

**KARADENİZ TEKNİK ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

İNŞAAT MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI

**ÖN YÜZÜ BETON KAPLI KAYA DOLGU BARAJLARIN
GÜVENİLİRLİK ANALİZİ**

DOKTORA TEZİ

İnş. Yük. Müh. Murat Emre KARTAL

**HAZİRAN 2010
TRABZON**

KARADENİZ TEKNİK ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

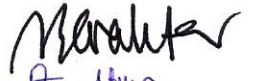
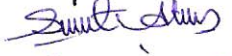

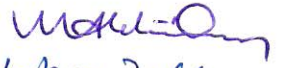

İNŞAAT MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI

ÖN YÜZÜ BETON KAPLI KAYA DOLGU BARAJLARIN
GÜVENİLİRLİK ANALİZİ

İnş. Yük. Müh. Murat Emre KARTAL

Karadeniz Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsünde
“Doktor (İnşaat Mühendisliği)”
Unvanı Verilmesi İçin Kabul Edilen Tezdir.

Tezin Enstitüye Verildiği Tarih : 11.05.2010
Tezin Savunma Tarihi : 04.06.2010

Tez Danışmanı : Prof. Dr. Alemdar BAYRAKTAR 
Jüri Üyesi : Yrd. Doç. Dr. Şevket ATEŞ 
Jüri Üyesi : Doç. Dr. Levent GÜMÜŞEL 
Jüri Üyesi : Yrd. Doç. Dr. Mehmet AKKÖSE 
Jüri Üyesi : Prof. Dr. Mehmet ÜLKER 

Enstitü Müdürü : Prof. Dr. Salih TERZİOĞLU

Trabzon 2010

ÖNSÖZ

Bu çalışma Karadeniz Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı'nda Doktora tezi olarak hazırlanmıştır.

Geometri, malzeme ve arayüzey sınır şartları bakımından lineer olmayan davranış dikkate alınarak ön yüzü beton kaplı kaya dolgu barajların güvenilirliğinin etkisinin incelendiği bu tez çalışmasını, bana öneren ve çalışmanın her aşamasında gerek bilgi ve tecrübelerini gerekse maddi ve manevi desteğini benden esirgemeyen, önerileriyle ufku açan, idari görevlerindeki yoğunluğa rağmen değerli zamanını bana ayıran danışmanım ve saygıdeğer hocam Prof. Dr. Alemdar BAYRAKTAR'a teşekkürlerimi bir borç bilirim.

Çalışma süresince değerli görüş ve bilgilerini benimle paylaşan ve çalışmayı inceleyen değerli hocalarım, Yrd. Doç. Dr. Şevket ATEŞ'e ve Doç. Dr. Levent GÜMÜŞEL'e teşekkür ederim. Ayrıca, tezimi inceleme zahmetine katlanan ve tavsiyelerini benimle paylaşan sayın Prof. Dr. Mehmet ÜLKER'e ve Yrd. Doç. Dr. Mehmet AKKÖSE'ye teşekkürü bir borç bilirim.

Çalışma süresince her ihtiyaç duyduğumda yanımda olan ve desteğini bir an olsun esirgemeyen kıymetli arkadaşım Dr. Hasan Basri BAŞAĞA'ya teşekkür ederim.

Bilgi ve tecrübelerini hiçbir zaman esirgemeyen değerli hocalarım, Yrd. Doç. Dr. Süleyman ADANUR ve Yrd. Doç. Dr. Kemal HACIEFENDİOĞLU'na teşekkür ederim. Çalışmalarım sırasında desteklerini esirgemeyen değerli arkadaşlarım Arş. Gör. Temel TÜRKER, Arş. Gör. Ahmet Can ALTUNIŞIK ve Arş. Gör. Dr. Barış SEVİM'e teşekkür ederim.

Tez çalışmam sırasında manevi desteğini benden esirgemeyen yakın dostum Öner YANIK'a teşekkür ederim.

Bugünlere gelmemde emeği olan, hoşgörüsünü benden esirgemeyen ve haklarını ödeyemeyeceğim annem Rukiye KARTAL ve babam Enver KARTAL'a şükranlarımı sunarım. Ayrıca çalışmalarım sırasında sevgisini ve desteğini benden esirgemeyen kardeşim Nagihan KARTAL ve kuzenim Hakan YILMAZ'a da teşekkür ederim.

Bu çalışmanın bundan sonra gerçekleştirilecek çalışmalara öncülük etmesini ve Ülkemize faydalı olmasını temenni ederim.

Murat Emre KARTAL
Trabzon 2010

İÇİNDEKİLER

	<u>Sayfa No</u>
ÖNSÖZ	II
İÇİNDEKİLER.....	III
ÖZET	VI
SUMMARY	VII
ŞEKİLLER DİZİNİ	VIII
TABLolar DİZİNİ.....	XIII
SEMBOLLER DİZİNİ	XVII
1. GENEL BİLGİLER.....	1
1.1. Giriş	1
1.2. Ön Yüzü Beton Kaplı Kaya Dolgu Barajlar ile İlgili Bazı Çalışmalar	2
1.3. Barajların Güvenilirlik Analizi ile İlgili Bazı Çalışmalar	7
1.4. Çalışmanın Amacı ve Kapsamı	11
1.5. Ön Yüzü Beton Kaplı Kaya Dolgu Barajların Sayısal Modellemesi ile İlgili Formülasyonlar	12
1.5.1. Sıvı-Yapı-Zemin Etkileşim Sistemleri	12
1.5.1.1. Sıvı Sistemlerinin Lagrange Yaklaşımına Dayalı Sonlu Eleman Formülasyonu	13
1.5.1.2. Sıvı-Yapı-Zemin Etkileşim Sistemlerinin Sonlu Eleman Formülasyonu....	17
1.5.2. Malzeme Bakımından Lineer Olmayan Davranış Formülasyonu	18
1.5.2.1. Pekleşme Modelleri	18
1.5.2.1.1. Temel Tanımlar	19
1.5.2.1.2. Karma Çift Yönlü Pekleşme Modeli	20
1.5.2.1.3. Karma Çok Yönlü Pekleşme Modeli.....	23
1.5.2.1.4. Drucker-Prager Malzeme Modeli	24
1.5.3. Geometri Bakımından Lineer Olmayan Davranış	26
1.5.4. Temas Problemleri.....	27
1.6. Güvenilirlik Analiz Formülasyonu.....	29
1.6.1. Güvenilirlik Analizinde Temel Kavramlar.....	29
1.6.1.1. Lognormal Dağılım	29
1.6.1.2. Limit Durum	30

1.6.1.3.	Göçme Olasılığı.....	30
1.6.2.	Güvenilirlik Analiz Yöntemleri.....	34
1.6.2.1.	Açık Limit Durum Fonksiyonu ile Güvenilirlik Analizi.....	35
1.6.2.1.1.	Birinci Derece Güvenilirlik Yöntemi.....	35
1.6.2.1.2.	Geliştirilmiş Rackwitz-Fiessler Yöntemiyle Güvenilirlik Analizi.....	37
1.6.2.1.3.	Monte Carlo Yöntemi.....	39
1.6.2.2.	Kapalı Limit Durum Fonksiyonu ile Güvenilirlik Analizi.....	40
1.6.2.2.1.	Direkt Birleştirme Yöntemi.....	41
1.6.2.2.2.	Yanıt Yüzeyi Yöntemi.....	42
2.	YAPILAN ÇALIŞMALAR.....	46
2.1.	Ön Yüzü Beton Kaplı Kaya Dolgu Barajların Modellenmesi.....	46
2.1.1.	Torul Barajı.....	47
2.1.1.1.	Sonlu Eleman Modeli.....	48
2.1.1.2.	Malzeme Özellikleri.....	51
2.1.2.	Kaya Dolgu ve Kaya Zeminin Lineer Olmayan Davranışı.....	51
2.1.3.	Beton Yüz Plak Kalınlığı.....	55
2.1.4.	Sayısal Uygulamalarda Dikkate Alınan Durumlar.....	56
2.1.5.	Yapısal Birleşimler.....	57
2.1.5.1.	Birleşim Yüzeyleri.....	57
2.1.5.2.	Temas Elemanlar.....	59
2.1.5.3.	Pinball Bölgesi.....	61
2.2.	Yer Hareketi Modeli.....	62
2.2.1.	Yerel Zemin Şartlarının Yer Hareketine Etkisi.....	62
2.2.2.	İndirgenmiş Deprem Kaydının Elde Edilmesi.....	63
2.3.	Güvenilirlik Analizlerinde Kullanılan Algoritmalar.....	65
2.4.	Ön Yüzü Beton Kaplı Kaya Dolgu Barajların Güvenilirlik Analizinde Kullanılan Limit Durum Fonksiyonları.....	69
2.5.	Ön Yüzü Beton Kaplı Kaya Dolgu Barajların Güvenilirlik Analizinde Kullanılan Değişken Parametreler.....	71
2.6.	Güvenilirlik Analizlerinde Kullanılan Yöntemler İçin Karşılaştırmalar.....	73
3.	BULGULAR VE İRDELEMELER.....	75
3.1.	Ön Yüzü Beton Kaplı Kaya Dolgu Barajların Deprem Analizi.....	75
3.1.1.	Yerdeğiştirmeler.....	75

3.1.1.1.	Birleşik Modellenmiş Sistemlerde Yerdeğiştirmeler	75
3.1.1.2.	Sürtünme Tanımlanan Sistemlerde Yerdeğiştirmeler.....	83
3.1.2.	Gerilmeler.....	97
3.1.2.1.	Beton Plakta Oluşan Asal Gerilmeler.....	97
3.1.2.1.1.	Birleşik Modellenmiş Sistemlerde Beton Plakta Oluşan Asal Gerilmeler..	97
3.1.2.1.2.	Sürtünme Tanımlanan Sistemlerde Beton Plakta Oluşan Asal Gerilmeler	105
3.2.	Ön Yüzü Beton Kaplı Kaya Dolgu Barajların Güvenilirlik Analizi	113
3.2.1.	Statik Yüklere Maruz Ön Yüzü Beton Kaplı Kaya Dolgu Barajların Güvenilirlik Analizi.....	113
3.2.1.1.	Birleşik Modellenmiş Sistemlerin Statik Yükler Altında Güvenilirlik Analizi	113
3.2.1.2.	Sürtünme Tanımlanan Sistemlerin Statik Yükler Altında Güvenilirlik Analizi	122
3.2.2.	Depreme Maruz Ön Yüzü Beton Kaplı Kaya Dolgu Barajların Güvenilirlik Analizi.....	130
3.2.2.1.	Birleşik Modellenmiş Sistemlerin Deprem Yüğü Altında Güvenilirlik Analizi	131
3.2.2.2.	Sürtünme Tanımlanan Sistemlerin Deprem Yüğü Altında Güvenilirlik Analizi	134
4.	SONUÇLAR VE ÖNERİLER	138
5.	KAYNAKLAR.....	142
ÖZGEÇMİŞ		

ÖZET

Bu tez çalışmasında, baraj-temel-rezervuar etkileşimi dikkate alınarak ön yüzü beton kaplı kaya dolgu barajların statik ve deprem etkileri altında güvenilirlik analizleri gerçekleştirilmiştir. Rezervuar suyunun baraj üzerindeki etkileri Lagrange yaklaşımına dayalı sıvı sonlu elemanlarla dikkate alınmıştır. Barajdaki çeşitli birleşim bölgeleri birleşik ve sürtünmeli olarak modellenmiştir. Sürtünmeli birleşimlerde Coulomb sürtünme yasasını dikkate alan bir boyutlu yüzey-yüzey temas elemanlar kullanılmıştır. Deprem etkisi için zemin tabanına indirgenmiş ivme kaydı dikkate alınmıştır. Yansıtmayan sınır şartları viskoz sönümleyiciler ile tanımlanmıştır. Malzeme bakımından lineer olmayan davranış için, betonda Drucker-Prager, kaya dolguda çok yönlü kinematik pekleşme modeli kullanılmıştır. Geometri bakımından lineer olmayan davranış da dikkate alınmıştır.

Ön yüzü beton kaplı kaya dolgu barajın güvenilirlik analizlerinde FERUM güvenilirlik analiz programı, ANSYS sonlu elemanlar programı ile birleştirilmiştir. İki program arasında kurulan bağlantı ile kapalı limit durum fonksiyonlarının çözümü için gerekli değerler elde edilmiştir. Güvenilirlik analizlerinde Geliştirilmiş Rackwitz-Fiessler Yöntemi, statik yüklere maruz baraj için Direkt Birleştirme Yöntemi ve Yanıt Yüzeyi Yöntemiyle, depreme maruz baraj için de Yanıt Yüzeyi Yöntemi ile kullanılmıştır. Çalışmada, beton plak üzerinde seçilen kritik noktaların göçme olasılıkları hesaplanmıştır.

Bu tez çalışması, dört bölümden oluşmaktadır. Birinci bölümde literatür araştırması, kullanılan yöntemler ve ilgili formülasyonlar verilmiştir. İkinci bölümde, çalışmada kullanılan ön yüzü beton kaplı kaya dolgu barajın sayısal modeli verilmiş ve güvenilirlik analizinde kullanılan algoritmalar açıklanmıştır. Üçüncü bölümde önce depreme maruz barajın davranışı irdelenmiş, ardından barajın statik ve deprem yükleri için güvenilirliği araştırılmıştır. Son bölümde, rezervuar suyunun dikkate alınmasıyla beton plağın güvenilirliğinin azaldığı ve birleşim bölgelerinde sürtünmenin dikkate alınmasıyla beton plağın güvenilirliğinin arttığı sonucu çıkartılmış olup ileri ki çalışmalar için de öneriler sunulmuştur. Bu bölümü kaynakların yer aldığı bölüm takip etmektedir.

Anahtar Kelimeler : Baraj-temel-rezervuar etkileşimi, Drucker-Prager modeli, Göçme olasılığı, Güvenilirlik analizi, Çok yönlü kinematik pekleşme modeli, Lagrange yaklaşımı, Lineer olmayan davranış, Ön yüzü beton kaplı kaya dolgu baraj, Sürtünmeli birleşim, Temas eleman.

SUMMARY

Reliability Analysis of Concrete-Faced Rockfill Dams

In this thesis, reliability analyses of concrete-faced rockfill dams under static and earthquake are performed considering dam-foundation-reservoir interaction. The effect of reservoir water on dam is considered using fluid finite elements based on the Lagrangian approach. Welded and friction contact are considered in various joints. One dimensional surface-to-surface contact elements obeying Coulomb's friction law are used for frictional contacts. Earthquake response of the dam to deconvolved ground acceleration record is obtained. Non-reflecting boundary conditions are defined by viscous dampers. Drucker-Prager model is used for concrete and multi-linear kinematic hardening model is used for rockfill in the materially nonlinear analyses. Geometrically nonlinearity is also considered.

FERUM, reliability analysis program, is combined with ANSYS finite element program in the reliability analysis of concrete-faced rockfill dam. The needed values used in the implicit limit state function are obtained by the established connection between these programs. Improved Rackwitz-Fiessler Method is used with Direct Coupled Method and Response Surface Method in the reliability analysis of the dam under static loads and used with Response Surface Method in the reliability analysis of the dam to earthquake. The probability of failure is computed for the selected critical points in the concrete slab.

This thesis is composed of four chapters. In the first chapter, literature researches, used methods and formulations are given. In the second chapter, numerical model of the concrete-faced rockfill dam is given and the reliability analysis algorithm is explained. In the third chapter, initially, earthquake response of the dam is examined and then reliability of the dam under static and earthquake loads is studied. In the last chapter, it is deduced from the study that reservoir water decreases the reliability of the concrete slab and to consider friction in the joints increases the reliability of the concrete slab and in addition to this the proposals for further studies are given. This chapter is followed by the references.

Key Words : Dam-foundation-reservoir interaction, Drucker-Prager model, Probability of failure, Reliability analysis, Multi-linear kinematic hardening model, Lagrangian approach, Nonlinear response, Concrete-faced rockfill dam, Frictional contact, Contact elements.

ŞEKİLLER DİZİNİ

	<u>Sayfa No</u>
Şekil 1. Akma gerilmesi ve eşdeğer plastik şekildeğiştirme ilişkisi a) çift yönlü pekleşme durumu b) çok yönlü pekleşme durumu (Allen ve Wilson, 2004)....	21
Şekil 2. Coulomb, Drucker-Prager ve von Mises kırılma kriterleri (Chen ve Mizuno, 1990).....	26
Şekil 3. Coulomb sürtünme yasasına göre temas durumunda kayma davranışı (ANSYS, 2009)	28
Şekil 4. Lognormal dağılımına sahip bir değişkenin olasılık yoğunluk fonksiyonu	30
Şekil 5. Rastgele dağılım gösteren Q ve R için göçme olasılığı (Ranganathan, 2000) ..	32
Şekil 6. Güvenilirliğin belirlenmesi (Ranganathan, 2000)	32
Şekil 7. Lineer güvenilirlik indeksinin geometrik olarak gösterimi (Thoft-Christensen ve Murotsu, 1986; Nowak ve Collins, 2000).....	36
Şekil 8. Lineer olmayan güvenilirlik indeksi (Hasofer ve Lind, 1974)	36
Şekil 9. Direkt Birleştirme Yönteminin şematik olarak gösterimi (Başağa, 2009)	42
Şekil 10. Yanıt Yüzeyi Yönteminin şematik olarak gösterimi (Başağa, 2009).....	42
Şekil 11. Örneklemeye yöntemleri (Başağa, 2009).....	43
Şekil 12. Torul Barajının en büyük iki boyutlu kesiti (DSİ, 2009)	47
Şekil 13. Torul Barajının görünüşleri (DSİ, 2009)	47
Şekil 14. Torul barajı iki boyutlu sonlu eleman modeli	49
Şekil 15. Topuk plağı sonlu eleman modeli	49
Şekil 16. Sıvı-yapı arayüzey şartının uygulanışı	50
Şekil 17. Kaya zeminler için tanımlanan kayma şekildeğiştirmesine bağlı normalleştirilmiş kayma modülü ve sönüm oranı eğrileri (Schnabel vd., 1972).....	53
Şekil 18. Rollins vd. (1998) tarafından çakıllı zeminler için üretilen kayma şekildeğiştirmesine bağlı normalleştirilmiş kayma modülü ve sönüm oranı eğrileri.....	53
Şekil 19. Kaya dolgu için çok yönlü kinematik pekleşme eğrileri	54
Şekil 20. Zemin tabakaları için çok yönlü kinematik pekleşme eğrileri	55
Şekil 21. Beton plak-kaya dolgu birleşimi ve arayüzey şartları	58
Şekil 22. Torul Barajı beton plak-topuk plağı birleşim detayı (DSİ, 2009)	59
Şekil 23. Gauss noktalarında temas algılama işlemi.....	60
Şekil 24. İki boyutlu durumda Pinball bölgesi	61
Şekil 25. n adet tabakadan oluşan bir boyutlu zemin sistemi	62

Şekil 26.	Erzincan depremi kuzey-güney bileşeni ivme kaydı (URL-2, 2010).....	64
Şekil 27.	Serbest yüzey deprem ivmesinin zemin tabanına indirgenmesi.....	64
Şekil 28.	Zemin tabanına indirgenmiş Erzincan depremi ivme kaydı.....	64
Şekil 29.	FERUM programı çalışma şeması.....	65
Şekil 30.	Direkt Birleştirme Yöntemi ile Geliştirilmiş Rackwitz-Fiessler Yöntemi akış şeması.....	67
Şekil 31.	Direkt Birleştirme Yöntemi ile Monte Carlo Yöntemi akış şeması	68
Şekil 32.	Yanıt Yüzeyi Yöntemi ile Geliştirilmiş Rackwitz-Fiessler Yöntemi akış şeması	69
Şekil 33.	Birleşik modellenmiş sistemlerde rezervuarın boş halinde Durum 2’de beton plakta menba yönünde oluşan en büyük yatay yerdeğiştirmeler.....	77
Şekil 34.	Birleşik modellenmiş sistemlerde rezervuarın boş halinde Durum 2’de beton plakta mansap yönünde oluşan en büyük yatay yerdeğiştirmeler	77
Şekil 35.	Birleşik modellenmiş sistemlerde rezervuarın boş halinde Durum 3’te beton plakta menba yönünde oluşan maksimum yatay yerdeğiştirmeler	78
Şekil 36.	Birleşik modellenmiş sistemlerde rezervuarın boş halinde Durum 3’te beton plakta mansap yönünde oluşan en büyük yatay yerdeğiştirmeler	78
Şekil 37.	Birleşik modellenmiş sistemlerde rezervuarın boş halinde Durum 4’te beton plakta menba yönünde oluşan en büyük yatay yerdeğiştirmeler.....	79
Şekil 38.	Birleşik modellenmiş sistemlerde rezervuarın boş halinde Durum 4’te beton plakta mansap yönünde oluşan en büyük yatay yerdeğiştirmeler	79
Şekil 39.	Birleşik modellenmiş sistemlerde rezervuarın dolu halinde Durum 2’de beton plakta menba yönünde oluşan en büyük yatay yerdeğiştirmeler.....	80
Şekil 40.	Birleşik modellenmiş sistemlerde rezervuarın dolu halinde Durum 2’de beton plakta mansap yönünde oluşan en büyük yatay yerdeğiştirmeler	80
Şekil 41.	Birleşik modellenmiş sistemlerde rezervuarın dolu halinde Durum 3’te beton plakta menba yönünde oluşan en büyük yatay yerdeğiştirmeler.....	81
Şekil 42.	Birleşik modellenmiş sistemlerde rezervuarın dolu halinde Durum 3’te beton plakta mansap yönünde oluşan en büyük yatay yerdeğiştirmeler	81
Şekil 43.	Birleşik modellenmiş sistemlerde rezervuarın dolu halinde Durum 4’te beton plakta menba yönünde oluşan en büyük yatay yerdeğiştirmeler.....	82
Şekil 44.	Birleşik modellenmiş sistemlerde rezervuarın dolu halinde Durum 4’te beton plakta mansap yönünde oluşan en büyük yatay yerdeğiştirmeler	82
Şekil 45.	Sürtünme tanımlanan sistemlerde rezervuarın boş halinde Durum 2’de beton plakta menba yönünde oluşan en büyük yatay yerdeğiştirmeler.....	84
Şekil 46.	Sürtünme tanımlanan sistemlerde rezervuarın boş halinde Durum 2’de beton plakta mansap yönünde oluşan en büyük yatay yerdeğiştirmeler	85
Şekil 47.	Sürtünme tanımlanan sistemlerde rezervuarın boş halinde Durum 3’te beton plakta menba yönünde oluşan en büyük yatay yerdeğiştirmeler.....	85

Şekil 48.	Sürtünme tanımlanan sistemlerde rezervuarın boş halinde Durum 4'te beton plakta menba yönünde oluşan en büyük yatay yerdeğiştirmeler	86
Şekil 49.	Sürtünme tanımlanan sistemlerde rezervuarın dolu halinde Durum 2'de beton plakta menba yönünde oluşan en büyük yatay yerdeğiştirmeler	86
Şekil 50.	Sürtünme tanımlanan sistemlerde rezervuarın dolu halinde Durum 2'de beton plakta mansap yönünde oluşan en büyük yatay yerdeğiştirmeler	87
Şekil 51.	Sürtünme tanımlanan sistemlerde rezervuarın dolu halinde Durum 3'te beton plakta menba yönünde oluşan en büyük yatay yerdeğiştirmeler	87
Şekil 52.	Sürtünme tanımlanan sistemlerde rezervuarın dolu halinde Durum 4'te beton plakta menba yönünde oluşan en büyük yatay yerdeğiştirmeler	88
Şekil 53.	70cm'lik plak taban kalınlığı için sürtünme tanımlanan sistemlerde rezervuarın boş halinde Durum 2'de krette beton plak ve kaya dolgunun düşey yerdeğiştirmelerinin zamanla değişimi	89
Şekil 54.	70cm'lik plak taban kalınlığı için sürtünme tanımlanan sistemlerde rezervuarın boş halinde Durum 3'te krette beton plak ve kaya dolgunun düşey yerdeğiştirmelerinin zamanla değişimi	90
Şekil 55.	70cm'lik plak taban kalınlığı için sürtünme tanımlanan sistemlerde rezervuarın boş halinde Durum 4'te krette beton plak ve kaya dolgunun düşey yerdeğiştirmelerinin zamanla değişimi	90
Şekil 56.	70cm'lik plak taban kalınlığı için sürtünme tanımlanan sistemlerde rezervuarın dolu halinde Durum 2'de krette beton plak ve kaya dolgunun düşey yerdeğiştirmelerinin zamanla değişimi	91
Şekil 57.	70cm'lik plak taban kalınlığı için sürtünme tanımlanan sistemlerde rezervuarın dolu halinde Durum 3'te krette beton plak ve kaya dolgunun düşey yerdeğiştirmelerinin zamanla değişimi	91
Şekil 58.	70cm'lik plak taban kalınlığı için sürtünme tanımlanan sistemlerde rezervuarın dolu halinde Durum 4'te krette beton plak ve kaya dolgunun düşey yerdeğiştirmelerinin zamanla değişimi	92
Şekil 59.	Beton plak-kaya dolgu arayüzeyinin depremin 2.195 saniyesinde yerdeğiştirmiş hali	92
Şekil 60.	70cm'lik plak taban kalınlığı için sürtünme tanımlanan sistemlerde rezervuarın boş halinde Durum 2'de baraj tabanında kaya dolgu ve temelin yatay yerdeğiştirmelerinin zamanla değişimi	94
Şekil 61.	70cm'lik plak taban kalınlığı için sürtünme tanımlanan sistemlerde rezervuarın boş halinde Durum 3'te baraj tabanında kaya dolgu ve temelin yatay yerdeğiştirmelerinin zamanla değişimi	94
Şekil 62.	70cm'lik plak taban kalınlığı için sürtünme tanımlanan sistemlerde rezervuarın boş halinde Durum 4'te baraj tabanında kaya dolgu ve temelin yatay yerdeğiştirmelerinin zamanla değişimi	95
Şekil 63.	70cm'lik plak taban kalınlığı için sürtünme tanımlanan sistemlerde rezervuarın dolu halinde Durum 2'de baraj tabanında kaya dolgu ve temelin yatay yerdeğiştirmelerinin zamanla değişimi	95

Şekil 64.	70cm'lik plak taban kalınlığı için sürtünme tanımlanan sistemlerde rezervuarın dolu halinde Durum 3'te baraj tabanında kaya dolgu ve temelin yatay yerdeğiştirmelerinin zamanla değişimi	96
Şekil 65.	70cm'lik plak taban kalınlığı için sürtünme tanımlanan sistemlerde rezervuarın dolu halinde Durum 4'te baraj tabanında kaya dolgu ve temelin yatay yerdeğiştirmelerinin zamanla değişimi	96
Şekil 66.	Beton plak-topuk plağı birleşim bölgesinin depremin 4.67 saniyesinde yerdeğiştirmiş hali	97
Şekil 67.	Birleşik modellenmiş sistemlerde rezervuarın boş halinde Durum 2'de beton plakta oluşan en büyük asal basınç gerilmeleri	99
Şekil 68.	Birleşik modellenmiş sistemlerde rezervuarın boş halinde Durum 2'de beton plakta oluşan en büyük asal çekme gerilmeleri	99
Şekil 69.	Birleşik modellenmiş sistemlerde rezervuarın boş halinde Durum 3'te beton plakta oluşan en büyük asal basınç gerilmeleri	100
Şekil 70.	Birleşik modellenmiş sistemlerde rezervuarın boş halinde Durum 3'te beton plakta oluşan en büyük asal çekme gerilmeleri	100
Şekil 71.	Birleşik modellenmiş sistemlerde rezervuarın boş halinde Durum 4'te beton plakta oluşan en büyük asal basınç gerilmeleri	101
Şekil 72.	Birleşik modellenmiş sistemlerde rezervuarın boş halinde Durum 4'te beton plakta oluşan en büyük asal çekme gerilmeleri	101
Şekil 73.	Birleşik modellenmiş sistemlerde rezervuarın dolu halinde Durum 2'de beton plakta oluşan en büyük asal basınç gerilmeleri	102
Şekil 74.	Birleşik modellenmiş sistemlerde rezervuarın dolu halinde Durum 2'de beton plakta oluşan en büyük asal çekme gerilmeleri	102
Şekil 75.	Birleşik modellenmiş sistemlerde rezervuarın dolu halinde Durum 3'te beton plakta oluşan en büyük asal basınç gerilmeleri	103
Şekil 76.	Birleşik modellenmiş sistemlerde rezervuarın dolu halinde Durum 3'te beton plakta oluşan en büyük asal çekme gerilmeleri	103
Şekil 77.	Birleşik modellenmiş sistemlerde rezervuarın dolu halinde Durum 4'te beton plakta oluşan en büyük asal basınç gerilmeleri	104
Şekil 78.	Birleşik modellenmiş sistemlerde rezervuarın dolu halinde Durum 4'te beton plakta oluşan en büyük asal çekme gerilmeleri	104
Şekil 79.	Sürtünme tanımlanan sistemlerde rezervuarın boş halinde Durum 2'de beton plakta oluşan en büyük asal basınç gerilmeleri	107
Şekil 80.	Sürtünme tanımlanan sistemlerde rezervuarın boş halinde Durum 2'de beton plakta oluşan en büyük asal çekme gerilmeleri	107
Şekil 81.	Sürtünme tanımlanan sistemlerde rezervuarın boş halinde Durum 3'te beton plakta oluşan en büyük asal basınç gerilmeleri	108
Şekil 82.	Sürtünme tanımlanan sistemlerde rezervuarın boş halinde Durum 3'te beton plakta oluşan en büyük asal çekme gerilmeleri	108

Şekil 83.	Sürtünme tanımlanan sistemlerde rezervuarın boş halinde Durum 4'te beton plakta oluşan en büyük asal basınç gerilmeleri	109
Şekil 84.	Sürtünme tanımlanan sistemlerde rezervuarın boş halinde Durum 4'te beton plakta oluşan en büyük asal çekme gerilmeleri	109
Şekil 85.	Sürtünme tanımlanan sistemlerde rezervuarın dolu halinde Durum 2'de beton plakta oluşan en büyük asal basınç gerilmeleri	110
Şekil 86.	Sürtünme tanımlanan sistemlerde rezervuarın dolu halinde Durum 2'de beton plakta oluşan en büyük asal çekme gerilmeleri	110
Şekil 87.	Sürtünme tanımlanan sistemlerde rezervuarın dolu halinde Durum 3'te beton plakta oluşan en büyük asal basınç gerilmeleri	111
Şekil 88.	Sürtünme tanımlanan sistemlerde rezervuarın dolu halinde Durum 3'te beton plakta oluşan en büyük asal çekme gerilmeleri	111
Şekil 89.	Sürtünme tanımlanan sistemlerde rezervuarın dolu halinde Durum 4'te beton plakta oluşan en büyük asal basınç gerilmeleri	112
Şekil 90.	Sürtünme tanımlanan sistemlerde rezervuarın dolu halinde Durum 4'te beton plakta oluşan en büyük asal çekme gerilmeleri	112

TABLULAR DİZİNİ

	<u>Sayfa No</u>
Tablo 1. Yapılar için limit durum çeşitleri (Melchers, 1999).....	30
Tablo 2. İki boyutlu baraj-temel-rezervuar etkileşim sisteminin sonlu eleman ve düğüm noktası sayıları.....	50
Tablo 3. Malzeme özellikleri	51
Tablo 4. ÖYBKKD barajlarda kullanılan çeşitlik plak kalınlık fonksiyonları (URL-1, 2008)	56
Tablo 5. Çin'deki ÖYBKKD barajlarda kullanılan plak kalınlık fonksiyonları (Qian, 2005).....	56
Tablo 6. Sayısal çözüm durumları	57
Tablo 7. FERUM programında kullanılan başlıca dosyalar	66
Tablo 8. Statik analizlerde dikkate alınan değişken parametrelerin ortalama ve COV değerleri	71
Tablo 9. Dinamik analizlerde dikkate alınan değişken parametrelerin ortalama ve COV değerleri	72
Tablo 10. Geliştirilmiş Rackwitz-Fiessler Yöntemi (Direkt Birleştirme Yöntemi ile)-Monte Carlo Yöntemi ve Geliştirilmiş Rackwitz-Fiessler Yöntemi (Yanıt Yüzeyi Yöntemi ile)-Monte Carlo Yöntemi için karşılaştırmalar	74
Tablo 11. Birleşik modellenmiş sistemde 70cm'lik plak taban kalınlığı için rezervuarın boş halinde Durum 1'de beton plağın güvenilirlik analiz sonuçları	115
Tablo 12. Birleşik modellenmiş sistemde 70cm'lik plak taban kalınlığı için rezervuarın boş halinde Durum 2'de beton plağın güvenilirlik analiz sonuçları	116
Tablo 13. Birleşik modellenmiş sistemde 70cm'lik plak taban kalınlığı için rezervuarın boş halinde Durum 3'te beton plağın güvenilirlik analiz sonuçları	116
Tablo 14. Birleşik modellenmiş sistemde 70cm'lik plak taban kalınlığı için rezervuarın boş halinde Durum 4'te beton plağın güvenilirlik analiz sonuçları	117
Tablo 15. Birleşik modellenmiş sistemde 70cm'lik plak taban kalınlığı için rezervuarın dolu halinde Durum 1'de beton plağın güvenilirlik analiz sonuçları	117
Tablo 16. Birleşik modellenmiş sistemde 70cm'lik plak taban kalınlığı için rezervuarın dolu halinde Durum 2'de beton plağın güvenilirlik analiz sonuçları	118

Tablo 17. Birleşik modellenmiş sistemde 70cm'lik plak taban kalınlığı için rezervuarın dolu halinde Durum 3'te beton plağın güvenilirlik analiz sonuçları	118
Tablo 18. Birleşik modellenmiş sistemde 70cm'lik plak taban kalınlığı için rezervuarın dolu halinde Durum 4'te beton plağın güvenilirlik analiz sonuçları	119
Tablo 19. Birleşik modellenmiş sistemde rezervuarın boş halinde Durum 1'de beton plağın güvenilirlik analiz sonuçları	119
Tablo 20. Birleşik modellenmiş sistemde rezervuarın boş halinde Durum 2'de beton plağın güvenilirlik analiz sonuçları	120
Tablo 21. Birleşik modellenmiş sistemde rezervuarın boş halinde Durum 3'te beton plağın güvenilirlik analiz sonuçları	120
Tablo 22. Birleşik modellenmiş sistemde rezervuarın boş halinde Durum 4'te beton plağın güvenilirlik analiz sonuçları	120
Tablo 23. Birleşik modellenmiş sistemde rezervuarın dolu halinde Durum 1'de beton plağın güvenilirlik analiz sonuçları	121
Tablo 24. Birleşik modellenmiş sistemde rezervuarın dolu halinde Durum 2'de beton plağın güvenilirlik analiz sonuçları	121
Tablo 25. Birleşik modellenmiş sistemde rezervuarın dolu halinde Durum 3'te beton plağın güvenilirlik analiz sonuçları	121
Tablo 26. Birleşik modellenmiş sistemde rezervuarın dolu halinde Durum 4'te beton plağın güvenilirlik analiz sonuçları	122
Tablo 27. Sürtünme tanımlanan sistemde 70cm'lik plak taban kalınlığı için rezervuarın boş halinde Durum 1'de beton plağın güvenilirlik analiz sonuçları	124
Tablo 28. Sürtünme tanımlanan sistemde 70cm'lik plak taban kalınlığı için rezervuarın boş halinde Durum 2'de beton plağın güvenilirlik analiz sonuçları	124
Tablo 29. Sürtünme tanımlanan sistemde 70cm'lik plak taban kalınlığı için rezervuarın boş halinde Durum 3'te beton plağın güvenilirlik analiz sonuçları	125
Tablo 30. Sürtünme tanımlanan sistemde 70cm'lik plak taban kalınlığı için rezervuarın boş halinde Durum 4'te beton plağın güvenilirlik analiz sonuçları	125
Tablo 31. Sürtünme tanımlanan sistemde 70cm'lik plak taban kalınlığı için rezervuarın dolu halinde Durum 1'de beton plağın güvenilirlik analiz sonuçları	126
Tablo 32. Sürtünme tanımlanan sistemde 70cm'lik plak taban kalınlığı için rezervuarın dolu halinde Durum 2'de beton plağın güvenilirlik analiz sonuçları	126

Tablo 33. Sürtünme tanımlanan sistemde 70cm'lik plak taban kalınlığı için rezervuarın dolu halinde Durum 3'te beton plağın güvenilirlik analiz sonuçları	127
Tablo 34. Sürtünme tanımlanan sistemde 70cm'lik plak taban kalınlığı için rezervuarın dolu halinde Durum 4'te beton plağın güvenilirlik analiz sonuçları	127
Tablo 35. Sürtünme tanımlanan sistemde rezervuarın boş halinde Durum 1'de beton plağın güvenilirlik analiz sonuçları	128
Tablo 36. Sürtünme tanımlanan sistemde rezervuarın boş halinde Durum 2'de beton plağın güvenilirlik analiz sonuçları	128
Tablo 37. Sürtünme tanımlanan sistemde rezervuarın boş halinde Durum 3'te beton plağın güvenilirlik analiz sonuçları	128
Tablo 38. Sürtünme tanımlanan sistemde rezervuarın boş halinde Durum 4'te beton plağın güvenilirlik analiz sonuçları	129
Tablo 39. Sürtünme tanımlanan sistemde rezervuarın dolu halinde Durum 1'de beton plağın güvenilirlik analiz sonuçları	129
Tablo 40. Sürtünme tanımlanan sistemde rezervuarın dolu halinde Durum 2'de beton plağın güvenilirlik analiz sonuçları	129
Tablo 41. Sürtünme tanımlanan sistemde rezervuarın dolu halinde Durum 3'te beton plağın güvenilirlik analiz sonuçları	130
Tablo 42. Sürtünme tanımlanan sistemde rezervuarın dolu halinde Durum 4'te beton plağın güvenilirlik analiz sonuçları	130
Tablo 43. Birleşik modellenmiş sistemlerde deprem etkisi altında rezervuarın boş halinde Durum 2'de beton plağın güvenilirlik analiz sonuçları	132
Tablo 44. Birleşik modellenmiş sistemlerde deprem etkisi altında rezervuarın boş halinde Durum 3'te beton plağın güvenilirlik analiz sonuçları	132
Tablo 45. Birleşik modellenmiş sistemlerde deprem etkisi altında rezervuarın boş halinde Durum 4'te beton plağın güvenilirlik analiz sonuçları	133
Tablo 46. Birleşik modellenmiş sistemlerde deprem etkisi altında rezervuarın dolu halinde Durum 2'de beton plağın güvenilirlik analiz sonuçları	133
Tablo 47. Birleşik modellenmiş sistemlerde deprem etkisi altında rezervuarın dolu halinde Durum 3'te beton plağın güvenilirlik analiz sonuçları	133
Tablo 48. Birleşik modellenmiş sistemlerde deprem etkisi altında rezervuarın dolu halinde Durum 4'te beton plağın güvenilirlik analiz sonuçları	134
Tablo 49. Sürtünme tanımlanan sistemlerde deprem etkisi altında rezervuarın boş halinde Durum 2'de beton plağın güvenilirlik analiz sonuçları	135
Tablo 50. Sürtünme tanımlanan sistemlerde deprem etkisi altında rezervuarın boş halinde Durum 3'te beton plağın güvenilirlik analiz sonuçları	135
Tablo 51. Sürtünme tanımlanan sistemlerde deprem etkisi altında rezervuarın boş halinde Durum 4'te beton plağın güvenilirlik analiz sonuçları	136

Tablo 52. Sürtünme tanımlanan sistemlerde deprem etkisi altında rezervuarın dolu halinde Durum 2’de beton plağın güvenilirlik analiz sonuçları	136
Tablo 53. Sürtünme tanımlanan sistemlerde deprem etkisi altında rezervuarın dolu halinde Durum 3’te beton plağın güvenilirlik analiz sonuçları	136
Tablo 54. Sürtünme tanımlanan sistemlerde deprem etkisi altında rezervuarın dolu halinde Durum 4’te beton plağın güvenilirlik analiz sonuçları	137

SEMBOLLER DİZİNİ

A_1, A_2	Alan
a, b_i, c_i ve d_{ij}	Yaklaşık fonksiyonun katsayıları
[B]	Yerdeğiştirme-şekildeğiştirme matrisi
c	Kohezyon
[C]	Ortak sistemin sönüm matrisi
d_k	Adım doğrultusu
[D]	Elastisite matrisi
[D _f]	Sıvı sistemin elastisite matrisi
DSİ	Devlet Su İşleri
{e}	Şekildeğiştirme vektörü
e_1, e_2	Yakınsama kriterleri
f	Akma fonksiyonu
F	Dış yük
{F}	Dış yük vektörü
f_k	1~3 arasında değişen keyfi bir katsayı
{F _f }	Zamana bağlı düğüm noktası yük vektörü
$F_{kl}(\omega)$	Transfer fonksiyonu
{F ^{nr} }	Newton-Raphson geri çağırım kuvveti
$f_R()$	Dayanım için olasılık yoğunluk fonksiyonları
$f_Q()$	Yük etkisi için olasılık yoğunluk fonksiyonları
$f_X(x)$	Olasılık yoğunluk fonksiyonu
$F_X(x)$	Eklenik dağılım fonksiyonu
g	Limit durum fonksiyon değeri
G	Kayma modülü
[G]	Şekil fonksiyonunun türev matrisi
g_0	Başlangıç limit durum fonksiyon değeri
$\check{g}()$	Yaklaşık fonksiyon
H _D	Baraj yüksekliği

H	Eşdeğer gerilmenin eşdeğer plastik şekildeğiştirmeye oranı
$h(\varepsilon_{eq}^{pl})$	Pekleşme fonksiyonu
$I[]$	Gösterge fonksiyonu
I_1	Gerilme tensörünün birinci invaryantı
$[J]$	Jacobian matrisi
J_2	Deviatorik gerilme tensörünün ikinci invaryantı
k	Kayma gerilmesinin akma dayanımı
$[K]$	Ortak sistemin rijitlik matrisi
K_2	Kumların rölatif yoğunluklarına bağlı bir parametre
k_d, α_d	Kohezyon ve içsel sürtünme açısına bağlı sabitler
$[K_f]$	Sıvı sistemin rijitlik matrisi
$[K_E]$	Sistem rijitlik matrisinin elastik bileşeni
$[K_f^*]$	Sıvı serbest yüzey rijitliklerini de içeren sıvı sistemin rijitlik matrisi
$[K_G]$	Sistem rijitlik matrisinin geometrik bileşeni
$[\bar{K}]$	Tanjant rijitlik matrisi
K_m	Kaya dolgu modülü
ks	Yaklaşık fonksiyonun katsayı değerlerini gösteren vektör
$m()$	Merit fonksiyonu
$[M]$	Ortak sistemin kütle matrisi
$[M_f]$	Sıvı sistemin kütle matrisi
n	Değişken sayısı
N	Üretilen örnek sayısı
P	Basınç
$P()$	Olasılık
P_f	Göçme olasılığı
P_w	Dönmeye ait gerilme
q	Yükün olasılık değeri
q_i	i. genelleştirilmiş koordinat
Q	Yük etkisi
Q_{ij}	Normal akma yüzeyi

Q_i	i. genelleştirilmiş kuvvet
R	Dayanım
R_d	Gerilme farkının büyüklüğü
R_0	Yapının güvenilirliği
$[S_f]$	Serbest yüzey eleman rijitlik matrisi
S_{ij}	Deviatorik gerilme tensörü
S_U	Drenajsız kayma dayanımı
T	Kinetik Enerji
T_b	Beton plak kalınlığı
$\{U\}$	Toplam yerdeğiştirme vektörü
$\{U_f\}$	Sıvı sistemin yerdeğiştirme vektörü
U_{fs}	Sıvı serbest yüzeyi düşey yerdeğiştirmesi
U_{fy}, U_{fz}	Sıvının yerdeğiştirme bileşenleri
u_m	m tabakasındaki yerdeğiştirme
U_n	Arayüze normal yerdeğiştirme
$\{\dot{U}\}$	Toplam hız vektörü
$\dot{U}_{fy}, \dot{U}_{fz}$	Hız bileşenleri
$\{\dot{U}_f\}$	Sıvı sistemin hız vektörü
$\{\ddot{U}\}$	Toplam ivme vektörü
$\{\ddot{U}_f\}$	Sıvı sistemin ivme vektörü
V_{Pf}	Göçme olasılığının değişim katsayısı
$\ddot{U}_{g(i)}$	Tabana indirgenmiş deprem ivmesi
$\ddot{U}_{g(s)}$	Serbest yüzey deprem ivmesi
w	Sıvının düzleme dik doğrultudaki dönmesi
W	Tasarım matrisi
X_1, X_2, X_3, X_n	Yapıları temsil eden yük ve dayanım parametreleri
x_i	Rastgele değişken
X_D	Tasarım noktası
X_M	Merkezi nokta

\hat{x}_j	Her bir değişken için üretilen örnek değer
$\{y\}$	Yanıt vektörü
Z_i	İndirgenmiş değişken
α	Doğrultman kosinüsü
α_f	Rotasyonla ilgili kısıtlama parametresi
α_{ij}	Deviatorik gerilme uzayında akma yüzeyinin merkezi
β	Güvenilirlik indeksi
β_f	Sıvının hacimsel elastisite modülü
β_s	Bir skaler parametre
δ_{ij}	Kroneker delta
ε_{eq}^{pl}	Eşdeğer plastik şekildeğiştirme
ε_h	Hata
ε_{ij}^{pl}	Plastik şekildeğiştirme
ε_v	Hacimsel şekildeğiştirme
$\Delta\varepsilon_{ij}^{pl}$	Plastik şekildeğiştirme artışı
$\Delta\varepsilon_{eq}^{pl}$	Eşdeğer plastik şekildeğiştirme artışı
$\Delta\sigma_{eff}$	Efektif gerilme artışı
ϕ	İçsel sürtünme açısı
γ	Bir skaler çarpan
$\Phi()$	Standart normal değişkenlerin eklenik dağılma fonksiyonu
λ_k	Adım boyu
μ	Sürtünme katsayısı
$\mu_{ln(x)}$	$\ln(x)$ 'in ortalaması
Π_e	Toplam şekildeğiştirme enerjisi
Π_s	Yüzey potansiyel enerjisi
Π_t	Toplam potansiyel enerji
ρ	Kütle yoğunluğu
σ_{ij}	Gerilme tensörü

σ_b	Basınç gerilmesi
σ_ζ	Çekme gerilmesi
$\{\sigma_f\}$	Sıvının gerilme vektörü
$\sigma_{\ln(x)}$	$\ln(x)$ 'in standart sapması
σ_m	Ortalama gerilme
σ_{mc}	Ortalama efektif basınç
σ_m'	Ortalama efektif gerilme
$\sigma_{p_f}^2$	Göçme olasılığının varyansı
σ_y	Akma gerilmesi
$\sigma_1, \sigma_2, \sigma_3$	Asal gerilmeler
τ	Eşdeğer kayma gerilmesi
τ_m	m tabakasındaki kayma gerilmesi
τ_{maks}	Maksimum kayma gerilmesi
ξ_{ij}	Gerilme farkı

1. GENEL BİLGİLER

1.1. Giriş

Ülkemizde ve dünyada barajlar çeşitli tiplerde inşa edilmektedir. İnşa edilecek baraj tipi arazinin durumu ve yapım maliyeti bakımından çeşitlilik gösterebilmektedir. Örneğin kemer barajlar için çok sağlam dar vadi yamaçları ve tabanı, ağırlık barajlar için çok sağlam vadi tabanları gerekirken, dolgu barajlar bu denli sağlamlığa ihtiyaç duyulmadan geniş vadilerde üstelik daha uygun maliyette inşa edilebilirler. Dolgu barajlar, toprak dolgu, kil çekirdekli (merkezi, eğimli) kaya dolgu, ön yüzü beton veya asfalt kaplı kaya dolgu olarak sıralanabilir. Kil çekirdekte kullanılan malzeme baraj civarından her zaman kolaylıkla elde edilemediğinden, ön yüzü beton kaplı kaya dolgu (ÖYBKGD) barajlar genellikle kil çekirdekli kaya dolgu (KÇKD) barajların ekonomik alternatifidir (Uddin, 1999; Wieland ve Brenner, 2007). KÇKD barajlardan farklı olarak ÖYBKGD barajlarda suyun baraj içine sızması menba yüzünde engellenmektedir. Bu yüzden baraj gövdesi kuru kalmakta ve KÇKD barajlarla kıyaslandığında depreme karşı daha yüksek stabilite sağlamaktadırlar.

Barajların insanoğlunun ihtiyaçlarına sunacağı hizmet, önünde depolanacak olan rezervuar suyuna bağlıdır. Gazetas (1991) deprem etkisiyle oluşacak hidrodinamik basıncın dolgu barajlar üzerinde önemli bir etkisinin olmadığını bildirmiştir. Bunun nedeni geniş taban ve büyük dolgu hacmine sahip olması nedeniyle rezervuar etkilerinin kemer ve ağırlık barajlara göre daha az olmasıdır. Ancak, ÖYBKGD barajların, rezervuar suyu ve beton plak-kaya dolgu arayüzeyinin sürtünme etkisinin dikkate alındığı yeni yaklaşımlarla modellenmesi durumunda, beton plağın hidrostatik ve hidrodinamik etkiler altında göstereceği davranışın belirlenmesi oldukça önemlidir.

ÖYBKGD barajlarda yüz plağının davranışı betonun kendi özellikleri kadar kaya dolgunun göstereceği davranışa da bağlıdır. İç ya da dış yüklerdeki artışla birlikte baraj gövdesinin göstereceği lineer olmayan davranışın etkisiyle, kaya dolgunun ve üzerindeki beton plağın davranışı değişecektir.

ÖYBKGD barajlar ile ilgili yapılan çalışmaların birçoğu malzeme ve geometrik parametrelerin kesin olarak bilindiği varsayımına bağlı olarak gerçekleştirilmiştir. Bu şekilde gerçekleştirilen çözümlere deterministik (belirli) çözümler denilmektedir. Aslında

tasarım parametrelerinde belirsizlikler bulunmaktadır. Özellikle kaya dolgu tipinde barajlar, teşkil edilme şekli ve barajı oluşturan gövde elemanlarının malzeme özelliklerinin belli olmaması nedeniyle tasarım parametrelerinde birçok belirsizlik içermektedir. Dolayısıyla yapılacak çözümlerde malzemenin rastgele değişimini dikkate alarak hesaplama yapabilen güvenilirlik analizinin gerçekleştirilmesi gerekmektedir (Chuhan, 2007). Güvenilirlik analizi, yapı davranışını etkileyen parametrelerin değişkenlikleri dikkate alınarak, yapı sistemlerinin ekonomik ömrü boyunca karşılaşılabileceği herhangi bir durum için yapının hasara uğrama veya göçme ihtimalinin hesaplandığı analize denilmektedir. Yapılarda meydana gelen göçmelerin birçoğu, insanlardan kaynaklanan hatalardan, yapıların projeye uygun yapılmamasından, malzemelerin yönetmeliklere uygun olmamasından, bazı yüklerin sayısal çözümlerde dikkate alınmamasından kaynaklanmaktadır (Whitman, 2000).

1.2. Ön Yüzü Beton Kaplı Kaya Dolgu Barajlar ile İlgili Bazı Çalışmalar

Seed vd. (1985), 0.5g maksimum yer ivmesi için ÖYBKKD barajların kayma deformasyonlarını belirlemek amacıyla kullanılan çözüm yöntemini kapsamlı bir şekilde açıklamışlardır. Ayrıca, mansap yüzlerinde sınır kayma deformasyonlarının 0.3-0.6m arasında kalması gerektiği de vurgulanmıştır.

Bureau vd. (1985), gerçekleştirdikleri çalışmada kaya dolgu barajların sismik performansını ve ÖYBKKD barajların muhtemel göçme şekillerini tartışmışlardır. Gözlemlenen bir depremin neden olduğu kret oturumlarıyla ilgili “Deprem Şiddet İndeksi” adlı ampirik bir çizelge sunmuşlardır.

Sherard ve Cooke (1987), ÖYBKKD barajların tüm dünyada gittikçe artan bir şekilde tercih edildiğini belirtmiştir. Bu baraj tipinin toprak çekirdekli kaya dolgu barajlarla kıyaslandığında büyük avantajları olduğunu vurgulamışlardır. ÖYBKKD barajların özellikle şiddetli yer sarsıntılarına karşı güvenli ve yüksek baraj inşaatları için son derece uygun olduğunu bildirmişlerdir. Çalışmalarında serilen her tabakanın altında daha büyük kayalar olmak üzere kaya dolguyu tabakalı olarak yerleştirmenin arzu edilen bir uygulama olduğunu belirtilmişlerdir. Ayrıca, kret oturumlarının oldukça düşük olduğu, ilk birkaç yıldan sonra hızla azaldığını vurgulamışlardır.

Cooke ve Sherard (1987), ÖYBKKD barajlar için tasarım ve inşanın ana detaylarını tartışmıştır. Çalışmaya, taban plak altındaki temelin iyileştirilmesi, boyutları, donatısı ve

enjeksiyonu; yüz plak kalınlığı, beton kalitesi, donatısı, birleşimleri ve yapımı; parapet duvarı ve eğim; kaya dolgu temelinin iyileştirilmesi, bölgelenmesi, kaya sınıflandırması, kaya kalitesi ve teşkili dâhil edilmiştir. Geçmiş ve güncel eğilimler değerlendirilmiştir.

Uddin (1992), ÖYBKKD barajların sismik davranışını incelemek için basit ve gerçekçi bir analitik model geliştirmiştir. Çalışmanın ana amacı, ÖYBKKD bir barajda deprem etkileri altında visko-elastik sonlu eleman modeli kullanarak ve yüz plağı ile kaya dolgu arasında Coulomb sürtünme yasasını dikkate alıp beton plaktaki gerilme ve şekildeğişimleri elde etmektir. Ayrıca, doğal frekans, mod şekilleri ve modal katkı faktörleri karakteristik geometrik ve malzeme parametrelerinin fonksiyonu olarak boyutsuz formda gösterilmiştir. Plağın en büyük deprem davranışını belirlemek için tepki spektrumu da kullanılmıştır. Yüz plağında oluşan gerilme ve şekildeğişimleri belirlemek amacıyla analitik modellere dayanarak rasyonel bir prosedür geliştirilmiştir.

Uddin ve Gazetas (1995), güçlü yer sarsıntısına maruz ÖYBKKD bir barajda kaya dolguyu, eşdeğer lineer bir malzemeyle modellemiştir. Kaya dolgu ve beton plak arasında Coulomb sürtünmesi tanımlanmış olup, deprem süresince sürtünme kapasitesinin aşılması durumunda kaymaya izin verilmiştir. 0.4g ve 0.6g pik ivmeli yer sarsıntıları altında yapılan çözümlerde beton plakta özellikle kaya dolgunun deformasyonlarından kaynaklanan aksenal çekme kuvvetleri nedeniyle sıkıntı yaşanacağı belirtilmiştir. 0.6g maksimum yer ivmeli sarsıntı için beton plakta mevcut dayanımı aşan çekme gerilmelerinin olduğu görülmüştür. Krette en büyük yer ivmesinin 1.5-3 katı arasında ivme değerleri elde edildiği görülmüştür.

Guo (1997), dikdörtgen kanyonda inşa edilen ÖYBKKD barajın yanal davranışını belirlemek amacıyla kapalı formda analitik bir çözüm geliştirmiştir. Baraj, kayma ve eğilme şeklinde deforme olabilen üç boyutlu lineer-histerik elastik cisim olarak idealize edilirken, kanyonun rijit olduğu kabul edilmiştir. Çalışmada, serbest ve taban kaynaklı titreşimler değişik kanyon geometrileri için dikkate alınmıştır. Kanyon genişliğinin ve baraj eğiminin davranış üzerindeki etkileri için parametrik bir çalışma gerçekleştirilmiştir.

Uddin (1999), tipik bir ÖYBKKD barajı (100 m) dikkate alarak ÖYBKKD barajlar için dinamik analiz prosedürü önermiştir. Güçlü sismik titreşime maruz barajın analizi, şev malzemesi, plak ve plak-kaya dolgu arayüzeyi gerçekçi bir şekilde modellenerek sunulmuştur. Kaya dolgu, etkili basıncın karekökü ile orantılı şekildeğiştirmeye bağlı kayma modülüne sahip eşdeğer-lineer malzeme olarak modellenmiştir. Yüz plağı ve kaya dolgu arasındaki arayüzeyin davranışında Coulomb sürtünmesi esas alınmıştır. Kayma

kuvveti ile ilgili sürtünme kapasitesi aldğında kayma hareketinin oluşmasına izin verilmiştir. Bu çalışmada sonlu eleman analizleri, kaymayı modellemek için ADINA programında mevcut özel arayüzey elemanları ve direkt adım-adım çözüm için Newmark zaman-integrasyon algoritması kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Şiddetli depremlerde beton plakta beton çekme dayanımından daha büyük çekme gerilmelerinin oluştuğu vurgulanmıştır.

Kong ve Liu (2002), kaya dolgunun çökmesini incelemek için bu tip problemlerin çözümünde etkili bir araç olan süreksiz deformasyon analizini kullanmıştır. Bu yöntemle homojen kaya dolgu ve ÖYBKKD baraj modellenmiş, davranış ve çökme işleminin karakteristikleri sunulmuştur. Sayısal analizlerden elde edilen sonuçların dinamik deneylerden elde edilen değerlerle uyumlu olduğu grlmtir.

Zhang vd. (2004), lineer olmayan davranışın ve zamana bağlı deformasyonun ayrışma ve çökme üzerindeki etkisini incelemek için bir temas analiz yöntemi önermiştir. Bu yönteme göre, baraj gövdesi ve beton plak iki ayrı deforme olabilen cisim olarak kabul edilmektedir. Bu iki yüzey birbiri ile temas ettiğinde ilgili arayüzeyde Coulomb sürtünme yasası geçerli olmaktadır. Baraj menba yüzündeki beton plağın lineer elastik, kaya dolgu malzemesinin ise lineer olmadığı ve zamana bağlı davranış gösterdiği kabul edilmiştir. rnek olarak, Tianshengqiao-I ÖYBKKD barajı sayısal olarak incelenmiş ve elde edilen sonuçlar arazi ölçümleri ile karılatırılmıtır. Kullanılan temas analiz yönteminin, beton plak ve yastık tabakası arasındaki ayrışmayı iyi bir Şekilde temsil ettiği belirtilmiştir.

Bayraktar vd. (2005a), baraj-rezervuar etkileşimini dikkate alarak değişerek yayılan taban titreşimine maruz ÖYBKKD barajların sismik davranışını belirlemiştir. Ortak sistemin hareket denklemleri, yüzey salınım hareketi sonlu eleman formülasyonuna dâhil edilerek Lagrange yaklaşımı ile belirlenmiştir. Sayısal analizlerde örnek olarak Torul Barajı dikkate alınmıştır. Analizler, beton plak-kaya dolgu arayüzeyi birleşik olarak kabul edilerek rezervuarın boş ve dolu hali için gerçekleştirilmiştir.

zkuzukıran (2005), Türkiye'nin ilk ÖYBKKD barajı olan Kürtün Barajı'nın oturma davranışını aratırmıtır. İnaa aşamasında ve rezervuarın dolması esnasında toplam gerilme ve yerdeğiirmeleri belirlemek için iki boyutlu, düzlem Őekildeėiirme sonlu eleman analizleri gerekleirmitir. Kaya dolgu malzemesinin lineer olmayan ve gerilmeye bağlı davranışını temsil etmek için pekleen zemin modeli kullanmıştır. Hesaplanan gerilmeler ve oturmalar gözlemlenmiş değerlerle mukayese edilmiş ve inşa safhaları ile uygun sonuçlar elde edildiği grlmtir.

Wieland ve Brenner (2005), şiddetli yer hareketine maruz ÖYBKKD barajların sismik performansının niteliksel değerlendirmesini sunmuş ve muhtemel problemlerle yetmezlikleri tartışmıştır. ÖYBKKD barajlarda daha ileri araştırma gerektiren beton yüzle ilgili bazı bakış açıları tanımlanmıştır. Çalışmada, deprem yer hareketi etkisi ile beton plakta kanyona zıt yönde oluşacak gerilmeler işaret edilmiştir. Bu nedenle birleşim bölgelerinde hasar oluşabileceği, beton plağın yerel olarak burkulabileceği ya da yüksek gerilmeler nedeniyle yerel hasarların da meydana gelebileceği vurgulanmıştır. Ayrıca çalışmada, diyafram duvarlarının ve enjeksiyon perdelerinin muhtemel sismik performans senaryoları da sunulmuş ve ihmal edilen bu elemanların sismik tasarımda mutlaka dikkate alınması gerektiği vurgulanmıştır.

Freitas (2005) tarafından sunulan çalışmada, ÖYBKKD barajların tasarım ve yapım özellikleri, kaya dolgunun performansı, çatlaklar ve anormal sızmalarla ilgili yorumlara yer verilmiştir. Çalışmada, ayrıca, topuk plağı geometrisi ve konumuna yönelik bazı değerlendirmeler sunulmuştur.

Esmaili (2005), ÖYBKKD barajların iki ve üç boyutlu sismik davranışı ile ilgili bir araştırma sunmuştur. Çalışmada, ANSYS programı ile statik ve dinamik analizler gerçekleştirilmiştir. Analizlerde kaya dolgu malzemesi için elastik ve elasto-plastik malzeme modelleri tercih edilmiştir. Ayrıca, baraj gövdesinin yapım safhalarının etkileri de yapılan çözümlerde dikkate alınmıştır. Maksimum yatay ivmeler-yerdeğıştirmeler, baraj gövdesinin farklı bölgelerinin maksimum kayma gerilmeleri-şekildeğıştirmeleri ve beton plağın asal gerilmeleri iki ve üç boyutlu durumlarda karşılaştırılmıştır.

Kaneko ve Kashiwayanagi (2005), ÖYBKKD barajlarda rezervuarın dolması sonucunda beton plak üzerinde oluşan gerilme ve deformasyonların derecesini belirlemek için iki boyutlu statik gerilme analizine dayalı olarak analiz modellerini karşılaştırmıştır. Bununla birlikte, temel biçimlerinin beton plaklara etkisini ve kademeli yapımın beton plak gerilmelerine etkisini de incelemiştir.

Wang vd. (2006), ÖYBKKD bir barajın en büyük kesiti için iki boyutlu sonlu eleman analizlerini 6.5 büyüklüğündeki bir depremi dikkate alarak gerçekleştirmiştir. Barajın menba ve mansap şevlerindeki potansiyel kayma yüzeyleri için güvenlik faktörlerini belirlemek amacıyla, şev stabilite analizleri yapılmıştır. Sonlu eleman çözümlerinde eşdeğer lineer yöntem ve hipoplastik yöntem kullanılmış olup, elde edilen sayısal sonuçlar birbiriyle karşılaştırılmıştır.

Haeri ve Karimi (2006), ÖYBKKD bir barajın trapezoidal kesitli prizmatik kanyon boyunca oluşan hareketini elde etmek için Ölçülendirilmiş Sınır Sonlu Elemanlar Yöntemine dayanan yeni bir yaklaşım kullanmıştır. Vadideki deşışerek yayılan yer hareketi Loma Prieta depreminin üç bileşeni kullanılarak dikkate alınmıştır. Buradan elde edilen sonuçlar kanyonda bulunan tipik ÖYBKKD bir barajın üç boyutlu dinamik analizi için yer hareketi olarak kullanılmıştır. Ayrıca, baraj-yüz plağı-mesnet etkileşimi Ölçülendirilmiş Sınır Sonlu Elemanlar Yöntemi kullanılarak analizlerde dikkate alınmıştır.

Ghannad (2006), ÖYBKKD bir baraj için sonlu eleman ve analitik (kayma dilim teorisi) yöntemlere dayalı çözümler sunmuş ve bu çözümleri karşılaştırmıştır. Seçilen baraj (104 m), İran'ın yüksek sismisiteye sahip bir bölgesinde bulunan pompalamalı depolama projesinin iki ÖYBKKD barajından biridir. Analizlerde dinamik etki olarak yer hareketi alınmıştır.

Xing vd. (2006), zayıf kayalarla inşa edilen ÖYBKKD barajlarla ilgili bir çalışma gerçekleştirmiştir. Barajların şev stabilitesi ve oturmalarıyla ilgili sayısal çözümler gerçekleştirilmiş ve sonuçlar arazi ölçümleriyle kıyaslanmıştır. Sayısal analizler sonucunda barajın belirli kesitlerinde elde edilen oturma, çökme, en büyük asal çekme ve basınç gerilmeleri verilmiştir.

Bayraktar ve Kartal (2007), kaya dolgunun malzeme özelliklerinin ÖYBKKD barajların deprem performansına etkisini incelemiştir. Deprem performansı beton plak için talep-kapasite eğrisi dikkate alınarak değerlendirilmiştir. Rezervuarın dolu hali için yapılan çözümlerde seçilen ivme kaydının en büyük ivmesi farklı büyüklüklere ölçeklenerek dikkate alınmıştır. Deprem etkisi altında gerçekleştirilen analizler sonucunda beton plağın potansiyel hasar durumu hakkında fikir elde edilmiştir.

Bayraktar vd. (2008), yakın fay etkisine maruz ÖYBKKD barajların deprem davranışını incelemiştir. Üç ayrı deprem kaydı için gerçekleştirilen iki boyutlu sonlu eleman çözümlerinde rezervuar suyunun etkisi Lagrange yaklaşımına dayalı sıvı sonlu elemanlarla dikkate alınmıştır. Çalışmada, yerdeğıştirmelerin ve asal gerilme bileşenlerinin barajın çeşitli kesitleri boyunca nasıl oluştuğı ve zamana bağılı olarak nasıl değıştiğı gösterilmiştir. Beton plak-kaya dolgu arayüzeyi birleşik olarak dikkate alınmıştır.

