

**KARADENİZ TEKNİK ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

İNŞAAT MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI

**ZEMİN SINIR ŞARTLARININ YAPI-ZEMİN ETKİLEŞİM SİSTEMLERİNİN
DİNAMİK DAVRANIŞINA ETKİSİ**

YÜKSEK LİSANS TEZİ

İnş. Müh. Hasan SESLİ

HAZİRAN 2013

TRABZON

KARADENİZ TEKNİK ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

İNŞAAT MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI

ZEMİN SINIR ŞARTLARININ YAPI-ZEMİN ETKİLEŞİM SİSTEMLERİNİN
DİNAMİK DAVRANIŞINA ETKİSİ

İnş. Müh. Hasan SESLİ

Karadeniz Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsünde
“İNŞAAT YÜKSEK MÜHENDİSİ”
Unvanı Verilmesi İçin Kabul Edilen Tezdir.

Tezin Enstitüye Verildiği Tarih : 14.05.2013
Tezin Savunma Tarihi : 11.06.2013

Tez Danışmanı : Doç. Dr. Mehmet AKKÖSE

Trabzon 2013

Karadeniz Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü
İnşaat Mühendisliği Ana Bilim Dalında
Hasan SESLİ tarafından hazırlanan

ZEMİN SINIR ŞARTLARININ YAPI-ZEMİN ETKİLEŞİM SİSTEMLERİNİN
DİNAMİK DAVRANIŞINA ETKİSİ

başlıklı bu çalışma, Enstitü Yönetim Kurulunun 21.05.2013 tarih ve 1506 sayılı
kararıyla oluşturulan jüri tarafından yapılan sınavda

YÜKSEK LİSANS TEZİ
olarak kabul edilmiştir.

Jüri Üyeleri

Başkan : Doç. Dr. Osman DEMİR

Üye : Doç. Dr. Mehmet AKKÖSE

Üye : Doç. Dr. Şevket ATEŞ

Prof. Dr. Sadettin KORKMAZ
Enstitü Müdürü

ÖNSÖZ

“Zemin Sınır Şartlarının Yapı-Zemin Etkileşim Sistemlerinin Dinamik Davranışına Etkisi” isimli bu çalışma: Karadeniz Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı’nda Yüksek Lisans Tezi olarak gerçekleştirilmiştir.

Bu denli önemli ve zor bir konuda çalışmamı sağlayan, hiçbir zaman aklımdan geçirmedığım ve istemedığım akademik camiaya girip ülkem adına bilimsel çalışmalar yapmama vesile olan, bu zorlu yolda yalnız bırakmayıp çalışmamın her aşamasında benimle yakından ilgilenen, çalışma boyunca araştırma zevki ve bilimsel düşünce disiplini aşılıp ufku açan, paylaşmaktan ve yol göstermekten asla kaçmayan, engin bilgi ve tecrübelerinden daima faydalandığım Yönetici Hocam Sayın Doç. Dr. Mehmet AKKÖSE’ye minnet ve şükranlarımı sunmayı her zaman için bir borç bilirim.

Yönetici Hocam’ın yurtdışında olduğu süreçte yardımlarıyla çalışmamın önünü açan, programlama altyapımı oluşturan, eğitim süresince karşılaştığım sorunları bazen bir hoca bazen bir ağabey bazen de arkadaş edasıyla çözmemi sağlayan, en ufak problemimde dahi yoğun iş yükü ve yorgunluğuna rağmen kapısını her zaman açık tutan, belki de halen araştırma görevlisi olarak devam etmemde çok büyük etkisi olan, bilgi ve tecrübesini hiçbir zaman esirgemeyip çalışmalarımı titizlikle takip eden Hocam Sayın Yrd. Doç. Dr. Hasan Basri BAŞAĞA’ya ve çalışma süresince her zaman sorgulayan, yönlendiren ve çalışmalarımda itici güç olan, bilgi ve tecrübesini hiçbir zaman esirgemeyen, hayatında karşılaştığı sorunları etrafındakilerinin de yaşamaması için gayret gösteren Hocam Sayın Yrd. Doç. Dr. Temel TÜRKER’e teşekkür ederim.

Çalışmalarım sırasında bilgi ve yardımlarını esirgemeyen Sayın Doç. Dr. Ahmet Can ALTUNIŞIK’a, Doç. Dr. Şevket ATEŞ’e, Doç. Dr. Süleyman ADANUR’a, Doç. Dr. Volkan KAHYA’ya, Yrd. Doç. Dr. Murat Emre KARTAL’a, Arş. Gör. Serhat DEMİR’e, Arş. Gör. Muhittin TURAN’a, Arş. Gör. Gökhan ADIYAMAN’a, Arş. Gör. Muhammet YURDAKUL’a, Arş. Gör. Zeliha KUYUMCU’ya, Arş. Gör. Fatih YILMAZ’a, Arş. Gör. Barbaros ATMACA’ya, Arş. Gör. Mustafa ERGÜN’e, öğrenim hayatım boyunca emeği geçen tüm hocalarıma, bana her türlü desteği veren babama, anneme, kardeşlerime ve tüm yakın dostlarıma müteşekkir olduğumu belirtmek isterim.

Hasan SESLİ

Trabzon 2013

TEZ BEYANNAMESİ

Yüksek Lisans Tezi olarak sunduğum “Zemin Sınır Şartlarının Yapı-Zemin Etkileşim Sistemlerinin Dinamik Davranışına Etkisi” başlıklı bu çalışmayı baştan sona kadar danışmanım Doç. Dr. Mehmet AKKÖSE'nin sorumluluğunda tamamladığımı, verileri kendim topladığımı, analizleri yaptığımı, başka kaynaklardan aldığım bilgileri metinde ve kaynakçada eksiksiz olarak gösterdiğimi, çalışma sürecinde bilimsel araştırma ve etik kurallara uygun olarak davrandığımı ve aksinin ortaya çıkması durumunda her türlü yasal sonucu kabul ettiğimi beyan ederim. 14/05/2013

Hasan SESLİ

İÇİNDEKİLER

	<u>Sayfa No</u>
ÖNSÖZ.....	III
TEZ BEYANNAMESİ.....	IV
İÇİNDEKİLER.....	V
ÖZET	VIII
SUMMARY	IX
ŞEKİLLER DİZİNİ	X
TABLolar DİZİNİ.....	XVII
SEMBOLLER DİZİNİ	XVIII
1. GENEL BİLGİLER.....	1
1.1. Giriş	1
1.2. Konu ile İlgili Daha Önce Yapılmış Çalışmalar.....	2
1.3. Tezin Kapsamı	12
1.4. Deprem Nedir?	13
1.4.1. Cisim Dalgaları.....	14
1.4.1.1. P Dalgaları	15
1.4.1.2. S Dalgaları	15
1.4.2. Yüzey Dalgaları.....	16
1.4.2.1. Love Dalgaları	17
1.4.2.2. Rayleigh Dalgaları.....	18
1.5. Yapı-Zemin Etkileşim Problemlerinin Dinamik Analizinde Matematik Model Seçimi.....	18
1.5.1. Ayrık Model	19
1.5.2. Yay ve Sönümleyicilerle Tanımlanan Zemin Modeli	20
1.5.3. Sonlu Eleman Modeli	22
1.6. Çeşitli Sınır Şartları ve Dalga Yansıma Şekilleri	24
1.7. Viskoz Sınırlar	27
1.7.1. Viskoz Sınırlı Yapı-Zemin Sisteminin Hareket Denklemi.....	30
1.7.1.1. Rayleigh Sönümü	31
1.7.1.2. Newmark Metodu	32

1.8.	Geçirgen Sınırlar.....	36
1.8.1.	Tabaka Rijitlik Matrisinin Oluşturulması.....	36
1.8.2.	Tabakalı Bölgenin Toplam Rijitlik Matrisi	41
1.8.3.	Hareket Denklemi.....	43
1.8.4.	Tabakalı Bölgenin Dinamik Rijitlik Matrisi.....	48
1.8.5.	Geçirgen Sınırların Yapı-Zemin Etkileşimi Sonlu Eleman Modeline Uygulanışı	52
1.8.5.1.	Eleman Boyutu	52
1.8.5.2.	Eleman Rijitlik Matrislerinin Oluşturulması	53
1.8.5.3.	Eleman Kütle Matrisinin Oluşturulması.....	54
1.8.5.4.	Sönüm Matrisinin Oluşturulması.....	55
1.8.5.5.	Geçirgen Sınırlı Yapı-Zemin Sistemlerinin Hareket Denklemi	57
1.8.5.6.	Serbest Zemin Hareketi	62
2.	YAPILAN ÇALIŞMALAR.....	64
2.1.	Giriş	64
2.2.	Sarıyar Beton Ağırlık Barajı.....	64
2.2.1.	Baraj-Rezervuar Etkileşimi	66
2.2.2.	Baraj-Zemin Etkileşimi	67
2.2.3.	Analitik Modeller	68
2.2.4.	Serbest Zemin Hareketi	80
2.3.	Sarıyar Barajının Dinamik Analizi.....	81
3.	BULGULAR VE İRDELEMELER	84
3.1.	Giriş	84
3.2.	ANSYS Programı ile Yapılan Analiz Sonuçlarının Değerlendirilmesi.....	84
3.2.1.	Zemin Sınırlarında Geleneksel Sınırların Kullanılması	84
3.2.1.1.	Yer Değiştirmeler	85
3.2.1.2.	İvmeler.....	85
3.2.1.3.	Gerilmeler.....	92
3.2.2.	Zemin Sınırlarında Viskoz Sönümleyicilerin Kullanılması	100
3.2.2.1.	Yer Değiştirmeler	100
3.2.2.2.	İvmeler.....	101
3.2.2.3.	Gerilmeler.....	105
3.3.	FLUSH Programı ile Elde Edilen Analiz Sonuçlarının Değerlendirilmesi....	113

3.3.1.	Yer Değiştirmeler	113
3.3.2.	Hızlar	114
3.3.3.	İvmeler.....	114
4.	SONUÇLAR VE ÖNERİLER.....	140
5.	KAYNAKLAR.....	143
ÖZGEÇMİŞ		

Yüksek Lisans Tezi

ÖZET

ZEMİN SINIR ŞARTLARININ YAPI-ZEMİN ETKİLEŞİM SİSTEMLERİNİN
DİNAMİK DAVRANIŞINA ETKİSİ

Hasan SESLİ

Karadeniz Teknik Üniversitesi
Fen Bilimleri Enstitüsü
İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı
Danışman: Doç. Dr. Mehmet AKKÖSE
2013, 147 Sayfa

Bu tez çalışmasında, dinamik etkiye maruz yapı-zemin etkileşim sistemi için yarı-sonsuz zemin ortamında kullanılan sınır şartlarının etkili olduğu zemin sınırları belirlenmeye çalışılmıştır. Bu amaçla, uygulama olarak yapı-zemin etkileşimine maruz zemine gömülü ağır yapı olan Sarıyar beton ağırlık barajı seçilmiştir. Sarıyar barajına ait yapı-zemin etkileşimi analitik modellerinin dinamik analizleri, zemin sınırlarında rijit sınırlar, dinamik etki sonucu zemin içerisinde meydana gelen P ve S dalgalarının sınırlardaki etkisini ortadan kaldıracak viskoz sınırlar ve Rayleigh dalgalarını sönmüleyen ve yarı-sonsuz zemin ortamının dinamik rijitlik matrisini içeren geçirgen sınırlar kullanılarak gerçekleştirilmiştir.

Bu tez beş bölümden oluşmaktadır. Birinci bölüm, yapı-zemin etkileşimi ve zemin sınır şartları ile ilgili literatür araştırmasından ibarettir. Tezde dikkate alınan sınır şartlarının kullanıldığı yapı-zemin etkileşimi sistemlerinin çözüm yöntemleri ile ilgili formülasyonlar da bu bölümde verilmektedir. İkinci bölümde, örnek baraja ait baraj-rezervuar etkileşimi, yapı-zemin etkileşimi ve dikkate alınan parametreler açıklanmakta ve yapı-zemin etkileşimi analitik modelleri ayrıntılı olarak verilmektedir. Üçüncü bölüm, gerçekleştirilen analizlerden elde edilen bulgular ve bunların irdelenmesinden oluşmaktadır. Dördüncü bölümde ise, bu tez çalışmasından çıkarılan sonuçlar ve öneriler verilmektedir. Beşinci bölüm, tezde yararlanılan kaynaklara ayrılmıştır.

Anahtar Kelimeler: Yapı-Zemin Etkileşimi, Dinamik Analiz, Dalga Yayılımı, Sınır Şartı, Rijit Sınır, Viskoz Sınır, Geçirgen Sınır.

Master Thesis

SUMMARY

INFLUENCE OF SOIL BOUNDARY CONDITIONS ON DYNAMIC BEHAVIOUR OF
SOIL-STRUCTURE INTERACTION SYSTEMS

Hasan SESLİ

Karadeniz Technical University
The Graduate School of Natural and Applied Sciences
Civil Engineering Graduate Program
Supervisor: Assoc. Prof. Mehmet AKKÖSE
2013, 147 Pages

In this thesis, for soil-structure interaction systems subject to dynamic effects, soil boundaries on which the boundary conditions applied on semi-infinite soil medium are effective are determined. For this purpose as a numerical application, Sarıyar concrete gravity dam which is a deeply embedded massive structure subjected to soil-structure interaction was chosen. Dynamic analysis of soil-structure interaction analytical models of Sarıyar dam was performed by using traditional boundaries, viscous boundaries which absorb P and S waves occurred in soil with dynamic effects and transmitting boundaries which absorb Rayleigh waves and include dynamic rigidity matrices of semi-infinite soil medium on the soil boundaries.

