edilenlere (Şekil 72-74) genel olarak benzemektedir. Kuzey-güney (N-S) ivme bileşeni kullanılarak elde edilen yatay (σ_{yy}) gerilmeler doğu-batı (E-W) bileşeninkinden daha büyük olurken, düşey (σ_{zz}) gerilmeler daha küçük olmaktadır.

Şekil 89-91 'den görüldüğü gibi III-III kesitindeki tüm gerilme bileşenleri sonsuz hız durumunda daha büyük olmaktadır. Gerilmeler yatay uzaklıkla değişim bakımından doğu-batı (E-W) bileşeni kullanılarak elde edilenlere (Şekil 75-77) benzemesine rağmen, değer bakımından daha küçük olmaktadır. Bunun ise, baraj kretine yakın bölgelerde dinamik

yerdeğiştirmelerin zahiri-statik yerdeğiştirmelere göre daha etkili olmasından kaynaklandığı düşünölmektedir. Şekil 10 'dan göröldüğü gibi kuzey-güney (N-S) bileşeni ivme kaydının genlik bakımından doğu-batı (E-W) bileşeninkinden (Şekil 9) küçöek olması yukarıda bahsedilenleri güçlendirmektedir. Baraj memba yüzeyinde meydana gelen hidrodinamik basınçlar doğu-batı (E-W) bileşeninde olduğu gibi deprem dalgasının sonlu hızla yayılması durumunda daha küçöek olmaktadır (Şekil 92).

Kuzey-güney (N-S) bileşenin gerilme ve hidrodinamik basınçların frekans içerikleri üzerinde meydana getirdiği etkiyi görmek için barajda B Gauss integrasyon noktası, rezervuarda ise E Gauss integrasyon noktası seçilmiştir (Şekil 44-a). 2000 m/s ve sonsuz dalga yayılma hızları için B Gauss integrasyon noktasında elde edilen yatay (σ_{yy}), dişey (σ_{zz}) ve kayma (σ_{yz}) gerilmelerinin zamanla değişimleri Şekil 93-95 'te verilmektedir. Şekil 93-95 'ten göröldüğü gibi, farklı bir ivme kaydı kullanılmasına rağmen, deprem dalgasının asinkronize etkisi gerilmelerin frekans içeriğini değiştirmektedir. Söz konusu değişim en bariz olarak yatay (σ_{yy}) ve kayma (σ_{yz}) gerilmelerinde görölmektedir. E Gauss integrasyon noktasında elde edilen hidrodinamik basınçların zamanla değişimleri ise Şekil 96 'da verilmektedir.

4.3.1.3. Baraj Temelinin Kütlesiz Olmasının Sonuçlar Üzerindeki Etkisi

Baraj temelinin kütlesiz olmasının sonuçları etkileyip etkilemeyeceğini görmek için kütleli (temelin atalet ve rijitlik etkisi dikkate alınmakta) ve kütlesiz (temelin sadece rijitlik etkisi dikkate alınmakta) çözümler birbirleriyle karşılaştırılmıştır. Hem kütleli hem de kütlesiz analizlerde Şekil 44-a 'da verilen sonlu eleman modeli kullanılmakta ve yer hareketi olarak 1992 Erzincan depreminin doğu-batı (E-W) bileşeni seçilmektedir. 250 m/s ve sonsuz dalga yayılma hızları için baraj kretine yakın alınan III-III kesitinde elde edilen gerilme bileşenleri Şekil 97-99 'da, baraj memba yüzeyi hidrodinamik basınçları ise Şekil 100 'de verilmektedir. Hem sonlu hem de sonsuz hız durumunda baraj temelinin kütlesiz alınması gerilmeleri ve hidrodinamik basınçları azaltmaktadır.

4.3.1.4. Rezervuarın Sonuçlar Üzerindeki Etkisi

Rezervuarın sonuçlar üzerindeki etkisini görmek amacıyla baraj-temel ve baraj-rezervuar-temel sistemlerinin asinkronize dinamik analizlerinden elde edilen sonuçlar birbirleriyle karşılaştırılmıştır. Baraj-temel etkileşiminde kullanılan sonlu eleman modeli, Şekil 44-a 'da verilen sonlu eleman modelinin rezervuarsız haline karşılık gelmektedir. Baraj-rezervuar-temel sisteminin asinkronize dinamik analizi için ise Şekil 44-a 'daki sonlu eleman modeli kullanılmıştır. Her iki modelin asinkronize dinamik analizinde baraj temeli dört bölgeye ayrılmıştır. Deprem dalgasının yatay yönde etkidiği kabul edilmekte ve dalga yayılma hızı 250 m/s ve sonsuz olarak seçilmektedir. Analizlerde 1992 depreminin doğu-batı (E-W) bileşeni gözönüne alınmıştır. Karşılaştırmalar I-I, II-II, III-III ve IV-IV kesitlerinde (Şekil 44-a) elde edilen mutlak maksimum gerilmeler üzerinde yapılmıştır. Ayrıca baraj memba topuğu Gauss integrasyon noktasında (B) çeşitli dalga yayılma hızları için meydana gelen gerilmelerin zamanla değişimleri de karşılaştırılmıştır.

I-I kesitinde barajın boş ve dolu olması durumlarında 250 m/s ve sonsuz dalga yayılma hızları için elde edilen yatay (σ_{yy}), düşey (σ_{zz}) ve kayma (σ_{yz}) gerilmeleri Şekil 101-103 'te verilmektedir. 250 m/s deprem dalgası yayılma hızı için I-I kesitinde hesaplanan tüm gerilme bileşenleri barajın boş ve dolu olmasından çok az etkilenmektedir. Söz konusu durum ise, ortak sistemin baraj temeli tabanına yakın kısmında barajın boş ve dolu olması durumlarında meydana gelen zahiri-statik yerdeğiştirmelerin çok büyük ve buna karşılık dinamik yerdeğiştirmelerin ise çok küçük olmasından kaynaklanmaktadır. Sonsuz hız durumunda beklenildiği gibi barajın dolu olması halinde yatay uzaklık boyunca genelde daha büyük gerilmeler oluşmaktadır.

II-II kesiti boyunca meydana gelen yatay (σ_{yy}), düşey (σ_{zz}) ve kayma (σ_{yz}) gerilmeleri Şekil 104-106 'da gösterilmektedir. Hem 250 m/s hem de sonsuz dalga yayılma hızları için hesaplanan gerilme bileşenlerinin tümü barajın dolu olması durumunda daha büyük olmaktadır.

III-III kesitindeki gerilmelerin yatay uzaklıkla değişimi Şekil 107-109 'da verilmektedir. Burada da II-II kesitinde gözlenenlere benzer bir durum görülmektedir. Fakat, rezervuarın etkisi II-II kesitindekilere göre daha açık bir şekilde kendisini göstermektedir. Rezervuarın dikkate alınması III-III kesiti boyunca hem sonlu hem de sonsuz hız durumlarında oluşan gerilmeleri önemli derecede arttırmaktadır.

Baraj yüksekliği boyunca alınan IV-IV kesitinde meydana gelen gerilmeler Şekil 110-112 'de verilmektedir. 250 m/s ve sonsuz dalga yayılma hızları için barajın dolu olması durumunda

daha büyük gerilmeler oluşmaktadır. Hızın sonsuz olması durumunda tüm gerilme bileşenlerinde boş ve dolu baraj çözümleri arasındaki fark çok açık olarak görülmesine rağmen, hızın sonlu olması halinde söz konusu durum sadece düşey (σ_{zz}) gerilmelerde gözükmektedir. Sonlu hız durumunda, yatay (σ_{yy}) ve kayma (σ_{yz}) gerilmelerinde boş ve dolu baraj çözümleri arasındaki farkın açıkça görülmemesi, asinkronize yer hareketinin yatay doğrultuda etkimesinden kaynaklanmaktadır. Söz konusu hareketten dolayı baraj temelinde oluşan yatay (σ_{yy}) ve kayma (σ_{yz}) gerilmeleri kret yakınında oluşanlara göre çok büyük olmaktadır. Bu ise şeklin ölçeğini küçültmektedir. Dolayısıyla, baraj kretine yakın kısımlarda oluşan gerilmeler arasındaki fark küçük görünmektedir.

Barajın dolu olması durumunda gerilmelerin frekans içeriklerinin asinkronize hareketten etkilendiği daha önceki kısımlarında bahsedilmiştir. Barajın boş olması halinde ise aynı durumun geçerli olup olmadığını görmek için baraj memba topuğu Gauss integrasyon noktasında (B) 250 m/s, 2000 m/s ve sonsuz dalga yayılma hızları için meydana gelen yatay (σ_{yy}), düşey (σ_{zz}) ve kayma (σ_{yz}) gerilmelerinin zamanla değişimleri Şekil 113-115 'te çizilmiştir. Şekillerden görüldüğü gibi barajın boş olması durumunda da asinkronize yer hareketi gerilmelerin frekans içeriklerini önemli derecede değiştirmektedir.

4.3.2. Asinkronize Düşey Yer Hareketine Göre Analiz

Burada, asinkronize düşey yer hareketinin baraj-rezervuar-temel sistemlerinin davranışı üzerindeki etkisi araştırılmaktadır. Analizlerde Şekil 44-b 'de verilen sonlu eleman modeli kullanılmakta ve deprem dalgası yayılma hızı 250 m/s, 500 m/s, 1000 m/s, 2000 m/s ve sonsuz olarak seçilmektedir. Yer hareketi olarak 1992 Erzincan depremi düşey (V) bileşeni dikkate alınmakta ve söz konusu bileşen mesnet noktalarına düşey doğrultuda uygulanmaktadır. 1992 Erzincan depremi düşey (V) ivme bileşenin eksen düzeltilmesi ile ilgili ayrıntılı bilgi Bölüm 3.4 'te verilmiştir. Zemin yerdeğiştirmelerinin şekil vektörleri (r vektörleri), baraj-rezervuar-temel tabanı dört bölgeye ayrılarak elde edilmektedir. Bölgelerin uzunlukları, Bölüm 4.3.1.1 'de asinkronize yatay yer hareketi için dikkate alınan uzunluklar kadardır. Dört bölge için elde edilen r vektörleri noktalı çizgi ile Şekil 116-119 'da gösterilmektedir. Asinkronize düşey yer hareketi durumunda r vektörleri, bir bölgedeki mesnet noktalarına düşey doğrultuda birim

yerdeğiştirme verilir, diğer bölgelerdeki mesnet noktaları tutulmak suretiyle elde edilmektedir. Mesnet noktalarındaki yay rijitliği $1.0E15$ N/m olarak seçilmiştir. r vektörleri toplandığında ortak sistemin her düğüm noktasında düşey doğrultuda birim hareket oluşmaktadır. Asinkronize düşey yer hareketi durumunda r vektörleri toplandığında sistem düşey doğrultuda rijit cisim hareketi yapmaktadır (Şekil 120). Sonsuz hız durumunda baraj kretinde hesaplanan zahiri-statik düşey yerdeğiştirmenin zamanla değişimi Şekil 121 'de verilmektedir. 1992 Erzincan depreminin düşey (V) ivme bileşeninin integrasyonu sonucu elde edilen yerdeğiştirmenin zamanla değişimi ise Şekil 11 'de çizilmiştir. Şekil 121 ve 11 'den görüldüğü gibi yerdeğiştirmelerin zamanla değişimi birbirinin aynısı çıkmaktadır. Her iki durumda da 15.67 cm 'lik maksimum yerdeğiştirme elde edilmiştir.

Asinkronize düşey yer hareketinin ilk olarak gerilme ve hidrodinamik basınçların frekans içerikleri üzerindeki etkisi araştırılmıştır. Daha sonra ise çeşitli kesitlerdeki mutlak maksimum gerilmeler ve baraj memba yüzeyindeki mutlak maksimum hidrodinamik basınçların değişimleri incelenmiştir.

Baraj memba topuğu Gauss integrasyon noktasında (B) 250 m/s, 2000 m/s ve sonsuz dalga yayılma hızları için elde edilen yatay (σ_{yy}), düşey (σ_{zz}) ve kayma (σ_{yz}) gerilmelerinin zamanla değişimleri sırasıyla Şekil 122-124 'te verilmektedir. Şekillerden görüldüğü gibi asinkronize düşey yer hareketi durumunda da deprem dalgası yayılma hızı azaldıkça gerilmelerin frekans içerikleri değişmektedir. Özellikle 250 m/s dalga yayılma hızı için söz konusu durum tüm gerilme bileşenlerinde açıkça görülmektedir. Benzer karşılaştırma rezervuarın E Gauss integrasyon noktasında oluşan hidrodinamik basınçlar üzerinde de yapılmıştır. E Gauss integrasyon noktasında 250 m/s, 2000 m/s ve sonsuz dalga yayılma hızları için hesaplanan hidrodinamik basınçların zamanla değişimleri Şekil 125 'te gösterilmektedir. Gerilmelerde gözlenen durumdan farklı olarak, deprem dalgasının sonlu hızla yayılması hidrodinamik basınçların frekans içeriklerini az etkilemektedir. Çünkü, asinkronize yatay yer hareketinde olduğu gibi burada da rezervuarda zahiri-statik yerdeğiştirmeler çok az etkili olmaktadır.

Asinkronize düşey yer hareketinin gerilmeler üzerinde meydana getirdiği artışı görmek için, baraj memba (B) ve mansap (D) topuğu Gauss integrasyon noktalarında meydana gelen maksimum yatay (σ_{yy}), düşey (σ_{zz}) ve kayma (σ_{yz}) gerilmeleri hesaplanmıştır. Bu gerilme değerleri Tablo 7 'de verilmektedir. Tablo 7 'de parentez içerisindeki ifadeler sonlu hız sonuçlarının sonsuz hız sonuçlarına oranını göstermektedir. En fazla artış yaklaşık 8 kat olarak memba topuğu yatay (σ_{yy}) gerilmesinde meydana gelmektedir.

Tablo 7: Baraj-rezervuar-temel sisteminin baraj memba (B) ve mansap (D) topuklarındaki Gauss integrasyon noktalarında 250 m/s ve sonsuz dalga yayılma hızları (asinkronize düşey yer hareketi) için hesaplanan mutlak maksimum gerilmeler.

Hız (m/s)	Baraj memba topuğu (B) gerilmeleri (kN/m ²)			Baraj mansap topuğu (D) gerilmeleri (kN/m ²)		
	σ_{yy}	σ_{zz}	σ_{yz}	σ_{yy}	σ_{zz}	σ_{yz}
250	6618.3 (8.18)	5263.5 (2.06)	4888.0 (4.69)	6124.8 (5.4)	3395.8 (2.29)	4405.0 (3.81)
Sonsuz	808.97	2550.7	1040.5	1132.2	1485.7	1155.5

Asinkronize düşey yer hareketinin baraj-rezervuar-temel sistemi üzerindeki etkisi, çeşitli kesitlerde meydana gelen mutlak maksimum gerilmeler karşılaştırılarak ta incelenmiştir. Söz konusu karşılaştırmalar I-I, II-II, III-III ve IV-IV kesitlerinde (Şekil 44-b) yapılmıştır. Analizlerde asinkronize yatay yer hareketi durumunda olduğu gibi deprem dalgası yayılma hızı 250 m/s, 500 m/s, 1000 m/s, 2000 m/s ve sonsuz seçilmiştir.

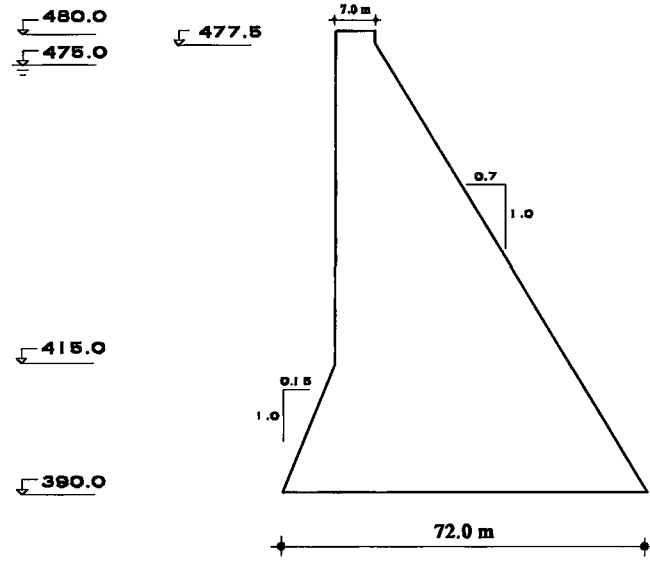
Baraj temelinde alınan I-I kesitindeki yatay (σ_{yy}), düşey (σ_{zz}) ve kayma (σ_{yz}) gerilmelerinin yatay uzaklıkla değişimleri Şekil 126-128 'de verilmektedir. Deprem dalgasının sonlu hızla yayılması durumunda tüm gerilme bileşenleri sonsuz hız durumunda elde edilenlerden daha büyük olmaktadır. I-I kesiti boyunca gerilmelerdeki en büyük artışlar 250 m/s dalga yayılma hızı için elde edilmektedir. Asinkronize yatay yer hareketi durumunda 250 m/s dalga yayılma hızı için I-I kesitinde elde edilen düşey gerilmeler (σ_{zz}), yatay gerilmelerin (σ_{yy}) yaklaşık olarak 1/5 katı olmasına rağmen, asinkronize düşey yer hareketi durumunda söz konusu gerilmeler birbirlerine yakın çıkmaktadır. Çünkü, asinkronize düşey yer hareketi durumunda baraj temeli tabanına yakın bölgelerde oluşan zahiri-statik düşey yerdeğiştirmeler artmaktadır.

II-II kesitinde elde edilen gerilme bileşenleri Şekil 129-131 'de verilmektedir. Deprem dalgasının sonlu hızla yayılması durumunda tüm gerilme bileşenleri sonsuz hız durumuna göre daha büyük olmaktadır. Gerilmeler yatay uzaklıkla değişim bakımından asinkronize yatay yer hareketinden elde edilenlere (Şekil 72-74) benzemelerine rağmen, büyüklük bakımından daha küçüktürler.

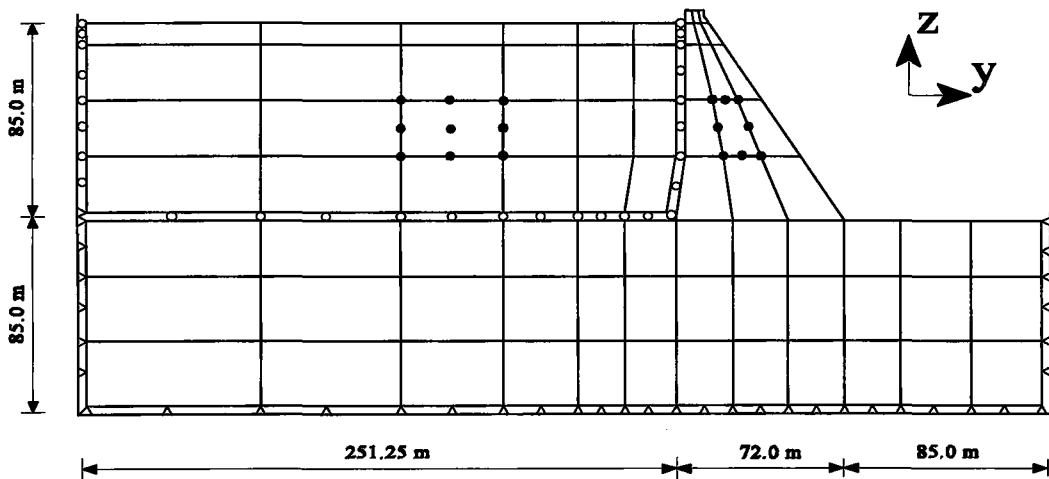
Baraj kretine yakın III-III kesitinde hesaplanan yatay (σ_{yy}), düşey (σ_{zz}) ve kayma (σ_{yz}) gerilmeleri Şekil 132-134 'te gösterilmektedir. Yatay gerilmeler (σ_{yy}), 250 m/s dalga yayılma hızı hariç, sonsuz hız için daha büyük olmaktadır. 250 m/s dalga yayılma hızı için yatay gerilmeler (σ_{yy}) sadece barajın mansap tarafında daha büyüktür (Şekil 132). Düşey gerilmeler (σ_{zz}) sonlu hız durumunda baraj memba tarafında daha büyük olurken, baraj ortası ve mansab yüzeyine yakın kısımda daha küçük olmaktadır (Şekil 133). Şekil 134 'te verilen kayma (σ_{yz}) gerilmelerinde ise sadece 250 m/s dalga yayılma hızı için elde edilenler daha büyük olmaktadır.

IV-IV kesitindeki gerilmelerin yükseklik boyunca değişimleri Şekil 135-137 'de verilmektedir. IV-IV kesitindeki karşılaştırmalar 250 m/s, 500 m/s ve sonsuz dalga yayılma hızları için yapılmaktadır. Şekil 135-137 'den görüldüğü gibi, tüm gerilme bileşenlerinde özellikle baraj gövdesi ortasına kadar dalganın sonlu hızla yayılması durumunda çok büyük artışlar meydana gelmektedir. Bu yükseklikten sonra gerilmelerdeki artış miktarı azalmaktadır.

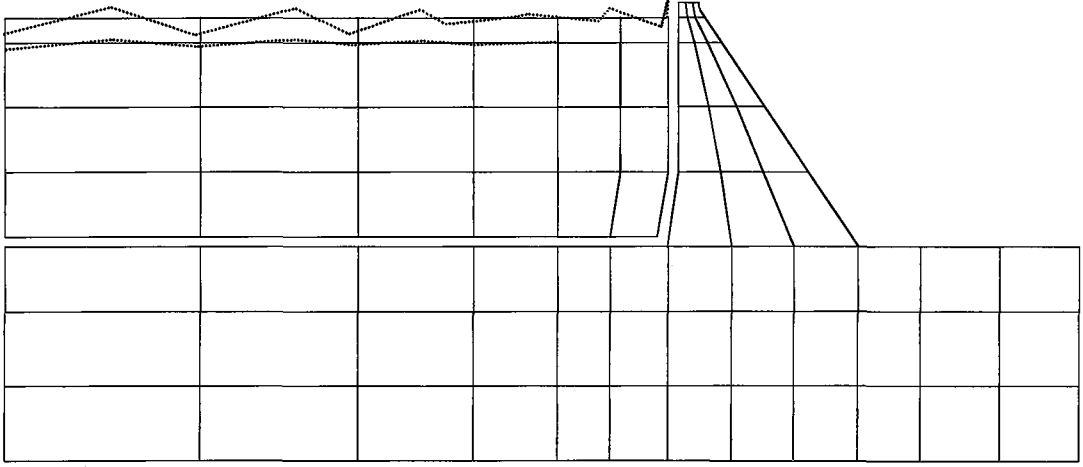
Baraj memba yüzeyi boyunca meydana gelen hidrodinamik basınçların yükseklikle değişimi Şekil 138 'de verilmektedir. Deprem dalgasının sonlu hızla yayılması durumunda hidrodinamik basınçlar genel olarak daha büyük olmaktadır.



Şekil 12: Sarıyar barajının boyutları [1].

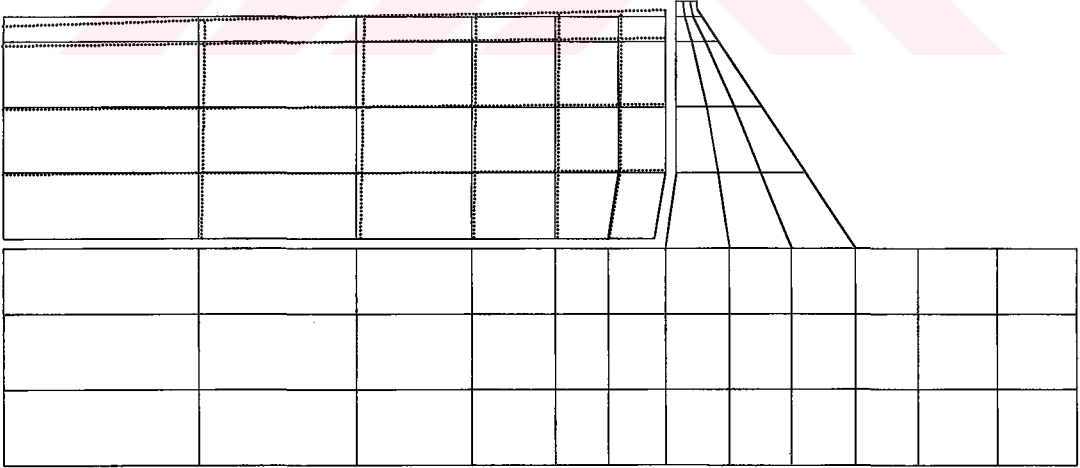


Şekil 13: Baraj-rezervuar-temel sisteminin iki boyutlu sonlu eleman modeli.



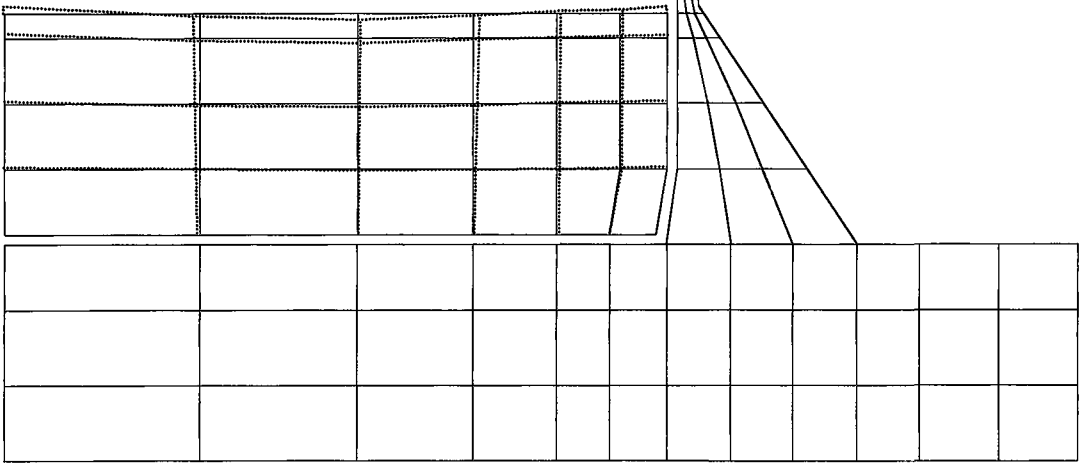
(0.04395 Hz)

Şekil 14: Baraj-rezervuar-temel sisteminin 1. mod şekli.



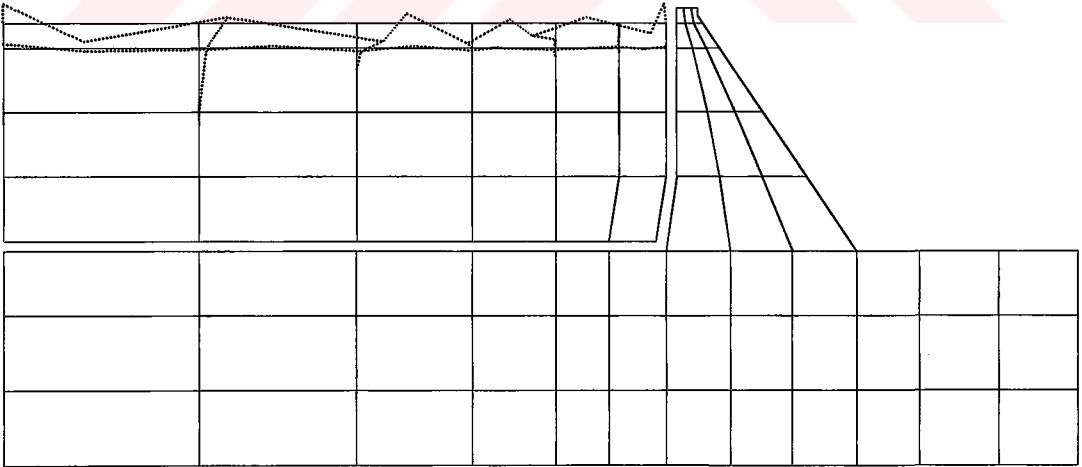
(0.04883 Hz)

Şekil 15: Baraj-rezervuar-temel sisteminin 2. mod şekli.



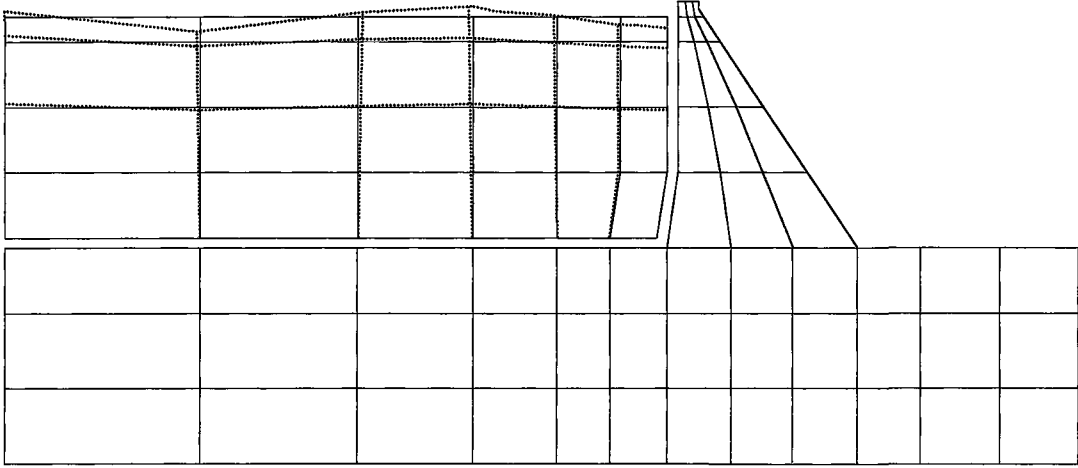
(0.07673 Hz)

Şekil 16: Baraj-rezervuar-temel sisteminin 3. mod şekli.



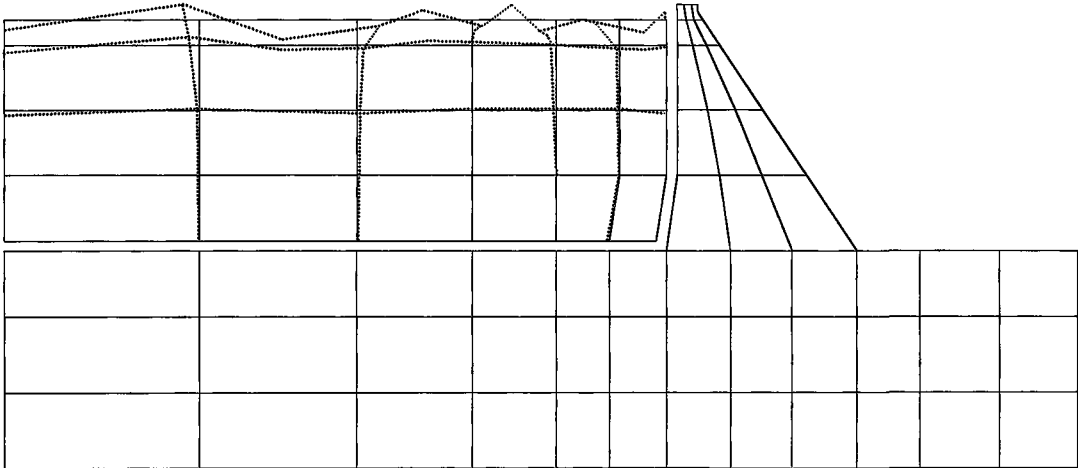
(0.08687 Hz)

Şekil 17: Baraj-rezervuar-temel sisteminin 4. mod şekli.



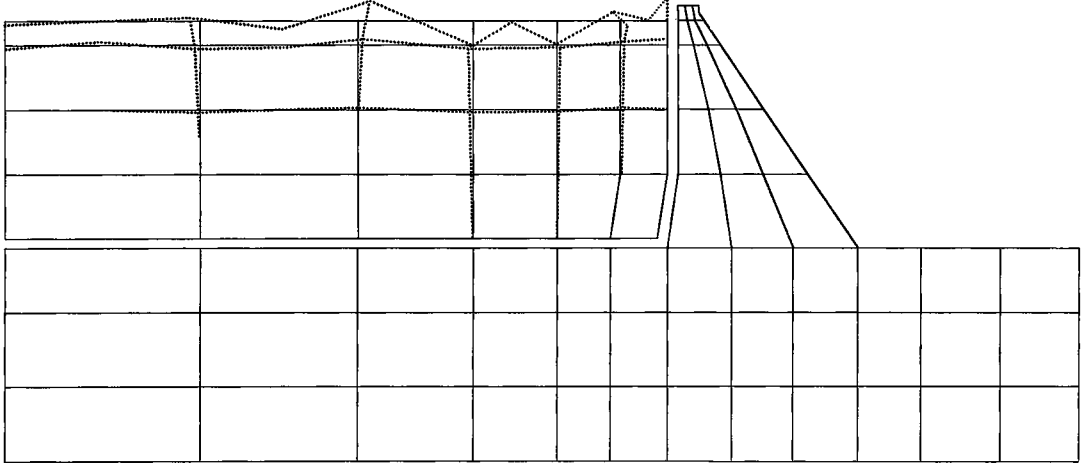
(0.09368 Hz)

Şekil 18: Baraj-rezervuar-temel sisteminin 5. mod şekli.



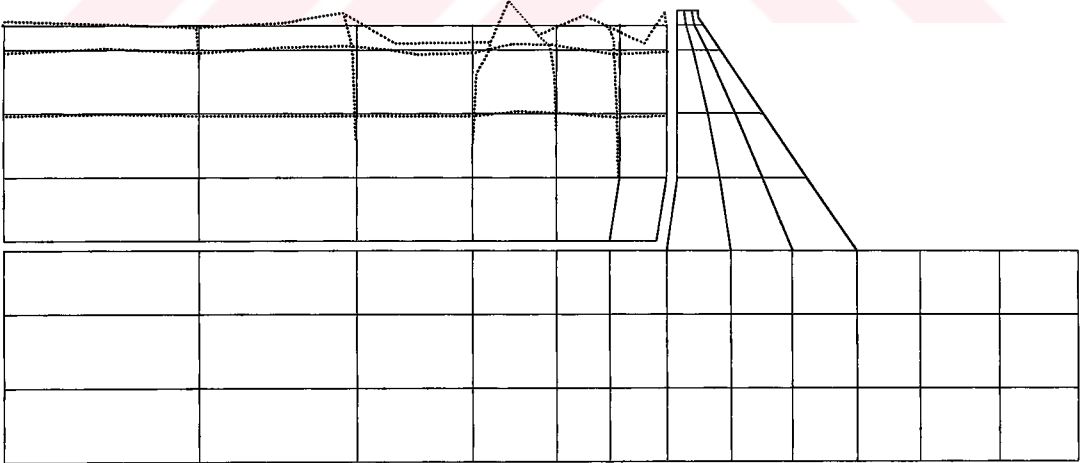
(0.10330 Hz)

Şekil 19: Baraj-rezervuar-temel sisteminin 6. mod şekli.



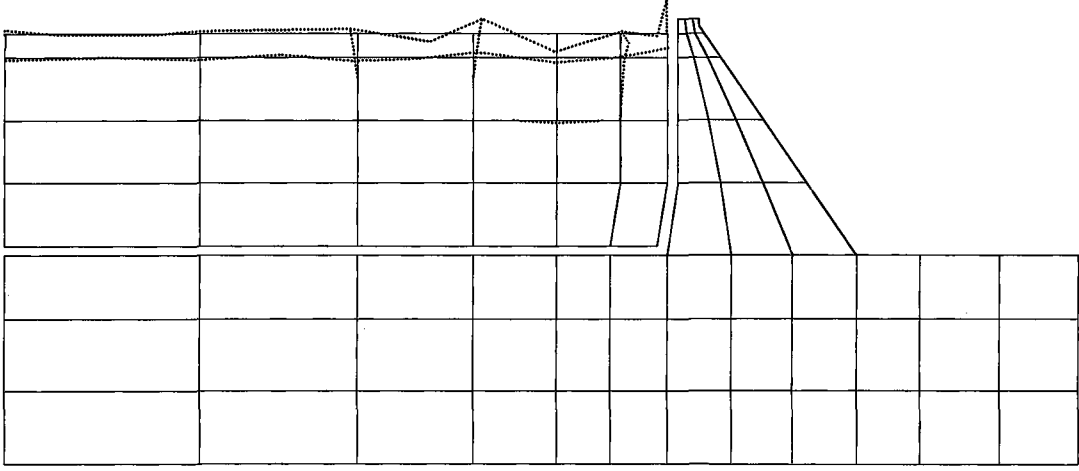
(0.11140 Hz)

Şekil 20: Baraj-rezervuar-temel sisteminin 7. mod şekli.



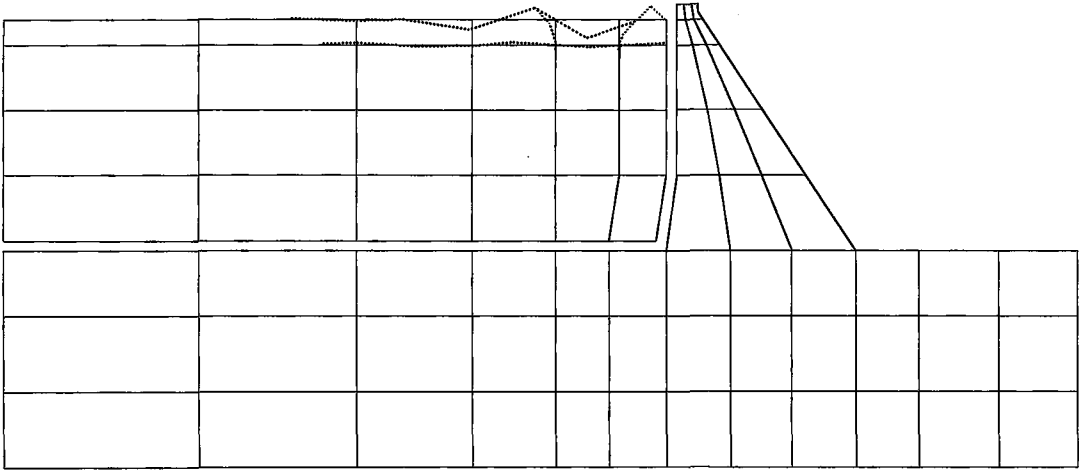
(0.12290 Hz)

Şekil 21: Baraj-rezervuar-temel sisteminin 8. mod şekli.



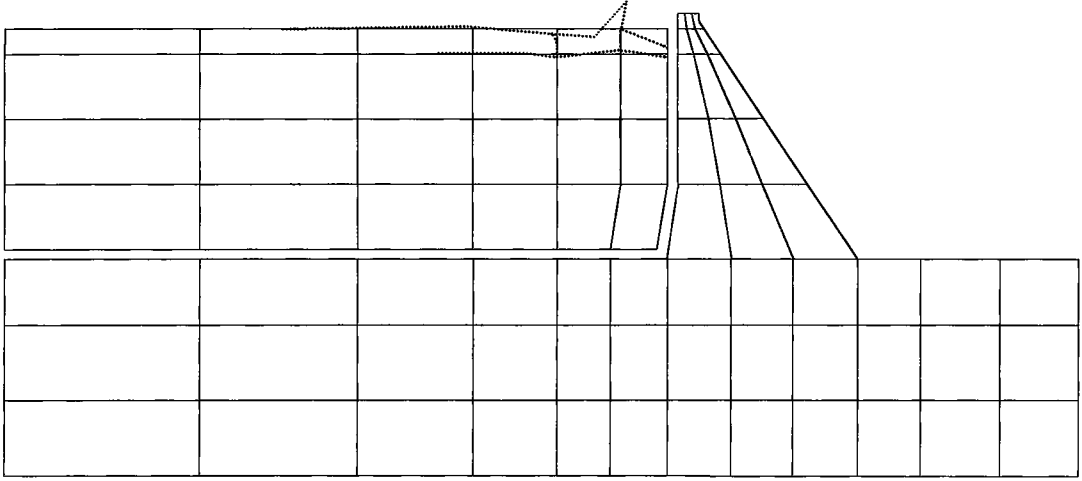
(0.13680 Hz)

Şekil 22: Baraj-rezervuar-temel sisteminin 9. mod şekli.



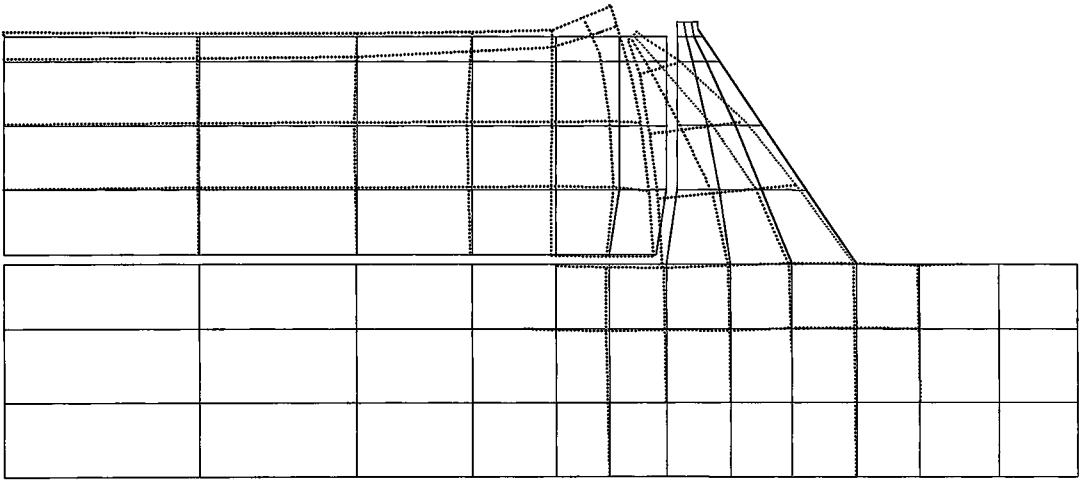
(0.15440 Hz)

Şekil 23: Baraj-rezervuar-temel sisteminin 10. mod şekli.



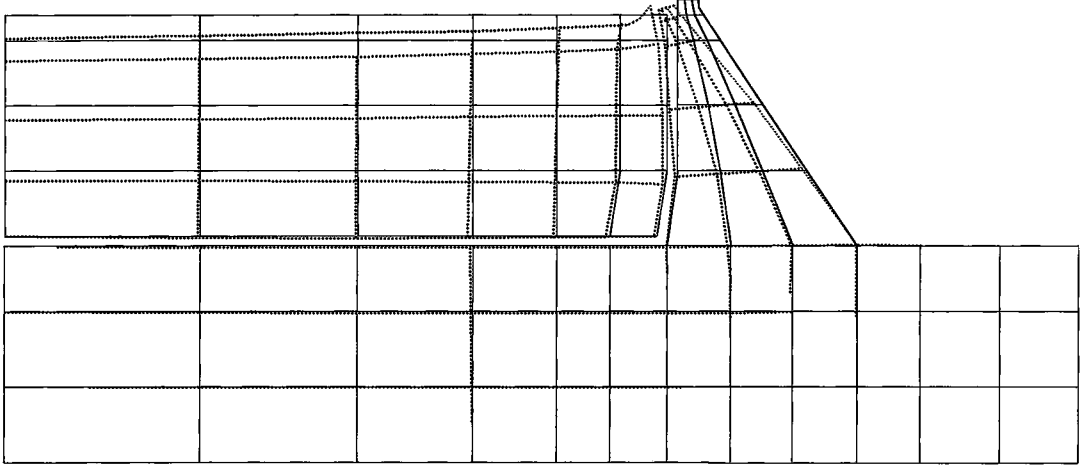
(0.17830 Hz)

Şekil 24: Baraj-rezervuar-temel sisteminin 11. mod şekli.



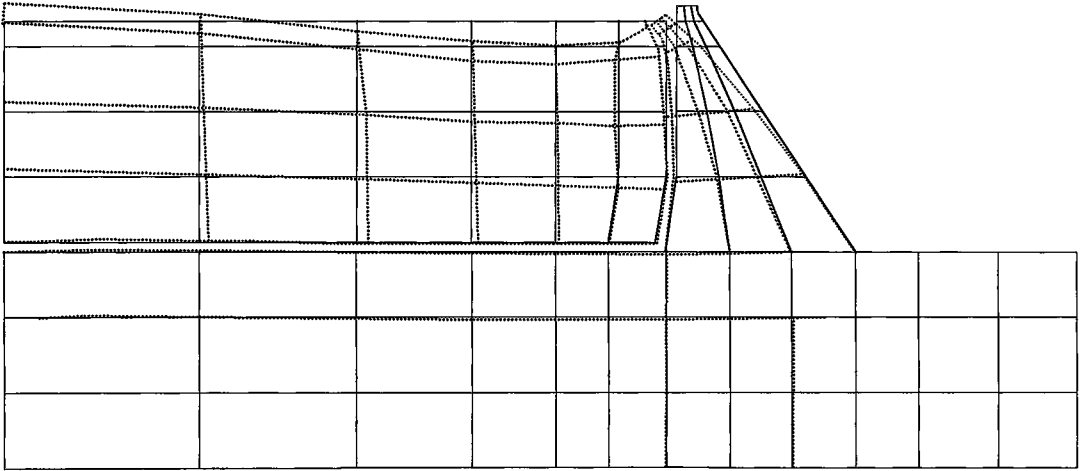
(3.387 Hz)

Şekil 25: Baraj-rezervuar-temel sisteminin 12. mod şekli.



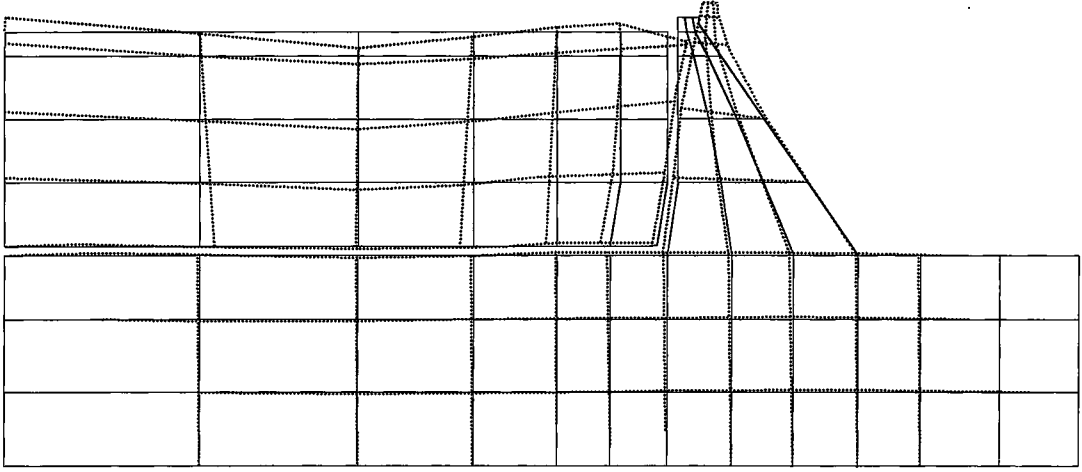
(4.161 Hz)

Şekil 26: Baraj-rezervuar-temel sisteminin 13. mod şekli.



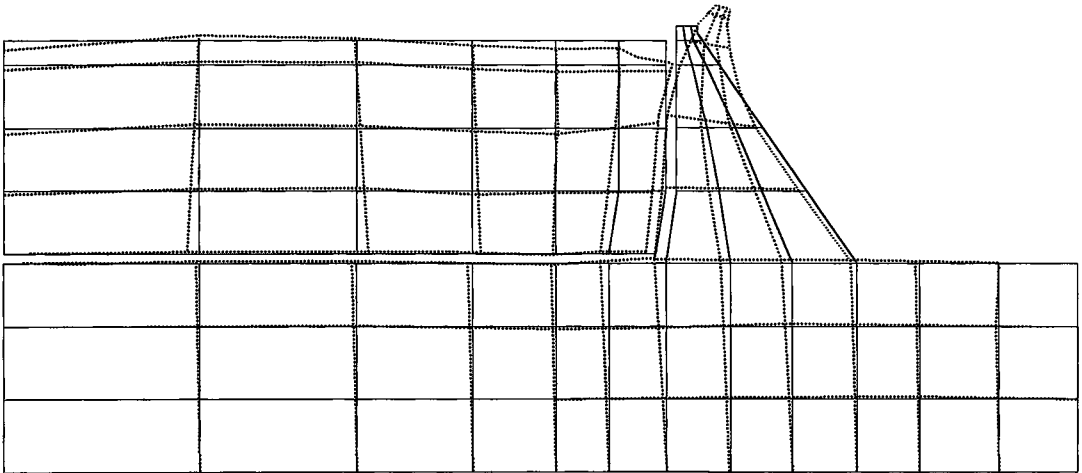
(5.033 Hz)

Şekil 27: Baraj-rezervuar-temel sisteminin 14. mod şekli.



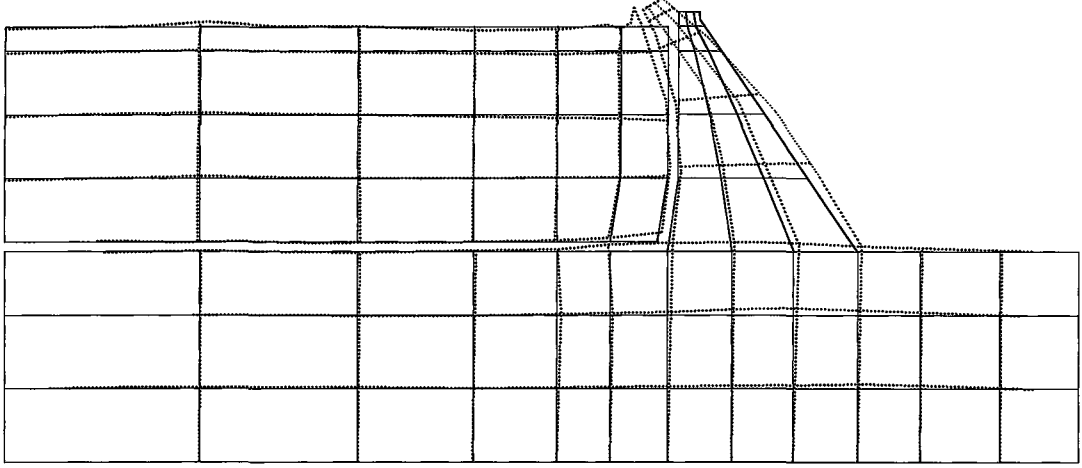
(6.670 Hz)

Şekil 28: Baraj-rezervuar-temel sisteminin 15. mod şekli.



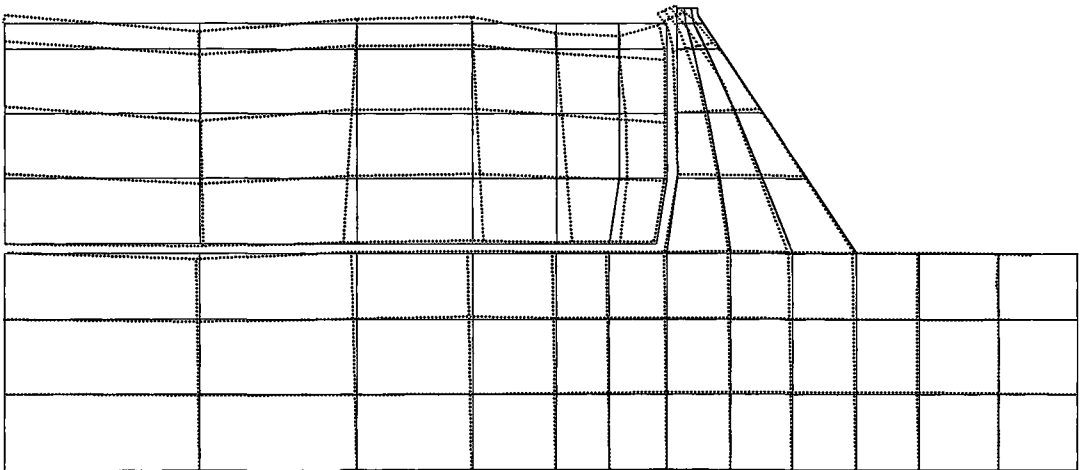
(7.753 Hz)

Şekil 29: Baraj-rezervuar-temel sisteminin 16. mod şekli.



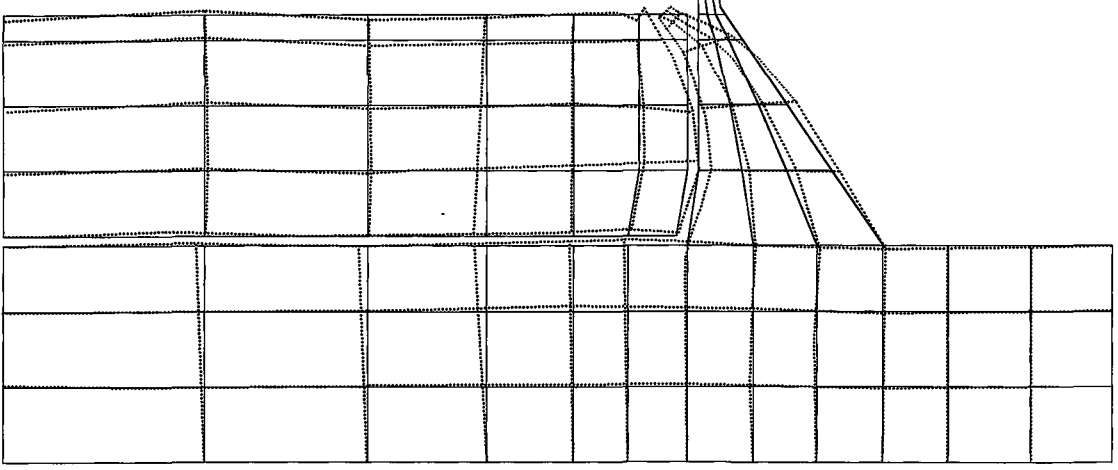
(8.346 Hz)

Şekil 30: Baraj-rezervuar-temel sisteminin 17. mod şekli.