Szostak-Chrzanowski vd. (2008), Dünyanın en yüksek ÖYBKKD (Shibuya) barajının davranışını sonlu eleman analizi ve deneysel çalışmalarla inceleyerek; rezervuarın en yüksek su seviyesine ulaşmadan önce beton plakta oluşan deformasyonların

kritik değerlere ulaştığını göstermiştir. Rezervuarın su ile dolması esnasında maksimum su seviyesine ulaşmadan beton plakta çatlakların oluştuğu belirtilmiştir.

Wei vd. (2009), yeni bir snme oluşum modelini kaya dolgu için sunmuştur. Snme modelinin sayısal analiz sonuçları laboratuarda üç-eksenli snme testlerinden elde edilen verilerle kıyaslanmıştır. Snme modelinin, kaya dolgunun mekanik davranışını ve gerçek snme karakteristiklerini tanımladığı belirtilmiştir. Çalışmada, kaya dolgunun snmesinin beton yüz plağının gerilme ve deformatsyonları üzerinde açık bir etkisi olduğu gösterilmiştir. Üç eksenli snme testlerinden elde edilen snme parametrelerinin dikkate alındığı Shuibuya barajında kaya dolgunun en büyük nihai oturmasının snme etkisine bağlı olarak 2.09m olacağı hesaplanmıştır.

Bayraktar vd. (2009), ÖYBKKD barajların yakın ve uzak fay etkileri altındaki lineer olmayan davranışlarını incelemiştir. İki boyutlu sonlu eleman çözümlerinde hidrodinamik basınç etkisi Lagrange yaklaşımına dayalı sıvı sonlu elemanlarla dikkate alınmıştır. Barajın malzeme bakımından lineer olmayan davranışı Drucker-Prager modeliyle tanımlanmıştır. Beton plak ve kaya dolgu birleşiminde kaymaya izin veren iki boyutlu arayüzey elemanlar kullanılmıştır. Zaman tanım alanında gerçekleştirilen çalışma sonucunda yakın fay etkisine maruz baraj-zemin-rezervuar sisteminde gerilme ve yerdeğiştirmeler bakımından daha elverişsiz durumlar oluştuğu grlmştir.

Hacıfendioglu (2009), viskoz sınır Őartlarını dikkate alarak rezervuar suyu üzerinde buz örtüsü bulunması halinde değişerek yayılan yer hareketine maruz ÖYBKKD barajın stokastik sismik davranışını baraj-temel-rezervuar etkileşimini dikkate alarak incelemiştir. Rezervuar suyu, Lagrange yaklaşımını dikkate alan sıvı elemanlarla tanımlanmıştır. 1999 Kocaeli depreminin doğu-batı bileşeni filtre edilmiş beyaz gürültü modeli ile dikkate alınmıştır. Parametrik alışmalar su ykseklіęi ve buz örtüsünün kalınlığı değişken alınarak gerçekleştirilmiş ve beton plak üzerindeki etkisi araştırılmıştır. Çalışmada buz örtüsünün etkisini belirleyebilmek için, buz örtüsüz, buz örtülü, tek çatlaklı buz örtülü ve iki çatlaklı buz örtülü olmak üzere dört ayrı durum dikkate alınmıştır.

1.3. Barajların Güvenilirlik Analizi ile İlgili Bazı alışmalar

Christian vd. (1994), zemin parametrelerinin olasılık tanımlarının arazi ve laboratuvar verilerinden nasıl çıkartılabileceğini ve stabilite analizlerinde nasıl uygulanabileceğini açıklamıştır. Çalışmada, Birinci-Derece İkinci-Moment yaklaşımı açıklanmış ve dolgu

barajların tasarımında kullanılmıştır. Dolgu barajın güvenilirliği için farklı parametrelerle ilgili belirsizliklerin rölatif katkıları örneklenmiştir.

De Araújo ve Awruch (1998), beton ağırlık barajların olasılık çözümü için bir yöntem sunmuştur. Çalışmalarında, betonun özellikleri ve sismik titreşim rastgele değişken olarak düşünülmüştür. Baraj-temel-rezervuar etkileşim sisteminin hareket denklemleri Sonlu Elemanlar Yöntemi ile çözülerek yapı davranışı elde edilmiştir. Yapı güvenilirliği başlıca göçme modlarına (çatlak, betonun ezilmesi ve baraj-temel arayüzünde kayma) göre Monte Carlo Yöntemi kullanılarak değerlendirilmiştir.

Horyna (1999), göçme durumundaki orta yükseklikteki beton ağırlık barajın tek bir monolitinin kayma davranışını temelden ayırık olması ya da olmaması hali için deneysel, analitik ve güvenilirlik yöntemleriyle incelemiştir. Güvenilirlik analizlerinde, monolit in deprem sırasında taban kayma miktarının yıllık aşılma ihtimali kriter olarak alınmış ve iki boyutlu sayısal analiz sonuçları hesaplarda kullanılmıştır. En büyük yer ivmesi, ivme kaydının karakteristikleri ve rezervuar su seviyesi rastgele parametre olarak düşünülmüştür.

Liang vd. (1999), çok tabakalı dolgu baraj ve şevlerin göçme olasılığını değerlendirmek için güvenilirlik ve olasılık teorileri geliştirmişlerdir. Güvenilirlik indeksinin belirlenmesinde normal ve lognormal dağılımlar kullanılmıştır. Geliştirilen yaklaşım ve bilgisayar programı bir dolgu barajın stabilitesinin incelenmesinde kullanılmıştır. Çalışma sonucuna göre en küçük güvenilirlik indeksleri mansap yüzünde oluşurken; mansap yüzünde de güvenilirlik indeksleri hedef değere oldukça yakın elde edilmiştir.

Gui vd. (2000), doymuş hidrolik iletkenliğinin stokastik ve zemin şev stabilite analizinin güvenilirliği üzerindeki etkisini incelemiştir. Doymuş zeminin hidrolik iletkenliği lognormal dağılıma göre rastgele değişken olarak düşünülmüş ve Monte Carlo çözümleri gerçekleştirilmiştir. Birinci Derece İkinci-Moment güvenilirlik indeksi, doymuş hidrolik iletkenliğin değişiminin ve boşluk suyu basınçlarının mansap şevinin stabilitesi üzerindeki etkisini karakterize etmek için kullanılmıştır.

Auvinet ve González (2000), üç boyutlu olasılık stabilite analiz algoritması kullanılarak şevlerin güvenilirliğini değerlendirmiştir. Parametrik çalışmalar tipik bir toprak baraj için gerçekleştirilmiştir. Zemin kayma dayanımının varyans ve korelasyon mesafesinin göçme mekanizmasıyla ilgili güvenilirlik üzerindeki etkisi değerlendirmiştir. Bununla birlikte potansiyel kayma yüzeylerinin boyutları ve biçiminin verilen rastgele

ortam için güvenilirlik üzerindeki etkisi ayrıca dikkate alınmıştır. Çalışma sonucunda, şevin global göçme olasılığına katkıda bulunan mekanizmanın, zemini homojen kabul eden standart deterministik değerlendirmelere göre kritik olarak tanımlanmış mekanizmalardan oldukça farklı olabileceği gösterilmiştir.

Luan vd. (2002), Hongjiadu ÖYBKKD barajı için mevcut olan deneysel verilerle kaya dolgunun kayma dayanım parametreleri için istatistiksel bir analiz gerçekleştirmiştir. Barajın mansap şevinin stabilitesinin güvenilirliğini değerlendirmek için sırasıyla Moment İstatistik Yöntemi ve Birinci-Derece İkinci-Moment yöntemi kullanılmıştır. Zemin kohezyonu ve içsel sürtünme açısının güvenilirlik indeksi üzerindeki etkisini tartışmak için kayma dayanım parametrelerinin istatistiksel karakteristik değişkenlerinin duyarlılık analizleri gerçekleştirilmiştir.

Bhattacharya vd. (2003), toprak şevlerin güvenilirlik indeksini belirlemek için bir prosedür önermiştir. Buna göre, güvenilirlik indeksinin hesabında, şev stabilite algoritması kullanılarak kritik olasılık yüzeyi doğrudan elde edilebilmektedir. Çalışmada, deterministik ve kritik olasılık yüzeyleri çeşitli yamaç ve dolgu baraj şevleri için elde edilmiştir.

Leclerc vd. (2003), CADAM programını kullanarak 30m yüksekliğindeki bir ağırlık barajın yapısal stabilite değerlendirmesini yapmıştır. Gerçekleştirdikleri çalışmada, statik ve sismik güvenlik için yükleme şartları, çatlak kriteri, kaldırma kuvvetlerinin yoğunluğu ve analiziyle ilgili birçok varsayımın kullanılabileceğini göstermişlerdir. Güvenilirlik analizlerinde yükleme ve dayanım parametreleri rastgele değişken olarak düşünülmüş, bunun sonucunda barajın göçme olasılığı hesaplanmıştır.

Al-Homoud ve Tanash (2004), dolgu barajların stabilitesini değerlendirmek için üç boyutlu olasılık stabilite analiz modeli geliştirmiştir. Karameh baraj dolgusunun ve temelinin stabilitesi, deterministik ve olasılık analizleri ile değerlendirilmiştir. Çalışmada, zemin özelliklerinin arazi ve laboratuarda ölçülen değerleri arasındaki farklılıkları ve modelleme hatalarını dikkate alan düzeltme faktörlerinin ortalama değerleri hesaplanmıştır. Bu değerlerin, iki boyutlu güvenlik faktörü, üç boyutlu güvenlik faktörü, şevin göçme olasılığı ve beklenen göçme genişliği üzerinde önemli etkisinin olduğu görülmüştür.

Mrabet vd. (2006), El Houareb (Tunus) dolgu barajının güvenilirlik analizini gerçekleştirmiştir. Dolgu barajın zemin özellikleri istatistiksel bakımdan homojen olarak dikkate alınmıştır. Çalışmada, global göçme olasılığına önem verilmiştir. Hesaplanan

global göçme olasılığı değeri, kritik elipsoit göçme mekanizması değerine yakın elde edilmiştir.

Chaudhuri ve Chakraborty (2006), pertürbasyon tabanlı stokastik Sonlu elemanlar Yöntemini güvenilirlik analizinde kullanmıştır. Bu amaçla, 1940 El Centro depremine maruz üç boyutlu baraj sisteminin en büyük kret yerdeğiştirmesi ve taban kayma kriterleri dikkate alınarak zamanla değışen güvenilirlik analizleri yapılmıştır.

Başıa ve Bayraktar (2007), güvenlik faktörleri yerine baraj davranışını etkileyen belirsiz parametreleri dikkate alarak deprem etkisinin ağırlık barajların stabilitesi üzerindeki etkisini incelemiştir. Güvenilirlik analizi devrilme, kayma ve taşıma gücü göçme modlarını dikkate alarak ölü yük, deprem yükü, kaldırma basıncı gibi yükleme şartları için gerçekleştirilmiştir. Barajın boyutları, zemin özellikleri ve barajın malzeme özellikleri rastgele değışken olarak dikkate alınmıştır. Güvenilirlik analizlerinde Monte Carlo Yöntemi ve Birinci Derece Güvenilirlik Yöntemi kullanılmıştır. Çalışma sonucunda rezervuar suyu ve deprem yükünün barajın stabilitesini etkilediği vurgulanmıştır.

Huber vd. (2008), dolgudaki belirsizlikleri ve göçme modlarını dikkate alarak sel risk yönetimi için güvenilirlik analizini gerçekleştirmişlerdir. Çalışmada, göçme modları olarak taşkın, taban kaldırma etkisi, borulanma, şev stabilitesi ve yüzey kaplamasındaki hasar dikkate alınmıştır. Sistemin göçmesi iki göçme modunun birlikte değeriendirilmesi ile elde edilmiştir.

Ching ve Hsu (2008), güvenilirlik limit-durum kısıtlamasını deterministik limit-durum kısıtlamasına dönüştürebilen, geniş bir uygulama alanında güvenilirlik tabanlı tasarım ve optimizasyon yapabilen etkili bir yöntem önermiştir. Yöntem lineer ve lineer olmayan sistemler ile yüksek boyutlu belirsizliklere sahip statik ve dinamik sistemlere uygulanabilmektedir. Çalışmada, örnek olarak malzeme özellikleri belirsiz olan toprak dolgu baraj dikkate alınmıştır. Barajın lineer elastik davrandığı varsayımıyla elastisite modülü ve kayma modülü lognormal rastgele dağılıma sahip olduğu dikkate alınarak modellenmiştir. Sonuç olarak, önerilen yöntemin güvenilirlik-tabanlı tasarım ve optimizasyon işleminde önemli derecede zaman kazancı sağladığı vurgulanmıştır.

Carvajal vd. (2009), baraj inşaatından önce ve baraj inşaatı esnasında elde edilen test sonuçlarına bağlı olarak silindirle sıkıştırılmış beton barajların kayma dayanımının olasılık modellemesi için bir yöntem önermiştir. Elde edilen olasılık dağılımları, Birinci Derece Güvenilirlik Yöntemi ve Monte Carlo Yöntemi için kayma dayanımına bağlı olarak oluşturulan limit durum fonksiyonunda kullanılmıştır.

Lu ve Tian (2009), ağırlık barajlar için Gerilme Katsayısı Yöntemi ve Monte Carlo Yöntemini birlikte kullanarak Sismik Dinamik Güvenilirlik Analiz Yöntemini geliştirmiştir. Dayanıma bağlı güvenilirlik ve sismik kayma stabilitesi bu yöntemle hesaplanabilmektedir. Barajın sismik davranışının hesabında tepki spektrum yöntemi kullanılmıştır.

Bernstone vd. (2009), beton barajlarda kaldırma etkisine ait verileri güvenilirlik analizlerinde kullanmıştır. Analizlerde, kayma ve devrilme limit durumları dikkate alınarak beş farklı kaldırma basınç dağılımı dikkate alınmıştır. Gerçekleştirilen güvenilirlik analizlerinde, verilerin emniyet üzerinde ne kadar etkisi olduğu görülmüştür.

1.4. Çalışmanın Amacı ve Kapsamı

Bu çalışmada, baraj-temel-rezervuar etkileşimi dikkate alınarak farklı sınır birleşim durumlarına sahip ÖYBKKD barajların geometri ve malzeme bakımından lineer olmayan davranışları için statik ve dinamik yükler altındaki güvenilirliklerinin belirlenmesi amaçlanmıştır. Bu amaçla oluşturulan bölümlerin içerikleri özet olarak aşağıda verilmiştir.

Birinci bölümde konu hakkında genel bilgiler verilmiş olup, ÖYBKKD barajlar ve barajların güvenilirlik analizleri ile ilgili yapılan çalışmalar sunulmuştur. Ayrıca, bu bölümde, sıvı sistemlerin formülasyonu, çalışmada kullanılan malzeme modellerinin formülasyonları, temas problemlerine ait formülasyonlar ve güvenilirlik analizlerine ait formülasyonlar verilmiştir.

İkinci bölümde sayısal çözümlerin gerçekleştirilebilmesi için yapılan çalışmalar açıklanmıştır. Bunun için önce örnek olarak seçilen Torul Barajına ait yapısal özellikler açıklanmış ve barajın sayısal modeli verilmiştir. Bu tip barajlarda dikkate alınacak birleşim bölgeleri, bu bölgelerde tanımlanacak temas elemanlar ve Coulomb sürtünme modeli açıklanmıştır. Malzeme bakımından lineer olmayan davranış için kinematik pekleşme modeli ve Drucker-Prager modeli ile ilgili bilgiler verilmiştir. Deprem hesaplarında kullanılan ivme kaydının yer yüzeyinden baraj temelinin tabanına indirgeme işlemi sunulmuştur. Son olarak güvenilirlik analizinde kullanılan algoritmalar açıklanmıştır.

Üçüncü bölümde önce örnek olarak seçilen Torul ÖYBKKD barajının deprem davranışı, yerdeğiştirme ve asal gerilmeler dikkate alınarak irdelenmiştir. Daha sonra barajın statik ve deprem yüklerine maruz kalması halinde beton plağın asal gerilme bileşenleri dikkate alınarak gerçekleştirilen güvenilirlik analizleri değerlendirilmiştir.

1.5. Ön Yüzü Beton Kaplı Kaya Dolgu Barajların Sayısal Modellemesi ile İlgili Formülasyonlar

Burada, rezervuar suyunun hidrodinamik etkisinin de dikkate alındığı lineer ve lineer olmayan sonlu eleman analiz formülasyonları verilmektedir. Formülasyonlarda, rezervuar suyunun baraj üzerindeki etkisi Lagrange yaklaşımına dayalı lineer davranış gösteren iki boyutlu sıvı sonlu elemanlarla dikkate alınmıştır. Lineer olmayan analiz formülasyonları aşağıdaki gibi üç gruba ayrılmıştır:

1. Malzeme bakımından (lineer olmayan elastik, plastik, hiperplastik)
2. Geometri bakımından (Büyük şekildeğişirmeler, hiperelastisite)
3. Arayüzey sınır şartları dikkate alınarak (temas problemleri)

1.5.1. Sıvı-Yapı-Zemin Etkileşim Sistemleri

Barajlar, sıvı depoları ve su kanalları gibi yapılar sıvı-yapı etkileşim sistemleridir. Bu tip yapılarda dinamik bir etki altında sıvı yapının, yapı da sıvının davranışını önemli derecede etkilediğinden, sıvı-yapı etkileşiminin çözümlerde dikkate alınması gerekmektedir. Sıvı-yapı-zemin etkileşim problemlerinin çözümünde çeşitli yaklaşımlar kullanılmaktadır. Bunlar şu şekilde sıralanabilir:

1. Westergaard yaklaşımı
2. Euler yaklaşımı
3. 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 ilave bir kütle tanımlanmıştır (Westergaard, 1933).

Euler yaklaşımında, yapıda yerdeğişirmeler sıvıda ise basınçlar veya hız potansiyelleri değişkendir. Bu yaklaşımda, sıvı ve yapı ortamında değişkenler farklı olduğundan sistemin çözümü için ara yüzey denklemine ihtiyaç duyulmaktadır. Sıvı-yapı-zemin etkileşim sisteminin bu yaklaşıma göre çözümü özel amaçlı bilgisayar programları ile gerçekleştirilebilmektedir (Calayır, 1994).

Lagrange yaklaşımında, her iki ortamda da yerdeğişirmeler bilinmeyen olarak seçildiğinden eleman matrisleri simetrik olarak oluşturulmaktadır. Yapı sistemlerini analiz

etmek için mevcut olan eleman alt programlarından yerdeğiştirmelere dayalı sıvı elemanları elde etmek ve genel amaçlı yapı analizi programlarına uyarlamak daha kolaydır (Calayır, 1994; Bayraktar, 1995). Bu çalışmada, Lagrange yaklaşımı esas alınmıştır.

1.5.1.1. Sıvı Sistemlerinin Lagrange Yaklaşımına Dayalı Sonlu Eleman Formülasyonu

Lagrange yaklaşımına dayalı sıvı sonlu elemanın geliştirilmesi, standart bir katı elemanın elastisite matrisinin uygun bir şekilde değiştirilerek dikkate alınması fikri ile ortaya çıkmıştır. Wilson ve Khalvati (1983) tarafından önerilen sıvı eleman kullanılarak sıvı, sıvı-yapı ve baraj-rezervuar sistemlerinin davranışı birçok araştırmacı tarafından incelenmiştir. (Greeves, 1991; Calayır, 1994; Calayır ve Dumanoğlu, 1994; Bayraktar, 1995; Bayraktar vd., 1996; 2005a; 2005b; 2005c; Akköse, 2004; Köseoğlu, 2007; Bayram, 2008).

Sıvı sistemlerin lineer elastik, rotasyonsuz ve viskoz olmayan, küçük yerdeğiştirmeler yapması durumu için temel bağıntılar Wilson ve Khalvati (1983), Calayır (1994) ve Bayraktar (1995) tarafından verilen formülasyona dayalı olarak sunulmuştur. Lagrange yaklaşımına göre rotasyonsuz ve viskoz olmayan lineer elastik bir sıvının küçük yerdeğiştirmeler yapması durumunda basınç ile hacimsel şekildeğiştirme arasında aşağıda verilen bağıntı vardır.

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

Bu ifadede, P basıncı, β_f sıvının hacimsel elastisite modülünü, ε_v ise hacimsel şekildeğiştirmeyi 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 ve z doğrultularındaki yerdeğiştirme bileşenleridir.

Sıvının gerilme-şekildeğiştirme bağıntılarına rotasyonlar ve bu rotasyonlarla ilgili kısıtlama parametreleri yerleştirilmektedir. Bu parametrelerin büyük değerde seğilmesiyle

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 göstermektedir. Bu rotasyonlarla ilgili gerilmeler,

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

bağıntısıyla hesaplanmaktadır. P_w dönmeye ait gerilmeyi, α_f rotasyonla ilgili kısıtlama parametresini göstermek üzere (1) ve (4) eşitlikleri kullanılarak iki boyutlu sıvının matris formundaki gerilme-şekildeğiştirme bağıntısı aşağıdaki gibi yazılabilir:

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

ya da

$$\{\sigma_f\} = [D_f] \{e\} \quad (6)$$

Burada $\{\sigma_f\}$ sıvının gerilme vektörünü, $[D_f]$ elastisite matrisini ve $\{e\}$ ise $\{e\}^T = \{\varepsilon_v \quad w\}$ şeklinde verilen şekildeğiştirme vektörünü göstermektedir.

Sıvı sistemin sonlu eleman formülasyonu enerji prensiplerinden yararlanılarak elde edilmektedir. Bir sıvı sistemin toplam şekildeğiştirme enerjisi,

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

şeklinde ifade edilir. Sonlu elemanlar yöntemini kullanarak (7) denklemini 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 değişme olmadan yerdeğiştirme yapabilmesidir. Baraj rezervuarları ve sıvı 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 gibi 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 sistemin 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 ve z doğrultularındaki hız bileşenlerini göstermektedir. Sonlu Elemanlar Yöntemini kullanarak (12) denklemi 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 sistemin hareket denklemi aşağıdaki Lagrange denklemi kullanılarak elde edilebilir (Clough ve Penzien, 1993).

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

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

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

veya

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

eşitlikleri elde edilir. Bu ifadede, $[K_f^*]$ sıvı serbest yüzey rijitliklerini de içeren sıvı sistemin 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.

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).

1.5.1.2. Sıvı-Yapı-Zemin Etkileşim Sistemlerinin Sonlu Eleman Formülasyonu

Sıvı-yapı sisteminin ortak hareket denklemleri her iki sisteme ait eşitliklerin arayüzey şartı dikkate alınarak birleştirilmesiyle elde edilmektedir. Bu nedenle, ortak sistemin arayüzey şartının belirlenmesi gerekmektedir. Sıvının viskoz olmadığı kabul edildiğinden ortak sistemin ara yüzeyinde, yalnızca arayüzey normalindeki yerdeğişmeler sürekli, teğet yerdeğişmeler ise süreksiz olmaktadır. Ortak sistemin arayüzeyinde, yapı kısmının pozitif yüzeye ve sıvı kısmının negatif yüzeye sahip olduğu kabul edilirse arayüzey şartı,

$$U_n^- = U_n^+ \quad (17)$$

şeklinde yazılabilir (Akkaş vd., 1979). Burada, U_n arayüzeye normal yerdeğişirmeyi göstermektedir. Bu şart, sıvı-yapı ya da sıvı-zemin arayüzeyinde arayüzeye normal doğrultuda karşılıklı düğüm noktaları arasına kısa ve yeterli rijitliğe sahip çubuk elemanlar yerleştirilerek (Akkaş vd., 1979) veya bu çalışmada olduğu gibi ortak sistemin ara yüzeyinde karşılıklı düğüm noktalarında ceza metodu (Bathe, 1996) kullanılarak da sağlanabilir.

Arayüzey şartları dikkate alınarak, n serbestlik dereceli sıvı-yapı sistemlerinin yer hareketi altındaki sönümlü hale ait ortak hareket denklemi,

$$[M]\{\ddot{U}\} + [C]\{\dot{U}\} + [K]\{U\} = \{F\} \quad (18)$$

şeklinde yazılabilir. Burada $[M]$, $[C]$, $[K]$ sırasıyla ortak sistemin kütle, sönüm ve rijitlik matrislerini; $\{\ddot{U}\}$, $\{\dot{U}\}$, $\{U\}$ ise sırasıyla toplam ivme, hız ve yerdeğişirme vektörlerini, $\{F\}$ ise dış yük vektörünü göstermektedir. Lagrange yaklaşımına dayalı sıvı-yapı sisteminin hareket denklemi, (18), simetrik sistem matrislerine sahip olduğundan herhangi bir yapı sisteminin hareket denklemi ile benzer bir formdadır. Bu nedenle, yapı analizi için kullanılan çözüm yöntemleri sıvı-yapı sistemi için de kullanılabilir. Bu da sıvı-yapı etkileşim sistemlerinin çözümünde Lagrange yaklaşımının tercih edilmesinin en önemli sebebidir (Bayraktar, 1995; Akköse ve Dumanoglu, 1998; Oskouei ve Dumanoglu, 2001;

Akköse, 2004; Bayraktar vd., 2005a; 2005b; 2005c; Parrinello ve Borino, 2007; Bayram, 2008).

1.5.2. Malzeme Bakımından Lineer Olmayan Davranış Formülasyonu

Dolgu tipinde inşa edilen barajlarda, zaman içinde gerçekleşen oturmalar ve şiddetli deprem etkileri altında oluşan kalıcı şekildeğişimler kaya dolgunun lineer davranmadığını göstermektedir. Zemin tabakalarında elastik modüller 10^{-4} mertebelerindeki şekildeğişimler için tanımlanırken, deprem sırasında kayma şekildeğişimleri 10^{-2} ile 10^{-1} mertebelerine kadar çıkabilmektedir. Dolgu barajların lineer olmayan davranışının hesabı için Seed ve Idriss (1970) eşdeğer lineer dinamik analiz yöntemini geliştirmiştir. Bu yöntemde, önce, yapı-zemin sistemini oluşturan tüm elemanların küçük şekildeğişimlerdeki viskoelastik özellikleri ile hesap yapılmakta ve seçilen deprem hareketi için elemanlarda oluşan maksimum birim şekildeğişimler hesaplanmaktadır. Daha sonra, her elemandaki etkili birim şekildeğiştirme maksimum değerinin bir çarpanı olarak kabul edilip, kayma modülü ve sönüm oranı bu birim şekildeğiştirmede alacağı değerlerle değiştirilerek tekrar tüm sistem analiz edilerek lineer olmayan davranış yaklaşık olarak elde edilmektedir (Hacıfendioğlu, 2004).

Bu çalışmada, kaya dolgu ve üzerine oturduğu kaya zemin için kayma modülü-kayma şekildeğiştirme eğrilerinden yararlanılarak tek eksenli gerilme-şekildeğiştirme ilişkileri elde edilmiştir. Elde edilen gerilme-şekildeğiştirme eğrileri kullanılarak kaya dolgu ve kaya zemininin statik ve dinamik yükler altındaki lineer olmayan davranışı çok yönlü kinematik pekleşme modeli ile belirlenmiştir. Beton plağın lineer olmayan davranışı ise Drucker-Prager modeli kullanılarak elde edilmiştir.

1.5.2.1. Pekleşme Modelleri

Bu bölümde kinematik pekleşme modelleri verilmiştir. Pekleşme eşitlikleri ilk aşamada çift yönlü pekleşme teorisiyle birlikte klasik von Mises teorisi için sunulmuştur. Bu eşitlikler daha sonra daha karmaşık çok yönlü kinematik pekleşme eşitliklerini elde etmek için değiştirilmiştir.

1.5.2.1.1. Temel Tanımlar

Deviatorik gerilme uzayında akma yüzeyinin merkezi α_{ij} tensörüyle tanımlıdır. Deviatorik gerilme tensörü aşağıdaki gibi yazılabilir (Allen ve Wilson, 2004).

$$S_{ij} = \sigma_{ij} - \delta_{ij}\sigma_m \quad (i, j = 1,2,3) \quad (19)$$

Burada, σ_{ij} , δ_{ij} ve σ_m sırasıyla, gerilme tensörünü, kroneker deltayı ve ortalama gerilmeyi temsil etmektedir. Gerilme farkı, ξ_{ij} , aşağıdaki gibi tanımlanabilir.

$$\xi_{ij} = S_{ij} - \alpha_{ij} \quad (i, j = 1,2,3) \quad (20)$$

Gerilme farkının büyüklüğü, R_d ,

$$R_d = |\xi_{ij}| = \sqrt{\xi_{ij}\xi_{ij}} \quad (21)$$

ifadesiyle tanımlanır (Allen ve Wilson, 2004). ξ_{ij} , α_{ij} ve S_{ij} arasındaki geometrik ilişki, gerilme farkının büyüklüğünün, R_d , yarıçap olarak dikkate alınmasını gerektirmektedir. Gerilme farkı cinsinden von Mises akma yüzeyi, f,

$$f = \frac{1}{2}\xi_{ij}\xi_{ij} = k^2 \quad (22)$$

olarak ifade edilebilir. Burada k kayma gerilmesinin akma dayanımı olup, efektif gerilme ise aşağıdaki gibi yazılabilir.

$$\sigma_{\text{eff}} = \sqrt{\frac{3}{2}\xi_{ij}\xi_{ij}} \quad (23)$$

(21) ve (23) denklemleri birleştirilirse, R_d ,

$$R_d = \sqrt{\frac{2}{3}} \sigma_{eff} \quad (24)$$

olarak elde edilir. Q_{ij} , normal akma yüzeyi bu durumda (22) denklemi kullanılarak,

$$Q_{ij} = \frac{\partial f / \partial \sigma_{ij}}{|f / \partial \sigma_{ij}|} = \frac{\zeta_{ij}}{R_d} \quad (25)$$

elde edilir. Normallik koşulunu dikkate alarak, şekildeğiştirmenin plastik kısmı aşağıdaki gibi verilebilir.

$$\varepsilon_{ij}^{pl} = \gamma Q_{ij} \quad (26)$$

Burada γ belirlenmesi gereken bir skaler çarpandır.

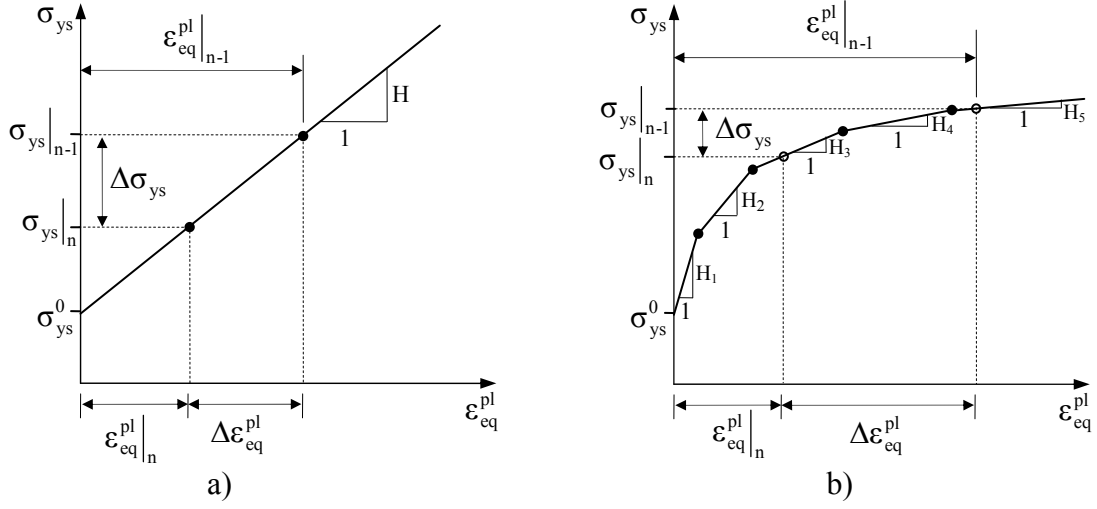
1.5.2.1.2. Karma Çift Yönlü Pekleşme Modeli

İki pekleşme tipinin lineer birleşimi kabul edilerek, her bir pekleşme tipinin miktarını belirleyen β_s gibi bir skaler parametre $0 \leq \beta_s \leq 1$ aralığında tanımlanabilir (Allen ve Wilson, 2004). Burada, $\beta_s = 1$ yalnızca izotropik pekleşmeye ve $\beta_s = 0$ yalnızca kinematik pekleşmeye karşılık gelmektedir. R_d ve α_{ij} için ilgili denklemler aşağıdaki gibi yazılabilir.

$$R_d = \sqrt{\frac{2}{3}} H \varepsilon_{eq}^{pl} \beta_s \quad (27)$$

$$\alpha_{ij} = \frac{2}{3} H \gamma Q_{ij} (1 - \beta_s) \quad (28)$$

Burada H eşdeğer gerilmenin eşdeğer plastik şekildeğiştirmeye oranıdır (Şekil 1).



Şekil 1. Akma gerilmesi ve eşdeğer plastik şekildeğiştirme ilişkisi a) çift yönlü pekleşme durumu b) çok yönlü pekleşme durumu (Allen ve Wilson, 2004)

Uygunluk denklemi,

$$Q_{ij} \xi_{ij} = R_d \quad (29)$$

ya da

$$Q_{ij} (S_{ij} - \alpha_{ij}) = \sqrt{\frac{2}{3}} H \epsilon_{eq}^{pl} \beta_s \quad (30)$$

şeklinde yazılabilir (Allen ve Wilson, 2004).

İlave şekildeğiştirme oranı ayrıştırması ve elastik gerilme oranı ile (30) denklemi ve tensör çarpımı normal alınarak, Q_{ij} aşağıdaki ifadeyi vermektedir (Allen ve Wilson, 2004).

$$Q_{ij} \sigma_{ij}^{pr} - \gamma Q_{ij} D_{ijkl} Q_{kl} - Q_{ij} \left[\frac{2}{3} H \gamma (1 - \beta_s) \right] Q_{ij} = Q_{ij} \left[\sqrt{\frac{2}{3}} H \sqrt{\frac{2}{3}} \beta_s \gamma \right] Q_{ij} \quad (31)$$

Böylece γ ifadesi aşağıdaki gibi elde edilebilir.

$$\gamma = \frac{1}{\left(1 + \frac{H}{3G}\right)} Q_{ij} \varepsilon_{ij} \quad (32)$$

Bu durumda bünye denklemlerinin artımsal hali,

$$\sigma_{ij} \Big|_{n+1} = \sigma_{ij}^{pr} \Big|_{n+1} - \Delta\gamma 2G Q_{ij} \quad (33)$$

$$R_d \Big|_{n+1} = R_d \Big|_n + \frac{2}{3} H \Delta\gamma \beta_s \quad (34)$$

$$\alpha_{ij} \Big|_{n+1} = \alpha_{ij} \Big|_n + \frac{2}{3} H \Delta\gamma Q_{ij} (1 - \beta_s) \quad (35)$$

şeklinde yazılabilir (Allen ve Wilson, 2004).

Uygunluk şartlarının artımsal hali aşağıdaki gibi

$$\alpha_{ij} \Big|_{n+1} + R_d \Big|_{n+1} Q_{ij} = S_{ij} \Big|_{n+1} \quad (36)$$

ifade edilebilir (Allen ve Wilson, 2004).

Denklem (33) ve (35)'te verilen uygunluk şartlarında, (36) denklemi yerine yazılırsa,

$$\left[\alpha_{ij} \Big|_n + \frac{2}{3} H \Delta\gamma Q_{ij} (1 - \beta_s) \right] + \left[R_d \Big|_n + \frac{2}{3} H \Delta\gamma \beta_s \right] Q_{ij} = S_{ij}^{pr} \Big|_{n+1} - \Delta\gamma 2G Q_{ij} \quad (37)$$

ifadesi bulunur. Q_{ij} içeren bir önceki eşitliğin her iki yanındaki tensör çarpanlarını çekerek ve $\Delta\gamma$ için çözüm yaparak aşağıdaki ifade elde edilir.

$$\Delta\gamma = \frac{1}{2G \left(1 + \frac{H}{3G}\right)} \left(\left| \xi_{ij}^{pr} \Big|_{n+1} \right| - R_d \Big|_n \right) \quad (38)$$

Yukarıdaki eşitlik plastik şekildeğiştirme artışının akma yüzeyini geçen gerilmeyi elastik tahmin edicinin mesafesinin büyüklüğüyle orantılı olduğunu göstermektedir. Ayrıca plastik şekildeğiştirme artışı,

$$\Delta \varepsilon_{ij}^{pl} = Q_{ij} \Delta \gamma \quad (39)$$

veya

$$\Delta \varepsilon_{eq}^{pl} = \sqrt{\frac{2}{3}} \Delta \gamma \quad (40)$$

şeklinde hesaplanabilir (Taylor ve Flanagan, 1998). Böylece, $\Delta \sigma_{eff}$ efektif gerilme artışı,

$$\Delta \sigma_{eff} = H \Delta \varepsilon_{eq}^{pl} = H \sqrt{\frac{2}{3}} \Delta \gamma \quad (41)$$

olarak elde edilebilir.

1.5.2.1.3. Karma Çok Yönlü Pekleşme Modeli

Çok yönlü pekleşme durumuna ait denklemler çift yönlü durumdakine benzemektedir. Ancak, bu durumda eşdeğer gerilmenin eşdeğer şekildeğiştirmeye oranı, H , artık sabit olmamaktadır (Şekil 1). Bu durumda $\Delta \sigma_{eff}$ efektif gerilme artışı çok yönlü pekleşme modelinde,

$$\Delta \sigma_{eff} = h(\varepsilon_{eq}^{pl}) \Delta \varepsilon_{eq}^{pl} = h(\varepsilon_{eq}^{pl}) \sqrt{\frac{2}{3}} \Delta \gamma \quad (42)$$

şeklinde yazılmaktadır (Allen ve Wilson, 2004). Burada $h(\varepsilon_{eq}^{pl})$ bir pekleşme fonksiyonudur. $h(\varepsilon_{eq}^{pl})$ ifadesi H için (27) ve (28) denklemlerinde yerine yazılırsa ve integrali alınırsa,

$$\Delta R_d = \beta_s \sqrt{\frac{2}{3}} \left[h(\varepsilon_{eq}^{pl}|_n + \Delta \varepsilon_{eq}^{pl}) - h(\varepsilon_{eq}^{pl}|_n) \right] \quad (43)$$

$$\Delta \alpha_{ij} = (1 - \beta_s) \frac{2}{3} \left[h(\varepsilon_{eq}^{pl}|_n + \Delta \varepsilon_{eq}^{pl}) - h(\varepsilon_{eq}^{pl}|_n) \right] Q_{ij}|_{n+1} \quad (44)$$

ifadeleri bulunur. (36) denklemi (43) ve (44) denklemleri cinsinden yeniden yazılırsa,

$$S_{ij}^{pr} - \alpha_{ij}|_n = \left\{ 2G \sqrt{\frac{3}{2}} \Delta \varepsilon_{eq}^{pl} + R_d|_n + \sqrt{\frac{2}{3}} \left[h(\varepsilon_{eq}^{pl}|_n + \Delta \varepsilon_{eq}^{pl}) - h(\varepsilon_{eq}^{pl}|_n) \right] \right\} Q_{ij}|_{n+1} \quad (45)$$

ifadesi elde edilir. Burada $R_d|_{n+1} = R_d|_n + \Delta R_d$ olmakla birlikte, bu eşitliğin her iki yanı $Q_{ij}|_{n+1}$ ile çarpılırsa,

$$2G \Delta \varepsilon_{eq}^{pl} + \frac{2}{3} \left[h(\varepsilon_{eq}^{pl}|_n + \Delta \varepsilon_{eq}^{pl}) - h(\varepsilon_{eq}^{pl}|_n) \right] = \sqrt{\frac{2}{3}} \left[(S_{ij}^{pr} - \alpha_{ij}|_n) - R_d|_n \right] \quad (46)$$

$\Delta \varepsilon_{eq}^{pl}$ için çözülebilecek lineer olmayan denklem elde edilir (Allen ve Wilson, 2004). $\Delta \varepsilon_{eq}^{pl}$ elde edildikten sonra, geri kalan artımsal elasto-plastik eşitlikler çift yönlü pekleşme durumunda verildiği gibi çözülebilir.

1.5.2.1.4. Drucker-Prager Malzeme Modeli

Malzemelerin akma yüzeyinin ya da akma fonksiyonlarının belirlenmesinde bir çok kriter vardır. Drucker-Prager modeli bu etkilerin göz önüne alınabildiği, kaya ve beton gibi sürtünmeli malzemeler için yaygın şekilde kullanılan bir elasto-plastik malzeme modelidir. Drucker ve Prager (1952) betonun elasto-plastik davranışını elde etmek için von-Mises kriterinin hidrostatik gerilme etkisini içerecek şekilde Mohr-Coulomb kriterini düzleştirerek uygun bir akma fonksiyonu elde etmiştir. Bu fonksiyon,

$$f = \alpha_d I_1 + \sqrt{J_2} - k_d \quad (47)$$

ifadesi ile tanımlanmaktadır (Drucker ve Prager, 1952). Burada, α_d ve k_d ilgili malzemenin kohezyon (c) ve içsel sürtünme açısına (ϕ) bağlı sabitler olup (48) denklemindeki gibi elde edilmektedir.

$$\begin{aligned}\alpha_d &= \frac{2 \sin \phi}{\sqrt{3} (3 - \sin \phi)} \\ k_d &= \frac{6c \cos \phi}{\sqrt{3} (3 - \sin \phi)}\end{aligned}\quad (48)$$

Denklem (47)'de I_1 , (σ_{ij}) gerilme tensörünün birinci invariantı,

$$I_1 = \sigma_{11} + \sigma_{22} + \sigma_{33} \quad (49)$$

ve J_2 (S_{ij}) deviatorik gerilme tensörünün ikinci invariantı olup,

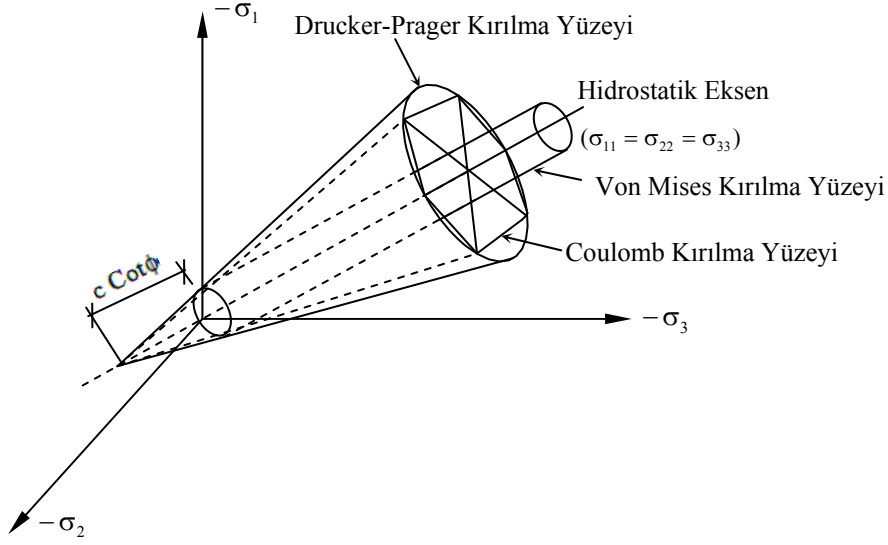
$$J_2 = \frac{1}{2} S_{ij} S_{ij} \quad (50)$$

ya da

$$J_2 = \frac{1}{6} \left[(\sigma_{11} - \sigma_{22})^2 + (\sigma_{22} - \sigma_{33})^2 + (\sigma_{33} - \sigma_{11})^2 \right] + \sigma_{12}^2 + \sigma_{13}^2 + \sigma_{23}^2 \quad (51)$$

şeklinde yazılabilir.

Drucker-Prager kriteri için kırılma yüzeyi, Mohr-Coulomb kriterinin altıgen akma yüzeyinin köşelerine temas ederek çevreleyecek şekilde malzeme parametrelerine sahip bir koni biçimindedir (Chen ve Mizuno, 1990). Bu grafiksel gösterim malzemenin çekme ve basınçtaki davranışlarının farklı olduğunu göstermektedir. Şekil 2'de görülen σ_1 , σ_2 ve σ_3 büyüklükleri asal gerilmeleri temsil etmektedir.



Şekil 2. Coulomb, Drucker-Prager ve von Mises kırılma kriterleri (Chen ve Mizuno, 1990)

1.5.3. Geometri Bakımından Lineer Olmayan Davranış

Yapılara etki eden kuvvetler, belli bir seviyenin altında kalması halinde yapının lineer davranışını değiştirmezler. Ancak, yük belirli bir seviyeye çıkınca malzemenin elastisite modülü ile yapı elemanının mesnetlenme şekli ve atalet momentlerine bağlı olarak yapı lineer olmayan davranış gösterebilir. Bu lineer olmama durumu, yapı elemanlarının ve buna bağlı olarak yapının rijitlik matrisinin yükün büyüklüğüne göre değişmesinden kaynaklanmaktadır. Rijitlik matrisindeki bu değişim geometrik rijitlik matrisi ve geometrik rijitlik matrisinin lineer rijitlik matrisiyle toplamına da sistem rijitlik matrisi denilmektedir. Bu tür lineer olmama durumunun hesaplara katılmasıyla yapılan analize ikinci mertebeye hesaba veya geometri bakımından lineer olmayan analiz denilmektedir (Aksoğan, 1986). Lineer olmayan analizin zorunlu olduğu durumlarda rijitlik matrisi her yük adımında yeniden oluşturulur.

Büyük yerdeğiştirme yapan yapılarda kuvvet denge denklemleri yapının şekil değiştirmiş hali üzerinde yazılır. Bunun anlamı;

$$\{F\} = [K]\{U\} \quad (52)$$

şeklindeki lineer bağıntının artık geçerli olmadığıdır (Przemieniecki, 1968). Eleman matrisleri ve yük vektörleri güncellenmiş Lagrange formülasyonu kullanılarak elde edilmelidir. Bu durumda aşağıdaki ifade yazılabilir (ANSYS 11.0, 2009).

$$[\bar{K}] \Delta u = \{F\} - \{F^{nr}\} \quad (53)$$

Burada, $[\bar{K}]$ tanjant rijitlik matrisi olup aşağıdaki gibi verilebilir.

$$[\bar{K}] = [K_E] + [K_G] \quad (54)$$

Denklem (54)'te $[K_E]$ başlangıç elastik rijitlik matrisi olup,

$$[K_E] = \int [B]^T [D] [B] dV \quad (55)$$

şeklinde verilebilir. Burada, $[D]$ elastisite matrisini, $[B]$ ise mevcut geometri için yerdeğiştirme-şekildeğiştirme matrisini göstermektedir.

$[K_G]$ geometrik rijitlik katkısı olup,

$$[K_G] = \int [G]^T [\tau_G] [G] dV \quad (56)$$

ifadesi ile temsil edilmektedir. Burada, $[G]$ şekil fonksiyonunun türev matrisi ve $[\tau_G]$ mevcut $\{\sigma\}$ Cauchy gerilmelerinin global kartezyen sistemdeki matrisini ifade etmektedir. $\{F^{nr}\}$ Newton-Raphson geri çağırım kuvveti olup aşağıdaki gibi verilebilir.

$$\{F^{nr}\} = \int [B]^T \{\sigma\} dV \quad (57)$$

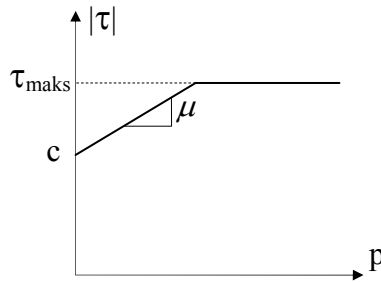
1.5.4. Temas Problemleri

İki ortam birbiriyle ayrık ya da temas halinde bulunabilir. Ortamlar arasında temas bulunması halinde aradaki davranış Coulomb sürtünme yasasına bağlı olarak elde

edilmektedir. Temel Coulomb sürtünme modelinde, temas eden iki yüzey bir birine göre kayma hareketine başlamadan önce, arayüzeyleri boyunca belli bir kayma gerilmesi seviyesine kadar kayma gerilmesi taşıyabilirler (yapışık durum) (Wriggers, 2006). Coulomb sürtünme modeli yüzeyde kaymanın P temas basıncının bir bölümü olarak başladığı bir τ eşdeğer kayma gerilmesi tanımlar. Bu gerilme,

$$\tau = \mu P + c \quad (58)$$

olarak ifade edilebilir (ANSYS, 2009). Burada μ sürtünme katsayısını ve c kaymaya karşı mukavemeti temsil eder. Kayma gerilmesi bir kez aşıldı mı, iki yüzey bir diğerine göre rölatif olarak hareket eder (kayma durumu). Yapışma-kayma hesaplamaları bir noktanın yapışmadan-kaymaya ya da kaymadan-yapışmaya geçişini belirler. Sürtünme katsayısının 0 olması sürtünmesiz temas problemlerini işaret etmektedir. Pürüzlü ve bağlı temaslar için dinamik sürtünme katsayısı 1 olarak dikkate işleme alınır. ANSYS (2009) sonlu eleman yazılımında maksimum kayma gerilmesi (τ_{maks}) temas basıncından, bağımsız olarak tanımlanabilir. Eğer sürtünme gerilmesi bu değere ulaşırsa kayma oluşmaktadır. En büyük kayma gerilmesi ampirik formüller ile hesaplanabilir. Ayrıca, bu değer $\frac{\sigma_y}{\sqrt{3}}$ ifadesine de yaklaşabilir (ANSYS, 2009). Burada σ_y , malzemenin deformasyona uğrayacağı akma gerilmesidir. Bir diğer sabit olan kohezyon da kayma gerilmesi gibi gerilme birimine sahiptir ve sıfır normal basıncı olsa bile kaymaya karşı mukavemet sağlar (Şekil 3).



Şekil 3. Coulomb sürtünme yasasına göre temas durumunda kayma davranışı (ANSYS, 2009)

1.6. Güvenilirlik Analiz Formülasyonu

1.6.1. Güvenilirlik Analizinde Temel Kavramlar

1.6.1.1. Lognormal Dağılım

Rastgele bir değişken, kendisine ait eklenik dağılım fonksiyonu ($F_X(x)$) ve bunun türevi olan olasılık yoğunluk fonksiyonu ($f_X(x)$) ile tanımlanır. Herhangi bir rastgele değişken için bu fonksiyonlar elde edilebilmektedir. Ancak, pratikte, belli formda bazı fonksiyonların birçok rastgele değişkenlerin dağılımlarını iyi ifade ettikleri görülmektedir. Güvenilirlik analizlerinde üniform, normal, lognormal, gamma, gumbel, weibull ve poisson dağılımları yaygın olarak kullanılan en önemli dağılımlardır. Bu çalışmadaki değişken parametrelerin tanımlanmasında lognormal dağılım kullanılmıştır. Lognormal dağılım, normal dağılımın özellikleri kullanılarak oluşturulmuş bir dağılımdır. $Y = \ln(X)$ normal dağılım özelliği gösterdiğinde, X lognormal rastgele bir değişkendir. Lognormal rastgele değişkenler sadece pozitif değerler için tanımlıdır ($x \geq 0$). Lognormal dağılımın olasılık yoğunluk fonksiyonu (Nowak ve Collins, 2000),

$$f_X(x) = \frac{1}{x \sigma_{\ln(x)}} \phi\left(\frac{\ln x - \mu_{\ln(x)}}{\sigma_{\ln(x)}}\right) \quad (59)$$

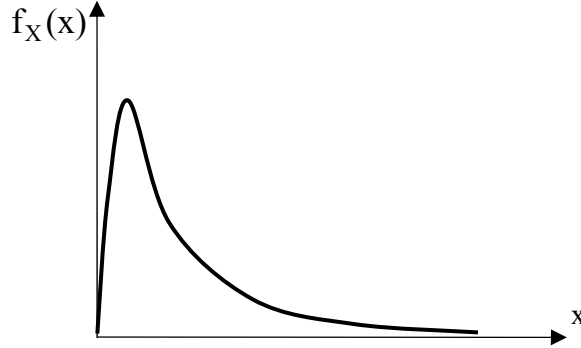
şeklinde ifade edilebilir. Burada $\mu_{\ln(x)}$ ve $\sigma_{\ln(x)}$, sırasıyla, $\ln(x)$ 'in ortalamasını ve standart sapmasını göstermektedir ve değerleri (Nowak ve Collins, 2000),

$$\begin{aligned} \mu_{\ln(x)} &= \ln(\mu_X) - \frac{1}{2} \sigma_{\ln(x)}^2 \\ \sigma_{\ln(x)} &= \sqrt{\ln(V_X^2 + 1)} \end{aligned} \quad (60)$$

ifadeleri ile elde edilir. Bu dağılıma ait eklenik dağılım fonksiyonu,

$$F_X(x) = \Phi\left(\frac{\ln(x) - \mu_{\ln(x)}}{\sigma_{\ln(x)}}\right) \quad (61)$$

olarak tanımlanır (Nowak ve Collins, 2000). Şekil 4'te lognormal dağılıma ait bir değişkenin olasılık yoğunluk fonksiyonu verilmektedir.



Şekil 4. Lognormal dağılıma sahip bir değişkenin olasılık yoğunluk fonksiyonu

1.6.1.2. Limit Durum

Bir yapının emniyetini belirleyebilmek için yapı davranışını tehlikeye sokacak unsurların sınırlarının tanımlanması gerekmektedir. Güvenilirlik analizinde, tanımlanan bu sınırlara limit durum denilmektedir. Dolayısıyla, limit durum, yapının istenen ve istenmeyen performansı arasındaki bir sınırdır. Limit durumun ihlali, yapı için istenilmeyen koşulun oluşması anlamına gelmektedir. Tablo 1'de bazı limit durum örnekleri verilmektedir.

Tablo 1. Yapılar için limit durum çeşitleri (Melchers, 1999)

Limit Durum	Tanımlama	Örnekler
Nihai emniyet	Yapının tamamen veya bir kısmının göçmesi	Kopma, kırılma, aşamalı göçme, korozyon, yangın...
Hasar		Aşırı veya erken oluşan çatlaklar, deformasyonlar veya kalıcı elastik olmayan deformasyonlar
Kullanılabilirlik	Normal kullanımın aksaması	Aşırı eğilme, titreşimler, yerel hasarlar

1.6.1.3. Göçme Olasılığı

Yapılar için tanımlanan limit durum, matematiksel olarak limit durum fonksiyonu veya performans fonksiyonu olarak adlandırılmaktadır. R ve Q sırasıyla dayanım ve yük

etkisini göstermek üzere limit durum fonksiyonu (Nowak ve Collins, 2000; Ditlevsen ve Madsen, 2002),

$$g(R, Q) = R - Q \quad (62)$$

olarak tanımlanmaktadır. $X_1, X_2, X_3, \dots, X_n$ yapıları temsil eden yük ve dayanım parametrelerini (sabit yük, hareketli yük, uzunluk, derinlik, basınç dayanımı, atalet momenti...) gösterirse limit durum fonksiyon koşulları,

$$g(X_1, X_2, X_3, \dots, X_n) > 0 \rightarrow \text{emniyetli durum}$$

$$g(X_1, X_2, X_3, \dots, X_n) = 0 \rightarrow \text{emniyetli ve emniyetsiz arasında sınır durum}$$

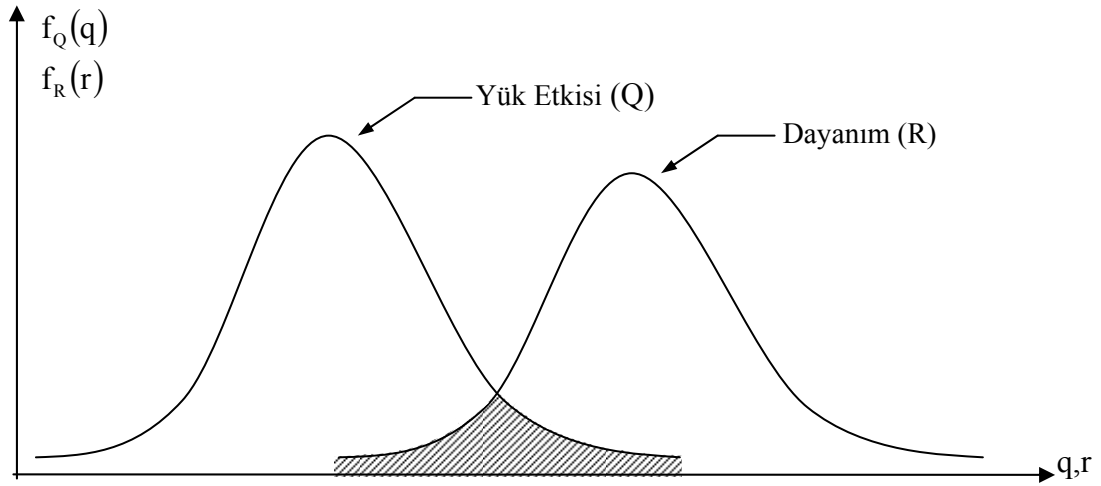
$$g(X_1, X_2, X_3, \dots, X_n) < 0 \rightarrow \text{emniyetsiz durum}$$

şeklinde gösterilebilir (Schueremans, 2003). Bir yapı elemanının üzerine etkiyen yük, dayanımından fazla olduğunda göçeceği dikkate alınırsa göçme olasılığı,

$$P_f = \begin{cases} P(R \leq Q) \\ P(R - Q \leq 0) \\ P\left(\frac{R}{Q} \leq 1\right) \\ P(\ln R - \ln Q \leq 0) \\ P[G(R - Q) \leq 0] \end{cases} \quad (63)$$

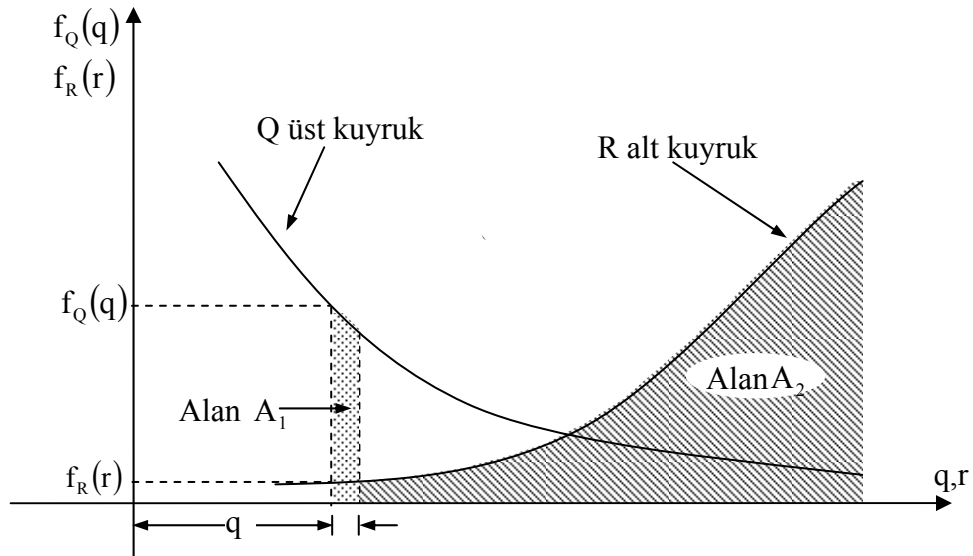
şeklinde farklı biçimlerde ifade edilebilir (Melchers, 1999).

Dayanım ve yük etkisi için olasılık yoğunluk fonksiyonları sırasıyla $f_R(\cdot)$ ve $f_Q(\cdot)$ olarak tanımlanırsa, R ve Q'nun yoğunluk fonksiyonları Şekil 5'teki gibi gösterilebilir. Burada taralı alan göçme olasılığının değerini göstermektedir.



Şekil 5. Rastgele dağılım gösteren Q ve R için göçme olasılığı (Ranganathan, 2000)

Yükün (Q) olasılık değeri q ile ifade edilirse, Şekil 6'da gösterilen A_1 alanı bu değere eşit olur.



Şekil 6. Güvenilirliğin belirlenmesi (Ranganathan, 2000)

Buna göre A_1 alanı,

$$P\left(q - \frac{dq}{2} < Q < q + \frac{dq}{2}\right) = f_q(q) dq = A_1 \quad (64)$$

şeklinde ifade edilebilir (Ranganathan, 2000). $R > q$ olasılığı Şekil 6'da gösterilen A_2 alanına eşittir. A_2 alanı,

$$P(R > q) = \int_q^{\infty} f_Q(q) dq = A_2 \quad (65)$$

olarak ifade edilebilir. Dayanım q değerini alırsa, güvenilirlik bu iki olasılığın türünden yazılabilir. Buna göre,

$$dR_0 = f_q(q) dq \int_0^{\infty} f_R(r) dr \quad (66)$$

şeklinde ifade edilebilir. Yapının güvenilirliği (R_0), dayanımın, yükün bütün muhtemel değerlerinden daha büyük olma olasılığı olarak tanımlanabilir. R_0 değeri,

$$R_0 = \int dR_0 = \int_{-\infty}^{\infty} f_q(q) \left[\int_q^{\infty} f_R(r) dr \right] dq \quad -\infty \leq q \leq \infty \quad (67)$$

olarak elde edilir (Ranganathan, 2000).

Göçme olasılığı, P_f ,

$$P_f = 1 - R_0 = 1 - \int_{-\infty}^{\infty} f_q(q) [1 - F_R(q)] dq \quad (68)$$

$$P_f = \int_{-\infty}^{\infty} f_q(q) F_R(q) dq \quad (69)$$

olarak hesaplanır. Bu ifadenin genelleştirilmiş hali,

$$P_f = P[g(X) \leq 0] = \int_{g(X) \leq 0} f_X(X) dx \quad (70)$$

şeklinde yazılabilir (Thoft-Christensen ve Baker, 1982; Thoft-Christensen ve Murotsu, 1986).

1.6.2. Güvenilirlik Analiz Yöntemleri

Göçme olasılığını elde etmek için (70) nolu denklemdeki çoklu integralin hesaplanması gerekmektedir. Ancak, bir gerçek yapının veya sistemin olasılık yoğunluk fonksiyonunu (70) nolu denklemi kullanarak hesaplamak oldukça zordur. Çünkü pratikte, bütün rastgele değişkenlerin ortak olasılık yoğunluk fonksiyonlarını bir alanda tanımlamak imkânsızdır. Bu nedenle, yapı güvenilirliğini elde etmek için yaklaşık yöntemler kullanılmaktadır. Bu yöntemler, Birinci Derece Güvenilirlik Yöntemi, İkinci Derece Güvenilirlik Yöntemi ve bu yöntemler temel alınarak geliştirilmiş güvenilirlik yöntemleri (Tvedt, 1983; Der Kiureghian vd., 1987; Tvedt, 1988; Hohenbichler ve Rackwitz, 1988; Tvedt, 1990; Der Kiureghian ve De Stefano, 1991; Karamchandani ve Cornell, 1991; Breitung, 1994; Koyluoglu ve Nielsen, 1994; Cai ve Elishakoff, 1994; Zhao ve Ono, 1999a; Zhao ve Ono, 1999b) olarak sıralanabilir. Bu yöntemler, genellikle, değişken parametrelerin açık şekilde ifade edildiği açık limit durum fonksiyonuna göre çözüm yapmaktadır. Kompleks yapıların güvenilirlik analizlerinde, limit durum fonksiyonlarını yapıların belirsiz parametrelerine bağlı olarak elde etmek zor bir iştir. Bu nedenle, bu tür yapıların analizinde kapalı limit durum fonksiyonları kullanılmaktadır.

Yapı sistemlerinde belirli noktaların seçilen limit durum fonksiyonlarına göre göçme olasılıklarının belirlenmesinde MCY yeterli koşum sayısında mevcut belirsiz parametreler ve dağılımları için gerçek göçme olasılığı değerlerini vermektedir. Ancak, çok yüksek sayıdaki koşum gereksinimleri nedeniyle genellikle yaklaşık yöntemler tercih edilmektedir.

Bu tez çalışmasında, modellerin tanımlanmasında Sonlu Elemanlar Yöntemi kullanılmıştır. Dolayısıyla, güvenilirlik analizleri kapalı limit durum fonksiyonları kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Bu amaçla, Sonlu Elemanlar Yöntemi ve açık limit durum fonksiyonlarının güvenilirlik analizlerinde kullanılan Birinci Derece Güvenilirlik Yöntemi tabanlı Geliştirilmiş Rackwitz-Fiessler Yöntemi ve Monte Carlo Yöntemi birleştirilmiştir. Bu birleşim için Direkt Birleştirme ve Yanıt Yüzeyi Yöntemleri kullanılmıştır. Aşağıda bu yöntemler hakkında bilgiler verilmektedir.

1.6.2.1. Açık Limit Durum Fonksiyonu ile Güvenilirlik Analizi

1.6.2.1.1. Birinci Derece Güvenilirlik Yöntemi

Güvenilirlik analizinde, ilk adım olarak, bütün değişkenler standart normal formlarına (sıfır ortalamalı birim varyanslı normal dağılım) dönüştürülürler. Böylece, değişkenler boyutsuz bir ortamda temsil edilebilmektedir. İndirgenmiş değişken, Z_i , ile gösterilirse, normal dağılımlı bir değişken için aşağıdaki gibi verilebilir (Melchers, 1999).

