

**KARADENİZ TEKNİK ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

İNŞAAT MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI

**SIVI-YAPI ETKİLEŞİM SİSTEMLERİNİN LAGRANGE YAKLAŞIMIYLA
STOKASTİK DİNAMİK ANALİZİ**

DOKTORA TEZİ

İnş. Yük. Müh. Ebru KÖSEOĞLU

**TEMMUZ 2007
TRABZON**

**KARADENİZ TEKNİK ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

İNŞAAT MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI

**SIVI-YAPI ETKİLEŞİM SİSTEMLERİNİN LAGRANGE YAKLAŞIMIYLA
STOKASTİK DİNAMİK ANALİZİ**

İnş. Yük. Müh. Ebru KÖSEOĞLU

**Karadeniz Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsünde
“Doktor”
Ünvanı Verilmesi İçin Kabul Edilen Tezdir.**

**Tezin Enstitüye Verildiği Tarih : 28.06.2007
Tezin Savunma Tarihi : 24.07.2007**

**Tez Danışmanı : Prof. Dr. Alemdar BAYRAKTAR
Jüri Üyesi : Prof. Dr. Ing. Ahmet DURMUŞ
Jüri Üyesi : Prof. Dr. Muzaffer DOĞAN
Jüri Üyesi : Yrd. Doç. Dr. Mehmet AKKÖSE
Jüri Üyesi : Prof. Dr. Mustafa ERDİK**

Enstitü Müdürü : Prof. Dr. Emin Zeki BAŞKENT

Trabzon 2007

ÖNSÖZ

Bu çalışma Karadeniz Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü İnşaat Mühendisliği Ana Bilim Dalı'nda doktora tezi olarak hazırlanmıştır.

Mühendislik yapıları incelenirken yapının davranışının istatistiksel olarak değerlendirilmesi, davranışın gelecekte olması muhtemel büyüklükleri hakkında tahminde bulunmamıza yardımcı olur. İstatistiksel bilgilerin elde edilmesi deprem kuşağında bulunan ülkemiz açısından oldukça önem taşımaktadır. Elde edilen bu bilgiler ışığında yapılan projelerin daha sağlıklı sonuçlar vereceği aşikardır.

“Sıvı-Yapı Etkileşim Sistemlerinin Lagrange Yaklaşımıyla Stokastik Dinamik Analizi” isimli konuyu bana önererek yöneticiliğimi üstlenen, fikirleriyle bana yol gösteren saygıdeğer hocam Prof. Dr. Alemdar BAYRAKTAR'a teşekkürlerimi sunmayı bir borç bilirim.

Yoğun çalışmalarını sırasında değerli zamanlarını ayırarak tezimi değerlendiren hocalarım Sayın Prof. Dr. Mustafa ERDİK'e, Sayın Prof. Dr. Ing Ahmet DURMUŞ'a, Sayın Prof. Dr. Muzaffer DOĞAN'a ve Sayın Yrd. Doç. Dr. Mehmet AKKÖSE'ye çok teşekkür ederim.

Bugüne kadar bana emeği geçen tüm hocalarımı saygıyla anar, çalışmamı destekleyerek yanımda olduklarını hissettiren tüm arkadaşlarıma teşekkür ederim.

Öğrenim hayatım boyunca maddi ve manevi yardımlarını esirgemeyen başta annem İlkay HANÇER, babam Mehmet HANÇER olmak üzere tüm aile fertlerine minnettar olduğumu belirtirim. Çalışmam sırasında desteğini esirgemediği için eşim Ömer Faruk KÖSEOĞLU'na, varlığıyla beni hayata bağladığı için oğlum Murat Efe KÖSEOĞLU'na çok teşekkür ederim.

Bu çalışmadan çıkarılan yayınlar aşağıda verilmektedir.

Makaleler :

Hançer, E., Bayraktar, A., 2004. “Stochastic Finite Element Analysis of Dam-Reservoir-Foundation Interaction System”, ARI The Bulletin of the Istanbul Technical University, 54, 1, 54-59.

Bayraktar, A., Hançer, E. ve Akköse M., 2005. “Influence of Base-Rock Characteristics on the Stochastic Dynamic Response of Dam-Reservoir-Foundation System”, Engineering Structures, 27, 1498-1508 (SCI).

Bayraktar, A., Hançer, E. ve Dumanoglu, A.A., 2005. "Comparison of Stochastic and Deterministic Dynamic Response of Gravity Dam-Reservoir Systems Using Fluid Finite Elements", Finite Elements in Analyses and Design, 41,1365-1376 (SCI).

Bayraktar, A., Hançer, E., 2005. "Stochastic Analysis of Fluid-Structure Interaction Systems by Lagrangian Approach", Structural Engineering and Mechanics, 20, 4, 389-403 (SCI).

Bayraktar, A., Hançer, E., 2007. "Stochastic Seismic Response of Fluid and Fluid-Solid Systems", Journal of Hydraulic Research, 45, 1, 117-125 (SCI).

Uluslararası Bildiriler :

Hançer, E., Bayraktar, A., 2002. "Probabilistic Finite Element Analysis of Dam-Reservoir-Foundation Systems", ACE 2002 The 5th International Congress on Advances in Civil Engineering, İstanbul, 2, 1223-1232.

Bayraktar, A., Hançer, E. ve Adanur, S., 2002. "Comparison of Asynchronous and Stochastic Dynamic Responses of Concrete Gravity Dams", Structural Dynamics, EUROODYN2002, 737-742.

Bayraktar, A., Hançer, E., 2003. "The Effects of Vertical Ground Motion on Stochastic Dynamic Responses of Dam-Reservoir Interaction Systems", 6th International Conference on Civil Engineering, Isfahan University of Technology, Isfahan, Iran, 6, 61-68.

Bayraktar, A., Hançer, E., 2003. "The Effects of Earthquake Input Mechanisms on the Stochastic Dynamic Response of Gravity Dams", International Conference on New Developments in Soil Mechanics and Geotechnical Engineering, Lefkosa, North Cyprus, 2, 127-132.

Bayraktar, A., Hançer, E., 2004. "Fluid Compressibility Effects on the Stochastic Dynamic Response of Fluid-Structure Systems", The 14th International Offshore and Polar Engineering Conference, Toulon, France, 426-432.

Bayraktar, A., Hançer, E., 2004. "The Effect of Random Loads on Hydrodynamic Pressures", Proceedings of the Fourth International Conference on Computational Technology, Lisbon, Portugal.

Ulusal Bildiriler :

Hançer, E., Bayraktar, A. ve Soyluk, K., 2001. "Zemin Sönüm Oranının Baraj-Su-Zemin Etkileşim Sistemlerinin Stokastik Dinamik Davranışına Etkisi", Türkiye İnşaat Mühendisliği XVI. Teknik Kongre ve Sergisi, Bildiriler Kitabı, Ankara.

Bayraktar, A., Hançer, E., 2003. "Sıvı-Yapı Etkileşim Sistemlerinin Lagrange Yaklaşımına Dayalı Stokastik Dinamik Analizi", V. Ulusal Deprem Mühendisliği Konferansı, İstanbul, Genişletilmiş Özetler, AT-005, 107-108.

Bayraktar, A., Hançer Köseoğlu, E., 2004. "Beton Ağırlık Barajların Stokastik Deprem Davranışı", 1. Ulusal Barajlar ve Hidroelektrik Santraller Sempozyumu, Ankara, 529-539.

Bu çalışmanın ülkemiz için faydalı olmasını temenni ederim.

Ebru KÖSEOĞLU

Trabzon 2007

İÇİNDEKİLER

	<u>Sayfa No</u>
ÖNSÖZ.....	II
İÇİNDEKİLER.....	IV
ÖZET	VII
SUMMARY	VIII
ŞEKİLLER DİZİNİ.....	IX
TABLolar DİZİNİ.....	XXI
SEMBOLLER DİZİNİ	XXIII
1. GENEL BİLGİLER.....	1
1.1. Giriş.....	1
1.2. Sıvı-Yapı Etkileşim Sistemi ile İlgili Çalışmalar	2
1.2.1. Deterministik Dinamik Analiz ile İlgili Çalışmalar	2
1.2.2. Stokastik Dinamik Analiz ile İlgili Çalışmalar.....	6
1.3. Çalışmanın Kapsamı.....	9
1.4. Sıvı Sistemlerinin Lagrange Yaklaşımına Dayalı Sonlu Eleman Formülasyonu.....	10
1.5. Sıvı-Yapı Sistemlerinin Stokastik Dinamik Analiz Formülasyonu.....	14
1.5.1. Stokastik Dinamik Analizde Kullanılan İfadeler.....	14
1.5.1.1. Rastgele Değişken	15
1.5.1.2. Rastgele İşlem	16
1.5.2. Deprem Etkileri Durumunda Stokastik Dinamik Analiz Formülasyonu.....	18
1.5.2.1. Spektral Momentler	19
1.5.2.2. Ortalama Maksimum Değer	21

1.5.2.3.	Oluşma Frekansı.....	22
1.5.2.4.	Yığışimli Olasılık Dağılım Fonksiyonu	23
2.	YAPILAN ÇALIŞMALAR.....	24
2.1.	Geliştirilen Bilgisayar Programı.....	24
2.2.	Geliştirilen Bilgisayar Programının Kontrol Edilmesi	24
2.2.1.	Rijit Sıvı Tankının Modal Analizi	24
2.2.2.	Sıvı-Yapı Etkileşim Sisteminin Stokastik Dinamik Analizi.....	26
2.2.2.1.	Frekanslar	28
2.2.2.2.	Ortalama Maksimum Yatay Yerdeğiştirmeler	29
2.2.2.3.	Ortalama Maksimum Yatay Gerilmeler	30
2.2.2.4.	Ortalama Maksimum Düşey Gerilmeler	33
2.2.2.5.	Ortalama Maksimum Kayma Gerilmeleri	35
2.2.2.6.	Ortalama Maksimum Hidrodinamik Basınçlar.....	37
2.3.	Seçilen Barajın Yapısal Özellikleri	38
2.3.1.	Baraj-Rezervuar Etkileşim Sisteminin Sonlu Eleman Modeli	39
2.3.2.	Baraj-Zemin-Rezervuar Etkileşim Sisteminin Sonlu Eleman Modeli	40
2.4.	Seçilen Yer Hareketinin Özellikleri	41
3.	BULGULAR VE İRDELEMELER	43
3.1.	Baraj-Rezervuar Etkileşim Sisteminin Lagrange Yaklaşımıyla Stokastik Dinamik Analizi	43
3.1.1.	Frekanslar	43
3.1.2.	Yerdeğiştirmeler ve Oluşma Frekansları.....	44
3.1.2.1.	Yerdeğiştirmelerin Yığışimli Olasılık Dağılım Fonksiyonu	46
3.1.3.	Gerilmeler ve Oluşma Frekansları.....	47
3.1.3.1.	Gerilmelerin Yığışimli Olasılık Dağılım Fonksiyonu	58
3.1.4.	Hidrodinamik Basınçlar ve Oluşma Frekansları	60

3.1.5.	Sıvı Sıkışabilirliğinin Baraj-Rezervuar Etkileşim Sisteminin Stokastik Davranışı Üzerindeki Etkisi	62
3.1.6.	Rezervuar Uzunluğunun Baraj-Rezervuar Etkileşim Sisteminin Stokastik Davranışı Üzerindeki Etkisi	72
3.1.7.	Farklı Yer Hareketlerinin Baraj-Rezervuar Etkileşim Sisteminin Stokastik Davranışı Üzerindeki Etkisi	83
3.1.8.	Düşey Yer Hareketinin Baraj-Rezervuar Etkileşim Sisteminin Stokastik Davranışı Üzerindeki Etkisi	109
3.2.	Baraj-Zemin-Rezervuar Etkileşim Sisteminin Lagrange Yaklaşımıyla Stokastik Dinamik Analizi.....	118
3.2.1.	Frekanslar	118
3.2.2.	Yerdeğiştirmeler ve Oluşma Frekansları.....	120
3.2.2.1.	Yerdeğiştirmelerin Yığışımli Olasılık Dağılım Fonksiyonu	122
3.2.3.	Gerilmeler ve Oluşma Frekansları.....	123
3.2.3.1.	Gerilmelerin Yığışımli Olasılık Dağılım Fonksiyonu.....	134
3.2.4.	Hidrodinamik Basınçlar ve Oluşma Frekansları	136
3.2.5.	Farklı Deprem Mekanizmalarının Baraj-Zemin-Rezervuar Etkileşim Sisteminin Stokastik Davranışı Üzerindeki Etkisi.....	138
3.2.6.	Farklı Zemin Elastisite Modüllerinin Baraj-Zemin-Rezervuar Etkileşim Sisteminin Stokastik Davranışı Üzerindeki Etkisi.....	149
4.	SONUÇLAR VE ÖNERİLER.....	160
5.	KAYNAKLAR.....	165
6.	EKLER	172

ÖZGEÇMİŞ

ÖZET

Bu çalışmada, sıvı-yapı etkileşim sistemlerinin Lagrange yaklaşımına dayalı stokastik dinamik davranışının incelenmesi amaçlanmaktadır. Bu doğrultuda sıvı ve sıvı-yapı sistemlerinin stokastik dinamik analizini yapmak amacıyla Lagrange yaklaşımına dayalı değişken düğüm noktalı iki boyutlu izoparametrik sıvı sonlu eleman formülasyonu FORTRAN programlama dilinde kodlanmıştır. Kodlanan bu alt program yapı sistemlerinin stokastik dinamik analizini yapan STOCAL programına dahil edilerek STOCALF olarak adlandırılmıştır. Sıvı-yapı sistemlerinin stokastik dinamik davranışlarının elde edildiği bu doktora tezi dört ana bölümden oluşmaktadır.

İlk bölüm, konuyla ilgili yapılan literatür araştırmasını ve sıvı-yapı sistemlerinin Lagrange yaklaşımına dayalı deterministik ve stokastik dinamik analiz formülasyonlarını içermektedir.

İkinci bölümde, geliştirilen bilgisayar programı tanıtılmış, frekansların kontrolü için bir rijit sıvı tankı sonlu elemanlar yöntemiyle modellenerek modal analizi yapılmıştır. Ayrıca örnek bir sıvı-yapı etkileşim sistemi modellenip, stokastik ve deterministik dinamik analizleri gerçekleştirilerek karşılaştırmalar yapılmıştır. Kullanılan sıvı-yapı etkileşim sistemlerinin sonlu eleman modelleri ve seçilen deprem kaydı hakkında bilgi verilmiştir.

İkinci bölümde yapılan kontroller ışığında üçüncü bölümde barajlar üzerine çeşitli uygulamalar yapılmıştır. Bu bölümde örnek bir baraj seçilerek, baraj-rezervuar ve baraj-zemin-rezervuar etkileşim sistemlerinin stokastik dinamik analizleri gerçekleştirilmiş; davranışların ortalama maksimum değerleri, oluşma frekansları ve yığışımli olasılık dağılım fonksiyonları elde edilmiştir. Bu bölümde çeşitli parametrik çalışmalar da yapılmıştır.

Dördüncü bölümde bu çalışmadan çıkan sonuçlar ayrıntılı olarak değerlendirilmiştir. Çalışma sonucunda sıvı-yapı etkileşim sistemlerinin davranışlarının belirlenmesinde yer hareketinin stokastik özelliğinin dikkate alınması gerektiği vurgulanmıştır.

Anahtar Kelimeler: Lagrange Yaklaşımı, Sıvı-Yapı Etkileşimi, Beton Ağırlık Baraj, Baraj-Rezervuar-Temel Etkileşimi, Stokastik Dinamik Analiz, Sonlu Eleman Yöntemi

SUMMARY

Stochastic Dynamic Analysis of Fluid-Structure Interaction Systems by Lagrangian Approach

In this study it is aimed to perform the stochastic dynamic analysis of fluid and fluid-structure systems by using the Lagrangian approach. For that reason, variable-number-nodes two-dimensional isoparametric fluid finite elements are programmed in FORTRAN language and incorporated into a general-purpose computer program for stochastic dynamic analysis of structure systems, STOCAL, and named as STOCALF. This Ph.D. thesis in which stochastic dynamic responses of fluid-structure systems are obtained consists of four main chapters.

First chapter consists of literature investigation about the subject. Formulations of deterministic and stochastic dynamic analyses of fluid-structure interaction systems by Lagrangian approach are given.

In the second chapter, developed computer program is introduced. For control of the frequencies, modal analysis of a rigid fluid tank which is modelled by finite element method is performed. Also, a fluid-structure interaction system is modelled as an example. Stochastic and deterministic dynamic analyses of fluid-structure interaction system are realized and comparisons are made. Informations about the finite element models of the interaction systems and earthquake motion which is chosen are given.

In the third chapter, a sample dam is chosen; stochastic dynamic analysis of dam-reservoir and dam-reservoir-foundation interaction systems are performed. Mean of maximum values, frequency of occurrence values of the responses and cumulative distribution functions are obtained. Also various parametric studies are performed.

In the fourth chapter, conclusions derived from this study are evaluated in details. At the end of the study it is underlined that the stochasticity of the earthquake motion must be taken into account to determine the responses of the fluid-structure interaction systems.

Key Words : Lagrangian Approach, Fluid-Structure Interaction, Concrete Gravity Dam, Dam-Reservoir-Foundation Interaction Systems, Stochastic Dynamic Analysis, Finite Element Method

ŞEKİLLER DİZİNİ

	<u>Sayfa No</u>
Şekil 1. Olasılık yoğunluk fonksiyonu	15
Şekil 2. Rastgele işlem.....	16
Şekil 3. Rastgele işlemin sınıflandırılması	17
Şekil 4. Örnek tepki işlemi	22
Şekil 5. Rijit sıvı tankı sonlu eleman modeli	25
Şekil 6. Sıvı-yapı etkileşim sistemi sonlu eleman modeli	27
Şekil 7. Sıvı-yapı etkileşim sistemi kret noktası (C noktası) mutlak maksimum yatay yerdeğiştirmesinin zamanla değişimi.....	30
Şekil 8. Sıvı-yapı etkileşim sistemi memba topuğu (A Gauss noktası) mutlak maksimum yatay gerilmesinin zamanla değişimi.....	32
Şekil 9. Sıvı-yapı etkileşim sistemi mansap topuğu (B Gauss noktası) mutlak maksimum yatay gerilmesinin zamanla değişimi.....	32
Şekil 10. Sıvı-yapı etkileşim sistemi memba topuğu (A Gauss noktası) mutlak maksimum düşey gerilmesinin zamanla değişimi	34
Şekil 11. Sıvı-yapı etkileşim sistemi mansap topuğu (B Gauss noktası) mutlak maksimum düşey gerilmesinin zamanla değişimi	34
Şekil 12. Sıvı-yapı etkileşim sistemi memba topuğu (A Gauss noktası) mutlak maksimum kayma gerilmesinin zamanla değişimi.....	36
Şekil 13. Sıvı-yapı etkileşim sistemi mansap topuğu (B Gauss noktası) mutlak maksimum kayma gerilmesinin zamanla değişimi.....	36
Şekil 14. Sıvı-yapı etkileşim sistemi memba topuğuna yakın D Gauss noktasında oluşan mutlak maksimum hidrodinamik basıncın zamanla değişimi.....	37
Şekil 15. Sarıyar Barajı boyutları	38
Şekil 16. Baraj-rezervuar etkileşim sisteminin sonlu eleman modeli.....	39
Şekil 17. Baraj-zemin-rezervuar etkileşim sisteminin sonlu eleman modeli.....	40

Şekil 18.	1971 San Fernando depremi Pacoima Baraj kaydı S16E bileşeni	41
Şekil 19.	1971 San Fernando depremi Pacoima Baraj kaydı S16E bileşenin güç spektral yoğunluk fonksiyonu	42
Şekil 20.	Baraj-rezervuar etkileşim sisteminde baraj memba yüzeyinde oluşan yatay yerdeğiştirmeler	45
Şekil 21.	Baraj-rezervuar etkileşim sisteminde baraj memba yüzeyinde oluşan yatay yerdeğiştirmelerin oluşma frekansları.....	45
Şekil 22.	Baraj-rezervuar etkileşim sisteminde baraj kret noktası (C noktası) yatay yerdeğiştirmesinin yığışımlı olasılık dağılım fonksiyonu	46
Şekil 23.	Baraj-rezervuar etkileşim sisteminde baraj memba yüzeyinde oluşan yatay gerilmeler	49
Şekil 24.	Baraj-rezervuar etkileşim sisteminde baraj memba yüzeyinde oluşan düşey gerilmeler	49
Şekil 25.	Baraj-rezervuar etkileşim sisteminde baraj memba yüzeyinde oluşan kayma gerilmeleri.....	50
Şekil 26.	Baraj-rezervuar etkileşim sisteminde baraj memba yüzeyinde oluşan yatay gerilmelerin oluşma frekansları	50
Şekil 27.	Baraj-rezervuar etkileşim sisteminde baraj memba yüzeyinde oluşan düşey gerilmelerin oluşma frekansları.....	51
Şekil 28.	Baraj-rezervuar etkileşim sisteminde baraj memba yüzeyinde oluşan kayma gerilmelerinin oluşma frekansları	51
Şekil 29.	Baraj-rezervuar etkileşim sistemi I-I kesitinde oluşan yatay gerilmeler.....	52
Şekil 30.	Baraj-rezervuar etkileşim sistemi I-I kesitinde oluşan düşey gerilmeler.....	52
Şekil 31.	Baraj-rezervuar etkileşim sistemi I-I kesitinde oluşan kayma gerilmeleri.....	53
Şekil 32.	Baraj-rezervuar etkileşim sistemi I-I kesitinde oluşan ortalama maksimum yatay gerilmelerin oluşma frekansları.....	53
Şekil 33.	Baraj-rezervuar etkileşim sistemi I-I kesitinde oluşan ortalama maksimum düşey gerilmelerin oluşma frekansları.....	54
Şekil 34.	Baraj-rezervuar etkileşim sistemi I-I kesitinde oluşan ortalama maksimum kayma gerilmelerinin oluşma frekansları	54

Şekil 35.	Baraj-rezervuar etkileşim sistemi II-II kesitinde oluşan yatay gerilmeler.....	55
Şekil 36.	Baraj-rezervuar etkileşim sistemi II-II kesitinde oluşan düşey gerilmeler.....	55
Şekil 37.	Baraj-rezervuar etkileşim sistemi II-II kesitinde oluşan kayma gerilmeleri.....	56
Şekil 38.	Baraj-rezervuar etkileşim sistemi II-II kesitinde oluşan ortalama maksimum yatay gerilmelerin oluşma frekansları.....	56
Şekil 39.	Baraj-rezervuar etkileşim sistemi II-II kesitinde oluşan ortalama maksimum düşey gerilmelerin oluşma frekansları.....	57
Şekil 40.	Baraj-rezervuar etkileşim sistemi II-II kesitinde oluşan ortalama maksimum kayma gerilmelerinin oluşma frekansları	57
Şekil 41.	Baraj-rezervuar etkileşim sisteminde baraj memba topuğundaki (A Gauss noktası) ortalama maksimum yatay gerilmenin yığışimli olasılık dağılım fonksiyonu	58
Şekil 42.	Baraj-rezervuar etkileşim sisteminde baraj memba topuğundaki (A Gauss noktası) ortalama maksimum düşey gerilmenin yığışimli olasılık dağılım fonksiyonu	59
Şekil 43.	Baraj-rezervuar etkileşim sisteminde baraj memba topuğundaki (A Gauss noktası) ortalama maksimum kayma gerilmesinin yığışimli olasılık dağılım fonksiyonu	59
Şekil 44.	Baraj-rezervuar etkileşim sisteminde baraj memba yüzeyinde elde edilen hidrodinamik basınç değişimi.....	61
Şekil 45.	Baraj-rezervuar etkileşim sisteminde baraj memba yüzeyinde oluşan ortalama maksimum hidrodinamik basınçların oluşma frekansları.....	61
Şekil 46.	Hacimsel elastisite modülünün farklı değerleri için baraj memba yüzeyinde oluşan ortalama maksimum yatay yerdeğiştirmeler.....	63
Şekil 47.	Hacimsel elastisite modülünün farklı değerleri için baraj memba yüzeyinde oluşan ortalama maksimum yatay yerdeğiştirmelerin oluşma frekansları	63
Şekil 48.	Hacimsel elastisite modülünün farklı değerleri için baraj kret noktasında (C noktası) elde edilen ortalama maksimum yatay yerdeğiştirmelerin yığışimli olasılık dağılım fonksiyonları.....	64
Şekil 49.	Hacimsel elastisite modülünün farklı değerleri için baraj memba yüzeyinde oluşan ortalama maksimum yatay gerilmeler	67

Şekil 50.	Hacimsel elastisite modülünün farklı değerleri için baraj memba yüzeyinde oluşan ortalama maksimum düşey gerilmeler.....	67
Şekil 51.	Hacimsel elastisite modülünün farklı değerleri için baraj memba yüzeyinde oluşan ortalama maksimum kayma gerilmeleri	68
Şekil 52.	Hacimsel elastisite modülünün farklı değerleri için barajın I-I kesitinde oluşan ortalama maksimum yatay gerilmeler	68
Şekil 53.	Hacimsel elastisite modülünün farklı değerleri için barajın I-I kesitindeki ortalama maksimum düşey gerilmeler.....	69
Şekil 54.	Hacimsel elastisite modülünün farklı değerleri için barajın I-I kesitinde oluşan ortalama maksimum kayma gerilmeleri.....	69
Şekil 55.	Hacimsel elastisite modülünün farklı değerleri için barajın II-II kesitinde oluşan ortalama maksimum yatay gerilmeler	70
Şekil 56.	Hacimsel elastisite modülünün farklı değerleri için barajın II-II kesitinde oluşan ortalama maksimum düşey gerilmeler	70
Şekil 57.	Hacimsel elastisite modülünün farklı değerleri için barajın II-II kesitinde oluşan ortalama maksimum kayma gerilmeleri.....	71
Şekil 58.	Hacimsel elastisite modülünün farklı değerleri için baraj memba yüzeyinde elde edilen ortalama maksimum hidrodinamik basınç değişimi	71
Şekil 59.	Rezervuar uzunluğu H olan baraj-rezervuar etkileşim sisteminin sonlu eleman modeli (Model A)	72
Şekil 60.	Rezervuar uzunluğu 2H olan baraj-rezervuar etkileşim sisteminin sonlu eleman modeli (Model B).....	72
Şekil 61.	Rezervuar uzunluğu 3H olan baraj-rezervuar etkileşim sisteminin sonlu eleman modeli (Model C).....	73
Şekil 62.	Farklı rezervuar uzunlukları için baraj memba yüzeyinde oluşan ortalama maksimum yatay yerdeğiştirmeler.....	74
Şekil 63.	Farklı rezervuar uzunlukları için baraj memba yüzeyinde oluşan ortalama maksimum yatay yerdeğiştirmelerin oluşma frekansları.....	74
Şekil 64.	Farklı rezervuar uzunlukları için baraj kret noktasında (C noktası) elde edilen ortalama maksimum yatay yerdeğiştirmelerin yığışimli olasılık dağılım fonksiyonları	75
Şekil 65.	Farklı rezervuar uzunlukları için baraj memba yüzeyinde oluşan ortalama maksimum yatay gerilmeler	77

Şekil 66.	Farklı rezervuar uzunlukları için baraj memba yüzeyinde oluşan ortalama maksimum düşey gerilmeler.....	78
Şekil 67.	Farklı rezervuar uzunlukları için baraj memba yüzeyinde oluşan ortalama maksimum kayma gerilmeleri	78
Şekil 68.	Farklı rezervuar uzunlukları için barajın I-I kesitinde oluşan ortalama maksimum yatay gerilmeler	79
Şekil 69.	Farklı rezervuar uzunlukları için barajın I-I kesitinde oluşan ortalama maksimum düşey gerilmeler.....	79
Şekil 70.	Farklı rezervuar uzunlukları için barajın I-I kesitinde oluşan ortalama maksimum kayma gerilmeleri	80
Şekil 71.	Farklı rezervuar uzunlukları için barajın II-II kesitinde oluşan ortalama maksimum yatay gerilmeler	80
Şekil 72.	Farklı rezervuar uzunlukları için barajın II-II kesitinde oluşan ortalama maksimum düşey gerilmeler.....	81
Şekil 73.	Farklı rezervuar uzunlukları için barajın II-II kesitinde oluşan ortalama maksimum kayma gerilmeleri	81
Şekil 74.	Farklı rezervuar uzunlukları için baraj memba yüzeyinde elde edilen ortalama maksimum hidrodinamik basınç değişimi.....	82
Şekil 75.	1992 Erzincan depremi doğu-batı bileşeni ivme kaydı	84
Şekil 76.	1999 Kocaeli depremi doğu-batı bileşeni ivme kaydı	84
Şekil 77.	1992 Erzincan depremi doğu-batı bileşeni güç spektral yoğunluk fonksiyonu	85
Şekil 78.	1999 Kocaeli depremi doğu-batı bileşeni güç spektral yoğunluk fonksiyonu	85
Şekil 79.	San Fernando depremi etkisiyle baraj memba yüzeyinde oluşan ortalama maksimum yatay yerdeğiştirmeler.....	86
Şekil 80.	Erzincan depremi etkisiyle baraj memba yüzeyinde oluşan ortalama maksimum yatay yerdeğiştirmeler.....	87
Şekil 81.	Kocaeli depremi etkisiyle baraj memba yüzeyinde oluşan ortalama maksimum yatay yerdeğiştirmeler.....	87
Şekil 82.	San Fernando depremi etkisiyle baraj memba yüzeyinde oluşan ortalama maksimum yatay yerdeğiştirmelerin oluşma frekansları.....	88
Şekil 83.	Erzincan depremi etkisiyle baraj memba yüzeyinde oluşan ortalama maksimum yatay yerdeğiştirmelerin oluşma frekansları.....	89

Şekil 84.	Kocaeli depremi etkisiyle baraj memba yüzeyinde oluşan ortalama maksimum yatay yerdeğiştirmelerin oluşma frekansları.....	89
Şekil 85.	San Fernando depremi etkisiyle baraj kret noktasında (C noktası) oluşan ortalama maksimum yatay yerdeğiştirmelerin yığışımlı olasılık dağılım fonksiyonu	90
Şekil 86.	Erzincan depremi etkisiyle baraj kret noktasında (C noktası) oluşan ortalama maksimum yatay yerdeğiştirmelerin yığışımlı olasılık dağılım fonksiyonu	91
Şekil 87.	Kocaeli depremi etkisiyle baraj kret noktasında (C noktası) oluşan ortalama maksimum yatay yerdeğiştirmelerin yığışımlı olasılık dağılım fonksiyonu	91
Şekil 88.	San Fernando depremi etkisiyle baraj memba yüzeyinde oluşan ortalama maksimum yatay gerilmeler	94
Şekil 89.	Erzincan depremi etkisiyle baraj memba yüzeyinde oluşan ortalama maksimum yatay gerilmeler	94
Şekil 90.	Kocaeli depremi etkisiyle baraj memba yüzeyinde oluşan ortalama maksimum yatay gerilmeler	95
Şekil 91.	San Fernando depremi etkisiyle baraj memba yüzeyinde oluşan ortalama maksimum düşey gerilmeler.....	95
Şekil 92.	Erzincan depremi etkisiyle baraj memba yüzeyinde oluşan ortalama maksimum düşey gerilmeler.....	96
Şekil 93.	Kocaeli depremi etkisiyle baraj memba yüzeyinde oluşan ortalama maksimum düşey gerilmeler.....	96
Şekil 94.	San Fernando depremi etkisiyle baraj memba yüzeyinde oluşan ortalama maksimum kayma gerilmeleri	97
Şekil 95.	Erzincan depremi etkisiyle baraj memba yüzeyinde oluşan ortalama maksimum kayma gerilmeleri	97
Şekil 96.	Kocaeli depremi etkisiyle baraj memba yüzeyinde oluşan ortalama maksimum kayma gerilmeleri	98
Şekil 97.	San Fernando depremi etkisiyle barajın I-I kesitinde oluşan ortalama maksimum yatay gerilmeler	98
Şekil 98.	Erzincan depremi etkisiyle barajın I-I kesitinde oluşan ortalama maksimum yatay gerilmeler	99
Şekil 99.	Kocaeli depremi etkisiyle barajın I-I kesitinde oluşan ortalama maksimum yatay gerilmeler	99

Şekil 100.	San Fernando depremi etkisiyle barajın I-I kesitinde oluşan ortalama maksimum düşey gerilmeler.....	100
Şekil 101.	Erzincan depremi etkisiyle barajın I-I kesitinde oluşan ortalama maksimum düşey gerilmeler.....	100
Şekil 102.	Kocaeli depremi etkisiyle barajın I-I kesitinde oluşan ortalama maksimum düşey gerilmeler.....	101
Şekil 103.	San Fernando depremi etkisiyle barajın I-I kesitinde oluşan ortalama maksimum kayma gerilmeleri	101
Şekil 104.	Erzincan depremi etkisiyle barajın I-I kesitinde oluşan ortalama maksimum kayma gerilmeleri	102
Şekil 105.	Kocaeli depremi etkisiyle barajın I-I kesitinde oluşan ortalama maksimum kayma gerilmeleri	102
Şekil 106.	San Fernando depremi etkisiyle barajın II-II kesitinde oluşan ortalama maksimum yatay gerilmeler	103
Şekil 107.	Erzincan depremi etkisiyle barajın II-II kesitinde oluşan ortalama maksimum yatay gerilmeler	103
Şekil 108.	Kocaeli depremi etkisiyle barajın II-II kesitinde oluşan ortalama maksimum yatay gerilmeler	104
Şekil 109.	San Fernando depremi etkisiyle barajın II-II kesitinde oluşan ortalama maksimum düşey gerilmeler.....	104
Şekil 110.	Erzincan depremi etkisiyle barajın II-II kesitinde oluşan ortalama maksimum düşey gerilmeler.....	105
Şekil 111.	Kocaeli depremi etkisiyle barajın II-II kesitinde oluşan ortalama maksimum düşey gerilmeler.....	105
Şekil 112.	San Fernando depremi etkisiyle barajın II-II kesitinde oluşan ortalama maksimum kayma gerilmeleri	106
Şekil 113.	Erzincan depremi etkisiyle barajın II-II kesitinde oluşan ortalama maksimum kayma gerilmeleri	106
Şekil 114.	Kocaeli depremi etkisiyle barajın II-II kesitinde oluşan ortalama maksimum kayma gerilmeleri	107
Şekil 115.	San Fernando depremi etkisiyle baraj memba yüzeyinde elde edilen ortalama maksimum hidrodinamik basınç değişimi.....	107
Şekil 116.	Erzincan depremi etkisiyle baraj memba yüzeyinde elde edilen ortalama maksimum hidrodinamik basınç değişimi.....	108

Şekil 117.	Kocaeli depremi etkisiyle baraj memba yüzeyinde elde edilen ortalama maksimum hidrodinamik basınç değişimi.....	108
Şekil 118.	Yatay ve düşey yer hareketi için baraj memba yüzeyinde oluşan ortalama maksimum yatay yerdeğiştirmeler.....	110
Şekil 119.	Yatay ve düşey yer hareketi için baraj memba yüzeyinde oluşan ortalama maksimum yatay yerdeğiştirmelerin oluşma frekansları.....	110
Şekil 120.	Yatay ve düşey yer hareketi için baraj kret noktasında (C noktası) oluşan ortalama maksimum yatay yerdeğiştirmelerin yığışımlı olasılık dağılım fonksiyonları.....	111
Şekil 121.	Yatay ve düşey yer hareketi için baraj memba yüzeyinde oluşan ortalama maksimum yatay gerilmeler	113
Şekil 122.	Yatay ve düşey yer hareketi için baraj memba yüzeyinde oluşan ortalama maksimum düşey gerilmeler.....	113
Şekil 123.	Yatay ve düşey hareket için baraj memba yüzeyindeki oluşan ortalama maksimum kayma gerilmeleri	114
Şekil 124.	Yatay ve düşey yer hareketi için barajın I-I kesitinde oluşan ortalama maksimum yatay gerilmeler	114
Şekil 125.	Yatay ve düşey yer hareketi için barajın I-I kesitinde oluşan ortalama maksimum düşey gerilmeler.....	115
Şekil 126.	Yatay ve düşey yer hareketi için barajın I-I kesitinde oluşan ortalama maksimum kayma gerilmeleri	115
Şekil 127.	Yatay ve düşey yer hareketi için barajın II-II kesitinde oluşan ortalama maksimum yatay gerilmeler	116
Şekil 128.	Yatay ve düşey yer hareketi için barajın II-II kesitinde oluşan ortalama maksimum düşey gerilmeler.....	116
Şekil 129.	Yatay ve düşey yer hareketi için barajın II-II kesitinde oluşan ortalama maksimum kayma gerilmeleri	117
Şekil 130.	Yatay ve düşey yer hareketi için baraj memba yüzeyinde elde edilen ortalama maksimum hidrodinamik basınç değişimi.....	117
Şekil 131.	Baraj-zemin-rezervuar etkileşim sisteminde baraj memba yüzeyinde oluşan yatay yerdeğiştirmeler.....	121
Şekil 132.	Baraj-zemin-rezervuar etkileşim sisteminde baraj memba yüzeyinde oluşan ortalama maksimum yatay yerdeğiştirmelerin oluşma frekansları.....	121

Şekil 133.	Baraj-zemin-rezervuar etkileşim sistemi baraj kret noktasında (C noktası) oluşan ortalama maksimum yatay yerdeğiştirmenin yığışlımlı olasılık dağılım fonksiyonu	122
Şekil 134.	Baraj-zemin-rezervuar etkileşim sisteminde baraj memba yüzeyinde oluşan yatay gerilmeler.....	125
Şekil 135.	Baraj-zemin-rezervuar etkileşim sisteminde baraj memba yüzeyinde oluşan düşey gerilmeler.....	125
Şekil 136.	Baraj-zemin-rezervuar etkileşim sisteminde baraj memba yüzeyinde oluşan kayma gerilmeleri.....	126
Şekil 137.	Baraj-zemin-rezervuar etkileşim sisteminde baraj memba yüzeyinde oluşan ortalama maksimum yatay gerilmelerin oluşma frekansları	126
Şekil 138.	Baraj-zemin-rezervuar etkileşim sisteminde baraj memba yüzeyinde oluşan ortalama maksimum düşey gerilmelerin oluşma frekansları	127
Şekil 139.	Baraj-zemin-rezervuar etkileşim sisteminde baraj memba yüzeyinde oluşan ortalama maksimum kayma gerilmelerinin oluşma frekansları	127
Şekil 140.	Baraj-zemin-rezervuar etkileşim sistemi I-I kesitinde oluşan yatay gerilmeler.....	128
Şekil 141.	Baraj-zemin-rezervuar etkileşim sistemi I-I kesitinde oluşan düşey gerilmeler.....	128
Şekil 142.	Baraj-zemin-rezervuar etkileşim sistemi I-I kesitinde oluşan kayma gerilmeleri.....	129
Şekil 143.	Baraj-zemin-rezervuar etkileşim sistemi I-I kesitinde oluşan ortalama maksimum yatay gerilmelerin oluşma frekansları.....	129
Şekil 144.	Baraj-zemin-rezervuar etkileşim sistemi I-I kesitinde oluşan ortalama maksimum düşey gerilmelerin oluşma frekansları.....	130
Şekil 145.	Baraj-zemin-rezervuar etkileşim sistemi I-I kesitinde oluşan ortalama maksimum kayma gerilmelerinin oluşma frekansları	130
Şekil 146.	Baraj-zemin-rezervuar etkileşim sistemi II-II kesitinde oluşan yatay gerilmeler.....	131
Şekil 147.	Baraj-zemin-rezervuar etkileşim sistemi II-II kesitinde oluşan düşey gerilmeler.....	131
Şekil 148.	Baraj-zemin-rezervuar etkileşim sistemi II-II kesitinde oluşan kayma gerilmeleri.....	132
Şekil 149.	Baraj-zemin-rezervuar etkileşim sistemi II-II kesitinde oluşan ortalama maksimum yatay gerilmelerin oluşma frekansları.....	132

Şekil 150.	Baraj-zemin-rezervuar etkileşim sistemi II-II kesitinde oluşan ortalama maksimum düşey gerilmelerin oluşma frekansları.....	133
Şekil 151.	Baraj-zemin-rezervuar etkileşim sistemi II-II kesitinde oluşan ortalama maksimum kayma gerilmelerinin oluşma frekansları	133
Şekil 152.	Baraj-zemin-rezervuar etkileşim sisteminde baraj memba topuğunda (A Gauss noktası) oluşan ortalama maksimum yatay gerilmenin yığışimli olasılık dağılım fonksiyonu	134
Şekil 153.	Baraj-zemin-rezervuar etkileşim sisteminde baraj memba topuğunda (A Gauss noktası) oluşan ortalama maksimum düşey gerilmenin yığışimli olasılık dağılım fonksiyonu	135
Şekil 154.	Baraj-zemin-rezervuar etkileşim sisteminde baraj memba topuğunda (A Gauss noktası) oluşan ortalama maksimum kayma gerilmesinin yığışimli olasılık dağılım fonksiyonu	135
Şekil 155.	Baraj-zemin-rezervuar etkileşim sisteminde baraj memba yüzeyinde elde edilen hidrodinamik basınç değişimi.....	137
Şekil 156.	Baraj-zemin-rezervuar etkileşim sisteminde baraj memba yüzeyinde elde edilen ortalama maksimum hidrodinamik basınçların oluşma frekansları	137
Şekil 157.	İndirgenmiş kaya taban veri modeli (Model III)	139
Şekil 158.	1971 San Fernando depremi Pacoima Barajı indirgenmiş ivme kaydı	139
Şekil 159.	Farklı deprem mekanizmaları için baraj memba yüzeyinde oluşan ortalama maksimum yatay yerdeğiştirmeler.....	141
Şekil 160.	Farklı deprem mekanizmaları için baraj memba yüzeyinde oluşan ortalama maksimum yatay yerdeğiştirmelerin oluşma frekansları.....	141
Şekil 161.	Farklı deprem mekanizmaları için baraj kret noktasında (C noktası) oluşan ortalama maksimum yatay yerdeğiştirmelerin yığışimli olasılık dağılım fonksiyonları.....	142
Şekil 162.	Farklı deprem mekanizmaları için baraj memba yüzeyinde oluşan ortalama maksimum yatay gerilmeler	144
Şekil 163.	Farklı deprem mekanizmaları için baraj memba yüzeyinde oluşan ortalama maksimum düşey gerilmeler.....	144
Şekil 164.	Farklı deprem mekanizmaları için baraj memba yüzeyinde oluşan ortalama maksimum kayma gerilmeleri	145
Şekil 165.	Farklı deprem mekanizmaları için barajın I-I kesitinde oluşan ortalama maksimum yatay gerilmeler	145

Şekil 166.	Farklı deprem mekanizmaları için barajın I-I kesitinde oluşan ortalama maksimum düşey gerilmeler.....	146
Şekil 167.	Farklı deprem mekanizmaları için barajın I-I kesitinde oluşan ortalama maksimum kayma gerilmeleri	146
Şekil 168.	Farklı deprem mekanizmaları için barajın II-II kesitinde oluşan ortalama maksimum yatay gerilmeler	147
Şekil 169.	Farklı deprem mekanizmaları için barajın II-II kesitinde oluşan ortalama maksimum düşey gerilmeler.....	147
Şekil 170.	Farklı deprem mekanizmaları için barajın II-II kesitinde oluşan ortalama maksimum kayma gerilmeleri	148
Şekil 171.	Farklı deprem mekanizmaları için baraj memba yüzeyinde elde edilen ortalama maksimum hidrodinamik basınç değişimi.....	148
Şekil 172.	Farklı zemin elastisite modülleri için baraj memba yüzeyi boyunca oluşan ortalama maksimum yatay yerdeğiştirmeler	150
Şekil 173.	Farklı zemin elastisite modülleri için baraj-zemin-rezervuar etkileşim sistemi baraj memba yüzeyinde oluşan ortalama maksimum yatay yerdeğiştirmelerin oluşma frekansları	150
Şekil 174.	Farklı zemin elastisite modülleri için baraj kret noktasında (C noktası) oluşan ortalama maksimum yatay yerdeğiştirmelerin yığışımlı olasılık dağılım fonksiyonları.....	152
Şekil 175.	Farklı zemin elastisite modülleri için baraj memba yüzeyinde oluşan ortalama maksimum yatay gerilmeler	154
Şekil 176.	Farklı zemin elastisite modülleri için baraj memba yüzeyinde oluşan ortalama maksimum düşey gerilmeler.....	154
Şekil 177.	Farklı zemin elastisite modülleri için baraj memba yüzeyinde oluşan ortalama maksimum kayma gerilmeleri	155
Şekil 178.	Farklı zemin elastisite modülleri için barajın I-I kesitinde oluşan ortalama maksimum yatay gerilmeler	155
Şekil 179.	Farklı zemin elastisite modülleri için barajın I-I kesitinde oluşan ortalama maksimum düşey gerilmeler.....	156
Şekil 180.	Farklı zemin elastisite modülleri için barajın I-I kesitinde oluşan ortalama maksimum kayma gerilmeleri	156
Şekil 181.	Farklı zemin elastisite modülleri için barajın II-II kesitinde oluşan ortalama maksimum yatay gerilmeler	157

Şekil 182.	Farklı zemin elastisite modülleri için barajın II-II kesitinde oluşan ortalama maksimum düşey gerilmeler.....	157
Şekil 183.	Farklı zemin elastisite modülleri için barajın II-II kesitinde oluşan ortalama maksimum kayma gerilmeleri	158
Şekil 184.	Farklı zemin elastisite modülleri için baraj memba yüzeyinde elde edilen ortalama maksimum hidrodinamik basınç değişimi.....	159

TABLolar DİZİNİ

Sayfa No

Tablo 1.	4 düğüm noktalı ve 9 düğüm noktalı eleman tipleri için normal ve indirgenmiş integrasyon dereceleri (Bathe, 1996).....	14
Tablo 2.	Rijit sıvı tankının modal analizlerinden elde edilen frekanslar	26
Tablo 3.	Sıvı-yapı etkileşim sisteminin dinamik analizlerinden elde edilen frekanslar	28
Tablo 4.	Ortalama maksimum ve mutlak maksimum yatay yerdeğıştirmeler	29
Tablo 5.	A ve B Gauss noktalarındaki ortalama maksimum ve mutlak maksimum yatay gerilmeler	30
Tablo 6.	A ve B Gauss noktalarındaki ortalama maksimum ve mutlak maksimum düşey gerilmeler	33
Tablo 7.	A ve B Gauss noktalarındaki ortalama maksimum ve mutlak maksimum kayma gerilmeleri	35
Tablo 8.	Baraj-rezervuar etkileşim sisteminin ilk 20 frekansı	43
Tablo 9.	Baraj-rezervuar etkileşim sisteminde baraj memba topuğunda (A Gauss noktası) oluşan gerilmeler	47
Tablo 10.	Baraj-rezervuar etkileşim sisteminin ara yüzeyine yakın sıvı elemanın memba topuğunda (B Gauss noktası) oluşan hidrodinamik basınçlar	60
Tablo 11.	Hacimsel elastisite modülünün farklı değerleri için baraj memba topuğunda (A Gauss noktası) oluşan gerilmeler.....	65
Tablo 12.	Farklı rezervuar uzunlukları için baraj memba topuğunda (A Gauss noktası) oluşan ortalama maksimum gerilmeler.....	76
Tablo 13.	Farklı deprem kayıtları için baraj memba topuğunda (A Gauss noktası) oluşan ortalama maksimum gerilmeler.....	92
Tablo 14.	Yatay ve düşey hareket için barajın kret noktasında oluşan (C noktası) ortalama maksimum yatay yerdeğıştirmeler.....	109
Tablo 15.	Yatay ve düşey hareket için barajın memba topuğunda oluşan (A Gauss noktası) ortalama maksimum gerilmeler	112

Tablo 16. Baraj-zemin-rezervuar etkileşim sisteminin ilk 30 frekansı.....	119
Tablo 17. Baraj-zemin-rezervuar etkileşim sistemi baraj memba topuğunda oluşan (A Gauss noktası) gerilmeler.....	123
Tablo 18. Baraj-zemin-rezervuar etkileşim sisteminin ara yüzeyine yakın sıvı elemanın memba topuğunda (B Gauss noktası) oluşan hidrodinamik basınçlar.....	136
Tablo 19. Farklı zemin elastisite modülleri için baraj kret noktasında oluşan ortalama maksimum yatay yerdeğiştirmeler.....	149
Tablo 20. Farklı zemin elastisite modülleri için baraj memba topuğunda (A Gauss noktası) oluşan ortalama maksimum gerilmeler.....	153
Tablo 21. Farklı zemin elastisite modülleri için baraj memba topuğunda (A Gauss noktası) oluşan ortalama maksimum hidrodinamik basınçlar	158

SEMBOLLER DİZİNİ

g	Yerçekimi ivmesi
n	Serbestlik derecesi
P	Basınç
p	Yer hareket ivmesinin maksimum büyüklük faktörü
q	Sıfır seviyesinin ortalama geçiş sayısının fonksiyonu olan maksimum büyüklük faktörü
Re	Gerçel kısım
T	Sıvı sisteminin kinetik enerjisi
t	Zaman
w	Sıvının düzleme dik doğrultudaki dönmesi
x	Rastgele değişken
$[C_f]$	Sıvı sistemin elastisite matrisi
$\{e\}$	Sıvı sistemin şekil değiştirme vektörü
$F_{R\tau(r)}$	Yığılımlı olasılık dağılım fonksiyonu
f_0	Oluşma frekansı
$\{F_f\}$	Zamana bağlı düğüm noktası yük vektörü
$H_{ir}(\omega)$	r. mod için frekans davranış fonksiyonu
$H_{js}(\omega)$	s. mod için frekans davranış fonksiyonu
$[K_f]$	Sıvı sistemin rijitlik matrisi
$[K_f^*]$	Serbest yüzey rijitliklerini içeren sıvı sistemi rijitlik matrisi
$[M_f]$	Sıvı sistemin kütle matrisi
$p(x)$	Olasılık yoğunluk fonksiyonu
P_w	Gerilme parametresi
Q_i	i. genelleştirilmiş kuvvet
q_i	i. genelleştirilmiş koordinat
$R_{ij}(\tau)$	Karşıt korelasyon fonksiyonu
$R_{rs}(t_1 - t_2)$	Modal karşıt korelasyon fonksiyonu

$S_{ij}(\omega)$	i ve j noktalarındaki yerdeğişirmelere ait karşıt spektral yoğunluk fonksiyonu
$S_{in}(\omega)$	Yer ivmesinin güç spektral yoğunluk fonksiyonu
$[S_f]$	Eleman serbest yüzey rijitlik matrisi
U_{fy}	y eksenini doğrultusundaki yerdeğiştirme
U_{fs}	Sıvı serbest yüzeyi düşey yerdeğiştirmesi
U_{fz}	z eksenini doğrultusundaki yerdeğiştirme
$U_j(t)$	j düğüm noktasındaki yerdeğiştirme
$\{U_f\}$	Sıvı sistemin düğüm noktası yerdeğiştirme vektörü
\dot{U}_{fy}	y eksenini doğrultusundaki hız bileşeni
\dot{U}_{fz}	z eksenini doğrultusundaki hız bileşeni
$\{\dot{U}_f\}$	Sıvı sistemin düğüm noktası hız vektörü
$\{\ddot{U}_f\}$	Sıvı sistemin düğüm noktası ivme vektörü
$\ddot{U}_g(t)$	Yer ivmesi
α	Kısıtlama parametresi
β	Sıvının hacimsel elastisite modülü
δ	Tepkinin güç spektral yoğunluk fonksiyonunun dağılımını ölçen parametre
$\{\delta\}$	Deprem doğrultu vektörü
ε_v	Hacimsel şekil değiştirme
$\lambda_{m,ij}$	Spektral momentler
$\lambda_{m,rr}$	Etkiye bağlı olarak ξ_r sönüm oranlı ve ω_r frekanslı tek serbestlik dereceli sistemin tepkisine ait spektral moment
$\lambda_{m,rs}$	r ve s modlarına ait normal koordinatların karşıt spektral momenti
λ_0	Sıfırıncı spektral moment
λ_1	Birinci spektral moment
λ_2	İkinci spektral moment
μ	Ortalama maksimum değer
ν	Geçiş sayısı
ν_e	Sıfır seviyesinin indirgenmiş ortalama geçiş sayısı
Π_e	Toplam şekil değiştirme enerjisi

Π_s	Yüzey potansiyel enerjisi
Π_t	Sıvının toplam potansiyel enerjisi
ρ	Sıvının kütle yoğunluğu
$\rho_{m,rs}$	Spektral momentlerle ilgili karşıt korelasyon katsayıları
σ	Ortalama maksimum değerin standart sapması
$\{\sigma\}$	Sıvının gerilme vektörü
τ	Zaman artımı
ψ_{jr}	r.modun $U_j(t)$ yerdeğiştirmesine katkısı (katkı faktörü)
ω	Dairesel frekans
*	Kompleks eşlenik

1. GENEL BİLGİLER

1.1. Giriş

Barajlar, sıvı depoları, su kanalları, sıvı boruları vb. tür yapılar sıvı-yapı etkileşimine maruz yapı grubuna girmektedir. Bu tür yapılarda dinamik bir etki altında sıvı yapının, yapı da sıvının davranışını önemli derecede etkilediğinden sıvı-yapı etkileşimi analizlerde dikkate alınmalıdır. Sıvı-yapı etkileşim problemlerinin çözümünde çeşitli yaklaşımlar kullanılmaktadır. Bunlar şöyle sıralanabilir:

- a) Westergaard yaklaşımı
- b) Euler yaklaşımı
- c) Lagrange yaklaşımı

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

Euler yaklaşımında yapıda yerdeğıştirmeler, sıvıda basınçlar veya hız potansiyelleri değışkendir. Bu yaklaşımda sıvı ve yapı ortamında değışkenler farklı olduğundan sistemin çözümü için ara yüzey denklemine ihtiyaç duyulmaktadır. Sıvı-yapı etkileşim sisteminin bu yaklaşıma göre çözümü özel amaçlı bilgisayar programı gerektirmektedir (Calayır, 1994).

Lagrange yaklaşımında her iki ortamda da yerdeğıştirmeler bilinmeyen olarak seçildiğinden, eleman matrisleri simetrik olmakta ve yapı sistemlerini analiz etmek için mevcut olan eleman alt programlarından yerdeğıştirmelere dayalı sıvı elemanlarını elde etmek ve genel amaçlı yapı analizi programlarına uyarlamak kolay olmaktadır (Calayır, 1994).

Sıvı-yapı etkileşim sistemlerinin dinamik analizlerinde deterministik ve stokastik olmak üzere iki yöntem kullanılmaktadır. Bir sistemin önceden tamamen belirlenmiş yüke göre analizi deterministik analiz olarak adlandırılmaktadır. Yapı dinamiğı problemlerinin deterministik olarak ele alınışında sistemin tüm dinamik parametrelerinin, başlangıç koşullarının ve zorlayıcı etkinin tamamen bilindiğı kabul edilir. Bütün bu parametrelerin

bilinmesiyle sistemin davranışı herhangi bir belirsizliğe düşülmeden hesaplanabilir. Ancak, dinamik etkiler birçok belirsizlik içerir ve bu belirsizlikler üzerinde denetim yapma şansı yoktur. Buna rağmen bazen uygun yük seçilerek veya en büyük yük alınarak yapılan deterministik analizler, optimum çözümü vermese dahi uygun projelendirme sağlayabilirler. Bununla birlikte, etkileşim sistemlerinin dinamik davranışı incelenirken, o bölgede olması muhtemel deprem hareketlerinin belirsizlikleri göz önünde tutulmalıdır. Bu nedenle analizlerde deprem hareketinin belirsizliğinin dikkate alındığı stokastik yöntem kullanılmalıdır. Böylece yapı tepkileri istatistiksel olarak değerlendirilebilir ve ileride olabilecek hareketlerin muhtemel sonuçları hakkında belirli tahminler yapılabilir. Bu da etkileşim sistemlerinin projelendirme aşaması ve sonrasında oldukça önemli rol oynamaktadır.

1.2. Sıvı-Yapı Etkileşim Sistemleri ile İlgili Çalışmalar

1.2.1. Deterministik Dinamik Analiz ile İlgili Çalışmalar

Sıvı-yapı etkileşim problemleri, 1933 yılında Westergaard'ın (1933) katı ile hareket eden sıvının davranışının bir parabolle belirlenmesini önermesi ile başlamıştır. Westergaard'ın bu çalışmasında, barajın rijit, sonsuz uzun ve düşey memba yüzeyli olduğu; rezervuarın memba doğrultusunda sonsuza uzandığı, suyun lineer sıkışabilir olduğu ve sıvı yüzey dalgalarının oluşmadığı kabulleri yapılmaktadır. Bu yaklaşım ile baraj davranışı, rezervuarın baraj üzerinde oluşturduğu hidrodinamik basınçlar baraj memba yüzeyindeki düğüm noktalarına ek kütleler olarak eklenip birçok araştırmacı tarafından deterministik yöntemler için incelenmiştir (Priscu vd., 1985; Bayraktar, 1991; Mays ve Roehm, 1991; Singhal, 1991; Calayır vd., 1993; Akköse, 1997; Hançer, 2001).

Zangar (1952; 1953), dolgu barajlarla ilgili yaptığı çalışmalarda hidrodinamik etkilerin özellikle dik şevli barajlarda dikkate alınması gerektiğini vurgulamış, yatık şevli dolgularda önemli olmadığını ifade etmiştir.

Etkileşim sistemlerinin analizinde kullanılan ikinci yaklaşım Euler yaklaşımıdır. Euler yaklaşımında yapının davranışı yerdeğiştirmeler, sıvının davranışı ise basınçlar (hız potansiyelleri) cinsinden ifade edilmektedir. 1960'lı yılların ortalarından sonra yüksek hızlı, büyük kapasiteli bilgisayarların ve buna paralel olarak sonlu elemanlar yöntemi gibi

etkin sayısal yöntemlerin gelişmesiyle, Euler yaklaşımına dayalı birçok çalışma gerçekleştirilmiştir.

Chopra ve grubunun baraj-rezervuar etkileşimi ile ilgili Euler yaklaşımını kullanarak deterministik yöntemlere dayalı birçok çalışması mevcuttur (Chopra, 1967; Chopra, 1970; Chakrabarti ve Chopra, 1973; Hall ve Chopra, 1980; Chopra vd., 1980; Chopra ve Chakrabarti, 1981; Hall ve Chopra, 1982; Hall ve Chopra, 1983; Fenves ve Chopra, 1984). Chopra'nın 1967 yılındaki çalışması (Chopra, 1967), bu grubun çalışmalarına temel oluşturmaktadır. İlgili çalışmalarda, baraj-rezervuar etkileşim sistemi tüm sistemin iki alt sistemi olarak ele alınmaktadır. Baraj alt sistemi, rijit temele oturan sonlu eleman sistemi ile tanımlanırken, rezervuar alt sistemi sabit derinlikli ve sonsuza uzanan sürekli bir ortam olarak temsil edilmektedir. Rezervuardaki suyun hidrodinamik etkileri, barajın hareket denklemlerinde frekansa bağımlı terimler olarak gözükmektedir. Elde edilen bu çalışmalar doğrultusunda rezervuarın varlığının baraj davranışını büyük oranda değiştirdiğini göstermişlerdir.

Dibaj ve Penzien (1967), çalışmalarında yatay olarak yayılan deprem hareketi etkisindeki bir barajın iki boyutlu sonlu elemanlarla dinamik analizini gerçekleştirmişlerdir. Çalışmanın sonucunda yer hareketinin zamanla değişiminin özellikle düşük hızlarda dikkate alınmasının gerekliliğini vurgulamışlardır. Değişerek yayılımın taban genişliğinin hıza oranının 0.1 saniyeden düşük olduğu durumlarda ihmal edilebileceğini ifade etmişlerdir.

Altınışık ve Severn (1980) ile Altınışık (1981), asinkronize yer hareketi etkisinin barajların dinamik analizinde dikkate alınması gerektiğini ortaya koymuşlardır. Bu çalışmalarda, toplam davranışın belirlenebilmesi için mesnet noktalarının birbirlerine göre rölatif hareketlerinden oluşan yarı-statik yerdeğiştirme ve gerilmelerin hesaba katılması gerekliliği vurgulanmıştır.

Dumanoğlu ve Severn (1984) ile Dumanoğlu vd. (1984) değişik hızlarla yayılan asinkronize yer hareketine maruz asma köprülerin; toprak, beton ağırlık ve kemer barajların dinamik davranışını incelemişlerdir. Deprem dalgası yayılma hızının azalmasıyla yapıda oluşan yerdeğiştirme ve gerilmelerde genel olarak bir artışın olduğu gözlenmiştir. Yapının tabanına etkiyen yer hareketinin değişik hızlarda yayılmasının analizlerde ele alınması vurgulanmıştır.

Lotfi vd. (1987), baraj-rezervuar-zemin etkileşim sistemlerinin depreme karşı iki boyutlu dinamik analizi için bir teknik geliştirmişlerdir. Sonlu elemanlar yönteminin

uygulandığı bu çalışmada sıvı-yapı etkileşiminin dikkate alınmasının gerekliliği üzerinde durulmuştur.

Grevees ve Dumanoglu (1989), baraj-rezervuar sisteminin yatay yer hareketi etkisindeki dinamik davranışını Euler yaklaşımını kullanarak incelemişlerdir. Söz konusu çalışmada, baraj ortamı iki boyutlu katı, rezervuar ortamı iki boyutlu sıvı olarak modellenmiş olup, ara yüzeyde bir boyutlu sonlu eleman kullanılmıştır.

Bougacha ve Tassoulas (1991a; 1991b), beton ağırlık barajların dinamik analizinde rezervuar tabanındaki sürüntü malzemesini göz önünde bulunduran sonlu eleman tekniği geliştirmişlerdir. Sürüntü malzemesi iki fazlı ortam olarak modellenmiştir. Sonuçlarda, tamamıyla doymuş sürüntü malzemesinin barajda oluşan maksimum ivmeyi ve hidrodinamik kuvveti önemli derecede azalttığı gözlenmiştir.

Chavez ve Fenves (1995), beton ağırlık barajların depreme karşı davranışını, baraj tabanı ve zemin yüzeyi arasındaki kaymayı dikkate alarak incelemişlerdir. Bu incelemeler neticesinde, tabandaki kaymanın hafif bir deprem sonucunda oluşabileceği, kayma yerdeğiştirmesinin de orta derecede bir değer alacağı kanısına varılmıştır.

Baraj-temel-rezervuar sistemlerinin analizinde kullanılan üçüncü yaklaşım, hem sıvı hem de yapıda yerdeğiştirmelerin değişken olarak kullanıldığı Lagrange yaklaşımıdır. Bu yaklaşımda, özel ara yüzey denklemlerine ihtiyaç olmamakta, sıvı-yapı ara yüzeyindeki düğüm noktalarında uygunluk ve denge denklemleri otomatik olarak sağlanmaktadır. Lagrange yaklaşımına dayalı çözümlerde sıfır enerji modları gibi bazı sayısal problemler ortaya çıkabildiğinden bu yaklaşım Euler yaklaşımı kadar yaygın olarak kullanılmamıştır. Lagrange yaklaşımına dayalı sıvı sonlu elemanların gelişimi birçok araştırmacının sıvıyı sıfır kayma modüllü bir katı olarak dikkate almasıyla başlamıştır (Hamdi vd., 1978; Zienkiewicz ve Bettess; 1978; Akkaş vd., 1979; Bathe ve Hahn, 1979; Wilson ve Khalvati, 1983).

Zienkiewicz ve Bettess (1978), kayma modülünün sıfır alınmasının tekil bir elastisite matrisi vereceğini, bunun da sıfır-enerji modlarının oluşmasına neden olabileceğini vurgulamaktadırlar. Bunun için yazarlar çalışmalarında, kayma modülünün küçük değerde alınmasını önermektedirler.

Hamdi vd. (1978), kayma modülünün küçük değerde alınmasına alternatif olarak, sıfır-enerji modlarını yok etmek için yerdeğiştirmelere rotasyon kısıtlaması getirmişlerdir.

Akkaş vd. (1979), kayma modülü sıfır olan sonlu elemanlar kullanarak yaptıkları modal analizde çok sayıda sıfır-enerji modu elde etmişlerdir.

Sıvı ve sıvı-yapı etkileşim sistemlerinin Lagrange yaklaşımına dayalı çözümlerinde farklı tip sıvı elemanların kullanıldığı yapılan literatür araştırmasından görülmektedir. Wilson ve Khalvati (1983), yerdeğiştirmelere getirilen rotasyonsuzluk kısıtlamasıyla birlikte, eleman matrislerinin hesaplanmasında indirgenmiş integrasyon mertebelerini kullanarak gereksiz sıfır enerji modlarını yok etmişlerdir. Sıvı serbest yüzey salınım hareketini içeren çalışmalarında, sıvı sonlu elemanların stabiliteilerinin sağlandığı teorik olarak gösterilmektedir. Wilson ve Khalvati'nin (1983) Lagrange yaklaşımına dayalı sıvı elemanların sıfır enerji modları gibi sayısal problemlerini ortadan kaldıran çalışmasından sonra söz konusu yaklaşım kullanılarak baraj-rezervuar problemleri için çalışmalar yapılmıştır.

Greeves (1991), beton barajların lineer ve lineer olmayan deprem analizlerini Lagrange yaklaşımına dayalı olarak incelemiştir.

Calayır (1994), üniform yer hareketini dikkate alarak baraj-rezervuar-temel sisteminin dinamik davranışını incelemiştir. Rezervuar ve temelin dikkate alınmasıyla barajın davranışının önemli derecede etkilendiği görülmüştür.

Bayraktar (1995), asinkronize yatay ve düşey yer hareketi için baraj-temel-rezervuar sistemlerinin Lagrange yaklaşımına dayalı deprem analizlerini gerçekleştirmiştir. Asinkronize yer hareketinin özellikle baraj tabanına yakın kısımlarda baraj davranışını düzgün yer hareketine göre önemli derecede arttırdığı gözlenmiştir.

Calayır vd. (1996), beton ağırlık barajların iki boyutlu deprem analizini Euler ve Lagrange yaklaşımını kullanarak gerçekleştirmişlerdir. Lagrange yaklaşımına dayalı çözümlerde sıvı hacimsel elastisite modülünün artırılmasıyla elde edilen sonuçların sıkışamaz Euler çözümlerine yaklaştığı görülmüştür.

Bayraktar vd. (1996), asinkronize yatay yer hareketi için beton ağırlık barajların dinamik analizini yapmışlardır. Söz konusu çalışmada, baraj-temel-rezervuar sistemi Lagrange yaklaşımına dayalı sonlu elemanlar kullanılarak modellenmiştir.

Aviles ve Li (1998) çalışmalarında, suyun sıkışabilirlik etkisi ve viskozitesini dikkate alarak rijit barajların düşey olmayan memba yüzündeki hidrodinamik basınçlar için analitik-numerik çözüm geliştirmiştir.

Hamdan'ın (1999) çalışmasında Lagrange kinematik tanımına bağlı olarak sıvı sonlu eleman formülasyonu ve teorisi tanıtılmaktadır. Bu formülasyonlar, sıvı-yapı etkileşim analizleri için iki boyutlu ve üç boyutlu sıvı elemanların geliştirilmesinde kullanılmaktadır.

Öngörülen formülasyon yapı analizi yapan bilgisayar programı ASAS-NL' ye uyarlanmış ve çeşitli dalga hızları için değerlendirilmiştir.

Ahmadi vd. (2001) çalışmalarında, baraj-rezervuar etkileşim sisteminin sonlu eleman analizi için lineer olmayan eleman modeli tanıtmışlardır. Analizlerde akustik dalgaların kısmi taban absorpsiyonu ve suyun sıkışabilirliği dikkate alınmıştır. Deprem bölgelerindeki kemer barajların güvenliği için bu modelin kullanılabilir olduğu vurgulanmaktadır.

Bayraktar vd. (2002), çalışmalarında sonlu eleman yöntemini kullanarak beton ağırlık barajların asinkronize ve stokastik dinamik analizlerini gerçekleştirerek karşılaştırmalar yapmışlardır. Asinkronize dinamik analiz için çeşitli deprem dalgası hızları dikkate alınmıştır. Deprem dalgası hızlarının gerilme bileşenlerini önemli derecede etkilediği görülmüştür.

Coşkun'un (2007) çalışmasında, sıkışamaz, viskoz olmayan, sınırsız sıvı ortamlı baraj-rezervuar etkileşim sisteminin analizi için bir sınır koşulu tanıtılmıştır. Bu sınır koşulunun elde edilmesinde rezervuar ortamı iki bölgeye ayrılmıştır. Bunlardan biri kompleks geometrisi olan yakın alan, diğeri üniform kesitli uzak alandır. Rezervuar alanı baraj-rezervuar etkileşim sistemine yakın bir yerde seçildiğinde etkili sonuçlar elde edilmektedir.

1.2.2. Stokastik Dinamik Analiz ile İlgili Çalışmalar

Stokastik analiz konusu geniş kapsamlı olarak ilk kez Lin (1967) tarafından yayınlanan kitapla incelenmiştir. Son yıllarda ise bu konu ile ilgili Newland (1975), Elishakoff (1983), Bolotin (1984), Yang (1986), Clough ve Penzien (1993), Manolis ve Koliopoulos (2001) tarafından yayınlanan birçok kitap mevcuttur.

Novak ve Suen (1987), çalışmalarında toprak dolgu barajların rastgele titreşim analizini gerçekleştirmişlerdir. Baraj prizmatik kiriş olarak tanımlanmış, dalga yayılma etkisi ihmal edilmiştir. Analizlerde düşey yer hareketi göz önünde bulundurulmuştur. Baraj-zemin etkileşimi dikkate alınmış ve bu etkileşimin beton ağırlık barajlarda önemli olurken toprak barajlarda ihmal edilebileceği vurgulanmıştır.

Ramadan ve Novak (1993), değişerek yayılarak yer hareketini kullanarak uzun ağırlık barajların davranışını baraj-zemin-rezervuar etkileşimini dikkate alarak incelemişlerdir.

Chen ve Harichandran (1995), Santa Felicia toprak barajının değişerek yayılan yer hareketine karşı stokastik davranışını incelemişlerdir. Bu çalışmada barajın üç boyutlu sonlu eleman modeli oluşturularak lineer rastgele titreşim analizi yapılmıştır. Barajın tabanına yakın kısımlarda değişerek yayılan yer hareketi oldukça etkili olduğu görülmüştür.

Araujo ve Awruch (1998), beton ağırlık barajların stokastik analizi için bir çalışma yapmışlardır. Beton özelliklerinin ve sismik hareketin rastgele değişken alındığı bu çalışmada stasyonier olmayan stokastik yaklaşım dikkate alınmıştır. Baraj güvenliği, ana kırılma modlarına (kırılma, betonun ezilmesi, baraj-zemin ara yüzeyinde kayma) bağlı olarak Monte Carlo yöntemi ile değerlendirilmiştir.

Marinilli ve Cerrolaza (1999), bu çalışmalarında statik yükleme altında oluşan yapı davranışlarının değerlendirilmesinde stokastik yöntemi kullanmışlardır. Oturmaları hesaplarken lineer olmayan zemin modelini dikkate alan sonlu farklar programı Dynard kullanılmıştır. Stokastik yöntemin doğruluğunu göstermek için ağırlık yükleri altındaki toprak baraj örnek seçilmiştir. Elde edilen sonuçlar sınır eleman yöntemini kullanan bilgisayar programıyla karşılaştırılmıştır.

Mellah vd. (2000) çalışmasında mühendislik problemlerinde stokastik sonlu eleman yönteminin kullanılabilirliğini araştırmışlardır. Stokastik sonlu eleman analizleri, birinci dereceden ikinci moment yöntemi ve Monte Carlo simülasyonları kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Sayısal örnekleme için toprak baraj seçilmiş, yerdeğiştirme, şekildeğiştirme ve gerilmelerin değişimleri incelenmiştir.

Di Paola ve Zingales (2003), rijit bir duvar üzerinde oluşan hidrodinamik basınçları belirlemişlerdir. Bu çalışmada, deprem hareketi rastgele işlem teorisiyle modellenerek, güç spektral yoğunluk fonksiyonu ile tanımlanmıştır.

Zingales'in (2003) bu çalışmasında bir baraj-rezervuar sistemindeki stasyonier olmayan hidrodinamik basıncın belirlenmesi için stokastik sismik analiz yapılmıştır. Analizlerde rezervuar uzunluğu sonsuz, sıkışabilir sıvı ve yer hareketi beyaz gürültü olarak dikkate alınmıştır. Stasyonier ve stasyonier olmayan deprem etkileri için barajın memba yüzeyinde etkili olan hidrodinamik basınçlar karşılaştırılmıştır.

Bayraktar ve Hançer (2004), çalışmalarında Lagrange yaklaşımını kullanarak sıvı sıkışabilirliğinin sıvı-yapı etkileşim sistemlerinin üzerindeki etkisini incelemişlerdir. Analizler için iki boyutlu sıvı-yapı etkileşim sistemi dikkate alınmıştır. Lagrange yaklaşımı

kullanılarak elde edilen davranışlar Westergaard yaklaşımı kullanılarak elde edilen davranışlarla karşılaştırılmıştır.

Bayraktar ve Hançer (2005), çalışmalarında sıvı-yapı etkileşim sistemlerinin Lagrange yaklaşımına dayalı stokastik dinamik analizlerini gerçekleştirmişlerdir. Sayısal örnek olarak bir sıvı tankı ve sıvı-yapı etkileşim sistemi üzerinde inceleme yapmışlardır. Modal analiz sonuçlarını analitik ve sayısal çözümlerle; ortalama maksimum yerdeğiştirme ve hidrodinamik basınçları mutlak maksimum yerdeğiştirme ve hidrodinamik basınçlarla karşılaştırmışlardır.

Bayraktar vd. (2005), çalışmalarında farklı deprem mekanizmalarının baraj-zemin-rezervuar etkileşim sisteminin stokastik davranışı üzerindeki etkisini incelemiştir. Sıvı elemanın sonlu eleman formülasyonu dalga yayılma etkisi ve yüzey salınım hareketini içermektedir. Üç farklı deprem mekanizması kullanarak elde ettikleri stokastik dinamik davranışları birbirleriyle karşılaştırmışlardır.

Bayraktar vd. (2005), çalışmalarında beton ağırlık baraj-rezervuar etkileşim sistemlerinin deterministik ve stokastik dinamik davranışlarını Lagrange yaklaşımına dayalı iki boyutlu sıvı sonlu elemanlar kullanarak karşılaştırmışlardır. Stokastik etkinin barajda oluşan yerdeğiştirme ve gerilmeleri önemli derecede değiştirdiği gözlenmiştir.

Akköse vd. (2007), çalışmalarında kaya dolgu barajların stokastik sismik davranışını sonlu eleman yöntemiyle incelemiştir. Örnek olarak Elazığ'da inşa edilen Keban Barajı seçilmiştir. Etkileşim sisteminde rezervuar etkisi ihmal edilmiş, zemin etkisi dikkate alınmıştır. Erzincan depremi etkisindeki Keban Barajı'nın deterministik dinamik analizi de gerçekleştirilerek karşılaştırmalar yapılmıştır. Stokastik analiz sonuçları deterministik analiz sonuçlarından daha küçük çıkmıştır.

De Sortis ve Paoliani (2007), çalışmalarında İtalya'da inşa edilmiş olan payandalı ağırlık barajı dikkate alarak analizlerini gerçekleştirmişlerdir. Bu çalışmada istatistiksel yaklaşımın önemi vurgulanmıştır. Ayrıca yapısal tanımlama tekniği tanıtılmış, yapının gelecekteki davranışını belirlemede bu tekniğin faydaları üzerinde durulmuştur.

Yapılan literatür araştırmasından görüleceği üzere sıvı-yapı etkileşim sistemlerinin deterministik dinamik analizleri detaylı bir biçimde araştırılmasına rağmen, stokastik dinamik analizleri yeterince ele alınmamıştır. Bu tez çalışmasında sıvı-yapı etkileşim sistemlerinin Lagrange yaklaşımına dayalı stokastik dinamik analizleri yapılarak bilime katkı sağlanabileceği düşünülmektedir.

1.3. Çalışmanın Kapsamı

Literatür araştırmasından da görüleceği gibi deprem etkileri altında sıvı-yapı etkileşim sistemlerinin Lagrange yaklaşımına dayalı deterministik dinamik analizleri birçok araştırmacı tarafından incelenmiştir. Bu çalışmalarda deprem hareketinin tüm özelliklerinin bilindiği kabul edilmiştir. Ancak, deprem hareketi rastgele olduğundan, sıvı-yapı etkileşim sistemlerinin çözümünde dinamik yüklemenin belirsizliğini dikkate alacak stokastik yöntemin kullanılmasına ihtiyaç vardır. Bu nedenle bu çalışmada sıvı-yapı etkileşim sistemlerinin Lagrange yaklaşımına dayalı stokastik dinamik davranışının belirlenmesi ve deterministik davranış sonuçlarıyla karşılaştırılması amaçlanmıştır.

Çalışmanın birinci bölümünde sıvı-yapı etkileşim sistemleriyle ilgili yapılan çalışmalardan bahsedilmektedir. Sıvı sistemlerinin Lagrange yaklaşımına dayalı sonlu eleman formülasyonu ve sıvı-yapı sistemlerinin deterministik ve stokastik dinamik analiz formülasyonları ayrıntılı biçimde anlatılmaktadır.