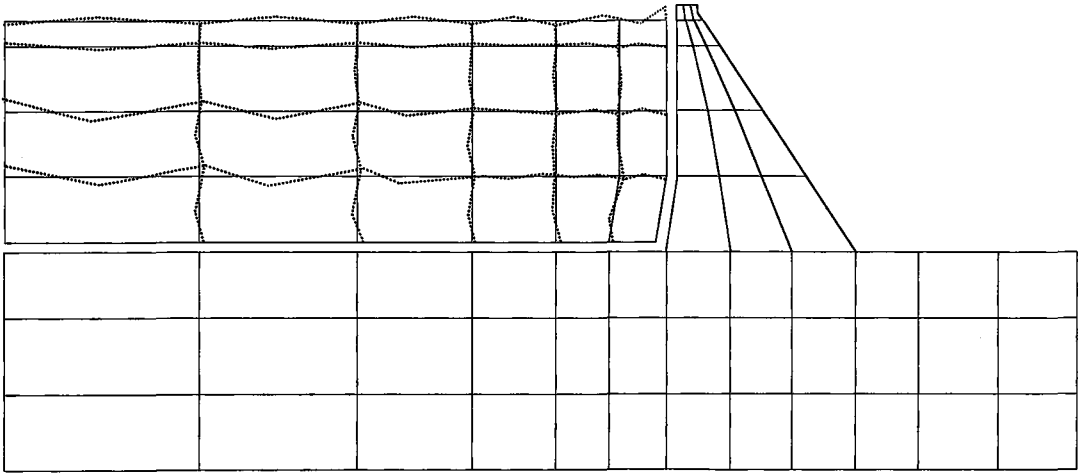
(9.018 Hz)

Şekil 31: Baraj-rezervuar-temel sisteminin 18. mod şekli.



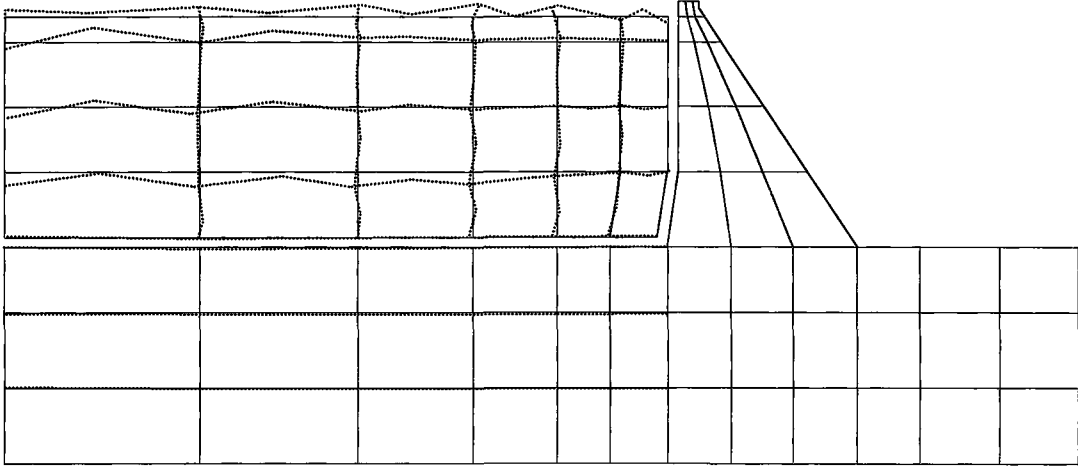
(9.871 Hz)

Şekil 32: Baraj-rezervuar-temel sisteminin 19. mod şekli.



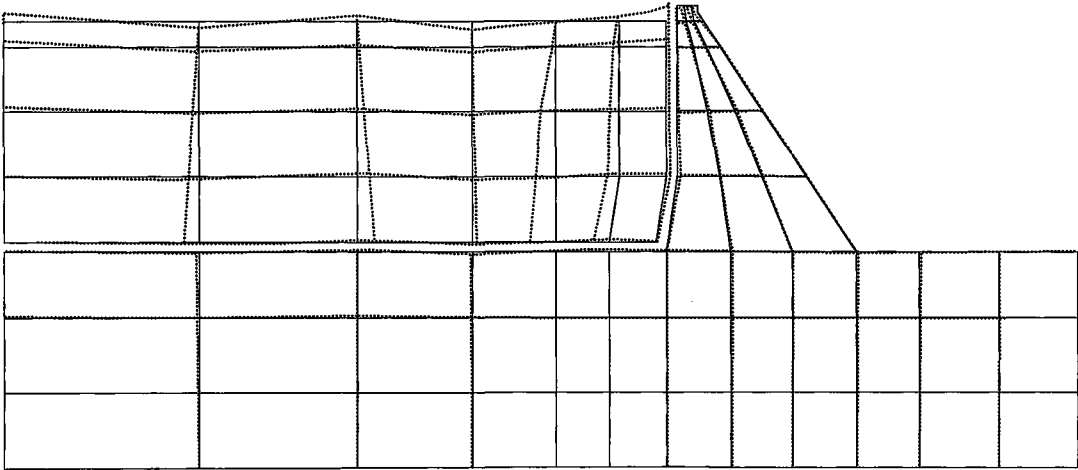
(10.760 Hz)

Şekil 33: Baraj-rezervuar-temel sisteminin 20. mod şekli.



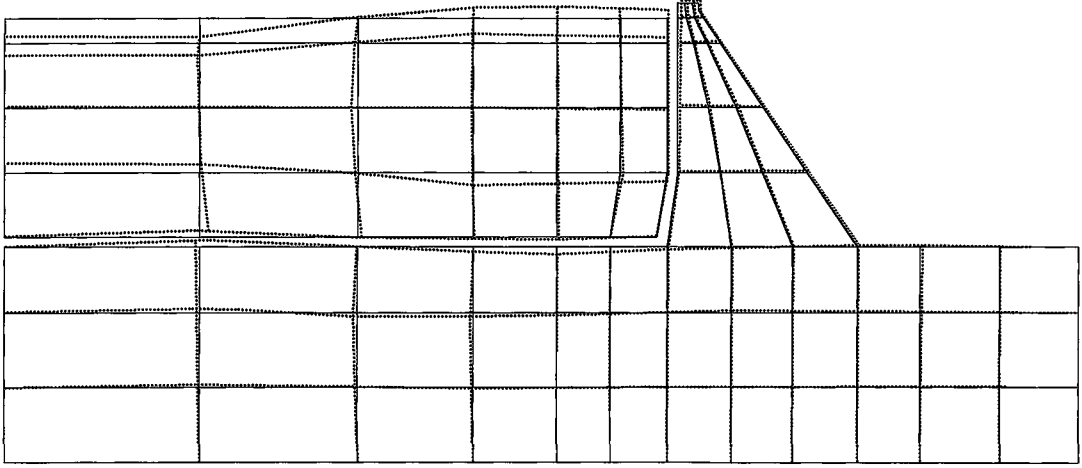
(10.780 Hz)

Şekil 34: Baraj-rezervuar-temel sisteminin 21. mod şekli.



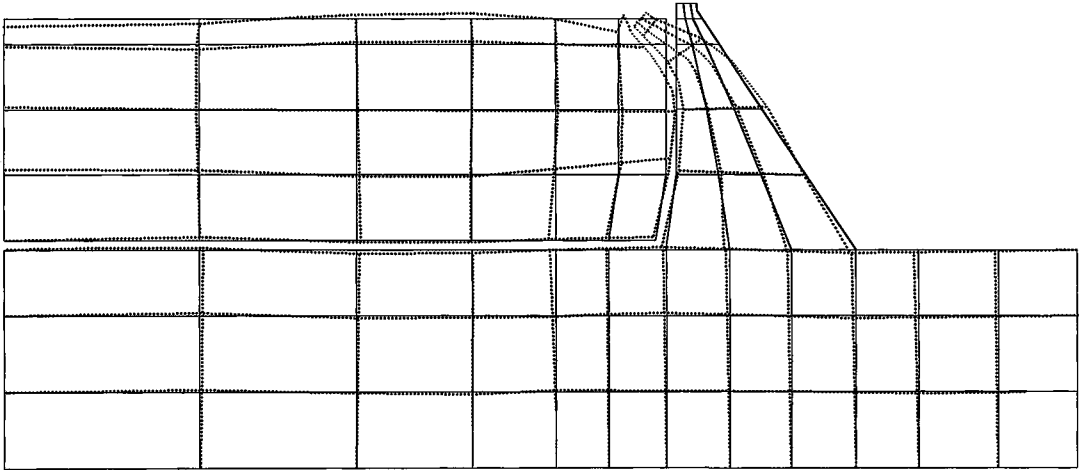
(11.250 Hz)

Şekil 35: Baraj-rezervuar-temel sisteminin 22. mod şekli.



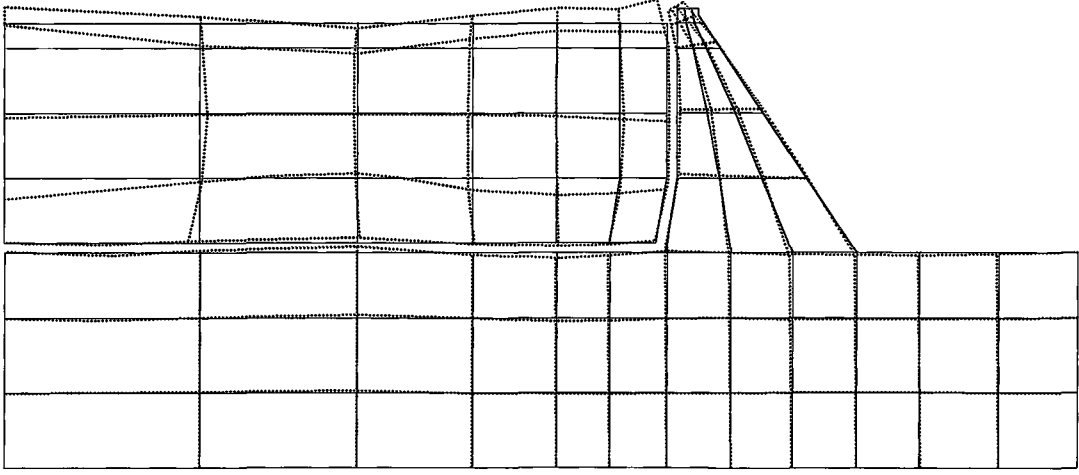
(11.780 Hz)

Şekil 36: Baraj-rezervuar-temel sisteminin 23. mod şekli.



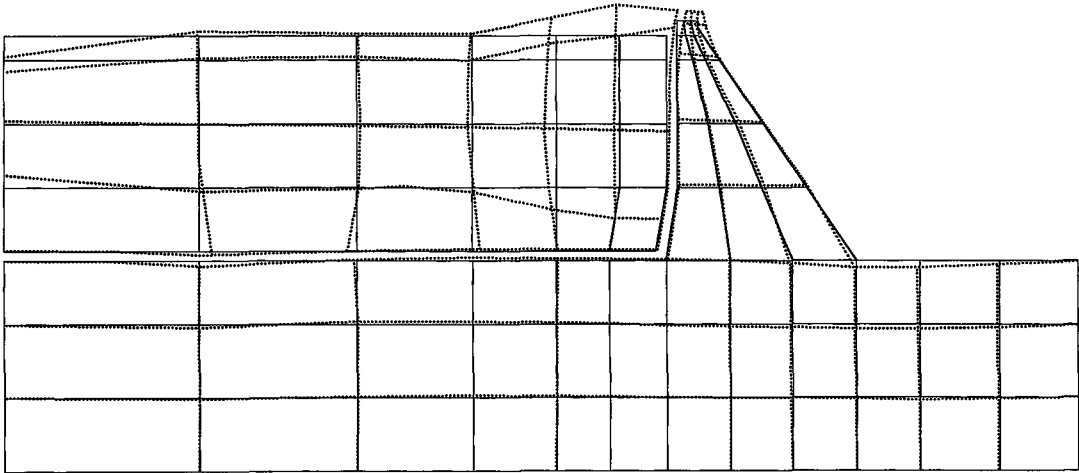
(12.090 Hz)

Şekil 37: Baraj-rezervuar-temel sisteminin 24. mod şekli.



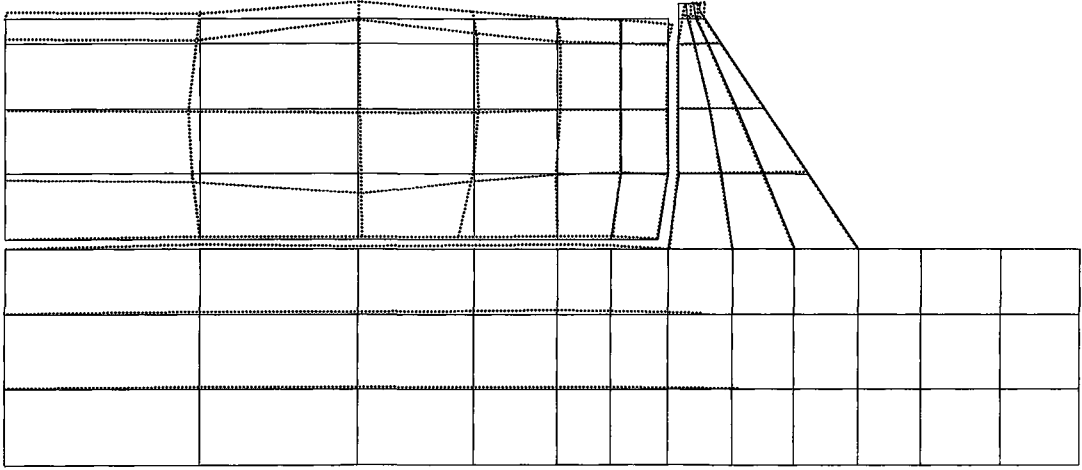
(12.950 Hz)

Şekil 38: Baraj-rezervuar-temel sisteminin 25. mod şekli.



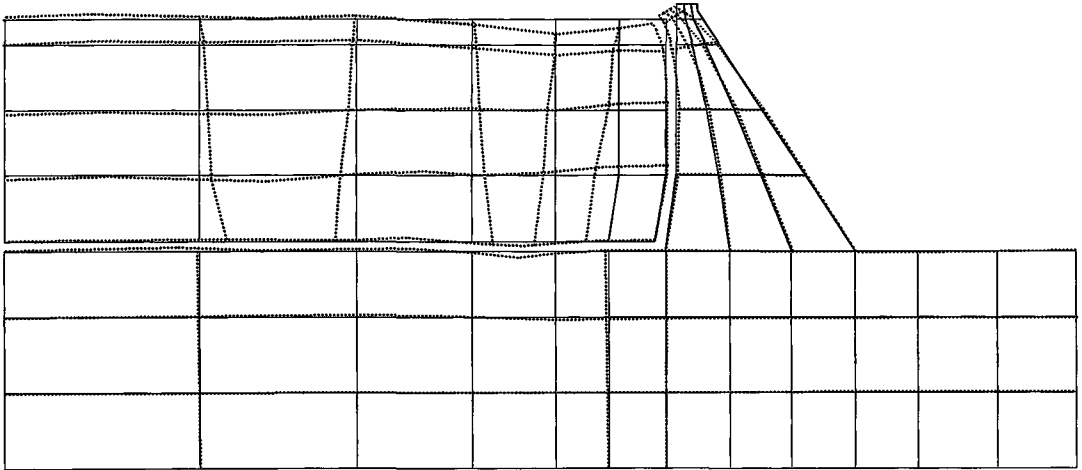
(13.770 Hz)

Şekil 39: Baraj-rezervuar-temel sisteminin 26. mod şekli.



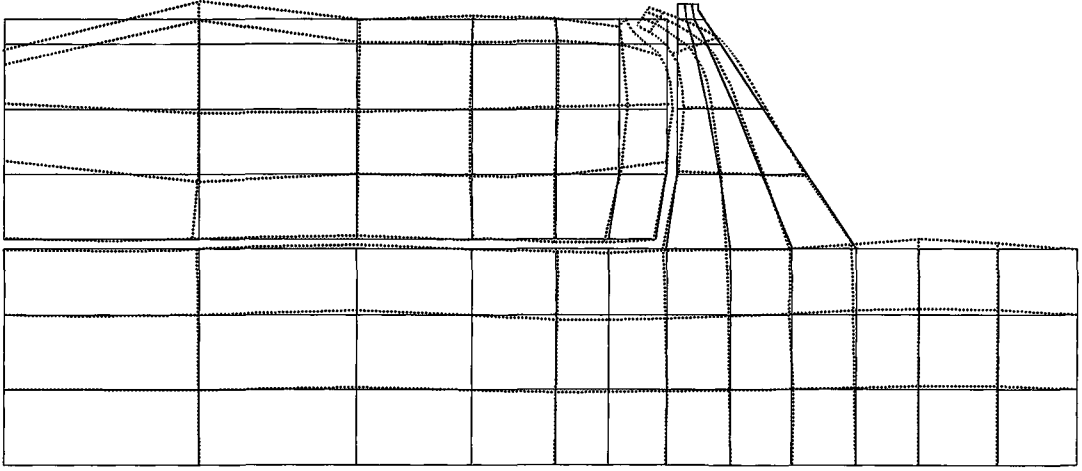
(14.090 Hz)

Şekil 40: Baraj-rezervuar-temel sisteminin 27. mod şekli.



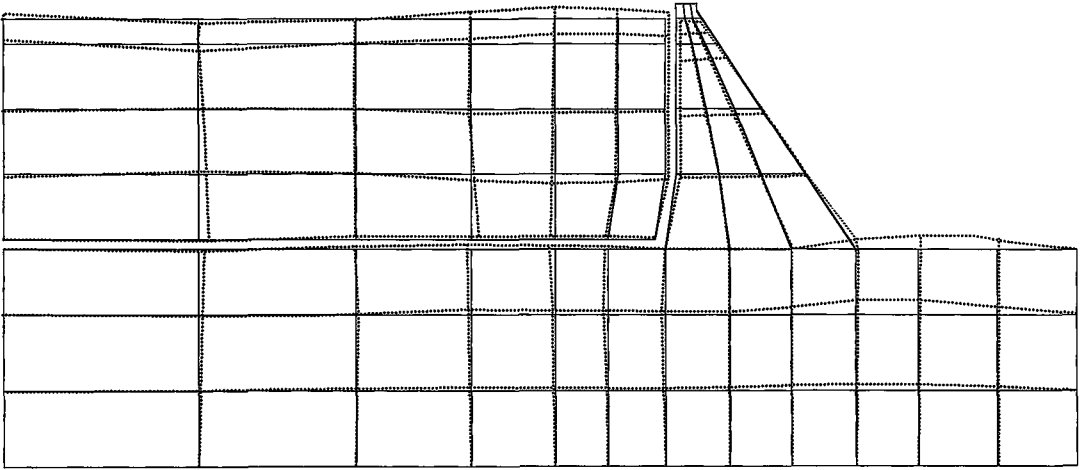
(14.410 Hz)

Şekil 41: Baraj-rezervuar-temel sisteminin 28. mod şekli.



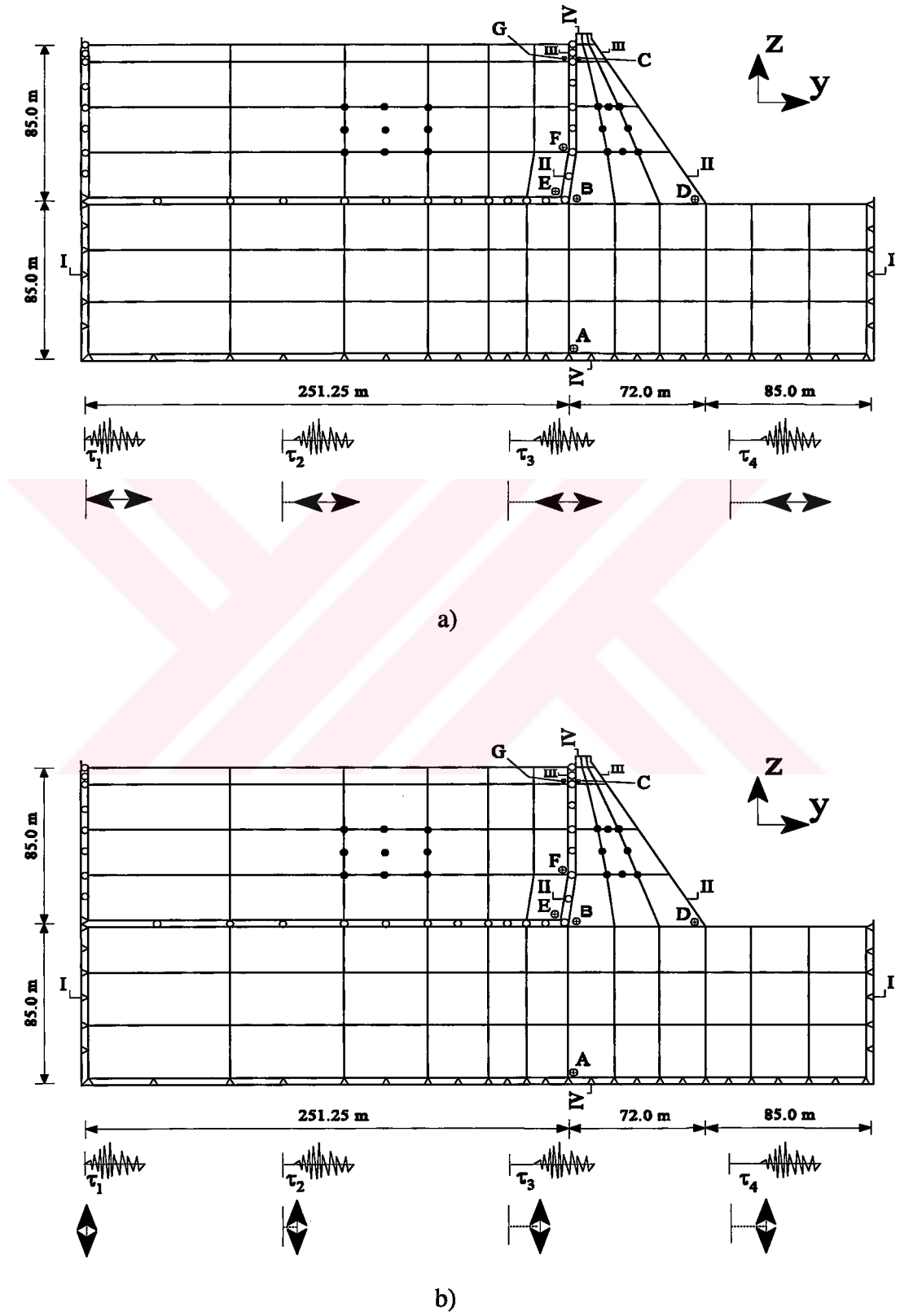
(14.760 Hz)

Şekil 42: Baraj-rezervuar-temel sisteminin 29. mod şekli.

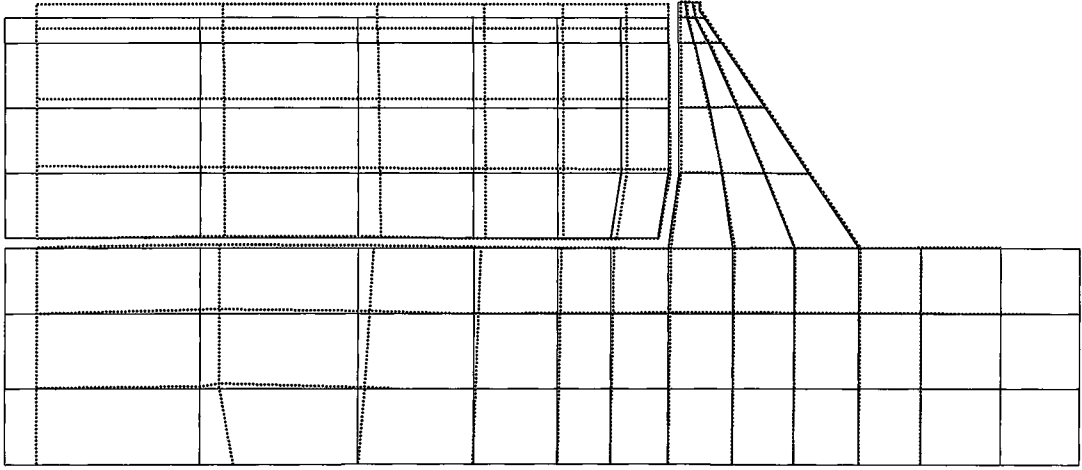


(14.910 Hz)

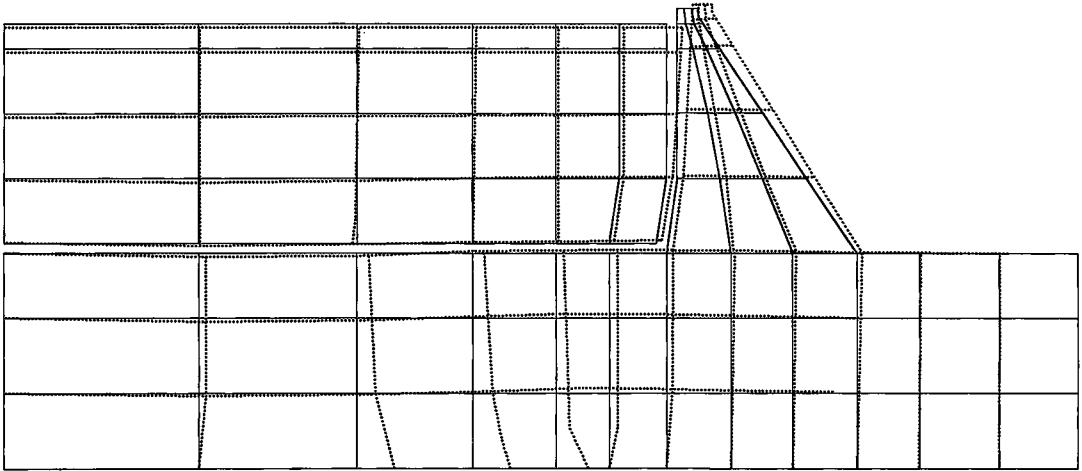
Şekil 43: Baraj-rezervuar-temel sisteminin 30. mod şekli.



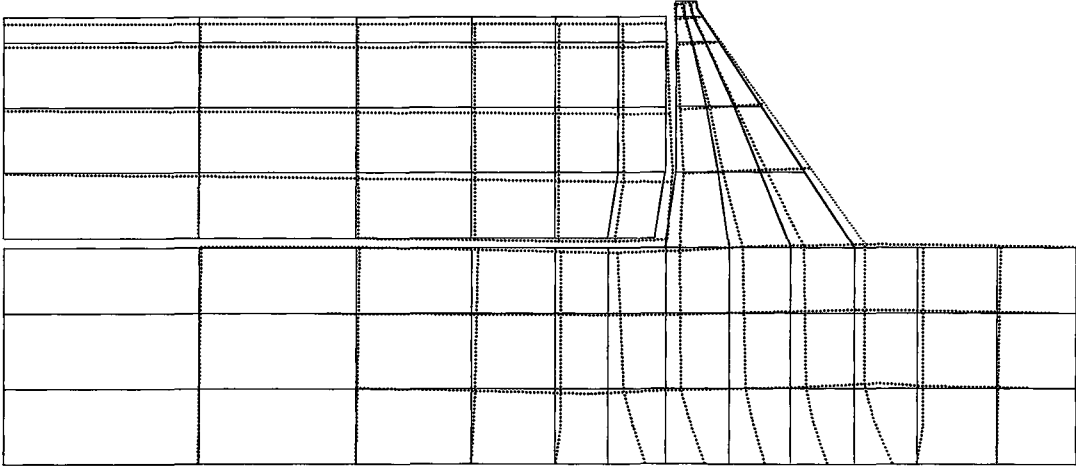
Şekil 44: Asinkronize yatay (a) ve düşey (b) yer hareketine maruz baraj-rezervuar-temel sistemi.



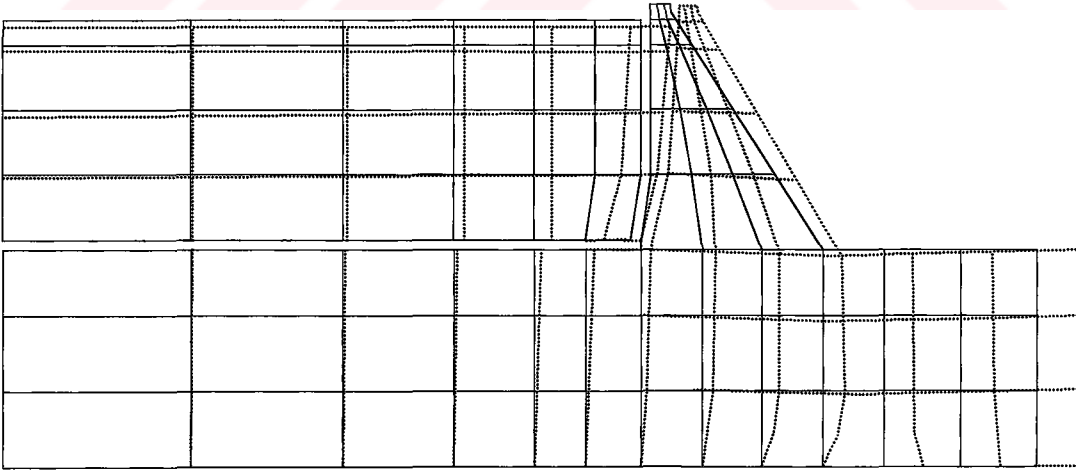
Şekil 45: Asinkronize yatay yer hareketi etkisindeki baraj-rezervuar-temel sisteminin 1. r vektörü (r_1 vektörü).



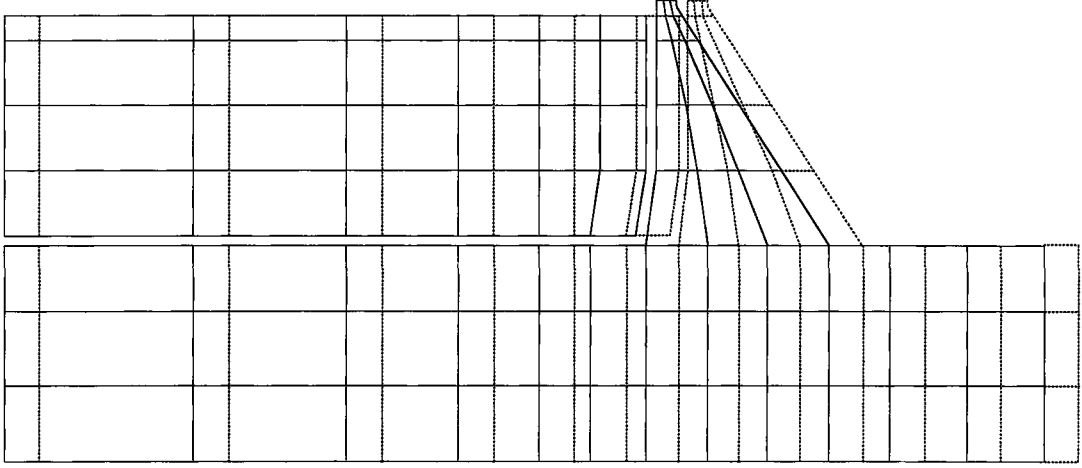
Şekil 46: Asinkronize yatay yer hareketi etkisindeki baraj-rezervuar-temel sisteminin 2. r vektörü (r_2 vektörü).



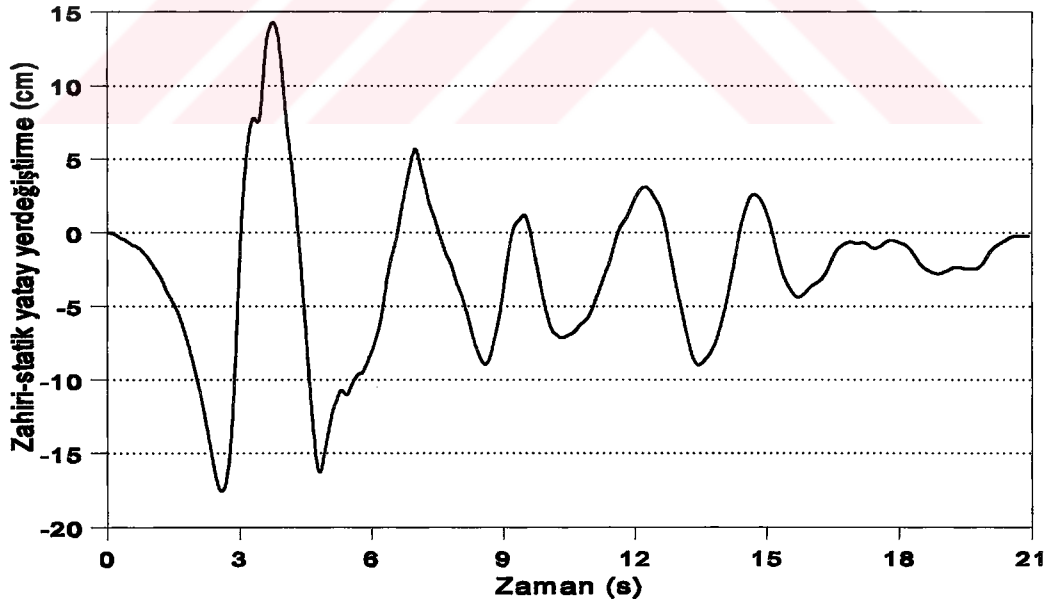
Şekil 47: Asinkronize yatay yer hareketi etkisindeki baraj-rezervuar-temel sisteminin 3. r vektörü (r_3 vektörü).



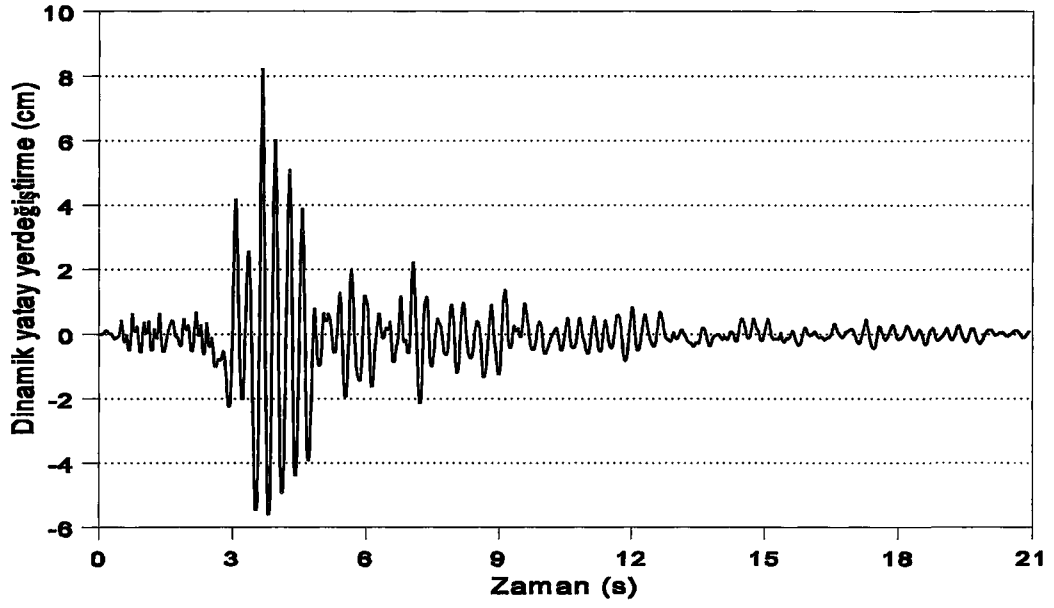
Şekil 48: Asinkronize yatay yer hareketi etkisindeki baraj-rezervuar-temel sisteminin 4. r vektörü (r_4 vektörü).



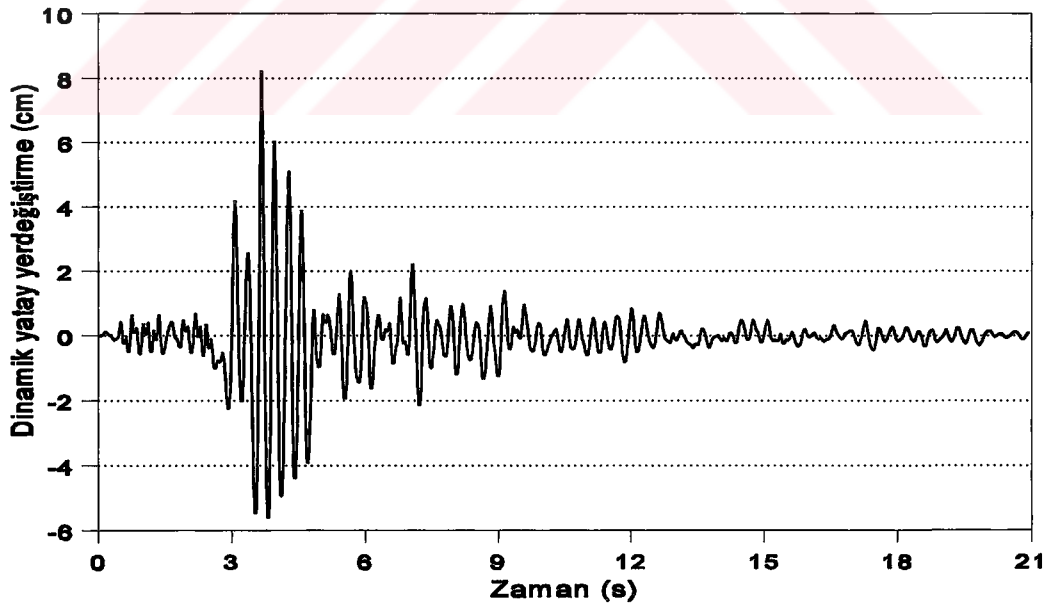
Şekil 49: Baraj-rezervuar-temel sisteminin yatay doğrultuda rijit cisim hareketi.



Şekil 50: Asinkronize yatay yer hareketi (doğu-batı (E-W) bileşeni) etkisindeki baraj-rezervuar-temel sisteminin baraj kretinde sonsuz dalga yayılma hızı için elde edilen zahiri-statik yatay yerdeğiştirme zamanla değişimi.

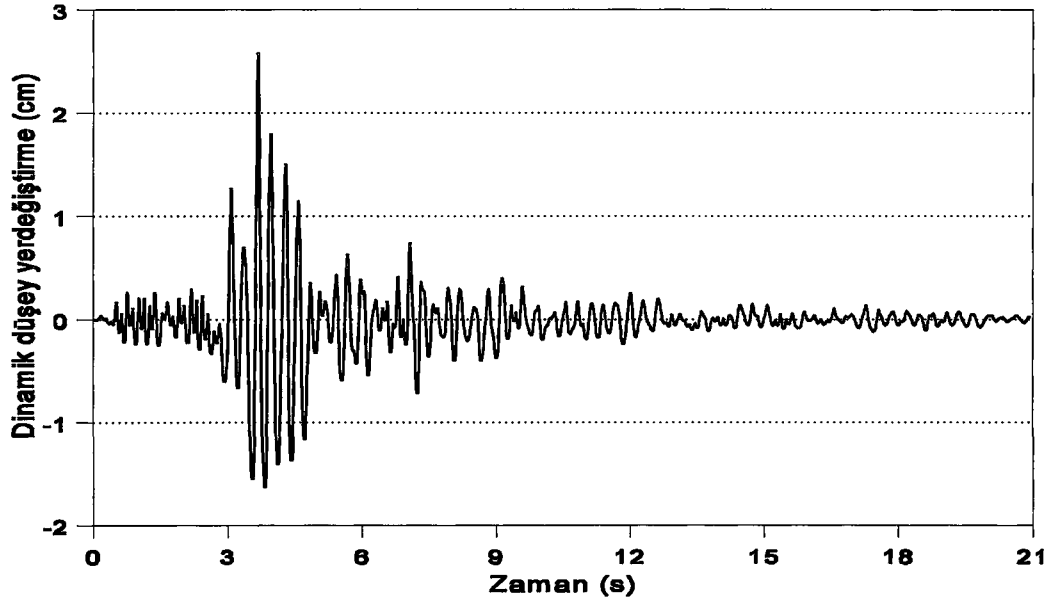


a) SAP IV [100] programı

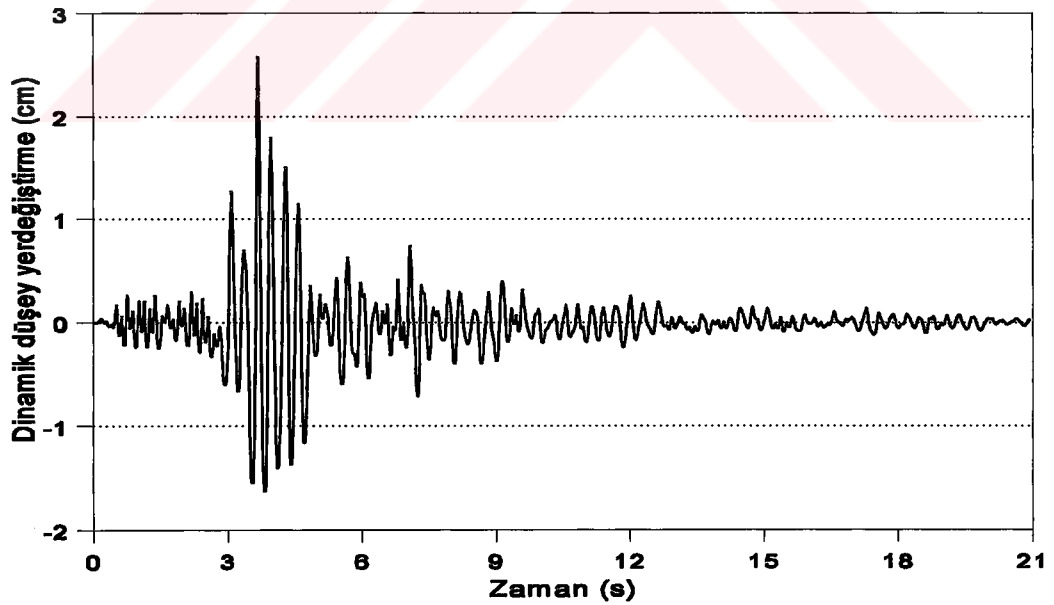


b) Mulsap [92] programı

Şekil 51: SAP IV [100] ve Mulsap [92] (sonsuz hız durumu için) programları kullanılarak baraj-rezervuar-temel sisteminin baraj kretinde elde edilen dinamik yatay yerdeğiştirmenin zamanla değişimi.

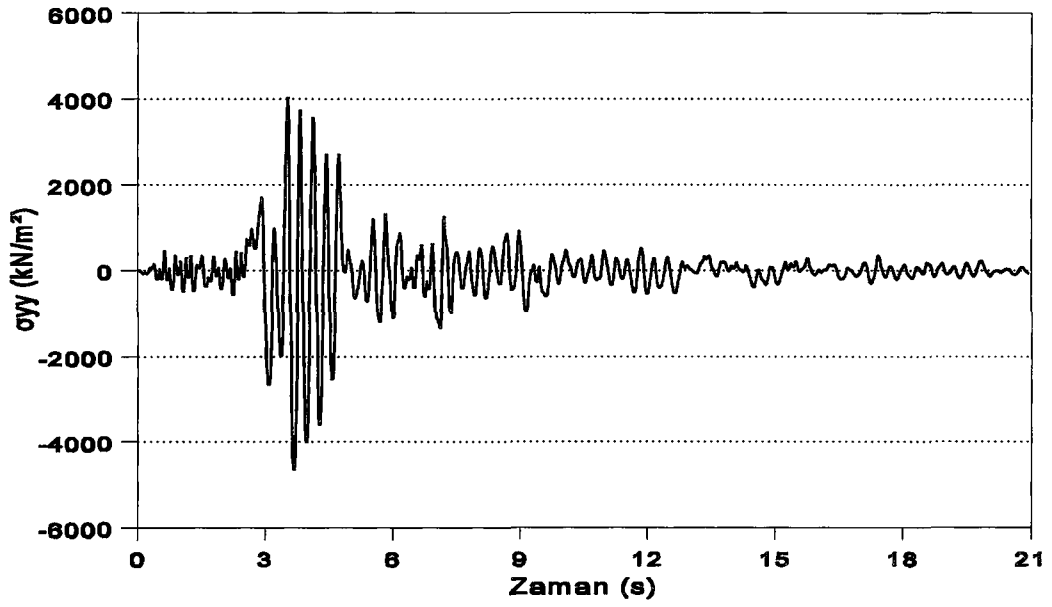


a) SAP IV [100] programı

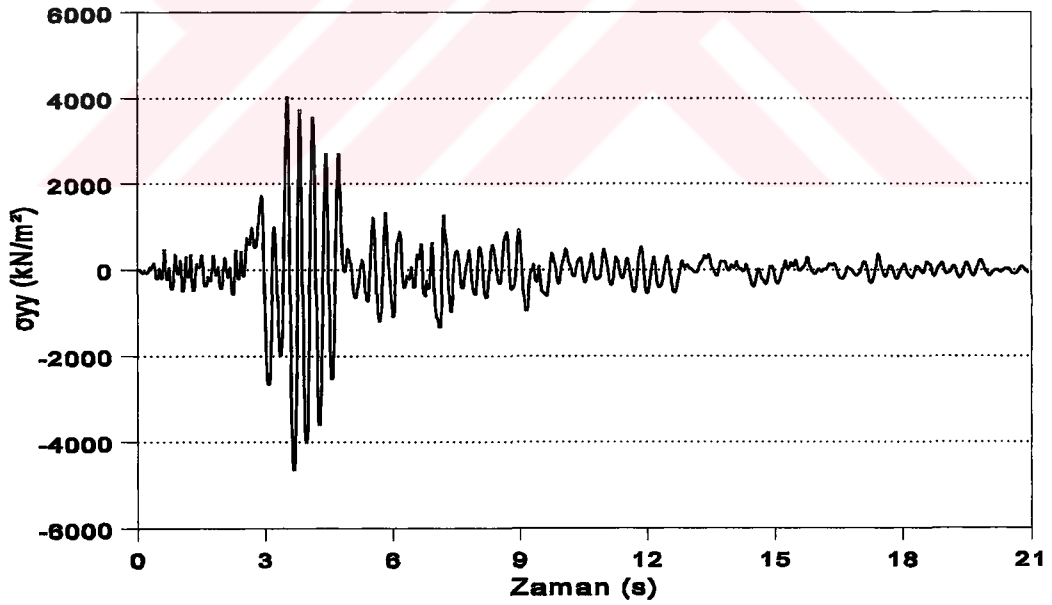


b) MULSAP [92] programı

Şekil 52: SAP IV [100] ve MULSAP [92] (sonsuz hız durumu için) programları kullanılarak baraj-rezervuar-temel sisteminin baraj kretinde elde edilen dinamik düşey yerdeğiştirmenin zamanla değişimi.

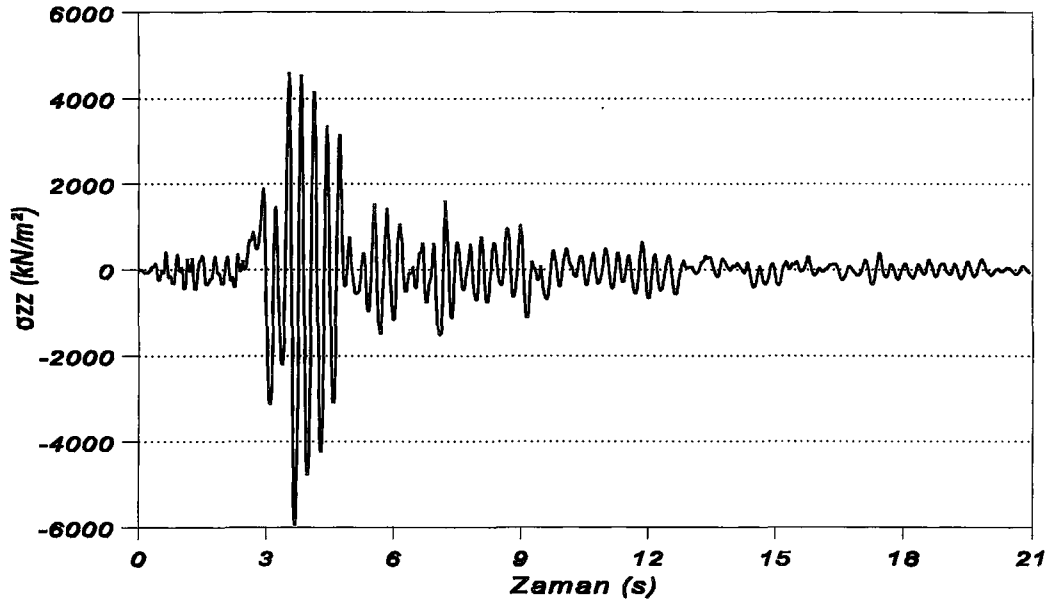


a) SAP IV [100] programı

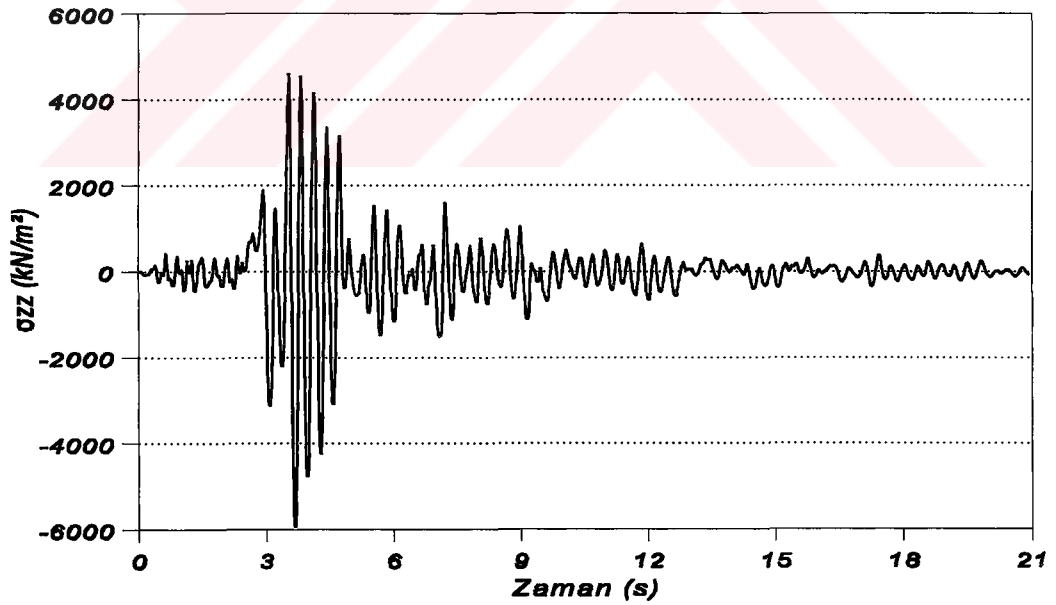


b) MULSAP [92] programı

Şekil 53: SAP IV [100] ve MULSAP [92] (sonsuz hız durumu için) programları kullanılarak baraj-rezervuar-temel sisteminin baraj mansap topuğundaki D Gauss integrasyon noktasında elde edilen yatay gerilmenin (σ_{yy}) zamanla değişimi.

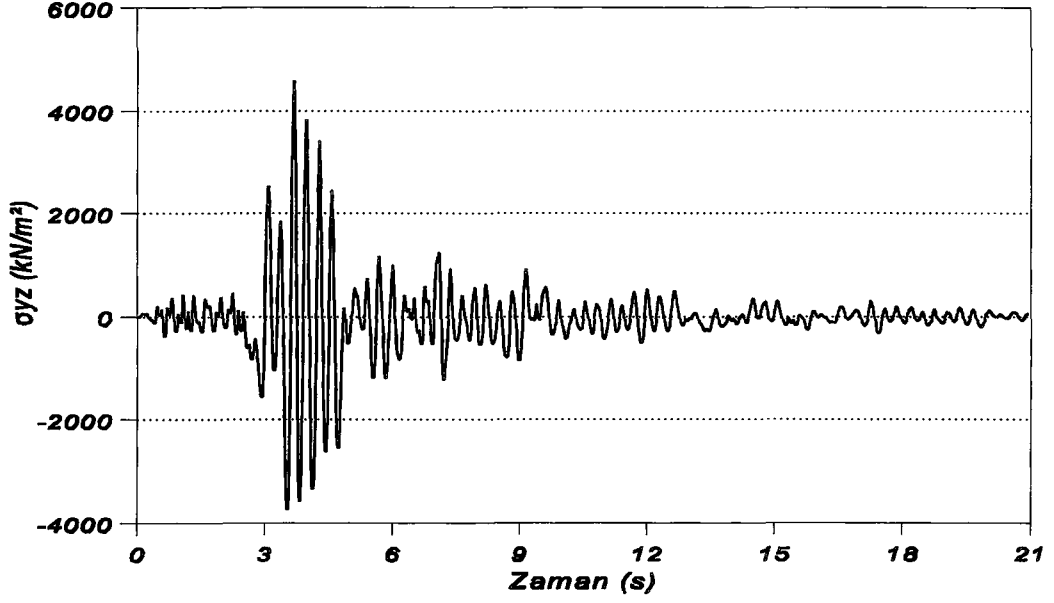


a) SAP IV [100] programı

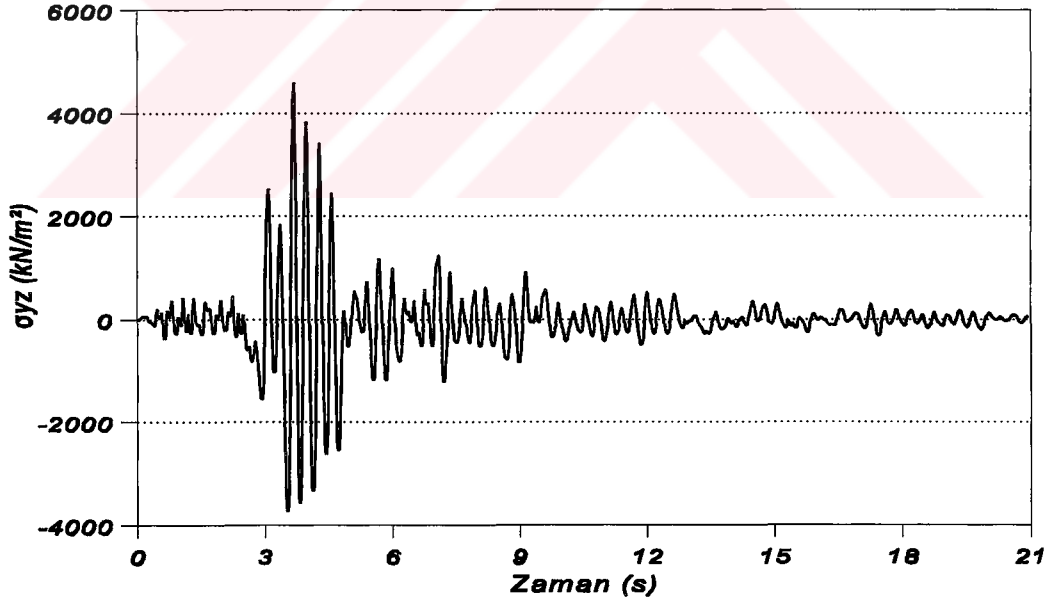


b) MULSAP [92] programı

Şekil 54: SAP IV [100] ve MULSAP [92] (sonsuz hız durumu için) programları kullanılarak baraj-rezervuar-temel sisteminin baraj mansap topuğundaki D Gauss integrasyon noktasında elde edilen düşey gerilmenin (σ_{zz}) zamanla değişimi.