This thesis consist of five chapters. The first chapter includes a literature survey associated with soil-structure interaction ve soil boundary conditions. The formulations related solution methods of the soil-structure interaction systems including boundary conditions used in this thesis are given. In the second chapter, for Sarıyar dam, dam-reservoir interaction, soil-structure interaction and considered parameters are explained and soil-structure interaction analytical models are given in details. The third chapter, the findings obtained from the analyses are given. The conclusions and recommendations deducated from the analyses are given in chapter four. Finally, the references are presented in the Fifth chapter.

Key Words: Soil-Structure Interaction, Dynamic Analysis, Wave Propogation, Boundary Condition, Foundation, Traditional Boundary, Viscous Boundary, Transmitting Boundary.

ŞEKİLLER DİZİNİ

	<u>Sayfa No</u>
Şekil 1.1. Türkiye deprem bölgeleri haritası	13
Şekil 1.2. Türkiye'deki barajlar	14
Şekil 1.3. P Dalgaları.....	15
Şekil 1.4. S dalgaları.....	16
Şekil 1.5. Love dalgaları.....	17
Şekil 1.6. Rayleigh dalgaları	18
Şekil 1.7. Yapı ve zemine ait ayırık matematik model.....	20
Şekil 1.8. Zeminin yapı davranışı üzerindeki etkilerinin yaylar ve sönümleyicilerle temsili	22
Şekil 1.9. Yapı-zemin etkileşim sisteminin sonlu elemanlarla temsili.....	23
Şekil 1.10. Rijit sınıra sahip sistemde yayılan ve yansıyan dalgalar	24
Şekil 1.11. Hareketin yatay doğrultuda kısıtlandığı, düşey doğrultuda serbest bırakıldığı sınıra sahip sistemde yayılan ve yansıyan dalgalar	25
Şekil 1.12. Yay elemanlı sınıra sahip sistemde yayılan ve yansıyan dalgalar	26
Şekil 1.13. Sönümleyici elemanlı sınıra sahip sistemde yayılan ve yansıyan dalgalar	26
Şekil 1.14. Düşük yoğunluklu ortamdaki yüksek yoğunluklu ortama dalga yayılımı	27
Şekil 1.15. Yüksek yoğunluklu ortamdaki düşük yoğunluklu ortama dalga yayılımı	27
Şekil 1.16. P dalgasına maruz yarı sonsuz ortam	28
Şekil 1.17. P dalgasına maruz yarı sonsuz ortamın viskoz sönümleyici elemanlarla idealleştirilmesi	28
Şekil 1.18. S dalgasına maruz yarı sonsuz ortam	29
Şekil 1.19. S dalgasına maruz yarı sonsuz ortamın viskoz sönümleyici elemanlarla idealleştirilmesi	30
Şekil 1.20. Rayleigh sönümü için sönüm oranı ile frekans arasındaki ilişki.....	32
Şekil 1.21. Yapı-zemin sisteminin kesiti	37
Şekil 1.22. Tabakalı zeminin sonlu elemanlara bölünüşü	37
Şekil 1.23. A ve B elemanları uç yer değiştirmeleri.....	40
Şekil 1.24. Sağ tabakalı bölge ve kuvvetlerin yerleşimi	51
Şekil 2.1. Sarıyar Barajı'nın görünümü.....	65
Şekil 2.2. Sarıyar Barajı'nın enkesiti.....	65

Şekil 2.3.	Hidrodinamik basınç dağılımı	66
Şekil 2.4.	Geçirgen sınır kullanılarak oluşturulan yapı-zemin etkileşimi sonlu eleman modeli ve tabakalı yarı-sonsuz zemin ortamı	70
Şekil 2.5.	Barajın yan sınırından 1H uzaklıkta rijit ve viskoz sınır kullanılarak oluşturulan yapı-zemin etkileşimi sonlu eleman modeli	71
Şekil 2.6.	Barajın yan sınırından 1.5H uzaklıkta rijit ve viskoz sınır kullanılarak oluşturulan yapı-zemin etkileşimi sonlu eleman modeli	72
Şekil 2.7.	Barajın yan sınırından 2H uzaklıkta rijit ve viskoz sınır kullanılarak oluşturulan yapı-zemin etkileşimi sonlu eleman modeli	73
Şekil 2.8.	Barajın yan sınırından 2.5H uzaklıkta rijit ve viskoz sınır kullanılarak oluşturulan yapı-zemin etkileşimi sonlu eleman modeli	74
Şekil 2.9.	Barajın yan sınırından 3H uzaklıkta rijit ve viskoz sınır kullanılarak oluşturulan yapı-zemin etkileşimi sonlu eleman modeli	75
Şekil 2.10.	Barajın yan sınırından 3.5H uzaklıkta rijit sınır kullanılarak oluşturulan yapı-zemin etkileşimi sonlu eleman modeli	76
Şekil 2.11.	Barajın yan sınırından 4H uzaklıkta rijit sınır kullanılarak oluşturulan yapı-zemin etkileşimi sonlu eleman modeli	77
Şekil 2.12.	Barajın yan sınırından 4.5H uzaklıkta rijit sınır kullanılarak oluşturulan yapı-zemin etkileşimi sonlu eleman modeli	78
Şekil 2.13.	Barajın yan sınırından 5H uzaklıkta rijit sınır kullanılarak oluşturulan yapı-zemin etkileşimi sonlu eleman modeli	79
Şekil 2.14.	13 Mart 1992 Erzincan Depremi doğu-batı bileşeni	80
Şekil 2.15.	13 Mart 1992 Erzincan Depremi doğu-batı bileşeninin tabakalı zemin için indirgenmiş rijit taban hareketi	81
Şekil 2.16.	Kompleks davranış tekniği (FLUSH programı) analizleri için kullanılan zemin profili ve mekanik özellikler	82
Şekil 3.1.	Rijit sınır için baraj memba yüzeyi yükseklik-yer değiştirme değişimi.....	86
Şekil 3.2.	Geleneksel sınırların 1H uzakta olması durumunda baraj kret noktasındaki yer değiştirmenin zamana bağlı değişimi	86
Şekil 3.3.	Geleneksel sınırların 1.5H uzakta olması durumunda baraj kret noktasındaki yer değiştirmenin zamana bağlı değişimi	87
Şekil 3.4.	Geleneksel sınırların 2H uzakta olması durumunda baraj kret noktasındaki yer değiştirmenin zamana bağlı değişimi	87
Şekil 3.5.	Geleneksel sınırların 2.5H uzakta olması durumunda baraj kret noktasındaki yer değiştirmenin zamana bağlı değişimi	87
Şekil 3.6.	Geleneksel sınırların 3H uzakta olması durumunda baraj kret noktasındaki yer değiştirmenin zamana bağlı değişimi	88

Şekil 3.7.	Geleneksel sınırların 3.5H uzakta olması durumunda baraj kret noktasındaki yer değiştirmenin zamana bağlı değişimi.....	88
Şekil 3.8.	Geleneksel sınırların 4H uzakta olması durumunda baraj kret noktasındaki yer değiştirmenin zamana bağlı değişimi	88
Şekil 3.9.	Geleneksel sınırların 4.5H uzakta olması durumunda baraj kret noktasındaki yer değiştirmenin zamana bağlı değişimi.....	89
Şekil 3.10.	Geleneksel sınırların 5H uzakta olması durumunda baraj kret noktasındaki yer değiştirmenin zamana bağlı değişimi.....	89
Şekil 3.11.	Geleneksel sınırların 1H uzakta olması durumunda baraj kret noktasındaki ivmenin zamana bağlı değişimi.....	89
Şekil 3.12.	Geleneksel sınırların 1.5H uzakta olması durumunda baraj kret noktasındaki ivmenin zamana bağlı değişimi.....	90
Şekil 3.13.	Geleneksel sınırların 2H uzakta olması durumunda baraj kret noktasındaki ivmenin zamana bağlı değişimi.....	90
Şekil 3.14.	Geleneksel sınırların 2.5H uzakta olması durumunda baraj kret noktasındaki ivmenin zamana bağlı değişimi.....	90
Şekil 3.15.	Geleneksel sınırların 3H uzakta olması durumunda baraj kret noktasındaki ivmenin zamana bağlı değişimi.....	91
Şekil 3.16.	Geleneksel sınırların 3.5H uzakta olması durumunda baraj kret noktasındaki ivmenin zamana bağlı değişimi.....	91
Şekil 3.17.	Geleneksel sınırların 4H uzakta olması durumunda baraj kret noktasındaki ivmenin zamana bağlı değişimi.....	91
Şekil 3.18.	Geleneksel sınırların 4.5H uzakta olması durumunda baraj kret noktasındaki ivmenin zamana bağlı değişimi.....	92
Şekil 3.19.	Geleneksel sınırların 5H uzakta olması durumunda baraj kret noktasındaki ivmenin zamana bağlı değişimi.....	92
Şekil 3.20.	Rijit sınır için baraj memba yüzeyi yükseklik- σ_x değişimi	94
Şekil 3.21.	Rijit sınır için baraj memba yüzeyi yükseklik- σ_y değişimi	95
Şekil 3.22.	Rijit sınır için baraj memba yüzeyi yükseklik- τ_{xy} değişimi	95
Şekil 3.23.	Rijit sınır için A-A kesiti boyunca σ_x -normal gerilme değişimi.....	96
Şekil 3.24.	Rijit sınır için A-A kesiti boyunca σ_y -normal gerilme değişimi	96
Şekil 3.25.	Rijit sınır için A-A kesiti boyunca τ_{xy} -kayma gerilmesi değişimi.....	97
Şekil 3.26.	Rijit sınır için B-B kesiti boyunca σ_x -normal gerilme değişimi	97
Şekil 3.27.	Rijit sınır için B-B kesiti boyunca σ_y -normal gerilme değişimi.....	98
Şekil 3.28.	Rijit sınır için B-B kesiti boyunca τ_{xy} -kayma gerilmesi değişimi	98
Şekil 3.29.	Rijit sınır için C-C kesiti boyunca σ_x -normal gerilme değişimi	99

Şekil 3.30.	Rijit sınır için C-C kesiti boyunca σ_y -normal gerilme değişimi.....	99
Şekil 3.31.	Rijit sınır için C-C kesiti boyunca τ_{xy} -kayma gerilmesi değişimi	100
Şekil 3.32.	Viskoz sınır için baraj memba yüzeyi yükseklik-yer değiştirme değişimi ..	101
Şekil 3.33.	Viskoz sınırların 1H uzakta olması durumunda baraj kret noktasındaki yer değiştirmenin zamana bağlı değişimi	102
Şekil 3.34.	Viskoz sınırların 1.5H uzakta olması durumunda baraj kret noktasındaki yer değiştirmenin zamana bağlı değişimi	102
Şekil 3.35.	Viskoz sınırların 2H uzakta olması durumunda baraj kret noktasındaki yer değiştirmenin zamana bağlı değişimi	103
Şekil 3.36.	Viskoz sınırların 2.5H uzakta olması durumunda baraj kret noktasındaki yer değiştirmenin zamana bağlı değişimi	103
Şekil 3.37.	Viskoz sınırların 3H uzakta olması durumunda baraj kret noktasındaki yer değiştirmenin zamana bağlı değişimi	103
Şekil 3.38.	Viskoz sınırların 1H uzakta olması durumunda baraj kret noktasındaki ivmenin zamana bağlı değişimi	104
Şekil 3.39.	Viskoz sınırların 1.5H uzakta olması durumunda baraj kret noktasındaki ivmenin zamana bağlı değişimi	104
Şekil 3.40.	Viskoz sınırların 2H uzakta olması durumunda baraj kret noktasındaki ivmenin zamana bağlı değişimi	104
Şekil 3.41.	Viskoz sınırların 2.5H uzakta olması durumunda baraj kret noktasındaki ivmenin zamana bağlı değişimi	105
Şekil 3.42.	Viskoz sınırların 3H uzakta olması durumunda baraj kret noktasındaki ivmenin zamana bağlı değişimi	105
Şekil 3.43.	Viskoz sınır için baraj memba yüzeyi yükseklik- σ_x değişimi	107
Şekil 3.44.	Viskoz sınır için baraj memba yüzeyi yükseklik- σ_y değişimi	108
Şekil 3.45.	Viskoz sınır için baraj memba yüzeyi yükseklik- τ_y değişimi.....	108
Şekil 3.46.	Viskoz sınır için A-A kesiti boyunca σ_x -normal gerilme değişimi.....	109
Şekil 3.47.	Viskoz sınır için A-A kesiti boyunca σ_y -normal gerilme değişimi	109
Şekil 3.48.	Viskoz sınır için A-A kesiti boyunca τ_{xy} -kayma gerilmesi değişimi	110
Şekil 3.49.	Viskoz sınır için B-B kesiti boyunca σ_x -normal gerilme değişimi	110
Şekil 3.50.	Viskoz sınır için B-B kesiti boyunca σ_y -normal gerilme değişimi.....	111
Şekil 3.51.	Viskoz sınır için B-B kesiti boyunca τ_{xy} -kayma gerilmesi değişimi	111
Şekil 3.52.	Viskoz sınır için C-C kesiti boyunca σ_x -normal gerilme değişimi	112
Şekil 3.53.	Viskoz sınır için C-C kesiti boyunca σ_y -normal gerilme değişimi.....	112
Şekil 3.54.	Viskoz sınır için C-C kesiti boyunca τ_{xy} -kayma gerilmesi değişimi	113