İkinci bölümde, sıvı-yapı etkileşim sisteminin Lagrange yaklaşımına dayalı stokastik dinamik analizini gerçekleştirmek için geliştirilen bilgisayar programı hakkında bilgi verilmektedir. Programı test etmek amacıyla rijit sıvı tankı modellenerek modal analizi yapılmıştır. Ayrıca, sıvı-yapı etkileşim sisteminin Lagrange yaklaşımına dayalı deterministik ve stokastik analizleri yapılarak stokastik dinamik analiz sonuçlarının uygunluğu kontrol edilmiştir. Yine bu bölümde geliştirilen programın beton ağırlık barajlara uygulanması amacıyla seçilen beton ağırlık barajdan bahsedilmiş ve baraj-rezervuar, baraj-zemin-rezervuar etkileşim sistemlerinin sonlu eleman modelleri tanıtılmıştır.

Üçüncü bölümde, baraj-rezervuar ve baraj-zemin-rezervuar etkileşim sistemlerinin stokastik dinamik analizleri yapılarak yerdeğiştirme ve gerilmelerin ortalama maksimum değerleri, oluşma frekansları ve yığılımlı olasılık dağılımları irdelenmiştir. Ayrıca etkileşim sistemleri üzerinde çeşitli parametrik çalışmalar yapılarak davranışları hakkında bilgi edinilmiştir.

Dördüncü bölümde, çalışmalardan elde edilen sonuçlar ve bu sonuçlara dayanarak yapılan önerilerden bahsedilmiştir. Bu bölümü kaynaklar ve ekler kısmı izlemektedir.

1.4. Sıvı Sistemlerinin Lagrange Yaklaşımına Dayalı Sonlu Eleman Formülasyonu

Burada lineer elastik, rotasyonsuz ve viskoz olmayan sıvının küçük yerdeğişiklikler yapması durumu için temel bağıntılar Wilson ve Khalvati (1983), Calayır (1994) ve Bayraktar (1995) ve Akköse (2003) tarafından verilen formülasyona dayalı sunulacaktır. Böyle bir sıvı için basınçla hacimsel şekil değiştirme arasında,

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

bağıntısı vardır. Bu ifadede, P basıncı, β sıvının hacimsel elastisite modülünü, ε_v ise hacimsel şekil değiştirmeyi göstermektedir. İki boyutlu problemler için, ε_v aşağıdaki gibi ifade edilmektedir.

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

Bu ifadede, U_{fy} ve U_{fz} sırasıyla y eksenini ve z eksenini doğrultularındaki yerdeğişiklik bileşenleridir.

Sıvının gerilme-şekil değiştirme bağıntılarına rotasyonlar ve bu rotasyonlarla ilgili uygun kısıtlama parametreleri yerleştirilmektedir. Bu parametrelerin büyük değerlerde seçilmesiyle sıvı rotasyonsuz hale yaklaşacaktır (Wilson ve Khalvati, 1983). İki boyutlu haldeki rotasyonlar aşağıdaki bağıntı ile verilebilir.

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

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

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

bağıntısıyla hesaplanmaktadır. Burada, P_w ve α sırasıyla gerilme ve rotasyonla ilgili kısıtlama parametresini göstermektedir. (1) ve (4) denklemlerini kullanarak sıvının matris formundaki gerilme-şekil değiştirme bağıntısı aşağıdaki gibi yazılabilir:

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

veya

$$\{\sigma\} = [C_f]\{e\} \quad (6)$$

Burada $\{\sigma\}$ sıvının gerilme vektörünü göstermektedir.

Sıvı sisteminin sonlu eleman formülasyonu enerji prensiplerinden faydalanılarak elde edilmektedir. Bir sıvı sisteminin toplam şekil değiştirme enerjisi,

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

şeklinde ifade edilir. Burada $\{e\}$, $\{e\}^T = \{\varepsilon_v \ w\}$ şeklinde verilen şekil değiştirme vektörünü, $[C_f]$ elastisite matrisini göstermektedir. Sonlu elemanlar yöntemini kullanarak denklem (7) aşağıdaki gibi ifade edilebilir.

$$\Pi_e = \frac{1}{2} \{U_f\}^T [K_f] \{U_f\} \quad (8)$$

Bu bağıntıda, $[K_f]$ ve $\{U_f\}$ sırasıyla sıvı sistemin rijitlik matrisi ve düğüm noktası yerdeğiştirme vektörünü göstermektedir. Sıvı sistemlerin önemli davranışlarından biri de hacimde bir değişim olmadan yerdeğiştirme yapabilmeleridir. Rezervuar ve su depoları için bu hareket yerdeğiştirmelerin düşey olduğu yüzey dalgaları şeklindedir. Bu hareketle ilgili enerji,

$$\Pi_s = \frac{1}{2} \int \rho g U_{fs}^2 dA \quad (9)$$

bağıntısıyla verilebilir. Burada, ρ sıvının kütle yoğunluğunu, g yerçekimi ivmesini, U_{fs} ise sıvı serbest yüzeyi düşey yerdeğiştirmesini göstermektedir. Denklem (9)'daki yüzey potansiyel enerjisi sonlu elemanlar yöntemi kullanılarak sıvı yüzeyindeki düğüm noktalarının düşey yerdeğiştirmeleri cinsinden aşağıdaki formda yazılabilir:

$$\Pi_s = \frac{1}{2} \{U_{fs}\}^T [S_f] \{U_{fs}\} \quad (10)$$

Bu ifadede, $[S_f]$ serbest yüzey eleman rijitlik matrisini göstermektedir. Sıvının toplam potansiyel enerjisi (8) ve (10) bağıntılarının toplanmasıyla aşağıdaki gibi elde edilir.

$$\Pi_t = \Pi_e + \Pi_s \quad (11)$$

Bir sıvı sisteminin kinetik enerjisi,

$$T = \frac{1}{2} \int \rho (\dot{U}_{fy}^2 + \dot{U}_{fz}^2) dV \quad (12)$$

şeklinde yazılabilir. Burada, \dot{U}_{fy} ve \dot{U}_{fz} sırasıyla y eksenini ve z eksenini doğrultularındaki hız bileşenlerini göstermektedir. Sonlu eleman yöntemini kullanarak denklem (12) aşağıdaki formda yazılabilir.

$$T = \frac{1}{2} \{\dot{U}_f\}^T [M_f] \{\dot{U}_f\} \quad (13)$$

Burada, $[M_f]$ ve $\{\dot{U}_f\}$ sırasıyla sıvı sistemin kütle matrisini ve düğüm noktası hız vektörünü göstermektedir. Sıvı sisteminin hareket denklemi aşağıdaki Lagrange denklemi kullanılarak elde edilebilir (Clough ve Penzien, 1993).

$$\frac{\partial}{\partial t} \left(\frac{\partial T}{\partial \dot{q}_i} \right) - \frac{\partial T}{\partial q_i} + \frac{\partial \Pi_t}{\partial q_i} = Q_i \quad (i=1, \dots, n) \quad (14)$$

Bu ifadede q_i ve Q_i sırasıyla i . genelleştirilmiş koordinatı ve kuvveti göstermektedir. Denklem (11) ve (13), denklem (14)'de yerine yazılırsa

$$[M_f] \{\ddot{U}_f\} + [K_f] \{U_f\} + [S_f] \{U_f\} = \{F_f\} \quad (15)$$

veya

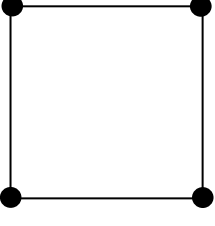
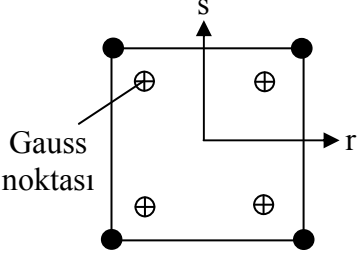
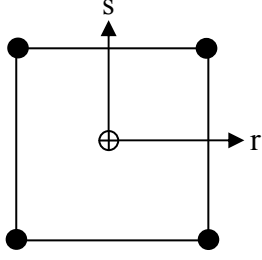
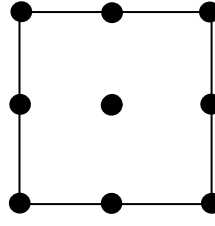
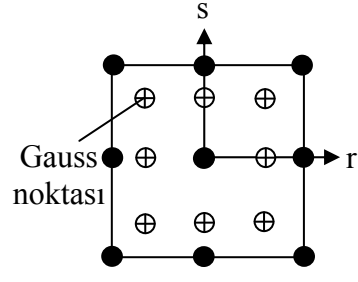
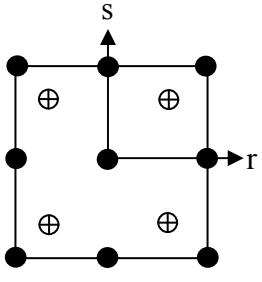
$$[M_f] \{\ddot{U}_f\} + [K_f^*] \{U_f\} = \{F_f\} \quad (16)$$

denklemleri elde edilir. Bu ifadede, $[K_f^*]$ sıvı serbest yüzey rijitliklerini de içeren sıvı sistemi rijitlik matrisini, $\{F_f\}$ zamana bağlı düğüm noktası yük vektörünü, $\{\ddot{U}_f\}$ ve $\{U_f\}$ sıvı sistemin düğüm noktası ivme ve yerdeğiştirme vektörlerini göstermektedir.

Sonlu elemanlar yöntemine göre (16) ifadesindeki sıvının kütle ve rijitlik matrislerinin elde edilmesi Ek 1'de verilmektedir.

Denklem (16)'da verilen formülasyon alan ve hacim üzerinde alınacak integralleri içermektedir. Sayısal integrasyon teknikleri kullanılarak bu integrallerin sayısal olarak elde edilmesi gerekir. Bunun için birçok sayısal integrasyon tekniği geliştirilmiştir. Bunlardan en yaygın olarak kullanılanlarından biri Gauss integrasyon tekniğidir. Bu teknikte integral, elemanın içinde Gauss noktaları adı verilen belirli noktalarda elde edilen bir ağırlıklı toplama eşdeğer alınmaktadır (Bathe, 1996). Lagrange yaklaşımına dayalı çözümlerde sıvı ortamında indirgenmiş integrasyon dereceleri kullanılmalıdır (Wilson ve Khalvati, 1983). Tablo 1'de 4 düğüm noktalı ve 9 düğüm noktalı eleman tipleri için normal ve indirgenmiş integrasyon dereceleri verilmektedir.

Tablo 1. 4 düğüm noktalı ve 9 düğüm noktalı eleman tipleri için normal ve indirgenmiş integrasyon dereceleri (Bathe, 1996).

Eleman	Normal İntegrasyon Derecesi	İndirgenmiş İntegrasyon Derecesi
 <p>4 düğüm noktalı</p>	 <p>2×2</p>	 <p>1×1</p>
 <p>9 düğüm noktalı</p>	 <p>3×3</p>	 <p>2×2</p>

1.5. Sıvı-Yapı Sistemlerinin Stokastik Dinamik Analiz Formülasyonu

1.5.1. Stokastik Dinamik Analizde Kullanılan İfadeler

Stokastik dinamik analiz rastgele dinamik yük dikkate alınarak yapılan bir analiz biçimidir. Dinamik yük önceden tamamen belirlenemeyip sadece istatistiksel olarak ifade edilebiliyorsa söz konusu dinamik yük rastgele olarak adlandırılır. Deprem hareketi, denizdeki dalga yüksekliği, roket motorlarından çıkan sesler kesin matematiksel ifadelerle açıklanamayan rastgele işlemlerdir. Rastgele işlemlerin gelecekte herhangi bir zaman dilimindeki değerlerinin tam olarak belirlenmesi mümkün değildir. Söz konusu veriler rastgeledirler; olasılık terimleri ve istatistiksel ifadelerle açıklanmalıdırlar (Bendat ve Piersol, 1971).

1.5.1.1. Rastgele Değişken

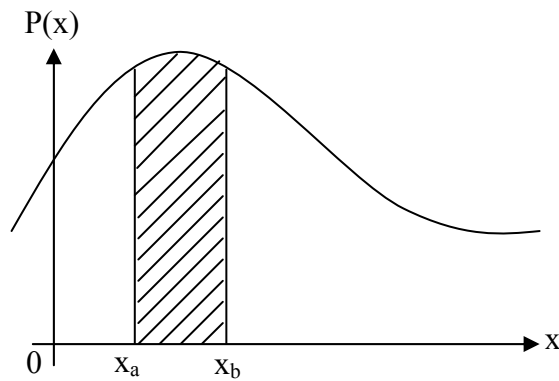
Bir değişkenin alacağı sayısal değer önceden kesin olarak belirlenemiyorsa bu değişkene rastgele değişken adı verilir. Böyle bir değişkenin belirli bir değeri alması veya aldığı değerlerin verilen bir aralıkta bulunma olasılığı belirlenebilir. Örneğin, $-\infty < x < +\infty$ aralığında değer alabilen x rastgele değişkeninin aldığı değerlerin $x_a < x < x_b$ aralığında olma olasılığı Şekil 1'den

$$P(x_a < x < x_b) = \int_{x_a}^{x_b} p(x) dx \quad (17)$$

olarak hesaplanabilir. Bu değer Şekil 1'de gösterilen taralı alana karşılık gelir ve $p(x)$, olasılık yoğunluk fonksiyonu olarak adlandırılır. Bu fonksiyon, tanımı gereği negatif değer almaz ve

$$\int_{-\infty}^{\infty} p(x) dx = 1 \quad (18)$$

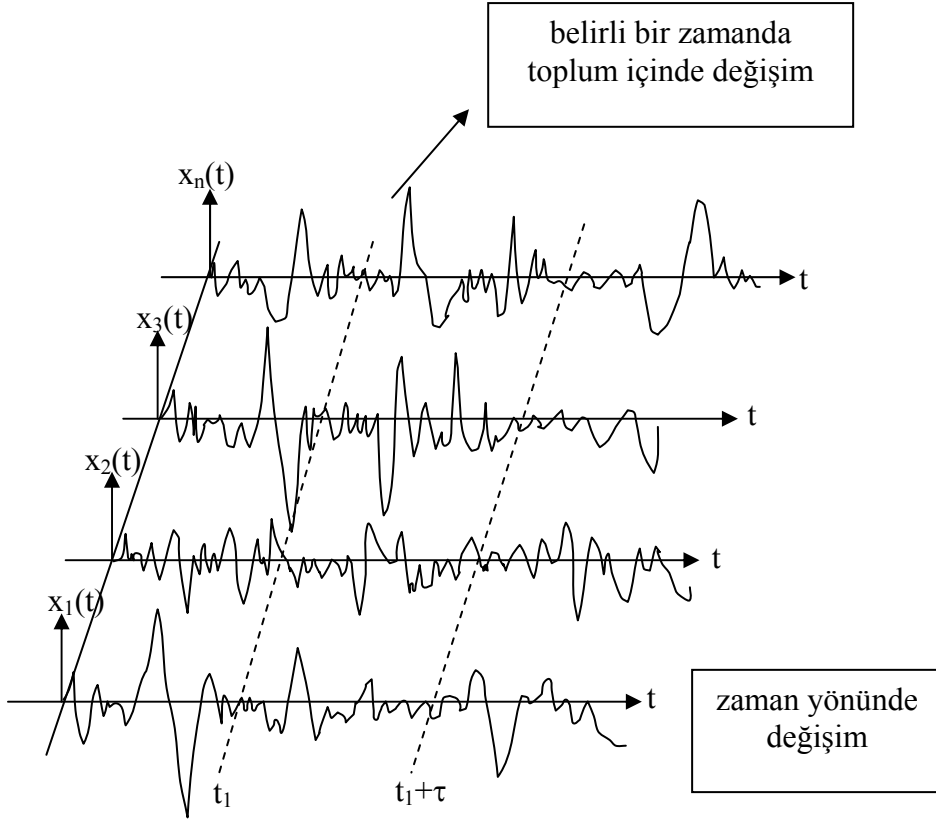
bağıntısını sağlar (Celep ve Kumbasar, 1996).



Şekil 1. Olasılık yoğunluk fonksiyonu

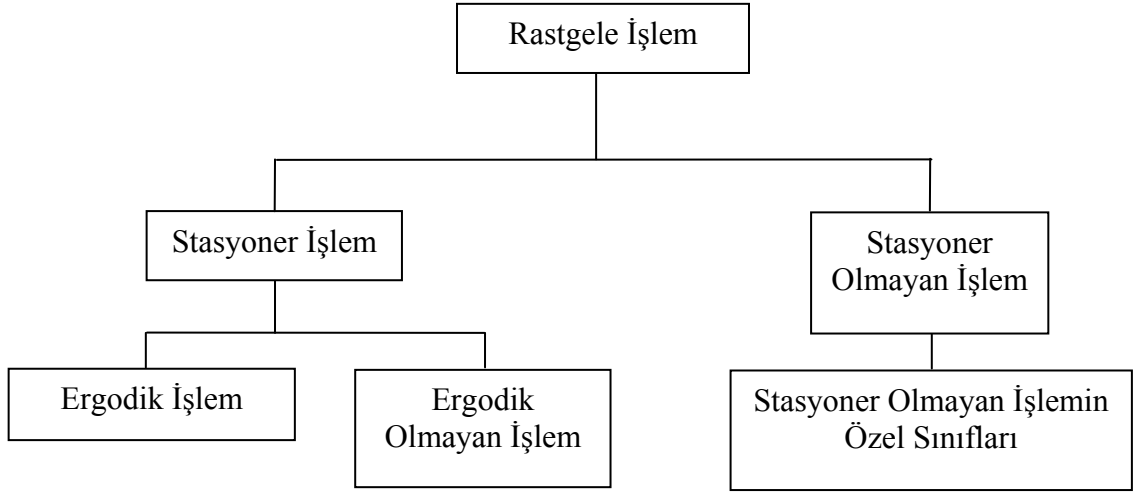
1.5.1.2. Rastgele İşlem

Bir rastgele değişkene ait kayıtların tamamı rastgele işlem olarak tanımlanır. Örneğin rastgele işlem Şekil 2'den de görüleceği gibi bir deprem hareketinin ivmesinin farklı sismograflar tarafından kaydedilmesi sonucu ortaya çıkabilir. Şekildeki kayıtlar $x_i(t)$ ($i=1,2,3,\dots,n$), bağımsız bir değişken olan zamanın fonksiyonları olup, her biri birbirinden farklıdır. Böylece, sismografta kaydedilecek ivme zaman grafiği, olabilecek sonsuz sayıdaki kayıttan sadece bir tanesi olacaktır. Rastgele bir olayı temsil eden tek bir zaman süreci, örnek fonksiyon olarak adlandırılır (Bendat ve Piersol, 1971).



Şekil 2. Rastgele işlem

Rastgele işlemler aşağıdaki gibi sınıflandırılabilir (Bendat ve Piersol, 1971):



Şekil 3. Rastgele işlemin sınıflandırılması

Stasyonerlik, istatistiksel özelliklerin zamandan bağımsız olduğunu ifade etmektedir. Mühendislikteki tüm rastgele işlemlerin bir başlangıç ve sonlarının olması nedeniyle gerçekte stasyoner olamazlar. Fakat pratik amaçlar için işlemler uygun yaklaşımlarla stasyoner olarak kabul edilebilirler (Chen ve Harichandran, 1998).

Stasyoner bir işlem için zamanın ötelenmesiyle bulunan tüm toplum istatistiklerinin stasyoner kalmasına ek olarak, tek bir örnek boyunca bulunan zaman istatistikleri toplum boyunca bulunan zaman istatistiklerine eşitse bu işlem ergodik işlem olarak adlandırılır. Her ergodik işlem stasyoner olduğu halde her stasyoner işlemin ergodik olduğu söylenemez (Bendat ve Piersol, 1971).

Rastgele işlemin olasılık özelliklerini tanımlayan en önemli fonksiyonlar şu şekilde sıralanabilir:

- Ortalama değer
- Otokorelasyon fonksiyonu
- Ortalamanın karesi değeri
- Varyans
- Olasılık yoğunluk fonksiyonu
- Güç spektral yoğunluk fonksiyonu

1.5.2. Deprem Etkileri Durumunda Stokastik Dinamik Analiz Formülasyonu

Denklem (16)'dan görüleceği gibi Lagrange yaklaşımına dayalı sıvı sisteminin hareket denklemi yapı sisteminin hareket denklemiyle aynı formda olmaktadır. Bu nedenle sıvı-yapı sistemleri aynı tip elemanlarla modellenebilir. Ancak, ortak sistemin ara yüzey şartını belirlemek gerekir. Sıvının viskoz olmadığı kabul edildiğinde ortak sistemin ara yüzeyinde ara yüzey normal yerdeğiştirmeler sürekli, teğet yerdeğiştirmeler süreksiz olmaktadır. Bu şart kısıtlama denklemleriyle sağlanmaktadır (Bathe, 1996).

Ara yüzey koşulunu kullanarak n serbestlik dereceli bir sıvı-yapı sisteminin Lagrange yaklaşımına dayalı sönüm içeren dinamik hareket denklemi aşağıdaki gibi yazılabilir.

$$[M]\{\ddot{U}\} + [C]\{\dot{U}\} + [K]\{U\} = -[M]\{\delta\}\ddot{U}_g(t) \quad (19)$$

Burada $\{\delta\}$ deprem doğrultu vektörünü, $\ddot{U}_g(t)$ yer ivmesini göstermektedir. Yapı sistemlerinin stokastik analiz formülasyonu birçok kaynakta (Newland, 1975; Elishakoff, 1983; Bolotin, 1984; Yang, 1986; Clough ve Penzien, 1993; Manolis ve Koliopoulos, 2001) ayrıntılı olarak verilmiştir. Güç spektral yoğunluk fonksiyonu ve otokorelasyon fonksiyonu stokastik analizin temel ifadeleridir. Bir sisteme etkiyen deprem hareketinin güç spektral yoğunluk fonksiyonu veya otokorelasyon fonksiyonu bilinirse, yapı davranışını tanımlayan stokastik parametreler kolayca belirlenebilir. Yapı davranışına ait güç spektral yoğunluk fonksiyonu,

$$S_{ij}(\omega) = S_{in}(\omega) \sum_{r=1}^N \sum_{s=1}^N \psi_{ir} \psi_{js} H_{ir}(\omega) H_{js}^*(\omega) \quad (20)$$

şeklinde yazılabilir. Burada, $S_{in}(\omega)$, yer ivmesinin güç spektral yoğunluk fonksiyonunu, ψ_{ir} r. modun $U_i(t)$ yerdeğiştirmesine katkısını, ψ_{js} s.modun $U_j(t)$ yerdeğiştirmesine katkısını (katkı faktörü), H_{ir} ve H_{js} r. ve s. mod için frekans davranış fonksiyonunu, * kompleks eşleniği göstermektedir. (20) denkleminde $i=j$ alınırsa, tek bir yerdeğiştirme için güç spektral yoğunluk fonksiyonu elde edilir (Soyluk ve Dumanoglu, 2000).

Çok serbestlik dereceli bir sistemin stasyonær tepkisinin otokorelasyon veya karşıt korelasyon fonksiyonunun bulunmasındaki temel denklem

$$R_{rs}(t_1 - t_2) = \int_{-\infty}^{\infty} S_{in}(\omega) H_r(\omega) H_s^*(\omega) e^{i\omega(t_1 - t_2)} d\omega \quad (21)$$

ile gösterilen modal karşıt korelasyon fonksiyonudur. i ve j noktalarındaki $U_i(t)$ ve $U_j(t)$ yerdeşiştirmeleri için karşıt korelasyon fonksiyonu,

$$R_{ij}(\tau) = \sum_{r=1}^N \sum_{s=1}^N \psi_{ir} \psi_{js} R_{rs}(\tau) \quad (22)$$

şeklindedir.

1.5.2.1. Spektral Momentler

Spektral momentler, güç spektral yoğunluk fonksiyonu ve frekans terimleri ile ifade edilmiş olup

$$\lambda_{m,ij} = 2 \int_0^{\infty} \omega^m S_{ij}(\omega) d\omega \quad , m=0,1,2 \quad (23)$$

şeklindedir. $m=0,1,2$ sırasıyla sıfırncı, birinci ve ikinci spektral momenti göstermektedir. (20) denklemi (23) denkleminde yerine yazılırsa,

$$\lambda_{m,ij} = \sum_{r=1}^N \sum_{s=1}^N \psi_{ir} \psi_{js} \lambda_{m,rs} \quad (24)$$

ifadesi elde edilir. Burada $\lambda_{m,rs}$

$$\lambda_{m,rs} = 2 \operatorname{Re} \int_0^{\infty} \omega^m S_{in}(\omega) H_{ir}(\omega) H_{jr}^*(\omega) d\omega \quad (25)$$

şeklinde hesaplanabilir. Re, gerçel kısmı göstermektedir. (24) denklemi,

$$\rho_{m,rs} = \frac{\lambda_{m,rs}}{\sqrt{\lambda_{m,rr} \lambda_{m,ss}}} \quad , m=0,1,2 \quad (26)$$

katsayılarının dahil edilmesiyle,

$$\lambda_{m,ij} = \sum_{r=1}^N \sum_{s=1}^N \psi_{ir} \psi_{js} \rho_{m,rs} \sqrt{\lambda_{m,rr} \lambda_{m,ss}} \quad , m=0,1,2 \quad (27)$$

şeklini alır. Burada, $\lambda_{m,rr}$ etkiye bağlı olarak ξ_r sönüm oranlı ve ω_r frekanslı tek serbestlik dereceli sistemin tepkisinin spektral momentini göstermektedir (Der Kiureghian, 1980). Spektral momentlerin bilinmesiyle tepki işlemi ile ilgili birtakım istatistikler de belirlenmiş olur. Bunlar,

- $\sqrt{\lambda_0}$ ile gösterilen karesel ortalamanın karekökü değeri (RMS)
- Tepkinin türevinin karesel ortalama değerinin karekökü $\sqrt{\lambda_2}$
- Eğer işlem Gauss işlemi ise sıfır seviyesinin ortalama geçiş sayısı (görünen frekans), ν

$$\nu = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{\lambda_2}{\lambda_0}} \quad (28)$$

- Tepkinin güç spektral yoğunluk fonksiyonunun dağılımını ölçen parametre, δ

$$\delta = \sqrt{1 - \frac{\lambda_1^2}{\lambda_0 \lambda_2}} \quad , 0 < \delta < 1 \quad (29)$$

(29) ifadesindeki δ küçük ise dar bant işlemini, büyük ise geniş bant işlemini gösterir. Bu parametreler, işlemin maksimum ortalama değeri, varyansı ve yığılımlı olasılık dağılım fonksiyonu belirlenirken kullanılır (Button vd., 1981).

1.5.2.2. Ortalama Maksimum Değer

Stokastik analizde kullanılan istatistiksel parametrelerden biri de ortalama maksimum değerdir. Ortalama maksimum değer μ , tüm maksimum değerlerin ortalaması olarak tanımlanır ve genelde maksimum büyüklük faktörüne ve tepkinin karesel ortalamasının kareköküne bağlı olarak aşağıdaki gibi ifade edilir.

$$\mu = p\sqrt{\lambda_0} \quad (30)$$

μ 'nün standart sapması ise,

$$\sigma = q\sqrt{\lambda_0} \quad (31)$$

şeklindedir. Burada, p ve q sırasıyla, yer hareket ivmesinin ve sıfır seviyesinin ortalama geçiş sayısının fonksiyonu olan maksimum büyüklük faktörleridir. Deprem mühendisliği uygulamaları için bu faktörler şu şekilde ifade edilebilir (Button vd., 1981);

$$p = \sqrt{2 \ln v_e \tau} + \frac{0.5772}{\sqrt{2 \ln v_e \tau}} \quad (32)$$

$$q = \frac{1.2}{\sqrt{(2 \ln v_e \tau)}} - \frac{5.4}{13 + (2 \ln v_e \tau)^{3.2}} \quad (33)$$

Burada; v_e sıfır seviyesinin indirgenmiş ortalama geçiş sayısını göstermekte ve aşağıdaki şekilde ifade edilmektedir.

$$v_e = \begin{cases} (1.63\delta^{0.45} - 0.38)v & \delta < 0.69 \\ v & \delta \geq 0.69 \end{cases} \quad (34)$$

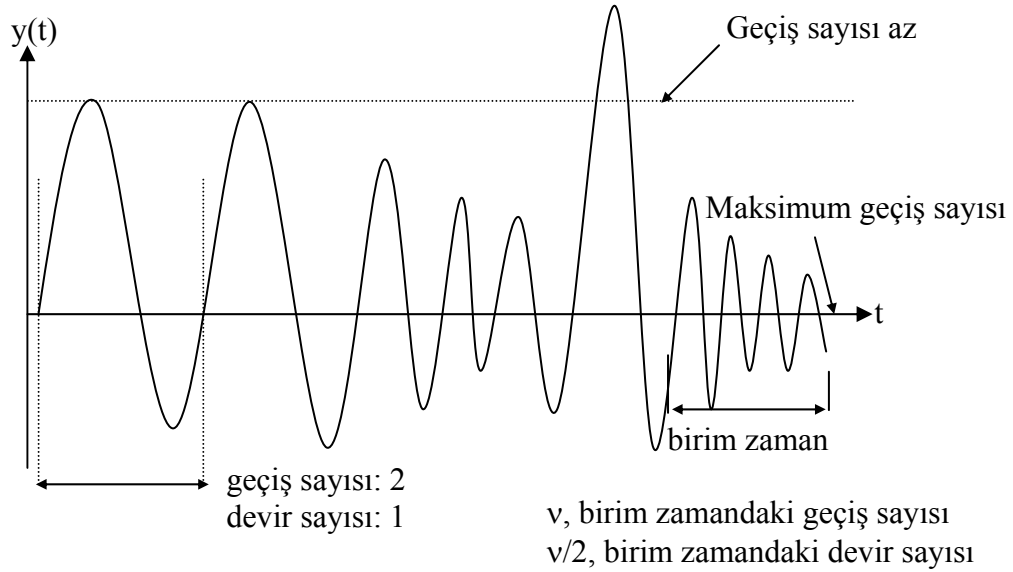
1.5.2.3. Oluşma Frekansı

Oluşma frekansı, tepki işlemi tarafından kesilen sıfır seviyesinin $y(t)=0$ birim zamandaki ortalama geçiş sayısıdır. Sıfır ortalamalı Gauss işlemi için birim zamandaki sıfır seviyesinin ortalama geçiş sayısı aşağıdaki gibi yazılabilir (Button vd., 1981).

$$v = \frac{1}{\pi} \frac{\sigma_{\dot{y}}}{\sigma_y} = \frac{1}{\pi} \sqrt{\frac{\lambda_2}{\lambda_0}} \quad (35)$$

Her periyodik hareket için, sıfır seviyesi iki kez geçildiğinden tepki işlemi $y(t)$ için oluşma frekansı $v/2$ olacaktır (Şekil 4).

$$f_0 = \frac{v}{2} = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{\lambda_2}{\lambda_0}} \quad (36)$$



Şekil 4. Örnek tepki işlemi

1.5.2.4. Yığışımlı Olasılık Dağılım Fonksiyonu

Stokastik analizde seçilmiş bir tepki değerinin oluşma ihtimali belirlenebilmektedir. Oluşma ihtimalinin hesaplanması, yığışımlı olasılık dağılım fonksiyonları ile mümkündür. Bilindiği gibi, sıfır ortalamalı Gauss etkisine maruz lineer bir yapı sisteminin tepkisi de sıfır ortalamaya ve Gauss dağılımına sahip olacaktır. Böyle bir işlemin,

$$R_{\tau} = \max_{\tau} |R(t)| \quad (37)$$

ile gösterilen maksimum mutlak değerinin Vanmacke (1975) tarafından oluşturulan yığışımlı olasılık dağılım fonksiyonu aşağıdaki gibi yazılabilir.

$$F_{R_{\tau}}(r) = \left[1 - \exp(-s^2/2)\right] \exp\left[-v\tau \frac{1 - \exp(-\sqrt{\pi/2}\delta_e s)}{\exp(s^2/2) - 1}\right], \quad r < 0 \quad (38)$$

Burada,

$$s = \frac{r}{\lambda_0} \quad (39)$$

$$v = \frac{1}{\pi} \sqrt{\frac{\lambda_2}{\lambda_0}} \quad (40)$$

$$\delta_e = \delta^{1.2} \quad (41)$$

$$\delta = \sqrt{1 - \frac{\lambda_1^2}{\lambda_0 \lambda_2}} \quad (42)$$

şeklinde ifade edilirler.

2. YAPILAN ÇALIŞMALAR

2.1. Geliştirilen Bilgisayar Programı

Lagrange yaklaşımına dayalı modellemede yapılan dinamik analizlerde hem yapı hem de sıvı ortamında yerdeğiştirmeler bilinmeyen olarak seçilmektedir. Böylece eleman matrisleri simetrik olmakta ve yapı sistemlerini analiz ederken mevcut olan eleman alt programlarından yerdeğiştirmelere dayalı sıvı elemanlarını elde etmek ve genel amaçlı yapı analizi programlarına uyarlamak kolay olmaktadır.

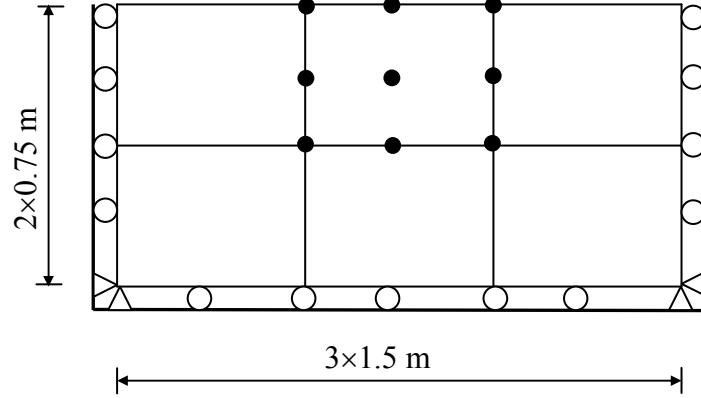
Yapı sistemlerinin stokastik dinamik analizi STOCAL (Button vd., 1981) programıyla yapılabilmektedir. Bu çalışmada sıvı ve sıvı-yapı sistemlerinin stokastik dinamik analizini yapmak amacıyla Wilson ve Khalvati (1983) tarafından önerilen Lagrange yaklaşımına dayalı değişken düğüm noktalı iki boyutlu izoparametrik sıvı sonlu eleman formülasyonu FORTRAN programlama dilinde kodlanmıştır. Kodlanan bu alt program yapı sistemlerinin stokastik dinamik analizini yapan STOCAL programına dahil edilerek STOCALF olarak adlandırılmıştır. Lagrange yaklaşımına dayalı değişken düğüm noktalı iki boyutlu izoparametrik sıvı sonlu eleman formülasyonu Ek 1’de anlatılmaktadır. Geliştirilen STOCALF programı ile çeşitli sıvı-yapı etkileşim sistemlerinin Lagrange yaklaşımına dayalı stokastik dinamik analizinin gerçekleştirilmesi amaçlanmıştır.

2.2. Geliştirilen Bilgisayar Programının Kontrol Edilmesi

2.2.1. Rijit Sıvı Tankının Modal Analizi

Geliştirilen STOCALF programının geçerliliğini ve doğruluğunu test etmek için dikdörtgen bir rijit sıvı tankı seçilmiştir. Seçilen sıvı tankının boyutları ve sonlu eleman modeli Şekil 5’de verilmektedir. 6 adet sonlu elemandan oluşan rijit sıvı tankının modal analizi yapılarak frekansları hesaplanmıştır. Sonlu eleman modelinde yüzey salınımlarının dikkate alındığı 9 düğüm noktalı izoparametrik sıvı sonlu elemanlar kullanılmıştır. Sıvı ortamı düğüm noktaları yatay ve düşey yerdeğiştirme yapabilirken, rijit tankın düşey ve

yatay dış kenarları sırasıyla sadece düşey ve yatay yerdeğiştirme yapabilmektedir. Eleman matrisleri 2×2 indirgenmiş integrasyon dereceleri kullanılarak hesaplanmaktadır. Sıvının hacimsel elastisite (Bulk) modülü 207×10^4 kN/m², kütle yoğunluğu 1000 kg/m³ ve yerçekimi ivmesi 9.81 m/s² alınmıştır.



Şekil 5. Rijit sıvı tankı sonlu eleman modeli

Bir sıvı sisteminin Lagrange yaklaşımına dayalı modal analizi yüzey salınım, hacim değişim ve rotasyonla ilgili modlar vermektedir (Wilson ve Khalvati, 1983). Rotasyonla ilgili modlar, rotasyonel kısıtlama parametresine bağlı olarak değişmektedir. Rotasyon kısıtlama parametresinin değeri büyüdükçe ilgili frekanslar da büyümektedir. 9 düğüm noktalı sıvı elemanda sıvının rotasyonsuzluğunun sağlanması için rotasyon kısıtlama parametresinin değeri hacimsel elastisite modülünün 100 katı alınması önerilmektedir (Wilson ve Khalvati, 1983; Calayır ve Dumanoglu, 1993). Bu çalışmada rotasyon kısıtlama parametresi, hacimsel elastisite modülünün 100 katı alınmaktadır. Şekil 5'de verilen rijit sıvı tankının STOCALF programı kullanılarak modal analizinden hesaplanan ilk 9 frekans Tablo 2'de verilmektedir. İlk 5 frekans yüzey salınım, diğerleri hacim değişim frekanslarıdır.

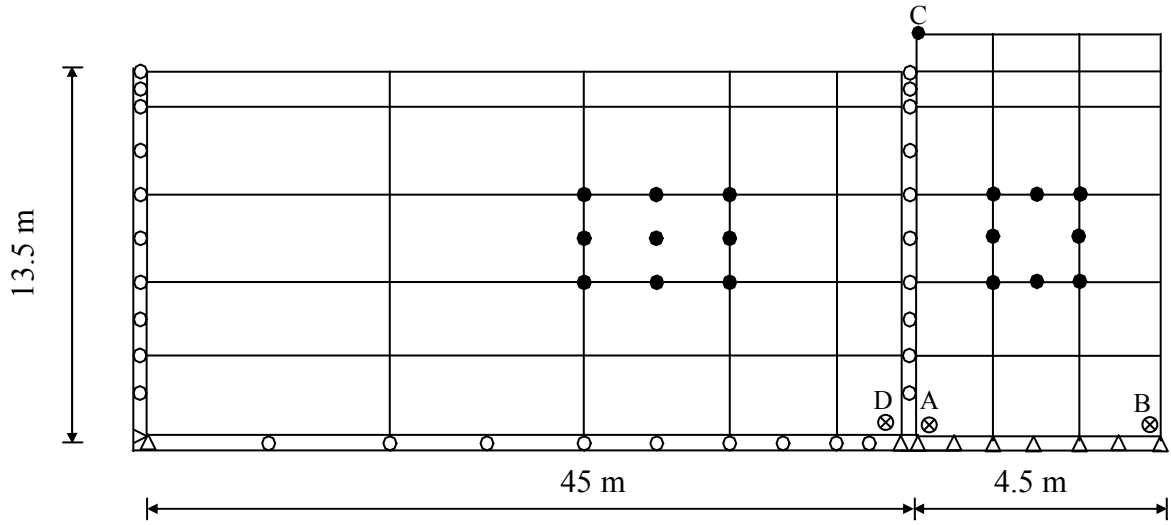
Tablo 2. Rijit sıvı tankının modal analizlerinden elde edilen frekanslar

Frekans (Hz)	Calayır (1994)	Bayraktar (1995)	STOCALF
1	0.368	0.368	0.296
2	0.398	0.398	0.364
3	0.571	0.571	0.522
4	0.650	0.650	0.544
5	0.668	0.668	0.596
6	239.800	239.800	236.981
7	287.700	287.700	285.071
8	394.500	394.500	387.334
9	490.100	490.100	529.268

Tablo 2’den görüleceği gibi rijit sıvı tankının STOCALF programı ile modal analizinden hesaplanan frekanslar, Calayır (1994) ve Bayraktar (1995) (MULSAPF programı) tarafından aynı sonlu eleman modeli kullanılarak elde edilen frekanslara çok yakındır. Aradaki farkın STOCALF programının çözüm tekniğinden kaynaklandığı düşünülmektedir. Çünkü, STOCALF programında her serbestlik derecesine ait kütle değerleri elle hesaplanıp dışarıdan veri olarak girilmekte ve özdeğer analizinde farklı çözüm tekniği kullanılmaktadır. Rijit sıvı tankı için birinci yüzey salınım frekansı Lamb (1932) tarafından verilen analitik çözümden 0.368 Hz olarak elde edilmiştir. Yine Olson ve Bathe’ in (1983) analitik çözümlerinden sıvı tankının ilk hacim değişim frekansı 239.791 Hz olmaktadır. Analitik çözümlerden elde edilen frekansların STOCALF programı sonuçlarına oldukça yakın olduğu Tablo 2’den görülmektedir.

2.2.2. Sıvı-Yapı Etkileşim Sisteminin Stokastik Dinamik Analizi

Geliştirilen STOCALF programının kontrolü amacıyla örnek bir sıvı-yapı etkileşim sistemi belirlenerek bu etkileşim sisteminin stokastik dinamik analizi gerçekleştirilmiştir. Yapılan analiz sonucunda belirli noktalardaki ortalama maksimum yerdeğiştirme, gerilme ve hidrodinamik basınç değerleri ve bu davranışların oluşma frekansları elde edilerek deterministik dinamik analiz sonucu elde edilen zamanla değişimleriyle karşılaştırma yapılmıştır. Buradaki amaç, yapı davranışlarının zamanla değişimleri incelenerek STOCALF programının sağlıklı sonuçlar verip vermediğini kontrol etmektir. Sıvı-yapı etkileşim sisteminin boyutları ve sonlu eleman modeli Şekil 6’da verilmektedir.



Şekil 6. Sıvı-yapı etkileşim sistemi sonlu eleman modeli

Yapı yüksekliği, $H=15$ m olup, rezervuar uzunluğu $3H=45$ m olarak belirlenmiştir (Singhal, 1991). Rezervuarda 9 düğüm noktalı, yapıda 8 düğüm noktalı izoparametrik sonlu elemanlar kullanılmıştır. Hem sıvı hem de yapı ortamının her düğüm noktasında yatay ve düşey ötelenmelerden oluşan iki serbestlik derecesi mevcuttur. Eleman matrisleri yapı için 3×3 normal, sıvı için 2×2 indirgenmiş integrasyon dereceleri kullanılarak elde edilmektedir (Bathe, 1996). Sıvı-yapı ara yüzeyinde iki ortamın yatay yerdeğiştirmelerinin sürekliliği kısıtlama denklemleri ile sağlanmıştır. Hesaplamalarda düzlem şekil değiştirme koşulları göz önünde bulundurulmuştur. Rezervuardaki sıvı için hacimsel elastisite modülü ve kütle yoğunluğu sırasıyla 207×10^4 kN/m², 1000 kg/m³ olarak alınmıştır.

Lagrange yaklaşımına dayalı sıvı-yapı etkileşim sistemlerinin modal analizinde mod sayısının seçimi çok önemlidir. Sıvının sonlu eleman modeline göre değişen yüzey salınım modlarının sayısı çok olmakta ve frekans tablosunda ilk sıralarda yer almaktadır. Bu modların yapı üzerindeki etkisi çok azdır. Bu nedenle deterministik ve stokastik analizlerde ilk 20 mod dikkate alınmıştır (Calayır ve Dumanoğlu, 1993). Analizlerde 1971 San Fernando depremi Pacoima Baraj kaydı S16E bileşeni dikkate alınmış ve sisteme yatay doğrultuda uygulanmıştır (URL-1, 2003).

2.2.2.1. Frekanslar

Sıvı-yapı etkileşim sisteminin STOCALF ve MULSAPF programlarıyla yapılan analizler sonucu elde edilen frekanslar Tablo 3'te gösterilmektedir. Lagrange yaklaşımı kullanılarak yapılan bu analizde elde edilen ilk 9 frekans yüzey salınımlarıyla ilgilidir ve yapının davranışında herhangi bir etkileri yoktur. Tablo 3'ten görüldüğü üzere 10. frekans ilk hacim değişim frekansıdır. MULSAPF ve STOCALF programlarından elde edilen frekanslar arasında küçük bir fark gözlenmiştir. Aradaki bu fark normal karşılanmaktadır. Çünkü daha önce de açıklandığı gibi STOCALF programında her serbestlik derecesine ait kütle değerleri elle hesaplanıp dışarıdan veri olarak girilmekte ve özdeğer analizinde farklı çözüm tekniği kullanılmaktadır.

Tablo 3. Sıvı-yapı etkileşim sisteminin dinamik analizlerinden elde edilen frekanslar

Frekanslar (Hz)	MULSAPF (Bayraktar, 1995)	STOCALF
1	0.0982	0.0101
2	0.1129	0.1143
3	0.1698	0.1505
4	0.1836	0.1766
5	0.2252	0.2099
6	0.2598	0.2366
7	0.3021	0.2783
8	0.3785	0.3452
9	0.5031	0.4356
10	9.5748	10.0176
11	15.0927	12.0211
12	26.5311	23.1085
13	26.8813	24.3444
14	27.6770	27.2916
15	29.2208	27.6433
16	29.8893	28.6401
17	30.7010	30.1234
18	33.1201	30.2590
19	34.0910	31.4497
20	35.3483	32.1459

2.2.2.2. Ortalama Maksimum Yatay Yerdeşistirmeler

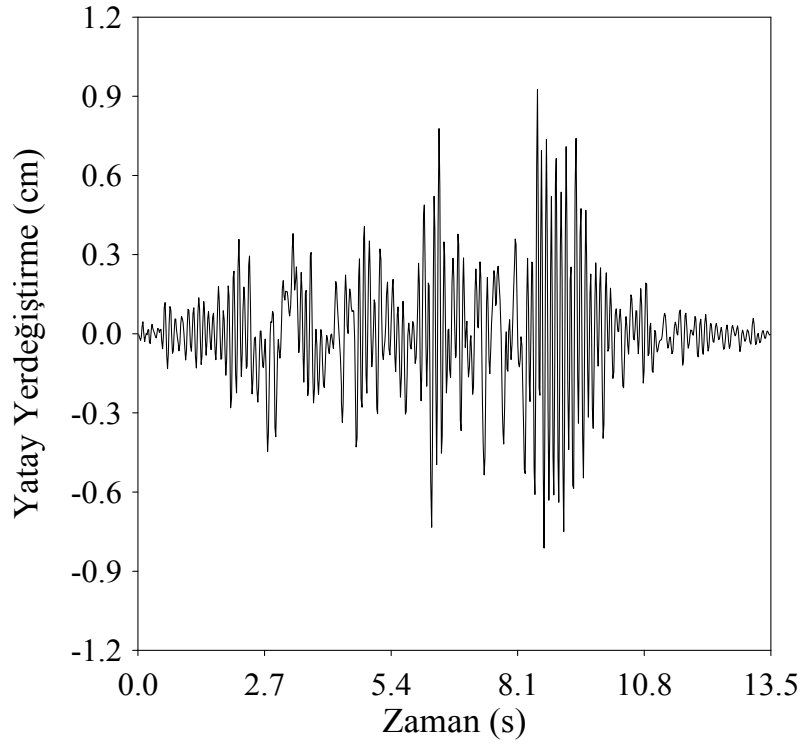
Bu bölümde sıvı-yapı etkileşim sisteminin stokastik dinamik analizi sonucu yapının kret noktasında elde edilen ortalama maksimum yatay yerdeşirme üzerinde inceleme yapılacaktır.

Tablo 4'te sıvı-yapı etkileşim sisteminin kret noktasında elde edilen ortalama maksimum ve mutlak maksimum yatay yerdeşirme değerleri görölmektedir. Sistemin Mulsapf programıyla yapılan deterministik dinamik analizi sonucu elde edilen mutlak maksimum yatay yerdeşirmenin Stocalf programıyla yapılan stokastik dinamik analizi sonucu elde edilen ortalama maksimum yatay yerdeşirmeden daha büyük olduğu görölmektedir.

Tablo 4. Ortalama maksimum ve mutlak maksimum yatay yerdeşistirmeler

Yatay Yerdeşirme (cm)	
Ortalama maksimum	0.42
Mutlak maksimum	0.92

Şekil 7'de sıvı-yapı etkileşim sisteminin kret noktasındaki (C noktası) mutlak maksimum yatay yerdeşirmenin zamanla değişimi verilmektedir. Şekilde 12 mutlak maksimum değerin ortalaması alınarak elde edilen yatay yerdeşirme değeri 0.47 cm'dir. Elde edilen bu değer stokastik dinamik analiz sonucu elde edilen ortalama maksimum yatay yerdeşirme değerine (0.42 cm) çok yakındır. Ayrıca ortalama maksimum yatay yerdeşirmenin oluşma frekansı 8.78 Hz, periyodu 0.114 s olarak hesaplanmıştır. Şekil 7'den maksimum değer için hesaplanan periyod 0.114 s olup, ortalama maksimum yatay yerdeşirmenin periyoduna eşittir. Bu ise diğer bir kontrol mekanizmasıdır.



Şekil 7. Sıvı-yapı etkileşim sistemi kret noktası (C noktası) mutlak maksimum yatay yerdeğiştirmesinin zamanla değişimi

2.2.2.3. Ortalama Maksimum Yatay Gerilmeler

Sıvı-yapı etkileşim sisteminin stokastik dinamik analizi yapılarak memba ve mansap topoğundaki (A ve B Gauss noktaları) ortalama maksimum yatay gerilmeler elde edilmiştir. A ve B Gauss noktalarındaki ortalama maksimum yatay gerilmelerin ve deterministik dinamik analiz sonucu elde edilen mutlak maksimum yatay gerilmelerin değerleri Tablo 5'te verilmektedir.

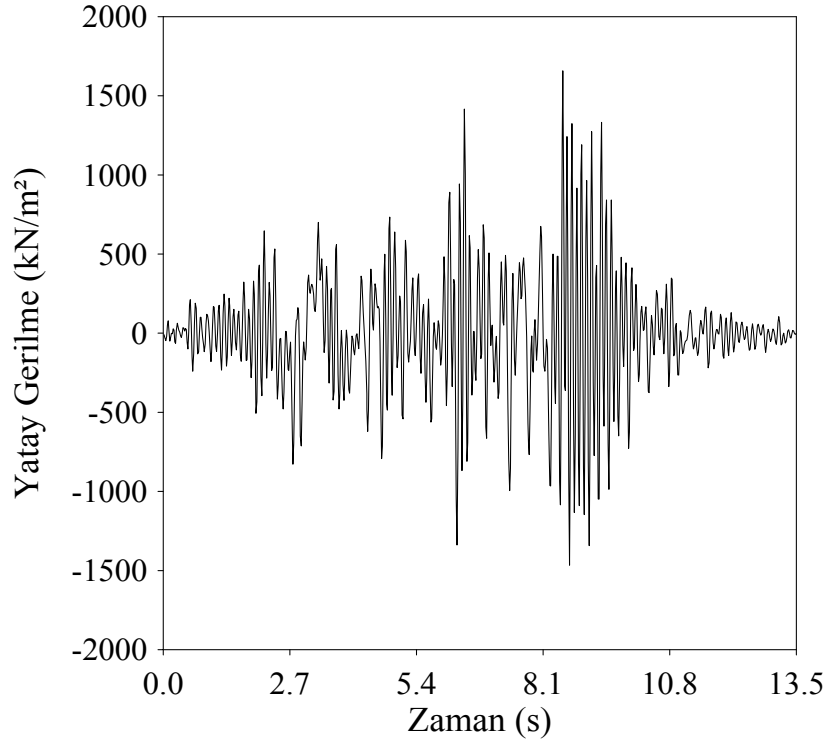
Tablo 5. A ve B Gauss noktalarındaki ortalama maksimum ve mutlak maksimum yatay gerilmeler

Yatay Gerilme (kN/m ²)	A Gauss Noktası	B Gauss Noktası
Ortalama maksimum	1146.40	1145.60
Mutlak maksimum	1657.70	1670.00

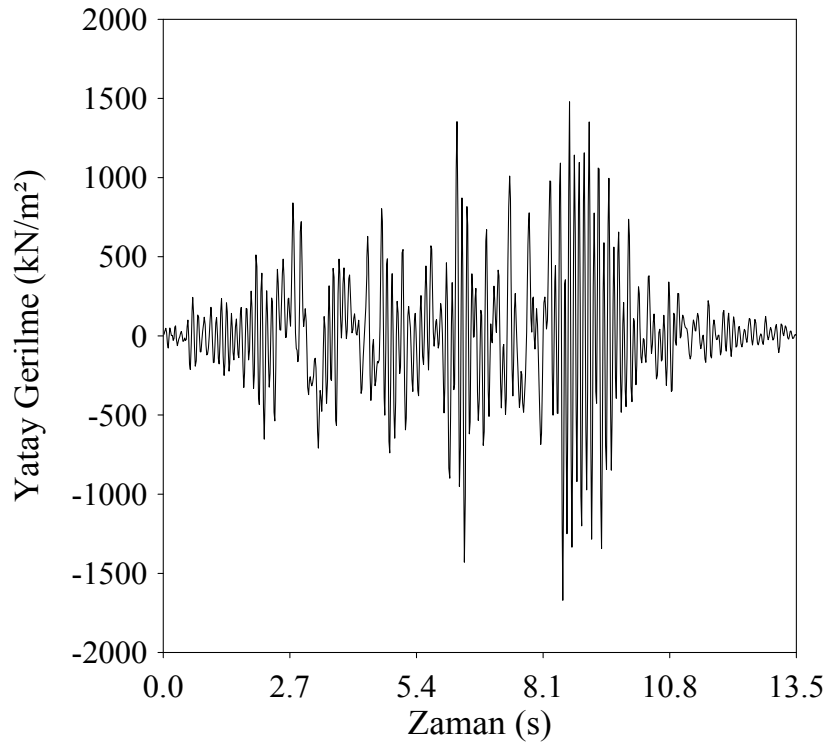
Tablo 5 incelendiğinde, memba topuğunda (A Gauss noktası) elde edilen ortalama maksimum yatay gerilme ile mansap topuğunda elde edilen (B Gauss noktası) ortalama maksimum yatay gerilme arasında çok az bir fark vardır. Mutlak maksimum yatay gerilmelere bakıldığında da memba topuğundaki (A Gauss noktası) mutlak maksimum yatay gerilme değeri mansap topuğundakinden (B Gauss noktası) az bir farkla küçük çıkmıştır. Ortalama maksimum yatay gerilmeler, mutlak maksimum yatay gerilmelerden daha küçüktür.

Şekil 8’de memba topuğundaki (A Gauss noktası) mutlak maksimum yatay gerilmenin zamanla değişim grafiği görülmektedir. Şekilden memba topuğundaki 12 mutlak maksimum değerlerin ortalaması alınarak elde edilen yatay gerilme değeri 1151.75 kN/m²’dir. Stokastik dinamik analizden elde edilen memba topuğundaki ortalama maksimum yatay gerilme Tablo 5’te belirtildiği üzere 1146.40 kN/m²’dir. Şekil 8’den hesaplanan yatay gerilme değeri ile tabloda belirtilen değer birbirine oldukça yakındır. Memba topuğundaki ortalama maksimum yatay gerilmenin oluşma frekansı 8.75 Hz, periyodu 0.114 s’dir. Şekil 8’den mutlak maksimum yatay gerilmenin periyodu 0.115 s’dir. Hesaplanan bu iki periyod birbirine eşit denecek kadar yakındır.

Şekil 9’da mansap topuğundaki (B Gauss noktası) mutlak maksimum yatay gerilmenin zamanla değişimi verilmektedir. Mansap topuğundaki 12 mutlak maksimum değerlerin ortalaması alınarak elde edilen yatay gerilme değeri 1190.21 kN/m²’dir. Bu değer, stokastik dinamik analizden elde edilen ortalama maksimum yatay gerilme değerine (1145.60 kN/m²) yakındır. Mansap topuğundaki ortalama maksimum yatay gerilmenin oluşma frekansı 8.76 Hz, periyodu 0.114 s’dir. Şekil 9’dan mutlak maksimum yatay gerilmenin periyodu ise 0.115 s olarak hesaplanmıştır.



Şekil 8. Sıvı-yapı etkileşim sistemi memba topuğu (A Gauss noktası) mutlak maksimum yatay gerilmesinin zamanla değişimi



Şekil 9. Sıvı-yapı etkileşim sistemi mansap topuğu (B Gauss noktası) mutlak maksimum yatay gerilmesinin zamanla değişimi

2.2.2.4. Ortalama Maksimum Düşey Gerilmeler

Sıvı-yapı etkileşim sisteminin stokastik ve deterministik dinamik analizleri sonucu memba ve mansap topoğunda (A ve B Gauss noktaları) elde edilen ortalama maksimum ve mutlak maksimum düşey gerilmeler Tablo 6’da verilmektedir.

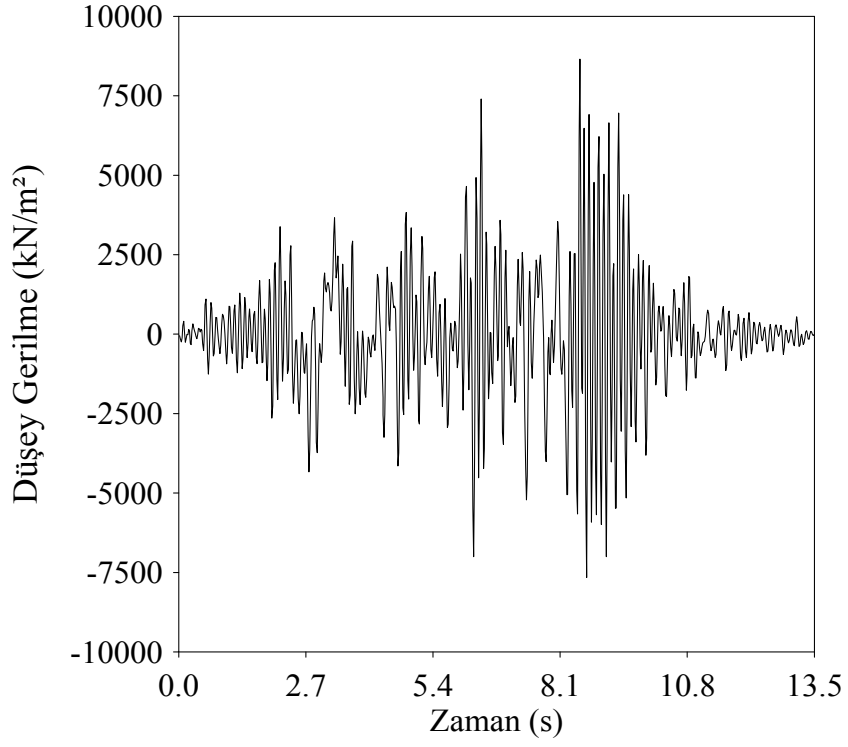
Tablo 6. A ve B Gauss noktalarındaki ortalama maksimum ve mutlak maksimum düşey gerilmeler

Düşey Gerilme (kN/m ²)	A Gauss Noktası	B Gauss Noktası
Ortalama maksimum	4585.60	4582.60
Mutlak maksimum	8653.90	8631.70

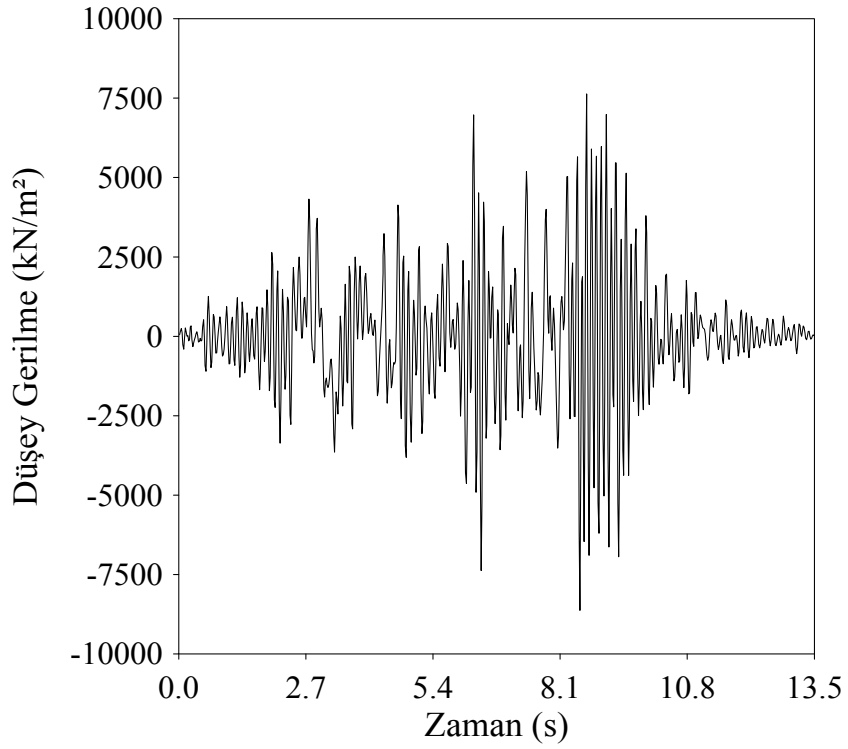
Stokastik dinamik analiz sonucunda memba topoğu ve mansap topoğunda elde edilen ortalama maksimum düşey gerilmeler birbirinden fazla farklılık göstermemektedir. Aynı şekilde deterministik dinamik analiz sonucu memba topoğu ve mansap topoğunda elde edilen mutlak maksimum düşey gerilmeler birbirlerine oldukça yakındır.

Şekil 10’da memba topoğundaki mutlak maksimum düşey gerilmenin zamanla değişimi verilmiştir. Bu şekilden 12 mutlak maksimum değerin ortalaması alınarak elde edilen düşey gerilme değeri 4641.42 kN/m² olup, stokastik dinamik analiz sonucu elde edilen ortalama maksimum düşey gerilme değerine (4585.60 kN/m²) yakındır. Ortalama maksimum düşey gerilmenin oluşma frekansı 8.75 Hz, periyodu 0.114 s’dir. Şekil 10’dan mutlak maksimum düşey gerilmenin periyodu 0.116 s olarak hesaplanmıştır.

Şekil 11’de mansap topoğundaki mutlak maksimum düşey gerilmenin zamanla değişim grafiğinden 12 mutlak maksimum değerin ortalaması alınarak elde edilen düşey gerilme değeri 4407.40 kN/m² olup, stokastik dinamik analiz sonucu elde edilen ortalama maksimum düşey gerilme değerine (4582.60 kN/m²) eşit denecek kadar yakındır. Ortalama maksimum düşey gerilmenin oluşma frekansı 8.76 Hz, periyodu 0.114 s’dir. Şekil 11’den mutlak maksimum düşey gerilmenin periyodu 0.115 s olarak belirlenmiştir.



Ŗekil 10. Sıvı-yapı etkileŖim sistemi memba topuğu (A Gauss noktası) mutlak maksimum düŖey gerilmesinin zamanla deđiŖimi



Ŗekil 11. Sıvı-yapı etkileŖim sistemi mansap topuğu (B Gauss noktası) mutlak maksimum düŖey gerilmesinin zamanla deđiŖimi

2.2.2.5. Ortalama Maksimum Kayma Gerilmeleri

Sıvı-yapı etkileşim sisteminin stokastik ve deterministik dinamik analizleri sonucu memba ve mansap topuğunda (A ve B Gauss noktaları) elde edilen ortalama maksimum ve mutlak maksimum kayma gerilmeleri Tablo 7’de verilmektedir.

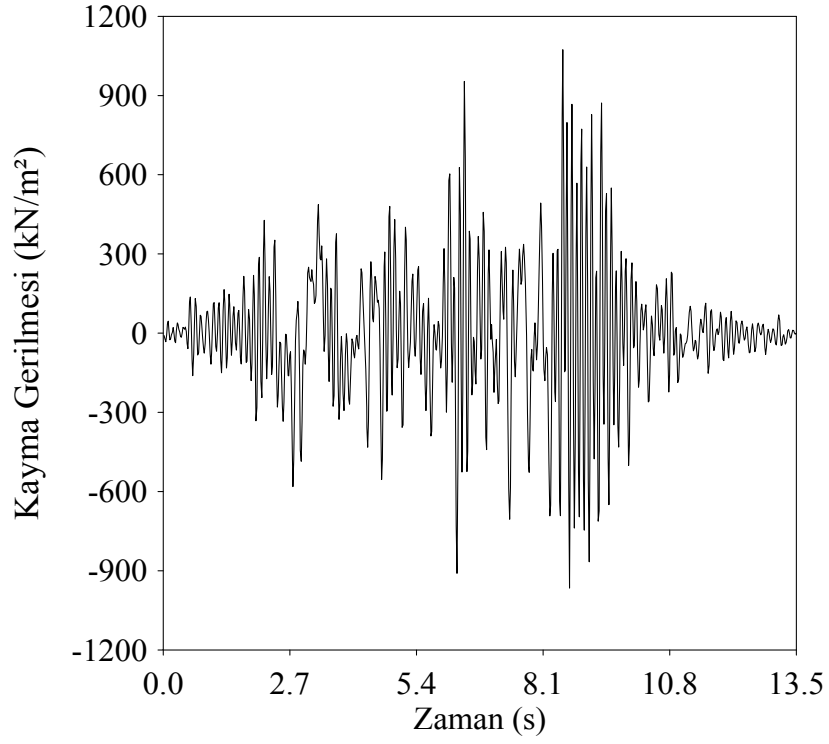
Tablo 7. A ve B Gauss noktalarındaki ortalama maksimum ve mutlak maksimum kayma gerilmeleri

Kayma Gerilmesi (kN/m ²)	A Gauss Noktası	B Gauss Noktası
Ortalama maksimum	676.45	651.21
Mutlak maksimum	1074.30	1041.00

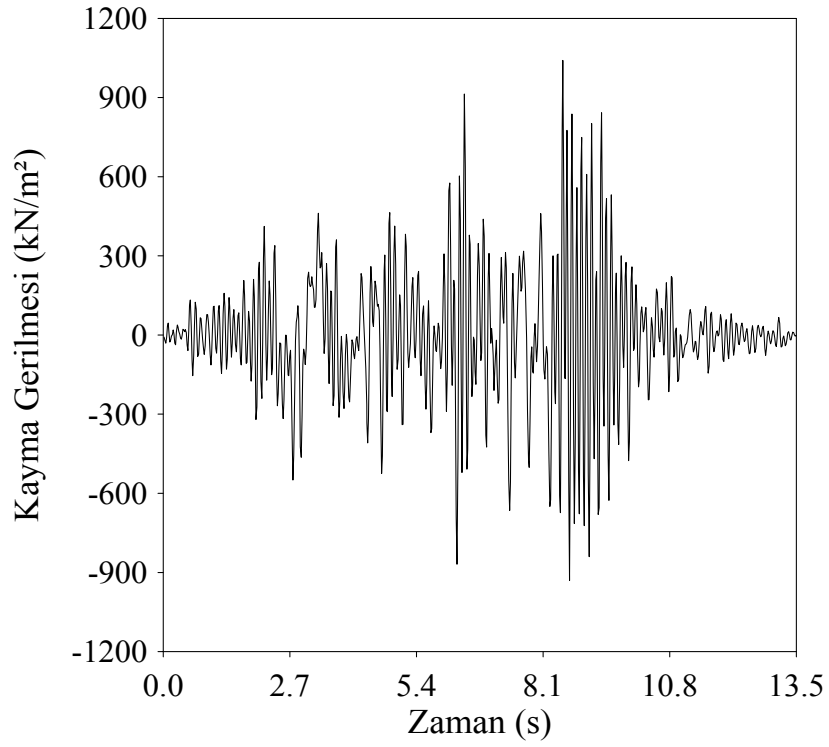
Ortalama maksimum yatay ve düşey gerilmelere benzer şekilde A ve B Gauss noktalarında elde edilen ortalama maksimum kayma gerilmeleri de birbirlerine yakın çıkmıştır. Beklendiği gibi mutlak maksimum kayma gerilmeleri, ortalama maksimum kayma gerilmelerinden daha büyüktür.

Şekil 12’de memba topuğundaki mutlak maksimum kayma gerilmesinin zamanla değişim grafiği görülmektedir. Şekil 12’deki 12 mutlak maksimum değerlerin ortalaması alınarak elde edilen kayma gerilmesinin değeri 659.44 kN/m²’dir. Stokastik dinamik analiz sonucu elde edilen ortalama maksimum kayma gerilmesi değeri 676.45 kN/m² olup, aradaki fark oldukça azdır. Ortalama maksimum kayma gerilmesinin oluşma frekansı 8.69 Hz, periyodu 0.115 s’dir. Şekil 12’den mutlak maksimum kayma gerilmesinin periyodu 0.114 s olarak belirlenmiştir.

Şekil 13’te mansap topuğundaki mutlak maksimum kayma gerilmesinin zamanla değişim grafiğinden 12 mutlak maksimum değerlerin ortalaması alınarak elde edilen kayma gerilmesi değeri 661.11 kN/m² olup, stokastik dinamik analiz sonucu elde edilen ortalama maksimum düşey gerilme değerine (651.21 kN/m²) oldukça yakındır. Ortalama maksimum düşey gerilmenin oluşma frekansı 8.72 Hz, periyodu 0.115 s’dir. Şekil 13’ten mutlak maksimum kayma gerilmesinin periyodu 0.116 s olarak hesaplanmıştır.



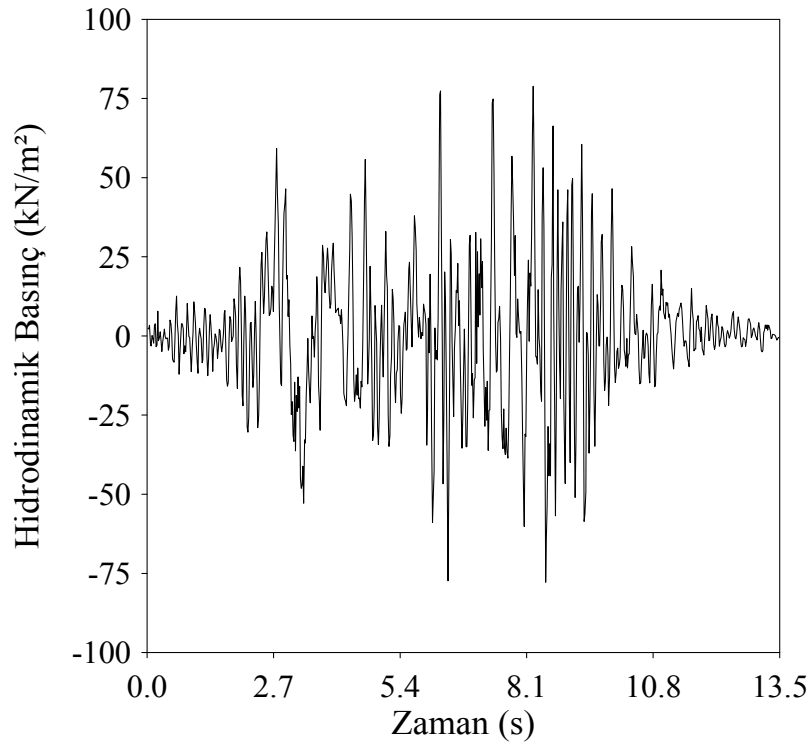
Şekil 12. Sıvı-yapı etkileşim sistemi memba topuğu (A Gauss noktası) mutlak maksimum kayma gerilmesinin zamanla değişimi



Şekil 13. Sıvı-yapı etkileşim sistemi mansap topuğu (B Gauss noktası) mutlak maksimum kayma gerilmesinin zamanla değişimi

2.2.2.6. Ortalama Maksimum Hidrodinamik Basınçlar

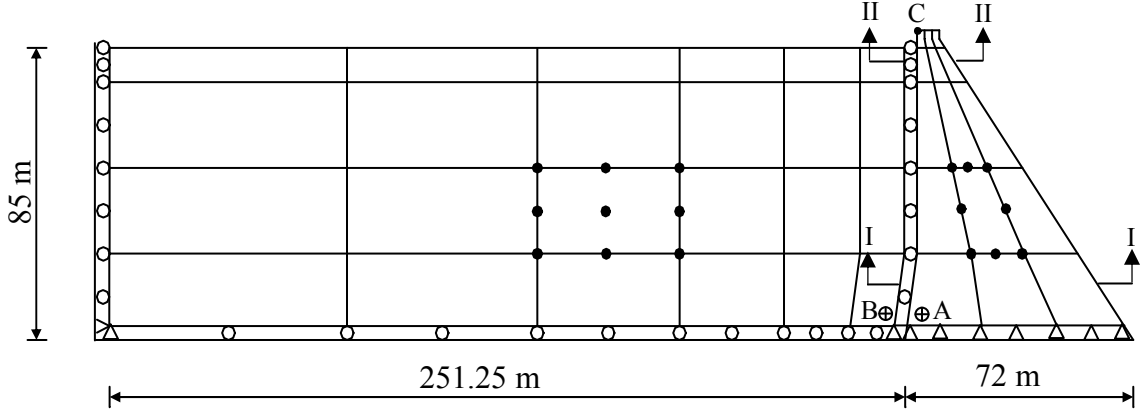
Sıvı-yapı etkileşim sisteminin stokastik ve deterministik dinamik analizleri sonucu memba topuğuna yakın D Gauss noktasında oluşan hidrodinamik basınçlar incelenmiştir. Şekil 14'te memba topuğundaki mutlak maksimum hidrodinamik basıncın zamanla değişimi görülmektedir. Şekilden 12 maksimum değerın ortalaması alınarak elde edilen hidrodinamik basınç 35.69 kN/m²'dir. Stokastik dinamik analiz sonucu elde edilen ortalama maksimum hidrodinamik basınç değeri 36.70 kN/m² olup, bu iki değeri birbirine oldukça yakındır. Ortalama maksimum hidrodinamik basıncın oluşma frekansı 7.91 Hz, periyodu 0.126 s'dir. Şekil 14'ten mutlak maksimum hidrodinamik basıncın periyodu 0.128 s olarak belirlenmiştir.



Şekil 14. Sıvı-yapı etkileşim sistemi memba topuğuna yakın D Gauss noktasında oluşan mutlak maksimum hidrodinamik basıncın zamanla değişimi

2.3.1. Baraj-Rezervuar Etkileşim Sisteminin Sonlu Eleman Modeli

Sarıyar Barajı'nın Lagrange yaklaşımına dayalı stokastik dinamik davranışı memba-mansap doğrultusundaki en büyük enkesit seçilerek elde edilmiştir. Baraj-rezervuar etkileşim sisteminin sonlu eleman modeli Şekil 16'da görülmektedir.



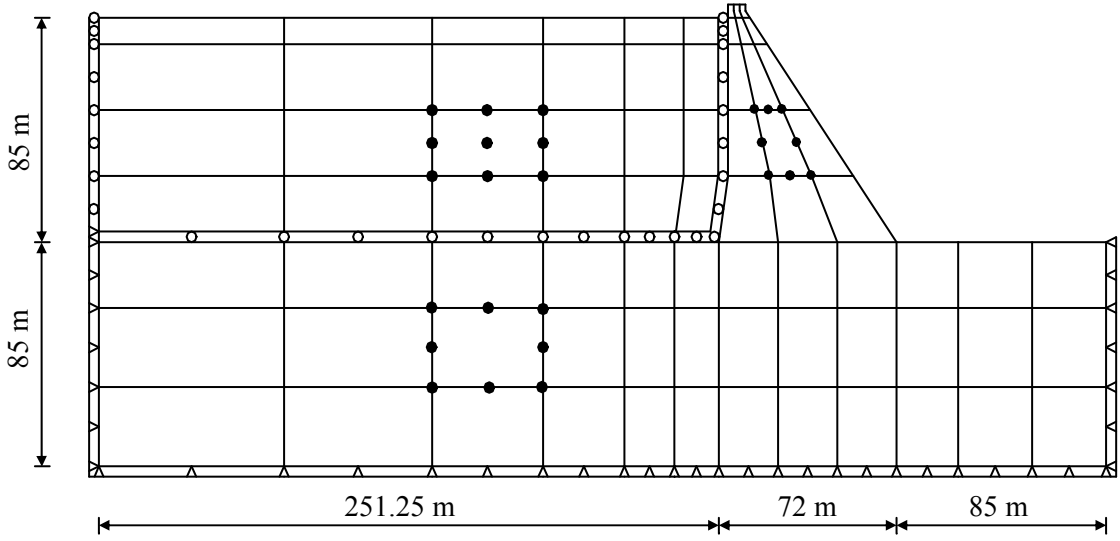
Şekil 16. Baraj-rezervuar etkileşim sisteminin sonlu eleman modeli

Sonlu eleman modelinde rezervuarda 9 düğüm noktalı 24 adet sıvı, barajda 8 düğüm noktalı 15 adet katı sonlu eleman kullanılmıştır. Rezervuar uzunluğu, rezervuar yüksekliğinin (H) 3 katı alınmıştır (Singhal, 1991). Hem sıvı hem de yapı ortamının her düğüm noktasında yatay ve düşey ötelenmelerden oluşan iki serbestlik derecesi mevcuttur. Eleman matrisleri katı için 3×3 normal, sıvı için 2×2 indirgenmiş integrasyon dereceleri kullanılarak elde edilmektedir (Bathe, 1996). Sıvı-yapı ara yüzeyinde iki ortamın yatay yerdeğiştirmelerinin sürekliliği kısıtlama denklemleri ile sağlanmıştır. Hesaplamalarda düzlem şekil değiştirme koşulları göz önünde bulundurulmuştur.