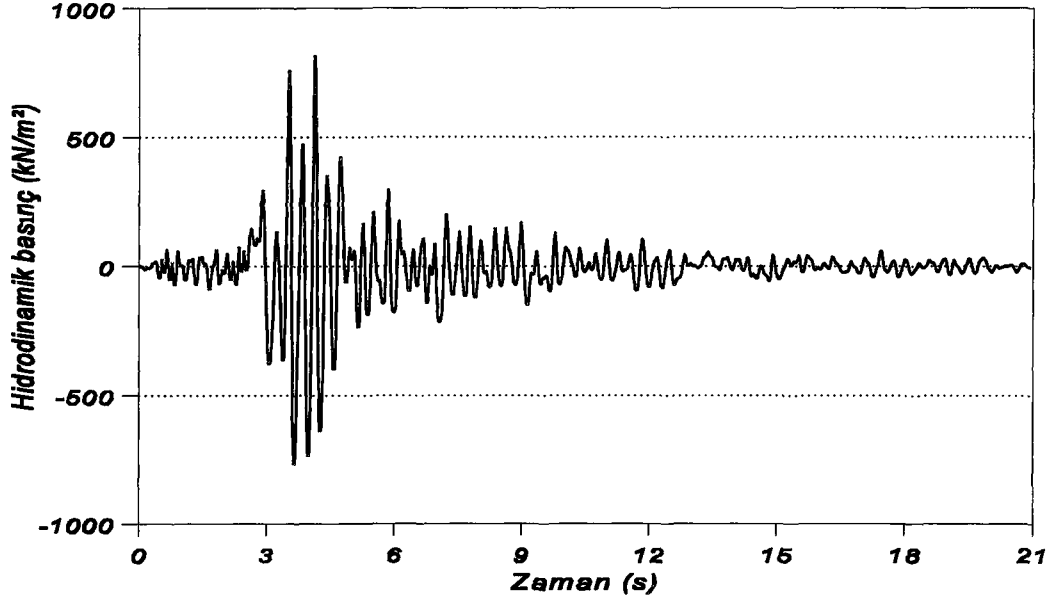


a) SAP IV [100] programı

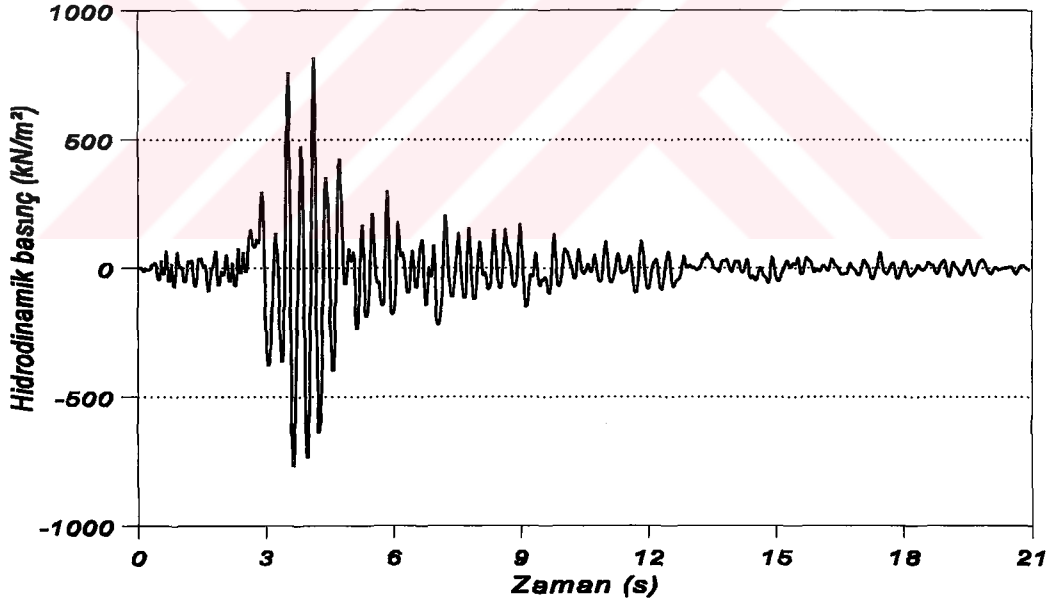


b) Mulsap [92] programı

Şekil 55: SAP IV [100] ve Mulsap [92] (sonsuz hız durumu için) programları kullanılarak baraj-rezervuar-temel sisteminin baraj mansap topuğundaki D Gauss integrasyon noktasında elde edilen kayma gerilmesinin (σ_{yz}) zamanla değişimi.

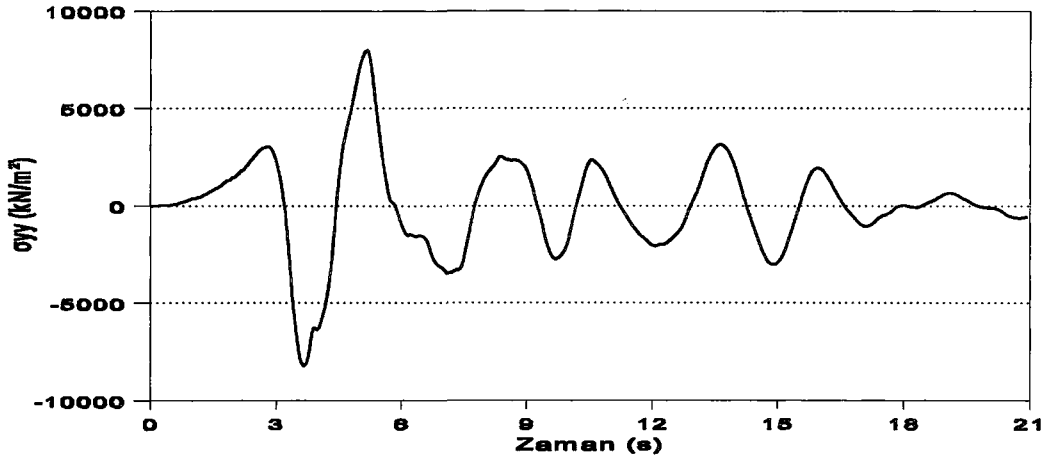


a) SAP IV [100] programı

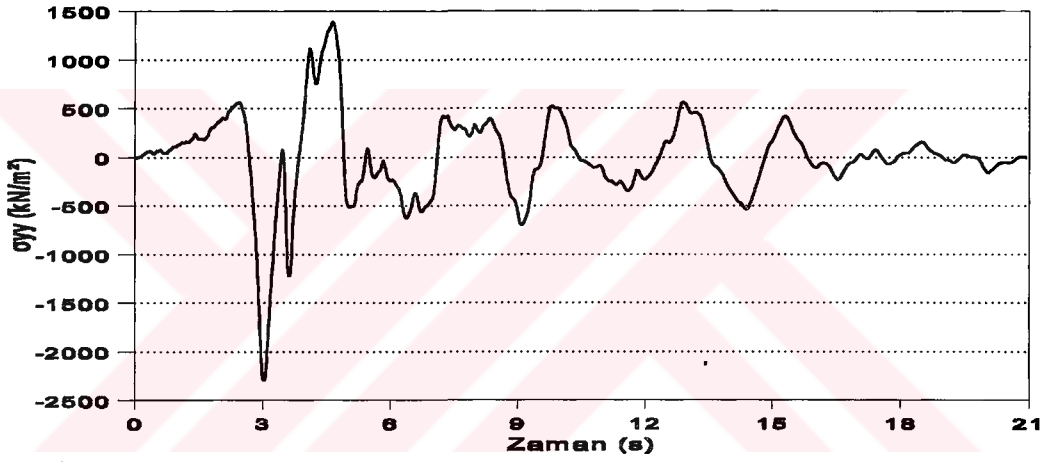


b) MULSAP [92] programı

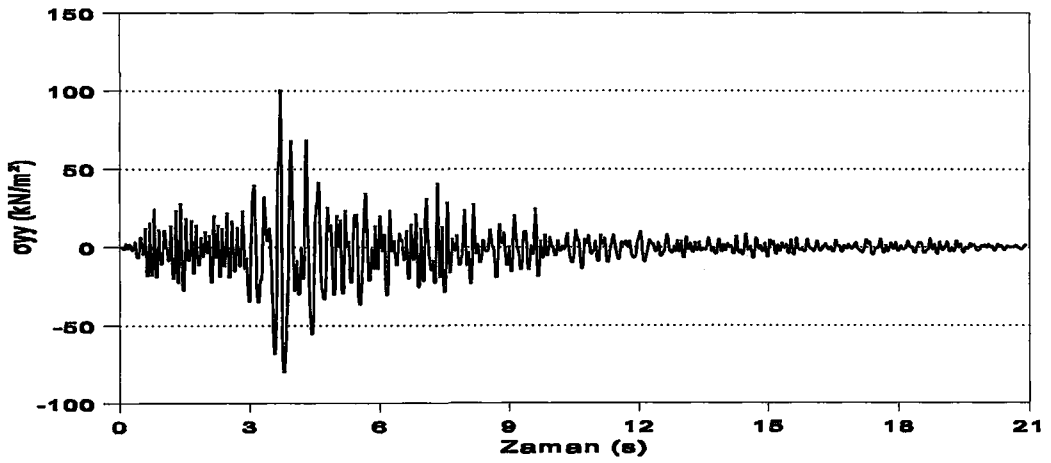
Şekil 56: SAP IV [100] ve MULSAP [92] (sonsuz hız durumu için) programları kullanılarak baraj-rezervuar-temel sisteminin baraj memba yüzeyine yakın E Gauss integrasyon noktasında elde edilen hidrodinamik basınçın zamanla değişimi.



a) 250 m/s

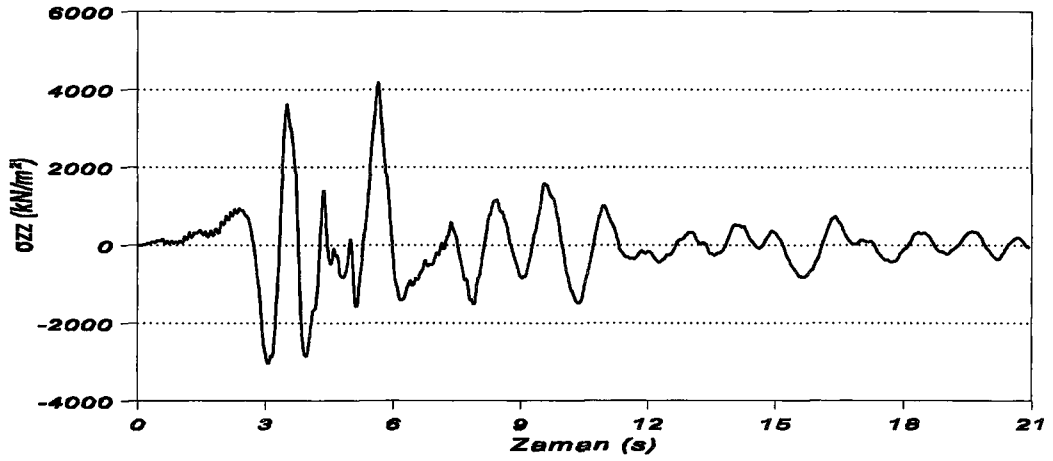


b) 2000 m/s

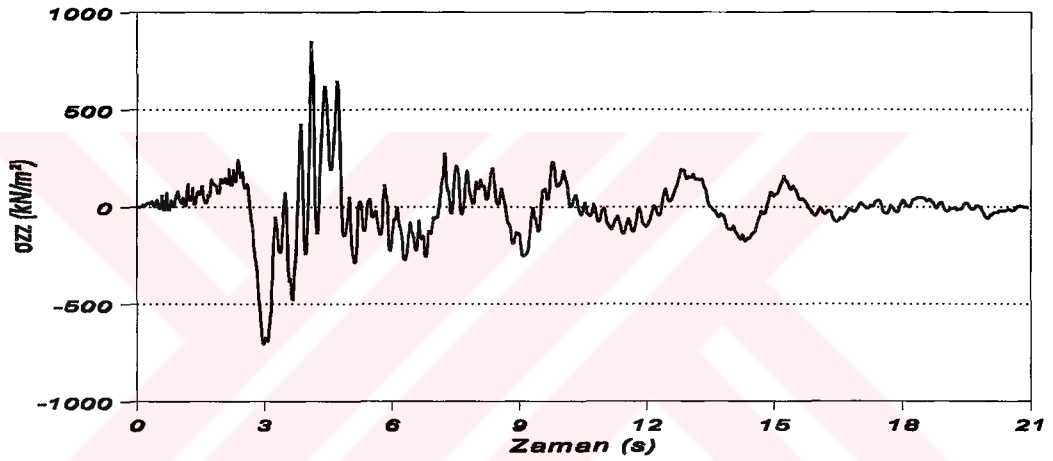


c) Sonsuz

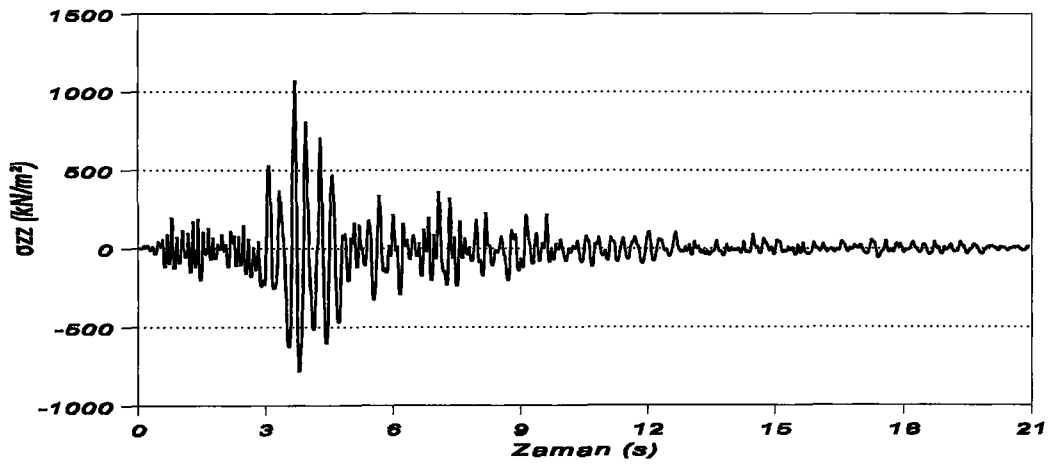
Şekil 57: Asinkronize yatay yer hareketi (doğu-batı (E-W) bileşeni) etkisindeki baraj-rezervuar-temel sisteminin baraj temeli tabanındaki A Gauss integrasyon noktasında 250 m/s, 2000 m/s ve sonsuz dalga yayılma hızları için elde edilen yatay gerilmelerin (σ_{yy}) zamanla değişimi.



a) 250 m/s

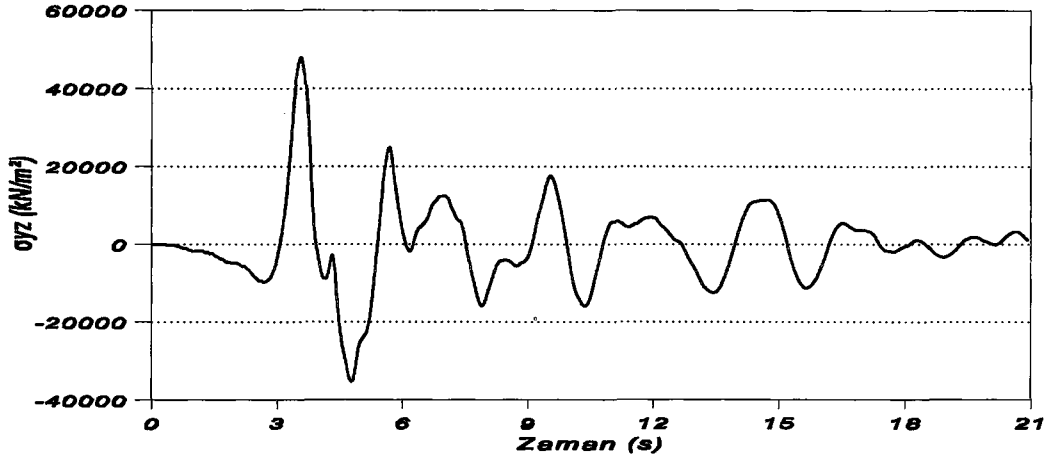


b) 2000 m/s

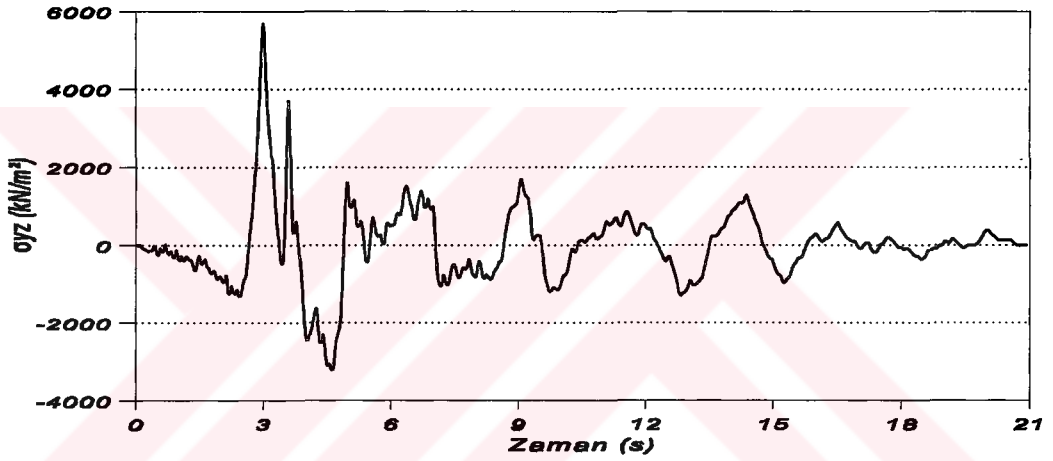


c) Sonsuz

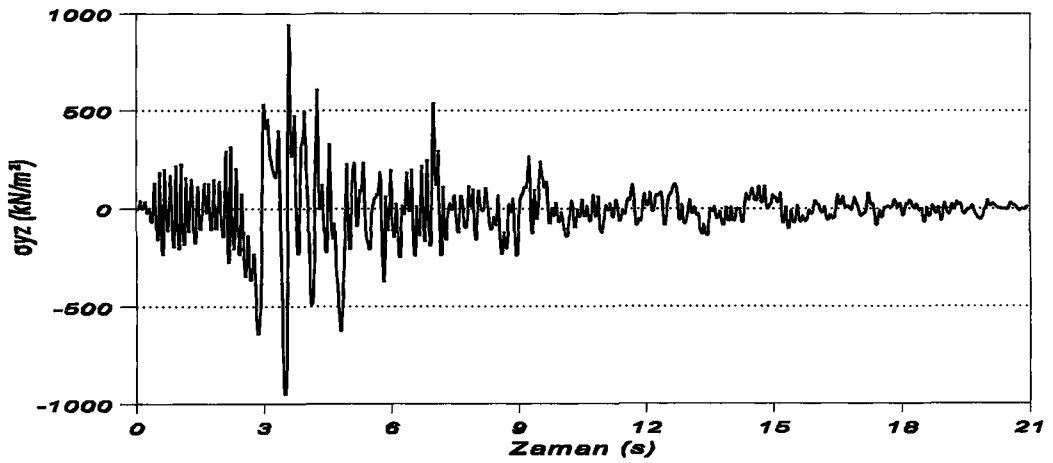
Şekil 58: Asinkronize yatay yer hareketi (doğu-batı (E-W) bileşeni) etkisindeki baraj-rezervuar-temel sisteminin baraj temeli tabanındaki A Gauss integrasyon noktasında 250 m/s, 2000 m/s ve sonsuz dalga yayılma hızları için elde edilen düşey gerilmelerin (σ_{zz}) zamanla değişimi.



a) 250 m/s

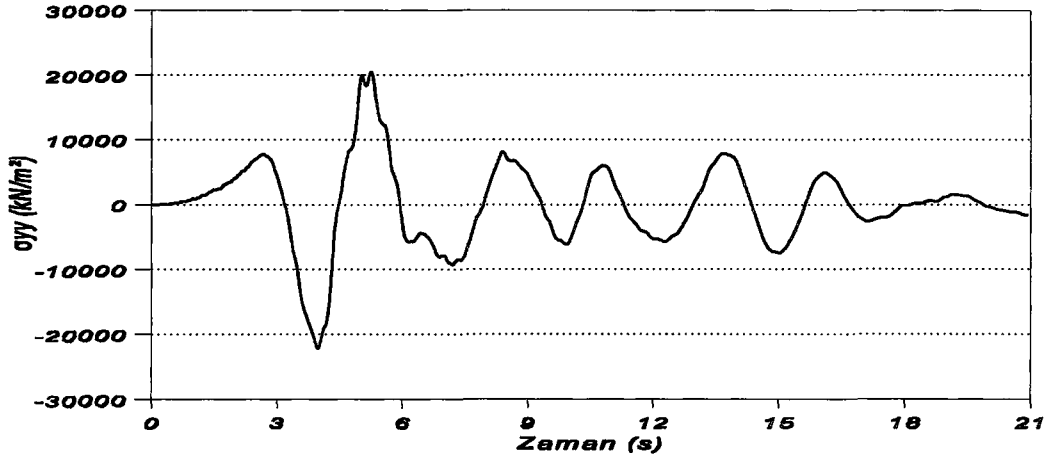


b) 2000 m/s

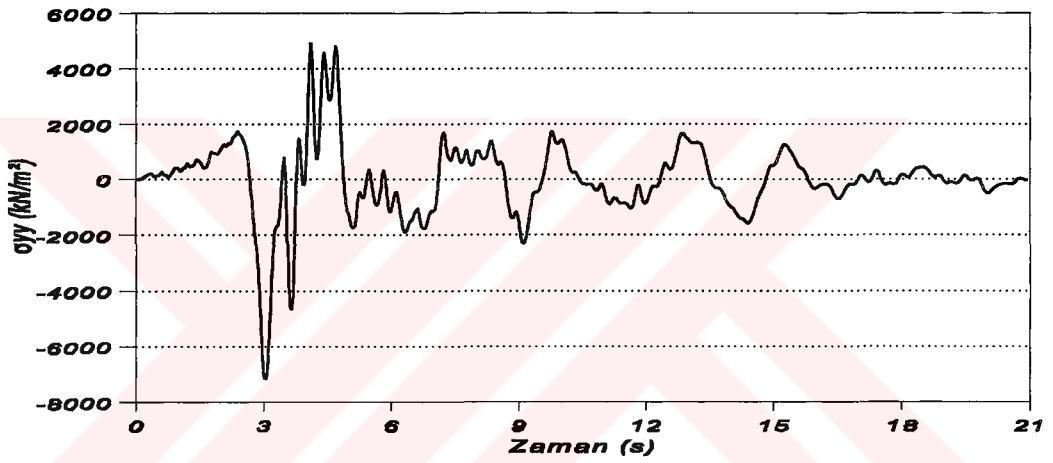


c) Sonsuz

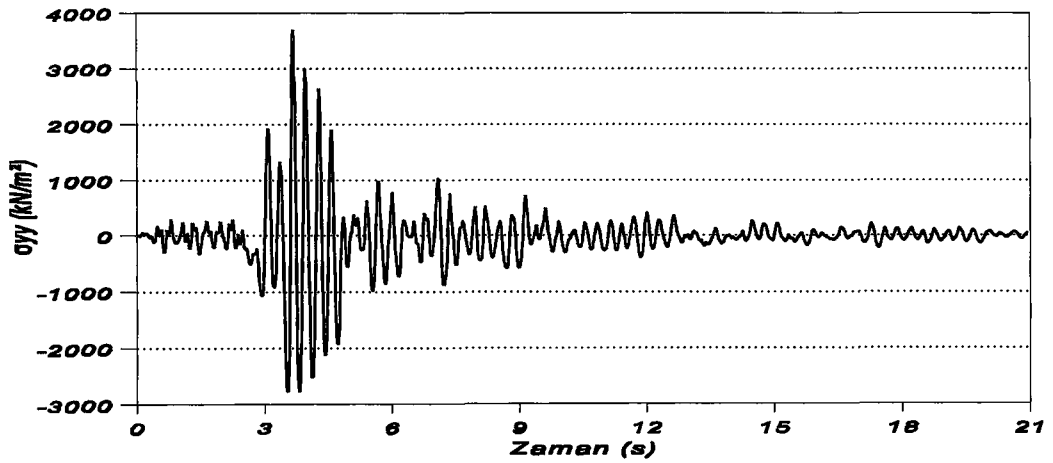
Şekil 59: Asinkronize yatay yer hareketi (doğu-batı (E-W) bileşeni) etkisindeki baraj-rezervuar-temel sisteminin baraj temeli tabanındaki A Gauss integrasyon noktasında 250 m/s, 2000 m/s ve sonsuz dalga yayılma hızları için elde edilen kayma gerilmelerinin (σ_{yz}) zamanla değişimi.



a) 250 m/s

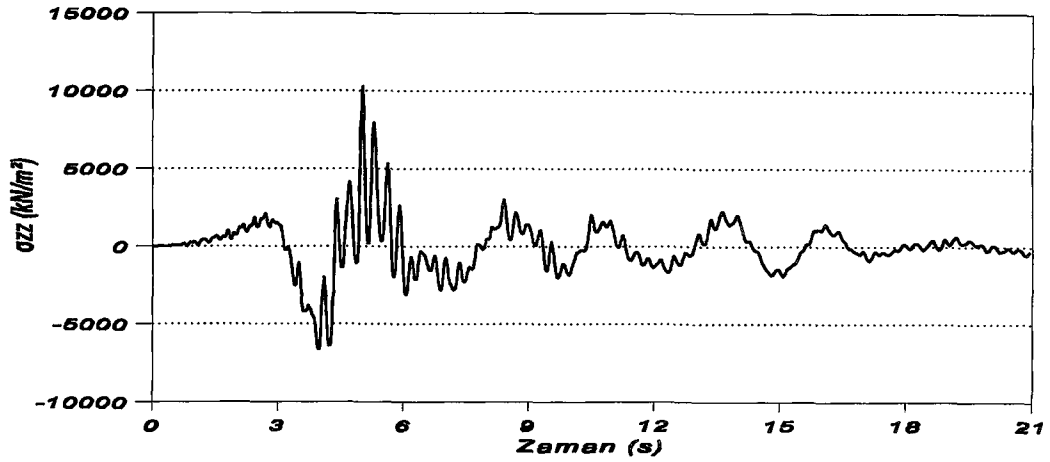


b) 2000 m/s

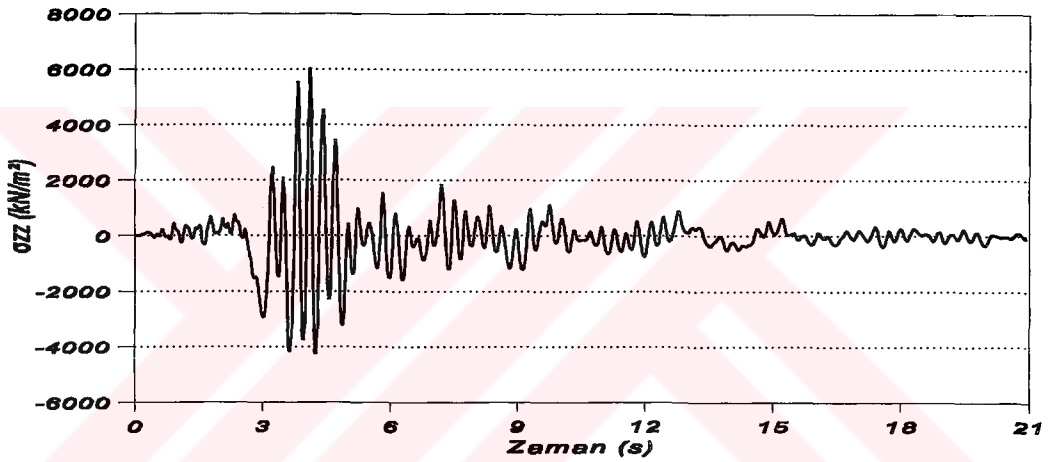


c) Sonsuz

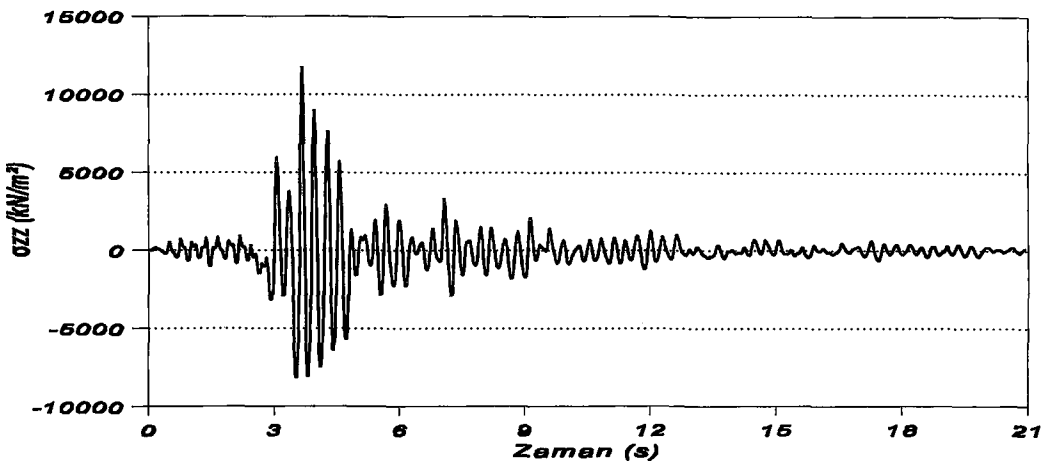
Şekil 60: Asinkronize yatay yer hareketi (doğu-batı (E-W) bileşeni) etkisindeki baraj-rezervuar-temel sisteminin baraj memba topuğundaki B Gauss integrasyon noktasında 250 m/s, 2000 m/s ve sonsuz dalga yayılma hızları için elde edilen yatay gerilmelerin (σ_{yy}) zamanla değişimi.



a) 250 m/s

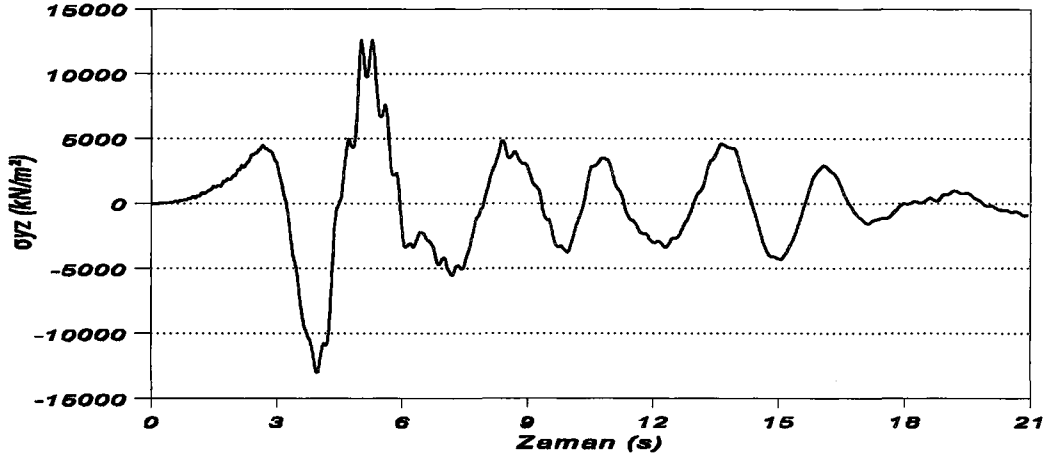


b) 2000 m/s

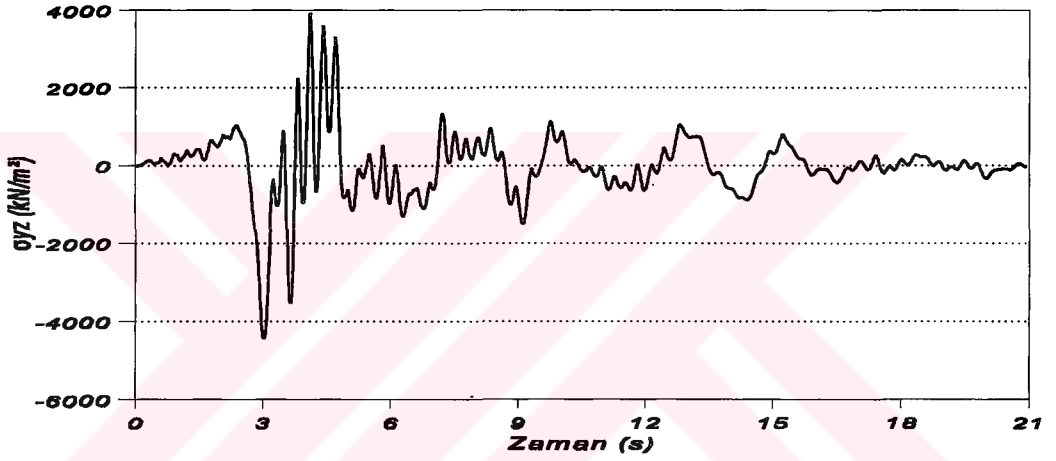


c) Sonsuz

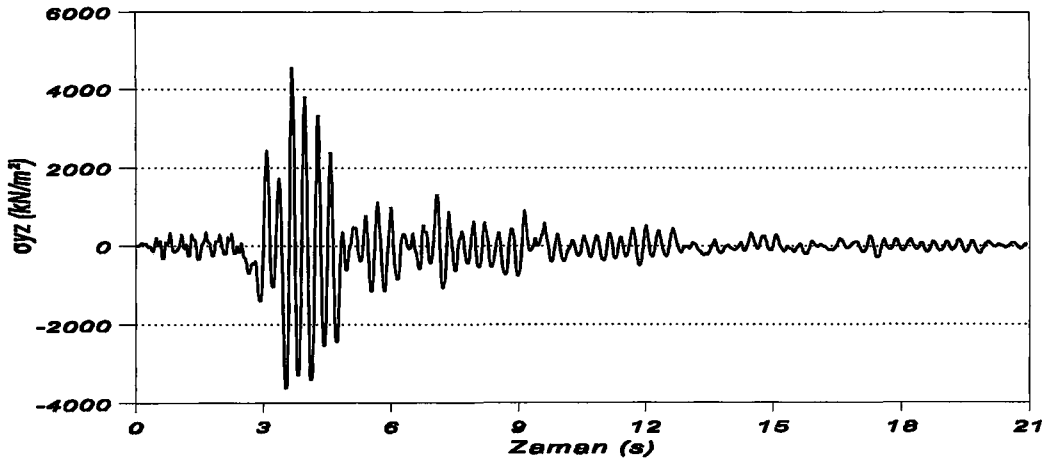
Şekil 61: Asinkronize yatay yer hareketi (doğu-batı (E-W) bileşeni) etkisindeki baraj-rezervuar-temel sisteminin baraj memba topuğundaki B Gauss integrasyon noktasında 250 m/s, 2000 m/s ve sonsuz dalga yayılma hızları için elde edilen düşey gerilmelerin (σ_{zz}) zamanla değişimi.



a) 250 m/s

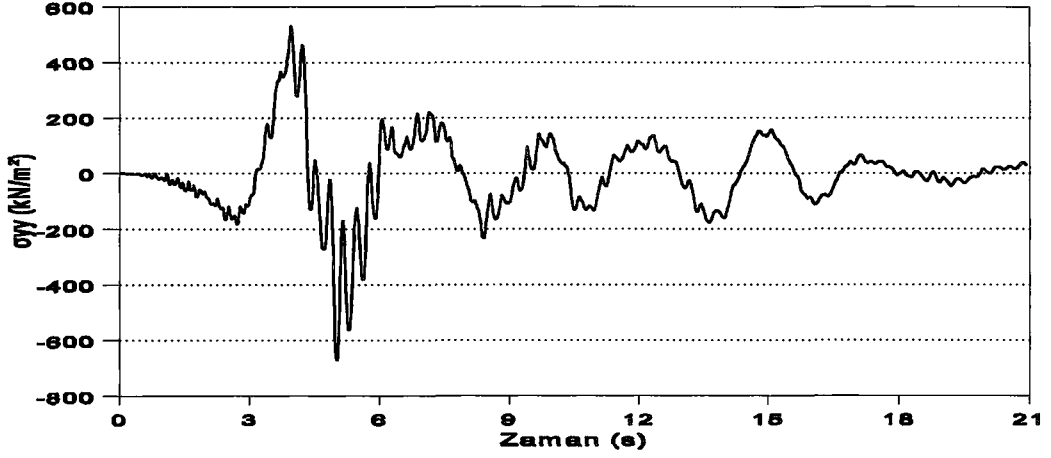


b) 2000 m/s

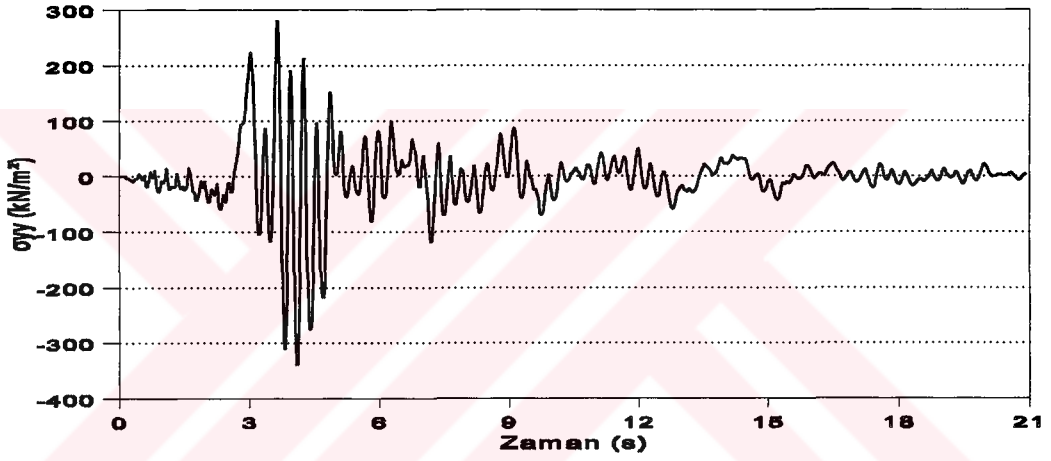


c) Sonsuz

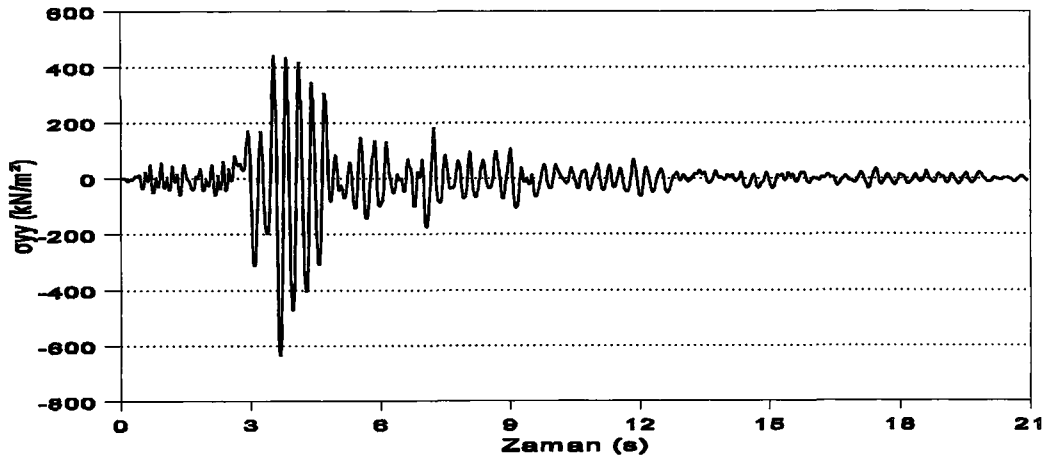
Şekil 62: Asinkronize yatay yer hareketi (doğu-batı (E-W) bileşeni) etkisindeki baraj-rezervuar-temel sisteminin baraj memba topuğundaki B Gauss integrasyon noktasında 250 m/s, 2000 m/s ve sonsuz dalga yayılma hızları için elde edilen kayma gerilmelerinin (σ_{yz}) zamanla değişimi.



a) 250 m/s

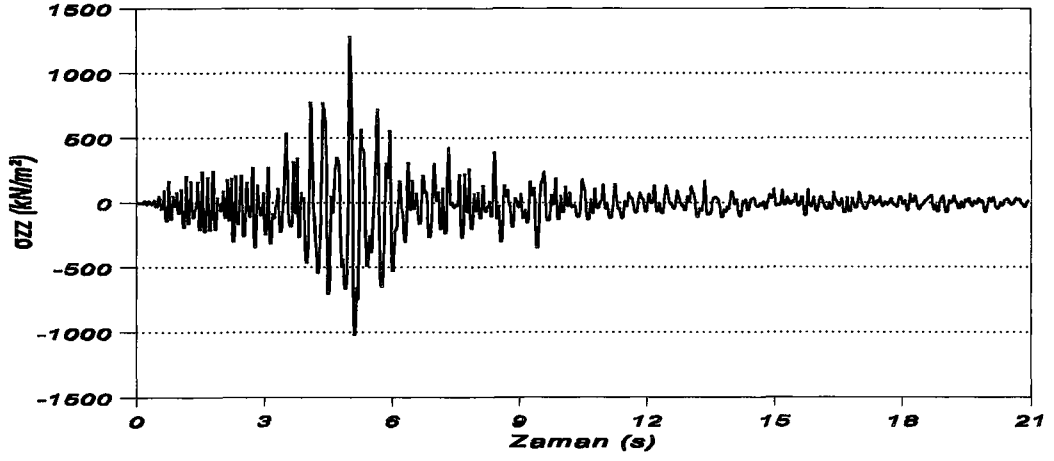


b) 2000 m/s

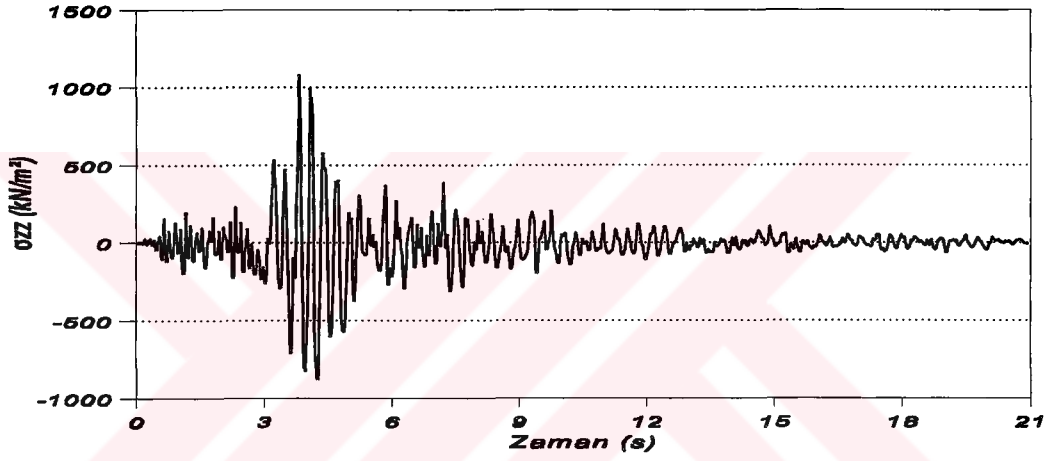


c) Sonsuz

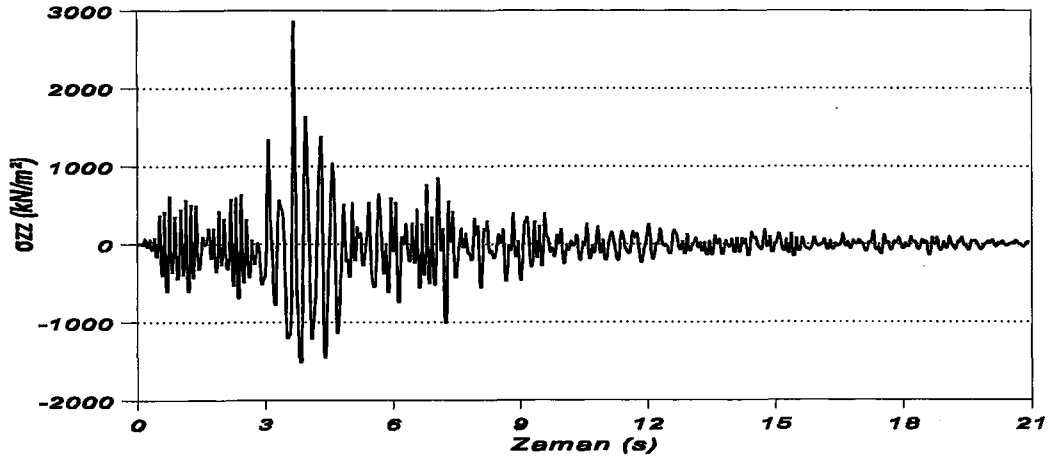
Şekil 63: Asinkronize yatay yer hareketi (doğu-batı (E-W) bileşeni) etkisindeki baraj-rezervuar-temel sisteminin baraj kretine yakın C Gauss integrasyon noktasında 250 m/s, 2000 m/s ve sonsuz dalga yayılma hızları için elde edilen yatay gerilmelerin (σ_{yy}) zamanla değişimi.



a) 250 m/s

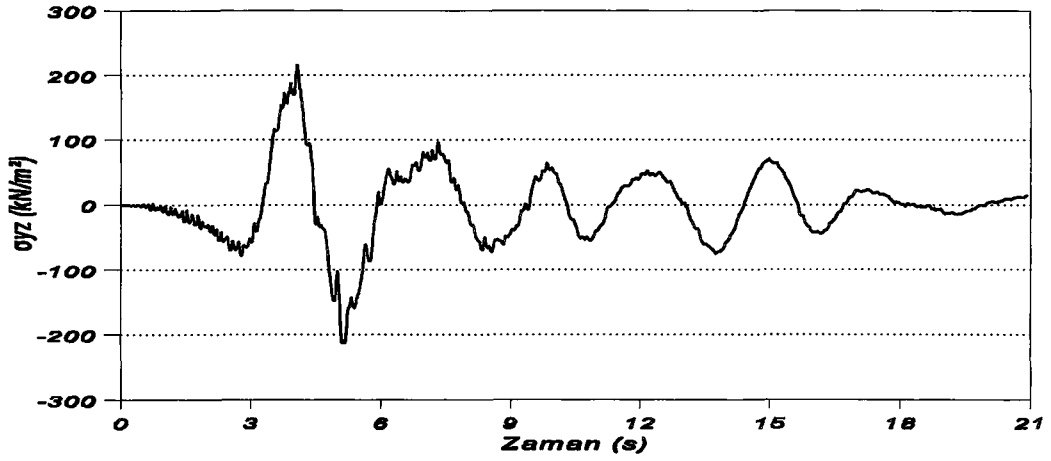


b) 2000 m/s

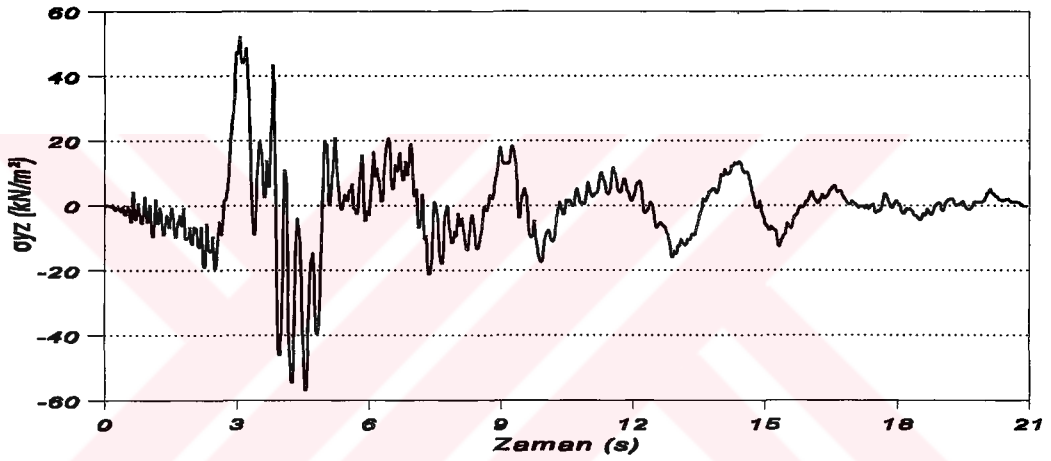


c) Sonsuz

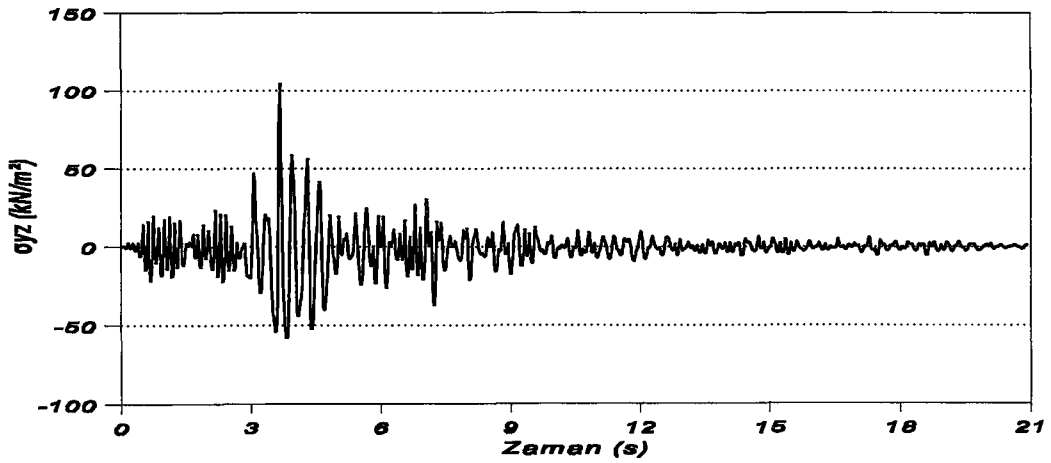
Şekil 64: Asinkronize yatay yer hareketi (doğu-batı (E-W) bileşeni) etkisindeki baraj-rezervuar-temel sisteminin baraj kretine yakın C Gauss integrasyon noktasında 250 m/s, 2000 m/s ve sonsuz dalga yayılma hızları için elde edilen düşey gerilmelerin (σ_{zz}) zamanla değişimi.



a) 250 m/s

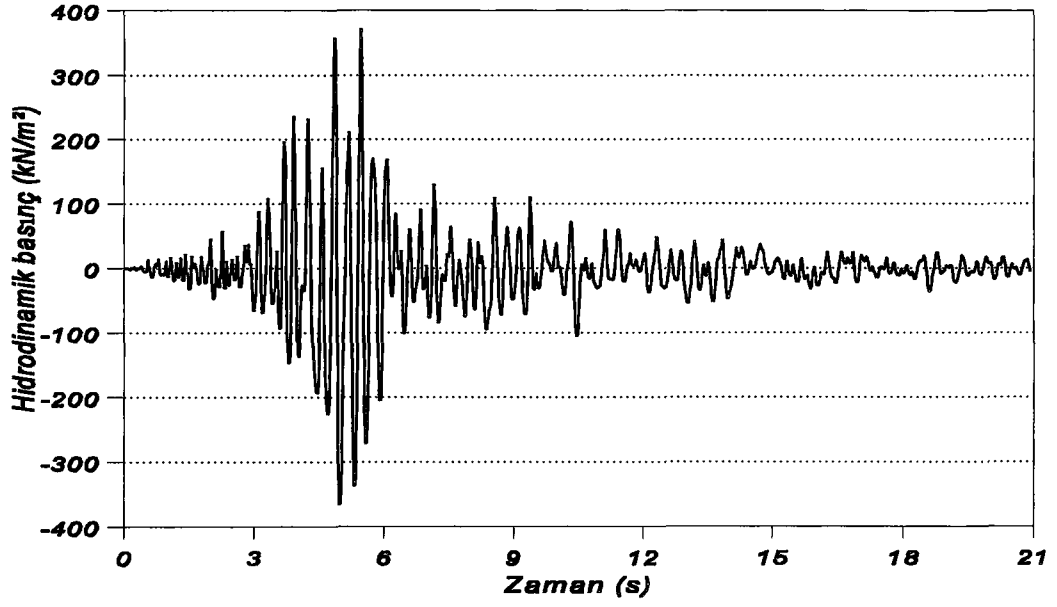


b) 2000 m/s

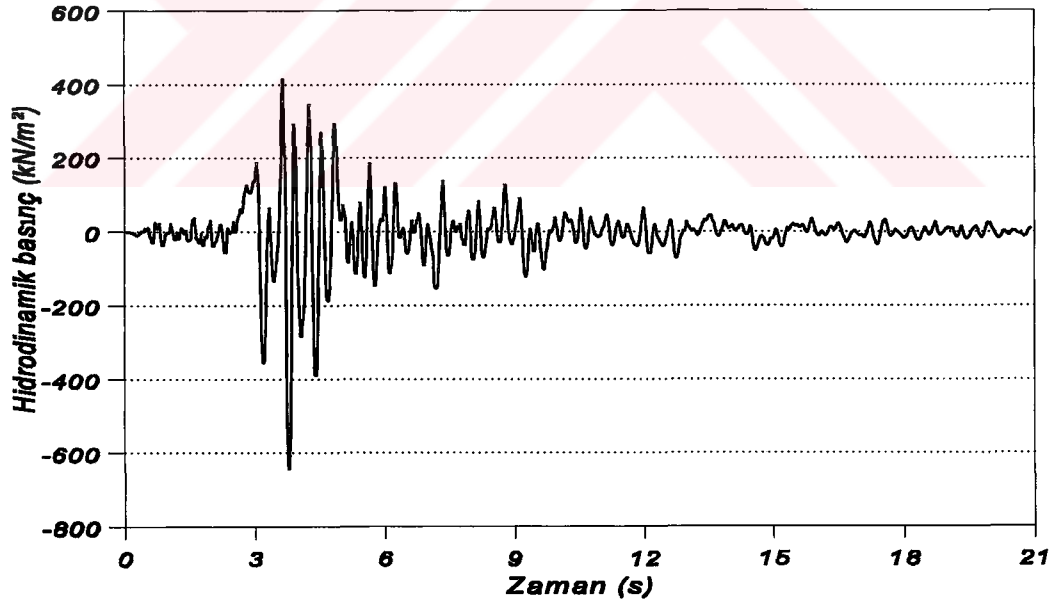


c) Sonsuz

Şekil 65: Asinkronize yatay yer hareketi (doğu-batı (E-W) bileşeni) etkisindeki baraj-rezervuar-temel sisteminin baraj kretine yakın C Gauss integrasyon noktasında 250 m/s, 2000 m/s ve sonsuz dalga yayılma hızları için elde edilen kayma gerilmelerinin (σ_{yz}) zamanla değişimi.