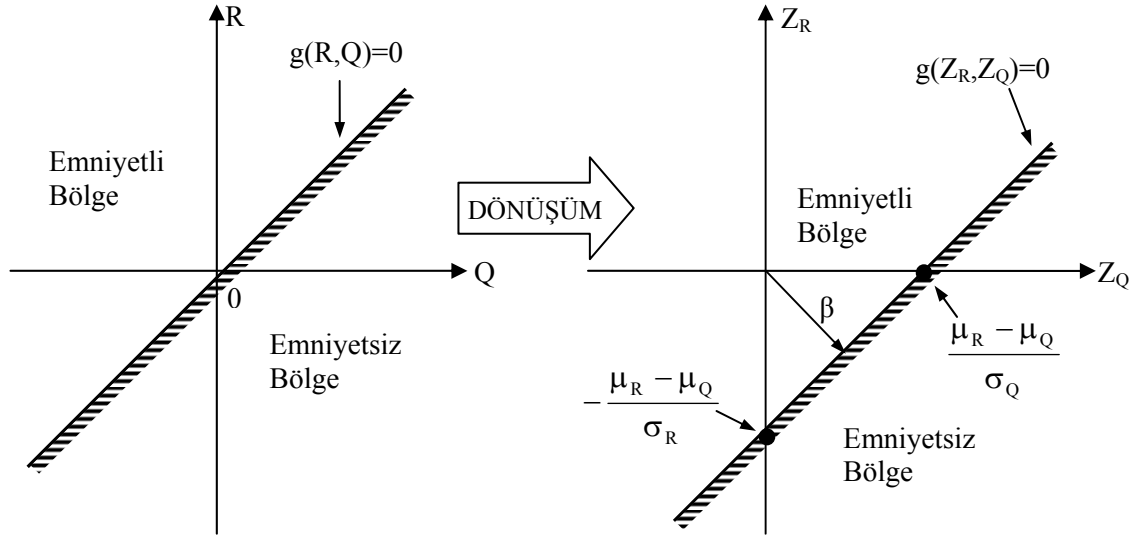
$$Z_i = \frac{X_i - \mu_i}{\sigma_i} \quad (71)$$

Güvenilirlik indeksi β 'nin geometrik olarak tanımı, indirgenmiş değişkenlerin oluşturduğu eksen takımının orijini ile bu eksen takımında tanımlı $g(Z_R, Z_Q) = 0$ fonksiyonu arasındaki en kısa mesafedir. Eğer limit durum fonksiyonu lineer ise, güvenilirlik indeksi (72) nolu denklem kullanılarak hesaplanmaktadır. Limit durum fonksiyonu lineer değil ise, güvenilirlik indeksi, Hasofer ve Lind (1974) tarafından $g(Z) = 0$ şartına bağlı olarak (73) denklemi ile hesaplanabilir (Nowak ve Collins, 2000).

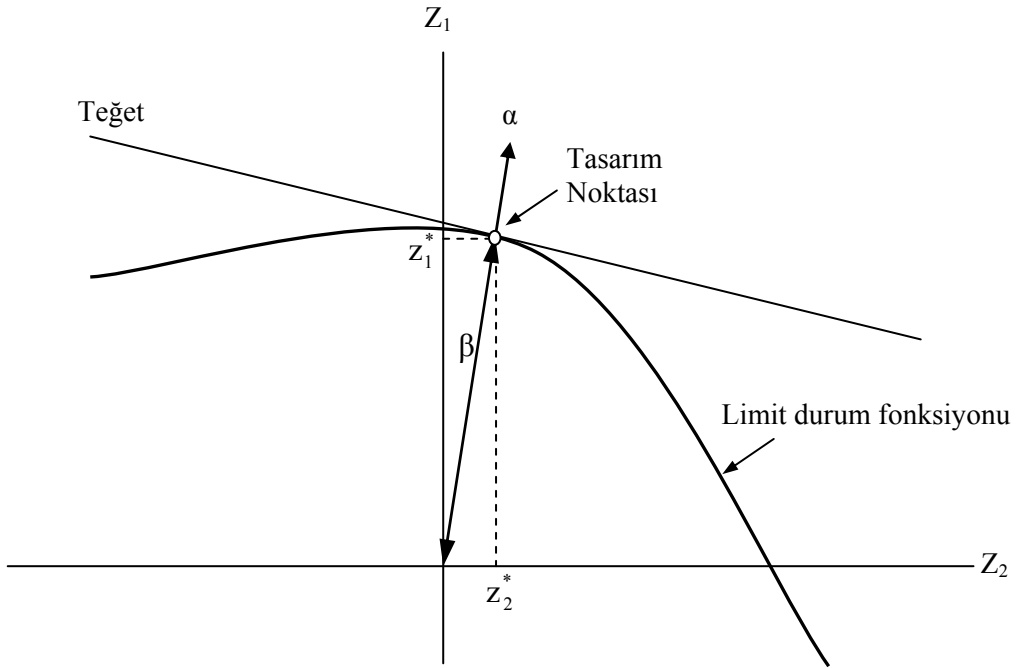
$$\beta = \frac{a_0 + \sum_{i=1}^n a_i \mu_{X_i}}{\sqrt{\sum_{i=1}^n (a_i \sigma_{X_i})^2}} \quad (72)$$

$$\beta = \min\left(\sqrt{Z^T Z}\right) \quad (73)$$

Şekil 7'de ve Şekil 8'de sırasıyla lineer ve lineer olmayan limit durum fonksiyonları için güvenilirlik indeksinin geometrik olarak gösterimi verilmektedir.



Şekil 7. Linear güvenilirlik indeksinin geometrik olarak gösterimi (Thoft-Christensen ve Murotsu, 1986; Nowak ve Collins, 2000)



Şekil 8. Lineer olmayan güvenilirlik indeksi (Hasofer ve Lind, 1974)

Hasofer ve Lind (1974)'in geliştirdiği bu güvenilirlik yönteminde değişkenlerin dağılımı dikkate alınmamaktadır. Bunun anlamı, bütün değişkenler normal dağılıma sahip kabul edilmektedir. Rackwitz ve Fiessler (1978) değişkenlerin dağılımlarını dikkate alarak güvenilirlik indeksi hesabını geliştirmişlerdir. Bu yöntemde, her bir normal olmayan

dağılıma sahip değişkenlerin ortalamaları ve standart sapmaları yerine “eşdeğer normal” değerleri kullanılmaktadır.

1.6.2.1.2. Geliştirilmiş Rackwitz-Fiessler Yöntemiyle Güvenilirlik Analizi

Güvenilirlik analizinde temel algoritma olarak Rackwitz-Fiessler Yöntemi alınmasına rağmen, birçok araştırmacı tasarım noktası hesaplama işlemini geliştirmeye çalışmışlardır. Bu tez çalışmasında, Geliştirilmiş Rackwitz-Fiessler Yöntemi (GRFY) (Zhang ve Der Kiureghian, 1997; Haukaas, 2001) kullanılmıştır. Bu yöntemde, her bir iterasyonda kullanılan adım boyu ve doğrultusu farklı bir algoritma ile hesaplanmaktadır. Aşağıda, bu yöntem için hesap adımları verilmiştir (Zhang ve Der Kiureghian, 1997; Haukaas, 2001).

1. n tane değişken için limit durum fonksiyonu, $g(X)$, oluşturulur.
2. Başlangıç tasarım noktası, $X = (x_1 \ x_2 \ \dots \ x_n)^T$, seçilir. Başlangıç tasarım noktası için genellikle değişkenlerin ortalama değerleri alınır.
3. X 'lere bağlı olarak indirgenmiş değişkenler, $Z = (z_1 \ z_2 \ \dots \ z_n)^T$,

$$z_i = \Phi^{-1}(F_X(x_i)) \quad (74)$$

bağıntısı kullanılarak hesaplanır. Burada, $\Phi(\)$, standart normal değişkenlerin eklenik dağılım fonksiyonunu ifade etmektedir.

4. $\{z_i\}$ değerleri, standart normal uzaydaki $\{x_i\}$ değerlerine dönüştürülür (iterasyonun ilk adımında bu madde atlanır):

$$x_i = F_X^{-1}(\Phi(z_i)) \quad (75)$$

5. $\{x_i\}$ değerleri $g(X)$ fonksiyonunda yerine yazılarak g değeri elde edilir. İterasyonun ilk adımında $g_0 = g$ olarak hesaplanır.

6. Gradyan vektörü hesaplanır.

$$\nabla Z g = \frac{\partial g}{\partial Z} \Big|_z = \frac{\partial g}{\partial X} \Big|_x [J]^{-1} \quad (76)$$

Burada, J Jacobian matrisini göstermektedir ve

$$[J] = \begin{bmatrix} \frac{\partial Z_1}{\partial X_1} & \dots & \frac{\partial Z_1}{\partial X_n} \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ \frac{\partial Z_n}{\partial X_1} & \dots & \frac{\partial Z_n}{\partial X_n} \end{bmatrix} \quad (77)$$

ile temsil edilmektedir.

7. Doğrultman kosinüsleri hesaplanır.

$$\alpha = -\frac{\nabla Z g}{\|\nabla Z g\|} \quad (78)$$

8. Yakınsama kriterleri hesaplanır. Sınır değerler (e_1 ve e_2) genellikle 10^{-3} alınır.

$$\begin{aligned} \left| \frac{g}{g_0} \right| &< e_1 \\ Z - \alpha^T Z \alpha &< e_2 \end{aligned} \quad (79)$$

9. Bir önceki maddedeki şartlar sağlanmadıysa, bir sonraki adım için yeni tasarım noktası hesaplanır.

$$Z_{k+1} = Z_k + \lambda_k d_k \quad (80)$$

Burada, d_k ve λ_k sırasıyla adım doğrultusu ve adım boyu olup aşağıdaki şekilde ifade edilir.

$$d_k = \left(\alpha^T Z_k + \frac{g}{\|\nabla Z g_k\|} \right) \alpha - Z_k \quad (81)$$

$$\lambda_k = \arg \min \{m(Z_k + \lambda d_k) - m(Z_k)\}$$

$$m(Z) = \frac{1}{2} \|Z\|^2 + c|g(Z)| \quad (82)$$

$$c > \frac{\|Z\|}{\|\nabla Z g\|}$$

Burada m, merit fonksiyonu olarak adlandırılmaktadır.

10. 4-9 maddeleri işlem yakınsayana kadar tekrarlanır.

11. Güvenilirlik indeksi,

$$\beta = \alpha^T Z \quad (83)$$

olarak elde edilir.

12. Göçme olasılığı,

$$p_f = \Phi(-\beta) \quad (84)$$

ifadesiyle hesaplanır.

1.6.2.1.3. Monte Carlo Yöntemi

Monte Carlo Yöntemi (MCY), herhangi bir fiziksel test yapmadan sayısal olarak sonuç üretmek amacıyla kullanılan özel bir tekniktir. Her bir değişkene karşılık rastgele örnek değerler olasılık yoğunluk fonksiyonlarına göre üretilmektedir. Üretilen bu değerler limit durum fonksiyonunda yerine konularak fonksiyonun alacağı değer kontrol edilmektedir (Nowak ve Collins, 2000). MCY'nin en büyük dezavantajı çok fazla iterasyon gerektirmesidir. Özellikle, göçme olasılığının 10^{-6} dan küçük olması durumunda bu yöntemin kullanılması imkânsız hale gelmektedir.

Bu yöntemde, göçme olasılığı (Melchers, 1999),

$$p_f = \int \cdots \int I[g(x) \leq 0] f_x(x) dx \quad (85)$$

ya da

$$p_f = \frac{1}{N} \sum_{j=1}^N I[g(\hat{x}_j) \leq 0] \quad (86)$$

ifadesi ile hesaplanmaktadır. Burada, N üretilen örnek sayısını, \hat{x}_j her bir değişken için üretilen örnek değeri ve $I[\]$ gösterge fonksiyonunu ifade etmekte olup değeri,

$$I[g(\hat{x}_j) \leq 0] = \begin{cases} 1 & \rightarrow g(\hat{x}_j) \leq 0 \\ 0 & \rightarrow g(\hat{x}_j) > 0 \end{cases} \quad (87)$$

şeklinde hesaplanmaktadır (Ranganathan, 2000; Schueremans, 2003; Melchers ve Ahammed, 2004).

Göçme olasılığının varyansı $\sigma_{p_f}^2$ ve değişim katsayısı V_{p_f} ,

$$\begin{aligned} \sigma_{p_f}^2 &= \frac{p_f(1-p_f)}{N} \\ V_{p_f} &= \frac{\sigma_{p_f}}{p_f} \end{aligned} \quad (88)$$

ifadeleri ile elde edilmektedir. (88) nolu denklemden gerekli olan minimum örnek sayısı, N ,

$$N \geq \frac{1}{V_{p_f}^2} \left(\frac{1}{p_f} - 1 \right) \quad (89)$$

şeklinde hesaplanmaktadır (Nowak ve Collins, 2000).

1.6.2.2. Kapalı Limit Durum Fonksiyonu ile Güvenilirlik Analizi

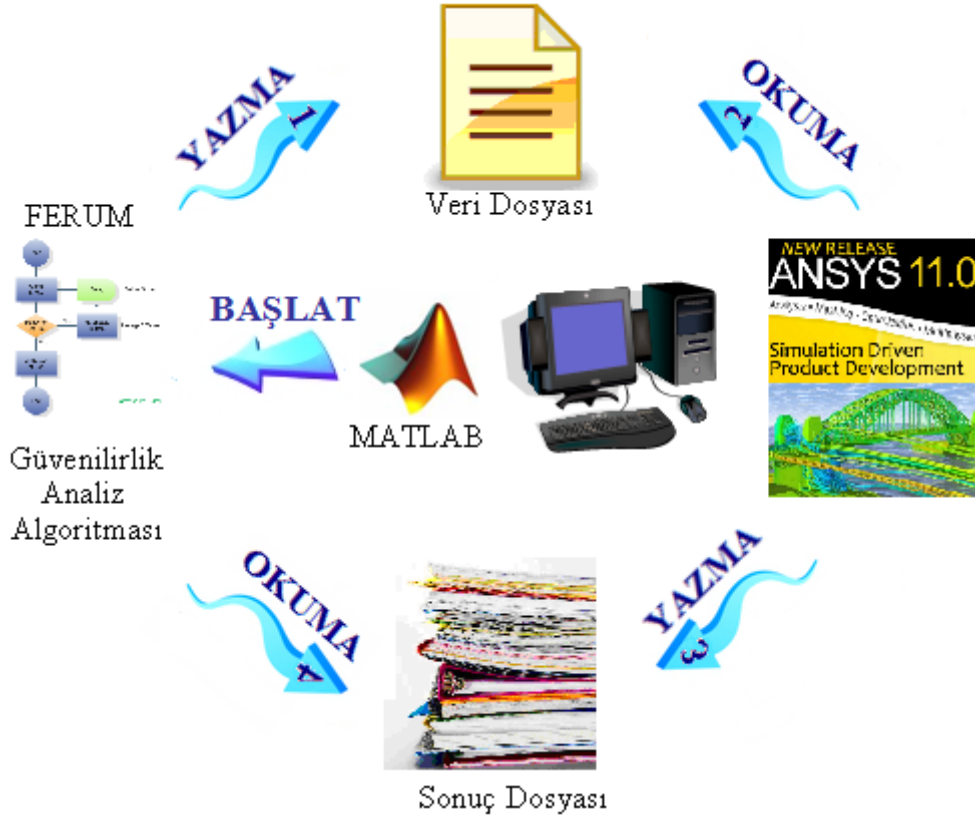
Yapı davranışı (yerdeğiştirme, gerilme, kesit tesirleri vb.) genellikle yaklaşık yöntemlere bağlı olarak geliştirilmiş bazı algoritmalar kullanılarak belirlenir. Örneğin, Sonlu Elemanlar Yöntemi, yapı davranışını belirlemek için etkili ve en yaygın olarak kullanılan yaklaşık yöntemlerden biridir. Ancak, yapı davranışının sonlu elemanlar gibi

yöntemler kullanılarak belirlenmesi, limit durum fonksiyonun açık olarak ifade edilememesine neden olmaktadır. Bu durumda, limit durum fonksiyonu Sonlu Elemanlar Yöntemi kullanılarak elde edilen sonuçlara bağlı olarak oluşturulabilmektedir. Bu tür limit durum fonksiyonuna kapalı limit durum fonksiyonu denilmektedir. Kapalı limit durum fonksiyonlarıyla güvenilirlik analizinin gerçekleştirilebilmesi, ancak güvenilirlik analiz yöntemleri ile sonlu elemanlar algoritmasının birleştirilmesi ile mümkün olmaktadır. Bu konu ile yapılmış çalışmalarda genel olarak Direkt Birleştirme Yöntemi, Yanıt Yüzeyi Yöntemi ve Optimizasyon Yöntemi kullanılmıştır (Maymon, 1994; Borri ve Speranzini, 1997; Mohamed ve Lemaire, 1998; Bucher vd., 2000; Pendola vd., 2000; Lemaire ve Mohamed, 2000; Sudret ve Der Kiureghian, 2002; Nie ve Ellingwood, 2005). Bu tez çalışmasında Direkt Birleştirme ve Yanıt Yüzeyi Yöntemi kullanıldığından, bu yöntemler hakkında bilgi verilecektir.

1.6.2.2.1. Direkt Birleştirme Yöntemi

Direkt Birleştirme Yönteminde (DBY), güvenilirlik analiz algoritması ile Sonlu Elemanlar Yöntemi için kullanılan program dosya alışverişi ile birleştirilmektedir. Direkt Birleştirme Yöntemine göre, güvenilirlik analizi için Şekil 9'da gösterilen hesaplama adımları aşağıda ayrıntılı olarak açıklanmıştır:

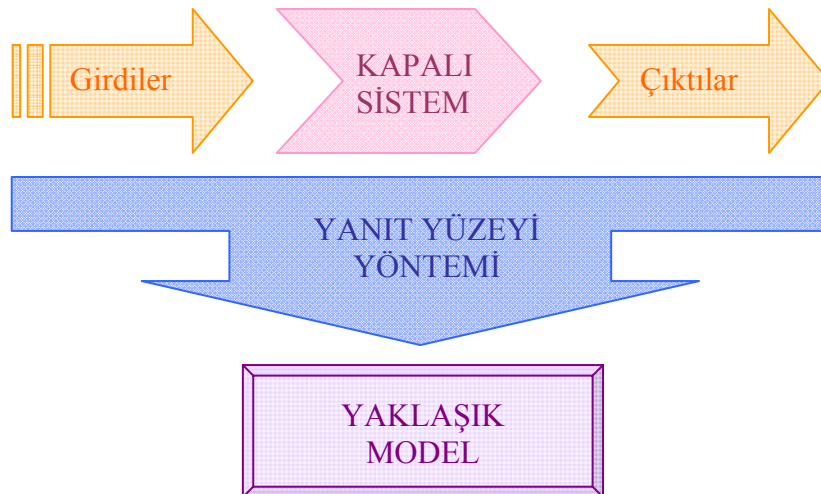
1. Güvenilirlik analiz algoritmasına başlanır.
2. Limit durum fonksiyonuna ihtiyaç duyulduğunda, sonlu elemanlar programının veri dosyası içinde rastgele değişkenlere ait değerler değiştirilerek yeni veri dosyası hazırlanır.
3. Sonlu elemanlar analizi için kullanılan program (ANSYS) güncellenmiş veri dosyası ile çalıştırılır.
4. İstenen sonuç bir dosyaya yazdırılır.
5. Güvenilirlik analizinde, dosyaya yazdırılan bu değer okunarak işleme devam edilir.



Şekil 9. Direkt Birleştirme Yönteminin şematik olarak gösterimi (Başğa, 2009)

1.6.2.2.2. Yanıt Yüzeyi Yöntemi

Yanıt yüzeyi yöntemi (YYY), girdiler ile çıktılar arasındaki ilişkiyi tanımlamak için kullanılan istatistiksel bir yöntemdir. Şekil 10'da bu ilişki gösterilmektedir.



Şekil 10. Yanıt Yüzeyi Yönteminin şematik olarak gösterimi (Başğa, 2009)

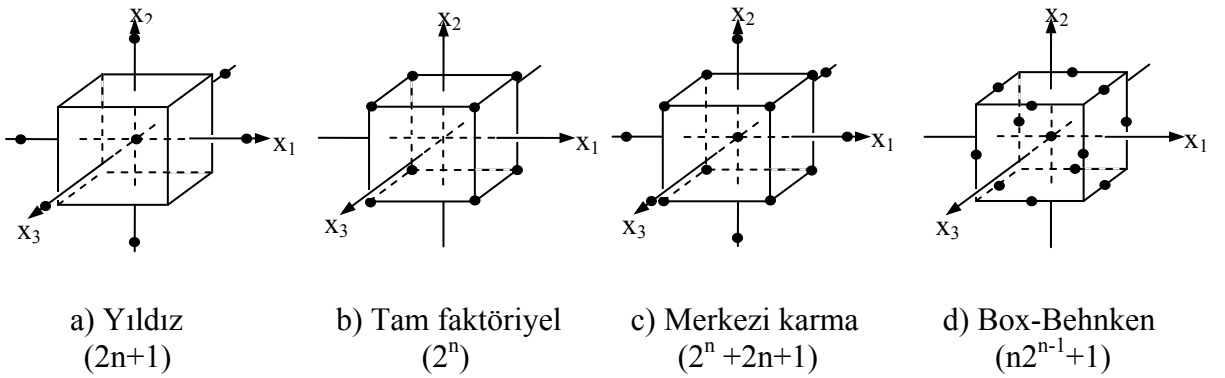
Yanıt Yüzeyi Yöntemi, kapalı limit durum fonksiyonlarını, ($g(X)$), dikkate alınan değişkenler türünden açık limit durum fonksiyonuna, ($\tilde{g}(X)$), dönüştürmektedir. Genel ifade ile karma terimleri ihmal edilmemiş ikinci dereceden bir polinom (Myers, 1971),

$$\tilde{g}(X) = a + \sum_{i=1}^n b_i x_i + \sum_{i=1}^n c_i x_i^2 + \sum_{i=1}^{n-1} \sum_{j=i+1}^n d_{ij} x_i x_j + \varepsilon_h \quad (90)$$

ifadesi ile temsil edilir. Burada n değişken sayısını, a , b_i , c_i ve d_{ij} polinomun katsayılarını ve ε_h yüksek mertebeli terimlerin dikkate alınmamasından kaynaklı hatayı göstermektedir. Pratikte, (90) nolu denklem yerine karma terimleri ihmal edilmiş ikinci derece polinom kullanılmaktadır. Bu durumda, (90) nolu ifade,

$$\tilde{g}(X) = a + \sum_{i=1}^n b_i x_i + \sum_{i=1}^n c_i x_i^2 + \varepsilon_h \quad (91)$$

şekline dönüşür (Myers, 1971). Bu fonksiyonun katsayılarının (a , b_i ve c_i) hesabı için örnek değerler seçilmesi gerekmektedir. Bunun için birçok örnekleme yöntemi mevcuttur. Bunlardan yıldız tasarımı, tam faktöriyel tasarımı, merkezi karma tasarımı ve Box-Behnken tasarımı üç parametre için Şekil 11'de verilmektedir.



Şekil 11. Örnekleme yöntemleri (Başaga, 2009)

Bucher ve Bourgund (1990), güvenilirlik analizinde yıldız tasarımını dikkate almış ve örnek noktaları x_i koordinat ekseninde ortalamalar etrafında seçmiştir. Buna göre örnek değerler,

$$x_i = \mu_i \mp f_k \sigma_i \quad (92)$$

formülü ile elde edilebilir (Bucher ve Bourgund, 1990). Burada f_k , 1~3 arasında değişen keyfi bir katsayıyı göstermektedir. Örnek değerler matrisi, üç değişken için,

$$X = \begin{bmatrix} \mu_1 & \mu_2 & \mu_3 \\ \mu_1 + k\sigma_1 & \mu_2 & \mu_3 \\ \mu_1 - k\sigma_1 & \mu_2 & \mu_3 \\ \mu_1 & \mu_2 + k\sigma_2 & \mu_3 \\ \mu_1 & \mu_2 - k\sigma_2 & \mu_3 \\ \mu_1 & \mu_2 & \mu_3 + k\sigma_3 \\ \mu_1 & \mu_2 & \mu_3 - k\sigma_3 \end{bmatrix} \quad (93)$$

şeklinde tanımlanır (Bucher ve Bourgund, 1990). (91) nolu denklemde tanımlanan ikinci derece yaklaşık fonksiyonun katsayıları, ks , en küçük kareler yöntemi kullanılarak,

$$ks = (W^T W)^{-1} W^T y \quad (94)$$

olarak elde edilebilir. Burada, y örnek değerlere bağlı olarak performans fonksiyonundan elde edilen yanıt vektörünü ve W örnek değerleri içeren tasarım matrisini göstermektedir. Tasarım matrisi, karma terimleri ihmal edilmiş ikinci derece polinom ve üç değişkenli bir problem için ortalamalar etrafında aşağıdaki gibi elde edilir (Başağa, 2009).

$$W = \begin{bmatrix} 1 & \mu_1 & \mu_2 & \mu_3 & (\mu_1)^2 & (\mu_2)^2 & (\mu_3)^2 \\ 1 & \mu_1 + k\sigma_1 & \mu_2 & \mu_3 & (\mu_1 + k\sigma_1)^2 & (\mu_2)^2 & (\mu_3)^2 \\ 1 & \mu_1 - k\sigma_1 & \mu_2 & \mu_3 & (\mu_1 - k\sigma_1)^2 & (\mu_2)^2 & (\mu_3)^2 \\ 1 & \mu_1 & \mu_2 + k\sigma_2 & \mu_3 & (\mu_1)^2 & (\mu_2 + k\sigma_2)^2 & (\mu_3)^2 \\ 1 & \mu_1 & \mu_2 - k\sigma_2 & \mu_3 & (\mu_1)^2 & (\mu_2 - k\sigma_2)^2 & (\mu_3)^2 \\ 1 & \mu_1 & \mu_2 & \mu_3 + k\sigma_3 & (\mu_1)^2 & (\mu_2)^2 & (\mu_3 + k\sigma_3)^2 \\ 1 & \mu_1 & \mu_2 & \mu_3 - k\sigma_3 & (\mu_1)^2 & (\mu_2)^2 & (\mu_3 - k\sigma_3)^2 \end{bmatrix} \quad (95)$$

Yanıt yüzeyi yöntemi ile güvenilirlik analizinin hesap adımları aşağıdaki gibi verilebilir:

1. Limit durum fonksiyonunu temsilen ikinci derece karma terimleri ihmal edilmiş bir polinom seçilir.
2. Örnek değerler ortalamalar etrafında seçilir.
3. Bilinmeyen katsayılar en küçük kareler yöntemi ile elde edilir.
4. Elde edilen yaklaşık $\hat{g}^{(1)}(X)$ fonksiyonuna, güvenilirlik analiz yöntemlerinden biri uygulanarak X_D tasarım noktası hesaplanır.
5. X_D tasarım noktaları, X_M merkezi noktaları elde etmek için kullanılır. Yeni X_M ler X 'lerin ortalama vektöründen (μ) , X_D tasarım noktalarına uzanan doğru üzerinde seçilir. Dolayısıyla $g(X)=0$ fonksiyonuna yakın noktalar (96) denklemi ile tespit edilir.

$$X_M = \mu + (X_D - \mu) \frac{g(\mu)}{g(\mu) - g(X_D)} \quad (96)$$

6. X_M 'ler etrafında yeni bir örnek değer grubu elde edilir.
7. Yaklaşık fonksiyonu yeniden belirlemek için en küçük kareler yöntemi kullanılarak katsayılar belirlenir.
8. $\hat{g}^{(2)}(X)$ yaklaşık fonksiyonu elde edilir.
9. En son elde edilen $\hat{g}^{(2)}(X)$ açık limit durum fonksiyonuna göre güvenilirlik analizi yöntemlerinden biri seçilerek göçme olasılığı hesaplanır.

2. YAPILAN ÇALIŞMALAR

2.1. Ön Yüzü Beton Kaplı Kaya Dolgu Barajların Modellenmesi

Ön yüzü beton kaplı kaya dolgu barajlar son kırk yıldan beri dünyada (Chuhan, 2007; Kim ve Kim, 2008) ve on yıldan beri Türkiye’de en çok tercih edilen baraj tiplerinden biridir. Ön yüzü beton kaplı kaya dolgu (ÖYBKKD) barajların tercih edilmesinin sebepleri:

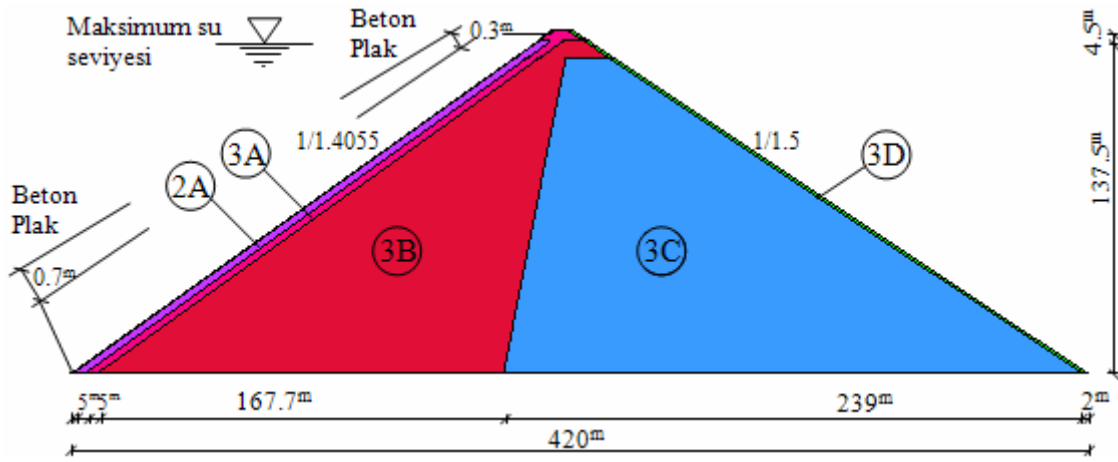
- yapılarının pratik ve ekonomik olması,
 - hemen her iklim şartında inşasının mümkün olması,
 - çok büyük yüksekliklerde inşa edilebilmesi,
 - dar vadiler için uygun olması,
 - çeşitlilik gösteren arazi koşullarına uyabilmesi,
 - geçirimsizlik için çekirdek malzemesine gerek duymaması,
 - geçirimsizliğin menba yüzünde sağlanması nedeniyle kaya dolgunun kuru olması ve bu nedenle deprem sırasında boşluk suyu basıncının oluşmaması,
- olarak sıralanabilir.

ÖYBKKD barajlarda, şevlerin eğimleri diğer dolgu barajlarla kıyaslandığında daha küçüktür ve geçirimsizliğin menba yüzünde sağlanması nedeniyle çekirdek malzemesi ihtiyacı da ortadan kalkmaktadır. Bu yüzden, diğer dolgu barajlara göre daha küçük hacimli ve ekonomik olarak inşa edilebilirler. Ayrıca, menba yüzünde beton plak dalga etkilerine karşı koruma sağladığından riprap gibi veya başka türlü pahalı şev stabilite yöntemlerine gerek duyulmamaktadır. ÖYBKKD barajlarda oluşacak oturmalar da diğer dolgu barajlarla kıyaslandığında oldukça küçüktür.

ÖYBKKD barajlarda en önemli sorun barajın menba yüzünde inşa edilen beton plağın göstereceği performanstır. Bu tip barajlarda beton plak-topuk plak (plinth) birleşimindeki davranışın incelenmesi gerekmektedir. Beton plak-topuk plağı birleşimde meydana gelecek çatlaklar sızmalara neden olabilirler (Wieland ve Brenner, 2007). Eğer, su barajın içine sızarsa barajın stabilitesi azalabilir (Chrzanowski ve Massiéra, 2006).

2.1.1. Torul Barajı

Torul Barajı Gümüşhane İli, Torul İlçesinin 14km kuzey batısında 2007 yılında inşası tamamlanmış olan ÖYBKGD tipinde bir barajdır. Baraj rezervuarının kullanım amacı enerji üretimidir. Baraj gövdesinin hacmi 4.6hm^3 ve normal su seviyesinde göl alanı 3.62km^2 'dir. Yıllık toplam güç üretim kapasitesi 322.28 GW'dır. Beton plak kalınlığı krette 0.3m ve tabanda 0.7m'dir. Baraj kretinin uzunluğu 320m ve genişliği 12m'dir. Ayrıca, baraj yüksekliği ve taban genişliği sırasıyla, 142m ve 420m'dir. Barajın en büyük iki boyutlu kesiti Şekil 12'de verilmektedir. Baraj rezervuarının dolu halinde menba ve mansap yönlerinden görünüşleri Şekil 13'te verilmiştir (DSİ, 2009).



Şekil 12. Torul Barajının en büyük iki boyutlu kesiti (DSİ, 2009)



a) Menba yüzü

b) Mansap yüzü

Şekil 13. Torul Barajının görünüşleri (DSİ, 2009)

2.1.1.1. Sonlu Eleman Modeli

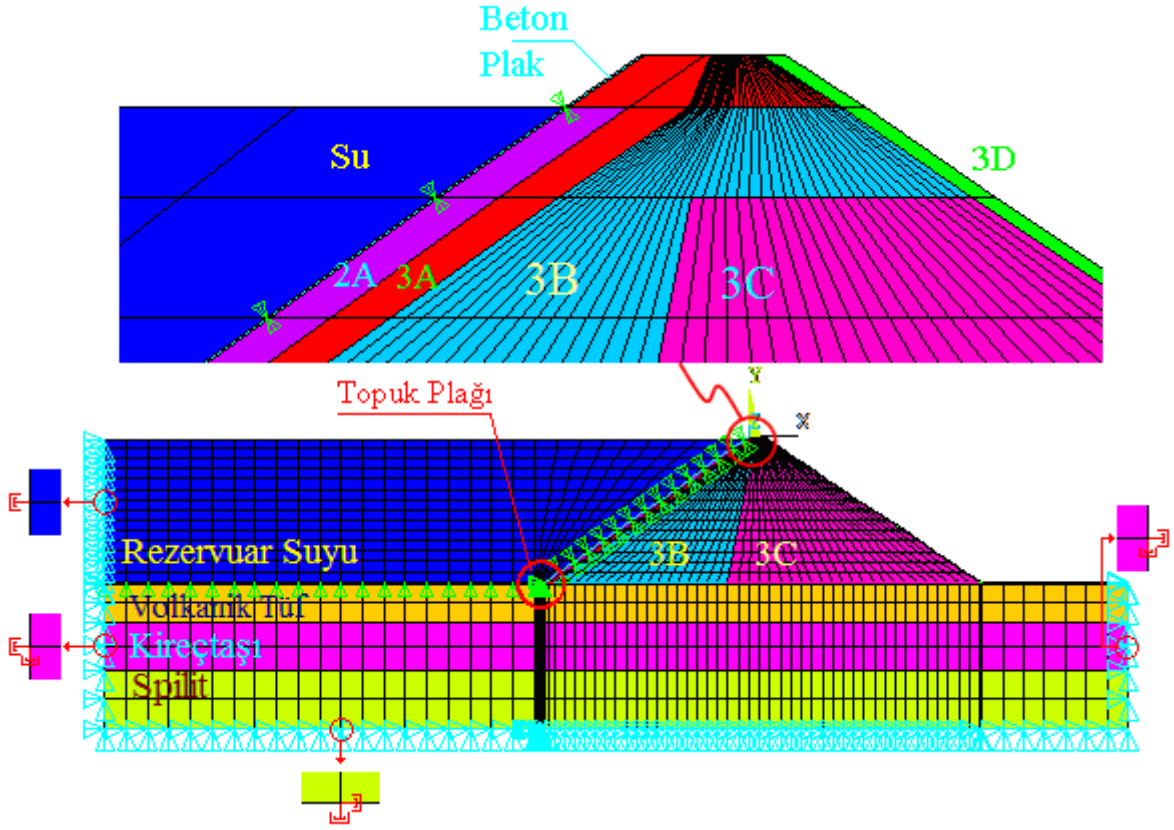
Torul ÖYBKKD barajının en büyük kesitine ait temel ve rezervuar suyunun da bulunduğu iki boyutlu sonlu eleman modeli Şekil 14’te verilmiştir. Sonlu eleman modeli rezervuarın boş ve dolu halleri için ANSYS (2009) sonlu eleman yazılımı kullanılarak oluşturulmuştur. Çalışmada, beton plağın üzerinde oturduğu topuk plağı da (plinth) dikkate alınmıştır. Topuk plağına ait sonlu eleman modeli Şekil 15’te verilmiştir. Sonlu eleman modelinde geçiş ve kaya dolgu bölgeleri ile birlikte riprap da bulunmaktadır. Ancak, krette bulunan parapet duvarı sonlu eleman modelinde ihmal edilmiştir. Burada amaç, deprem yükleri altında beton plak davranışının daha açık şekilde belirlenmesidir. Sonlu eleman modelinde dikkate alınan temel zemini ise barajın üzerinde bulunduğu üç ayrı zemin tipini de içermektedir. Zemin tabakaları aslında birbiri içine geçmiş olduğundan gerçekte geometrik olarak kesin bir ayırım yoktur. Ancak, zemin örneklerinden elde edilen deney sonuçları dikkate alınarak, üç tabakalı bir temel modeli oluşturulmuştur. 2 boyutlu sonlu eleman modelinde beton plak, topuk plağı, kaya dolgu bölgeleri ve temel zemini Plane42 katı sonlu elemanlarla, rezervuar suyu ise Fluid79 sıvı sonlu elemanlarla tanımlanmıştır.

Klasik modelleme ile elde edilen sonuçların karşılaştırılması amacıyla sonlu eleman modelleri oluşturulurken birleşim bölgeleri hem birleşik hem de Coulomb sürtünme yasası dikkate alınarak modellenmiştir. Bu tezde, sürtünmeyi dikkate alabilmek amacıyla temas eden yüzeyler üzerinde 1 boyutlu yüzey-yüzey temas elemanları kullanılmıştır.

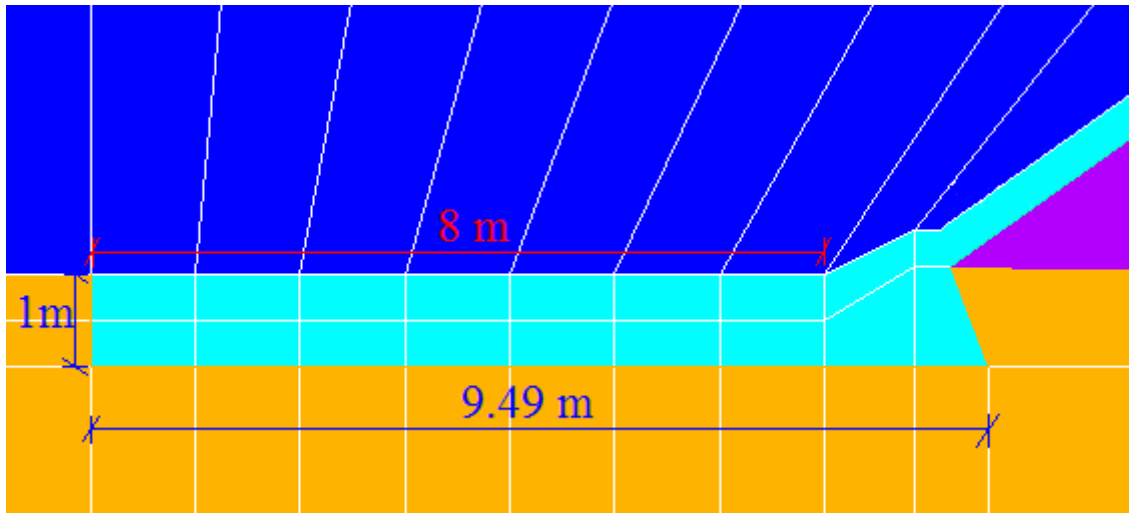
Torul Barajının birleşim bölgelerindeki sürtünmenin de dikkate alındığı sonlu eleman modelindeki eleman sayıları ve düğüm noktası sayıları Tablo 2’de verilmiştir. Rezervuar suyu ile baraj ve temel arasındaki etkileşimi sağlamak için ilgili arayüzeyde 1mm’lik boşluk tanımlanmış ve yüzey normali doğrultusunda toplam 47 adet yerdeğiştirme sürekli kılınmıştır (Şekil 16).

Sonlu eleman modelinin temel ve rezervuar suyu sınırlarında Lysmer ve Kuhlemeyer (1969) tarafından geliştirilen viskoz sönümleyiciler kullanılmıştır. Böylece sonlu eleman modelinin sonsuz uzunluklu olduğu dikkate alınarak yansıtmayan sınır şartları sağlanmıştır.

ANSYS sonlu eleman yazılımında viskoz sönümleyicileri tanımlamak için eleman kütüphanesinde bulunan Combin14 yay-sönümleyici elemanlar kullanılmıştır (ANSYS, 2009). Bu eleman için yalnızca sönüm değerleri tanımlanmış olup yay sabiti ise ihmal edilmiştir.



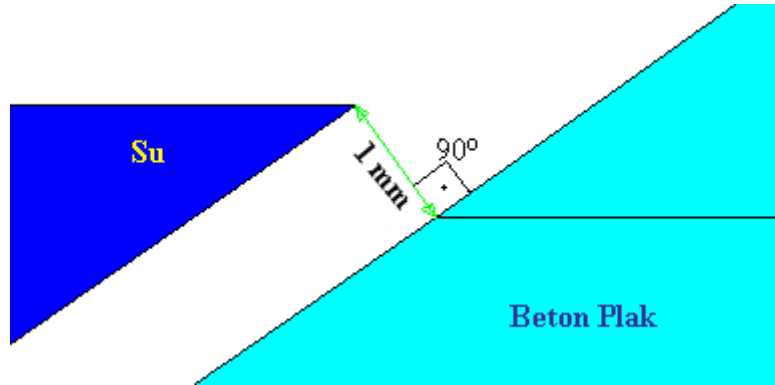
Şekil 14. Torul barajı iki boyutlu sonlu eleman modeli



Şekil 15. Topuk plağı sonlu eleman modeli

Tablo 2. İki boyutlu baraj-temel-rezervuar etkileşim sisteminin sonlu eleman ve düğüm noktası sayıları

Sonlu Eleman Bölgeleri	Sonlu Eleman Sayısı	Düğüm Noktası Sayısı
Beton Plak	15	32
Topuk Plağı	18	30
2A Bölgesi (Geçiş Bölgesi)	14	
3A Bölgesi (Geçiş Bölgesi)	57	
3B Bölgesi (Kaya dolgu)	262	720
3C Bölgesi (Kaya dolgu)	312	
3D Bölgesi (Riprap)	15	
Temel Zemini (Üst tabaka, Volkanik Tüf)	251	
Temel Zemini (Orta tabaka, Kireç taşı)	160	661
Temel Zemini (Alt tabaka, Spilit)	160	
Rezervuar Suyu	406	450
Beton Plak-Kaya Dolgu Temas-Hedef Eleman Çifti	15	32
Kaya Dolgu-Temel Temas-Hedef Eleman Çifti	44	90
Topuk Plağı-Temel Temas-Hedef Eleman Çifti	12	26
Beton Plak-Topuk Plağı Temas-Hedef Eleman Çifti	1	4
Toplam	1814	2045



Şekil 16. Sıvı-yapı arayüzey şartının uygulanışı

Zaman tanım alanında gerçekleştirilen analizlerde Rayleigh sönümü dikkate alınmıştır (Rayleigh ve Lindsay, 1945; Chopra, 1996). Sönüm oranı %5 olarak seçilmiştir. Rezervuarın boş ve dolu halleri için barajın frekansları ayrı ayrı hesaplanmış ve Rayleigh sönümü için gerekli katsayılar ilk altı mod dikkate alınarak hesaplanmıştır.

Sonlu eleman çözümleri Newmark yöntemi dikkate alınarak (Newmark, 1959) gerçekleştirilmiştir.

2.1.1.2. Malzeme Özellikleri

Torul Barajı gövdesi menba yüzünden mansaba doğru beton plak ve ardında 5 farklı kaya dolgu bölgesinden oluşmaktadır: 2A, 3A, 3B, 3C, 3D. Bu bölgeler ince granüler malzemelerden kalın malzemelere doğru değişmektedir. Çalışmada barajın, iyi derecelendirilmiş, düşük boşluklu yüksek basınç modülüne sahip malzemelerden oluştuğu dikkate alınarak 3C bölgesinin elastisite modülü $200 \times 10^3 \text{ kN/m}^2$ seçilmiştir (Haeri, 2005). Malzeme gradasyonu inceldikçe alüvyal dolgularda elastisite modülünün azaldığı, ocak kayası dolgularda ise malzeme gradasyonu inceldikçe elastisite modülünün arttığı dikkate alınarak, barajı oluşturan kaya dolgu bölgelerin malzeme parametreleri seçilmiştir (Varadarajan vd., 2006). Beton plakta C20 beton sınıfına ait beton kullanılmış olup çekme ve basınç dayanımları, sırasıyla, 1.6MPa ve 20MPa'dır (TS 500, 2000). Betonun kohezyon ve içsel sürtünme açısı değerleri, sırasıyla, 2.50MPa ve 30° olarak dikkate alınmıştır. Rezervuar suyunun hacimsel elastisite modülü $2.07 \times 10^6 \text{ kN/m}^2$ ve kütle yoğunluğu 1000 kg/m^3 olarak çözümlerde kullanılmıştır. Sonlu eleman analizlerinde kullanılan malzeme özellikleri Tablo 3'te verilmiştir.

Tablo 3. Malzeme özellikleri

Malzeme	D_{\max} (mm)	Malzeme Özellikleri		
		Elastisite Modülü (10^7 kN/m^2)	Poisson Oranı	Kütle Yoğunluğu (kg/m^3)
Beton	-	2.800	0.20	2395.5
2A (elenmiş kaya veya alüvyon dolgu)	150	0.040	0.36	1880.0
3A (seçilmiş kaya ile dolgu)	300	0.030	0.36	1870.0
3B (ocak kayası ile dolgu)	600	0.025	0.32	1850.0
3C (ocak kayası ile dolgu)	800	0.020	0.32	1850.0
3D (seçilmiş kaya, riprap)	1000	0.018	0.26	1800.0
Zemin (Volkanik Tüf, üstte)	-	1.036	0.17	2732.9
Zemin (Kireçtaşı, ortada)	-	1.206	0.18	2834.8
Zemin (Spilit, altta)	-	1.387	0.18	2834.8

*En büyük dane çapı

2.1.2. Kaya Dolgu ve Kaya Zeminin Lineer Olmayan Davranışı

Torul Barajı volkanik tüf, kireçtaşı ve spilit formasyonlarının üzerinde teşkil edilmiştir. Dolgu barajların ve kaya zeminlerin davranışlarının kayma modülüne bağlı olduğu bilinmektedir. En büyük kayma modülü ise ortalama efektif gerilmenin

karekökünün fonksiyonu olarak bulunduğundan, tüm elemanlardan alınan değerlere dayalı bir ağırlıklı ortalama hesaplanmaktadır.

Kum için modül değerleri çevresel basınçtan, şekildeğiştirme genliğinden ve boşluk oranından (ya da rölatif yoğunluktan) son derece fazla etkilenirken, tane büyüklük karakteristiklerinden çok fazla etkilenmemektedir. Bir dolgu barajın kohezyonsuz zeminden teşkil edilmesi durumunda küçük şekildeğiştirmelerde G kayma modülü, ortalama efektif gerilmeye bağlı olarak aşağıdaki gibi önerilmiştir (Seed ve Idriss, 1970).

$$G = 1000K_2(\sigma_m')^{1/2} \quad (97)$$

Burada σ_m' ortalama efektif gerilme ve K_2 kumların rölatif yoğunluklarına bağlı olarak seçilen bir parametredir. Küçük şekildeğiştirmelerde kum-çakıl malzemelerin dinamik modül katsayısı için K_2 faktörü ortalama eğrilerden elde edilmektedir (Seed ve Idriss, 1970). K_2 değerinin zayıf kumlu zeminler için 30 ile 75, sıkı kumlu-çakıllı zeminler için 90 ile 188 değerleri arasında olduğu laboratuvar çalışmalarından elde edilmiştir.

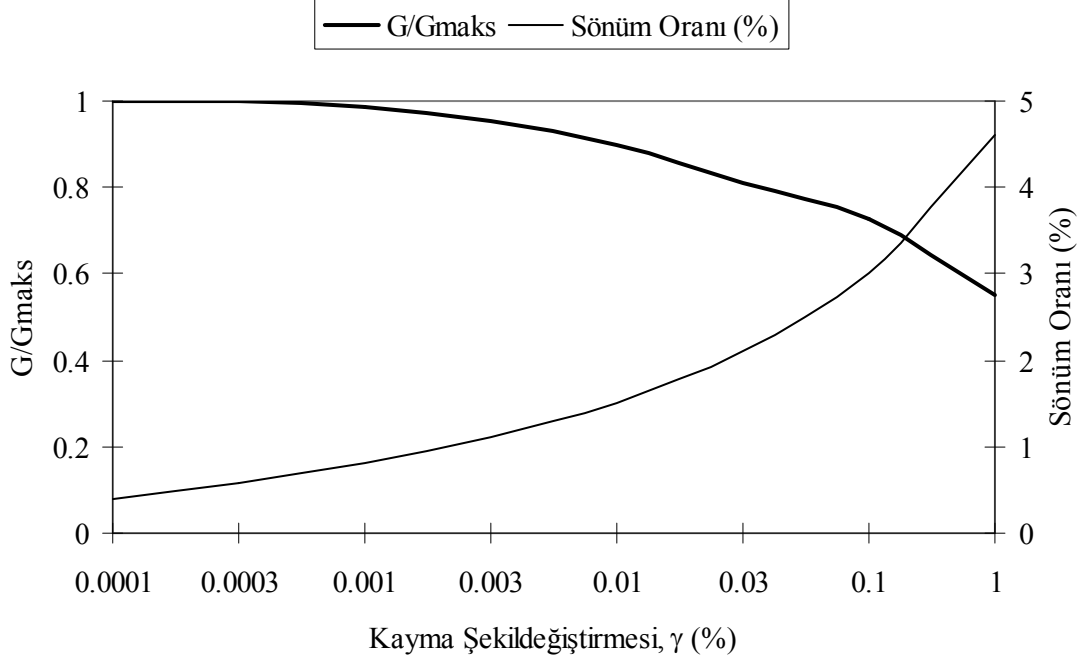
Merkez çekirdek için maksimum kayma modülü G/S_U oranına bağlı olarak hesaplanmaktadır. Böylece, çekirdek malzemesinin küçük şekildeğiştirme kayma modülünü değerlendirmek için G_{maks}/S_U ortalama oranı 1000'e eşit kabul edilmektedir (Seed ve Idriss, 1970). Kayma modülünü hesaplamak için gerekli S_U kayma dayanımları çekirdek malzemeler için ölçülen kayma zarfları ve ilgili konsolidasyon gerilmeleri kullanılarak elde edilmektedir. Kayma dayanımları aşağıdaki eşitlik kullanılarak hesaplanabilmektedir (Seed ve Idriss, 1970).

$$S_U = c + \sigma_{mc} \cdot \tan \phi \quad (98)$$

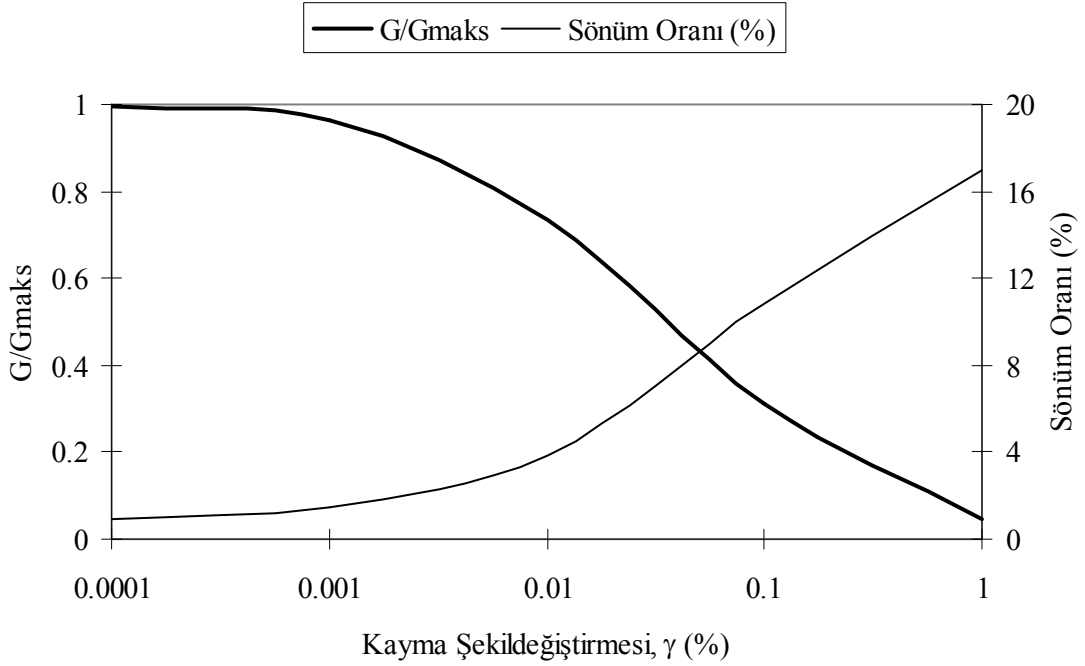
Burada, S_U drenajsız kayma dayanımı, c kohezyon faktörü, σ_{mc} ortalama efektif basınç ve ϕ içsel sürtünme açısını temsil etmektedir.

Kaya zeminler için kayma modülü ve sönüm oranının kayma şekildeğiştirmesine bağlı değişimleri ise Şekil 17'de verilmiştir. Bunun yanı sıra, Rollins vd. (1998) 15 araştırmacı tarafından sunulan verileri kullanmış ve çakıllı zeminler için bir araya getirmiştir. Yaptıkları çalışmada toplam 980 veri noktası kullanılmış olup, kayma modülü

ve sönüm oranının kayma şekildeğiştirilmesiyle değişimi için en iyi hiperbolik eğriyi önermiştir (Şekil 18).

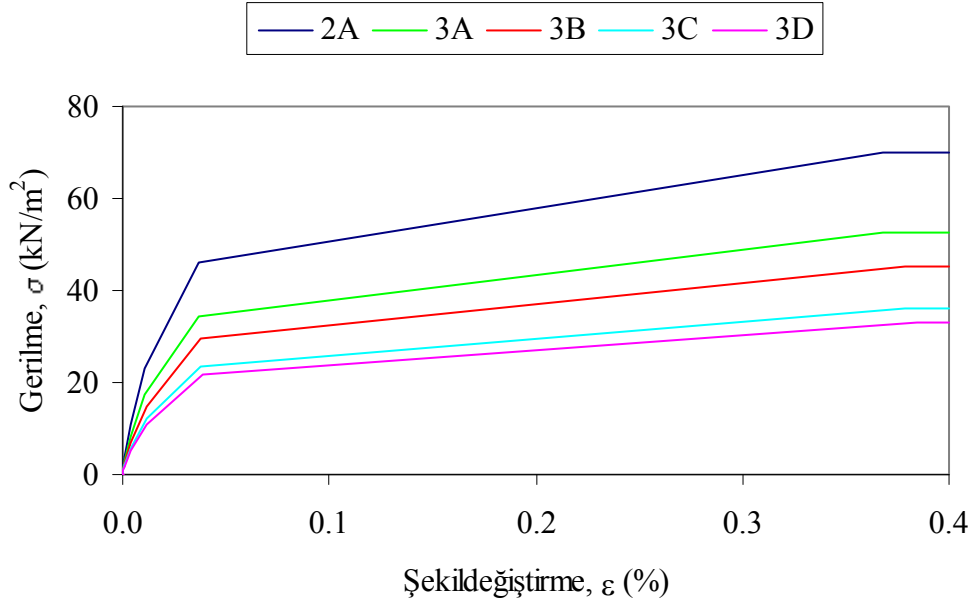


Şekil 17. Kaya zeminler için tanımlanan kayma şekildeğiştirilmesine bağlı normalize edilmiş kayma modülü ve sönüm oranı eğrileri (Schnabel vd., 1972)

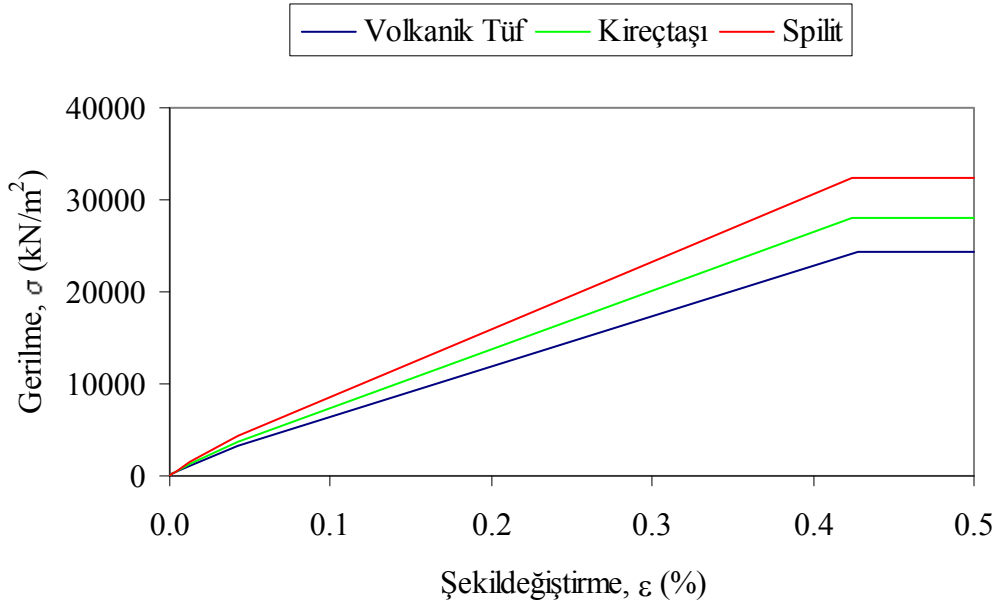


Şekil 18. Rollins vd. (1998) tarafından çakıllı zeminler için üretilen kayma şekildeğiştirilmesine bağlı normalize edilmiş kayma modülü ve sönüm oranı eğrileri

Kaya dolgunun malzeme bakımından lineer olmayan davranışı, Rollins vd. (1998) tarafından çakıl malzemeler için oluşturulmuş olan kayma modülü-kayma şekildeğiştirme eğrisi kullanılarak elde edilen tek eksenli gerilme-şekildeğiştirme ilişkisi ile belirlenmiştir. Bu ilişki, çok yönlü kinematik pekleşme modeli ile temsil edilmiştir. Bu yöntem kullanılarak statik ve dinamik yükler altında baraj davranışı elde edilebilir. Şekil 19'da kaya dolgu bölgeleri için elde edilen gerilme-şekildeğiştirme ilişkileri sunulmuştur. Bu eğriler üretilirken 3C kaya dolgu bölgesi başlangıç elastisite modülü değeri $200 \times 10^3 \text{ kN/m}^2$ olacak şekilde dikkate alınmış (Haeri, 2005) ve diğer bölgelerin özellikleri Varadarajan vd. (2006)'nin önerileri dikkate alınarak belirlenmiştir. Temel zemini için de benzer işlemler yapılmış olup Schnabel vd. (1972) tarafından kaya zeminler için deneysel çalışmalardan üretilen kayma modülü-kayma şekildeğiştirme ilişkilerinden yararlanarak bulunan gerilme-şekildeğiştirme eğrisi Şekil 20'de verilmiştir.



Şekil 19. Kaya dolgu için çok yönlü kinematik pekleşme eğrileri



Şekil 20. Zemin tabakaları için çok yönlü kinematik pekleşme eğrileri

2.1.3. Beton Yüz Plak Kalınlığı

Ön yüzü beton kaplı kaya dolgu barajlarda beton yüz plak kalınlığı araştırmacıların üzerinde durduğu başlıca konulardan biridir. Günümüzde beton plağın geçirimsizliğinin yeterli olması halinde plak kalınlığının azaltılabileceği ve 30cm'lik sabit bir kalınlık alınabileceği yönde bir eğilim görülmektedir. Bununla birlikte, beton plak için müsaade edilen en küçük kalınlık 30cm'dir. Ancak, incelen plak kalınlığının deprem ve diğer yükler altındaki performansını nasıl etkileyeceği ayrı bir tartışma konusu olmaktadır. ÖYBKDD barajların tasarımında baraj yüksekliğine (H_D) bağlı olarak kaya dolgu modülünün (K_m) büyüklüğü göz önüne alınarak beton plak kalınlığı (T_b) için çeşitli formülasyonlar geliştirilmiş ve zaman içinde barajların inşasında dikkate alınmıştır (Tablo 4). Qian (2005), Çin'de inşa edilen çeşitli barajlar için baraj yüksekliğine bağlı olarak plak kalınlığının elde edildiği çeşitli fonksiyonları ve bu fonksiyonlar kullanılarak elde edilen plak kalınlıklarının uygulandığı barajları sunmuştur (Tablo 5). Torul Barajının beton plak kalınlığı kret noktasında 30cm olup lineer bir değişimle taban seviyesinde 70cm'ye ulaşmaktadır. Bu tezde plak kalınlığı krette 30cm olup, plak tabanında ise Qian (2005) tarafından verilen formülasyonlar kullanılarak elde edilen plak kalınlıkları için parametrik çalışmalar yapılmıştır (Tablo 5). Tablo 5'te üçüncü satırdaki 72.6cm'lik plak kalınlığı, barajın 70cm'lik mevcut plak taban kalınlığına yakın olduğu için çözümlerde mevcut plak kalınlığı dikkate alınmıştır.

Tablo 4. ÖYBKGD barajlarda kullanılan çeşitlik plak kalınlık fonksiyonları (URL-1, 2008)

İyi Derecelendirilmiş Kaya Dolgu			
$H_D < 120$		$H_D = 120m$	$H_D > 120m$
$K_m \geq 100MPa$	$K_m < 100MPa$		
$T_b = 0.30 + 0.002H_D$	$T_b = 0.30 + 0.003H_D$	$T_b = 0.0045H_D$	$T_b = 0.30 + 0.002H_D$
Düzenli Derecelendirilmiş Kaya Dolgu			
$H_D < 120m$		$H_D = 120m$	$H_D > 120m$
$T_b = 0.30 + 0.003H_D$		$K_m \geq 100MPa$	
		$T_b = 0.30 + 0.003H_D$	$T_b = 0.0045H_D$
		$K_m < 100MPa$	
		$H_D = 120m$	$H_D \geq 120m$
		$T_b = 0.40 + 0.003H_D$	$T_b = 0.0063H_D$

Tablo 5. Çin'deki ÖYBKGD barajlarda kullanılan plak kalınlık fonksiyonları (Qian, 2005)

Plak Kalınlığı İçin Kullanılan Fonksiyonlar	Plak Kalınlığı (m)		Baraj-Tamamlandığı yıl
	Kret	Taban	
$T_b = 0.3$	0.3	0.3	Hengshan-1992, Douyan-1995, Chusong-1999
$T_b = 0.3 + 0.002H_D$	0.3	0.584	Baiyun-1998, Da'ao-1999, Tianhuaqing-1997
$T_b = 0.3 + 0.003H_D$	0.3	0.726	Baixi- 2001, Tankeng-2005, Xiaoshan-1997
$T_b = 0.3 + 0.004H_D$	0.3	0.868	Gouhou-1989
$T_b = 0.3 + 0.8 m$	0.3	1.1	Jiangpinghe - (221m)

2.1.4. Sayısal Uygulamalarda Dikkate Alınan Durumlar

Bu çalışmada, Torul Barajının geometri ve malzeme bakımından lineer ve lineer olmayan analizleri gerçekleştirilmiştir. Rezervuar suyunun etkisinin de dikkate alındığı sayısal çözümlerde birleşim bölgeleri sürtünmeli ve sürtünmesiz olarak tanımlanmıştır. Çalışmada, malzeme ve geometri bakımından lineer olmama durumlarının baraj davranışı üzerindeki etkilerini belirleyebilmek için çeşitli analiz durumları dikkate alınmıştır (Tablo 6). Statik yükler altında Tablo 6'da verilen bu dört durum da dikkate alınırken, deprem yüküne maruz sistemlerde Durum 2, 3 ve 4 dikkate alınmıştır.