Analizlerde baraj betonu lineer elastik, homojen ve izotrop kabul edilmiştir. Baraj inşaatlarında kullanılan beton malzemesinin C30 olduğu dikkate alınarak TS 500'den alınan bilgilerle betonun elastisite modülü, birim hacim ağırlığı ve Poisson oranı sırasıyla 33×10^6 kN/m², 24 kN/m³ ve 0.20 olarak belirlenmiştir. Rezervuardaki sıvı için hacimsel elastisite modülü ve kütle yoğunluğu sırasıyla 207×10^4 kN/m², 1000 kg/m³ seçilmiştir. Kısıtlama parametresi hacimsel elastisite modülünün 100 katı olarak alınmıştır (Wilson ve Khalvati, 1983; Calayır ve Dumanoglu, 1993).

2.3.2. Baraj-Zemin-Rezervuar Etkileşim Sisteminin Sonlu Eleman Modeli

Sıvı-yapı etkileşim sistemlerinin Lagrange yaklaşımı dikkate alınarak yapılan stokastik dinamik analizlerinde zemin etkisinin incelenmesi de amaçlanmıştır. Bu nedenle baraj-zemin-rezervuar etkileşim sistemi sonlu elemanlar yöntemine göre modellenmiştir. Baraj-zemin-rezervuar etkileşim sisteminin sonlu eleman modeli Şekil 17’de verilmektedir.



Şekil 17. Baraj-zemin-rezervuar etkileşim sistemi sonlu eleman modeli

Baraj-zemin-rezervuar etkileşim sisteminin sonlu eleman modeli, baraj ve zeminde toplam 51 adet 8 düğüm noktalı, rezervuarda 24 adet 9 düğüm noktalı sonlu elemandan oluşmaktadır. Eleman matrisleri yapı ve zemin için 3×3 normal, sıvı için 2×2 indirgenmiş integrasyon dereceleri kullanılarak elde edilmektedir (Bathe, 1996). Baraj-zemin-rezervuar etkileşim sisteminin sonlu eleman modelinde memba ve mansap yönünde zemin uzunluğu sırasıyla $3H$ ve H alınmıştır. Zemin derinliği ise H olarak seçilmiştir. Her iki sonlu eleman modelinin analizinde de %5’lik sönüm oranı ve 0.005 s zaman aralığı dikkate alınmıştır.

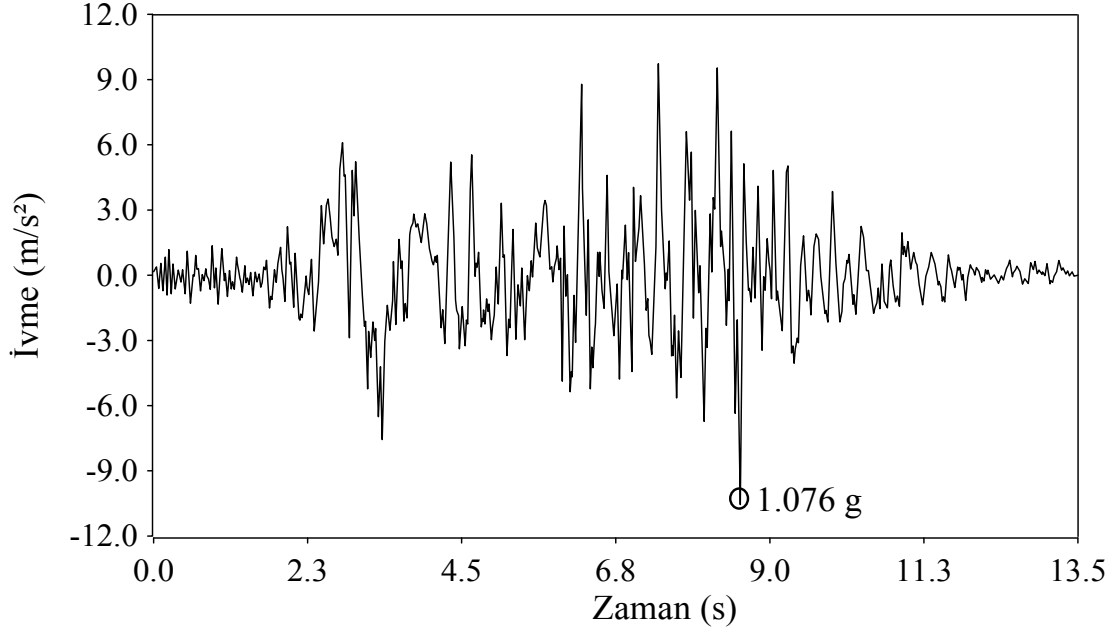
DSİ’den alınan bilgiler doğrultusunda Sarıyar Barajı’nın temelini metamorfik kayalık, silt ve quartz olduğu göz önüne alınarak zemin elastisite modülü 25×10^6 kN/m² olarak belirlenmiştir. Temel zemininin birim hacim ağırlığı 26 kN/m³, Poisson oranı 0.30 olarak belirlenmiştir (DSİ, 1991; Hançer, 2001).

2.4. Seçilen Yer Hareketinin Özellikleri

Etkileşim sistemlerinin stokastik dinamik analizleri gerçekleştirilirken stasyonerlik kabulü yapılmıştır. Stasyonerlik, istatistiksel özelliklerin zamandan bağımsız olduğunu ifade etmektedir. Mühendislikteki tüm rastgele işlemlerin bir başlangıç ve sonlarının olması nedeniyle gerçekte stasyoner olamazlar. Fakat pratik amaçlar için işlemler uygun yaklaşımlarla stasyoner olarak kabul edilebilirler (Chen ve Harichandran,1995).

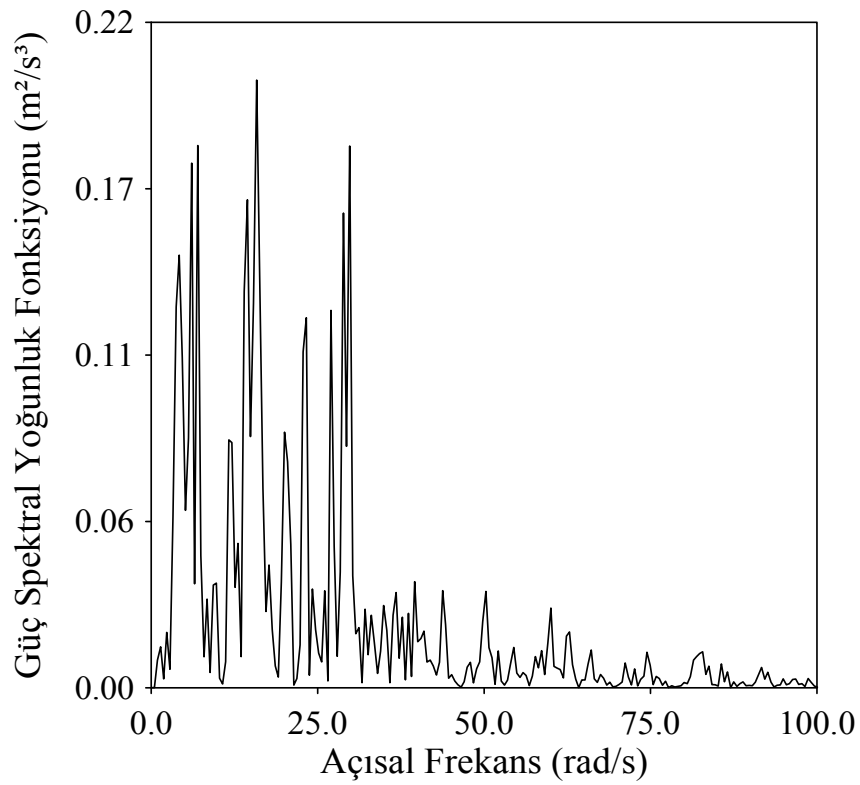
Stasyoner bir işlem için zamanın ötelenmesiyle bulunan tüm toplum istatistiklerinin stasyoner kalmasına ek olarak, tek bir örnek boyunca bulunan zaman istatistikleri toplum boyunca bulunan zaman istatistiklerine eşitse bu işlem ergodik işlem olarak adlandırılır (Bendat ve Piersol, 1971). Bu çalışmada da ergodiklik kabulü yapılarak problemin incelenmesinde tek bir deprem kaydı kullanılmaktadır.

Yer hareketi olarak 1971 San Fernando depremi Pacoima Baraj kaydı S16E bileşeni seçilmiştir. 13.5 s süren deprem kaydı, Sarıyar Barajı'na yatay (mamba-mansap) doğrultuda uygulanmıştır. Söz konusu depremin ivme kaydı (URL-1, 2003) Şekil 18'de verilmektedir.



Şekil 18. 1971 San Fernando depremi Pacoima Baraj kaydı S16E bileşeni

Güç spektral yoğunluk fonksiyonu bir dalganın gücünün frekansa karşı olan dağılımını gösterir ve integre edilirse toplam gücü verir. Stokastik analizde rastgele kuvvetin spektral yoğunluk fonksiyonunun belirlenmesi gerekmektedir. Zaman süreci kayıtları deterministik dinamik analizler için etki işlemini tanımlarken, spektral yoğunluk fonksiyonları da stokastik analizler için aynı görevi yapar. 1971 San Fernando depremi Pacoima Baraj kaydı S16E bileşeni için hesaplanan güç spektral yoğunluk fonksiyonu Şekil 19’da verilmektedir.



Şekil 19. 1971 San Fernando depremi Pacoima Baraj kaydı S16E bileşeninin güç spektral yoğunluk fonksiyonu

3. BULGULAR VE İRDELEMELER

3.1. Baraj-Rezervuar Etkileşim Sisteminin Lagrange Yaklaşımıyla Stokastik Dinamik Analizi

3.1.1. Frekanslar

Baraj-rezervuar etkileşim sisteminin STOCALF ve MULSAPF (Bayraktar, 1995) programıyla yapılan modal analizleri sonucu elde edilen ilk 20 frekans aşağıdaki tabloda verilmektedir.

Tablo 8. Baraj-rezervuar etkileşim sisteminin ilk 20 frekansı

Frekanslar (Hz)	MULSAPF	STOCALF
1	0.0439	0.0983
2	0.0489	0.1496
3	0.0768	0.2242
4	0.0869	0.2351
5	0.0937	0.2778
6	0.1030	0.2925
7	0.1116	0.3183
8	0.1222	0.3490
9	0.1370	0.3856
10	0.1544	0.4409
11	0.1783	0.4982
12	3.9597	3.9088
13	4.5470	4.5017
14	5.3731	5.2977
15	7.0776	6.9878
16	9.1705	8.6770
17	10.8559	9.2392
18	11.0612	11.1966
19	12.1340	11.9014
20	12.7356	12.4248

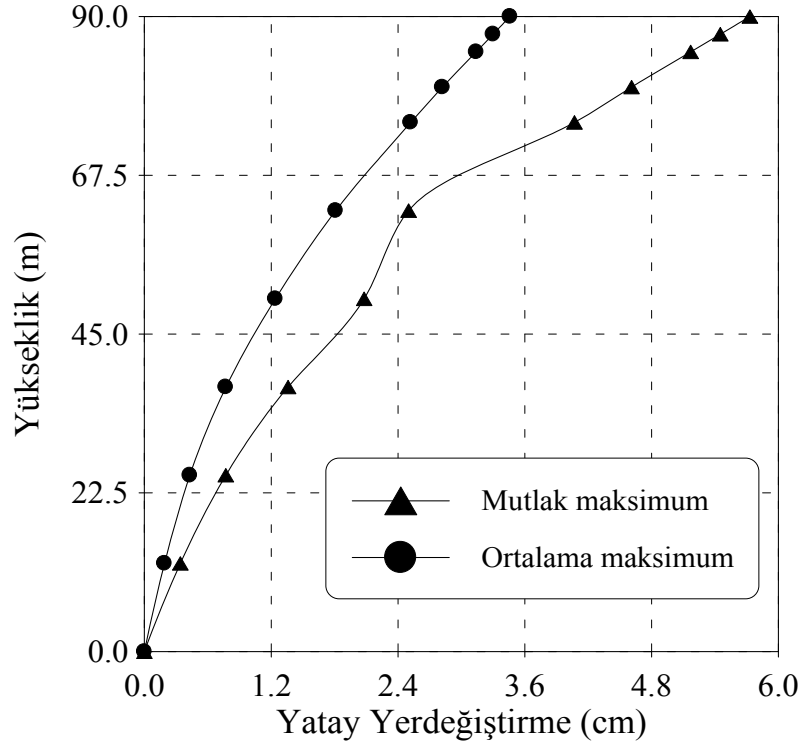
Baraj-rezervuar etkileşim sistemi için ilk 11 frekans yüzey salınım, diğerleri hacim değişim frekanslarıdır. Yüzey salınım frekanslarının yapının davranışında herhangi bir etkisi yoktur. Hacim değişim frekanslarının birincisi (12. frekans) Mulsapf programında 3.959 Hz, Stocalf programında 3.909 Hz olarak elde edilmiştir. Bu değerler birbirlerine oldukça yakındır. Aradaki küçük farkın Stocalf programının çözüm tekniğinden kaynaklandığı düşünüldüğü daha önceki bölümde belirtilmiştir. Çünkü Stocalf programında her serbestlik derecesine ait kütle değerleri elle hesaplanıp dışarıdan veri olarak girilmekte ve özdeğer analizinde farklı çözüm tekniği kullanılmaktadır.

3.1.2. Yerdeğiştirmeler ve Oluşma Frekansları

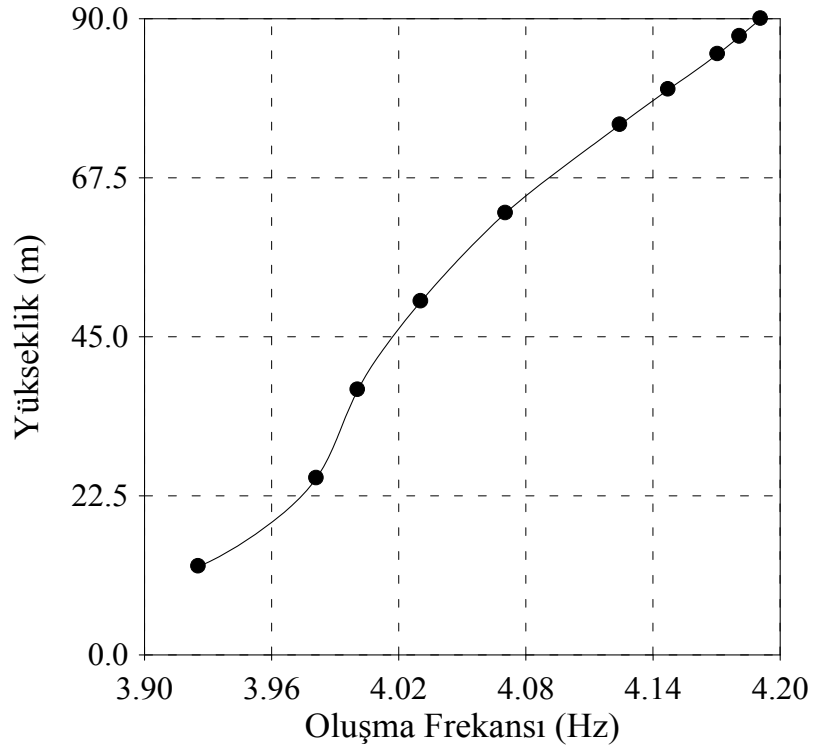
Baraj-rezervuar etkileşim sisteminin Stocalf programıyla yapılan stokastik dinamik analizi ve Mulsapf (Bayraktar, 1995) programıyla yapılan deterministik dinamik analizi sonucu dinamik davranışlar elde edilmiştir. Şekillerde stokastik dinamik analizler sonucu elde edilen dinamik davranışlar ortalama maksimum ifadesiyle, deterministik dinamik analizler sonucu elde edilen dinamik davranışlar mutlak maksimum ifadesiyle gösterilmektedir.

Baraj-rezervuar etkileşim sisteminin stokastik ve deterministik dinamik analizleri sonucu baraj memba yüzeyindeki yatay yerdeğiştirmeler elde edilerek Şekil 20'de gösterilmiştir. Şekil 20'de görüldüğü gibi stokastik dinamik analiz sonucu elde edilen ortalama maksimum yatay yerdeğiştirmeler, deterministik dinamik analiz sonucu elde edilen mutlak maksimum yatay yerdeğiştirmelerden daha küçük çıkmıştır. Stokastik dinamik analizde ortalama maksimum değerler, bütün maksimum davranış değerlerinin ortalaması alınarak hesaplandığı için bulunan ortalama maksimum değerlerin mutlak maksimum değerlerden küçük olması beklenen bir durumdur.

Stokastik dinamik analizin önemli özelliklerinden biri yapı tepkilerinin oluşma frekanslarının hesaplanmasıdır. Baraj-rezervuar etkileşim sisteminin baraj memba yüzeyindeki ortalama maksimum yatay yerdeğiştirmelerinin oluşma frekansları hesaplanarak Şekil 21'de verilmektedir. Şekil 21'den baraj kret noktasındaki yatay yerdeğiştirmenin oluşma frekansı 4.19 Hz, periyodu ise 0.238 s olarak elde edilmiştir. Şekilde görüleceği üzere memba topuğundan kret noktasına yaklaştıkça oluşma frekans değerleri artmaktadır.



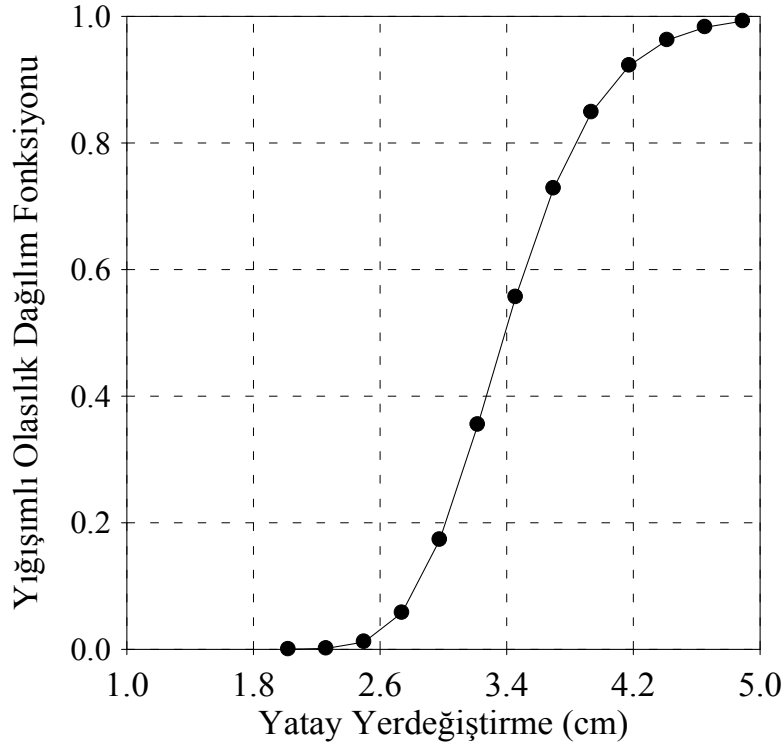
Şekil 20. Baraj-rezervuar etkileşim sisteminde baraj memba yüzeyinde oluşan yatay yerdeğıştirmeler



Şekil 21. Baraj-rezervuar etkileşim sisteminde baraj memba yüzeyinde oluşan yatay yerdeğıştirmelerin oluşma frekansları

3.1.2.1. Yerdeğiştirmelerin Yığışımlı Olasılık Dağılım Fonksiyonu

Stokastik dinamik analizin diğer bir özelliği, seçilmiş bir tepki değerinin oluşma olasılığının belirlenebilmesidir. Oluşma olasılığının hesaplanması yığışımlı olasılık dağılım fonksiyonları ile mümkündür. Yığışımlı olasılık dağılım fonksiyonları kullanılarak yapıdaki davranışın olasılıkları ile ilgili bilgi edinilmektedir. Şekil 22’de barajın memba yüzeyi kret noktasındaki (C noktası) ortalama maksimum yatay yerdeğiştirmenin yığışımlı olasılık dağılım fonksiyonu verilmektedir. Şekil 22 incelendiğinde kret noktasındaki ortalama maksimum yatay yerdeğiştirmenin (3.46 cm) aşılma olasılığı yaklaşık olarak %58’dir. Ayrıca 2 cm’nin altında bir maksimum değerin oluşma olasılığı yok denecek kadar az iken, 4.9 cm’nin altında bir maksimum değerin oluşma olasılığı %100’dür.



Şekil 22. Baraj-rezervuar etkileşim sisteminde baraj kret noktası (C noktası) yatay yerdeğiştirmesinin yığışımlı olasılık dağılım fonksiyonu

3.1.3. Gerilmeler ve Oluşma Frekansları

1971 San Fernando depremi etkisindeki baraj-rezervuar etkileşim sisteminin deterministik ve stokastik dinamik analizleri gerçekleştirilerek baraj memba yüzeyindeki yatay, düşey ve kayma gerilme bileşenleri elde edilmiştir. Yatay, düşey ve kayma gerilmeleri Şekil 23-25'te gösterilmektedir. Gerilme değerleri baraj memba yüzeyindeki sonlu elemanların sol taraftaki Gauss noktalarında elde edilmiştir. Şekiller incelendiğinde stokastik dinamik analiz sonuçlarının deterministik dinamik analiz sonuçlarından daha küçük çıktığı görülmektedir. Ayrıca, her iki analiz sonucu hesaplanan gerilme bileşenlerinde krete doğru azalma gözlenmiştir.

Barajın memba topuğundaki gerilme bileşenleri A Gauss noktasında elde edilmiş, Tablo 9'da verilmiştir. Tablo 9'da en büyük gerilme değerlerinin düşey bileşende oluştuğu gözlenmiştir.

Tablo 9. Baraj-rezervuar etkileşim sisteminde baraj memba topuğunda (A Gauss noktası) oluşan gerilmeler

Gerilmeler	Yatay Gerilme (kN/m ²)	Düşey Gerilme (kN/m ²)	Kayma Gerilmesi (kN/m ²)
Ortalama maksimum	1760.80	7043.10	1755.80
Mutlak maksimum	2120.80	10641.80	2771.60

Stokastik dinamik analiz sonucu yatay, düşey ve kayma gerilmelerinin oluşma frekansları Şekil 26-28'de verilmektedir. Barajın memba topuğunda yatay gerilmenin oluşma frekansı 4.01 Hz, düşey gerilmenin oluşma frekansı 4.00 Hz, kayma gerilmesinin oluşma frekansı 3.87 Hz olarak elde edilmiştir. Oluşma frekansı grafikleri genellikle yükseklikle artan bir eğilim göstermektedirler.

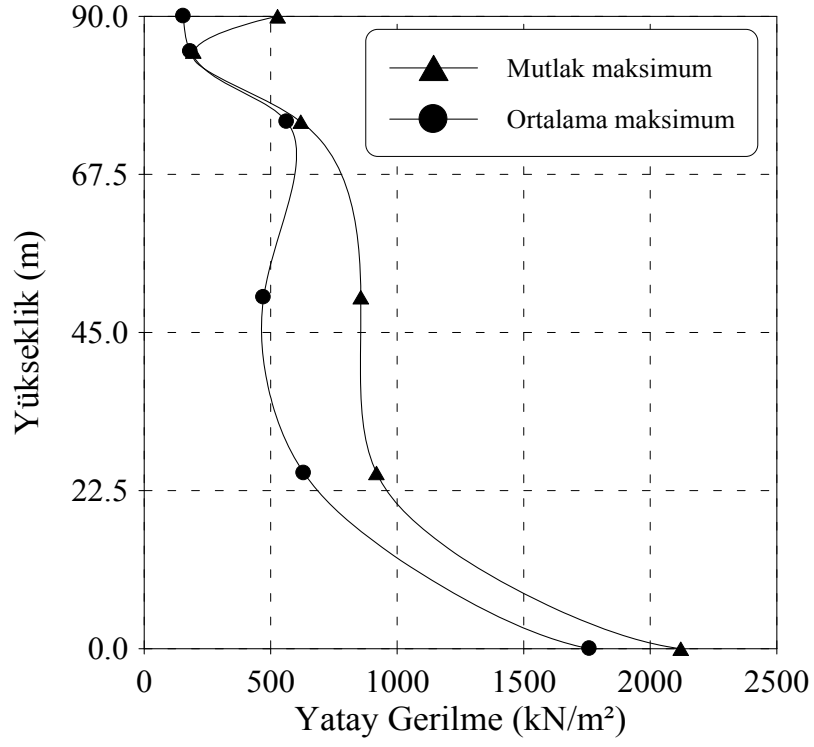
Beton ağırlık barajın I-I ve II-II kesitlerindeki gerilme bileşenlerinin yatay uzaklıkla değişimini görmek amacıyla incelemeler yapılmıştır. Barajın I-I kesiti Şekil 16'da görüldüğü gibi tabana yakın sonlu elemanların üst kısmını, II-II kesiti krete yakın elemanların alt kısmını temsil etmektedir.

Şekil 29-31'da I-I kesitindeki yatay, düşey gerilmeler ve kayma gerilmelerinin yatay uzaklıkla değişimi verilmektedir. I-I kesitindeki düşey gerilme değerleri yatay gerilme ve kayma gerilmelerine oranla çok daha büyük çıkmıştır. Barajın memba tarafında yatay gerilmeler ve kayma gerilmeleri küçük çıkarken, düşey gerilmeler en büyük değerleri almaktadır. Barajın ortasına yakın kısımlarda yatay ve düşey gerilme bileşenlerinin değerleri azalmaktadır. Şimdiye kadar yapılan bütün analiz sonuçlarında olduğu gibi yine mutlak maksimum gerilmeler ortalama maksimum gerilmelerden daha büyük çıkmıştır.

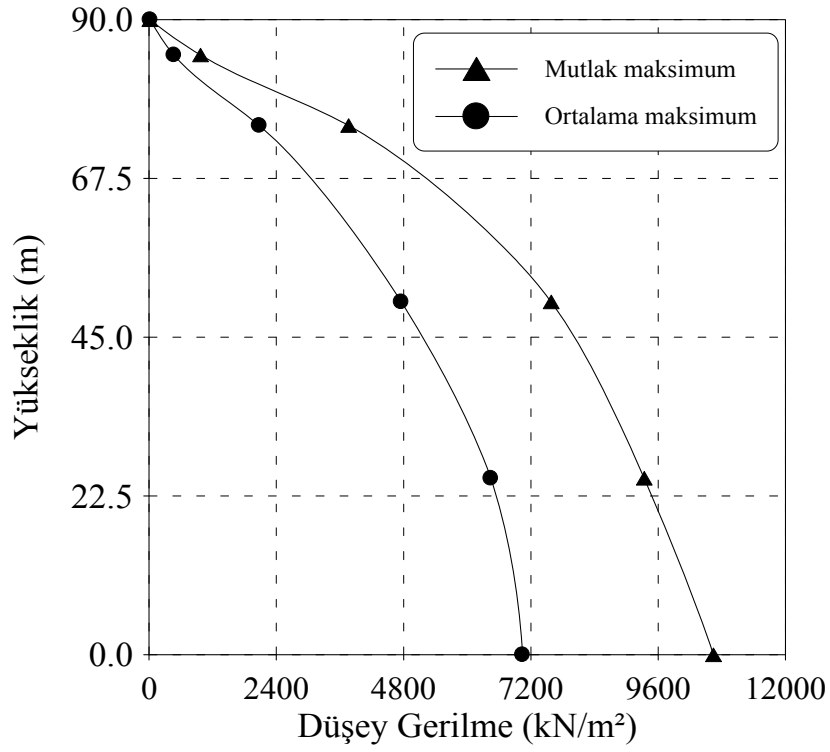
I-I kesitinde elde edilen ortalama maksimum gerilme bileşenlerinin oluşma frekansları Şekil 32-34'te verilmektedir. Ortalama maksimum yatay gerilmenin oluşma frekansı yaklaşık 20 m'de pik yaparken (4.47 Hz), ortalama maksimum düşey gerilme ve kayma gerilmesinin oluşma frekansları (4.16 Hz, 4.56 Hz) 3 m'de maksimum değerleri almaktadırlar.

Şekil 35-37'de II-II kesitindeki yatay, düşey gerilmeler ve kayma gerilmelerinin yatay uzaklıkla değişimi verilmektedir. II-II kesitindeki yatay gerilmeler barajın memba tarafında en küçük değeri alırken gittikçe artan bir dağılım göstermekte, barajın mansap tarafında bu artış biraz azalmaktadır. II-II kesitindeki düşey gerilmeler barajın memba ve mansap tarafında en büyük değerleri, barajın orta kısmında ise en küçük değeri almaktadır. II-II kesitindeki kayma gerilmeleri barajın memba tarafında en küçük değeri almakta olup gittikçe artan bir değişim göstermektedir.

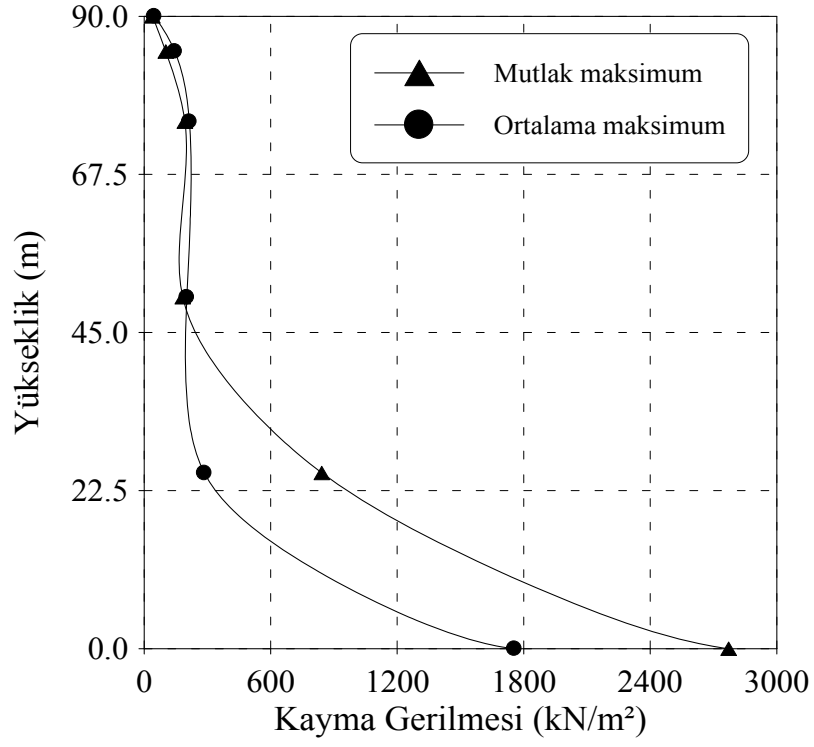
Şekil 38-40'ta ortalama maksimum gerilme bileşenlerinin oluşma frekansları görülmektedir. Ortalama maksimum yatay gerilmenin oluşma frekansı barajın ortasına doğru en küçük değeri alırken (4.92 Hz), düşey gerilmenin oluşma frekansı en büyük değeri almaktadır (5.76 Hz). Ortalama maksimum kayma gerilmelerinin oluşma frekansları kayma gerilmelerinde olduğu gibi artan bir değişim sergilemektedir.



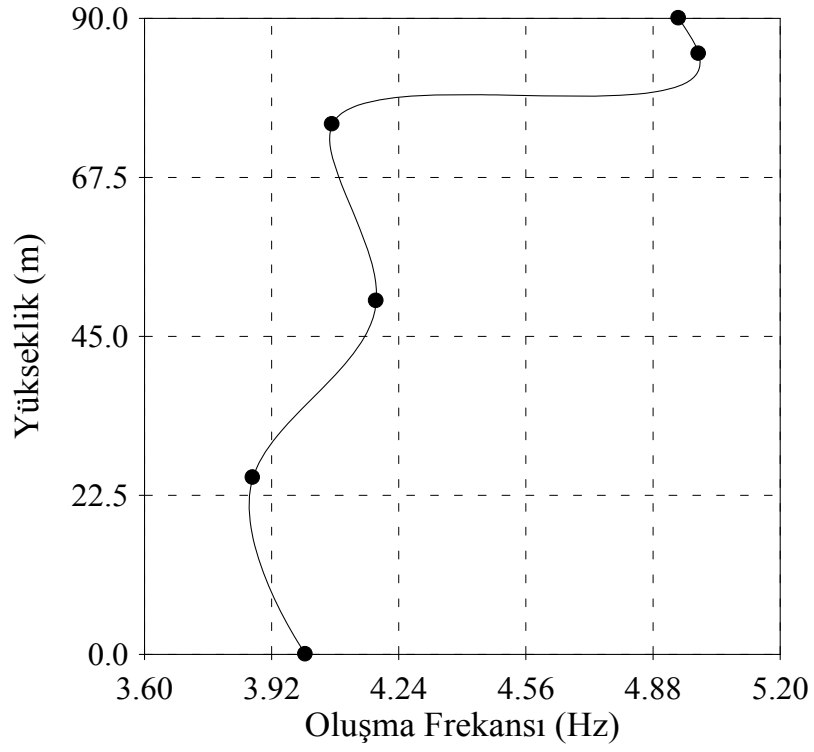
Şekil 23. Baraj-rezervuar etkileşim sisteminde baraj memba yüzeyinde oluşan yatay gerilmeler



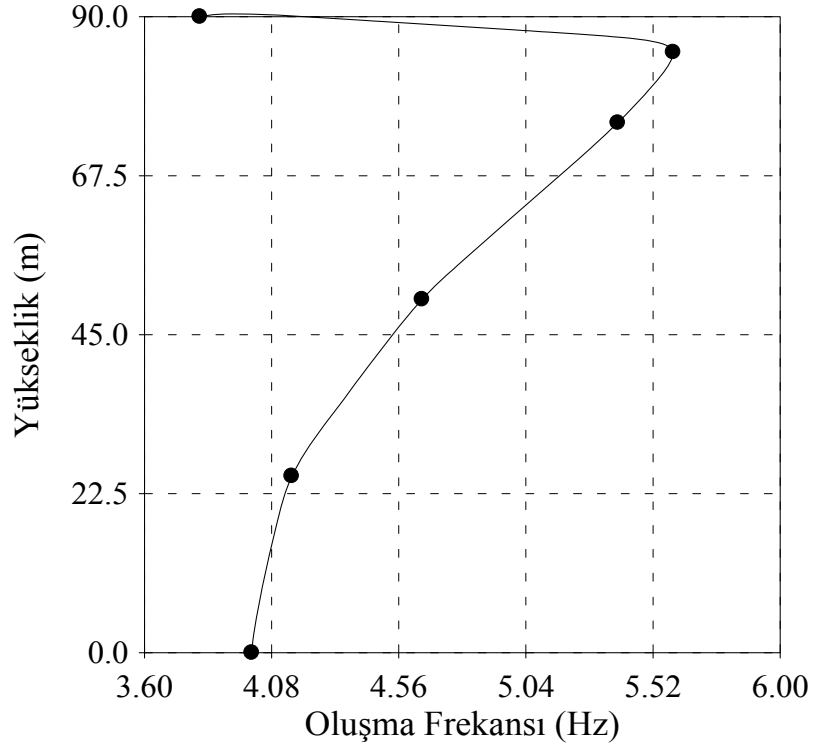
Şekil 24. Baraj-rezervuar etkileşim sisteminde baraj memba yüzeyinde oluşan düşey gerilmeler



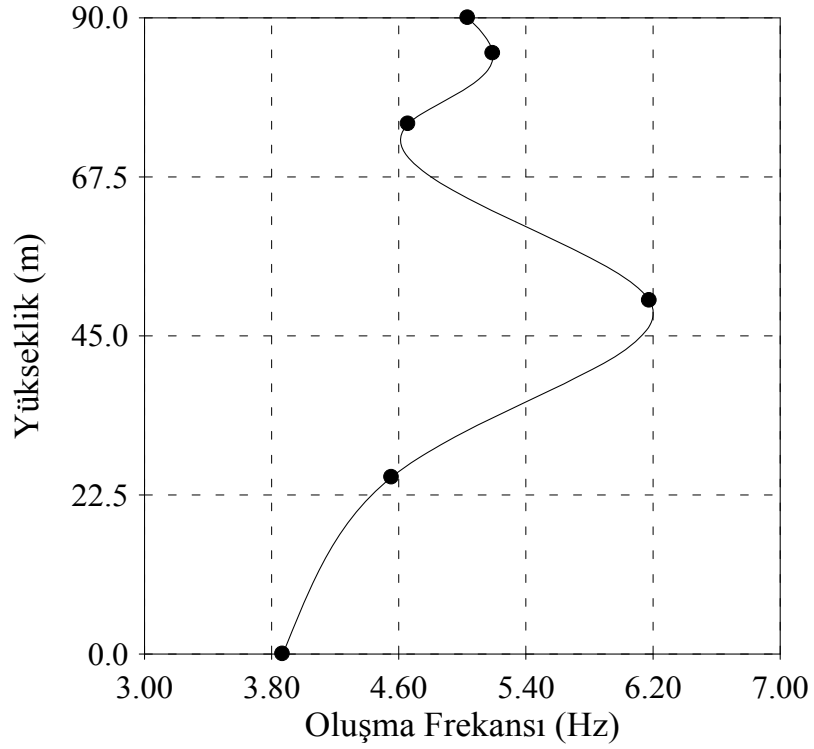
Şekil 25. Baraj-rezervuar etkileşim sisteminde baraj memba yüzeyinde oluşan kayma gerilmeleri



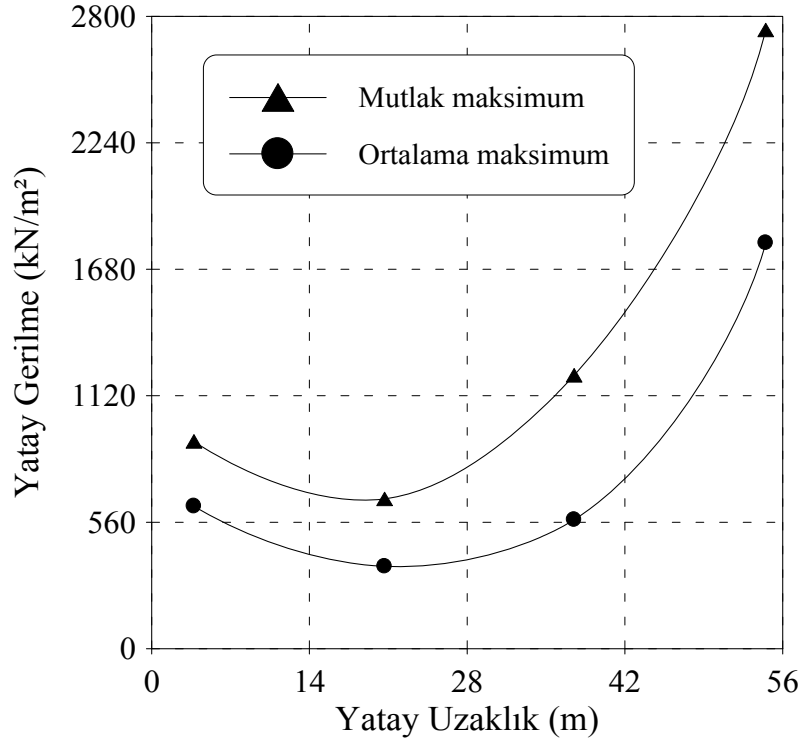
Şekil 26. Baraj-rezervuar etkileşim sisteminde baraj memba yüzeyinde oluşan yatay gerilmelerin oluşma frekansları



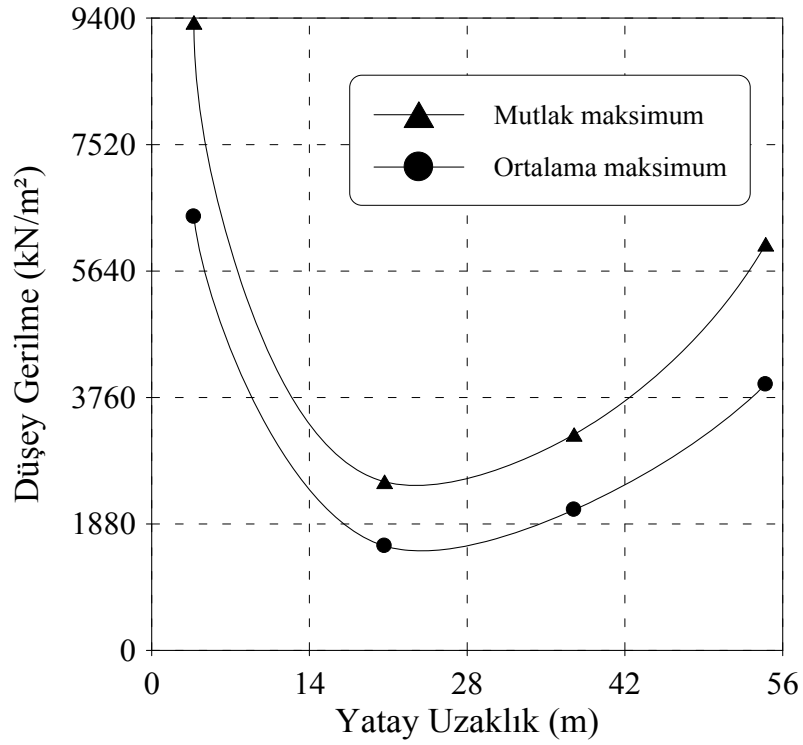
Şekil 27. Baraj-rezervuar etkileşim sisteminde baraj memba yüzeyinde oluşan düşey gerilmelerin oluşma frekansları



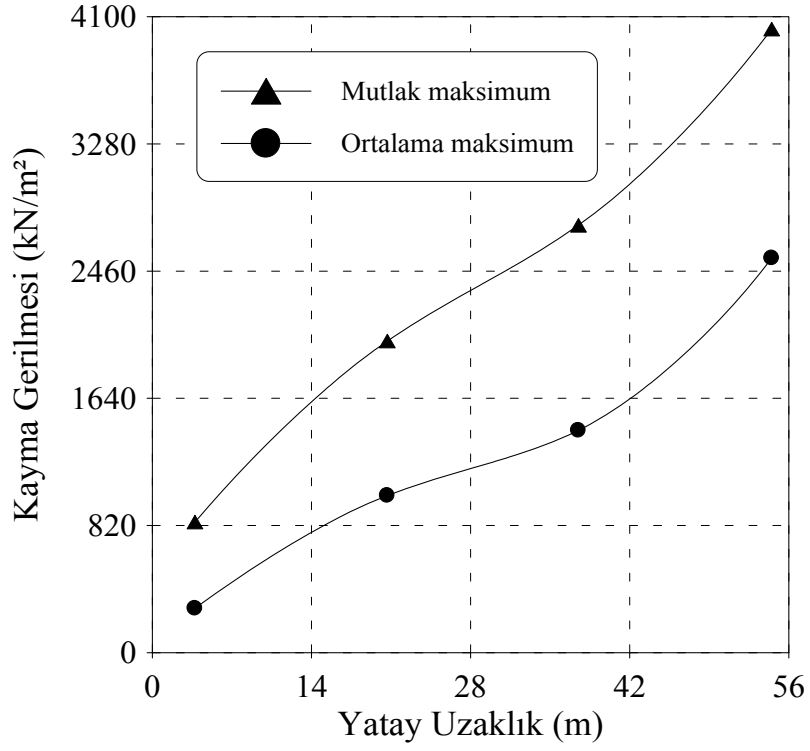
Şekil 28. Baraj-rezervuar etkileşim sisteminde baraj memba yüzeyinde oluşan kayma gerilmelerinin oluşma frekansları



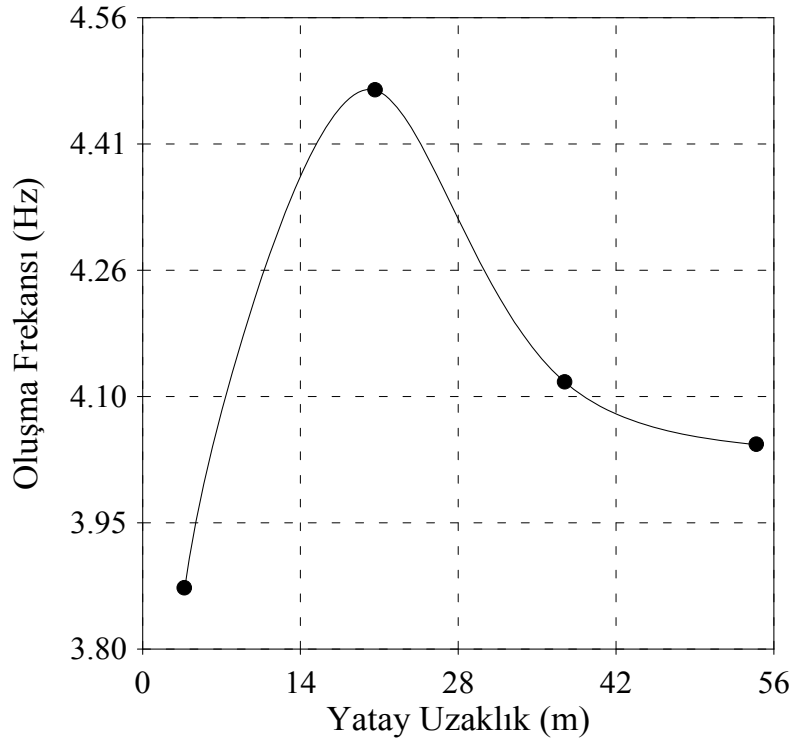
Şekil 29. Baraj-rezervuar etkileşim sistemi I-I kesitinde oluşan yatay gerilmeler



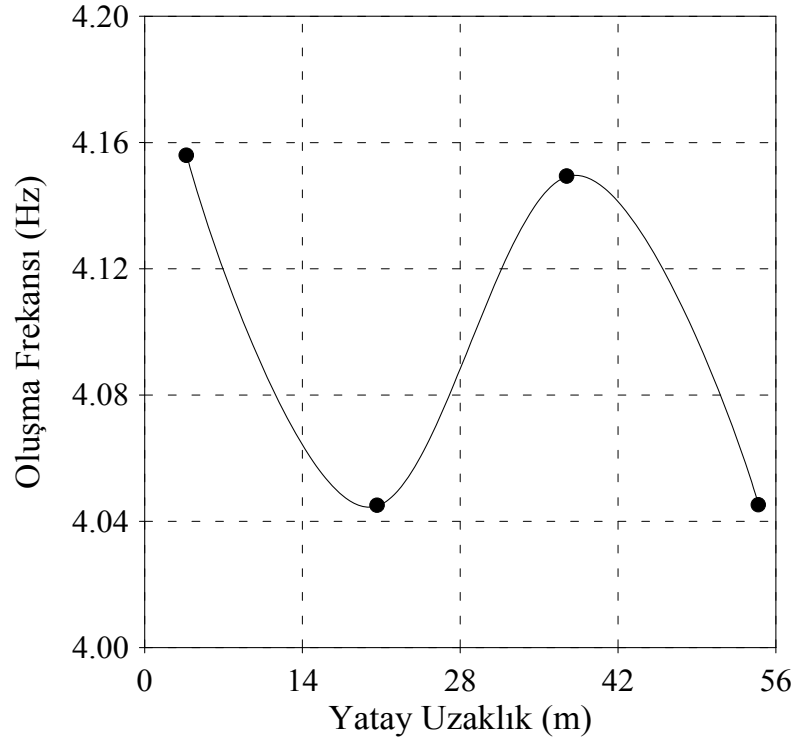
Şekil 30. Baraj-rezervuar etkileşim sistemi I-I kesitinde oluşan düşey gerilmeler



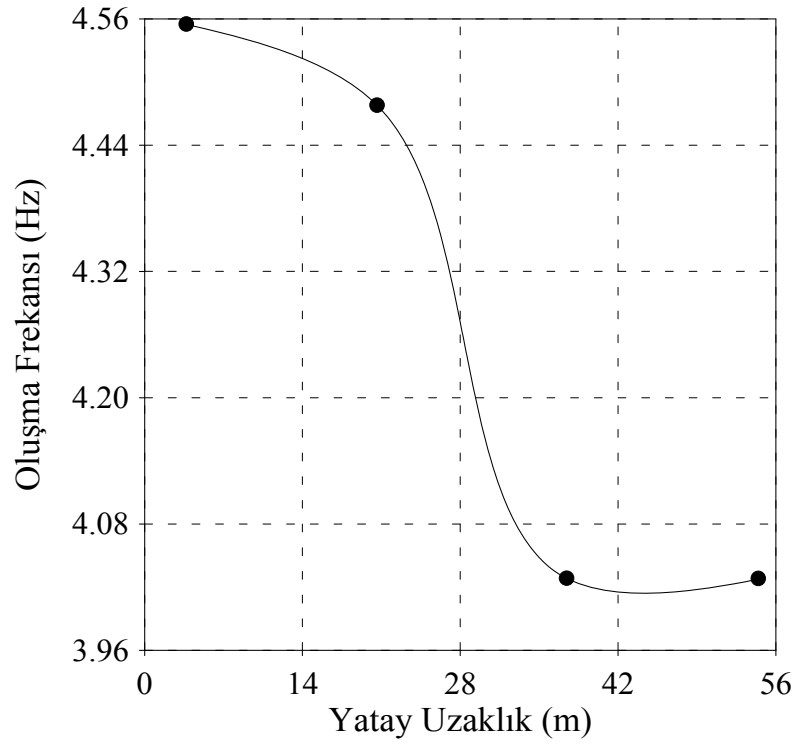
Şekil 31. Baraj-rezervuar etkileşim sistemi I-I kesitinde oluşan kayma gerilmeleri



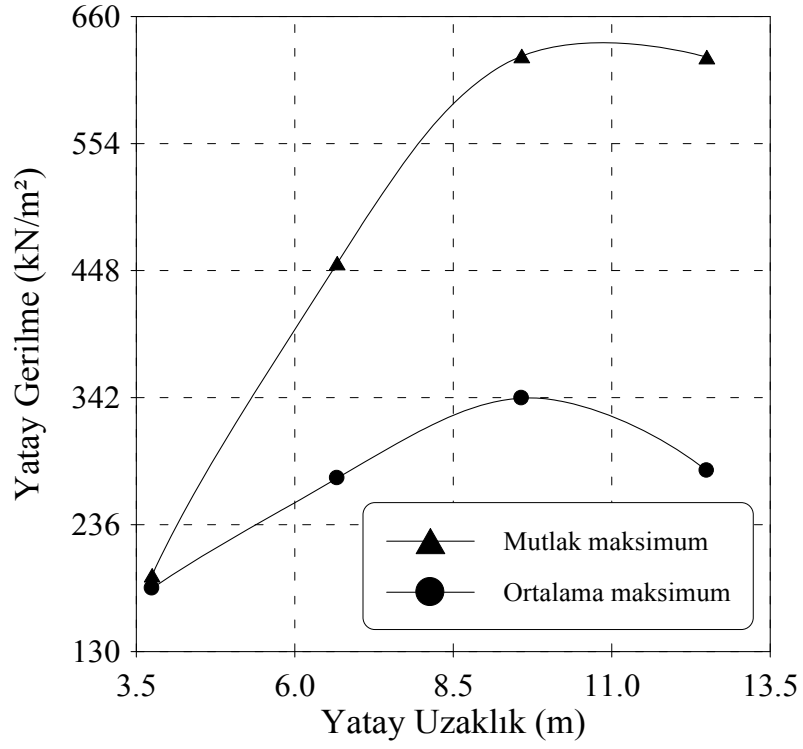
Şekil 32. Baraj-rezervuar etkileşim sistemi I-I kesitinde oluşan ortalama maksimum yatay gerilmelerin oluşma frekansları



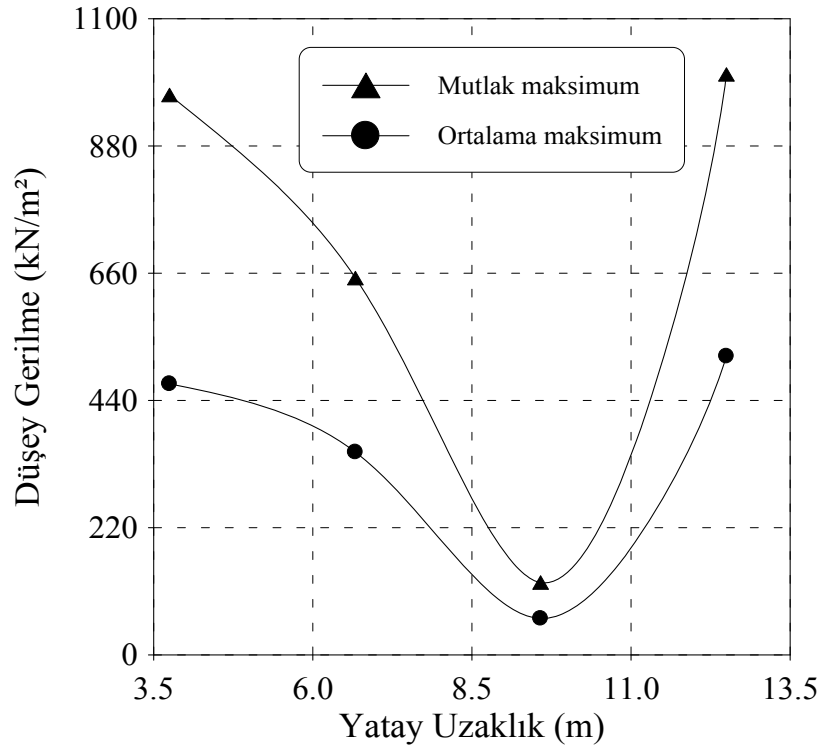
Şekil 33. Baraj-rezervuar etkileşim sistemi I-I kesitinde oluşan ortalama maksimum düşey gerilmelerin oluşma frekansları



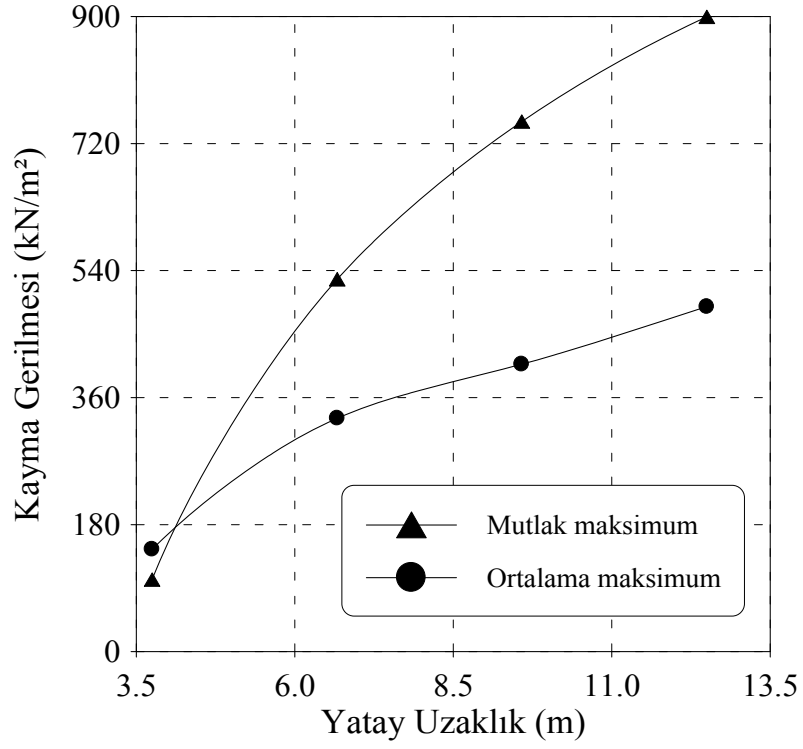
Şekil 34. Baraj-rezervuar etkileşim sistemi I-I kesitinde oluşan ortalama maksimum kayma gerilmelerinin oluşma frekansları



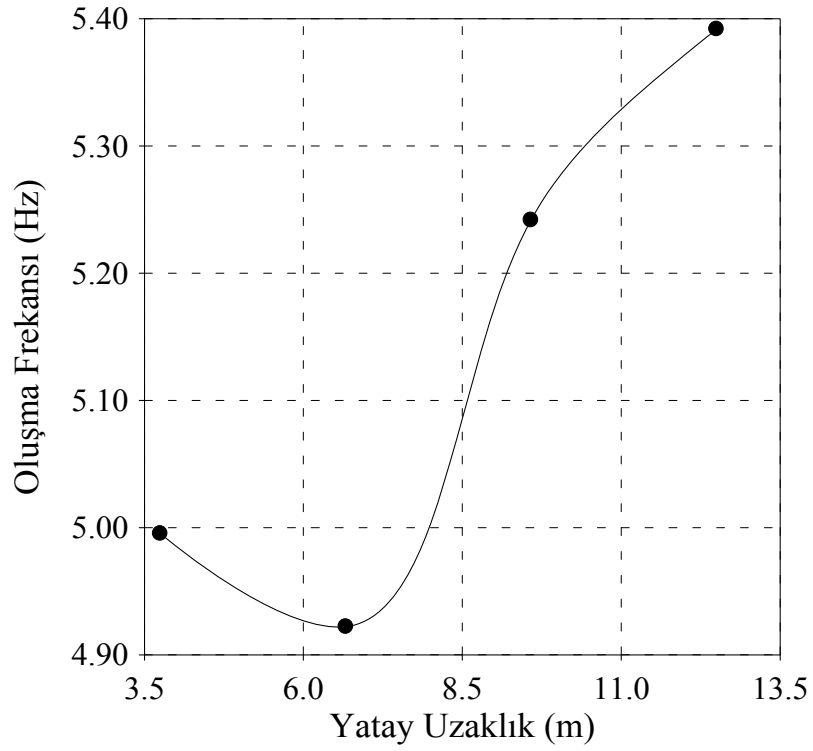
Şekil 35. Baraj-rezervuar etkileşim sistemi II-II kesitinde oluşan yatay gerilmeler



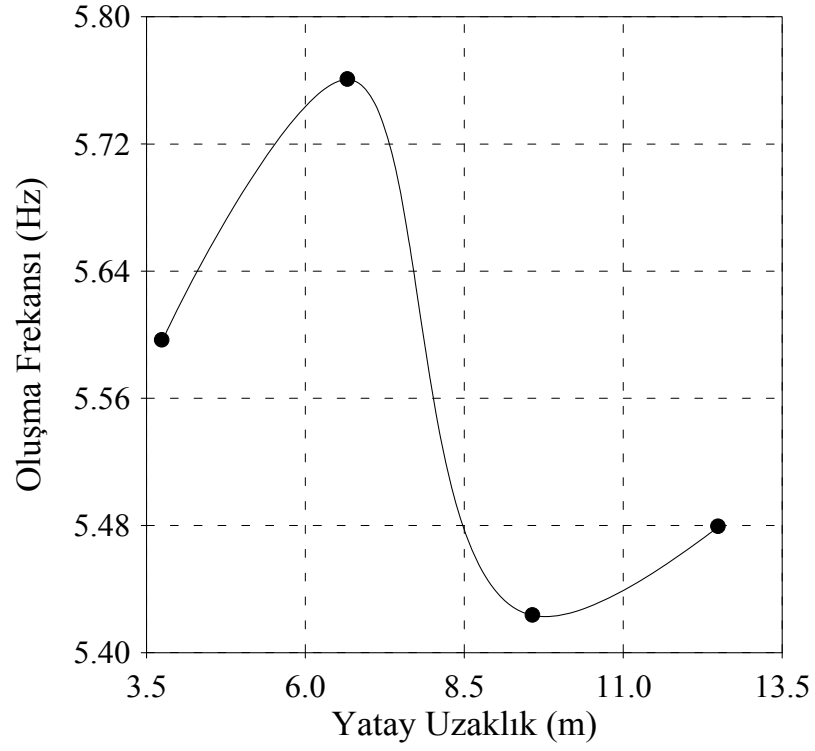
Şekil 36. Baraj-rezervuar etkileşim sistemi II-II kesitinde oluşan düşey gerilmeler



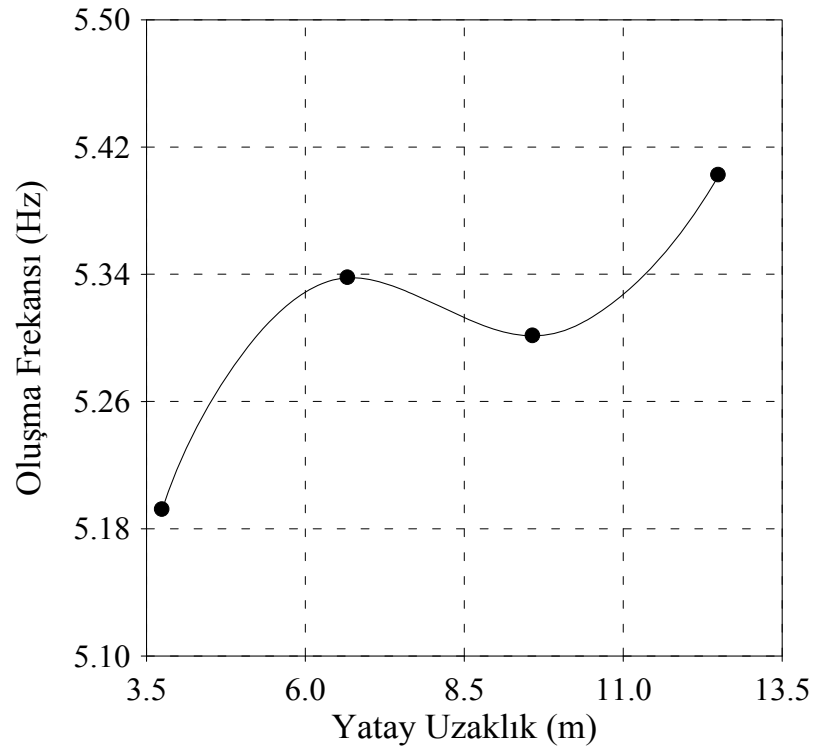
Şekil 37. Baraj-rezervuar etkileşim sistemi II-II kesitinde oluşan kayma gerilmeleri



Şekil 38. Baraj-rezervuar etkileşim sistemi II-II kesitinde oluşan ortalama maksimum yatay gerilmelerin oluşma frekansları



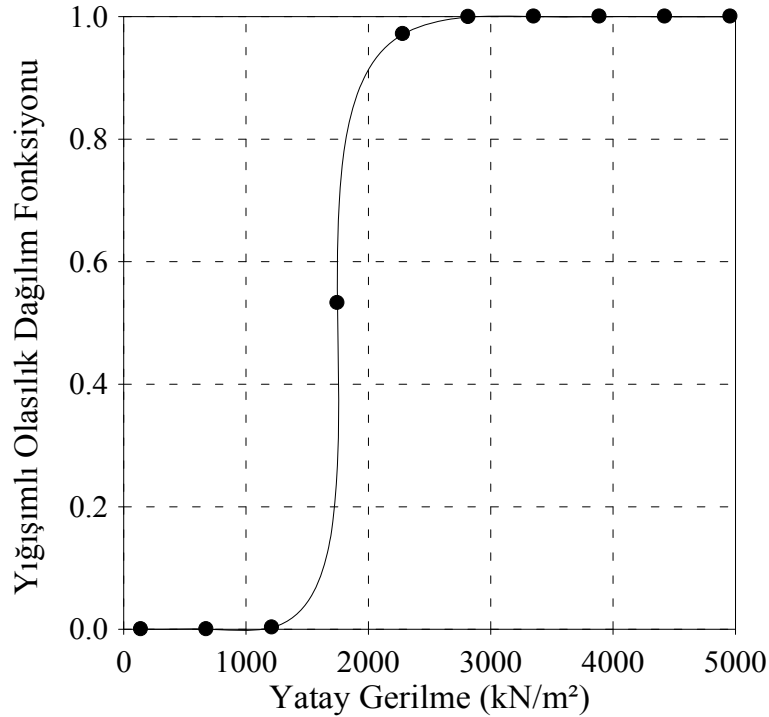
Şekil 39. Baraj-rezervuar etkileşim sistemi II-II kesitinde oluşan ortalama maksimum düşey gerilmelerin oluşma frekansları



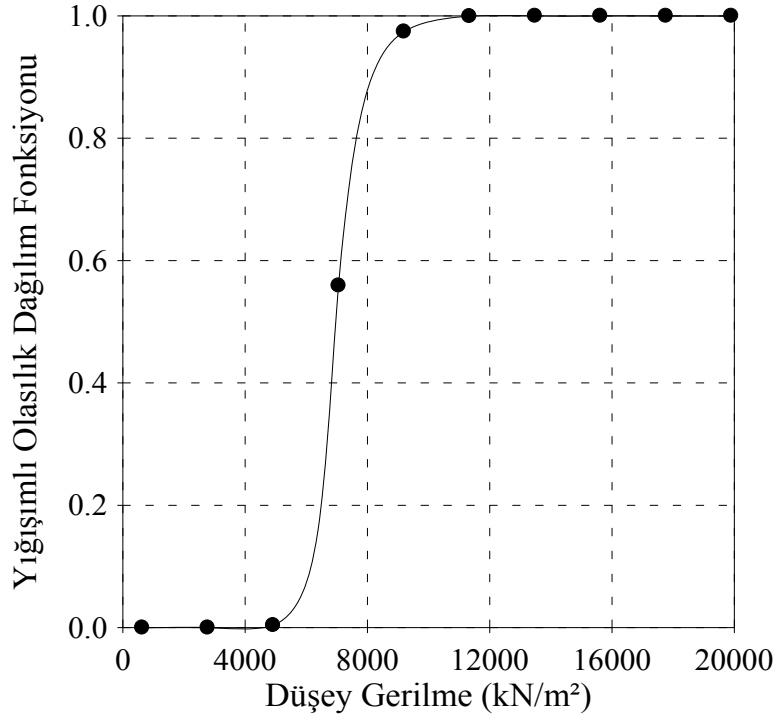
Şekil 40. Baraj-rezervuar etkileşim sistemi II-II kesitinde oluşan ortalama maksimum kayma gerilmelerinin oluşma frekansları

3.1.3.1. Gerilmelerin Yığılımlı Olasılık Dağılım Fonksiyonu

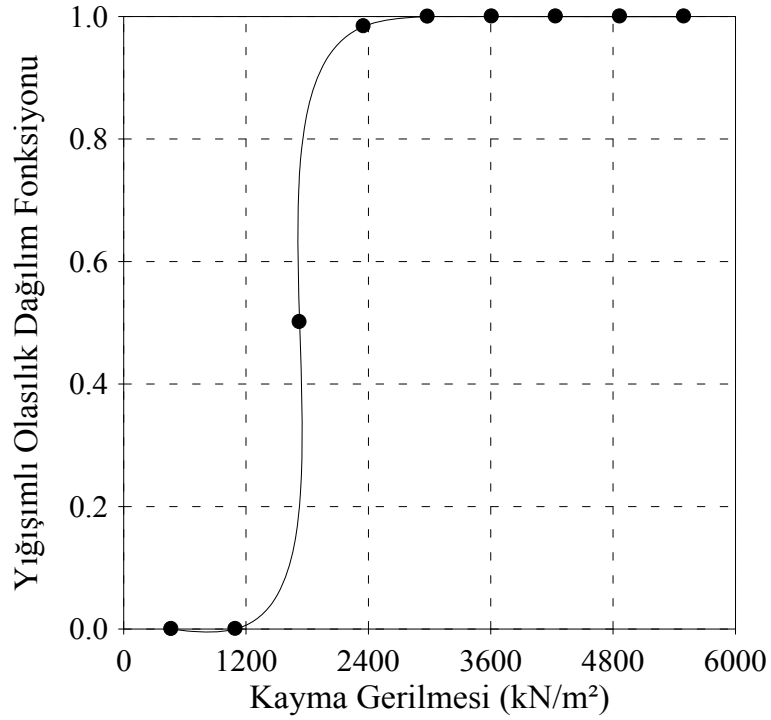
Baraj-rezervuar etkileşim sisteminin STOCALF programıyla stokastik dinamik analizi gerçekleştirilerek baraj memba topuğundaki (A Gauss noktası) gerilme bileşenlerinin yığılımlı olasılık dağılım fonksiyonları elde edilmiştir. Şekil 41 incelendiğinde barajın memba topuğundaki yatay gerilmenin (1760.80 kN/m^2) aşılma olasılığı yaklaşık %52'dir. 1250 kN/m^2 'nin altında bir maksimum değer oluşma olasılığı çok az iken, 2800 kN/m^2 'nin altında bir maksimum değer oluşma olasılığı %100'dür. Şekil 42 incelendiğinde barajın memba topuğundaki düşey gerilmenin (7043.10 kN/m^2) aşılma olasılığı %57 civarındadır. 5000 kN/m^2 'nin altında bir maksimum değer oluşma olasılığı yok denecek kadar az iken, 11000 kN/m^2 'nin altında bir maksimum değer oluşma olasılığına kesin gözüyle bakılabilir. Şekil 43 incelendiğinde barajın memba topuğundaki kayma gerilmesinin (1755.80 kN/m^2) aşılma olasılığı yaklaşık olarak %50 olup, 1000 kN/m^2 'nin altında bir maksimum değer oluşma olasılığı çok azken, 2900 kN/m^2 'nin altında bir maksimum değer oluşma olasılığı %100'dür.



Şekil 41. Baraj-rezervuar etkileşim sisteminde baraj memba topuğundaki (A Gauss noktası) ortalama maksimum yatay gerilmenin yığılımlı olasılık dağılım fonksiyonu



Şekil 42. Baraj-rezervuar etkileşim sisteminde baraj memba topuğundaki (A Gauss noktası) ortalama maksimum düşey gerilmenin yığışımlı olasılık dağılım fonksiyonu



Şekil 43. Baraj-rezervuar etkileşim sisteminde baraj memba topuğundaki (A Gauss noktası) ortalama maksimum kayma gerilmesinin yığışımlı olasılık dağılım fonksiyonu

3.1.4. Hidrodinamik Basınçlar ve Oluşma Frekansları

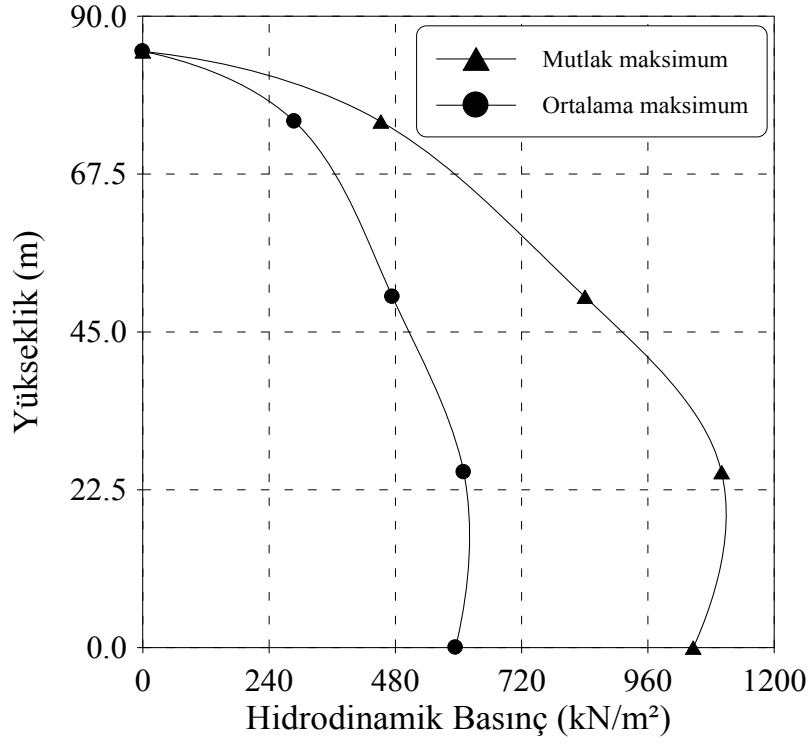
Baraj-rezervuar etkileşim sisteminin Lagrange yaklaşımına dayalı stokastik ve deterministik dinamik analizleri sonucu baraj memba yüzeyi boyunca elde edilen hidrodinamik basınçların değişimi Şekil 44'te gösterilmektedir. Hidrodinamik basınç değerleri baraj-rezervuar etkileşim sisteminin ara yüzeyine yakın sıvı elemanların Gauss noktalarında elde edilmiştir. Şekil 44'ten de görülmektedir ki hidrodinamik basınçların stokastik dinamik analizinden elde edilen ortalama maksimum değerleri, deterministik dinamik analizinden elde edilen mutlak maksimum değerlerinden daha küçüktür. Rezervuarın yüzeyine yaklaştıkça hidrodinamik basınç değeri azalmakta ve yüzeye ulaşıldığında bu değer oldukça küçük olmakta ve bu nedenle de ihmal edilmektedir.

Baraj-rezervuar etkileşim sisteminin ara yüzeyine yakın sıvı elemanın memba topuğunda elde edilen hidrodinamik basınç değerleri Tablo 10'da görülmektedir.

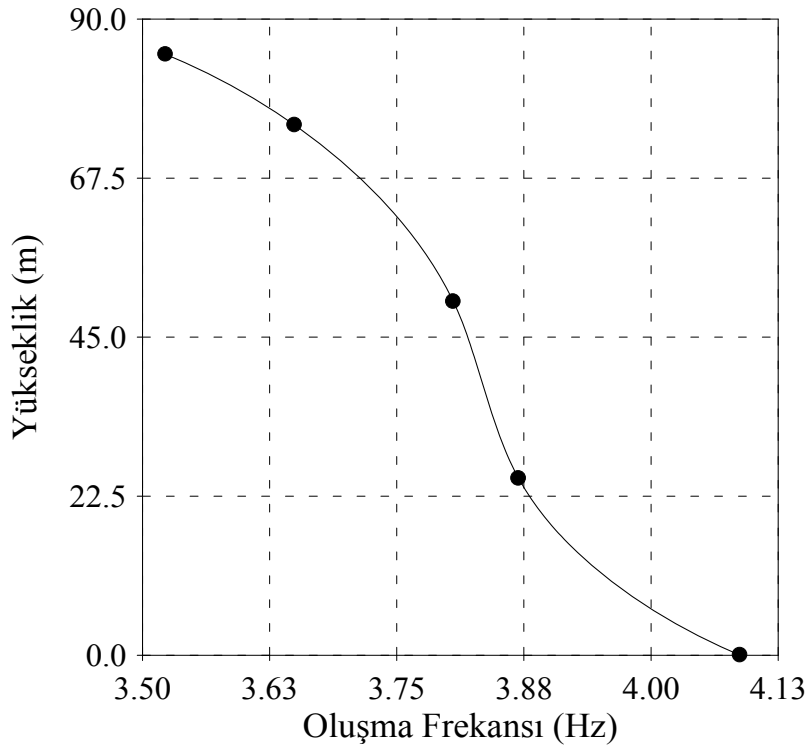
Tablo 10. Baraj-rezervuar etkileşim sisteminin ara yüzeyine yakın sıvı elemanın memba topuğunda (B Gauss noktası) oluşan hidrodinamik basınçlar

Hidrodinamik Basınç (kN/m ²)	
Ortalama maksimum	594.66
Mutlak maksimum	1046.00

Baraj-rezervuar etkileşim sisteminin stokastik dinamik analiz sonucu baraj memba yüzeyinde elde edilen ortalama maksimum hidrodinamik basınçların oluşma frekansları Şekil 45'te verilmektedir. Baraj memba topuğunda elde edilen ortalama maksimum hidrodinamik basıncın oluşma frekansı 4.09 Hz, periyodu ise 0.245 s'dir. Barajın memba topuğundan rezervuar yüzeyine doğru gidildikçe oluşma frekansları ve hidrodinamik basınç değerleri azalmaktadır.



Şekil 44. Baraj-rezervuar etkileşim sisteminde baraj memba yüzeyinde elde edilen hidrodinamik basınç değişimi



Şekil 45. Baraj-rezervuar etkileşim sisteminde baraj memba yüzeyinde oluşan ortalama maksimum hidrodinamik basınçların oluşma frekansları

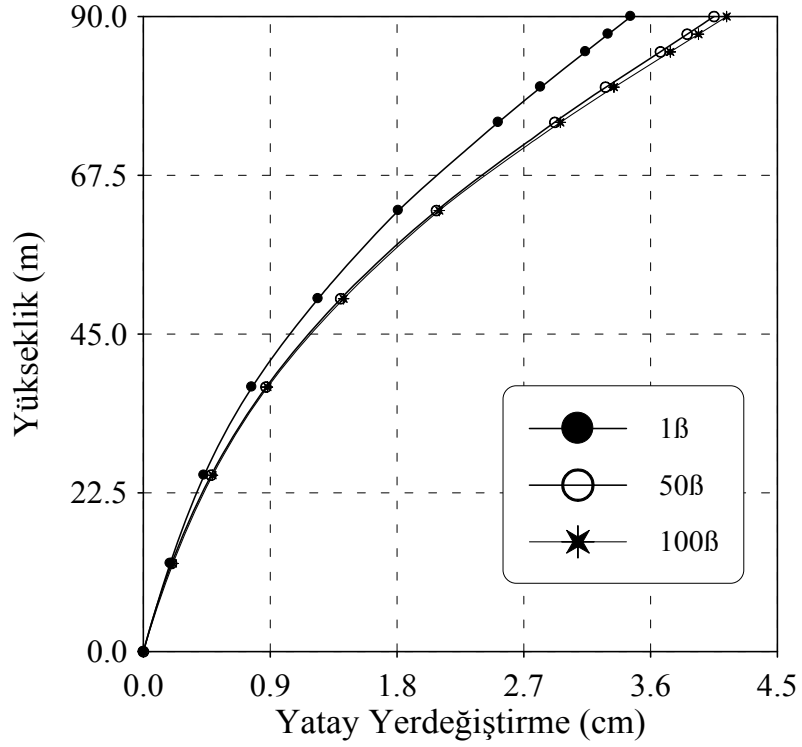
3.1.5. Sıvı Sıkışabilirliğinin Baraj-Rezervuar Etkileşim Sisteminin Stokastik Davranışı Üzerindeki Etkisi

Bu bölümde sıvı sıkışabilirliğinin baraj-rezervuar etkileşim sisteminin stokastik davranışı üzerindeki etkisini incelemek amacıyla stokastik dinamik analizler gerçekleştirilecektir. Lagrange formülasyonu sıkışabilir sıvı varsayımına dayanır. Sıvının hacimsel elastisite modülünü arttırarak sıkışamaz sıvı durumuna yaklaşmak mümkündür. Sıvı sıkışabilirliğinin etkisini incelemek amacıyla bu bölümde sıvının hacimsel elastisite modülü (β) 1, 50, 100 kat arttırılarak analizler gerçekleştirilmiştir.