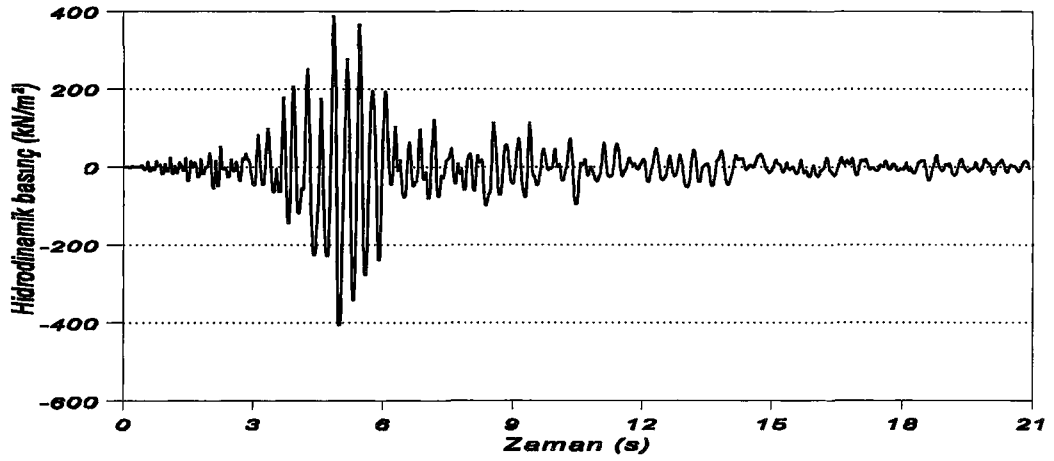


a) 250 m/s

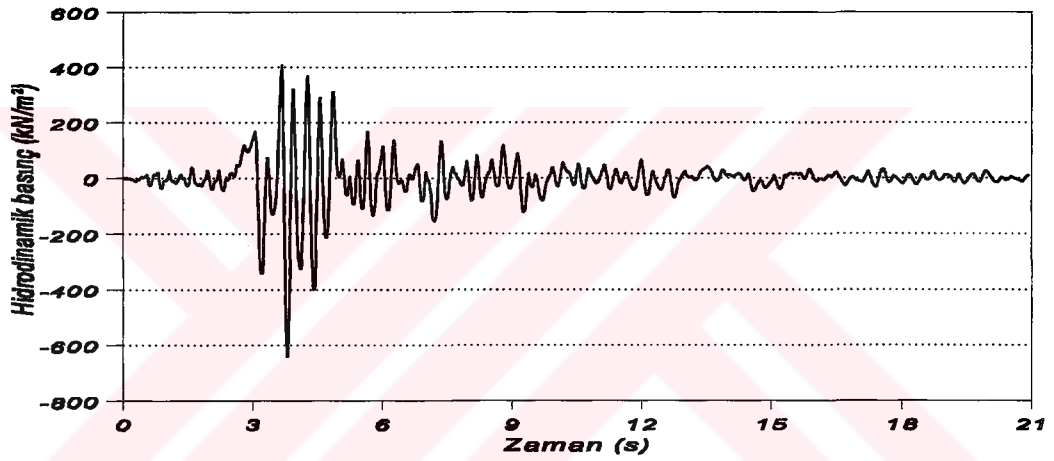


c) 2000 m/s

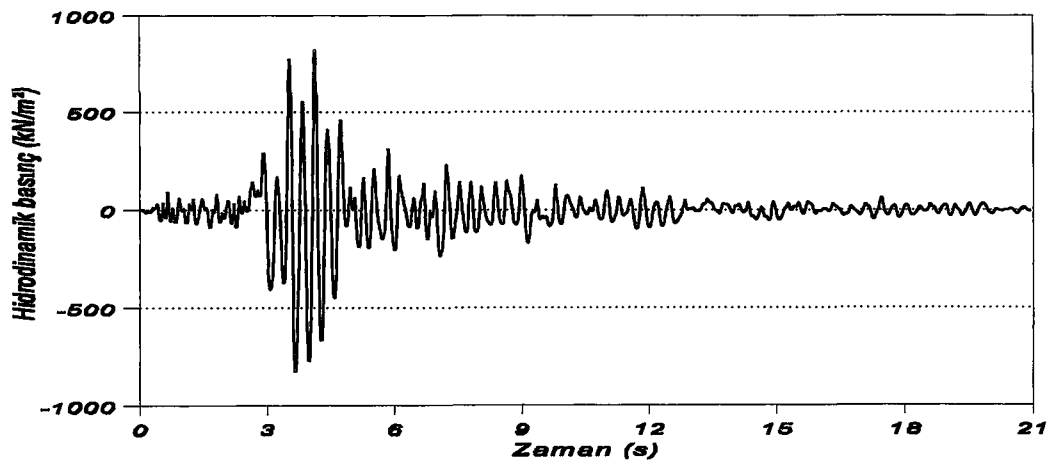
Şekil 66: Asinkronize yatay yer hareketi (doğu-batı (E-W) bileşeni) etkisindeki baraj-rezervuar-temel sisteminin baraj memba yüzeyine yakın E Gauss integrasyon noktasında 250 m/s ve 2000 m/s dalga yayılma hızları için elde edilen hidrodinamik basınçların zamanla değişimi.



a) 250 m/s

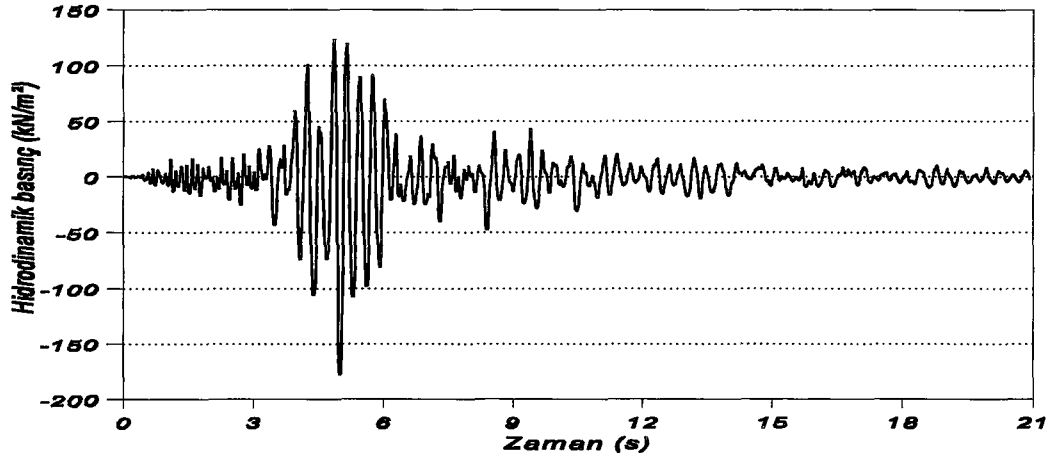


b) 2000 m/s

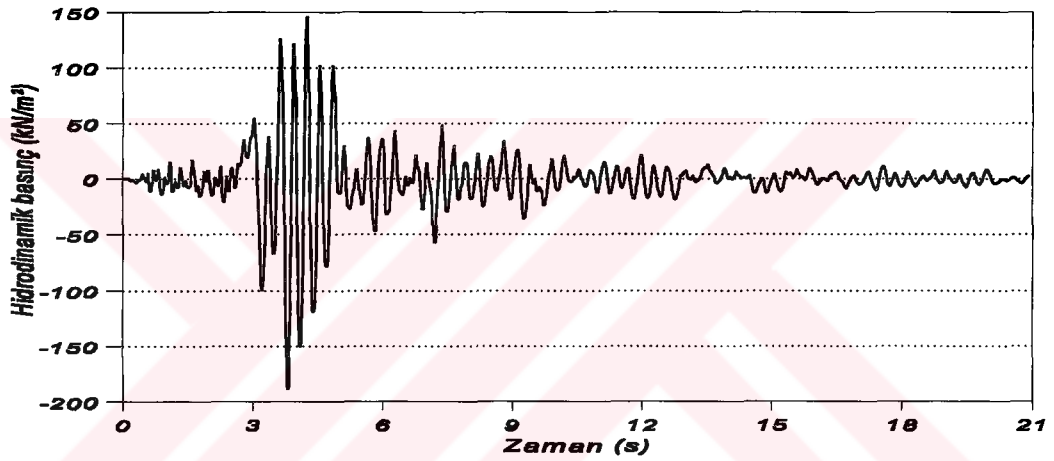


c) Sonsuz

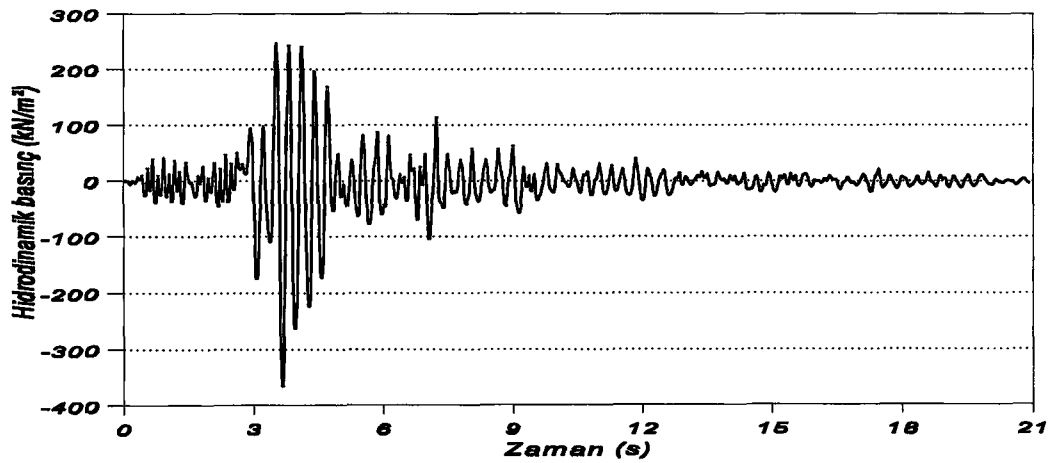
Şekil 67: Asinkronize yatay yer hareketi (doğu-batı (E-W) bileşeni) etkisindeki baraj-rezervuar-temel sisteminin baraj memba yüzeyine yakın F Gauss integrasyon noktasında 250 m/s, 2000 m/s ve sonsuz dalga yayılma hızları için elde edilen hidrodinamik basınçların zamanla değişimi.



a) 250 m/s

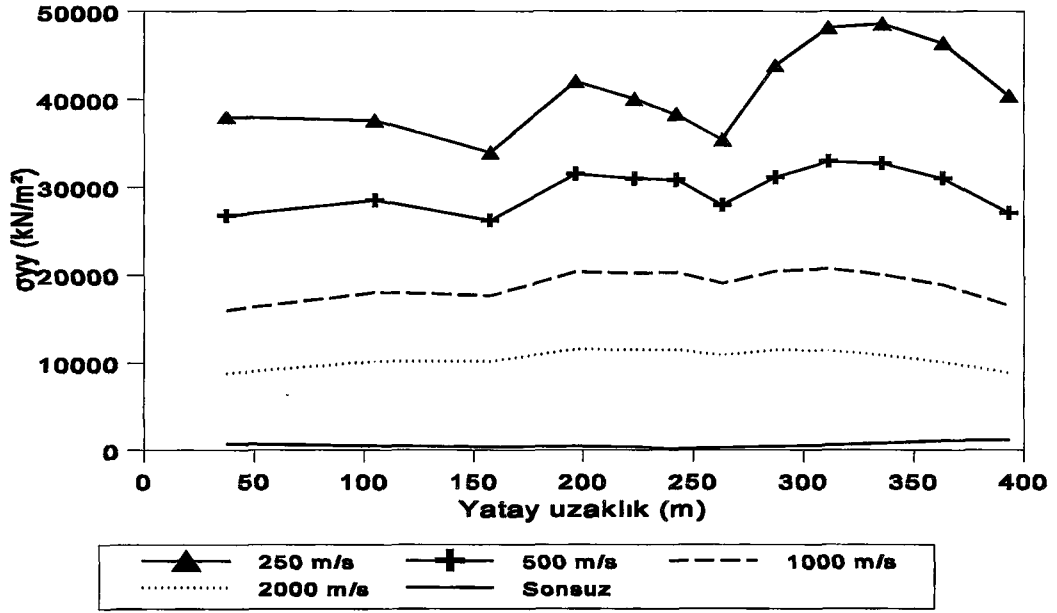


b) 2000 m/s

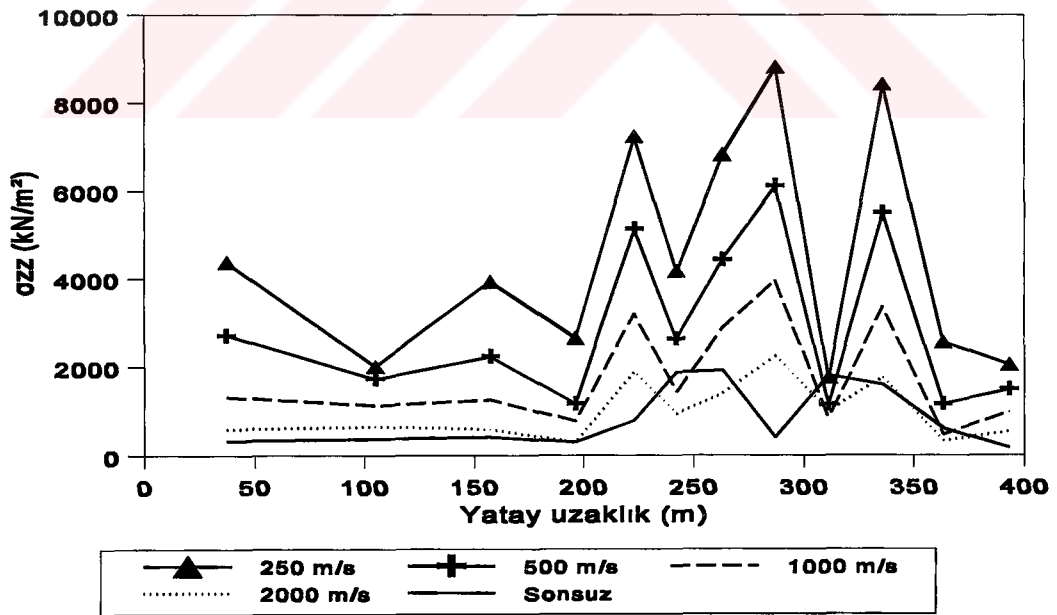


c) Sonsuz

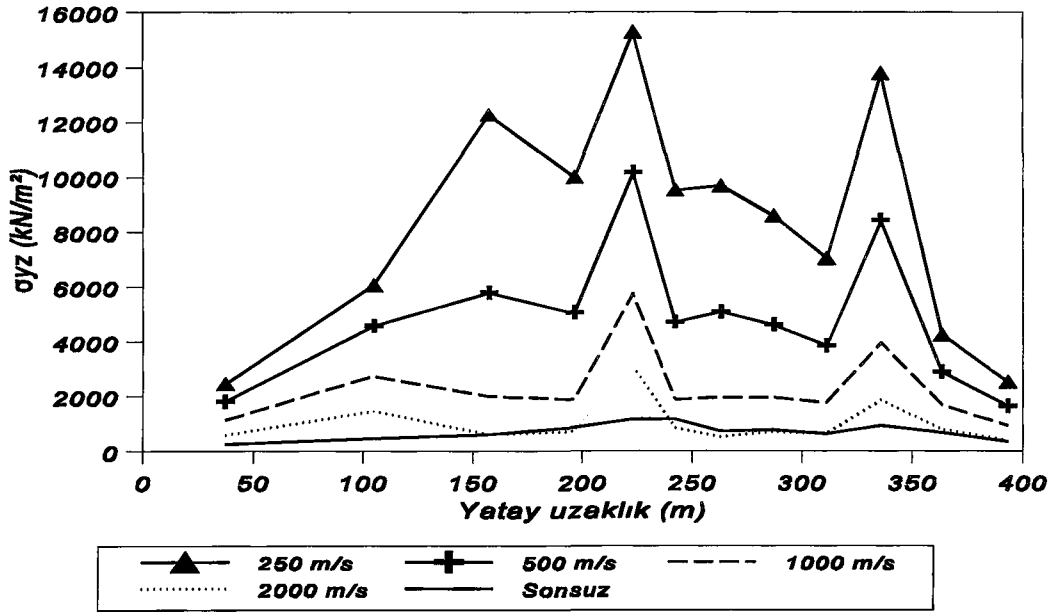
Şekil 68: Asinkronize yatay yer hareketi (doğu-batı (E-W) bileşeni) etkisindeki baraj-rezervuar-temel sisteminin baraj memba yüzeyine yakın G Gauss integrasyon noktasında 250 m/s, 2000 m/s ve sonsuz dalga yayılma hızları için elde edilen hidrodinamik basınçların zamanla değişimi.



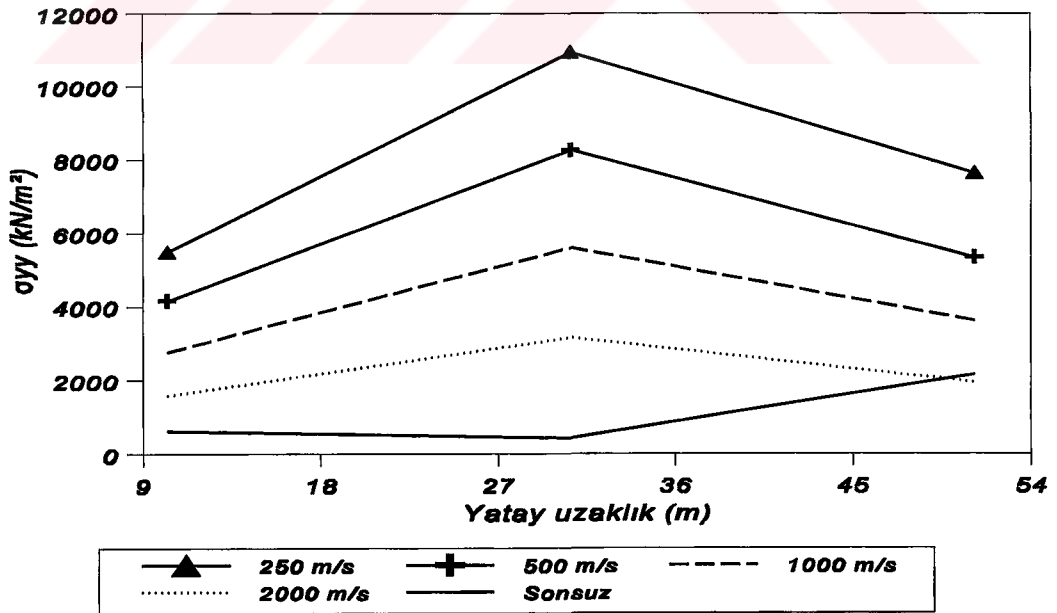
Şekil 69: Asinkronize yatay yer hareketi (doğu-batı (E-W) bileşeni) etkisindeki baraj-rezervuar-temel sisteminin baraj temelinde alınan I-I kesitinde değişik dalga yayılma hızları için elde edilen mutlak maksimum yatay gerilmelerin (σ_{yy}) yatay uzaklıkla değişimi.



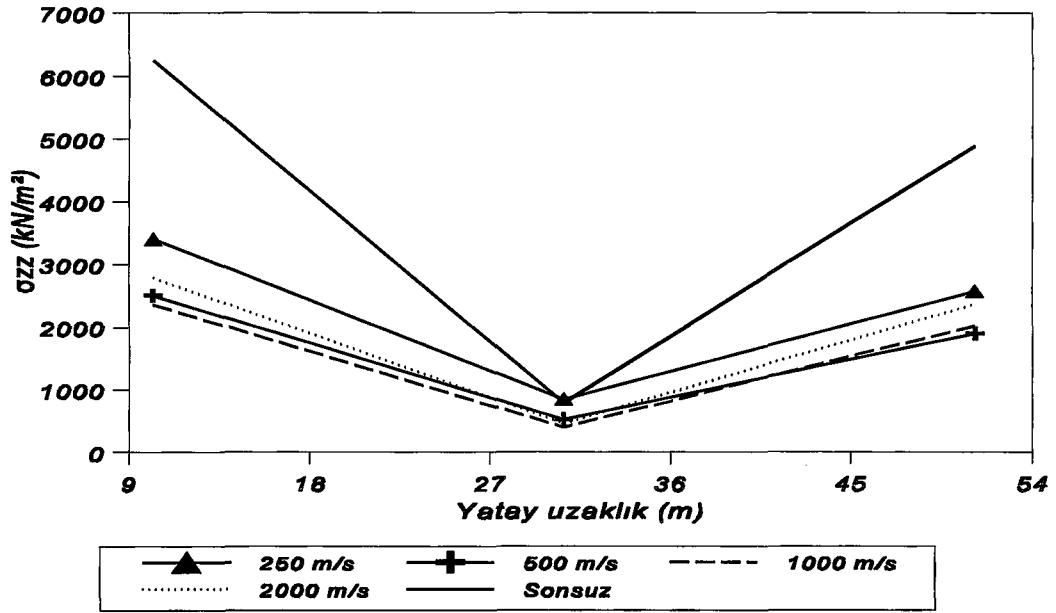
Şekil 70: Asinkronize yatay yer hareketi (doğu-batı (E-W) bileşeni) etkisindeki baraj-rezervuar-temel sisteminin baraj temelinde alınan I-I kesitinde değişik dalga yayılma hızları için elde edilen mutlak maksimum düşey gerilmelerin (σ_{zz}) yatay uzaklıkla değişimi.



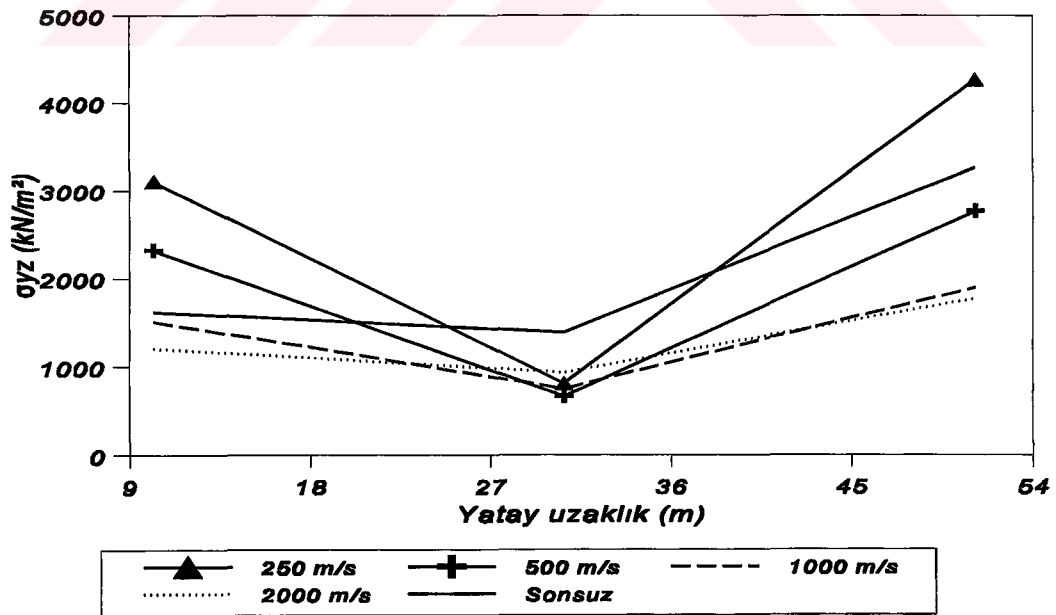
Şekil 71: Asinkronize yatay yer hareketi (doğu-batı (E-W) bileşeni) etkisindeki baraj-rezervuar-temel sisteminin baraj temelinde alınan I-I kesitinde değişik dalga yayılma hızları için elde edilen mutlak maksimum kayma gerilmelerinin (σ_{yz}) yatay uzaklıkla değişimi.



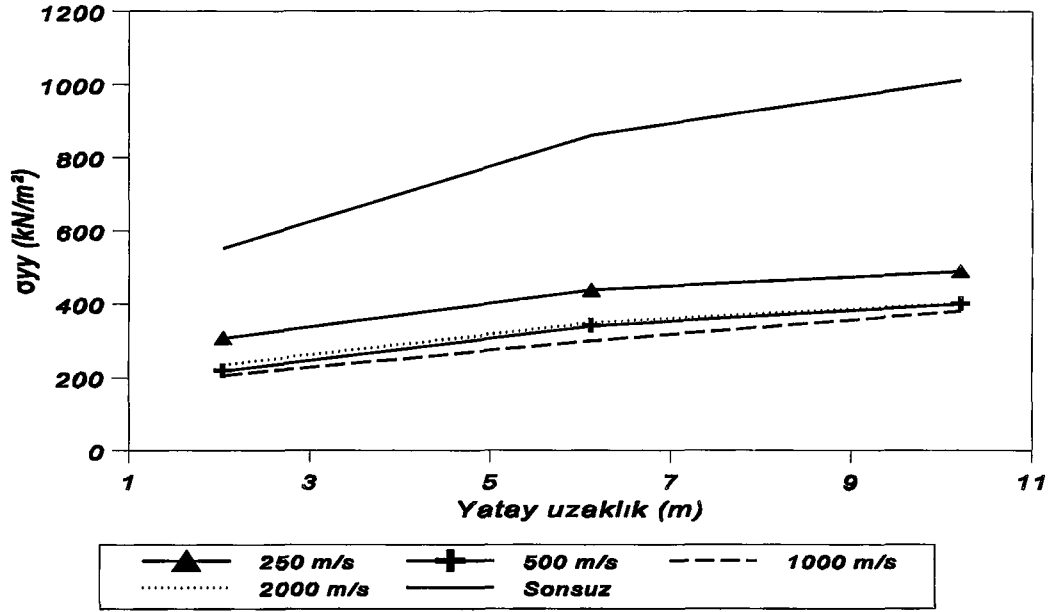
Şekil 72: Asinkronize yatay yer hareketi (doğu-batı (E-W) bileşeni) etkisindeki baraj-rezervuar-temel sisteminin baraj tabanında alınan II-II kesitinde değişik dalga yayılma hızları için elde edilen mutlak maksimum yatay gerilmelerin (σ_{yy}) yatay uzaklıkla değişimi.



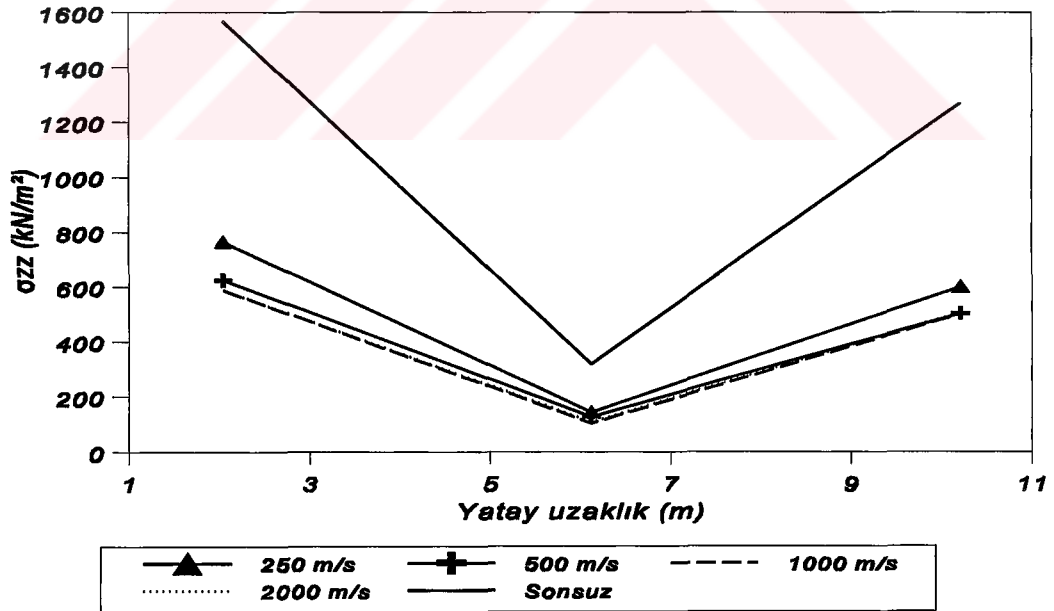
Şekil 73: Asinkronize yatay yer hareketi (doğu-batı (E-W) bileşeni) etkisindeki baraj-rezervuar-temel sisteminin baraj tabanında alınan II-II kesitinde değişik dalga yayılma hızları için elde edilen mutlak maksimum düşey gerilmelerin (σ_{zz}) yatay uzaklıkla değişimi.



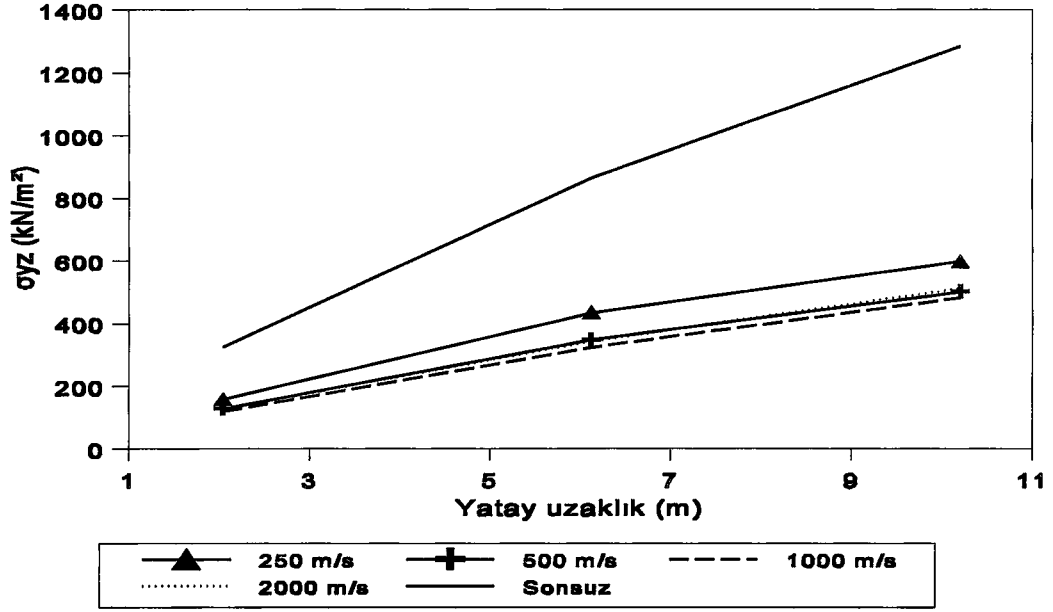
Şekil 74: Asinkronize yatay yer hareketi (doğu-batı (E-W) bileşeni) etkisindeki baraj-rezervuar-temel sisteminin baraj tabanında alınan II-II kesitinde değişik dalga yayılma hızları için elde edilen mutlak maksimum kayma gerilmelerinin (σ_{yz}) yatay uzaklıkla değişimi.



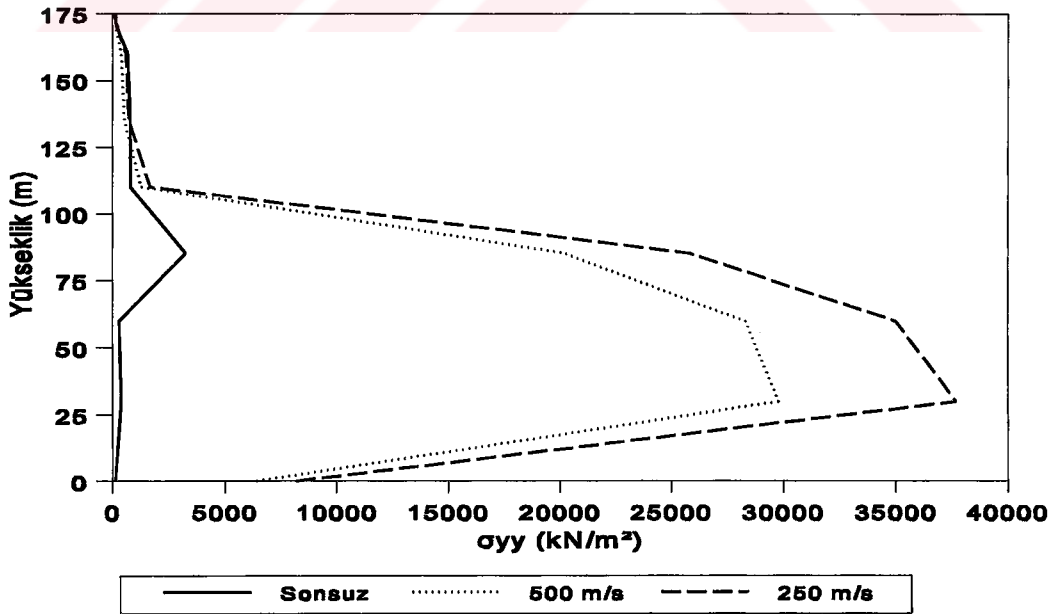
Şekil 75: Asinkronize yatay yer hareketi (doğu-batı (E-W) bileşeni) etkisindeki baraj-rezervuar-temel sisteminin baraj kretine yakın alınan III-III kesitinde değişik dalga yayılma hızları için elde edilen mutlak maksimum yatay gerilmelerin (σ_{yy}) yatay uzaklıkla değişimi.



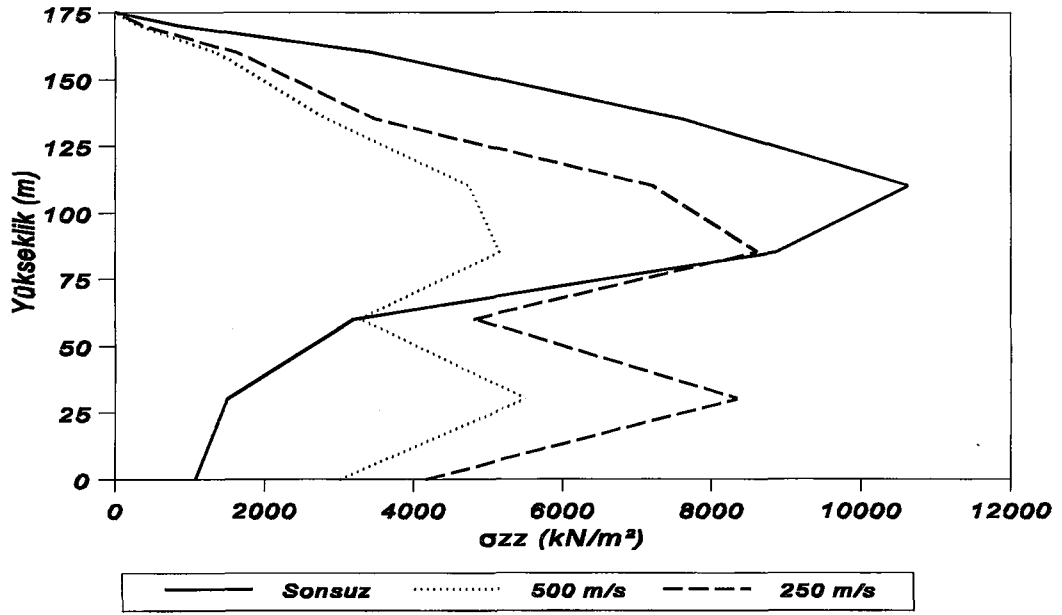
Şekil 76: Asinkronize yatay yer hareketi (doğu-batı (E-W) bileşeni) etkisindeki baraj-rezervuar-temel sisteminin baraj kretine yakın alınan III-III kesitinde değişik dalga yayılma hızları için elde edilen mutlak maksimum düşey gerilmelerin (σ_{zz}) yatay uzaklıkla değişimi.



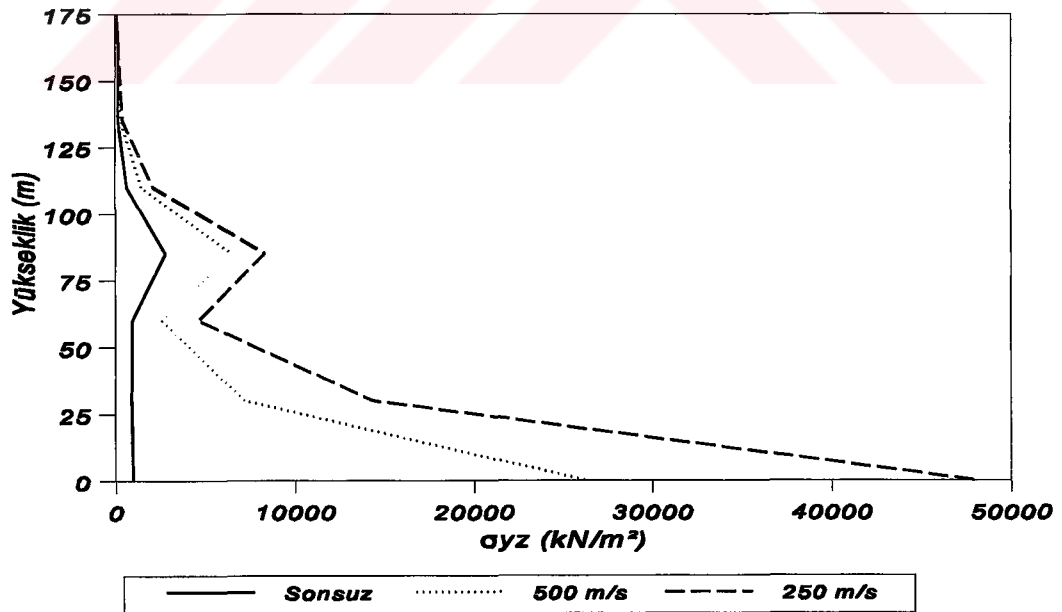
Şekil 77: Asinkronize yatay yer hareketi (doğu-batı (E-W) bileşeni) etkisindeki baraj-rezervuar-temel sisteminin baraj kretine yakın alınan III-III kesitinde değişik dalga yayılma hızları için elde edilen mutlak maksimum kayma gerilmelerinin (σ_{yz}) yatay uzaklıkla değişimi.



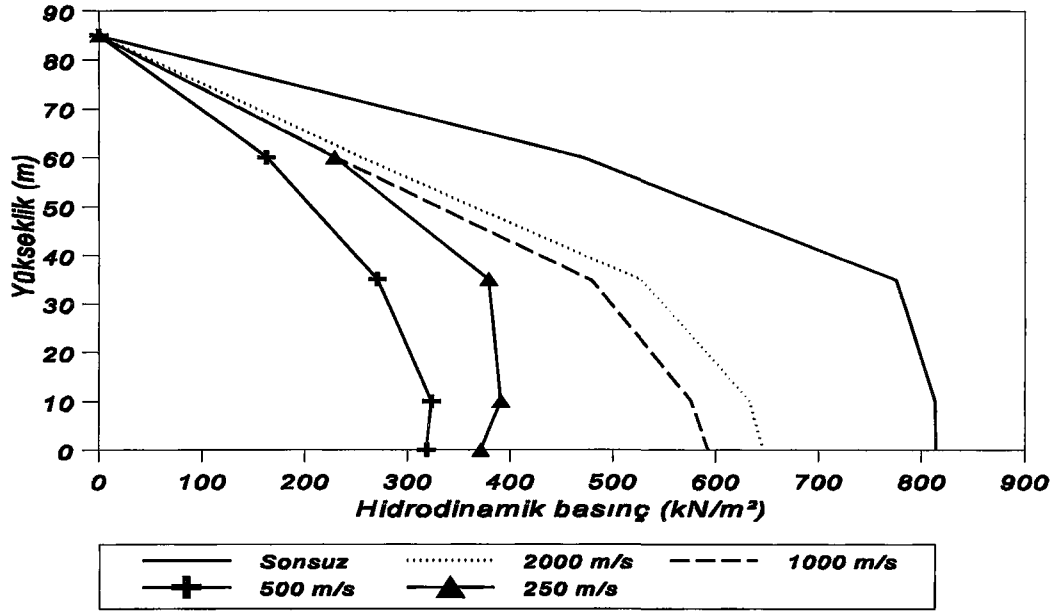
Şekil 78: Asinkronize yatay yer hareketi (doğu-batı (E-W) bileşeni) etkisindeki baraj-rezervuar-temel sisteminin IV-IV kesitinde değişik dalga yayılma hızları için elde edilen mutlak maksimum yatay gerilmelerin (σ_{yx}) yükseklikle değişimi.



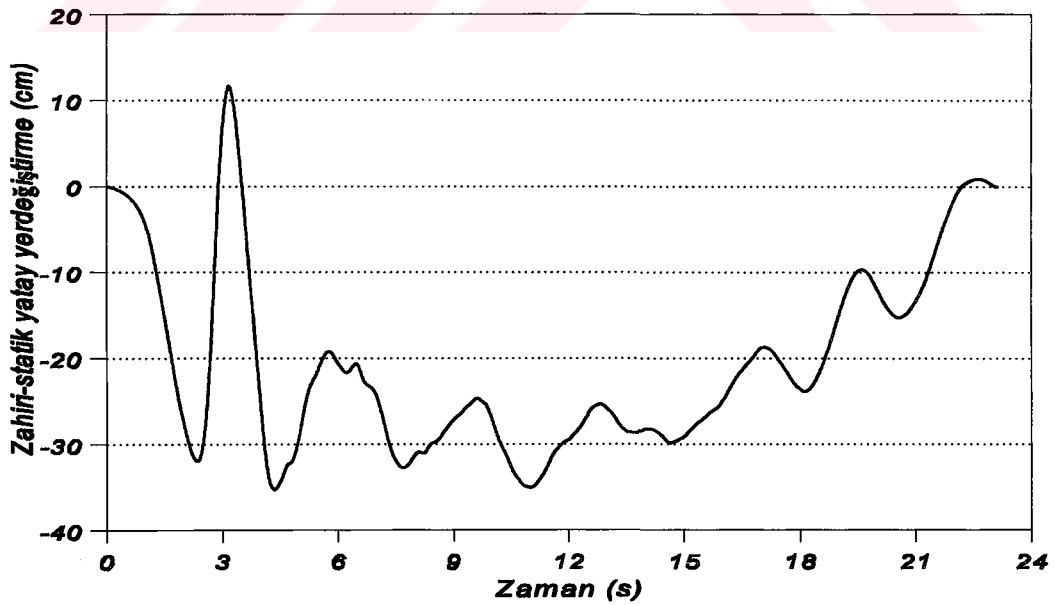
Şekil 79: Asinkronize yatay yer hareketi (doğu-batı (E-W) bileşeni) etkisindeki baraj-rezervuar-temel sisteminin IV-IV kesitinde değişik dalga yayılma hızları için elde edilen mutlak maksimum düşey gerilmelerin (σ_{zz}) yükseklikle değişimi.



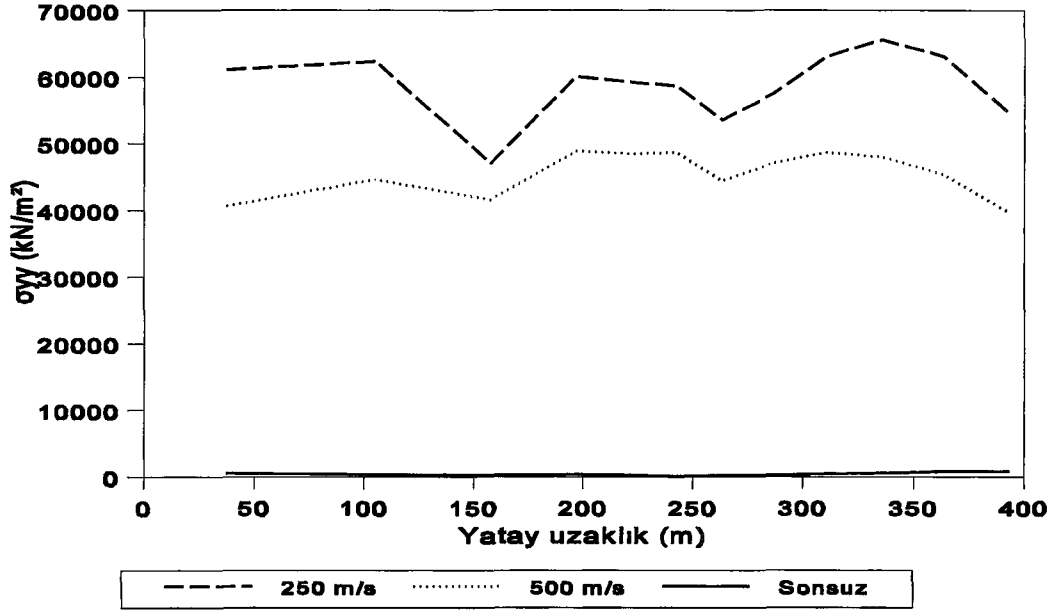
Şekil 80: Asinkronize yatay yer hareketi (doğu-batı (E-W) bileşeni) etkisindeki baraj-rezervuar-temel sisteminin IV-IV kesitinde değişik dalga yayılma hızları için elde edilen mutlak maksimum kayma gerilmelerinin (σ_{yz}) yükseklikle değişimi.



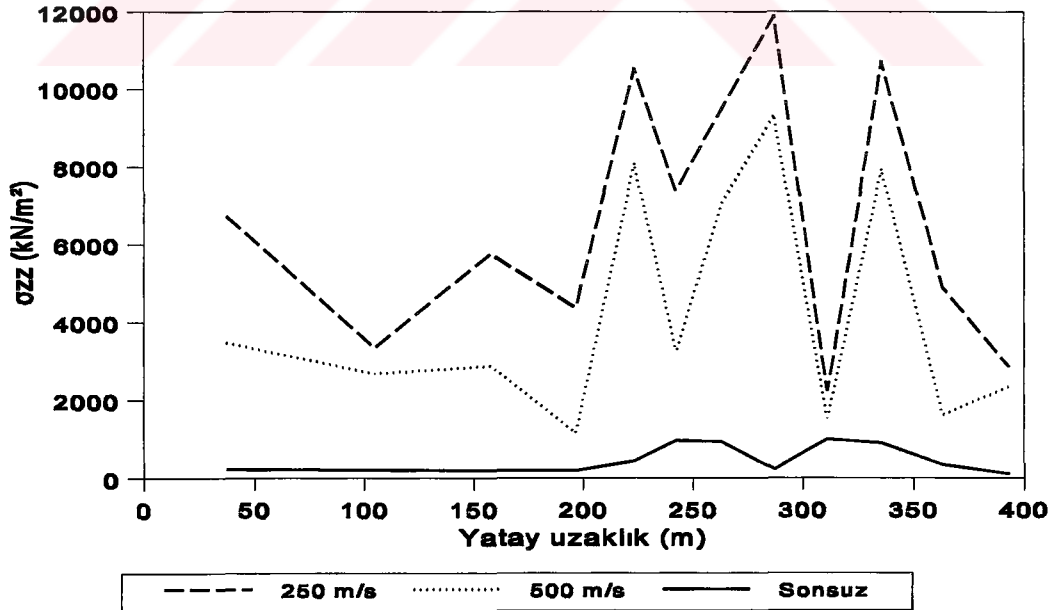
Şekil 81: Asinkronize yatay yer hareketi (doğu-batı (E-W) bileşeni) etkisindeki baraj-rezervuar-temel sisteminin baraj memba yüzeyi boyunca değişik dalga yayılma hızları için elde edilen mutlak maksimum hidrodinamik basınçların yükseklikle değişimi.



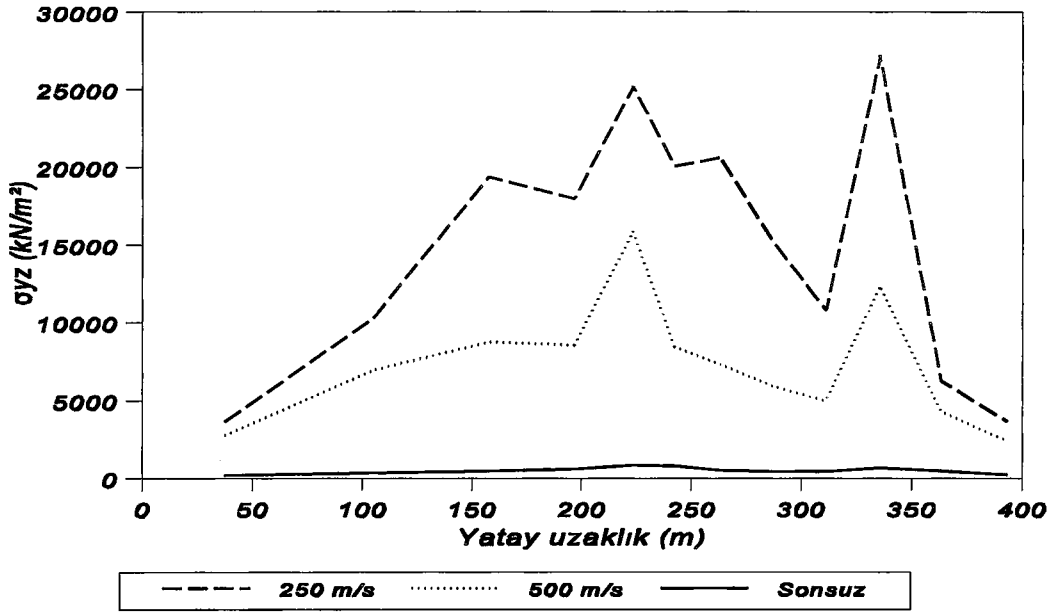
Şekil 82: Asinkronize yatay yer hareketi (kuzey-güney (N-S) bileşeni) etkisindeki baraj-rezervuar-temel sisteminin baraj kretinde sonsuz dalga yayılma hızı için elde edilen zahiri-statik yatay yerdeğiştirme zamanla değişimi.



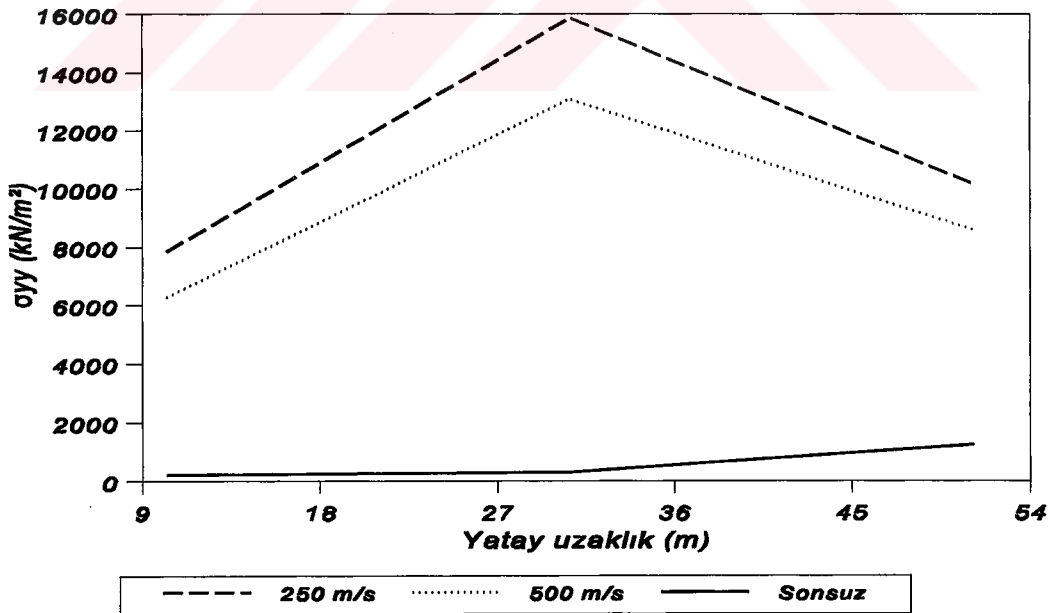
Şekil 83: Asinkronize yatay yer hareketi (kuzey-güney (N-S) bileşeni) etkisindeki baraj-rezervuar-temel sisteminin baraj temelinde alınan I-I kesitinde değişik dalga yayılma hızları için elde edilen mutlak maksimum yatay gerilmelerin (σ_{yy}) yatay uzaklıkla değişimi.