Tablo 6. Sayısal çözüm durumları

Durum	Davranış					
	Geometri Bakımından			Malzeme Bakımından		
	Beton Plak	Kaya Dolgu	Temel Zemini	Beton Plak	Kaya Dolgu	Temel Zemini
Durum 1	Lineer	Lineer	Lineer	Lineer	Lineer	Lineer
Durum 2	L. Olmayan	L. Olmayan	L. Olmayan	Lineer	Lineer	Lineer
Durum 3	L. Olmayan	L. Olmayan	L. Olmayan	Lineer	L. Olmayan	L. Olmayan
Durum 4	L. Olmayan	L. Olmayan	L. Olmayan	L. Olmayan	L. Olmayan	L. Olmayan

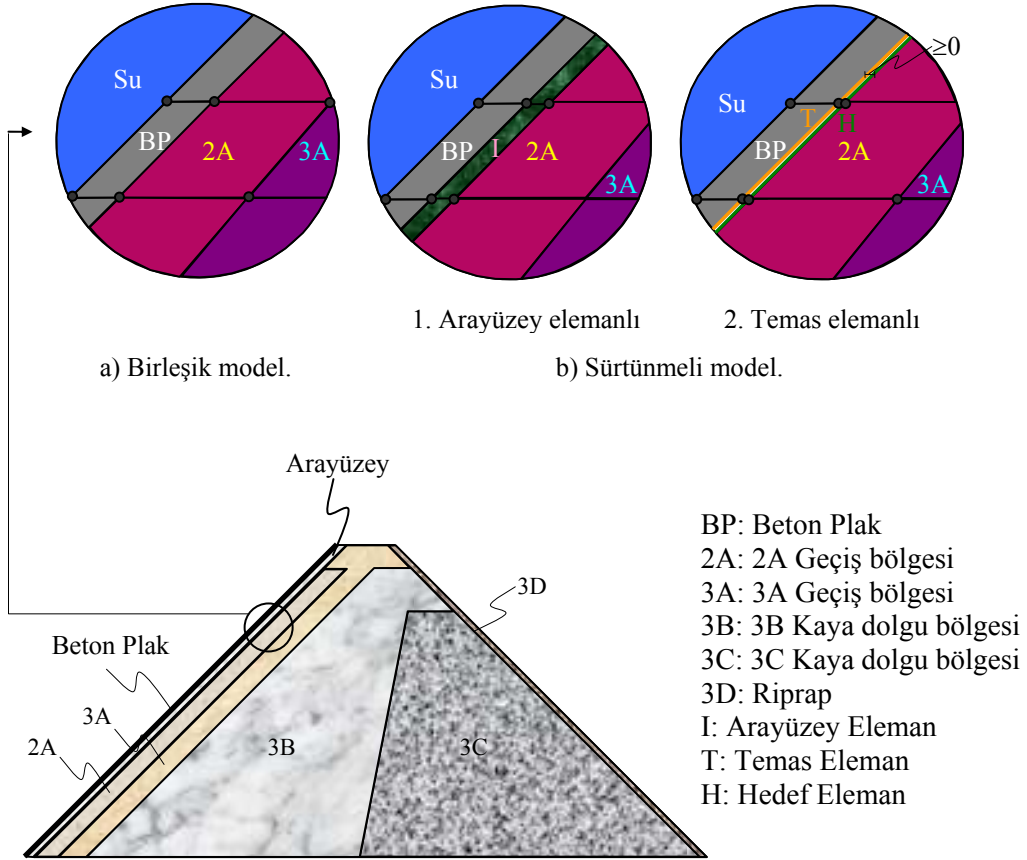
2.1.5. Yapısal Birleşimler

2.1.5.1. Birleşim Yüzeyleri

Yapısal birleşimler genellikle iki şekilde modellenmektedir. Bunlar birleşik ve sürtünmeli birleşim olarak adlandırılabilir.

Birleşik modeller ilgili arayüzeyin ortak düğüm noktaları kullanılarak tanımlanması ile oluşturulurlar. Bu nedenle, bu tip birleşimlerde gerilme ya da yerdeğiştirme aktarımı söz konusu değildir. Çünkü birleşim bölgesindeki ortak düğüm noktasında her bir elemandan elde edilen gerilmelerin ortalaması ve ortak yerdeğiştirme bileşeni elde edilmektedir.

Sürtünmeli modeller ise arayüzey elemanlar ya da temas elemanlar kullanmak suretiyle genellikle iki şekilde oluşturulmaktadır (Şekil 21). Arayüzey elemanlar kullanıldığında, düzlem problemler için 4 veya 6 düğüm noktalı sonlu elemanlar kullanılmakla birlikte arayüzey kayma rijitliği tanımlanarak sürtünme hareketi sağlanmaktadır. Temas elemanlarının kullanılması halinde ise, ilgili arayüzeydeki sonlu elemanlar üzerinde 2 veya 3 düğüm noktalı çizgisel temas elemanlar tanımlanmaktadır. Bu elemanlar kullanıldığında temas sağlanması durumunda müsaade edilen en büyük kayma gerilmesine ve sürtünme katsayısına bağlı olarak Coulomb sürtünme yasasına dayalı sürtünme hareketi gerçekleşmektedir.



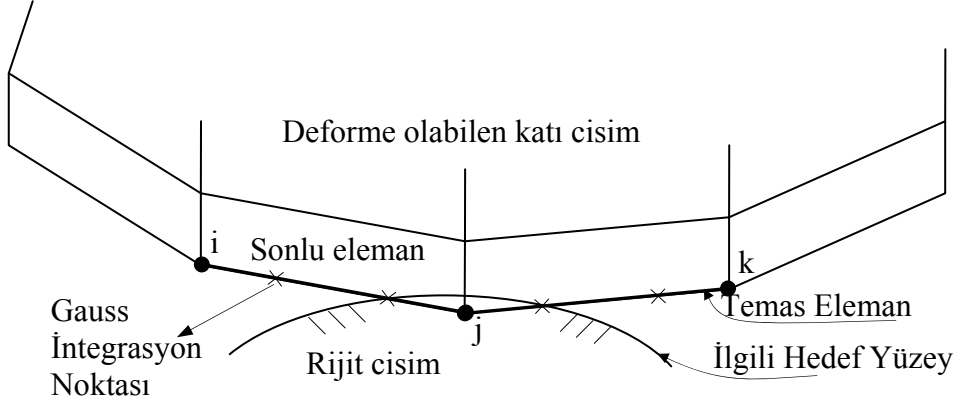
Şekil 21. Beton plak-kaya dolgu birleşimi ve arayüzey şartları

İki ortam bir biri üzerinde rölatif olarak hareket edebiliyorsa veya diğer bir deyişle bir ortamdaki diğerine yük veya gerilme aktarımında kayıp söz konusu ise bu iki farklı ortam arasında sürtünme tanımlamak suretiyle daha gerçekçi sonuçlar elde edilebilir. Böylece gereksiz gerilme yığılmalarından da kaçınılabılır. Bu çalışmada baraj modelinde sürtünme:

- beton plak-kaya dolgu,
 - kaya dolgu-temel zemini,
 - topuk plağı-temel zemini,
 - beton plak-topuk plağı
- arasında dikkate alınmıştır.

Temas arayüzünde sürtünmeyi dikkate almak için bir temas eleman çifti tanımlanmıştır. Bunlardan biri temas diğeri ise hedef elemandır. Çalışmada, temas elemanlar beton plak-kaya dolgu arayüzünde beton plağa, kaya dolgu-temel zemini arayüzünde kaya dolguya, topuk plağı-temel zemin arayüzünde topuk plağına ve beton plak-topuk plağı ara yüzünde beton plağa iliştilmiştir. Bu elemanlar tanımlanırken,

geometrik karakteristiklerini taşımaktadırlar. Tanımlanmış hedef yüzey üzerinde, hedef parça elemanların birine temas eleman yüzeyi değdiği anda temas oluşmaktadır. Bu işlem, temas elemanların Gauss noktalarında kontrol edilmektedir (Şekil 23). Temas olması halinde kullanılan temas elemanlar, Coulomb ve kayma gerilme sürtünmeleri tanımlayabilmektedir.



Şekil 23. Gauss noktalarında temas algılama işlemi

ANSYS (2009) programı ile yüzey-yüzey temas elemanları kullanılarak çeşitli yüzey etkileşim modelleri tanımlamak mümkündür.

1. Standart tekyönlü temas: Kaymaya ve ayrışmaya izin verilir. Eğer ayrışma olursa, normal basınç sıfıra eşittir. Bu tez çalışmasında, standart tekyönlü temas modeli beton plak-topuk plak birleşimindeki teması temsil etmek için kullanılmıştır.
2. Mükemmel pürüzlü sürtünmeli temas: Kaymaya izin verilmez. Bu durum sonsuz sürtünme katsayısı ile ilişkilidir ve malzemenin sürtünme katsayısını dikkate almaz.
3. Ayrışmayan temas: Bir kez temas sağlandığında, hedef ve temas yüzeyler birbirine bağlanır ancak temas yüzeyi boyunca kayma hareketine izin verilir.
4. Bağlı temas: Bir kez temas sağlandığında, bundan sonra temas ve hedef yüzeyler her yönde bağlanırlar.
5. Ayrışmayan temas (Sürekli): Temas algılama noktaları ya başlangıçta Pinball bölgesi içindedir ya da hedef yüzeyine normal doğrultusu boyunca sürekli ilişiktir. Yüzey boyunca kayma hareketine izin verilirken, ayrışmaya izin verilmez. Bu model, beton plak-kaya dolgu, kaya dolgu-temel, topuk plağı-temel birleşimindeki teması temsil etmek için kullanılmıştır.

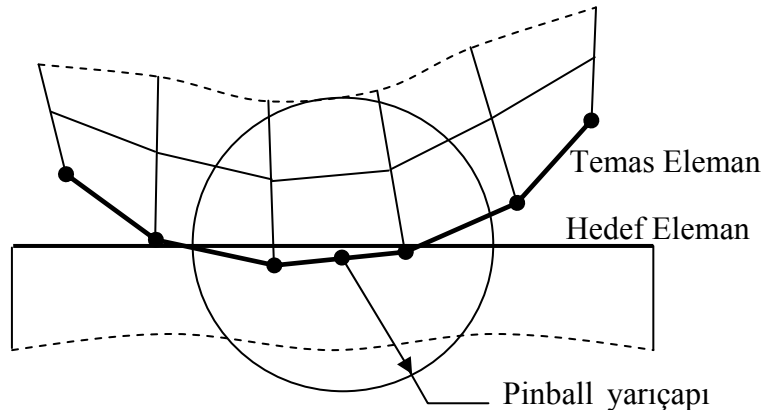
6. Bağlı temas (Sürekli): Temas algılama noktaları ya başlangıçta Pinball bölgesi içindedir ya da hedef yüzeyine normal doğrultusu ve teğetsel doğrultu boyunca sürekli ilişiktir. Yüzey boyunca kayma hareketine ve ayrışmaya izin verilmez, tümüyle bağlı bir durum vardır.
7. Bağlı temas (başlangıç teması): Başlangıçta kapalı durumda olan temas algılama noktaları analiz süresince hedef yüzeye bağlı, başlangıçta açık olanlar ise açık kalacaktır.

2.1.5.3. Pinball Bölgesi

Hedef yüzeyle ilişkisi olan temas elemanın konumu ve hareketi, temas elemanın durumunu belirler. Kullanılan sonlu eleman yazılımı, her bir temas elemanı izler ve ona bir durum atar.

1. temas hali: Açık uzak-alan teması
2. temas hali: Açık yakın-alan teması
3. temas hali: Kayan temas
4. temas hali: Yapışık temas

Bir temas eleman integrasyon noktaları (Gauss noktaları veya düğüm noktaları) ilgili hedef yüzeye mesafesi kodla-hesaplanan (ya da kullanıcının tanımladığı) sınırlanan içinde ise yakın alan teması olarak dikkate alınır. Bu mesafe “Pinball” bölgesi olarak adlandırılır. Pinball bölgesi 2 boyutlu sistemlerde bir daire ya da 3 boyutlu sistemlerde merkezi Gauss noktası olan bir küredir (Şekil 24).



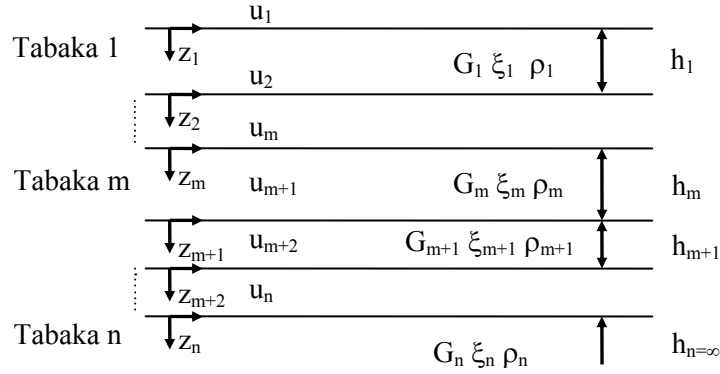
Şekil 24. İki boyutlu durumda Pinball bölgesi

2.2. Yer Hareketi Modeli

2.2.1. Yerel Zemin Şartlarının Yer Hareketine Etkisi

Yerel zemin şartlarının deprem hareketine etkisi yıllar boyunca araştırma konusu olmuştur (Leger ve Boughoufalah, 1989; Clough, 1992; Lavallee ve Archuleta, 1999; Elgamal ve Lai, 1999; Joyner ve Chen, 1975; Faccioli, 1976; Der Kiureghian vd., 1997; Trifunac, 1990; Hindy ve Novak, 1980; Zempaty ve Rutenberg, 1998a; 1998b; Stewart vd., 1998). Deprem dalgası ana kaynağından yüzeye ulaşınca kadar farklı jeolojik malzemelerden oluşan tabakalardan geçmektedir. Bu tabakalardan geçerken birçok yansıma ve kırılmalara maruz kalmaktadır. Dolayısıyla, önemli mühendislik yapılarının deprem davranışının belirlenmesinde yerel zemin şartlarının ivme kayıtları üzerindeki etkisi dikkate alınmalıdır (Kramer, 1996). Yerel zemin şartlarının deprem hareketi üzerindeki etkisinin hesaplanabilmesi için lineer viskoelastik sistem boyunca kayma dalgalarının düşey yayılımı ile ilgili davranışları dikkate alınmaktadır. Şekil 25'te n. tabaka ana kaya olmak üzere n adet yatay tabakadan oluşan bir zemin katmanı gösterilmiştir. Her tabakanın homojen ve izotrop olduğu kabul edilmiştir.

Şekil 25'te sistem boyunca kayma dalgalarının düşey yayılımı yalnızca yatay yerdeğiştirmelere sebep olacaktır.



Şekil 25. n adet tabakadan oluşan bir boyutlu zemin sistemi

Her bir tabaka için bir z yerel eksen koordinat sistemi tanıtlırsa, üstteki ve alttaki m tabakasındaki yerdeğiştirmeler (Schnabel vd., 1972; Hacıfendioğlu vd., 2004),

$$u_m(z_m, t) = \left(A_m \cdot e^{ik_m^* z_m} + B_m \cdot e^{-ik_m^* z_m} \right) e^{i\omega t} \quad (99)$$

şeklinde hesaplanır. Kayma gerilmeleri üstteki ve alttaki m tabakasında,

$$\tau_m(z_m, t) = ik_m^* G_m^* \left(A_m \cdot e^{ik_m^* z_m} - B_m \cdot e^{-ik_m^* z_m} \right) e^{i\omega t} \quad (100)$$

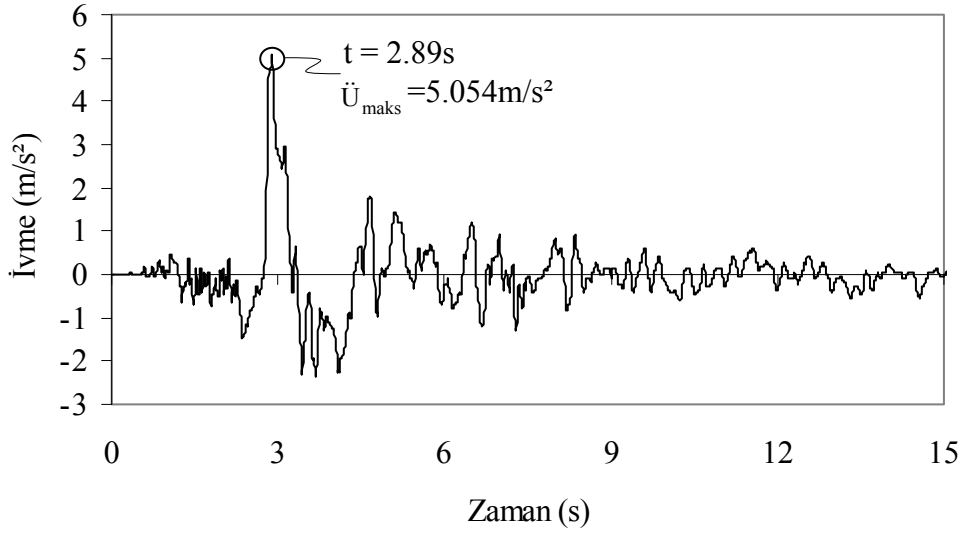
ifadesindeki gibi olur. k ve l seviyelerinde yerdeğişirmeler arasında $F_{kl}(\omega)$ transfer fonksiyonu (101) denklemi ile tanımlanmaktadır.

$$F_{kl}(\omega) = \frac{|u_k|}{|u_l|} = \frac{a_k(\omega) + b_k(\omega)}{a_l(\omega) + b_l(\omega)} \quad (101)$$

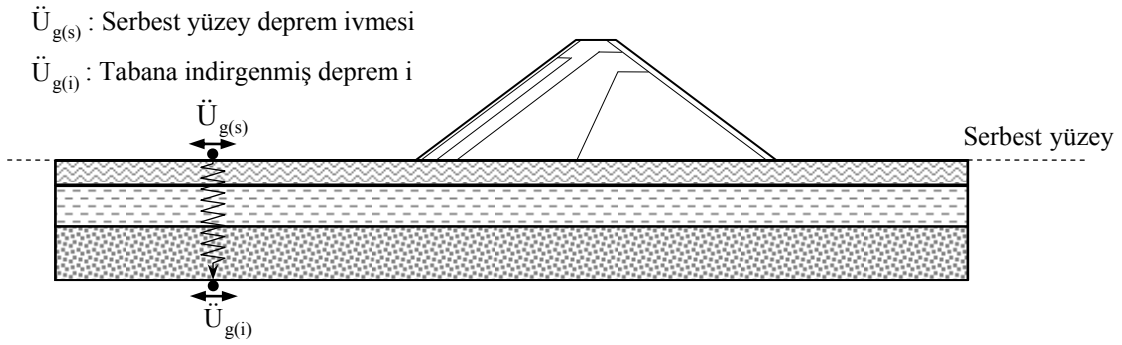
Burada a_k ve b_k , $a_l=b_l=1$ durumu için transfer fonksiyonlarıdır. (101) eşitliği ivme ve hızların genliğini tanımlamaktadır. $F_{kl}(\omega)$ transfer fonksiyonu sistemin herhangi iki tabakası arasında bulunabilir. Bu yüzden, eğer sistemin herhangi bir tabakasının hareketi biliniyorsa, herhangi bir diğer tabakanın hareketi kolaylıkla hesaplanabilir (Schnabel vd., 1972).

2.2.2. İndirgenmiş Deprem Kaydının Elde Edilmesi

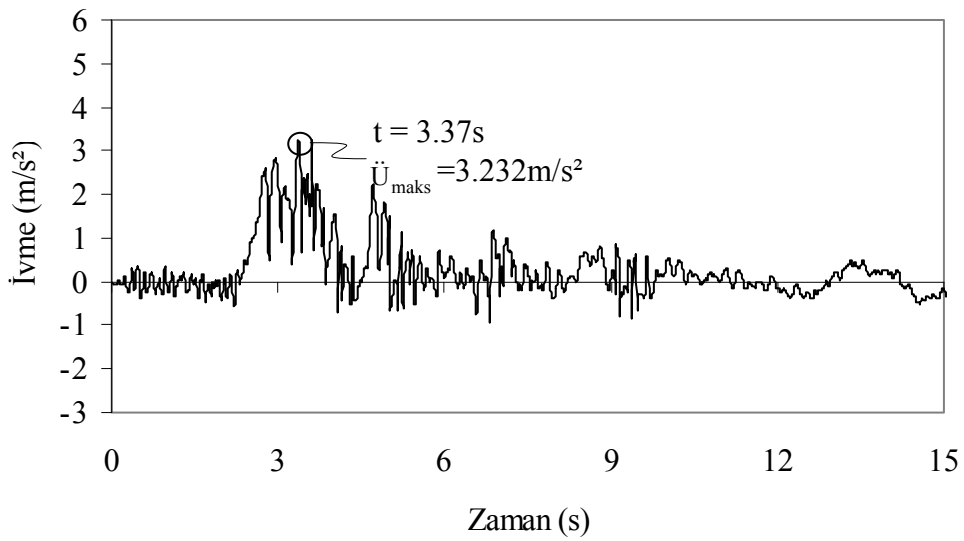
Torul Barajının deprem analizleri için barajın bulunduğu konum ve yerel zemin şartları dikkate alınarak 1992 Erzincan depreminin 0.515g maksimum yer ivmeli yatay bileşeni 0.01s zaman aralığı ve 15s süre için seçilmiştir (Şekil 26). Bir boyutlu dalga yayılma teorisine dayalı çözüm gerçekleştiren SHAKE91 (Idriss ve Sun, 1992) adlı bilgisayar programı kullanılarak serbest yüzeyde kaydedilen deprem ivme kaydı temel zemininin tabanına indirgenmiştir (Şekil 27). İvme kaydı üç zemin tabakasının tabanına indirgenmiş olup sayısal çözümlerde indirgenmiş ivme kaydı kullanılmıştır (Şekil 28). Tabana indirgenmiş ivme kaydı değerlerinin serbest-yüzeyde kaydedilen ivme kaydı değerlerinden daha küçük olduğu açıkça görülmektedir.



Şekil 26. Erzincan depremi kuzey-güney bileşeni ivme kaydı (URL-2, 2010)



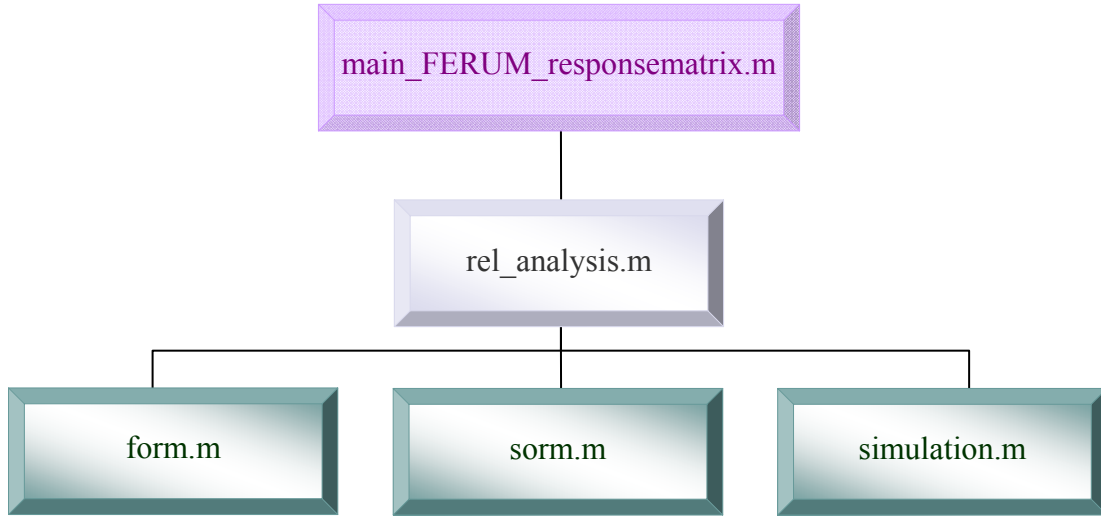
Şekil 27. Serbest yüzey deprem ivmesinin zemin tabanına indirgenmesi



Şekil 28. Zemin tabanına indirgenmiş Erzincan depremi ivme kaydı

2.3. Güvenilirlik Analizlerinde Kullanılan Algoritmalar

Yapı davranışının karmaşık olması halinde limit durum fonksiyonunu belirsiz parametrelere göre açık formda ifade etmek mümkün değildir. Bu nedenle, yapılarda belli kriterlere göre göçme olasılığının hesabında yapı davranışını belirlemeye yarayan bazı algoritmalar (Sonlu Elemanlar Yöntemi vd.) ile güvenilirlik analiz algoritmasının birleştirilmesi gerekmektedir. Bu tez çalışmasında, açık limit durum fonksiyonlarının güvenilirlik analizini yapabilen FERUM programı (URL-3, 2004; Zhang ve Der Kiureghian, 1997; Haukaas, 2001) ile ANSYS (2009) sonlu elemanlar yazılımı kapalı limit durum fonksiyonlarının güvenilirlik analizi için birleştirilmiştir. FERUM programı Geliştirilmiş Rackwitz-Fiessler Yöntemi, İkinci Derece Güvenilirlik Yöntemi, Direkt Örneklemeli Monte Carlo Yöntemi ve Önemli Örneklemeli Monte Carlo Yöntemi ile güvenilirlik analizi yapabilen MATLAB programlama dilinde yazılmış açık kodlu bir program olup Şekil 29’da verilen ağ ile ana dosyalar birbirine bağlıdır. Programın çalışmasında önemli yeri olan bazı dosyaların görevleri Tablo 7’de verilmiştir.



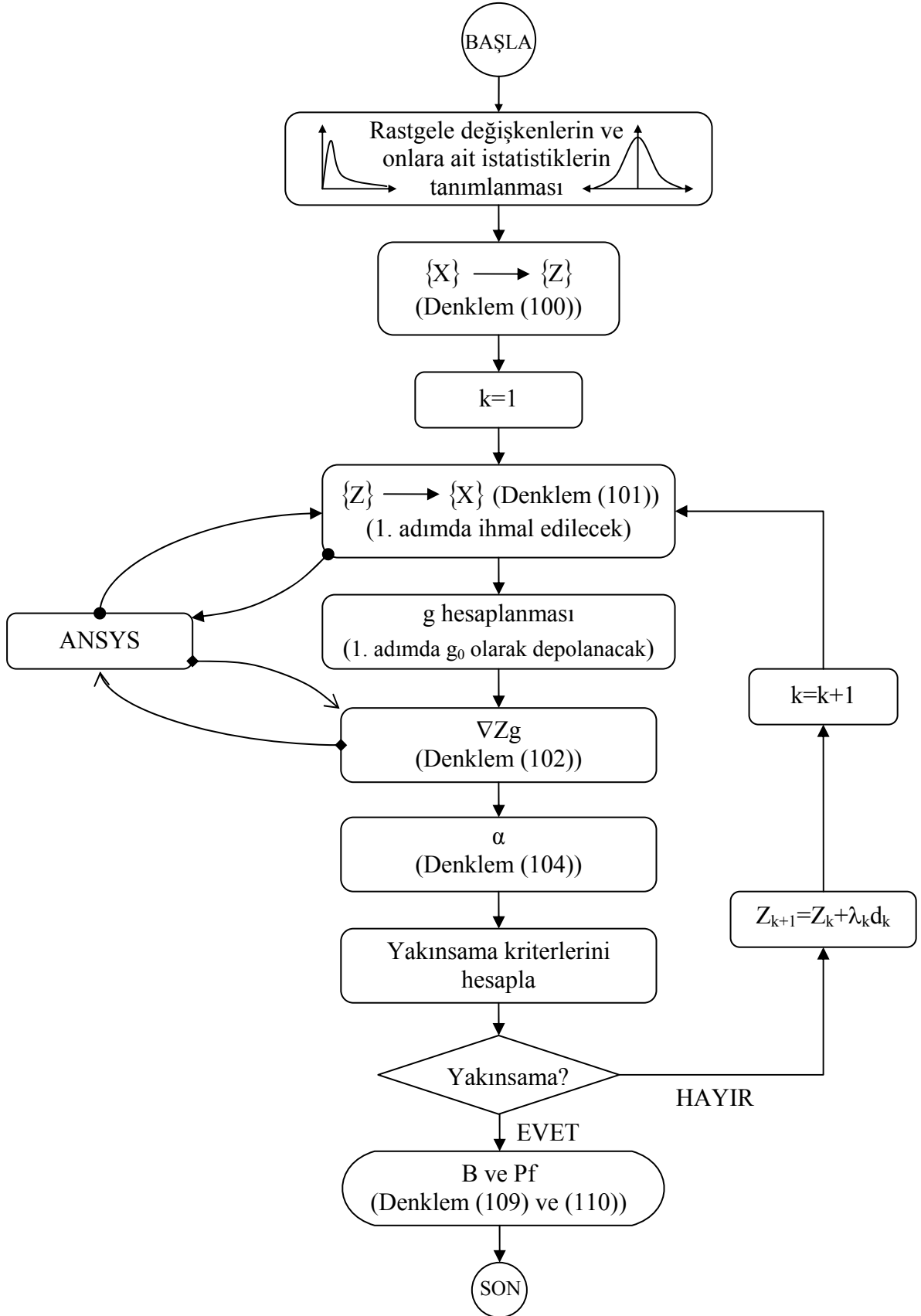
Şekil 29. FERUM programı çalışma şeması

Tablo 7. FERUM programında kullanılan başlıca dosyalar

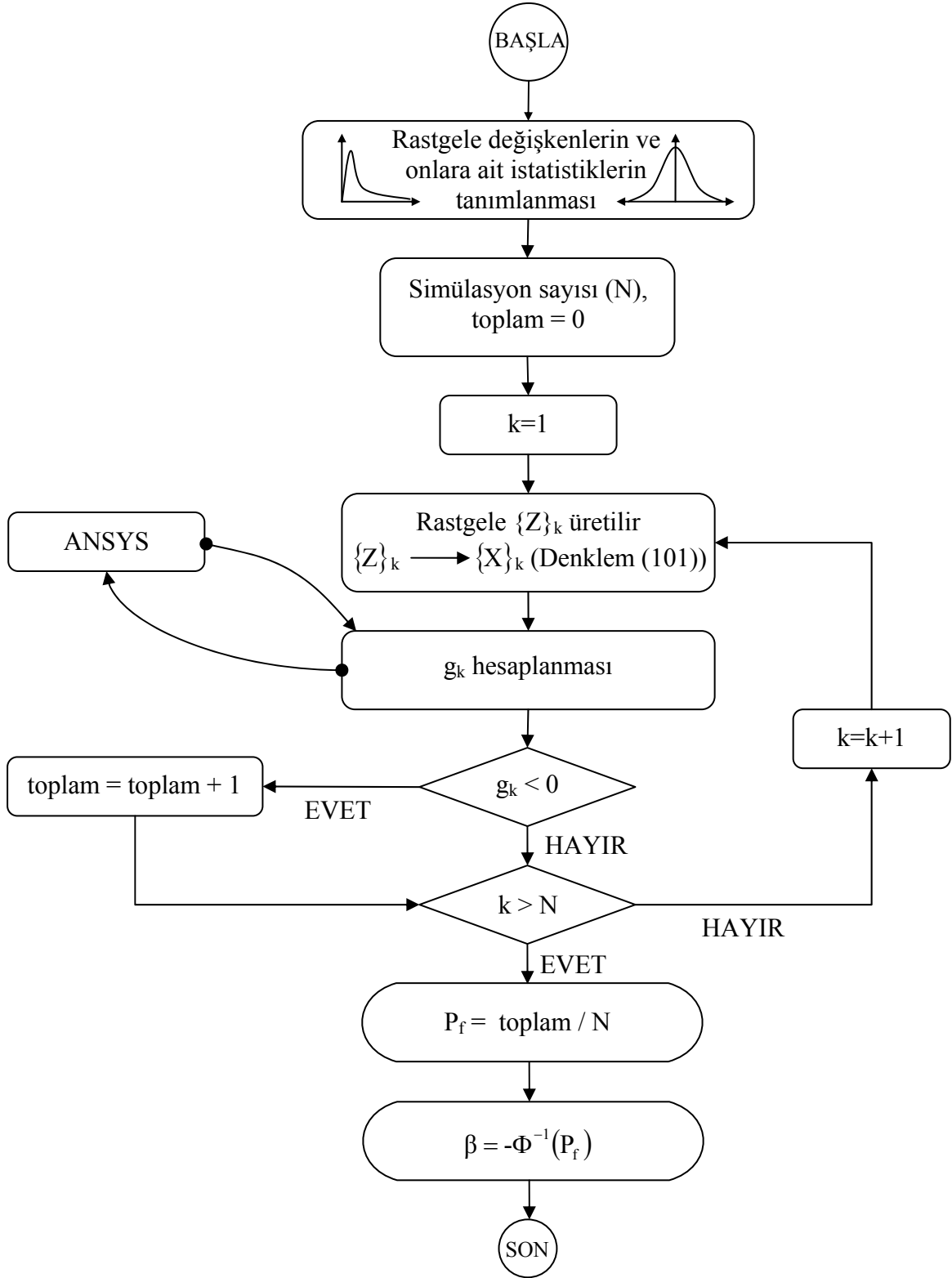
Dosya adı	Görevi	Açıklaması
main_FERUM_responsematrix.m	Ana program	Değişkenlere ait ortalama ve standart sapma değerleri dosyadan okunur ve güvenilirlik analiz yöntemi seçilir.
rel_analysis.m	Alt program	Değişkenlere ait dağılım, yakınsama kriteri ve simülasyon sayısı tanımlanır ve seçilen güvenilirlik analiz yöntemi için alt program çağrılır.
form.m	Alt program	Birinci derece güvenilirlik analizi gerçekleştirilir.
sorm.m	Alt program	İkinci derece güvenilirlik analizi gerçekleştirilir.
simulation.m	Alt program	Monte Carlo analizleri gerçekleştirilir.
responsematrix.m	Alt program	Limit durum fonksiyonu tanımlanır.
main_prob.dat	Veri dosyası	Değişkenlere ait ortalama ve standart sapma değerleri bu dosyada verilir.

Sonlu Elemanlar Yöntemi ile çözüm yapan ANSYS yazılımının FERUM programı ile birlikte kullanılması için ANSYS programının arka planda çalışma özelliğinden faydalanılmıştır. Programın bu özelliği, kullanıcının grafik ara yüzünü açmadan dosya üzerinden işlem yapabilmesini sağlamaktadır. Bu nedenle, ANSYS programı bir başka programın alt programı olarak çağrılabilir. ANSYS programında kullanıcılar grafik ara yüzünün yanı sıra yazılıma ait bir programlama dilini kullanarak da modelleme ve analiz işlemlerini gerçekleştirebilirler. APDL olarak bilinen bu dil, FORTRAN program diline benzeyen ve komutları tekrarlama, makrolar, do-loop döngüleri, if-then-else döngüleri ile matris işlemleri gibi birçok komut özelliğine sahiptir. Böylece, ANSYS veri dosyasında istenilen işlem yapılabilir, istenilen veri dosyadan okunabilir ve istenilen veri dosyaya yazılabilir.

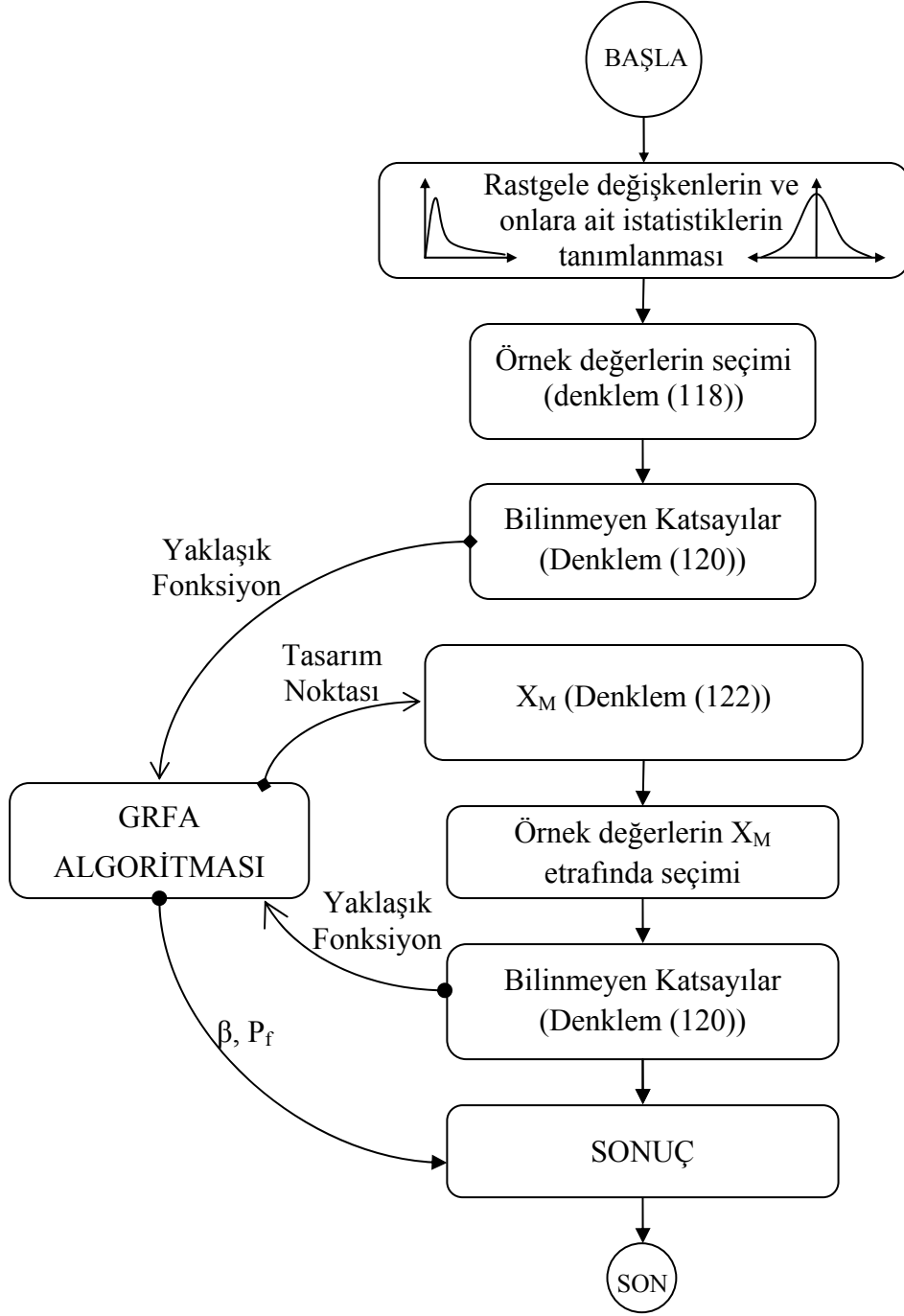
Bu tez çalışmasında, FERUM-ANSYS birleştirmesinde Direkt Birleştirme Yöntemi ve Yanıt Yüzeyi Yöntemi kullanılmıştır. Bu algoritma ön yüzü beton kaplı kaya dolgu barajların güvenilirlik analizi için modifiye edilmiştir. Şekil 30-32'de sırasıyla Direkt Birleştirme Yöntemi ile Geliştirilmiş Rackwitz-Fiessler Yönteminin, Direkt Birleştirme Yöntemi ile Monte Carlo Yönteminin ve Yanıt Yüzeyi Yöntemi ile Geliştirilmiş Rackwitz-Fiessler Yönteminin algoritmaları verilmiştir.



Şekil 30. Direkt Birleştirme Yöntemi ile Geliştirilmiş Rackwitz-Fiessler Yöntemi akış şeması



Şekil 31. Direkt Birleştirme Yöntemi ile Monte Carlo Yöntemi akış şeması



Şekil 32. Yanıt Yüzeyi Yöntemi ile Geliştirilmiş Rackwitz-Fiessler Yöntemi akış şeması

2.4. Ön Yüzü Beton Kaplı Kaya Dolgu Barajların Güvenilirlik Analizinde Kullanılan Limit Durum Fonksiyonları

Ön yüzü beton kaplı kaya dolgu barajlar için gerçekleştirilen çalışmaların birçoğunda yapısal parametrelerin tüm yapı için belli olduğu düşünülmüştür. Deterministik analizlerle elde edilen sonuçlar bir noktanın ya da bir sistemin emniyeti hakkında tek başına yeterli

olmamaktadır. Örneğin 20MPa basınç dayanımına sahip bir betonda elde edilen 19MPa değerindeki basınç gerilmesi dikkate alınırsa, bu betonun mevcut yükler altında güvenilir olduğu düşünülebilir. Ancak, değişken parametreler dikkate alınarak yapılan güvenilirlik analizleri sonucunda, ilgili noktanın göçme olasılığı hakkında nihai bir fikir sahibi olunabilmektedir. İnşa özellikleri nedeniyle ÖYBKKD barajlar, tasarım parametreleri dikkate alındığında birçok belirsizlik içermektedir. Bu belirsizlikler geometrik özellikler (kesit özellikleri ve boyutlar), malzemenin mekanik özellikleri (elastisite modülü, yoğunluk, dayanım ve Poisson oranı), yükün büyüklüğü ve dağılımı vb. olarak sıralanabilir. Bu çalışmada barajda geometrik belirsizliklerin bulunmadığı kabul edilmiştir.

ÖYBKKD barajlarda en önemli unsurlardan biri beton plağın davranışdır. Beton plak ve beton plak-kaya dolgu birleşiminde oluşacak çatlaklar barajın güvenliğini tehdit edebilirler. Bu nedenle, bu çalışmada beton plakta statik ve dinamik yükler altında oluşan asal basınç (σ_b) ve çekme (σ_c) gerilmelerine göre belirli noktaların güvenilirliklerinin incelenmesi amaçlanmıştır. Sonlu Elemanlar Yöntemi ile birleştirilerek gerçekleştirilen güvenilirlik analizlerinde, bu noktalar için asal basınç ve çekme gerilmeleri limit durum fonksiyonları sırasıyla (102) ve (103) ifadelerinde verilmiştir.

$$g(X) = 20000 - \sigma_b \quad (102)$$

$$g(X) = 1600 - \sigma_c \quad (103)$$

Statik yüklere maruz baraj sistemlerinde, beton plaktaki düğüm noktalarında hesaplanan ortalama değerler, beton basınç ve çekme dayanımları ile kıyaslanmış ve bu değerlerden büyük ya da yakın olduğu yerlerde güvenilirlik analizleri gerçekleştirilmiştir. Yer hareketine maruz baraj sistemlerinde çözüm süresinin statik yükler için gerçekleştirilen çözümlere göre oldukça uzun olması nedeniyle sadece en kritik asal basınç ve çekme gerilmeleri elde edilen düğüm noktaları dikkate alınarak güvenilirlik analizleri gerçekleştirilmiştir. Bunun sonucunda, seçilen her bir kritik düğüm noktası için güvenilirlik analizi yapılmış olup her analizden bir güvenilirlik indeksi-göçme olasılığı çifti elde edilmiştir.

2.5. Ön Yüzü Beton Kaplı Kaya Dolgu Barajların Güvenilirlik Analizinde Kullanılan Değişken Parametreler

Bu çalışmada, statik sonlu eleman analizlerinde barajın kendi ağırlığı ve rezervuar suyunun hidrostatik basınç etkisi yük olarak dikkate alınmıştır. Statik yüklere maruz baraj için gerçekleştirilen güvenilirlik analizlerinde dikkate alınan değişken parametreler, ortalama ve COV (standart sapma/ortalama) değerleri Tablo 8’de verilmiştir. Yapılan çözümlerde değişken parametrelerin lognormal dağılıma sahip olduğu kabul edilmiştir.

Tablo 8. Statik analizlerde dikkate alınan değişken parametrelerin ortalama ve COV değerleri

Malzeme	Elastisite Modülü		Poisson Oranı		Yoğunluk	
	Ortalama (10^7 kN/m ²)	COV (%)	Ortalama	COV (%)	Ortalama (kg/m ³)	COV (%)
Beton	2.800	15	0.20	5	2395.5	10
2A (Elenmiş kaya ya da alüvyon)	0.040	20	0.36	5	1880.0	10
3A (Seçilmiş kaya)	0.030	20	0.36	5	1870.0	10
3B (Ocak kayası)	0.025	20	0.32	5	1850.0	10
3C (Ocak kayası)	0.020	20	0.32	5	1850.0	10
3D (Seçilmiş kaya)	0.018	20	0.26	5	1800.0	10
Zemin (Volkanik tüf)	1.036	-	0.17	-	2732.9	-
Zemin (Kireçtaşı)	1.206	-	0.18	-	2834.8	-
Zemin (Spilit)	1.387	-	0.18	-	2834.8	-
Malzeme	Kohezyon		İçsel Sürtünme Açısı		Dayanım	
	Ortalama (kN/m ²)	COV (%)	Ortalama	COV (%)	Ortalama (kN/m ²)	COV (%)
Beton	2500	10	30	5	20000 ^a	10
					1600 ^b	10

^aBasınç dayanımı

^bÇekme dayanımı

Bu çalışmada, dinamik yük olarak kaya zemin tabanına indirgenmiş deprem ivme kaydı dikkate alınmıştır. Depreme maruz bir barajın sonlu eleman analiz süresi ile barajın statik analiz süresi kıyaslandığında oldukça uzundur. Günümüzde kullanılan son teknolojiye sahip bilgisayarlar ile iki boyutlu sistemler için statik analiz süresi çoğunlukla saniye ve dakikalar ile ifade edilirken, deprem analizleri saatleri bulan sürelerde çözüme kavuşmaktadır. Bu nedenle, deprem yükü için MCY ile çözüm yapmak olası görülmemiştir. Sonlu eleman çözüm süresinin uzun olması ve Direkt Birleştirme Yöntemiyle Geliştirilmiş Rackwitz-Fiessler Yönteminin kaç iterasyonda çözüm vereceğinin belli olmaması nedeniyle depreme maruz ÖYBKKD barajların güvenilirlik

analizlerinde koşum sayısı önceden belli olan Yanıt Yüzeyi Yöntemiyle Geliştirilmiş Rackwitz-Fiessler Yöntemi güvenilirlik analizi için tercih edilmiştir.

Yanıt Yüzeyi Yönteminde koşum sayısı ile değişken sayısı doğrudan ilişkili olduğu için zamandan tasarruf etmek amacıyla gövde malzemelerinden beton plak davranışına en çok etki edecek birkaç parametre değişken alınmıştır. Ancak, bu yöntem kullanıldığında bile, örneğin, rezervuarın dolu halinde, Durum 4'te en kritik asal basınç gerilmesi için gerçekleştirilen güvenilirlik analizi sadece 40 koşum için 5 gün 12 saat 37 dakika sürmüştür. Bu nedenle, deprem yüküne maruz baraj-zemin-rezervuar etkileşim sistemleri için beton plak kalınlığı boyunca oluşan yalnızca en kritik asal çekme ve basınç gerilmeleri için güvenilirlik analizleri gerçekleştirilmiştir.

Bu çalışmada, depreme maruz ÖYBKKD barajın güvenilirlik analizlerinde kullanılan değişken parametreler, ortalama ve COV (standart sapma/ortalama) değerleri Tablo 9'da verilmiştir. Yapılan çözümlerde değişken parametrelerin lognormal dağılıma sahip olduğu kabul edilmiştir.

Tablo 9. Dinamik analizlerde dikkate alınan değişken parametrelerin ortalama ve COV değerleri

Malzeme	Elastisite Modülü		Poisson Oranı		Yoğunluk	
	Ortalama (10^7 kN/m ²)	COV (%)	Ortalama	COV (%)	Ortalama (kg/m ³)	COV (%)
Beton	2.800	15	0.20	-	2395.5	-
2A (Elenmiş kaya ya da alüvyon)	0.040	-	0.36	-	1880.0	-
3A (Seçilmiş kaya)	0.030	-	0.36	-	1870.0	-
3B (Ocak kayası)	0.025	20	0.32	-	1850.0	10
3C (Ocak kayası)	0.020	20	0.32	-	1850.0	-
3D (Seçilmiş kaya)	0.018	-	0.26	-	1800.0	-
Zemin (Volkanik tüf)	1.036	-	0.17	-	2732.9	-
Zemin (Kireçtaşı)	1.206	-	0.18	-	2834.8	-
Zemin (Spilit)	1.387	-	0.18	-	2834.8	-
Beton	Kohezyon		İçsel Sürtünme Açısı		Dayanım	
	Ortalama (kN/m ²)	COV (%)	Ortalama	COV (%)	Ortalama (kN/m ²)	COV (%)
	2500	10	30	5	20000 ^a	10
					1600 ^b	10
	Deprem Yüğü Büyütme Faktörü			Sönüm		
	Ortalama		COV (%)	Ortalama		COV (%)
	1		10	0.05		20

^aBasınç dayanımı

^bÇekme dayanımı

2.6. Güvenilirlik Analizlerinde Kullanılan Yöntemler İçin Karşılaştırmalar

Ön yüzü beton kaplı kaya dolgu barajların kendi ağırlığı için güvenilirlik analizleri Tablo 6’da gösterilen dört farklı durum için gerçekleştirilmiştir. Güvenilirlik analizleri, beton plak yüzeyinde sonlu eleman analizlerinde belirlenen kritik düğüm noktalarında gerçekleştirilmiştir.

Statik yükler altındaki çözümler özellikle birleşik modellenmiş sistemlerde Durum 1 ve 2 için bir kaç saniye sürerken, Durum 3 ve 4’te nispeten daha uzun sürmektedir. Sürtünme tanımlı sistemler ise birleşik modellenmiş sistemlerle kıyaslandığında daha uzun sürede çözülmektedir. Durum 3 ve 4’te sonlu eleman analizinin süresi 1 dakikaya kadar çıkmıştır.

Statik yüklere maruz sistemlerin güvenilirlik analizlerinde, genellikle gerçek çözüme daha yakın sonuçlar verdiği kabul edilen Geliştirilmiş Rackwitz-Fiessler Yöntemi ile Direkt Birleştirme Yönteminin birlikte kullanıldığı algoritma tercih edilmiştir. Ancak, rezervuarın dolu halinde bazı düğüm noktaları için gerçekleştirilen çözümler esnasında birleşik modellenmiş sistemlerde Durum 4’te ve sürtünme tanımlı sistemlerde Durum 3 ve 4’te 0.01 hassasiyet değeri için 3 haftalık bekleyişin ardından yakınsama elde edilememiştir. 30cm’lik plak kalınlığı için sürtünme dahil edilen sistemde rezervuarın dolu halinde Durum 4’te 0.90 gibi çok kaba bir hassasiyet değeri için bile 10 saat civarı bir sürede 1 nolu düğüm noktasının asal çekme gerilme değeri için çözüm alınabilmiştir. Bu nedenle, sadece bu üç sistemin güvenilirlik analizlerinde Direkt Birleştirme Yöntemi yerine Yanıt Yüzeyi Yöntemi tercih edilmiştir. Her iki yöntemde de dikkate alınan değişken parametreleri ve dağılımlar aynıdır. Yanıt Yüzeyi Yöntemi kullanılarak 0.001 hassasiyet için ilgili sistemlerde başarılı sonuçlar elde edilmiştir.

Tablo 10’da Geliştirilmiş Rackwitz-Fiessler Yöntemi ile Direkt Birleştirme Yönteminin ve Geliştirilmiş Rackwitz-Fiessler Yöntemi ile Yanıt Yüzeyi Yönteminin birlikte kullanıldığı algoritmalarından elde edilen yaklaşık sonuçların kesin çözüm veren Monte Carlo Yöntemi ile kıyaslamaları verilmiştir. Geliştirilmiş Rackwitz-Fiessler Yöntemi (Direkt Birleştirme Yöntemi ile)-Monte Carlo Yöntemi karşılaştırması, rezervuarın boş halinde birleşik modellenmiş sistemde 70cm’lik plak taban kalınlığı bulunan modelde Durum 1’de 20 nolu düğüm noktasında (tabandan 90m yukarıda) asal basınç gerilmesi için yapılmıştır. Geliştirilmiş Rackwitz-Fiessler Yöntemi (Yanıt Yüzeyi Yöntemi ile)-Monte Carlo Yöntemi karşılaştırması ise sürtünme dikkate alınan 58cm’lik

plak taban kalınlığı bulunan modelde, rezervuarın dolu halinde Durum 3'te 26 nolu düğüm noktasında (tabandan 30m yukarıda) asal basınç gerilmesi için yapılmıştır. Yapılan karşılaştırmalara göre, yaklaşık yöntemlerle elde edilen çözümlerin yeterli yaklaşıklıkta olduğu kabul edilmiştir.

Tablo 10. GRFY (DBY ile)-MCY ve GRFY (YYY ile)-MCY için karşılaştırmalar

Karşılaştırma	Yöntem	β	P_f	β İçin Hata Oranı	Limit durum fonksiyonunu kullanma sayısı
GRFY(DBY ile)-MCY	GRFY	0.642	0.26030	0.03167	41
	MCY	0.663	0.25373	-	10000
GRFY(YYY ile)-MCY	YYY	0.228	0.40992	0.10588	80
	MCY	0.255	0.39920	-	10000

3. BULGULAR VE İRDELEMELER

Bu bölümde birinci olarak deprem etkisi altında ön yüzü beton kaplı kaya dolgu barajın davranışı incelenmiştir. İkinci olarak da ön yüzü beton kaplı kaya dolgu barajın kendi ağırlığı ve deprem etkisi için güvenilirlik analizleri gerçekleştirilmiş olup, seçilen kritik noktalar için göçme olasılıkları belirlenmiştir.

3.1. Ön Yüzü Beton Kaplı Kaya Dolgu Barajların Deprem Analizi

Bu tez çalışmasında, 1992 Erzincan depremi kuzey-güney bileşenine ait ivme kaydı kaya temel tabanına indirgenerek kullanılmış ve gerçekleştirilen deprem analiz sonuçları birleşik ve sürtünmeli olarak modellenmiş sistemler için:

- beton plak yüksekliği boyunca maksimum yatay yerdeğiştirmelerin değişimi,
 - kret noktasında beton plak-kaya dolgu arasında düşey yerdeğiştirmelerin zamanla değişimi,
 - kaya dolgu-temel zemini arasında yatay yerdeğiştirmelerin zamanla değişimi,
 - beton plak yüksekliği boyunca maksimum asal gerilme bileşenlerinin değişimi,
- dikkate alınarak incelenmiştir.

3.1.1. Yerdeğiştirmeler

3.1.1.1. Birleşik Modellenmiş Sistemlerde Yerdeğiştirmeler

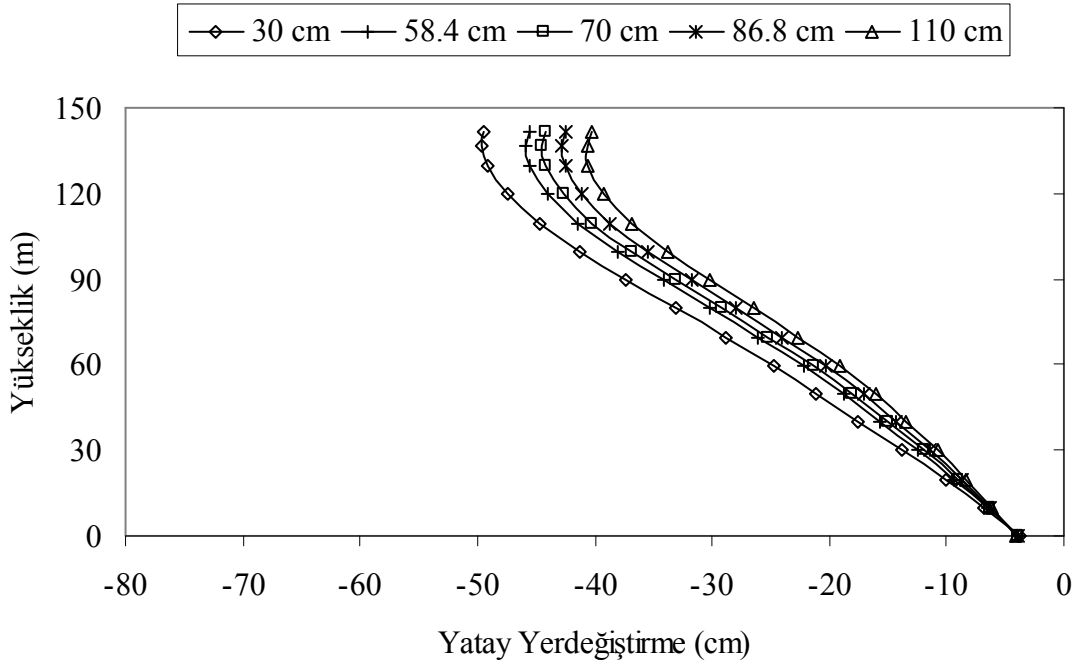
Birleşik olarak modellenmiş sistemlerde, beton plak yüksekliği boyunca menba ve mansap doğrultusunda elde edilen kritik yatay yerdeğiştirmelerin beton plak taban kalınlıklarına göre değişimi rezervuarın boş hali için Şekil 33-38'de, dolu hali için Şekil 39-44'te verilmiştir. Boş ve birleşik sistemlerde beton plak kalınlığı azaldıkça yerdeğiştirmeler her iki doğrultuda da artmıştır. Artışlar özellikle menba doğrultusunda daha belirgin olmuştur. Barajı oluşturan yapı elemanlarının malzeme bakımından lineer olmayan davranışları yerdeğiştirmelerde önemli artışlara neden olmuştur. Bununla birlikte, beton plağın da lineer olmayan davranış gösterdiği Durum 4'te menba ve mansap doğrultularında en büyük yatay yerdeğiştirmeler elde edilmiştir. Ayrıca, yatay yerdeğiştirmelerin kret noktasına yaklaştıkça arttığı görülmüştür.

Rezervuarın boş halinde en küçük kritik yatay yerdeşiftirmeler Durum 2’de 110cm’lik plak taban kalınlığı için menba yönünde 40.7cm, mansap yönünde 20.7cm olarak belirlenmiştir. En büyük yatay yerdeşiftirmeler ise 30cm’lik plak taban kalınlığı için Durum 4’te menba yönünde 69.2cm ve mansap yönünde 29.4cm olarak hesaplanmıştır. Barajın mevcut 70cm’lik plak taban kalınlığı için menba ve mansap yönlerinde Durum 2’de, sırasıyla, 44.5cm ve 23.1cm, Durum 4’te 64.3cm ve 27.1cm’lik yatay yerdeşiftirmeler oluşmuştur.

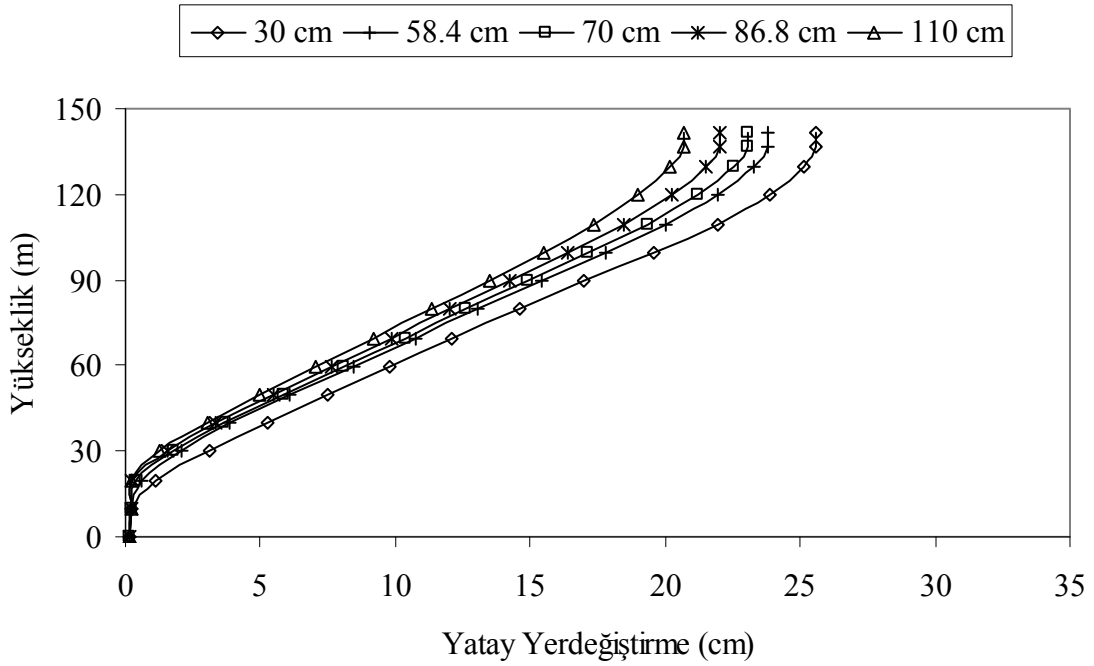
Birleşik modellenmiş sistemlerde hidrodinamik basıncın dikkate alınmasıyla boş rezervuar haline göre yerdeşiftirmelerin arttığı görülmüştür. Bununla birlikte beton plak kalınlığının artması yerdeşiftirmeleri azaltmıştır. Rezervuarın boş halinde olduğu gibi, Durum 3’te Durum 2’ye göre, Durum 4’te de Durum 3’e göre daha büyük yatay yerdeşiftirmeler elde edilmiştir. Boş haldekine benzer şekilde en büyük yatay yerdeşiftirmeler kret noktasına yakın bölgelerde elde edilmiştir.

Hidrodinamik basınç dikkate alındığında rezervuarın boş halinde olduğu gibi en küçük kritik yatay yerdeşiftirmeler 110cm’lik plak taban kalınlığı için Durum 2’de, menba yönünde 42.5cm ve mansap yönünde 22.0cm olarak bulunmuştur. En büyük kritik yatay yerdeşiftirmeler ise 30cm’lik plak taban kalınlığı için Durum 4’te menba yönünde 72.8cm ve mansap yönünde ise 30.7cm olarak belirlenmiştir. Barajın mevcut 70cm’lik plak taban kalınlığı için Durum 2’de menba yönünde 46.6cm ve mansap yönünde 24.3cm’lik yatay yerdeşiftirme oluşurken, Durum 4’te, sırasıyla, 67.8cm ve 28.5cm’lik yatay yerdeşiftirmeler oluşmuştur.

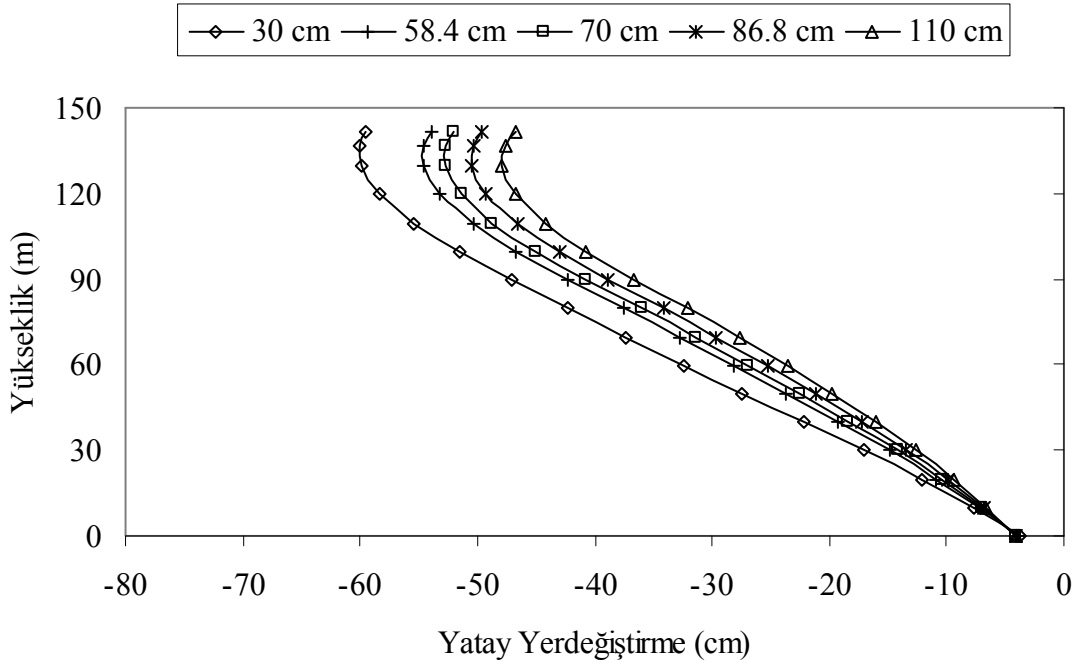
Rezervuarın boş ve dolu hali için birleşik modellenmiş sistemler kıyaslandığında, kritik yatay yerdeşiftirmelerin en büyüğü baraj rezervuarının dolu halinde, Durum 4’te sabit 30cm’lik plak kalınlığı için elde edilmiştir. En küçük kritik yatay yerdeşiftirmeler ise baraj boşken Durum 2’de 110cm’lik plak taban kalınlığı olan sistemde oluşmuştur.