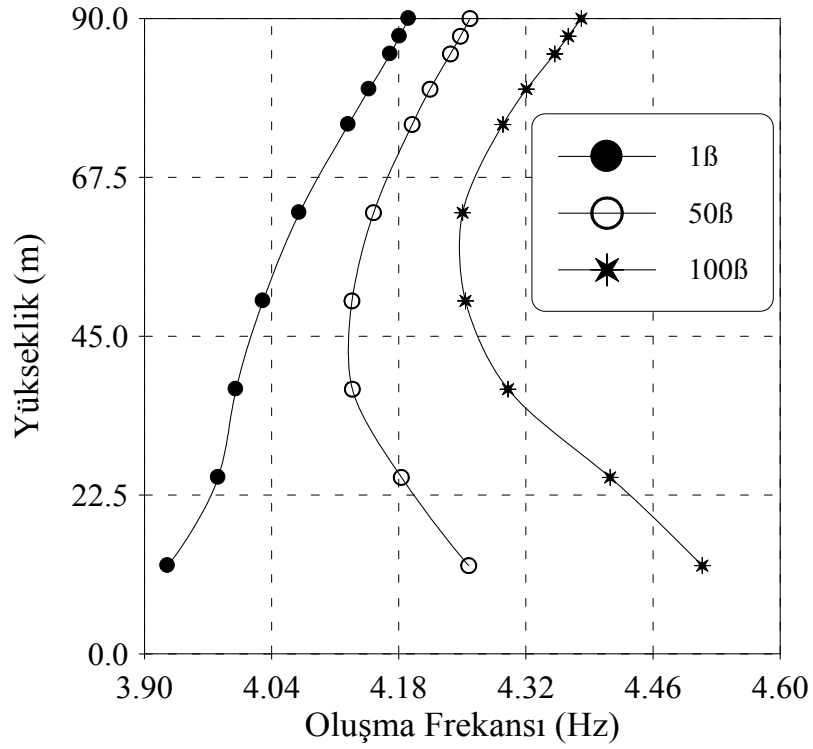
Lagrange yaklaşımında hacimsel elastisite modülünün her değeri için elde edilen ilk 11 frekans sıvının yüzey salınımlarıyla ilgilidir. Yapının davranışında etkili olmayan bu frekanslar, hacimsel elastisite modülünün değişiminden etkilenmemektedir. İlk hacim değişim frekansı 1β için 3.909 Hz, 50β için 4.394 Hz, 100β için 4.426 Hz'dir. 1β için elde edilen frekans değerleri 50β ve 100β için elde edilen frekans değerlerinden daha küçüktür. Ayrıca, hacimsel elastisite modülünün artmasıyla birlikte frekanslar da artış görülmektedir.

Hacimsel elastisite modülünün 1β , 50β , 100β değerleri için elde edilen ortalama maksimum yatay yerdeğiştirmeler Şekil 46'da verilmektedir. Ortalama maksimum yatay yerdeğiştirmeler yapının memba yüzeyindeki elemanların düğüm noktalarında 0.005 s zaman aralığıyla hesaplanmıştır. Şekil 46'da 1β için elde edilen ortalama maksimum yatay yerdeğiştirmeler 50β ve 100β için elde edilen ortalama maksimum yatay yerdeğiştirmelere oranla daha küçük çıkmıştır. Bununla beraber 50β ve 100β için elde edilen yerdeğiştirme değerleri birbirlerine eşit denilecek kadar yakın çıkmıştır. Bu durum hacimsel elastisite modülünün belli bir değerinden sonra sıvının sıkışamaz duruma yaklaştığının bir göstergesidir.

Baraj-rezervuar etkileşim sisteminin stokastik dinamik analizi sonucu hacimsel elastisite modülünün farklı değerleri için elde edilen ortalama maksimum yatay yerdeğiştirmelerin oluşma frekansları Şekil 47'de görülmektedir. Hacimsel elastisite modülünün 1β değeri için barajın memba yüzü kret noktasında oluşan 3.46 cm değerindeki ortalama maksimum yatay yerdeğiştirmenin oluşma frekansı 4.19 Hz, periyodu 0.239 sn'dir. Aynı noktada 50β değeri için oluşan 4.05 cm değerindeki ortalama maksimum yatay yerdeğiştirmenin oluşma frekansı 4.26 Hz, periyodu 0.235 sn iken, 100β değeri için oluşan 4.14 cm değerindeki ortalama maksimum yatay yerdeğiştirmenin oluşma frekansı 4.38 Hz, periyodu 0.228 sn'dir. Ortalama maksimum yatay yerdeğiştirmeler arttıkça oluşma frekansları da artmakta, periyodlar ise azalmaktadır.

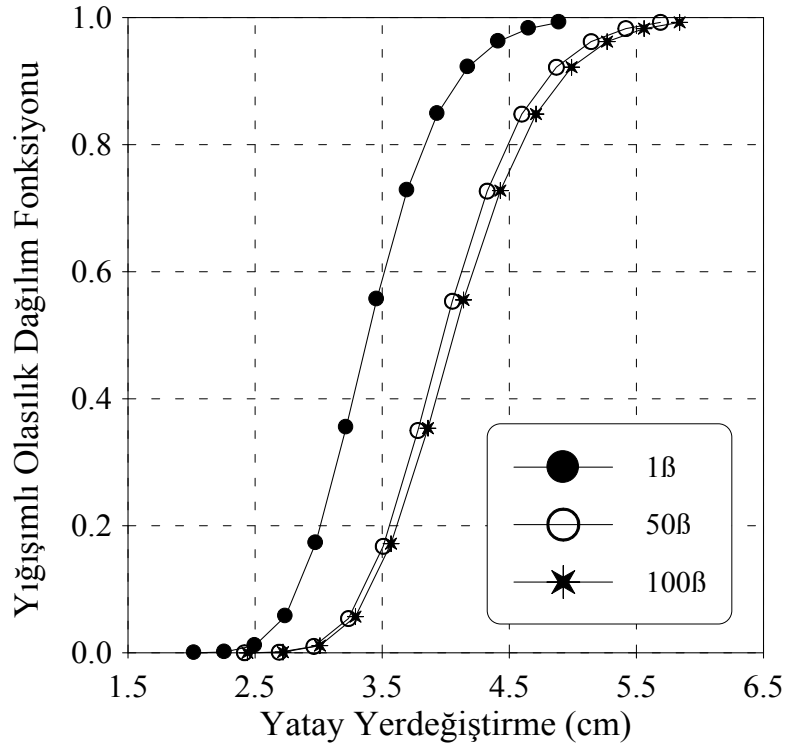


Şekil 46. Hacimsel elastisite modülünün farklı değerleri için baraj memba yüzeyinde oluşan ortalama maksimum yatay yerdeğıştirmeler



Şekil 47. Hacimsel elastisite modülünün farklı değerleri için baraj memba yüzeyinde oluşan ortalama maksimum yatay yerdeğıştirmelerin oluşma frekansları

Barajın memba yüzeyi kret noktasındaki (C noktası) ortalama maksimum yatay yerdeğiştirmenin yığışımlı olasılık dağılım fonksiyonu Şekil 48’de görölmektedir. Hacimsel elastisite modölnün 1β değeri için barajın memba yüzü kret noktasında oluşan ortalama maksimum yatay yerdeğiştirmenin (3.46 cm) aşılma olasılığı yaklaşık olarak %55’dir. Ayrıca 2 cm’nin altında bir maksimum değerin oluşma olasılığı oldukça az iken, 4.8 cm’nin altında bir maksimum değerin oluşma olasılığı %100’dür. Şekil 48 incelendiğinde hacimsel elastisite modölnün 50β ve 100β değerleri için yığışımlı olasılık dağılım fonksiyonlarının birbirine oldukça yakın olduğu görölmektedir.



Şekil 48. Hacimsel elastisite modölnün farklı değerleri için baraj kret noktasında (C noktası) elde edilen ortalama maksimum yatay yerdeğiştirmelerin yığışımlı olasılık dağılım fonksiyonları

Baraj memba yüzeyinde elde edilen ortalama maksimum yatay, düşey gerilmeler ve kayma gerilmeleri Şekil 49-51’de verilmektedir. Daha önce de belirtildiği gibi hacimsel elastisite modülünün 1β için elde edilen gerilme değerleri, 50β ve 100β değerleri için elde edilen gerilme değerlerinden az bir farkla küçük çıkmıştır. Hacimsel elastisite modülünün farklı değerleri için barajın memba topuğunda (A Gauss noktası) elde edilen gerilme bileşenleri Tablo 11’de görülmektedir. Bütün gerilme bileşenleri en büyük değerlerini barajın taban kısmında almaktadır. Baraj kretine yaklaştıkça gerilme değerleri azalmaktadır. Bu durum yer hareketinin en çok barajın taban kısmında etkili olduğunu göstermektedir. Şekillerden de görüldüğü gibi sızmanın sıkışabilirliği stokastik dinamik analiz sonuçlarını etkilemektedir.

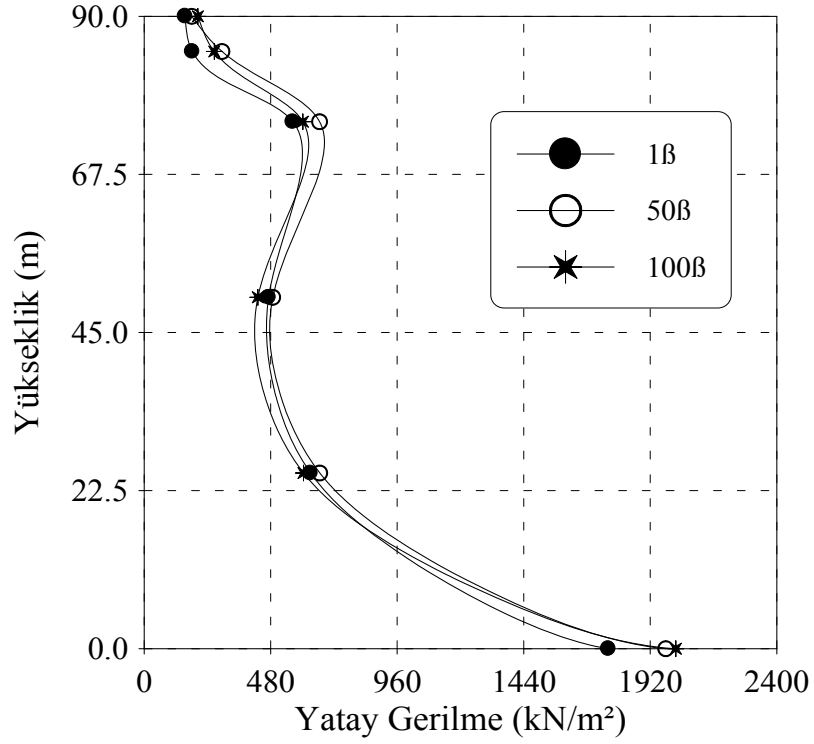
Tablo 11. Hacimsel elastisite modülünün farklı değerleri için baraj memba topuğunda (A Gauss noktası) oluşan gerilmeler

Hacimsel Elastisite Modülü	Yatay Gerilme (kN/m ²)	Düşey Gerilme (kN/m ²)	Kayma Gerilmesi (kN/m ²)
1β	1760.80	7043.10	1755.80
50β	1978.80	7915.20	1940.20
100β	2017.20	8068.90	1942.20

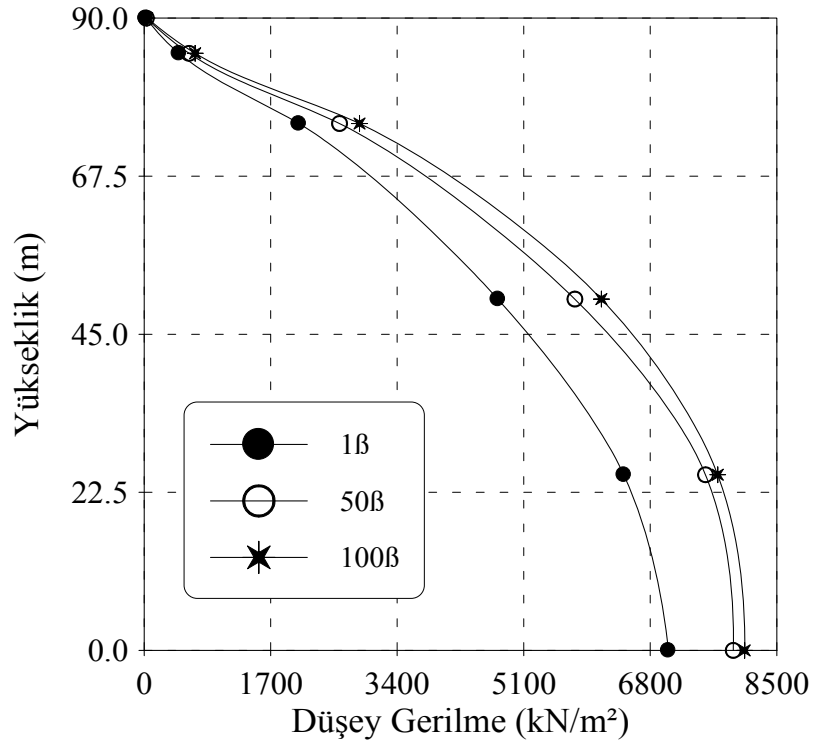
Barajın I-I kesitinde elde edilen ortalama maksimum gerilmeler Şekil 52-54’te gösterilmektedir. I-I kesitindeki ortalama maksimum yatay gerilmelerin yatay uzaklıkla değişimi incelendiğinde (Şekil 52), barajın mansap tarafına doğru gidildikçe ortalama maksimum yatay gerilme değerleri arttığı görülmektedir. Hacimsel elastisite modülü 1β olan ortalama maksimum yatay gerilmeler, hacimsel elastisite modülü 50β ve 100β olanlardan daha küçük çıkmıştır. Ayrıca 50β ve 100β için hesaplanan ortalama maksimum yatay gerilmeler birbirine oldukça yakındır. I-I kesitindeki ortalama maksimum düşey gerilmeler önce azalan sonra artan değerler almaktadır (Şekil 53). Şekil 54’te görülen I-I kesitindeki ortalama maksimum kayma gerilmeleri ise barajın mansap kısmına doğru gidildikçe artmaktadır.

II-II kesitindeki ortalama maksimum yatay gerilmeler I-I kesitindeki ortalama maksimum yatay gerilmelerin aksine önce artan sonra azalan bir eğilim göstermektedir (Şekil 55). Bu şekilde hacimsel elastisite modülünün 1β değeri için elde edilen ortalama maksimum yatay gerilmeler diğerlerine nazaran daha küçüktür. Hacimsel elastisite modülünün değeri arttıkça gerilme değerleri de artmaktadır. II-II kesitindeki ortalama maksimum düşey gerilmeler incelendiğinde (Şekil 56) en küçük değer barajın orta kısmına doğru, en yüksek değer ise barajın mansap kısmına doğru elde edildiği görülmektedir. II-II kesitindeki ortalama maksimum kayma gerilmeleri I-I kesitinde olduğu gibi artan değerler almaktadır.

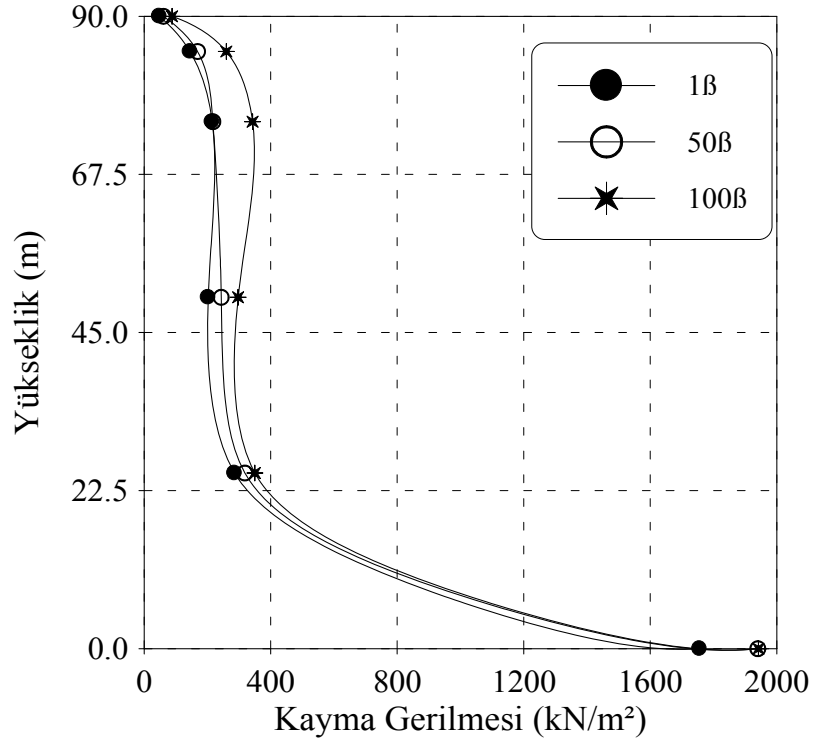
Baraj-rezervuar etkileşim sisteminin memba yüzeyindeki sıvı elemanların Gauss noktalarında hesaplanan hidrodinamik basınçların ortalama maksimum değerleri Şekil 58’te görülmektedir. Sıkışabilir sıvı durumu (1β) için hesaplanan hidrodinamik basınç değerleri sıkışamaz sıvı durumu (100β) için hesaplanan değerlerden daha küçüktür. Barajın memba topuğuna bitişik sıvı elemanın B Gauss noktasındaki hidrodinamik basınç hacimsel elastisite modülünün 1β , 50β ve 100β değerleri için sırasıyla 594.66 kN/m^2 , 600.58 kN/m^2 ve 621.25 kN/m^2 değerlerini almaktadır.



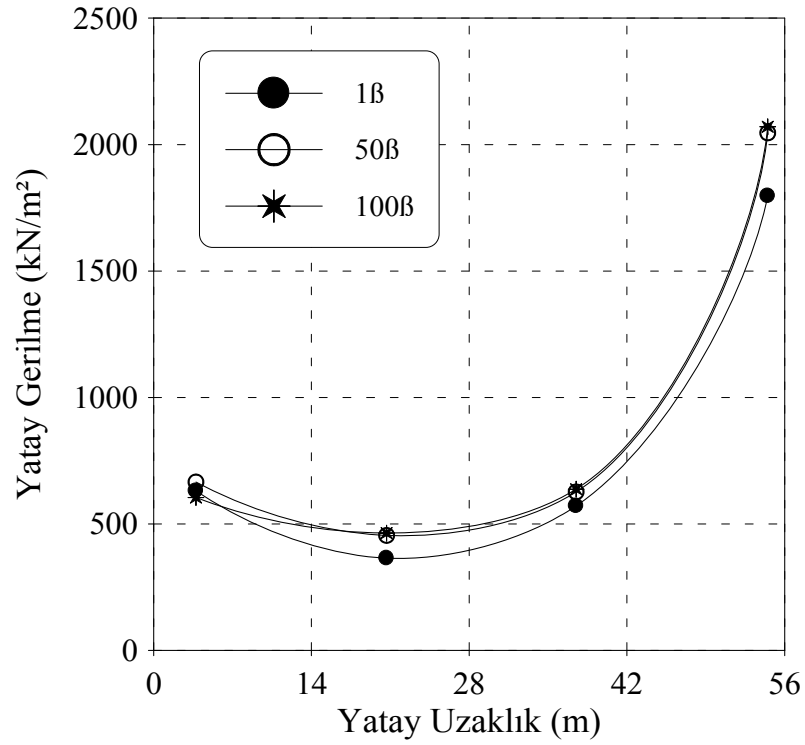
Şekil 49. Hacimsel elastisite modülünün farklı değerleri için baraj memba yüzeyinde oluşan ortalama maksimum yatay gerilmeler



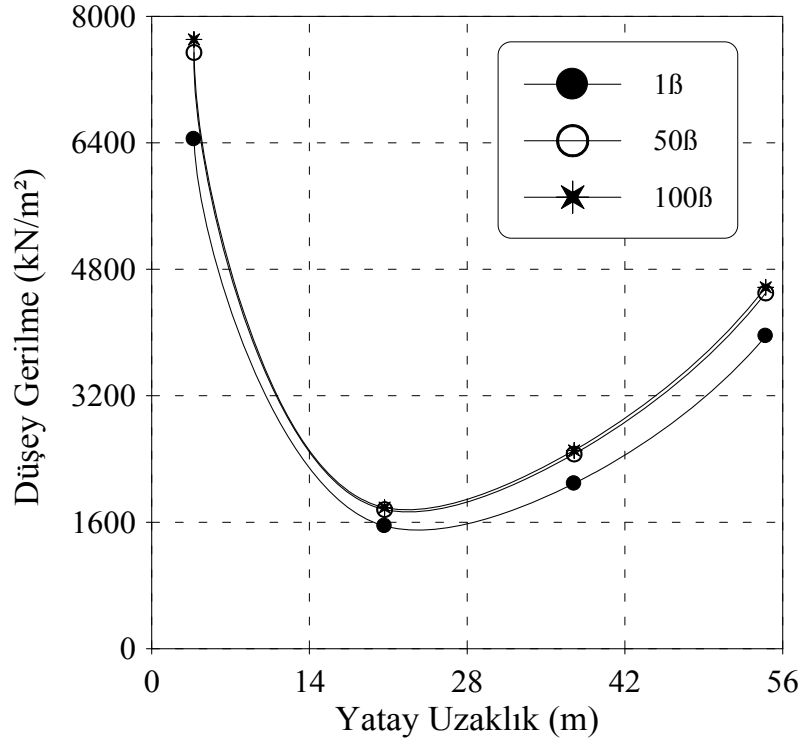
Şekil 50. Hacimsel elastisite modülünün farklı değerleri için baraj memba yüzeyinde oluşan ortalama maksimum düşey gerilmeler



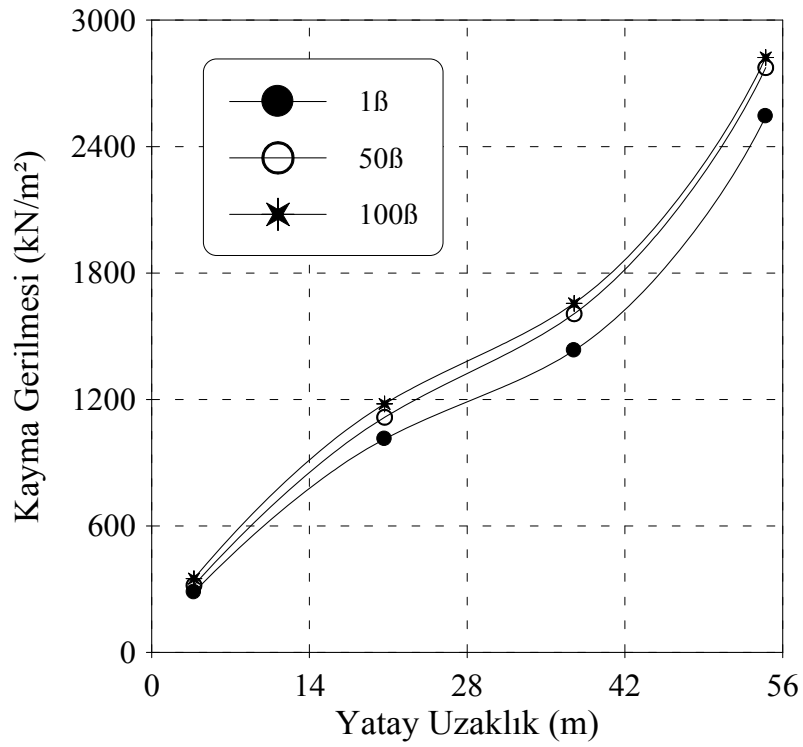
Şekil 51. Hacimsel elastisite modülünün farklı değerleri için baraj mamba yüzeyinde oluşan ortalama maksimum kayma gerilmeleri



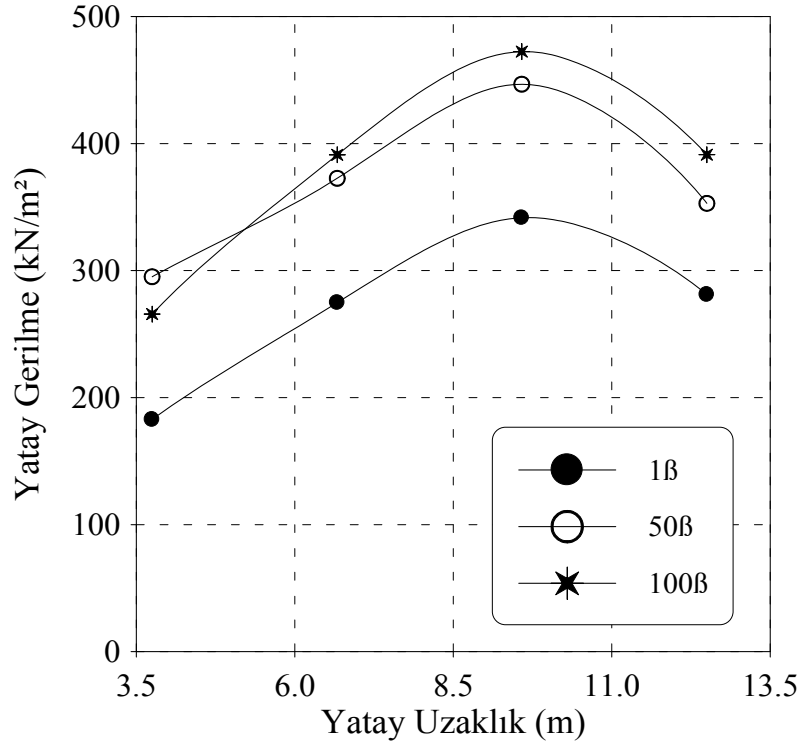
Şekil 52. Hacimsel elastisite modülünün farklı değerleri için barajın I-I kesitinde oluşan ortalama maksimum yatay gerilmeler



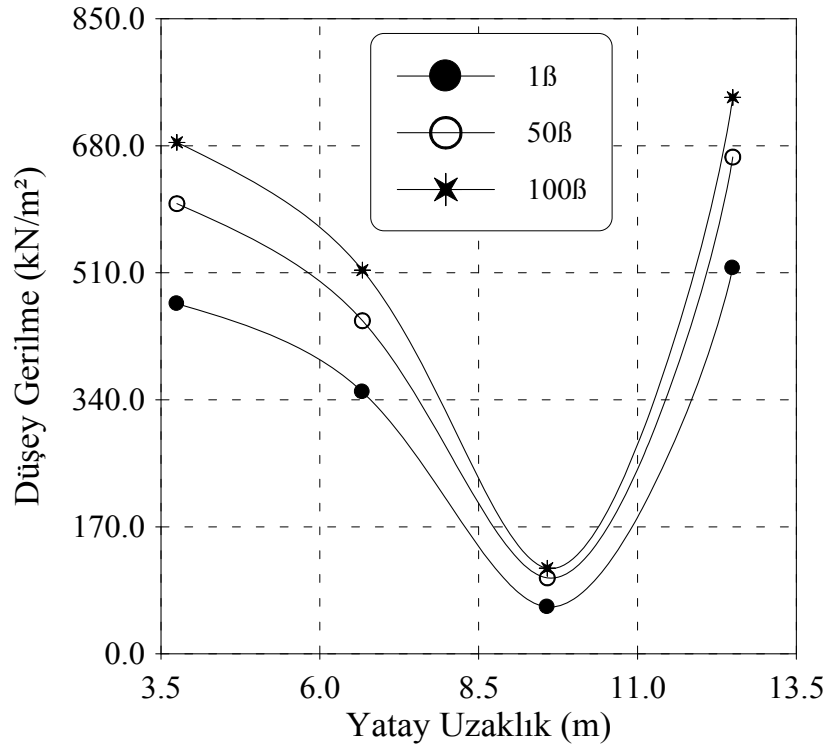
Şekil 53. Hacimsel elastisite modülünün farklı değerleri için barajın I-I kesitinde oluşan ortalama maksimum düşey gerilmeler



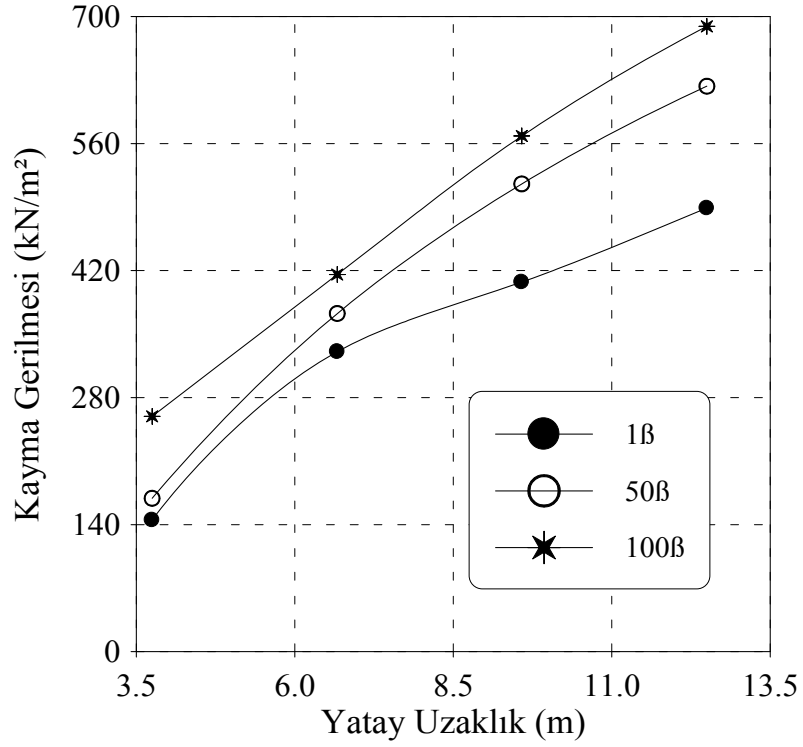
Şekil 54. Hacimsel elastisite modülünün farklı değerleri için barajın I-I kesitinde oluşan ortalama maksimum kayma gerilmeleri



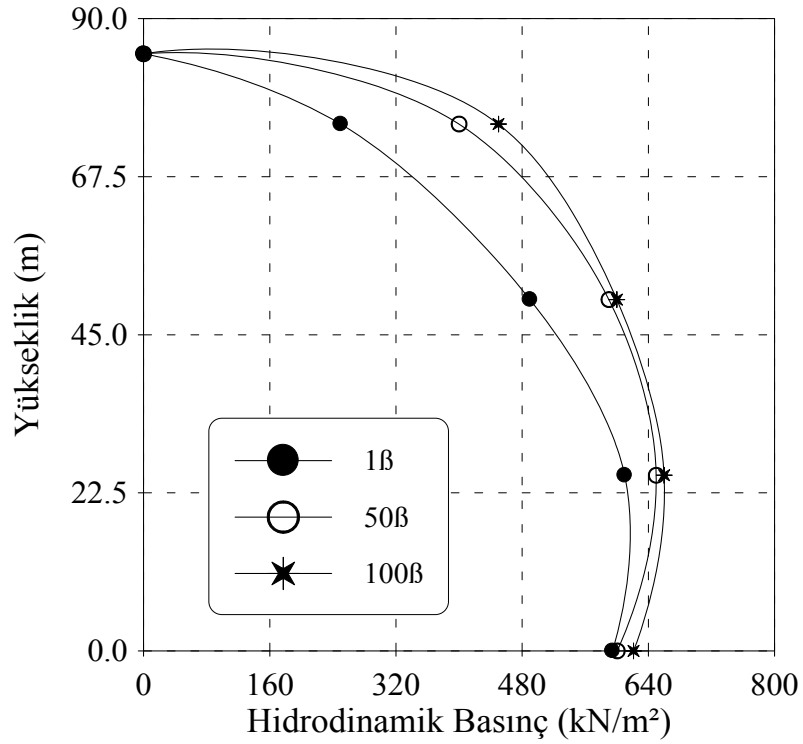
Şekil 55. Hacimsel elastisite modülünün farklı değerleri için barajın II-II kesitinde oluşan ortalama maksimum yatay gerilmeler



Şekil 56. Hacimsel elastisite modülünün farklı değerleri için barajın II-II kesitinde oluşan ortalama maksimum düşey gerilmeler



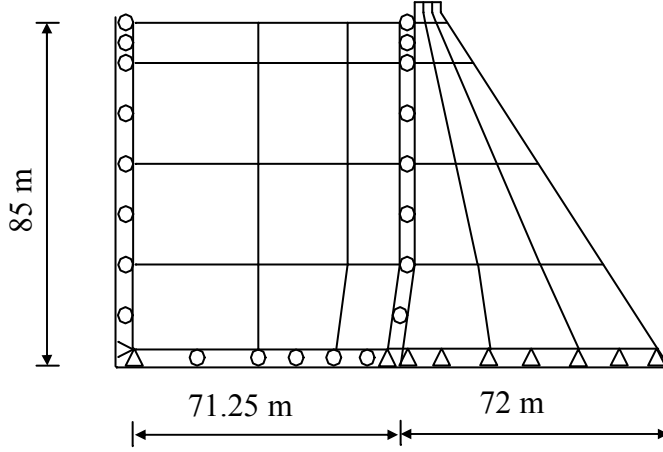
Şekil 57. Hacimsel elastisite modülünün farklı değerleri için barajın II-II kesitinde oluşan ortalama maksimum kayma gerilmeleri



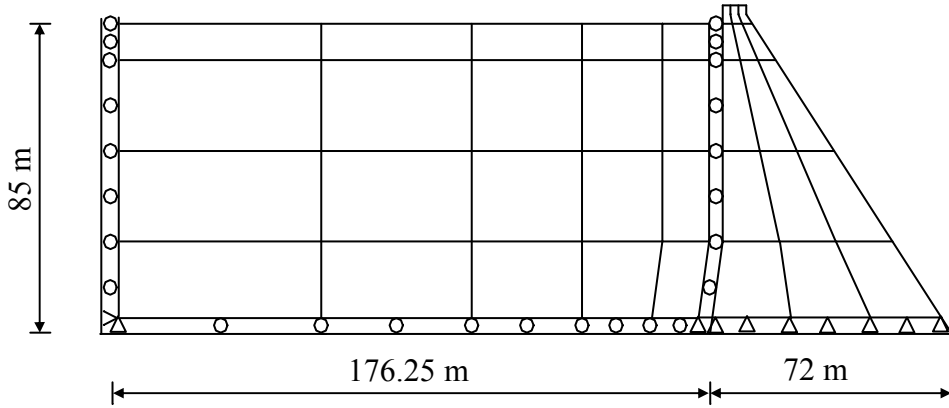
Şekil 58. Hacimsel elastisite modülünün farklı değerleri için baraj memba yüzeyinde elde edilen ortalama maksimum hidrodinamik basınç değişimi

3.1.6. Rezervuar Uzunluğunun Baraj-Rezervuar Etkileşim Sisteminin Stokastik Davranışı Üzerindeki Etkisi

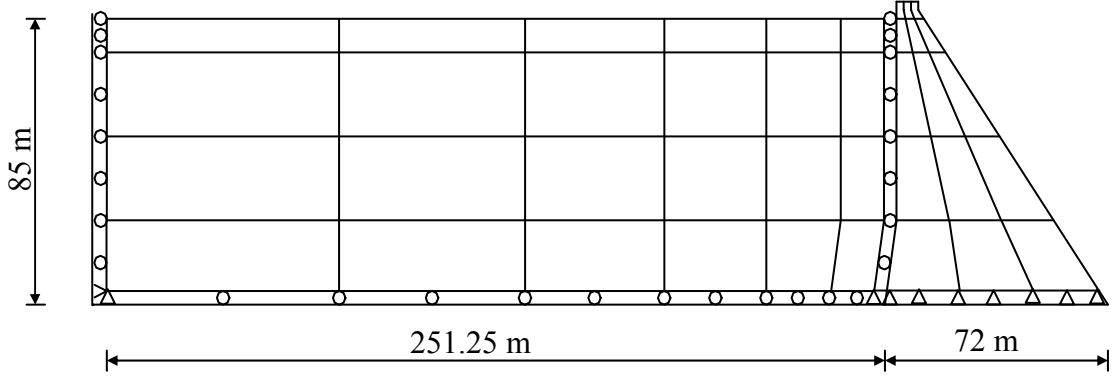
Baraj-rezervuar etkileşim sistemi için incelenecek olan parametrelerden biri de rezervuar uzunluğudur. Rezervuar uzunluğunun baraj-rezervuar etkileşim sisteminin stokastik davranışı üzerindeki etkisini incelemek amacıyla üç ayrı sonlu eleman modeli dikkate alınmıştır. Model A'da rezervuar uzunluğu yaklaşık olarak rezervuar yüksekliği (H) kadar seçilmiştir. Model B'de rezervuar uzunluğu yaklaşık olarak rezervuar yüksekliğinin iki katı (2H) olarak seçilmiştir. Son olarak Model C'de rezervuar uzunluğu rezervuar yüksekliğinin üç katı (3H) olarak dikkate alınmıştır. Model A, Model B, Model C Şekil 59-61'de görülmektedir.



Şekil 59. Rezervuar uzunluğu H olan baraj-rezervuar etkileşim sisteminin sonlu eleman modeli (Model A)



Şekil 60. Rezervuar uzunluğu 2H olan baraj-rezervuar etkileşim sisteminin sonlu eleman modeli (Model B)

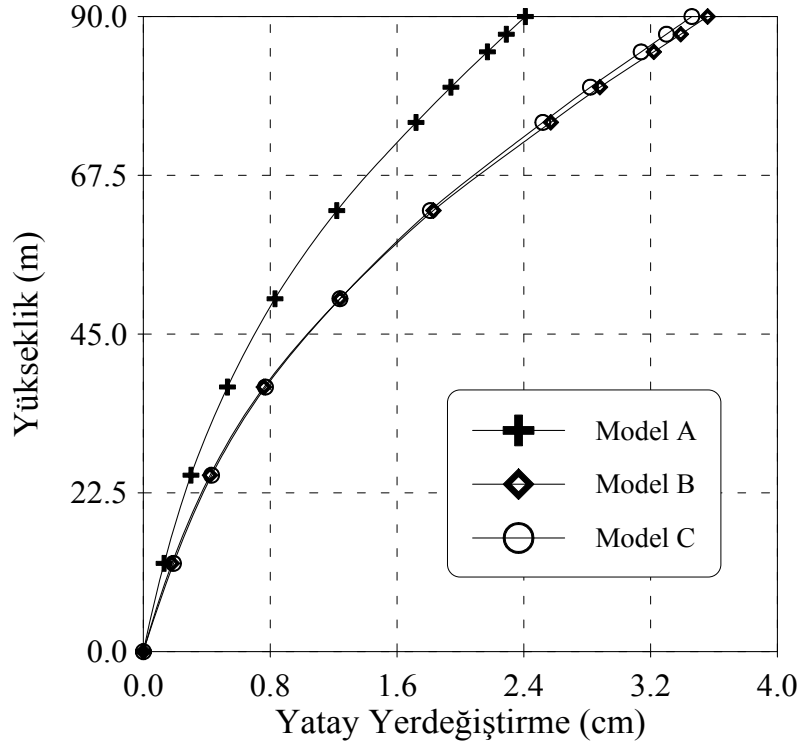


Şekil 61. Rezervuar uzunluğu 3H olan baraj-rezervuar etkileşim sisteminin sonlu eleman modeli (Model C)

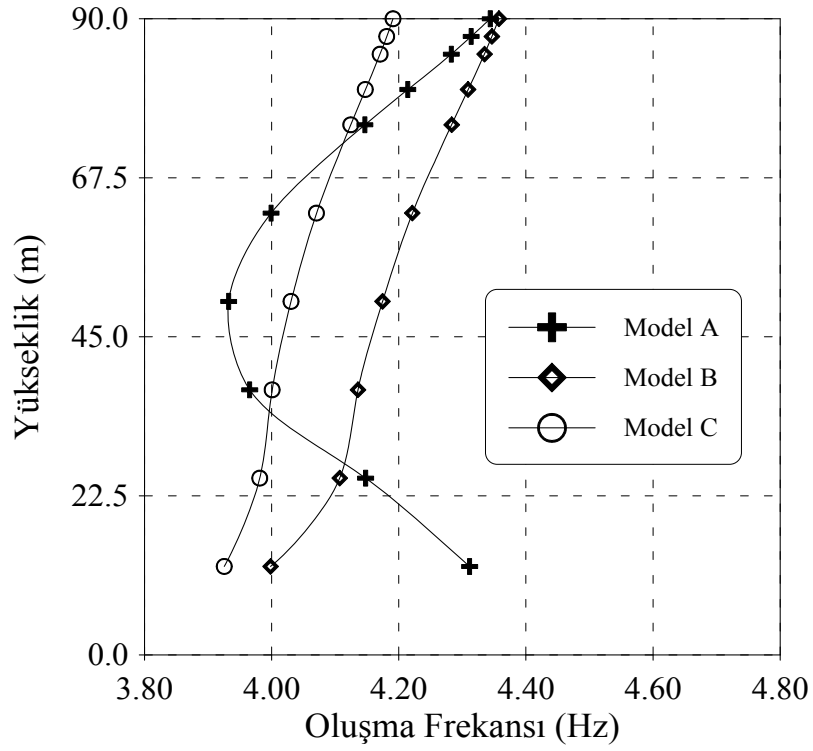
Model A, Model B ve Model C'nin stokastik dinamik analizleri sonucu elde edilen frekanslar birbirlerinden farklılık göstermektedir. Sonlu eleman modelleri farklı olduğu için bu beklenen bir sonuç olmakla beraber, rezervuar uzunluğu arttıkça yüzey salınım frekanslarının sayısında artış gözlenmiştir. Model A'da ilk 5 frekans yüzey salınım frekansı olup, yapının davranışında etkili ilk frekans 3.733 Hz'dir. Model B'de ilk 9 frekans yüzey salınım frekansı olmakla beraber yapının davranışında etkili ilk frekans 3.880 Hz'dir. Model C'de ilk 11 frekans yüzey salınım frekansı olup, yapının davranışında etkili ilk frekans 3.909 Hz'dir.

Model A, Model B ve Model C'nin stokastik dinamik analizleri sonucu elde edilen baraj memba yüzeyi ortalama maksimum yatay yerdeğiştirmeleri Şekil 62'de verilmektedir. Model A'da elde edilen ortalama maksimum yatay yerdeğiştirmeler, Model B ve Model C'ye oranla daha küçük çıkmıştır. Model B ve Model C'de elde edilen ortalama maksimum yatay yerdeğiştirmeler birbirlerine oldukça yakındır.

Farklı rezervuar uzunlukları için baraj memba yüzeyi boyunca elde edilen ortalama maksimum yatay yerdeğiştirmelerin oluşma frekansları Şekil 63'te gösterilmiştir. Model A'nın stokastik dinamik analizi sonucu elde edilen ortalama maksimum yatay yerdeğiştirmelerin oluşma frekansları Model B ve Model C'nin stokastik dinamik analizleri sonucu elde edilenlerden farklılık göstermektedir. Baraj memba yüzeyi kret noktası (C noktası) ortalama maksimum yatay yerdeğiştirmesinin oluşma frekansı Model A'da 4.34 Hz, Model B'de 4.36 Hz, Model C'de 4.19 Hz çıkmıştır. Model B'nin stokastik dinamik analizi sonucu elde edilen oluşma frekansları Model C'nin stokastik dinamik analizinden elde edilen oluşma frekanslarından daha büyük çıkmıştır.

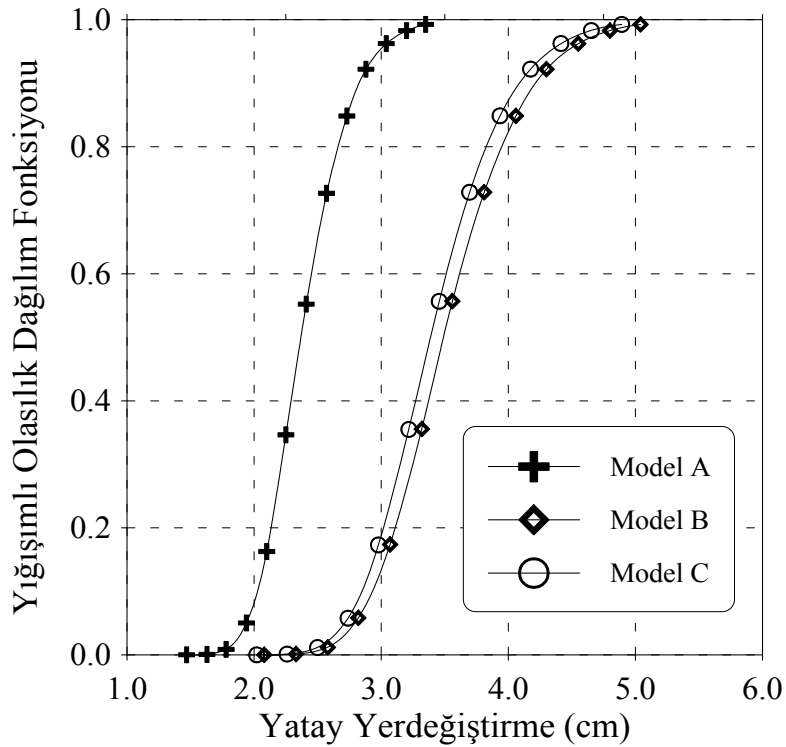


Şekil 62. Farklı rezervuar uzunlukları için baraj memba yüzeyinde oluşan ortalama maksimum yatay yerdeğıştirmeler



Şekil 63. Farklı rezervuar uzunlukları için baraj memba yüzeyinde oluşan ortalama maksimum yatay yerdeğıştirmelerin oluşma frekansları

Model A, Model B ve Model C için barajın memba yüzeyi kret noktasındaki (C noktası) ortalama maksimum yatay yerdeğiştirmenin yığışımlı olasılık dağılım fonksiyonu elde edilmiştir (şekil 64). Model A için barajın memba yüzü kret noktasında oluşan ortalama maksimum yatay yerdeğiştirmenin (2.41 cm) aşılma olasılığı yaklaşık olarak %55'dir. Ayrıca 1.47 cm'nin altında bir maksimum değerin oluşma olasılığı oldukça az iken, 3.35 cm'nin altında bir maksimum değerin oluşma olasılığı %100'dür. Model B için barajın memba yüzü kret noktasında oluşan ortalama maksimum yatay yerdeğiştirmenin (3.56 cm) aşılma olasılığı yaklaşık olarak %56 olmakla beraber, 5.04 cm'nin altında bir maksimum değerin oluşma olasılığı %100'dür. Aynı şekilde Model C incelendiğinde barajın memba yüzü kret noktasında oluşan ortalama maksimum yatay yerdeğiştirmenin (3.46 cm) aşılma olasılığı yaklaşık olarak %56'dır. Ayrıca 2.02 cm'nin altında bir maksimum değerin oluşma olasılığı yok denecek kadar az iken, 4.90 cm'nin altında bir maksimum değerin oluşma olasılığı %100'dür.



şekil 64. Farklı rezervuar uzunlukları için baraj kret noktasında (C noktası) elde edilen ortalama maksimum yatay yerdeğiştirmelerin yığışımlı olasılık dağılım fonksiyonları

Şekil 65-67’de farklı rezervuar uzunluklarına sahip baraj-rezervuar etkileşim sistemlerinin stokastik dinamik analizleri yapılarak elde edilen baraj memba yüzeyi ortalama maksimum gerilme bileşenleri görülmektedir. Şekil 65’te rezervuar uzunluğu H olan sistemde (Model A) baraj memba yüzeyindeki ortalama maksimum yatay gerilmeler diğer modellere oranla daha düşük çıkmıştır. Şekil 66 ve Şekil 67’de baraj memba yüzeyindeki ortalama maksimum düşey gerilmeler ve ortalama maksimum kayma gerilmeleri incelendiğinde Model A’da elde edilen ortalama maksimum gerilmeler yine diğerlerine nazaran düşük çıkmıştır. Model B ve Model C’de elde edilen ortalama maksimum düşey gerilmeler birbirine yakın çıkmıştır. Bütün modellerde baraj tabanında elde edilen gerilme değerleri en büyük değerlerdir. Rezervuar uzunluğu arttıkça baraj memba yüzeyindeki gerilme değerleri de genellikle artmaktadır.

Farklı rezervuar uzunlukları için barajın memba topuğunda (A Gauss noktası) elde edilen ortalama maksimum gerilme değerleri Tablo 12’de verilmektedir. Tablodan da görüleceği gibi gerilme bileşenleri değerleri rezervuar uzunluğuyla artmaktadır.

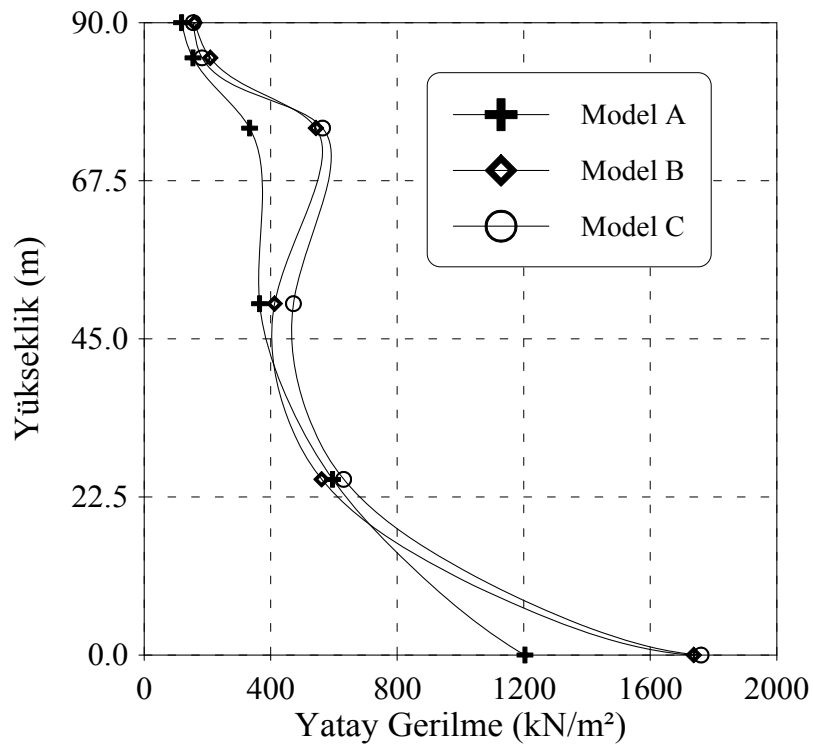
Tablo 12. Farklı rezervuar uzunlukları için baraj memba topuğunda (A Gauss noktası) oluşan ortalama maksimum gerilmeler

Modeller	Yatay Gerilme (kN/m ²)	Düşey Gerilme (kN/m ²)	Kayma Gerilmesi (kN/m ²)
Model A	1204.10	4816.50	1354.50
Model B	1737.50	6950.10	1599.70
Model C	1763.70	7055.00	1757.00

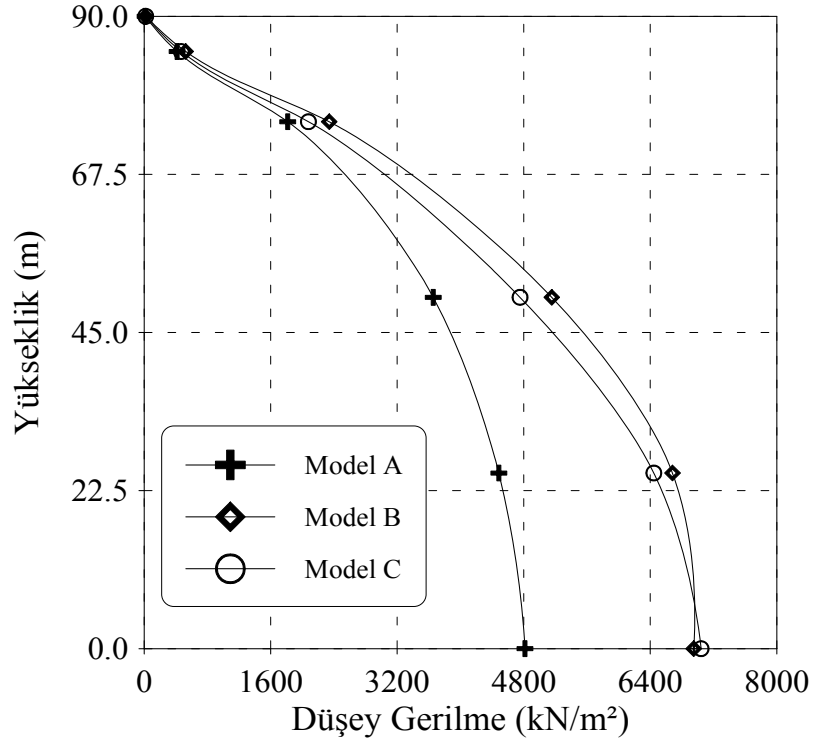
Ortalama maksimum gerilmelerin I-I kesitindeki yatay uzaklık boyunca değişimleri Şekil 68-70’de verilmektedir. Şekil 68’de görülen ortalama maksimum yatay gerilmeler en büyük değerini mansap tarafında, Şekil 69’da görülen ortalama maksimum düşey gerilmeler ise en büyük değerini memba tarafında almaktadır. Ortalama maksimum kayma gerilme değerleri ise mansap tarafına doğru artmaktadır. I-I kesitinde Model A için elde edilen bütün ortalama maksimum gerilmeler diğer modeller için elde edilenlere nazaran daha küçük çıkmıştır.

II-II kesitindeki ortalama maksimum gerilme bileşenleri Şekil 71-73’te çizilmiştir. Şekil 71’de II-II kesitindeki ortalama maksimum yatay gerilmeler en büyük değerlerini

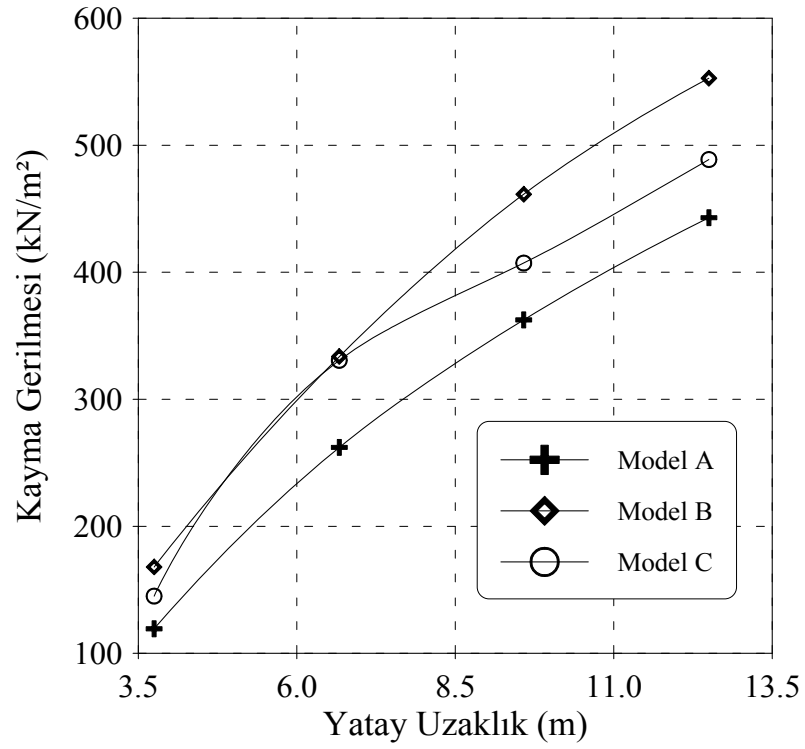
barajın ortasına doğru, en küçük değerlerini ise barajın memba tarafında almaktadır. Ayrıca Model B’de elde edilen gerilmeler diğerlerinden daha büyüktür. II-II kesitindeki ortalama maksimum düşey gerilmeler incelendiğinde, Model C kullanılarak yapılan stokastik dinamik analiz sonucu elde edilen ortalama maksimum düşey gerilmelerin diğerlerinden daha büyük olduğu gözlemlenmiştir. En büyük ortalama maksimum düşey gerilmeler barajın memba ve mansap yüzeylerine doğru elde edilmiştir. II-II kesitindeki ortalama maksimum kayma gerilmeleri, I-I kesitinde olduğu gibi yine mansap tarafına doğru artan değerler almaktadır.



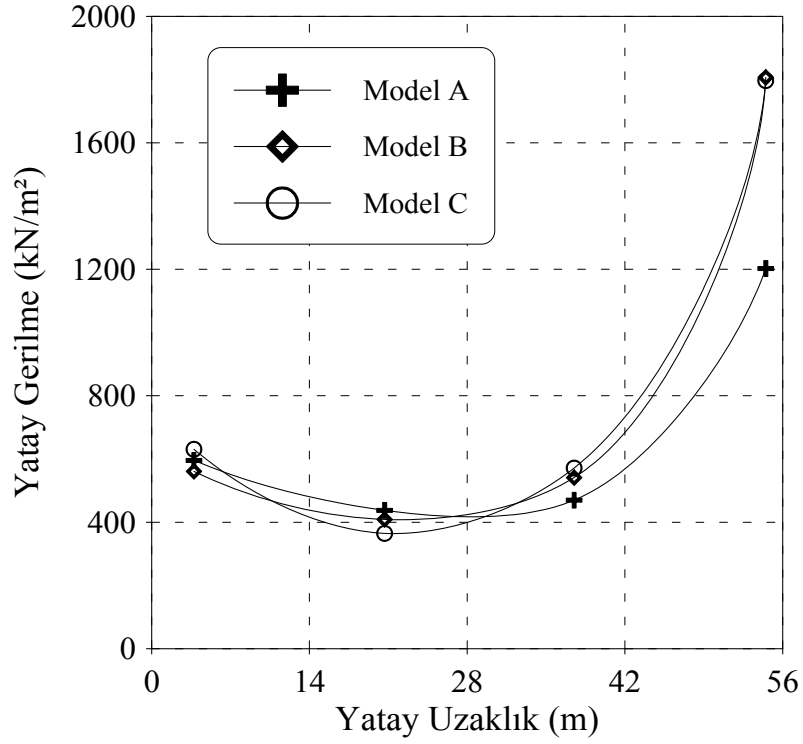
Şekil 65. Farklı rezervuar uzunlukları için baraj memba yüzeyinde oluşan ortalama maksimum yatay gerilmeler



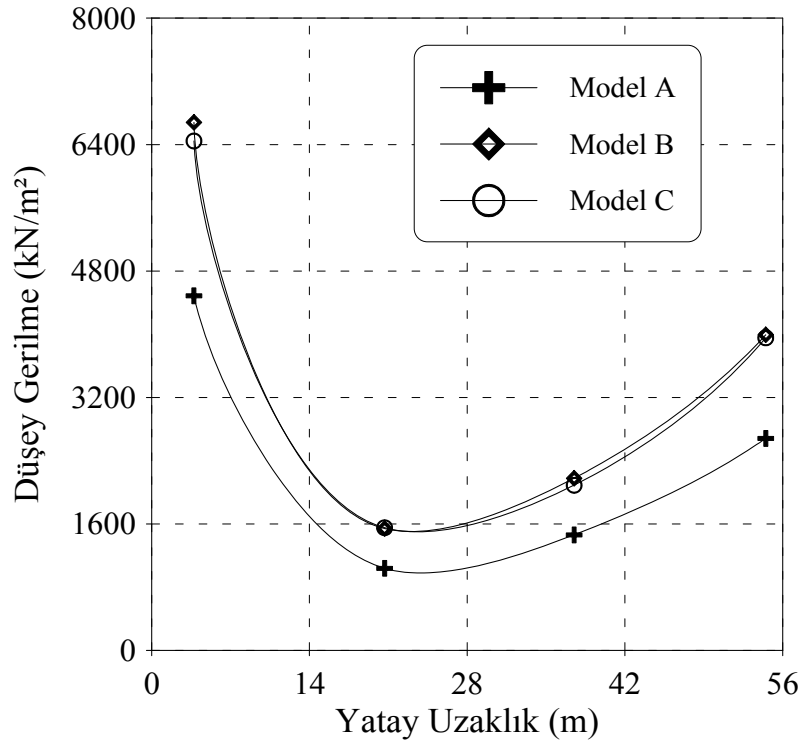
Şekil 66. Farklı rezervuar uzunlukları için baraj memba yüzeyinde oluşan ortalama maksimum düşey gerilmeler



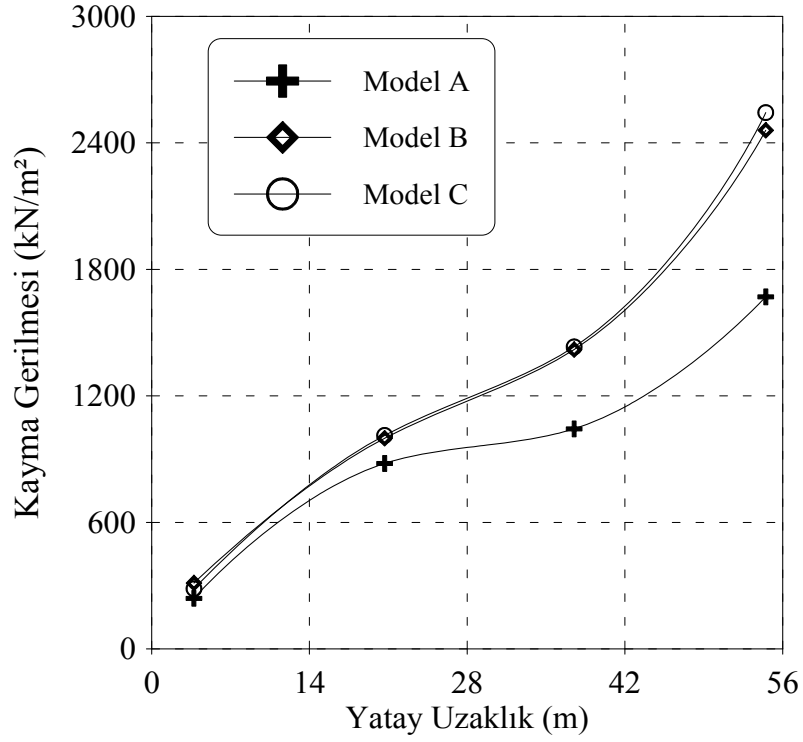
Şekil 67. Farklı rezervuar uzunlukları için baraj memba yüzeyinde oluşan ortalama maksimum kayma gerilmeleri



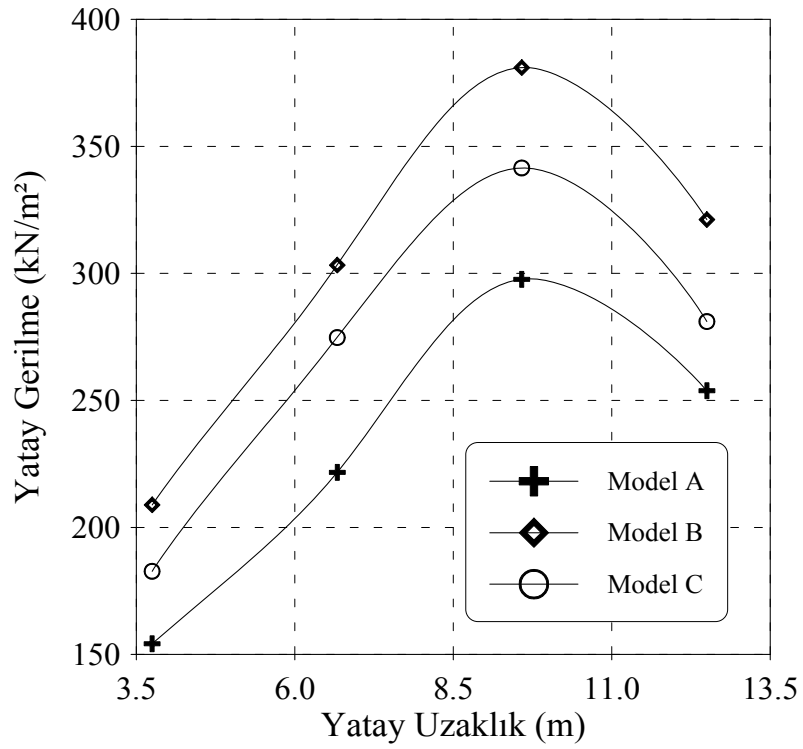
Şekil 68. Farklı rezervuar uzunlukları için barajın I-I kesitinde oluşan ortalama maksimum yatay gerilmeler



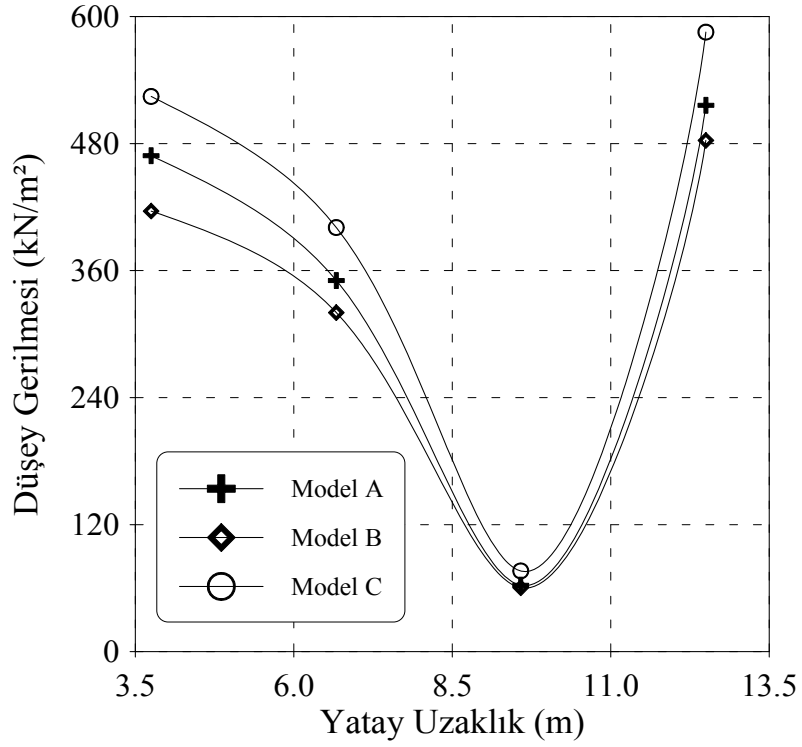
Şekil 69. Farklı rezervuar uzunlukları için barajın I-I kesitinde oluşan ortalama maksimum düşey gerilmeler



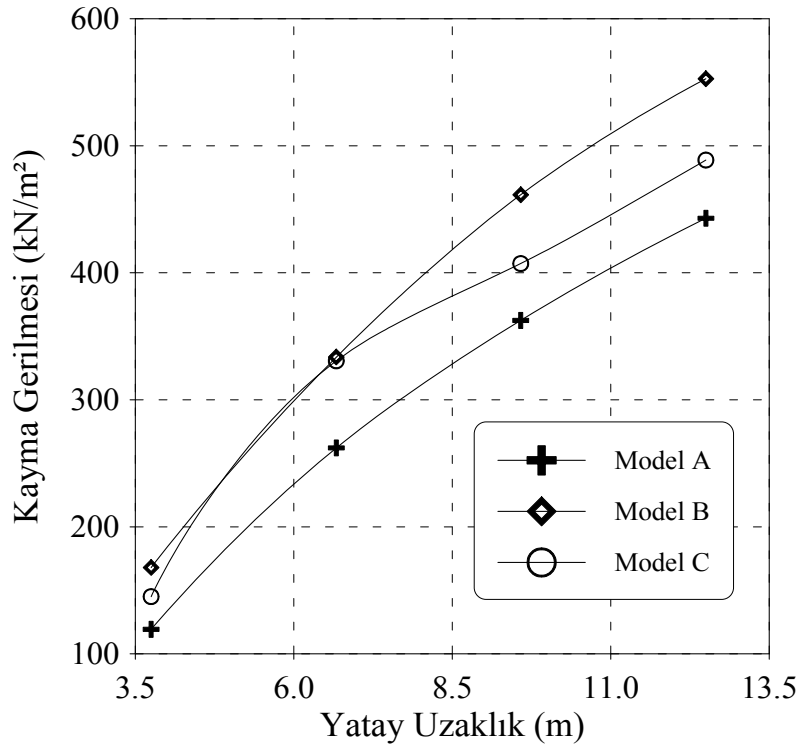
Şekil 70. Farklı rezervuar uzunlukları için barajın I-I kesitinde oluşan ortalama maksimum kayma gerilmeleri



Şekil 71. Farklı rezervuar uzunlukları için barajın II-II kesitinde oluşan ortalama maksimum yatay gerilmeler

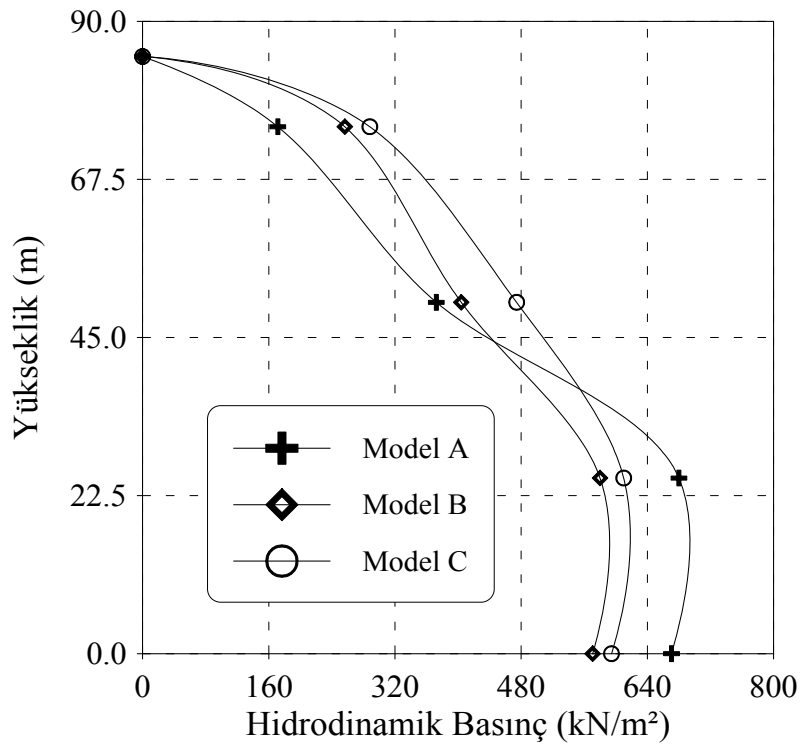


Şekil 72. Farklı rezervuar uzunlukları için barajın II-II kesitinde oluşan ortalama maksimum düşey gerilmeler



Şekil 73. Farklı rezervuar uzunlukları için barajın II-II kesitinde oluşan ortalama maksimum kayma gerilmeleri

Baraj-rezervuar etkileşim sisteminin farklı rezervuar uzunlukları için baraj memba yüzeyinde elde edilen ortalama maksimum hidrodinamik basınçlar Şekil 74'te görülmektedir. Model A'da ortalama maksimum hidrodinamik basınç değişimi diğer modellerden farklılık göstermektedir. Bu durumun, Model A'nın rezervuar uzunluğunun analiz edilecek olan diğer sonlu eleman modellerine göre (Model B ve Model C) küçük kalmasından kaynaklandığı düşünülmektedir. Model B ve Model C'deki ortalama maksimum hidrodinamik basınçlar birbirlerine yakın değerler almakla beraber, Model C'deki hidrodinamik basınç değişimi daha büyüktür. Farklı rezervuar uzunlukları için barajın memba topuğuna bitişik sıvı elemanın B Gauss noktasındaki hidrodinamik basınç Model A, Model B ve Model C için sırasıyla 670.65 kN/m², 570.62 kN/m², 594.66 kN/m²'dir.

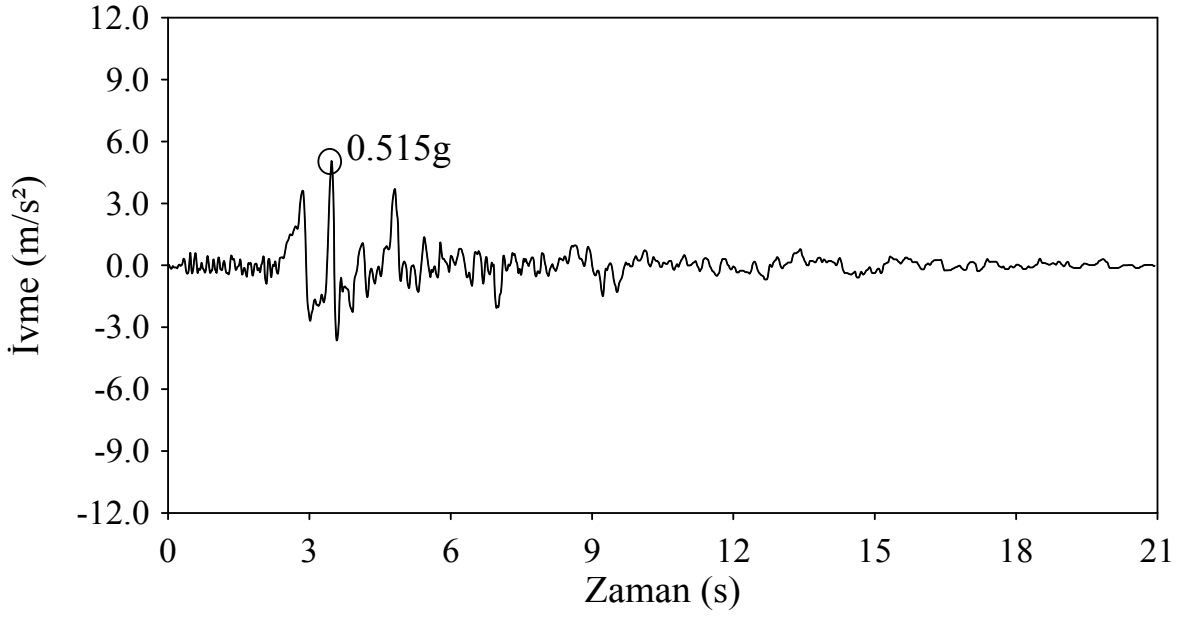


Şekil 74. Farklı rezervuar uzunlukları için baraj memba yüzeyinde elde edilen ortalama maksimum hidrodinamik basınç değişimi

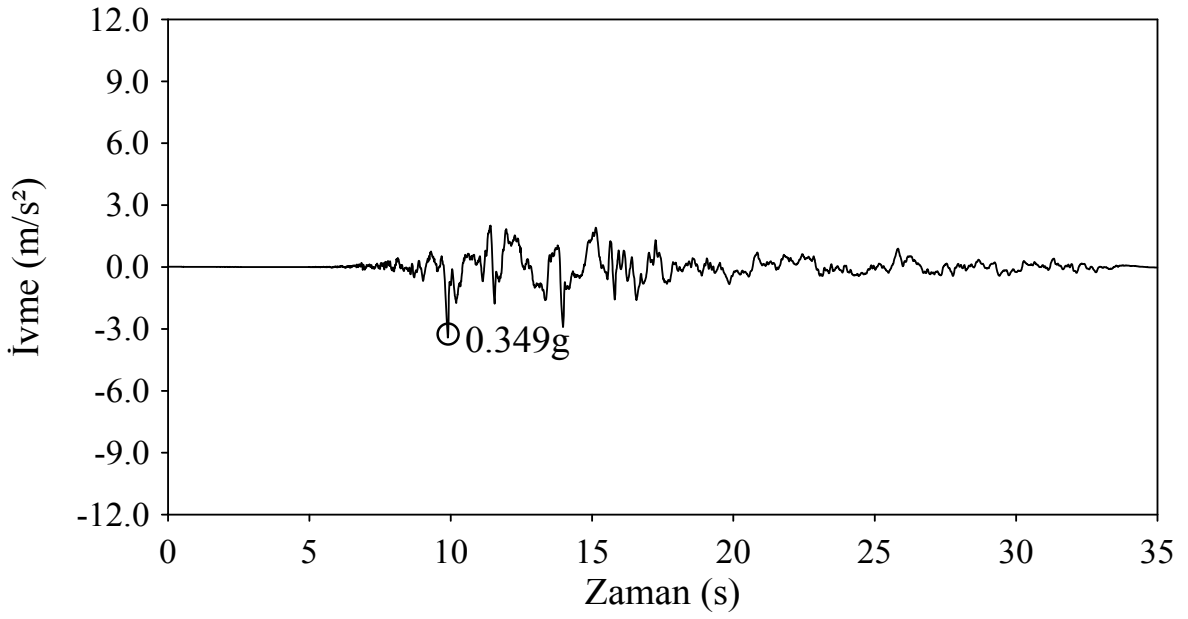
3.1.7. Farklı Yer Hareketlerinin Baraj-Rezervuar Etkileşim Sisteminin Stokastik Davranışı Üzerindeki Etkisi

Bu bölümde farklı yer hareketlerinin baraj-rezervuar etkileşim sistemi üzerindeki etkisi incelenecektir. Analizlerde 1971 San Fernando depremi Pacoima Baraj kaydı S16E bileşeninin yanı sıra 1992 Erzincan depremi doğu-batı bileşeni ivme kaydı ve 1999 Kocaeli depremi doğu-batı bileşeni ivme kaydı kullanılacaktır. San Fernando depremi Pacoima Barajı S16E bileşeni sert zeminde kaydedilmiştir ve maksimum ivmesi 1.076g'dir. Buna karşılık 1992 Erzincan depremi doğu-batı bileşeni orta zeminde, 1999 Kocaeli depremi doğu-batı bileşeni ise yumuşak zeminde kaydedilmiştir ve maksimum ivmeleri sırasıyla 0.515g ve 0.349g'dir. Erzincan ve Kocaeli depremlerinin ivme kayıtları Şekil 75-76'da verilmektedir.