Şekil 3.55.	A noktasına ait yer değiştirme spektrumları	115
Şekil 3.56.	B noktasına ait yer değiştirme spektrumları.....	115
Şekil 3.57.	C noktasına ait yer değiştirme spektrumları.....	116
Şekil 3.58.	D noktasına ait yer değiştirme spektrumları	116
Şekil 3.59.	E noktasına ait yer değiştirme spektrumları.....	117
Şekil 3.60.	F noktasına ait yer değiştirme spektrumları	117
Şekil 3.61.	G noktasına ait yer değiştirme spektrumları	118
Şekil 3.62.	A noktasına ait hız spektrumları.....	118
Şekil 3.63.	B noktasına ait hız spektrumları.....	119
Şekil 3.64.	C noktasına ait hız spektrumları.....	119
Şekil 3.65.	D noktasına ait hız spektrumları.....	120
Şekil 3.66.	E noktasına ait hız spektrumları	120
Şekil 3.67.	F noktasına ait hız spektrumları	121
Şekil 3.68.	G noktasına ait hız spektrumları.....	121
Şekil 3.69.	A noktasına ait ivme spektrumları	122
Şekil 3.70.	B noktasına ait ivme spektrumları.....	122
Şekil 3.71.	C noktasına ait ivme spektrumları.....	123
Şekil 3.72.	D noktasına ait ivme spektrumları	123
Şekil 3.73.	E noktasına ait ivme spektrumları.....	124
Şekil 3.74.	F noktasına ait ivme spektrumları	124
Şekil 3.75.	G noktasına ait ivme spektrumları	125
Şekil 3.76.	Yapıdan 1H uzaklıkta rijit sınır olması durumunda A noktasına ait zamana bağlı ivme değişimi	125
Şekil 3.77.	Yapıdan 2H uzaklıkta rijit sınır olması durumunda A noktasına ait zamana bağlı ivme değişimi	126
Şekil 3.78.	Yapıdan 3H uzaklıkta rijit sınır olması durumunda A noktasına ait zamana bağlı ivme değişimi	126
Şekil 3.79.	Yapıdan 4H uzaklıkta rijit sınır olması durumunda A noktasına ait zamana bağlı ivme değişimi	126
Şekil 3.80.	Yapıdan 5H uzaklıkta rijit sınır olması durumunda A noktasına ait zamana bağlı ivme değişimi	127
Şekil 3.81.	Yapıdan 0.2H uzaklıkta geçirgen sınır olması durumunda A noktasına ait zamana bağlı ivme değişimi	127
Şekil 3.82.	Yapıdan 1H uzaklıkta rijit sınır olması durumunda B noktasına ait zamana bağlı ivme değişimi	127

Şekil 3.83.	Yapıdan 2H uzaklıkta rijit sınır olması durumunda B noktasına ait zamana bağlı ivme değişimi	128
Şekil 3.84.	Yapıdan 3H uzaklıkta rijit sınır olması durumunda B noktasına ait zamana bağlı ivme değişimi	128
Şekil 3.85.	Yapıdan 4H uzaklıkta rijit sınır olması durumunda B noktasına ait zamana bağlı ivme değişimi	128
Şekil 3.86.	Yapıdan 5H uzaklıkta rijit sınır olması durumunda B noktasına ait zamana bağlı ivme değişimi	129
Şekil 3.87.	Yapıdan 0.2H uzaklıkta geçirgen sınır olması durumunda B noktasına ait zamana bağlı ivme değişimi	129
Şekil 3.88.	Yapıdan 1H uzaklıkta rijit sınır olması durumunda C noktasına ait zamana bağlı ivme değişimi	129
Şekil 3.89.	Yapıdan 2H uzaklıkta rijit sınır olması durumunda C noktasına ait zamana bağlı ivme değişimi	130
Şekil 3.90.	Yapıdan 3H uzaklıkta rijit sınır olması durumunda C noktasına ait zamana bağlı ivme değişimi	130
Şekil 3.91.	Yapıdan 4H uzaklıkta rijit sınır olması durumunda C noktasına ait zamana bağlı ivme değişimi	130
Şekil 3.92.	Yapıdan 5H uzaklıkta rijit sınır olması durumunda C noktasına ait zamana bağlı ivme değişimi	131
Şekil 3.93.	Yapıdan 0.2H uzaklıkta geçirgen sınır olması durumunda C noktasına ait zamana bağlı ivme değişimi	131
Şekil 3.94.	Yapıdan 1H uzaklıkta rijit sınır olması durumunda D noktasına ait zamana bağlı ivme değişimi	131
Şekil 3.95.	Yapıdan 2H uzaklıkta rijit sınır olması durumunda D noktasına ait zamana bağlı ivme değişimi	132
Şekil 3.96.	Yapıdan 3H uzaklıkta rijit sınır olması durumunda D noktasına ait zamana bağlı ivme değişimi	132
Şekil 3.97.	Yapıdan 4H uzaklıkta rijit sınır olması durumunda D noktasına ait zamana bağlı ivme değişimi	132
Şekil 3.98.	Yapıdan 5H uzaklıkta rijit sınır olması durumunda D noktasına ait zamana bağlı ivme değişimi	133
Şekil 3.99.	Yapıdan 0.2H uzaklıkta geçirgen sınır olması durumunda D noktasına ait zamana bağlı ivme değişimi	133
Şekil 3.100.	Yapıdan 1H uzaklıkta rijit sınır olması durumunda E noktasına ait zamana bağlı ivme değişimi	133
Şekil 3.101.	Yapıdan 2H uzaklıkta rijit sınır olması durumunda E noktasına ait zamana bağlı ivme değişimi	134

Şekil 3.102. Yapıdan 3H uzaklıkta rijit sınır olması durumunda E noktasına ait zamana bağlı ivme değişimi	134
Şekil 3.103. Yapıdan 4H uzaklıkta rijit sınır olması durumunda E noktasına ait zamana bağlı ivme değişimi	134
Şekil 3.104. Yapıdan 5H uzaklıkta rijit sınır olması durumunda E noktasına ait zamana bağlı ivme değişimi	135
Şekil 3.105. Yapıdan 0.2H uzaklıkta geçirgen sınır olması durumunda E noktasına ait zamana bağlı ivme değişimi	135
Şekil 3.106. Yapıdan 1H uzaklıkta rijit sınır olması durumunda F noktasına ait zamana bağlı ivme değişimi	135
Şekil 3.107. Yapıdan 2H uzaklıkta rijit sınır olması durumunda F noktasına ait zamana bağlı ivme değişimi	136
Şekil 3.108. Yapıdan 3H uzaklıkta rijit sınır olması durumunda F noktasına ait zamana bağlı ivme değişimi	136
Şekil 3.109. Yapıdan 4H uzaklıkta rijit sınır olması durumunda F noktasına ait zamana bağlı ivme değişimi	136
Şekil 3.110. Yapıdan 5H uzaklıkta rijit sınır olması durumunda F noktasına ait zamana bağlı ivme değişimi	137
Şekil 3.111. Yapıdan 0.2H uzaklıkta geçirgen sınır olması durumunda F noktasına ait zamana bağlı ivme değişimi	137
Şekil 3.112. Yapıdan 1H uzaklıkta rijit sınır olması durumunda G noktasına ait zamana bağlı ivme değişimi	137
Şekil 3.113. Yapıdan 2H uzaklıkta rijit sınır olması durumunda G noktasına ait zamana bağlı ivme değişimi	138
Şekil 3.114. Yapıdan 3H uzaklıkta rijit sınır olması durumunda G noktasına ait zamana bağlı ivme değişimi	138
Şekil 3.115. Yapıdan 4H uzaklıkta rijit sınır olması durumunda G noktasına ait zamana bağlı ivme değişimi	138
Şekil 3.116. Yapıdan 5H uzaklıkta rijit sınır olması durumunda G noktasına ait zamana bağlı ivme değişimi	139
Şekil 3.117. Yapıdan 0.2H uzaklıkta geçirgen sınır olması durumunda G noktasına ait zamana bağlı ivme değişimi	139

TABLolar DİZİNİ

	<u>Sayfa No</u>
Tablo 2.1. Adım adım integrasyon (ANSYS programı) analizleri için kullanılan malzeme özellikleri.....	82

SEMBOLLER DİZİNİ

a	Sabit
a_0 ve a_1	Rayleigh sönüm katsayıları
A	Sönümleyicinin tanımlandığı düğüm noktasının şekil düzlemine dik yüzey alanı
$[A]$	Serbest zemin bölgesinde tanımlanan kayma modülü ve Lamé sabitine bağlı matris
$\{A\}_s$	Yapı-zemin etkileşim sisteminin frekans alanında yapılan çözümle bulunan kompleks yer değiştirme genlikleri
$\{A_f\}_s$	Serbest zemin bölgesinin verilen deprem ivmesi için frekans alanındaki yer değiştirme genlikleri
b	Sabit
$[B]$	Tabakalı bölge için antisimetrik matris ve şekil değiştirmelerini yer değiştirmelere bağlayan matris
c	Dalga yayılma hızı
c_i	Yer değiştirme sabitleri
C_n	Normal sönüm katsayısı
C_t	Teğetsel sönüm katsayısı
$[c]_e$	Dörtgen elemana ait sönüm matrisi
$[C]$	Frekansa bağlı dinamik kütle matrisi, sönüm matrisi
d_j	Tabakalı bölgede alınan sonlu elemanların yükseklikleri
$[D]$	Serbest zemin bölgesinde tanımlanan kayma modülü ve Lamé sabitine bağlı matris
E	Elastisite modülü
E_r	Kayanın elastisite modülü
E_s	Zeminin elastisite modülü
E^*	Kompleks elastisite modülü
$[E]$	Tabakalı bölgede seçilen yer değiştirmeleri diğer yer değiştirmelere bağlayan matris

f	Frekans
$\{F\}$	Matematik modelin sağ ve sol geçirgen sınırlarında düğüm noktalarına düşey doğrultuda etkiyen statik kuvvetler
g	Yerçekimi ivmesi
G	Kayma modülü
G_j	Zemindeki her bir tabakaya ait kayma modülü
G^*	Kompleks kayma modülü
$[G]$	Tabakalı bölgede tanımlanan kayma modülü ve Lamé sabitlerine bağlı simetrik matris
h_j	Tabakalı bölgede alınan sonlu elemanların genişlikleri
H	Rezervuar derinliği
k	Dalga sayısı
$[K]$	Tabakalı bölgenin rijitlik matrisi
$[K]_s$	Çözüm frekansına bağlı kompleks terimli rijitlik matrisi
$[k]_e$	Dörtgen elemanın rijitlik matrisi
$[k]_r$	Dörtgen elemana ait rijitlik matrisinin r. satırı
$[L]$	Sol tabakalı bölgeye ait dinamik rijitlik matrisi
$[L]_j$	j. tabakaya ait rijitlik matrisi
m_j	A ve B elemanlarının katkısı ile ortak düğüm noktası j. tabakada toplanmış kütle
m_{j+1}	A ve B elemanlarının katkısı ile ortak düğüm noktası j+1. tabakada toplanmış kütle
$m_{l,j}$	j sınırındaki ivme nedeniyle l sınırındaki eş değer kütle
$m(z)$	rezervuar derinliğine bağlı kütle dağılımı
$\{m\}$	Kütle matrisi ile rijit taban ivmesinin yönüne ilişkin bir vektör
$[m]_e$	Dörtgen elemanlara ait ortalama kütle matrisi
$[m]_t$	Eleman tekil kütle matrisi
$[m]_y$	Eleman yayılı kütle matrisi

$[M]$	Tabakalı bütün bölgenin kütle matrisi
$[M]_j$	j. tabakanın kütle matrisi
N	Zaman aralıkları sayısı
P	Tabana etkiyen kuvvetler
P_x	Tabana yatay yönde etkiyen dış kuvvet
P_y	Tabana düşey yönde etkiyen dış kuvvet
$\{P\}$	Sistemin yük vektörü
$\{P\}_e$	Eleman kuvvet vektörü
$\{P\}^R$	Sağ tabakalı bölgeye etkiyen kuvvetler
$\{P\}_s$	Her frekans için değişen, rijit taban hareketinin birim genliğine ($\ddot{y}_s = 1$) karşılık gelen alan kuvvet vektörü
$Q_{l,j}^m$	j sınırına m tabakasından gelen ve l doğrultusunda etkiyen kuvvet
$Q_{x,j}$	j sınırında x-ekseni doğrultusunda kuvvet
$Q_{x,j}^j$	j. tabakada m_j kütle sine yatay doğrultuda etkiyen kuvvet
$Q_{x,j+1}^j$	j. tabakada m_{j+1} kütle sine yatay doğrultuda etkiyen kuvvet
$Q_{y,j}$	j sınırında y-ekseni doğrultusunda kuvvet
$Q_{y,j}^j$	j. tabakada m_j kütle sine düşey doğrultuda etkiyen kuvvet
$Q_{y,j+1}^j$	j. tabakada m_{j+1} kütle sine düşey doğrultuda etkiyen kuvvet
$\{Q\}$	Tabakalı bölgenin kuvvet vektörü
$-\{Q\}$	Dinamik eylemsizlik kuvvetleri
$[R]$	Sağ tabakalı bölge dinamik rijitlik matrisi
T	Periyot
$\{T\}$	Sağ ve sol tabakalı bölgede enerji yayılımından oluşan ve her iki geçirgen sınırlardaki düğüm noktalarına etkiyen kuvvetler
$\{u\}$	Sistemin yer değiştirme vektörü
$\{u_f\}$	Serbest zemin yer değiştirme vektörü
u_x	Yer değiştirmelerin yatay doğrultudaki bileşenleri