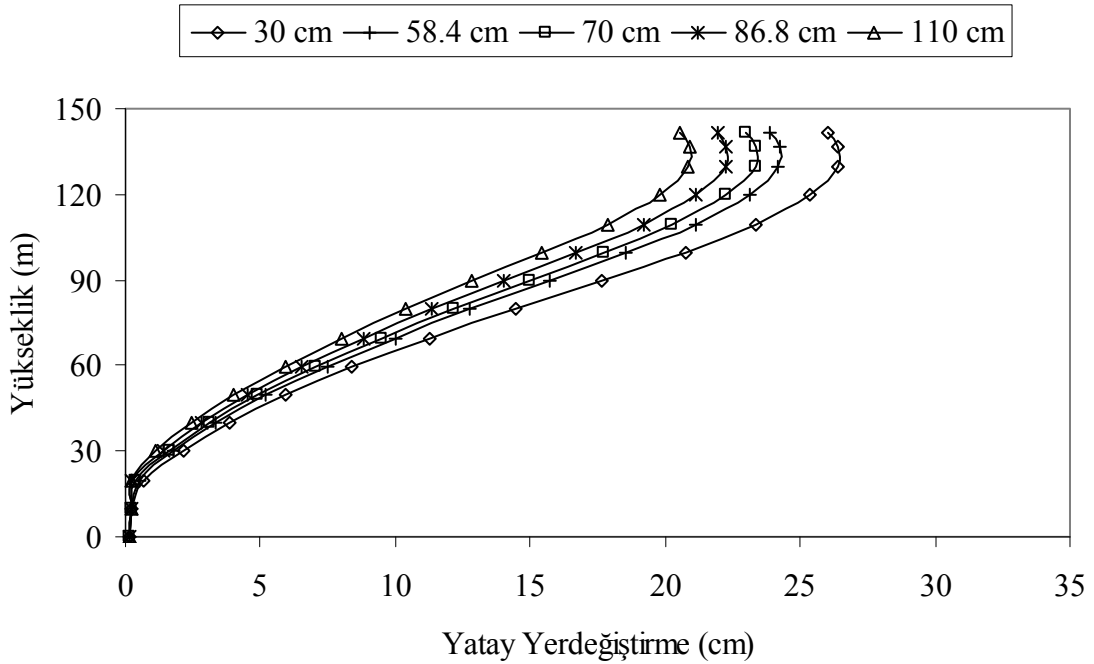
Şekil 33. Birleşik modellenmiş sistemlerde rezervuarın boş halinde Durum 2’de beton plakta menba yönünde oluşan en büyük yatay yerdeğiştirmeler



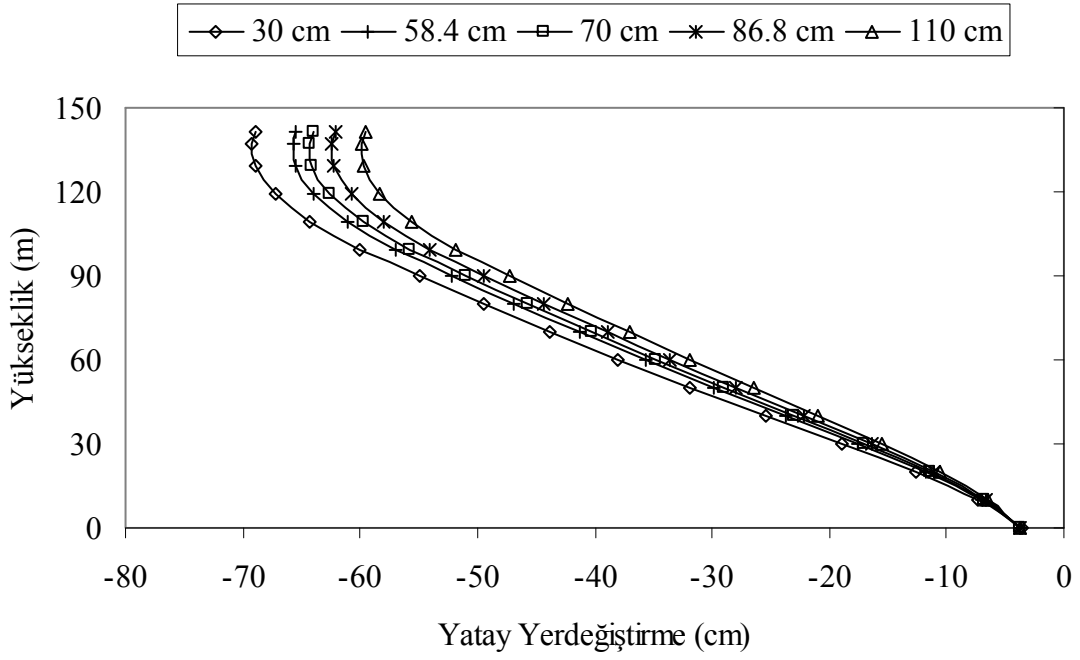
Şekil 34. Birleşik modellenmiş sistemlerde rezervuarın boş halinde Durum 2’de beton plakta mansap yönünde oluşan en büyük yatay yerdeğiştirmeler



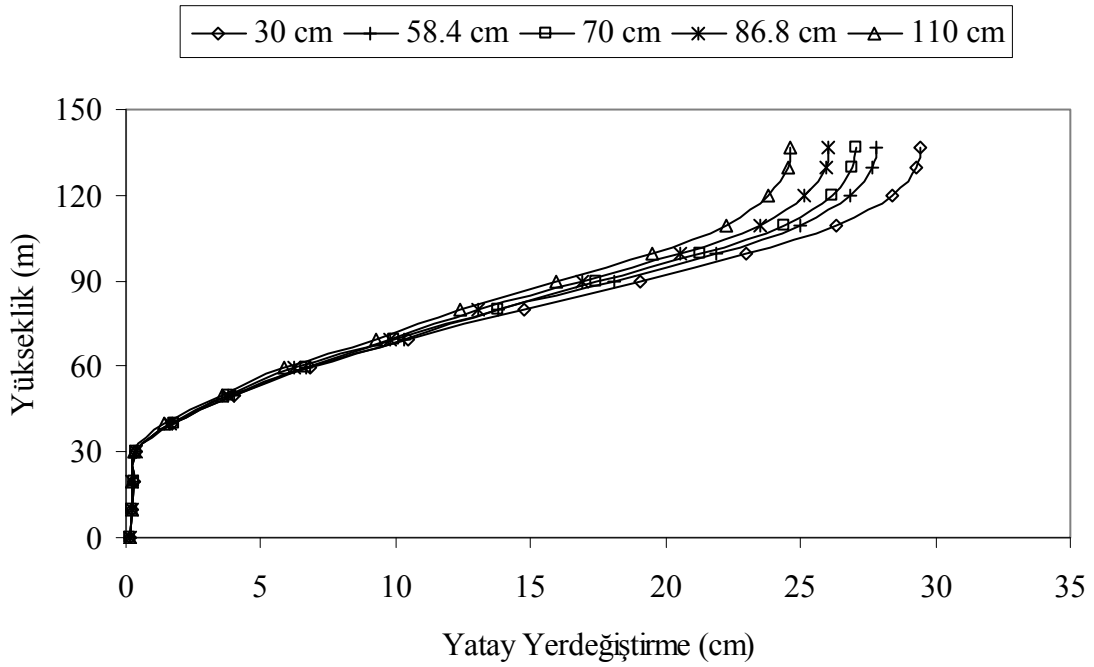
Şekil 35. Birleşik modellenmiş sistemlerde rezervuarın boş halinde Durum 3’te beton plakta menba yönünde oluşan maksimum yatay yerdeğiştirmeler



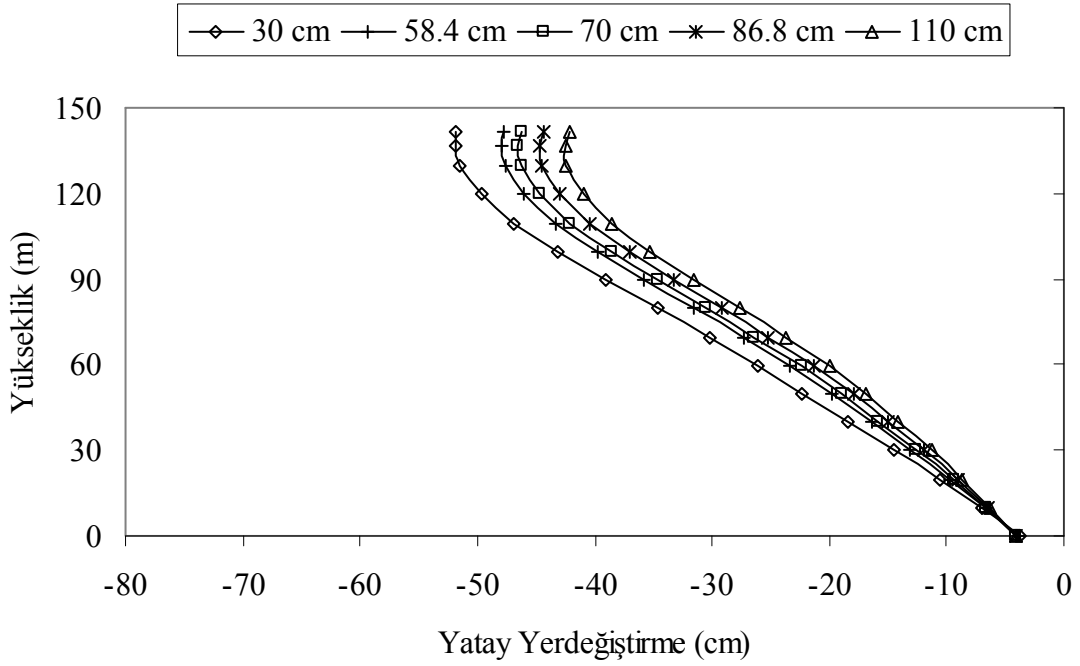
Şekil 36. Birleşik modellenmiş sistemlerde rezervuarın boş halinde Durum 3’te beton plakta mansap yönünde oluşan en büyük yatay yerdeğiştirmeler



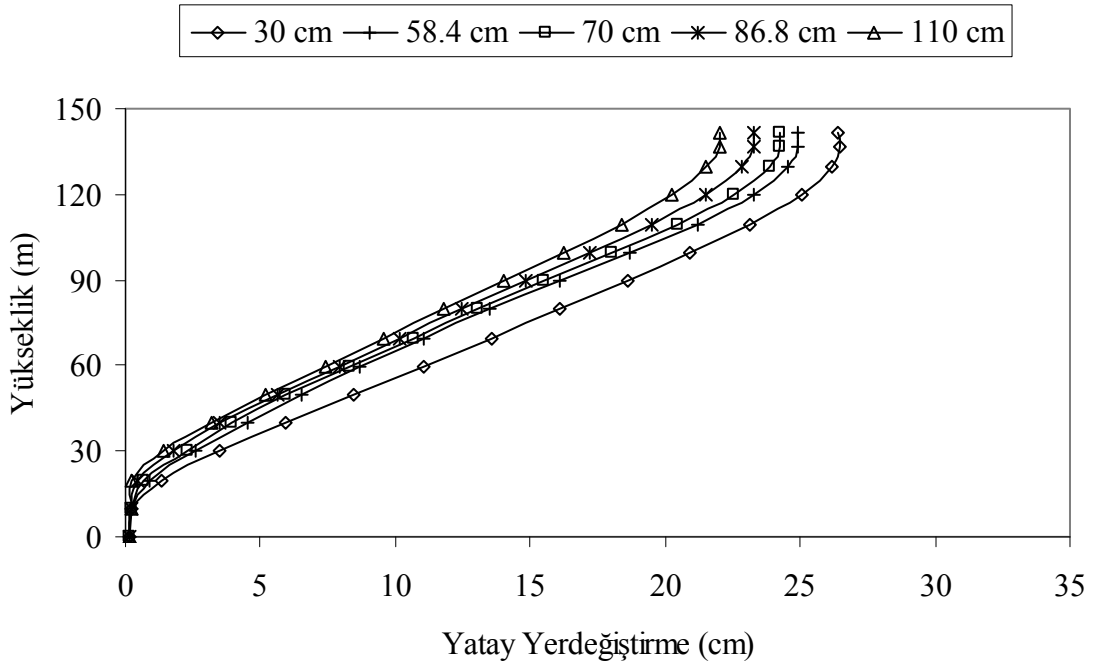
Şekil 37. Birleşik modellenmiş sistemlerde rezervuarın boş halinde Durum 4’te beton plakta menba yönünde oluşan en büyük yatay yerdeğistirmeler



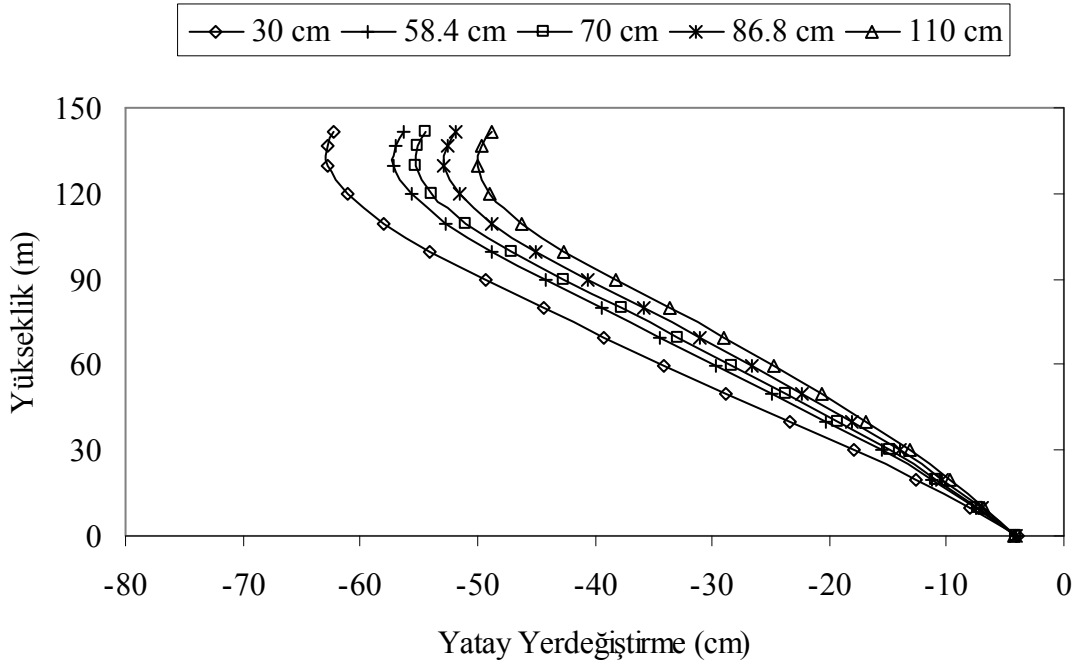
Şekil 38. Birleşik modellenmiş sistemlerde rezervuarın boş halinde Durum 4’te beton plakta mansap yönünde oluşan en büyük yatay yerdeğistirmeler



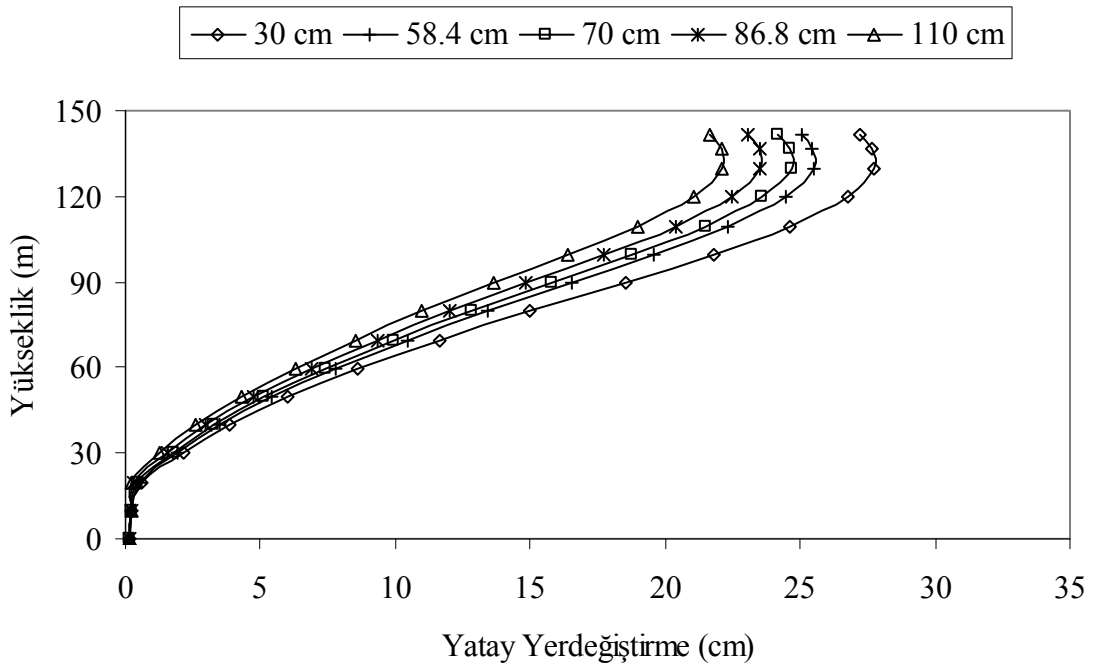
Şekil 39. Birleşik modellenmiş sistemlerde rezervuarın dolu halinde Durum 2’de beton plakta menba yönünde oluşan en büyük yatay yerdeğiştirmeler



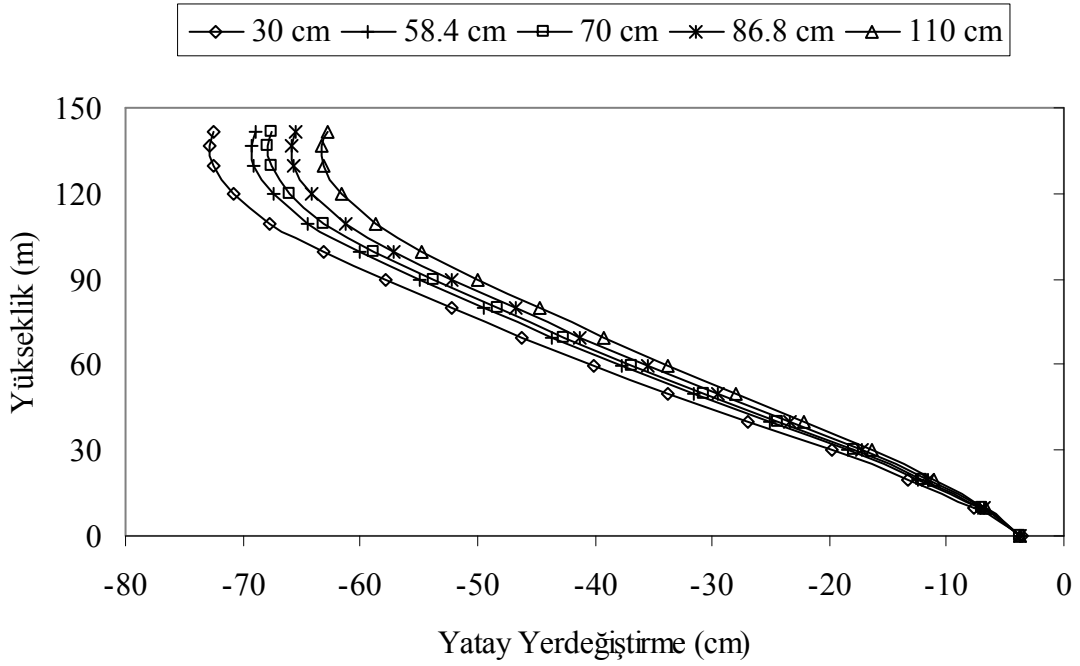
Şekil 40. Birleşik modellenmiş sistemlerde rezervuarın dolu halinde Durum 2’de beton plakta mansap yönünde oluşan en büyük yatay yerdeğiştirmeler



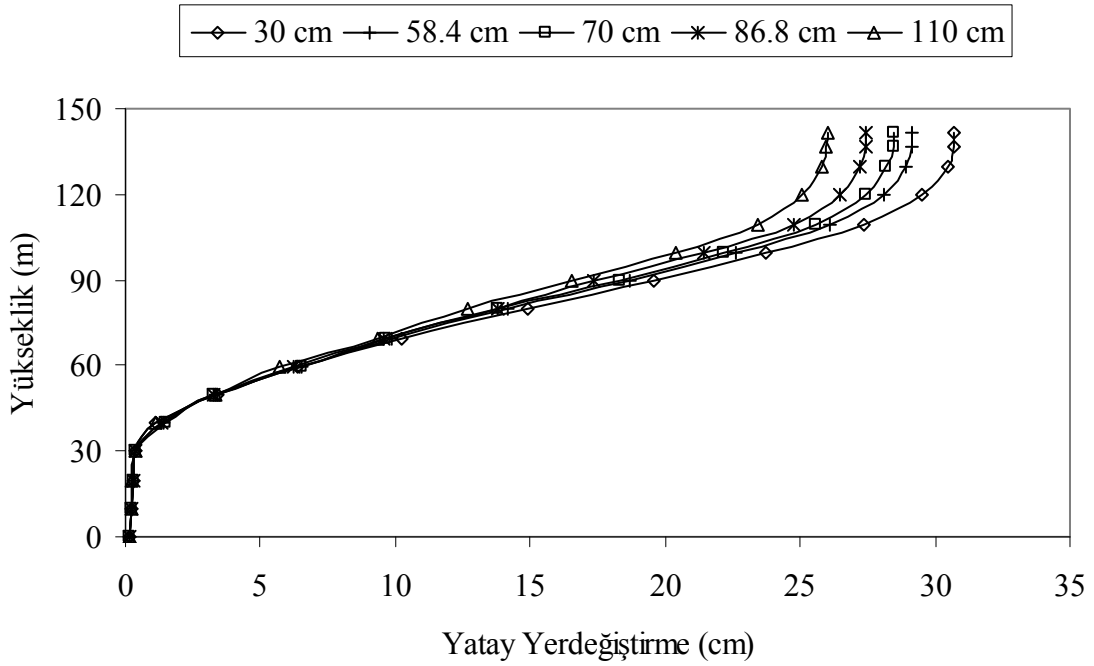
Şekil 41. Birleşik modellenmiş sistemlerde rezervuarın dolu halinde Durum 3'te beton plakta menba yönünde oluşan en büyük yatay yerdeğıştirmeler



Şekil 42. Birleşik modellenmiş sistemlerde rezervuarın dolu halinde Durum 3'te beton plakta mansap yönünde oluşan en büyük yatay yerdeğıştirmeler



Şekil 43. Birleşik modellenmiş sistemlerde rezervuarın dolu halinde Durum 4'te beton plakta menba yönünde oluşan en büyük yatay yerdeğıştirmeler



Şekil 44. Birleşik modellenmiş sistemlerde rezervuarın dolu halinde Durum 4'te beton plakta mansap yönünde oluşan en büyük yatay yerdeğıştirmeler

3.1.1.2. Sürtünme Tanımlanan Sistemlerde Yerdeğiştirmeler

Birleşim bölgelerinde sürtünme dikkate alınarak oluşturulan modellerde, beton plakta oluşan kritik yatay yerdeğiştirmelerin yükseklik boyunca plak taban kalınlıklarına göre değişimi rezervuarın boş hali için Şekil 45-48'de, dolu hali için Şekil 49-52'de verilmiştir. Sürtünmenin dikkate alındığı sistemlerde maksimum yatay yerdeğiştirmelerin değişimi, birleşik modellenmiş sistemlerdeki yatay yerdeğiştirmelerin değişimi ile benzer özellikler göstermiştir. Baraj rezervuarının boş halinde, yatay yerdeğiştirmeler Durum 3'te Durum 2'ye göre, Durum 4'te de Durum 3'e göre menba yönünde çok büyük artışlar göstermiştir. Durum 4'te plak kalınlığı azaldıkça yerdeğiştirmelerdeki artış daha da belirginleşmiştir. Durum 3 ve 4'te menba yönünde yatay yerdeğiştirmelerde oluşan büyük artışlar mansap yönünde kritik yatay yerdeğiştirmelerin oluşmamasına sebep olmuştur.

Rezervuarın boş halinde menba yönünde oluşan kritik yatay yerdeğiştirmelerin en küçüğü Durum 2'de 110cm'lik plak kalınlığı için 40.3cm, en büyüğü Durum 4'te 30cm'lik plak kalınlığı için 103.2cm olarak elde edilmiştir. Mansap yönünde ise Durum 3 ve 4'te 0.83cm'lik en küçük yatay yerdeğiştirmeler oluşurken Durum 2'de 30cm'lik plak kalınlığı için 21.2cm'lik kritik yatay yerdeğiştirme oluşmuştur. Barajın mevcut 70cm'lik plak taban kalınlığı için menba yönünde Durum 2'de en küçük kritik yatay yerdeğiştirmeler 40.8cm olarak elde edilirken, mansap yönünde Durum 3 ve 4'te 0.84cm'lik yatay yerdeğiştirme oluşmuştur.

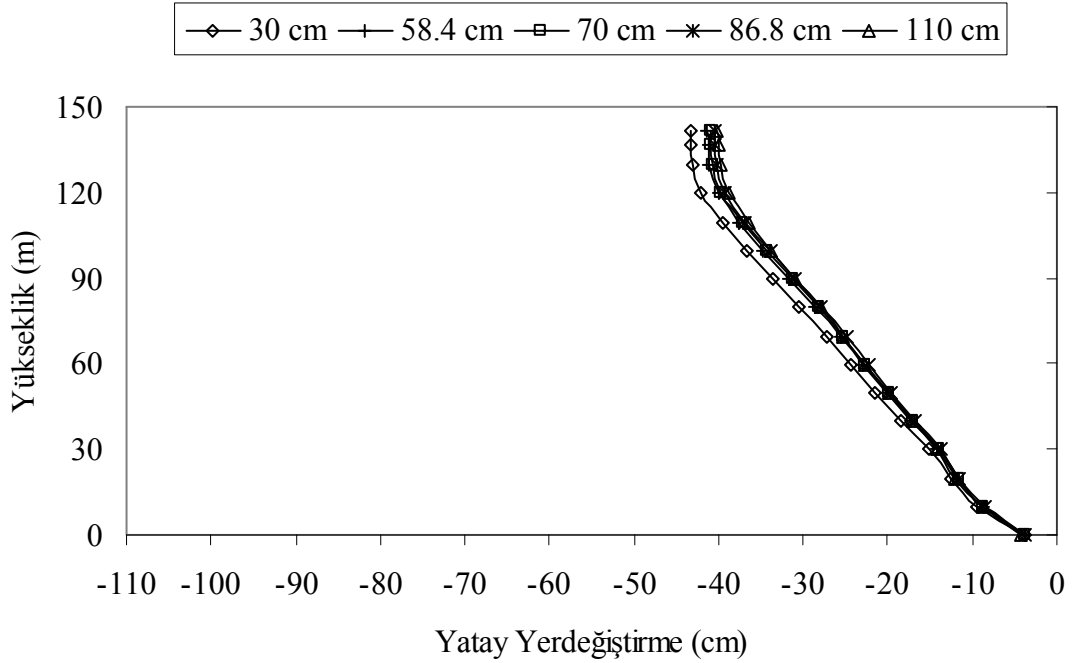
Hidrodinamik basınç etkisi sürtünme dikkate alınan sistemlerde de ayırt edilmektedir. Bu sistemlerde plak kalınlığının azalması, yatay yerdeğiştirmelerde artışa sebep olmuştur. Bununla birlikte özellikle gövdedeki malzemelerin lineer olmayan davranışlarının dikkate alınmasıyla yatay yerdeğiştirmelerde önemli artışlar ortaya çıkmıştır. Hidrodinamik basınç, rezervuarın boş halinde Durum 2 ve 3'te mansap yönünde elde edilen küçük yatay yerdeğiştirmelerin de artmasına neden olmuştur.

Hidrodinamik basınç dikkate alındığında, menba yönünde kritik yatay yerdeğiştirmelerin en küçüğü Durum 2'de 110cm'lik plak taban kalınlığı için 48.6cm, en büyüğü Durum 4'te 30cm'lik plak kalınlığı için 87.8cm olarak elde edilmiştir. Mansap yönünde ise, Durum 3'te 110cm'lik plak taban kalınlığı için 8.9cm'lik en küçük kritik yatay yerdeğiştirme oluşurken, Durum 2'de 30cm'lik plak taban kalınlığında 22.8cm'lik en büyük kritik yatay yerdeğiştirme elde edilmiştir. Barajın mevcut 70cm'lik plak taban kalınlığı için ise Durum 2'de menba yönünde 48.7cm, Durum 3'te mansap yönünde

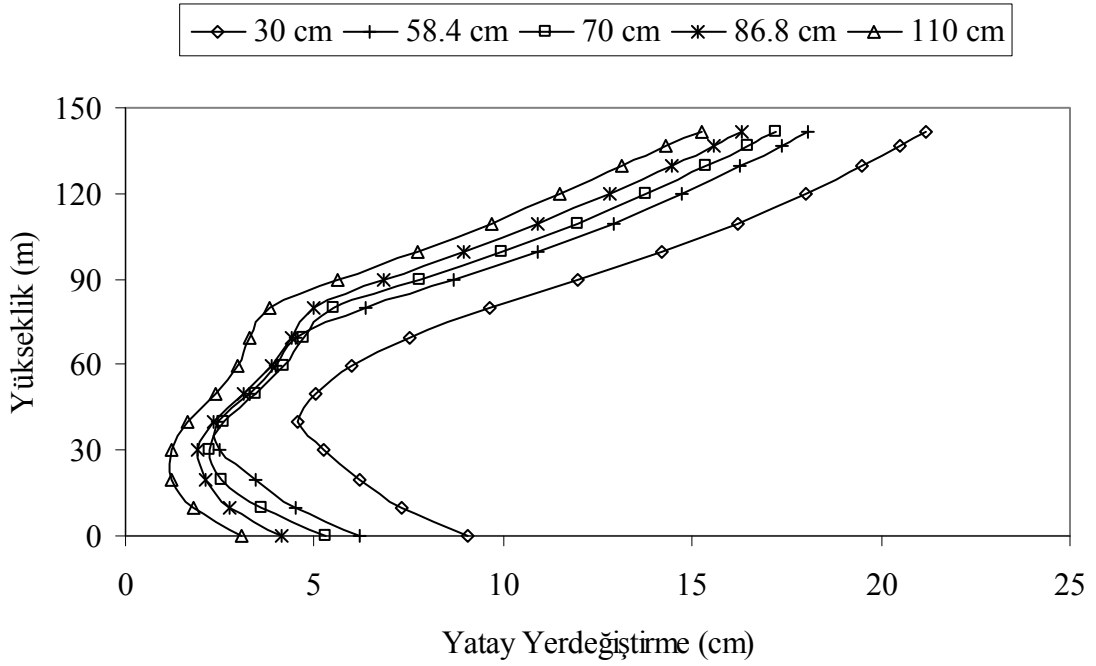
9.8cm'lik en küçük kritik yatay yerdeşiftirmeler elde edilmiştir. En büyük kritik yatay yerdeşiftirmeler ise menba yönünde Durum 4'te 87.5cm'lik, mansap yönünde ise Durum 2'de 22.6cm olarak hesaplanmıştır.

Durum 3 ve 4'te yatay yerdeşiftirmelerin menba yönünde büyük artış göstermesi, Durum 2'de mansap yönünde daha büyük yatay yerdeşiftirmelerin oluşmasına neden olmuştur. Durum 3 ve 4 için menba ve mansap yönündeki kritik yatay yerdeşiftirme değerleri birbirine yakın elde edilmiştir.

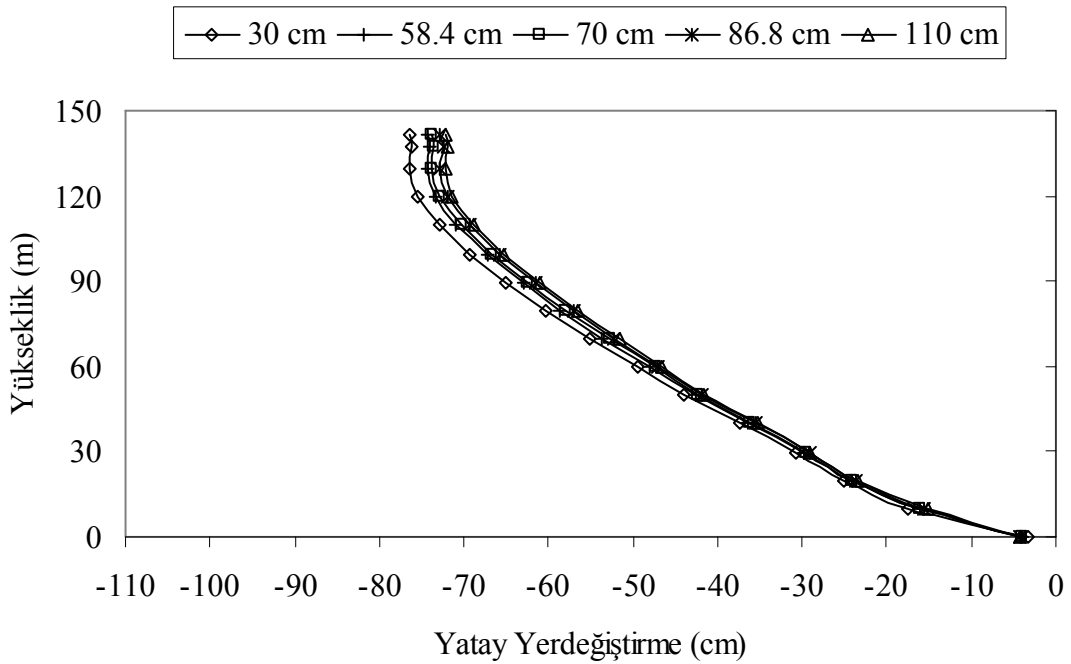
En kritik yatay yerdeşiftirmeler dikkate alındığında sürtünmeli sistemlerde birleşik sistemlere göre daha büyük değerler elde edilmiştir.



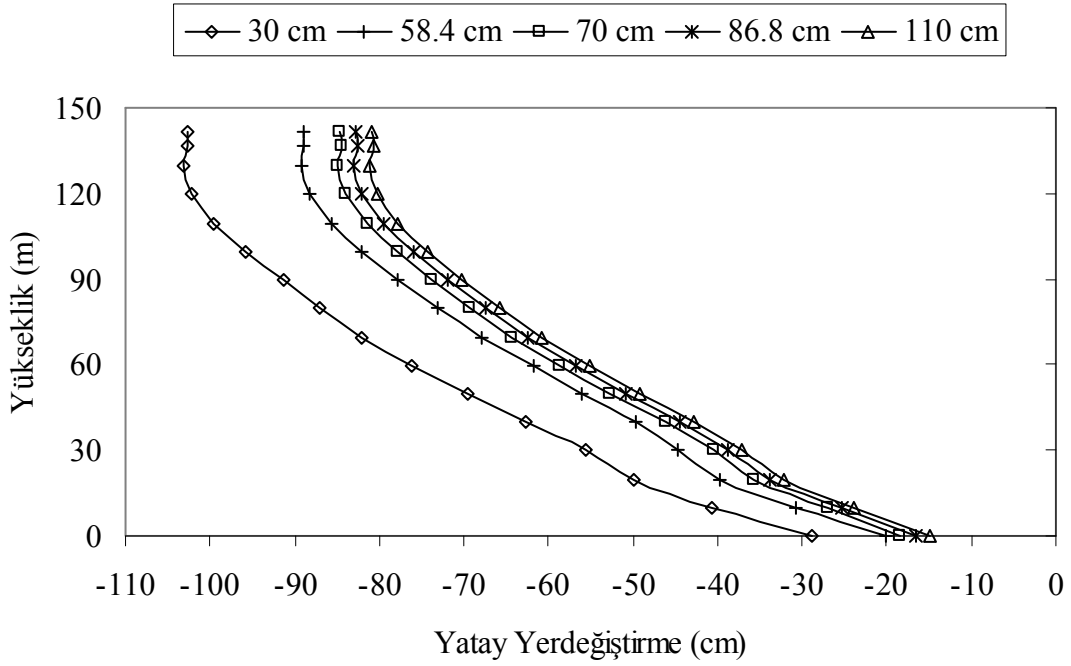
şekil 45. Sürtünme tanımlanan sistemlerde rezervuarın boş halinde Durum 2'de beton plakta menba yönünde oluşan en büyük yatay yerdeşiftirmeler



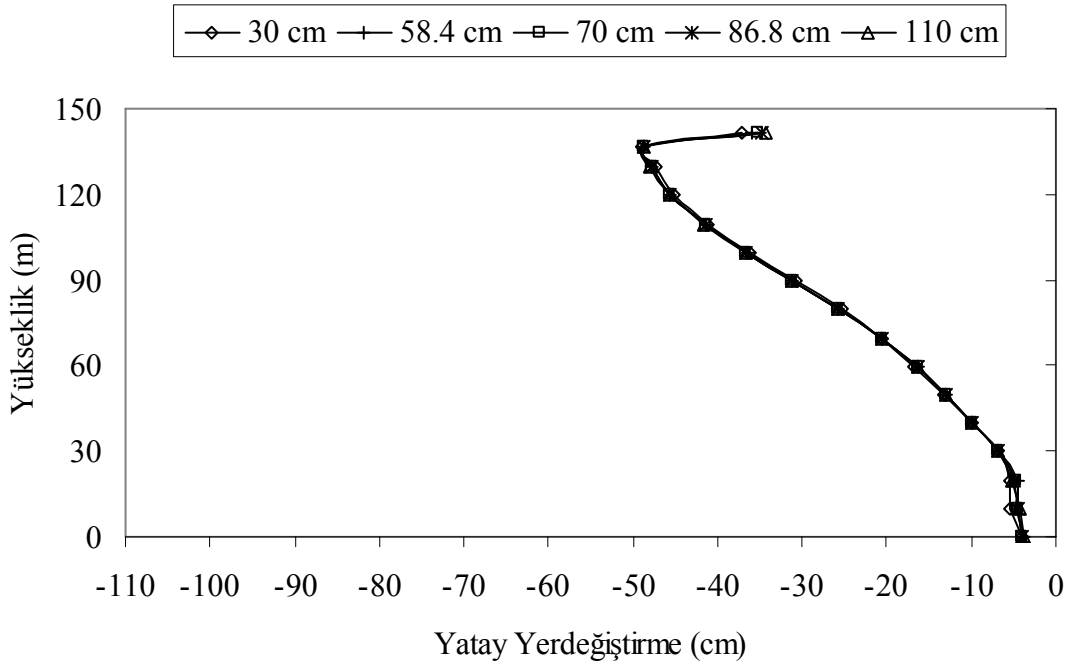
Şekil 46. Sürtünme tanımlanan sistemlerde rezervuarın boş halinde Durum 2'de beton plakta mansap yönünde oluşan en büyük yatay yerdeğıştirmeler



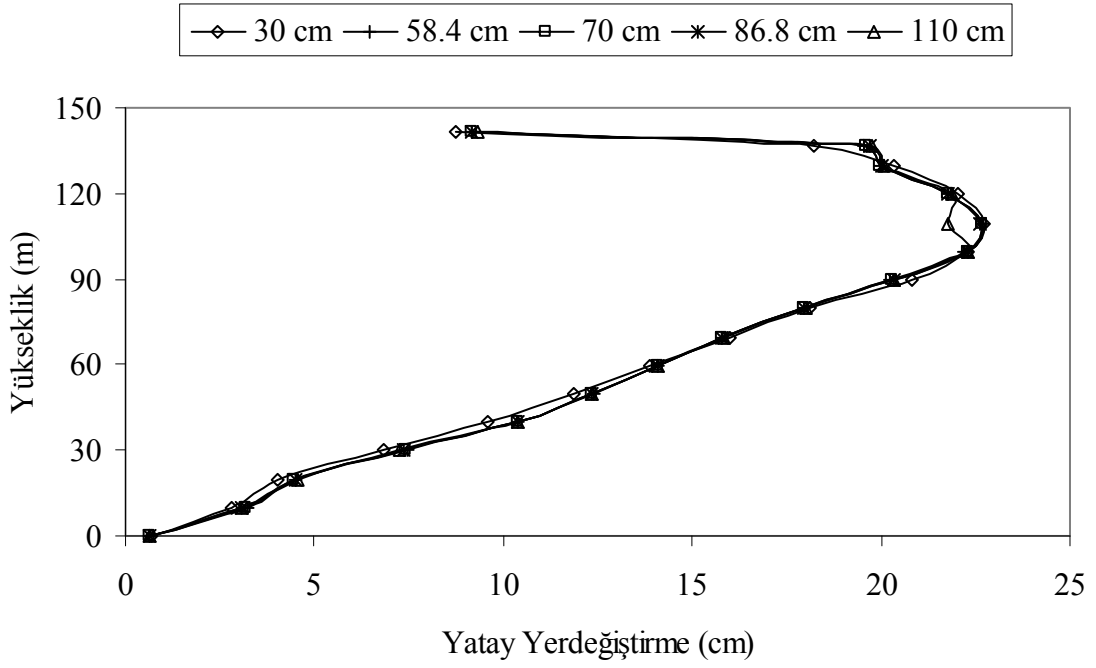
Şekil 47. Sürtünme tanımlanan sistemlerde rezervuarın boş halinde Durum 3'te beton plakta menba yönünde oluşan en büyük yatay yerdeğıştirmeler



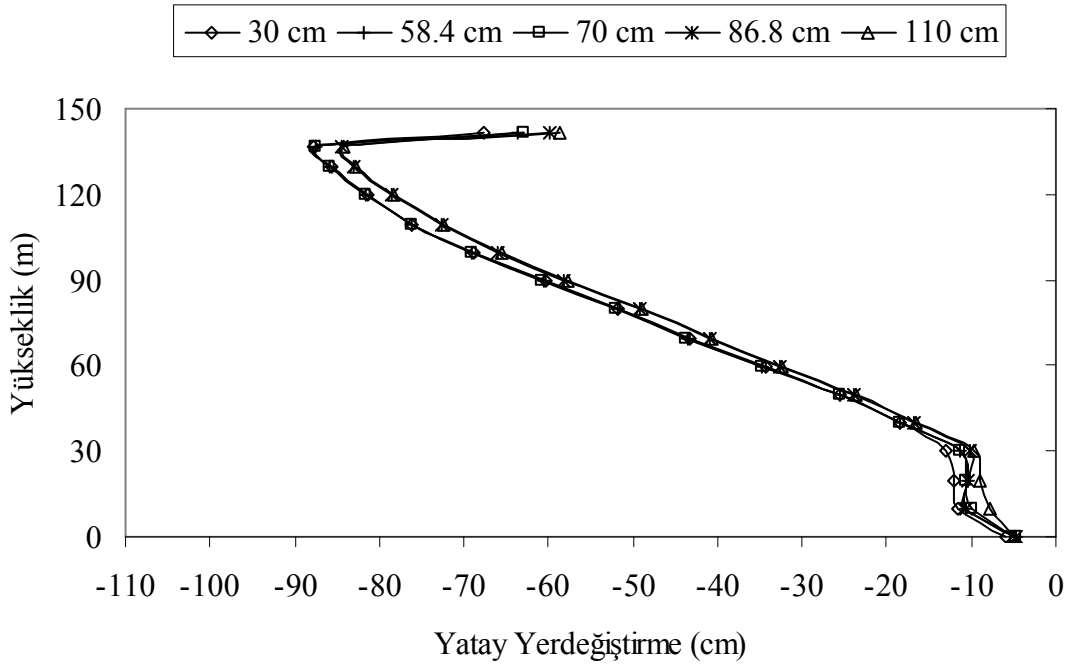
Şekil 48. Sürtünme tanımlanan sistemlerde rezervuarın boş halinde Durum 4'te beton plakta menba yönünde oluşan en büyük yatay yerdeğıştirmeler



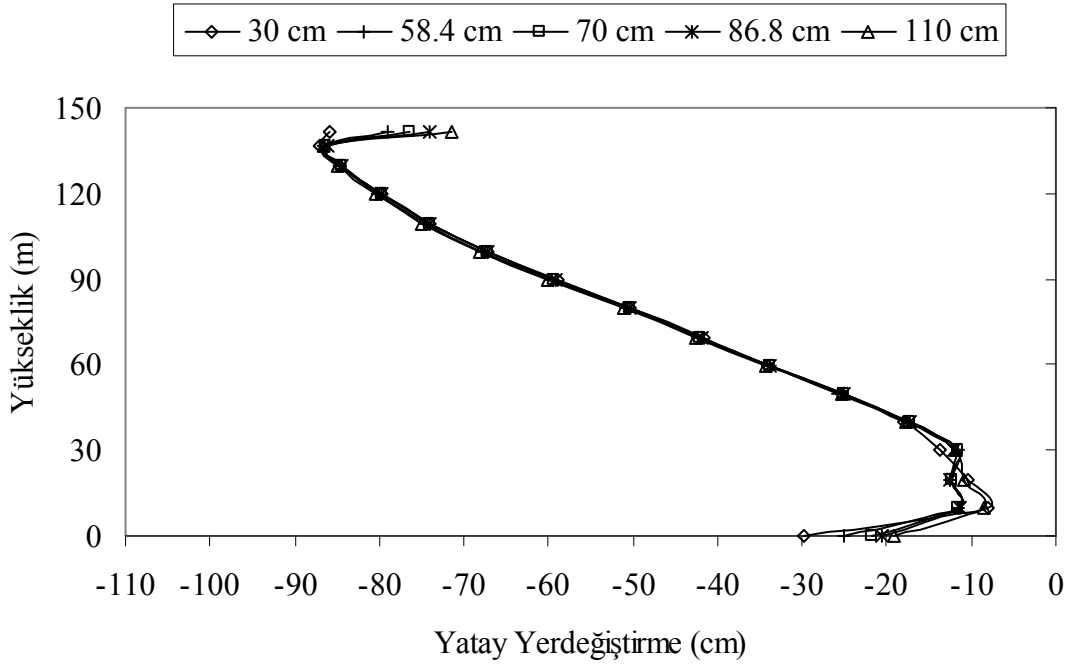
Şekil 49. Sürtünme tanımlanan sistemlerde rezervuarın dolu halinde Durum 2'de beton plakta menba yönünde oluşan en büyük yatay yerdeğıştirmeler



Şekil 50. Sürtünme tanımlanan sistemlerde rezervuarın dolu halinde Durum 2'de beton plakta mansap yönünde oluşan en büyük yatay yerdeğıştirmeler



Şekil 51. Sürtünme tanımlanan sistemlerde rezervuarın dolu halinde Durum 3'te beton plakta menba yönünde oluşan en büyük yatay yerdeğıştirmeler



Şekil 52. Sürtünme tanımlanan sistemlerde rezervuarın dolu halinde Durum 4'te beton plakta menba yönünde oluşan en büyük yatay yerdeğiştirmeler

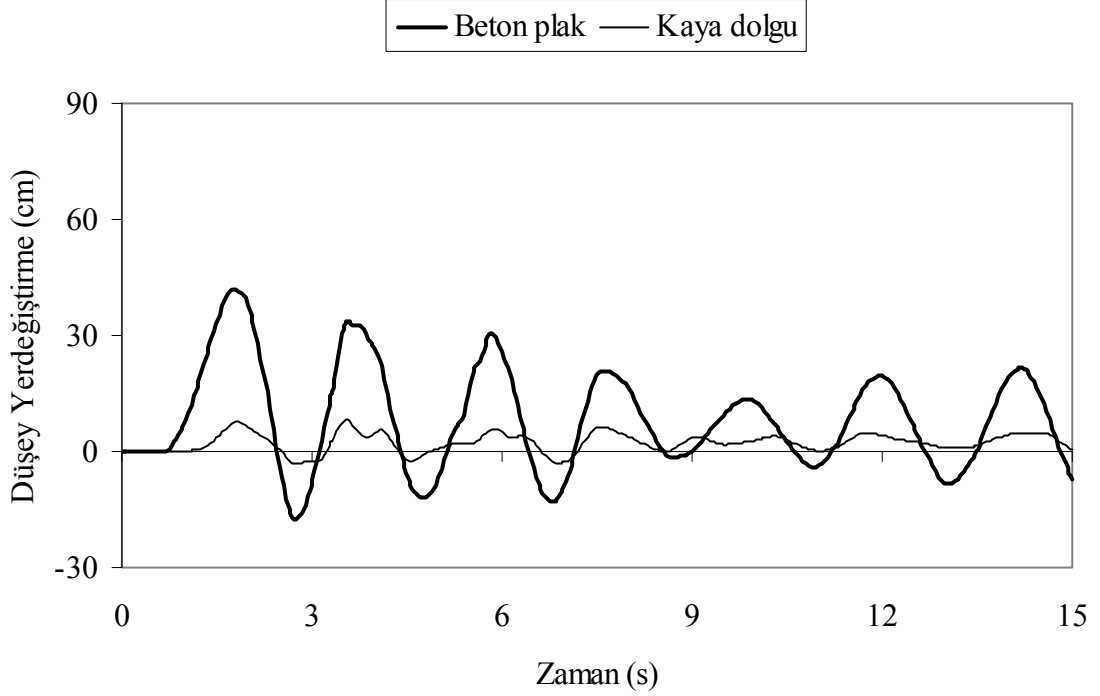
Birleşim bölgelerinde sürtünmenin dikkate alındığı sistemlerde yapı elemanları birbiri üzerinde hareket edebilmektedir. Beton plak ve üzerinde teşkil edildiği kaya dolgu da buna bir örnektir. Beton plak ve menba yüzünde kaya dolgunun davranışının daha iyi belirlenmesi için beton plak-kaya dolgu birleşim yüzeyinde yerdeğiştirmelerin düşey bileşenlerinin zamana bağlı değişimleri incelenmiştir. Krette beton plak-kaya dolgu arayüzeyinde barajın mevcut plak kalınlığı için düşey yerdeğiştirmelerin zamanla değişimleri rezervuarın boş hali için Şekil 53-55'te, dolu hali için Şekil 56-58'de verilmiştir.

Şekil 53-55'te rezervuarın boş halinde beton plağın kaya dolgu üzerinde deprem süresince hareket ettiği açık bir şekilde görülmektedir. Beton plakta oluşan düşey yerdeğiştirmeler kaya dolgu ile kıyaslandığında her üç durum için de oldukça büyüktür. Bu sistemlerde en büyük düşey yerdeğiştirmeler ilk 3 saniyede oluşmuştur. Durum 3 ve 4'te kayma hareketi sonucu beton plak düşey yöndeki titreşim hareketini mevcut konumundan daha yukarıda yeni bir eksen boyunca devam ettirmiştir. Durum 3 ve 4'te kaya dolguda oluşan düşey yerdeğiştirmelerin de arttığı görülmüştür.

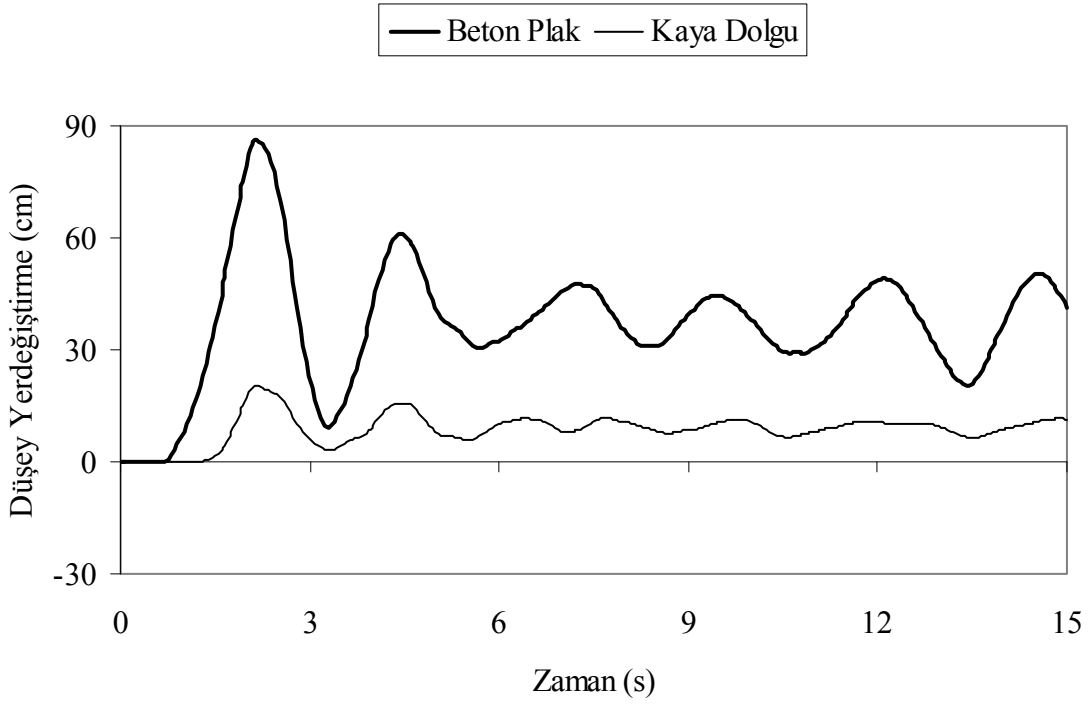
Baraj rezervuarının dolu halinde beton plak ve kaya dolgunun düşey yerdeğiştirmelerinin zamanla değişimi rezervuarın boş halindeki benzemektedir. Dolu halde hidrodinamik basınç etkisi beton plağı aşağı yönde hareket ettirmiştir. Boş hal ile

kıyaslandığında düşey yerdeğıştirmeler daha küçük çıkmıştır. Wieland ve Brenner (2007) de su basıncının etkisiyle kayma direncinin arttığını ve betonun zeminden ayrışmasını azalttığını belirtmiştir. Hidrodinamik basınç kaya dolgu üzerinde dikkate değer bir etki göstermemiştir. Ancak, hem beton plağın hem de kaya dolgunun düşey yerdeğıştirmeleri üzerinde malzemenin lineer olmayan davranışı daha önemli bir etki göstermiştir.

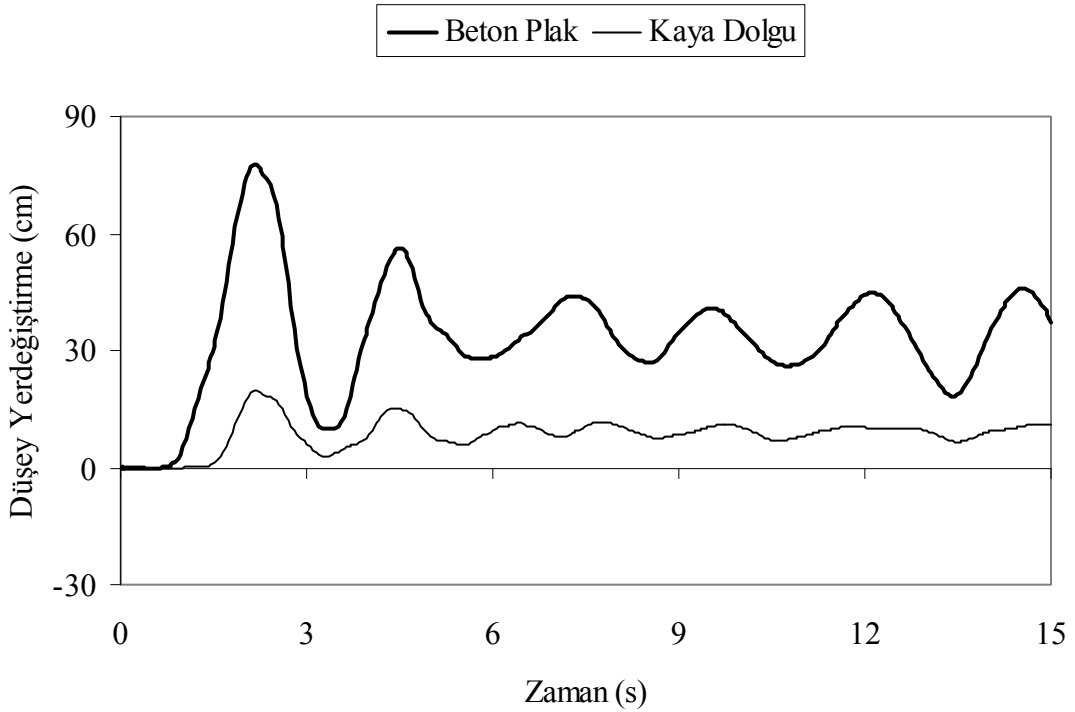
Beton plağın kaya dolgu üzerinde hareket edebildiği Şekil 53-58’de gösterilmiştir. Düşey yönde gerçekleşen bu hareket sonucunda, deprem etkisi ile kaya dolgu büyük yatay yerdeğıştirmeler yaparken beton plak onun üzerinde hareket edebildiği için yatay doğrultuda beton plakta bu kadar büyük yerdeğıştirmeler oluşmamıştır.



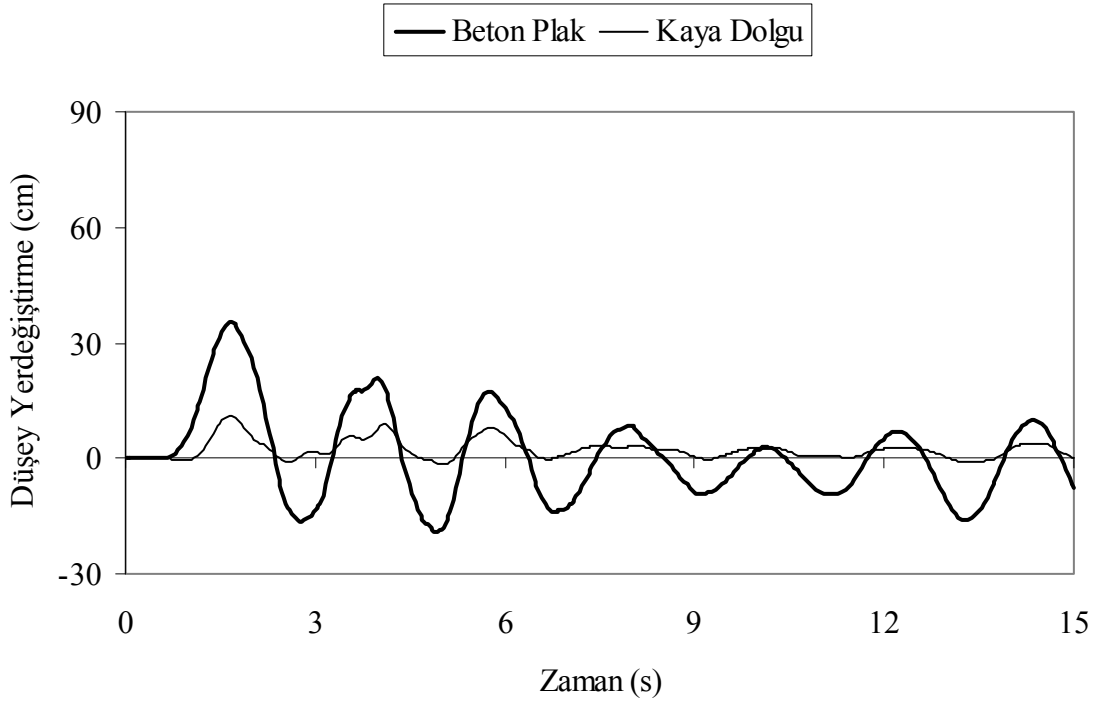
Şekil 53. 70cm’lik plak taban kalınlığı için sürtünme tanımlanan sistemlerde rezervuarın boş halinde Durum 2’de krette beton plak ve kaya dolgunun düşey yerdeğıştirmelerinin zamanla değışimi



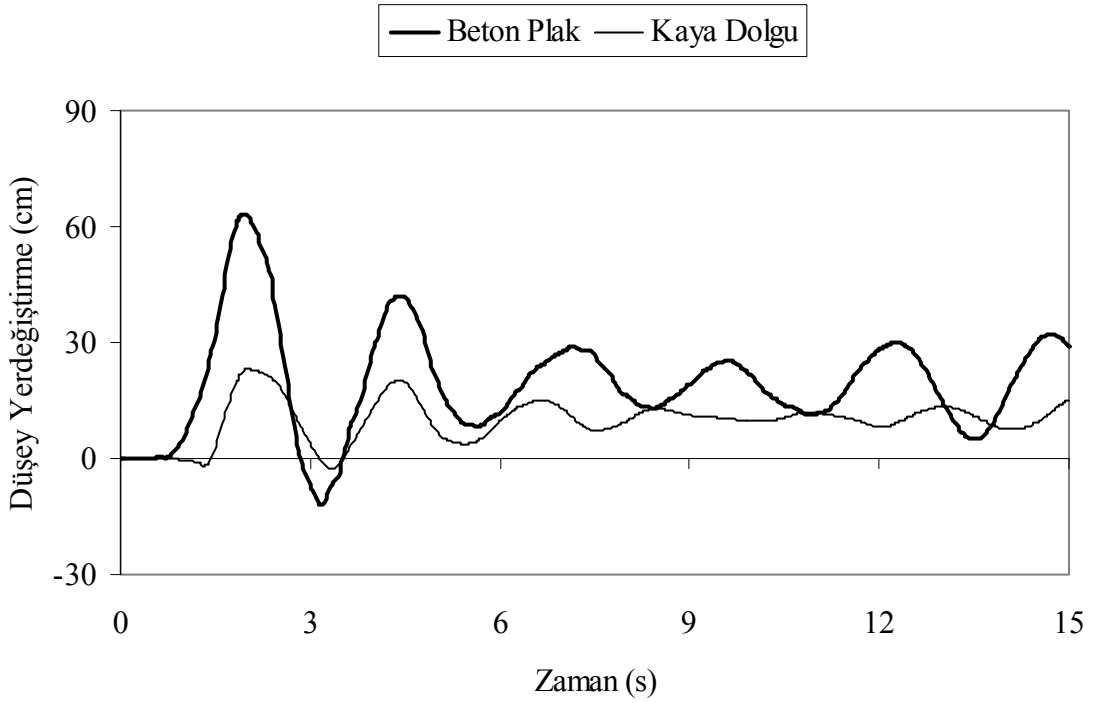
Şekil 54. 70cm'lik plak taban kalınlığı için sürtünme tanımlanan sistemlerde rezervuarın boş halinde Durum 3'te krette beton plak ve kaya dolgunun düşey yerdeğiştirmelerinin zamanla değişimi



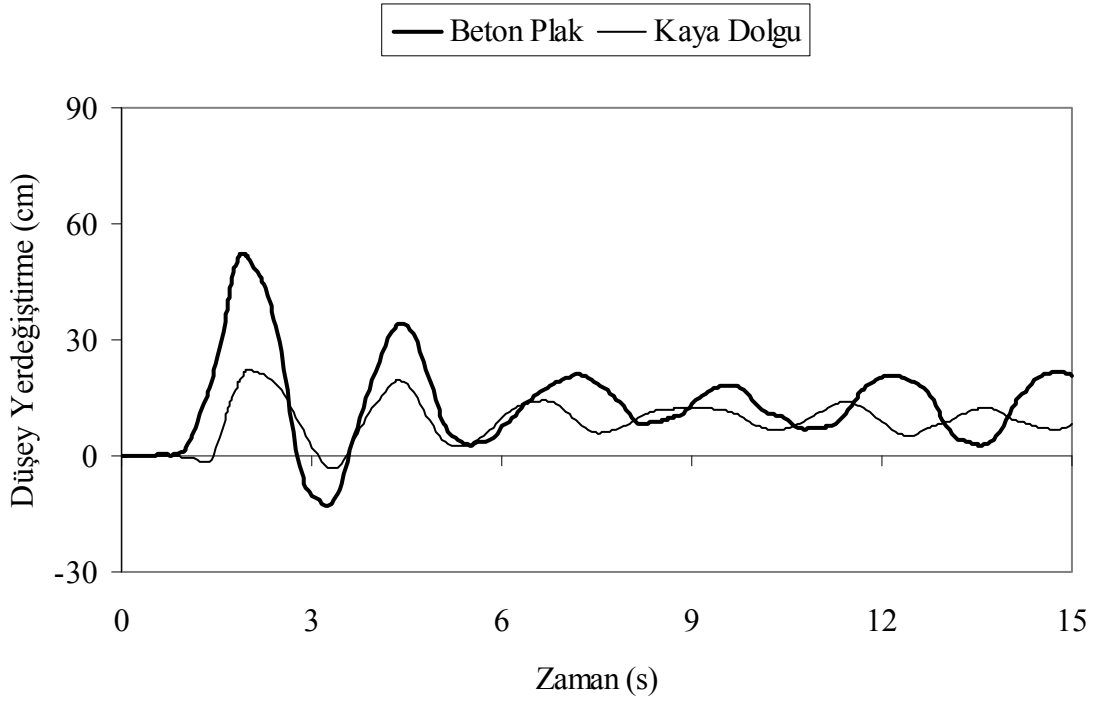
Şekil 55. 70cm'lik plak taban kalınlığı için sürtünme tanımlanan sistemlerde rezervuarın boş halinde Durum 4'te krette beton plak ve kaya dolgunun düşey yerdeğiştirmelerinin zamanla değişimi



Şekil 56. 70cm'lik plak taban kalınlığı için sürtünme tanımlanan sistemlerde rezervuarın dolu halinde Durum 2'de krette beton plak ve kaya dolgunun düşey yerdeğiştirmelerinin zamanla değişimi

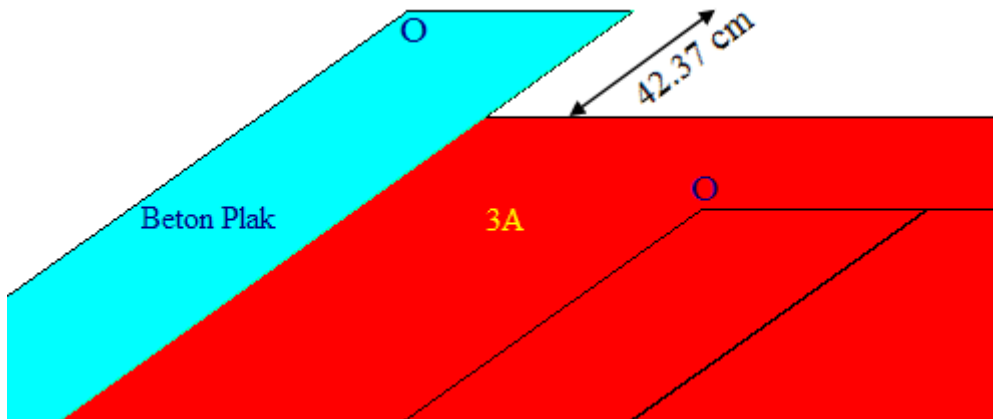


Şekil 57. 70cm'lik plak taban kalınlığı için sürtünme tanımlanan sistemlerde rezervuarın dolu halinde Durum 3'te krette beton plak ve kaya dolgunun düşey yerdeğiştirmelerinin zamanla değişimi



Şekil 58. 70cm'lik plak taban kalınlığı için sürtünme tanımlanan sistemlerde rezervuarın dolu halinde Durum 4'te krette beton plak ve kaya dolgunun düşey yerdeğiştirmelerinin zamanla değişimi

Beton plak ve kaya dolgu arasındaki kayma hareketinin daha iyi ayırt edilebilmesi için 70cm'lik plak taban kalınlığı için rezervuarın dolu halinde Durum 4'te deprem hareketinin 2.195 saniyesinde kret seviyesindeki yerdeğiştirmiş hali Şekil 59'da verilmiştir.