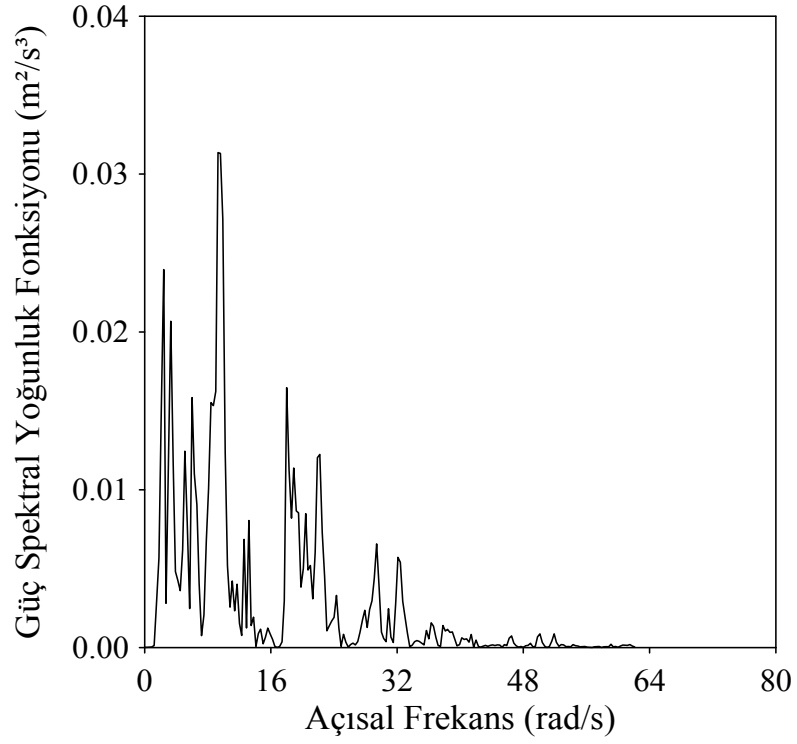
Bilindiği gibi stokastik analizde rastgele kuvvetin spektral yoğunluk fonksiyonunun belirlenmesi gerekmektedir. Güç spektral yoğunluk fonksiyonu tüm frekans bölgesi boyunca integre edilirse deprem hareketinin toplam gücü elde edilir. Bu nedenle STOCALF programı yardımıyla Şekil 75-76'daki ivme kayıtları kullanılarak Erzincan ve Kocaeli depremlerinin güç spektral yoğunluk fonksiyonları hesaplanmıştır. Erzincan depreminin güç spektral yoğunluk fonksiyonu Şekil 77'de, Kocaeli depreminin güç spektral yoğunluk fonksiyonu Şekil 78'de görülmektedir.



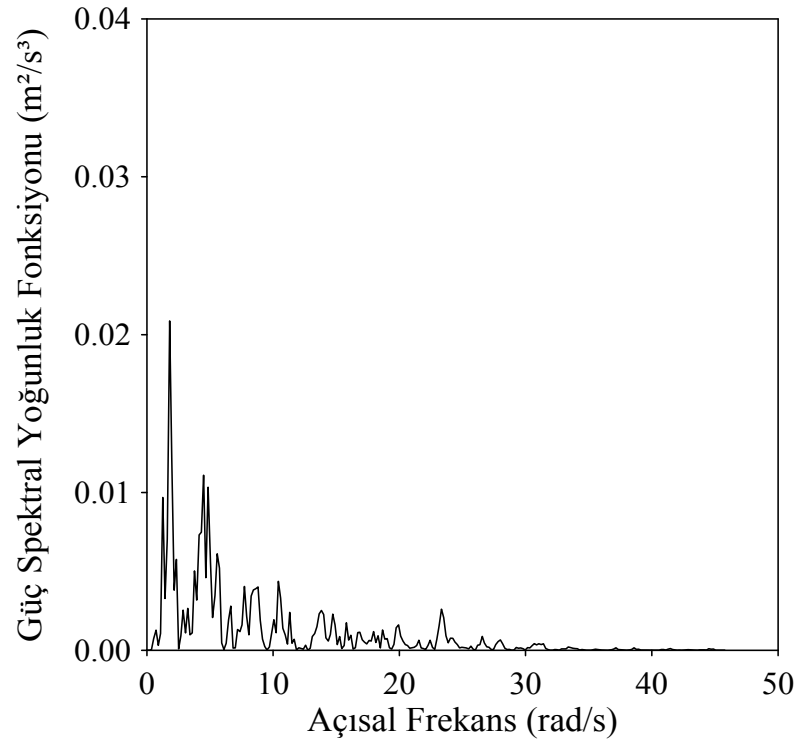
Şekil 75. 1992 Erzincan depremi doğu-batı bileşeni ivme kaydı



Şekil 76. 1999 Kocaeli depremi doğu-batı bileşeni ivme kaydı

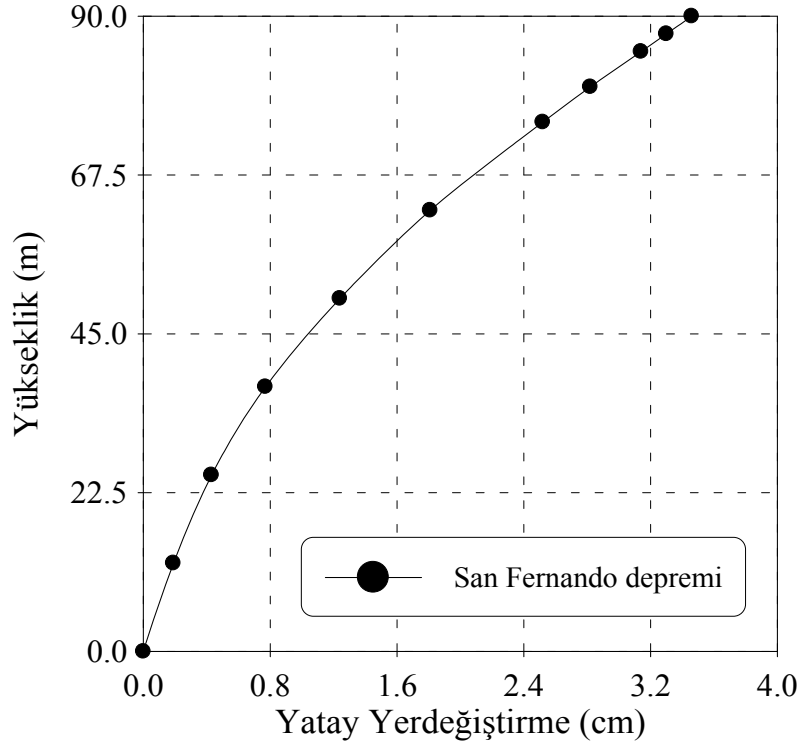


Şekil 77. 1992 Erzincan depremi doğu-batı bileşeni güç spektral yoğunluk fonksiyonu

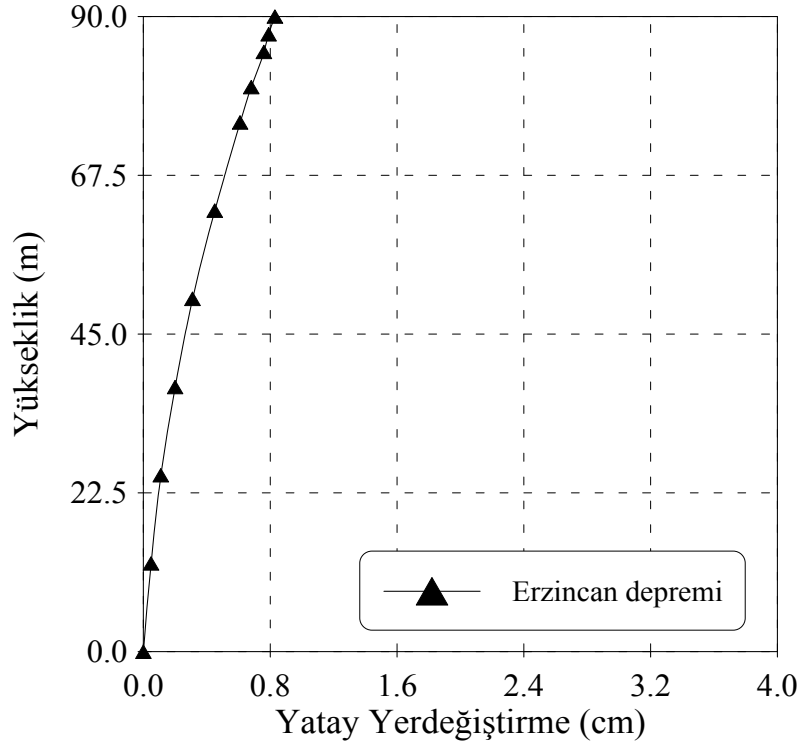


Şekil 78. 1999 Kocaeli depremi doğu-batı bileşeni güç spektral yoğunluk fonksiyonu

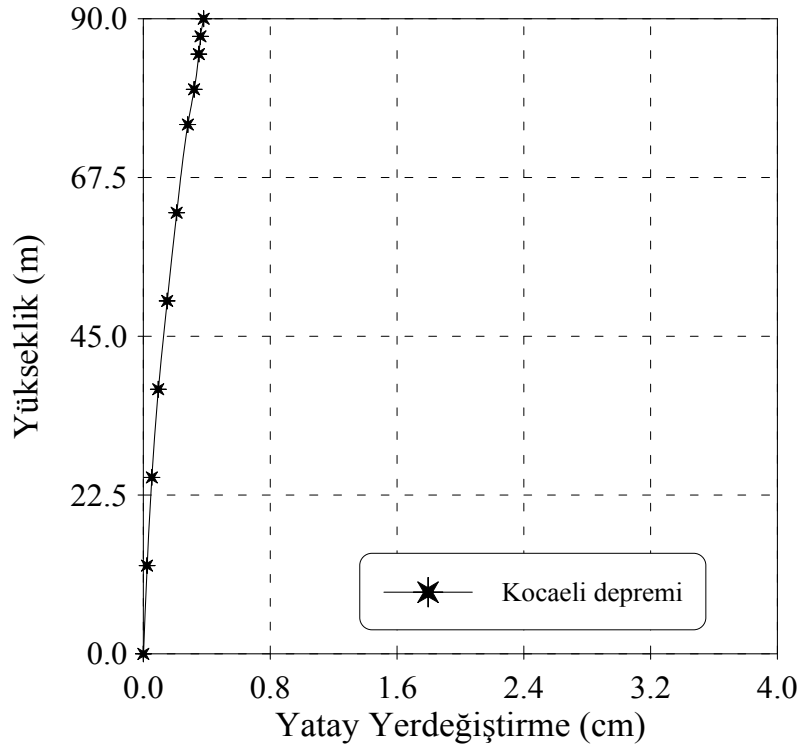
Şekil 16’da verilen baraj-rezervuar etkileşim sisteminin farklı yer hareketleri için STOCALF programı yardımıyla yapılan stokastik dinamik analizi sonucu ortalama maksimum davranışlar elde edilmiştir. Farklı yer hareketlerinin farklı genlikleri olduğu için elde edilen baraj davranışları ayrı şekillerde gösterilmiştir. Baraj-rezervuar etkileşim sisteminin stokastik dinamik analizinden elde edilen barajın memba yüzü kret noktası ortalama maksimum yatay yerdeğiştirmesi San Fernando depremi için 3.46 cm, Erzincan depremi için 0.83 cm, Kocaeli depremi için 0.38 cm’dir. San Fernando depreminin maksimum ivmesi Erzincan ve Kocaeli depremlerine oranla daha yüksek olduğu için bu beklenen bir sonuçtur. Şekil 79-81’de görüldüğü gibi ortalama maksimum yatay yerdeğiştirmeler en yüksek değerleri San Fernando depreminde, en düşük değerleri Kocaeli depreminde almaktadır.



Şekil 79. San Fernando depremi etkisiyle baraj memba yüzeyinde oluşan ortalama maksimum yatay yerdeğiştirmeler

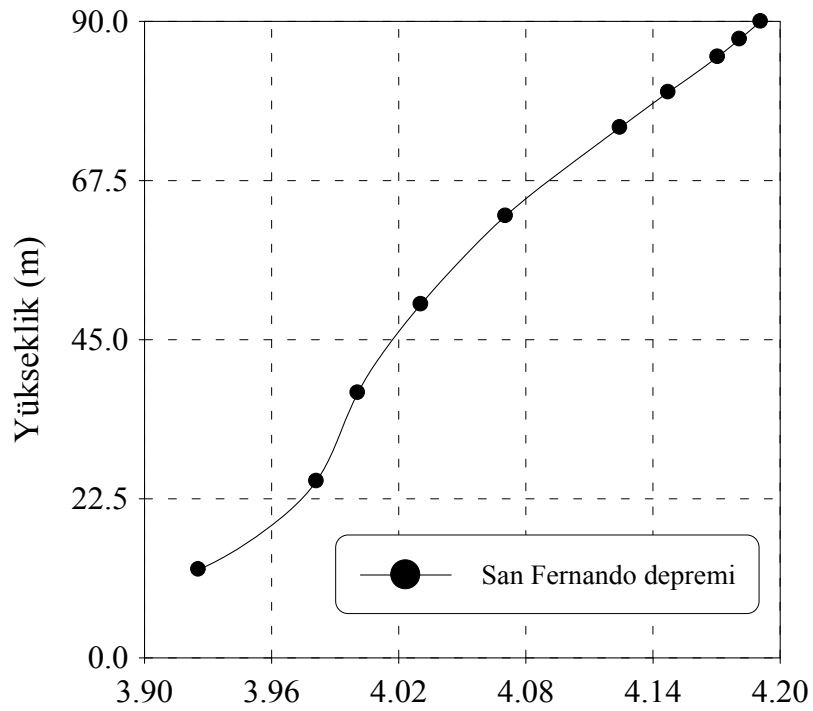


Şekil 80. Erzincan depremi etkisiyle baraj memba yüzeyinde oluşan ortalama maksimum yatay yerdeğiştirmeler

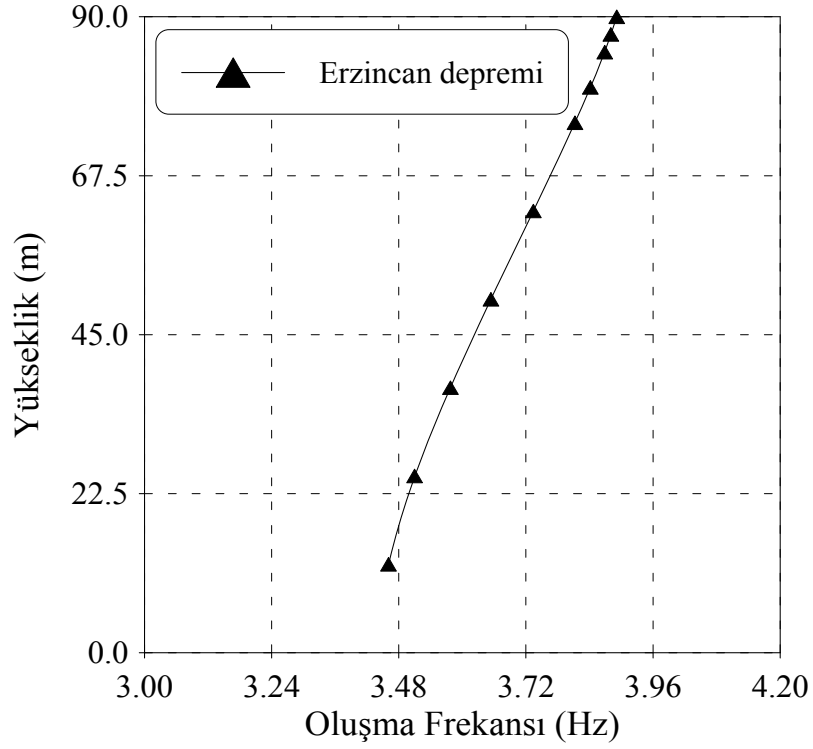


Şekil 81. Kocaeli depremi etkisiyle baraj memba yüzeyinde oluşan ortalama maksimum yatay yerdeğiştirmeler

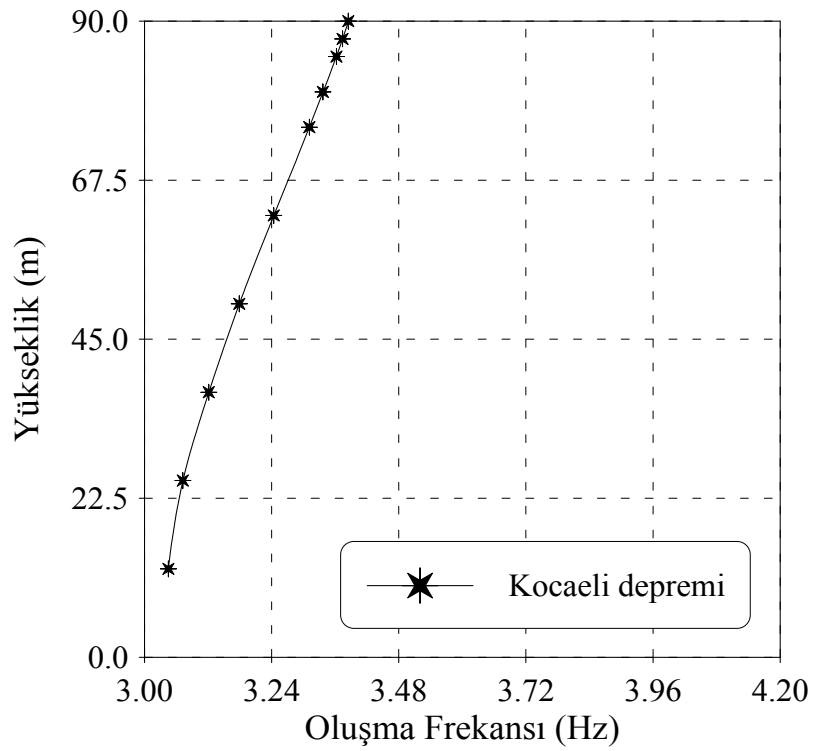
Baraj-rezervuar etkileşim sisteminin San Fernando, Erzincan ve Kocaeli deprem kayıtları kullanılarak yapılan stokastik dinamik analizinin gerçekleştirilmesiyle baraj memba yüzeyinde elde edilen ortalama maksimum yatay yerdeğiştirmelerin oluşma frekansları Şekil 82-84’de görölmektedir. San Fernando depremi etkisi altındaki baraj-rezervuar etkileşim sisteminde barajın memba yüzü kret noktasında oluşan 3.46 cm değerindeki yatay yerdeğiştirmenin oluşma frekansı 4.19 Hz, periyodu 0.239 sn’dir. Aynı noktada Erzincan depremi etkisi sonucu oluşan 0.83 cm değerindeki yatay yerdeğiştirmenin oluşma frekansı 3.89 Hz, periyodu 0.257 sn iken, Kocaeli depremi etkisi sonucu oluşan 0.38 cm değerindeki yatay yerdeğiştirmenin oluşma frekansı 3.39 Hz, periyodu 0.295 sn’dir. Yatay yerdeğiştirme değerleri azaldıkça oluşma frekansı değerleri de azalmakta, periyotları ise artmaktadır.



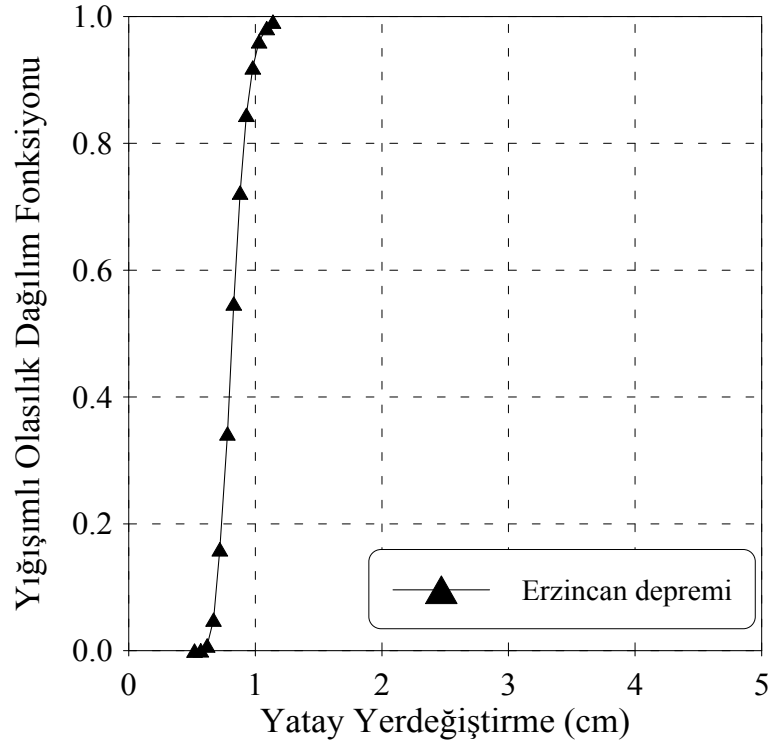
Şekil 82. San Fernando depremi etkisiyle baraj memba yüzeyinde oluşan ortalama maksimum yatay yerdeğiştirmelerin oluşma frekansları



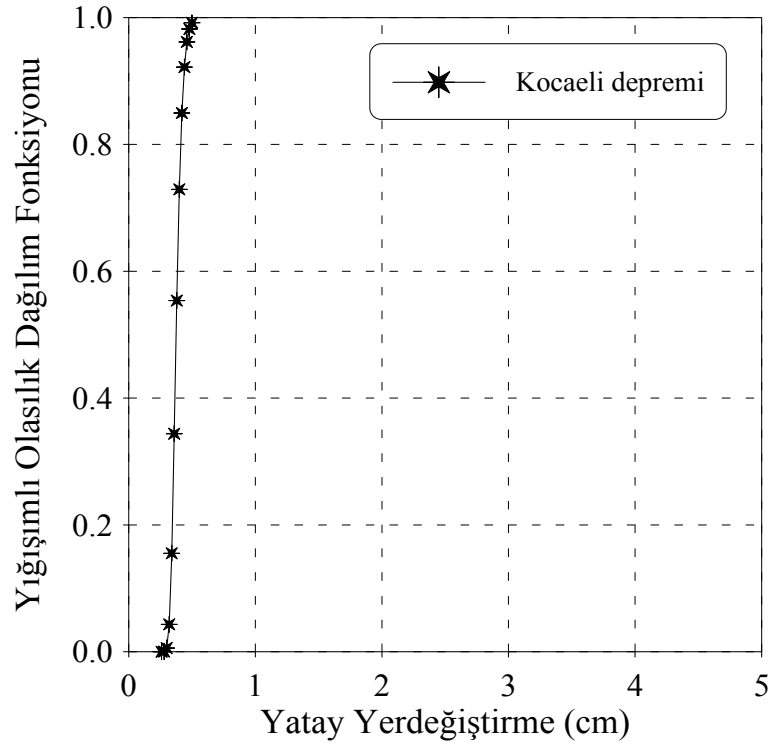
Şekil 83. Erzincan depremi etkisiyle baraj memba yüzeyinde oluşan ortalama maksimum yatay yerdeğıştirmelerin oluşma frekansları



Şekil 84. Kocaeli depremi etkisiyle baraj memba yüzeyinde oluşan ortalama maksimum yatay yerdeğıştirmelerin oluşma frekansları



Şekil 86. Erzincan depremi etkisiyle baraj kret noktasında (C noktası) oluşan ortalama maksimum yatay yerdeştirmelerin yığışımlı olasılık dağılım fonksiyonu



Şekil 87. Kocaeli depremi etkisiyle baraj kret noktasında (C noktası) oluşan ortalama maksimum yatay yerdeştirmelerin yığışımlı olasılık dağılım fonksiyonu

Farklı yer hareketleri etkisindeki baraj-rezervuar etkileşim sisteminin stokastik dinamik analizinin gerçekleştirilmesiyle ortalama maksimum gerilme bileşenleri elde edilmiştir. Baraj memba yüzeyi boyunca San Fernando, Erzincan ve Kocaeli depremleri için elde edilen gerilme bileşenleri Şekil 88-96'da gösterilmiştir. Şekiller incelendiğinde San Fernando depremi sonucu oluşan ortalama maksimum gerilme bileşenleri Erzincan ve Kocaeli depremi sonucu oluşanlardan oldukça büyüktür. San Fernando, Erzincan ve Kocaeli depremleri için barajın memba topuğunda (A Gauss noktası) elde edilen gerilme değerleri Tablo 13'te verilmektedir. Tablo 13'ten en düşük ivmeli deprem kaydı (Kocaeli depremi) kullanılarak yapılan analizlerden elde edilen gerilme bileşenlerinin değerleri en küçük olmaktadır.

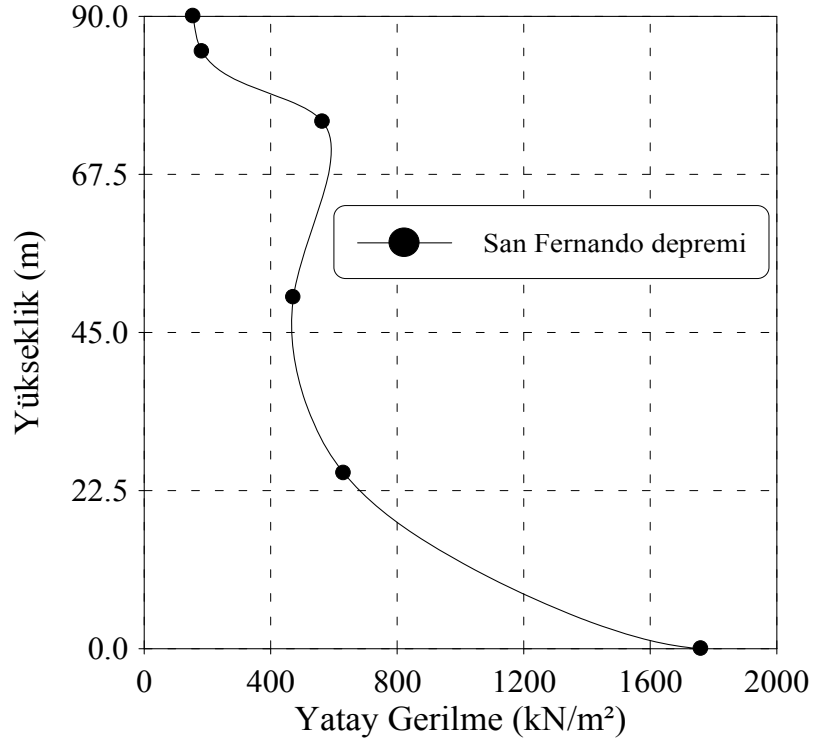
Tablo 13. Farklı deprem kayıtları için baraj memba topuğunda (A Gauss noktası) oluşan ortalama maksimum gerilmeler

Depremler	Yatay Gerilme (kN/m ²)	Düşey Gerilme (kN/m ²)	Kayma Gerilmesi (kN/m ²)
San Fernando	1760.80	7043.10	1755.80
Erzincan	446.48	1785.90	459.35
Kocaeli	211.20	844.78	227.69

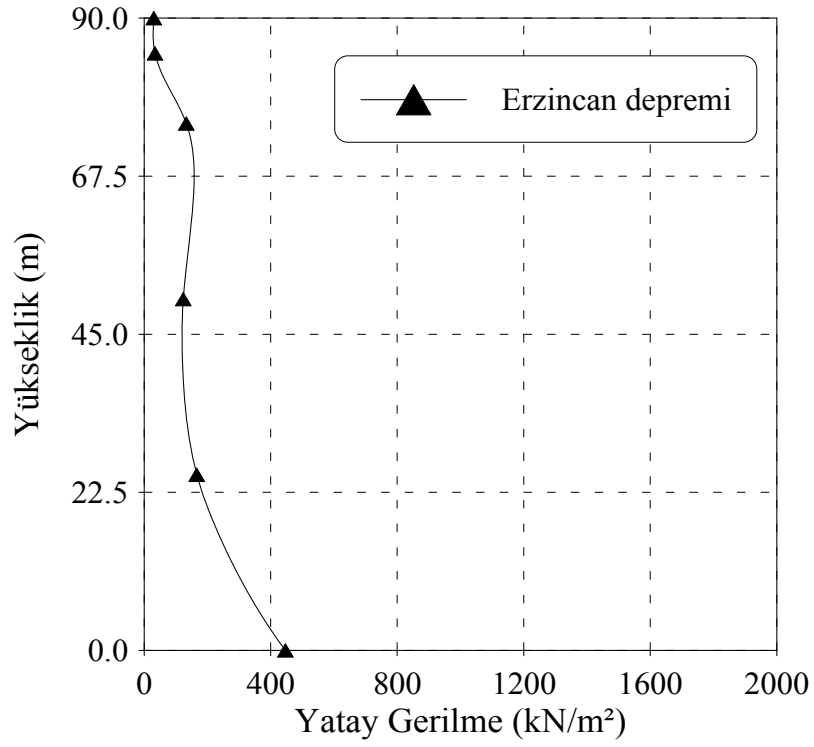
San Fernando, Erzincan ve Kocaeli depremleri için I-I kesitindeki ortalama maksimum gerilme bileşenlerinin değişimi Şekil 97-105'te görülmektedir. En büyük gerilmeler San Fernando depremi sonucu oluşmuştur. Bu sırayı Erzincan ve Kocaeli depremleri izlemektedir. En büyük deprem ivmesinin San Fernando depremine ait olduğu düşünülürse bu kaçınılmaz bir sonuçtur. I-I kesitinde farklı depremlere ait ortalama maksimum yatay ve düşey gerilme grafikleri incelenirse (Şekil 97-102) gerilme değerlerinin barajın mansap kısmından ortasına doğru gidildikçe azaldığı daha sonra mansap tarafına doğru arttığı gözlenmiştir. I-I kesitindeki kayma gerilmeleri memba tarafında en düşük, mansap tarafında en yüksek değerleri almaktadır.

Farklı deprem hareketleri için elde edilen ortalama maksimum gerilme bileşenlerinin II-II kesitindeki yatay uzaklıkla değişimleri Şekil 106-114'te verilmektedir. II-II kesitindeki ortalama maksimum yatay gerilmeler barajın memba tarafından orta kısmına doğru gidildikçe artmakta, mansap tarafına doğru azalmaktadır. II-II kesitindeki ortalama maksimum düşey gerilmeler incelendiğinde San Fernando ve Erzincan depremleri sonucu oluşan ortalama maksimum düşey gerilmeler memba tarafından orta kısmına doğru gidildikçe azalmakta mansap tarafına doğru artmaktadır. Sadece Kocaeli depremi sonucu bu gerilmeler barajın memba tarafından mansap tarafına doğru sürekli azalmaktadır. Bu sonuç Kocaeli depreminin ivmesinin küçük olmasına ve yumuşak zeminde kaydedilmiş olmasına bağlanmaktadır. II-II kesitindeki ortalama maksimum kayma gerilmeleri her üç deprem için de barajın memba tarafından mansap tarafına doğru artan değerler almaktadır.

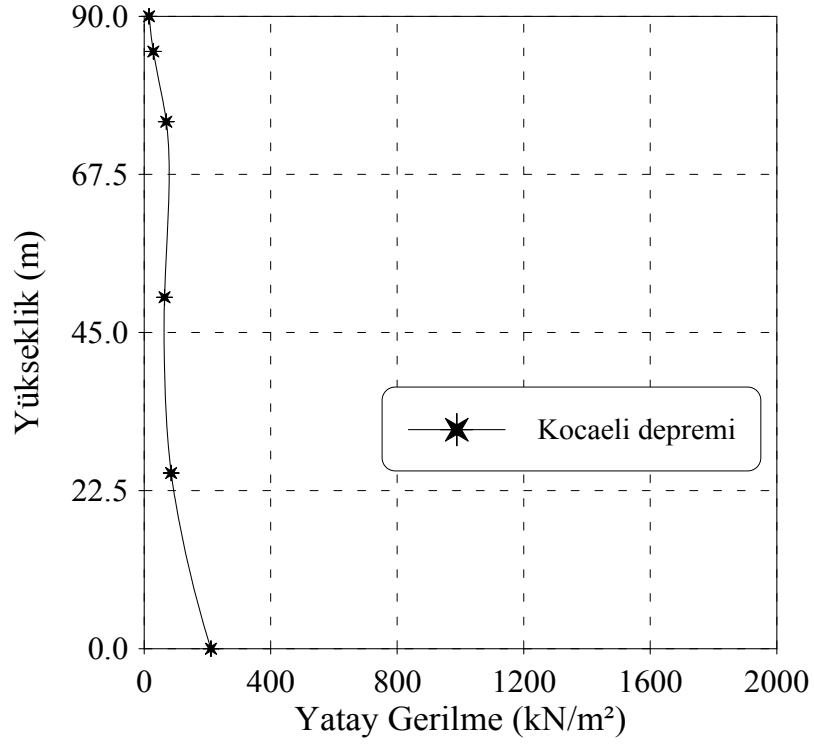
Baraj-rezervuar etkileşim sisteminin farklı yer hareketleri için stokastik dinamik analizi sonucu baraj memba yüzeyinde elde edilen hidrodinamik basınçlar Şekil 115-117'de verilmektedir. Hidrodinamik basınç değerleri baraj-rezervuar etkileşim sisteminin ara yüzeyine yakın sıvı elemanların Gauss noktalarında elde edilmiştir. Barajın memba topuğuna bitişik sıvı elemanın B Gauss noktasındaki hidrodinamik basınç San Fernando, Erzincan ve Kocaeli depremleri için sırasıyla 594.66 kN/m², 148.52 kN/m², 78.52 kN/m²'dir. Baraj-rezervuar etkileşim sisteminde baraj memba topuğundaki hidrodinamik basınçlar yerdeğiştirme ve gerilmelerde olduğu gibi San Fernando depremi etkisi için en büyük değerleri alırken, Kocaeli depremi için en küçük değerleri almaktadır. Çünkü San Fernando depreminin maksimum ivmesi 1.076g iken Kocaeli depreminin maksimum ivmesi sadece 0.349g kadardır.



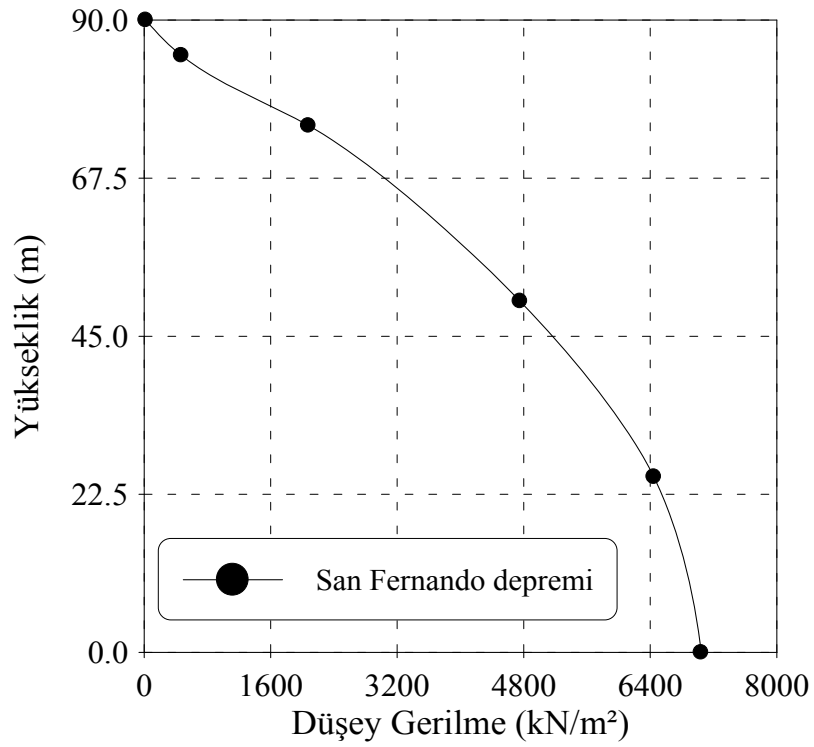
Şekil 88. San Fernando depremi etkisiyle baraj memba yüzeyinde oluşan ortalama maksimum yatay gerilmeler



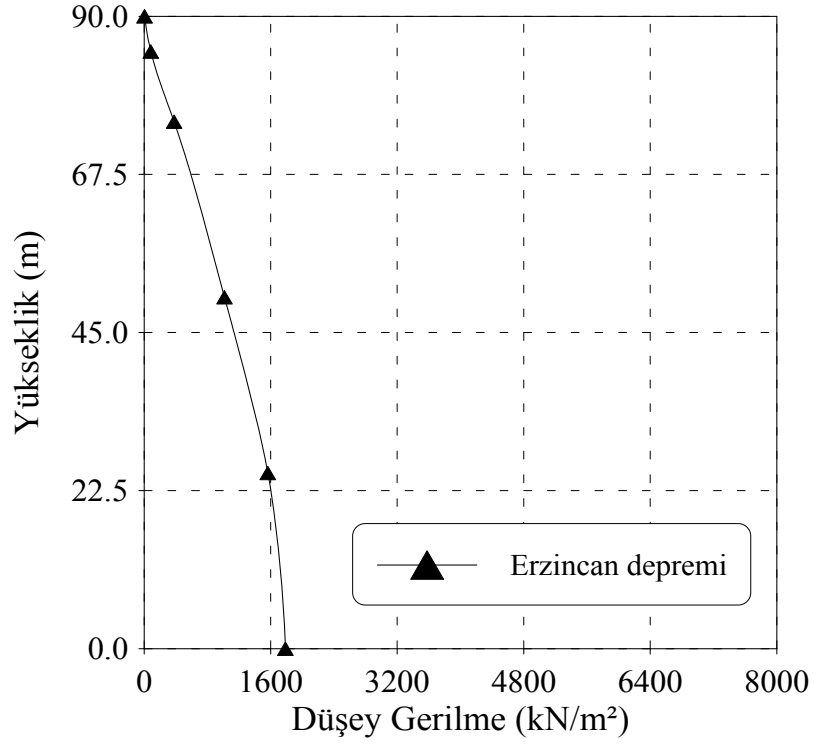
Şekil 89. Erzincan depremi etkisiyle baraj memba yüzeyinde oluşan ortalama maksimum yatay gerilmeler



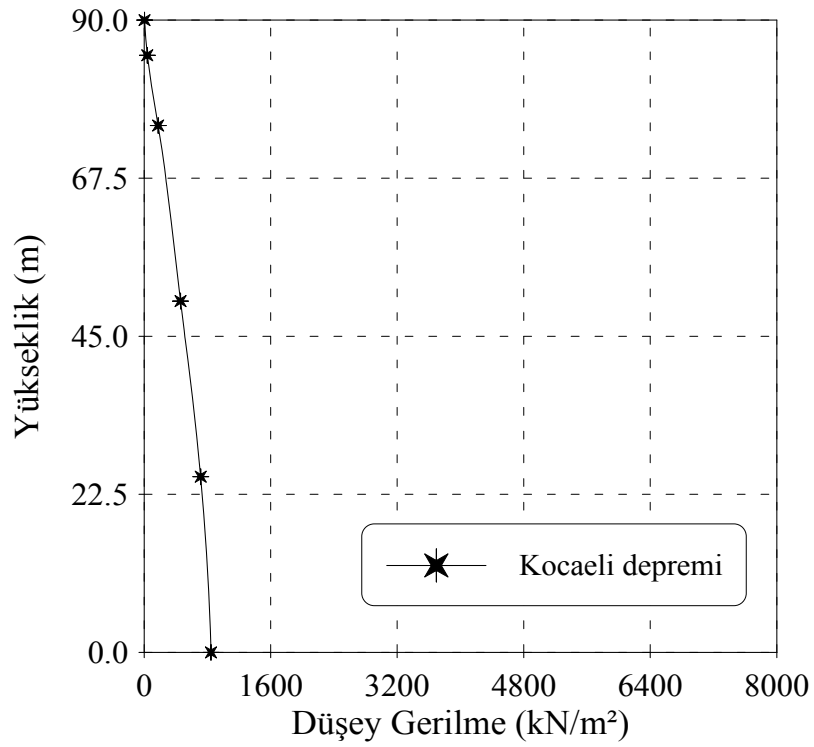
Şekil 90. Kocaeli depremi etkisiyle baraj memba yüzeyinde oluşan ortalama maksimum yatay gerilmeler



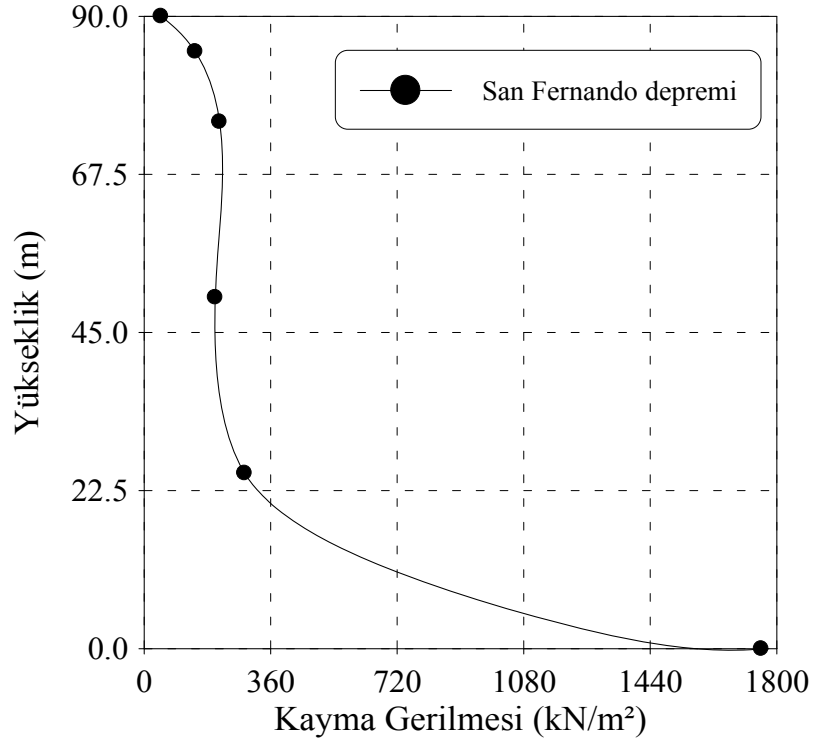
Şekil 91. San Fernando depremi etkisiyle baraj memba yüzeyinde oluşan ortalama maksimum düşey gerilmeler



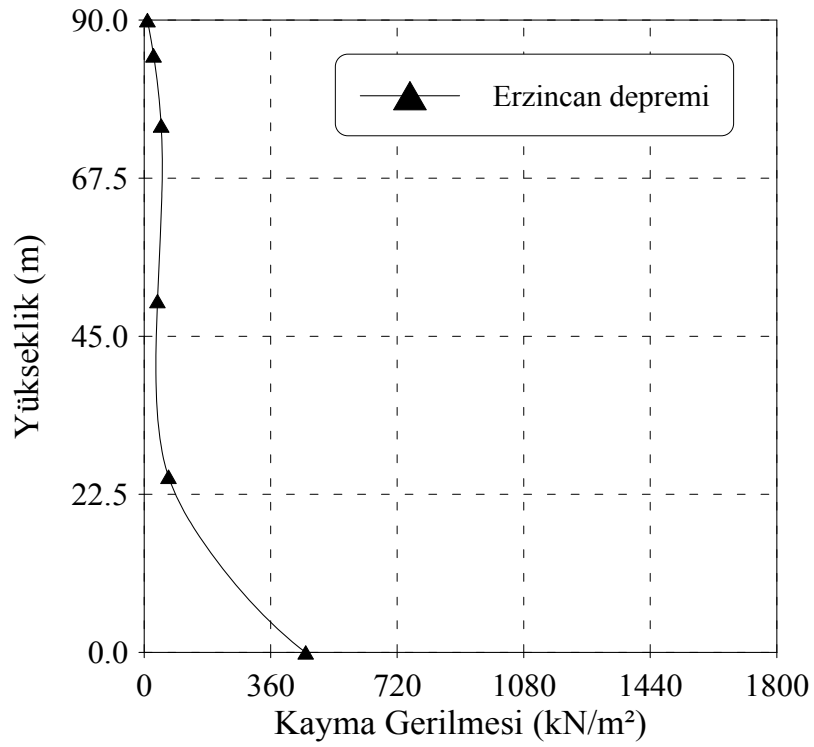
Şekil 92. Erzincan depremi etkisiyle baraj memba yüzeyinde oluşan ortalama maksimum düşey gerilmeler



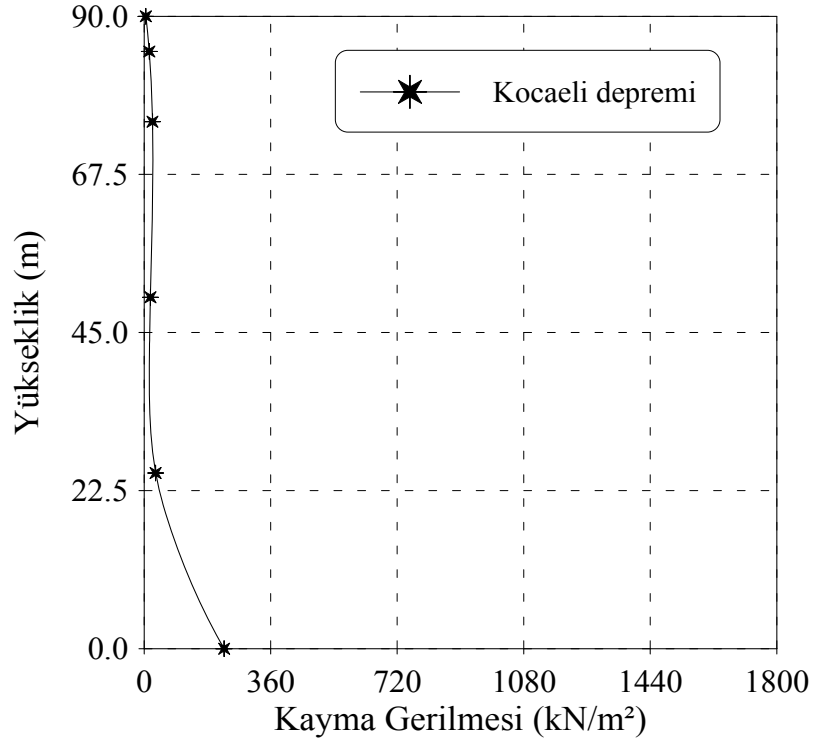
Şekil 93. Kocaeli depremi etkisiyle baraj memba yüzeyinde oluşan ortalama maksimum düşey gerilmeler



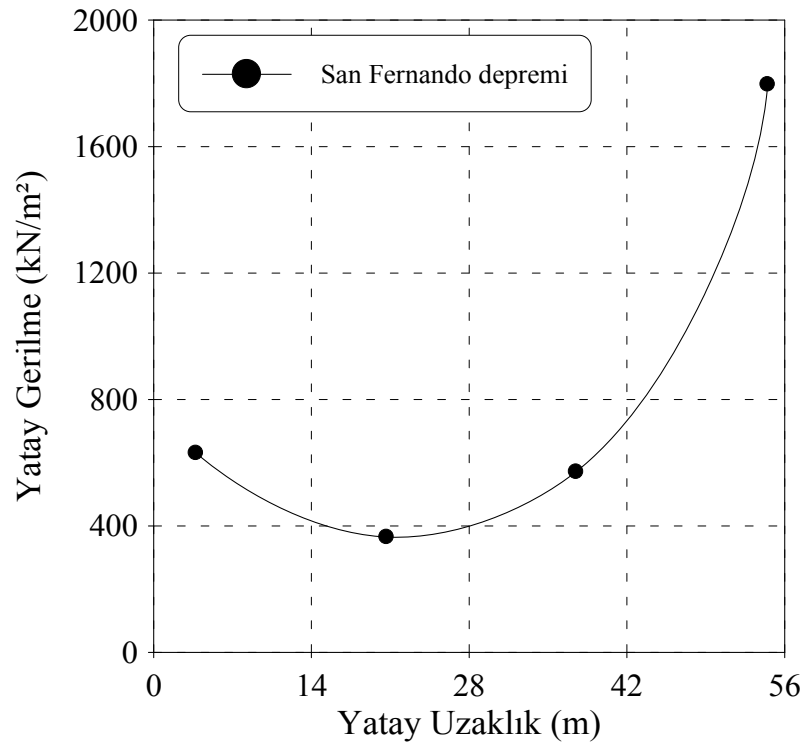
Şekil 94. San Fernando depremi etkisiyle baraj memba yüzeyinde oluşan ortalama maksimum kayma gerilmeleri



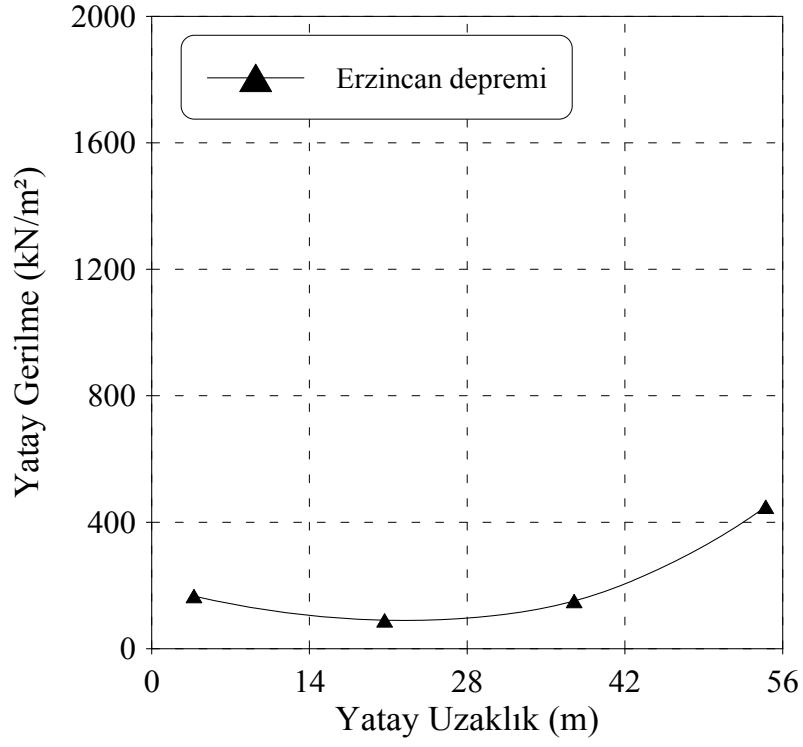
Şekil 95. Erzincan depremi etkisiyle baraj memba yüzeyinde oluşan ortalama maksimum kayma gerilmeleri



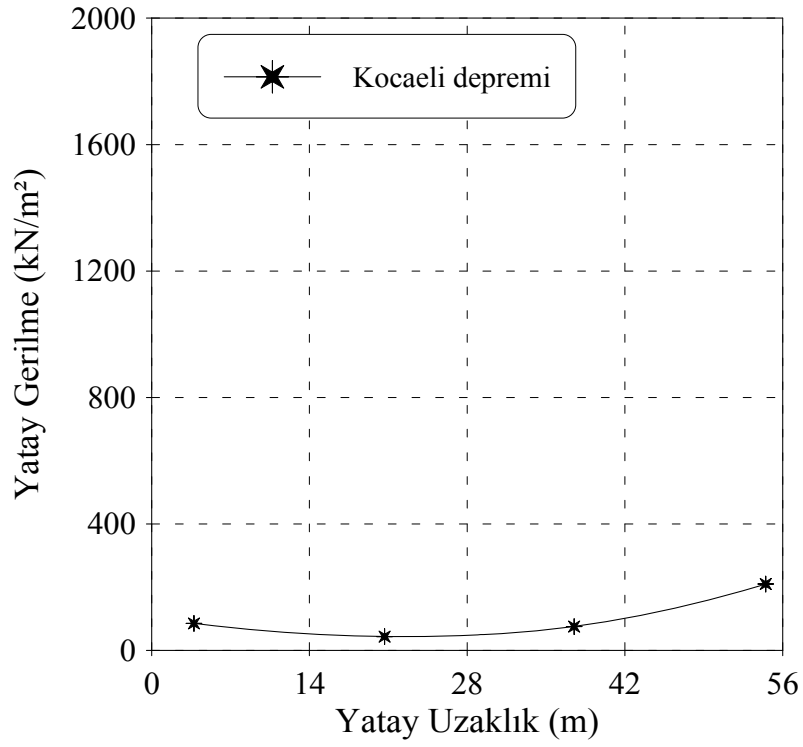
Şekil 96. Kocaeli depremi etkisiyle baraj memba yüzeyinde oluşan ortalama maksimum kayma gerilmeleri



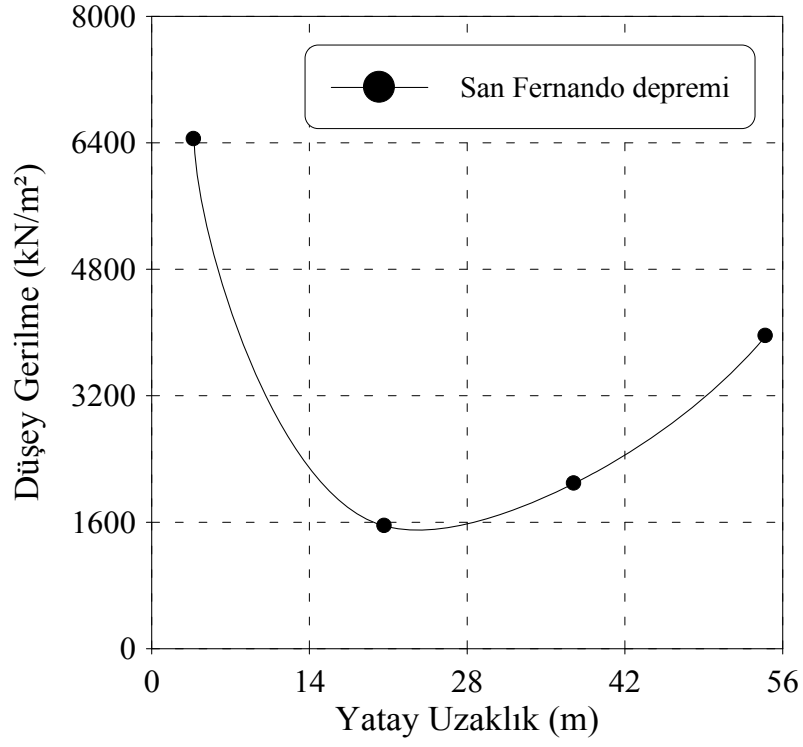
Şekil 97. San Fernando depremi etkisiyle barajın I-I kesitinde oluşan ortalama maksimum yatay gerilmeler



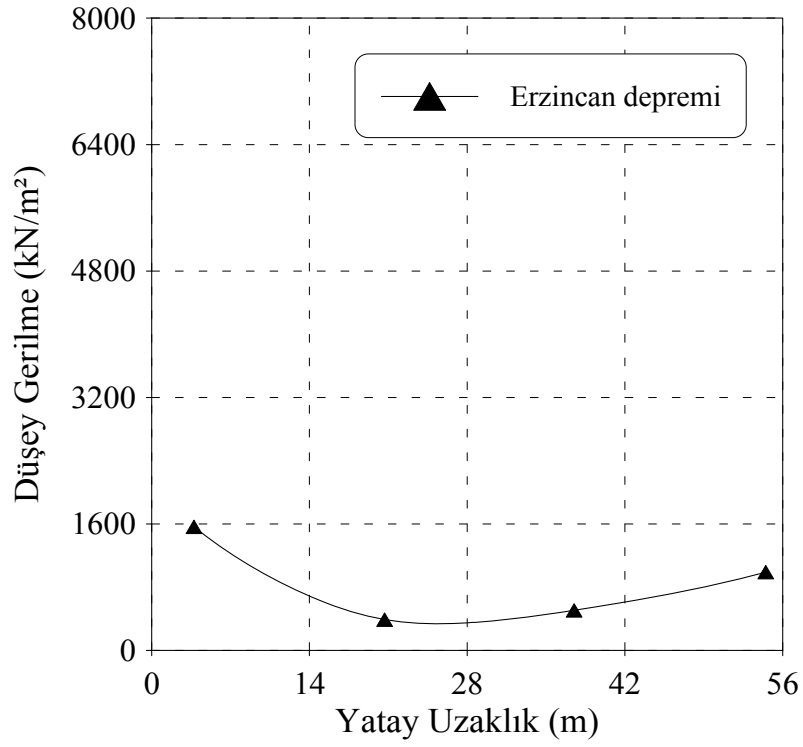
Şekil 98. Erzincan depremi etkisiyle barajın I-I kesitinde oluşan ortalama maksimum yatay gerilmeler



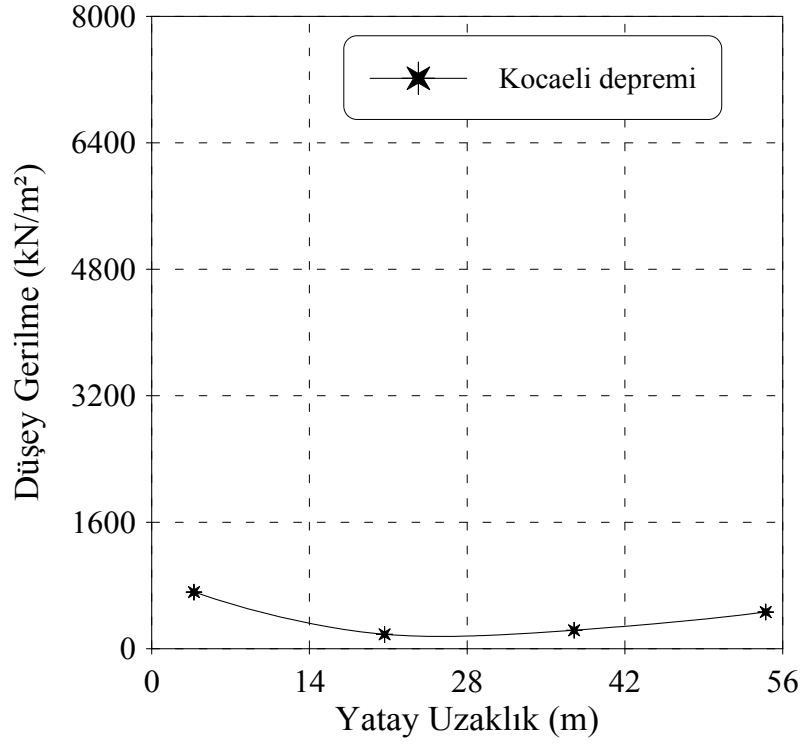
Şekil 99. Kocaeli depremi etkisiyle barajın I-I kesitinde oluşan ortalama maksimum yatay gerilmeler



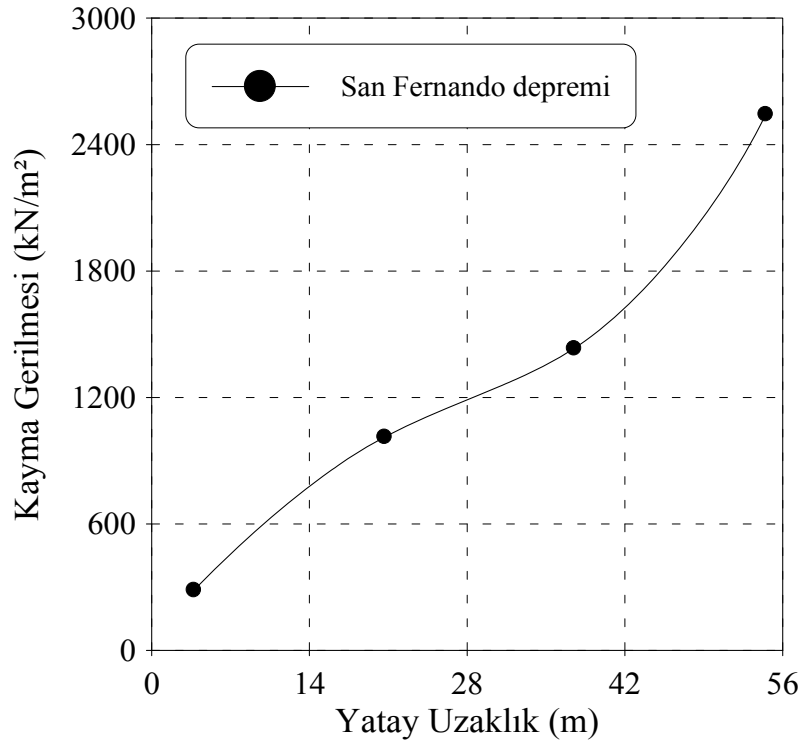
Şekil 100. San Fernando depremi etkisiyle barajın I-I kesitinde oluşan ortalama maksimum düşey gerilmeler



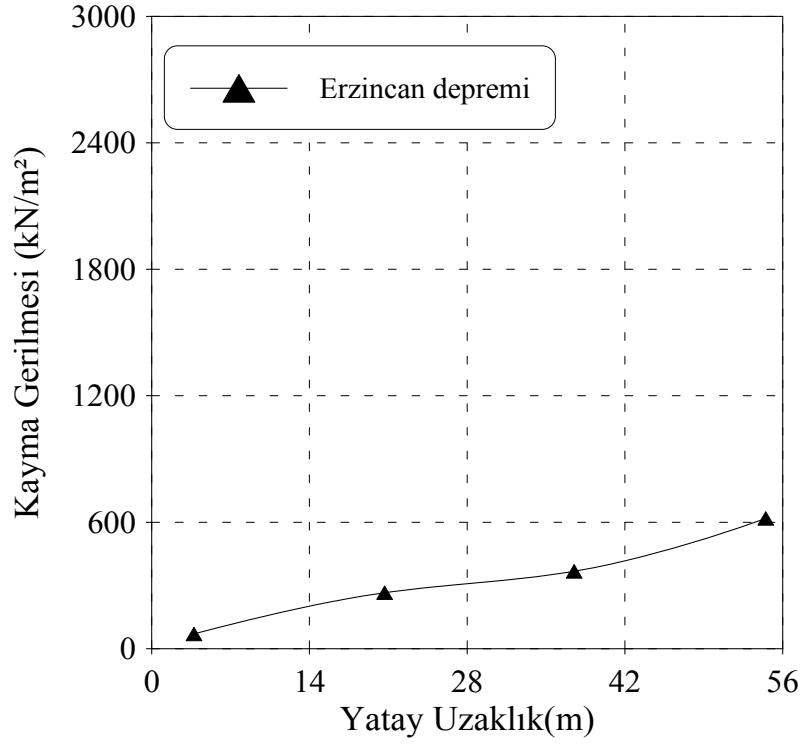
Şekil 101. Erzincan depremi etkisiyle barajın I-I kesitinde oluşan ortalama maksimum düşey gerilmeler



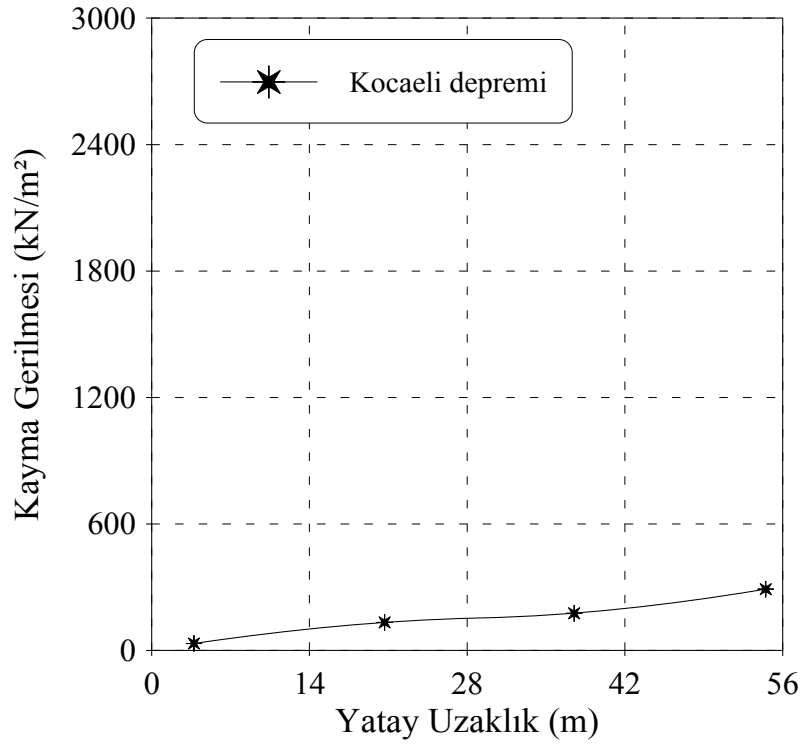
Şekil 102. Kocaeli depremi etkisiyle barajın I-I kesitinde oluşan ortalama maksimum düşey gerilmeler



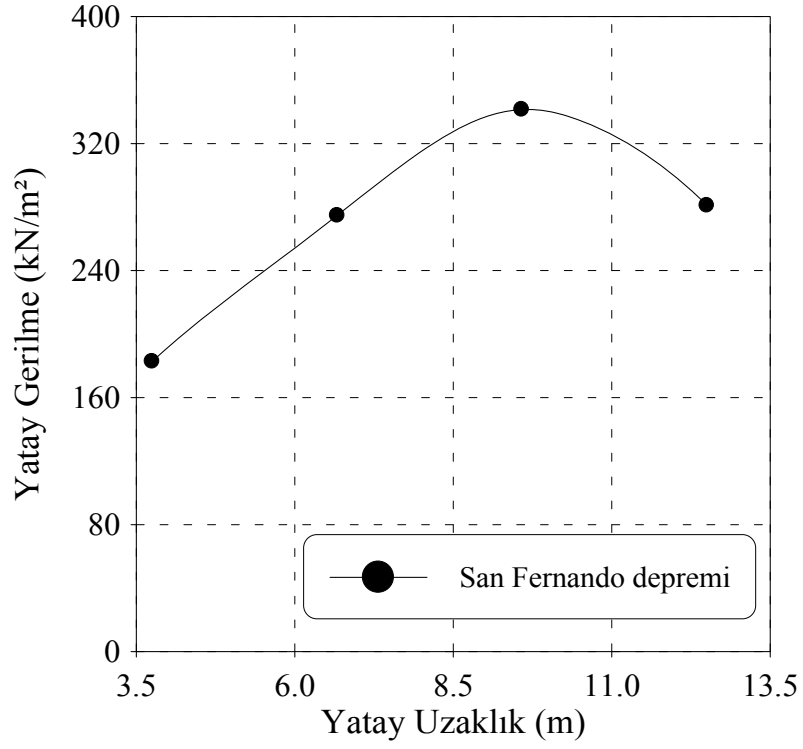
Şekil 103. San Fernando depremi etkisiyle barajın I-I kesitinde oluşan ortalama maksimum kayma gerilmeleri



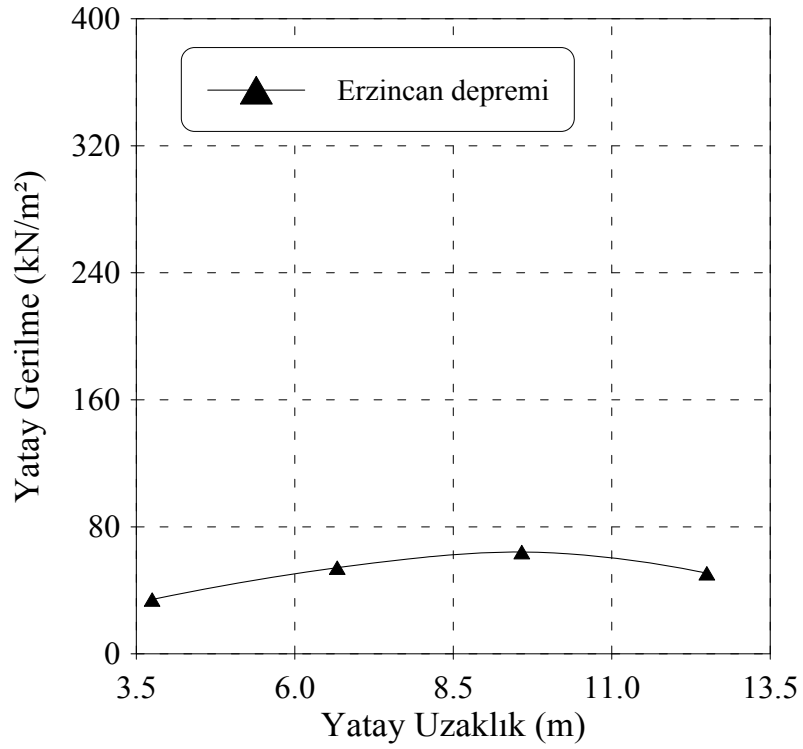
Şekil 104. Erzincan depremi etkisiyle barajın I-I kesitinde oluşan ortalama maksimum kayma gerilmeleri



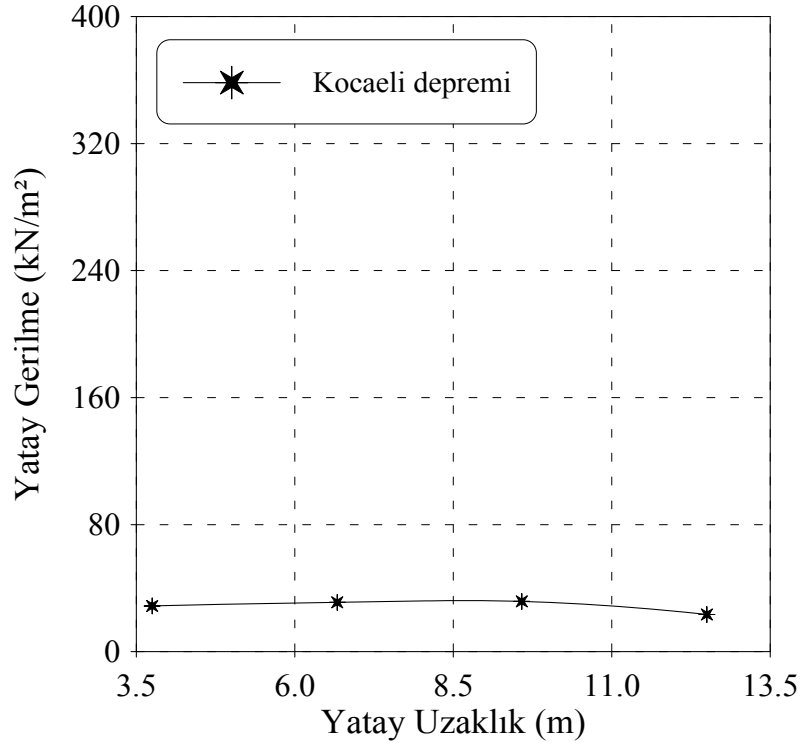
Şekil 105. Kocaeli depremi etkisiyle barajın I-I kesitinde oluşan ortalama maksimum kayma gerilmeleri



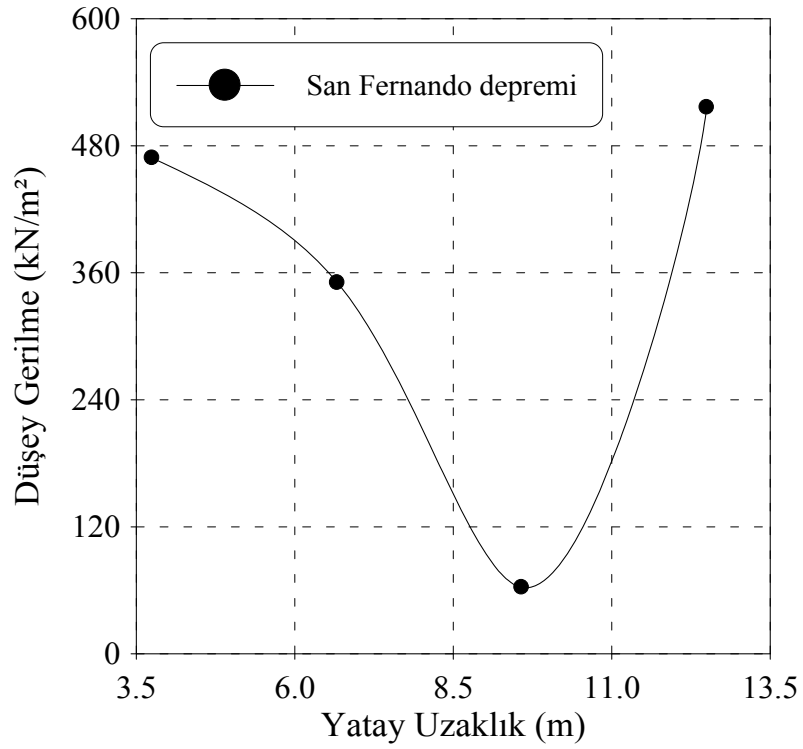
Şekil 106. San Fernando depremi etkisiyle barajın II-II kesitinde oluşan ortalama maksimum yatay gerilmeler



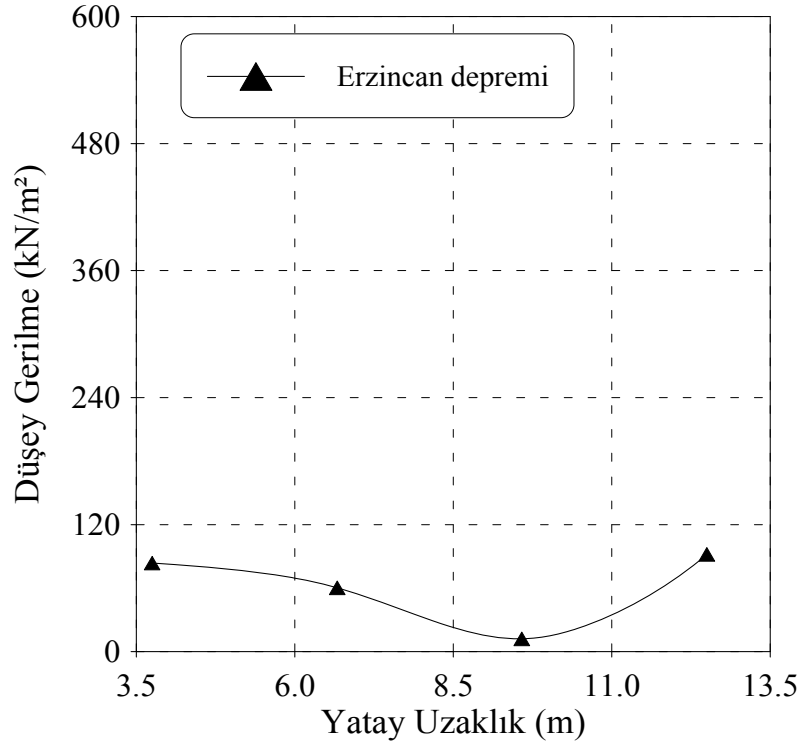
Şekil 107. Erzincan depremi etkisiyle barajın II-II kesitinde oluşan ortalama maksimum yatay gerilmeler



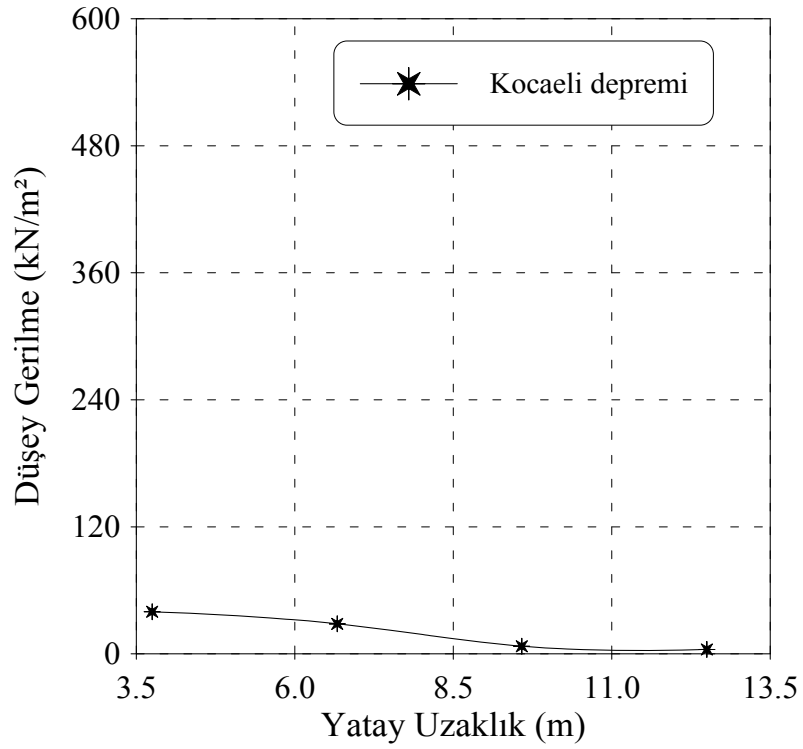
Şekil 108. Kocaeli depremi etkisiyle barajın II-II kesitinde oluşan ortalama maksimum yatay gerilmeler