$u_{x,j}$	j sınırında x-ekseni doğrultusundaki yer değiştirme
U_i	i anındaki yer değiştirme vektörü
U_{i+1}	i+1 anındaki yer değiştirme vektörü
\dot{U}_i	i anındaki hız vektörü
\dot{U}_{i+1}	i+1 anındaki hız vektörü
\ddot{U}_i	i anındaki ivme vektörü
\ddot{U}_{i+1}	i+1 anındaki ivme vektörü
$U_{x,n}$	n. tabakanın üst sırasındaki x-ekseni doğrultusundaki yatay yer değiştirmeler
$U_x(y)$	x-ekseni doğrultusundaki genlik fonksiyonu
u_y	Yer değiştirmelerin düşey doğrultudaki bileşenleri
$u_{y,j}$	j sınırında y-ekseni doğrultusundaki yer değiştirme
$U_{y,n}$	n. tabakanın üst sırasındaki y-ekseni doğrultusundaki düşey yer Değiştirmeler
U_0	$t = 0$ anındaki yer değiştirme
\dot{U}_0	$t = 0$ anındaki hız
\ddot{U}_0	$t = 0$ anındaki ivme
$U_y(y)$	y-ekseni doğrultusundaki genlik fonksiyonu
$\{u\}_e$	Eleman köşe noktalarına ait yer değiştirme vektörü
$\{u\}_A$	A elemanı yer değiştirme vektörü
$\{u\}_B$	B elemanı yer değiştirme vektörü
$\{\ddot{u}\}$	İvme vektörü
$\{U\}$	Tabakalı bölgenin yer değiştirme vektörü
$\{U\}_j$	j tabakasının üst ve alt sınırlarındaki yer değiştirme vektörü
$\{U\}_s$	Mod şekilleri
$[U]$	Özel değer matrisi
w	Suyun birim ağırlığı

V_s	Kayma dalgası hızı
V_p	P-dalgası hızı
$\{V\}$	Yatay ve düşey doğrultudaki viskoz sönüm kuvveti vektörü
\ddot{y}	Rijit taban ivmesinin yönü
z	Su yüzeyinden itibaren su derinliği
ρ_j	Zemindeki her bir tabakaya ait birim hacim yoğunluğu
λ_j	Lame sabiti
ν_j	Zemindeki her bir tabakaya ait poisson oranı
ω	Açısal frekans
λ	Dalga boyu
α_s	Mod katılma faktörü
$\{\alpha\}$	Mod katılma faktörleri vektörü
σ_x	Sınır boyunca yatay kuvvetleri meydana getiren x-ekseni doğrultusundaki normal gerilme
σ_y	Sınır boyunca yatay kuvvetleri meydana getiren y-ekseni doğrultusundaki normal gerilme
τ_{xy}	Sınır boyunca düşey kuvvetleri meydana getiren kayma gerilmesi
ε_x	x-ekseni doğrultusundaki şekil değiştirme bileşeni
ε_y	y-ekseni doğrultusundaki şekil değiştirme bileşeni
γ_{xy}	Kayma şekil değiştirmesi
β	Kritik sönüm oranı
Δt	Zaman aralığı
$\delta_x(t)$	Yatay yer değiştirmesi
$\dot{\delta}_x(t)$	Zamana göre yatay doğrultudaki yer değiştirmelerin türevi olan hızlar
$\delta_y(t)$	Düşey yer değiştirmesi
$\dot{\delta}_y(t)$	Zamana göre düşey doğrultudaki yer değiştirmelerin türevi olan hızlar
ξ_n	Rayleigh sönümü

1. GENEL BİLGİLER

1.1. Giriş

Dünyanın yaratılışından beri, sismik yönden aktif bulunan bölgelerde depremlerin ardışık olarak oluştuğu ve bunun sonucunda milyonlarca insanın ve yapıların etkilendiği bilinmektedir. Depremi ne zaman meydana geleceği bilinemediği gibi, nerede ve hangi büyüklükte gerçekleşeceği de tahmin edilememektedir. Deprem ve depremin yapı üzerindeki etkileri hakkında bilgiler arttıkça muhtemel can ve mal kayıpları önenebilir ve daha güvenilir yapılar inşa edilebilir (Yurdakul, 2011). Bu sebeple son yıllarda, özellikle sosyal ve ekonomik yönden büyük önem arz eden yapıların inşası ile beraber bu yapıların deprem etkisi altındaki dinamik davranışlarının tespiti de önemli bir araştırma konusu haline gelmiştir.

Yapılan gözlem ve araştırmalar, yapıların dinamik davranışlarının, üzerinde inşa edilmiş oldukları zeminin özelliklerinden bağımsız olarak düşünölemeyeceğini ortaya koymuştur. Yapı ve zemin arasındaki karşılıklı etkileşim sonucu, yapısal davranışların önemli ölçüde değişebileceği gibi yapı civarındaki zeminin de davranışı değişime uğramaktadır. Zemine gömülü olsun olmasın ağır yapıların dinamik hesabında yapı-zemin etkileşiminin dikkate alınması en önemli etkenlerden bir tanesi olmaktadır (Dumanoğlu, 1979).

Yapı-zemin etkileşiminin dikkate alınmasıyla beraber, gerek çözümlerde etkili olacak parametreler gerekse de sonsuz zemin ortamını modelleme gereksinimi ve analitik çözümler problemin doğasını değiştirmektedir. Sonsuz zemin ortamının geometrisine bağlı olarak şekillenen dinamik enerjinin yayılımı ve sönümü, problemi daha zor ve karmaşık hale getirmektedir (Aydınöğlu, 1992).

Yapı-zemin etkileşiminin dinamik analizinde dinamik etkiye maruz yapının titreşimi sonucu meydana gelen ve dinamik etkiyle zemin içerisinde yayılan dalgaların etkisini ortaya koyacak sınırsız zemin ortamının ifade edilebilmesi gerekmektedir. Analizlerde genellikle sonsuz büyüklükteki zemin ortamı, sınırlı büyüklükteki sonlu elemanlarla temsil edildiği için, zemin içerisinde yayılan dalgalar sınır değer problemi meydana getirmektedir. Özellikle baraj, nükleer güç santrali gibi ağır yapıların dinamik davranışı, sınır durumuna bağlı olarak gelişen dalga yayılımıyla büyük oranda değişime

uğramaktadır. Bu sebeple, yapı-zemin etkileşim problemlerinin çözümü için sonsuz ortamdaki dalga yayılımını dikkate alabilecek alternatif sınır şartlarının araştırılması ve geliştirilmesi gerekmektedir.

1.2. Konu ile İlgili Daha Önce Yapılmış Çalışmalar

İnşaat mühendisliği alanının esas çalışma konularından biri olan yapı-zemin etkileşimi problemi, 1970'li yılların başından itibaren nükleer güç santrali gibi fonksiyonları önemli ve maliyetleri büyük endüstriyel yapıların inşasıyla beraber bilim insanlarının çalışmalarına yön vermiştir. Sosyoekonomik gelişimin beraberinde getirdiği teknolojik imkânlar, problemlere çözümler sunarken, bilimsel çalışmaların da önünü açmış ve bu süreçte birçok çalışmanın ortaya konmasına imkan sağlamıştır.

Lysmer vd. (1969), sonsuz sürekli sistemi kapsayan dinamik problemlerin analizleri için sayısal bir yöntem sundular. Tipik sonsuz sistemin dinamik titreşimi sonucu ortamın sınırlarına gelen enerjiyi absorbe edebilecek viskoz sınır şartını ortaya koymuşlar ve dinamik etki sonucu ortam içerisinde oluşan P ve S dalgaları için bu sınır şartlarını idealleştirdiler. Önerdikleri yöntemle elde ettikleri sonuçların, eksenel simetrik bir temele ait titreşim problemi için elde edilen teorik sonuçlarla uyum gösterdiğini belirttiler. Bozuk ve düzensiz geometriye sahip sistemlerin, homojen ve lineer elastik ortamın bir parçasına dönüştürülmesi durumunda, sonsuz ortamın analizleri için bu sınırların kullanılabilceğini ifade ettiler.

Lysmer (1970), çok tabakalı elastik ortamdaki genelleştirilmiş Rayleigh dalgalarının analizi için basit bir sayısal yöntem ortaya koydu. Yer değiştirme potansiyellerini kullanmayan ve genel olarak bilgisayar kodlarıyla çözülebilen öz değer problemine yol açan bu yöntemin, mevcut teorilerden elde edilen sonuçlarla uyum sağladığını ifade etti. Ek uygulamalarla beraber viskoz tabakalı ortamın ve Love dalgalarının analizlerinin de yapılabileceğini belirtti.

Isenberg vd. (1972), zemine gömülü nükleer güç santrali ve zemin arasındaki etkileşimi, toplu kütlelere ve rijitliklere sahip zemine rijit bağlı bir boyutlu model, zemin ve yapı arasına yerleştirilen yaylı bir boyutlu model ve iki boyutlu sonlu eleman model ile idealleştirdiler. Kullanılan basit yaylı sistemin rijitlikleri, yüzeysel yapıların davranışından hesap edildiğinden, davranış frekansı ve büyüklüklerinde sapmaların meydana geldiğini belirlediler. İki boyutlu sonlu eleman modeline yakın sonuçlar elde etmek için daha

gerçekçi toplu rijitlik ve sönüm değerleri tanımlamak gerektiğini vurguladılar. Ekonomik ve kabul edilebilir çözümler için iki boyutlu sonlu eleman ağı sınırının yapıdan uzaklığının temel genişliğinin 0.75-1.0 katı arasında alınabileceğini ortaya koydular.

Anderson (1972), zemine gömülü yapı sistemlerinin sismik davranışı üzerinde yapı-zemin etkileşiminin tesirini hesaplamak için sonlu eleman yöntemini kullandı. Çok tabakalı elastik bir ortama kurulan nükleer güç santrali üzerinde zemin özellikleri, kaya hareketleri ve yapı rijitliğinin etkilerini dikkate aldı. Sonuçları temel ivme spektrumu yardımıyla sundu. Çeşitli zemin bölgelerinde kurulu nükleer güç santrallerinin sismik tasarım gereksinimlerini hesaplamak için değiştirilmiş tasarım spektrumuyla beraber ayrık bir yapı-zemin analitik modelinin gerekli olduğunu önerdi.

Kuhlemeyer vd. (1973), yarı sonsuz, homojen ve iki malzemeli çubuğun sonlu eleman modelleri yardımıyla bir boyutlu harmonik elastik dalganın sonlu eleman ağı boyunca yayılımının sebep olduğu yer değiştirmelerin doğruluğunu çalıştılar. Dalga uzunluğunun altıda ve on ikide biri arasında değişen eleman uzunlukları için sırasıyla %4 ve %1 civarında yer değiştirme hatasının meydana geldiğini belirlediler. İki ve üç boyutlu tabakalı ortamlar için en büyük eleman uzunluğunun elastik tabakadaki en yavaş cisim dalgasının dalga uzunluğunun sekizde birine eşit olmasını tavsiye ettiler.

Seed vd. (1973), zemine gömülü ağır yapıların deprem esnasındaki yapı-zemin etkileşimi için yay-sönümleyici ve sonlu eleman modellerinin analiz sonuçları arasındaki muhtemel farklılıkları ile zemine gömülü bir yapının davranışında yapı tabanının kaya kütesine yakınlığı, gömülme derinliği ve zemin karakteristiklerinin muhtemel etkilerini sonlu eleman modeli yardımıyla araştırdılar. Yay-sönümleyici modeli ile yapı üzerinde elde edilen ivme değerlerinin oldukça büyük olduğunu belirlediler. Yapı altındaki ve etrafındaki zeminin rijitliğindeki değişimlerin bazen yapıdaki ivme değerlerini önemli ölçüde etkilemediğini; yapı tabanı seviyesindeki ivme değerleri artsa bile gömülme derinliğinin azalması bazı durumlarda yapı davranışını azalttığını, yapı tabanının temel kayasına olan yakınlığındaki değişimin bazı durumlarda yapı davranışında önemli bir değişime sebep olmadığını ve bazı durumlarda da yapı davranışını artırabileceğini ortaya koydular.

Berger vd. (1975), eksenel simetrik bir nükleer güç santrali-zemin sisteminin eşdeğer düzlem şekil değiştirme ve eksenel simetrik sonlu eleman analizlerinden elde edilen sismik davranışlardaki farklılıkları incelediler. İki yöntemle yaptıkları analizler sonucunda yer yüzeyi altındaki noktalarda yakın değerler elde edildiğini, yer yüzeyi üzerindeki noktalarda

ise farklılıkların meydana geldiğini gözlemlediler. Daha sonra geliştirilmiş analitik bir yöntem (Berger, 1975) yardımıyla aksel simetrik modelin davranışını tekrar analiz ettiler. En küçük karelere benzetme tekniği ile yapı tabanı boyunca bulunan yatay doğrultudaki düğüm noktalarının yatay ve düşey hareketlerini aynı seviyedeki rijit bir düzlemin yatay ve dönme hareketlerine benzeterek üst yapının yatay ve dönme rijit taban davranış analizlerini gerçekleştirdiler. Böylece, meydana gelen davranış farklılıklarının yapı-zemin sisteminin aksel simetrik ve düzlem şekil değiştirme modellerinin farklı eğilme karakteristiklerinden dolayı meydana geldiğini ortaya koydular.