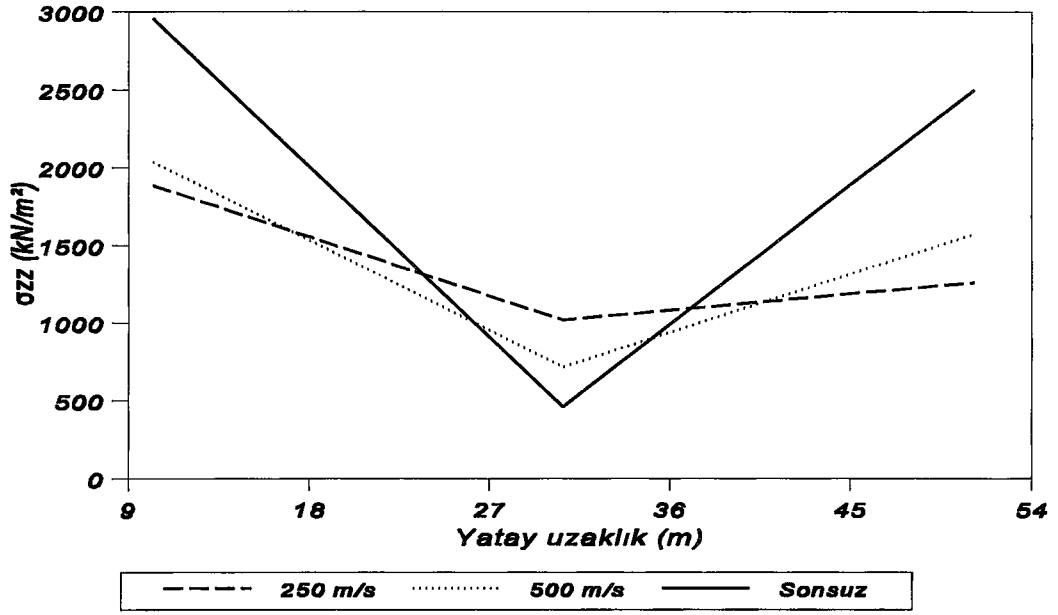
Şekil 84: Asinkronize yatay yer hareketi (kuzey-güney (N-S) bileşeni) etkisindeki baraj-rezervuar-temel sisteminin baraj temelinde alınan I-I kesitinde değişik dalga yayılma hızları için elde edilen mutlak maksimum düşey gerilmelerin (σ_{zz}) yatay uzaklıkla değişimi.



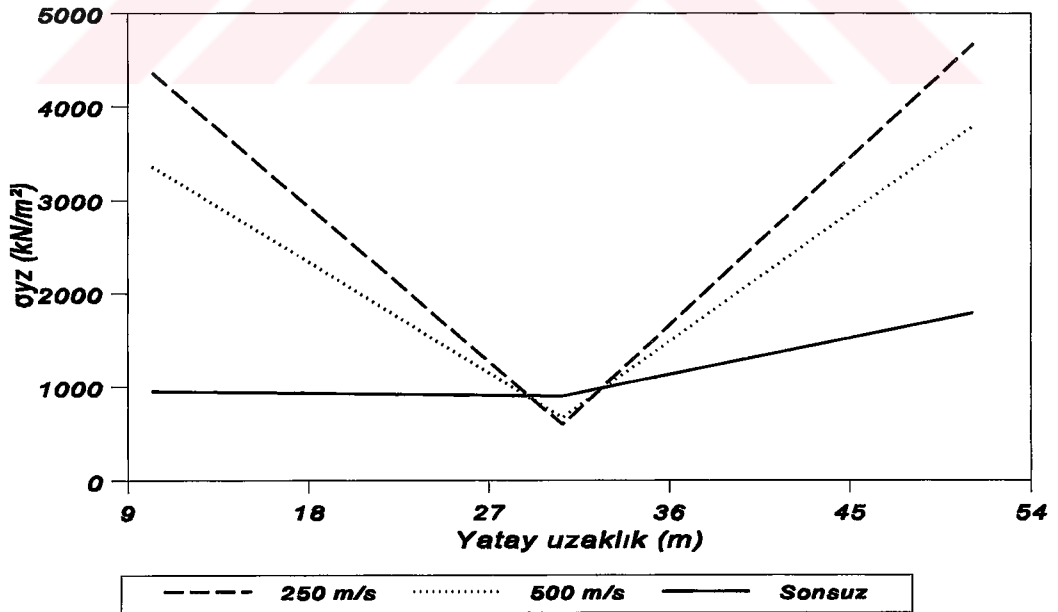
Şekil 85: Asinkronize yatay yer hareketi (kuzey-güney (N-S) bileşeni) etkisindeki baraj-rezervuar-temel sisteminin baraj temelinde alınan I-I kesitinde değişik dalga yayılma hızları için elde edilen mutlak maksimum kayma gerilmelerinin (σ_{yz}) yatay uzaklıkla değişimi.



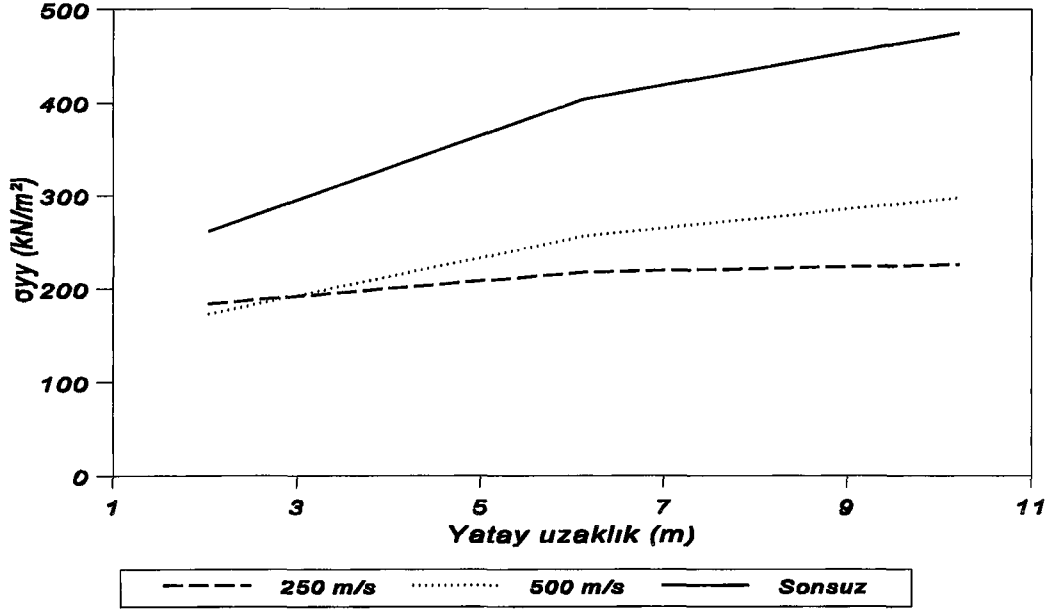
Şekil 86: Asinkronize yatay yer hareketi (kuzey-güney (N-S) bileşeni) etkisindeki baraj-rezervuar-temel sisteminin baraj tabanında alınan II-II kesitinde değişik dalga yayılma hızları için elde edilen mutlak maksimum yatay gerilmelerin (σ_{yy}) yatay uzaklıkla değişimi.



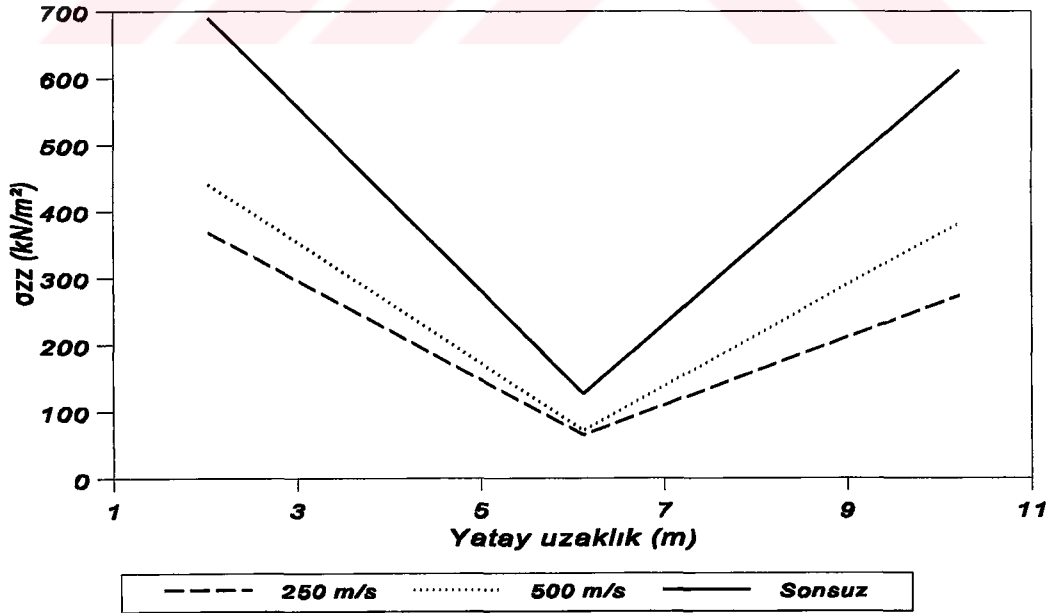
Şekil 87: Asinkronize yatay yer hareketi (kuzey-güney (N-S) bileşeni) etkisindeki baraj-rezervuar-temel sisteminin baraj tabanında alınan II-II kesitinde değişik dalga yayılma hızları için elde edilen mutlak maksimum düşey gerilmelerin (σ_{zz}) yatay uzaklıkla değişimi.



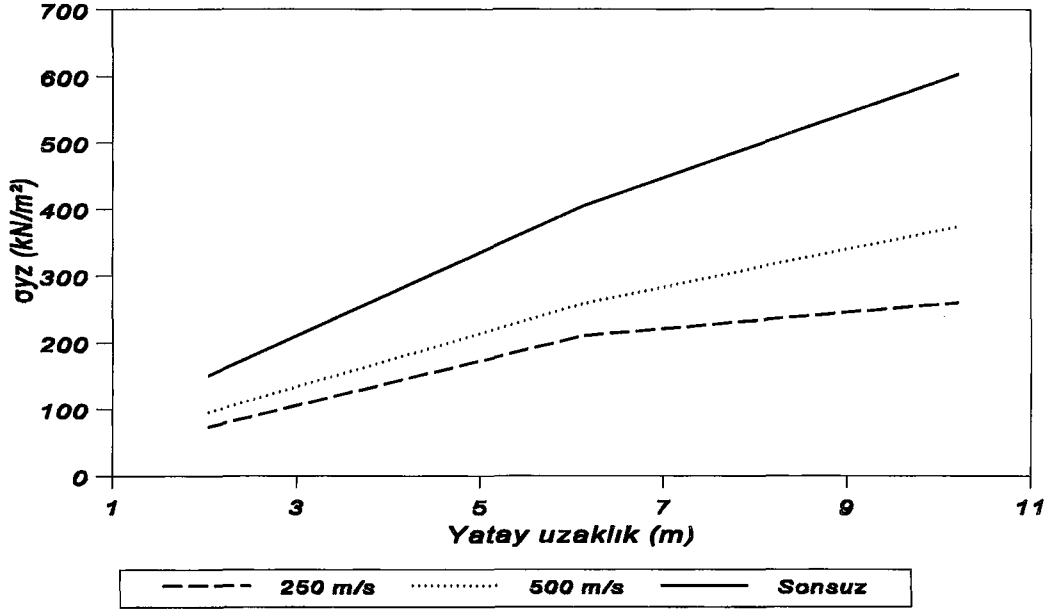
Şekil 88: Asinkronize yatay yer hareketi (kuzey-güney (N-S) bileşeni) etkisindeki baraj-rezervuar-temel sisteminin baraj tabanında alınan II-II kesitinde değişik dalga yayılma hızları için elde edilen mutlak maksimum kayma gerilmelerinin (σ_{yz}) yatay uzaklıkla değişimi.



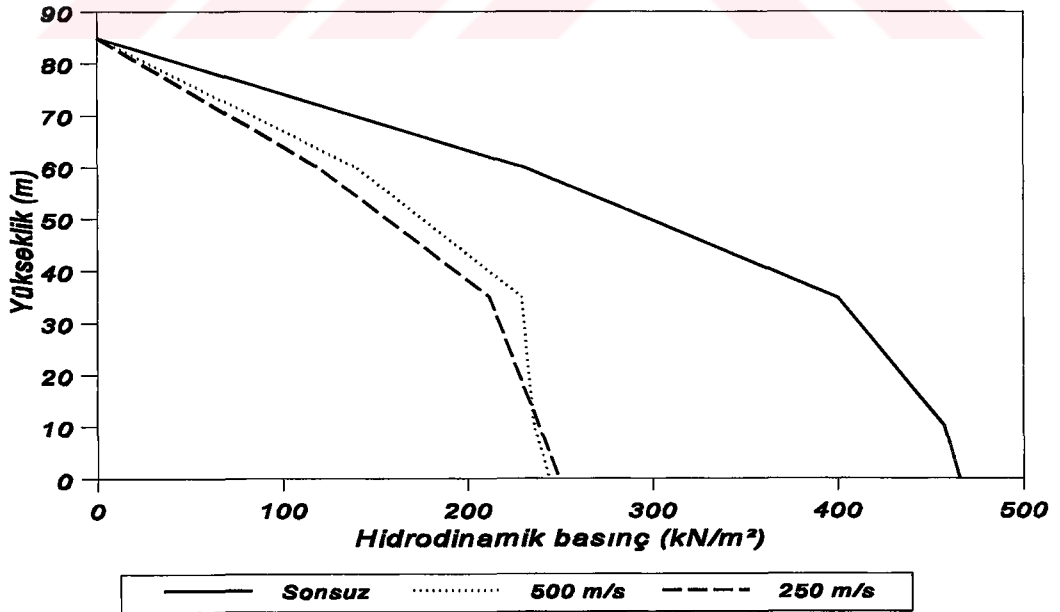
Şekil 89: Asinkronize yatay yer hareketi (kuzey-güney (N-S) bileşeni) etkisindeki baraj-rezervuar-temel sisteminin baraj kretine yakın alınan III-III kesitinde değişik dalga yayılma hızları için elde edilen mutlak maksimum yatay gerilmelerin (σ_{yy}) yatay uzaklıkla değişimi.



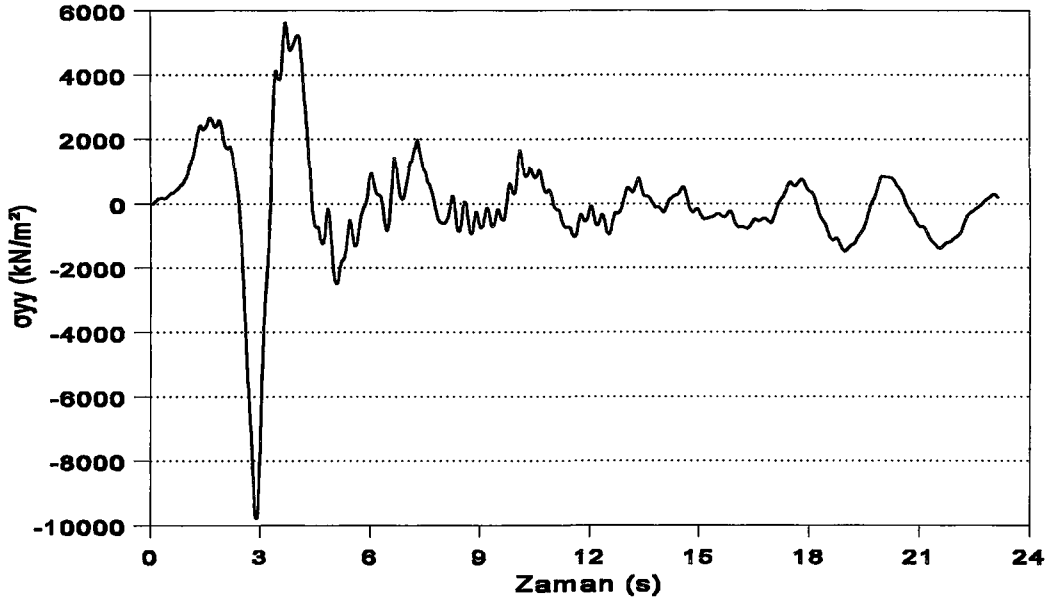
Şekil 90: Asinkronize yatay yer hareketi (kuzey-güney (N-S) bileşeni) etkisindeki baraj-rezervuar-temel sisteminin baraj kretine yakın alınan III-III kesitinde değişik dalga yayılma hızları için elde edilen mutlak maksimum düşey gerilmelerin (σ_{zz}) yatay uzaklıkla değişimi.



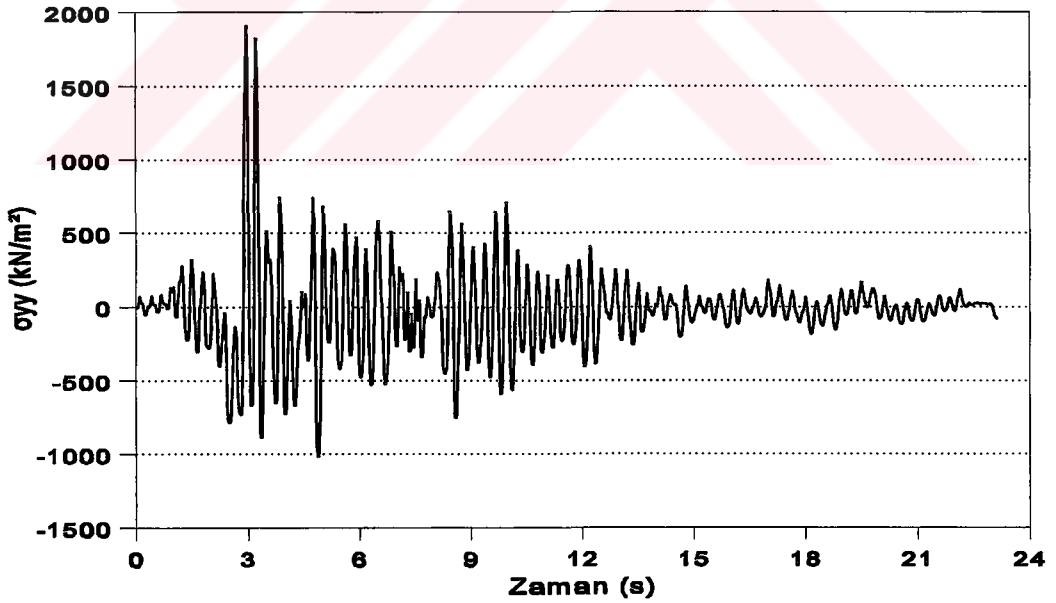
Şekil 91: Asinkronize yatay yer hareketi (kuzey-güney (N-S) bileşeni) etkisindeki baraj-rezervuar-temel sisteminin baraj kretine yakın alınan III-III kesitinde değişik dalga yayılma hızları için elde edilen mutlak maksimum kayma gerilmelerinin (σ_{yz}) yatay uzaklıkla değişimi.



Şekil 92: Asinkronize yatay yer hareketi (kuzey-güney (N-S) bileşeni) etkisindeki baraj-rezervuar-temel sisteminin baraj memba yüzeyi boyunca değişik dalga yayılma hızları için elde edilen mutlak maksimum hidrodinamik basınçların yükseklikle değişimi.

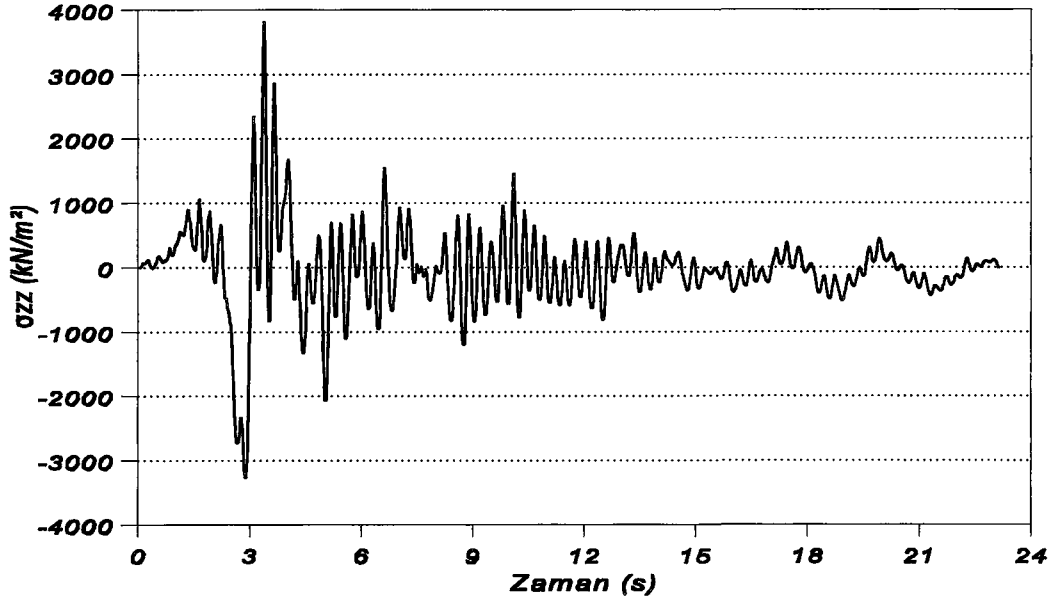


a) 2000 m/s

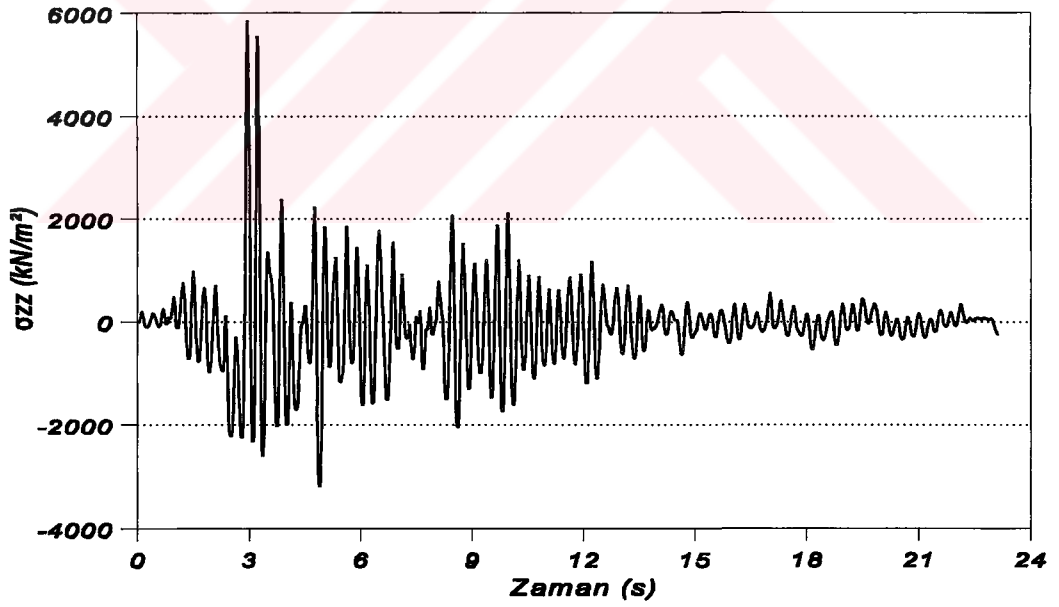


b) Sonsuz

Şekil 93: Asinkronize yatay yer hareketi (kuzey-güney (N-S) bileşeni) etkisindeki baraj-rezervuar-temel sisteminin baraj memba topuğundaki B Gauss integrasyon noktasında 2000 m/s ve sonsuz dalga yayılma hızları için elde edilen yatay gerilmelerin (σ_{yy}) zamanla değişimi.

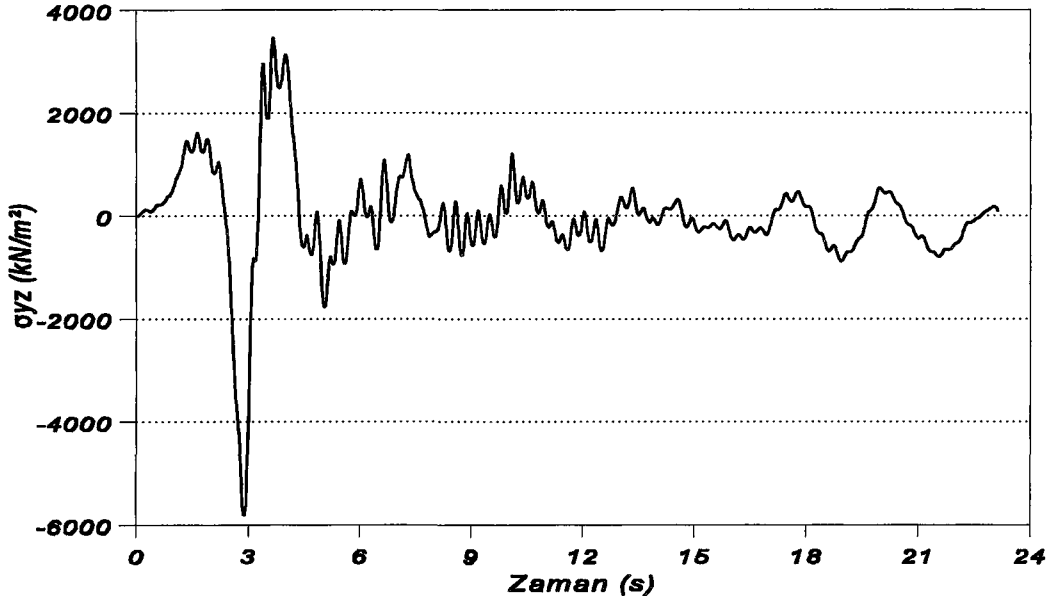


a) 2000 m/s

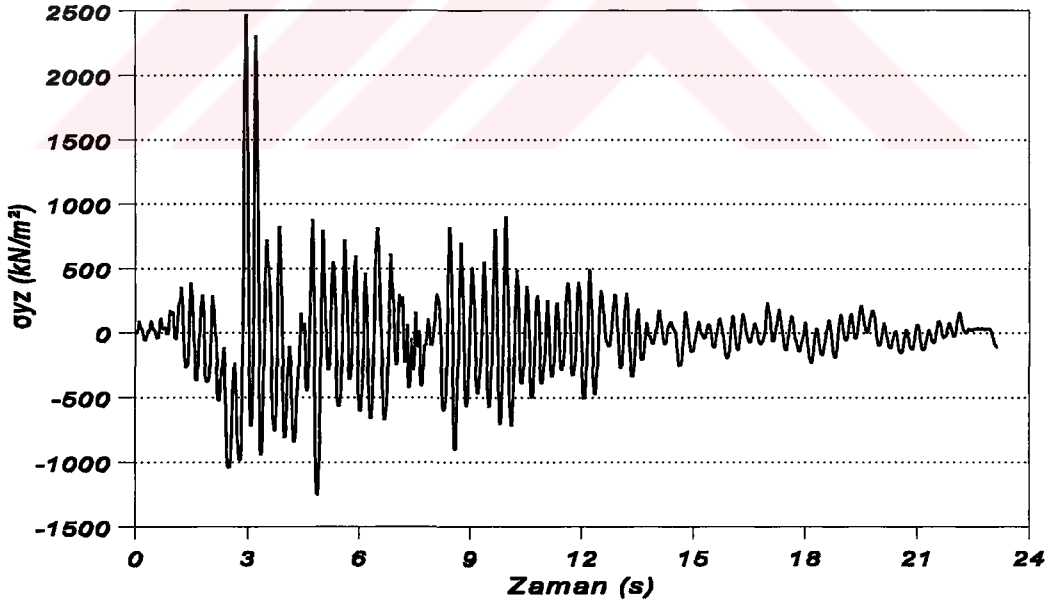


b) Sonsuz

Şekil 94: Asinkronize yatay yer hareketi (kuzey-güney (N-S) bileşeni) etkisindeki baraj-rezervuar-temel sisteminin baraj memba topuğundaki B Gauss integrasyon noktasında 2000 m/s ve sonsuz dalga yayılma hızları için elde edilen düşey gerilmelerin (σ_{zz}) zamanla değişimi.

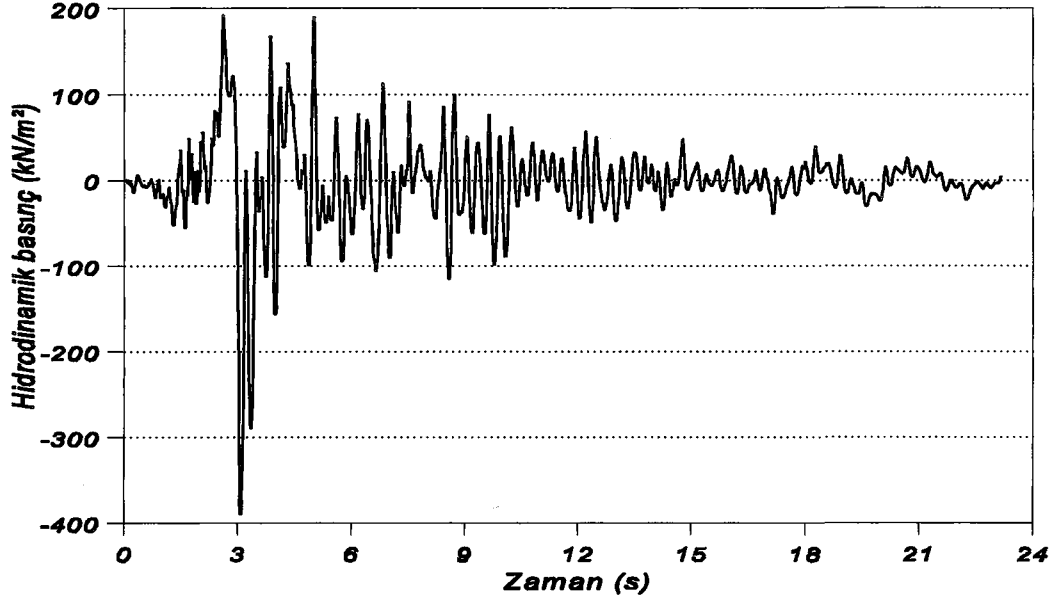


a) 2000 m/s

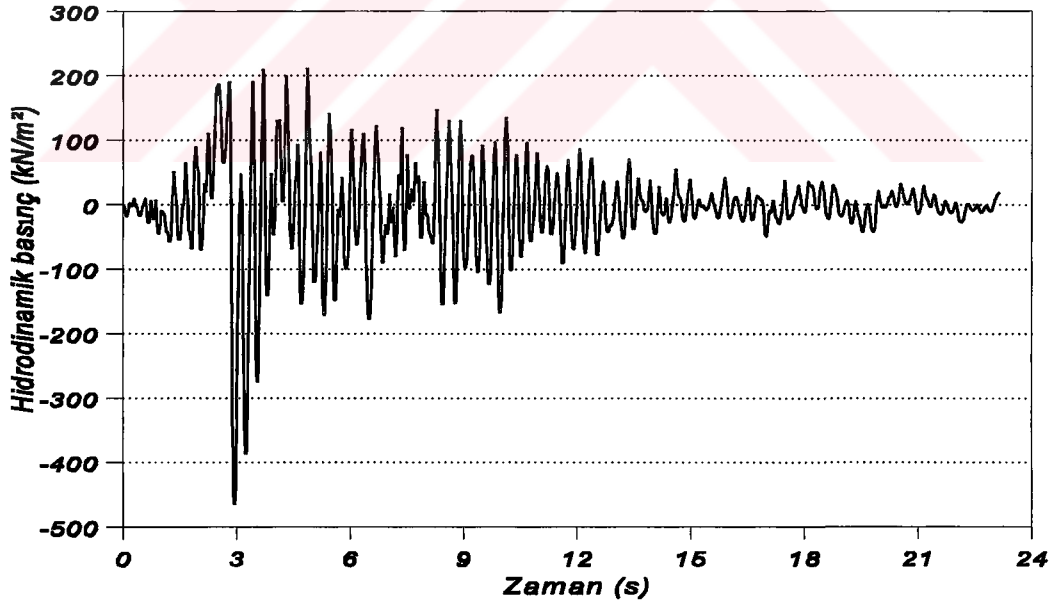


b) Sonsuz

Şekil 95: Asinkronize yatay yer hareketi (kuzey-güney (N-S) bileşeni) etkisindeki baraj-rezervuar-temel sisteminin baraj memba topuğundaki B Gauss integrasyon noktasında 2000 m/s ve sonsuz dalga yayılma hızları için elde edilen kayma gerilmelerinin (σ_{yz}) zamanla değişimi.

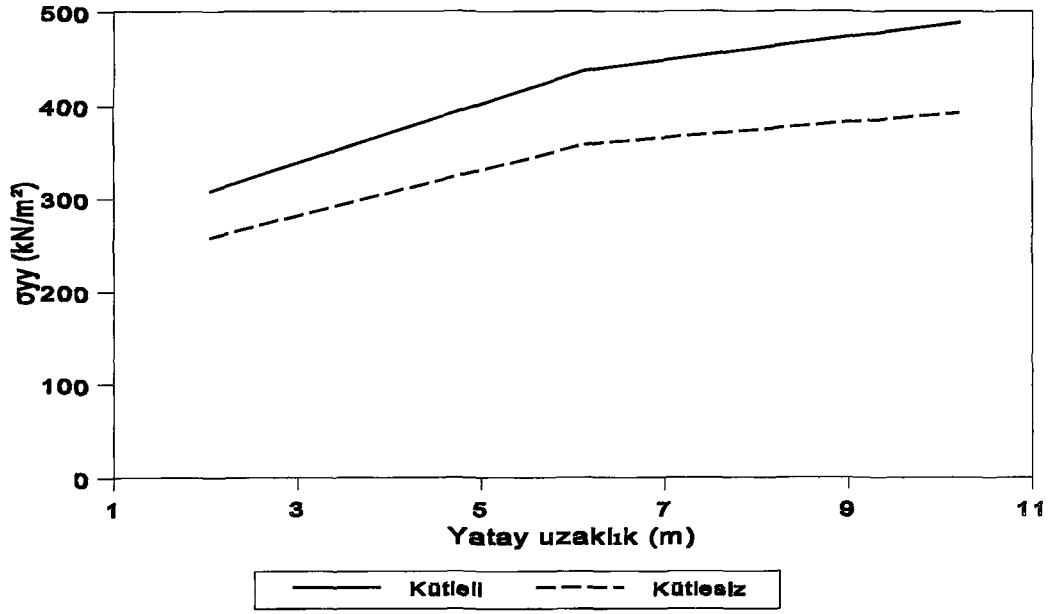


a) 2000 m/s

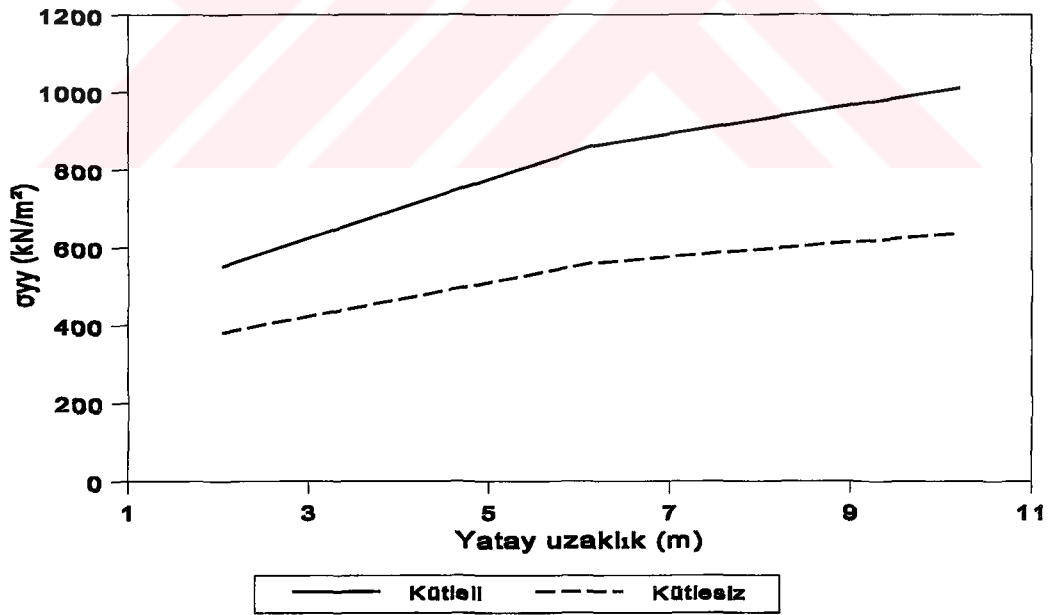


b) Sonsuz

Şekil 96: Asinkronize yatay yer hareketi (kuzey-güney (N-S) bileşeni) etkisindeki baraj-rezervuar-temel sisteminin baraj memba yüzeyine yakın E Gauss integrasyon noktasında 2000 m/s ve sonsuz dalga yayılma hızları için elde edilen hidrodynamic basınçların zamanla değişimi.

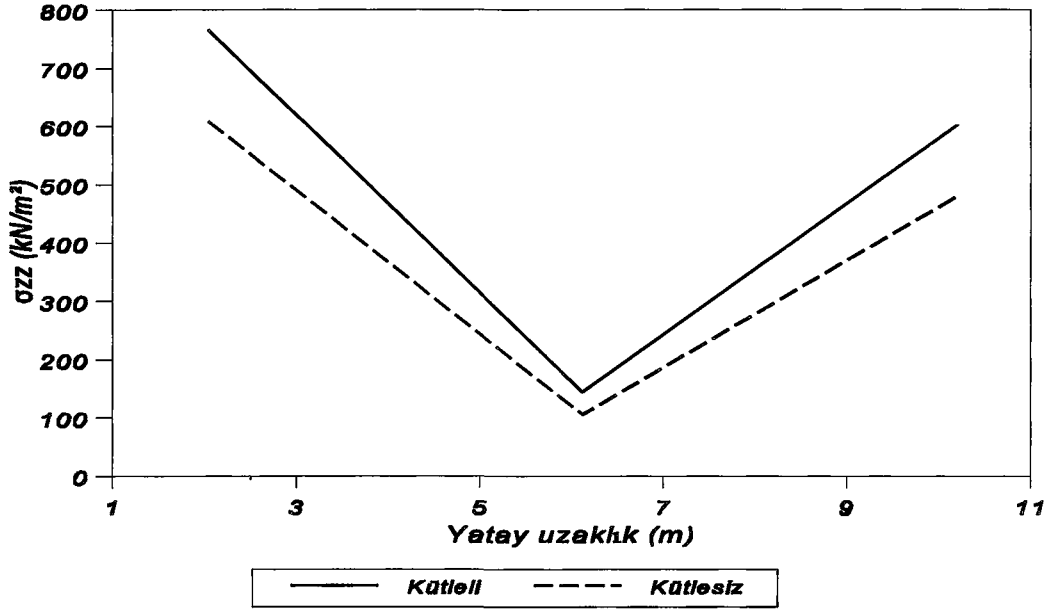


a) 250 m/s

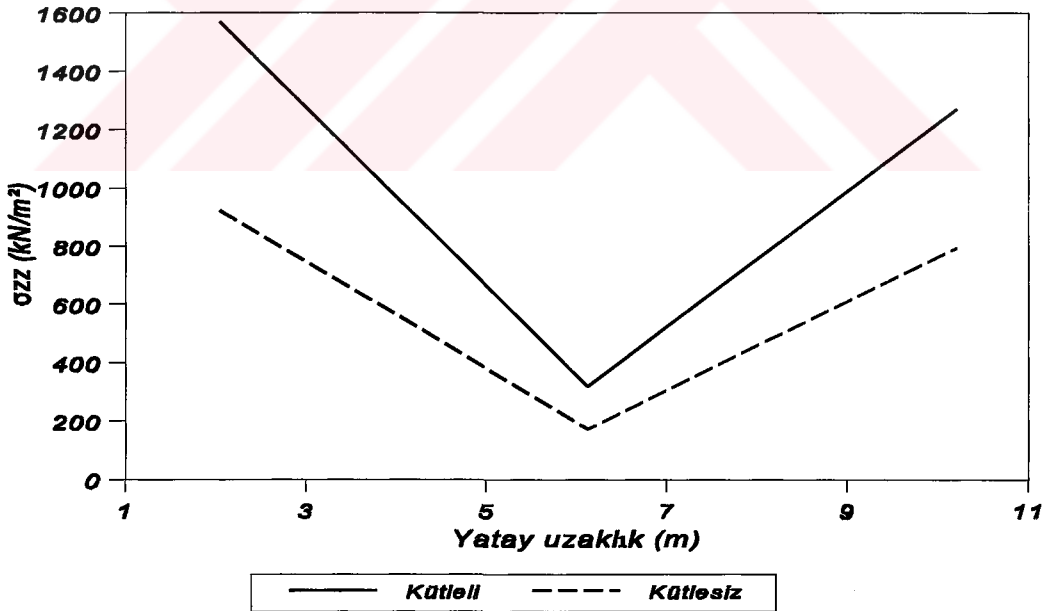


b) Sonsuz

Şekil 97: Baraj temelinin kütleli ve kütleli olması durumlarında III-III kesitinde 250 m/s ve sonsuz dalga yayılma hızları için elde edilen mutlak maksimum yatay gerilmelerin (σ_{yy}) yatay uzaklıkla değişimi.

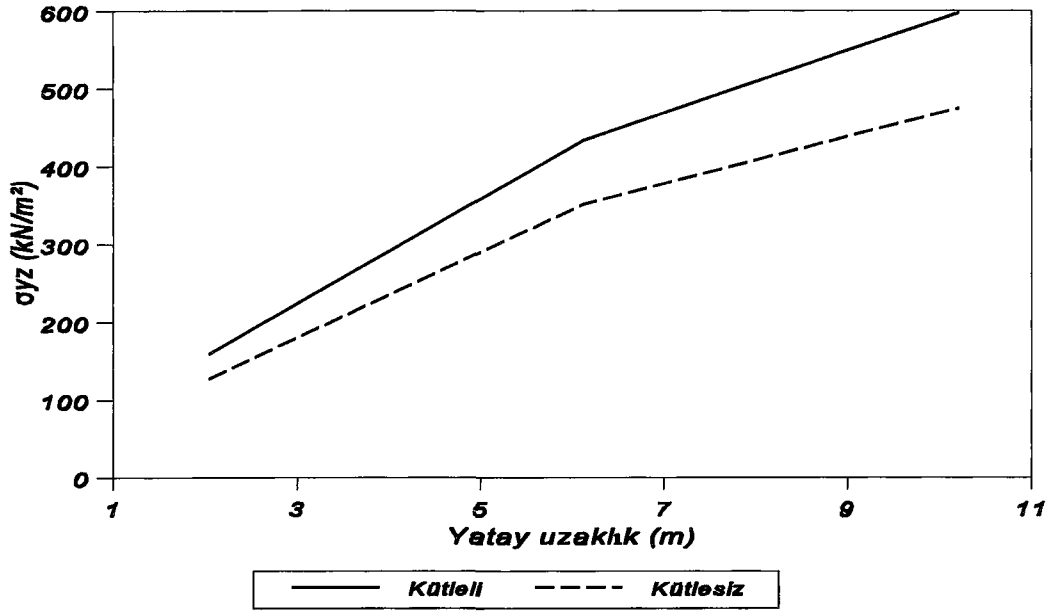


a) 250 m/s

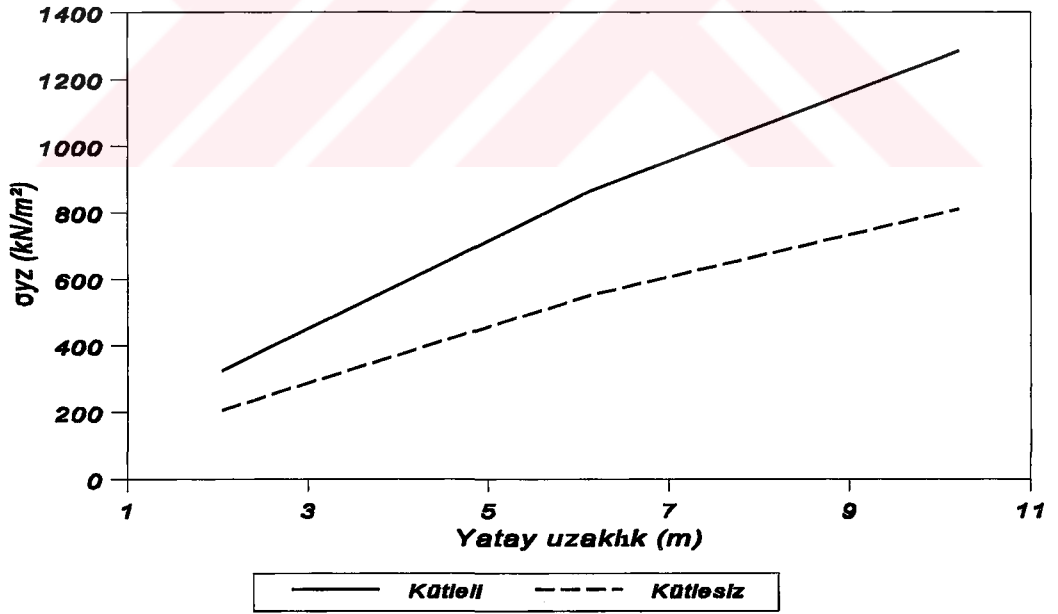


b) Sonsuz

Şekil 98: Baraj temelinin kütleli ve kütleli olması durumlarında III-III kesitinde 250 m/s ve sonsuz dalga yayılma hızları için elde edilen mutlak maksimum düşey gerilmelerin (σ_{zz}) yatay uzaklıkla değişimi.

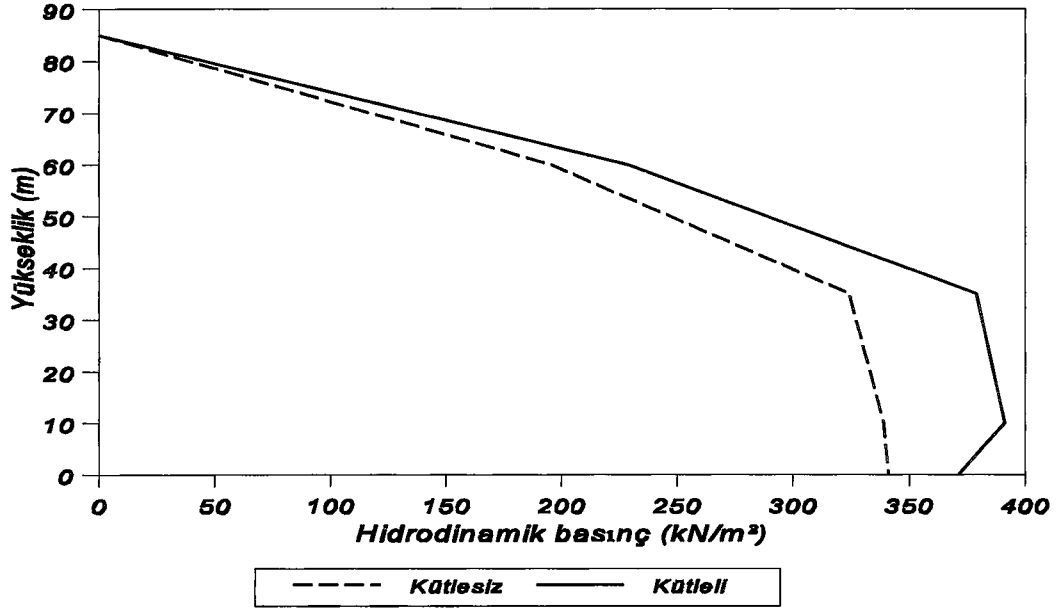


a) 250 m/s

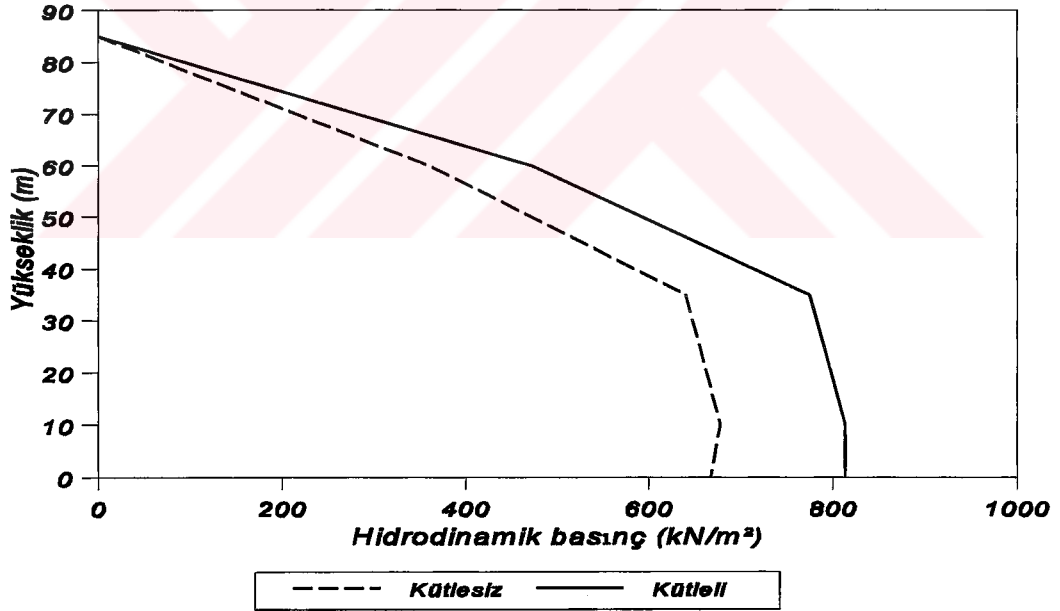


b) Sonsuz

Şekil 99: Baraj temelinin kütleli ve kütleli olması durumlarında III-III kesitinde 250 m/s ve sonsuz dalga yayılma hızları için elde edilen mutlak maksimum kayma gerilmelerinin (σ_{yz}) yatay uzaklıkla değişimi.

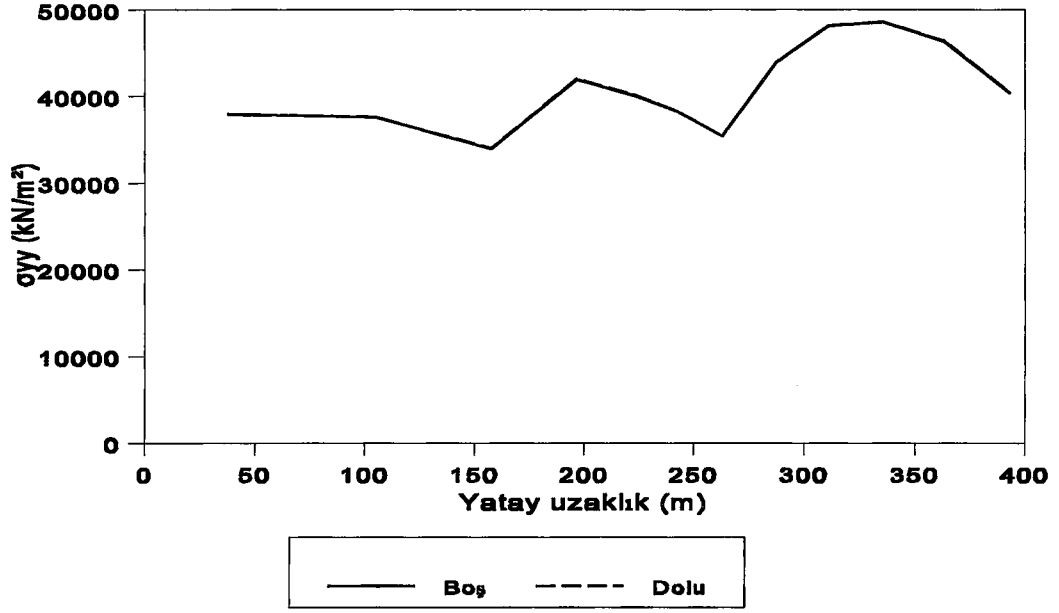


a) 250 m/s

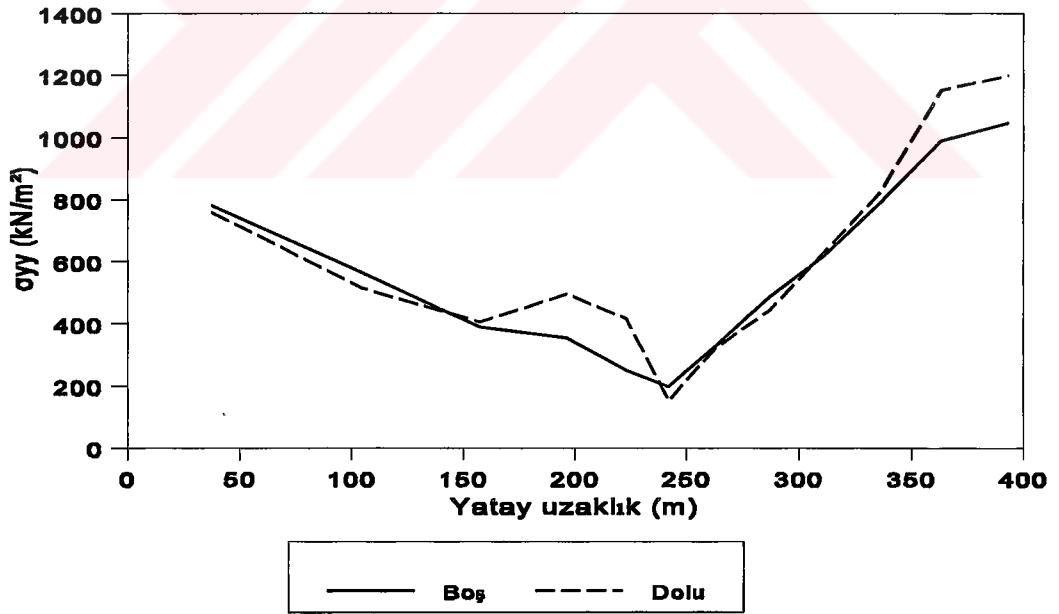


b) Sonsuz

Şekil 100: Baraj temelinin kütleli ve kütlesiz olması durumlarında baraj memba yüzeyinde 250 m/s ve sonsuz dalga yayılma hızları için elde edilen mutlak maksimum hidrodinamik basınçların yükseklikle değişimi.