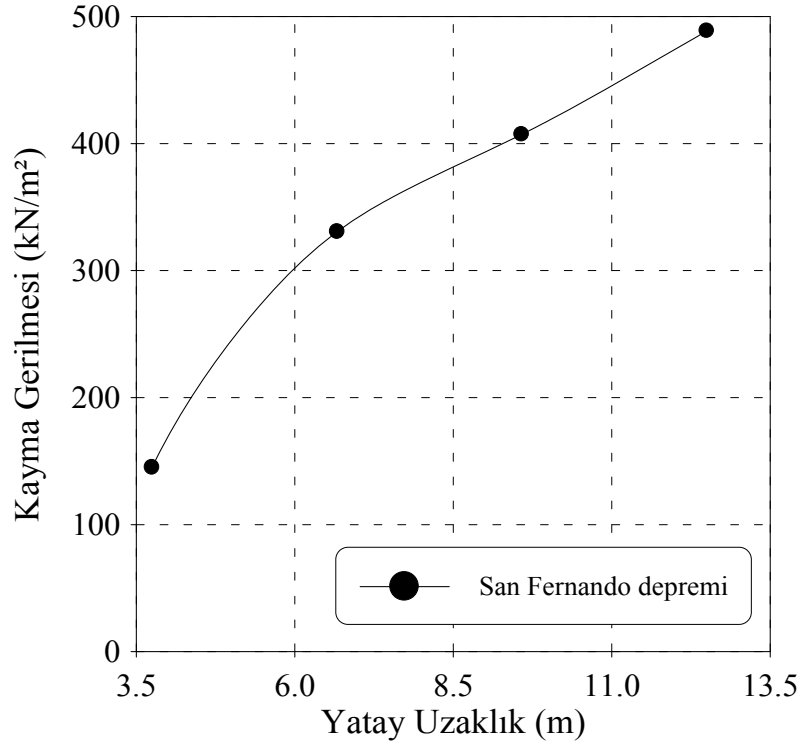
Şekil 109. San Fernando depremi etkisiyle barajın II-II kesitinde oluşan ortalama maksimum düşey gerilmeler



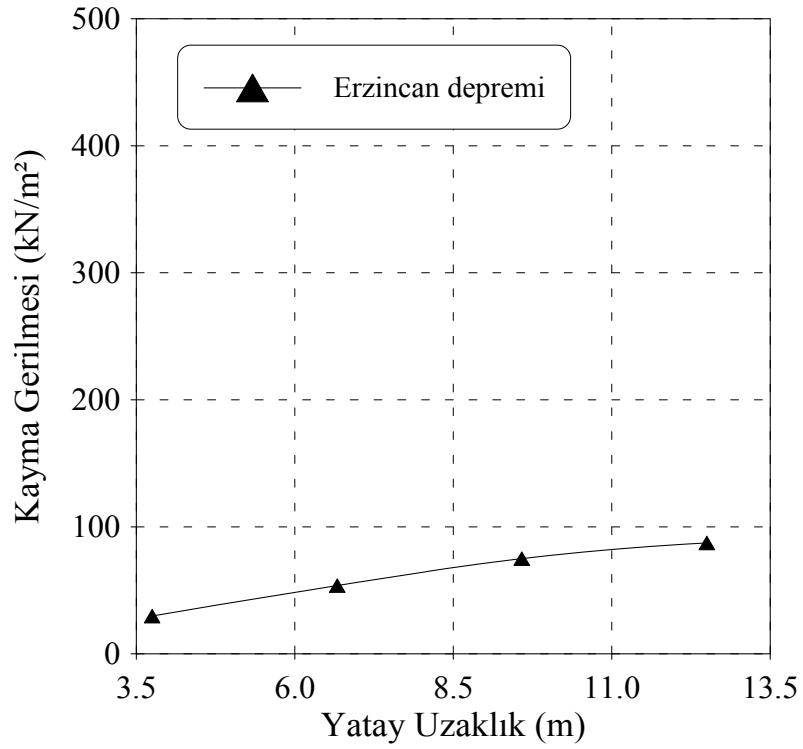
Şekil 110. Erzincan depremi etkisiyle barajın II-II kesitinde oluşan ortalama maksimum düşey gerilmeler



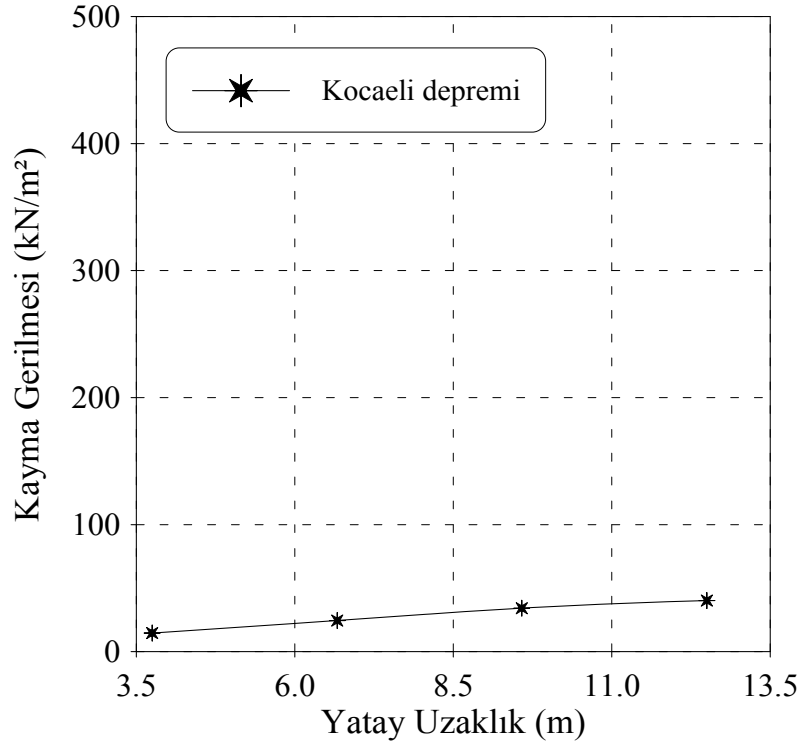
Şekil 111. Kocaeli depremi etkisiyle barajın II-II kesitinde oluşan ortalama maksimum düşey gerilmeler



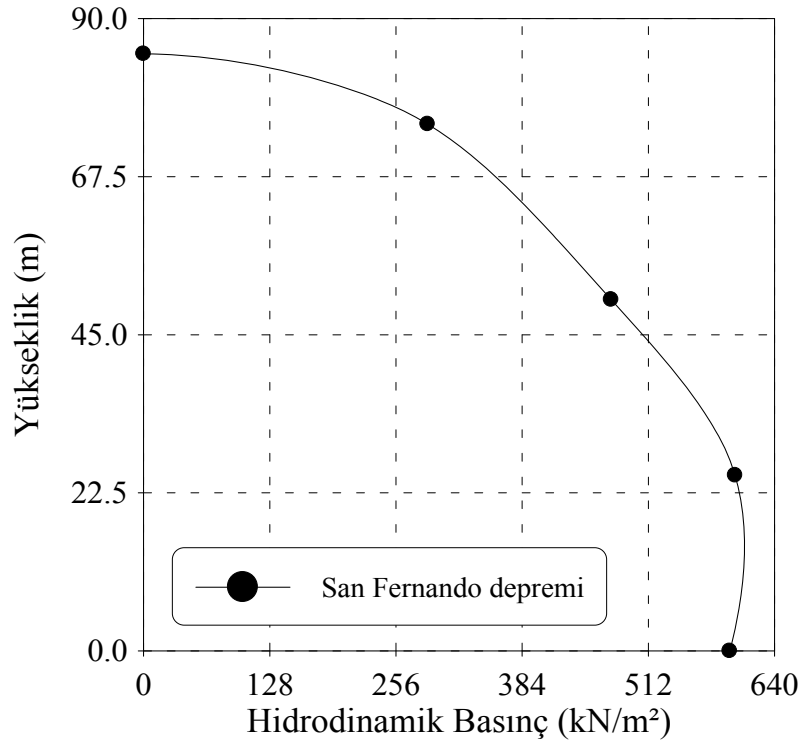
Şekil 112. San Fernando depremi etkisiyle barajın II-II kesitinde oluşan ortalama maksimum kayma gerilmeleri



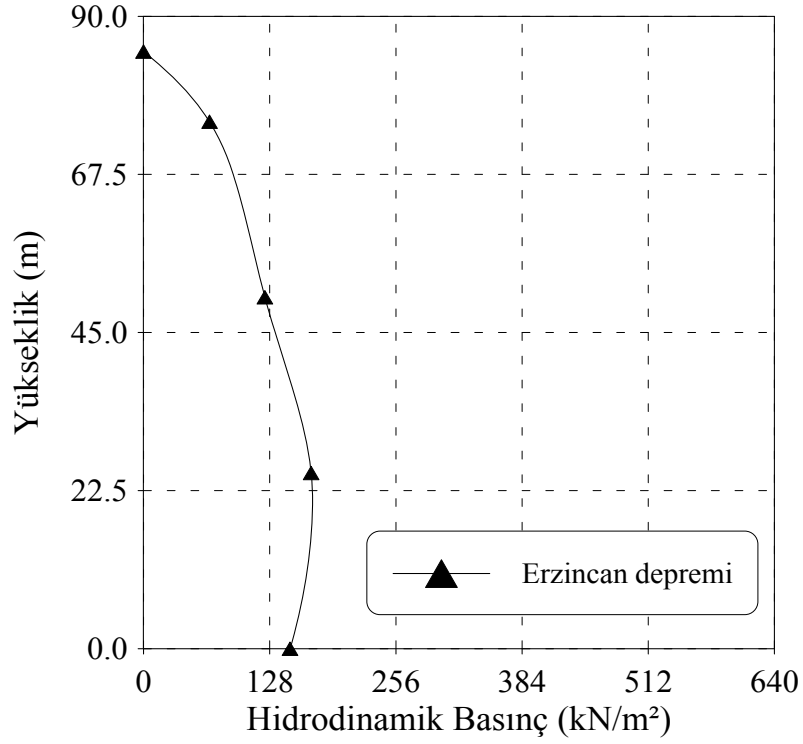
Şekil 113. Erzincan depremi etkisiyle barajın II-II kesitinde oluşan ortalama maksimum kayma gerilmeleri



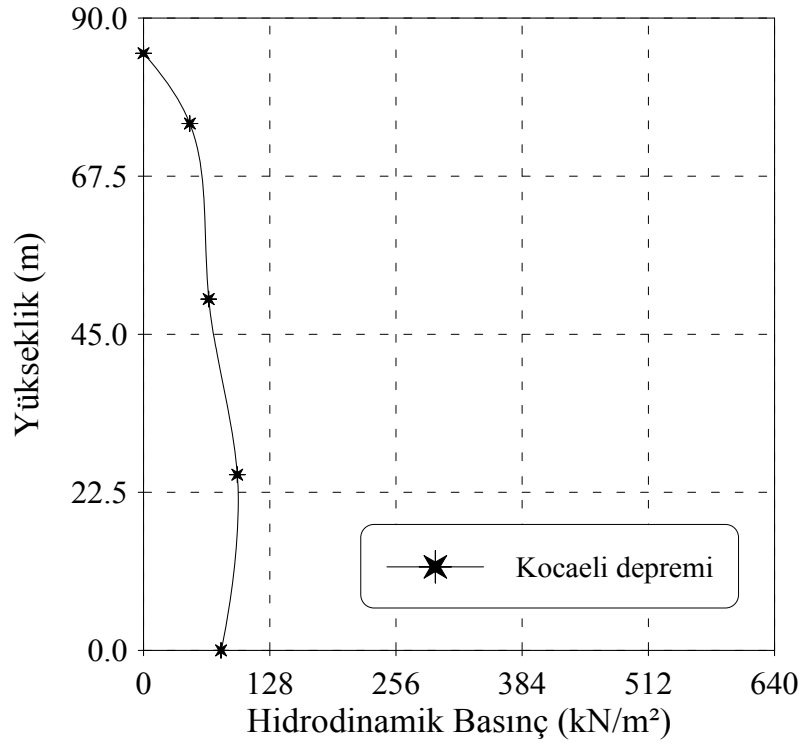
Şekil 114. Kocaeli depremi etkisiyle barajın II-II kesitinde oluşan ortalama maksimum kayma gerilmeleri



Şekil 115. San Fernando depremi etkisiyle baraj memba yüzeyinde elde edilen ortalama maksimum hidrodinamik basınç değişimi



Şekil 116. Erzincan depremi etkisiyle baraj memba yüzeyinde elde edilen ortalama maksimum hidrodinamik basınç değişimi



Şekil 117. Kocaeli depremi etkisiyle baraj memba yüzeyinde elde edilen ortalama maksimum hidrodinamik basınç değişimi

3.1.8. Düşey Yer Hareketinin Baraj-Rezervuar Etkileşim Sisteminin Stokastik Davranışı Üzerindeki Etkisi

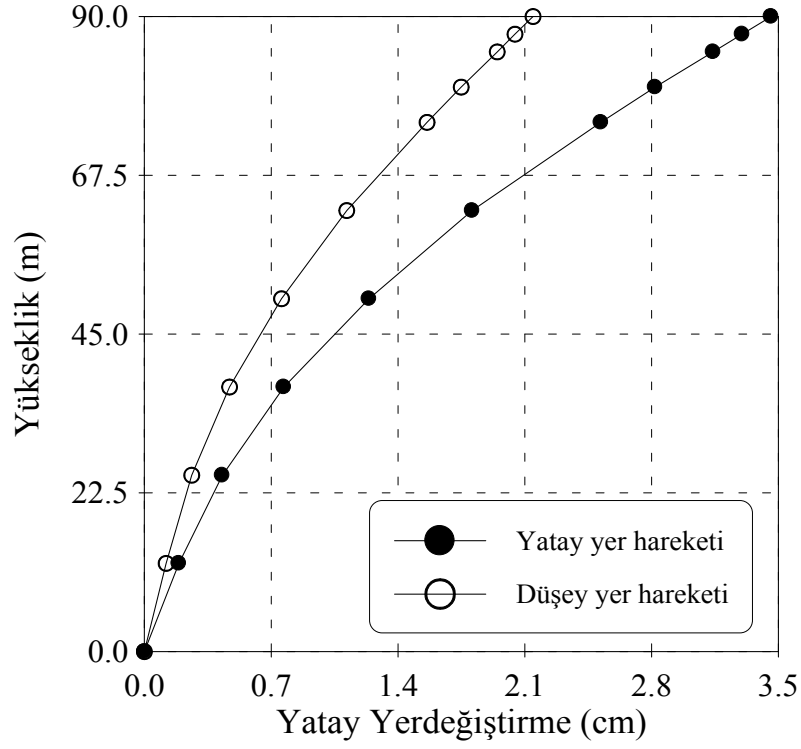
Bu bölüme kadar gerek sıvı-yapı etkileşim sistemi gerekse baraj-rezervuar etkileşim sistemi üzerinde yapılan stokastik analizlerde yer hareketi etkileşim sistemlerine yatay doğrultuda uygulanmıştır. Bu bölümde ise yer hareketi baraj-rezervuar etkileşim sistemine düşey doğrultuda uygulanarak düşey yer hareketinin baraj-rezervuar etkileşim sisteminin stokastik davranışı üzerindeki etkisi incelenecektir. Ayrıca düşey yer hareketi uygulanarak elde edilen stokastik dinamik analiz sonuçları yatay yer hareketi uygulanarak elde edilen stokastik dinamik analiz sonuçları ile karşılaştırılacaktır.

Analizler düşey doğrultuda gerçekleşeceği için 1971 San Fernando depremi Pacoima Barajı ivme kaydının 2/3'ü baraj-rezervuar etkileşim sistemine uygulanmıştır. Analizlerde stokastik dinamik davranışlar hesaplanırken 0.005 s zaman aralığı ve %5 sönüm oranı kullanılmıştır. Hem yatay hareket hem de düşey hareket için barajın memba yüzü kret noktasında (C noktası) elde edilen yatay yerdeğiştirmelerin sayısal değerleri Tablo 14'te gösterilmektedir.

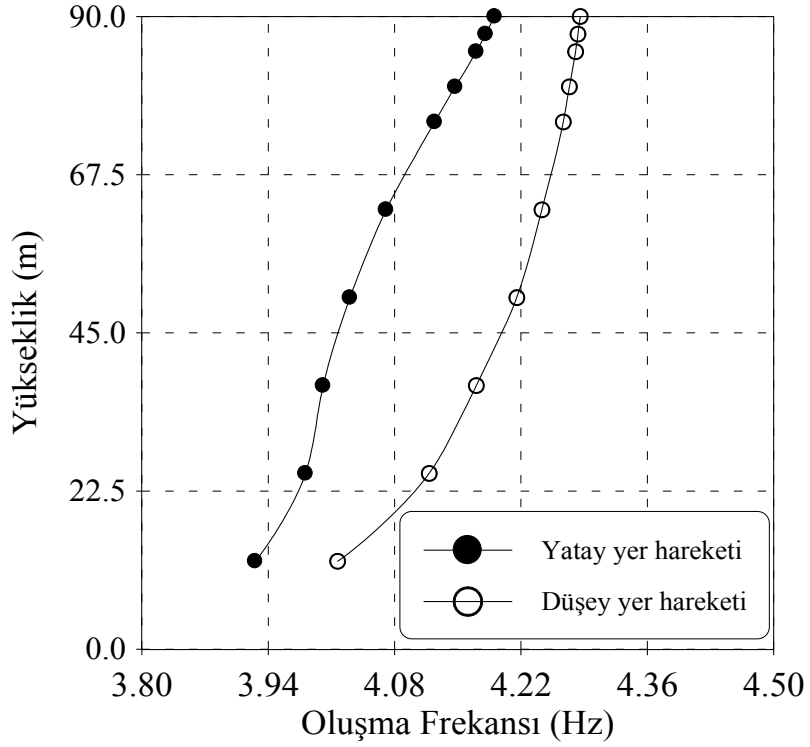
Tablo14. Yatay ve düşey yer hareketi için barajın kret noktasında (C noktası) oluşan ortalama maksimum yatay yerdeğiştirmeler

Hareket Yönü	Yatay Yerdeğiştirme (cm)
Yatay	3.46
Düşey	2.15

Barajın memba yüzeyinde elde edilen ortalama maksimum yatay yerdeğiştirmeler ve yatay yerdeğiştirmelerin oluşma frekansları Şekil 118-119'da verilmektedir. Barajın tabanından kretine doğru çıkıldıkça yerdeğiştirmeler artmaktadır. Yatay hareket için elde edilen yatay yerdeğiştirme değerleri düşey hareket için elde edilen yatay yerdeğiştirme değerlerinden büyük çıkmıştır. Bu durum yatay hareketin baraj-rezervuar etkileşim sistemi üzerinde daha etkili olduğunu göstermektedir. Yerdeğiştirme sonuçlarının aksine yatay hareket için elde edilen ortalama maksimum yatay yerdeğiştirmelerin oluşma frekansları, düşey hareket için elde edilen ortalama maksimum yatay yerdeğiştirmelerin oluşma frekanslarından küçük çıkmıştır. Diğer bir deyişle yerdeğiştirmeler arttıkça oluşma frekansları azalmaktadır.

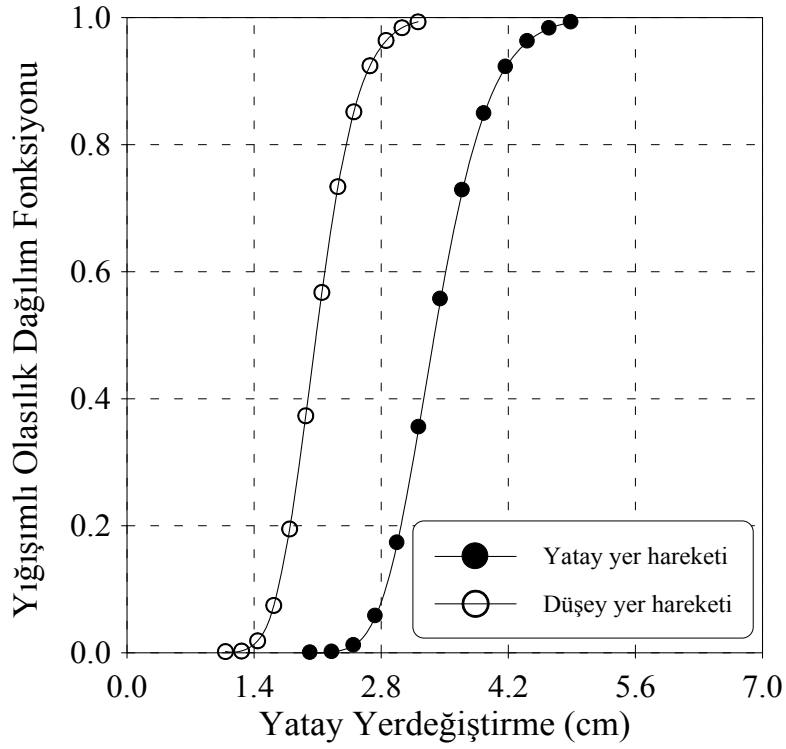


Şekil 118. Yatay ve düşey yer hareketi için baraj memba yüzeyinde oluşan ortalama maksimum yatay yerdeğiştirmeler



Şekil 119. Yatay ve düşey yer hareketi için baraj memba yüzeyinde oluşan ortalama maksimum yatay yerdeğiştirmelerin oluşma frekansları

Yatay ve düşey yer hareketi etkisindeki baraj-rezervuar etkileşim sisteminin stokastik dinamik analiziyle baraj memba yüzeyindeki kret noktasının (C noktası) ortalama maksimum yatay yerdeğiştirmesinin yığılımlı olasılık dağılım fonksiyonları elde edilmiştir (Şekil 120). Şekil 120’de ortalama maksimum yatay yerdeğiştirmenin yığılımlı olasılık dağılım fonksiyonu incelendiğinde barajın memba yüzü kret noktasında oluşan ortalama maksimum yatay yerdeğiştirmenin (2.15 cm) aşılma olasılığı yaklaşık olarak %58’dir. Ayrıca 1 cm’nin altında bir maksimum değer oluşma olasılığı oldukça az iken, 3.2 cm’nin altında bir maksimum değer oluşma olasılığı %100’dür.



Şekil 120. Yatay ve düşey yer hareketi için baraj kret noktasında (C noktası) oluşan ortalama maksimum yatay yerdeğiştirmelerin yığılımlı olasılık dağılım fonksiyonu

Yerdeğiştirmelerde olduğu gibi baraj memba yüzeyinde yatay hareket etkisi sonucu elde edilen ortalama maksimum gerilme bileşenleri düşey hareket etkisi sonucu elde edilenlerden daha büyük çıkmıştır (Şekil 121-123). Hem yatay hareket için hem de düşey hareket için en yüksek ortalama maksimum gerilmeler barajın taban kısmında elde edilmiştir. Barajın kretine doğru gidildikçe bu değerler azalmaktadır. Barajın memba topuğundaki (A Gauss noktası) ortalama maksimum gerilmeler Tablo 15’te görülmektedir.

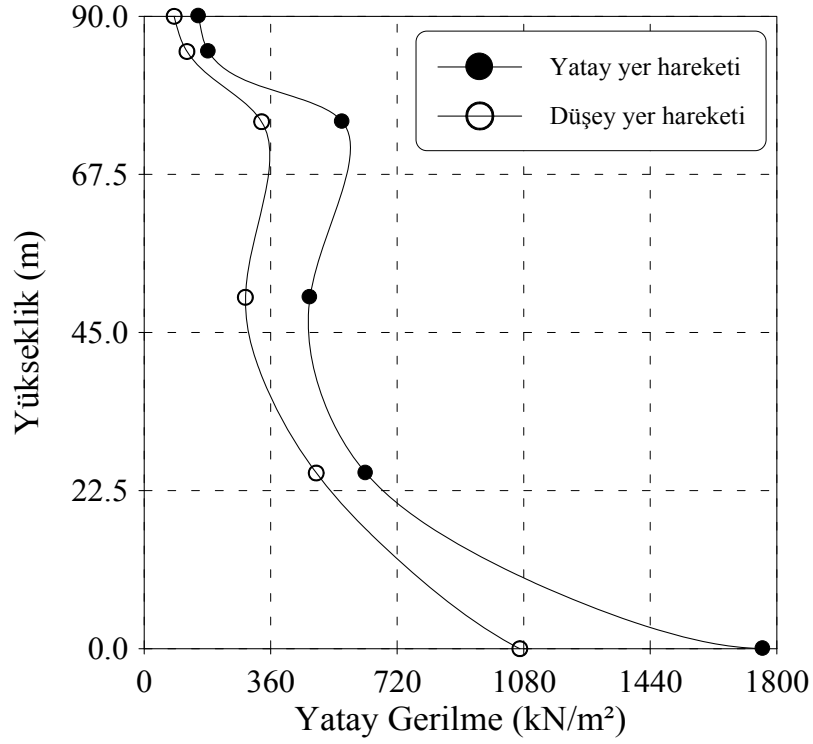
Tablo 15. Yatay ve düşey yer hareketi için barajın memba topuğunda (A Gauss noktası) oluşan ortalama maksimum gerilmeler

Hareket Yönü	Yatay Gerilme (kN/m ²)	Düşey Gerilme (kN/m ²)	Kayma Gerilmesi (kN/m ²)
Yatay	1760.80	7043.10	1755.80
Düşey	1069.00	4276.10	1215.30

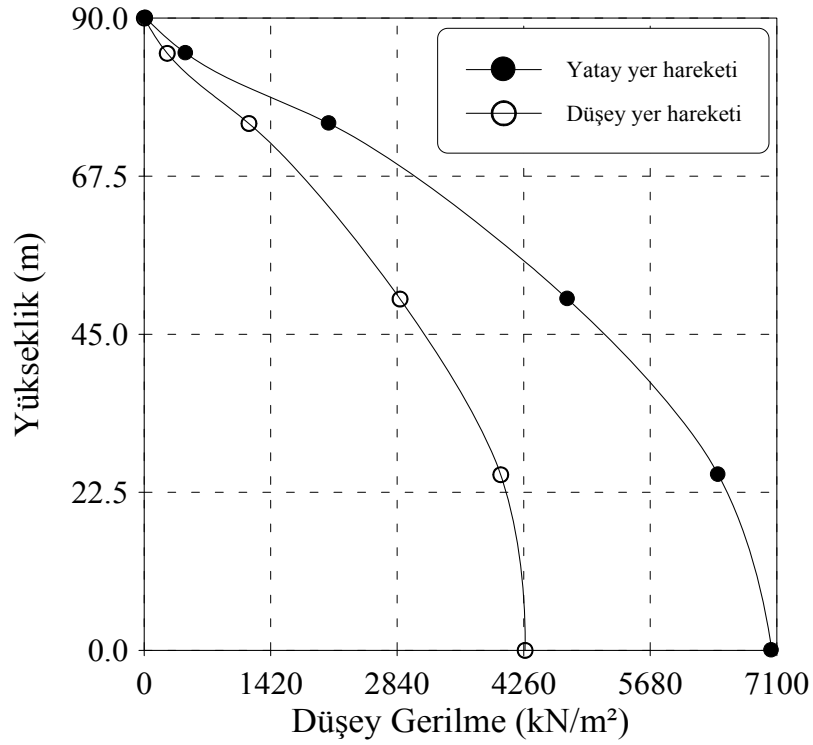
Barajın I-I kesitindeki ortalama maksimum gerilmeler Şekil 124-126'da verilmiştir. Şekillerden görüldüğü gibi yatay yer hareketi baraj-rezervuar etkileşim sistemi üzerinde daha fazla etkilidir. Zira yatay hareket sonucu oluşan dinamik davranışlar düşey hareket sonucu oluşanlardan daha büyüktür. I-I kesitinde ortalama maksimum yatay ve düşey gerilmeler barajın memba tarafından orta kısmına doğru yaklaştıkça azalmakta mansap tarafına doğru gidildikçe artmaktadır. Ortalama maksimum kayma gerilmeleri ise memba tarafından mansap tarafına doğru gidildikçe sürekli artmaktadır.

Barajın II-II kesitinde oluşan ortalama maksimum gerilmelerin yatay uzaklıkla değişimleri Şekil 127-129'da görülmektedir. II-II kesitindeki ortalama maksimum kayma gerilmeleri barajın memba tarafından orta kısmına doğru gidildikçe artmakta, mansap tarafında ise azalmaktadır. Ortalama maksimum düşey gerilmelerde bu durum tam tersidir. Ortalama maksimum düşey gerilmeler barajın memba tarafından orta kısmına doğru gidildikçe azalmakta, mansap tarafında ise artmaktadır. Ortalama maksimum kayma gerilmeleri yine mansap tarafına doğru gittikçe artan değerler almaktadır.

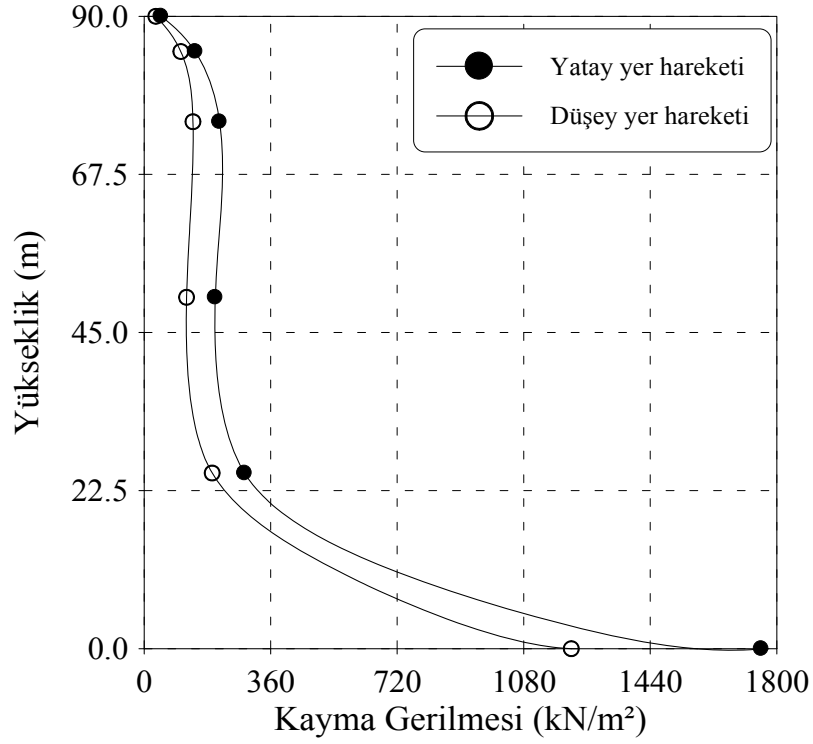
Yatay ve düşey hareket sonucu baraj memba yüzeyinde elde edilen ortalama maksimum hidrodinamik basınçlar Şekil 130'da verilmektedir. Hidrodinamik basınç değerleri baraj-rezervuar etkileşim sisteminin ara yüzeyine yakın sıvı elemanların Gauss noktalarında elde edilmiştir. Barajın memba topuğuna bitişik sıvı elemanın B Gauss noktasındaki hidrodinamik basınç, yatay hareket için 594.66 kN/m², düşey hareket için 580.06 kN/m²'dir.



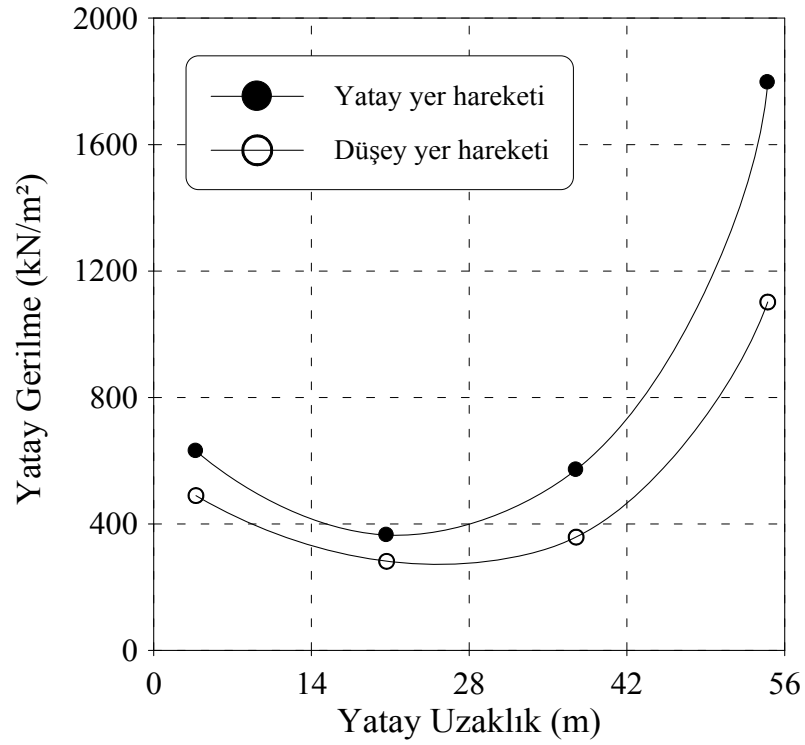
Şekil 121. Yatay ve düşey yer hareketi için baraj memba yüzeyinde oluşan ortalama maksimum yatay gerilmeler



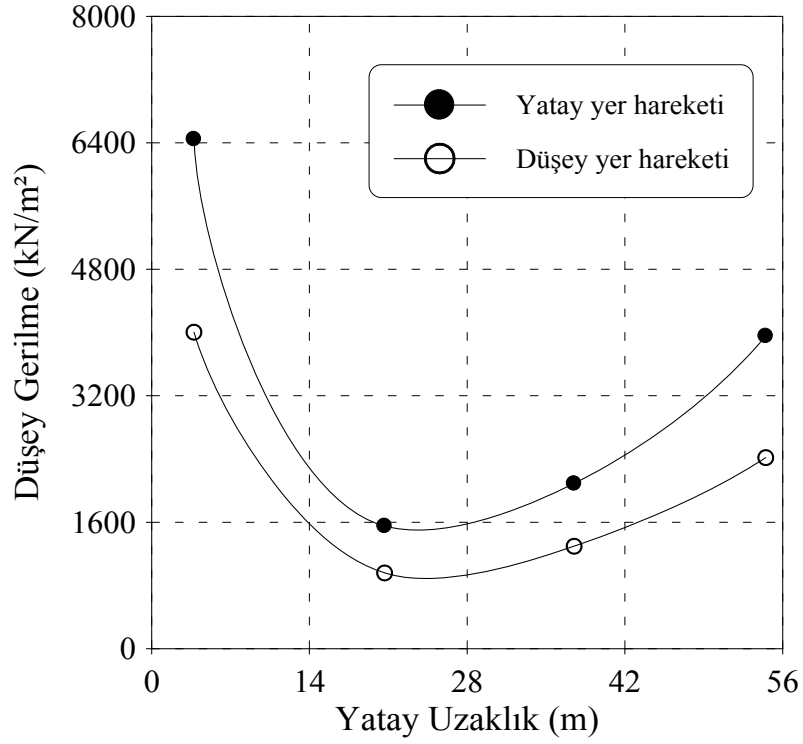
Şekil 122. Yatay ve düşey yer hareketi için baraj memba yüzeyinde oluşan ortalama maksimum düşey gerilmeler



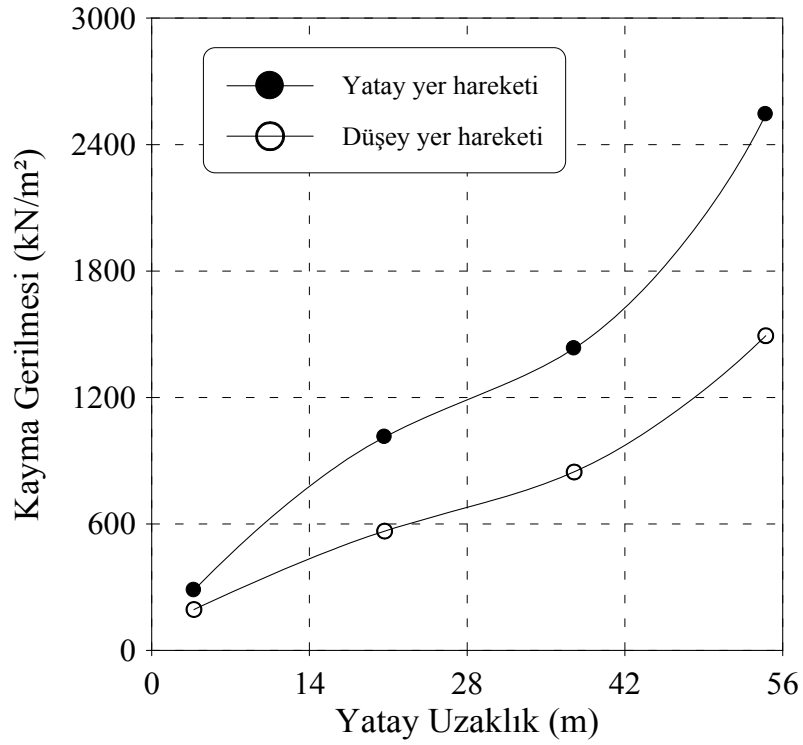
Şekil 123. Yatay ve düşey yer hareketi için baraj memba yüzeyinde oluşan ortalama maksimum kayma gerilmeleri



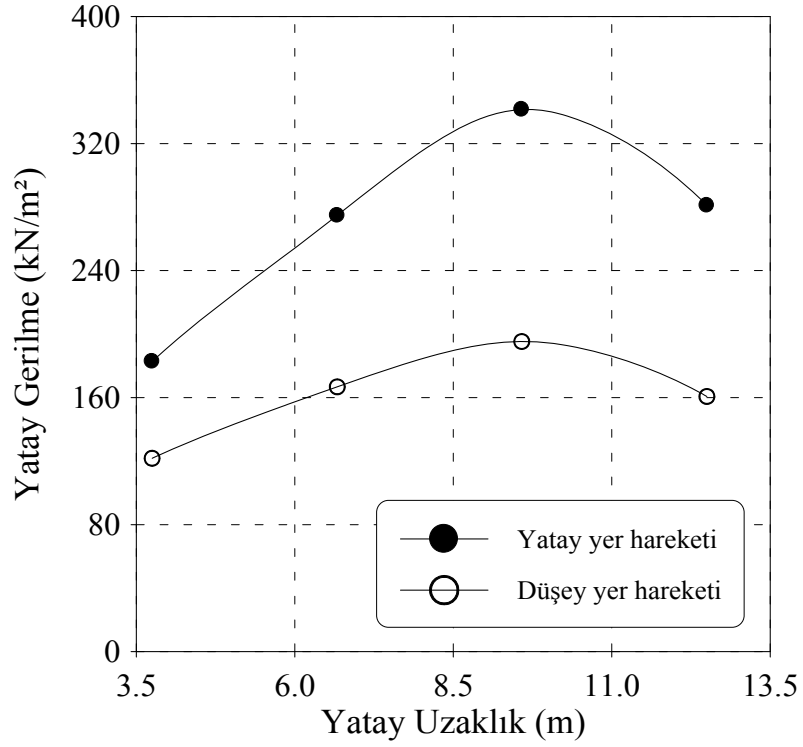
Şekil 124. Yatay ve düşey yer hareketi için barajın I-I kesitinde oluşan ortalama maksimum yatay gerilmeler



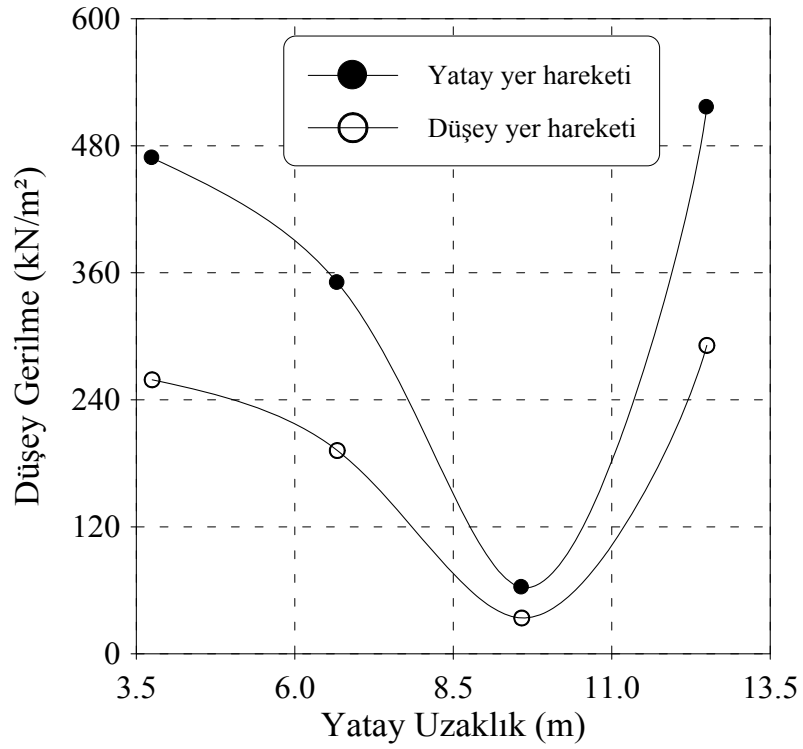
Şekil 125. Yatay ve düşey yer hareketi için barajın I-I kesitinde oluşan ortalama maksimum düşey gerilmeler



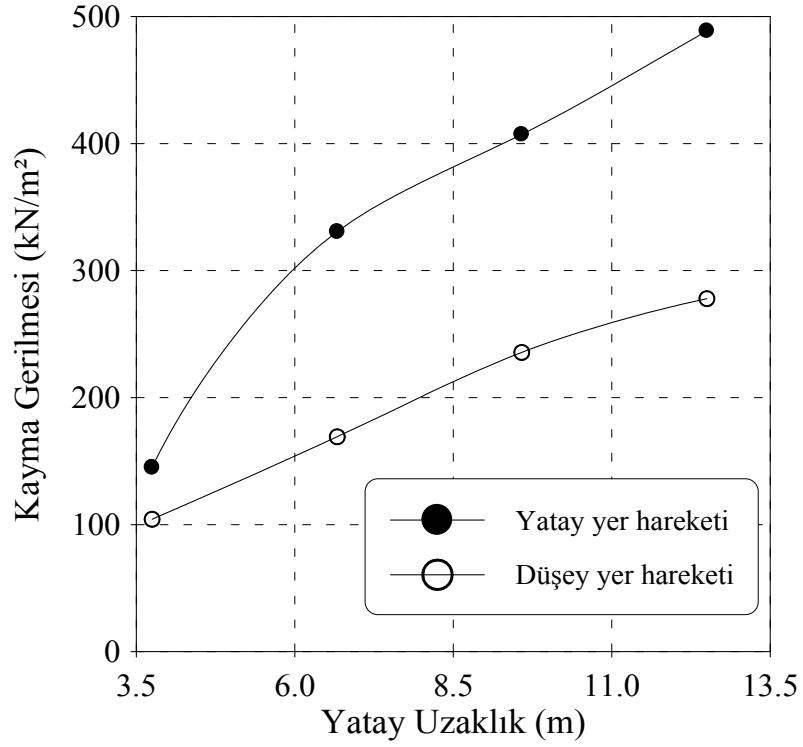
Şekil 126. Yatay ve düşey yer hareketi için barajın I-I kesitinde oluşan ortalama maksimum kayma gerilmeleri



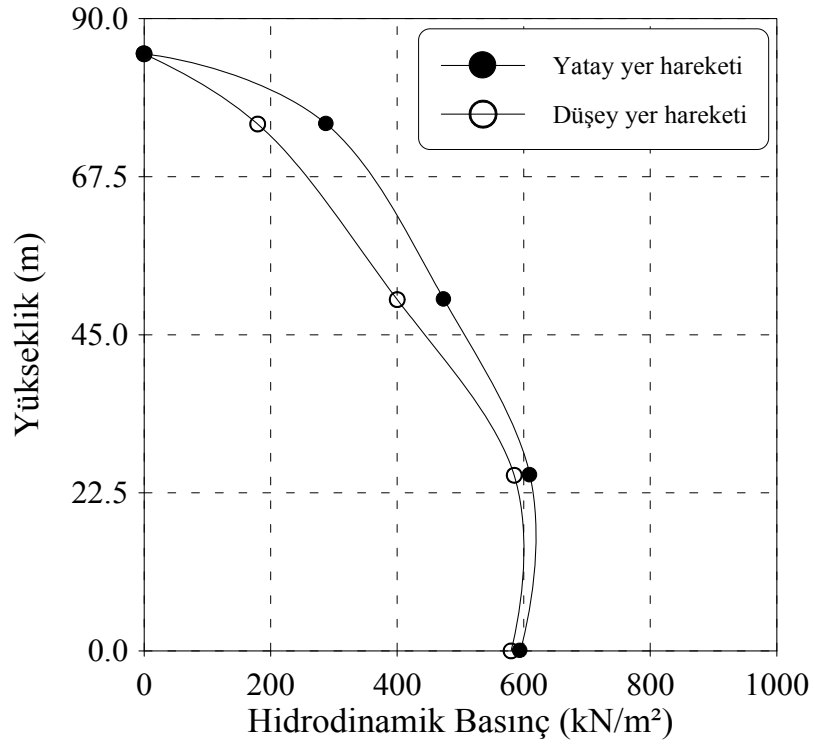
Şekil 127. Yatay ve düşey yer hareketi için barajın II-II kesitinde oluşan ortalama maksimum yatay gerilmeler



Şekil 128. Yatay ve düşey yer hareketi için barajın II-II kesitinde oluşan ortalama maksimum düşey gerilmeler



Şekil 129. Yatay ve düşey yer hareketi için barajın II-II kesitinde oluşan ortalama maksimum kayma gerilmeleri



Şekil 130. Yatay ve düşey yer hareketi için baraj memba yüzeyinde elde edilen ortalama maksimum hidrodinamik basınç değişimi

3.2. Baraj-Zemin-Rezervuar Etkileşim Sisteminin Lagrange Yaklaşımıyla Stokastik Dinamik Analizi

Bu bölümde Şekil 17’de görülen baraj-zemin-rezervuar etkileşim sisteminin Lagrange yaklaşımıyla stokastik dinamik analizi yapılarak ortalama maksimum davranışlar incelenecektir.

3.2.1. Frekanslar

Baraj-zemin-rezervuar etkileşim sisteminin Mulsapf (Bayraktar, 1995) ve Stocalf programlarıyla yapılan analizleri sonucu elde edilen ilk 30 frekans Tablo 16’da verilmektedir. Baraj-zemin-rezervuar etkileşim sisteminin modal analiz sonucu elde edilen ilk 11 frekans yüzey salınım frekanslarıdır. 12. frekans ve daha sonrası hacim değişim frekansları olup bunlar yapının davranışında etkili olan frekanslardır. Hacim değişim frekanslarının birincisi (12. frekans) Mulsapf programında 3.194 Hz, Stocalf programında 3.014 Hz olarak elde edilmiştir. Bu değerler birbirlerine oldukça yakındır.

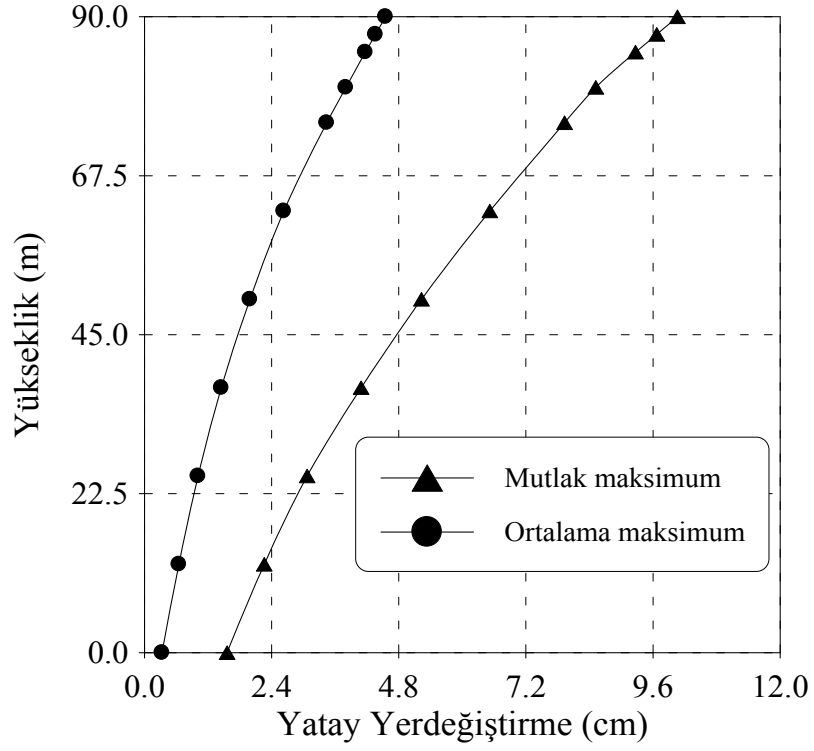
Tablo 16. Baraj-zemin-rezervuar etkileşim sisteminin ilk 30 frekansı

Frekanslar (Hz)	MULSAPF	STOCALF
1	0.0439	0.0627
2	0.0488	0.1418
3	0.0767	0.1465
4	0.0869	0.2009
5	0.0937	0.2114
6	0.1033	0.2379
7	0.1114	0.2565
8	0.1229	0.2616
9	0.1368	0.3114
10	0.1544	0.3145
11	0.1783	0.3497
12	3.1942	3.0144
13	4.1110	3.9356
14	4.9386	4.6580
15	6.3248	6.4623
16	6.7784	8.3334
17	7.4882	8.8034
18	8.6564	9.2812
19	8.9572	9.5823
20	9.7912	10.9269
21	10.1923	11.5009
22	10.6952	11.7478
23	10.9085	12.0774
24	10.9515	12.3650
25	11.9732	13.1334
26	12.5382	13.4030
27	13.1653	14.1016
28	13.3945	14.4563
29	13.6459	14.5074
30	13.7987	14.8758

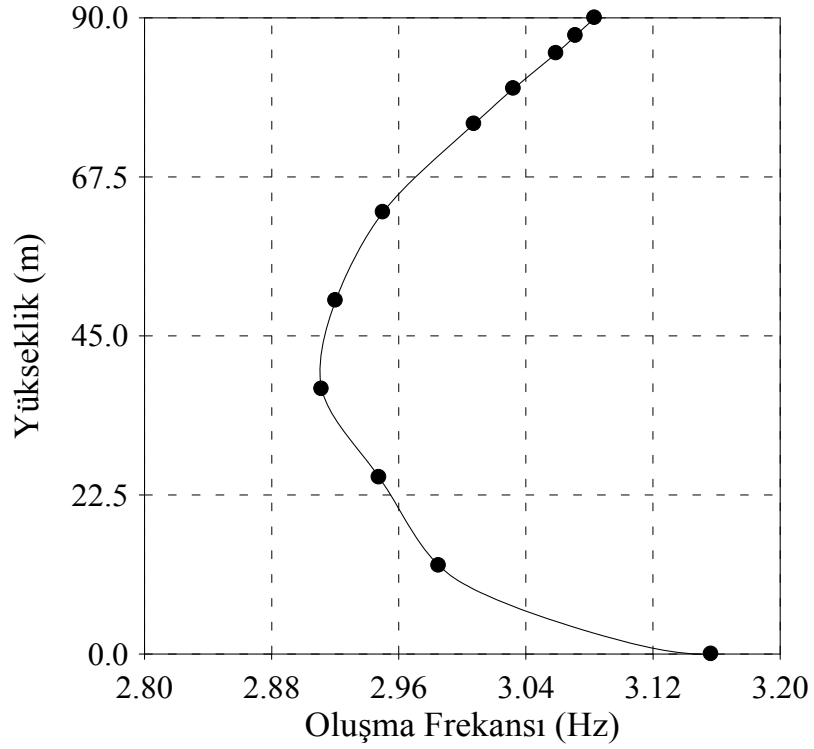
3.2.2. Yerdeşiştirmeler ve Oluşma Frekansları

Baraj-zemin-rezervuar etkileşim sisteminin stokastik ve deterministik dinamik analizleri sonucu baraj memba yzeyinde oluşan ortalama maksimum ve mutlak maksimum yatay yerdeşiştirmeler Şekil 131’de verilmektedir. Ortalama maksimum yatay yerdeşiştirmeler yine mutlak maksimum yatay yerdeşiştirmelerden kucuk cikmiştir. Baraj tabanından kretine doğru cikıldıkça her iki analiz sonucu elde edilen yatay yerdeşiştirme değerleri artmaktadır. Baraj-zemin-rezervuar etkileşim sisteminin analiziyle elde edilen ortalama maksimum ve mutlak maksimum yatay yerdeşiştirmeler, baraj-rezervuar etkileşim sisteminin analiziyle elde edilenlerden daha buyuk cikmiştir. Analizlerde zeminin dikkate alınması dinamik davranışları etkilemekte, yatay yerdeşiştirme değerlerini arttırmaktadır. Bu sonuç doğrultusunda etkileşim sistemlerinin analizlerinde zeminin dikkate alınması gerektiği ortaya cikmaktadır.

Baraj memba yzeyindeki ortalama maksimum yatay yerdeşiştirmenin oluşma frekansları Şekil 132’de gosterilmektedir. Oluşma frekansları baraj tabanından kretine 3.16 Hz-3.08 Hz arasında değerler almaktadır. Baraj tabanından kretine gidildikçe oluşma frekansları once azalmakta sonra artmaktadır. Baraj tabanındaki ortalama maksimum yatay yerdeşiştirme 0.33 cm, oluşma frekansı 3.16 Hz, periyodu 0.316 s’dir. Baraj kretindeki ortalama maksimum yatay yerdeşiştirme 4.55 cm, oluşma frekansı 3.08 Hz, periyodu 0.324 s’dir.



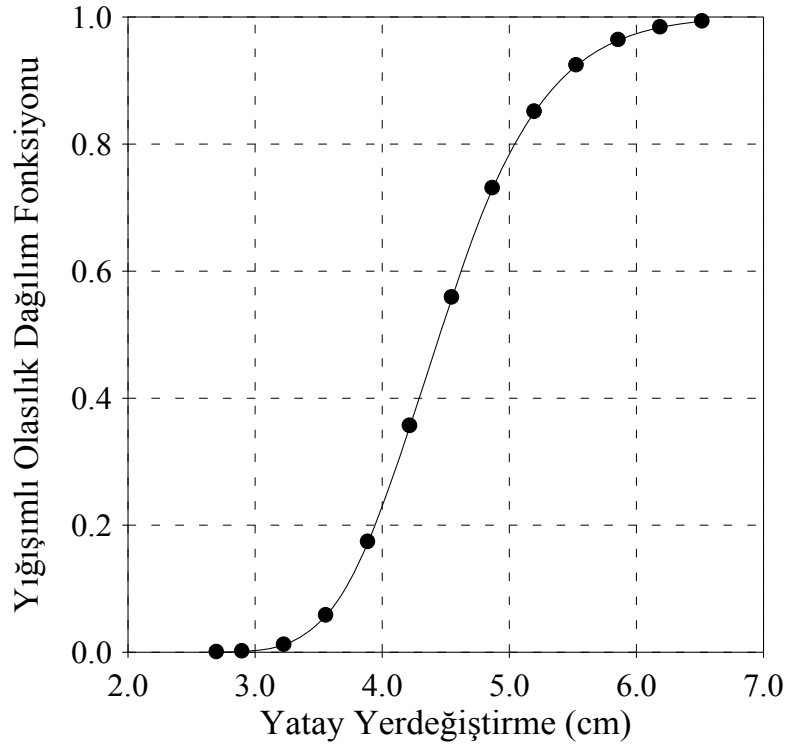
Şekil 131. Baraj-zemin-rezervuar etkileşim sisteminde baraj memba yüzeyinde oluşan yatay yerdeğıştirmeler



Şekil 132. Baraj-zemin-rezervuar etkileşim sisteminde baraj memba yüzeyinde oluşan ortalama maksimum yatay yerdeğıştirmelerin oluşma frekansları

3.2.2.1. Yerdeğiştirmelerin Yığışımlı Olasılık Dağılım Fonksiyonu

Baraj-zemin-rezervuar etkileşim sisteminin stokastik dinamik analizi yapılarak barajın kret noktasındaki ortalama maksimum yatay yerdeğiştirmenin yığışımlı olasılık dağılım fonksiyonu elde edilmiştir. Şekil 133'te çizilen yığışımlı olasılık dağılım fonksiyonu ile baraj kret noktasındaki (C noktası) ortalama maksimum yatay yerdeğiştirmenin oluşma olasılığı belirlenebilir. Şekil 133 incelendiğinde kret noktasındaki ortalama maksimum yatay yerdeğiştirmenin (4.55 cm) aşılma olasılığı yaklaşık olarak %70'dir. Ayrıca 2.70 cm'nin altında bir maksimum değerin oluşma olasılığı yok denecek kadar az iken, 6.52 cm'nin altında bir maksimum değerin oluşma olasılığı %100'dür.



Şekil 133. Baraj-zemin-rezervuar etkileşim sistemi baraj kret noktasında (C noktası) oluşan ortalama maksimum yatay yerdeğiştirmenin yığışımlı olasılık dağılım fonksiyonu

3.2.3. Gerilmeler ve Oluşma Frekansları

Baraj-zemin-rezervuar etkileşim sisteminin stokastik ve deterministik dinamik analizleri yapılarak baraj memba yüzeyinde, I-I kesitinde ve II-II kesitindeki gerilme bileşenleri elde edilmiştir. Şekil 134-136'da baraj memba yüzeyinde elde edilen ortalama maksimum ve mutlak maksimum gerilme bileşenleri verilmektedir. Baraj memba yüzeyinde yapılan incelemelerde yatay, düşey gerilmeler ve kayma gerilmeleri baraj tabanından kretine doğru gidildikçe azalmaktadır. Mutlak maksimum gerilmeler ortalama maksimum gerilmelerden genellikle daha büyük çıkmıştır.

Barajın memba topuğunda (A Gauss noktası) elde edilen gerilme bileşenleri Tablo 17'de gösterilmektedir. Tablo 9 ve Tablo 17 karşılaştırıldığında baraj-zemin-rezervuar etkileşim sisteminin analizi sonucu elde edilen gerilme bileşenleri baraj-rezervuar etkileşim sisteminin analizi sonucu elde edilenlerden daha büyük çıkmıştır. Etkileşim sistemine zeminin dahil edilmesiyle sonuçlarda artış gözlenmiştir.

Tablo 17. Baraj-zemin-rezervuar etkileşim sistemi baraj memba topuğunda (A Gauss noktası) oluşan gerilmeler

Gerilmeler	Yatay Gerilme (kN/m ²)	Düşey Gerilme (kN/m ²)	Kayma Gerilmesi (kN/m ²)
Ortalama maksimum	2416.50	6798.60	3052.30
Mutlak maksimum	5003.80	13931.00	6328.10

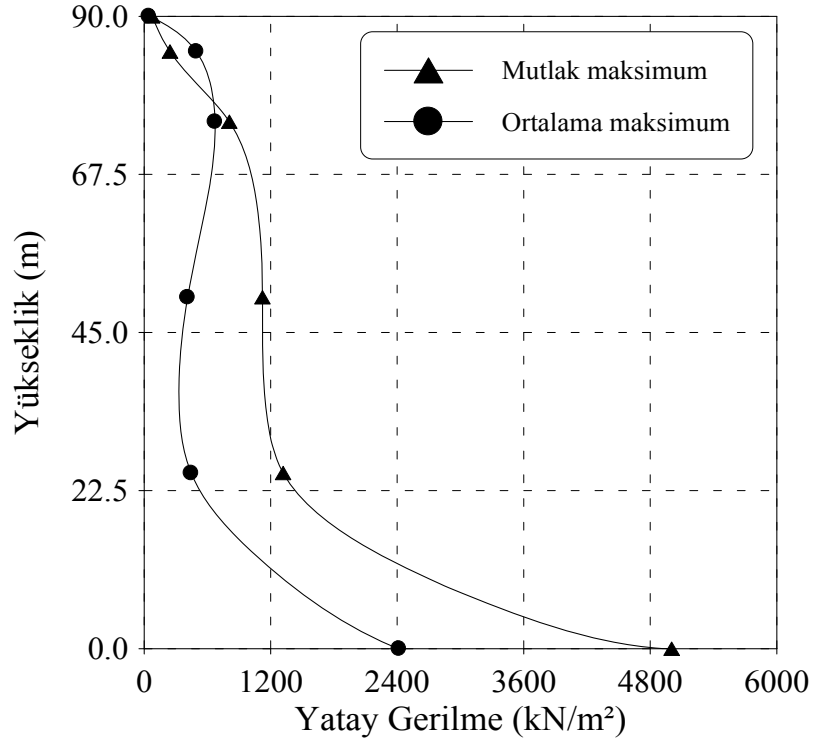
Ortalama maksimum yatay, düşey gerilmeler ve kayma gerilmelerinin oluşma frekansları Şekil 137-139'da gösterilmektedir. Şekiller incelendiğinde, ortalama maksimum gerilmelerin oluşma frekansları, baraj tabanından krete doğru gidildikçe önce artmakta sonra azalmaktadır. Baraj tabanında ortalama maksimum yatay gerilmenin oluşma frekansı 2.94 Hz, periyodu 0.339 s, ortalama maksimum düşey gerilmenin oluşma frekansı 2.92 Hz, periyodu 0.343 s, ortalama maksimum kayma gerilmesinin oluşma frekansı 2.86 Hz, 0.350 s'dir.

I-I kesitinde elde edilen gerilme bileşenlerinin yatay uzaklıkla değişimleri Şekil 140-142'de gösterilmiştir. Mutlak maksimum yatay gerilmeler, ortalama maksimum yatay gerilmelerden yine daha büyük çıkmıştır. Hem mutlak maksimum hem de ortalama maksimum yatay gerilmeler baraj membasından mansabına doğru gidildikçe genellikle artan değerler almıştır. Düşey gerilmeler incelendiğinde barajın memba tarafından mansap tarafına gidildikçe gerilme değerleri barajın ortasına doğru azalmakta sonra artmaktadır. Kayma gerilmeleri ise baraj memba tarafında en düşük, mansap tarafında ise en yüksek değeri almaktadır.

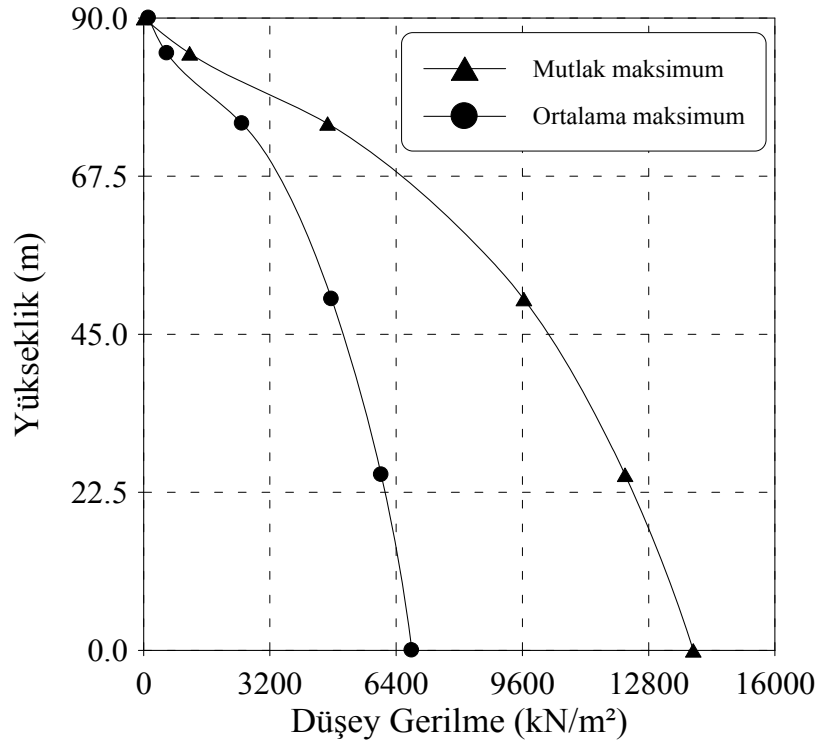
STOCALF programı kullanılarak elde edilen ortalama maksimum gerilmelerin oluşma frekansları Şekil 143-145'de verilmektedir. Şekillerde görüldüğü gibi oluşma frekansları farklı bir dağılım göstermektedirler. I-I kesiti başlangıç noktasında başka bir ifadeyle barajın memba tarafında ortalama maksimum yatay gerilmenin oluşma frekansı 3.96 Hz, periyodu 0.253 s, düşey gerilmenin oluşma frekansı 3.28 Hz, periyodu 0.305 s, kayma gerilmesinin oluşma frekansı 4.05 Hz, periyodu 0.247 s'dir. Şekil 142'de ortalama maksimum kayma gerilmesi baraj mansabına doğru artmakta, Şekil 145'de ortalama maksimum kayma gerilmesinin oluşma frekansları ise baraj mansabına doğru azalmaktadır. Kayma gerilmeleri arttıkça oluşma frekansları azalmaktadır.

II-II kesitinde elde edilen gerilme bileşenleri Şekil 146-148'de gösterilmektedir. Mutlak maksimum gerilmeler ortalama maksimum gerilmelerden genellikle daha büyük çıkmıştır. Şekil 146 ve 148'de mutlak maksimum yatay gerilmeler ve kayma gerilmeleri barajın memba tarafından mansap tarafına doğru artan değerler almakta iken, ortalama maksimum yatay gerilmeler azalan ve kayma gerilmeleri ile birbirine yakın değerler almaktadır.

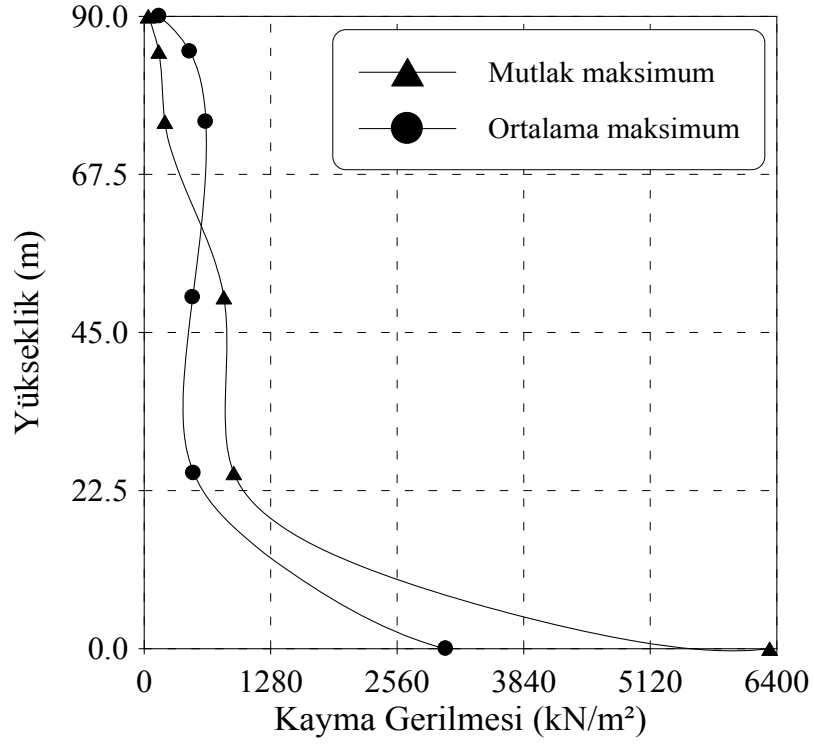
Şekil 149-151'de ortalama maksimum gerilme bileşenlerinin oluşma frekansları görülmektedir. Ortalama maksimum yatay gerilmenin oluşma frekansı kesitin sonuna doğru yani barajın mansap tarafında en büyük değeri alırken (4.17 Hz), ortalama maksimum düşey gerilmenin oluşma frekansı barajın memba tarafında en büyük değeri almaktadır (4.86 Hz). Ortalama maksimum kayma gerilmesinin oluşma frekansı ise kesitin orta kısımlarında en büyük değeri almıştır (5.04 Hz).