Hwang vd. (1975), zemin kütleindeki enerji kaybının 3 boyutlu etkilerinin, 2 boyutlu düzlem şekil değiştirme analizleri ile bağlantılı olan özel bir viskoz sınır kullanarak yaklaşık bir yöntem içerisinde dikkate alınabileceğini gösterdiler. Bu yeni sınırın etkilerini, iki boyutlu düzlem şekil değiştirme analizi, aksel simetrik analiz ve basitleştirilmiş üç boyutlu analiz gibi sonlu eleman yöntemleriyle çalıştılar. Yapı üzerinde, yer yüzeyi altında ve yapı tabanı civarında belirledikleri noktalar üzerinde elde ettikleri değerler arasında kıyaslama yaptılar. Basitleştirilmiş üç boyutlu analizle yer yüzeyi altında elde edilen değerlerin, aksel simetrik analizden elde edilen değerlerle uyum sağladığını, serbest zemin üzerindeki noktalarda (özellikle yapı üst kısmına doğru) üç yöntemle elde edilen sonuçlar arasında uyumsuzluk olduğunu ve iki boyutlu analizler sonucunda elde edilen davranış spektrumlarında, model sınırındaki dalga yansımalarına bağlı uç değerlerin ortaya çıktığını belirlediler. Yer yüzeyi altındaki noktalarda, basit düzlem şekil değiştirme analizleri sonucunda elde edilen değerlerin ise, gerçek değerleri koruduğunu belirlediler. Bunun dışında karesel bir yapının aksel simetrik modeline ait sonuçlarda %30 civarında tahmin dışı davranış elde edildiğini, yapının zemin davranışı üzerindeki etkisinin yapı merkezinden itibaren yapı çapına eşit mesafede ihmal edilebileceğini ortaya koydular.

Clayton vd. (1977), sınırlardan yapay yansımaları en aza indiren sayısal dalga benzeşimi için sınır şartları ortaya koydular. Böylece sınırsız bir alandaki fiziksel davranışı temsil etmek için sınırlı bir alandaki akustik ve elastik dalga yayılımını etkin bir şekilde kullandılar. Elastik dalga denklemlerinin paraksiyal yaklaşımlarını esas alan sınır şartlarının, sayısal olarak uygulama yönünden kolaylığını ve aynı zamanda çok sayıda geniş bir alandaki yansımayı azalttığını ortaya koydular.

Dumanoğlu (1980), zemine gömülü yapıların dinamik analizinde geçirgen sınırlar ve viskoz sınırlar ile beraber kullanılacak ve rijit taban kabulünün yerini alacak yansıtmayan

sınırları önerdi. Yaptığı çalışma ile yansıtmayan sınırların, sonlu elemanların uygulandığı bölgenin rijit tabana kadar genişletilmesinin önüne geçtiğini ortaya koydu.

Liao vd. (1984), yapay bir sınırdan dalgaların geçişini sağlayacak sayısal bir yöntem sundular. Bu yöntem, dış bükey bir yapay sınır ve zaman adımlı bir algoritma ile 2 veya 3 boyutlu lineer dalga problemleri için uygulanabilir olmuştur. Bir ekstrapolasyon formülü şeklinde ifade edilebilen bu sayısal yöntem, sonlu farklar veya sonlu elemanlarda rahatlıkla uygulanabilmiştir. Yapay sınır düğüm noktalarındaki değerler, zaman adım geçmişinden sadece iç düğüm noktalarıyla hesaplanabilmiştir. Bu yöntemin dezavantajları yaklaşık olarak sonlu eleman yöntemindekine benzer olmuştur. Doğruluğu, ekstrapolasyon serilerinin terim sayılarıyla kontrol edilmiş ve zaman adım sayısı azaltılarak geliştirilebilmiştir.

Dinamik temel problemlerinin sonlu eleman analizi, uzak alandaki sonlu eleman ağından dalga yayılımının modellenmesi için geçirgen sınırların kullanımını gerektirdiği, yakın alandaki zeminin inelastik davranışını içeren problemler zaman alanında rahatlıkla çözüldüğü, böyle durumlarda standart viskoz sınır yaygın olarak kullanıldığı ve eksenel simetrik durumlar için bu sınırın uygun olmadığını düşünen Deeks vd. (1992), dışa doğru hareket eden dalga şekli yaklaşımını esas alan eksenel simetrik kayma ve basınç dalgaları için düzlem şekil değiştirme sınır denklemlerini geliştirdiler. Bu sınır denklemlerinin, frekanstan bağımsız elemanlı mekanik sistemler için eşdeğer olduklarını gözlemlediler. Yeni sınırların karmaşık rijitliklerini, eşdeğer viskoz ve düzlem şekil değiştirme sınır rijitlikleriyle kıyaslamışlar ve yeni sınırların düzlem şekil değiştirme sınırlarıyla uyum sağladığını buldular. Şahmerdanla üretilen süreksiz bir kuvvete maruz, uzatılmış, eksenel simetrik sonlu bir eleman ağının davranışını hesaplamışlar ve çeşitli geçirgen sınırlarla kesilmiş benzer ağların davranışlarıyla kıyaslamışlardır.

Fujimori vd. (1993), nükleer güç santrallerinin reaktör yapıları üzerindeki zemine gömülme etkilerini bir takım model deneylerle incelediler. Yapı-zemin etkileşimi üzerinde gömülme etkilerini açıklığa kavuşturmak için büyük ölçekli modellerde sismik gözlemler yaptılar. Gözlemleri, serbest bölge, kazılı zemin, gömülü olmayan yapı ve gömülü yapı üzerinde gerçekleştirdiler. Toplam yükseklikleri 10.5m ve ağırlıkları 450 ton olan 8m² temele sahip model yapıyı, betonarme olarak inşa ettiler. 5m derinlikte gömülü yapıyı, gömülü olmayan yapının yanına yerleştirdiler. Sonuç olarak, gömülü yapının doğal frekans ve sönümü artırdığını ve gömülü olmayan yapı koşullarına kıyasla sismik davranışı azalttığını ortaya koydular.

Chuhan vd. (1999), sonlu elemanlar, sınır elemanlar, sonsuz elemanlar ve sonsuz sınır elemanların birleşik bir modelini yapı-zemin etkileşim analizi için sundular. Ana kaya, sınır eleman-sonsuz sınır eleman çifti ile ayrık hale getirilip bunun yanında yatay olmayan ana kaya yüzeyi dikkate alınabilirken sonsuz tabakalı zeminin yayılma etkilerini sonlu eleman-sonsuz eleman çifti ile dikkate aldılar. Yer değiştirme uyumluluğunu, söz konusu tüm eleman tipleri için sağladılar. Ana kaya yarım uzayı ve uzak alandan dikey olmayan dalgaların gelişi dikkate alındığında bu modelin, mevcut zemin-yapı etkileşim programlarına göre bazı avantajlarının olduğunu ortaya koydular. Uygulama örnekleri, FLUSH2 programı ile kıyaslandığında yöntemin uygulanabilirliğini ve doğruluğunu göstermiştir. Son olarak, zemin ve kayanın rölatif modül oranı (E_r/E_s) etkileri ile zemin ve yapı davranışı üzerinde düşey olmayan dalgaların geliş açılarını incelediler.

Kellezi (2000), dinamik yapı-zemin etkileşimine dair analiz edilen problemlerin alternatif yöntemlerini inceledi. Etkileşimin, yapı davranış genliğinin zemindeki malzeme sönümü ve dalga yayılımından dolayı ilave enerji kaybıyla etkilenmesi manasına geldiğini ve etraftaki yumuşak zeminin, bu zemine gömülmüş veya desteklenmiş kütleli ve rijit bir yapı için doğal bir sönümleyici olduğunu ifade etti. Böyle bir analizden ortaya çıkan başlıca zorluklardan birinin de titreşen yapıdan yayılan dalgaların olduğunu ve sayısal hesaplarda temel ortamının sadece sonlu bir bölgenin analiz edildiğini belirterek, sınır bölgesinden yansıyan dalgaları önlemek için bir uygulama gerçekleştirdi. Yapı-zemin etkileşim problemlerinin zaman alanında doğrudan çözümleri için basit ve etkin bir sonlu eleman işlemi olan yerel emilim sınırlarını ortaya koydu.

Kim vd. (2000), kartezyen koordinat sisteminde 3 boyutlu geçirgen sınır formüle ettiler. Bunu, rijit ana kaya üzerinde yatay olarak heterojen tabakalanmış zemin tabakaları içinde düzensiz şekilli temellerin dinamik yapı-zemin etkileşim problemleri için geliştirdiler. Homojen zemin tabakaları üzerindeki rijit yüzeysel bir dikdörtgen temelin dinamiğini, temeli içine alan sonlu bölgenin geleneksel sonlu elemanlar yöntemiyle ve yeni geliştirilen geçirgen sınırla sonsuz bölge çevrelenerek modellendiği hibrid yaklaşımıyla analiz ettiler. Bu yaklaşımın etkisini ortaya koymak için, dik bir düzlem ile ayrılan 2 ayrı bölgeden oluşan yatay olarak heterojen bir yerin içinde bulunan dikdörtgen bir temele uyguladılar.

Wolf vd. (2000), sonlu eleman metodunu esas alan ve aynı zamanda sınır eleman metodu sayılan, tutarlı sonsuz küçük sonlu eleman hücre yöntemini ortaya koydular. Burada, sınır eleman metodu ile sonlu eleman metodunu birleştirerek, sonlu eleman

hassasiyetine yakın çözümler elde ettiler. Sonlu eleman metoduyla yapıya komşu sınırsız ortamı modelleyerek, sınırsız ortamın analizini sağlayan sönüm çözücü ekstraksiyon yöntemini sundular. Ayrıca, önceden seçilen açılarda yayılan düzlem dalgalar için düşük ve yüksek frekans sınırlarında sağlıklı sonuçlar veren çift kat asimptotik çok doğrultulu geçirgen sınır şartlarını ifade ettiler.

Park vd. (2003), sonsuz ortamdaki dalga yayılımını modellemeye yarayan bir yöntem geliştirdiler ve zaman tanım alanında sismik yapı-zemin etkileşimi analizinde kullandılar. Süreksiz Galerkin metodunu esas alan bu yöntem, sınır eleman yöntemine nazaran daha az hesap zamanı ve daha az hesap hacmi gerektirmekteydi. Bu yöntemle birlikte kullanılan Newmark metodu koşulsuz kararlı olup zaman tanım alanında etkili bir hesaplama sağlamaktaydı. Sismik hareketle karakterize edilen durumlara bu yöntemi uyarlamak için, yapı ve yapı civarındaki zeminin hareket sınırında oluşan etkin kuvvetlerin hesabında serbest yüzey hareketini kullandılar. Sismik harekete maruz bir baraj-zemin sistemine ait sayısal bir örnekle yöntemin performansını ortaya koydular.

Sismik yapı-zemin etkileşim analizi için dikkate alınan yer ivmesi verilerinin doğrudan integrasyonunun, elde edilen yer değiştirmeler de büyük sapmalara sebep olduğunu ve yer değiştirmenin girdi verisi olarak kullanıldığı büyük ölçekli etkileşim analizlerinde sapmaların önemli bir etkiye sahip olduğunu ifade eden Yang vd. (2005), gerçekçi bir yer değiştirme-zaman serisi elde etmek amacıyla ivme integrasyonunu sağlayan yeni bir yaklaşım ortaya koydular. Bu yaklaşımda, öncelikle en küçük kareler eğrisi uydurma tekniğini kullanarak zaman tanım alanında ivme verisini düzelttiler ve daha sonra elde edilen yer değiştirmede uzun periyodlu salınımlara sebep olan etkenleri uzaklaştırmak için bir çeşit filtre kullanarak frekans tanım alanında işleme devam ettiler. Önerilen yaklaşımın uygulanabilirliğini birkaç örnekle değerlendirdiler ve diğer karmaşık yöntemlerden elde edilen sonuçlar arasında karşılaştırmalar yaptılar.

Liu vd. (2006), yapı-zemin etkileşim sistemini analiz etmek için sınırlarda sönümleyici eleman ile yayı birlikte kullandılar ve zaman tanım alanında mod süperpozisyon yöntemini esas alan basitleştirilmiş bir yöntem geliştirdiler. Viskoz-yayı ile yapay sınır yardımıyla sonsuz yapı-zemin etkileşim sistemini, sonlu sisteme dönüştürdüler. Çözüm yöntemini, iki farklı örnek üzerinde sonlu eleman programı NASTRAN ile denediler. İlk örnekte üniform yarı sonsuz ortamdaki dalga hareketi problemini, Lamb problemi (Lamb, 1904) olarak ele aldılar. İkinci örnekte ise, sismik etki altındaki yapı-zemin etkileşim sisteminin davranışını, 20 katlı çelik-betonarme karışımı çok katlı bir

çerçeve yapı ile elde ettiler. Çalışma sonucunda, bu yöntemin yapı-zemin sistemi temel karakteristiğini koruduğunu ve doğrudan yöntemlere kıyasla daha yüksek hesap etkinliği ve zaman tasarrufu sağladığını ortaya koydular.

Du vd. (2006), yakın alan temel kayasındaki yerel lineer olmayan davranışı ve baraj-temel kayası dinamik etkileşimindeki kemer barajların sismik davranışının hesabı için kullanılan zaman tanım alanında analitik bir yöntemi, geçirgen sınırlar ile sonlu eleman yöntemini birleştirerek geliştirdiler. Çin'deki Xiaowan barajının sismik davranışı üzerinde enerji yayılımının baraj-zemin dinamik etkileşimine tesirini, önerilen yöntem ile kütsüz zemin kabulünün yapıldığı geleneksel yöntemin sonuçlarını karşılaştırarak incelediler. Baraj tabanındaki üniform olmayan hareketin etkileri ve sonsuz temeldeki enerji yayılımının tesiri ile kemer barajın merkezi ve en üst kısmındaki kemer ve konsol gerilmelerinin %20-40 civarında azaldığını gözlemlediler. Lineer olmayan davranışa sahip fayların kemer barajların sismik gerilmeleri üzerindeki etkisinin çok az olduğunu tespit ettiler.