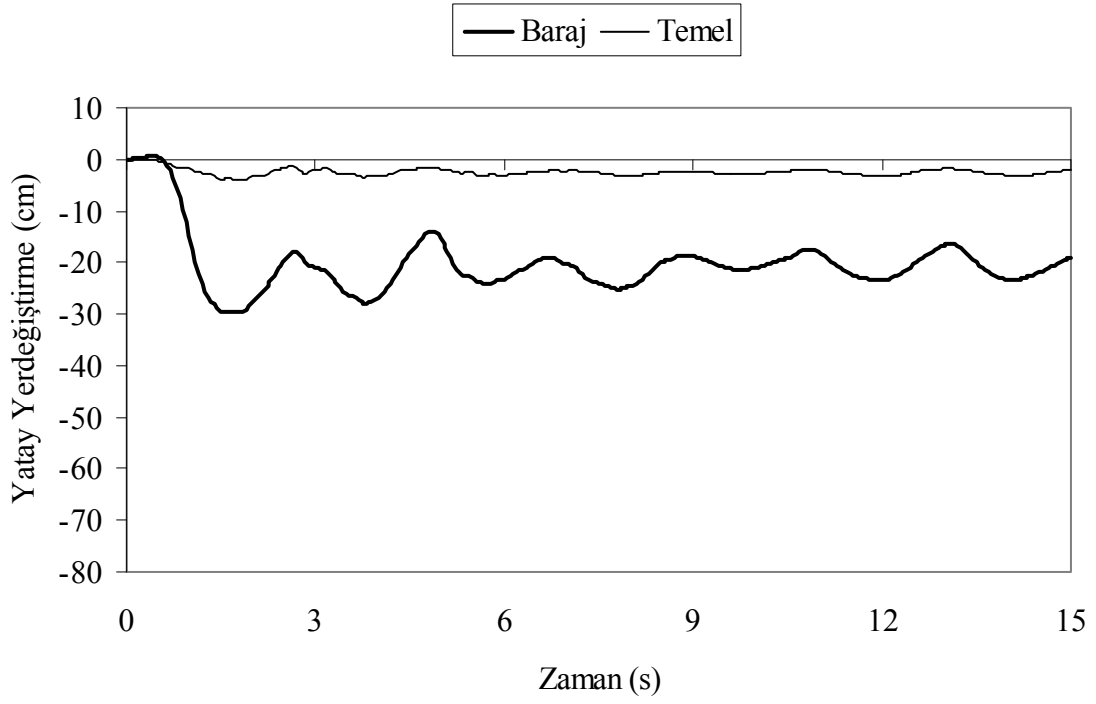


Şekil 59. Beton plak-kaya dolgu arayüzeyinde oluşan yerdeğiştirme durumu

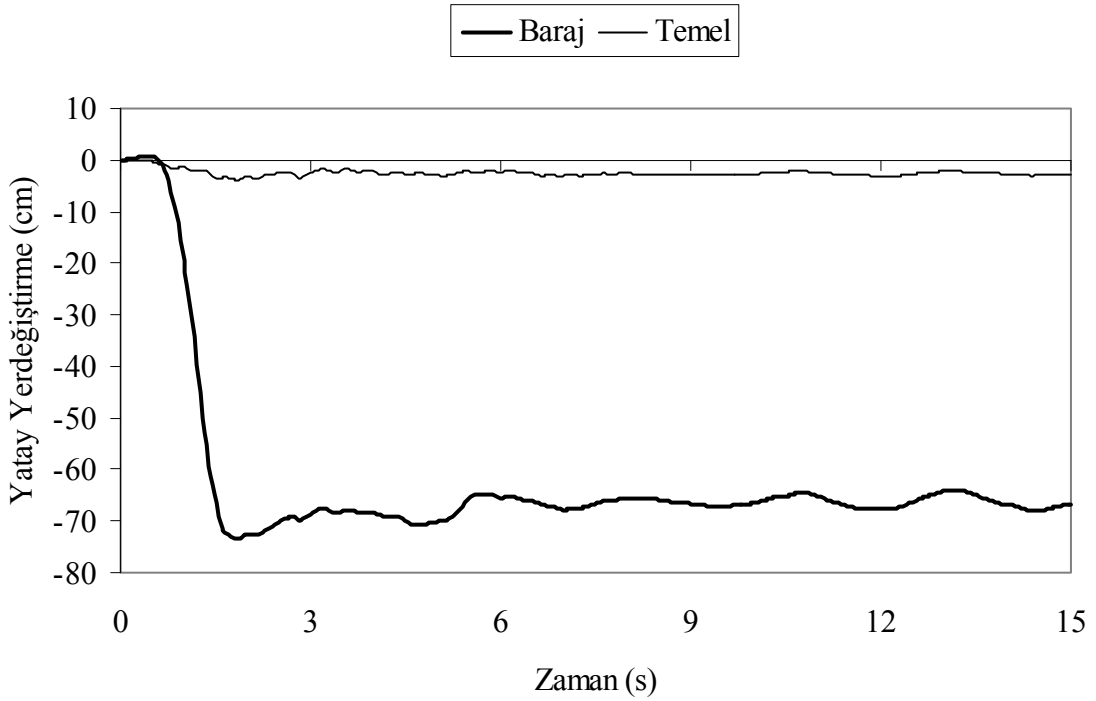
Sürtünme tanımlanan sistemlerde, baraj-temel etkileşim yüzeyinde, barajın temele göre olan davranışını inceleyebilmek için baraj tabanında 3B ve 3C kaya dolgu bölgelerinin birleştiği noktada mevcut 70cm'lik plak taban kalınlığı için barajın ve temel zemininin gerçekleştirdiği yatay yerdeğiştirmenin zamanla değişimi rezervuarın boş hali için Şekil 60-62'de, dolu hali için Şekil 63-65'te verilmiştir.

Rezervuarın boş halinde baraj tabanında oluşan yatay yerdeğiştirmeler incelendiğinde, barajın temele göre yatay yönde daha büyük ötelenmeler yaptığı görülmüştür. Bununla birlikte, Durum 3 ve 4'te yatay yerdeğiştirmeler Durum 2'ye göre daha büyük elde edilmiştir. Baraj tabanındaki en büyük yatay yerdeğiştirmeler depremin ilk üç saniyesinde gerçekleşmiş olup, deprem süresince titreşim hareketi azalmıştır. Öyle ki, Durum 3 ve 4'te yerdeğiştirmeler en büyük değere ulaştıktan sonra baraj tabanında neredeyse yatay yönde hareket oluşmadığı görülmüştür.

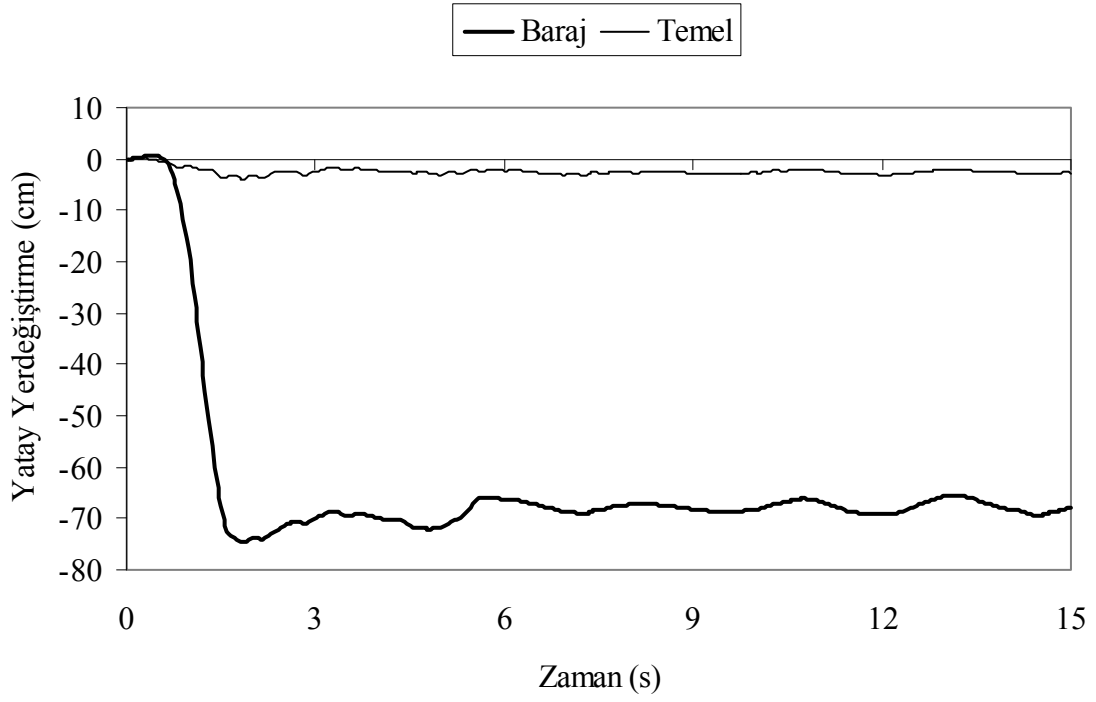
Rezervuar suyu dikkate alındığında rezervuarın boş halinde yatay yöndeki davranışta farklılıklar görülmüştür. Durum 2'de depremin ilk 3 saniyesinde menba yönünde en büyük ötelenmeler oluşmuştur. Bu saniyeden sonra başlangıç konumuna göre mansap yönünde ötelenme meydana gelmiş ve deprem süresince salınımlar bu konumda devam etmiştir. Durum 3 ve 4'te gövde malzemesinin lineer olmayan davranışının hidrodinamik basınca göre daha etkin olması nedeniyle menba yönünde yatay ötelenme gerçekleşmiştir. Ayrıca burada su, hareketi kısıtlamış olsa bile başlangıç konumuna göre salınımlar yine menba tarafında gerçekleşmiştir. Temel zemininin yatay hareketi ise farklı malzeme durumları için elde edilen çözümlerden çok az etkilenmiştir.



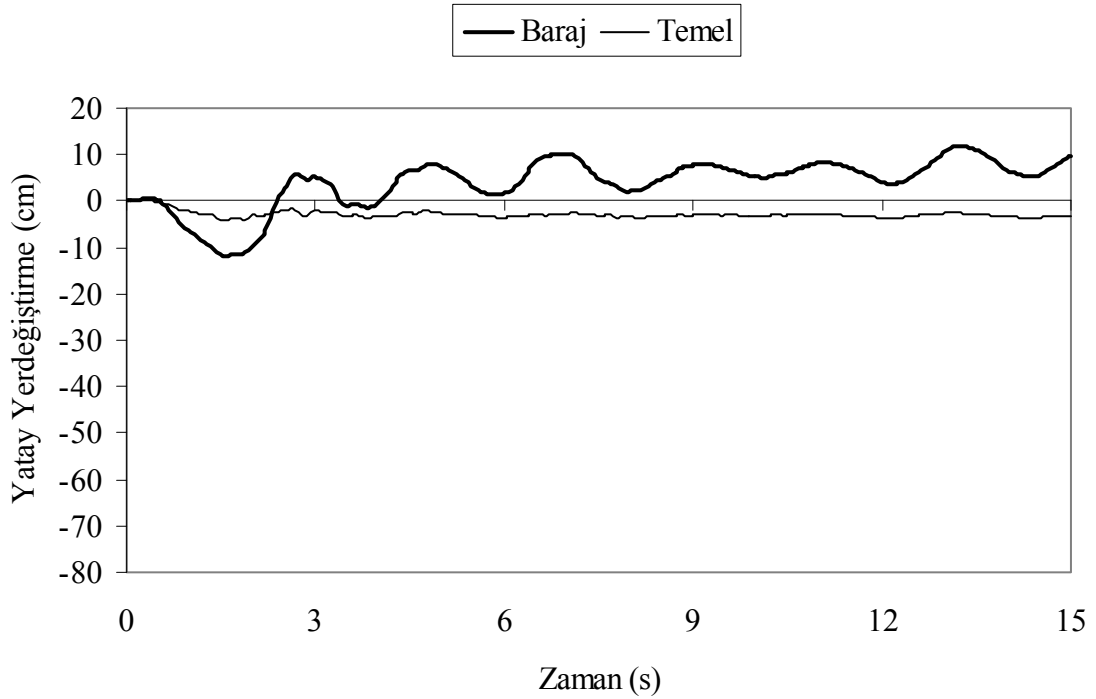
Şekil 60. 70cm'lik plak taban kalınlığı için sürtünme tanımlanan sistemlerde rezervuarın boş halinde Durum 2'de baraj tabanında kaya dolgu ve temelin yatay yerdeğiştirmelerinin zamanla değişimi



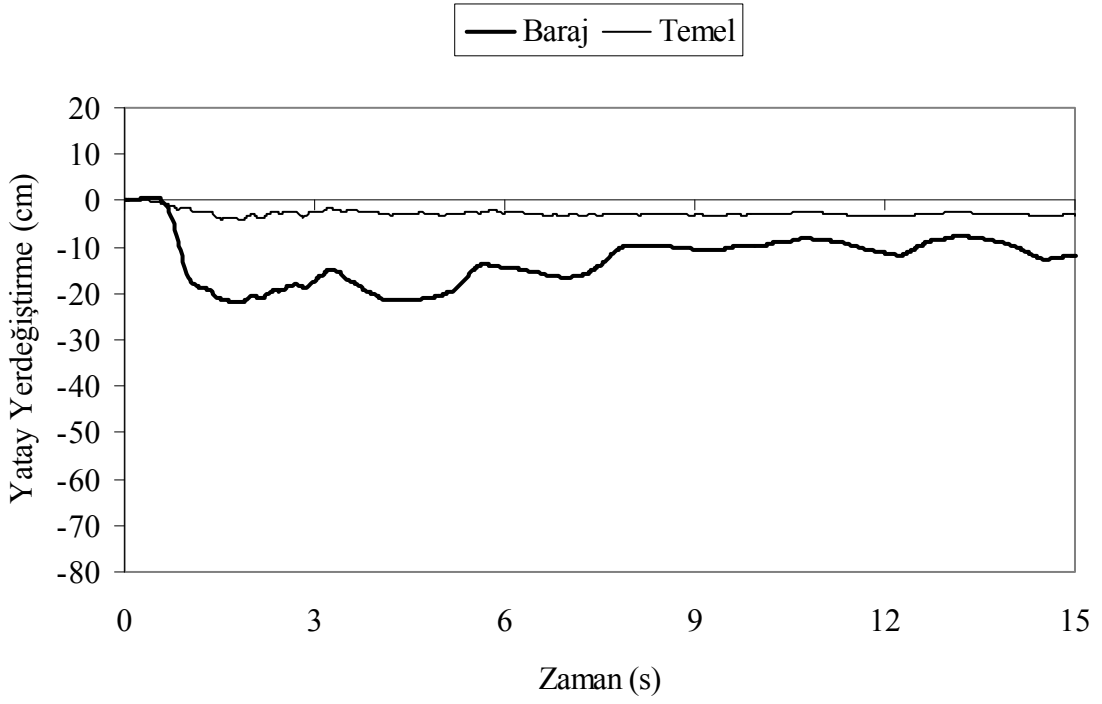
Şekil 61. 70cm'lik plak taban kalınlığı için sürtünme tanımlanan sistemlerde rezervuarın boş halinde Durum 3'te baraj tabanında kaya dolgu ve temelin yatay yerdeğiştirmelerinin zamanla değişimi



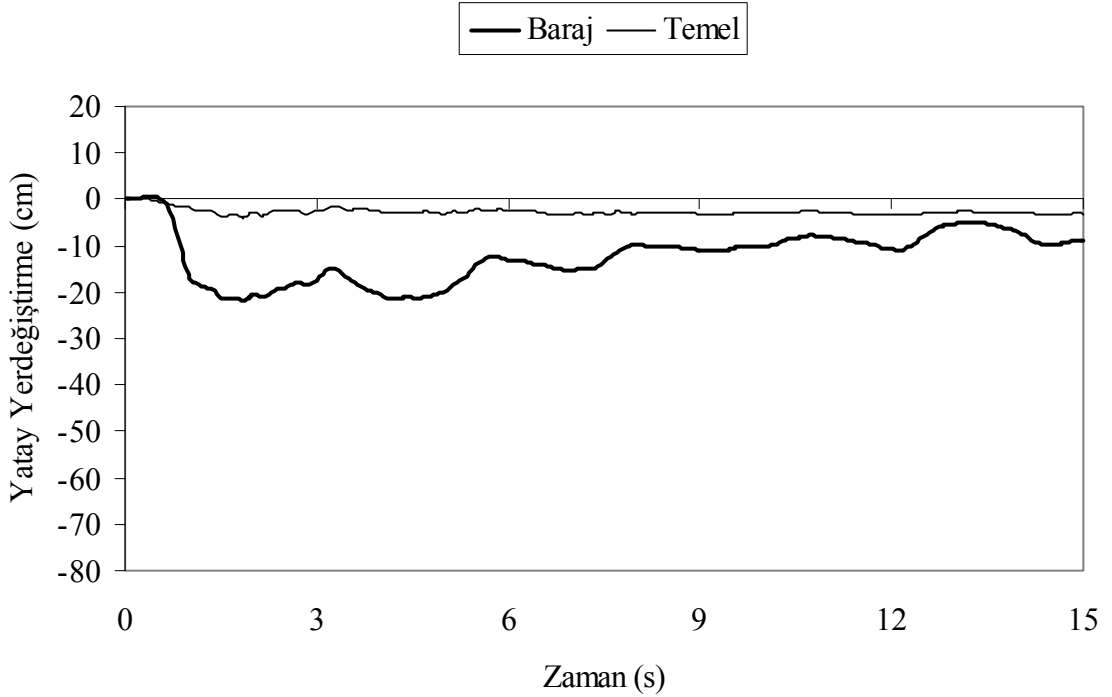
Şekil 62. 70cm'lik plak taban kalınlığı için sürtünme tanımlanan sistemlerde rezervuarın boş halinde Durum 4'te baraj tabanında kaya dolgu ve temelin yatay yerdeğiştirmelerinin zamanla değişimi



Şekil 63. 70cm'lik plak taban kalınlığı için sürtünme tanımlanan sistemlerde rezervuarın dolu halinde Durum 2'de baraj tabanında kaya dolgu ve temelin yatay yerdeğiştirmelerinin zamanla değişimi

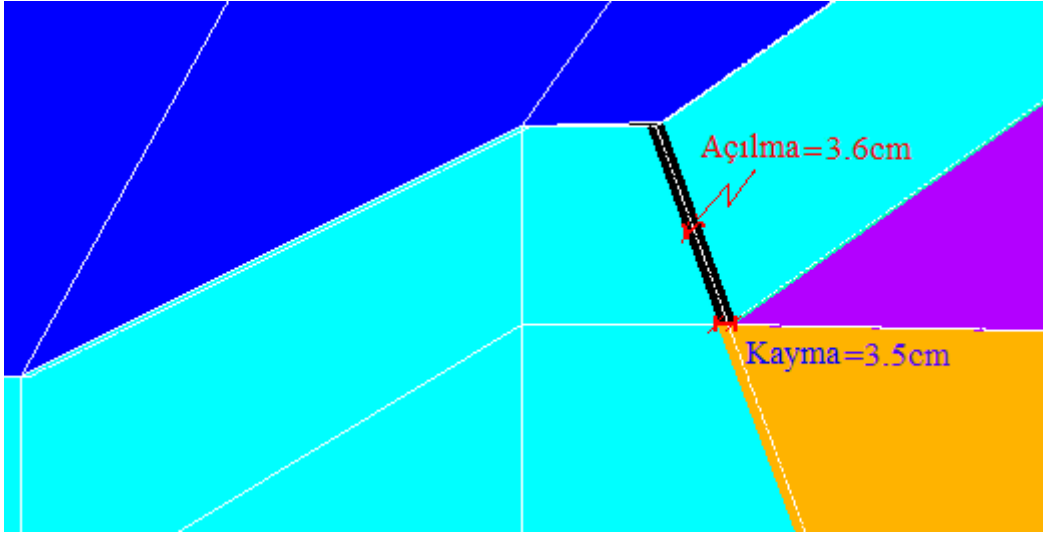


Şekil 64. 70cm'lik plak taban kalınlığı için sürtünme tanımlanan sistemlerde rezervuarın dolu halinde Durum 3'te baraj tabanında kaya dolgu ve temelin yatay yerdeğiştirmelerinin zamanla değişimi



Şekil 65. 70cm'lik plak taban kalınlığı için sürtünme tanımlanan sistemlerde rezervuarın dolu halinde Durum 4'te baraj tabanında kaya dolgu ve temelin yatay yerdeğiştirmelerinin zamanla değişimi

Beton plak-topuk plağı birleşim bölgesinde 70cm'lik plak taban kalınlığı olan modelde Durum 2'de rezervuarın dolu halinde depremin 4.67 saniyesinde elde edilen baraj tabandaki kayma ve beton plaktaki açılma hareketi Şekil 66'da verilmiştir.



Şekil 66. Beton plak-topuk plağı birleşim bölgesinde oluşan yerdeğiştirme durumu

3.1.2. Gerilmeler

3.1.2.1. Beton Plakta Oluşan Asal Gerilmeler

3.1.2.1.1. Birleşik Modellenmiş Sistemlerde Beton Plakta Oluşan Asal Gerilmeler

Birleşik olarak modellenmiş sistemlerde beton plakta yükseklik boyunca elde edilen en kritik asal basınç ve çekme gerilmeleri rezervuarın boş hali için Şekil 67-72'de, dolu hali için Şekil 73-78'de verilmiştir. Rezervuarın boş halinde elde edilen asal gerilme bileşenleri en büyük değerlerini Durum 3'te alırken, en küçük değerlerini Durum 4'te almıştır. Bununla birlikte Durum 4'te farklı plak kalınlıkları için elde edilen asal basınç ve çekme gerilmeleri birbirine oldukça yakın elde edilmiştir. Durum 2 ve 3'te elde edilen asal gerilme değerleri ise beton plak kalınlığının artmasıyla belirgin bir azalma göstermiştir.

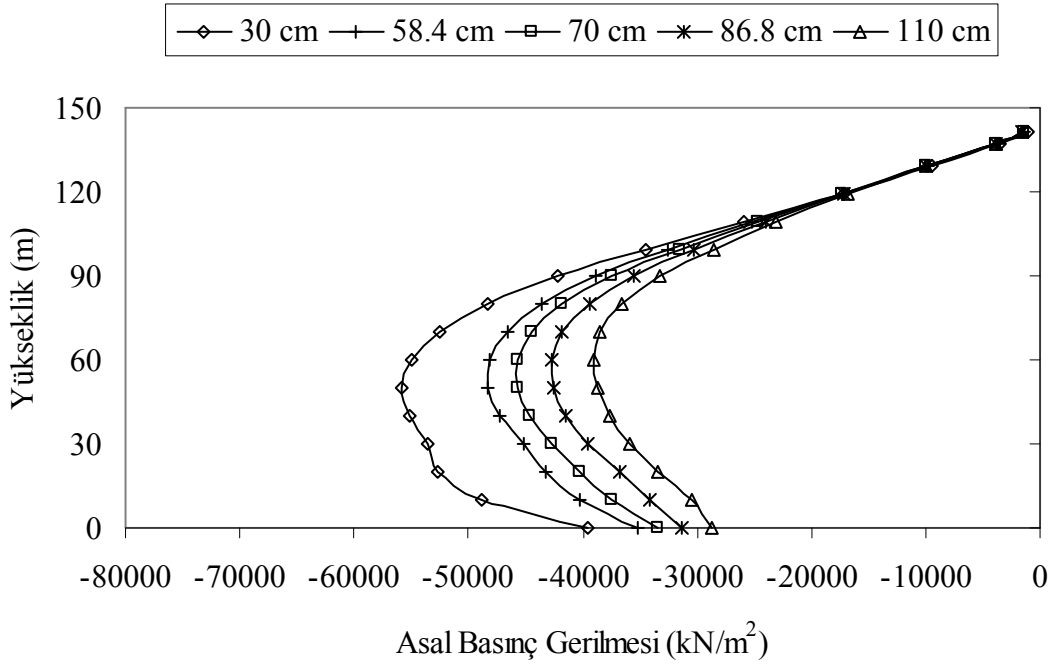
Rezervuarın boş halinde en küçük asal basınç gerilmeleri Durum 4'te 110cm'lik plak taban kalınlığı için 18890.6 kN/m^2 olarak elde edilirken, en büyük asal basınç gerilmesi Durum 3'te 30cm'lik sabit plak kalınlığı için 69352.3 kN/m^2 olarak elde edilmiştir. Asal çekme gerilmelerinde de benzer şekilde en küçük değerler Durum 4'te 110cm'lik plak

taban kalınlığı için 3778.14kN/m^2 olarak elde edilirken, en büyük değerler ise Durum 3'te 30cm 'lik sabit plak kalınlığı için 36375.1kN/m^2 olarak hesaplanmıştır. Barajın mevcut 70cm 'lik plak taban kalınlığı için en kritik asal basınç gerilmesi, Durum 3'te 51809.5kN/m^2 , asal çekme gerilmesi ise 26621.3kN/m^2 olarak elde edilmiştir. En küçük kritik asal basınç gerilmesi Durum 4'te 19023.5kN/m^2 , asal çekme gerilmesi ise 3892.82kN/m^2 olarak hesaplanmıştır.

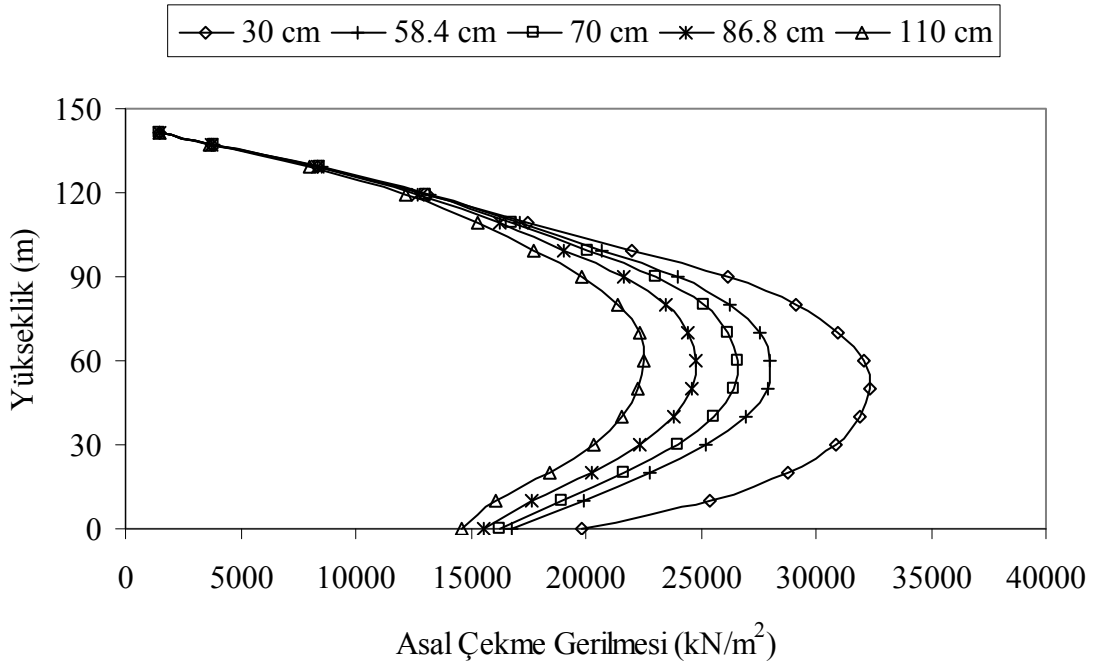
Hidrodinamik basınç etkisi ile asal gerilmelerde Durum 2 ve 3'te belirgin artışlar olmuştur. Durum 4'te ise asal gerilme bileşenlerinde önemli bir değişim olmadığı görülmüştür. En küçük asal basınç gerilmesi Durum 4'te 110cm 'lik plak taban kalınlığı için 18991.3kN/m^2 , en büyük asal basınç gerilmesi ise 30cm 'lik plak kalınlığı için Durum 3'te 73541.7kN/m^2 olarak elde edilmiştir. En küçük asal çekme gerilmesi Durum 4'te 110cm 'lik plak taban kalınlığı için 3775.72kN/m^2 olarak oluşurken, en büyük asal çekme gerilme değeri ise Durum 3'te 38894.5kN/m^2 olarak hesaplanmıştır. Barajın mevcut 70cm 'lik plak taban kalınlığı için en küçük asal basınç gerilmesi Durum 4'te 19070.1kN/m^2 , en büyük asal basınç gerilmesi ise Durum 3'te 54983.5kN/m^2 olarak elde edilmiştir. En küçük asal çekme gerilmesi Durum 4'te 3943.6kN/m^2 , en büyük asal çekme gerilmesi ise Durum 3'te 30245.6kN/m^2 olarak hesaplanmıştır.

Sonlu eleman analiz sonuçlarına göre Durum 4 beton plak için en güvenli sonuçları vermiştir. Ancak bu durumda bile asal çekme gerilmeleri mevcut beton dayanımının 2.5 katı büyüklüğündedir. Dolayısıyla betonun bu büyüklükte bir çekme gerilmesine karşı koyması mümkün değildir. Asal basınç gerilmeleri dikkate alındığında ise beton basınç dayanımından küçük ancak dayanım miktarına çok yakın değerler elde edilmiştir. Basınç dayanımı bakımından sonuçlar emniyetli olarak görülmesine rağmen göçme olasılığının belirlenmesi gerekmektedir. Durum 1 ve 2'de elde edilen asal gerilme değerlerinin beton plak tarafından taşınması olası görülmemektedir.

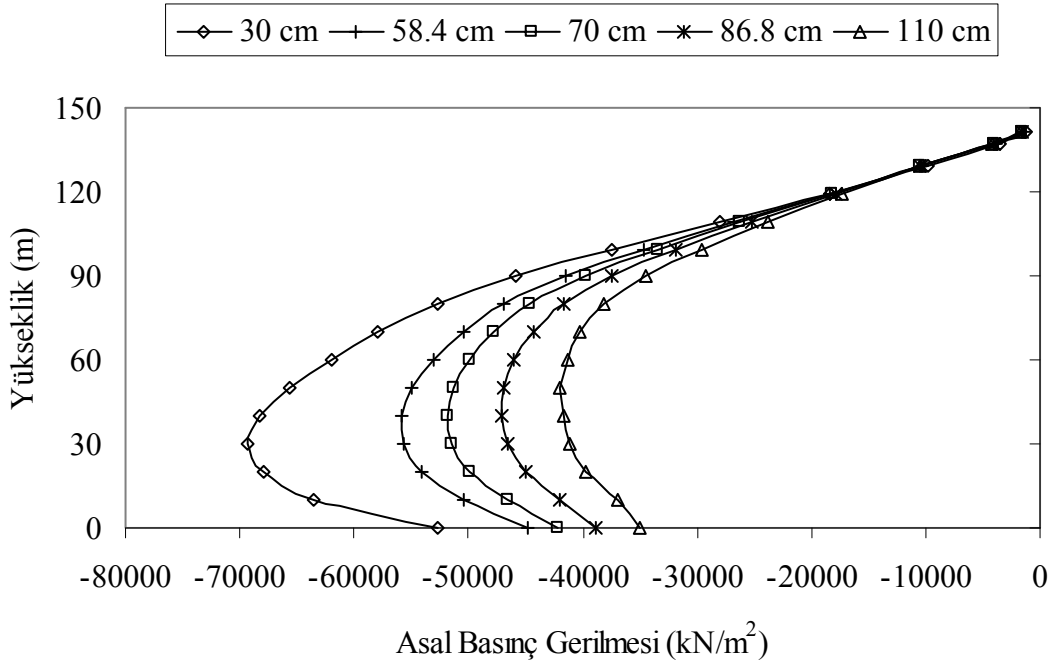
Baraj gövdesinin malzeme bakımından lineer olmayan davranışının dikkate alındığı Durum 3'te, gövdenin gerçekleştirdiği büyük deformasyonları aradaki büyük rijitlik farkı nedeniyle menba yüzünde karşılamaya çalışan beton plak daha fazla zorlanmaktadır. Bunun sonucunda da gövdenin malzeme bakımından lineer olarak dikkate alındığı Durum 2'ye göre çok daha elverişsiz bir durum ortaya çıkmaktadır.



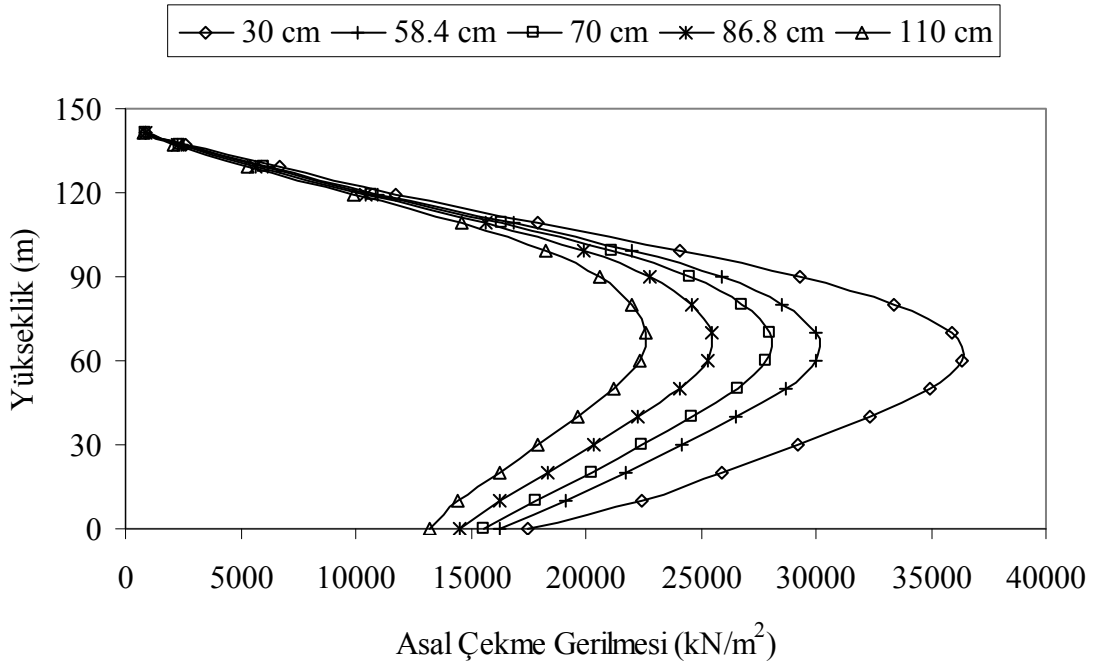
Şekil 67. Birleşik modellenmiş sistemlerde rezervuarın boş halinde Durum 2'de beton plakta oluşan en büyük asal basınç gerilmeleri



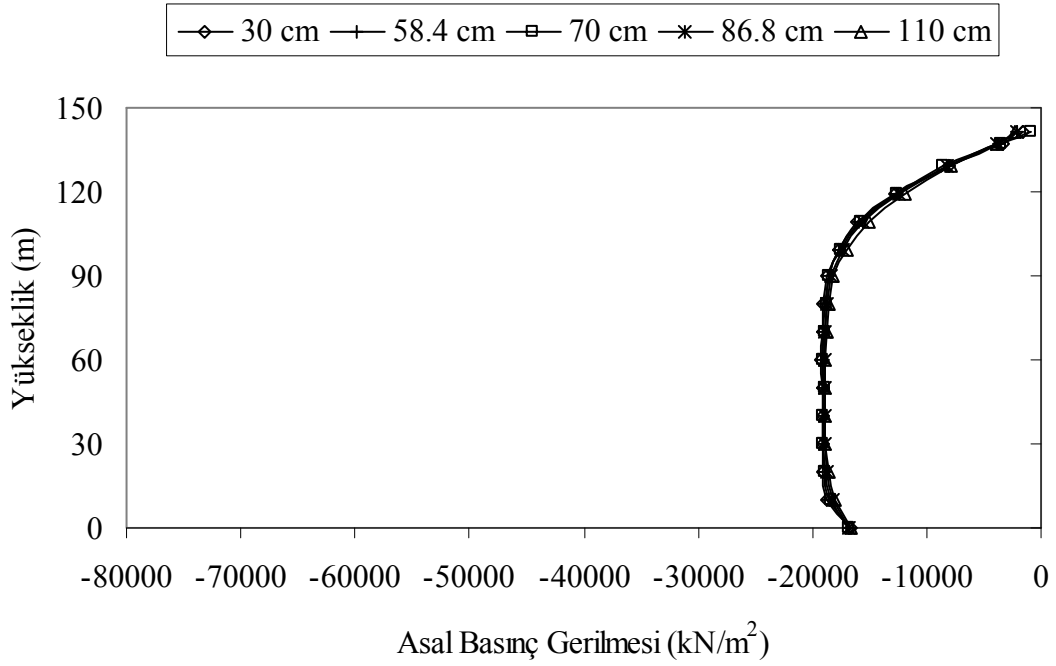
Şekil 68. Birleşik modellenmiş sistemlerde rezervuarın boş halinde Durum 2'de beton plakta oluşan en büyük asal çekme gerilmeleri



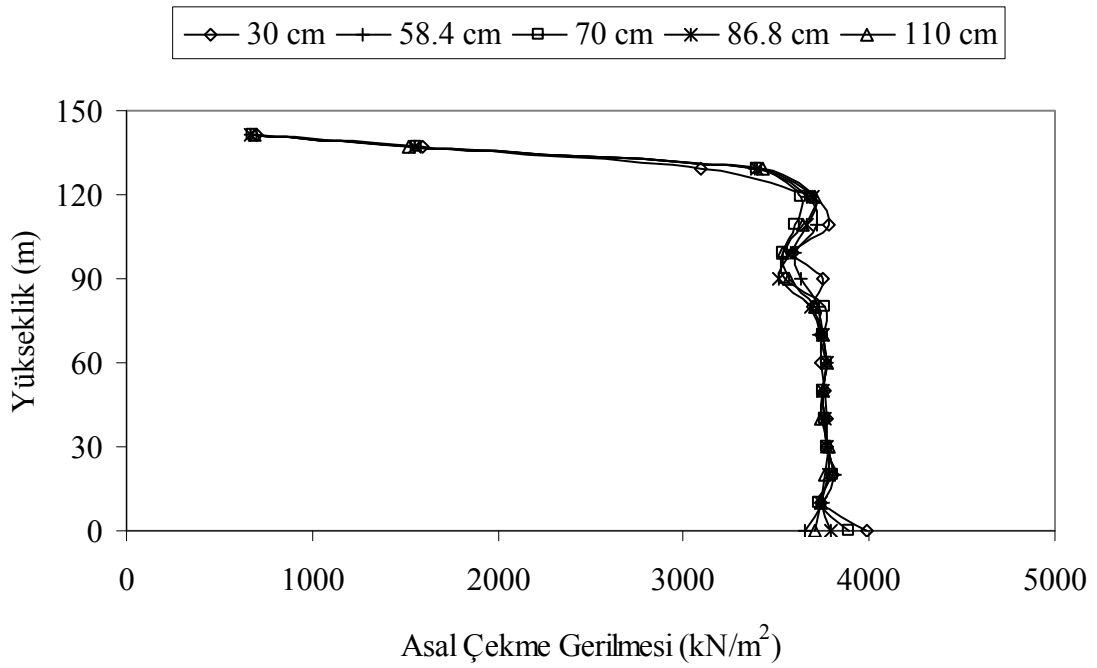
Şekil 69. Birleşik modellenmiş sistemlerde rezervuarın boş halinde Durum 3’te beton plakta oluşan en büyük asal basınç gerilmeleri



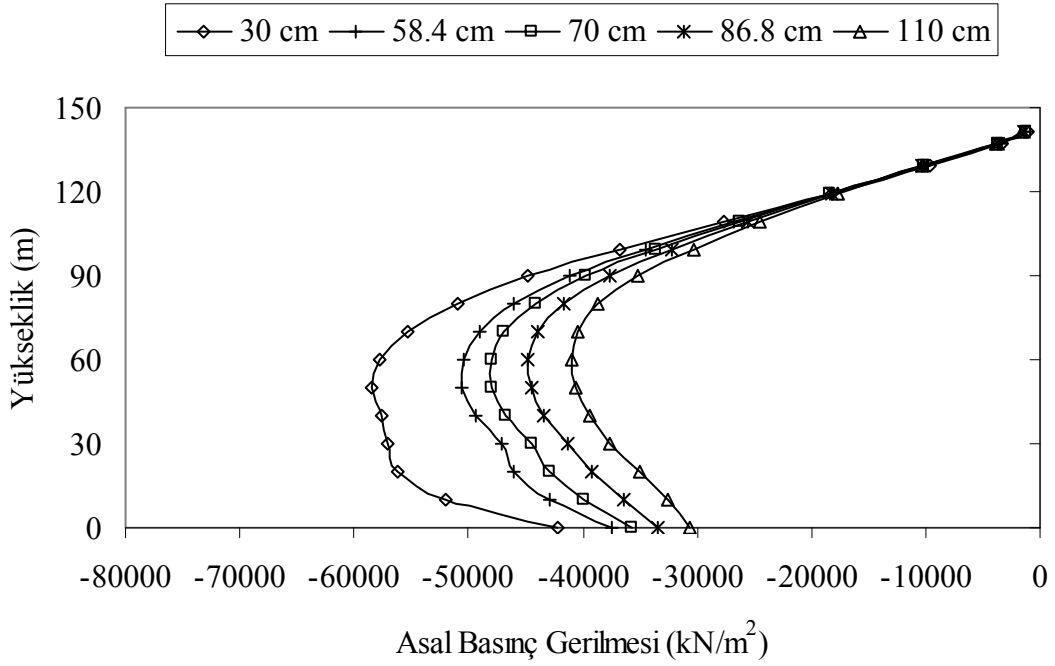
Şekil 70. Birleşik modellenmiş sistemlerde rezervuarın boş halinde Durum 3’te beton plakta oluşan en büyük asal çekme gerilmeleri



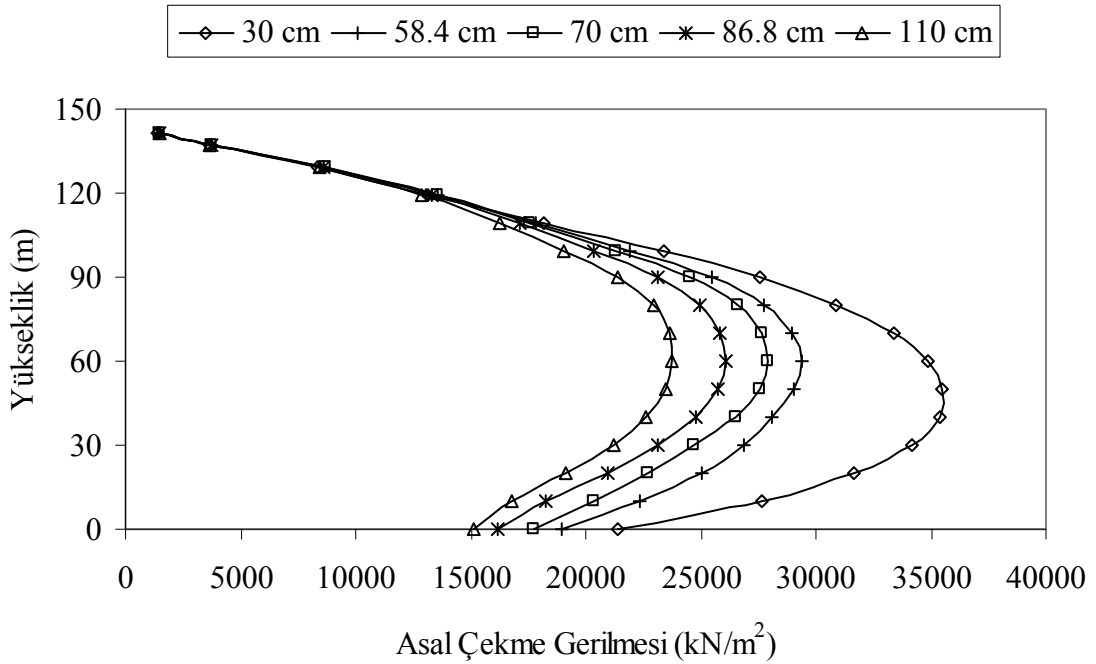
Şekil 71. Birleşik modellenmiş sistemlerde rezervuarın boş halinde Durum 4'te beton plakta oluşan en büyük asal basınç gerilmeleri



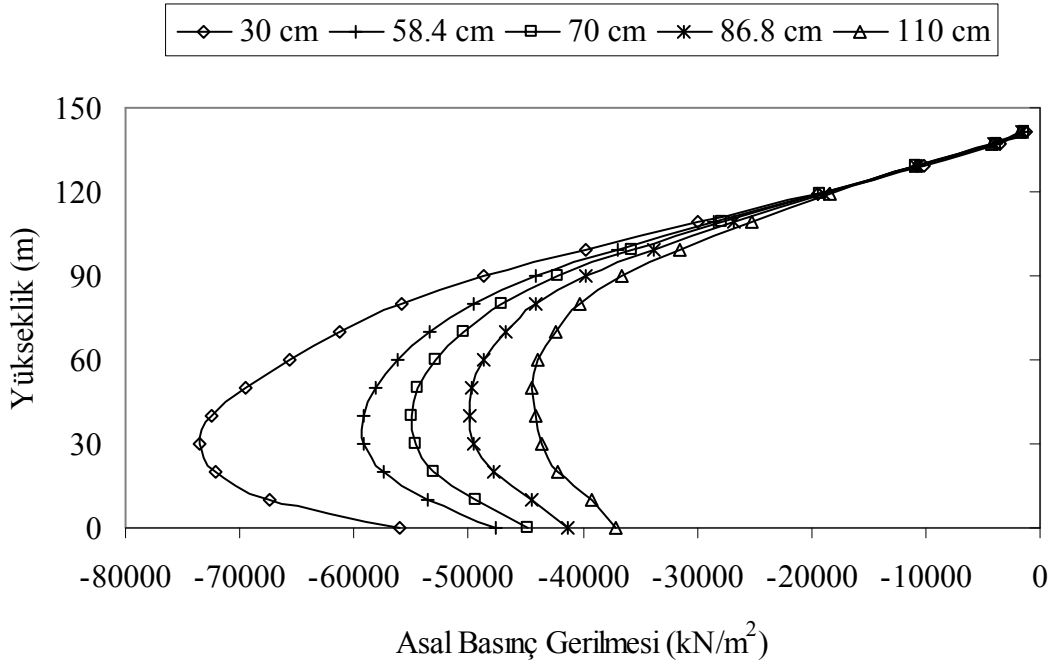
Şekil 72. Birleşik modellenmiş sistemlerde rezervuarın boş halinde Durum 4'te beton plakta oluşan en büyük asal çekme gerilmeleri



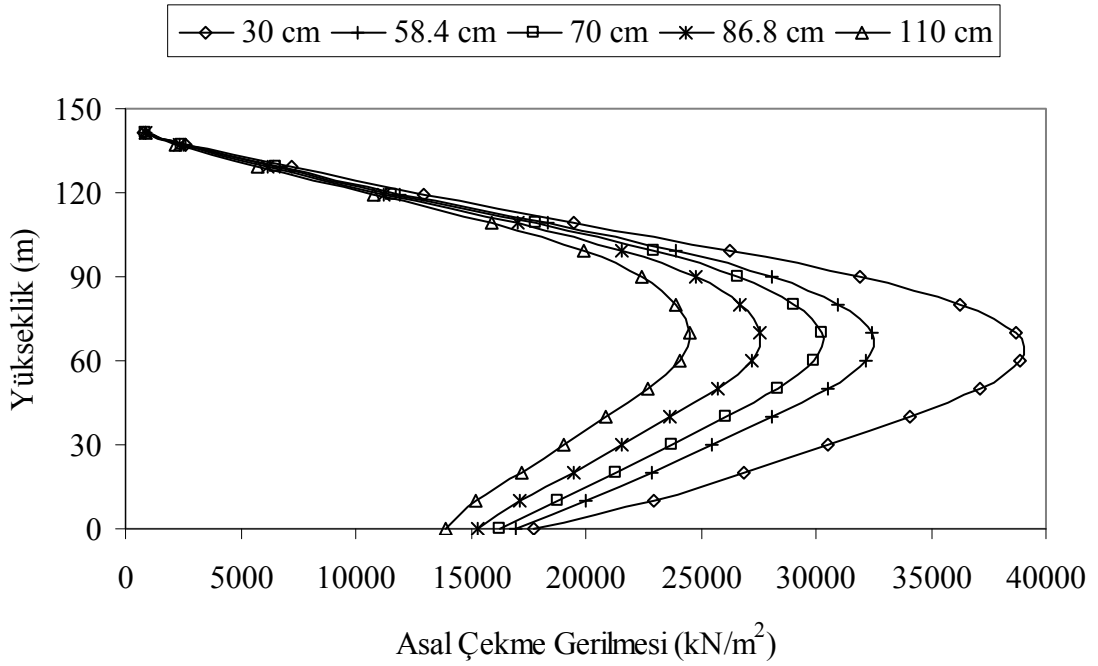
Şekil 73. Birleşik modellenmiş sistemlerde rezervuarın dolu halinde Durum 2'de beton plakta oluşan en büyük asal basınç gerilmeleri



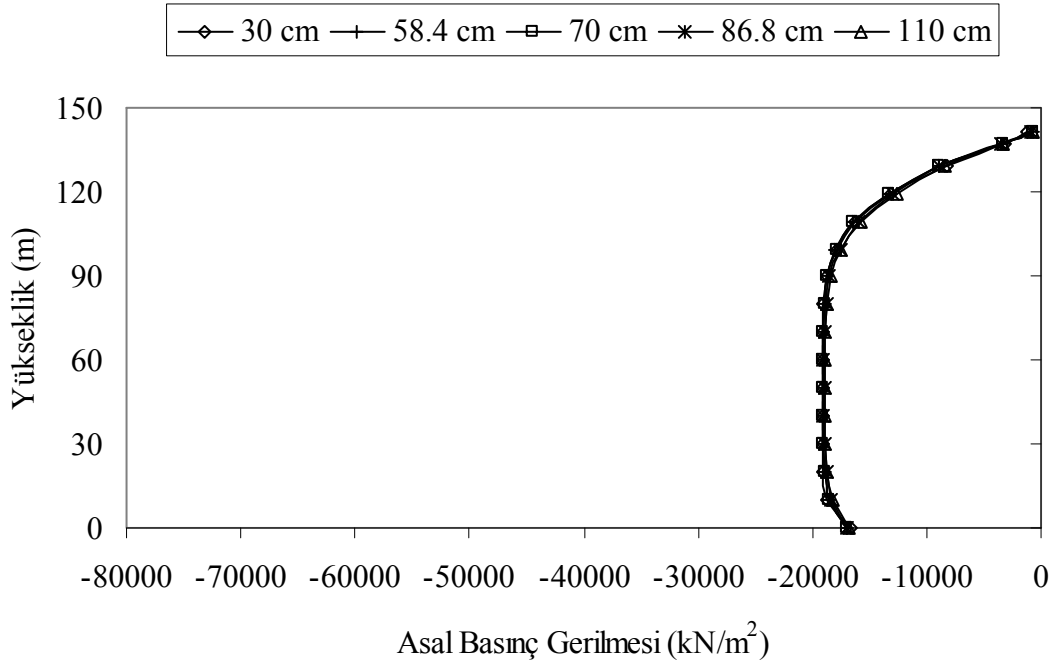
Şekil 74. Birleşik modellenmiş sistemlerde rezervuarın dolu halinde Durum 2'de beton plakta oluşan en büyük asal çekme gerilmeleri



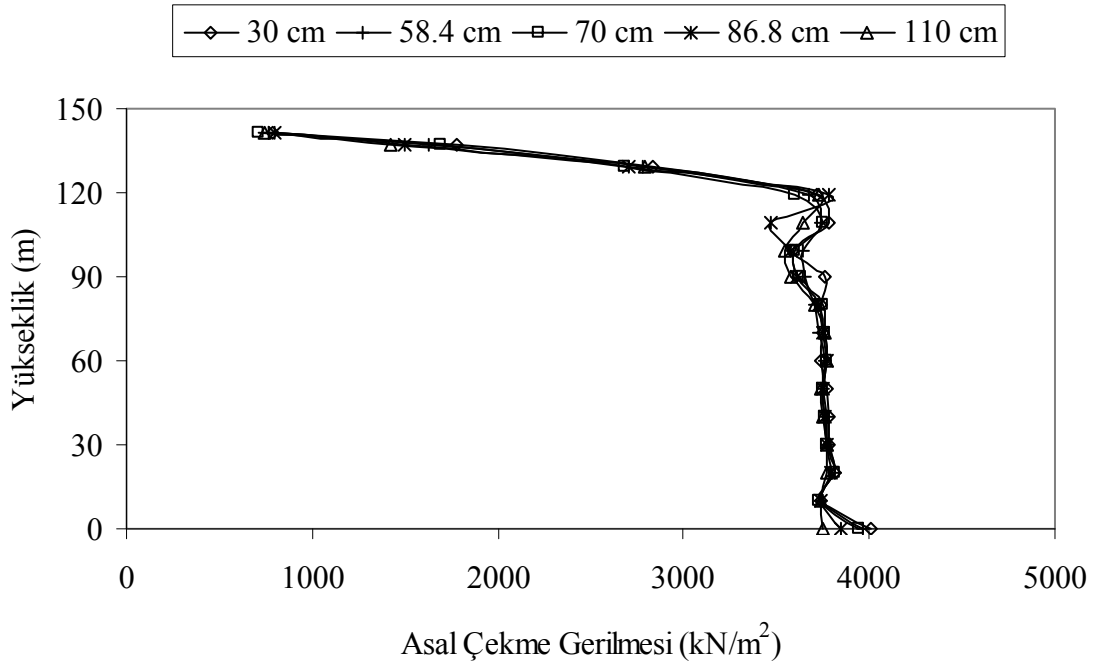
Şekil 75. Birleşik modellenmiş sistemlerde rezervuarın dolu halinde Durum 3'te beton plakta oluşan en büyük asal basınç gerilmeleri



Şekil 76. Birleşik modellenmiş sistemlerde rezervuarın dolu halinde Durum 3'te beton plakta oluşan en büyük asal çekme gerilmeleri



Şekil 77. Birleşik modellenmiş sistemlerde rezervuarın dolu halinde Durum 4'te beton plakta oluşan en büyük asal basınç gerilmeleri



Şekil 78. Birleşik modellenmiş sistemlerde rezervuarın dolu halinde Durum 4'te beton plakta oluşan en büyük asal çekme gerilmeleri

3.1.2.1.2. Sürtünme Tanımlanan Sistemlerde Beton Plakta Oluşan Asal Gerilmeler

Sürtünme dikkate alınan sistemlerde beton plakta oluşan asal gerilme bileşenlerinin yükseklik boyunca değişimi rezervuarın boş hali için Şekil 79-84'te, dolu hali için Şekil 85-90'da verilmiştir. Bu sistemlerden elde edilen sonuçların birleşik modellenmiş sistemlerden elde edilenlerle kıyaslandığında daha düşük olduğu görülmüştür. Deprem kuvveti etkisiyle birleşim bölgelerinde yoğunlaşan gerilme yığılması sürtünme etkisiyle harcanmış ve gerilmelerde azalma meydana gelmiştir. Baraj rezervuarı boşken, Durum 2'de en küçük asal gerilme bileşenleri elde edilmiştir. En kritik asal gerilme bileşenleri ise Durum 3'te elde edilmiştir. Birleşik modellenmiş sistemlerle kıyaslandığında bu sistemlerde beton plak-topuk plağı birleşim bölgesine yaklaştıkça asal gerilme bileşenleri özellikle Durum 3 ve 4'te artış göstermiştir. Birleşik modellenmiş sistemlere benzer olarak bu sistemlerde de beton plak kalınlığının azalması gerilme bileşenlerinde artışa neden olmuştur. Ancak bazı modellerde değişim fazla belirgin olmazken bazı modellerde ise son derece belirgindir.

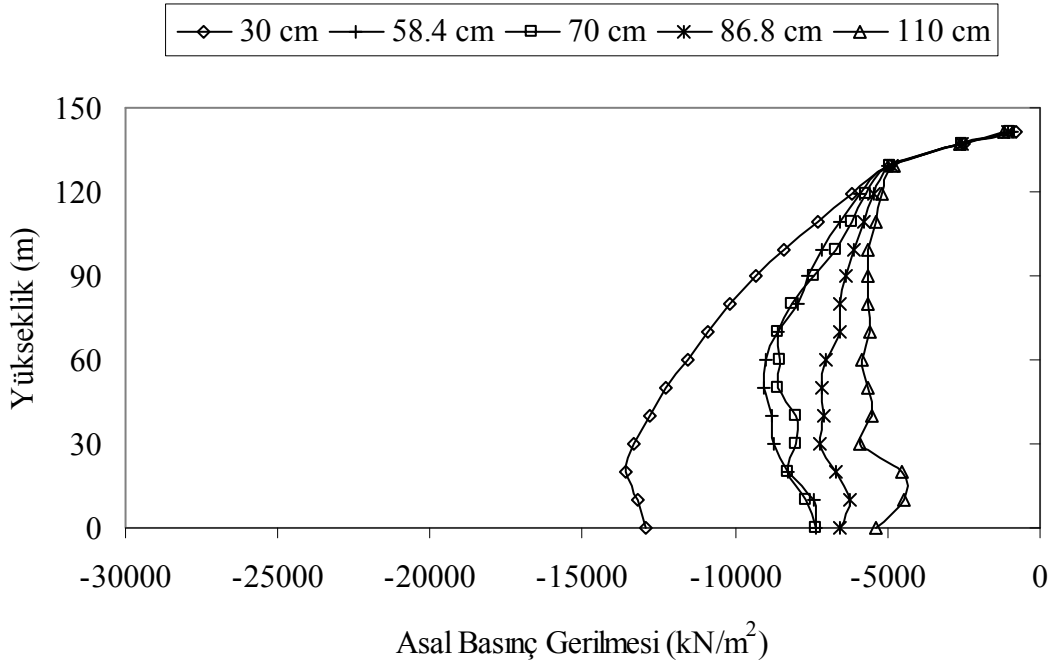
Rezervuarın boş halinde en küçük kritik asal basınç gerilmeleri Durum 2'de 110cm'lik plak taban kalınlığı olan model için 5890.66kN/m^2 olarak belirlenmiş, en kritik asal basınç gerilmesi ise Durum 3'te 30cm'lik plak kalınlığı için 15527.2kN/m^2 olarak elde edilmiştir. Rezervuar boşken en küçük asal çekme gerilmesi Durum 2'de 110cm'lik plak kalınlığı için 994.757kN/m^2 , en büyük asal çekme gerilmesi ise Durum 3'te 30cm'lik plak kalınlığı için 3237.13kN/m^2 olarak elde edilmiştir. Barajın mevcut 70cm'lik plak taban kalınlığı içinse en küçük kritik asal basınç gerilmesi Durum 2'de 8613.65kN/m^2 , en büyük asal basınç gerilmesi ise Durum 3'te 10598.3kN/m^2 olarak elde edilmiştir. En küçük kritik asal çekme gerilmesi ise Durum 2'de 1027.8kN/m^2 , en büyük kritik asal çekme gerilmesi ise Durum 3'te 2571.74kN/m^2 olarak elde edilmiştir.

Sürtünme tanımlanan modellerde hidrodinamik basınç dikkate alındığında rezervuarın boş haline göre asal gerilme bileşenlerinde belirgin artışlar görülmüştür. Beton plak kalınlığının azalması ile asal gerilme bileşenlerinde artışlar ortaya çıkmıştır. Rezervuarın dolu halinde Durum 3'te en kritik asal gerilme bileşenleri elde edilirken, Durum 2'de asal çekme gerilmeleri ve 30cm'lik beton plak dikkate alınan model haricinde asal basınç gerilmelerinin daha düşük olduğu belirlenmiştir. Rezervuar suyunun etkisi dikkate alındığında, boş halde olduğu gibi beton plak-topuk plağı civarında gerilmelerde artışlar belirlenmiştir.

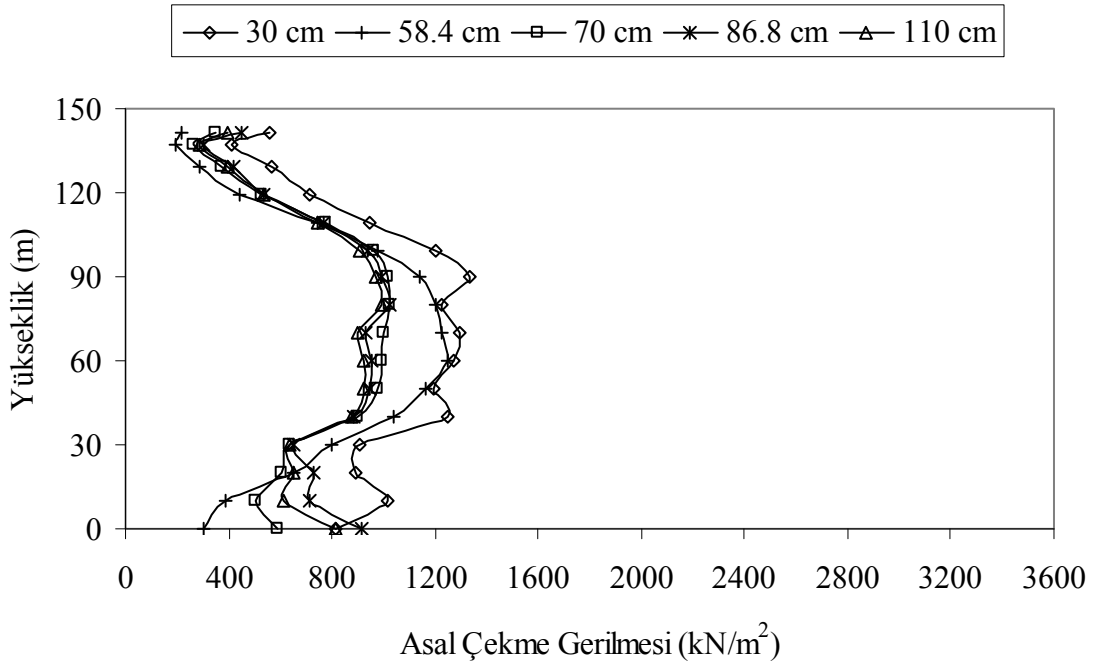
Gövde malzemesinin lineer olmayan davranışı, sürtünmenin dikkate alındığı sistemlerde de gerilme bileşenlerinin artışına neden olmuştur. Durum 4'te en kritik asal basınç gerilmeleri beton plak-topuk plağı birleşiminde elde edilmiştir. Beton plak yüksekliği boyunca gerilme değişimi dikkate alındığında, Durum 3'te elde edilen asal basınç gerilmelerinin daha büyük olduğu görülmüştür. Asal çekme gerilmeleri ise Durum 3'te en kritik değerlerini alırken, Durum 1'de en küçük olmuş ve Durum 4'te Durum 3'e göre daha küçük değerler almıştır.

Hidrodinamik basınç dikkate alındığında en küçük kritik asal basınç gerilmesi Durum 2'de 110cm'lik plak taban kalınlığı için 8302.4kN/m^2 olarak oluşurken, en büyük asal basınç gerilmesi ise Durum 3'te 30cm'lik plak kalınlığı için 27569.9kN/m^2 olarak elde edilmiştir. En küçük kritik asal çekme gerilmesi Durum 2'de 110cm'lik plak taban kalınlığı için 1092.47kN/m^2 olarak elde edilirken; en büyük asal çekme gerilmesi ise Durum 3'te 30cm'lik plak kalınlığı için 8499.14kN/m^2 olarak hesaplanmıştır. Barajın mevcut 70cm'lik plak taban kalınlığı için en küçük asal basınç gerilmesi Durum 2'de 11498.7kN/m^2 olarak, en büyük asal basınç gerilmesi ise Durum 3'te 15330.0kN/m^2 olarak elde edilmiştir. En küçük asal çekme gerilmesi Durum 2'de 1326.5kN/m^2 , en büyük asal çekme gerilmesi ise Durum 3'te 5400.4kN/m^2 olarak elde edilmiştir.

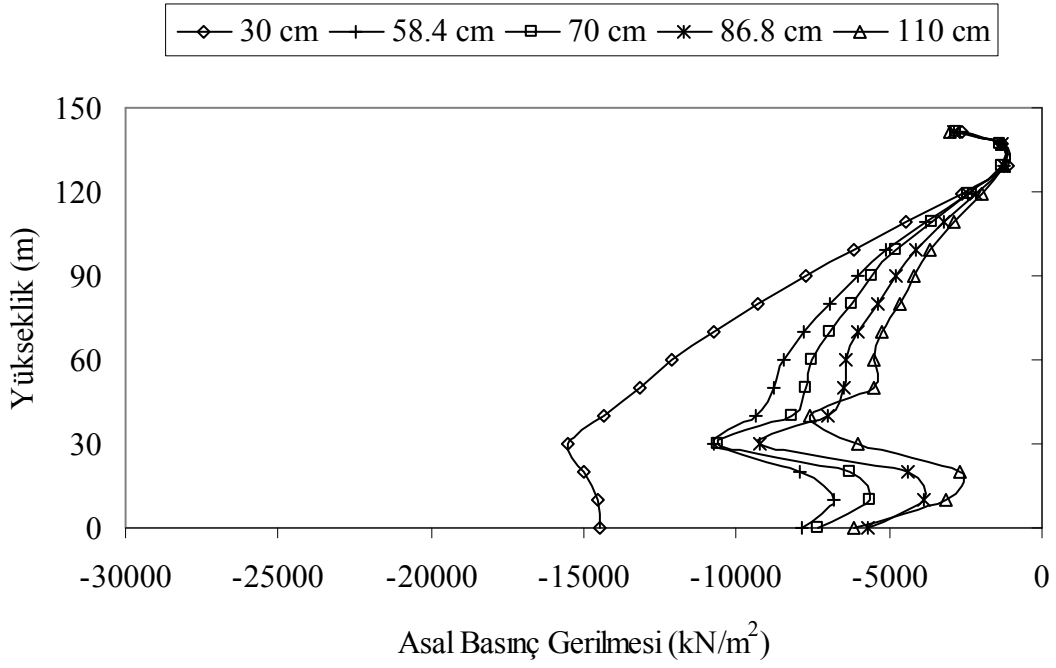
Asal basınç gerilmeleri dikkate alındığında rezervuarın dolu halinde yalnızca 30cm'lik plak kalınlığı için Durum 2 ve 3'te beton dayanımının aşıldığı belirlenmiştir. Sonlu eleman analizlerine göre diğer plak kalınlıkları için basınç kırılması bakımından bir tehlike görülmemiştir. Özellikle hidrodinamik basınç etkisi ihmal edildiğinde oldukça küçük basınç gerilmeleri elde edilmiştir. Rezervuar boşken, Durum 2 için beton plakta asal çekme gerilmeleri beton çekme dayanımından daha küçük elde edilmiştir. Ancak baraj rezervuarı dolu iken 30cm'lik plak kalınlığı için mevcut dayanımın aşıldığı görülmüştür. Baraj gövdesini oluşturan kaya dolgunun lineer olmayan davranışının dikkate alınmasıyla asal çekme gerilmelerinin beton dayanımını aştığı görülmüştür. Bu durumda Uddin ve Gazetas (1995) tarafından da belirtildiği gibi kaya dolgunun artan deformasyonları beton plakta oluşan çekme gerilmelerini artırmıştır. Dikkate alınan sistemler içinde sadece 110cm'lik plak taban kalınlığı için barajın boş ve dolu hallerinde Durum 2 ve 4'te beton dayanımı bakımında kabul edilebilir sınırlara yakın değerler elde edilmiştir.