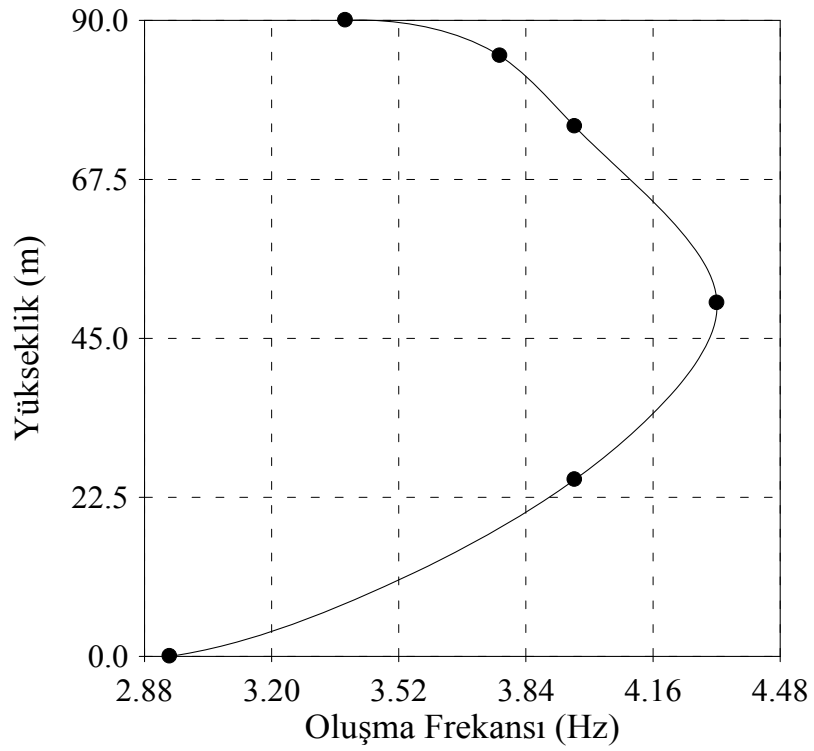
Şekil 134. Baraj-zemin-rezervuar etkileşim sisteminde baraj memba yüzeyinde oluşan yatay gerilmeler



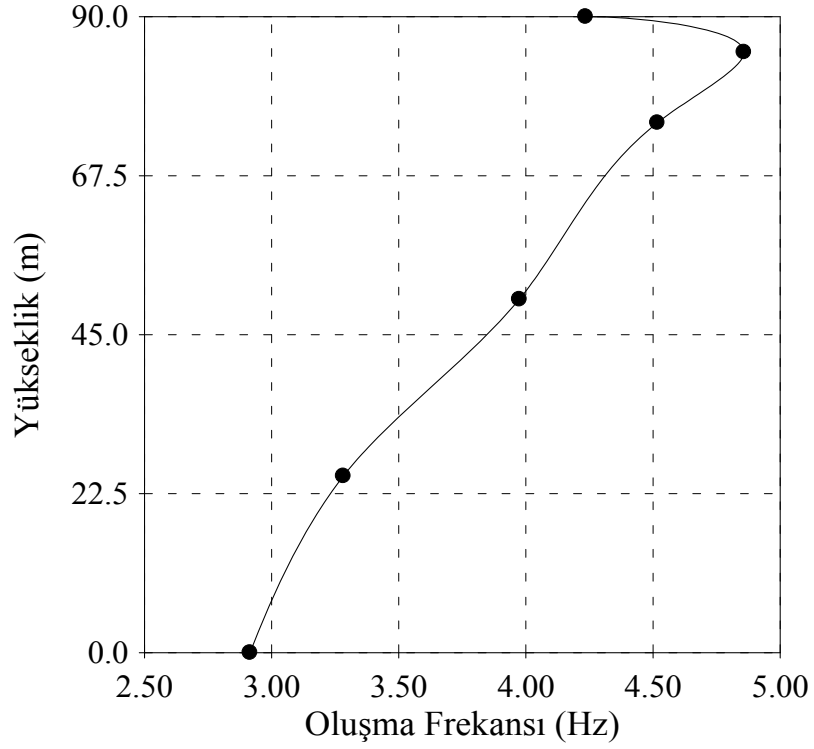
Şekil 135. Baraj-zemin-rezervuar etkileşim sisteminde baraj memba yüzeyinde oluşan düşey gerilmeler



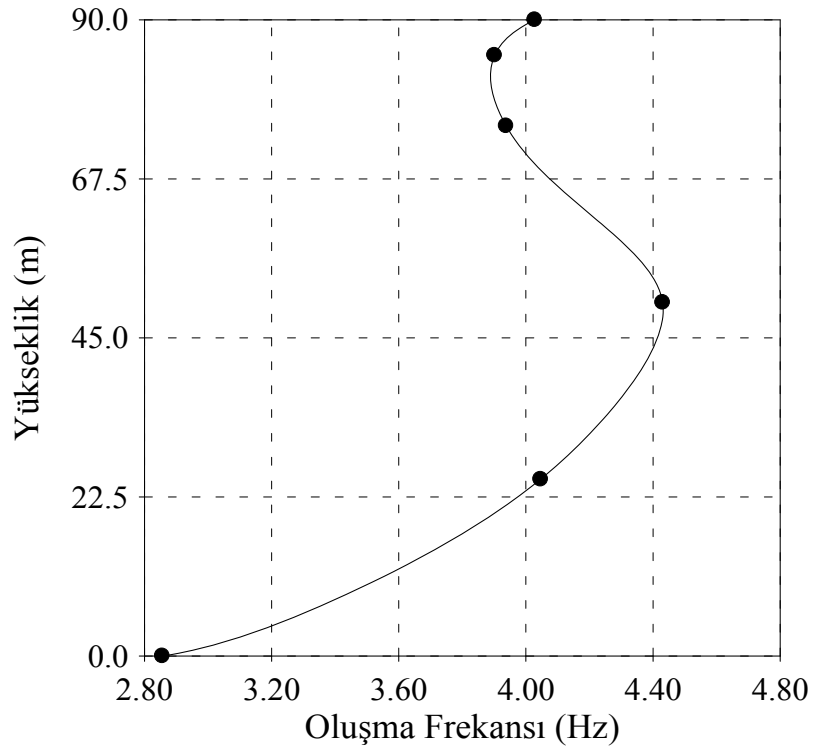
Şekil 136. Baraj-zemin-rezervuar etkileşim sisteminde baraj memba yüzeyinde oluşan kayma gerilmeleri



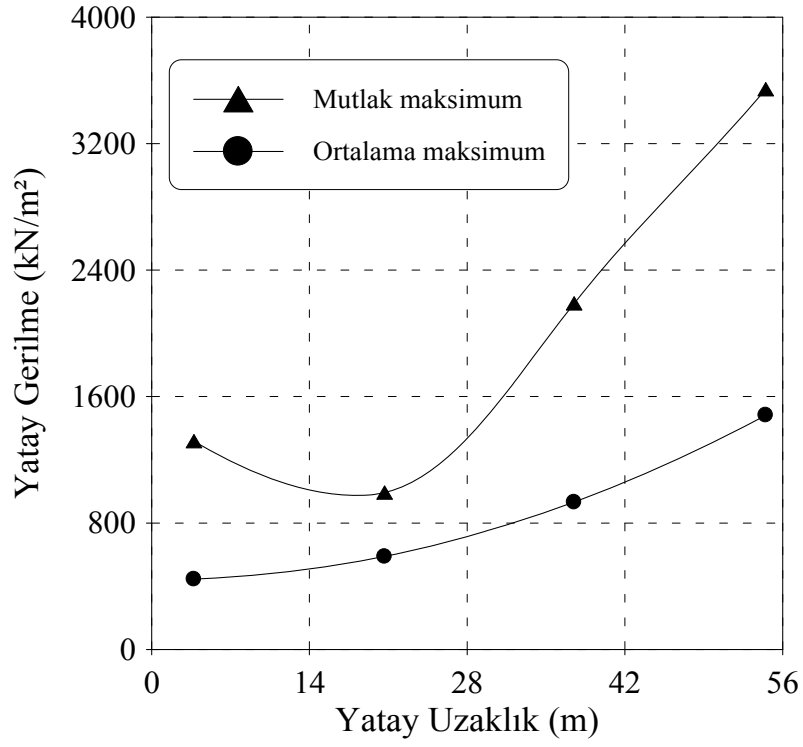
Şekil 137. Baraj-zemin-rezervuar etkileşim sisteminde baraj memba yüzeyinde oluşan ortalama maksimum yatay gerilmelerin oluşma frekansları



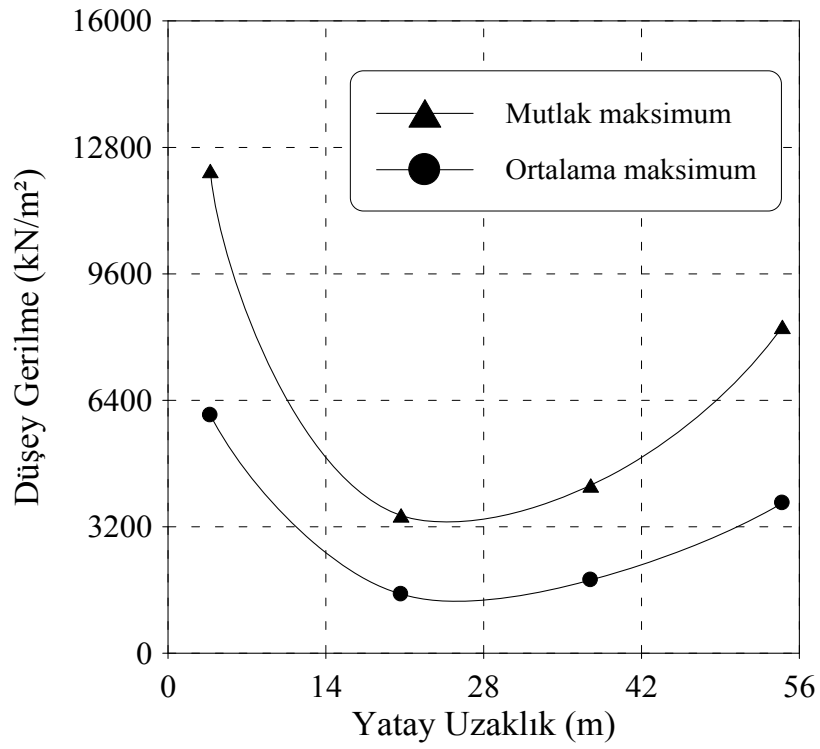
Şekil 138. Baraj-zemin-rezervuar etkileşim sisteminde baraj memba yüzeyinde oluşan ortalama maksimum düşey gerilmelerin oluşma frekansları



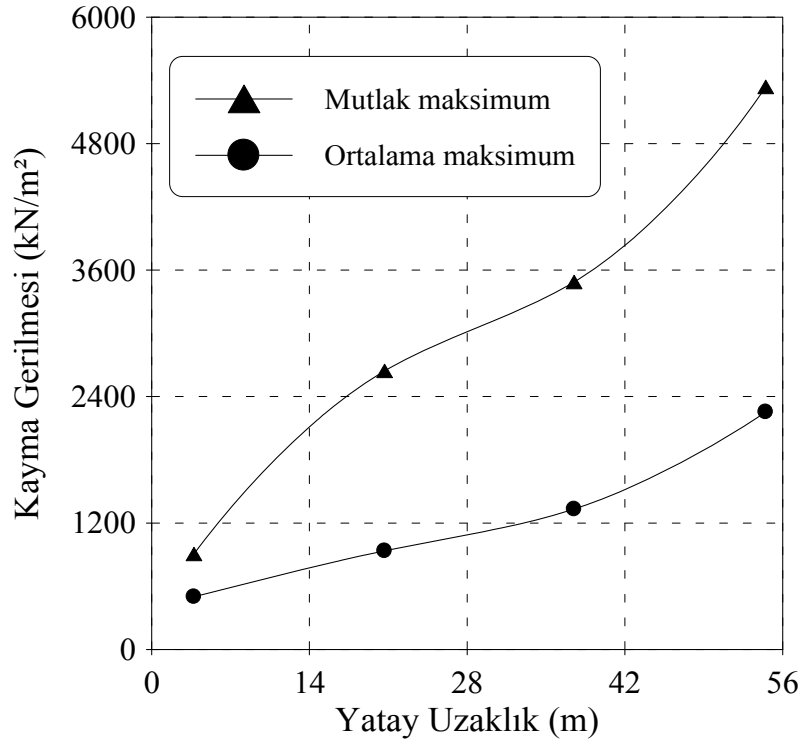
Şekil 139. Baraj-zemin-rezervuar etkileşim sisteminde baraj memba yüzeyinde oluşan ortalama maksimum kayma gerilmelerinin oluşma frekansları



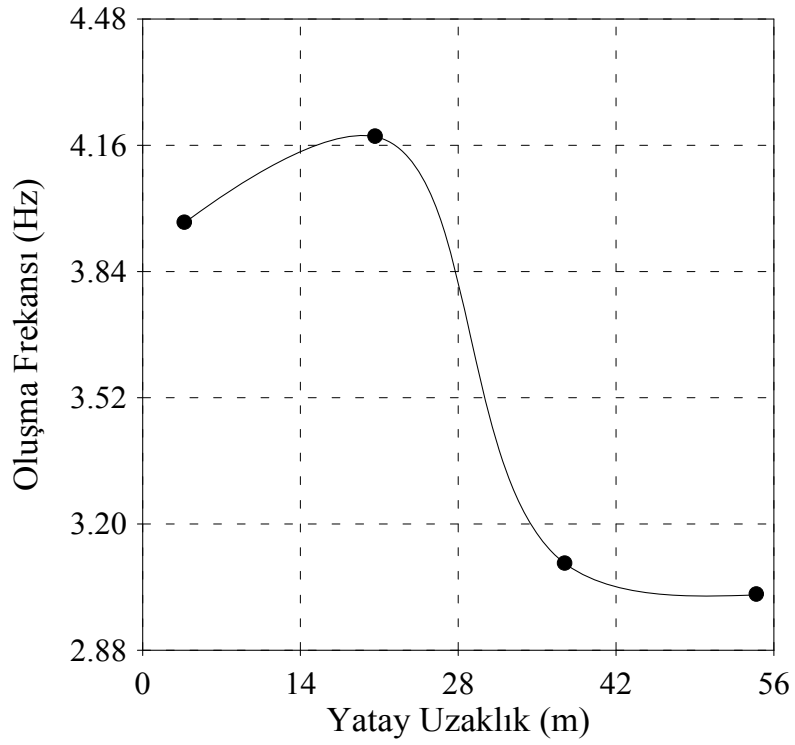
Şekil 140. Baraj-zemin-rezervuar etkileşim sistemi I-I kesitinde oluşan yatay gerilmeler



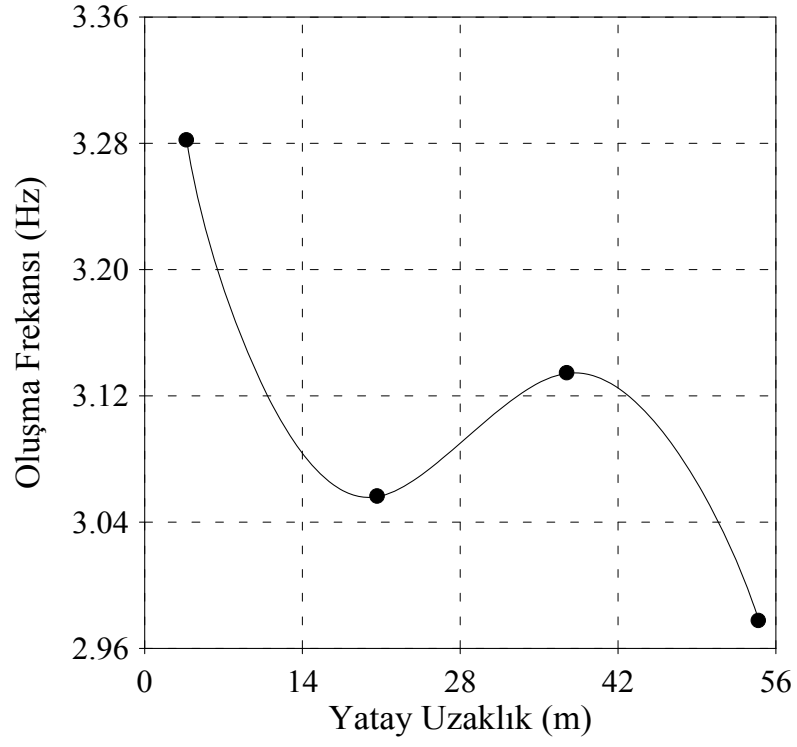
Şekil 141. Baraj-zemin-rezervuar etkileşim sistemi I-I kesitinde oluşan düşey gerilmeler



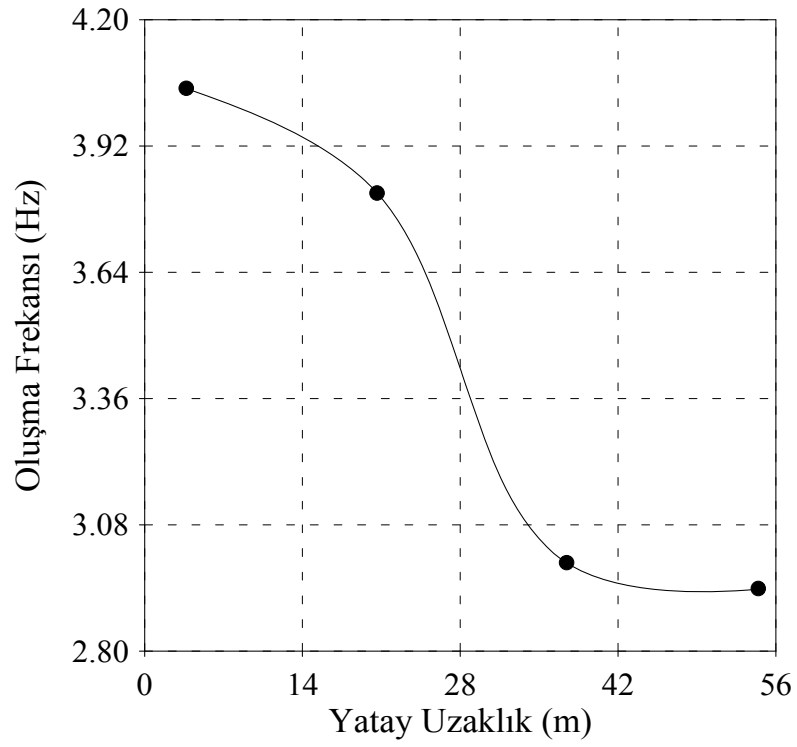
Şekil 142. Baraj-zemin-rezervuar etkileşim sistemi I-I kesitinde oluşan kayma gerilmeleri



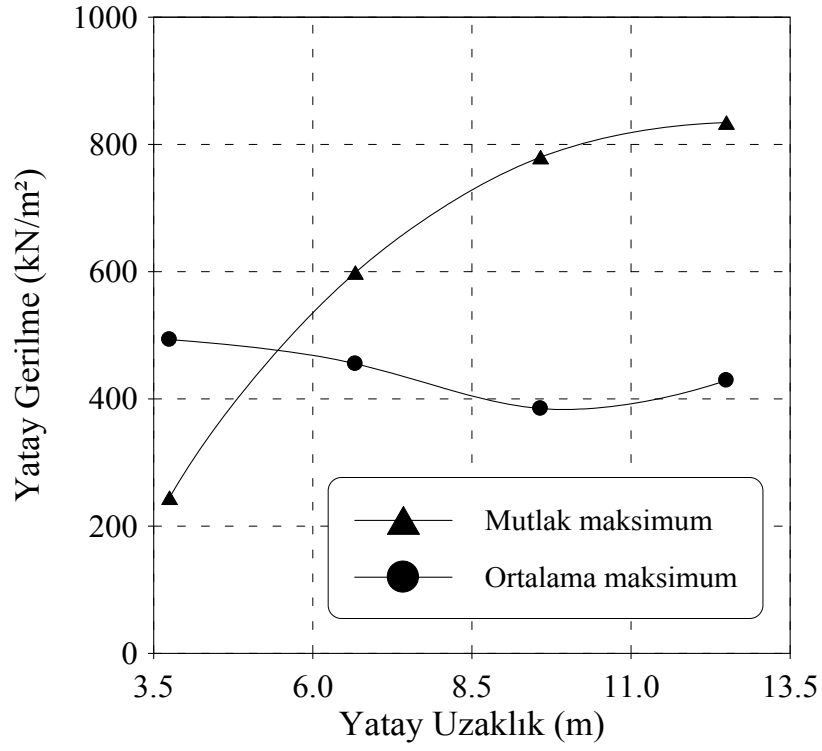
Şekil 143. Baraj-zemin-rezervuar etkileşim sistemi I-I kesitinde oluşan ortalama maksimum yatay gerilmelerin oluşma frekansları



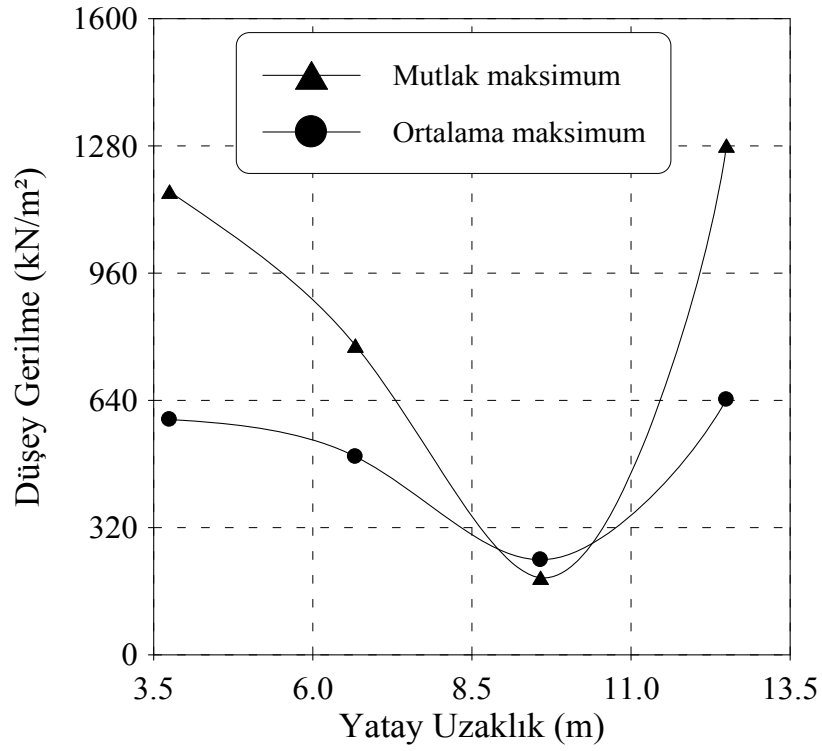
Şekil 144. Baraj-zemin-rezervuar etkileşim sistemi I-I kesitinde oluşan ortalama maksimum düşey gerilmelerin oluşma frekansları



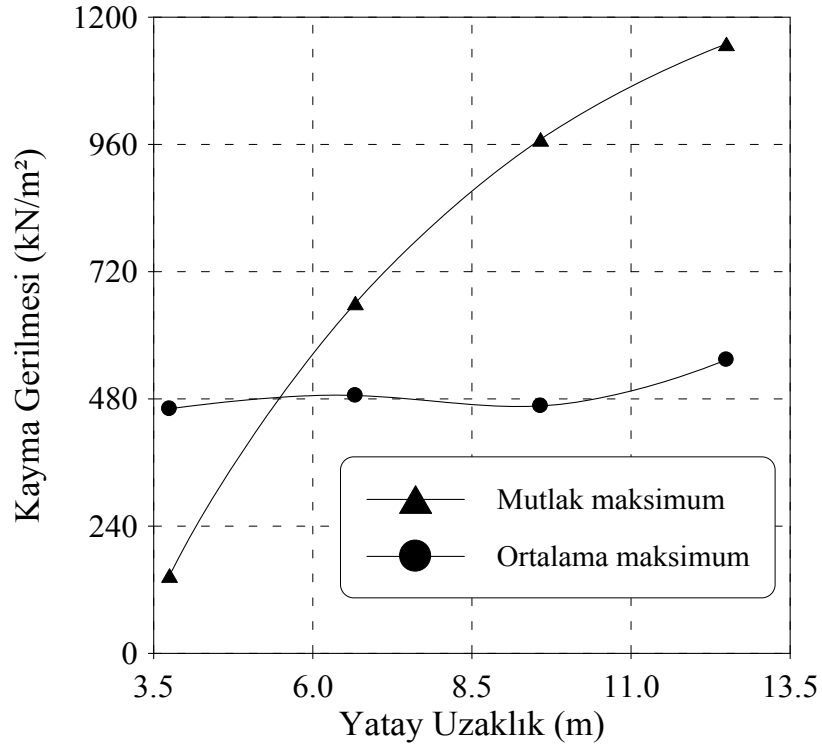
Şekil 145. Baraj-zemin-rezervuar etkileşim sistemi I-I kesitinde oluşan ortalama maksimum kayma gerilmelerinin oluşma frekansları



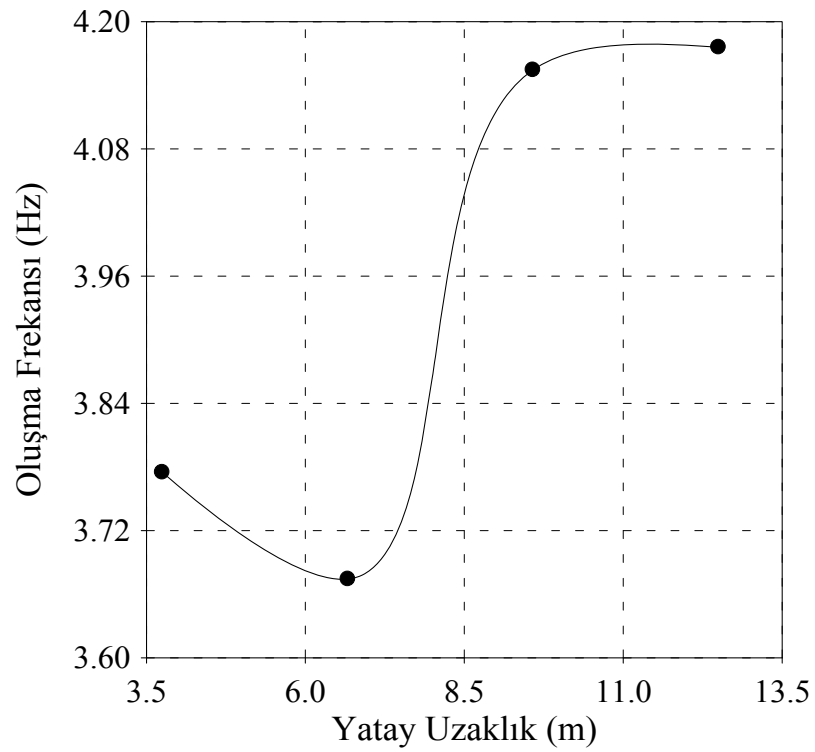
Şekil 146. Baraj-zemin-rezervuar etkileşim sistemi II-II kesitinde oluşan yatay gerilmeler



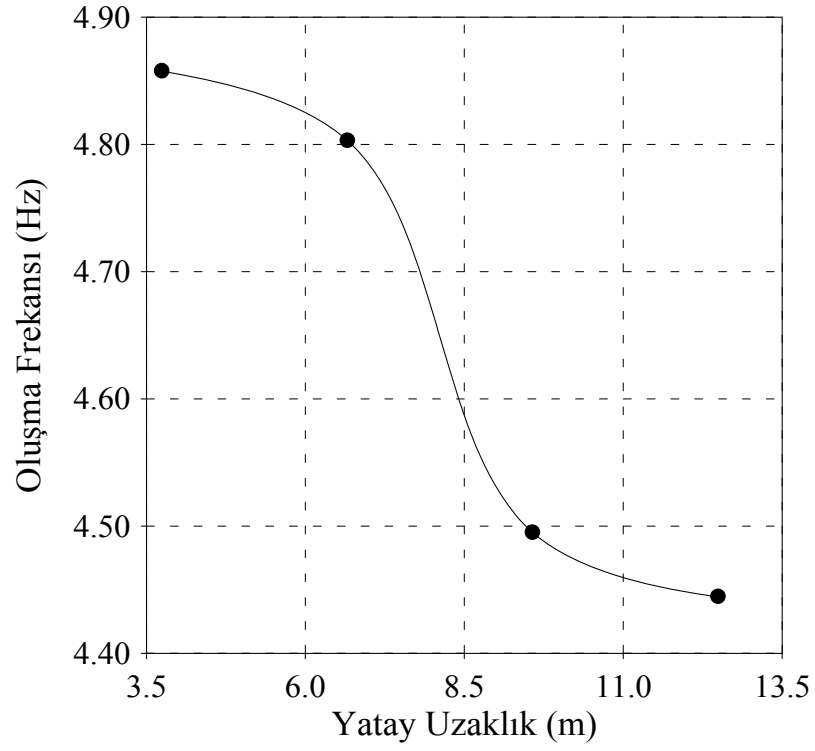
Şekil 147. Baraj-zemin-rezervuar etkileşim sistemi II-II kesitinde oluşan düşey gerilmeler



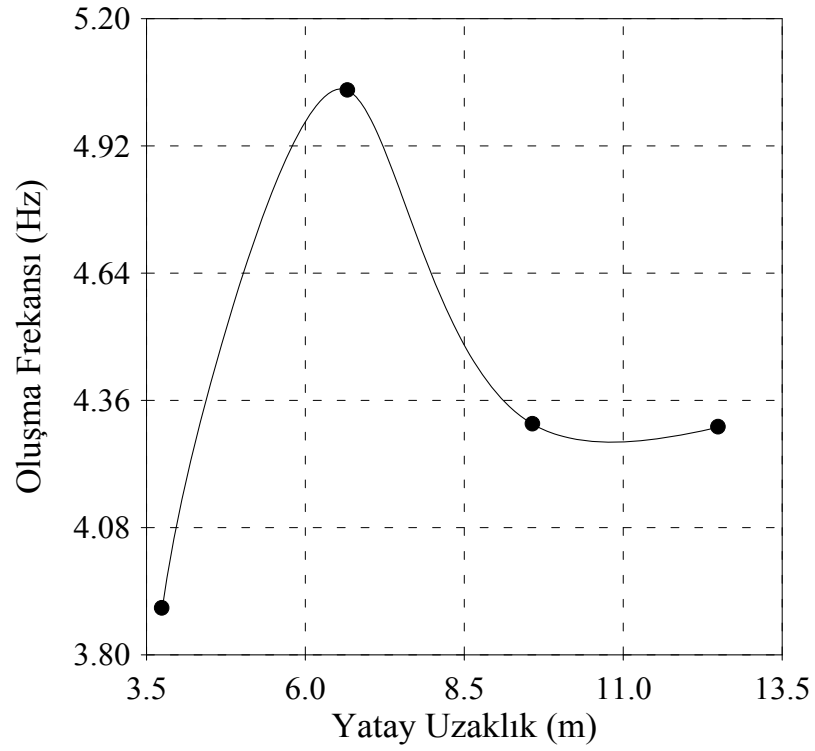
Şekil 148. Baraj-zemin-rezervuar etkileşim sistemi II-II kesitinde oluşan kayma gerilmeleri



Şekil 149. Baraj-zemin-rezervuar etkileşim sistemi II-II kesitinde oluşan ortalama maksimum yatay gerilmelerin oluşma frekansları



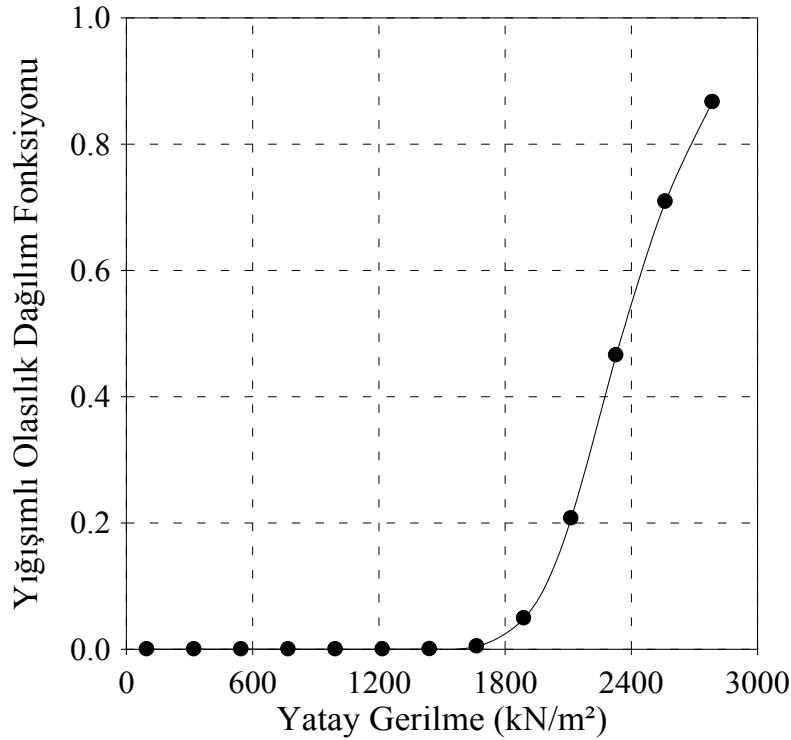
Şekil 150. Baraj-zemin-rezervuar etkileşim sistemi II-II kesitinde oluşan ortalama maksimum düşey gerilmelerin oluşma frekansları



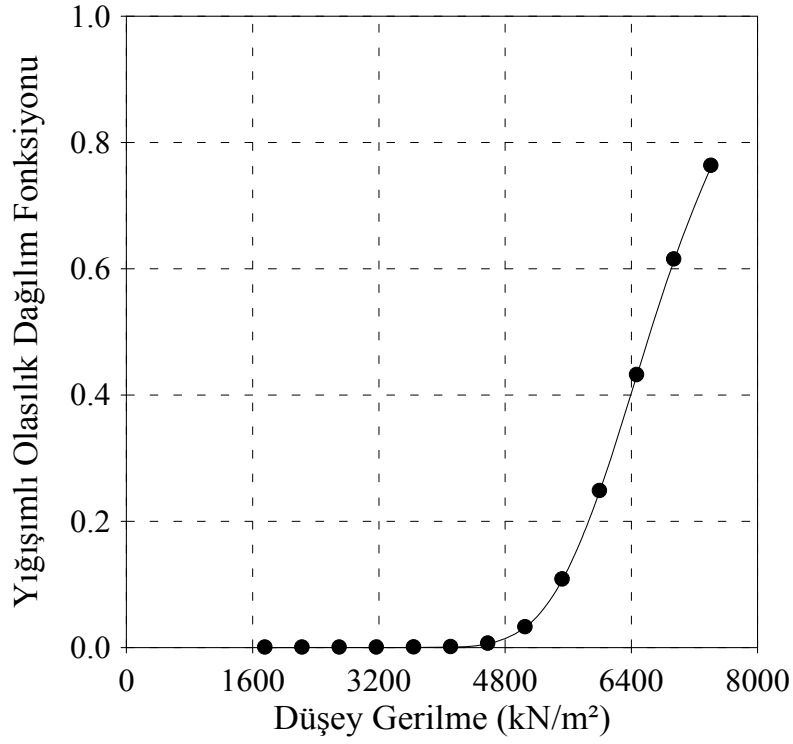
Şekil 151. Baraj-zemin-rezervuar etkileşim sistemi II-II kesitinde oluşan ortalama maksimum kayma gerilmelerinin oluşma frekansları

3.2.3.1. Gerilmelerin Yığışımli Olasılık Dağılım Fonksiyonu

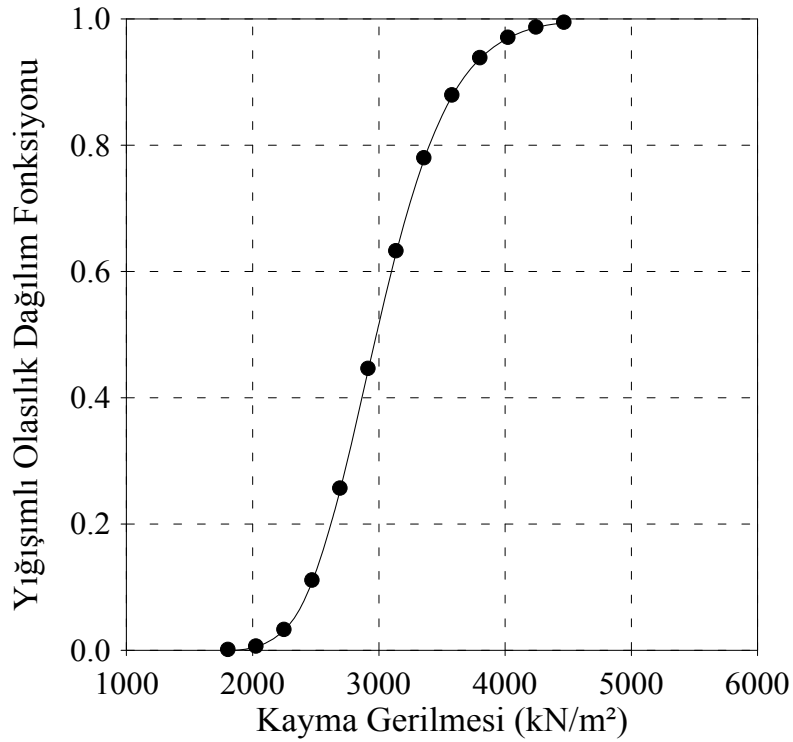
Baraj-zemin-rezervuar etkileşim sisteminin stokastik dinamik analizlerinin gerçekleştirilmesiyle baraj memba topuğunda (A Gauss noktası) elde edilen ortalama maksimum gerilme bileşenlerinin yığışımli olasılık dağılım fonksiyonları Şekil 152-154'de verilmektedir. Baraj memba topuğundaki ortalama maksimum yatay gerilmenin aşılma olasılığı Şekil 152'den yaklaşık olarak % 52 olarak hesaplanmıştır. 1440 kN/m² altında bir maksimum değerin oluşma olasılığı hiç yoktur. 2790 kN/m² altında bir maksimum değerin oluşma olasılığı ise % 87 civarındadır. Şekil 153'den ortalama maksimum düşey gerilmenin aşılma olasılığı % 50'dir. 3650 kN/m²'nin altında bir maksimum değerin oluşma olasılığı yok denecek kadar az iken, 7400 kN/m²'nin altında bir maksimum değerin oluşma olasılığı % 76'dır. Baraj memba topuğundaki ortalama maksimum kayma gerilmesinin aşılma olasılığı % 48 civarındadır. 1800 kN/m²'nin altında bir maksimum değerin oluşma olasılığı çok azken, 4470 kN/m²'nin altında bir maksimum değerin oluşma olasılığı % 100'dür.



Şekil 152. Baraj-zemin-rezervuar etkileşim sisteminde baraj memba topuğundaki (A Gauss noktası) ortalama maksimum yatay gerilmenin yığışımli olasılık dağılım fonksiyonu



Şekil 153. Baraj-zemin-rezervuar etkileşim sisteminde baraj memba topuğundaki (A Gauss noktası) ortalama maksimum düşey gerilmenin yığışımlı olasılık dağılım fonksiyonu



Şekil 154. Baraj-zemin-rezervuar etkileşim sisteminde baraj memba topuğundaki (A Gauss noktası) ortalama maksimum kayma gerilmesinin yığışımlı olasılık dağılım fonksiyonu

3.2.4. Hidrodinamik Basınçlar ve Oluşma Frekansları

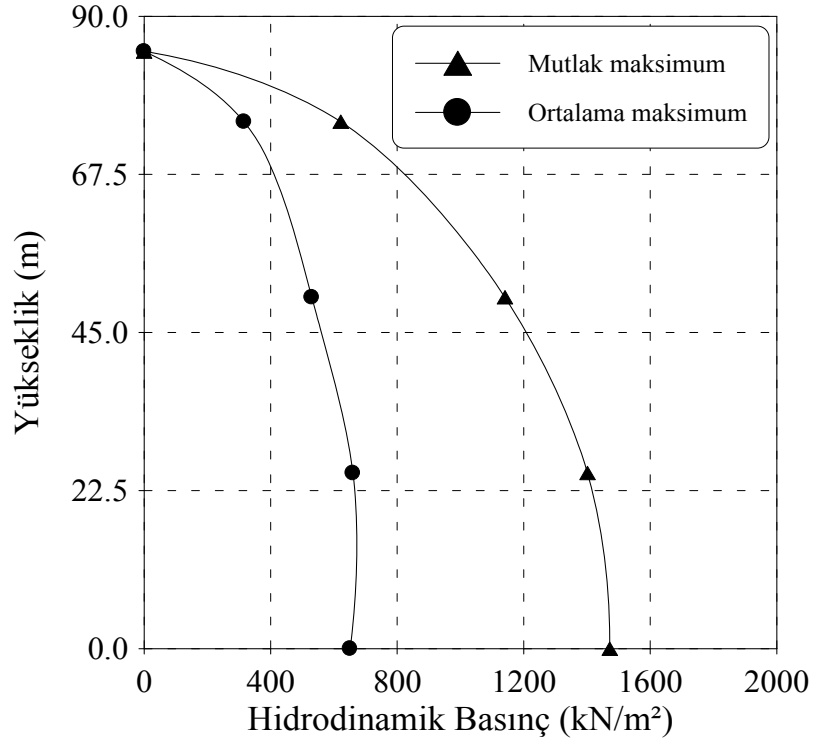
Baraj-zemin-rezervuar etkileşim sisteminde baraj memba yüzeyinde stokastik ve deterministik dinamik analizler sonucu elde edilen ortalama maksimum ve mutlak maksimum hidrodinamik basınçlar Şekil 155'te gösterilmektedir. Mutlak maksimum hidrodinamik basınçlar ortalama maksimum hidrodinamik basınçlardan daha büyük çıkmıştır. Hidrodinamik basınçlar barajın tabanından kretine doğru çıktıkça azalmaktadır. Baraj-rezervuar etkileşim sisteminin ara yüzeyine yakın sıvı elemanın memba topuğunda (B Gauss noktası) elde edilen ortalama maksimum ve mutlak maksimum hidrodinamik basınçlar Tablo 18'de verilmektedir. Hidrodinamik basınçlar baraj tabanında ve tabana yakın kısımlarda en büyük değerleri almaktadır.

Tablo 18. Baraj-zemin-rezervuar etkileşim sisteminin ara yüzeyine yakın sıvı elemanın memba topuğunda (B Gauss noktası) oluşan hidrodinamik basınçlar

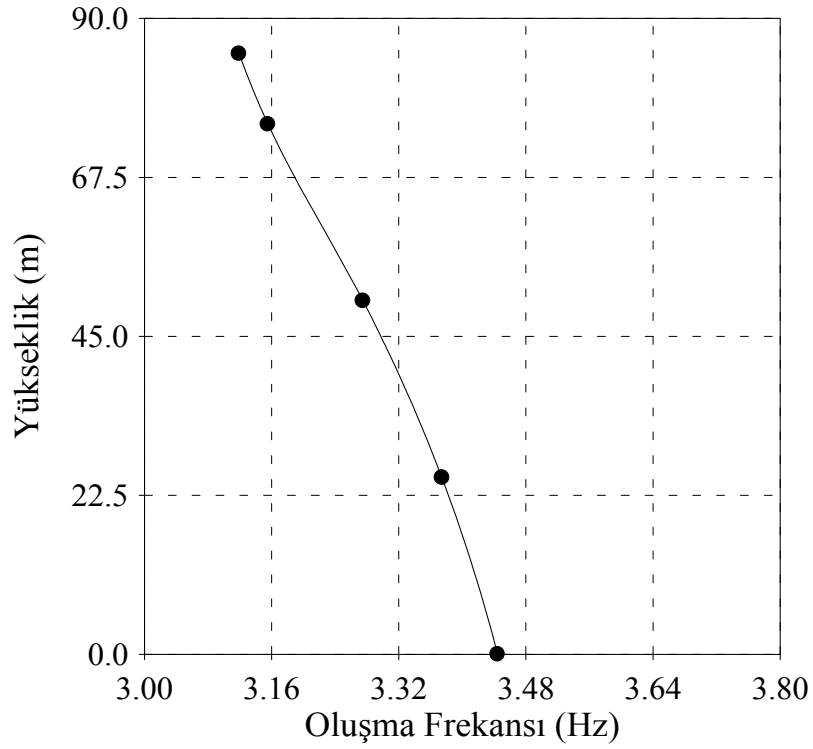
Hidrodinamik Basınç (kN/m ²)	
Ortalama maksimum	650.84
Mutlak maksimum	1472.00

Tablo 10 ve Tablo 18 karşılaştırıldığında baraj-rezervuar etkileşim sistemine zeminin eklenmesiyle etkileşim sisteminin ara yüzeyine yakın sıvı elemanın memba topuğundaki hidrodinamik basınç değerlerinin arttığı gözlemlenmiştir. Ayrıca tüm baraj memba yüzeyi boyunca da hidrodinamik basınç değerlerindeki artış dikkati çekmektedir. Zeminin varlığının analiz sonuçlarını etkilediği bir kez daha ortaya çıkmıştır.

Baraj-zemin-rezervuar etkileşim sisteminde baraj memba yüzeyinde elde edilen ortalama maksimum hidrodinamik basınçların oluşma frekansları Şekil 156'da verilmiştir. Baraj memba topuğunda elde edilen ortalama maksimum hidrodinamik basıncın oluşma frekansı 3.45 Hz, periyodu ise 0.290 s, baraj kretinde elde edilen ortalama maksimum hidrodinamik basıncın oluşma frekansı 3.16 Hz, periyodu ise 0.316 s'dir. Barajın memba topuğundan rezervuar yüzeyine doğru gidildikçe hidrodinamik basınç değerleri ve hidrodinamik basınçların oluşma frekansları azalmakta, periyotları ise artmaktadır.



Şekil 155. Baraj-zemin-rezervuar etkileşim sisteminde baraj memba yüzeyinde elde edilen hidrodinamik basınç değişimi



Şekil 156. Baraj-zemin-rezervuar etkileşim sisteminde baraj memba yüzeyinde elde edilen ortalama maksimum hidrodinamik basınçların oluşma frekansları

3.2.5. Farklı Deprem Mekanizmalarının Baraj-Zemin-Rezervuar Etkileşim Sistemi Üzerindeki Etkisi

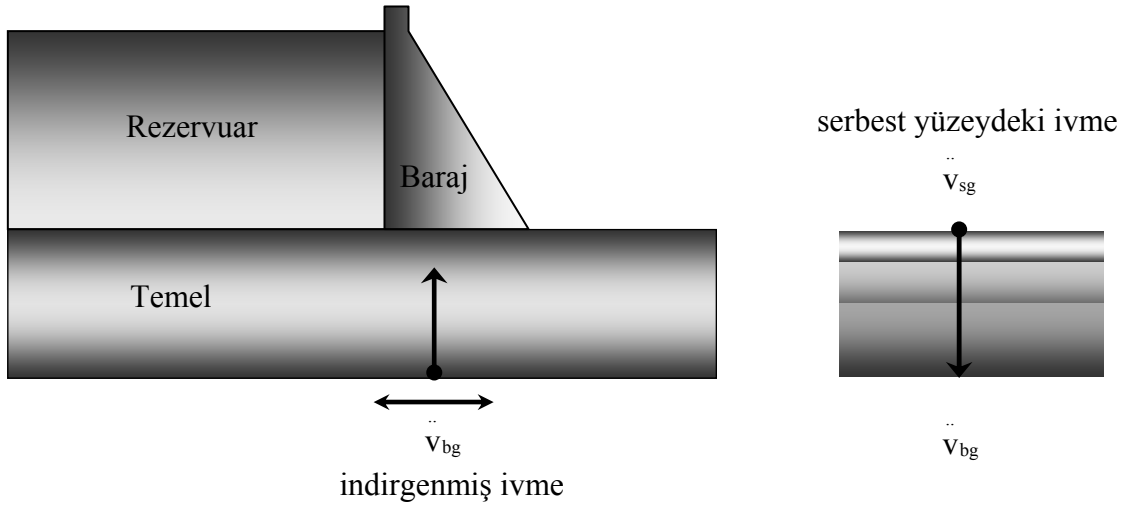
Bu bölümde farklı deprem mekanizmalarının baraj-zemin-rezervuar etkileşim sistemi üzerindeki etkisi incelenecektir. Temel zemini ve rezervuarın deprem sırasında ağırlık barajların dinamik davranışını önemli derecede etkilediği bilinmektedir. Baraj-zemin etkileşim sistemlerinin deprem davranışını belirlerken yerel zemin koşullarını göz önünde bulundurmak için dört farklı deprem mekanizması kullanılmaktadır (Leger ve Boughoufalah, 1989). Bunlar sırasıyla standart rijit taban veri modeli, kütsüz temel veri modeli, indirgenmiş kaya taban veri modeli ve serbest alan baraj-temel ara yüzey veri modelidir.

Standart rijit taban veri modelinde (Model I), temel zemininin tabanına uygulanan deprem hareketi, zemin yüzeyinde bulunan kuvvetli yer hareket sismografi tarafından daha önceden kaydolunan yer hareketidir.

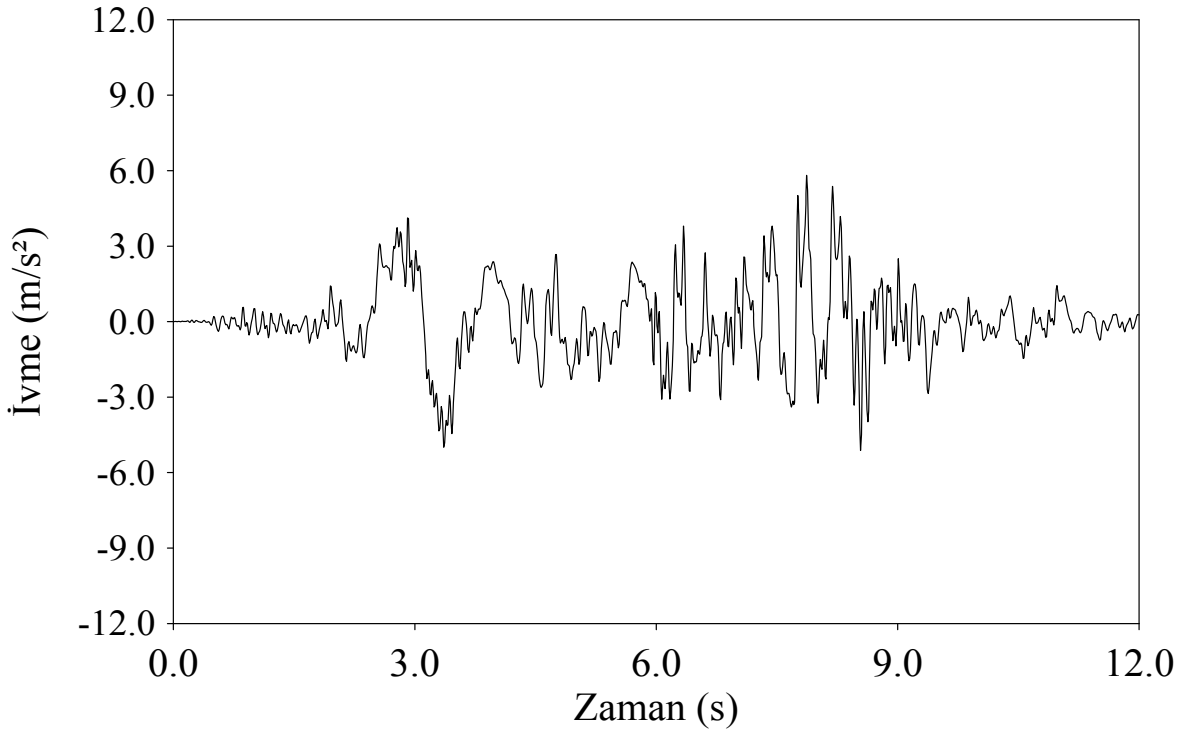
Kütsüz temel veri modelinde (Model II), idealleştirilmiş temel modelinin kütsüz olduğu düşünülür. Kütlenin yokluğu temel kayasını bir yay gibi yapar. Başka bir deyişle, temel kayasının sadece elastikiyeti dikkate alınır. Bu durum serbest yüzey ivmelerinin yapay büyüme potansiyel problemini ortadan kaldırır.

Model I ve Model II'nin görünen eksikliği zemin tabakasının tabanında oluşan hareketle yüzeyinde kaydedilenin aynı olmamasıdır. Buna bağlı olarak, bu eksiklikleri gidermek için modellerde bir düzeltme yapılmalıdır. Bu düzeltmeler, serbest alan yüzey kaydını indirgeyerek kullanan (Model III) veya kaydedilen ivmeyi serbest alan verisi olarak kullanan analiz işleminin formülasyonunu uygulayarak (Model IV) gerçekleştirilebilir.

İndirgenmiş kaya taban veri modeli (Model III) ve serbest alan baraj-zemin ara yüzey veri modeli (Model IV), temel ve rijit kaya tabanı arasındaki zemin tabakasını içeren aynı matematik modele uygulandığı ve zemin tabakasının yüzeyinde aynı serbest alan hareketinin oluşacağı düşünüldüğü için bu iki analiz aynı sonuçları vermektedir (Clough, 1993). Bu nedenle bu çalışmada Şekil 157'de gösterilen indirgenmiş kaya taban veri modeli (Model III) kullanılacaktır.



Şekil 157. İndirgenmiş kaya taban veri modeli (Model III)

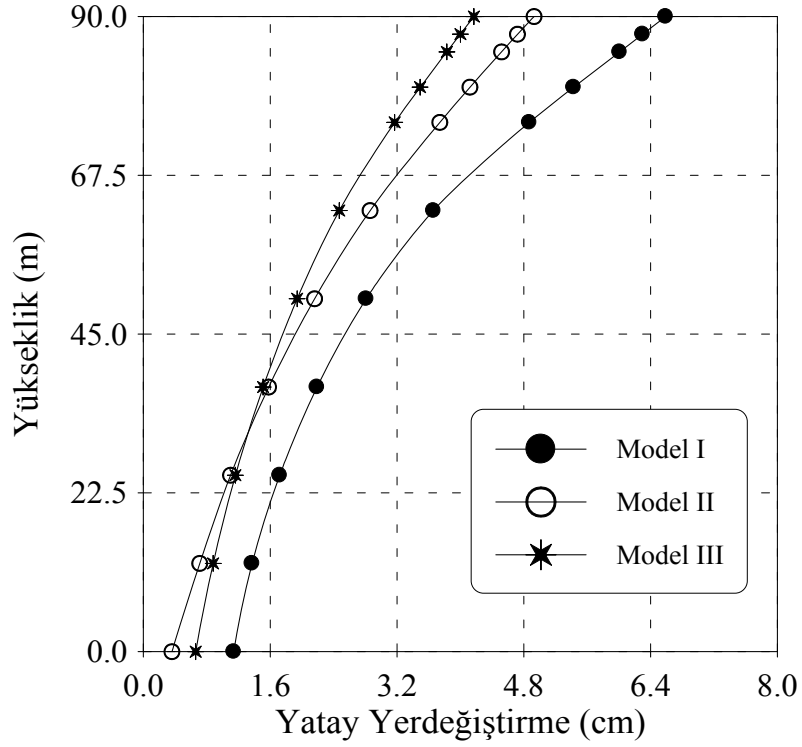


Şekil 158. 1971 San Fernando depremi Pacoima Barajı indirgenmiş ivme kaydı

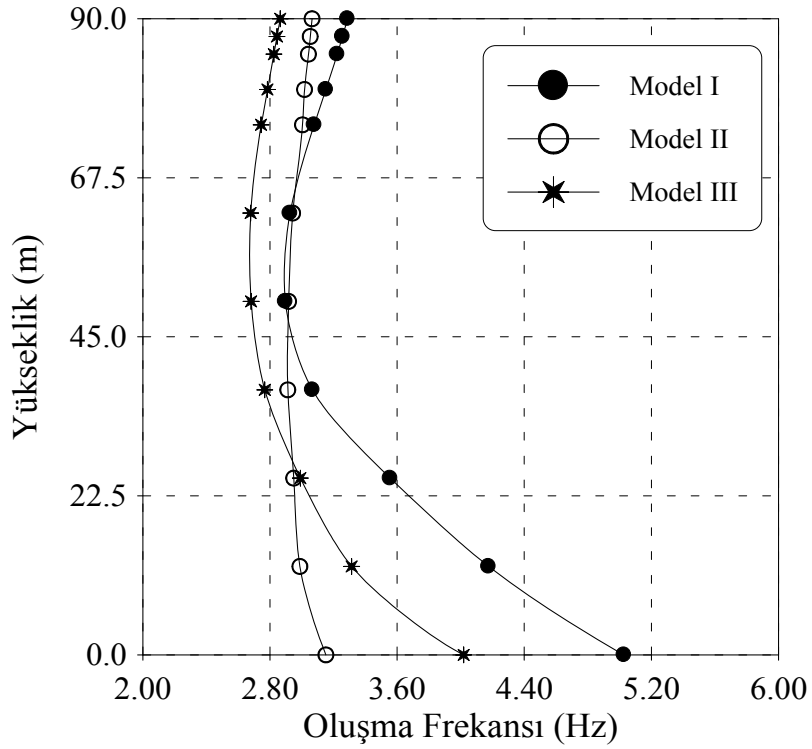
Yer hareketi olarak serbest yüzeyde kaydedilen 1971 San Fernando depremi Pacoima Baraj kaydı S16E bileşeni (Şekil 18) seçilmiştir (URL-1, 2003). İndirgenmiş ivme kaydı bir boyutlu dalga yayılma teorisine dayanan SHAKE91 bilgisayar programı (Idriss ve Sun, 1992) kullanılarak hesaplanmış ve Şekil 158’de verilmiştir. İndirgenmiş ivme kaydına bağlı olarak yapılan analizde ana parametreler, kayma dalga hızı ve temel zemininin sönüm oranıdır. İvme ölçerlerin kayma dalga hızı ve temel zemini sönüm oranından etkilendiği söylenebilir. Temel zeminin elastikiyeti arttıkça yapay büyüme oluşur. Kaymanın kayma dalga hızı ve sönüm oranı 2000 m/s ve %5 olarak seçilmiştir. İvme kaydının ilk 12 saniyesi 0.01 zaman aralığı ile dikkate alınmıştır. Yerel zemin koşullarının ivme kaydının zaman geçmişi frekans içeriklerini önemli derecede etkilemektedir. İndirgenmiş ivme değerleri serbest yüzeyde kaydedilen ivme değerlerinden daha küçüktür (Şekil 158).

Ortalama maksimum yatay yerdeğiştirmeler, standart rijit taban veri modeli (Model I), kütsüz temel veri modeli (Model II), indirgenmiş kaya taban veri modeli (Model III) olmak üzere üç farklı deprem mekanizması için baraj memba yüzeyi boyunca düğüm noktalarında hesaplanmıştır. Model I ve Model II için yapılan analizlerde Şekil 18’de çizilen serbest yüzey ivme kaydı kullanılmıştır. Şekil 158’de verilen indirgenmiş ivme kaydı Model III için yapılan analizlerde kullanılmıştır. Farklı deprem mekanizmaları kullanılarak yapılan analizler sonucu, Model III kullanılarak elde edilen ortalama maksimum yatay yerdeğiştirmelerin, Model I kullanılarak elde edilenlerden oldukça küçük olduğu Şekil 159’dan görülmektedir. Model II kullanılarak yapılan analiz sonucu elde edilen ortalama maksimum yatay yerdeğiştirmeler Model III’e oranla daha büyük çıkmıştır. Model II’de zemin kütsüz kabul edildiği için temel kayasının elastikiyeti artmış, bu da elde edilen davranışları Model I’e oranla nispeten küçültmüştür.

Şekil 160’da Model I, Model II ve Model III kullanılarak elde edilen ortalama maksimum yatay yerdeğiştirmelerin oluşma frekansları görülmektedir. Her üç modelde de oluşma frekansları barajın tabanından kretine doğru gidildikçe azalmakta, krete yaklaştıkça az da olsa artmaktadır. Model I’in stokastik dinamik analizi sonucu elde edilen ortalama maksimum yatay yerdeğiştirmelerin oluşma frekansları Model II ve III’e oranla daha büyük çıkmıştır. Model I ve Model III sonuçları birbirine paralel çıkmıştır. Model II kullanılarak yapılan analiz sonucu elde edilen ortalama maksimum yatay yerdeğiştirmelerin oluşma frekanslarının dağılımı Model I ve III’ten biraz farklılık göstermekle beraber, genellikle Model I’den küçük, Model III’ten büyük çıkmıştır.

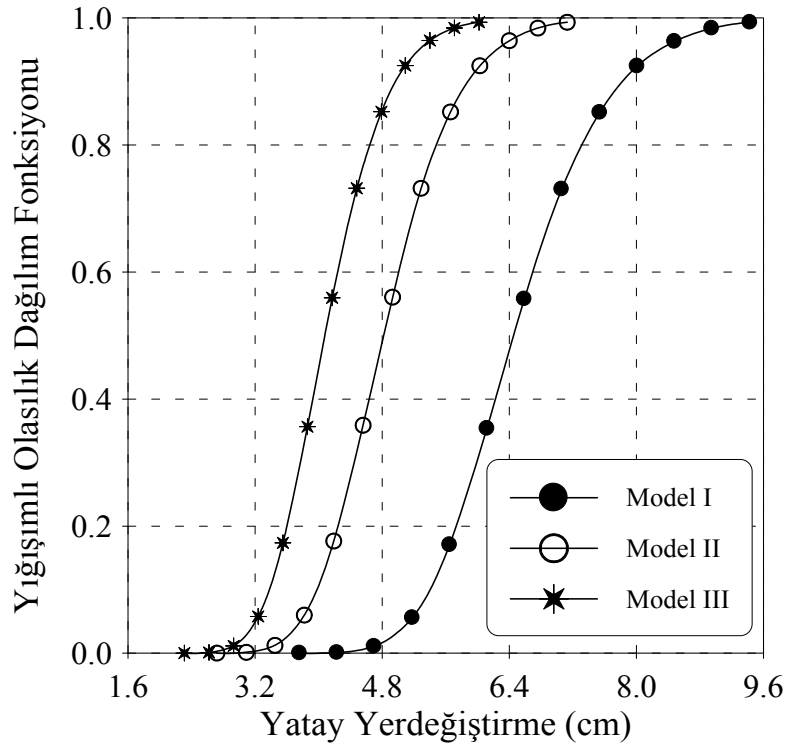


Şekil 159. Farklı deprem mekanizmaları için baraj memba yüzeyinde oluşan ortalama maksimum yatay yerdeğiştirmeler



Şekil 160. Farklı deprem mekanizmaları için baraj memba yüzeyinde oluşan ortalama maksimum yatay yerdeğiştirmelerin oluşma frekansları

Şekil 161’de farklı deprem mekanizmaları için baraj-zemin-rezervuar etkileşim sisteminde barajın memba yüzü kret noktasındaki (C noktası) ortalama maksimum yatay yerdeğiştirmenin yığışımlı olasılık dağılım fonksiyonları verilmektedir. Şekil 161 incelendiğinde standart rijit taban veri modeli (Model I) için barajın kret noktasındaki ortalama maksimum yatay yerdeğiştirmenin (6.59 cm) aşılma olasılığı yaklaşık olarak %56’dır. Ayrıca 3.76 cm’nin altında bir maksimum değer oluşma olasılığı oldukça az iken, 9.43 cm’nin altında bir maksimum değer oluşma olasılığı %100’dür. Benzer şekilde Model II ve Model III incelenmiştir. Kütlesiz temel veri modeli (Model II) için barajın kret noktasındaki ortalama maksimum yatay yerdeğiştirmenin (4.93 cm) aşılma olasılığı yaklaşık olarak %56’dır. 2.72 cm’nin altında bir maksimum değer oluşma olasılığı oldukça az iken, 7.13 cm’nin altında bir maksimum değer oluşma olasılığı %100’dür. İndirgenmiş kaya taban veri modeli incelendiğinde (Model III) barajın kret noktasındaki ortalama maksimum yatay yerdeğiştirmenin (4.17 cm) aşılma olasılığı da %56’dır. 2.31 cm’nin altında bir maksimum değer oluşma olasılığı yok denecek kadar az iken, 6.02 cm’nin altında bir maksimum değer oluşma olasılığı çok yüksektir.

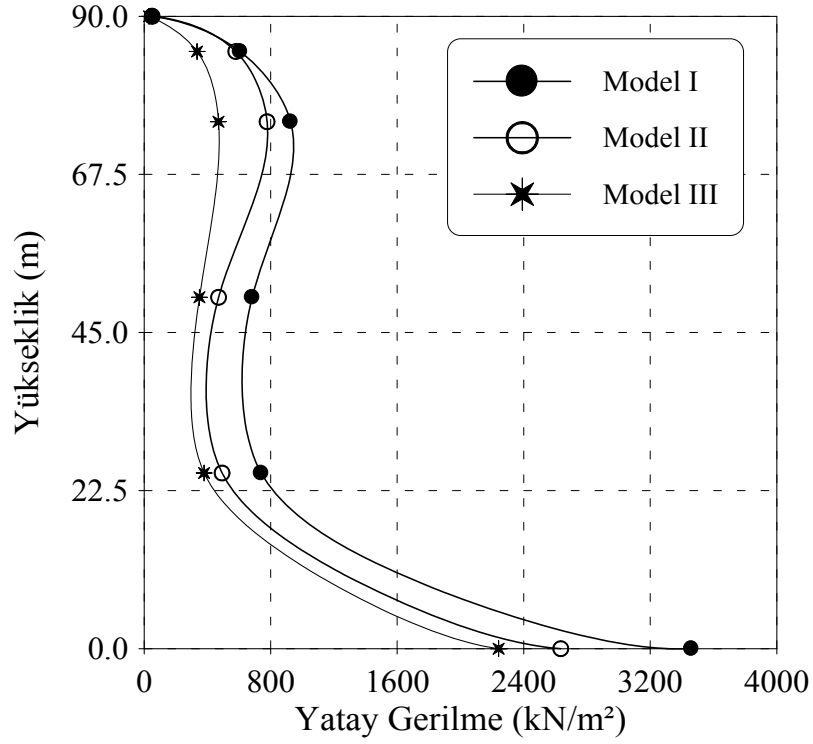


Şekil 161. Farklı deprem mekanizmaları için baraj kret noktasında (C noktası) elde edilen ortalama maksimum yatay yerdeğiştirmelerin yığışımlı olasılık dağılım fonksiyonları

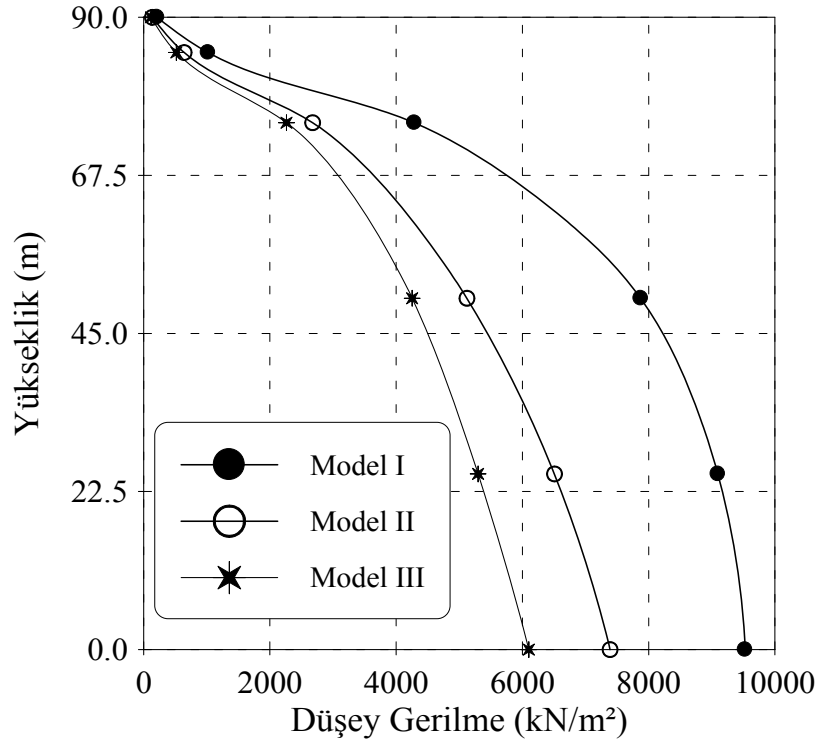
Farklı deprem mekanizmaları için baraj memba yüzeyinde elde edilen ortalama maksimum gerilme bileşenleri Şekil 162-164'de gösterilmektedir. Şekillerden görülmektedir ki, Model I'in stokastik dinamik analizi sonucu elde edilen ortalama maksimum gerilmeler, Model II ve Model III'ün analizlerinden elde edilenlerden daha büyük çıkmıştır. Şekil 162'de ortalama maksimum yatay gerilmeler incelendiğinde, en yüksek gerilme değerinin barajın tabanında, en düşüğünün ise barajın kretinde olduğu görülmektedir. Şekil 163-164'de barajın tabanından kretine doğru gidildikçe ortalama maksimum düşey gerilme ve kayma gerilme değerleri azalmaktadır.

Ortalama maksimum gerilme bileşenlerinin yatay uzaklıkla değişimleri I-I ve II-II kesitlerinde incelenmiştir (Şekil 165-170). Her iki kesitte de en büyük ortalama maksimum gerilme değerleri Model I'de elde edilmiştir. Şekil 165 ve Şekil 167'de ortalama maksimum yatay ve kayma gerilmeleri baraj membasından mansabına doğru gidildikçe artmaktadır. Ortalama maksimum düşey gerilmeler en büyük değerlerini barajın memba tarafında almaktadır. Barajın orta kısmına doğru azalmakta, mansaba doğru tekrar artan değerler almaktadır. II-II kesitinde ortalama maksimum yatay gerilmeler incelendiğinde Model I ve Model III'ün analizinden elde edilen gerilme değerleri baraj membasından mansabına doğru gidildikçe artarken Model II'de bu değerler azalmaktadır. II-II kesitinde Model II ve III'ün dağılımlarında farklılık gözlenmiştir. Bu da II-II kesitinin krete yakın bir kesit olduğundan kaynaklandığı düşünülmektedir.

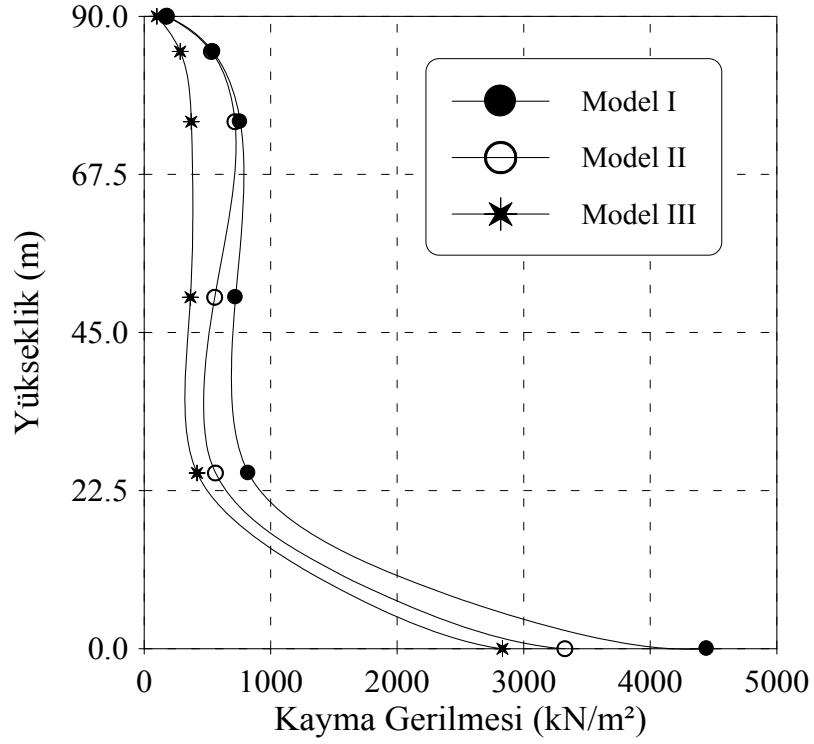
Farklı deprem mekanizmaları için baraj-zemin-rezervuar etkileşim sisteminde baraj memba yüzeyindeki ortalama maksimum hidrodinamik basınç değişimi Şekil 171'de gösterilmektedir. Ortalama maksimum hidrodinamik basınç değerleri baraj-rezervuar etkileşim yüzeyine komşu sıvı elemanların Gauss noktalarında elde edilmiştir. İndirgenmiş kaya taban veri modeli için (Model III) elde edilen hidrodinamik basınçlar, standart rijit taban veri modeli (Model I) ve kütsüz temel veri modeli (Model II) için elde edilen hidrodinamik basınçlardan daha küçüktür. Hidrodinamik basınçlar en büyük değerini barajın memba topuğuna yakın kısımlarda almaktadır.



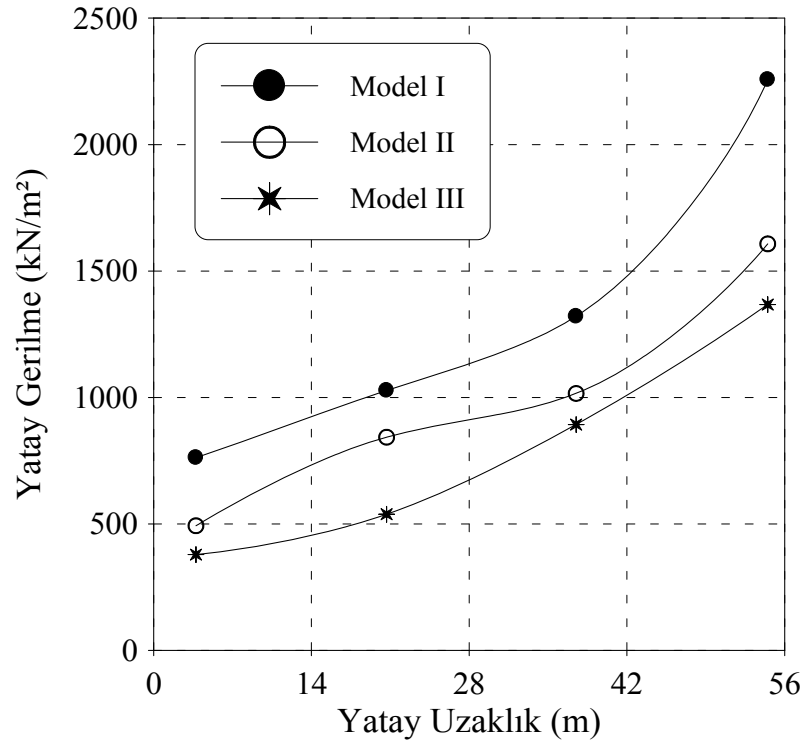
Şekil 162. Farklı deprem mekanizmaları için baraj memba yüzeyinde oluşan ortalama maksimum yatay gerilmeler



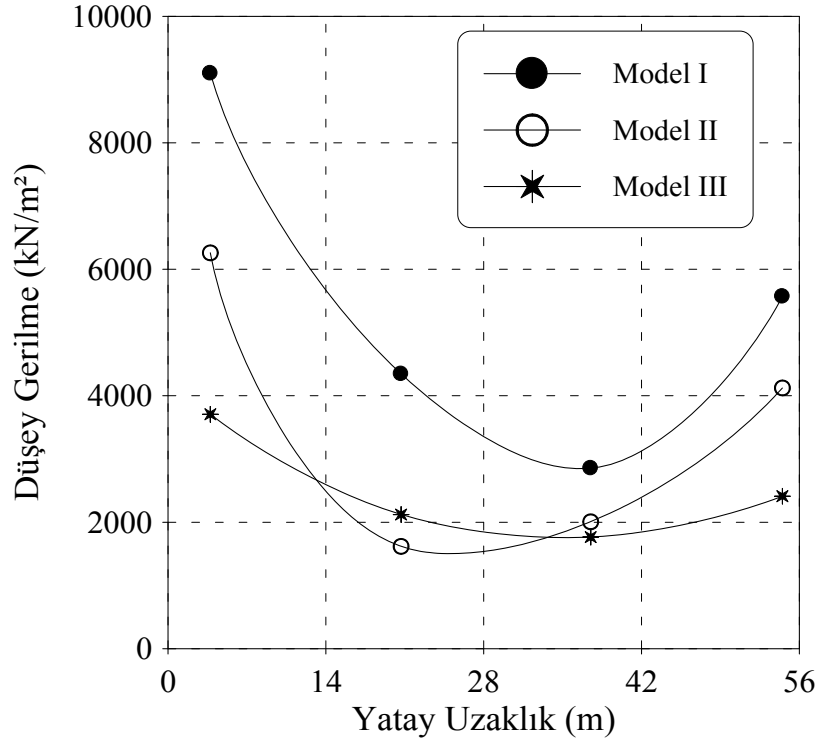
Şekil 163. Farklı deprem mekanizmaları için baraj memba yüzeyinde oluşan ortalama maksimum düşey gerilmeler



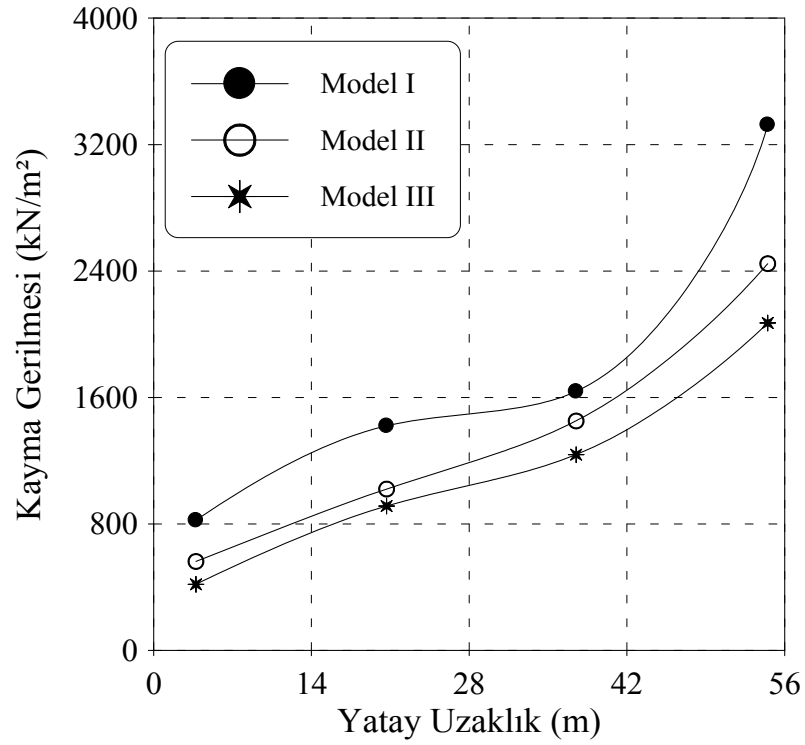
Şekil 164. Farklı deprem mekanizmaları için baraj memba yüzeyinde oluşan ortalama maksimum kayma gerilmeleri



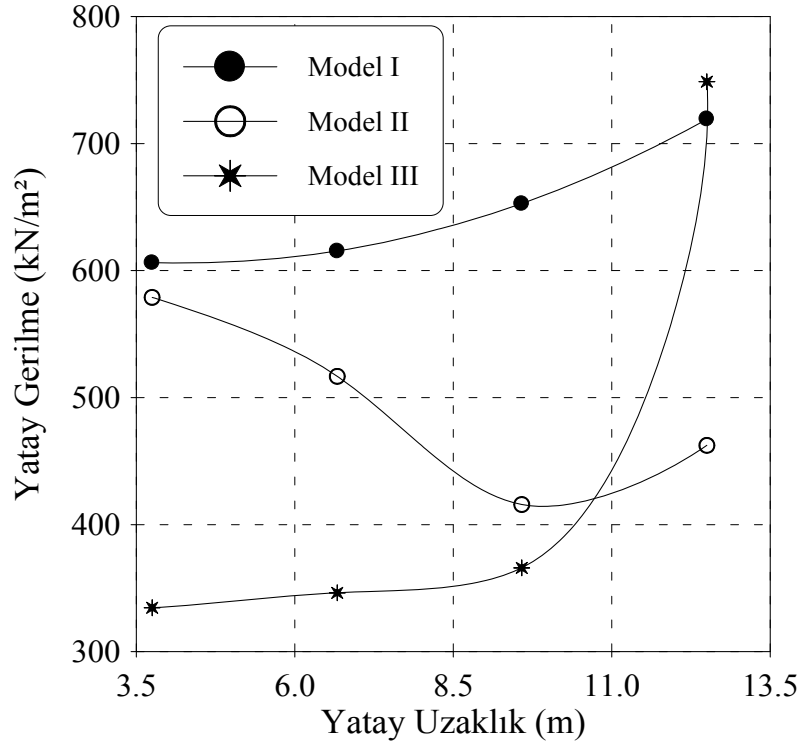
Şekil 165. Farklı deprem mekanizmaları için barajın I-I kesitinde oluşan ortalama maksimum yatay gerilmeler



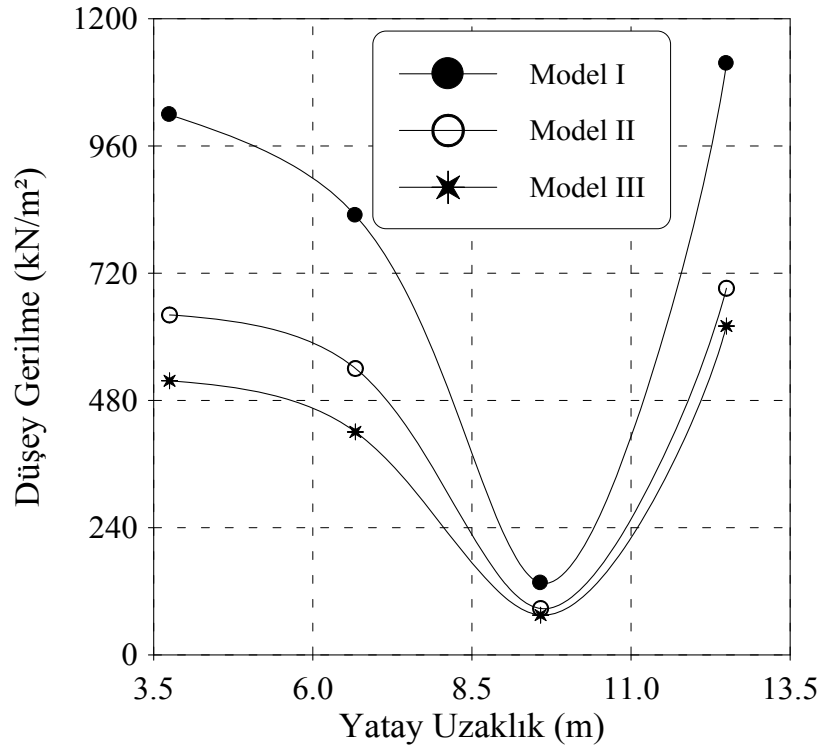
Şekil 166. Farklı deprem mekanizmaları barajın I-I kesitinde oluşan ortalama maksimum düşey gerilmeler



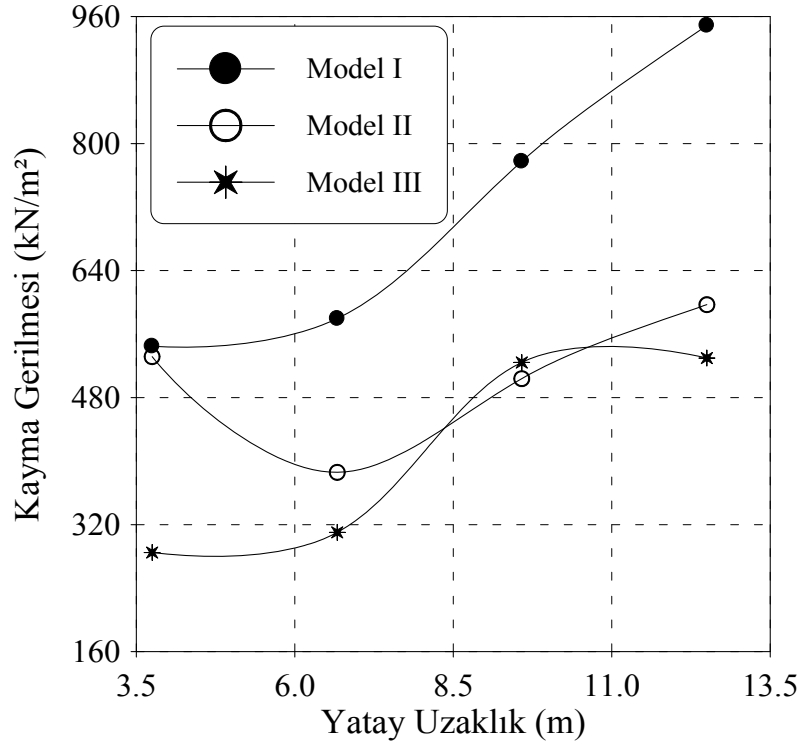
Şekil 167. Farklı deprem mekanizmaları için barajın I-I kesitinde oluşan ortalama maksimum kayma gerilmeleri



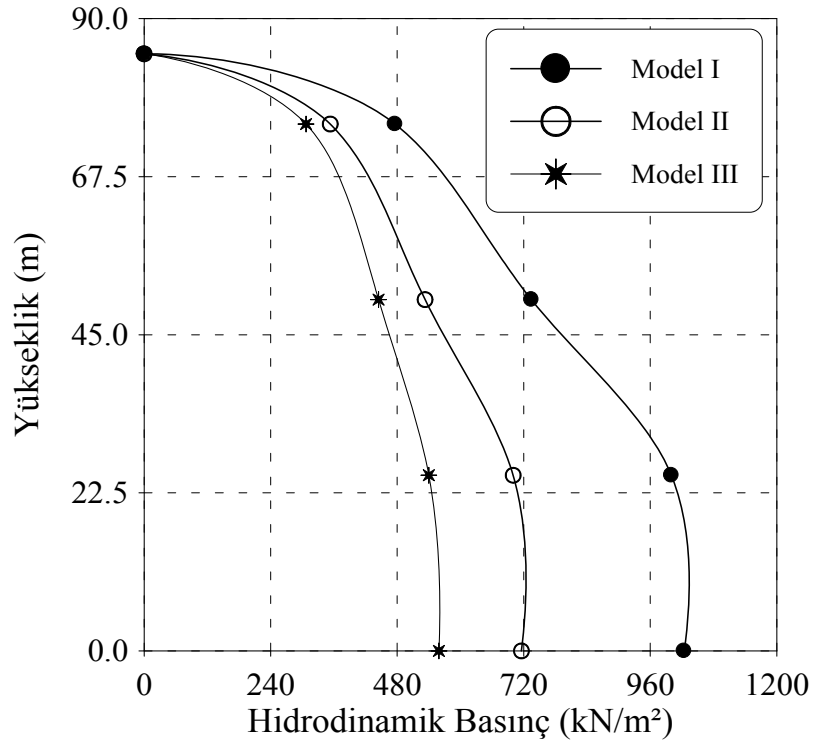
Şekil 168. Farklı deprem mekanizmaları için barajın II-II kesitinde oluşan ortalama maksimum yatay gerilmeler



Şekil 169. Farklı deprem mekanizmaları için barajın II-II kesitinde oluşan ortalama maksimum düşey gerilmeler



Şekil 170. Farklı deprem mekanizmaları için barajın II-II kesitinde oluşan ortalama maksimum kayma gerilmeleri



Şekil 171. Farklı deprem mekanizmaları için baraj memba yüzeyinde elde edilen ortalama maksimum hidrodinamik basınç değişimi

3.2.6. Farklı Zemin Elastisite Modüllerinin Baraj-Zemin-Rezervuar Etkileşim Sisteminin Stokastik Davranışı Üzerindeki Etkisi

Bu bölümde baraj-zemin-rezervuar etkileşim sistemlerinde zemin elastisite modülünün etkisini incelemek amacıyla temel zemini için farklı elastisite modülleri kullanılarak parametrik çalışma yapılmıştır. Sonuçların grafiksel gösteriminde, elastisite modülünün değişik değerleri A, B, C, D durumları ile ifade edilmiştir. Bunlar;

A Durumu: $E_f / E_c = 0.5$

B Durumu: $E_f / E_c = 1$

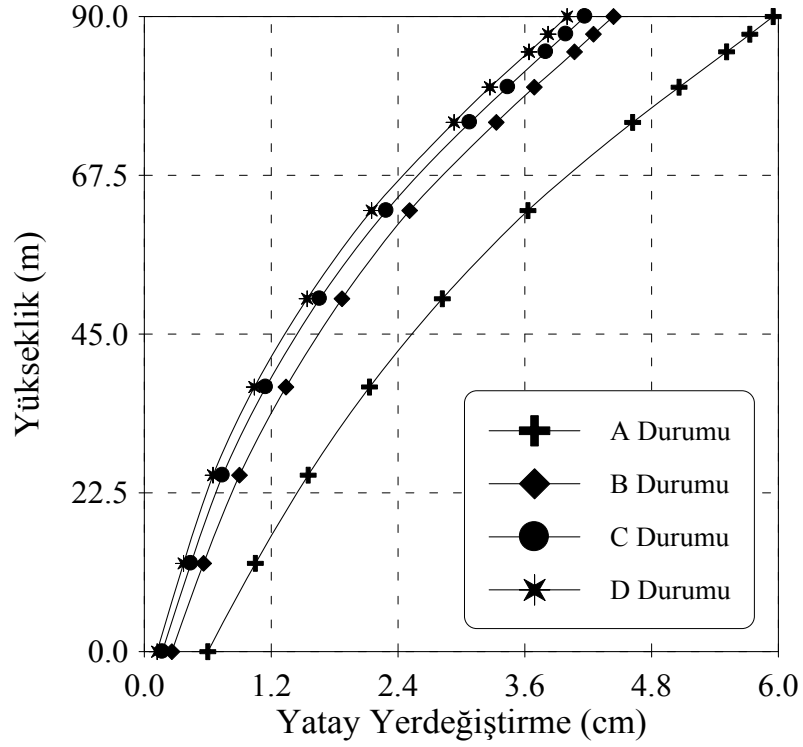
C Durumu: $E_f / E_c = 1.5$

D Durumu: $E_f / E_c = 2$ şeklindedir.