Birk vd. (2006), zaman tanım alanında 3 boyutlu baraj-rezervuar sisteminin tanımlanması için yeni bir yöntem önerdiler. Yapıyı, düzgün geometriye sahip rezervuarın sonlu bir kısmını ve temeli, standart sonlu elemanlar kullanarak dikkate aldılar. Yarı sonsuz bir sıvı vasıtasıyla sönüm yayılışını doğru bir şekilde ele aldılar. Sıvı-sıvı ara yüzeyindeki basınçla ilişkili ve frekansa bağlı modal rijitlik katsayısı analitik olarak elde edilebildiği için, rasyonel bir yaklaşım ve cebirsel bölme işlemiyle bu spektral rijitlik bağıntısının zaman alanına dönüşümünü sağladılar. Yarı sonsuz sıvı kanalını temsil etmek için, sistemin sınırlı parçasının hareket denklemlerini birleştirebilen birinci derece diferansiyel denklemler takımı elde ettiler. Son olarak, tam bir baraj-rezervuar sistemini, basıncı yeni değişkenlerle değiştirerek simetrik ikinci dereceden diferansiyel denklemlerle tanımladılar.

Soares vd. (2006), sınır eleman (BEM)-sınır eleman (BEM) çifti için ardışık bir yöntem ileri sürdüler. Tekrarlı olarak bağlanan alanlar için uygun ara yüzey şartları ve algoritmalar ortaya koydular. Bu ara yüzey şartları ve algoritmaları modellemek için elastostatik Green fonksiyonlarını kullanan lineer olmayan yaklaşım, zamana bağlı Green fonksiyonlarını esas alan elastodinamik sınır eleman yöntemi formülasyonları ve akustik gibi zaman alanında üç farklı sınır eleman yöntemi formülasyonlarını kullandılar. İki örneğin analizi üzerinden sonuçları değerlendirdiler.

Bazyar vd. (2006), ölçekli sonlu sınır eleman yöntemini, sınırsız alanların dinamik analizi için geliştirdiler. Bu yöntemde, üç boyuttan bir boyuta kadar indirgeme yaparak sınırları ayrıklaştırdılar. Kütle yoğunluğu ve elastisite modülü ile homojen olmayan sınırsız alanların süreksiz davranışını temsil etmek için ölçekli sınır sonlu eleman yöntemini kullandılar. Serbestlik derecesi sayısını ve işlem hacmini azaltmak için temel fonksiyonlarını azaltma tekniğini kullandılar. Sınırsız bir alan için ölçekli sınır sonlu eleman denklemini genelleştirilmiş koordinatlarda yeniden formüle ettiler. İvmenin birim impuls davranış matrisini elde ettiler ve standart sonlu elemanların hareket denklemiyle birleştirdiler. Ölçekli sınır sonlu eleman yönteminin doğruluğunu, homojen olmayan izotropik ve enine izotropik sınırsız alanlarla ilgili sayısal örneklerle gösterdiler.

Wolf vd. (2000) tarafından ileri sürülen sönüm çözücü ekstraksiyon (DSE) yönteminin, hiçbir tekil integral hesabının olmaması, hiçbir temel çözüm gerektirmemesi, evrişim integrallerinin ele alınmaması gibi durumlardan ötürü büyük kolaylıkları olmuştur. Fakat ilgili ara yüzeydeki yer değiştirmenin bilinmeyen bir vektör olması münasebetiyle büyük ölçekli problemler için DSE'nin zaman alanında uygulanması, yapı-sınırsız temel ara yüzeyindeki etkileşim kuvvetlerinin hesabında büyük zorluklar meydana getirmiştir. Birbiriyle ilişkili 3 adet büyük cebrik denklem takımının çözümünü gerektirmesi sebebiyle Zhong vd. (2007), bu zorlukların üstesinden gelebilmek için çözümü büyük ölçüde basitleştiren ve işlem miktarında etkin bir şekilde tasarruf sağlayan etkin bir algoritma sundular. Algoritmanın doğruluğunu kanıtlamak için alan boyutunda bir parametre analizi ve yapay sönüm miktarı ile analitik çözümlü iki örnek incelediler. DSE yaklaşımının etkinliği ve uygulanabilirliğini göstermek için, Morrow Point barajının zaman tanım alanında deprem analizi ve karmaşık frekans-davranış fonksiyonlarını, parametre çalışmalarında önerilen parametrelerle ortaya koydular.

Nakamura (2008) derin bir şekilde zemine gömülü nükleer güç santrali yapılarının sismik davranışlarının tahmininde frekans alanındaki zemin empedansının zaman alanındaki impuls davranışına doğru bir şekilde dönüşümünün gerekli olduğunu ifade ettiler. Bu sebeple, temel yöntem, kütle terimli yöntem ve büyük histeretik sönümlü problemler için geliştirilmiş yöntem olmak üzere 3 yöntem ileri sürdüler. Öne sürülen yöntemleri, geçmiş yer değiştirme veya hızı kullanan mevcut yöntemlerden farklı olarak hem geçmiş yer değiştirme hem de geçmiş hızı kullandılar. Tabakalı zemine gömülü nükleer reaktör yapısı kullanarak homojen olmayan zemine ait empedans için dönüşüm yönteminin uygunluğunu incelediler. Bu amaçla tabakalı zemin empedansının dönüşümü

için, iki tabakalı zemine gömülü model ve homojen olmayan zemin empedansının dönüşümü için iki tabakalı ve kazı dolgulu zemine gömülü model olmak üzere 2 ayrı model kullandılar. Zemin modelinin yan kenarlarına enerji geçirgen sınırlar (Lysmer, 1975) ve tabana viskoz sınırlar yerleştirdiler. Önerilen yöntemler ve frekans davranış analizi ile her iki model üzerinde elde edilen sonuçların uyumluluk gösterdiğini ortaya koydular.

Nakamura (2008), 2 boyutlu problemler için frekans tanım alanındaki geçirgen sınırları zaman tanım alanına dönüştürdüler. Bu sınırları kullanarak zaman tanım alanında yapı-zemin etkileşim sistemlerinin sismik davranış analizini gerçekleştiren bir yöntem ileri sürdüler. Zaman tanım alanında lineer analizler için rijitlik orantısal, şekil değiştirme enerjisi orantısal ve nedensel histeretik sönüm modelleri kullandılar. Elde edilen maksimum ivme değerlerini frekans tanım alanında elde edilen değerlerle karşılaştırdılar. Frekans alanında geçirgen sınırlar kullanılarak yapılan lineer analiz sonuçları ile zaman tanım alanında geçirgen sınırlar beraberinde yapılan lineer analiz sonuçlarını karşılaştırdılar. Frekans tanım alanında ve zaman tanım alanında geçirgen sınırlar ile yapılan lineer ve lineer olmayan analiz sonuçları ile 5 farklı yapı-zemin etkileşim modeli üzerinde viskoz sınırlar kullanarak yapılan lineer ve lineer olmayan analiz sonuçlarını karşılaştırdılar. Frekansa bağlı geçirgen sınır empedans matrisinin, zaman tanım alanında yüksek doğruluk oranı ile dönüştürülebildiğini ortaya koydular. Lineer ve lineer olmayan sismik davranış analizi açısından ve zaman tanım alanındaki viskoz sınıra kıyasla önerilmekte olan yöntemin doğruluğu gösterdiler.

Bouaanani vd. (2009), memba tarafında geçirgen sınır şartlarının kullanıldığı baraj-rezervuar sistemlerinin dinamik davranışını incelemek için yeni bir formülasyon önerdiler. Geliştirilen analitik denklemleri, verilen geçirgen sınır şartlarının doğruluğunu değerlendirmek için çözdüler ve rezervuarın sonlu eleman ya da sınır elemanlı modellerde oluşan hataları belirlediler. Yöntemi yarı sonsuz rezervuar durumunda değerlendirerek klasik yöntemlere göre uygun olduğunu belirlediler. Geçirgen sınır şartlarının davranış üzerindeki etkilerinin beraberinde baraj esnekliği, suyun sıkışabilirliği, rezervuar dip dalga emilimi, rezervuar kesiklik uzunluğu ve titreşim hareket frekansı gibi etkilerin sistemin dinamik davranışındaki tanımlanmasını sundular.

Soyluk vd. (2009), geçirgen ve geleneksel sınırlar (rijit, sabit ve ankastre) kullanarak kablolu köprülerin dinamik analizini yaptılar. Örnek model olarak, Güney Kore'de inşa edilmiş Jindo köprüsünü seçtiler. Analizleri, FLUSH bilgisayar programı ile yaptılar.

Geçirgen sınırların kullanılmasının yapının davranışını nasıl etkilediğini göstermek amacıyla geçirgen sınırların yapıdan 6m uzakta modellendiği örnekle, ankastre sınırların yapıdan 6m ve 80m uzakta modellenmesi durumunda elde edilen tepkilere ait grafikleri karşılaştırdılar. Karşılaştırmaları, köprü tabliyesinde oluşan eğilme momentleri, yer değiştirmeler, kule eğilme momentleri ve kule yer değiştirmeleri üzerine yaptılar. Karşılaştırmalar sonucunda, ankastre sınırların yapıdan uzak alınması ile elde edilen sonuçların, geçirgen sınırlar kullanılarak elde edilen sonuçlara yaklaştığını gözlemlədiler. Geçirgen sınırlı modelde kullanılan sonlu eleman sayısı ile birlikte işlem hacminin büyük oranda azaldığını ve geçirgen sınırların kullanılması ile gerçeğe daha yakın bir modelleme yapmanın mümkün olduğunu ifade ettiler.

Clouteau vd. (2011), bozuk zemin üzerinde inşa edilen maket yapılarda gerçekleştirilen yapı-zemin-yapı etkileşimi ve yapı-zemin etkileşimi deneyleri çerçevesinde sonlu eleman ve sınır eleman yöntemlerini birleştiren metotlar geliştirdiler. Zorlanmış ve doğal sismik yükler gibi çeşitli yükleme koşullarında tek ve yan yana yapılar, sığ ve derin temeller gibi çeşitli durumları denediler. Kazıdaki yapının pozisyonu, yükün doğrultusu, gömülü temellere ait zemin ve yapıların yan duvarları arasındaki temas niteliği gibi durumların, ilk zemin tabakasının rijitliği ile geliştirilen dinamik sistem davranışı üzerinde güçlü bir etkiye sahip olduğunu göstermediğini belirlediler. Yapı-zemin-yapı etkileşimi dikkate alındığında, çapraz etkileşimin yüzey temel durumundaki yapı davranışında küçük bir etkiye ve yapı üst kısmındaki davranışta önemli bir azalmanın beraberinde gömülü temellerde güçlü bir etkiye sahip olduğunu ortaya koydular.

Fattah vd. (2012), yapı-zemin etkileşim problemlerinin dinamik analizinde geçirgen sınırların geçerliliğini araştırdılar. Viskoz sönümleyiciler ile modellenen sonsuz sınırlar, 5 düğüm noktalı haritalanmış sonsuz eleman ile modellenen sonsuz sınırlar ve sonlu sınırlar (geleneksel sınırlar) gibi 3 durum üzerinde dinamik yük frekansı ve deprem yer değiştirme kayıtlarının yatay bileşenlerinin pik değerlerini içine alan birkaç parametrenin etkisini araştırdılar. Sabit sınırdaki gözlenen yansımaların geçirgen sınırlarda kaybolduğunu gözlemlədiler. Dinamik yükün yerleşimi ve tipi, kullanılan sonsuz sınırların önem durumlarına karar verilmesinde iki önemli kontrol faktörü olduğunu; deprem, bir taban hareketi olarak uygulandığında veya yüzeyde bir basınç olarak uygulandığında sonuçların büyük oranda etkilendiğini vurguladılar.

1.3. Tezin Kapsamı

Yapı-zemin dinamik etkileşiminin doğru bir şekilde belirlenebilmesi için yapılacak işlemlerin en başında uygun bir matematik modelin seçilmesi gelmektedir. Bu tip etkileşim problemlerinde sonsuz büyüklükteki zemin hacmi, sınırlı hacimde zemin ve sonlu elemanlarla temsil edilmek istenmektedir. Sonsuz hacmi sınırlı hacimle belirtmek, sistem enerjisini belirli bir bölgede sınırlamak anlamına gelmektedir. Bu durum, sistemde yayılan titreşim dalgalarının zemin sınır koşullarına bağlı biçimde yansımaya sebep olmakta ve yapıların dinamik davranışını etkilemektedir.

Zemin sınır koşullarına bağlı olarak değişen yapı dinamik davranışı, zemin sınırlarının yapıdan uzak seçilmesi veya zeminde özel sınırların kullanılmasıyla giderilebilir. Zemin sınırlarının yapıdan çok uzak seçilmesi durumunda, yayılan dalgalar sınırlara gelmeden malzeme iç sönümü sebebiyle absorbe edilecektir. 1970'li yılların başında teknolojik imkânların kısıtlı olması ve bu tip bir modelin çok miktarda sonlu eleman ve buna bağlı serbestlik derecesi gerektirmesi, yarı sonsuz zemin hacmini özel sınırlar kullanarak sınırlı bir zemin hacmine eşdeğer olarak gösterme ihtiyacını ortaya çıkarmıştır. Bu sebeple, sınırlara ulaşan titreşim dalgasını absorbe edecek özel sınırlar geliştirilmiştir.