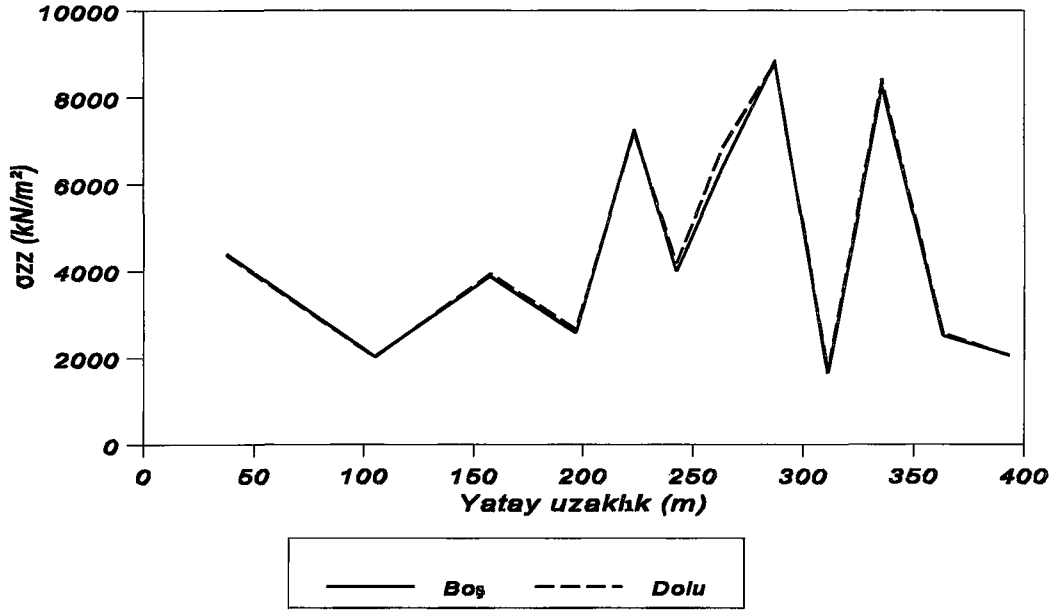


a) 250 m/s

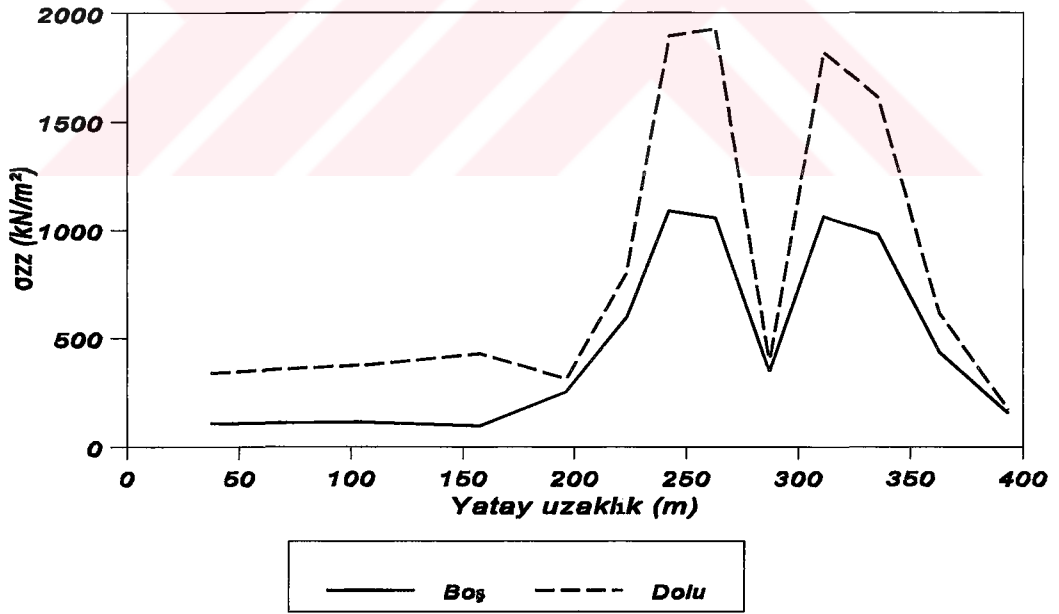


b) Sonsuz

Şekil 101: Barajın boş ve dolu olması durumlarında I-I kesitinde 250 m/s ve sonsuz dalga yayılma hızları için elde edilen mutlak maksimum yatay gerilmelerin (σ_{yy}) yatay uzaklıkla değişimi.



a) 250 m/s

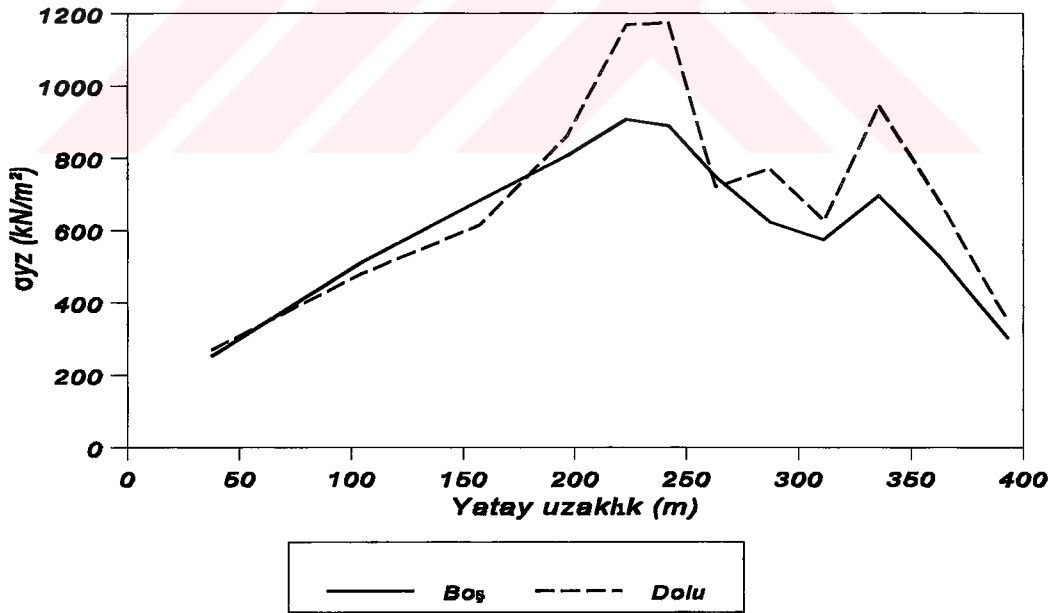


b) Sonsuz

Şekil 102: Barajın boş ve dolu olması durumlarında I-I kesitinde 250 m/s ve sonsuz dalga yayılma hızları için elde edilen mutlak maksimum düşey gerilmelerin (σ_{zz}) yatay uzaklıkla değişimi.

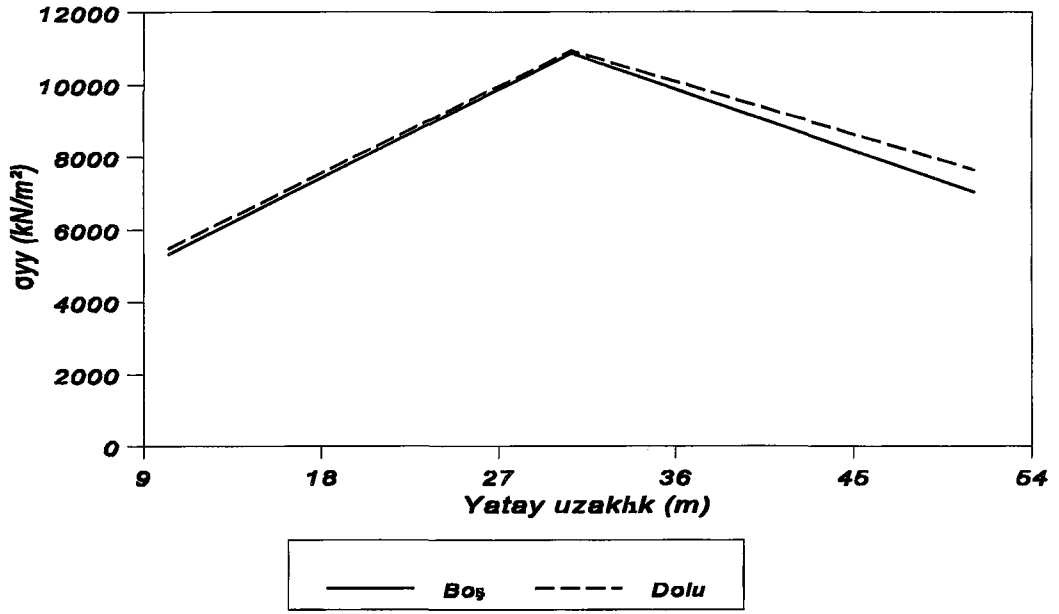


a) 250 m/s

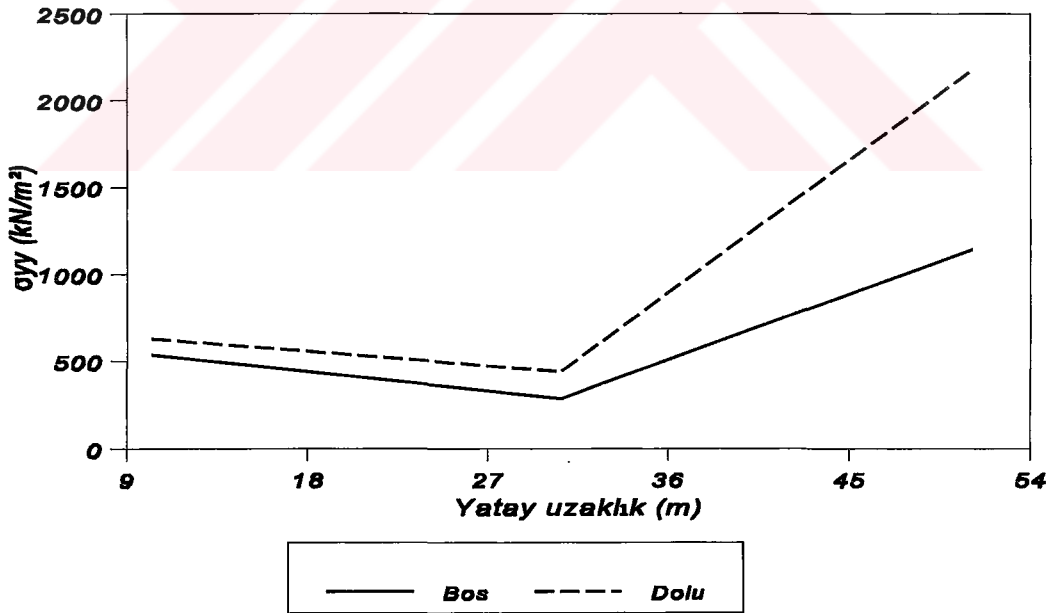


b) Sonsuz

Şekil 103: Barajın boş ve dolu olması durumlarında I-I kesitinde 250 m/s ve sonsuz dalga yayılma hızları için elde edilen mutlak maksimum kayma gerilmelerinin (σ_{yz}) yatay uzaklıkla değişimi.

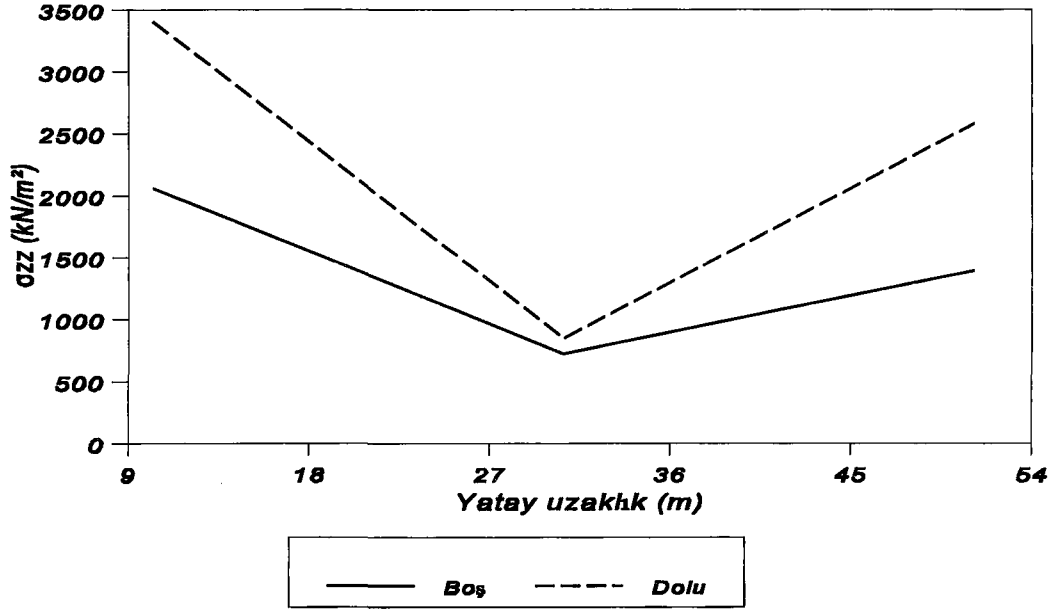


a) 250 m/s

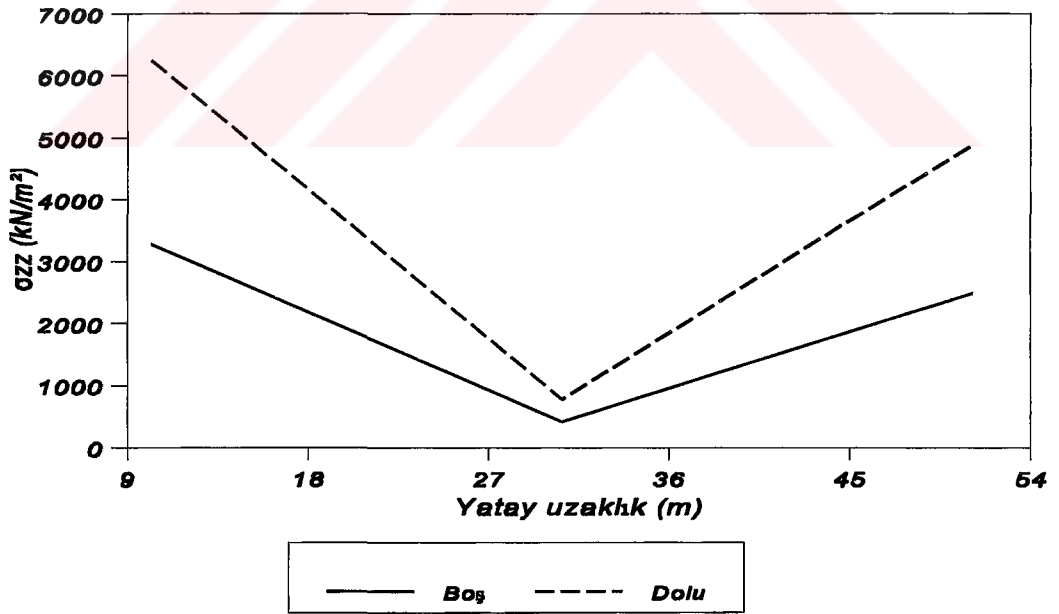


b) Sonsuz

Şekil 104: Barajın boş ve dolu olması durumlarında II-II kesitinde 250 m/s ve sonsuz dalga yayılma hızları için elde edilen mutlak maksimum yatay gerilmelerin (σ_{yy}) yatay uzaklıkla değişimi.

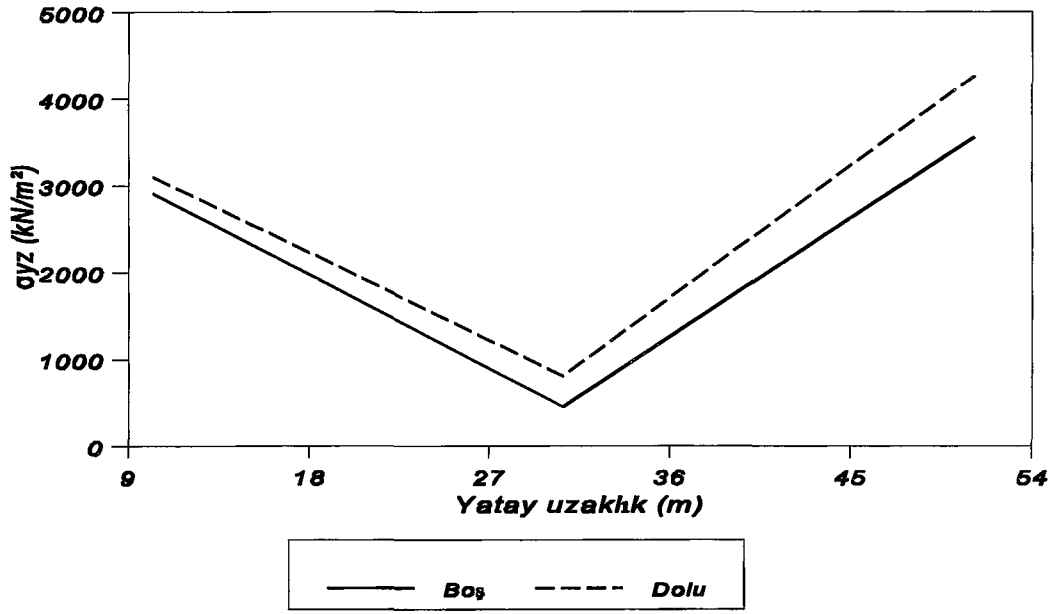


a) 250 m/s

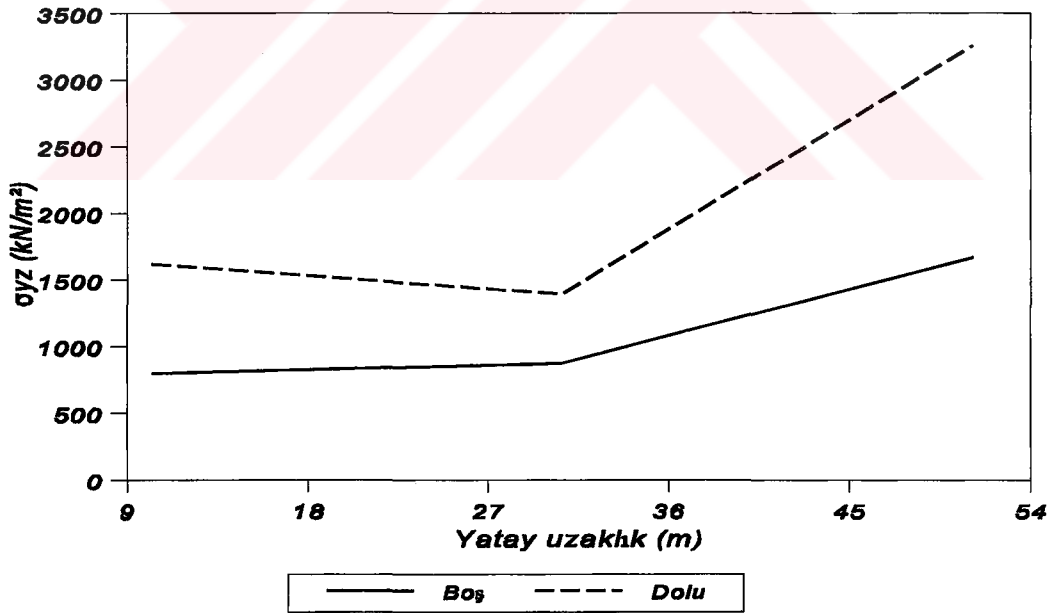


b) Sonsuz

Şekil 105: Barajın boş ve dolu olması durumlarında II-II kesitinde 250 m/s ve sonsuz dalga yayılma hızları için elde edilen mutlak maksimum düşey gerilmelerin (σ_{zz}) yatay uzaklıkla değişimi.

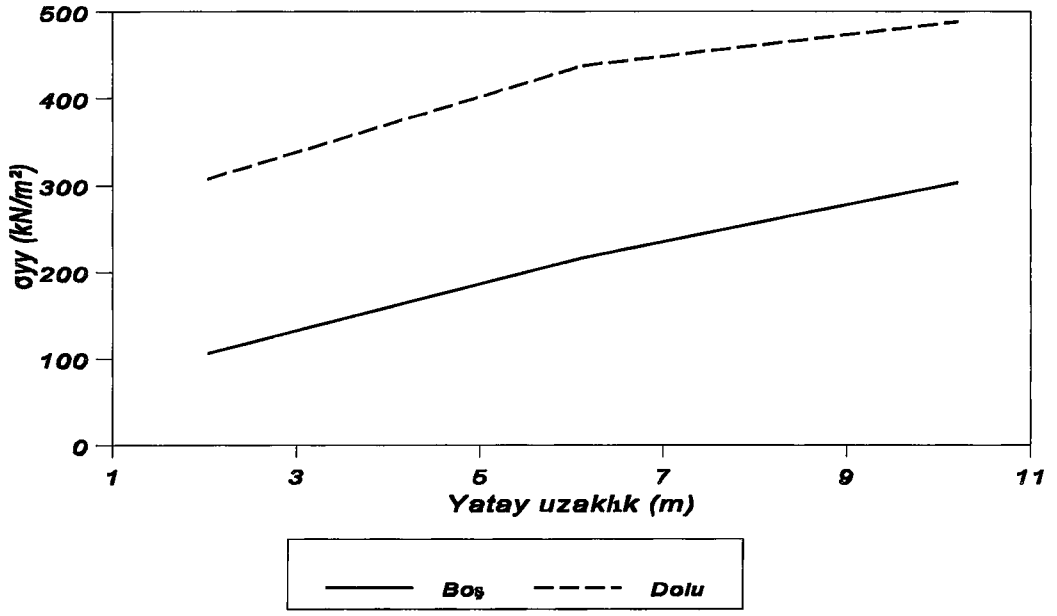


a) 250 m/s

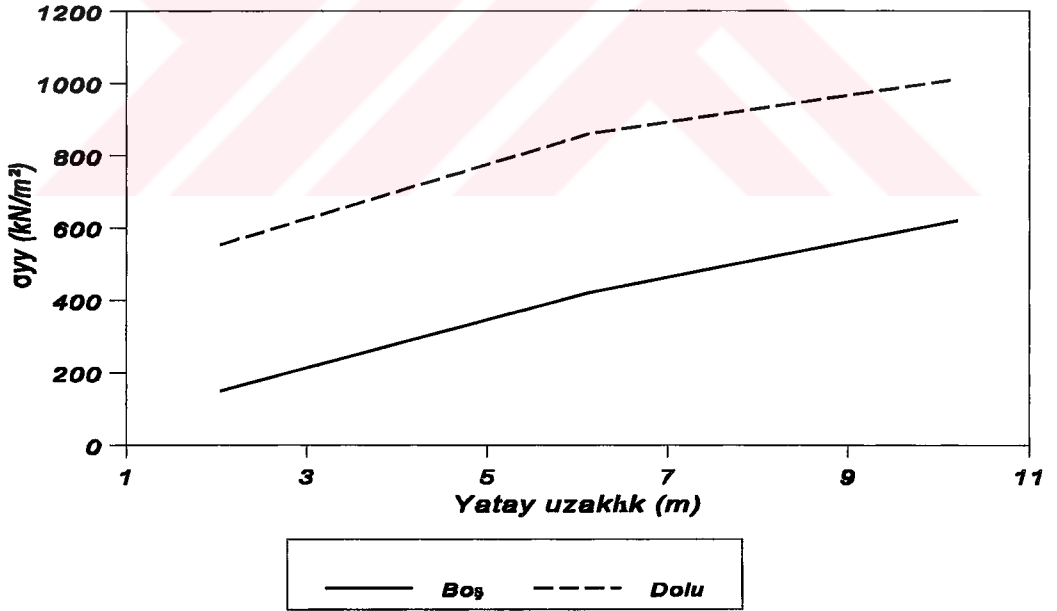


b) Sonsuz

Şekil 106: Barajın boş ve dolu olması durumlarında II-II kesitinde 250 m/s ve sonsuz dalga yayılma hızları için elde edilen mutlak maksimum kayma gerilmelerinin (σ_{yz}) yatay uzaklıkla değişimi.

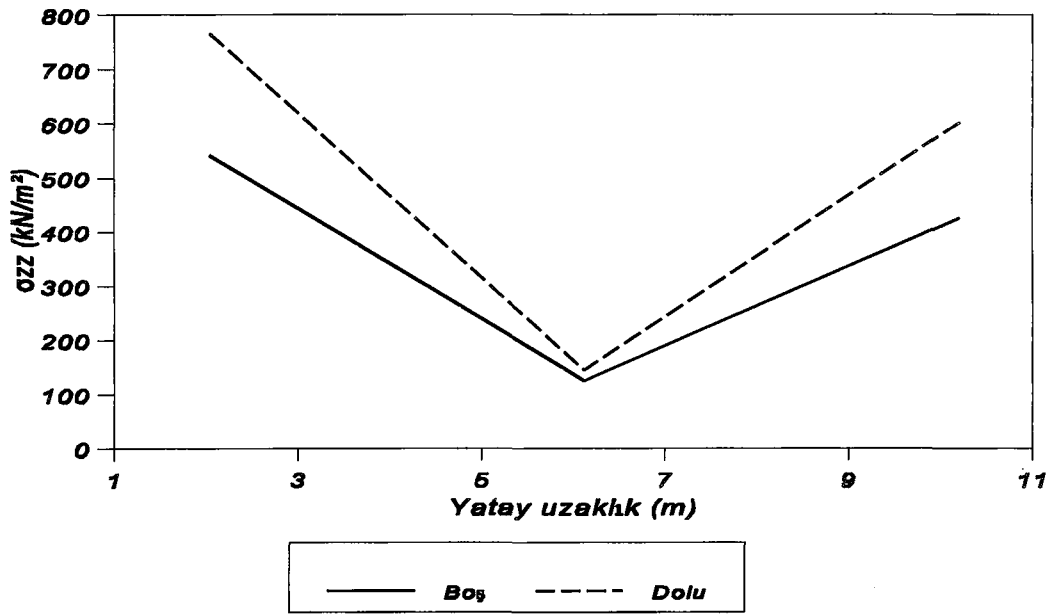


a) 250 m/s

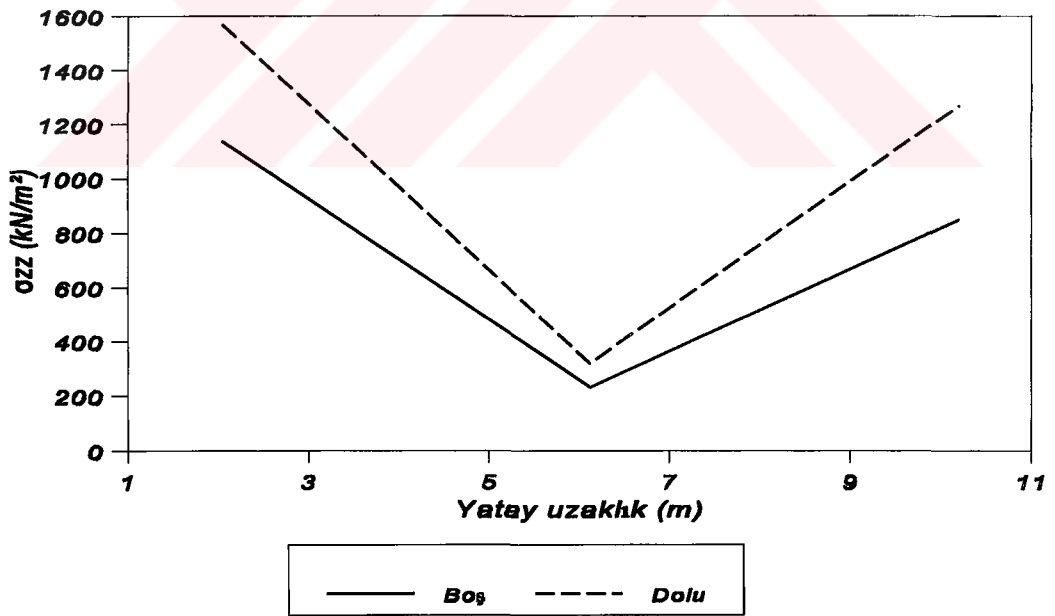


b) Sonsuz

Şekil 107: Barajın boş ve dolu olması durumlarında III-III kesitinde 250 m/s ve sonsuz dalga yayılma hızları için elde edilen mutlak maksimum yatay gerilmelerin (σ_{yy}) yatay uzaklıkla değişimi.

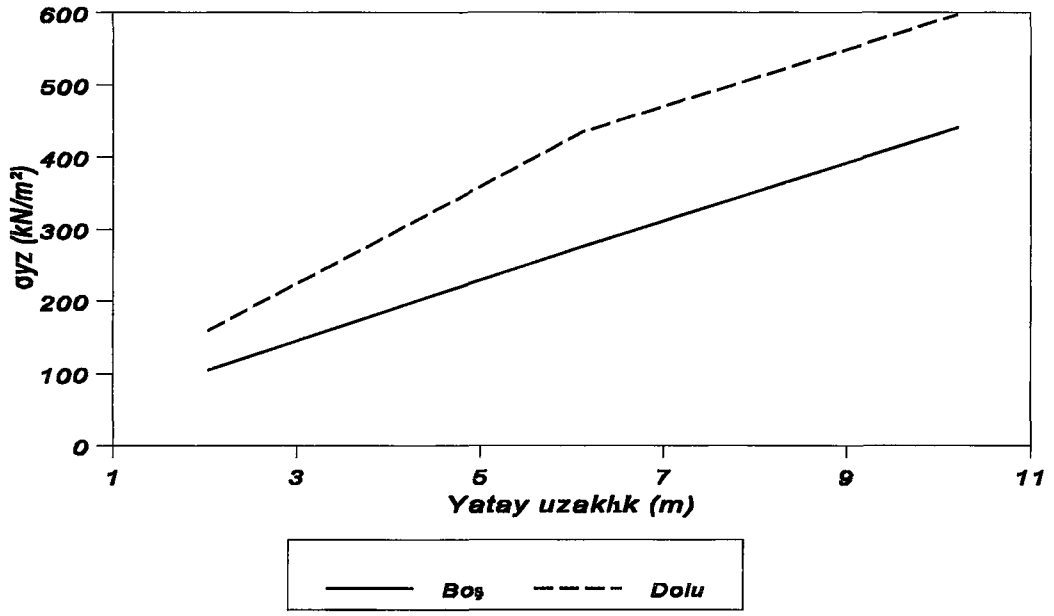


a) 250 m/s

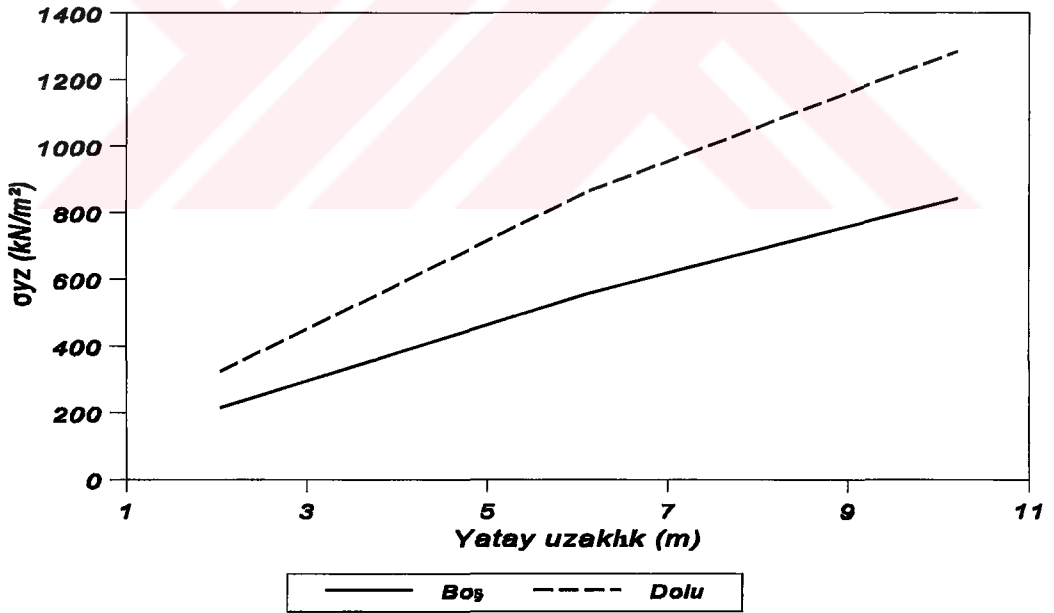


b) Sonsuz

Şekil 108: Barajın boş ve dolu olması durumlarında III-III kesitinde 250 m/s ve sonsuz dalga yayılma hızları için elde edilen mutlak maksimum düşey gerilmelerin (σ_{zz}) yatay uzaklıkla değişimi.

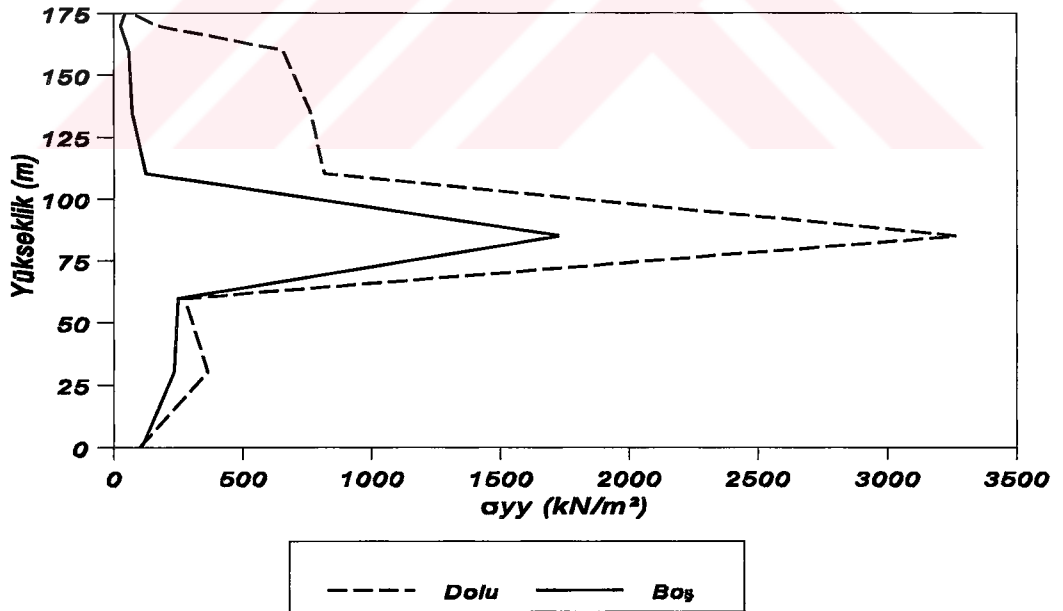
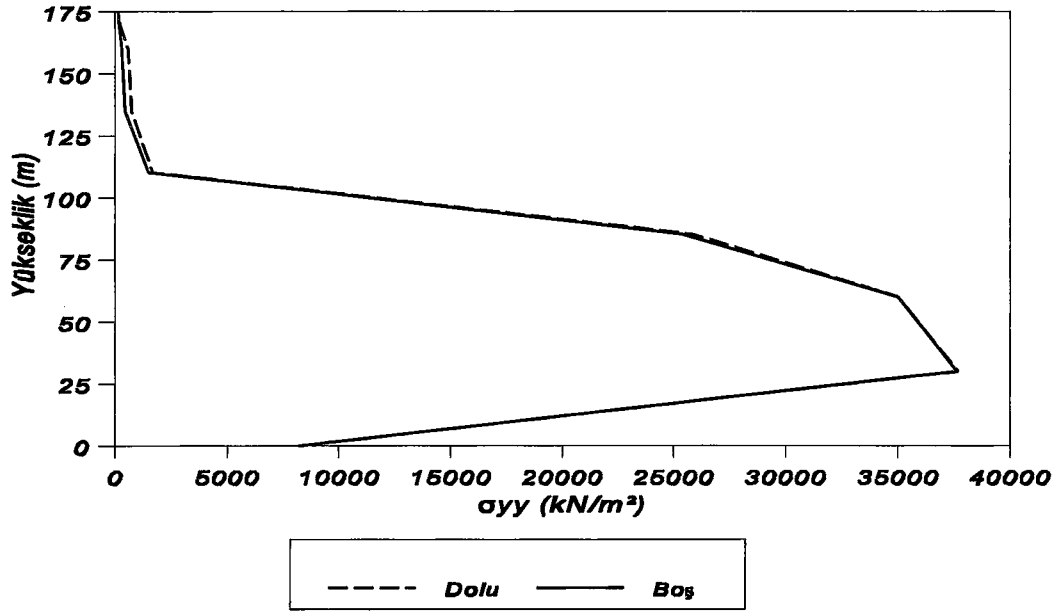


a) 250 m/s

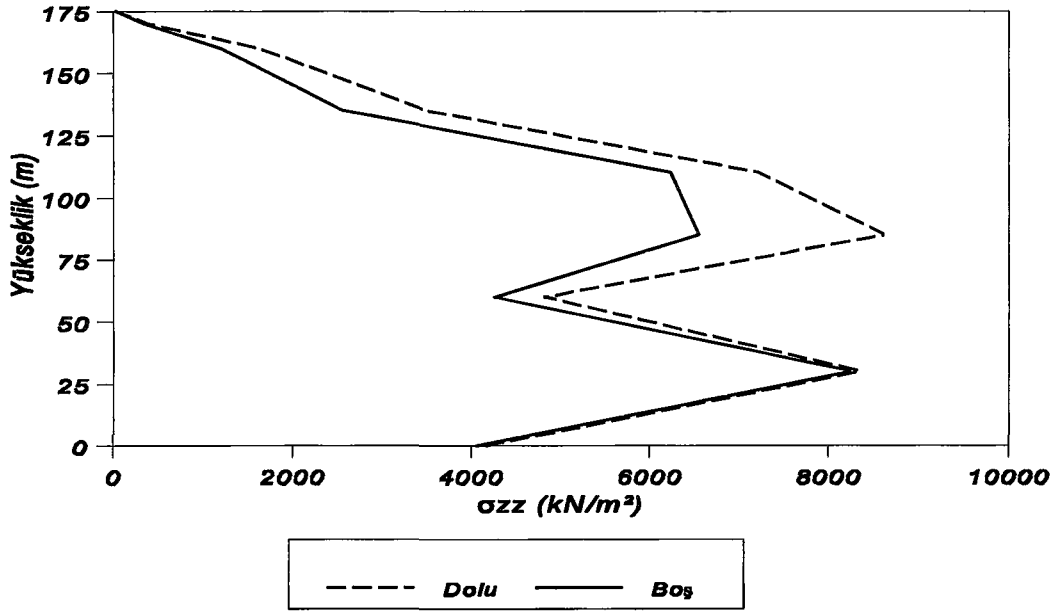


b) Sonsuz

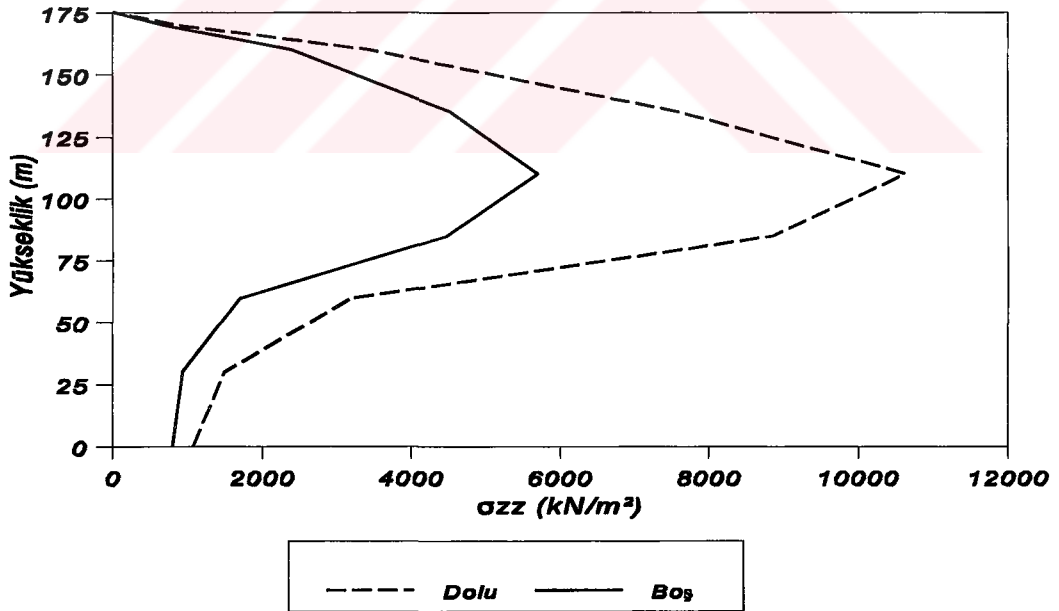
Şekil 109: Barajın boş ve dolu olması durumlarında III-III kesitinde 250 m/s ve sonsuz dalga yayılma hızları için elde edilen mutlak maksimum kayma gerilmelerinin (σ_{yz}) yatay uzaklıkla değişimi.



Şekil 110: Barajın boş ve dolu olması durumlarında IV-IV kesitinde 250 m/s ve sonsuz dalga yayılma hızları için elde edilen mutlak maksimum yatay gerilmelerin (σ_{yy}) yükseklikle değişimi.

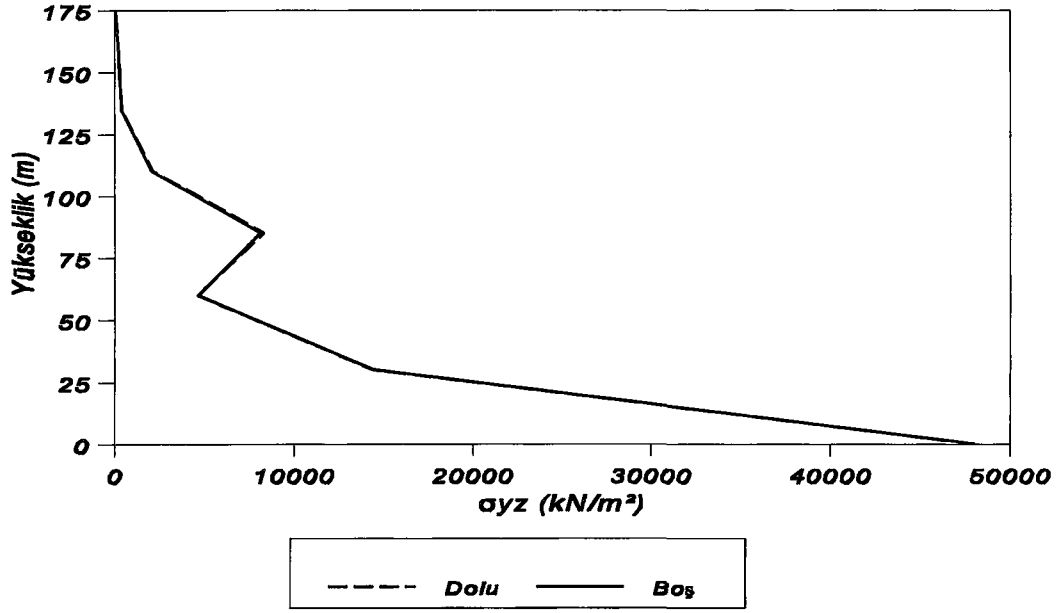


a) 250 m/s

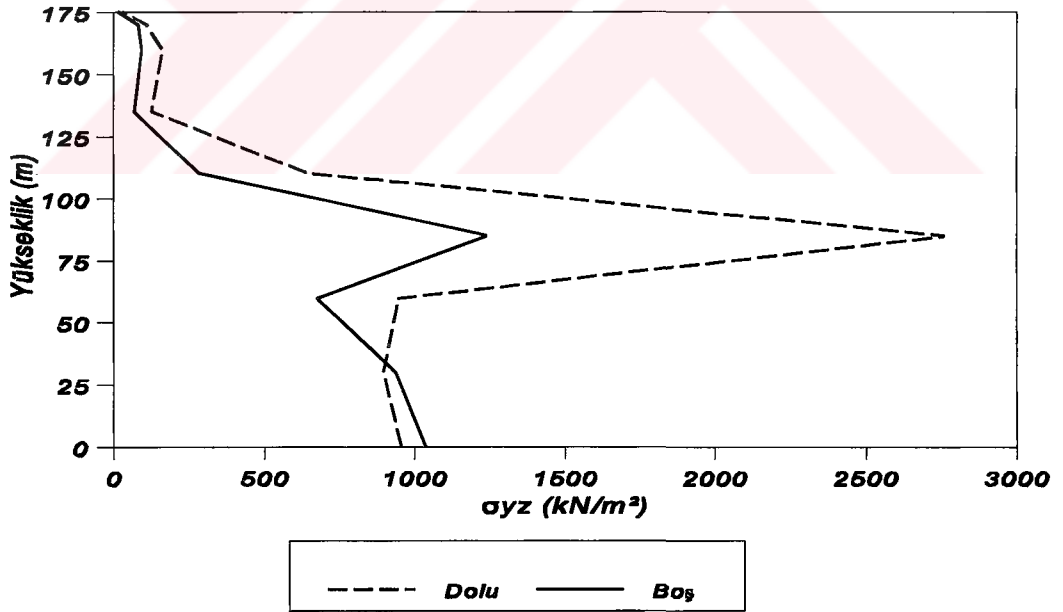


b) Sonsuz

Şekil 111: Barajın boş ve dolu olması durumlarında IV-IV kesitinde 250 m/s ve sonsuz dalga yayılma hızları için elde edilen mutlak maksimum düşey gerilmelerin (σ_{zz}) yükseklikle değişimi.

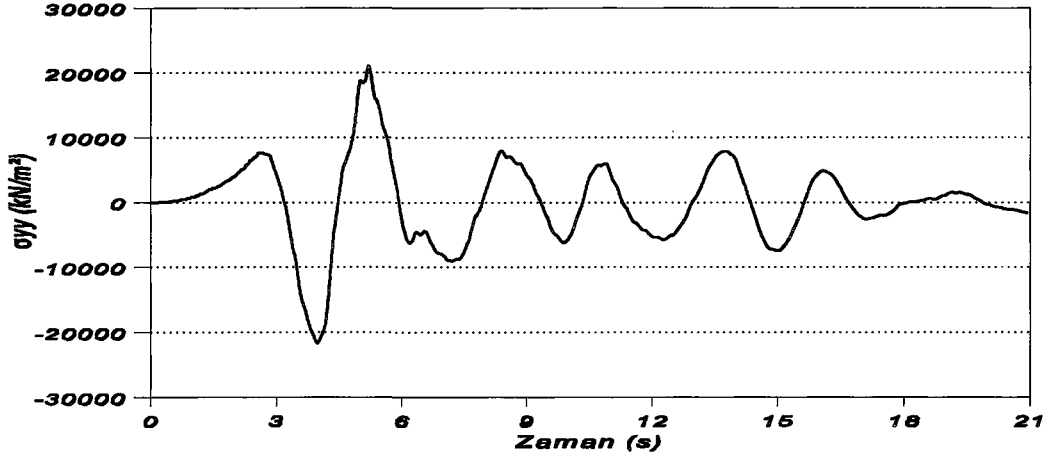


a) 250 m/s

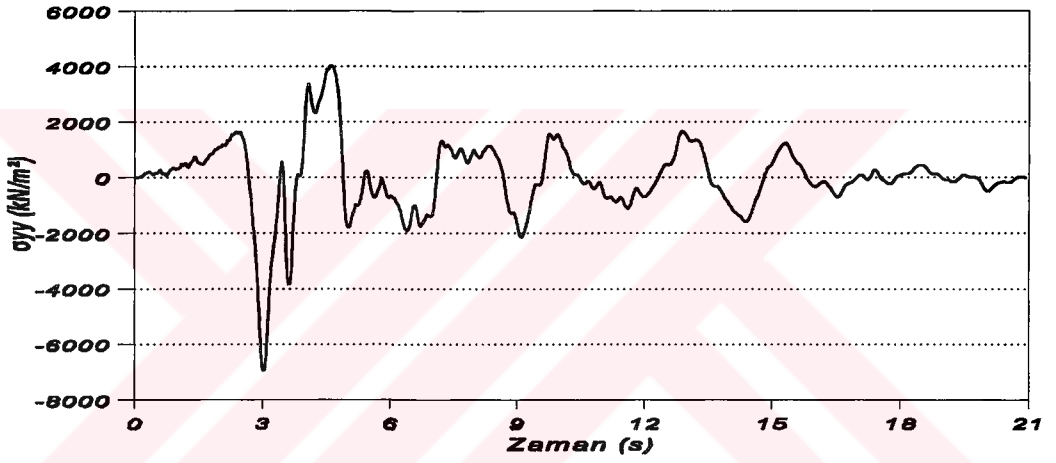


b) Sonsuz

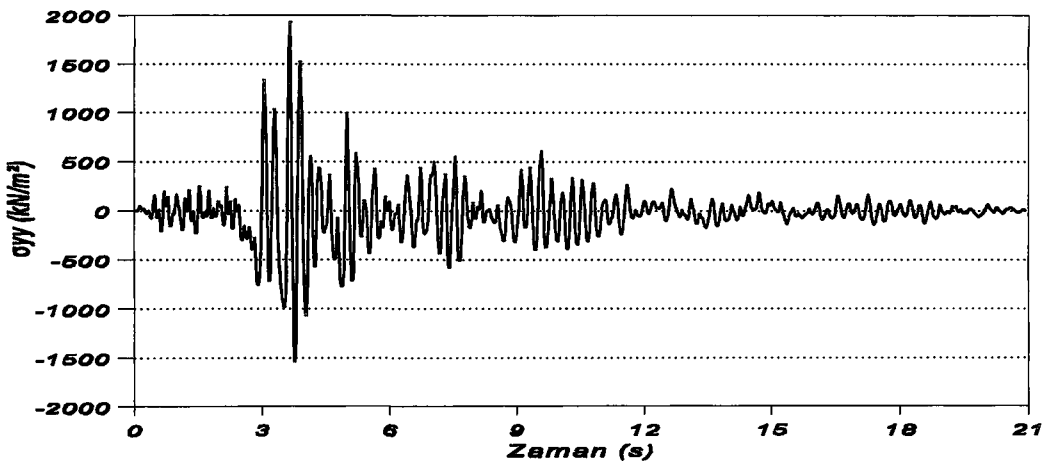
Şekil 112: Barajın boş ve dolu olması durumlarında IV-IV kesitinde 250 m/s ve sonsuz dalga yayılma hızları için elde edilen mutlak maksimum kayma gerilmelerinin (σ_{yz}) yükseklikle değişimi.



a) 250 m/s

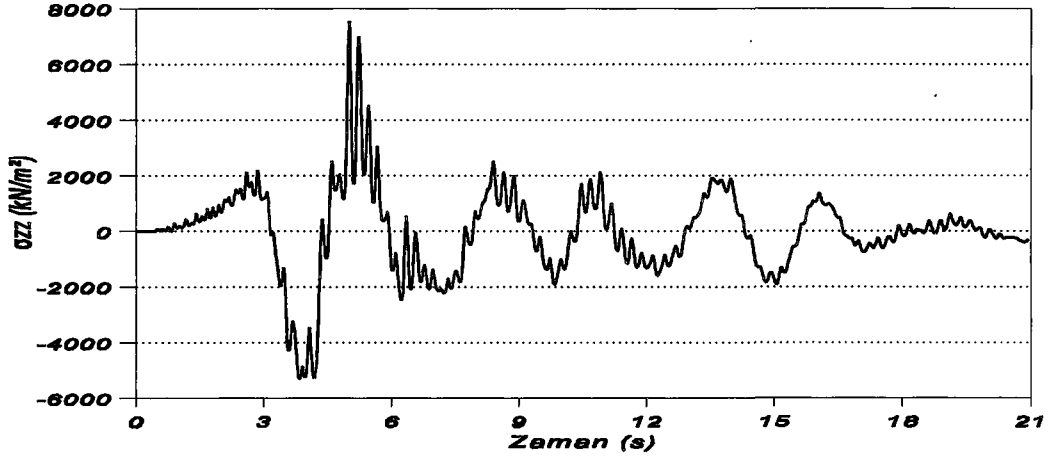


b) 2000 m/s

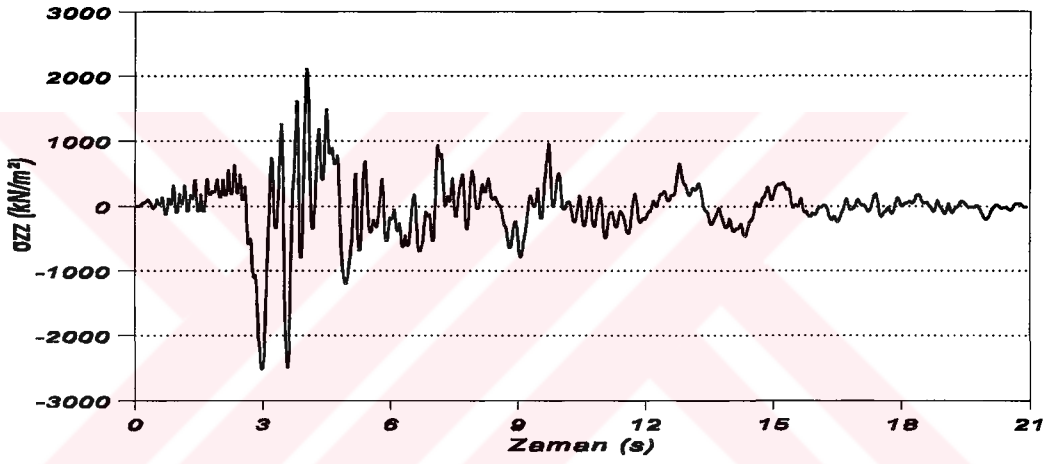


c) Sonsuz

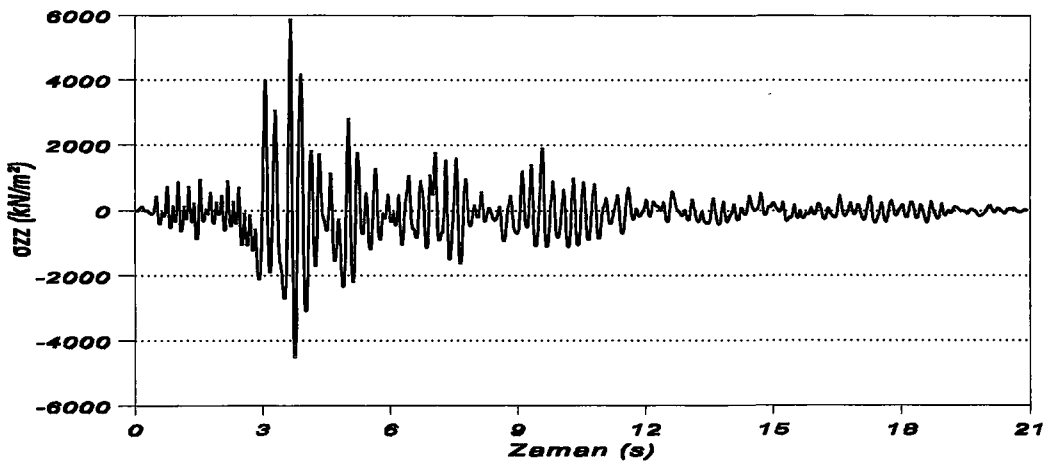
Şekil 113: Barajın boş olması durumunda baraj memba topuğundaki B Gauss integrasyon noktasında 250 m/s, 2000 m/s ve sonsuz dalga yayılma hızları için elde edilen yatay gerilmelerin (σ_{yy}) zamanla değişimi.