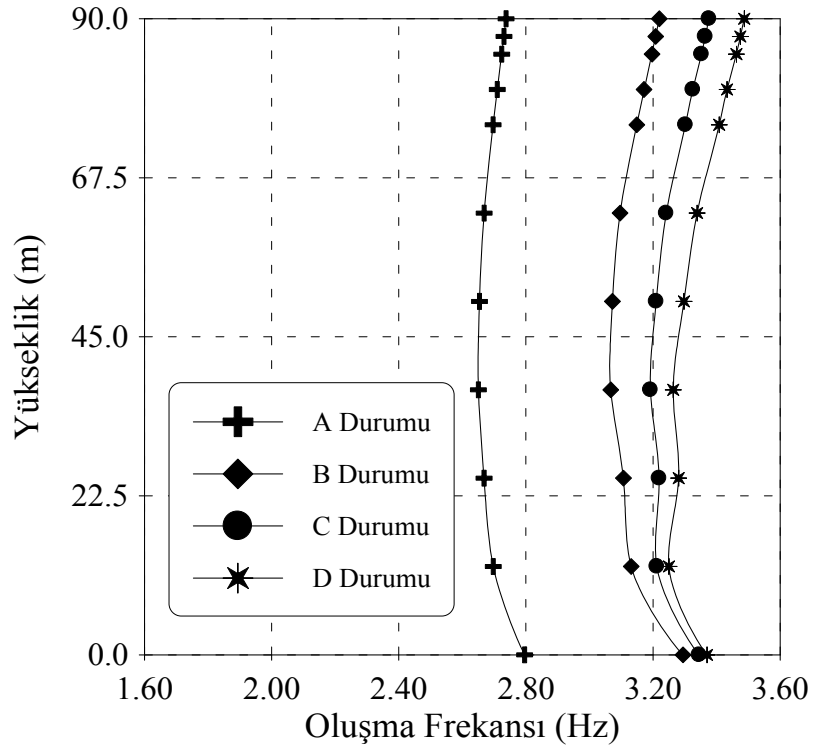
Burada; E_f , temel zemininin elastisite modülünü, E_c ise baraj betonunun elastisite modülünü göstermektedir. Yukarıdaki dört farklı durum için baraj-zemin-rezervuar etkileşim sistemi baraj kret noktasında hesaplanan ortalama maksimum yatay yerdeğiştirmeler Tablo 19’da verilmiştir. Zemin elastisite modülü arttıkça ortalama maksimum yatay yerdeğiştirmeler azalmaktadır. Bu sonuç Şekil 172’de verilmiş olan baraj memba yüzeyi boyunca elde edilen tüm ortalama maksimum yatay yerdeğiştirmelerde görülmektedir. $E_f / E_c = 0.5$ olduğu durumda (A Durumu) ortalama maksimum yatay yerdeğiştirmeler arasındaki fark biraz daha fazladır. Şekil 173’te baraj memba yüzeyi boyunca oluşan ortalama maksimum yatay yerdeğiştirmelerin oluşma frekansları verilmiştir. Ortalama maksimum yatay yerdeğiştirmelerin artmasıyla bu yerdeğiştirmelerin oluşma frekansları azalmaktadır. Ayrıca temel zemininin elastisite modülü arttıkça ortalama maksimum yatay yerdeğiştirmelerin oluşma frekansları da artmaktadır.

Tablo 19. Farklı zemin elastisite modülleri için baraj kret noktasında oluşan ortalama maksimum yatay yerdeğiştirmeler

E_f / E_c Oranı	Yatay Yerdeğiştirme (cm)
$E_f / E_c = 0.5$	5.95
$E_f / E_c = 1$	4.44
$E_f / E_c = 1.5$	4.17
$E_f / E_c = 2$	4.00



Şekil 172. Farklı zemin elastisite modülleri için baraj memba yüzeyinde oluşan ortalama maksimum yatay yerdeğıştirmeler



Şekil 173. Farklı zemin elastisite modülleri için baraj memba yüzeyinde oluşan ortalama maksimum yatay yerdeğıştirmelerin oluşma frekansları

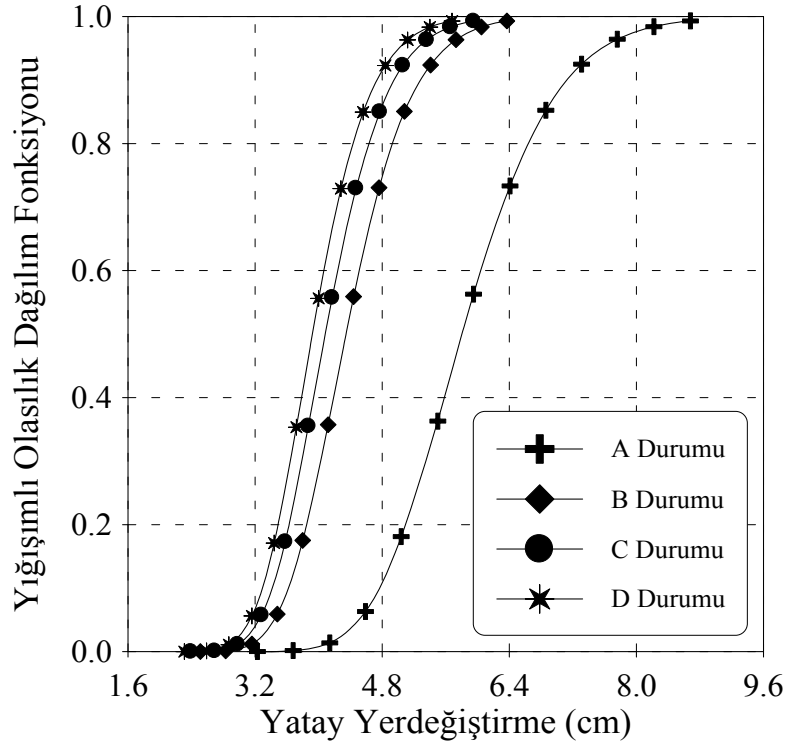
Farklı zemin elastisite modülleri için baraj-zemin-rezervuar etkileşim sistemi baraj kret noktasında (C noktası) elde edilen ortalama maksimum yatay yerdeğiştirmenin yığışımlı olasılık dağılım fonksiyonu Şekil 174'te gösterilmektedir.

A durumunda, barajın kret noktasındaki ortalama maksimum yatay yerdeğiştirmenin (5.95 cm) aşılma olasılığı yaklaşık olarak %56'dır. Ayrıca 3.23 cm'nin altında bir maksimum değerin oluşma olasılığı oldukça az iken, 8.68 cm'nin altında bir maksimum değerin oluşma olasılığı %100'dür.

B durumunda, barajın kret noktasındaki ortalama maksimum yatay yerdeğiştirmenin (4.44 cm) aşılma olasılığı yaklaşık olarak %56'dır. 2.51 cm'nin altında bir maksimum değerin oluşma olasılığı oldukça az iken, 6.37 cm'nin altında bir maksimum değerin oluşma olasılığı %100'dür.

C durumunda, barajın kret noktasındaki ortalama maksimum yatay yerdeğiştirmenin (4.17 cm) aşılma olasılığı da %56'dır. 2.39 cm'nin altında bir maksimum değerin oluşma olasılığı yok denecek kadar az iken, 5.95 cm'nin altında bir maksimum değerin oluşma olasılığı çok yüksektir.

D durumunda ise barajın kret noktasındaki ortalama maksimum yatay yerdeğiştirmenin (4.00 cm) aşılma olasılığı %56'dır. Ayrıca 2.31 cm'nin altında bir maksimum değerin oluşma olasılığı oldukça az iken, 5.68 cm'nin altında bir maksimum değerin oluşma olasılığı %100'dür. Görüldüğü üzere her dört durumda da ortalama maksimum yatay yerdeğiştirmenin aşılma olasılığı birbirine eşittir. Farklı zemin elastisite modülleri ortalama maksimum yatay yerdeğiştirmenin aşılma olasılığını fazla etkilememektedir. Sadece %100 olması beklenen ortalama maksimum yatay yerdeğiştirme değerleri değişmektedir.



Şekil 174. Farklı zemin elastisite modülleri için baraj kret noktasında (C noktası) elde edilen ortalama maksimum yatay yerdeğiştirmelerin yığışlımlı olasılık dağılım fonksiyonları

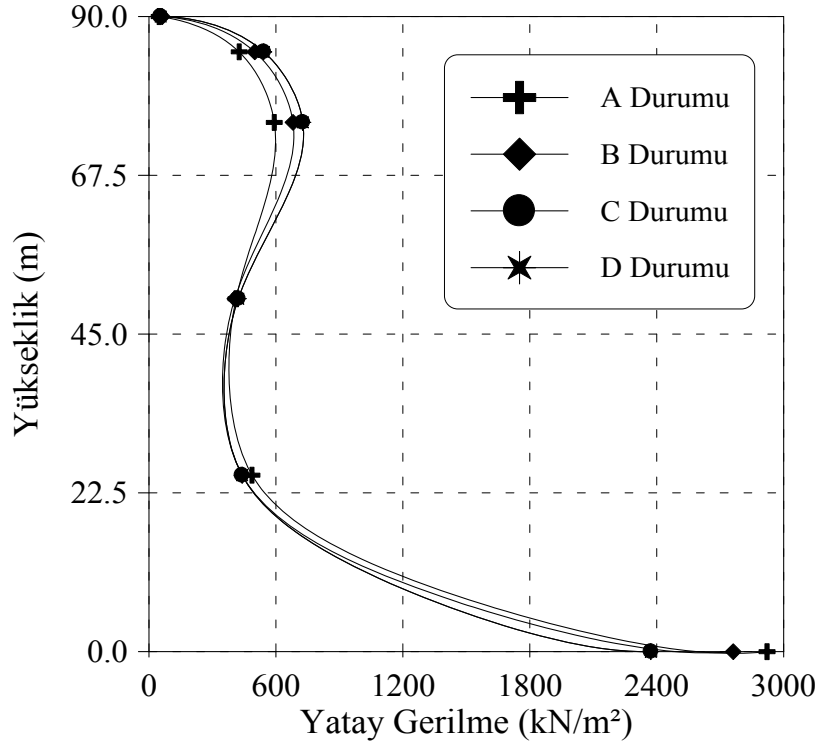
Baraj-zemin-rezervuar etkileşim sistemi baraj memba yüzeyinde oluşan ortalama maksimum gerilme bileşenleri Şekil 175-177'de gösterilmektedir. Ortalama maksimum yatay ve kayma gerilmelerinin şekilleri incelendiğinde barajın memba topuğunda en büyük ortalama maksimum gerilmeler A durumunda elde edilmiştir. Başka bir deyişle baraj memba topuğunda temel zemininin elastisite modülü arttıkça ortalama maksimum yatay gerilme ve kayma gerilmesi değerleri azalmaktadır. Ancak baraj memba yüzeyi boyunca inceleme yapıldığında bunun tam tersi bir durum ortaya çıkmaktadır. Baraj memba yüzeyi boyunca en büyük ortalama maksimum yatay gerilmeler ve kayma gerilmeleri C ve D durumlarında elde edilmiştir. Temel zemininin elastisite modülü arttıkça ortalama maksimum yatay gerilmeler ve kayma gerilmeleri artmıştır. Şekil 176'da en büyük ortalama maksimum düşey gerilmeler A durumunda elde edilmiş olup, barajın membasından kretine doğru gidildikçe dört durum için de elde edilen değerler birbirine yaklaşmaktadır. Tablo 20'de barajın memba topuğunda (A Gauss noktası) elde edilen ortalama maksimum gerilme bileşenleri verilmektedir.

Tablo 20. Farklı zemin elastisite modülleri için baraj memba topuğunda (A Gauss noktası) oluşan ortalama maksimum gerilmeler

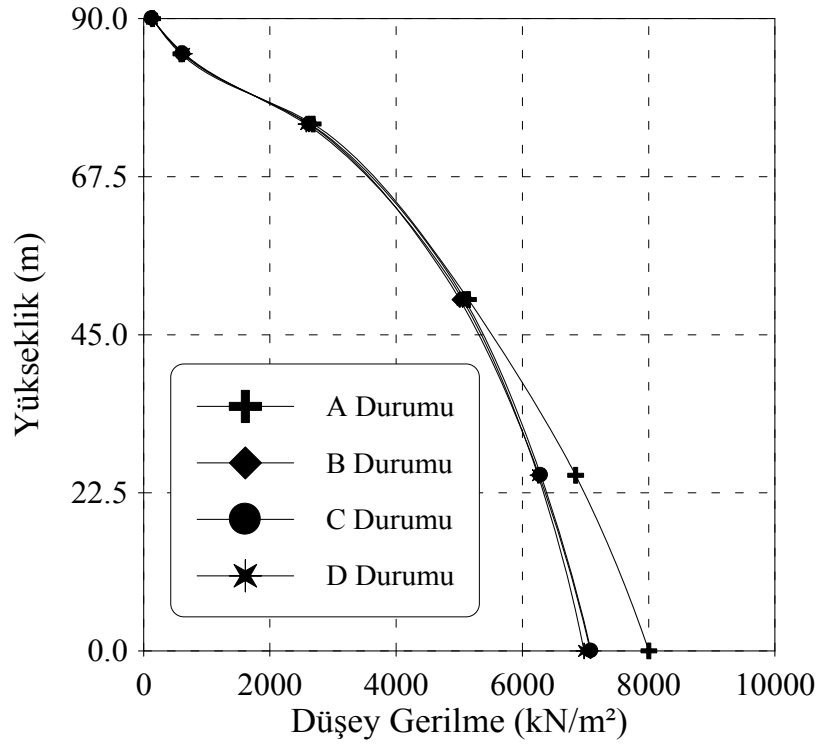
E_f / E_c Oranı	Yatay Gerilme (kN/m ²)	Düşey Gerilme (kN/m ²)	Kayma Gerilmesi (kN/m ²)
$E_f / E_c = 0.5$	2921.90	8004.80	3768.90
$E_f / E_c = 1$	2761.60	7077.80	3094.90
$E_f / E_c = 1.5$	2372.50	7087.40	2915.80
$E_f / E_c = 2$	2254.70	6977.80	2713.80

Baraj-zemin-rezervuar etkileşim sistemi I-I kesitinde elde edilen ortalama maksimum yatay, düşey gerilmeler ve kayma gerilmeleri Şekil 178-180'de verilmiştir. Şekillerden görülmektedir ki temel zemininin elastisite modülü arttıkça ortalama maksimum gerilme bileşenleri genellikle azalmaktadır. Barajın memba tarafından mansabına doğru gidildikçe ortalama maksimum yatay ve kayma gerilmeleri genellikle artmaktadır. Ortalama maksimum düşey gerilmeler en büyük değerini barajın memba tarafında almaktadır. Barajın ortasına doğru gidildikçe ortalama maksimum değerleri azalmakta, mansabına doğru gidildikçe tekrar artmaktadır.

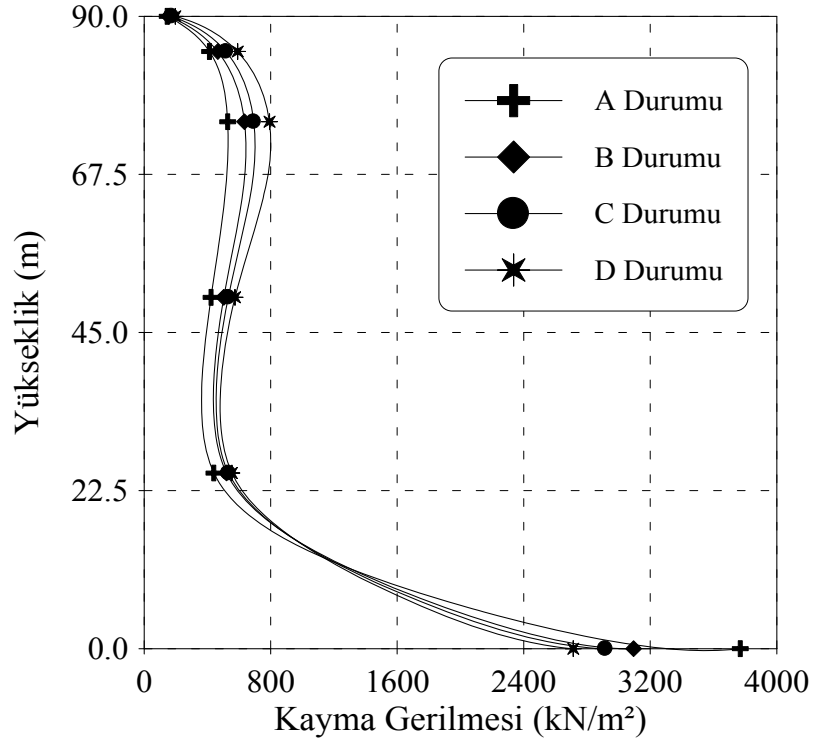
Farklı zemin elastisite modüllerinin kullanılmasıyla elde edilen ortalama maksimum gerilmeler baraj-zemin-rezervuar etkileşim sistemi II-II kesitinde de incelenmiştir (Şekil 181-183). II-II kesitinde de en büyük gerilme değerleri D durumunda elde edilmiştir. Diğer bir ifadeyle, temel zemininin elastisite modülü arttıkça ortalama maksimum gerilmeler artmıştır. Ortalama maksimum yatay gerilmeler baraj membasından mansabına doğru gidildikçe genellikle azalmaktadır. Ortalama maksimum düşey gerilmeler barajın orta kısmında en düşük değerini almaktadır. Ortalama maksimum kayma gerilmeleri ise baraj membasından mansabına doğru gidildikçe önce azalan sonra artan bir grafik çizmektedirler. Şekillerden görüldüğü gibi I-I ve II-II kesitlerinde elde edilen ortalama maksimum gerilme bileşenlerinde farklılıklar gözlenmiştir. Buradan yatay kesitlerin uzunluğunun ve kesitin barajın membasına ya da kretine yakın olmasının analiz sonuçlarını etkilediği anlaşılmaktadır.



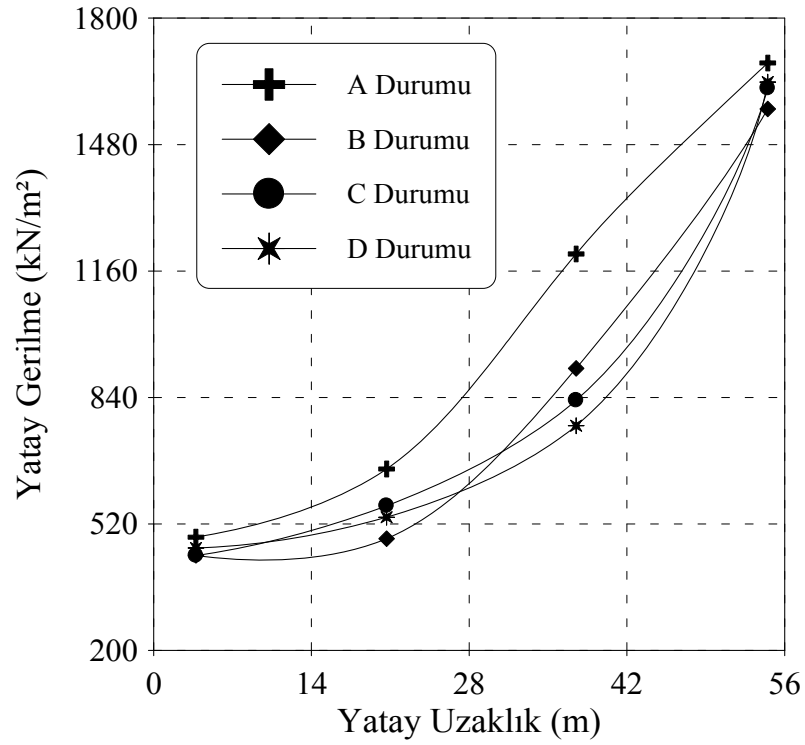
Şekil 175. Farklı zemin elastisite modülleri için baraj memba yüzeyinde oluşan ortalama maksimum yatay gerilmeler



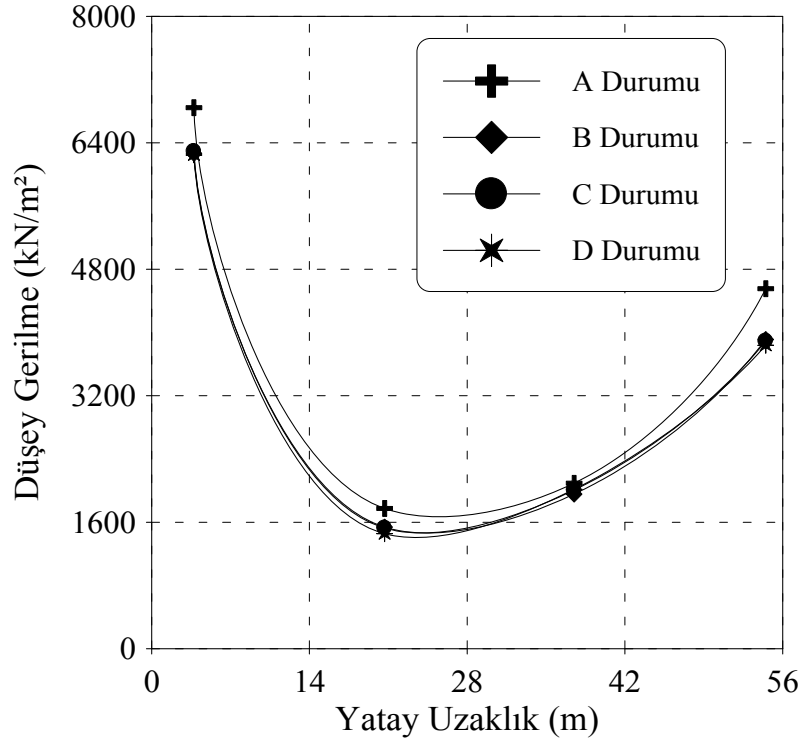
Şekil 176. Farklı zemin elastisite modülleri için baraj memba yüzeyinde oluşan ortalama maksimum düşey gerilmeler



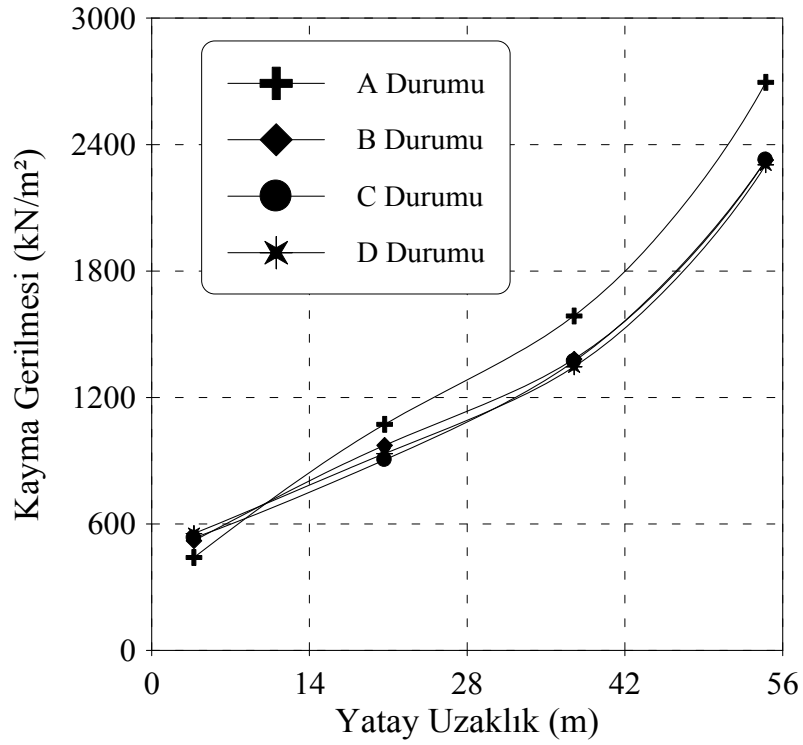
Şekil 177. Farklı zemin elastisite modülleri için baraj memba yüzeyinde oluşan ortalama maksimum kayma gerilmeleri



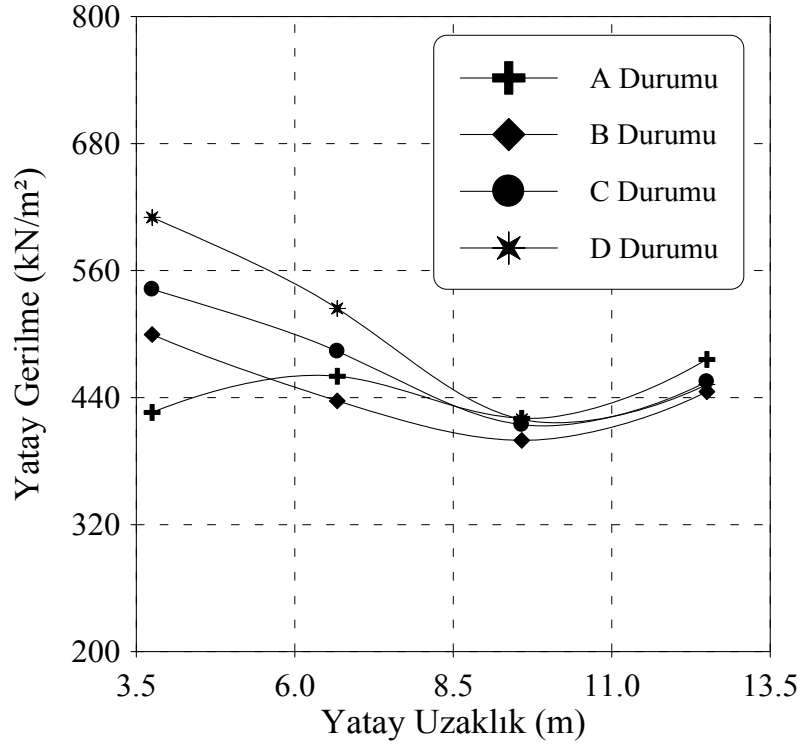
Şekil 178. Farklı zemin elastisite modülleri için barajın I-I kesitinde oluşan ortalama maksimum yatay gerilmeler



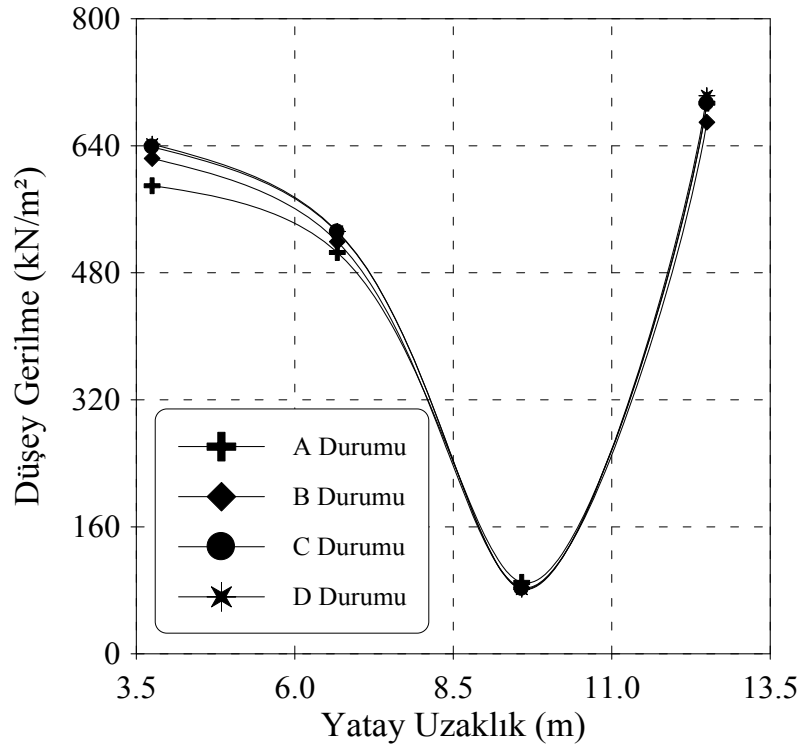
Şekil 179. Farklı zemin elastisite modülleri için barajın I-I kesitinde oluşan ortalama maksimum düşey gerilmeler



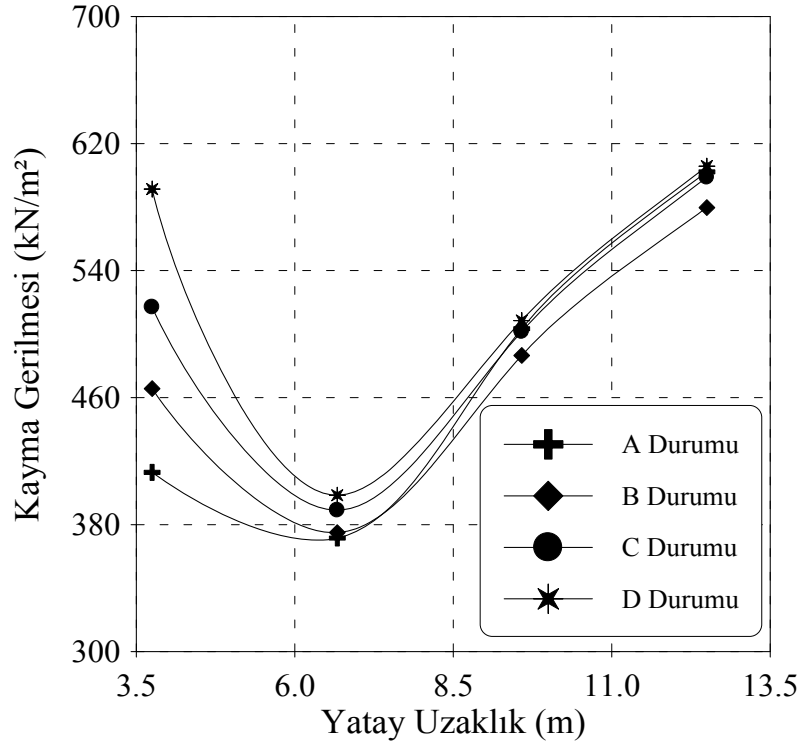
Şekil 180. Farklı zemin elastisite modülleri için barajın I-I kesitinde oluşan ortalama maksimum kayma gerilmeleri



Şekil 181. Farklı zemin elastisite modülleri için barajın II-II kesitinde oluşan ortalama maksimum yatay gerilmeler



Şekil 182. Farklı zemin elastisite modülleri için barajın II-II kesitinde oluşan ortalama maksimum düşey gerilmeler

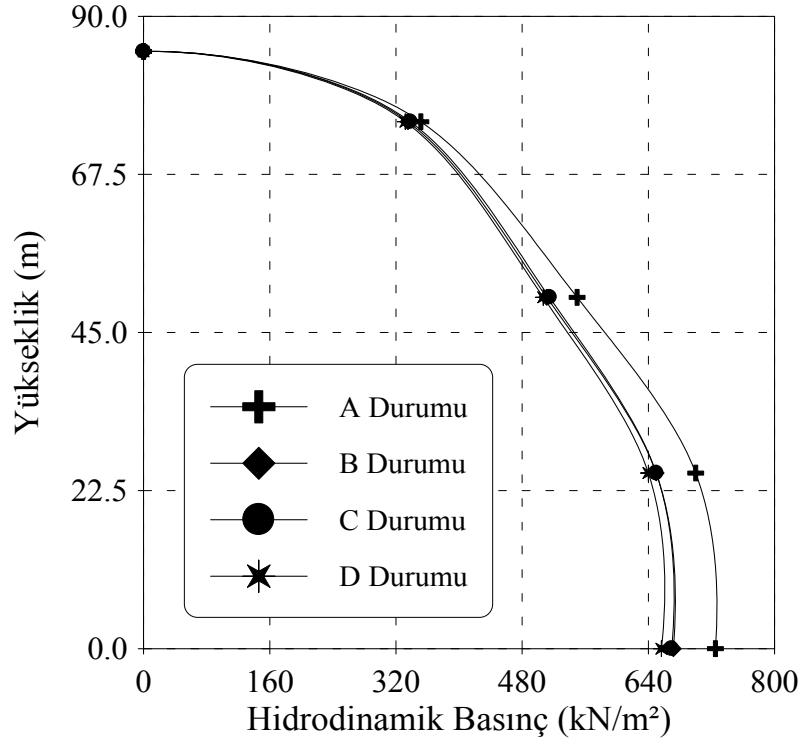


Şekil 183. Farklı zemin elastisite modülleri için barajın II-II kesitinde oluşan ortalama maksimum kayma gerilmeleri

Baraj memba yüzeyinde farklı zemin elastisite modülleri kullanılarak elde edilen ortalama maksimum hidrodinamik basınçlar Şekil 184’de verilmiştir. Ortalama hidrodinamik basınçlar en büyük değerlerini A durumunda almıştır. B, C ve D durumlarında elde edilen ortalama hidrodinamik basınç değerleri birbirlerine oldukça yakın çıkmıştır. Temel zemininin elastisite modülü arttıkça baraj memba yüzeyinde ortalama maksimum hidrodinamik basınçlar azalmaktadır. Tablo 21’de baraj memba topuğundaki (A Gauss noktası) ortalama maksimum hidrodinamik basınçlar verilmektedir.

Tablo 21. Farklı zemin elastisite modülleri için baraj memba topuğunda (A Gauss noktası) oluşan ortalama maksimum hidrodinamik basınçlar

Durum	Hidrodinamik Basınç (kN/m ²)
A Durumu	724.95
B Durumu	671.60
C Durumu	669.49
D Durumu	656.63



Şekil 184. Farklı zemin elastisite modülleri için baraj memba yüzeyinde elde edilen ortalama maksimum hidrodinamik basınç değişimi

4. SONUÇLAR VE ÖNERİLER

Barajlar, sıvı-yapı etkileşimine maruz kalan önemli yapı gruplarından biridir. Barajların deprem sırasındaki davranışlarının istatistiksel olarak ifade edilmesi gelecekte olması muhtemel davranış içerikleri hakkında tahminde bulunmamıza yardımcı olur. Bu da sıvı-yapı etkileşim sistemlerinin projelendirme aşamasında proje mühendisine oldukça kolaylık sağlayacaktır.

Deterministik dinamik analiz sonucu yapı davranışı tepki değerlerinin maksimumları ya da zaman süreçleri belirlenmektedir. Bu değerler özel bir deprem için bulunmuş olup; oluşma frekansları, oluşma dağılımları ve ortalama maksimum değerleri ile ilgili olarak herhangi bir bilgi vermemektedirler. Barajlar gibi önemli mühendislik yapılarının analizlerinde, tepkilerin en büyük değerlerinin yanında ortalama değerlerinin ve oluşma frekanslarının bilinmesine ihtiyaç duyulmaktadır. Stokastik yöntemle yapılan dinamik analizlerde ise projelendirme için diğer yöntemlere oranla daha çok bilgi edinilebilmektedir. Böylece seçilen yapı türünün daha güvenilir ve gerçekçi olarak projelendirilmesi sağlanmakta, hem de yapı tepkilerinin oluşma frekansları ve olasılık dağılımları hakkında bilgi edinilmektedir.

Sıvı-yapı etkileşim sistemleri incelenirken Westergaard, Euler ve Lagrange yaklaşımları kullanılmaktadır. Westergaard yaklaşımında yapı ile birlikte hareket eden suyu temsil etmek üzere ek bir kütle tanımlanmıştır. Euler yaklaşımında, yapıda yerdeğiştirmeler, sıvıda basınçlar veya hız potansiyelleri değişkendir. Bu yaklaşımın çözümü özel amaçlı bilgisayar programları gerektirmektedir. Lagrange yaklaşımında ise hem sıvı hem de yapı ortamında yerdeğiştirmeler bilinmeyen olarak seçilmektedir. Lagrange yaklaşımına dayalı analizlerde mevcut olan eleman alt programlarından yerdeğiştirmelere dayalı sıvı elemanlarını elde etmek ve genel amaçlı yapı analizi programlarına uyarlamak kolay olmaktadır.

Bu çalışmada, sıvı-yapı etkileşim sistemlerinin Lagrange yaklaşımına dayalı stokastik dinamik analizi gerçekleştirilmiştir. Sıvı ve sıvı-yapı sistemlerinin stokastik dinamik analizini yapmak amacıyla Wilson ve Khalvati (1983) tarafından önerilen Lagrange yaklaşımına dayalı değişken düğüm noktalı iki boyutlu izoparametrik sıvı sonlu eleman formülasyonu FORTRAN programlama dilinde kodlanarak yapı sistemlerinin stokastik dinamik analizini yapan STOCAL programına dahil edilmiş ve STOCALF olarak

adlandırılmıştır. Geliştirilen STOCALF programının geçerliliğini ve doğruluğunu test etmek için dikdörtgen bir rijit sıvı tankı ve örnek bir sıvı-yapı etkileşim sistemi seçilerek stokastik dinamik analizler yapılmıştır. Daha sonra sıvı-yapı etkileşim sistemlerine daha büyük bir örnek teşkil etmesi amacıyla Ankara'nın 120 km kuzeybatısında, Sakarya Nehri üzerinde inşa edilen Sarıyar Barajı seçilmiştir. Böylece baraj-rezervuar ve baraj-zemin-rezervuar etkileşim sistemlerinin Lagrange yaklaşımına dayalı stokastik dinamik analizleri gerçekleştirilmiştir. Ayrıca deterministik dinamik analizleri de yapılarak karşılaştırmalar yapılmıştır. Deterministik dinamik analizlerde MULSAPF (Bayraktar, 1995) programı kullanılmıştır.

Yer hareketi olarak San Fernando depremi Pacoima Baraj kaydı S16E bileşeni kullanılmıştır. Ergodiklik kabulü yapılarak problemin incelenmesinde tek bir deprem kaydı kullanılmaktadır. Ayrıca analizlerde istatistiksel özelliklerin zamandan bağımsız olmasını gerektiren ve hesapları önemli derecede kolaylaştıran stasyonerlik kabulü yapılmıştır.

Sıvı-yapı etkileşim sistemlerinin Lagrange yaklaşımına dayalı stokastik dinamik analizi konulu bu çalışmadan çıkarılabilecek sonuçlar ve öneriler aşağıda verilmektedir.

- 1- Rijit sıvı tankının STOCALF programı ile yapılan modal analizi sonucu elde edilen frekanslar ile MULSAPF programıyla yapılan analizden elde edilen frekanslar birbirlerine oldukça yakındır. Aradaki farkın STOCALF programının çözüm tekniğinden kaynaklandığı düşünülmektedir. Çünkü STOCALF programında her serbestlik derecesine ait kütle değerleri elle hesaplanıp dışarıdan veri olarak girilmekte ve özdeğer analizinde farklı çözüm tekniği kullanılmaktadır.
- 2- Lagrange yaklaşımı kullanılarak yapılan sıvı-yapı etkileşim sistemlerinin stokastik ve deterministik dinamik analizleri sonucu frekans tablolarının ilk sıralarını oluşturan frekanslar yüzey salınım frekanslarıdır. Yüzey salınım frekansları, yüzey salınımıyla ilgilidir ve yapının davranışında herhangi bir etkileri yoktur. Hacim değişim frekansları yüzey salınım frekanslarından sonra elde edilen frekanslardır. STOCALF ve MULSAPF programlarından elde edilen hacim değişim frekansları birbirlerine oldukça yakındır. Bu durum geliştirilen STOCALF programının geçerliliğinin göstergelerinden biridir.

- 3- Sıvı-yapı etkileşim sisteminin deterministik dinamik analiz sonucu belirli noktalarında davranışların zaman değişimleri elde edilmiştir. Bu zaman değişimlerinden elde edilen frekanslar ile stokastik dinamik analiz sonucu elde edilen oluşma frekansları karşılaştırılmış ve birbirine eşit denecek kadar yakın olduğu görülmüştür. Bu sonuç yine STOCALF programının geçerliliğinin göstergelerinden biridir.
- 4- Baraj-rezervuar ve baraj-zemin-rezervuar etkileşim sistemlerinin deterministik dinamik analiz sonucu elde edilen mutlak maksimum davranışlar, stokastik dinamik analiz sonucu elde edilen ortalama maksimum davranışlardan genellikle daha büyük çıkmıştır. Stokastik dinamik analizde ortalama maksimum değerler, bütün maksimum davranış değerlerinin ortalaması alınarak hesaplandığı için, mutlak maksimum değerlerin ortalama maksimum değerlerden daha büyük çıkması beklenen bir sonuçtur.
- 5- Baraj-rezervuar ve baraj-zemin-rezervuar etkileşim sistemlerinde baraj memba yüzeyinde yapılan incelemelerde hem deterministik hem de stokastik dinamik analizde en büyük yatay yerdeğiştirmeler barajın kret noktasında, en büyük gerilmeler ise barajın tabanına yakın kısımlarda oluşmaktadır.
- 6- Baraj-rezervuar etkileşim sisteminin stokastik dinamik analiziyle elde edilen ortalama maksimum yerdeğiştirmeler ve ortalama maksimum gerilmeler arttıkça bu yerdeğiştirmeye ve gerilmelerin oluşma frekansları da genellikle artmaktadır. Baraj-zemin-rezervuar etkileşim sisteminin stokastik dinamik analiziyle elde edilen ortalama maksimum yerdeğiştirmeler ve ortalama maksimum gerilmeler arttıkça ise bu yerdeğiştirmeye ve gerilmelerin oluşma frekansları önce azalmakta sonra artmaktadır. Burada zeminin varlığının baraj davranışını önemli ölçüde etkilediği görülmüştür. Bu nedenle dinamik analizlerde baraj-zemin-rezervuar etkileşiminin dikkate alınması gerekmektedir.
- 7- Sıvının hacimsel elastisite modülü artırılarak baraj-rezervuar etkileşim sistemi üzerindeki sıvı sıkışabilirlik etkisi incelenmiştir. Hacimsel elastisite modülü 1, 50, 100 kat artırılarak yapılan analizler sonucu elde edilen ortalama maksimum davranışlar en büyük değerlerine hacimsel elastisite modülünün 100β olduğu durumda ulaşmıştır. Ayrıca hacimsel elastisite modülünün 50β ve 100β olduğu

durumlarda ortalama maksimum davranışlar genellikle birbirine yakın çıkmıştır. Bu durum hacimsel elastisite modülünün belli bir değerinden sonra sıvının sıkışamaz duruma yaklaştığını göstermektedir.

- 8- Rezervuar uzunluğunun baraj-rezervuar etkileşim sisteminin stokastik davranışı üzerindeki etkisi incelenmiştir. Rezervuar uzunluğu arttıkça yüzey salınım frekanslarının sayısının ve ortalama maksimum davranışların genellikle arttığı, uzunluk arttıkça davranışların birbirine yakın değerler aldığı görülmüştür. Rezervuar uzunluğu baraj-rezervuar etkileşim sisteminin davranışında önemli bir rol oynamaktadır. Bu nedenle baraj-rezervuar etkileşim sistemlerinin analizleri yapılırken rezervuar uzunluğu sistemin davranışını en iyi biçimde ifade edecek boyutta olmalıdır. Beton ağırlık barajların stokastik analizi için rezervuar uzunluğunun 3H alınmasının yeterli olduğu görülmüştür.
- 9- Farklı yer hareketleri dikkate alınarak gerçekleştirilen stokastik dinamik analizler sonucunda, ivme kaydı büyük olan deprem sonucu oluşan ortalama maksimum davranışlar en büyük olurken, ivme kaydı küçük olan deprem sonucu oluşan ortalama maksimum davranışlar en küçük olmaktadır.
- 10- Baraj-rezervuar etkileşim sistemine etki eden yer hareketinin yönü, yapılan stokastik dinamik analizlerde etkili olmaktadır. Yer hareketi yatay yönde olduğunda elde edilen ortalama maksimum davranışlar, yer hareketinin yönünün düşey olduğu durumda elde edilenlerden daha büyük çıkmaktadır. Yatay yönde etki eden deprem hareketinin baraj-rezervuar etkileşim sistemlerini daha fazla etkilediği görülmüştür.
- 11- Farklı deprem mekanizmaları kullanılarak baraj-zemin-rezervuar etkileşim sistemi üzerinde gerçekleştirilen stokastik dinamik analizler sonucunda, standart rijit taban veri modeli kullanılarak elde edilen ortalama maksimum davranışlar, kütesiz temel veri modeli ve indirgenmiş kaya taban veri modeli kullanılarak elde edilenlerden genellikle daha büyük çıkmıştır. Kütesiz temel veri modelinde zemin kütesiz kabul edildiği için temel kayasının elastikiyeti artmış, bu da elde edilen davranışları standart rijit taban veri modeline oranla daha küçültmüştür. Standart rijit taban veri modeli davranış niceliklerini önemli derecede büyütmektedir. Bu nedenle baraj-zemin-rezervuar etkileşim sistemlerinin stokastik dinamik davranışlarının

değerlendirilmesinde bu model yetersizdir. Kütlesiz temel veri modeli, indirgenmiş kaya taban veri modeli kadar doğru olmasa da pratik analizler için kullanılabilir.

- 12- Farklı zemin elastisite modüllerinin baraj-zemin-rezervuar etkileşim sistemleri üzerindeki etkisi incelenmiş, temel zemininin elastisite modülü arttıkça ortalama maksimum yatay yerdeğiştirmelerin azaldığı gözlenmiştir. Baraj tabanına yakın kesitte temel zemininin elastisite modülü arttıkça ortalama maksimum gerilmeler genellikle azalmakta, baraj kretine yakın kesitte ise temel zemininin elastisite modülü arttıkça ortalama maksimum gerilmeler genellikle artmaktadır. Temel zemini elastisite modülünün baraj-zemin-rezervuar etkileşim sistemlerinin stokastik dinamik analizinde önemli bir etken olduğu açıktır. Bu nedenle analizlere başlamadan önce zemin cinsi en doğru biçimde belirlenmelidir.
- 13- Bu çalışmada örnek bir beton ağırlık baraj seçilmiş ve analizler bu örnek üzerinde gerçekleştirilmiştir. Elde edilen sonuçların genelleştirilebilmesi için farklı tip baraj modelleri üzerinde incelemeler yapılabilir.
- 14- Stokastik dinamik analizler pratik olması sebebiyle istatistiksel özelliklerin zamandan bağımsız olduğu stasyonerlik kabulü yapılarak gerçekleştirilmiştir. Aynı işlemler stasyoner olmama durumu göz önüne alınarak tekrarlanabilir.
- 15- Baraj-zemin-rezervuar etkileşim sistemlerinin Lagrange yaklaşımına dayalı lineer olmayan stokastik dinamik analizleri gerçekleştirilebilir.
- 16- Yayılarak değişen yer hareketi dikkate alınarak baraj-zemin-rezervuar sistemlerinin stokastik dinamik analizleri yapılabilir.

5. KAYNAKLAR

- Ahmadi, M.T., Izadinia, M. ve Bachmann, H., 2001. A Discrete Crack Joint Model for Nonlinear Dynamic Analysis of Concrete Arch Dam, Computers and Structures, 79, 403-420.
- Akkaş, N., Akay, H.U. ve Yılmaz, Ç., 1979. Applicability of General-Purpose Finite Element Programs in Solid-Fluid Interaction Problems, Computers and Structures, 10, 773-783.
- Akköse, M., 1997. Kemer Barajların Lineer ve Lineer Olmayan İki ve Üç Boyutlu Statik ve Dinamik Analizi, Yüksek Lisans Tezi, KTÜ Fen Bilimleri Enstitüsü, Trabzon.
- Akköse, M., 2003. Lagrange Yaklaşımı ile Kemer Baraj-Su-Zemin Sistemlerinin Malzeme Bakımından Lineer ve Lineer Olmayan Dinamik Analizi, Doktora Tezi, KTÜ Fen Bilimleri Enstitüsü, Trabzon
- Akköse, M., Adanur, S., Bayraktar, A. ve Dumanoglu, A.A., 2007. Stochastic Seismic Response of Keban Dam by the Finite Element Method, Applied Mathematics and Computation, 184, 2, 704-714.
- Altınışık, D., 1981. Yayıgın Temelli Yapıların Dinamik Analizleri, Deprem Araştırma Bülteni, 34, 45-64.
- Altınışık, D. ve Severn, R.T., 1980. Natural Frequencies and Response Characteristics of Gravity Dams, Conference on Design of Dams to Resist Earthquake, ICE, R.23, London, 167-174.
- Araujo, J.M. ve Awruch, A.M., 1998. Probabilistic Finite Element Analysis of Concrete Gravity Dams, Advances in Engineering Software, 29, 9, 7-104.
- Aviles, J. ve Li, X., 1998. Analytical-Numerical Solution for Hydrodynamic Pressures on Dams with Sloping Face Considering Compressibility and Viscosity of Water, Computers and Structures, 66, 4, 481-488.
- Bayraktar, A., 1991. Beton Ağırlık Barajlarda Baraj-Su-Zemin Etkileşiminin Statik ve Dinamik Analizde Değerlendirilişi, Yüksek Lisans Tezi, KTÜ Fen Bilimleri Enstitüsü, Trabzon.
- Bayraktar, A., 1995. Asinkronize Yer Hareketi Etkisindeki Baraj-Rezervuar-Temel Sistemlerinin Dinamik Davranışı, Doktora Tezi, KTÜ Fen Bilimleri Enstitüsü, 1995, Trabzon.
- Bayraktar, A., Dumanoglu, A.A. ve Calayir, Y., 1996. Asynchronous Dynamic Analysis of Dam-Reservoir-Foundation Systems by the Lagrangian Approach, Computers and Structures, 58, 5, 925-935.

- Bayraktar, A., Hançer, E. ve Adanur, S., 2002. Comparison of Asynchronous and Stochastic Dynamic Responses of Concrete Gravity Dams, *Structural Dynamics, EURODYN2002*, H. Grundmann & G.I. Schuëller (eds.), Swets & Zeitlinger, Lisse, ISBN 90 5809 510 X, 1, 737-742.
- Bayraktar, A. ve Hançer, E., 2004. Fluid Compressibility Effects on the Stochastic Dynamic Response of Fluid-Structure Systems, *The 14th International Offshore and Polar Engineering Conference*, Toulon, France, 426-432.
- Bayraktar, A. ve Hançer, E., 2005. Stochastic Analysis of Fluid-Structure Interaction Systems by Lagrangian Approach, *Structural Engineering and Mechanics*, 20, 4, 389-403.
- Bayraktar, A., Hançer, E. ve Dumanoğlu, A.A., 2005. Comparison of Stochastic and Deterministic Dynamic Response of Gravity Dam-Reservoir Systems Using Fluid Finite Elements, *Finite Elements in Analysis and Design*, 41, 1365-1376.
- Bayraktar, A., Hançer, E. ve Akköse, M., 2005. Influence of Base Rock Characteristics on the Stochastic Dynamic Response of Dam-Reservoir-Foundation Systems, *Engineering Structures*, 27, 1498-1508.
- Bathe, K-J., 1996. *Finite Element Procedures*, Prentice-Hall Inc. Englewood Cliffs, New Jersey.
- Bathe, K-J. ve Hahn, W.F., 1979. On Transient Analysis of Fluid-Structure Systems, *Computers and Structures*, 10, 383-391.
- Bendat, S.J. ve Piersol, A.G., 1971. *Random Data: Analysis and Measurement Procedures*, First Edition, John Wiley and Sons, Inc., New York.
- Bolotin, V.V., 1984. *Random Vibrations of Elastic Systems*, First Edition, Martinus Nijhoff Publishers, The Hague.
- Bougacha, S. ve Tassoulas, J.L., 1991. Seismic Response of Gravity Dams I: Modeling of Sediments, *Journal of Engineering Mechanics*, 117, 8, 1826-1837.
- Bougacha, S. ve Tassoulas, J.L., 1991. Seismic Response of Gravity Dams II: Effects of Sediments, *Journal of Engineering Mechanics*, 117, 8, 1839-1849.
- Button, M.R., Der Kiureghian, A. ve Wilson, E.L., 1981. *STOCAL-User Information Manual*. Report No. UCB-SESM/81-2, Department of Civil Engineering, University of California, Berkeley, CA.
- Calayır, Y., 1994. Beton Ağırlık Barajların Euler ve Lagrange Yaklaşımları Kullanılarak Dinamik Analizi, Doktora Tezi, KTÜ Fen Bilimleri Enstitüsü, Trabzon.
- Calayır, Y., Bayraktar, A. ve Dumanoğlu, A.A., 1993. Baraj-Rezervuar Sistemlerinin Lineer Teoriye Göre Dinamik Analizi, 2. Ulusal Deprem Mühendisliği Konferansı, 178-187, İstanbul.

- Calayır, Y. ve Dumanoglu, A.A., 1993. Static and Dynamic Analysis of Fluid and Fluid-Structure Systems by Lagrangian Method, Computers and Structures, 49, 4, 625-632.
- Calayır, Y., Dumanoglu, A.A. ve Bayraktar, A., 1995. Baraj-Rezervuar Sistemlerinin Lagrange Yaklaşımı Kullanılarak İki ve Üç Boyutlu Dinamik Analizi, 3.Ulusal Deprem Mühendisliği Konferansı, TMMOB İnşaat Mühendisleri Odası İstanbul Şubesi, İstanbul, 95-104.
- Calayır, Y., Dumanoglu, A.A. ve Bayraktar, A., 1996. Earthquake Analysis of Gravity Dam-Reservoir Systems Using the Eulerian and Lagrangian Approaches, Computers and Structures, 19, 5, 877-890.
- Celep, Z. ve Kumbasar, N., 1996. Yapı Dinamiği ve Deprem Mühendisliğine Giriş, İkinci Baskı, Sema Matbaacılık, İstanbul.
- Chakrabarti, P. ve Chopra, A.K., 1973. Hydrodynamic Pressures and Response of Gravity Dams to Vertical Earthquake Components, Earthquake Engineering and Structural Dynamics, 1, 325-335.
- Chavez, J.W. ve Fenves, G.L., 1995. Earthquake Analysis of Concrete Gravity Dams Including Base Sliding, Earthquake Engineering and Structural Dynamics, 24, 673-686.
- Chen, M. ve Harichandran, R.S., 1995. Effect of Spatially Varying Ground Motion on Earth Dam Response, Proceedings of Engineering Mechanics, 1, 78-81.
- Chen, M. ve Harichandran, R.S., 1998. Sensitivity of Earth Dam Seismic Response to Ground Motion Coherency, Proceedings of the 1998 Conference on Geotechnical Earthquake Engineering and Soil Dynamics III, Geotechnical Special Publication, 2, 914-925.
- Chopra, A.K., 1967. Reservoir-Dam Interaction During Earthquakes, Bulletin of the Seismological Society of America, 57, 675-687.
- Chopra, A.K., 1970. Earthquake Response of Concrete Gravity Dams, Journal of the Engineering Mechanics Division, ASCE, 96, 443-454.
- Chopra, A.K., 2001. Dynamics of Structures, Second Edition, Prentice Hall, New Jersey.
- Chopra, A.K., Chakrabarti, P. ve Gupta, S., 1980. Earthquake Response of Concrete Gravity Dams Including Hydrodynamic and Foundation Interaction Effects, Report No. UCB/EERC 80/01, Earthquake Engineering Research Center, University of California, Berkeley, California.
- Chopra, A.K. ve Chakrabarti, P., 1981. Earthquake Analysis of Concrete Gravity Dams Including Dam-Water-Foundation Rock Interaction, Earthquake Engineering and Structural Dynamics, 9, 363-383.

- Clough, R.W., 1993. A Structural Engineer's View of Soil-Structure-Interaction, Development in Dynamics Soil-Structure Interaction, Edited by P. Gülkan and R.W. Clough, Kluwer Academic Publish, Dordrecht, The Neitherlands, 91-99.
- Clough, R.W. ve Penzien, J., 1993. Dynamics of Structures, Second Edition, Mc Graw Hill, Inc., Singapore.
- Coşkun, S.B., 2007. An Exact Truncation Boundary Condition for Incompressible Fluid Domains in Dam-Reservoir Interaction Analysis, Engineering Structures, 29, 4, 635-639.
- De Sortis, A. ve Paoliani, P., 2007. Statistical Analysis and Structural Identification in Concrete Dam Monitoring, Engineering Structures, 29, 1, 110-120.
- Der Kiureghian, A., 1980. Structural Response to Stationary Excitation, Journal of Engineering Mechanics Division, 106, EM6, 1195-1213.
- Dibaj, M. ve Penzien, J., 1967. Response of Earth Dams to Travelling Seismic Waves, Journal of Soil Mechanics and Foundation Division, ASCE, 95, SM2.
- Di Paola, M. ve Zingales, M., 2003. Stochastic Seismic Analysis of Hydrodynamic Pressure in Dam-Reservoir Systems, Earthquake Engineering and Structural Dynamics, 32, 165-172.
- DSİ, 1991. Türkiye'deki Barajlar, Bayındırlık ve İskan Bakanlığı Devlet Su İşleri Genel Müdürlüğü, Ankara.
- Dumanoğlu, A.A. ve Severn, R.T., 1984. Dynamic Response of Dams and Other Structures to Differential Ground Motions, Proc. Instn. Civ. Engrs., 2, 77, 333-352.
- Dumanoğlu, A.A., Severn, R.T. ve Taylor, C.A., 1984. Effect of Asynchronous Input on the Response of Dams, Proceedings of Eighth World Conference on Earthquake Engineering, 6, 127-133.
- Dumanoğlu, A.A. ve Severn, R.T., 1990. Stochastic Response of Suspension Bridges to Earthquake Forces, Earthquake Engineering and Structural Dynamics, 19, 133-152
- Dumanoğlu, A.A. ve Soyluk, K., 1998. Kablolu Köprülerin Stokastik ve Asinkronize Dinamik Analizi, Türkiye Deprem Vakfı, Teknik Rapor TDV/TR 98-013.
- Elishakoff, I., 1983. Probabilistic Method in the Theory of Structures, John Wiley and Sons, Inc., New York.
- Fenves, G. ve Chopra, A.K., 1984. Earthquake Analysis of Concrete Gravity Dams Including Reservoir Bottom Absorption and Dam-Water-Foundation Rock Interaction, Earthquake Engineering and Structural Dynamics, 12, 663-680.

- Greeves, E.J., 1991. The Modelling and Analysis of Linear and Nonlinear Fluid-Structure Systems with Particular Reference to Concrete Dams, Ph. D. Thesis, University of Bristol, Bristol.
- Greeves, E.J. ve Dumanoglu, A.A., 1989. The Implementation of an Efficient Computer Analysis for Fluid-Structure System Using the Eulerian Approach within SAPIV, Report No. UBCE-EE-89-10, University of Bristol, Department of Civil Engineering, Bristol.
- Hall, J.F. ve Chopra, A.K., 1980. Dynamic Response of Embankment Dams, Concrete Gravity and Arch Dams Including Hydrodynamic Interaction, Report No. UCB/EERC 80/39, Earthquake Engineering Research Center, University of California, Berkeley, California.
- Hall, J.F. ve Chopra, A.K., 1982. Hydrodynamic Effects in the Dynamic Response of Concrete Gravity Dams, Earthquake Engineering and Structural Dynamics, 10, 333-345.
- Hall, J.F. ve Chopra, A.K., 1983. Dynamic Analysis of Arch Dams Including Hydrodynamic Effects, Journal of Engineering Mechanics, ASCE, 109, 1, 149-167.
- Hamdan, F.H., 1999. Near-Field Fluid-Structure Interaction Using Lagrangian Fluid Finite Elements, Computers and Structures, 71, 123-141.
- Hamdi, M.A., Ousset, Y. ve Verchery, G.A., 1978. Displacement Method for the Analysis of Vibrations of Coupled Fluid-Structure Interaction Systems, International Journal for Numerical Methods in Engineering, 13, 139-150.
- Hançer, E., 2001. Beton Ağırlık Barajların Stokastik ve Deterministik Dinamik Analizlerinin Karşılaştırmalı İncelenmesi, Yüksek Lisans Tezi, KTÜ Fen Bilimleri Enstitüsü, Trabzon.
- Idriss, I.M. ve Sun, J.I., 1992. SHAKE91: A Computer Program for Conducting Equivalent Linear Seismic Response Analyses of Horizontally Layered Soil Deposits, Department of Civil and Environmental Engineering, University of California, Davis.
- Lamb, H., 1932. Hydrodynamics, 6th Ed., Cambridge University Press, London.
- Leger, P. ve Boughoufalah, M., 1989. Earthquake Input Mechanisms for Time-Domain Analysis of Dam-Foundation Systems, Engineering Structures, 11, 37-46.
- Lotfi, V., Roesset, M.J. ve Tassoulas, J.L., 1987. A Technique for the Analysis of the Response of Dams to Earthquakes, Earthquake Engineering and Structural Dynamics, 15, 463-490.
- Lin, Y.K., 1967. Probabilistic Theory of Structural Dynamics, First Edition, Mc Graw Hill, Inc., New York.

- Manolis, G.D. ve Koliopoulos, P.K., 2001. Stochastic Structural Dynamics in Earthquake Engineering, Bookcraft Ltd., Bath., Great Britain.
- Marinilli, A. ve Cerrolaza, M., 1999. Computational Stochastic Analysis of Earth Structure Settlements, Computers and Geotechnics, 25, 107-121.
- Mays, J.R. ve Roehm, L.H., 1991. Hydrodynamic Pressure in a Dam-Reservoir System, Computers and Structures, 40, 2, 281-291.
- Mellah, R., Auvinet, G. ve Masrouri, F., 2000. Stochastic Finite Element Method Applied to Non-Linear Analysis of Embankments, Probabilistic Engineering Mechanics, 15, 251-259.
- Newland, D.E., 1975. An Introduction to Random Vibrations and Spectral Analysis, First Edition, Longman, Inc., New York.
- Novak, M. ve Suen, E., 1987. Dam-Foundation Interaction Under Spatially Correlated Random Ground Motion, Proceedings of the 3rd International Conference on Soil Dynamics and Earthquake Engineering, Developments in Geotechnical Engineering, 43: Soil-Structural Interaction, Elsevier, 25-39.
- Olson, L.G. ve Bathe, K-J., 1983. A Study of Displacement-Based Fluid Finite Elements for Calculating Frequencies of Fluid and Fluid-Structure Systems, Nuclear Engineering and Design, 76, 137-151.
- Paola M.D. ve Zingales, M., 2003. Stochastic Seismic Analysis of Hydrodynamic Pressure in Dam Reservoir Systems, Earthquake Engineering and Structural Dynamics, 32, 165-172.
- Priscu, R., Popovici, A., Stemiatu, D. ve Stere, C., 1985. Earthquake Engineering for Large Dams, Second Edition, Editura Academia, Bucuresti.
- Ramadan, O. ve Novak, M., 1993. Simulation of Spatially Incoherent Random Ground Motions, Journal of Engineering Mechanics, 19,5, 997-1015.
- Singhal, A.C., 1991. Comparison of Computer Codes for Seismic Analysis of Dams, Computers and Structures, 38, 1, 107-112.
- Soyluk, K. ve Dumanoglu, A.A., 2000. Comparison of Asynchronous and Stochastic Dynamic Responses of a Cable-Stayed Bridge, Engineering Structures, 22, 435-445.
- URL-1, <http://peer.berkeley.edu/smcat/data/ath/SFERN/PCD.AT2>, 11/03/2003.
- Vanmarcke, E.H., 1975. On the Distribution of the First-Passage Time for Normal Stationary Random Process, Journal of Applied Mechanics, 42, 215-219.
- Westergaard, H.M., 1933. Water Pressures on Dams During Earthquakes, Transactions, ASCE, 98, 1835, 418-433.

- Wilson, E.L. ve Khalvati, M., 1983. Finite Elements for the Dynamic Analysis of Fluid-Solid Systems, International Journal for Numerical Methods in Engineering, 19, 1657-1668.
- Yang, C.Y., 1986. Random Vibration of Structures, First Edition, John Wiley and Sons, Inc., New York.
- Zangar, C.N., 1952. Hydrodynamic Pressures on Dams Due to Earthquake Effects, Engineering Monograph 11, Bureau of Reclamation, Washington D.C.
- Zangar, C.N., 1953. Hydrodynamic Pressures on Dams Due to Horizontal Earthquakes, Proceedings of Society of Experimental Stress Analysis, 10, 93-102.
- Zienkiewicz, O.C. ve Bettess, P., 1978. Fluid-Structure Dynamic Interaction and Wave Forces. An Introduction to Numerical Treatment, International Journal for Numerical Methods in Engineering, 13, 1-16.
- Zingales, M., 2003. Seismically Induced Non-Stationary Hydrodynamic Pressure in a Dam-Reservoir System, Probabilistic Engineering Mechanics, 18, 151-163.

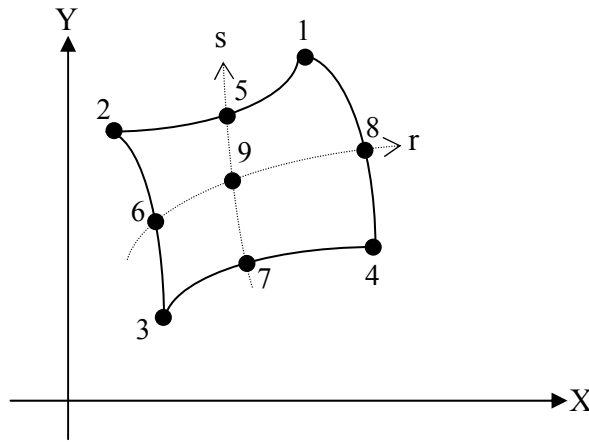
6. EKLER

EK 1. SONLU ELEMANLAR YÖNTEMİ KULLANILARAK SIVI ELEMANIN RİJİTLİK VE KÜTLE MATRİSİNİN HESAPLANMASI

Sonlu elemanlar yönteminin en önemli aşamalarından biri sonlu eleman matrislerinin oluşturulmasıdır. Bu çalışmada, sonlu eleman matrisleri izoparametrik sonlu eleman formülasyonu kullanılarak elde edilmektedir. İzoparametrik sonlu eleman formülasyonunda temel özellik, eleman koordinat ve yerdeğiştirmelerinin aynı şekil fonksiyonları kullanılarak elde edilmesidir. İzoparametrik formülasyonda genel (global) ve yerel (lokal) olmak üzere iki eksen takımı kullanılmaktadır. İki boyutlu durumda genel eksen takımı (x,y) Kartezyen eksen takımından, yerel eksen takımı (r,s) boyutsuz eksen takımından oluşmaktadır (Ek Şekil 1). Sonlu eleman düğüm noktası koordinatları genel eksen takımında aşağıdaki gibi yerel koordinatlar cinsinden ifade edilmektedir.

$$\begin{aligned} x &= \sum_{i=1}^q h_i x_i^e \\ y &= \sum_{i=1}^q h_i y_i^e \end{aligned} \quad (E.1)$$

Burada; x, y sonlu elemanın herhangi bir noktasındaki koordinatları; x_i, y_i $i=1,2,\dots,q$ ise q düğüm noktalı elemanın düğüm noktası koordinatlarını göstermektedir. h_i şekil fonksiyonları her bir değişkeni -1 ve +1 arasında değişen (r,s) yerel koordinat sisteminde tanımlanmaktadır. Eleman düğüm noktası sayısına bağlı olarak şekil fonksiyonlarının sayısı değişmektedir.



Ek Şekil 1. 9 düğüm noktalı izoparametrik sonlu eleman

Ek 1.'in devamı

9 nodlu iki boyutlu sonlu elemanın şekil fonksiyonları,

$$\begin{aligned}
 h_1 &= \frac{1}{4}(1+r)(1+s) - \frac{1}{2}h_5 - \frac{1}{2}h_8 - \frac{1}{4}h_9 \\
 h_2 &= \frac{1}{4}(1-r)(1+s) - \frac{1}{2}h_5 - \frac{1}{2}h_6 - \frac{1}{4}h_9 \\
 h_3 &= \frac{1}{4}(1-r)(1-s) - \frac{1}{2}h_6 - \frac{1}{2}h_7 - \frac{1}{4}h_9 \\
 h_4 &= \frac{1}{4}(1+r)(1-s) - \frac{1}{2}h_7 - \frac{1}{2}h_8 - \frac{1}{4}h_9 \\
 h_5 &= \frac{1}{2}(1-r^2)(1+s) - \frac{1}{2}h_9 \\
 h_6 &= \frac{1}{2}(1-s^2)(1-r) - \frac{1}{2}h_9 \\
 h_7 &= \frac{1}{2}(1-r^2)(1-s) - \frac{1}{2}h_9 \\
 h_8 &= \frac{1}{2}(1-s^2)(1+r) - \frac{1}{2}h_9 \\
 h_9 &= (1-r^2)(1-s^2)
 \end{aligned} \tag{E.2}$$

olarak ifade edilirler.

Sonlu elemanın herhangi bir noktasındaki yerdeğişirmeler,

$$\begin{aligned}
 U_x &= \sum_{i=1}^q h_i u_{xi}^e \\
 U_y &= \sum_{i=1}^q h_i u_{yi}^e
 \end{aligned} \tag{E.3}$$

şeklinde tanımlanabilir (Bathe, 1982). Burada u_{xi} ve u_{yi} , elemanın i düğüm noktasının x ve y eksenleri doğrultusundaki yerdeğiştirme bileşenleridir.

Şekil fonksiyonları, r ve s koordinatlarında tanımlandığından söz konusu fonksiyonların x ve y koordinatlarına göre türevlerini hesaplamak için zincir kuralı matris formunda uygulanırsa,

$$\begin{Bmatrix} \frac{\partial}{\partial r} \\ \frac{\partial}{\partial s} \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{\partial x}{\partial r} & \frac{\partial y}{\partial r} \\ \frac{\partial x}{\partial s} & \frac{\partial y}{\partial s} \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \frac{\partial}{\partial x} \\ \frac{\partial}{\partial y} \end{Bmatrix} = [J] \begin{Bmatrix} \frac{\partial}{\partial x} \\ \frac{\partial}{\partial y} \end{Bmatrix} \tag{E.4}$$

Ek 1.'in devamı

elde edilir. Burada J, Jacobien operatörünü göstermektedir. Jacobien operatörünün tersi aşağıdaki gibi yazılabilir.

$$[J]^{-1} = \frac{1}{\det[J]} \begin{bmatrix} J_{22} & -J_{12} \\ -J_{21} & J_{11} \end{bmatrix} \quad (E.5)$$

Gerekli türevler ve Jacobien operatörünün tersi alınarak aşağıdaki dönüşüm elde edilir.

$$\begin{Bmatrix} \frac{\partial}{\partial x} \\ \frac{\partial}{\partial y} \end{Bmatrix} = [J_{ij}]^{-1} \begin{Bmatrix} \frac{\partial}{\partial r} \\ \frac{\partial}{\partial s} \end{Bmatrix} \quad (E.6)$$

Sıvının iki boyutlu şekil değiştirme-yerdeğiştirme bağıntıları;

$$\begin{aligned} \varepsilon_v &= \frac{\partial U_x}{\partial x} + \frac{\partial U_y}{\partial y} \\ W_z &= \frac{1}{2} \left(\frac{\partial U_x}{\partial y} - \frac{\partial U_y}{\partial x} \right) \end{aligned} \quad (E.7)$$

Her eleman için matris formunda yazılırsa,

$$\{e^e\} = [B^e] \{U^e\} \quad (E.8)$$

Burada, $\{e^e\}$ sıvı elemanın şekil değiştirme vektörünü, $[B^e]$ sıvı elemanın şekil değiştirme-yerdeğiştirme matrisini, $\{U^e\}$ sıvı sistemin düğüm noktası yerdeğiştirme vektörünü göstermektedir.

$$\{e^e\}^T = \{\varepsilon_v^e \quad W_z^e\} \quad (E.9)$$

$$\{U^e\}^T = \left\{ \{U_x^e\}^T \quad \{U_y^e\}^T \right\} \quad (E.10)$$

şeklinde tanımlanmaktadır.

Eleman rijitlik matrisi,

$$[K_f^e] = \int_V [B^e]^T [C] [B^e] dV^e \quad (E.11)$$

Ek 1.'in devamı

ifadesi ile elde edilir. Burada $[C]$ malzeme özelliklerini içeren matristir ve aşağıdaki biçimde gösterilir.

$$[C] = \begin{bmatrix} \beta & 0 \\ 0 & \alpha_z \end{bmatrix} \quad (E.12)$$

Eleman rijitlik matrisi doğal koordinatlarda aşağıdaki şekilde tanımlanabilir:

$$[K_f^e] = \int_{-1}^{+1} \int_{-1}^{+1} t^e [B^e]^T [C] [B^e] \det[J] dr ds \quad (E.13)$$

t^e eleman kalınlığını, W_i, W_j ağırlık çarpanlarını göstermek üzere Gauss integrasyon tekniği kullanılarak rijitlik matrisi aşağıdaki şekilde hesaplanabilir:

$$[K_f^e] = \sum_i \sum_j W_i W_j t_{ij}^e [B_{ij}^e]^T [C] [B_{ij}^e] \det J_{ij} \quad (E.14)$$

9 nodlu sıvı elemanın kütle matrisi de benzer şekilde hesaplanmaktadır. $[H]$ şekil fonksiyonları matrisini göstermek üzere;

$$\begin{Bmatrix} U_x \\ U_y \end{Bmatrix} = [H] \{U^e\} \quad (E.15)$$

Düğüm noktası uyumlu kütle matrisi,

$$[M_f^e] = \rho \int_V [H]^T [H] dV^e \quad (E.16)$$

ifadeleri ile yazılabilir. Gauss sayısal integrasyon tekniği kullanılarak kütle matrisi aşağıdaki şekilde hesaplanabilir:

$$[M_f^e] = \rho \sum_i \sum_j W_i W_j t_{ij}^e [H_{ij}]^T [H_{ij}] \det J_{ij} \quad (E.17)$$

Burada ρ , sıvının kütle yoğunluğunu göstermektedir.

ÖZGEÇMİŞ

Ebru Köseoğlu, 1976 yılında Trabzon’da doğdu. Lise öğrenimini 1994 yılında Trabzon Anadolu Lisesi’nde tamamladı. 1995 yılında girdiği Karadeniz Teknik Üniversitesi İnşaat Mühendisliği bölümünden 1999 yılında mezun oldu. 1999’da Karadeniz Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı’nda yüksek lisans öğrenimine başladı. Aralık 1999’da Fen Bilimleri Enstitüsü 50/d kadrosuna araştırma görevlisi olarak atandı. 2001 yılında “Beton Ağırlık Barajların Stokastik ve Deterministik Dinamik Analizlerinin Karşılaştırmalı İncelenmesi” isimli teziyle yüksek lisans eğitimini tamamlayan Köseoğlu, aynı yıl doktora giriş sınavını kazanarak doktora eğitimine başladı. Şubat 2006’da naklen geçiş yaparak Bayındırlık ve İskan Bakanlığı Yapı İşleri Genel Müdürlüğü’ne Mühendis olarak atandı. İyi derecede İngilizce bilen Köseoğlu evli ve bir çocuk annesidir.