Lysmer vd. (1969), yarı sonsuz ortamda dalga yayılımı ile oluşan enerji kaybını sınırlı bir ortamda gerçekleştirmek için viskoz sınırlar tanımladılar. Bu sınırlarda biçim değiştirme (kayma-S) dalgaları ve genleşme (boyuna-P) dalgaları ile yayılan enerjiyi absorbe etmek için viskoz sönümleyiciler kullandılar.

Dinamik etkiye maruz zemin yüzeyindeki yapıdan yayılan toplam enerjinin büyük bölümü Rayleigh yüzey dalgalarınca taşınmaktadır (Richart vd., 1970; Graff, 1975). Waas (1972), düzlem ve aksenal simetrik durumlar için bu yüzey dalgalarını taşıyan enerjiyi absorbe edecek ve yarı sonsuz ortamın sınırlı bölgeye etkisini ilgili dinamik rijitlik matrisleriyle içerecek geçirgen sınırlar tanımlamış ve ilgili hareket denklemlerini ortaya koymuştur. Tabakalı zemin ortamını düşey olarak keserek zemin hacmini önemli ölçüde azaltan bu sınırlar özellikle zemine gömülü ağır yapılar için birçok araştırmacı tarafından kullanılmıştır (Dumanoğlu, 1978). Lysmer vd. (1975) tarafından geliştirilen bilgisayar programıyla da sürekliliği sağlanmıştır.

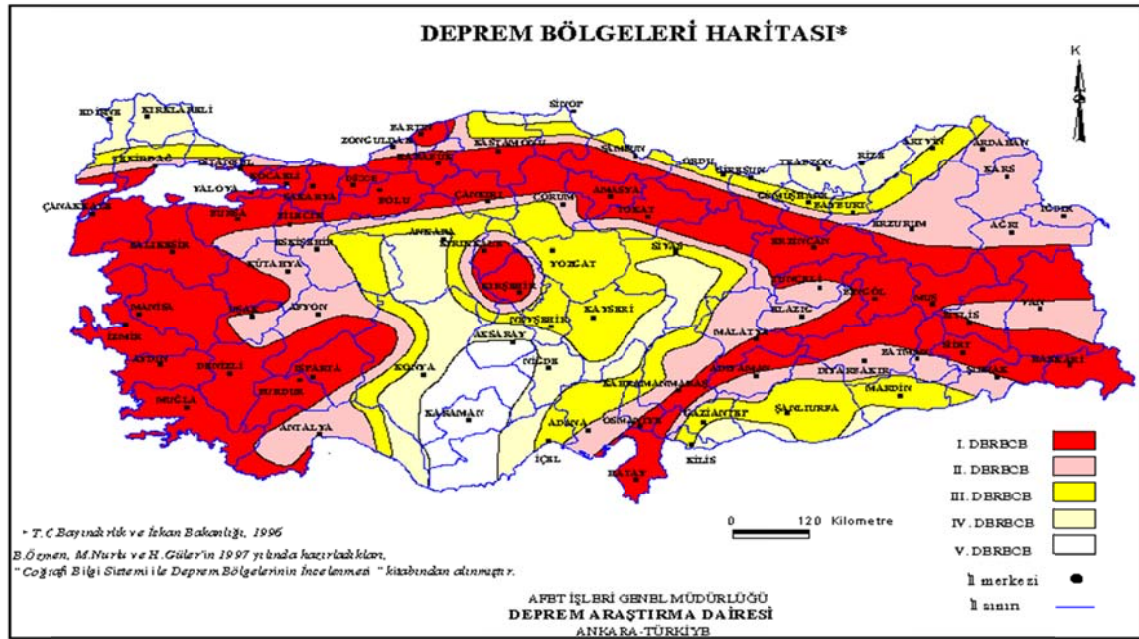
Bu tez çalışmasında, yapı-zemin etkileşim sistemlerinde sonsuz büyüklükteki zemin hacmi, sınırlı hacimde zemin ve sonlu elemanlarla temsil edilmiştir. Sınırlı hacimde

zeminin sınırlarında; rijit sınır, viskoz sınır ve geçirgen sınır kabulleri yapılarak yapı davranışı incelenmiştir. Sayısal uygulama olarak bir beton ağırlık baraj seçilmiştir.

1.4. Deprem Nedir?

Ülkemiz, dünyanın en etkin deprem kuşaklarından birinin üzerinde bulunmaktadır. Geçmişte ülkemizde birçok yıkıcı depremler olduğu gibi, gelecekte de oluşacak depremlerin büyük can ve mal kaybına sebep olacağı bir gerçektir.

Şekil 1.1'de verilen deprem bölgeleri haritasına göre, yurdumuzun %92'sinin deprem bölgeleri içerisinde olduğu, nüfusumuzun %95'inin deprem tehlikesi altında yaşadığı ve ayrıca büyük sanayi merkezlerinin %98'i ve Şekil 1.2'de de görüldüğü gibi barajlarımızın %93'ünün deprem bölgesinde bulunduğu bilinmektedir (URL-1, 2013).



Şekil 1.1. Türkiye deprem bölgeleri haritası

Depremlerin meydana gelişi, "Elastik Geri Sekme Kuramı" adı altında 1911 yılında Amerikalı Reid tarafından açıklanmış ve laboratuvarlarda denenerek ispatlanmıştır. Bu kurama göre, herhangi bir noktada zamana bağımlı olarak, yavaş yavaş oluşan birim deformasyon birikiminin elastik olarak depoladığı enerji, kritik bir değere eriştiğinde, fay düzlemi boyunca var olan sürtünme kuvvetini yenerek, fay çizgisinin her iki tarafındaki

kayaç bloklarının birbirine görelî hareketlerini oluşturmaktadır. Bu hareket, ani yer değiştirme hareketidir. Bu ani yer değiştirmeler ise bir noktada biriken birim deformasyon enerjisinin açığa çıkması, boşalması, diğer bir deyişle mekanik enerjiye dönüşmesi ve sonuç olarak yer katmanlarının kırılma ve yırtılma hareketi ile meydana gelmektedir (URL-2, 2013).



şekil 1.2. Türkiye'deki barajlar (DSİ, 2005)

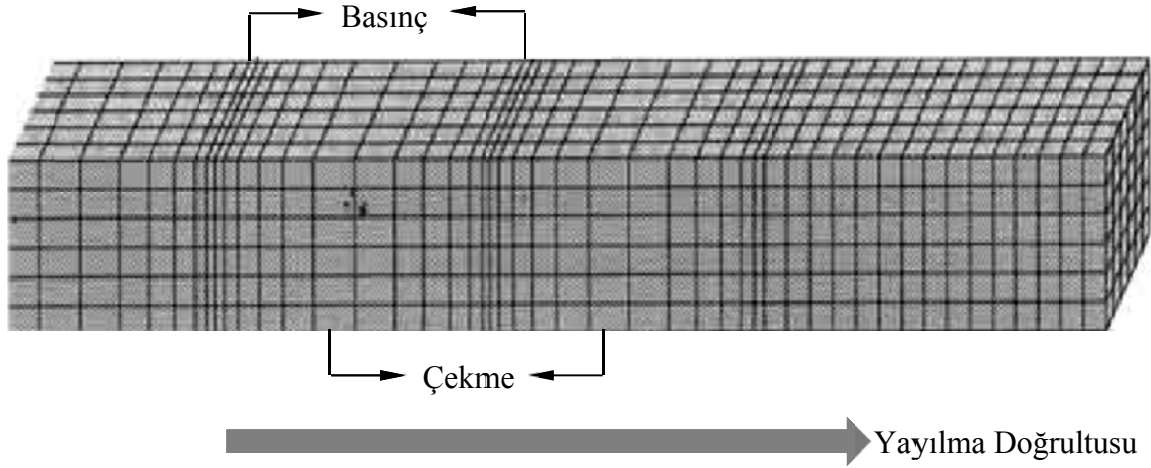
Bir kırık boyunca biriken enerjinin boşalması sırasında çevreye farklı sismik dalgalar yayılmaktadır. Bu dalgalar zemindeki hareket alanlarına göre, cisim dalgaları ve yüzey dalgaları olmak üzere ikiye ayrılmaktadır.

1.4.1. Cisim Dalgaları

Cisim dalgaları, kaynaktan bütün yönlere doğru yayılarak, yer kabuğu içerisinde seyahat ederler. Yer kabuğu derinliklerinde yüzeyine oranla daha hızlı yayılırlar ve zemin içerisindeki hareketlerine bağlı olarak basınç (P dalgası) ve kayma dalgaları (S dalgası) olmak üzere ikiye ayrılırlar.

1.4.1.1. P Dalgaları

Yer içerisinde en hızlı yayılan ve sismograflar tarafından ilk algılanan dalgalardır. Birincil (Primer), basınç ya da boyuna dalga olarak adlandırılmaktadırlar. Hızları, yayıldıkları zemin ve kaya ortamının yoğunluk ve elastik özelliklerine bağlıdır. Bu dalgalar nedeniyle dalganın yayılma doğrultusunda bulunan taneciklerin ileri-geri hareketinden dolayı yer basınç ve çekmeye maruz kalmaktadır (Şekil 1.3). Hareketi ses dalgasıyla aynıdır. Yaptıkları bir çeşit basınç-çekme hareketinden dolayı, geçtikleri ortamları hacimce değiştirmektedirler. Bu dalgalar, katı ve sıvı ortamların her ikisinde de ilerleyebilirler (URL-3, 2013).



Şekil 1.3. P Dalgaları

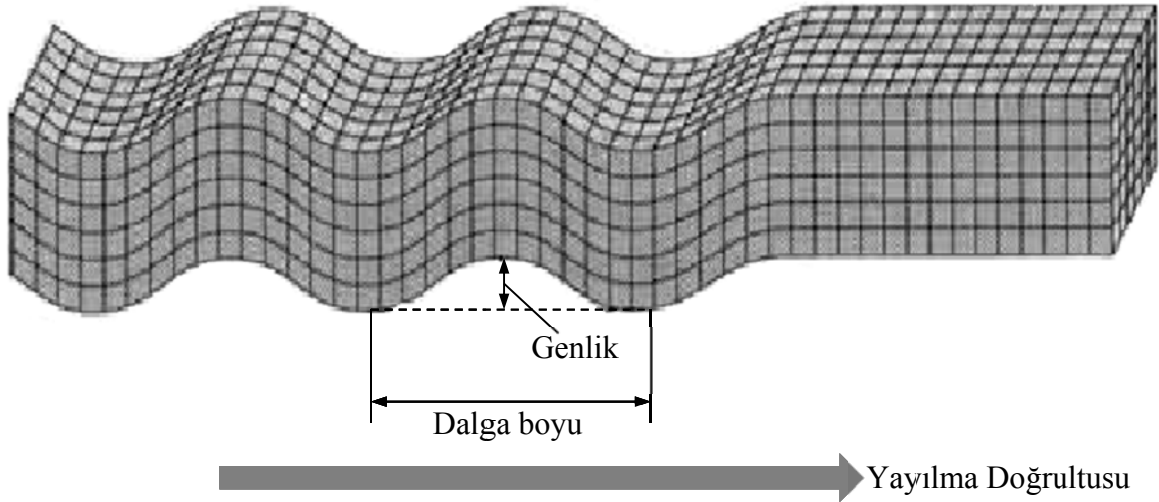
1.4.1.2. S Dalgaları

P dalgasından sonra sismograflara gelen ikinci cisim dalgasıdır. İkincil (sekonder), kayma veya enine dalga olarak da tanımlanır. Hızları, P dalgasının %60 ile %70'i kadardır ve P dalgaları gibi yayıldıkları zemin ve kaya ortamının yoğunluk ve elastik özelliklerine bağlıdır. S dalgaları yayılırken tanecikler, yayılma doğrultusuna dik, aşağı-yukarı veya sağdan-sola doğru titreşmektedirler (Şekil 1.4). Kesme ve burulma hareketi gibi yayılma özelliklerinden dolayı geçtikleri ortamda şekil bozukluğuna yol açmaktadırlar. Kesme kuvvetlerine karşı direnci olmayan, yani rijitliği sıfır olan sıvılar ve gazlar içerisinde

yayılamamaktadırlar. Bu nedenle sadece, katı ortam içerisinde ilerlemektedirler (URL-3, 2013).

Yatay ve düşey düzlemde olmak üzere iki bileşenleri vardır. Yayılma doğrultusuna dik, düşey düzlemdeki bileşenine SV, yatay düzlemdeki bileşenine ise SH denmektedir. SV bileşeni sismografların düşey bileşeninde, SH bileşeni ise diğer iki yatay bileşende (kuzey-güney ve doğu-batı) rahatlıkla gözlenebilmektedir.

Yer kabuğundaki kaya tabakalarında hareket ederken, bu dalgalar kaya tabakaları arasında yansıyabilmekte veya kırılabilir. Dalgalar, yansıdıklarında veya kırıldıklarında, enerjinin bir kısmı diğer dalga tiplerine dönüşmektedir. Yaygın bir örnek olarak, bir P dalgasının yukarı yönde ilerleyerek alüvyon bir tabakanın altına çarpmasıyla enerjisinin bir kısmı P dalgası olarak alüvyonlu tabakanın üst kısmına ve bir kısmı da S dalgasına dönüşerek yukarıya geçmektedir. Geri kalan kısmı da P ve S dalgası olarak geri yansımaktadır (URL-3, 2013).