a) 250 m/s

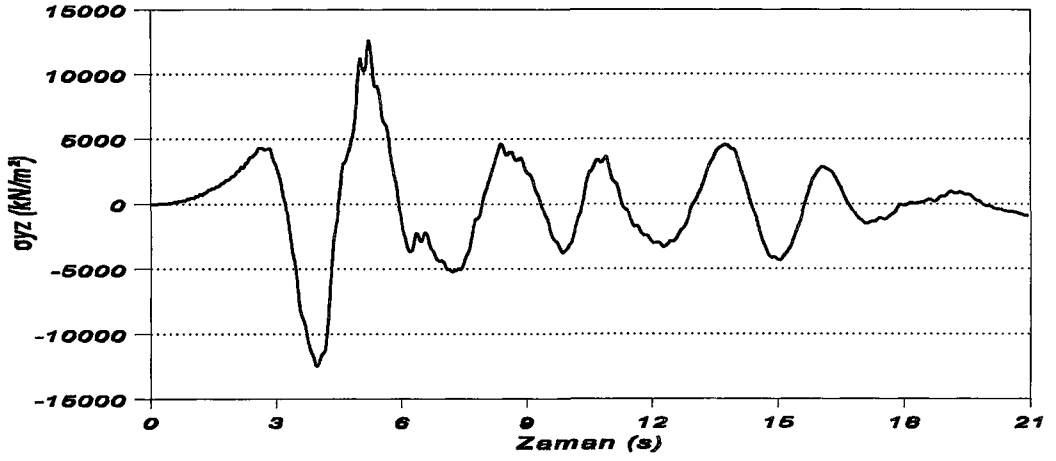


b) 2000 m/s

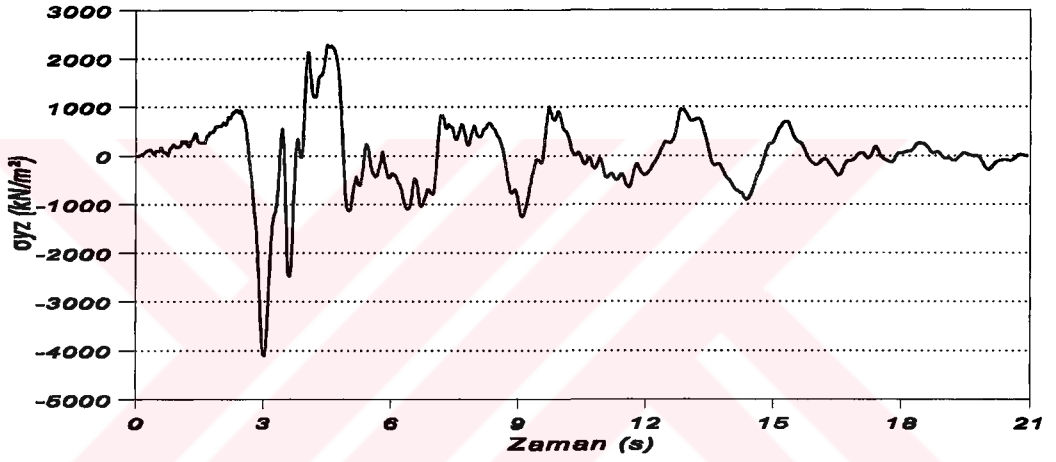


c) Sonsuz

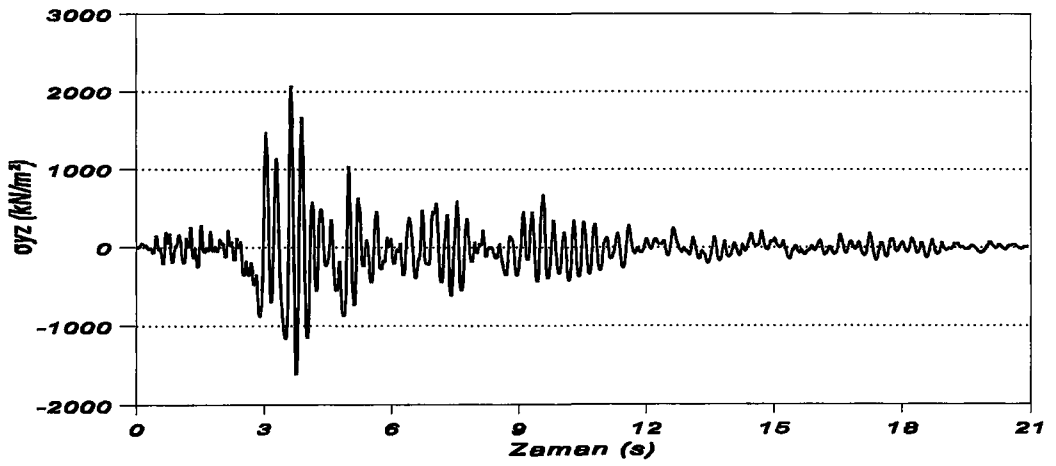
Şekil 114: Barajın boş olması durumunda baraj memba topuğundaki B Gauss integrasyon noktasında 250 m/s, 2000 m/s ve sonsuz dalga yayılma hızları için elde edilen düşey gerilmelerin (σ_{zz}) zamanla değişimi.



a) 250 m/s

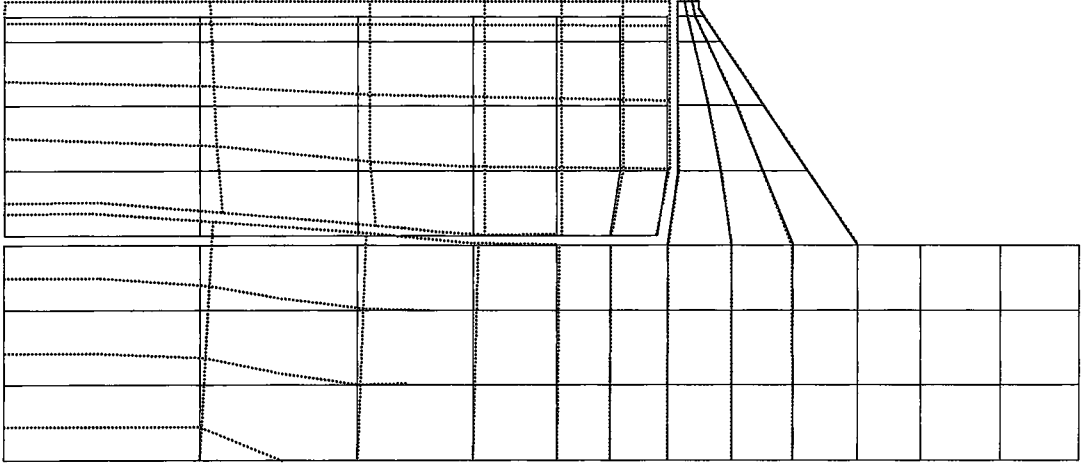


b) 2000 m/s

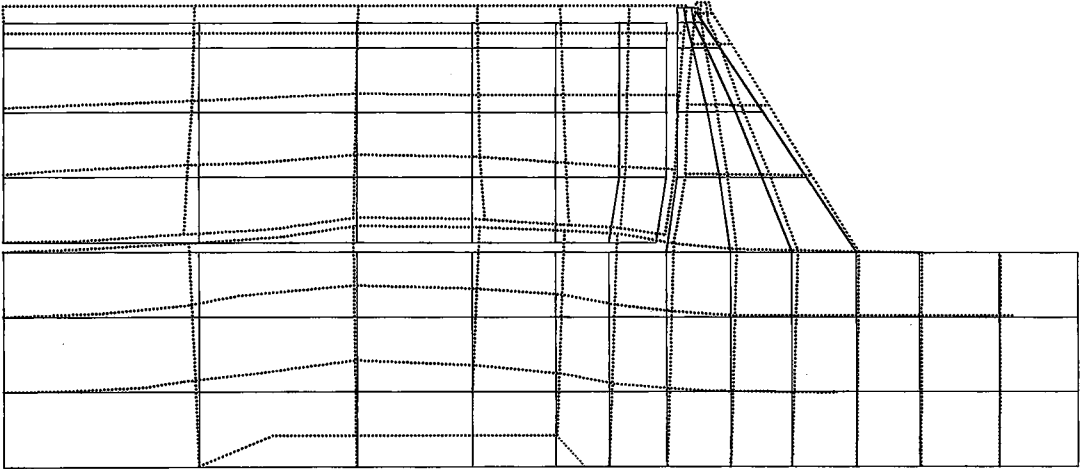


c) Sonsuz

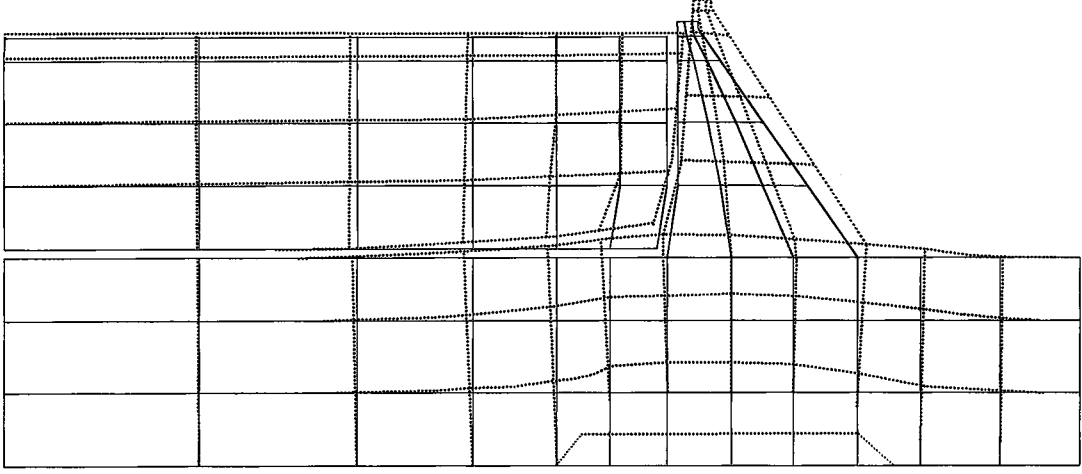
Şekil 115: Barajın boş olması durumunda baraj memba topuğundaki B Gauss integrasyon noktasında 250 m/s, 2000 m/s ve sonsuz dalg yayılma hızları için elde edilen kayma gerilmelerinin (σ_{yz}) zamanla değişimi.



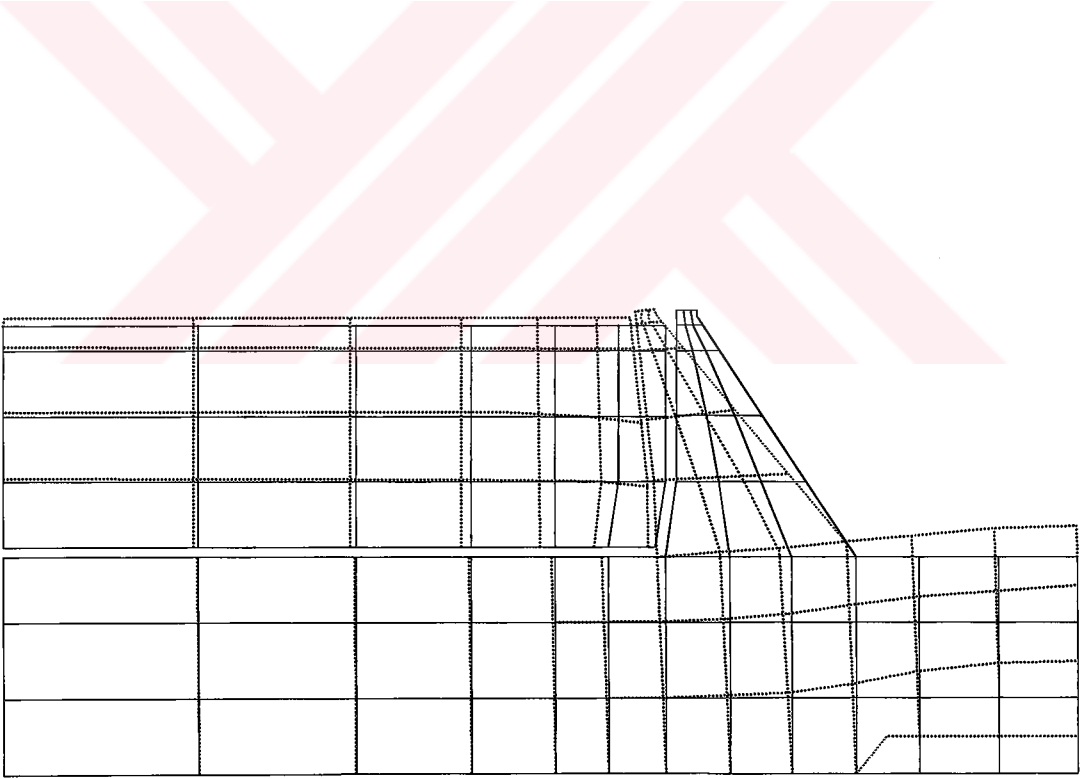
Şekil 116: Asinkronize düşey yer hareketi etkisindeki baraj-rezervuar-temel sisteminin 1. r vektörü (r_1 vektörü).



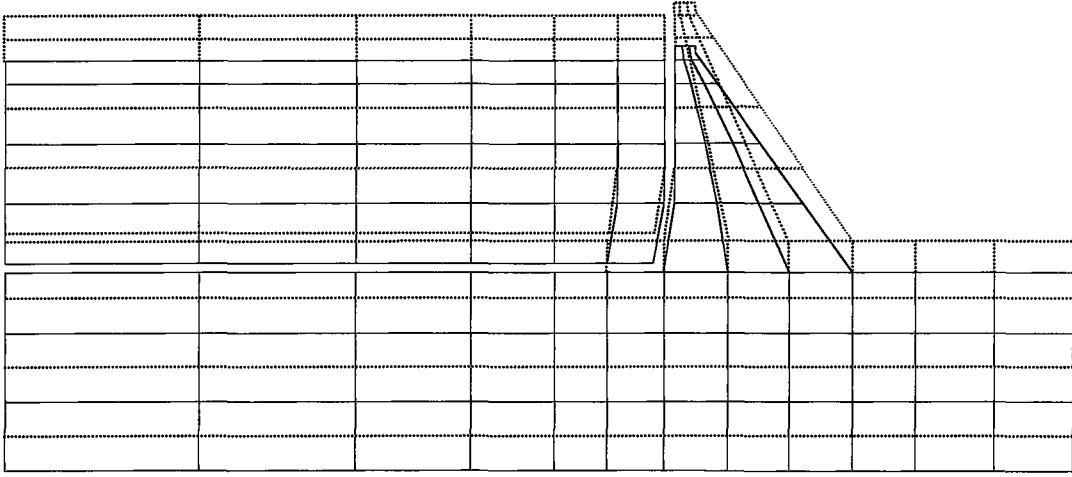
Şekil 117: Asinkronize düşey yer hareketi etkisindeki baraj-rezervuar-temel sisteminin 2. r vektörü (r_2 vektörü).



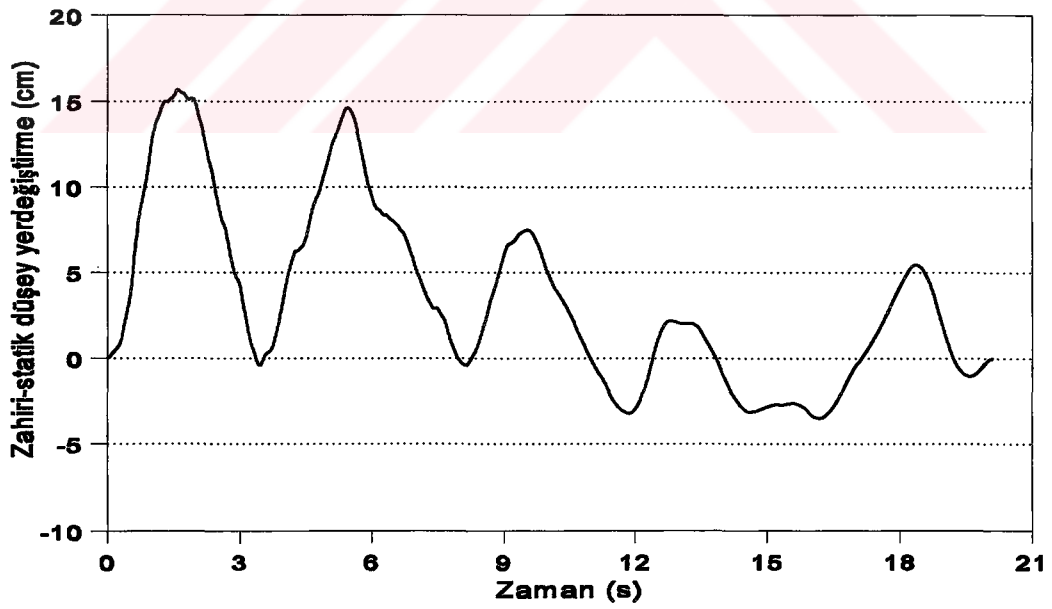
Şekil 118: Asinkronize düşey yer hareketi etkisindeki baraj-rezervuar-temel sisteminin 3. r vektörü (r_3 vektörü).



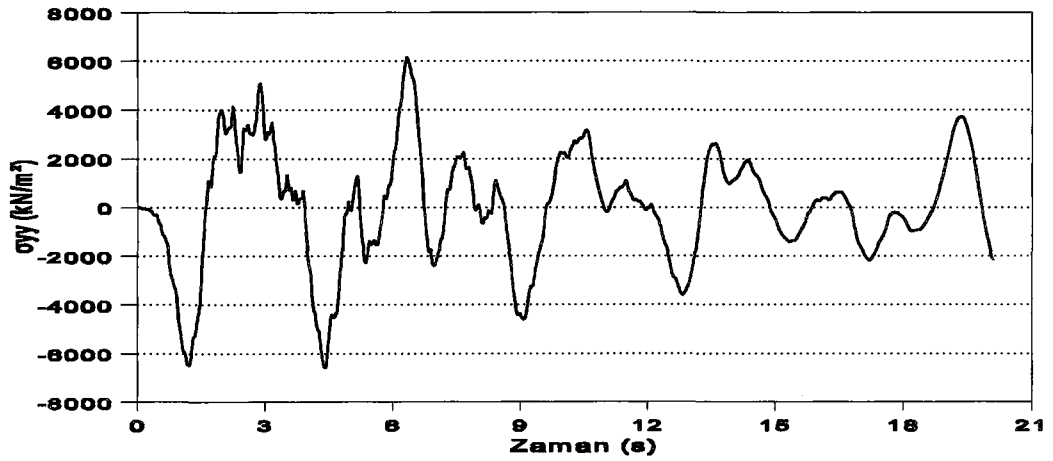
Şekil 119: Asinkronize düşey yer hareketi etkisindeki baraj-rezervuar-temel sisteminin 4. r vektörü (r_4 vektörü).



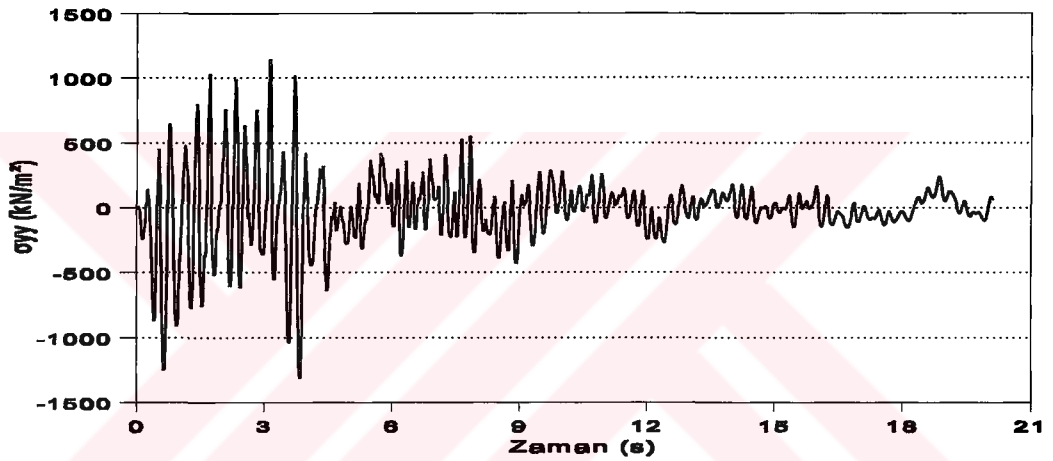
Şekil 120: Baraj-rezervuar-temel sisteminin düşey doğrultuda rijit cisim hareketi.



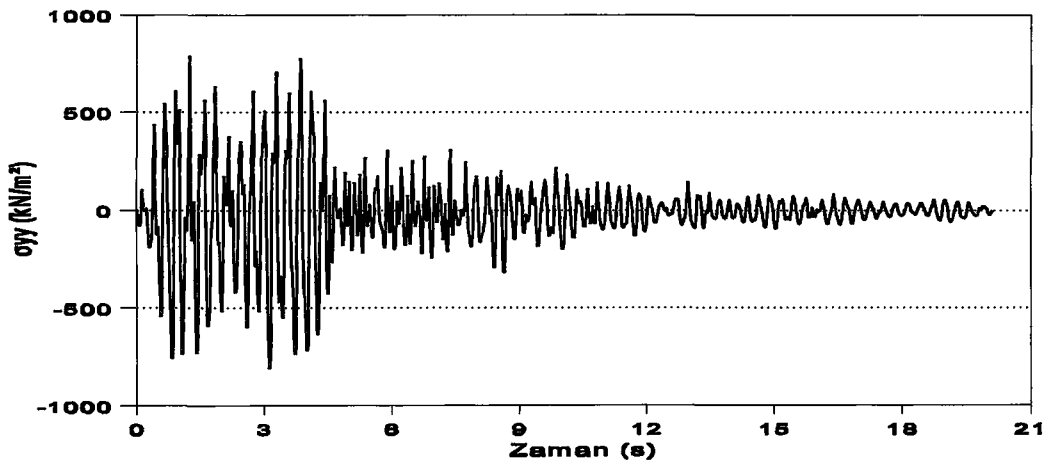
Şekil 121: Asinkronize düşey yer hareketi (düşey (V) bileşen) etkisindeki baraj-rezervuar-temel sisteminin baraj kretinde sonsuz dalga yayılma hızı için elde edilen zahiri-statik düşey yerdeğiştirme zamanla değişimi.



a) 250 m/s

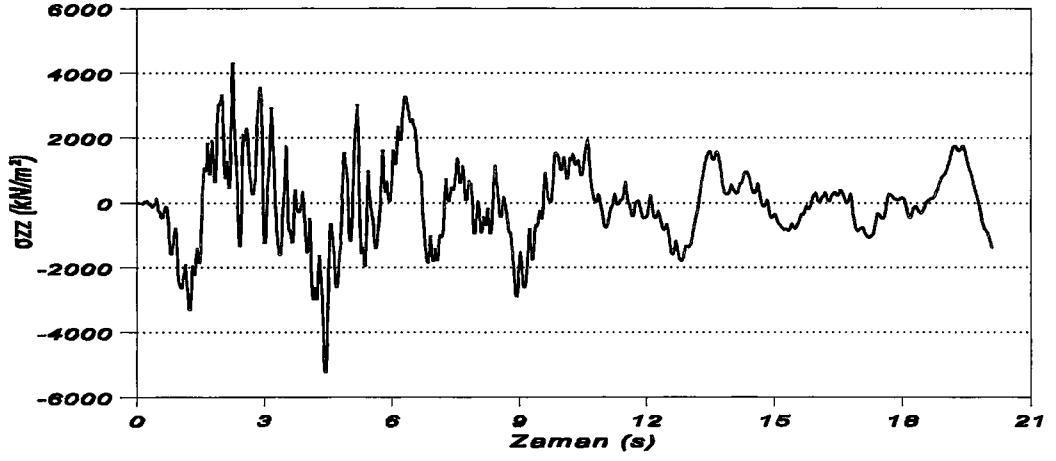


b) 2000 m/s

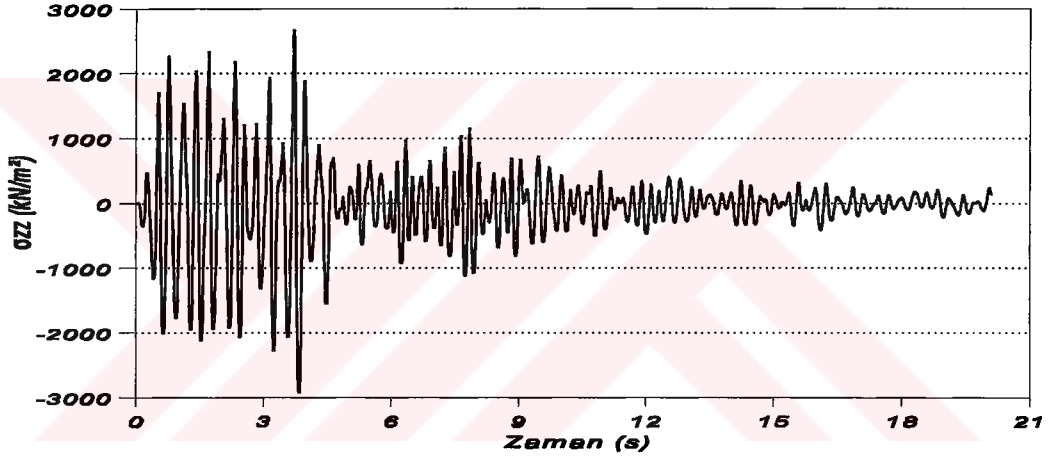


c) Sonsuz

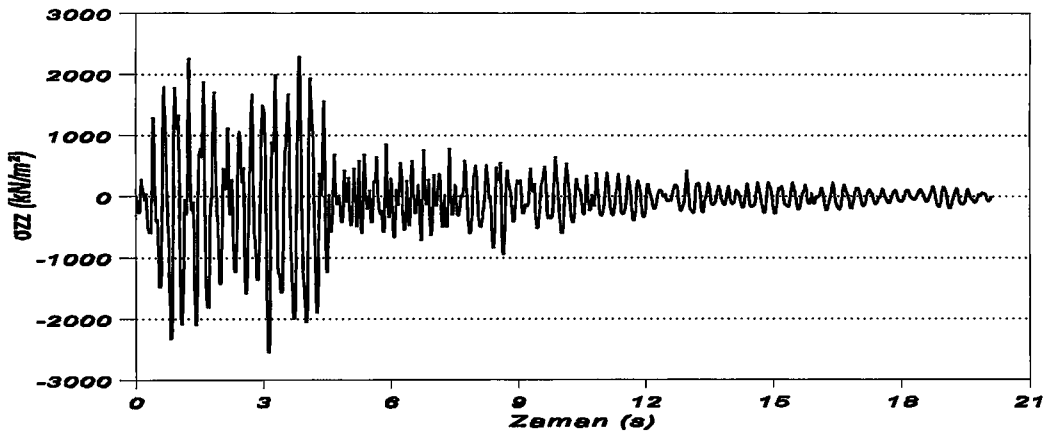
Şekil 122: Asinkronize düşey yer hareketi (düşey (V) bileşen) etkisindeki baraj-rezervuar-temel sisteminin baraj memba topuğundaki B Gauss integrasyon noktasında 250 m/s, 2000 m/s ve sonsuz dalga yayılma hızları için elde edilen yatay gerilmelerin (σ_{yy}) zamanla değişimi.



a) 250 m/s

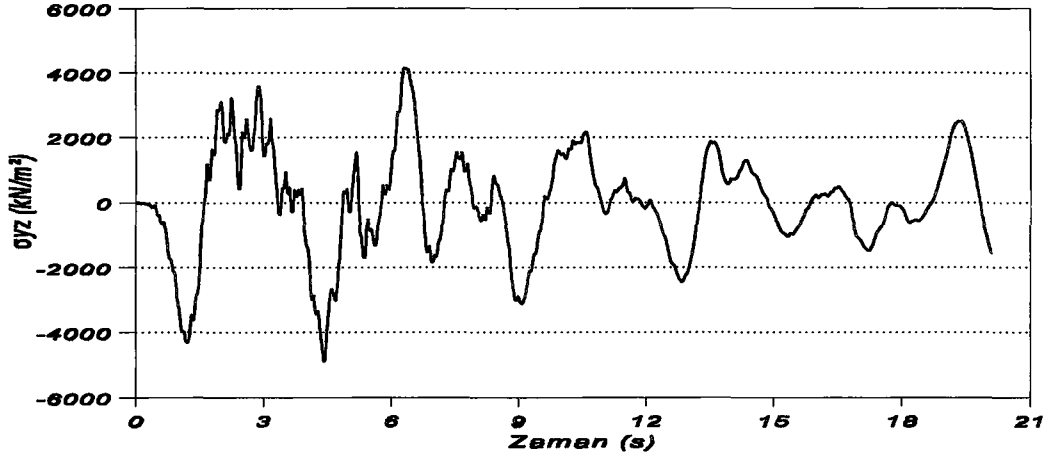


b) 2000 m/s

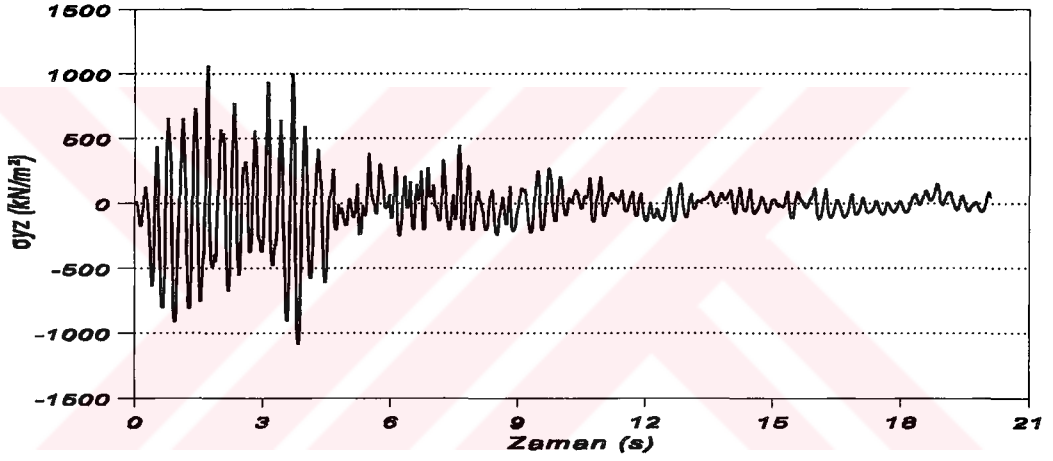


c) Sonsuz

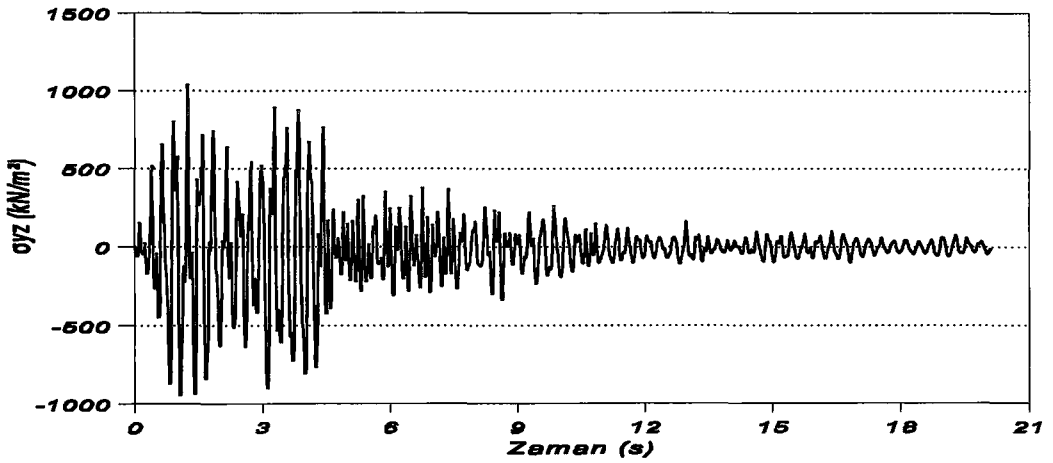
Şekil 123: Asinkronize düşey yer hareketi (düşey (V) bileşen) etkisindeki baraj-rezervuar-temel sisteminin baraj memba topuğundaki B Gauss integrasyon noktasında 250 m/s, 2000 m/s ve sonsuz dalga yayılma hızları için elde edilen düşey gerilmelerin (σ_{zz}) zamanla değişimi.



a) 250 m/s

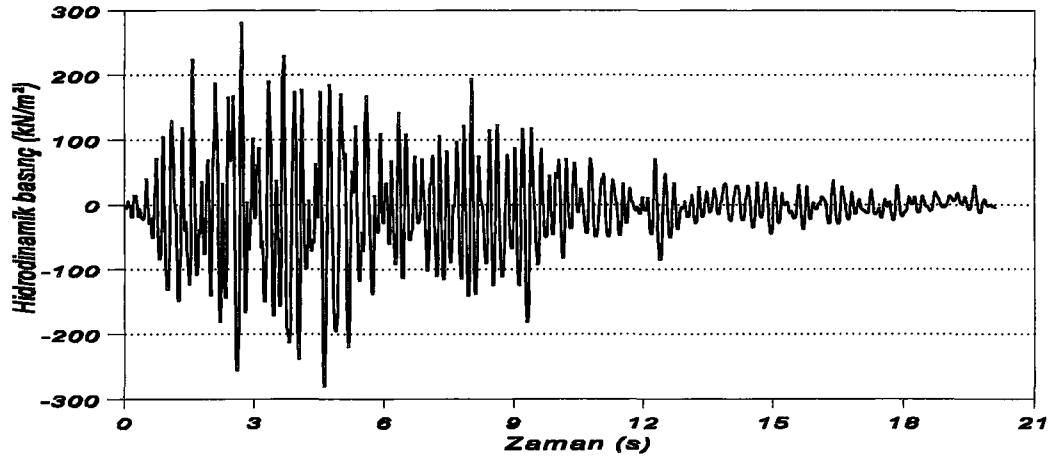


b) 2000 m/s

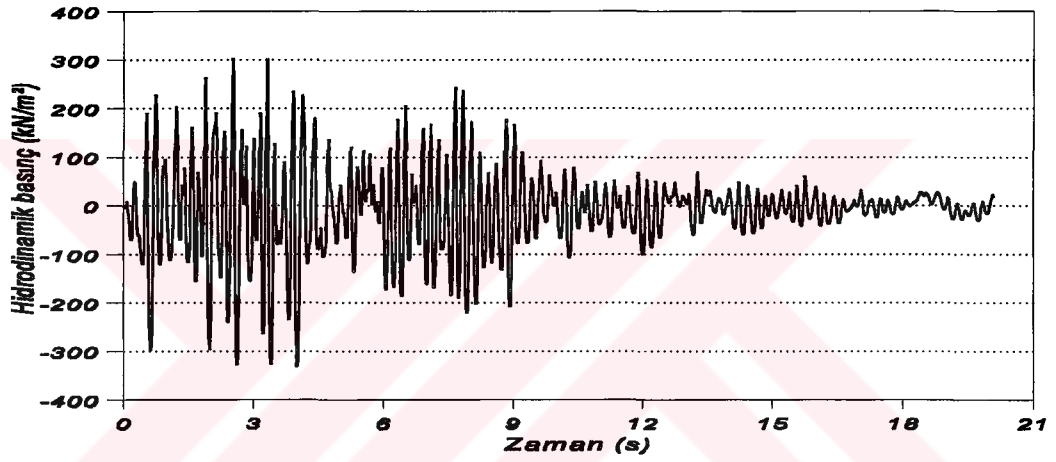


c) Sonsuz

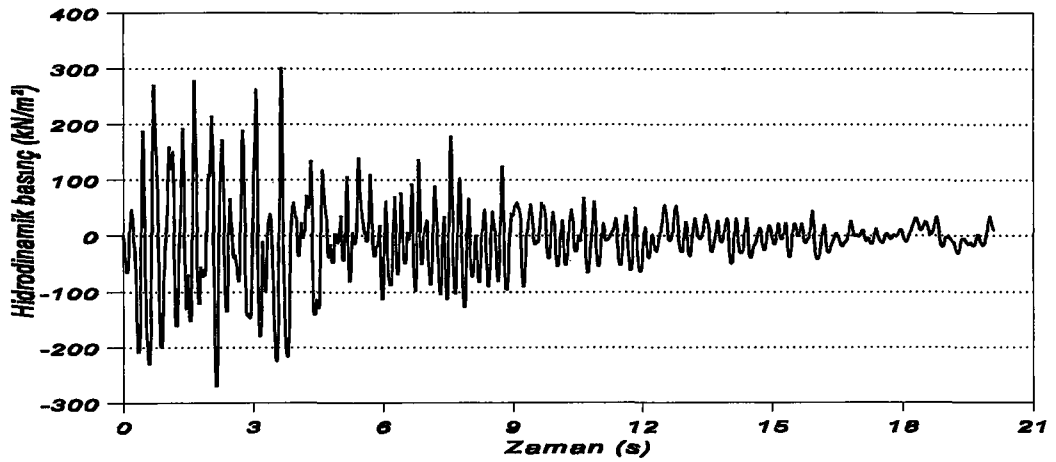
Şekil 124: Asinkronize düşey yer hareketi (düşey (V) bileşen) etkisindeki baraj-rezervuar-temel sisteminin baraj memba topuğundaki B Gauss integrasyon noktasında 250 m/s, 2000 m/s ve sonsuz dalga yayılma hızları için elde edilen kayma gerilmelerinin (σ_{yz}) zamanla değişimi.



a) 250 m/s

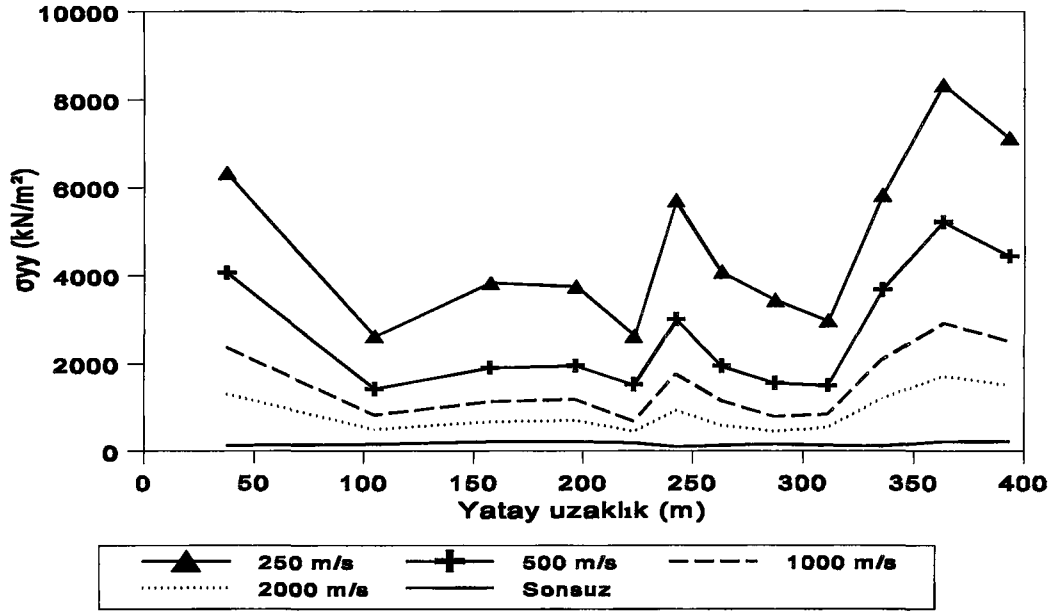


b) 2000 m/s

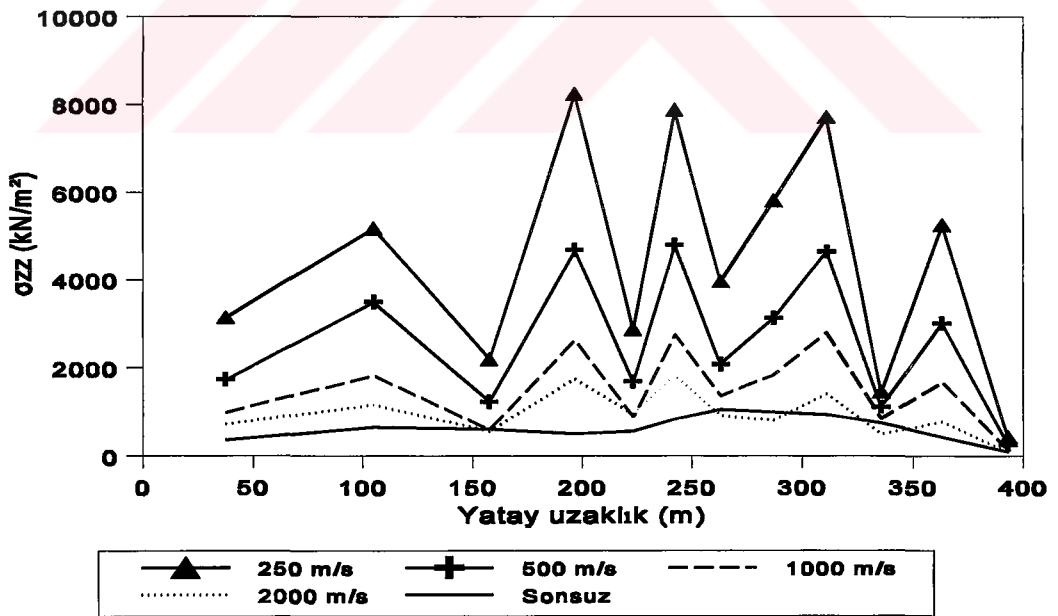


c) Sonsuz

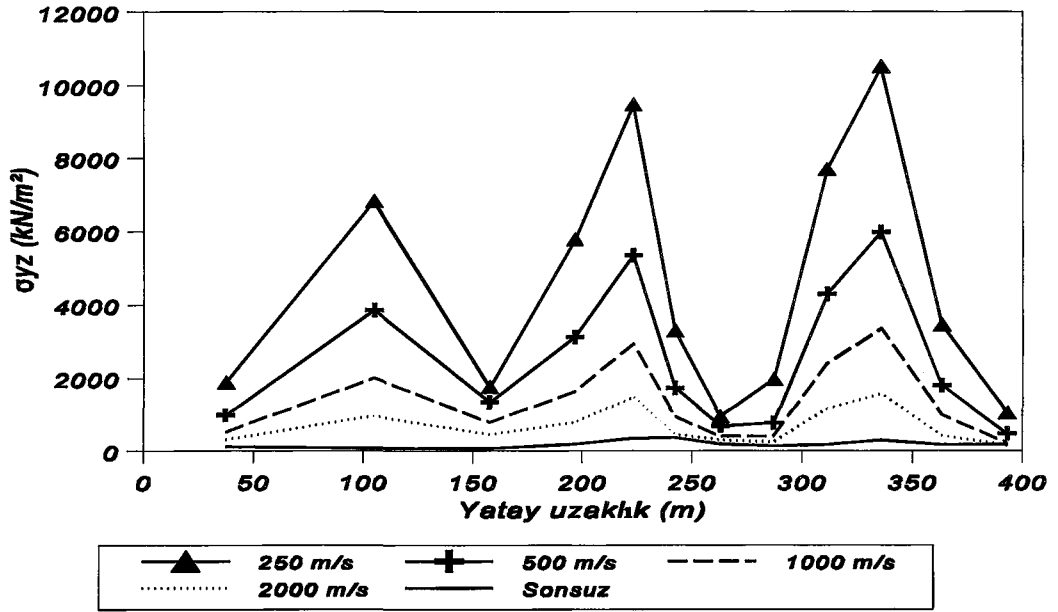
Şekil 125: Asinkronize düşey yer hareketi (düşey (V) bileşen) etkisindeki baraj-rezervuar-temel sisteminin baraj memba yüzeyine yakın E Gauss integrasyon noktasında 250 m/s, 2000 m/s ve sonsuz dalga yayılma hızları için elde edilen hidrodinamik basınçların zamanla değişimi.



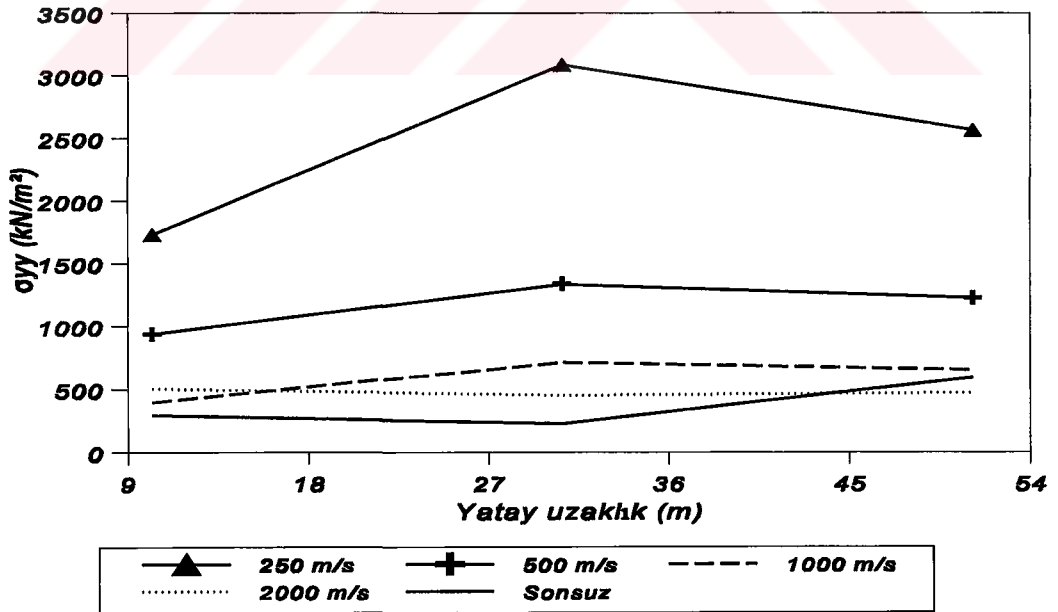
Şekil 126: Asinkronize düşey yer hareketi (düşey (V) bileşen) etkisindeki baraj-rezervuar-temel sisteminin baraj temelinde alınan I-I kesitinde değişik dalga yayılma hızları için elde edilen mutlak maksimum yatay gerilmelerin (σ_{yy}) yatay uzaklıkla değişimi.



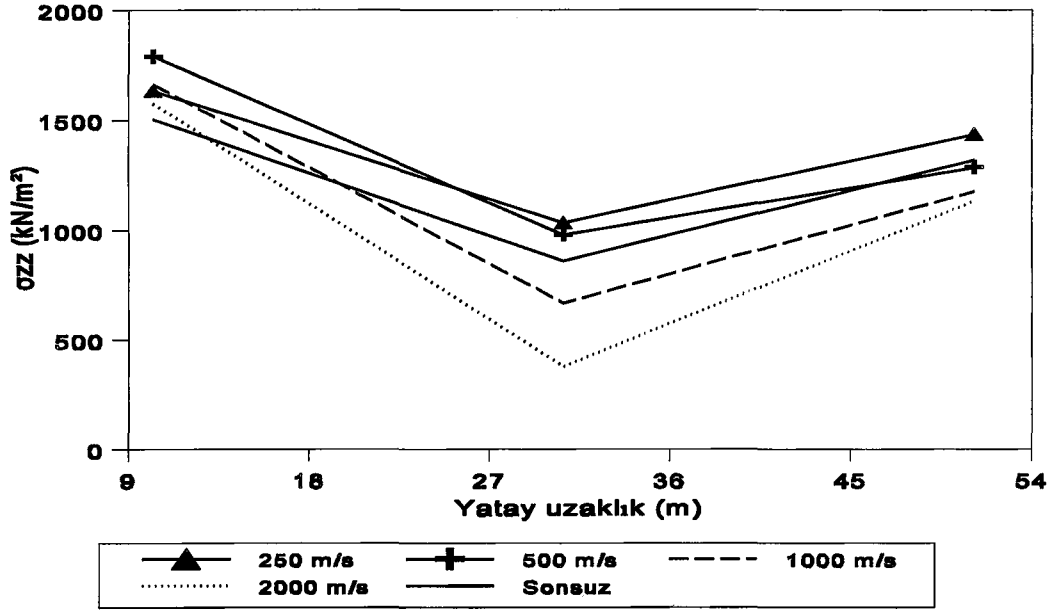
Şekil 127: Asinkronize düşey yer hareketi (düşey (V) bileşen) etkisindeki baraj-rezervuar-temel sisteminin baraj temelinde alınan I-I kesitinde değişik dalga yayılma hızları için elde edilen mutlak maksimum düşey gerilmelerin (σ_{zz}) yatay uzaklıkla değişimi.



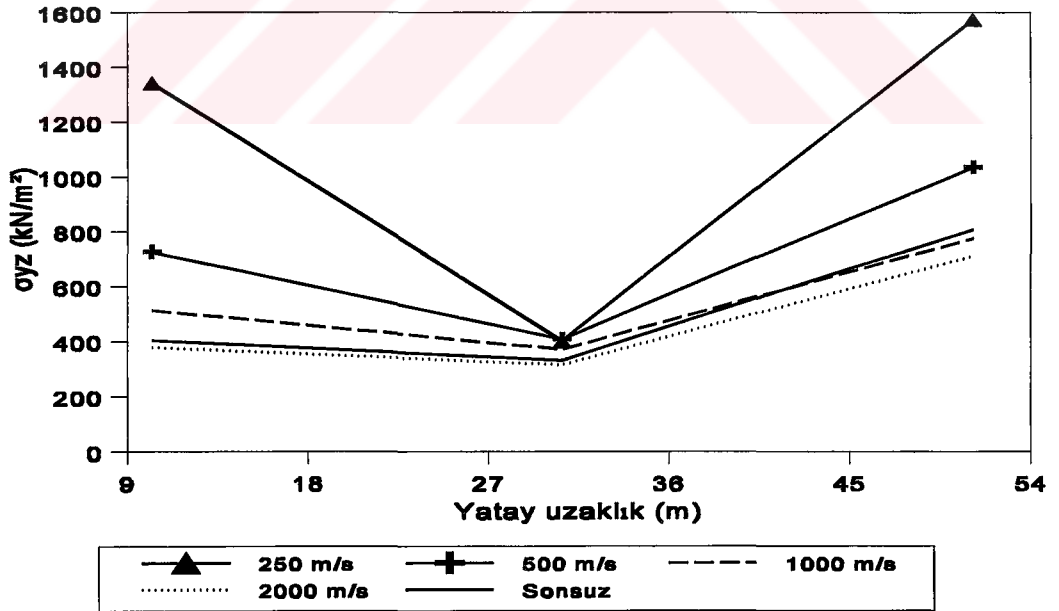
Şekil 128: Asinkronize düşey yer hareketi (düşey (V) bileşen) etkisindeki baraj-rezervuar-temel sisteminin baraj temelinde alınan I-I kesitinde değişik dalga yayılma hızları için elde edilen mutlak maksimum kayma gerilmelerinin (σ_{yz}) yatay uzaklıkla değişimi.



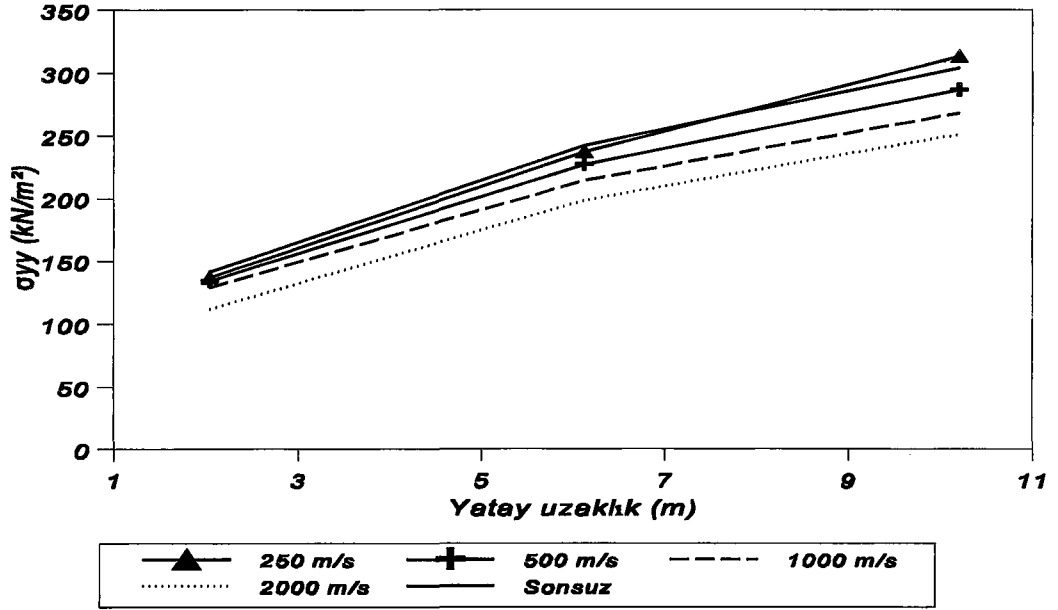
Şekil 129: Asinkronize düşey yer hareketi (düşey (V) bileşen) etkisindeki baraj-rezervuar-temel sisteminin baraj tabanında alınan II-II kesitinde değişik dalga yayılma hızları için elde edilen mutlak maksimum yatay gerilmelerin (σ_{yy}) yatay uzaklıkla değişimi.