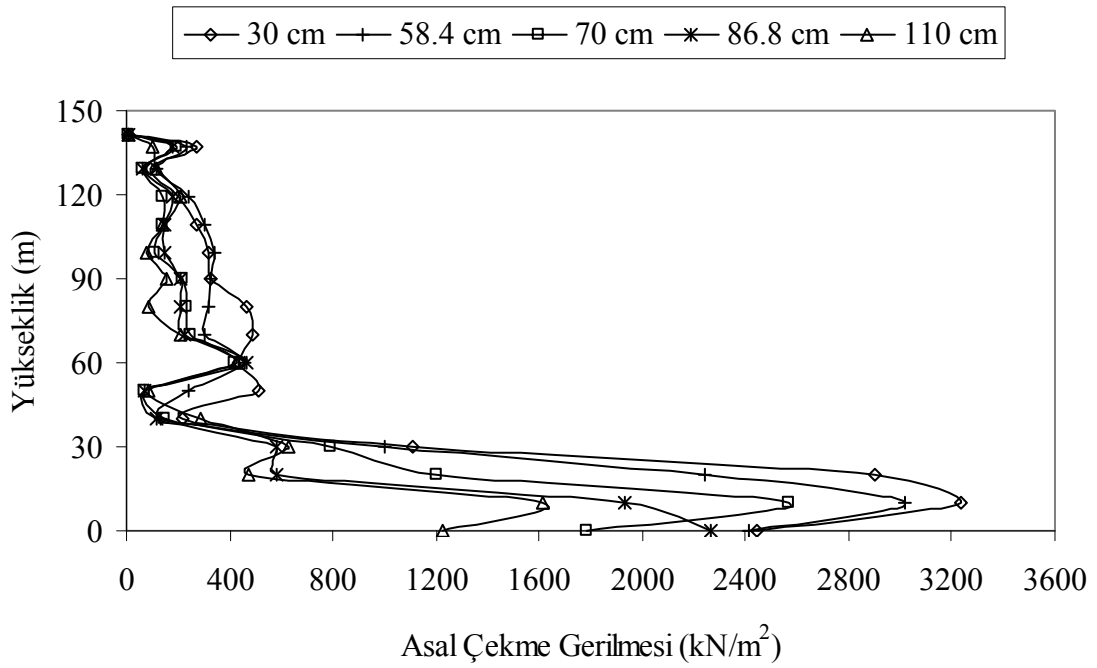
Şekil 79. Sürtünme tanımlanan sistemlerde rezervuarın boş halinde Durum 2'de beton plakta oluşan en büyük asal basınç gerilmeleri



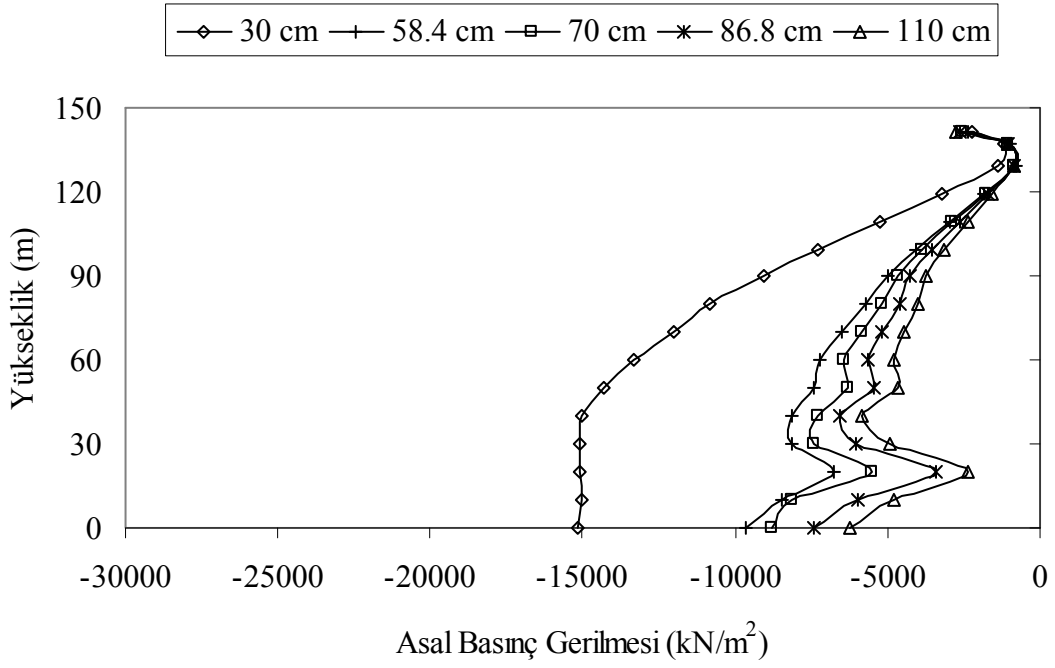
Şekil 80. Sürtünme tanımlanan sistemlerde rezervuarın boş halinde Durum 2'de beton plakta oluşan en büyük asal çekme gerilmeleri



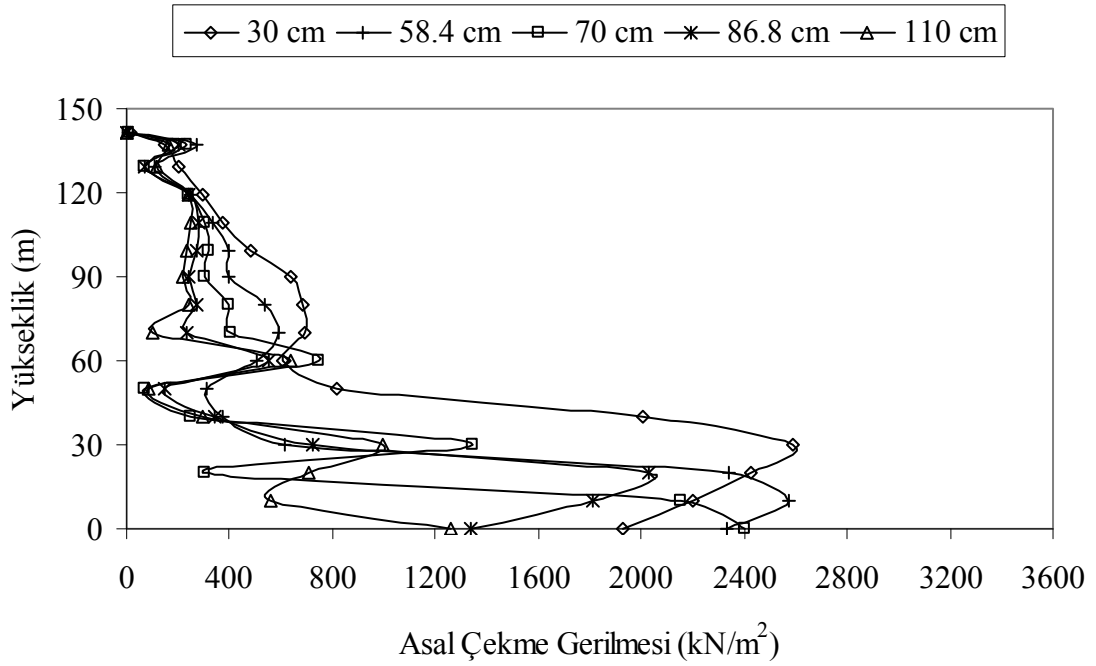
Şekil 81. Sürtünme tanımlanan sistemlerde rezervuarın boş halinde Durum 3'te beton plakta oluşan en büyük asal basınç gerilmeleri



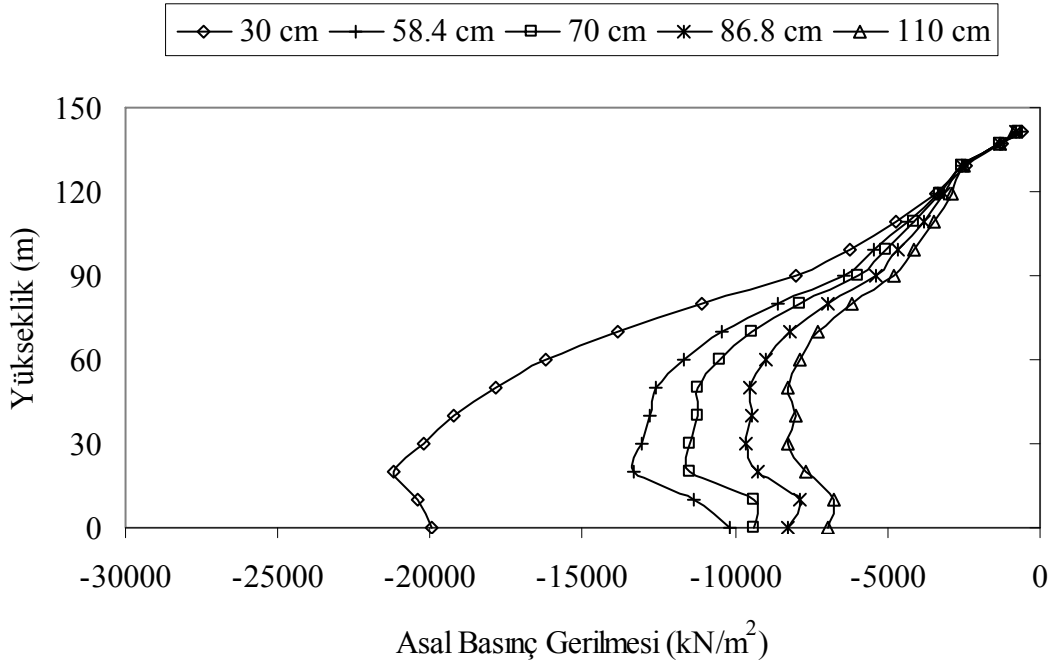
Şekil 82. Sürtünme tanımlanan sistemlerde rezervuarın boş halinde Durum 3'te beton plakta oluşan en büyük asal çekme gerilmeleri



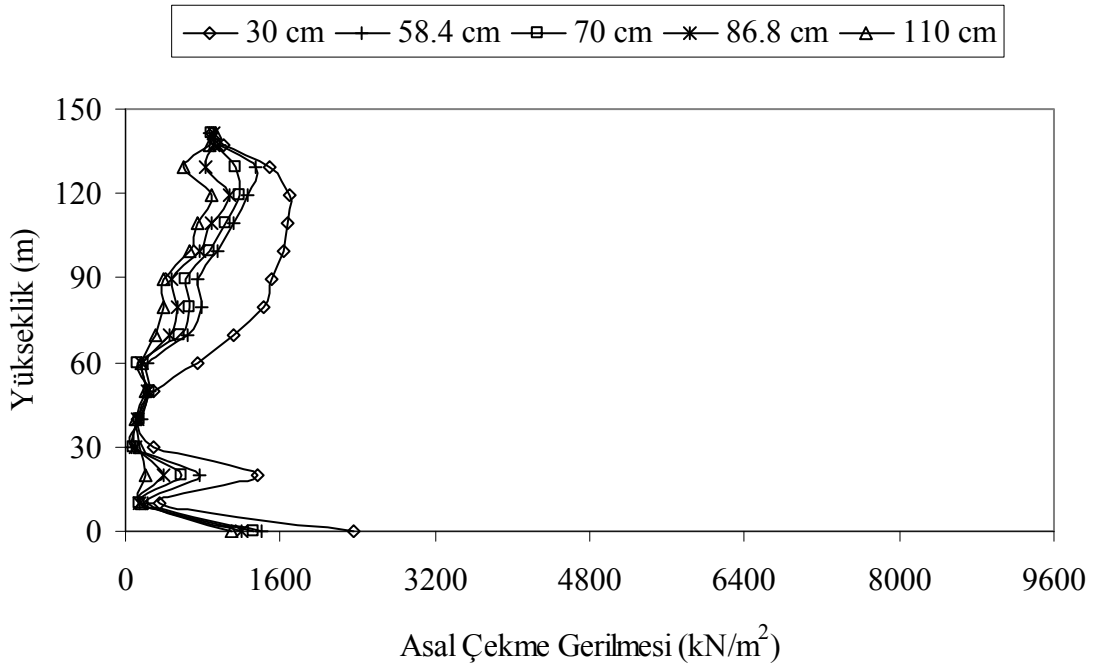
Şekil 83. Sürtünme tanımlanan sistemlerde rezervuarın boş halinde Durum 4’te beton plakta oluşan en büyük asal basınç gerilmeleri



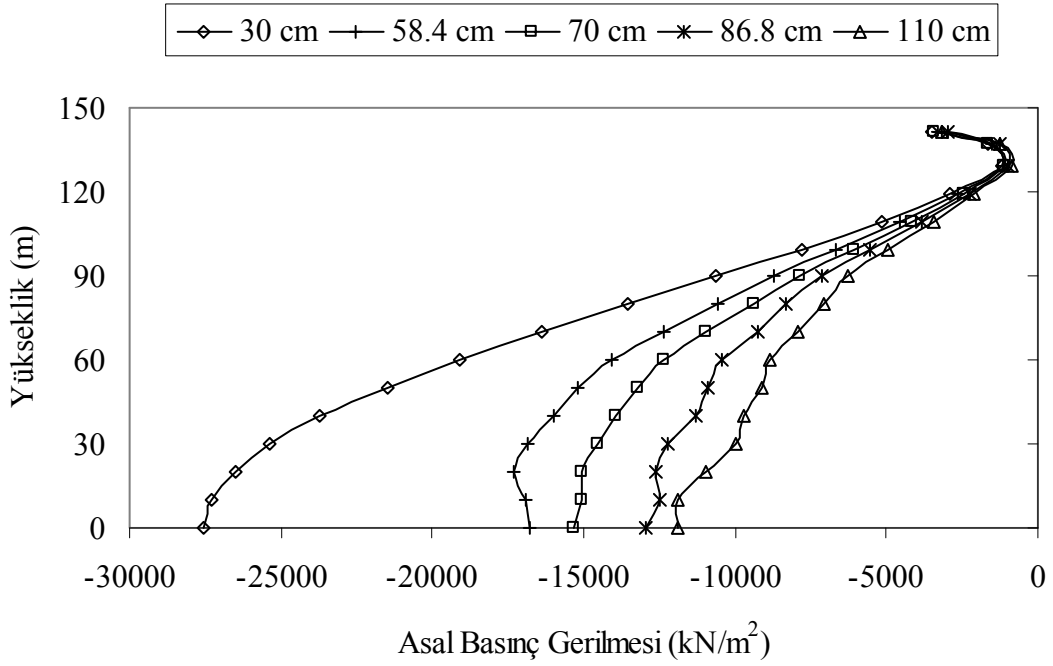
Şekil 84. Sürtünme tanımlanan sistemlerde rezervuarın boş halinde Durum 4’te beton plakta oluşan en büyük asal çekme gerilmeleri



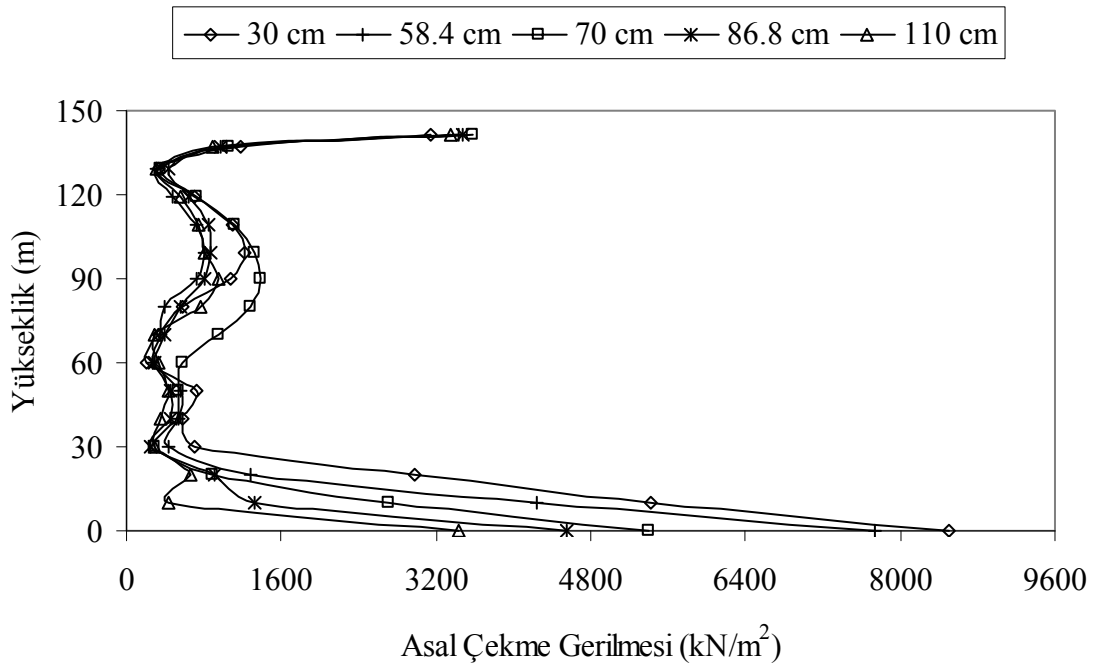
Şekil 85. Sürtünme tanımlanan sistemlerde rezervuarın dolu halinde Durum 2’de beton plakta oluşan en büyük asal basınç gerilmeleri



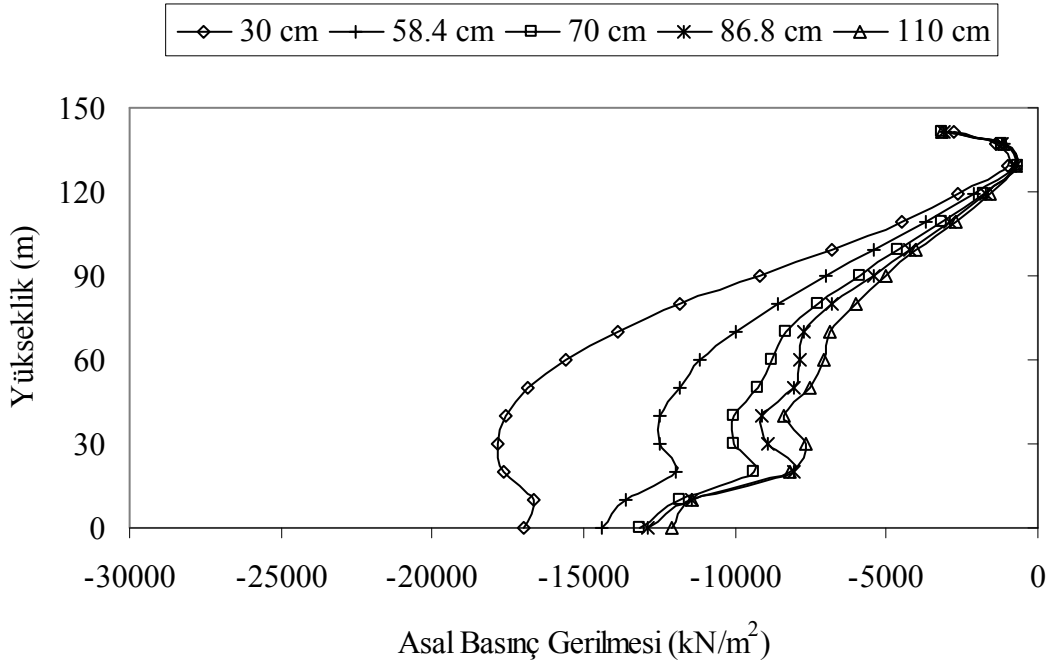
Şekil 86. Sürtünme tanımlanan sistemlerde rezervuarın dolu halinde Durum 2’de beton plakta oluşan en büyük asal çekme gerilmeleri



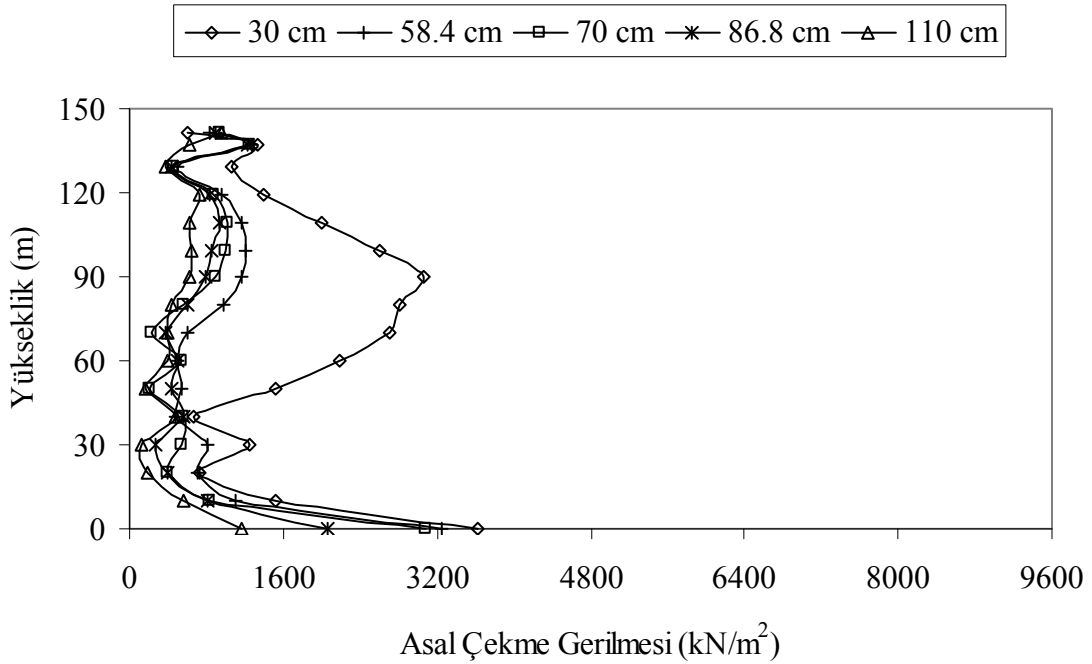
Şekil 87. Sürtünme tanımlanan sistemlerde rezervuarın dolu halinde Durum 3'te beton plakta oluşan en büyük asal basınç gerilmeleri



Şekil 88. Sürtünme tanımlanan sistemlerde rezervuarın dolu halinde Durum 3'te beton plakta oluşan en büyük asal çekme gerilmeleri



Şekil 89. Sürtünme tanımlanan sistemlerde rezervuarın dolu halinde Durum 4'te beton plakta oluşan en büyük asal basınç gerilmeleri



Şekil 90. Sürtünme tanımlanan sistemlerde rezervuarın dolu halinde Durum 4'te beton plakta oluşan en büyük asal çekme gerilmeleri

3.2. Ön Yüzü Beton Kaplı Kaya Dolgu Barajların Güvenilirlik Analizi

Bu tez çalışması kapsamında statik ve dinamik yüklere maruz ÖYBKGD barajların güvenilirlik analizleri gerçekleştirilmiştir. Burada, beton plak üzerinde seçilen kritik noktalar için elde edilen güvenilirlik indeksi (β) ve göçme olasılığı (P_f) değerleri verilmiştir.

3.2.1. Statik Yüklere Maruz Ön Yüzü Beton Kaplı Kaya Dolgu Barajların Güvenilirlik Analizi

Tez çalışmasının bu bölümünde, statik yük olarak barajın kendi ağırlığı ve rezervuar suyunun hidrostatik basınç etkisi dikkate alınarak ÖYBKGD barajın güvenilirlik analizleri gerçekleştirilmiştir. Bu amaçla, Geliştirilmiş Rackwitz-Fiessler Yöntemi beton plağın güvenilirliğini belirlemek için Direkt Birleştirme Yöntemi ve Yanıt Yüzeyi Yöntemi ile birlikte kullanılmıştır.

3.2.1.1. Birleşik Modellenmiş Sistemlerin Statik Yükler Altında Güvenilirlik Analizi

Birleşik modellenmiş sistemlerde barajın mevcut 70cm'lik beton plak taban kalınlığı için beton plakta statik analizlerden elde edilen asal gerilme bileşenleri ve kritik noktalar için güvenilirlik analiz sonuçları birlikte verilmiştir. Beton plakta oluşan asal gerilme ve güvenilirlik indeksi-göçme olasılığı değerleri rezervuarın boş hali için Tablo 11-14'te, dolu hali için Tablo 15-19'da verilmiştir. Bu bölümde, ayrıca, farklı beton plak kalınlıkları dikkate alınan modellerde beton plak üzerinde elde edilen en kritik güvenilirlik indeksi-göçme olasılığı değerleri de rezervuarın boş hali için Tablo 19-22'de, dolu hali için Tablo 23-26'da verilmiştir.

Rezervuarın boş halinde Durum 1 ve 2'de birleşik modellenmiş sistemlerin sonlu eleman çözümlerinden elde edilen sonuçlar ve bu modeller kullanılarak elde edilen güvenilirlik analiz sonuçları birbirine oldukça yakın elde edilmiştir. Geometri bakımından lineer olmayan davranışın dikkate alındığı Durum 2'de, beton plakta elde edilen kritik asal basınç gerilmeleri tüm plak kalınlıkları için Durum 1'de elde edilenlere göre daha küçük olmuştur. Bununla birlikte, her iki durumda da beton plakta elde edilen asal çekme gerilmeleri çok küçük olduğundan göçme olasılıkları hesaplanmamıştır. Durum 1 ve 2'de beton plak kalınlığı arttıkça asal basınç gerilmelerinin ve göçme olasılıklarının azaldığı

görülmüştür. 87 ve 110cm'lik plak taban kalınlıkları için beton plakta beton dayanımından daha küçük asal basınç gerilmeleri elde edilmiş olmasına karşın göçme olasılıklarının oldukça yüksek oldukları görülmüştür. Durum 3'te, Durum 1 ve 2'ye göre daha büyük asal basınç gerilmeleri elde edilmiştir. Bu durumda, en büyük plak kalınlığı için bile basınç dayanımının aşıldığı görülmüştür. Bu değerler için hesap yapılan ilgili noktaların 0.5'in üzerinde göçme olasılığının olduğu görülmüştür. Ancak, asal çekme gerilmeleri için Durum 1 ve 2 deki gibi göçme riski görülmemiştir. Birleşik modellenmiş sistemlerde Durum 4'te en küçük asal basınç gerilmeleri elde edilmiştir. Bu sistemlerde tüm plak kalınlıkları için beton plakta beton basınç dayanımından daha küçük kritik gerilmeler elde edilmesine rağmen 0.06-0.14 arasında değişen göçme olasılıkları elde edilmiştir. Bu değerler, plak kalınlığındaki artış ile beton plak üzerinde göçme olasılığı olan bölgeleri ve olasılıklarını azaltsa bile yine de beton plak için göçme riski anlamına gelmektedir.

Birleşik modellenmiş sistemlerde rezervuarın dolu halinde Durum 1 ve 2'de elde edilen asal basınç gerilmeleri boş haldeki gibi birbirine oldukça yakın elde edilmiştir. Durum 2'de elde edilen basınç gerilmeleri Durum 1'e göre az da olsa küçülmüştür. Bununla birlikte, beton plaktaki kritik noktaların göçme olasılıkları az da olsa azalmıştır. Durum 3'te ise Durum 1 ve 2 ile kıyaslandığında son derece büyük asal basınç gerilmeleri elde edilmiş olup, bu değerler beton basınç dayanımının oldukça üzerinde çıkmıştır. Bununla birlikte, Durum 1, 2 ve özellikle 3'te beton plak yüksekliği boyunca elde edilen kritik göçme olasılığı değerleri beton plağın da göçmesi anlamına gelecek düzeydedir. Durum 4'te ise asal basınç gerilmeleri beton plak yüksekliği boyunca diğer durumlarla kıyaslandığında oldukça küçük elde edilmiştir. Aynı durum yükseklik boyunca elde edilen göçme olasılıkları için de geçerlidir. Durum 4'te sadece beton plak-topuk plağı birleşiminde basınç dayanımından daha büyük gerilme değerleri elde edilmiş olup; bu bölgede 0.7'nin üzerinde göçme olasılığı elde edilmiştir. Rezervuarın dolu olması halinde boş durumda oluşmayan kritik asal çekme gerilmeleri beton plak üzerinde oluşmuştur. Beton plak üzerinde oluşan kritik değerler dikkate alındığında asal basınç gerilmelerine benzer şekilde, en kritik değerler Durum 3'te oluşurken en elverişli asal çekme gerilmeleri Durum 4'te oluşmuştur. Rezervuarın dolu halinde asal çekme gerilmeleri için gerçekleştirilen güvenilirlik analizleri de sonlu eleman analizlerinde elde edilen gerilme değerlerine benzer şekilde Durum 3'te en yüksek göçme olasılığını verirken; Durum 4'te en küçük göçme olasılığı değerlerini vermiştir. Durum 2'de ise Durum 1'e kıyasla az da olsa daha küçük göçme olasılığı değerleri elde edilmiştir. Beton plak kalınlığındaki artış

sonucunda oluşan asal gerilme bileşenlerindeki azalmalara paralel olarak, kritik noktalarda yapılan güvenilirlik analizi sonuçlarına göre bu noktaların göçme olasılıkları da azalmıştır.

Rezervuarın boş ve dolu halleri kıyaslandığında, dolu halde asal gerilme bileşenlerinde belirgin artışlar olmuştur. Öyle ki, boş halde oluşmayan kritik asal çekme gerilmeleri de ortaya çıkmıştır. Beton plak kalınlığındaki artışla birlikte kritik gerilme değerlerinde azalma olsa da asal basınç gerilmeleri için göçme olasılığı değerleri rezervuarın her iki hali için de oldukça yüksek olmuştur. Asal çekme gerilmeleri ise yalnızca rezervuarın dolu olması halinde beton plak üzerindeki belli noktalarda göçme riskine neden olmuştur. Birleşik modellenmiş sistemlerde kritik göçme olasılıkları dikkate alındığında, 110cm'lik plak taban kalınlığı bulunan sistem diğer plak kalınlıklarını içeren sistemlere göre daha elverişli olurken, 30cm'lik plak kalınlığı bulunan sistem en elverişsiz baraj modeli olmuştur.

Tablo 11. Birleşik modellenmiş sistemde 70cm'lik plak taban kalınlığı için rezervuarın boş halinde Durum 1'de beton plağın güvenilirlik analiz sonuçları

Yükseklik (m)	Basınç Gerilmesi (kN/m ²)	β	P_r ($\times 10^{-2}$)	Çekme Gerilmesi (kN/m ²)	β	P_r ($\times 10^{-2}$)
0	-17450.942	0.543	29.346	-1144.536	-	0
10	-19343.578	0.115	45.423	43.207	-	0
20	-20334.211	-0.082	53.264	51.979	-	0
30	-20107.118	-0.037	51.470	21.003	-	0
40	-19231.546	0.119	45.280	-3.929	-	0
50	-18081.865	0.301	38.181	-9.483	-	0
60	-16913.309	0.460	32.289	-31.574	-	0
70	-15980.063	0.566	28.556	-26.372	-	0
80	-15438.084	0.621	26.723	-20.163	-	0
90	-15310.328	0.642	26.030	-1.377	-	0
100	-15443.588	0.664	25.327	-5.458	-	0
110	-15465.462	0.757	22.450	-39.197	-	0
120	-14525.798	1.197	11.563	-24.147	-	0
129	-11925.004	2.558	0.527	-88.175	-	0
137	-7084.478	6.223	0	-54.906	-	0
142	-3555.838	-	0	303.945	-	0

Tablo 12. Birleşik modellenmiş sistemde 70cm'lik plak taban kalınlığı için rezervuarın boş halinde Durum 2'de beton plağın güvenilirlik analiz sonuçları

Yükseklik (m)	Basınç Gerilmesi (kN/m ²)	β	P_f (x10 ⁻²)	Çekme Gerilmesi (kN/m ²)	β	P_f (x10 ⁻²)
0	-17381.326	0.560	28.774	-1141.003	-	0
10	-19257.371	0.133	44.701	43.054	-	0
20	-20236.137	-0.063	52.505	52.042	-	0
30	-20001.274	-0.017	50.677	21.236	-	0
40	-19120.455	0.139	44.481	-3.604	-	0
50	-17967.921	0.320	37.436	-8.961	-	0
60	-16797.708	0.478	31.631	-31.192	-	0
70	-15863.699	0.583	27.980	-26.147	-	0
80	-15322.550	0.637	26.208	-20.235	-	0
90	-15198.847	0.657	25.555	-1.521	-	0
100	-15341.775	0.678	24.890	-5.719	-	0
110	-15380.448	0.770	22.078	-39.409	-	0
120	-14463.954	1.208	11.361	-24.187	-	0
129	-11887.135	2.569	0.510	-87.993	-	0
137	-7066.469	6.240	0	-54.728	-	0
142	-3547.398	11.218	0	303.253	-	0

Tablo 13. Birleşik modellenmiş sistemde 70cm'lik plak taban kalınlığı için rezervuarın boş halinde Durum 3'te beton plağın güvenilirlik analiz sonuçları

Yükseklik (m)	Basınç Gerilmesi (kN/m ²)	β	P_f (x10 ⁻²)	Çekme Gerilmesi (kN/m ²)	β	P_f (x10 ⁻²)
0	-23606.877	-0.627	73.455	-1544.869	-	0
10	-25530.027	-0.880	81.051	68.344	-	0
20	-26162.105	-0.935	82.498	82.216	-	0
30	-25032.014	-0.757	77.557	53.824	-	0
40	-22732.422	-0.415	66.084	9.668	-	0
50	-19810.560	0.012	49.509	-13.405	-	0
60	-16771.405	0.402	34.397	-61.579	-	0
70	-14193.483	0.662	25.390	-62.759	-	0
80	-12557.844	0.787	21.555	-40.757	-	0
90	-12163.501	0.823	20.529	-0.859	-	0
100	-12947.255	0.764	22.233	8.700	-	0
110	-14279.870	0.708	23.956	-26.653	-	0
120	-14678.386	0.868	19.265	-18.186	-	0
129	-12801.657	1.751	4.000	-104.701	-	0
137	-7828.191	4.689	0	-88.792	-	0
142	-3845.819	9.821	0	354.356	-	0

Tablo 14. Birleşik modellenmiş sistemde 70cm'lik plak taban kalınlığı için rezervuarın boş halinde Durum 4'te beton plağın güvenilirlik analiz sonuçları

Yükseklik (m)	Basınç Gerilmesi (kN/m ²)	β	P_f (x10 ⁻²)	Çekme Gerilmesi (kN/m ²)	β	P_f (x10 ⁻²)
0	-14989.937	2.057	1.983	-617.407	-	0
10	-16152.106	1.308	9.551	47.345	-	0
20	-16327.588	1.307	9.555	78.984	-	0
30	-16213.427	1.270	10.212	32.178	-	0
40	-15638.270	1.512	6.533	-32.439	-	0
50	-14319.582	1.878	3.022	-34.058	-	0
60	-12687.044	2.167	1.513	11.437	-	0
70	-11239.817	2.342	0.960	-35.547	-	0
80	-10201.348	2.358	0.920	-20.654	-	0
90	-10366.923	2.271	1.159	-6.234	-	0
100	-11477.224	2.128	1.668	27.397	-	0
110	-12817.936	2.014	2.199	-12.616	-	0
120	-13322.423	2.323	1.010	-36.673	-	0
129	-12099.878	3.305	0.047	-151.885	-	0
137	-7484.411	6.725	0	-42.374	-	0
142	-3822.968	15.884	0	306.373	-	0

Tablo 15. Birleşik modellenmiş sistemde 70cm'lik plak taban kalınlığı için rezervuarın dolu halinde Durum 1'de beton plağın güvenilirlik analiz sonuçları

Yükseklik (m)	Basınç Gerilmesi (kN/m ²)	β	P_f (x10 ⁻²)	Çekme Gerilmesi (kN/m ²)	β	P_f (x10 ⁻²)
0	-44700.381	-4.275	99.999	-4058.558	-	0
10	-36736.851	-2.828	99.766	1699.705	-0.537	70.427
20	-33909.271	-2.434	99.253	883.707	5.035	0
30	-31307.552	-2.017	97.815	1323.684	1.524	6.373
40	-27648.259	-1.355	91.225	704.614	5.449	0
50	-24508.813	-0.770	77.932	1031.709	3.556	0.019
60	-21285.032	-0.231	59.143	503.601	9.528	0
70	-18927.407	0.146	44.197	758.435	7.113	0
80	-17170.587	0.405	34.272	406.211	-	0
90	-16241.106	0.536	29.594	528.971	-	0
100	-15939.721	0.596	27.557	313.894	-	0
110	-15809.424	0.674	25.012	258.703	-	0
120	-15060.405	0.988	16.160	134.524	-	0
129	-12654.715	2.087	1.847	-3.069	-	0
137	-7787.514	5.560	0	-59.195	-	0
142	-4006.141	10.605	0	331.535	-	0

Tablo 16. Birleşik modellenmiş sistemde 70cm'lik plak taban kalınlığı için rezervuarın dolu halinde Durum 2'de beton plağın güvenilirlik analiz sonuçları

Yükseklik (m)	Basınç Gerilmesi (kN/m ²)	β	P_f (x10 ⁻²)	Çekme Gerilmesi (kN/m ²)	β	P_f (x10 ⁻²)
0	-44632.060	-4.268	99.999	-4086.634	-	0
10	-36650.146	-2.817	99.758	1692.634	-0.503	69.238
20	-33820.738	-2.423	99.229	883.799	4.980	0
30	-31227.526	-2.006	97.758	1324.825	1.518	6.451
40	-27566.555	-1.343	91.028	708.030	5.359	0
50	-24427.568	-0.758	77.579	1032.053	3.549	0.019
60	-21193.290	-0.217	58.575	505.929	9.456	0
70	-18823.726	0.163	43.537	758.356	7.110	0
80	-17046.879	0.425	33.558	406.226	-	0
90	-16101.052	0.558	28.858	528.681	-	0
100	-15789.056	0.619	26.793	313.467	-	0
110	-15664.267	0.698	24.269	258.828	-	0
120	-14940.282	1.012	15.575	134.687	-	0
129	-12574.532	2.110	1.741	-2.594	-	0
137	-7748.760	5.588	0	-58.895	-	0
142	-3988.369	-	0	329.722	-	0

Tablo 17. Birleşik modellenmiş sistemde 70cm'lik plak taban kalınlığı için rezervuarın dolu halinde Durum 3'te beton plağın güvenilirlik analiz sonuçları

Yükseklik (m)	Basınç Gerilmesi (kN/m ²)	β	P_f (x10 ⁻²)	Çekme Gerilmesi (kN/m ²)	β	P_f (x10 ⁻²)
0	-64739.136	-5.259	100	-5080.369	-	0
10	-58800.152	-4.257	99.999	1890.056	-1.107	86.590
20	-55080.109	-3.969	99.996	979.563	4.386	0.001
30	-49742.561	-3.603	99.984	1253.325	1.453	7.312
40	-43182.442	-2.881	99.802	674.823	5.314	0
50	-37214.707	-2.154	98.437	1063.169	3.053	0.113
60	-30985.123	-1.120	86.857	512.081	7.333	0
70	-25629.281	-0.627	73.466	671.785	7.221	0
80	-21431.624	-0.174	56.919	368.052	-	0
90	-18777.922	0.112	45.558	526.332	-	0
100	-17692.752	0.232	40.819	312.085	-	0
110	-17756.698	0.237	40.634	275.012	-	0
120	-17593.048	0.313	37.723	152.642	-	0
129	-15284.943	0.936	17.458	-19.497	-	0
137	-9490.632	3.865	0.006	-99.429	-	0
142	-4681.861	9.141	0	434.447	-	0

Tablo 18. Birleşik modellenmiş sistemde 70cm'lik plak taban kalınlığı için rezervuarın dolu halinde Durum 4'te beton plağın güvenilirlik analiz sonuçları

Yükseklik (m)	Basınç Gerilmesi (kN/m ²)	β	P_f (x10 ⁻²)	Çekme Gerilmesi (kN/m ²)	β	P_f (x10 ⁻²)
0	-22444.181	-0.578	71.832	-5360.264	-	0
10	-11723.696	2.215	1.337	1267.549	1.953	2.543
20	-13333.516	2.085	1.852	939.634	2.695	0.353
30	-13320.825	2.003	2.258	1127.422	3.247	0.058
40	-13481.735	2.059	1.974	900.891	4.975	0
50	-13352.187	2.402	0.815	918.603	5.055	0
60	-12537.359	2.710	0.336	751.403	-	0
70	-11416.637	2.650	0.402	633.739	-	0
80	-10520.867	2.701	0.345	546.898	-	0
90	-10443.245	2.453	0.709	445.480	-	0
100	-11362.362	2.282	1.125	356.416	-	0
110	-12748.342	2.208	1.361	264.788	-	0
120	-13821.438	2.108	1.753	127.578	-	0
129	-13127.865	2.823	0.238	33.692	-	0
137	-8841.374	5.648	0	-135.824	-	0
142	-4655.117	-	0	324.966	-	0

Tablo 19. Birleşik modellenmiş sistemde rezervuarın boş halinde Durum 1'de beton plağın güvenilirlik analiz sonuçları

Plak Kalınlığı (cm)	Basınç Gerilmesi (kN/m ²)	β	P_f (x10 ⁻²)	Çekme Gerilmesi (kN/m ²)	β	P_f (x10 ⁻²)
30	-26010.846	-0.954	82.992	300.674	-	0
58.4	-21680.163	-0.319	62.513	303.472	-	0
70	-20334.211	-0.082	53.264	303.945	-	0
86.8	-18715.739	0.253	40.025	303.761	-	0
110	-16852.093	0.682	24.773	302.461	-	0

Tablo 20. Birleşik modellenmiş sistemde rezervuarın boş halinde Durum 2’de beton plağın güvenilirlik analiz sonuçları

Plak Kalınlığı (cm)	Basınç Gerilmesi (kN/m ²)	β	P_f (x10 ⁻²)	Çekme Gerilmesi (kN/m ²)	β	P_f (x10 ⁻²)
30	-25892.017	-0.873	80.862	299.958	-	0
58.4	-21576.878	-0.301	61.826	302.771	-	0
70	-20236.137	-0.063	52.505	303.253	-	0
86.8	-18624.156	0.273	39.248	303.082	-	0
110	-16761.732	0.703	24.098	301.803	-	0

Tablo 21. Birleşik modellenmiş sistemde rezervuarın boş halinde Durum 3’te beton plağın güvenilirlik analiz sonuçları

Plak Kalınlığı (cm)	Basınç Gerilmesi (kN/m ²)	β	P_f (x10 ⁻²)	Çekme Gerilmesi (kN/m ²)	β	P_f (x10 ⁻²)
30	-35803.425	-1.985	97.642	352.092	-	0
58.4	-28383.900	-1.257	89.556	354.130	-	0
70	-26162.105	-0.935	82.498	354.356	-	0
86.8	-23591.065	-0.623	73.325	353.835	-	0
110	-20805.689	-0.178	57.073	352.297	-	0

Tablo 22. Birleşik modellenmiş sistemde rezervuarın boş halinde Durum 4’te beton plağın güvenilirlik analiz sonuçları

Plak Kalınlığı (cm)	Basınç Gerilmesi (kN/m ²)	β	P_f (x10 ⁻²)	Çekme Gerilmesi (kN/m ²)	β	P_f (x10 ⁻²)
30	-16839.515	1.081	13.983	284.125	-	0
58.4	-16364.055	1.208	11.357	299.875	-	0
70	-16213.427	1.270	10.212	306.373	-	0
86.8	-15989.824	1.368	8.574	314.975	-	0
110	-15643.004	1.519	6.439	324.913	-	0

Tablo 23. Birleşik modellenmiş sistemde rezervuarın dolu halinde Durum 1’de beton plağın güvenilirlik analiz sonuçları

Plak Kalınlığı (cm)	Basınç Gerilmesi (kN/m ²)	β	P_f (x10 ⁻²)	Çekme Gerilmesi (kN/m ²)	β	P_f (x10 ⁻²)
30	-65089.414	-6.168	100	1896.843	-1.586	94.362
58.4	-48624.776	-4.697	100	1784.102	-0.999	84.106
70	-44700.381	-4.275	99.999	1699.705	-0.537	70.427
86.8	-40633.764	-3.810	99.993	1647.004	-0.270	60.630
110	-36729.875	-3.331	99.957	1643.932	-0.245	59.661

Tablo 24. Birleşik modellenmiş sistemde rezervuarın dolu halinde Durum 2’de beton plağın güvenilirlik analiz sonuçları

Plak Kalınlığı (cm)	Basınç Gerilmesi (kN/m ²)	β	P_f (x10 ⁻²)	Çekme Gerilmesi (kN/m ²)	β	P_f (x10 ⁻²)
30	-65048.652	-6.171	100	1887.244	-1.538	93.794
58.4	-48554.532	-4.690	100	1775.577	-0.955	83.021
70	-44632.060	-4.268	99.999	1692.634	-0.503	69.238
86.8	-40572.369	-3.803	99.993	1641.984	-0.235	59.286
110	-36679.617	-3.325	99.956	1641.311	-0.243	59.610

Tablo 25. Birleşik modellenmiş sistemde rezervuarın dolu halinde Durum 3’te beton plağın güvenilirlik analiz sonuçları

Plak Kalınlığı (cm)	Basınç Gerilmesi (kN/m ²)	β	P_f (x10 ⁻²)	Çekme Gerilmesi (kN/m ²)	β	P_f (x10 ⁻²)
30	-102181.572	-7.266	100	2020.440	-1.956	97.478
58.4	-71395.584	-5.851	100	1923.674	-1.422	92.255
70	-64739.136	-5.259	100	1890.056	-1.107	86.590
86.8	-57583.139	-4.974	100	1884.967	-1.106	86.582
110	-50659.572	-4.492	100	1831.173	-0.982	83.704

Tablo 26. Birleşik modellenmiş sistemde rezervuarın dolu halinde Durum 4'te beton plağın güvenilirlik analiz sonuçları

Plak Kalınlığı (cm)	Basınç Gerilmesi (kN/m ²)	β	P_f (x10 ⁻²)	Çekme Gerilmesi (kN/m ²)	β	P_f (x10 ⁻²)
30	-25265.751	-1.218	88.844	1420.146	0.551	29.076
58.4	-22568.496	-0.580	71.916	1346.892	1.058	14.496
70	-22444.181	-0.578	71.832	1267.549	1.953	2.543
86.8	-22315.992	-0.522	69.901	1211.304	1.988	2.343
110	-21963.774	-0.519	69.822	1174.723	2.058	1.981

3.2.1.2. Sürtünme Tanımlanan Sistemlerin Statik Yükler Altında Güvenilirlik Analizi

Sürtünme tanımlanmış sistemlerde barajın mevcut 70cm'lik plak taban kalınlığı için statik yükler altında beton plakta oluşan asal gerilme bileşenleri ve kritik noktalarda elde edilen güvenilirlik analiz sonuçları birlikte verilmiştir. Beton plakta oluşan asal gerilme ve güvenilirlik indeksi-göçme olasılığı değerleri rezervuarın boş hali için Tablo 27-30'da, dolu hali için Tablo 31-34'te verilmiştir. Ayrıca, farklı beton plak taban kalınlığı içeren modellerde elde edilen en kritik göçme olasılığı değerleri de rezervuarın boş hali için Tablo 35-38'de, dolu hali için Tablo 39'da verilmiştir.

Rezervuarın boş olması halinde, beton plakta elde edilen asal basınç ve çekme gerilmeleri Durum 1 ve 2'de betonun basınç ve çekme dayanımından çok küçük olması nedeniyle, bu sistemler için güvenilirlik analizi yapılmamıştır. Durum 3'te asal basınç ve çekme gerilmelerindeki artışla birlikte küçük plak kalınlıkları için beton plak-topuk plağı birleşiminde kritik çekme gerilmeleri oluşmuştur. Bu noktalarda hesaplanan göçme olasılığı değerleri, çekme gerilmeleri bakımından göçme riskinin yüksek olduğunu göstermiştir. Ancak, asal basınç gerilmelerindeki artış dayanım değerinin çok altında olduğu için sadece 30cm'lik plak kalınlığı için hesaplanan göçme olasılığı değeri bile göçme riski oluşturmayacak kadar küçük olmuştur. Durum 4'te elde edilen kritik asal çekme gerilmeleri Durum 3'e göre biraz daha azalmıştır. Bu noktalar için hesaplanan göçme olasılığı değerleri Durum 3 ile karşılaştırıldığında daha küçük olmakla birlikte plak kalınlığı arttıkça değerlerde azalma görülmüştür.

Rezervuarın dolu olması halinde Durum 1 ve 2'de beton plakta elde edilen asal basınç gerilmeleri plak kalınlığı arttıkça azalmıştır. Bununla birlikte, kritik noktalarda

hesaplanan göçme olasılıkları da benzer şekilde azalma göstermiştir. Durum 2’de beton plakta elde edilen asal basınç gerilmeleri ve göçme olasılıkları Durum 1’e göre daha küçük elde edilmiştir. Ancak, her iki durumda da belli noktaların göçme riskinin oldukça yüksek olduğu görülmüştür. Durum 3’te beton plaktaki gerilme değerlerinde görülen artışla birlikte göçme olasılıkları da artmış olup Durum 4’te ise bu değerler azalmıştır. Rezervuarın dolu halinde beton plakta boş halde oluşmayan kritik asal çekme gerilmelerinin oluştuğu görülmüştür. Durum 2’de Durum 1’e göre daha küçük kritik çekme gerilmeleri elde edilmiştir. Durum 3’te en kritik asal çekme gerilmeleri ve göçme olasılığı değerleri elde edilmiştir. Durum 4’te ise diğer üç duruma göre daha küçük asal çekme gerilmeleri elde edilirken, göçme olasılıkları ve göçme riski yüksek olan düğüm noktası sayılarında da azalma görülmüştür. Durum 4’te en riskli bölgenin beton plak-topuk plağı birleşimi civarı olduğu görülmüştür.

Birleşik modellenmiş sistemlerle kıyaslandığında sürtünme dikkate alınan sistemlerde oldukça küçük asal gerilmeler elde edilmiştir. Buna bağlı olarak da beton plakta elde edilen göçme olasılığı değerlerinin birleşik modellenmiş sistemlerden elde edilen değerlere göre oldukça küçük olduğu görülmüştür. Birleşik modellenmiş sistemlerde beton plak-kaya dolgu birleşiminde beton plak yüksek rijitliği nedeniyle daha fazla yük taşımıştır. Bu nedenle, olması gerektiğinden daha fazla gerilme taşımış ve göçme olasılığı da artmıştır. Sürtünme dikkate alındığında beton plak ve kaya dolgu birbirine göre daha bağımsız hareket edebilmektedir. Bu nedenle, beton plak kaya dolgunun davranışından kaynaklanan aşırı gerilmeleri çok daha az almıştır. Bu da beton elemanlarda göçme olasılığını düşürmüştür.

Tablo 27. Sürtünme tanımlanan sistemde 70cm'lik plak taban kalınlığı için rezervuarın boş halinde Durum 1'de beton plağın güvenilirlik analiz sonuçları

Yükseklik (m)	Basınç Gerilmesi (kN/m ²)	β	P_f (x10 ⁻²)	Çekme Gerilmesi (kN/m ²)	β	P_f (x10 ⁻²)
0	-3368.335	-	0	-66.134	-	0
10	-3460.532	-	0	7.780	-	0
20	-3472.696	-	0	47.473	-	0
30	-3253.956	-	0	-39.461	-	0
40	-3103.350	-	0	-3.009	-	0
50	-2971.896	-	0	-0.257	-	0
60	-2818.663	-	0	-21.439	-	0
70	-2691.552	-	0	-9.303	-	0
80	-2569.091	-	0	-15.246	-	0
90	-2446.208	-	0	-7.203	-	0
100	-2322.407	-	0	-17.079	-	0
110	-2162.628	-	0	9.157	-	0
120	-1883.540	-	0	18.324	-	0
129	-1655.155	-	0	-10.703	-	0
137	-1199.928	-	0	-29.012	-	0
142	-615.328	-	0	57.578	-	0

Tablo 28. Sürtünme tanımlanan sistemde 70cm'lik plak taban kalınlığı için rezervuarın boş halinde Durum 2'de beton plağın güvenilirlik analiz sonuçları

Yükseklik (m)	Basınç Gerilmesi (kN/m ²)	β	P_f (x10 ⁻²)	Çekme Gerilmesi (kN/m ²)	β	P_f (x10 ⁻²)
0	-2871.244	-	0	-147.323	-	0
10	-3107.166	-	0	3.473	-	0
20	-3318.827	-	0	95.456	-	0
30	-3084.769	-	0	-49.939	-	0
40	-2904.304	-	0	-7.766	-	0
50	-2770.503	-	0	6.955	-	0
60	-2598.144	-	0	-29.307	-	0
70	-2462.816	-	0	-1.880	-	0
80	-2322.915	-	0	-21.313	-	0
90	-2183.975	-	0	-3.780	-	0
100	-2042.924	-	0	-19.734	-	0
110	-1860.781	-	0	10.166	-	0
120	-1559.636	-	0	18.970	-	0
129	-1353.683	-	0	-7.081	-	0
137	-1032.933	-	0	-23.457	-	0
142	-588.094	-	0	39.882	-	0

Tablo 29. Sürtünme tanımlanan sistemde 70cm'lik plak taban kalınlığı için rezervuarın boş halinde Durum 3'te beton plağın güvenilirlik analiz sonuçları

Yükseklik (m)	Basınç Gerilmesi (kN/m ²)	β	P_f (x10 ⁻²)	Çekme Gerilmesi (kN/m ²)	β	P_f (x10 ⁻²)
0	-5175.192	-	0	877.692	1.963	2.48
10	-3678.298	-	0	-136.873	-	0
20	-2272.078	-	0	-429.783	-	0
30	-2852.623	-	0	374.677	-	0
40	-2508.332	-	0	-76.215	-	0
50	-2088.279	-	0	-132.975	-	0
60	-2041.985	-	0	129.572	-	0
70	-1770.292	-	0	-106.850	-	0
80	-1614.569	-	0	14.558	-	0
90	-1482.887	-	0	-28.383	-	0
100	-1387.906	-	0	-27.289	-	0
110	-1290.779	-	0	13.269	-	0
120	-1002.357	-	0	59.310	-	0
129	-809.397	-	0	10.709	-	0
137	-1119.593	-	0	-33.879	-	0
142	-1295.874	-	0	19.867	-	0

Tablo 30. Sürtünme tanımlanan sistemde 70cm'lik plak taban kalınlığı için rezervuarın boş halinde Durum 4'te beton plağın güvenilirlik analiz sonuçları

Yükseklik (m)	Basınç Gerilmesi (kN/m ²)	β	P_f (x10 ⁻²)	Çekme Gerilmesi (kN/m ²)	β	P_f (x10 ⁻²)
0	-4846.082	-	0	630.769	2.864	0.209
10	-3462.428	-	0	-122.272	-	0
20	-1818.914	-	0	-483.630	-	0
30	-2447.884	-	0	407.658	-	0
40	-2210.249	-	0	-37.118	-	0
50	-1750.231	-	0	-177.152	-	0
60	-1755.235	-	0	156.459	-	0
70	-1503.095	-	0	-116.486	-	0
80	-1375.080	-	0	16.446	-	0
90	-1276.461	-	0	-26.727	-	0
100	-1215.618	-	0	-26.896	-	0
110	-1159.672	-	0	11.432	-	0
120	-921.517	-	0	60.888	-	0
129	-752.096	-	0	13.398	-	0
137	-1075.642	-	0	-36.436	-	0
142	-1250.051	-	0	20.657	-	0

Tablo 31. Sürtünme tanımlanan sistemde 70cm'lik plak taban kalınlığı için rezervuarın dolu halinde Durum 1'de beton plağın güvenilirlik analiz sonuçları

Yükseklik (m)	Basınç Gerilmesi (kN/m ²)	β	P_f (x10 ⁻²)	Çekme Gerilmesi (kN/m ²)	β	P_f (x10 ⁻²)
0	-7380.298	7.158	0	13719.512	-3.010	99.869
10	-4443.155	-	0	3505.112	-2.953	99.843
20	-17201.661	0.726	23.385	4710.194	-6.270	100
30	-13391.914	1.581	5.695	-977.007	-	0
40	-12624.143	1.890	2.940	1288.844	1.746	4.041
50	-12443.156	1.919	2.753	1550.479	0.150	44.026
60	-10094.337	2.705	0.341	-116.181	-	0
70	-9099.726	3.364	0.038	1333.491	1.364	8.631
80	-7469.124	3.579	0.017	56.616	-	0
90	-6043.699	4.529	0	744.073	7.120	0
100	-4761.598	-	0	163.377	-	0
110	-3380.193	-	0	344.163	-	0
120	-2270.789	-	0	169.735	-	0
129	-1540.071	-	0	94.612	-	0
137	-1182.073	-	0	-21.701	-	0
142	-672.705	-	0	52.214	-	0

Tablo 32. Sürtünme tanımlanan sistemde 70cm'lik plak taban kalınlığı için rezervuarın dolu halinde Durum 2'de beton plağın güvenilirlik analiz sonuçları

Yükseklik (m)	Basınç Gerilmesi (kN/m ²)	β	P_f (x10 ⁻²)	Çekme Gerilmesi (kN/m ²)	β	P_f (x10 ⁻²)
0	-6391.707	8.841	0	7030.317	-1.138	87.233
10	609.702	-	0	2272.520	-0.737	76.938
20	-13118.492	2.167	1.513	4078.785	-6.127	100
30	-9069.712	3.417	0.032	-965.774	-	0
40	-8844.161	3.577	0.017	1393.395	0.953	17.036
50	-9020.054	3.620	0.015	1498.061	0.445	32.800
60	-7123.560	4.399	0.001	-76.979	-	0
70	-6576.721	4.775	0	1292.192	1.643	5.023
80	-5415.594	-	0	101.375	-	0
90	-4447.980	-	0	724.266	7.269	0
100	-3611.472	-	0	179.191	-	0
110	-2672.756	-	0	345.548	-	0
120	-1945.360	-	0	160.666	-	0
129	-1460.958	-	0	89.016	-	0
137	-1191.111	-	0	-19.864	-	0
142	-718.053	-	0	46.329	-	0

Tablo 33. Sürtünme tanımlanan sistemde 70cm'lik plak taban kalınlığı için rezervuarın dolu halinde Durum 3'te beton plağın güvenilirlik analiz sonuçları

Yükseklik (m)	Basınç Gerilmesi (kN/m ²)	β	P_f (x10 ⁻²)	Çekme Gerilmesi (kN/m ²)	β	P_f (x10 ⁻²)
0	-3876.760	-	0	52101.144	-21.349	100
10	1440.087	-	0	13038.473	-7.507	100
20	-23175.000	-0.220	58.716	5222.954	-3.111	99.907
30	-17067.042	0.525	29.995	-2524.900	-	0
40	-13903.482	1.067	14.306	679.037	1.739	4.105
50	-14130.976	1.163	12.233	3129.746	-6.776	100
60	-10783.343	1.216	11.199	-1480.456	-	0
70	-7778.167	1.868	3.088	2027.334	-2.633	99.577
80	-7737.880	2.793	0.261	-206.297	-	0
90	-5277.879	7.330	0	769.154	5.746	0
100	-4452.137	-	0	192.533	-	0
110	-3148.820	-	0	263.367	-	0
120	-1883.182	-	0	302.299	-	0
129	-1401.997	-	0	68.376	-	0
137	-379.503	-	0	-14.404	-	0
142	31.251	-	0	1098.651	1.359	8.704

Tablo 34. Sürtünme tanımlanan sistemde 70cm'lik plak taban kalınlığı için rezervuarın dolu halinde Durum 4'te beton plağın güvenilirlik analiz sonuçları

Yükseklik (m)	Basınç Gerilmesi (kN/m ²)	β	P_f (x10 ⁻²)	Çekme Gerilmesi (kN/m ²)	β	P_f (x10 ⁻²)
0	-1523.609	-	0	3292.059	-3.874	99.995
10	-3774.270	-	0	927.083	1.373	8.493
20	-10380.887	2.829	0.233	1380.127	0.913	18.054
30	-6836.129	4.036	0.003	665.987	3.828	0.006
40	-8496.445	4.121	0.002	1332.822	0.717	23.672
50	-9022.842	4.483	0	839.604	3.358	0.039
60	-7842.342	4.303	0.001	1135.053	3.067	0.108
70	-6879.518	4.787	0	320.592	-	0
80	-4933.705	-	0	224.447	-	0
90	-3344.741	-	0	1085.495	2.576	0.499
100	-2782.788	-	0	-85.999	-	0
110	-2015.641	-	0	463.370	-	0
120	-1543.331	-	0	190.566	-	0
129	-1140.987	-	0	141.838	-	0
137	-450.527	-	0	-25.750	-	0
142	48.697	-	0	1088.009	1.604	5.442

Tablo 35. Sürtünme tanımlanan sistemde rezervuarın boş halinde Durum 1’de beton plağın güvenilirlik analiz sonuçları

Plak Kalınlığı (cm)	Basınç Gerilmesi (kN/m ²)	β	P_f (x10 ⁻²)	Çekme Gerilmesi (kN/m ²)	β	P_f (x10 ⁻²)
30	-5886.671	4.918	0	163.262	-	0
58.4	-3900.099	-	0	56.216	-	0
70	-3472.696	-	0	57.578	-	0
86.8	-3066.168	-	0	59.129	-	0
110	-2667.665	-	0	61.326	-	0

Tablo 36. Sürtünme tanımlanan sistemde rezervuarın boş halinde Durum 2’de beton plağın güvenilirlik analiz sonuçları

Plak Kalınlığı (cm)	Basınç Gerilmesi (kN/m ²)	β	P_f (x10 ⁻²)	Çekme Gerilmesi (kN/m ²)	β	P_f (x10 ⁻²)
30	-5590.349	-	0	159.678	-	0
58.4	-3681.605	-	0	109.65	-	0
70	-3318.827	-	0	95.456	-	0
86.8	-2939.917	-	0	77.935	-	0
110	-2553.498	-	0	56.269	-	0

Tablo 37. Sürtünme tanımlanan sistemde rezervuarın boş halinde Durum 3’te beton plağın güvenilirlik analiz sonuçları

Plak Kalınlığı (cm)	Basınç Gerilmesi (kN/m ²)	β	P_f (x10 ⁻²)	Çekme Gerilmesi (kN/m ²)	β	P_f (x10 ⁻²)
30	-6796.850	5.095	0	1757.737	-0.531	70.242
58.4	-5555.266	-	0	1225.130	1.006	15.723
70	-5175.192	-	0	877.692	1.963	2.48
86.8	-5074.320	-	0	527.346	-	0
110	-4331.543	-	0	250.830	-	0

Tablo 38. Sürtünme tanımlanan sistemde rezervuarın boş halinde Durum 4'te beton plağın güvenilirlik analiz sonuçları

Plak Kalınlığı (cm)	Basınç Gerilmesi (kN/m ²)	β	P_f (x10 ⁻²)	Çekme Gerilmesi (kN/m ²)	β	P_f (x10 ⁻²)
30	-5800.977	-	0	1748.172	-0.463	67.818
58.4	-5268.706	-	0	875.207	2.099	1.790
70	-4846.082	-	0	630.769	2.864	0.209
86.8	-4288.225	-	0	400.989	-	0
110	-3733.123	-	0	226.686	-	0

Tablo 39. Sürtünme tanımlanan sistemde rezervuarın dolu halinde Durum 1'de beton plağın güvenilirlik analiz sonuçları

Plak Kalınlığı (cm)	Basınç Gerilmesi (kN/m ²)	β	P_f (x10 ⁻²)	Çekme Gerilmesi (kN/m ²)	β	P_f (x10 ⁻²)
30	-24330.476	-0.791	78.554	8609.007	-9.004	100
58.4	-18564.521	0.250	40.126	5434.138	-6.978	100
70	-17201.661	0.726	23.385	4710.194	-6.270	100
86.8	-15010.966	1.075	14.127	3935.977	-5.918	100
110	-13288.076	2.420	0.775	3180.838	-4.879	100

Tablo 40. Sürtünme tanımlanan sistemde rezervuarın dolu halinde Durum 2'de beton plağın güvenilirlik analiz sonuçları

Plak Kalınlığı (cm)	Basınç Gerilmesi (kN/m ²)	β	P_f (x10 ⁻²)	Çekme Gerilmesi (kN/m ²)	β	P_f (x10 ⁻²)
30	-18625.313	0.254	39.986	8290.167	-8.849	100
58.4	-14284.509	1.685	4.596	4741.938	-6.655	100
70	-13118.492	2.167	1.513	4078.785	-6.127	100
86.8	-11539.543	3.065	0.109	3468.512	-5.389	100
110	-9305.763	4.652	0	2881.242	-4.447	100

Tablo 41. Sürtünme tanımlanan sistemde rezervuarın dolu halinde Durum 3'te beton plağın güvenilirlik analiz sonuçları

Plak Kalınlığı (cm)	Basınç Gerilmesi (kN/m ²)	β	P_f (x10 ⁻²)	Çekme Gerilmesi (kN/m ²)	β	P_f (x10 ⁻²)
30	-31292.251	-1.751	96.000	55190.425	-35.192	100
58.4	-28169.096	-1.403	91.971	53276.225	-34.969	100
70	-23175.000	-0.220	58.716	52101.144	-21.349	100
86.8	-19582.046	-0.033	51.300	45584.485	-8.194	100
110	-16715.870	0.800	21.200	37109.043	-6.285	100

Tablo 42. Sürtünme tanımlanan sistemde rezervuarın dolu halinde Durum 4'te beton plağın güvenilirlik analiz sonuçları

Plak Kalınlığı (cm)	Basınç Gerilmesi (kN/m ²)	β	P_f (x10 ⁻²)	Çekme Gerilmesi (kN/m ²)	β	P_f (x10 ⁻²)
30	-11634.588	2.621	0.438	3335.034	-4.083	99.998
58.4	-10380.887	2.730	0.317	3302.122	-3.955	99.996
70	-10376.536	2.829	0.233	3292.059	-3.874	99.995
86.8	-9551.000	2.946	0.161	3261.478	-3.296	99.951
110	-9506.969	3.630	0.014	3148.618	-2.108	98.248

3.2.2. Depreme Maruz Ön Yüzü Beton Kaplı Kaya Dolgu Barajların Güvenilirlik Analizi

Bu tez çalışması kapsamında, zemin tabanına indirgenmiş deprem kaydı ve rezervuar suyunun hidrodinamik basınç etkisi dikkate alınarak ÖYBKKD barajın güvenilirlik analizleri gerçekleştirilmiştir. Deprem etkisi altında beton plağın güvenilirliğinin belirlenmesinde Geliştirilmiş Rackwitz-Fiessler Yöntemi Yanıt Yüzeyi Yöntemi ile birlikte kullanılmıştır.