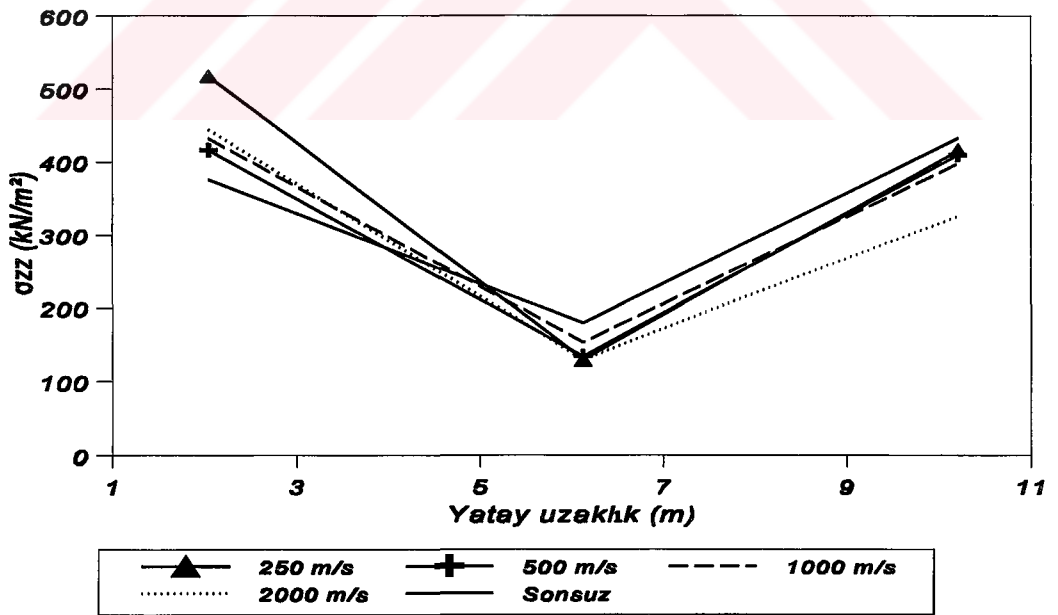
Şekil 130: Asinkronize düşey yer hareketi (düşey (V) bileşen) etkisindeki baraj-rezervuar-temel sisteminin baraj tabanında alınan II-II kesitinde değişik dalga yayılma hızları için elde edilen mutlak maksimum düşey gerilmelerin (σ_{zz}) yatay uzaklıkla değişimi.



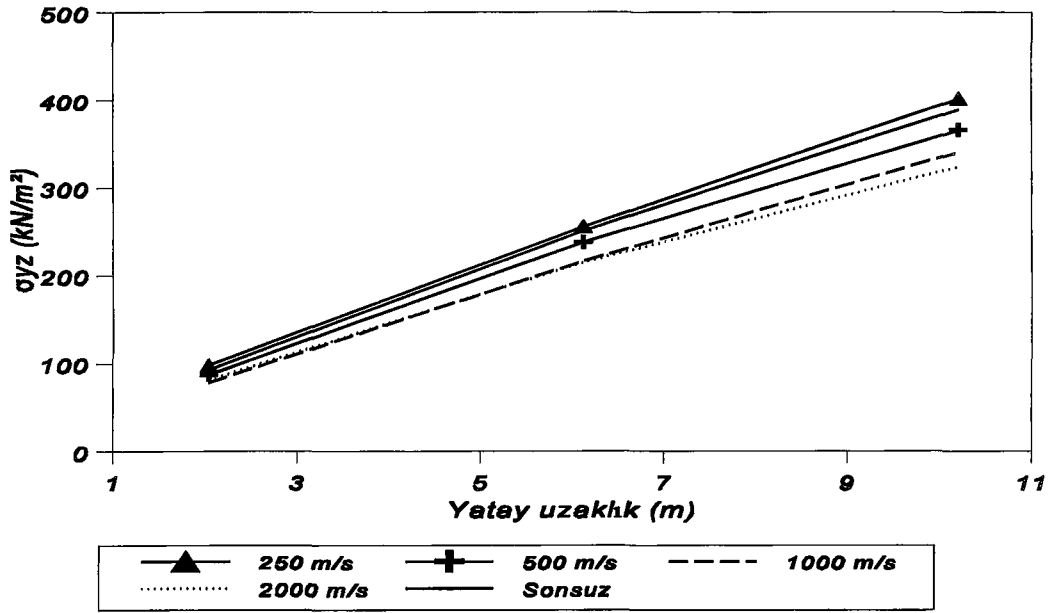
Şekil 131: Asinkronize düşey yer hareketi (düşey (V) bileşen) etkisindeki baraj-rezervuar-temel sisteminin baraj tabanında alınan II-II kesitinde değişik dalga yayılma hızları için elde edilen mutlak maksimum kayma gerilmelerinin (σ_{yz}) yatay uzaklıkla değişimi.



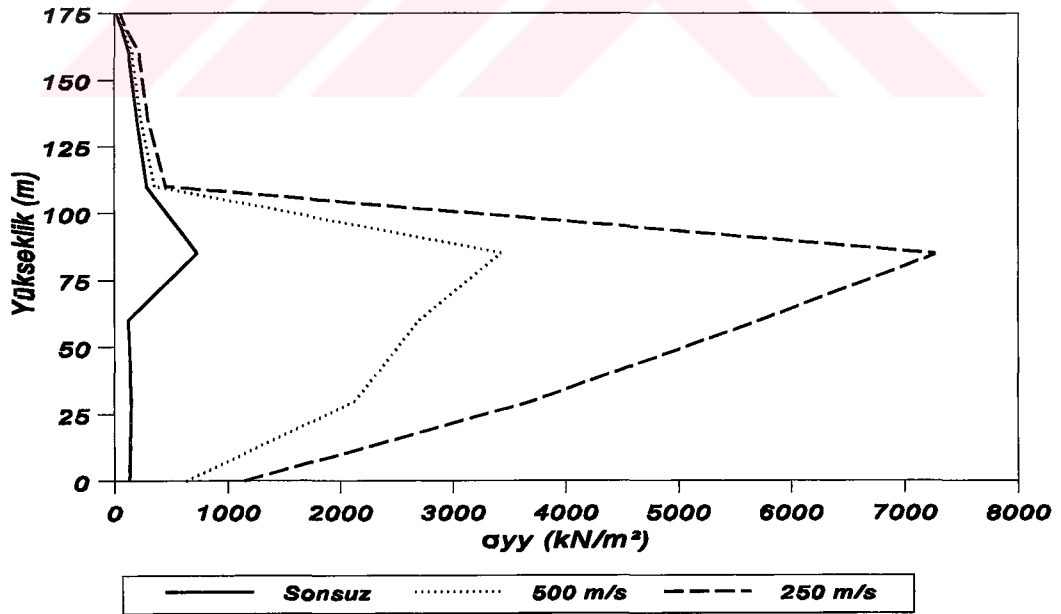
Şekil 132: Asinkronize düşey yer hareketi (düşey (V) bileşen) etkisindeki baraj-rezervuar-temel sisteminin baraj kretine yakın alınan III-III kesitinde değişik dalga yayılma hızları için elde edilen mutlak maksimum yatay gerilmelerin (σ_{yy}) yatay uzaklıkla değişimi.



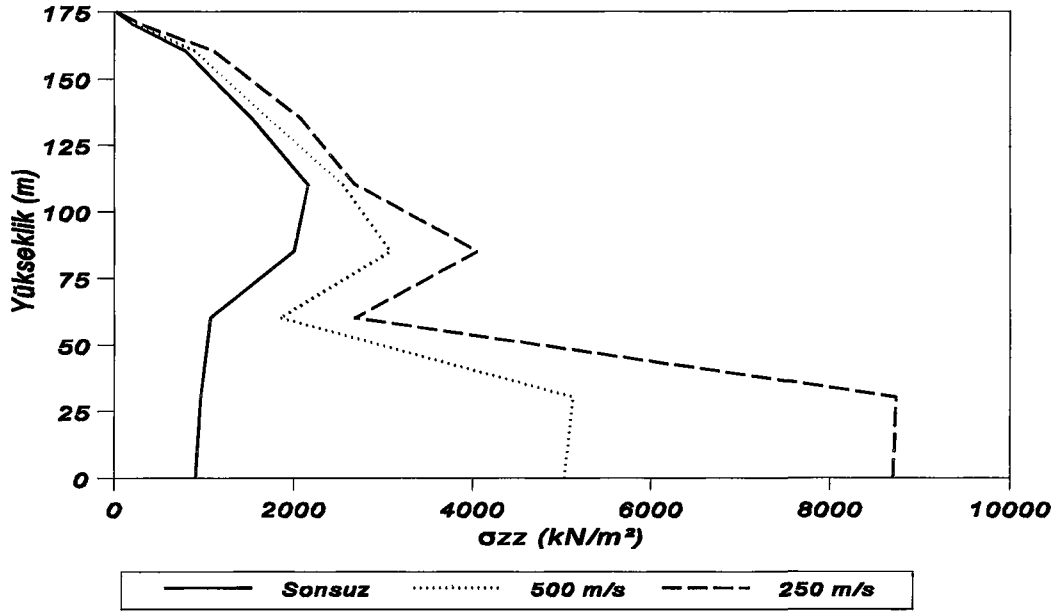
Şekil 133: Asinkronize düşey yer hareketi (düşey (V) bileşen) etkisindeki baraj-rezervuar-temel sisteminin baraj kretine yakın alınan III-III kesitinde değişik dalga yayılma hızları için elde edilen mutlak maksimum düşey gerilmelerin (σ_{zz}) yatay uzaklıkla değişimi.



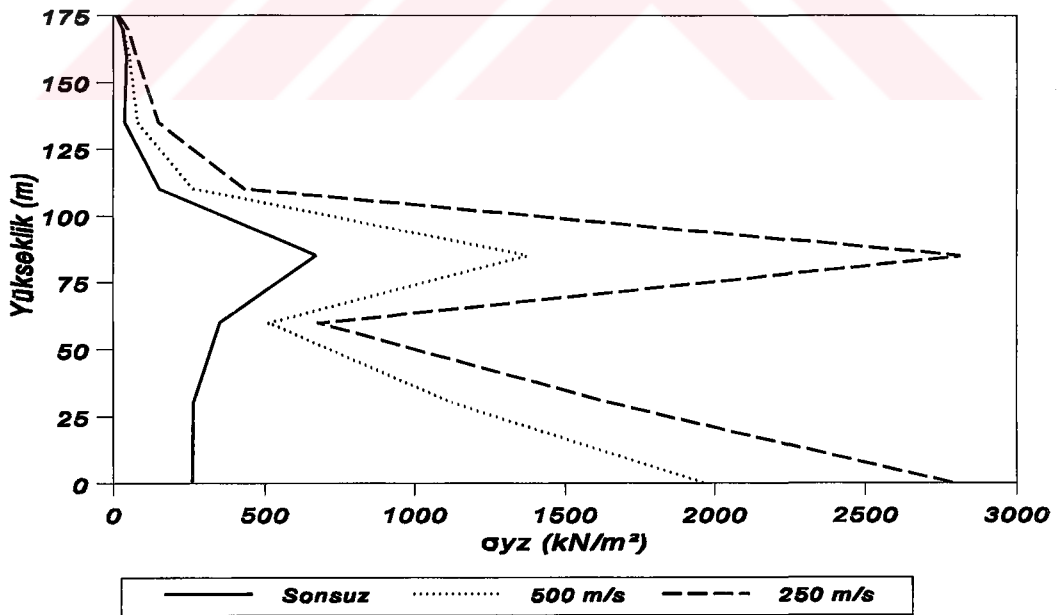
Şekil 134: Asinkronize düşey yer hareketi (düşey (V) bileşen) etkisindeki baraj-rezervuar-temel sisteminin baraj kretine yakın alınan III-III kesitinde değişik dalga yayılma hızları için elde edilen mutlak maksimum kayma gerilmelerinin (σ_{yz}) yatay uzaklıkla değişimi.



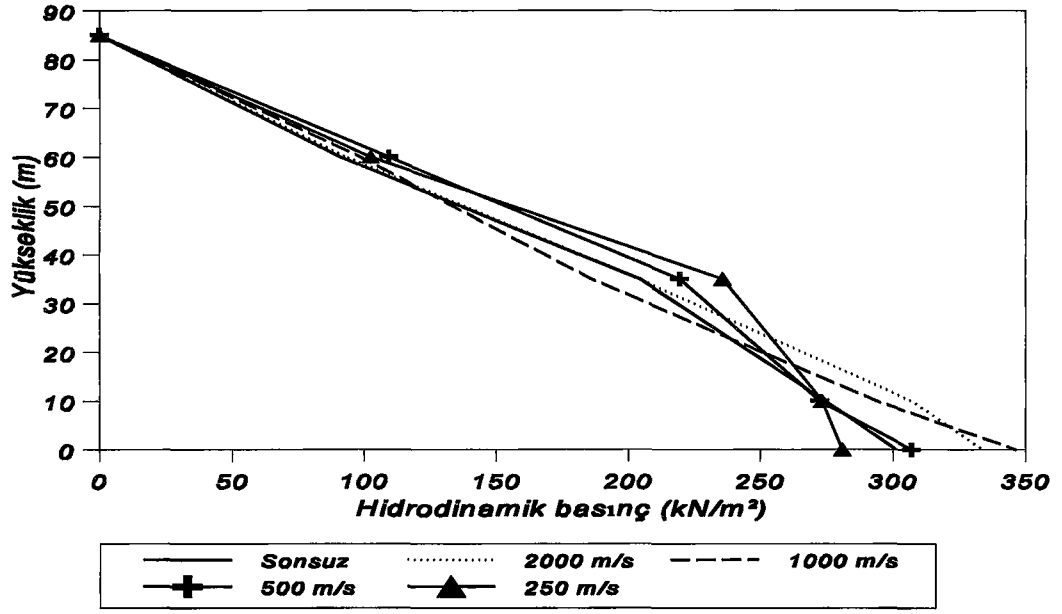
Şekil 135: Asinkronize düşey yer hareketi (düşey (V) bileşen) etkisindeki baraj-rezervuar-temel sisteminin IV-IV kesitinde değişik dalga yayılma hızları için elde edilen mutlak maksimum yatay gerilmelerin (σ_{yx}) yükseklikle değişimi.



Şekil 136: Asinkronize düşey yer hareketi (düşey (V) bileşen) etkisindeki baraj-rezervuar-temel sisteminin IV-IV kesitinde değişik dalga yayılma hızları için elde edilen mutlak maksimum düşey gerilmelerin (σ_{zz}) yükseklikle değişimi.



Şekil 137: Asinkronize düşey yer hareketi (düşey (V) bileşen) etkisindeki baraj-rezervuar-temel sisteminin IV-IV kesitinde değişik dalga yayılma hızları için elde edilen mutlak maksimum kayma gerilmelerinin (σ_{yz}) yükseklikle değişimi.



Şekil 138: Asinkronize düşey yer hareketi (düşey (V) bileşen) etkisindeki baraj-rezervuar-temel sisteminin baraj memba yüzeyi boyunca değişik dalga yayılma hızları için elde edilen mutlak maksimum hidrodinamik basınçların yükseklikle değişimi.

5. SONUÇLAR

Barajların deprem analizleri genellikle, zeminle etkileşim yüzeyleri boyunca üniform (sonsuz hızla yayılan) yer hareketine maruz kaldığı kabulüne göre yapılmaktadır. Fakat, deprem dalgaları yayılma ortamının özelliklerine bağlı olarak farklı sonlu hızlarla yayılmaktadır. Dolayısıyla, kaynağından sonlu hızla yayılan deprem dalgasının frekans içeriği ve genliği yayıldığı ortamın özelliklerine bağlı olarak değişmekte ve farklı noktalara farklı zamanlarda ulaşmaktadır. Bu durum ise yapıda dinamik yerdeğiştirmelere ek olarak zahiri-statik (quasi-static) yerdeğiştirmeler de meydana getirir. Dinamik yerdeğiştirmelere atalet kuvvetleri neden olurken, zahiri-statik (quasi-static) yerdeğiştirmelere yapı-zemin etkileşim yüzeyindeki noktaların birbirlerine göre rölatif hareketleri neden olmaktadır. Bunun için analizlerde deprem dalgası yayılma hızının dikkate alınması gerekmektedir.

Barajlar sıvı-yapı-zemin etkileşimine maruz yapı grubuna girdiğinden, söz konusu yapıların analizleri sıvı-yapı sistemlerinin etkileşim analizlerinde kullanılan kütle ekleme (added mass), Euler ve Lagrange yaklaşımları kullanılarak yapılmaktadır. Barajların davranışları hakkında ön bilgi edinmek için kullanılan kütle ekleme yaklaşımında, dinamik etki sonucunda baraj memba yüzeyi boyunca oluşan hidrodinamik basınç dağılımı, barajla beraber titreşen bir kütle dağılımı olarak göz önüne alınmaktadır. Euler yaklaşımında yapının davranışı yerdeğiştirmeler, sıvının davranışı ise basınçlar (hız potansiyelleri) cinsinden ifade edilmektedir. Dolayısıyla, Euler yaklaşımı kullanıldığında sıvı-yapı arayüzeyinde özel arayüzey denklemlerine ihtiyaç duyulmaktadır. Bu arayüzey denklemleri sonlu eleman denklemlerinde büyük bant genişliklerine ve simetrik olmayan denklemlere sebep olmaktadır. Bu nedenle Euler yaklaşımı genellikle bir özel amaçlı bilgisayar programı gerektirmektedir. Baraj-rezervuar-temel sistemlerinin analizinde kullanılan üçüncü yaklaşım ise Lagrange yaklaşımıdır. Lagrange yaklaşımında sıvı ve yapıda yerdeğiştirmeler değişken olarak kullanıldığından, özel arayüzey denklemlerine ihtiyaç olmamaktadır. Dolayısıyla, sıvı-yapı arayüzeyindeki sonlu eleman düğüm noktalarında uygunluk ve denge denklemleri otomatik olarak sağlanmaktadır. Ayrıca, Lagrange yaklaşımı kullanılarak geliştirilen sıvı elemanların genel amaçlı yapı analiz programlarına uyarlanması kolay olmaktadır. Söz konusu durum ise Lagrange yaklaşımını diğer yaklaşımlara göre üstün kılmaktadır.

Baraj-rezervuar-temel sisteminin asinkronize dinamik analizi için, Lagrange yaklaşımına dayalı iki boyutlu değişken düğüm noktalı katı ve sıvı sonlu elemanlar alt programlar halinde Fortran 77 dilinde kodlanmıştır. Bu alt programlar yapı sistemlerinin asinkronize dinamik analizini yapan MULSAP [92] programına uyarlandı ve sözkonusu program sıvı-yapı sistemleri için geliştirilerek analizlerde kullanıldı. Ayrıca, geliştirilmiş MULSAP [92] programının sonsuz hız durumuna karşılık gelen çözümlerini karşılaştırmak amacıyla yukarıda bahsedilen alt programlar klasik dinamik analiz yapan SAP IV [100] programına da uyarlanmıştır. Sıvı elemanların Lagrange yaklaşımı ile formülasyonu, sıvının sıkışabilirliğini ve sıvı serbest yüzey salınım hareketi ile ilgili etkileri içermektedir. Formülasyonlarda sıvının rotasyonsuzluğu; sıvının gerilme-şekildeğiştirme bağıntılarına rotasyonlar ve bu rotasyonlara ilgili uygun kısıtlama parametreleri yerleştirilerek ceza (penalty) metodlara [57-58] benzer şekilde dikkate alınmaktadır. Kısıtlama parametreleri büyük değerli seçilerek sıvının rotasyonsuz hale yaklaşması sağlanmaktadır. Sıvı eleman matrislerinin hesaplanmasında ise indirgenmiş integrasyon mertebeleri kullanılmaktadır.

Baraj-rezervuar-temel sisteminin asinkronize ve klasik dinamik analizinin yer hareketinin yatay ve düşey bileşenlerine göre ayrı ayrı yapıldığı bu çalışmadan çıkartılabilecek sonuçlar ve öneriler aşağıda özetlenmektedir. Çözümlerde 1992 Erzincan depreminin doğu-batı (E-W), kuzey-güney (N-S) ve düşey (V) ivme bileşenleri kullanılmıştır. Deprem dalgasının yayılma hızı 250 m/s, 500 m/s, 1000 m/s, 2000 m/s ve sonsuz olarak seçilmiştir.

1) Rezervuarda 9, barajda 8 düğüm noktalı sonlu elemanlar kullanılarak baraj-rezervuar sistemi için elde edilen 1. sıvı yüzey salınım frekansı analitik çözümden elde edilen sonuca çok yakın çıkmıştır. Aynı model için Lagrange ve Euler yaklaşımı kullanılarak elde edilen 1.yanal eğilme frekansı biraz farklı olmaktadır. Bu ise Euler yaklaşımında sıvının sıkışamaz kabul edilmesinden kaynaklanmaktadır. Lagrange yaklaşımında sıvı hacimsel elastisite modülü artırılarak (sıvı sıkışamaz hale yaklaşmakta) elde edilen çözümler Euler çözümlerine yaklaşmıştır. Sıvının sıkışamaz hale yaklaşması sıvı yüzey salınım frekanslarının sayı ve değerlerini etkilememektedir. Fakat, yüzey salınım frekansları dışındaki frekansları büyütmektedir. Bu ise hacim değişimi ile ilgili frekansların sıvı sıkışabilirliğinden etkilendiğini göstermektedir.

2) Baraj-rezervuar-temel sisteminin modal analizinde baraj temelının kütsüz (temelin sadece rijitlik etkisi dikkate alınmakta) alınması, yüzey salınım frekanslarının sayı ve değerlerini

değiştirmezken, bunlar dışındaki frekans değerlerini artırmaktadır.

3) Baraj-rezervuar-temel ve baraj-temel sistemlerinin modal analizlerinden elde edilen frekanslar üzerinde yapılan karşılaştırmalarda, rezervuarın dikkate alınmasının frekans değerlerini azalttığı gözlenmiştir.

4) Baraj-rezervuar-temel sisteminin asinkronize dinamik analizinden hesaplanan zemin yerdeğiştirmeleri Şekil vektörleri (r vektörleri) toplandığında tüm düğüm noktalarında; asinkronize yatay yer hareketi durumunda yatay doğrultuda, asinkronize düşey yer hareketi durumunda ise düşey doğrultuda birim yerdeğiştirmeler oluşturmaktadır. Eğer söz konusu değer birim olmazsa analizlerden elde edilen sonuçlar yanlış olacaktır.

5) Asinkronize dinamik analizde kullanılan yer hareketi verisinin eksen düzeltmesi yapılmalıdır. Eksen düzeltmesi yapılmamış verilerin integrasyonu sonucunda kalıntı hız ve yerdeğiştirmeler oluşmaktadır. Kalıntı yerdeğiştirme değerleri klasik dinamik analizde problem oluşturmazken, asinkronize dinamik analizde yanlış yerdeğiştirme ve gerilmelerin hesaplanmasına neden olmaktadır.

6) Baraj-rezervuar-temel sisteminin herhangi bir düğüm noktasında, sonsuz dalga yayılma hızı için asinkronize yatay yer hareketi durumunda hesaplanan maksimum zahiri-statik yatay yerdeğiştirme, ve asinkronize düşey yer hareketi durumunda maksimum zahiri-statik düşey yerdeğiştirme analizlerde kullanılan yer hareketinin maksimum yerdeğiştirmesine eşit olmaktadır. Yer hareketinin yatay yönde dikkate alınması durumunda zahiri-statik düşey yerdeğiştirmeler, düşey yönde alınması durumunda ise zahiri-statik yatay yerdeğiştirmelerin sıfır olması r vektörlerinin doğru hesaplandığını göstermektedir.

7) Mulsap [92] (sonsuz hız durumu için) ve Sap Iv [100] programlarından elde edilen yerdeğiştirme ve gerilmelerin hem frekans içerikleri hem de genlikleri beklendiği gibi birbirlerine çok yakın çıkmıştır.

8) Asinkronize yatay ve düşey yer hareketleri gerilmelerin frekans içeriklerini önemli ölçüde değiştirmektedir. Bu değişim deprem dalgası yayılma hızına ve baraj temelinden olan yüksekliğe bağlı olmaktadır. Özellikle baraj temeline yakın kısımlarda küçük yayılma hızı için

söz konusu değişim gerilmelerin frekans içerikleri üzerinde açıkça kendisini göstermektedir.

9) Asinkronize yatay ve düşey yer hareketi durumunda baraj temeli ve tabanındaki gerilmelerde çok büyük artışlar meydana gelmektedir. Baraj memba topuğu yatay gerilmesi asinkronize yatay yer hareketi dikkate alındığında sonsuz hız durumuna göre yaklaşık olarak altı kat artarken, asinkronize düşey yer hareketi dikkate alındığında yaklaşık olarak sekiz kat artmaktadır.

10) Asinkronize yatay ve düşey yer hareketi, hidrodinamik basınçların frekans içeriklerini önemsiz ölçüde değiştirmektedir.

11) Asinkronize yatay yer hareketi durumunda baraj memba yüzeyi boyunca oluşan hidrodinamik basınçlar zahiri-statik etkilerden çok az etkilenmektedir. Deprem dalgasının asinkronize etkisi dinamik yerdeğiştirmeleri azaltmaktadır. Dolayısıyla, deprem dalgasının sonlu hızla yayılması durumunda elde edilen mutlak maksimum hidrodinamik basınçlar sonsuz hız durumu sonuçlarına göre daha küçük olmaktadır.

12) Zahiri-statik yerdeğiştirmeler baraj temeline yakın kısımlarda çok etkili olmaktadır. Baraj temelinden krete doğru yükseldikçe söz konusu yerdeğiştirmelerin etkisi azalmaktadır.

13) Asinkronize dinamik analizde, yer hareketinin yerdeğiştirme değerleri sonuçları önemli derecede etkilemektedir. Eğer analizlerde kullanılan yer hareketinin yerdeğiştirme değerleri büyükse, gerilmelerde baraj temeline yakın kısımlarda önemli artışlar meydana gelmektedir.

14) Baraj-rezervuar-temel sisteminde baraj temelinin kütsesiz (temelin sadece rijitlik etkisi dikkate alınmakta) alınması hem sonsuz hem de sonlu dalga yayılma hızları için hesaplanan gerilme ve hidrodinamik basınç değerlerini azaltmaktadır.

15) Asinkronize yatay yer hareketi durumunda baraj temelinde meydana gelen gerilmeler, barajın boş ve dolu olmasından çok az etkilenmektedir. Fakat, baraj gövdesinde hem sonsuz ve hem de sonlu yayılma hızları için barajın dolu olması gerilmeleri büyütmektedir.

16) Bundan sonra yapılacak çalışmalarda, asinkronize yer hareketi etkisindeki baraj-rezervuar-temel sisteminin lineer olmayan davranışı dikkate alınabilir. Lineer olmayan analiz sonuçları kurulacak deney düzeneğinden elde edilen sonuçlarla karşılaştırılabilir.

Sonuç olarak denilebilir ki, yıkılmaları ile can ve mal güvenliği açısından büyük felaketlere neden olabilen barajların deprem analizlerinde hidrodinamik etkilerle birlikte yer hareketinin asinkronize etkisinin de dikkate alınması gerekmektedir.



6. KAYNAKLAR

1. Bayraktar, A., Beton Ağırlık Barajlarda Baraj-Su-Zemin Etkileşiminin Statik ve Dinamik Analizde Değerlendirilişi, Yüksek Lisans Tezi, K.T.Ü. Fen Bilimleri Enstitüsü, Trabzon, 1991.
2. Öziş, Ü., Su Yapıları, Dokuz Eylül Üniversitesi Mühendislik-Mimarlık Fakültesi Yayınları, No. 54, Bornova-İzmir, 1983.
3. Bulson, P.S., Caldwell, J.B. and Severn, R.T., Engineering Structures Developments in the Twentieth Century, University of Bristol Press, Bristol, 1983.
4. Muvafık, M., Kemer Barajların Statik ve Dinamik Analizi, Yüksek Lisans Tezi, K.T.Ü. Fen Bilimleri Enstitüsü, Trabzon, 1993.
5. Öziş, Ü. ve Alsan, M., Beton Baraj İnşaatının Türkiye 'de Gelişmesi, Teknik Dergi, TMMOB İnşaat Mühendisleri Odası, 3, 1 (1990) 147-158.
6. Türkiye 'deki Barajlar ve Hidroelektrik Santraller, Bayındırlık ve İskan Bakanlığı, Devlet Su İşleri (DSİ) Genel Müdürlüğü, Ankara, 1991.
7. Chopra, A.K., Earthquake Analysis, Design, and Safety Evaluation of Concrete Dams, Proceedings of the Fifth Canadian Conference on Earthquake Engineering, 1987, Ottawa, Canada, 39-62.
8. Trifunac, M.D., Effects of Site Geology on Amplitudes of Strong Motion, Proceedings of the Seventh World Conference on Earthquake Engineering, 1980, İstanbul, Volume 2, 145-152.
9. Sanchez-Sesma, F.J., Site Effects on Strong Ground Motion, Soil Dynamics and Earthquake Engineering, 6, 2 (1987) 124-132.

10. Seed, H.B. and Idriss, I.M., Influence of Soil Conditions on Ground Motions During Earthquakes, Journal of the Soil Mechanics and Foundations Division, ASCE, 95, SM1 (1969) 99-137.
11. Calciati, F., Castoldi, R., Ciacci, R. and Fanelli, M.A., Experiences Gained During in Situ Artificial and Natural Dynamic Excitation of Large Concrete Dams in Italy: Analytical Interpretation of Results, Thirteenth International Congress on Large Dams (ICOLD), 1979, New Delhi, Volume 4, R32, 1377-1402.
12. Dibaj, M. and Penzien, J., Response of Earth Dams to Travelling Seismic Waves, Journal of the Soil Mechanics and Foundations Division, ASCE, 95, SM2 (1969) 541-560.
13. Dezfulian, H. and Seed, H.B., Response of Nonuniform Soil Deposits to Travelling Seismic Waves, Journal of the Soil Mechanics and Foundations Division, ASCE, 97, SM1 (1971) 27-46.
14. Dumanoğlu, A.A., Asinkronize Dinamik Analiz, İnşaat Mühendisliğinde Bilgisayar Kullanımı I. Sempozyumu, 1988, İstanbul, Bildiriler Kitabı, 95-106.
15. Westergaard, H.M., Water Pressures on Dams During Earthquakes, Transactions, ASCE, 98, 1835 (1933) 418-433.
16. Priscu, R., Popovici, A., Stematiu, D. and Stere, C., Earthquake Engineering for Large Dams, Second Edition, Editura Academiei, Bucureşti, 1985.
17. Maheri, M.R., Taylor, C.A. and Blakeborough, A., Comparative Numerical Studies of Hydrodynamic Effects on Dam Structures, Proceedings of the Eighth European Conference on Earthquake Engineering, 1986, Lisbon, Volume 3, 25-32.
18. Calayır, Y., Bayraktar, A. ve Dumanoğlu, A.A., Baraj-Rezervuar Sistemlerinin Lineer Teoriye Göre Dinamik Analizi, 2. Ulusal Deprem Mühendisliği Konferansı, TMMOB İnşaat Mühendisleri Odası İstanbul Şubesi, 1993, İstanbul, Bildiriler Kitabı, 178-187.
19. Greeves, E.J. and Dumanoğlu, A.A., The Implementation of an Efficient Computer Analysis for Fluid-Structure Systems Using the Eulerian Approach within SAP IV, Report No. UBCE-EE-89-10, Department of Civil Engineering, University of Bristol, Bristol, 1989.

20. Mays, J.R. and Roehm, L.H., Hydrodynamic Pressure in a Dam-Reservoir System, Computers and Structures, 40, 2 (1991) 281-291.
21. Singhal, A.C., Comparison of Computer Codes for Seismic Analysis of Dams, Computers and Structures, 38, 1 (1991) 107-112.
22. Okomato, S., Introduction to Earthquake Engineering, Second Edition, University of Tokyo Press, Tokyo, 1984.
23. Chopra, A.K., Hydrodynamic Pressures on Dams During Earthquakes, Journal of the Engineering Mechanics Division, ASCE, 93, EM6 (1967) 205-223.
24. Chopra, A.K., Earthquake Behaviour of Reservoir-Dam Systems, Journal of the Engineering Mechanics Division, ASCE, 94, EM6 (1968) 1475-1500.
25. Chopra, A.K., Earthquake Response of Concrete Gravity Dams, Journal of the Engineering Mechanics Division, ASCE, 96, EM4 (1970) 443-454.
26. Chakrabarti, P. and Chopra, A.K., Hydrodynamic Pressures and Response of Gravity Dams to Vertical Earthquake Component, Earthquake Engineering and Structural Dynamics, 1, (1973) 325-335.
27. Saini, S.S., Krishna, J. and Chandrasekaran, A.R., Behaviour of Koyna Dam-Dec. 11, 1967 Earthquake, Journal of the Structural Division, ASCE, 98, ST7 (1972) 1395-1412.
28. Chakrabarti, P. and Chopra, A.K., Earthquake Analysis of Gravity Dams Including Hydrodynamic Interaction, Earthquake Engineering and Structural Dynamics, 2, (1973) 143-160.
29. Finn, W.D.L. and Varoğlu, E., Dynamics of Gravity Dam-Reservoir Systems, Computers and Structures, 3, (1973) 913-924.
30. Chakrabarti, P. and Chopra, A.K., Hydrodynamic Effects in Earthquake Response of Gravity Dams, Journal of the Structural Division, ASCE, 100, ST6 (1974) 1211-1224.
31. Rea, D., Liaw, C-Y. and Chopra, A.K., Mathematical Models for the Dynamic Analysis of Concrete Gravity Dams, Earthquake Engineering and Structural Dynamics, 3, (1975) 249-258.

32. Saini, S.S., Bettess, P. and Zienkiewicz, O.C., Coupled Hydrodynamic Response of Concrete Gravity Dams Using Finite and Infinite Elements, Earthquake Engineering and Structural Dynamics, 6, (1978) 363-374.
33. Hall, J.F. and Chopra, A.K., Hydrodynamic Effects in the Dynamic Response of Concrete Gravity Dams, Earthquake Engineering and Structural Dynamics, 10, (1982) 333-345.
34. Hall, J.F. and Chopra, A.K., Two-Dimensional Dynamic Analysis of Concrete Gravity and Embankment Dams Including Hydrodynamic Effects, Earthquake Engineering and Structural Dynamics, 10, (1982) 305-332.
35. Sharan, S.K., Finite Element Modelling of Infinite Reservoirs, Journal of Engineering Mechanics, ASCE, 111, 12 (1985) 1457-1469.
36. Fenves, G. and Chopra, A.K., Effects of Reservoir Bottom Absorption on Earthquake Response of Concrete Gravity Dams, Earthquake Engineering and Structural Dynamics, 11, (1983) 809-829.
37. Fenves, G. and Chopra, A.K., Earthquake Analysis of Concrete Gravity Dams Including Reservoir Bottom Absorption and Dam-Water-Foundation Rock Interaction, Earthquake Engineering and Structural Dynamics, 12, (1984) 663-680.
38. Greeves, E.J., 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, Bristol, 1991.
39. Calayır, Y., Beton Ağırlık Barajların Euler ve Lagrange Yaklaşımları Kullanılarak Dinamik Analizi, Doktora Tezi, K.T.Ü. Fen Bilimleri Enstitüsü, Trabzon, 1994.
40. Dungar, R., An Efficient Method of Fluid-Structure Coupling in the Dynamic Analysis of Structures, International Journal for Numerical Methods in Engineering, 13, (1978) 93-107.
41. Karadeniz, H., The Theoretical and Experimental Dynamic Analysis of Thin Shells of Revolution, Ph. D. Thesis, Department of Civil Engineering, University of Bristol, Bristol, 1976.
42. Humar, J. and Roufaiel, M., Finite Element Analysis of Reservoir Vibration, Journal of Engineering Mechanics, ASCE, 109, 1 (1983) 215-230.

43. Sharan, S.K., Efficient Finite Element Analysis of Hydrodynamic Pressure on Dams, Computers and Structures, 42, 5 (1992) 713-723.
44. Chopra, A.K. and Chakrabarti, P., Earthquake Analysis of Concrete Gravity Dams Including Dam-Water-Foundation Rock Interaction, Earthquake Engineering and Structural Dynamics, 9, (1981) 363-383.
45. Paul, D.K., Influence of Reservoir and Dam on the Hydrodynamic Pressure, Proceedings of the Eighth World Conference on Earthquake Engineering, 1984, San Francisco, 351-358.
46. Hall, J.F., Study of the Earthquake Response of Pine Flat Dam, Earthquake Engineering and Structural Dynamics, 14, (1986) 281-295.
47. Fenves, G. and Chopra, A.K., Effects of Reservoir Bottom Absorption and Dam-Water-Foundation Rock Interaction on Frequency Response Functions for Concrete Gravity Dams, Earthquake Engineering and Structural Dynamics, 13, (1985) 13-31.
48. Chopra, A.K. and Gupta, S., Hydrodynamic and Foundation Interaction Effects in Frequency Response Functions for Concrete Gravity Dams, Earthquake Engineering and Structural Dynamics, 10, (1982) 89-106.
49. Sharan, S.K. and Gladwell, G.M.L., A General Method for the Dynamic Response Analysis of Fluid-Structure Systems, Computers and Structures, 21, 5 (1985) 937-943.
50. Wilson, E.L. and Khalvati, M., Finite Elements for the Dynamic Analysis of Fluid-Solid Systems, International Journal for Numerical Methods in Engineering, 19, (1983) 1657-1668.
51. Olson, L.G. and Bathe, K-J., A Study of Displacement-Based Fluid Finite Elements for Calculating Frequencies of Fluid and Fluid-Structure Systems, Nuclear Engineering and Design, 76 (1983) 137-151.
52. Chopra, A.K., Wilson, E.L. and Farhoomand, I., Earthquake Analysis of Reservoir-Dam Systems, Proceedings of the Fourth World Conference on Earthquake Engineering, 1969, Santiago, Chile, Volume 2, B-4, 1-10.
53. Akkaş, N., Akay, H.U. and Yılmaz, Ç., Applicability of General Purpose Finite Element Programs in Solid-Fluid Interaction Problems, Computers and Structures, 10, (1979) 773-783.

54. Bathe, K-J. and Hahn, W., On Transient Analysis of Fluid-Structure Systems, Computers and Structures, 10, (1978) 383-391.
55. Zienkiewicz, O.C. and Bettess, P., Fluid-Structure Dynamic Interaction and Wave Forces. An Introduction to Numerical Treatment, International Journal for Numerical Methods in Engineering, 13, (1978) 1-16.
56. Hamdi, M.A., Ousset, Y. and Verchery, G., A Displacement Method for the Analysis of Vibrations of Coupled Fluid-Structure Systems, International Journal for Numerical Methods in Engineering, 13, (1978) 139-150.
57. Zienkiewicz, O.C. and Taylor, R.C., The Finite Element Method, Volume 1, Fourth Edition, McGraw-Hill Book Company, London, 1989.
58. Bathe, K-J., Finite Element Procedures in Engineering Analysis, Prentice-Hall Inc., Englewood Cliffs, New Jersey, 1982.
59. Deshpande, S.S., Belkune, R.M. and Ramesh, C.K., Dynamic Analysis of Coupled Fluid-Structure Interaction Problems, Numerical Methods for Coupled Problems, Edited by: E. Hinton, P. Bettess and R.W. Lewis, Pineridge Press, Swansea, U.K., 1981, 367-378.
60. Greeves, E.J., 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, 1990.
61. Calayır, Y. ve Dumanoğlu, A.A., Sıvı-Yapı Sistemlerinin Statik ve Dinamik Davranışlarının Lagrangian Metoduyla İncelenmesi, İnşaat Mühendisliğinde Bilgisayar Kullanımı III. Sempozyumu, 1992, İstanbul, Bildiriler Kitabı, Cilt 1, 248-261.
62. Calayır, Y. and Dumanoğlu, A.A., Static and Dynamic Analysis of Fluid and Fluid-Structure Systems by the Lagrangian Method, Computers and Structures, 49, 4 (1993) 625-632.
63. Calayır, Y. ve Dumanoğlu, A.A., Sıvı Sıkışabilirliğinin Baraj-Rezervuar Sistemlerinin Modal Davranışına Etkisi, İnşaat Mühendisliğinde Bilgisayar Kullanımı IV. Sempozyumu, 1994, İstanbul, Bildiriler Kitabı, 151-160.
64. Calayır, Y., Dumanoğlu, A.A. ve Bayraktar, A., Baraj-Rezervuar Sistemlerinin Lagrange Yaklaşımı Kullanılarak İki ve Üç boyutlu Dinamik Analizi, 3. Ulusal Deprem Mühendisliği

- Konferansı, TMMOB İnşaat Mühendisleri Odası İstanbul Şubesi, 1995, İstanbul, Bildiriler Kitabı, 95-104.
65. Bogdanoff, J.L., Goldberg, J.E. and Schiff, A.J., The Effect of Ground Transmission Time on the Response of Long Structures, Bulletin of Seismological Society of America, 55, 3 (1965) 627-640.
66. Werner, S.D., Lee, L.C., Wong, H.L. and Trifunac, M.D., Structural Response to Travelling Seismic Waves, Journal of the Structural Division, ASCE, 105, ST12 (1979) 2547-2564.
67. Abdel-Ghaffar, A.M. and Rubin, L.I., Suspension Bridge Response to Multiple-Support Excitations, Journal of the Engineering Mechanics Division, ASCE, 108, EM2 (1982) 419-435.
68. Abdel-Ghaffar, A.M. and Stringfellow, R.G., Response of Suspension Bridges to Travelling Earthquake Excitations: Part I. Vertical Response, Soil Dynamics and Earthquake Engineering, 3, 2 (1984) 67-72.
69. Abdel-Ghaffar, A.M. and Stringfellow, R.G., Response of Suspension Bridges to Travelling Earthquake Excitations: Part II. Lateral Response, Soil Dynamics and Earthquake Engineering, 3, 2 (1984) 73-81.
70. Nazmy, A.S. and Abdel-Ghaffar, A.M., Non-Linear Earthquake-Response Analysis of Long-Span Cable-Stayed Bridges: Theory, Earthquake Engineering and Structural Dynamics, 19, (1990) 45-62.
71. Nazmy, A.S. and Abdel-Ghaffar, A.M., Non-Linear Earthquake-Response Analysis of Long-Span Cable-Stayed Bridges: Applications, Earthquake Engineering and Structural Dynamics, 19, (1990) 63-76.
72. Nazmy, A.S. and Abdel-Ghaffar, A.M., Effects of Ground Motion Spatial Variability on the Response of Cable-Stayed Bridges, Earthquake Engineering and Structural Dynamics, 21, (1992) 1-20.
73. Dumanoğlu, A.A., Severn, R.T. and Brownjohn, J.M.W., Asynchronous Seismic Analysis of Bosphorus and Humber Suspension Bridges, Proceedings of the Eighth European Conference on Earthquake Engineering, 1986, Lisbon, Volume 3, 1-8.

74. Dumanoglu, A.A. and Severn, R.T., Seismic Response of Modern Suspension Bridges to Asynchronous Vertical Ground Motion, Proc. Instn Civ. Engrs, Part 2, 83, (1987) 701-730.
75. Garevski, M., Dumanoglu, A.A. and Severn, R.T., Dynamic Characteristic and Seismic Behaviour of Jindo Bridge, South Korea, Structural Engineering Review, 1, (1988) 141-149.
76. Dumanoglu, A.A. and Severn, R.T., Seismic Response of Modern Suspension Bridges to Asynchronous Longitudinal and Lateral Ground Motion, Proc. Instn Civ. Engrs, Part 2, 87, (1987) 73-86.
77. Dumanoglu, A.A., Brownjohn, J.M.W. and Severn, R.T., Seismic Analysis of the Fatih Sultan Mehmet (Second Bosphorus) Suspension Bridge, Earthquake Engineering and Structural Dynamics, 21, (1992) 881-906.
78. Rutenberg, A. and Heidebrecht, A.C., Approximate Spectral Multiple Support Seismic Analysis: Travelling Wave Approach, Proc. Instn Civ. Engrs, Part 2, 85, (1988) 223-236.
79. Léger, P., Ide, I.M. and Paultre, P., Multiple-Support Seismic Analysis of Large Structures, Computers and Structures, 36, 6 (1990) 1153-1158.
80. Yamamura, N. and Tanaka, H., Response Analysis of Flexible MDF Systems for Multiple-Support Seismic Excitations, Earthquake Engineering and Structural Dynamics, 19, (1990) 345-357.
81. Perotti, F., Structural Response to Non-Stationary Multiple-Support Random Excitation, Earthquake Engineering and Structural Dynamics, 19, (1990) 513-527.
82. Wu, R.W., Hussain, F.A. and Liu, L.K., Seismic Response Analysis of Structural System Subjected to Multiple Support Excitation, Nuclear Engineering and Design, 47, (1978) 273-282.
83. Lee, M.C. and Penzien, J., Stochastic Analysis of Structures and Piping Systems Subjected to Stationary Multiple Support Excitations, Earthquake Engineering and Structural Dynamics, 11, (1983) 91-110.
84. Wolf, J.P., Seismic Response due to Travelling Shear Wave Including Soil-Structure Interaction with Base-Mat Uplift, Earthquake Engineering and Structural Dynamics, 5, (1977) 337-363.

85. Wolf, J. P. and Oberhuber, P., Effects of Horizontally Travelling Waves in Soil-Structure Interaction, Nuclear Engineering and Design, 57, (1980) 221-244.
86. Altınışık, D., Yaygın Temelli Yapıların Dinamik Analizleri, Deprem Araştırma Bülteni, 34 (1981) 45-64.
87. Altınışık, D., Aseismic Design of Concrete Dams, Ph. D. Thesis, Department of Civil Engineering, University of Bristol, Bristol, 1980.
88. Altınışık, D. and Severn, R.T., Natural Frequencies and Response Characteristics of Gravity Dams, Conference on Design of Dams to Resist Earthquake, ICE, R.23, 1980, London, 167-174.
89. Altınışık, D., Back, P.A.A., Ledbetter, S.R., Severn, R.T. and Taylor, C.A., Aseismic Design of Arch Dams: Particularly the Contribution from the Reservoir, and Multiple-Support Excitation of the Base, Conference on Design of Dams to Resist Earthquake, ICE, R.24, 1980, London, 175-182.
90. Haroun, M.A. and Abdel-Hafiz, E.A., Seismic Response Analysis of Earth Dams Under Differential Ground Motion, Bulletin of the Seismological Society of America, 77, 5 (1987) 1514-1529.
91. Maugeri, M., Motta, E. and Zeng, X., The Effect of Travelling Seismic Waves on the Dynamic Response of Earth Dams, Soil Dynamics and Earthquake Engineering, 12, (1993) 61-72.
92. Dumanoğlu, A.A. and Severn, R.T., Dynamic Response of Dams and Other Structures to Differential Ground Motions, Proc. Instn Civ. Engrs, Part 2, 77, (1984) 333-352.
93. Dumanoğlu, A.A., Severn, R.T. and Taylor, C.A., Effect of Asynchronous Input on the Reponse of Dams, Proceedings of the Eighth World Conference on Earthquake Engineering, 1984, San Francisco, Volume 6, 127-133.
94. Zhang, X. and Mai, J., Vibration-Response of Arch Dams with Time-Lag Between Abutments, International Congress on Large Dam (ICOLD), 1987, Beijing, China, Volume 1, 219-232.
95. Chen, H. and Hou, S., Effect of Seismic Travelling Wave on the Response of Arch Dam, Proceedings of China-U.S. Workshop on Earthquake Behaviour of Arch Dams, 1987, Beijing, China, 73-91.

96. Bayraktar, A., Muvafık, M. ve Dumanoglu, A.A., Beton Ağrılık Barajların Asinkronize Dinamik Analizi, İnşaat Mühendisliğinde Gelişmeler 1. Teknik Kongre, 1993, Gazimağusa, KKTC, Bildiriler Kitabı, Cilt I, 161-170.
97. Bayraktar, A. ve Dumanoglu, A.A., Baraj-Rezervuar-Temel Sistemlerinin Asinkronize Dinamik Analizi, İnşaat Mühendisliğinde Bilgisayar Kullanımı IV. Sempozyumu, 1994, İstanbul, Bildiriler Kitabı, 307-316.
98. Bayraktar, A., Dumanoglu, A.A. ve Calayır, Y., Asinkronize Düşey Yer Hareketi Etkisindeki Baraj-Rezervuar-Temel Sisteminin Deprem Analizi, 3. Ulusal Deprem Mühendisliği Konferansı, TMMOB İnşaat Mühendisleri Odası İstanbul Şubesi, 1995, İstanbul, Bildiriler Kitabı, 75-84.
99. Bayraktar, A. and Dumanoglu, A.A., The Effect of the Asynchronous Ground Motion on Hydrodynamic Pressures, The Sixth International Conference on Civil and Structural Engineering Computing, August 1995, Cambridge, England (accepted for publication).
100. Bathe, K-J., Wilson, E.L. and Peterson, F.E., SAP IV: A Structural Analysis Program for Static and Dynamic Response of Linear Systems, Report No. EERC 73-11, Earthquake Engineering Research Center, University of California, Berkeley, California, 1973.
101. Clough, R.W. and Penzien, J., Dynamics of Structures, McGraw-Hill Book Company, Singapore, 1975.
102. Hellen, T.K., Effective Quadrature Rules for Quadratic Solid Isoparametric Finite Elements, International Journal for Numerical Methods in Engineering, 4, 4 (1972) 597-599.
103. Muvafık, M., Bayraktar, A. ve Dumanoglu, A.A., Kemer Barajların Üç Boyutlu Statik ve Dinamik Analizi, İnşaat Mühendisliğinde Gelişmeler 1. Teknik Kongre, 1993, Gazimağusa, KKTC, Bildiriler Kitabı, Cilt I, 21-30.
104. Celep, Z. ve Kumbasar, N., Yapı Dinamiği ve Deprem Mühendisliğine Giriş, Sema Matbaacılık, İstanbul, 1992.
105. Celep, Z. ve Kumbasar, N., Deprem Mühendisliğine Giriş ve Depreme Dayanıklı Yapı Tasarımı, İstanbul Teknik Üniversitesi İnşaat Fakültesi Matbaası, İstanbul, 1992.

106. Bayülke, N., İnan, E. and Güler, H., Strong Motion Accelerograph Records of Turkey, Volume 2, General Directorate of Disaster Affairs, Earthquake Research Department, Ankara, 1990.
107. Erdik, M. and Kubin, J., A Procedure for the Acceleration Processing, Proceedings of the Eighth World Conference on Earthquake Engineering, 1984, San Francisco, California, Volume 2, 135-142.
108. Erdik, M., Processing of Strong Motion Accelerograms in Earthquake Engineering: Corrected Accelerogram, Velocity and Displacement Traces, METU Journal of Pure and Applied Sciences, 12, 2 (1979) 277-304.
109. Berg, G.V. and Housner, G.W., Integrated Velocity and Displacement of Strong Earthquake Ground Motion, Bulletin of the Seismological Society of America, 51, 2 (1961) 175-189.
110. Trujillo, D.M. and Carter, A.C., A New Approach to the Integration of Accelerometer Data, Earthquake Engineering and Structural Dynamics, 10, (1982) 529-535.
111. Kreyszig, E., Advanced Engineering Mathematics, Sixth Edition, John Wiley and Sons, New York, 1988.
112. Ohsaki, Y. (Çeviren: M. İpek), Deprem Dalgasının Spektral Analizine Giriş, TMMOB İnşaat Mühendisleri Odası İstanbul Şubesi, İstanbul, 1991.
113. Craig, R.R., Structural Dynamics, John Wiley and Sons, Singapore, 1981.
114. Wearner, W. and Johnston, P.R., Structural Dynamics by Finite Elements, Prentice-Hall Inc., Englewood Cliffs, New Jersey, 1987.
115. İnan, E., Güler, H. ve Çoruh, E., Kuvvetli Yer Hareketi Kayıtları, 13 Mart 1992 Erzincan Depremi Raporu, Editör: N. Bayülke, Afet İşleri Genel Müdürlüğü Deprem Araştırma Dairesi, Ankara, 1993, 59-110.
116. Karakaya Barajı ve Santralı Kati Projesi, Bayındırlık ve İskan Bakanlığı, Devlet Su İşleri Genel Müdürlüğü, Ankara, 1975.

117. Bustamante, J.I., Rosenblueth, E., Herrera, I. and Flores, A., Presion Hidrodinamica en Presas y Depositos, Boletin Sociedad Mexicana de Ingenieria Sismica, 1, 2 (1963) 37-54.
118. Newmark, N.M. and Rosenblueth, E., Fundamentals of Earthquake Engineering, Prentice-Hall, Englewood Cliffs, New Jersey, 1971.
119. Graham, E.W. and Rodriquez, A.M., The Characteristics of Fuel Motion which Affect Airplane Dynamics, Journal of Applied Mechanics, 19, (1952) 381-388.
120. Calayır, Y., Dumanoğlu, A.A. and Bayraktar, A., Earthquake Analysis of Gravity Dam-Reservoir Systems Using the Eulerian and Lagrangian Approaches, Computers and Structures, 1995, (accepted for publication).
121. Bayraktar, A., Dumanoğlu, A.A. and Calayır, Y., Asynchronous Dynamic Analysis of Dam-Reservoir--Foundation Systems by the Lagrangian Approach, Computers and Structures, 1995, (accepted for publication).

7. ÖZGEÇMİŞ

Alemdar BAYRAKTAR, 1966 yılında Trabzon' da doğdu. İlk öğrenimini 1973-1978 yılları arasında Trabzon' da, orta ve lise öğrenimini ise 1978-1984 yılları arasında İzmir' de tamamlayarak 1984-1985 öğretim yılında Karadeniz Teknik Üniversitesi Mühendislik Mimarlık Fakültesi İnşaat Mühendisliği Bölümüne başladı. 1987-1988 öğretim yılında bu bölümden derece ile mezun oldu. Aynı yıl girdiği sınavı kazanarak mezun olduğu bölümde yüksek lisans öğrenimine başladı. Mart 1989' da mezun olduğu bölümün Yapı Anabilim Dalı' na Araştırma Görevlisi olarak atandı. Yüksek lisans öğrenimini "Beton Ağırlık Barajlarda Baraj-Su-Zemin Etkileşiminin Statik ve Dinamik Analizde Değerlendirilişi" konusunda hazırladığı teze Ocak 1991 'de tamamlayarak, aynı yıl doktora çalışmalarına başladı. Bekar olan Alemdar BAYRAKTAR, İngilizce bilmekte ve halen K.T.Ü. İnşaat Mühendisliği Bölümünde görevine devam etmektedir.