3.2.2.1. Birleşik Modellenmiş Sistemlerin Deprem Yüğü Altında Güvenilirlik Analizi

Depreme etkisi altında birleşik modellenmiş sistemlerde farklı beton plak taban kalınlıkları için oluşturulan modellerde, beton plaktaki en kritik asal gerilme bileşenleri için güvenilirlik analizleri gerçekleştirilmiştir. Beton plakta elde edilen kritik asal çekme ve basınç gerilmeleri için güvenilirlik indeksi-göçme olasılığı değerleri rezervuarın boş hali için Tablo 43-45'te, dolu hali için Tablo 46-48'de verilmiştir.

Deprem yüküne maruz birleşik modellenmiş ÖYBKKD barajın sonlu eleman analizlerine göre elde edilen asal gerilme bileşenlerinin beton plak kalınlığı arttıkça azaldığı, Durum 2 ve 3 için elde edilmişti. Bu değerlerin en kritikleri için göçme olasılıkları incelendiğinde, beton plak kalınlığının artışı ile rezervuarın her iki durumunda da asal basınç gerilmeleri için elde edilen güvenilirlik indekslerinde artış oluşmuştur. Ancak, asal çekme gerilmelerinde böyle bir değişim açık bir şekilde elde edilememiş olsa da göçme olasılıklarının 1 veya 1'e çok yakın elde edilmiştir. Kritik değerlerin oluştuğu noktaların güvenilirlikleri değerlendirildiğinde, bu noktaların göçeceği belirlenmiştir. Rezervuarın dolu halinde artan kritik asal basınç gerilmeleri ile birlikte ilgili noktanın güvenilirlik indeksinin biraz daha azaldığı görülmüştür. Çekme gerilmeleri için böyle bir ayırım yapılamamıştır. Ancak, göçme olasılıkları dikkate alındığında Durum 2 ve 3 için dolu halde de güvenilirlik analizi yapılan düğüm noktalarının göçme olasılıklarının 1 veya 1'e çok yakın elde edildiği ve bunun sonucunda da bu noktaların göçeceği söylenebilir.

Rezervuarın hem boş hem de dolu hali için Durum 4'te asal basınç ve çekme gerilmelerinin Durum 2 ve 3'e göre azaldığı sonlu eleman analizlerinde görülmüştü. Asal çekme gerilmeleri diğer iki duruma göre oldukça küçülse de yüzey plağında kullanılan betonun dayanımından büyük elde edilmiştir. Durum 4'te en kritik asal çekme gerilmeleri için gerçekleştirilen güvenilirlik analizlerine göre ilgili noktalarının göçme olasılıkları diğer durumlardaki gibi 1'dir ve asal çekme gerilmesi kriter alındığında bu noktaların göçtüğü söylenebilir. Deprem analizlerine göre Durum 4'te rezervuarın boş ve dolu hali için elde edilen en kritik asal basınç gerilmeleri betonun basınç dayanımından küçük elde edilmiştir. Bu modellerde ortalama 19MPa gibi bir basınç gerilmesi elde edilmiştir. Bu değer beton dayanımıyla kıyaslandığında basınç kırılması bakımından güvenli olarak kabul edilebilir. Ancak, farklı plak taban kalınlıkları için gerçekleştirilen güvenilirlik analizlerine göre rezervuarın boş ve dolu halleri için ilgili noktalarda 0.35-0.45 arasında göçme

olasılığı değerleri elde edilmiştir. Bu da bu sistemlerde dikkate alınan kritik noktaların asal basınç gerilmeleri için de göçme olasılığının oldukça yüksek olduğunu göstermiştir.

Birleşik modellenmiş sistemlerde en kritik asal çekme ve basınç gerilmeleri için gerçekleştirilen güvenilirlik analizleri, ilgili noktalarda göçme riskinin son derece yüksek olduğunu göstermiştir. Öyle ki, beton plak basınç dayanımından daha küçük kritik değerler elde edilen Durum 4’te bile oldukça yüksek göçme olasılığı elde edilmiştir.

Tablo 43. Birleşik modellenmiş sistemlerde deprem etkisi altında rezervuarın boş halinde Durum 2’de beton plağın güvenilirlik analiz sonuçları

Plak Kalınlığı (cm)	Basınç Gerilmesi (kN/m ²)	β	P_f (x10 ⁻²)	Çekme Gerilmesi (kN/m ²)	β	P_f (x10 ⁻²)
30	-55810.524	-4.940	100	32343.707	-9.417	100
58.4	-48243.175	-4.493	99.999	28035.751	-9.482	100
70	-45673.269	-4.307	99.999	26621.312	-9.533	100
86.8	-42637.274	-4.082	99.998	24780.120	-9.508	100
110	-39022.687	-3.731	99.991	22541.915	-9.378	100

Tablo 44. Birleşik modellenmiş sistemlerde deprem etkisi altında rezervuarın boş halinde Durum 3’te beton plağın güvenilirlik analiz sonuçları

Plak Kalınlığı (cm)	Basınç Gerilmesi (kN/m ²)	β	P_f (x10 ⁻²)	Çekme Gerilmesi (kN/m ²)	β	P_f (x10 ⁻²)
30	-69352.338	-5.317	100	36375.126	-5.142	100
58.4	-55793.363	-4.970	100	29971.235	-6.508	100
70	-51809.529	-4.745	99.999	27958.504	-6.512	100
86.8	-47023.739	-4.426	99.999	25470.252	-7.273	100
110	-41966.400	-4.121	99.998	22593.414	-7.421	100

Tablo 45. Birleşik modellenmiş sistemlerde deprem etkisi altında rezervuarın boş halinde Durum 4’te beton plağın güvenilirlik analiz sonuçları

Plak Kalınlığı (cm)	Basınç Gerilmesi (kN/m ²)	β	P_f (x10 ⁻²)	Çekme Gerilmesi (kN/m ²)	β	P_f (x10 ⁻²)
30	-19193.786	0.185	42.675	3989.331	-8.306	100
58.4	-19092.250	0.301	38.163	3809.791	-5.226	100
70	-19023.490	0.362	35.887	3892.817	-9.056	100
86.8	-18966.316	0.371	35.525	3791.312	-7.975	100
110	-18890.643	0.389	34.879	3778.138	-5.105	100

Tablo 46. Birleşik modellenmiş sistemlerde deprem etkisi altında rezervuarın dolu halinde Durum 2’de beton plağın güvenilirlik analiz sonuçları

Plak Kalınlığı (cm)	Basınç Gerilmesi (kN/m ²)	β	P_f (x10 ⁻²)	Çekme Gerilmesi (kN/m ²)	β	P_f (x10 ⁻²)
30	-58472.905	-5.178	100	35498.588	-9.424	100
58.4	-50572.532	-4.742	99.999	29368.117	-9.767	100
70	-47967.281	-4.599	99.999	27913.114	-9.793	100
86.8	-44782.892	-4.356	99.999	26062.678	-9.814	100
110	-40983.712	-4.015	99.999	23776.068	-9.763	100

Tablo 47. Birleşik modellenmiş sistemlerde deprem etkisi altında rezervuarın dolu halinde Durum 3’te beton plağın güvenilirlik analiz sonuçları

Plak Kalınlığı (cm)	Basınç Gerilmesi (kN/m ²)	β	P_f (x10 ⁻²)	Çekme Gerilmesi (kN/m ²)	β	P_f (x10 ⁻²)
30	-73541.726	-5.526	100	38894.503	-4.127	100
58.4	-59225.308	-5.175	100	32392.521	-6.012	100
70	-54983.482	-5.004	100	30245.565	-5.929	100
86.8	-49879.255	-4.693	99.999	27579.922	-5.818	100
110	-44421.983	-4.406	99.999	24490.108	-6.219	100

Tablo 48. Birleşik modellenmiş sistemlerde deprem etkisi altında rezervuarın dolu halinde Durum 4'te beton plağın güvenilirlik analiz sonuçları

Plak Kalınlığı (cm)	Basınç Gerilmesi (kN/m ²)	β	P_f (x10 ⁻²)	Çekme Gerilmesi (kN/m ²)	β	P_f (x10 ⁻²)
30	-19167.659	0.149	44.059	4003.448	-7.079	100
58.4	-19118.267	0.216	41.459	3970.710	-6.909	100
70	-19070.056	0.298	38.281	3943.602	-9.131	100
86.8	-19032.326	0.316	37.602	3848.349	-7.067	100
110	-18991.266	0.354	36.183	3775.716	-5.117	100

3.2.2.2. Sürtünme Tanımlanan Sistemlerin Deprem Yüğü Altında Güvenilirlik Analizi

Birleşim bölgelerinde sürtünme tanımlanmasıyla beton plakta oluşan asal çekme ve basınç gerilmeleri birleşik modellenmiş sistemlere göre daha küçük elde edilmiştir. Ancak, gerek statik yüklere maruz sistemlerde gerekse depreme maruz birleşik modellenmiş baraj sistemlerinden elde edilen sonuçlar göz önüne alındığında, betonun çekme ve basınç dayanımından küçük değerler elde edilmesi ilgili noktanın güvenli olacağını göstermemiştir. Birleşim bölgelerindeki sürtünmenin dahil edildiği sonlu eleman modelleri ile gerçekleştirilen güvenilirlik analiz sonuçları rezervuarın boş hali için Tablo 49-51'de, dolu hali için Tablo 52-54'te verilmiştir.

Rezervuarın boş olması halinde basınç gerilmeleri bakımından sadece 30cm'lik plak için göçme riski oldukça yüksek çıkmıştır. Sürtünme dikkate alınan modellerde plak kalınlığının artmasıyla göçme riski düşerken Durum 3'te göçme riski diğerlerine göre biraz daha yüksek olmuştur. Asal çekme gerilmeleri bakımından en güvenilir sonuçlar durum 2'de elde edilmiştir. Durum 3'te tüm plak kalınlıkları için beton çekme dayanımı kriter alındığında, ilgili noktaların çok yüksek olasılıkla göçtüğü söylenebilir. Durum 4'te ise yalnızca 110cm'lik plak kalınlığı için göçme olasılığının düşük olduğu görülmüştür. Rezervuarın boş olması halinde kritik gerilmelerin oluştuğu noktalarda, özellikle 30cm'lik plak kalınlığı için hem çekme hem de basınç gerilmeleri bakımından göçme olasılığı diğer plak kalınlıklarıyla kıyaslandığında daha yüksek elde edilmiştir.

Rezervuarın dolu olması halinde kritik asal gerilme bileşenlerindeki artışla birlikte göçme olasılıklarının da arttığı görülmüştür. Bu durumda da, Durum 3'te asal basınç ve çekme gerilmeleri kriter alındığında göçme olasılığının diğer durumlara göre daha yüksek

olduğu görülmüştür. Sadece plak taban kalınlığının 86.8cm ve 110cm'lik büyük değerlerinde basınç gerilmeleri bakımından göçme olasılığı düşük elde edilmiştir. Rezervuarın dolu olması halinde sadece 110cm'lik plak taban kalınlığı için Durum 3'te her iki gerilme bileşeni için düşük göçme olasılığından söz edilebilir. 30cm'lik plak kalınlığı için ise en yüksek göçme riski ortaya çıkmıştır.

Sürtünme tanımlanan sistemlerde asal çekme ve basınç gerilmeleri için gerçekleştirilen güvenilirlik analizlerine göre bu sistemler birleşik modellenmiş sistemlere göre daha güvenilir sistemler olarak belirlenmiştir. Ayrıca bu sistemlerde, plak kalınlığının artışı ile göçme olasılığı da azalmıştır.

Tablo 49. Sürtünme tanımlanan sistemlerde deprem etkisi altında rezervuarın boş halinde Durum 2'de beton plağın güvenilirlik analiz sonuçları

Plak Kalınlığı (cm)	Basınç Gerilmesi (kN/m ²)	β	P_f (x10 ⁻²)	Çekme Gerilmesi (kN/m ²)	β	P_f (x10 ⁻²)
30	-13590.909	1.634	5.119	1333.587	0.363	35.848
58.4	-9076.743	3.267	0.054	1251.889	0.525	29.965
70	-8590.938	3.939	0.004	1027.806	0.835	20.190
86.8	-7205.965	4.605	0	1023.456	1.299	9.683
110	-5890.667	5.272	0	994.757	1.472	7.046

Tablo 50. Sürtünme tanımlanan sistemlerde deprem etkisi altında rezervuarın boş halinde Durum 3'te beton plağın güvenilirlik analiz sonuçları

Plak Kalınlığı (cm)	Basınç Gerilmesi (kN/m ²)	β	P_f (x10 ⁻²)	Çekme Gerilmesi (kN/m ²)	β	P_f (x10 ⁻²)
30	-15527.223	1.178	11.947	3237.131	-3.775	99.992
58.4	-10723.605	2.316	1.028	3021.812	-3.699	99.989
70	-10598.332	2.383	0.858	2571.743	-2.982	99.857
86.8	-9219.083	3.082	0.103	2262.226	-2.480	99.343
110	-7580.105	3.550	0.019	1610.782	-0.041	51.645

Tablo 51. Sürtünme tanımlanan sistemlerde deprem etkisi altında rezervuarın boş halinde Durum 4'te beton plağın güvenilirlik analiz sonuçları

Plak Kalınlığı (cm)	Basınç Gerilmesi (kN/m ²)	β	P_f (x10 ⁻²)	Çekme Gerilmesi (kN/m ²)	β	P_f (x10 ⁻²)
30	-15137.059	1.306	9.573	2590.461	-2.306	100
58.4	-9670.432	6.347	0	2576.832	-1.789	96.318
70	-8791.919	5.928	0	2401.998	-1.455	89.343
86.8	-7444.922	5.722	0	2027.840	-0.898	81.152
110	-6232.471	5.317	0	1259.189	1.808	3.531

Tablo 52. Sürtünme tanımlanan sistemlerde deprem etkisi altında rezervuarın dolu halinde Durum 2'de beton plağın güvenilirlik analiz sonuçları

Plak Kalınlığı (cm)	Basınç Gerilmesi (kN/m ²)	β	P_f (x10 ⁻²)	Çekme Gerilmesi (kN/m ²)	β	P_f (x10 ⁻²)
30	-21187.205	-0.288	61.345	2359.972	-1.806	96.456
58.4	-13306.868	1.555	5.996	1397.144	0.593	27.675
70	-11498.736	2.376	0.876	1326.503	0.653	25.698
86.8	-9649.053	3.486	0.025	1207.226	0.847	19.864
110	-8302.460	3.929	0.004	1092.471	1.456	7.274

Tablo 53. Sürtünme tanımlanan sistemlerde deprem etkisi altında rezervuarın dolu halinde Durum 3'te beton plağın güvenilirlik analiz sonuçları

Plak Kalınlığı (cm)	Basınç Gerilmesi (kN/m ²)	β	P_f (x10 ⁻²)	Çekme Gerilmesi (kN/m ²)	β	P_f (x10 ⁻²)
30	-27569.969	-2.795	99.741	8499.141	-5.361	100
58.4	-17343.702	0.613	26.983	7743.032	-3.939	99.996
70	-15330.047	2.177	1.473	5400.409	-2.851	99.782
86.8	-12974.411	2.807	0.250	4549.166	-1.398	91.892
110	-11880.795	3.179	0.074	3431.448	-1.199	88.475

Tablo 54. Sürtünme tanımlanan sistemlerde deprem etkisi altında rezervuarın dolu halinde Durum 4'te beton plağın güvenilirlik analiz sonuçları

Plak Kalınlığı (cm)	Basınç Gerilmesi (kN/m ²)	β	P_f (x10 ⁻²)	Çekme Gerilmesi (kN/m ²)	β	P_f (x10 ⁻²)
30	-17846.667	0.890	18.687	3616.889	-3.950	100
58.4	-14386.609	2.162	1.532	3258.956	-3.346	99.959
70	-13142.615	2.534	0.564	3074.845	-1.514	93.494
86.8	-12905.533	2.775	0.276	2071.477	-1.042	85.132
110	-12059.508	3.435	0.030	1172.681	2.118	1.708

4. SONUÇLAR VE ÖNERİLER

Bu tez çalışmasında, ÖYBKGD barajların baraj-temel-rezervuar etkileşimi dikkate alınarak statik ve deprem yükleri altındaki güvenilirlik analizlerinin gerçekleştirilmesi amaçlanmıştır. Çalışma kapsamında deprem etkisi altında ÖYBKGD barajın davranışı ayrıntılı olarak incelenmiştir. Sayısal örneklerde Torul Barajının en büyük kesiti dikkate alınmıştır. Sonlu eleman çözümlerinde rezervuar suyunun baraj üzerindeki etkisini belirlemek amacıyla Lagrange yaklaşımına dayalı sıvı sonlu elemanlar kullanılmıştır. Sonlu eleman modellerinde çeşitli birleşim bölgeleri birleşik ve sürtünme dikkate alınarak oluşturulmuştur. Sürtünmeyi tanımlamak için temas yüzeyleri arasında Coulomb sürtünme yasasını dikkate alan bir boyutlu yüzey-yüzey temas elemanlar kullanılmıştır. Deprem etkisi için gerçekleştirilen analizlerde, sonlu eleman modelinin sınırlarında viskoz sönümleyiciler kullanılarak temel ve rezervuar suyunun sonsuz uzunluğu dikkate alınmıştır.

Sayısal çözümlerde dört farklı durum dikkate alınmıştır. Birinci durumda tüm sistem geometri ve malzeme bakımından lineer kabul edilmiştir. İkinci durumda tüm sistemin malzeme bakımından lineer, geometri bakımından ise lineer olmadığı kabul edilmiştir. Üçüncü durumda, ikinci duruma ilave olarak kaya dolgu ve temelin malzeme bakımından lineer olmadığı kabul edilmiştir. Dördüncü durumda ise üçüncü duruma ilave olarak beton plak ve topuk plağının malzeme bakımından lineer olmayan davranışa sahip olduğu kabul edilmiştir. Betonun malzeme bakımından lineer olmayan davranışı Drucker-Prager malzeme modeli ile kaya dolgu ve kaya zeminin lineer olmayan davranışı ise çok yönlü kinematik pekleşme modeli ile elde edilmiştir.

Ön yüzü beton kaplı kaya dolgu barajın güvenilirlik analizlerinde güvenilirlik analiz yöntemi-Sonlu Elemanlar Yöntemi birlikte kullanılmıştır. Statik yükler altındaki güvenilirlik analizlerinde Geliştirilmiş Rackwitz-Fiessler Yöntemi, Direkt Birleştirme Yöntemi ve Yanıt Yüzeyi Yöntemi ile, deprem etkisi altında gerçekleştirilen çözümlerde ise Geliştirilmiş Rackwitz-Fiessler Yöntemi Yanıt Yüzeyi Yöntemi ile kullanılmıştır. Kapalı limit durum fonksiyonları kullanılarak gerçekleştirilen çözümlerde FERUM güvenilirlik analiz programı, ANSYS sonlu elemanlar programı ile birleştirilmiştir.

Birleşim yüzeyleri birleşik ve sürtünmeli olarak modellenen ön yüzü beton kaplı kaya dolgu barajlarda çeşitli plak taban kalınlıkları dikkate alınarak gerçekleştirilen sonlu eleman ve güvenilirlik analizlerinden elde edilen sonuçlar aşağıda verilmiştir:

1. Deprem etkisi altında birleşik modellenmiş sistemlerde beton plak kalınlığı arttıkça menba ve mansap yönündeki yatay yerdeğiştirmeler azalmıştır. En büyük yatay yerdeğiştirmeler 30cm'lik plak kalınlığı için menba yönünde beton plak ve kaya dolgunun malzeme bakımından lineer olmayan davranış gösterdiği durumda elde edilmiştir. Hidrodinamik basınç etkisi ile yatay yerdeğiştirmeler, menba ve mansap yönlerinde artış göstermiştir.
2. Deprem etkisi altında sürtünme tanımlanan sistemlerde kaya dolgunun lineer olmayan davranışının dikkate alınmasıyla yatay yerdeğiştirmelerde artış görülmüş, beton plağın lineer olmayan davranışının dikkate alınmasıyla en kritik yatay yerdeğiştirmeler elde edilmiştir. Beton plak kalınlığı azaldıkça yatay yerdeğiştirmelerde artış elde edilmiştir.
3. Sürtünmeli ve birleşik modellenmiş sistemler kıyaslandığında depreme maruz sürtünme tanımlanan sistemlerde beton plak yüksekliği boyunca daha büyük yatay yerdeğiştirmeler elde edilmiştir.
4. Deprem etkisi altında birleşik modellenmiş sistemlerde en kritik asal gerilmeler, beton plağın lineer, kaya dolgunun lineer olmayan davranışı için elde edilmiştir. Beton plağın lineer olması halinde hidrodinamik basınç etkisi ile asal gerilme bileşenlerinde artış görülmüştür. Beton plak kalınlığı arttıkça asal gerilme bileşenleri azalmıştır. Ancak beton plağın malzeme bakımından lineer olmayan davranışı için gerilme değerleri birbirine yakın elde edilmiştir.
5. Deprem etkisi altında sürtünme tanımlanan sistemlerde de beton plağın lineer, kaya dolgunun lineer olmayan davranışı için en kritik asal gerilmeler elde edilmiştir. Beton plağın lineer olmayan davranışı için gerilmelerde azalmalar elde edilmiştir. Beton plak kalınlığının artışı ile asal gerilmelerde azalmalar olmuştur. Hidrodinamik basınç etkisi ile asal gerilmeler artmıştır.
6. Sürtünmeli ve birleşik modellenmiş sistemler kıyaslandığında depreme maruz sürtünme tanımlanan sistemlerde beton plak yüksekliği boyunca daha küçük asal gerilmeler elde edilmiştir.
7. Statik yükler altında birleşik modellenmiş sistemlerde malzeme bakımından lineer geometri bakımından lineer olmayan analizlerde, geometri bakımından lineer analizlere göre asal basınç gerilmeleri için daha küçük göçme olasılıkları elde edilmiştir. En

- büyük göçme olasılıkları kaya dolgunun lineer olmayan, beton plağın lineer davranışı için elde edilmiştir. Beton plağın lineer olmayan davranışının dikkate alınmasıyla en küçük göçme olasılığı değerleri elde edilmiştir. Rezervuarın boş halinde çekme gerilmeleri bakımından göçme riski oluşmamıştır. Rezervuarın dolu halinde asal basınç gerilmeleri bakımından göçme olasılıkları artış göstermiştir. Bununla birlikte beton plakta belirli bölgelerde çekme gerilmeleri bakımından riskli bölgeler olduğu belirlenmiştir. Beton plak kalınlığındaki artışla birlikte göçme olasılıkları da azalmıştır.
8. Statik yükler altında sürtünme tanımlanan sistemlerde rezervuarın boş halinde malzeme bakımından lineer analizlerde asal basınç ve çekme gerilmeleri bakımından göçme riski oluşmamıştır. Sadece beton plağın lineer, kaya dolgunun lineer olmayan davranışı için beton plak-topuk plağı birleşim bölgesine yakın noktalarda çekme gerilmeleri bakımından göçme riski olan bölgeler belirlenmiştir. Rezervuarın dolu halinde boş hale göre göçme olasılığı olan noktaların sayısı ve büyüklüğü artmıştır. Statik yükler altında sürtünme tanımlanan sistemlerde beton elemanların göçme olasılığını kaya dolgunun lineer olmayan davranışı, plak kalınlığının azalması ve rezervuar suyunun etkisi artırmıştır.
 9. Sürtünmeli ve birleşik modellenmiş sistemler kıyaslandığında statik yükler altında birleşik modellenmiş sistemlerin göçme olasılığının daha yüksek olduğu belirlenmiştir.
 10. Deprem etkisi altında birleşik modellenmiş sistemlerde beton plağın lineer olması halinde en kritik asal gerilme bileşenleri için çok yüksek göçme olasılıkları elde edilmiştir. Plak kalınlığındaki azalma ve hidrodinamik basınç etkisi ile asal gerilmeler artsa da göçme olasılıkları 1 civarında elde edilmiştir. Beton plağın lineer olmayan davranışı için çekme gerilmeleri küçülmüş olmasına rağmen göçme olasılığı 1 olarak elde edilirken, asal basınç gerilmelerindeki azalma ile göçme olasılığı 0.35-0.45 aralığına kadar düşmüştür.
 11. Deprem etkisi altında sürtünme tanımlanan sistemlerde plak kalınlığındaki artışla birlikte kritik asal gerilme bileşenleri için göçme olasılıkları azalmıştır. Hidrodinamik basınç etkisi dikkate alındığında ise göçme olasılıklarında artış elde edilmiştir. Beton plağın lineer, kaya dolgunun lineer olmaması halinde en kritik göçme olasılığı değerleri elde edilirken, beton plağın lineer olmaması halinde bu değerlerde azalmalar elde edilmiştir.
 12. Sürtünmeli ve birleşik modellenmiş sistemler kıyaslandığında deprem yükü altında sürtünme tanımlanan sistemlerde daha küçük göçme olasılıkları elde edilmiştir.

13. Beton plak davranışını en çok kaya dolgunun davranışı etkilemiştir. Kaya dolgunun lineer olmayan davranışı ile artan deformasyonlar beton plağın daha fazla zorlanmasına dolayısıyla daha fazla gerilme almasına neden olmuştur.
14. Gerçekleştirilen güvenilirlik analizlerine göre en güvenli sistem sürtünme tanımlanan 110cm'lik plak taban kalınlığı olan model, en güvensiz sistem ise birleşik modellenmiş 30cm'lik plak kalınlığı olan model olmuştur.

Bu tez çalışmasında dikkate alınmayan ancak ileriki çalışmalara ışık tutması açısından aşağıda bazı öneriler sunulmuştur:

1. Bu çalışmaya göre, rezervuar suyu beton plağın ve barajın davranışını ihmal edilmemesi gereken düzeyde etkilemiştir. Bu nedenle gerçekleştirilecek sayısal çözümlerde hidrostatik ve hidrodinamik basınç etkileri mutlaka dikkate alınmalıdır.
2. Bu çalışmada deprem etkisi üniform yer hareketi için dikkate alınmıştır. Bundan sonraki çalışmalar üniform olmayan yer hareketi de dikkate alınarak gerçekleştirilebilir.
3. Bu çalışma, iki boyutlu baraj-temel-rezervuar etkileşim sistemleri için gerçekleştirilmiştir. Bundan sonraki çalışmalarda üç boyutlu baraj-temel-rezervuar etkileşim sistemleri dikkate alınarak vadiye dik doğrultudaki etkiler için de çözümler gerçekleştirilebilir.
4. Bu çalışmada, deprem hesaplarında barajın kendi ağırlığı ihmal edilmiştir. Bundan sonraki çalışmalarda, barajın kendi ağırlığı dikkate alındıktan sonra deprem hareketi uygulanarak çalışmalar gerçekleştirilebilir.
5. Bu çalışmada, deprem etkisi altındaki güvenilirlik analizleri kaya dolgu ve betonun sınırlı sayıdaki özellikleri değişken olarak dikkate alınarak gerçekleştirilmiştir. Bundan sonraki çalışmalarda daha fazla değişken parametre dikkate alınarak güvenilirlik analizleri gerçekleştirilebilir.
6. Güvenilirlik analizleri için yeni bir yaklaşık yöntem geliştirilerek daha az koşulda çözüm yapılabilir.
7. Bu çalışmada, güvenilirlik analizleri eleman bazında yapılmıştır, bundan sonraki çalışmalarda sistem bazında çözümler gerçekleştirilebilir.

5. KAYNAKLAR

- Akkaş, N., Akay, H.U. ve Yılmaz, Ç., 1979. Applicability of General Purpose Finite Elements Programs in Solid-Fluid Interaction Problems, Computers and Structures, 10, 5, 773-783.
- Akköse, M., 2004. Lagrange Yaklaşımı ile Kemer Baraj-Su-Zemin Sistemlerinin Malzeme Bakımından Lineer ve Lineer Olmayan Dinamik Analizi, Doktora Tezi, K.T.Ü., Fen Bilimleri Enstitüsü, Trabzon.
- Akköse, M. ve Dumanoglu, A.A., 1998. Rezervuar-Kemer Baraj-Zemin Sistemlerinin Lineer Olmayan Üç Boyutlu Dinamik Analizi, III. Ulusal Hesaplamalı Mekanik Konferansı, 16-18 Kasım, İstanbul, Bildiriler Kitabı: 57-64.
- Aksoğan, O., 1986. Nonlinear Yapı Analizi, Yapı Mekaniğinde Son gelişmeler, Ed: Ertepinar, A., Wasti, S.T., Aksoğan, O., KTÜ Basımevi, 225-233. Trabzon.
- Al-Homoud, A.S. ve Tanash, N., 2004. Modeling Uncertainty in Stability Analysis for Design of Embankment Dams on Difficult Foundations, Engineering Geology, 71, 3-4, 323-342.
- Allen, P.A. ve Wilson, C.D., 2004. Development of a Pressure-Dependent Constitutive Model with Combined Multilinear Kinematic and Isotropic Hardening, 2004 ABAQUS Users' Conference, 1-16.
- ANSYS 11.0, 2009. Swanson Analysis Systems Inc., Houston PA, USA.
- Auvinet, G. ve González, J.L., 2000. Three-Dimensional Reliability Analysis of Earth Slopes, Computers and Geotechnics, 26, 3, 247-261.
- Başağa, H.B., 2009. Yapıların Güvenilirlik Analizi İçin Bir Yaklaşım: Geliştirilmiş Yanıt Yüzeyi Yöntemi, Doktora Tezi, K.T.Ü., Fen Bilimleri Enstitüsü, Trabzon.
- Başağa, H.B. ve Bayraktar, A., Investigation of the Earthquake Effect on the Stability of Gravity Dams by Using Reliability Analysis, International Symposium on Advances in Earthquake and Structural Engineering, AESE 2007, Ekim 2007, Isparta-Antalya, Turkey, Bildiriler Kitabı, 195-205.
- Bathe, K.J., 1996. Finite Element Procedures, Prentice-Hall Inc. Englewood Cliffs, New Jersey, 1037 s.
- Bayraktar, A., 1995. Asinkronize Yer Hareketi Etkisindeki Baraj-Rezervuar-Temel Sistemlerinin Dinamik Davranışı, Doktora Tezi, K.T.Ü., Fen Bilimleri Enstitüsü, Trabzon.

- Bayraktar, A., Altunışık, A.C., Sevim, B., Kartal, M.E. ve Türker, T., 2008, Near-Fault Ground Motion Effects on the Nonlinear Response of Dam-Reservoir-Foundation Systems, Structural Engineering and Mechanics, 28, 4, 411-442.
- Bayraktar, A., Altunışık, A.C., Sevim, B., Kartal, M.E., Türker, T. ve Bilici, Y., 2009. Comparison of Near- and Far-Fault Ground Motion Effect on the Nonlinear Response of Dam-Reservoir-Foundation Systems, Nonlinear Dynamics, 58, 4, 655-673.
- Bayraktar, A., Dumanoğlu, A.A. ve Calayır, Y., 1996. Asynchronous Dynamic Analysis of Dam-Reservoir-Foundation Systems by the Lagrangian Approach, Computers and Structures, 58, 5, 925-935.
- Bayraktar, A., Hacıfendioglu, K. ve Muvafık, M., 2005a. Asynchronous Seismic Analysis of Concrete-Faced Rockfill Dams Including Dam-Reservoir Interaction, Canadian Journal of Civil Engineering, 32, 5, 940-947.
- Bayraktar, A., Hançer, E. ve Dumanoğlu, A.A., 2005b. Comparison of Stochastic and Deterministic Dynamic Responses of Gravity Dam-Reservoir Systems Using Fluid Finite Elements, Finite Elements in Analysis and Design, 41, 14, 1365-1376.
- Bayraktar, A., Hançer, E. ve Akköse, M., 2005c. Influence of Base-Rock Characteristics on the Stochastic Dynamic Response of Dam-Reservoir-Foundation Systems, Engineering Structures, 27, 10, 1498-1508.
- Bayraktar, A. ve Kartal, M.E., The Effect of Rockfill Characteristics on Earthquake Performance of Concrete Slab on CFR Dams, International Symposium on Advances in Earthquake & Structural Engineering, AESE 2007, Ekim 2007, Süleyman Demirel University, Isparta-Antalya, Turkey, Bildiriler Kitabı, 120-133.
- Bayram, Y, 2008. Değişerek Yayılan Yer Hareketi Etkisindeki Baraj-Rezervuar-Zemin Sistemlerinin Stokastik Dinamik Analizi, Doktora Tezi, K.T.Ü., Fen Bilimleri Enstitüsü, Trabzon.
- Bernstone, C., Westberg, M. ve Jeppsson, J., 2009. Structural Assessment of a Concrete Dam Based on Uplift Pressure Monitoring, Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, ASCE, 135, 1, 133-142.
- Bhattacharya, G., Jana, D., Ojha, S. ve Chakraborty, S., 2003. Direct Search for Minimum Reliability Index of Earth Slopes, Computers and Geotechnics, 30, 6, 455-462.
- Borri, A. ve Speranzini, E., 1997. Structural Reliability Analysis Using a Standard Deterministic Finite Element Code, Structural Safety, 19, 4, 361-382.
- Breitung, K.W., 1994. Asymptotic Approximations for Probability Integrals, Springer-Verlag, Berlin, 146 s.
- Bucher, C.G. ve Bourgund, U., 1990. A Fast and Efficient Response Surface Approach for Structural Reliability Problems, Structural Safety, 7, 57-66.

- Bucher, C., Hintze, D. ve Roos, D., 2000. Advanced Analysis of Structural Reliability Using Commercial FE-Codes, European Congress on Computational Methods in Applied Sciences and Engineering- ECCOMAS 2000, Barcelona.
- Bureau, G., Volpe, R. L., Roth, W. ve Udaka, T., 1985. Seismic Analysis of Concrete Face Rockfill Dams, Proc. of Symposium on Concrete Face Rockfill Dams-Design, Construction and Performance, ASCE, 479-508.
- Cai, G.Q. ve Elishakoff, I., 1994. Refined Second-Order Reliability Analysis, Structural Safety, 14, 267-276.
- Calayır, Y., 1994. Beton Ağırlık Barajların Euler ve Lagrange Yaklaşımları Kullanılarak Dinamik Analizi, Doktora Tezi, K.T.Ü., Fen Bilimleri Enstitüsü, Trabzon.
- Calayır, Y. ve Dumanoglu, A.A., 1994. Sıvı Sıkışabilirliğinin Baraj-Rezervuar Sistemlerinin Modal Davranışına Etkisi, İnşaat Mühendisliğinde Bilgisayar Kullanımı IV. Sempozyumu, İstanbul, 151-160.
- Carvajal, C., Peyras, L., Bacconnet, C. ve Bécue, J., 2009. Probability Modelling of Shear Strength Parameters of RCC Gravity Dams for Reliability Analysis of Structural Safety, European Journal of Environmental and Civil Engineering, 13, 1, 91-119.
- Chaudhuri, A. ve Chakraborty, S., 2006. Reliability of Linear Structures with Parameter Uncertainty under Non-Stationary Earthquake, Structural Safety, 28, 3, 231-246.
- Chen, W.F. ve Mizuno, E., 1990. Nonlinear Analysis in Soil Mechanics, Elsevier Science Amsterdam, Netherlands, 672 s.
- Ching, J. ve Hsu, W.C., 2008. Transforming Reliability Limit-State Constraints into Deterministic Limit-State Constraints, Structural Safety, 30, 1, 11-33.
- Chopra, A.K., 1996. Dynamics of Structures: Theory and Applications of Earthquake Engineering, 2nd Edition, Prentice Hall, 844 s.
- Christian, J.T., Charles, C.L. ve Gregory, B.B., 1994. Reliability Applied to Slope Stability Analysis, Journal of Geotechnical Engineering, 120, 12, 2180-2207.
- Chrzanowski, S. ve Massiera, M., 2006. Relation between Monitoring and Design Aspects of Large Earth Dams, 3rd IAG, 12th FIG Symposium, Baden.
- Chuhan, Z., 2007. Challenges of High Dam Construction to Computational Mechanics, Frontiers of Architecture and Civil Engineering in China, 1, 1, 12-33.
- Clough, R.W., A Structural Engineer's View of Soil-Structure-Interaction, NATO ASI on Developments in Dynamic Soil-Structure Interaction, Temmuz 1992, Antalya, Türkiye.
- Clough, R.W. ve Penzien, J., 1993. Dynamics of Structures, 2nd Edition, McGraw-Hill, Inc., Singapore, 768 s.

- Cooke, J.B. ve Sherard, J.L., 1987. Concrete-Face Rockfill Dam: II. Design, Journal of Geotechnical Engineering, ASCE, 113, 10, 1113-1132.
- De Araújo, J.M. ve Awruch, A.M., 1998. Probabilistic Finite Element Analysis of Concrete Gravity Dams, Advances in Engineering Software, 20, 2, 97-104.
- Der Kiureghian, A. ve De Stefano, M., 1991. Efficient Algorithm for Second-Order Reliability Analysis, Journal of Engineering Mechanics, ASCE, 117, 12, 2904-2923.
- Der Kiureghian, A., Keshishian, P. ve Hakobian, A., 1997. Multiple Support Response Spectrum Analysis of Bridges Including the Site-Response Effect & The MSRS Code, Report No. UCB/EERC-97/02, Earthquake Engineering Research Center, College of Engineering, University of California, Berkeley, CA.
- Der Kiureghian, A., Lin, H.Z. ve Hwang, S.J., 1987. Second-Order Reliability Approximations, Journal of Engineering Mechanics, ASCE, 113, 8, 1208-1225.
- Ditlevsen, O. ve Madsen, H.O., 2002. Structural Reliability Methods, Internet Edition 2.1, 351 s.
- Drucker. D.C. ve Prager, W., 1952. Soil Mechanics and Plastic Analysis on Limit Design. Quarterly Journal of Applied Mathematics, 10, 2, 157-165.
- DSİ, 2009. Devlet Su İşleri XXII. Bölge Müdürlüğü, Trabzon.
- Elgamal, A. ve Lai, T., 1999. Comprehensive Investigation of Nonlinear Site Response, Collaborative Research with UC San Diego, and UC Davis, Annual Project Summary to USGS, Department of Structural Engineering, University of California at San Diego.
- Esmaeili, S., 2005. Three Dimensional Dynamic Analysis of Concrete Face Rockfill Dams, Proceedings of Symposium on 20 Years for Chinese CFRD Construction, English Part, 192-201.
- Faccioli, E., 1976. A Stochastic Approach to Soil Amplification, Bulletin of the Seismological Society of America, 66, 4, 1277-1291.
- Freitas, M.S., 2005. Deformations and Cracking in Concrete Face Rockfill Dams, Proceedings of Symposium on 20 Years for Chinese CFRD Construction, English Part, 169-176.
- Gazetas, G., 1991. Seismic Response of Earth Dams: Some Recent Developments, Soil Dynamics and Earthquake Engineering, 6, 1, 1-47.
- Ghannad, Z., 2006. Dynamic Analysis of Concrete Face Rockfill Dams Using Numerical and Analytical Methods, First European Conference on Earthquake Engineering and Seismology, Geneva, Switzerland, ID 649.

- Greenwood, J.A. ve Williamson, J.B.P., 1966. The Contact of Normally-Flat Surface, *Proceedings of the Royal Society of London, A* 6, 295, 1442, 300-319.
- Greeves, E.J., 1991. The Modelling and Analysis of Linear and Nonlinear Fluid-Structure Systems with Particular Reference to Concrete Dams, Ph. D. Thesis, Department of Civil Engineering, University of Bristol, Bristol.
- Gui, S., Zhang, R., Turner, J.P. ve Xue, X., 2000. Probabilistic Slope Stability Analysis with Stochastic Soil Hydraulic Conductivity, *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, 126, 1, 1-9.
- Guo, Y., 1997. Dynamic Response of Concrete-Faced Rockfill Dams in Rectangular Canyons, MS Thesis, Rice University, Houston, Texas, USA.
- Hacıfendioğlu, K., 2004. Değişerek Yayılan Yer Hareketi Etkisindeki Toprak Dolgu Barajların Lineer Olmayan Stokastik Analizi, Doktora Tezi, K.T.Ü., Fen Bilimleri Enstitüsü, Trabzon.
- Hacıfendioğlu, K., 2009. Stochastic Response of Concrete Faced Rockfill Dams Including Partially Ice-Covered Reservoir–Foundation Interaction Under Spatially Varying Seismic Waves, *Cold Regions Science and Technology*, 58, 1-2, 57-67.
- Hacıfendioğlu, K., Bayraktar, A. ve Dumanoglu, A.A., 2004. Stochastic dynamic response of embankment dams to deconvolved ground acceleration record, *Progress in Structural Engineering, Mechanics and Computation*, Zingoni (ed.), Taylor & Francis Group, London, 747-751.
- Haeri, S.M., 2005. Effects of Dam Foundation Interaction and Spatial Variable Ground Motion on Seismic Response Concrete Faced Rockfill Dam, *Proceedings of Symposium on 20 Years for Chinese CFRD Construction*, 19-26 September, Yichang China, 202-210.
- Haeri, S.M. ve Karimi, M., 2006. Three Dimensional Response of Concrete Faced Rockfill Dams to Strong Earthquakes Considering Dam-Foundation Interaction and Spatial Variable Ground Motion, *First European Conference on Earthquake Engineering and Seismology*, Geneva, Switzerland, ID 1406.
- Hasofer, A.M. ve Lind, N.C., 1974. Exact and Invariant Second Moment Code Format, *Journal of Engineering Mechanics Division*, ASCE, 100, 111-121.
- Haukaas, T., 2001. A New Computational Framework for Nonlinear Finite Element Reliability and Sensitivity Analysis, Report No. CE299, Department of Civil and Environmental Engineering, University of California, Berkeley.
- Hindy, A. ve Novak, M., 1980. Pipeline Response to Random Ground Motion, *Journal of Engineering Mechanics Division*, 106, 2, 339-360.

- Hohenbichler, M. ve Rackwitz, R., 1988. Improvement of Second Order Reliability Estimates by Importance Sampling, Journal of Engineering Mechanics, ASCE, 114, 12, 2195-2199.
- Horyna, T., 1999. Reliability Analysis of Base Sliding of Concrete Gravity Dams Subjected to Earthquakes, PhD Thesis, The University of British Columbia, Vancouver, Canada.
- Huber, M., Pieter, A.M. ve Venneer, A., 2008. PC-River - Reliability Analysis of Embankment Stability, 6th International Probabilistic Workshop, Darmstadt, 349-361.
- Idriss, I.M. ve Sun, J.I., 1992. SHAKE91: A Computer Program for Conducting Equivalent Linear Seismic Response Analyses of Horizontally Layered Soil Deposits, Center of Geotechnical Modeling Department of Civil & Environmental Engineering, University of California Davis, California.
- Joyner, W.B. ve Chen, A.T.F., 1975. Calculation of Nonlinear Ground Response in Earthquakes, Bulletin of the Seismological Society of America, 65, 5, 1315-1336.
- Kaneko, Y. ve Kashiwayanagi, M., 2005. Influence of Construction of Concrete Face Rockfill Dam on Concrete Slabs, Proceedings of Symposium on 20 Years for Chinese CFRD Construction, English Part, 218-225.
- Karamchandani, A. ve Cornell, C.A., 1991. Adaptive Hybrid Conditional Expectation Approaches for Reliability Estimation, Structural Safety, 11, 59-74.
- Kim, Y.S. ve Kim, B.T., 2008, Prediction of Relative Crest Settlement of Concrete-Faced Rockfill Dams Analyzed Using an Artificial Neural Network Model, Computers and Geotechnics, 35, 3, 313-322.
- Kong, X. ve Liu, J., 2002. Dynamic Failure Numeric Simulations of Model Concrete-Faced Rock-fill Dam, Soil Dynamics and Earthquake Engineering, 22, 9-12, 1131-1134
- Koyluoglu, H.U. ve Nielsen, S.R.K., 1994. New Approximations for SORM Integrals, Structural Safety, 13, 235-246.
- Köseoğlu, E., 2007. Sıvı-Yapı Etkileşim Sistemlerinin Lagrange Yaklaşımıyla Stokastik Dinamik Analizi, Doktora Tezi, K.T.Ü., Fen Bilimleri Enstitüsü, Trabzon.
- Kramer, S.L., 1996. Geotechnical Earthquake Engineering. Prentice-Hall, Inc., First Edition, New Jersey, 653 s.
- Lavallee, D. ve Archuleta, R.J. 1999. Modeling of Nonlinear Strong Ground Motion During the 1994 Northridge, Earthquake at the Van Norman Dam Complex, Annual Report 1999, Institute for Crustal Studies, University of California, Santa Barbara.

- Leclerc, M., Léger, P. ve Tinawi, R. 2003. Computer Aided Stability Analysis of Gravity Dams—CADAM, Advances in Engineering Software, 34, 7, 403-420.
- Leger, P. ve Boughoufalah, M., 1989. Earthquake Input Mechanisms for Time-Domain Analysis of Dam-Foundation Systems, Engineering Structures, 11, 37-46.
- Lemaire, M. ve Mohamed A., 2000. Finite Element and Reliability: A Happy Marriage?, Keynote Lecture- 9th IFIP WG 7.5 Working Conference.
- Liang, R.Y., Nusier, O.K. ve Malkawi, A.H., 1999. A Reliability Based Approach for Evaluating the Slope Stability of Embankment Dams, Engineering Geology, 54, 3-4, 271-285.
- Lu, X. ve Tian, B., 2009. Seismic Dynamic Reliability Analysis of Gravity Dam, Computational Structural Engineering, 331-340.
- Luan, M.T, Xin, J.X ve Zhao, S.C., 2002. Reliability Analysis of Concrete-Faced Rockfill Dam's Slope Stability and Its Application, Journal of Dalian University of Technology, 42, 4, 467-471.
- Lysmer, J. ve Kuhlemeyer, R.L., 1969. Finite Dynamic Model for Infinite Media, Journal of the Engineering Mechanics Division, 95, EM4, 859-877.
- Maymon, G., 1994. Direct Computation of the Design Point of a Stochastic Structure Using a Finite Element Code, Structural Safety, 14, 3, 185-202.
- Melchers, R.E., 1999. Structural Reliability Analysis and Prediction, John Wiley&Sons, England, 437 s.
- Melchers, R.E. ve Ahammed, M., 2004. A Fast Approximate Method for Parameter Sensitivity Estimation in Monte Carlo Structural Reliability, Computers and Structures, 82, 55-61.
- Mohamed, A. ve Lemaire, M., 1998. Discussion on: Structural Reliability Analysis Using a Standard Deterministic Finite Element Code, Structural Safety, 20, 4, 391-397.
- Mrabet, Z., El oui, M.R. ve Kheder, K., Reliability Analysis of Earth Dams: Case of El Houareb Dam – Kairouan - Tunisia, 3rd International Asranet Colloquium , Temmuz 2006, Glasgow, U.K., 1-8.
- Myers, R.H., 1971. Response Surface Methodology, Allyn and Bacon, Boston.
- Newmark, N.M., 1959. A Method of Computation for Structural Dynamics, Proceedings of ASCE, Journal of Engineering Mechanics, 85, EM3, 67-94.
- Nie, J. ve Ellingwood, B.R., 2005. Finite Element-Based Structural Reliability Assessment Using Efficient Directional Simulation, Journal of Engineering Mechanics, 131, 3, 259-267.

- Nowak, A.S. ve Collins, K.R., 2000. Reliability of Structures, McGraw-Hill Higher Education, United State of America, 338 s.
- Oskouei, V. ve Dumanoğlu, A.A., 2001. Nonlinear Dynamic Response of Concrete Gravity Dams: Cavitation Effect, Soil Dynamics and Earthquake Engineering, 21, 2, 99-112.
- Özkuzukıran, R.S., 2005. Settlement Behaviour of Concrete Faced Rockfill Dams: A Case Study, MS Thesis, Middle East Technical University, Ankara, Turkey.
- Parrinello, F. ve Borino, G., 2007. Lagrangian Finite Element Modelling of Dam-Fluid Interaction: Accurate Absorbing Boundary Conditions, Computers and Structures, 85, 11-14, 932-943.
- Pendola, M., Mohamed, A., Lemaire, M. ve Hornet, P., 2000. Combination of Finite Element and Reliability Methods in Nonlinear Fracture Mechanics, Reliability Engineering and System Safety, 70, 1, 15-27.
- Przemieniecki, J.S., 1968. Theory of Matrix Structural Analysis, First Edition, McGraw-Hill, Inc., New York, 468 s.
- Qian, C., 2005. Recent Development of CFRD in China, Proceedings of Symposium on 20 years for Chinese CFRD Construction, Yichang, China, 8-15.
- Rackwitz, R. ve Fiessler, B., 1978. Structural Reliability under Combined Random Load Sequences, Computer and Structures, 9, 489-494.
- Ranganathan, R., 2000. Reliability Analysis and Design of Structures, McGraw-Hill Publishing Company, United States of America, 354 s.
- Rayleigh, J.W.S. ve Lindsay, R.B., 1945. The Theory of Sound, Dover Publications. New York, 504 s.
- Rollins, K. M., Evans, M. D., Diehl, N. B. ve Daily, W. D. III., 1998. Shear Modulus and Damping Relationships for Gravels, Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, 124, 5, 396-405.
- Schnabel, P.B., Lysmer, J. ve Seed, H.B., 1972. SHAKE: A Computer Program for Earthquake Response Analysis of Horizontally Layered Sites. Report No.eerc-72/12, Earthquake Engineering Research Centre, University of California, Berkeley.
- Schueremans, L., 2003. Structural Reliability in Design and Analysis, State of the Art Report, PAT-TAP-project "Technological Attraction Poles".
- Seed, H.B. ve Idriss, I.M., 1970. Soil Moduli and Damping Factors for Dynamic Response Analysis, Report No. EERC 70-10, Earthquake Engineering Research Center, University of California, Berkeley, California.

- Seed, H.B., Seed, R.B., Lai, S.S. ve Khamenehpour, B., 1985. Seismic Design of Concrete Face Rockfill Dams, Proc. of Symposium on Concrete Face Rockfill Dams-Design, Construction and Performance, ASCE, 459-478.
- Sherard, J.L. ve Cooke, J.B., 1987. Concrete-Face Rockfill Dam: I. Assessment, Journal of Geotechnical Engineering, ASCE, 113, 10, 1096-1112.
- Stewart, J.P., Seed, R.B. ve Fenves, G.L. 1998. Empirical Evaluation of Inertial Soil-Structure Interaction Effects, Report No. PERR-98/07, Pacific Earthquake Engineering Research Center, University of California, Berkeley, California.
- Sudret, B. ve Der Kiureghian, A., 2002. Comparison of Finite Element Reliability Methods, Probabilistic Engineering Mechanics, 17, 337-348.
- Szostak-Chrzanowski, A., Deng, N. ve Massiera, M., 2008. Monitoring and Deformation Aspects of Large Concrete Face Rockfill Dams, 13th FIG International Symposium on Deformation Measurements and Analysis, 4th IAG Symposium on Geodesy for Geotechnical and Structural Engineering, Lisbon, 1-10.
- Taylor, L.M. ve Flanagan, D.P., 1998. PRONTO 2D: A Two Dimensional Transient Solid Dynamics Program, Sandia Report, SAND86-0594, UC-32.
- Thoft-Christensen, P. ve Baker, M.J., 1982. Structural Reliability Theory and Its Applications, Springer-Verlag, Berlin, 267 s.
- Thoft-Christensen, P. ve Murotsu, Y., 1986. Application of Structural Systems Reliability Theory, Springer-Verlag, Berlin, 343 s.
- Trifunac, M.D., 1990. How to Model Amplification of Strong Earthquake Motions by Local Soil and Geologic Site Conditions, Earthquake Engineering and Structural Dynamics, 19, 833-846.
- TS 500, 2000. Betonarme Yapıların Tasarım ve Yapım Kuralları.
- Tvedt, L., 1983. Two Second-Order Approximations to the Failure Probability, Veritas Rep. RDIV/20-004083, Det Norske Veritas, Oslo.
- Tvedt, L., 1988. Second-Order Reliability by an Exact Integral, Proc., 2nd IFIP Working Conference on Reliability and Optimization on Structural Systems, New York, 377-384.
- Tvedt, L., 1990. Distribution of Quadratic Forms in the Normal Space-Application to Structural Reliability, Journal of Engineering Mechanics, ASCE, 116, 6, 1183-1197.
- Uddin, N., 1992. Seismic Analysis of Earth-Core and Concrete-Face Rockfill Dams, PhD Thesis, State University of New York, Buffalo, USA.

- Uddin, N., 1999. A Dynamic Analysis Procedure for Concrete-Faced Rockfill Dams Subjected to Strong Seismic Excitation, Computers and Structures, 72, 1-3, 409-421.
- Uddin, N. ve Gazetas, G., 1995. Dynamic Response of Concrete-Faced Rockfill Dams to Strong Seismic Excitation, Journal of Geotechnical Engineering, ASCE, 121, 2, 185-197.
- URL-1, http://www.vncold.vn/Modules/CMS/Upload/13/Science/CFRDGuideEw_21_10_08/CFRDGuide_1.pdf. 03.05.2008.
- URL-2, <http://peer.berkeley.edu/smcat/>, PEER (Pacific Earthquake Engineering Research Centre). 04.01.2010.
- URL-3, http://www.ce.berkeley.edu/FERUM/User_s_Guide/user_s_guide.html, Ferum User's Guide. 05.04.2004.
- Varadarajan, A., Sharma, K.G., Abbas, S.M. ve Dhawan, A.K., 2006. Constitutive Model for Rockfill Materials and Determination of Material Constants, International Journal of Geomechanics, ASCE, 6, 4, 226-237.
- Wang, Z.L., Makdisi, F.I. ve Egan J., 2006. Practical Applications of a Nonlinear Approach to Analysis of Earthquake-Induced Liquefaction and Deformation of Earth Structures, Soil Dynamics and Earthquake Engineering, 26, 2-4, 231-252.
- Wei, Z., Xiaolin, C., Chuangbing, Z. ve Xinghong, L., 2009. Creep Analysis of High Concrete-Faced Rockfill Dam, Communications in Numerical Methods in Engineering, 1-18.
- Westergaard, M., 1933. Water Pressures on Dams During Earthquakes, Transactions, ASCE, 98, 418-433.
- Whitman, R.V., 2000. Organizing and Evaluating Uncertainty in Geotechnical Engineering, Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, 126, 7, 583-593.
- Wieland, M. ve Brenner, R.P., 2005. Earthquake Aspects of Concrete-Face RockFill Dams, Diaphragm Walls and Grout Curtains, Proceedings of Symposium on 20 Years for Chinese CFRD Construction, English Part, 149-155.
- Wieland, M. ve Brenner, R.P., 2007. Seismic Performance of CFRDs, International Water Power & Dam Construction, Dam Safety, CFRD, 18-21.
- 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, 11. 1657-1668.
- Wriggers, P., 2006. Computational Contact Mechanics, Second Edition, Springer Verlag, Netherlands, 518 s.

- Xing, H.F., Gong, X.N., Zhou, X.G. ve Fu, H.F., 2006. Construction of Concrete-Faced Rockfill Dams with Weak Rocks, Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, ASCE, 132, 6, 778-785.
- Zempaty, Z. ve Rutenberg, A., 1998a. Sensitivity Analysis of Spatial Seismic Effects from Local Soil Amplification, 11th European Conference on Earthquake Engineering, Balkema, Rotterdam.
- Zempaty, Z. ve Rutenberg, A., 1998b. On the Sensitivity of Bridge Seismic Response with Local Soil Amplification, Earthquake Engineering and Structural Dynamics, 27, 1095-1099.
- Zhang, Y. ve Der Kiureghian A, 1997. Finite Element Reliability Methods for Inelastic Structures, Report No. UCB/SEMM-97/05, Department of Civil and Environmental Engineering, University of California, Berkeley.
- Zhang, B., Wang, J.G. ve Shi, R., 2004. Time-Dependent Deformation in High Concrete-Faced Rockfill Dam and Separation between Concrete Face Slab and Cushion Layer, Computers and Geotechnics, 31, 7, 559-573.
- Zhao, Y.G. ve Ono, T., 1999a. New Approximations for SORM: Part 1, Journal of Engineering Mechanics, ASCE, 125, 1, 79-85.
- Zhao, Y.G. ve Ono, T., 1999b. New approximations for SORM: Part 2, Journal of Engineering Mechanics, ASCE, 125, 1, 86-93.

ÖZGEÇMİŞ

Murat Emre KARTAL, 1978 yılında Trabzon'da doğdu. İlköğrenimini 24 Şubat İlkokulunda, orta öğrenimini Cumhuriyet Ortaokulunda, lise öğrenimini de Trabzon Fatih Süper Lisesinde tamamladı. 1997 yılında Karadeniz Teknik Üniversitesi İnşaat Mühendisliği Bölümünü kazandı. 2001 yılında lisans öğrenimini bu bölümde tamamladı. 2002 yılında Zonguldak Karaelmas Üniversitesi İnşaat Mühendisliği Bölümü'nde Araştırma Görevlisi kadrosuna atandı. Aynı yıl, Zonguldak Karaelmas Üniversitesi İnşaat Mühendisliği Bölümünde yüksek lisans öğrenimine başladı. Yüksek Lisans öğrenimini "Düğüm Noktalarındaki Kısmi Bağlılığın Kafes ve Prefabrik Yapı Davranışına Etkisi" konusunda hazırladığı tezle Ağustos 2004'te tamamladı. 2005 yılında Karadeniz Teknik Üniversitesi İnşaat Mühendisliği Bölümünde doktora çalışmalarına başladı. Bekar olan Murat Emre KARTAL iyi derecede İngilizce bilmektedir. Bugüne kadar birçok akademik çalışma yapan KARTAL'a ait yayın listesi aşağıda sunulmaktadır.

- Bayraktar, A., **Kartal, M.E.** ve Adanur, S., Beton Plak-Kaya Dolgu Arayüzey Birleşiminin ÖYBKGD Barajların Deprem Davranışına Etkisi, I. Ulusal Baraj Güvenliği Sempozyumu, Mayıs 2007, Ankara, Bildiriler Kitabı, 449-460.
- Bayraktar, A. ve **Kartal, M.E.**, Torul Barajının Beton Kaplamasının Deprem Performansının Baraj-Zemin-Rezervuar Etkileşiminin Dikkate Alınarak İncelenmesi, I. Ulusal Baraj Güvenliği Sempozyumu, Mayıs 2007, Ankara, Bildiriler Kitabı, 495-506.
- Başağa, H.B., Bayraktar, A., **Kartal, M.E.** ve Hacıfendioğlu, K., Deprem Etkisindeki Binaların Güvenilirlik Analizi, 6. Ulusal Deprem Mühendisliği Konferansı, Ekim 2007, Süleyman Demirel Kültür Merkezi, İTÜ, İstanbul, Cilt I, Bildiri 34, 391-398.
- Bayraktar, A., **Kartal, M.E.**, Bilici, Y., Ateş, Ş. ve Akköse, M., Rezervuar Su Yüksekliği Değişiminin Kürtün Barajının Lineer Olmayan Deprem Davranışına Etkisi, 6. Ulusal Deprem Mühendisliği Konferansı, Ekim 2007, Süleyman Demirel Kültür Merkezi, İTÜ, İstanbul, Cilt I, Bildiri 63, 723-736.
- Bayraktar, A. ve **Kartal, M.E.**, The Effect of Rockfill Characteristics on Earthquake Performance of Concrete Slab on CFR Dams, International Symposium on Advances in Earthquake & Structural Engineering, Ekim 2007, Süleyman Demirel University, Isparta-Antalya, Turkey, Bildiriler Kitabı, 120-133.
- Bayraktar, A., Türker, T., **Kartal, M.E.**, Başağa, H.B. ve Muvafık, M., Experimental Modal Analysis of Steel Frames with Semi-Rigid Connections, 8th International

Congress on Advances in Civil Engineering, September 2008, Eastern Mediterranean University, Famagusta, North Cyprus, Bildiriler Kitabı, 4, 3, 21-29.

- Bayraktar, A., Altunışık, A.C., Sevim, B., **Kartal, M.E.** ve Türker, T., 2008. Near-Fault Ground Motion Effects on the Nonlinear Response of Dam-Reservoir-Foundation Systems, Structural Engineering and Mechanics, 28, 4, 411-442.
- Bayraktar, A., Sevim, B., Altunışık, A.C., Türker, T., **Kartal, M.E.**, Akköse, M. ve Bilici, Y., 2009. Comparison of Near and Far Fault Ground Motion Effects on the Seismic Performance Evaluation of Dam-Reservoir-Foundation Systems, International Water Power&Dam Construction, Dam Engineering, 19, 3, 1-39.
- Türker, T. ve **Kartal, M.E.**, 2009. Bayraktar, A., Muvafık, M., Assessment of Semi-Rigid Connections in Steel Structures by Modal Testing, Journal of Constructional Steel Research, 65, 7, 1538-1547.
- Bayraktar, A., **Kartal, M.E.** ve Basaga, H.B., 2009. Reservoir Water Effects on Earthquake Performance Evaluation of Torul Concrete-Faced Rockfill Dam, Water Science and Engineering, 2, 1, 43-57.
- Bayraktar, A., Altunışık, A.C., Sevim, B., **Kartal, M.E.**, Türker, T. ve Bilici, Y., 2009. Comparison of Near and Far Fault Ground Motion Effects on the Nonlinear Response of Dam-Reservoir-Foundation Systems, Nonlinear Dynamics, 58, 4, 655-673.
- Çavdar, Ö., Bayraktar, A., Çavdar, A. ve **Kartal, M.E.**, 2009. Stochastic Finite Element Analysis of Structural Systems with Partially Restrained Connections subjected to Seismic Loads, Steel and Composite Structures, 9, 6, 499-518.
- Hacıfendioğlu, K., Bayraktar, A. ve **Kartal, M.E.**, Rezervuarda Oluşan Buz Örtüsünün Değişerek Yayılan Yer Hareketine Maruz Ön Yüzü Beton Kaplı Kaya Dolgu Barajların Stokastik Davranışına Etkisi, II. Ulusal Baraj Güvenliği Sempozyumu ve Sergisi, Mayıs 2009, Konferans Merkezi Salonları, Eskişehir Osmangazi Üniversitesi, Batı Meşelik, Eskişehir, Bildiriler Kitabı, 515-526.
- **Kartal, M.E.** ve Bayraktar, A., Ön Yüzü Beton Kaplı Kaya Dolgu Barajların Birleşim Bölgelerinde Tanımlanan Sürtünmenin Barajın Deprem Davranışına Etkisi, II. Ulusal Baraj Güvenliği Sempozyumu ve Sergisi, Mayıs 2009, Konferans Merkezi Salonları, Eskişehir Osmangazi Üniversitesi, Batı Meşelik, Eskişehir, Bildiriler Kitabı, 527-540.
- Hacıfendioğlu, K., Bayraktar, A. ve **Kartal, M.E.**, Deprem Dalgası Yayılma Hızının Ünlform Olmayan Yer Hareketine Maruz Toprak Dolgu Barajların Sıvılaşıma Potansiyeli Üzerindeki Etkisi, II. Ulusal Baraj Güvenliği Sempozyumu ve Sergisi, Mayıs 2009, Konferans Merkezi Salonları, Eskişehir Osmangazi Üniversitesi, Batı Meşelik, Eskişehir, Bildiriler Kitabı, 633-644.
- Bayraktar, A. ve **Kartal, M.E.**, 2010. Linear and Nonlinear Response of Concrete Slab on CFR Dam during Earthquake, Soil Dynamics and Earthquake Engineering, (baskıda).

- **Kartal, M.E.**, Bayraktar, A. ve Başağa, H.B., 2010. Seismic Failure Probability of Concrete Slab on CFR Dams with Welded and Friction Contacts by Response Surface Method, Soil Dynamics and Earthquake Engineering, (baskıda).
- **Kartal, M.E.**, Başağa, H.B., Bayraktar, A. ve Muvafık, M., 2010. Effects of Semi-Rigid Connection on Structural Responses, Electronic Journal of Structural Engineering, (baskıda).