Şekil 1.4. S dalgaları

1.4.2. Yüzeysel Dalgaları

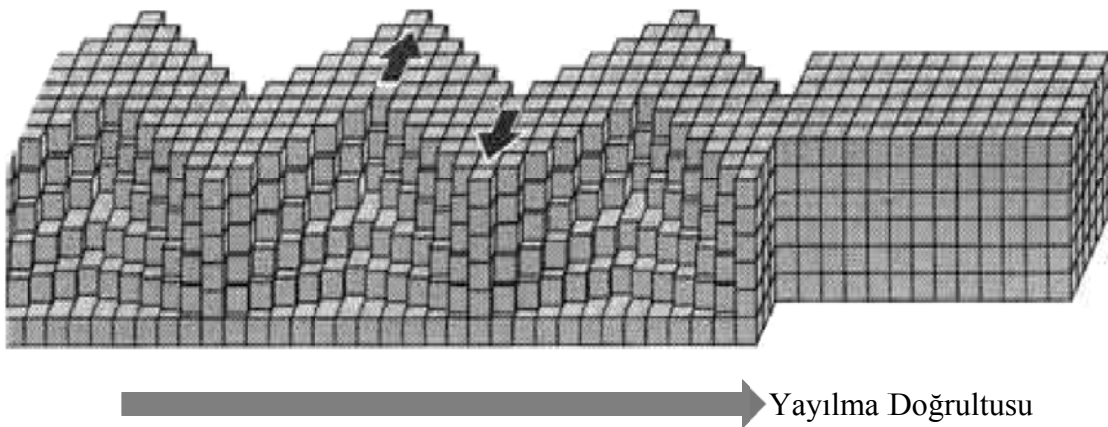
Sismik bir kaynaktan çıkarak yer kürenin serbest yüzeyi boyunca yayılan yüzeysel dalgaları, cisim dalgalarından daha yavaş olarak ilerler. Deprem veya patlatma gibi yüzeye yakın herhangi bir sismik kaynaklı enerjinin bir kısmı yüzeye yakın yarı sonsuz ortam

içerisinde dalgalar halinde yayılmaktadır. Bu tip dalgalar göl boyunca ilerleyen suyun dalgalanması şeklindedir. Yüzey dalgaları, cisim dalgalarından daha düşük frekans içeriğine sahiptir. Düşük frekansa ve büyük genliklere sahip olmalarından dolayı yüzey dalgaları birçok depremde yapılara zarar veren dalga türü olmaktadır (URL-3, 2013).

Love ve Rayleigh dalgası olmak üzere başlıca iki çeşit yüzey dalgası vardır.

1.4.2.1. Love Dalgaları

Love dalgaları, Rayleigh dalgalarından daha hızlıdır. Bu yüzden sismograflarda Rayleigh dalgalarından daha önce görülür ve "L" harfi ile gösterilir. Bu iki dalga arasındaki hız farkı sismograflar üzerinde gözlenemeyecek kadar küçüktür. Love dalgalarının oluşabilmesi için elastik ve yarı sonsuz bir yüzey katmanının bulunması gerekmektedir. Yer kabuğu bu görevi üstlenmektedir. Love dalgaları, yerin serbest yüzeyi ile yer kabuğunun alt sınırı arasında ardışık yansımalara uğrayan SH dalgalarıyla oluşmaktadır. Bu nedenle Love dalgalarının geçtiği ortamda tanecikler tamamen yayılma doğrultusuna dik yatay düzlemde, yani x-veya y-düzleminde titreşmektedirler (Şekil 1.5). Love dalgaları, yatay olarak yayılması sebebiyle özellikle yapıların temellerine zarar vermektedir (URL-3, 2013).

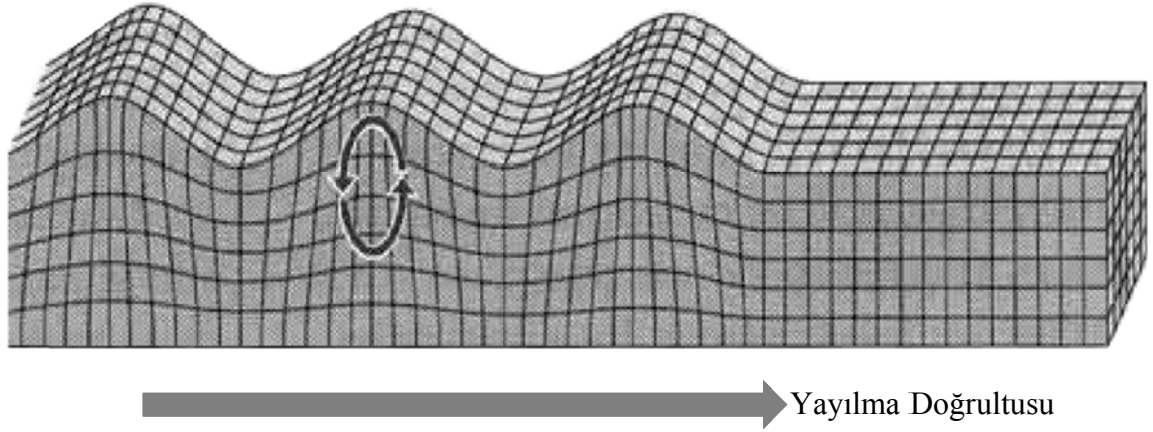


Şekil 1.5. Love dalgaları

1.4.2.2. Rayleigh Dalgaları

Rayleigh dalgaları, tıpkı bir su birikintisinde yayılan göl dalgalar gibi, yerin yüzeyi boyunca yuvarlanarak ilerleyen dalgalardır. Bu dalgalar " R "harfi ile gösterilmektedir.

Rayleigh dalgaları, yer kürenin yüzeyi boyunca yayılırken bir çeşit yuvarlanma hareketi yaptıklarından dolayı, geçtikleri ortam içerisinde bulunan tanecikler, yayılma doğrultusu boyunca ters bir elips hareketi meydana getirmektedirler (Şekil 1.6). Taneciklerin yapmış olduğu bu elips hareketi derinlere doğru gittikçe küçülmekte ve etkisini kaybetmektedir (URL-3, 2013).



Şekil 1.6. Rayleigh dalgaları

Rayleigh dalgalarının meydana gelebilmesi için serbest bir yüzey ile sınırlandırılmış yarı sonsuz esnek bir ortamın bulunması gerekmektedir. Sadece böyle bir ortam içerisinde, serbest yüzeye yakın bir yerde P ve S dalgalarının oluşumu sonucunda Rayleigh dalgaları meydana gelmektedir. Love dalgası suda ilerleyememekte ve yüzey sularını sadece belli bir noktaya kadar etkileyebilmektedir. Oysaki Rayleigh dalgaları, hareketinin düşey bileşeninden dolayı göller gibi yüzey sularını etkileyebilmektedir (URL-3, 2013).

1.5. Yapı-Zemin Etkileşim Problemlerinin Dinamik Analizinde Matematik Model Seçimi

Yapı-zemin etkileşim problemlerinde yapılacak işlemler dört adımda özetlenebilir:

- 1) Uygun matematik modelin seçilmesi

- 2) Yer sarsıntı hareketinin belirlenmesi
- 3) Belirlenen yer sarsıntı hareketine karşı sistemin dinamik davranışının analitik olarak saptanması
- 4) Bulunan sonuçların gerçek yapıda değerlendirilmesi

Deprem gibi dinamik etkiye maruz bir yapının davranışının zeminle olan etkileşimi dikkate alınarak matematik model seçimi en önemli adımdır. Ancak, yapının davranışını kesin olarak belirleyecek tek bir model seçmek mümkün olmamaktadır. Bu sebeple; aşağıdaki hususlar göz önüne alınarak en ideal matematik modele ulaşılabilir:

- 1) Zemin özelliklerinin derinliğe ve yer hareketinin şiddetine bağlı olarak değişebileceği dikkate alınmalıdır.
- 2) Zeminin enerji absorbe edebilme özelliği dikkate alınarak yarı sonsuz zemin ortamı dalga yayılımı açısından sınırlı hacime eşdeğer hale getirilmelidir.
- 3) Bir titreşim kaynağından çıkarak yayılan dalgaların genlikleri, zemin ortamının özelliklerine bağlı olarak değişebileceği dikkate alınmalıdır.
- 4) Yapı-zemin probleminin üç boyutlu özelliği gösterilebilmelidir.
- 5) Enerji yayılımının üç boyutlu olması yanında değişik özellikte ve birbirine yakın olarak inşa edilmiş yapılarda yapı-zemin-yapı dinamik etkileşimi dikkate alınabilmelidir.

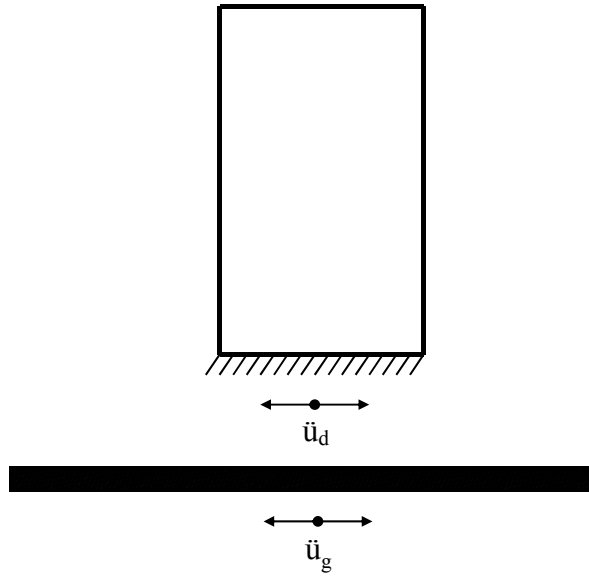
Yapı-zemin etkileşimine maruz sistemlerin çözümünde kullanılan matematik modeller üç grupta toplanabilir:

- 1) Yapı ve zemin etkileşimi ihmal edilerek yapı ve zemin iki ayrı sistem halinde düşünüldüğü matematik model.
- 2) Zeminin yapı davranışı üzerindeki etkisini dikkate almak için zeminin bir seri yay ve sönümleyicilerle temsil edildiği matematik model.
- 3) Yapı ve zemin sisteminin birlikte düşünüldüğü matematik model.

1.5.1. Ayrık Model

Bu matematik modelde (Şekil 1.7), yapı tabanındaki yer hareketi, üzerinde yapı bulunmayan zemin bölgesinin verilen dinamik etki için çözümü ile saptanmaktadır. Bu çözümde dinamik etkinin düşey doğrultuda bir boyutlu olarak yayılan biçim değiştirme dalgaları ile oluştuğu kabul edilmektedir. Yapı tabanı seviyesinde kaydedilen yer hareketi, tabanı ankastre kabul edilen yapının dinamik hesabında kullanılmaktadır. Bu tür bir

matematik model, barajlar gibi zemine kısmen gömülü ağır yapıların dinamik hesabında yapı-zemin etkileşiminin büyük oluşu sebebiyle doğru sonuçlar vermemektedir. Ayrıca, bu model zeminin tabakalı olmaması, zemin özelliklerinin kesit boyunca değişmesi ve zemin özelliklerinin tabandaki sınırdaki eğimlilik göstermesi durumunda da uygulanamaz (Dumanoglu, 1979).



Şekil 1.7. Yapı ve zemine ait ayırık matematik model

1.5.2. Yay ve Sönümleyicilerle Tanımlanan Zemin Modeli

Zemini yarı sonsuz bir ortam olarak kabul eden bu matematik modelde (Şekil 1.8), elastik yarı sonsuz yüzey üzerinde periyodik olarak titreşen rijit plakların çözümünden bulunan sonuçlardan yararlanılmaktadır. Kuvvetlerle yer değiştirmeler arasındaki bağıntılar, Bycroft (1956) tarafından titreşim frekanslarının bir fonksiyonu olarak bulunan karmaşık değerli rijitlik kat sayıları ile verilmektedir.

Bu matematik modelin uygulaması:

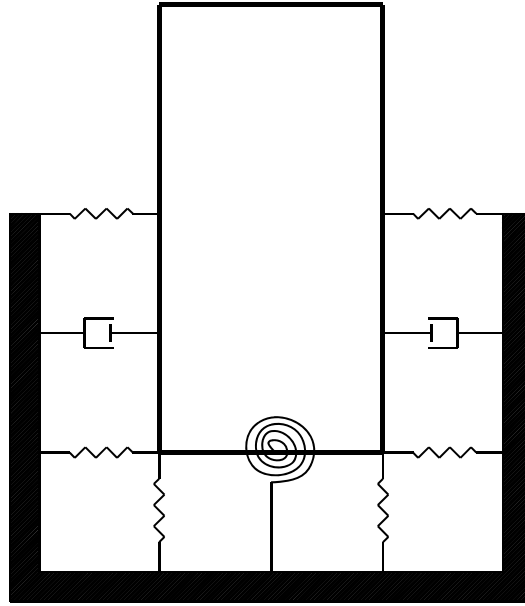
- 1) Yarı sonsuz zemin yüzeyi üzerine periyodik olarak titreşen plaklar için rijitlik ve sönüm özelliklerine ait ifadelerin bulunması

2) Bu ifadeleri kapsayan hareket denklemlerinin çözülmesi şeklinde iki aşamalı olarak gerçekleştirilmektedir.

Çözümün iki ayrı aşamada gerçekleşebilecek gruplara ayrılmasının hem çözüm tekniği hem de ekonomik oluşu bakımından yararları vardır. Ayrıca rijitlik ve sönüm özelliklerine ait ifadeler başlangıçta bir defa değişik şekilli plak türleri için bulunması durumunda bunlardan çeşitli yapı türleri için faydalanılmaktadır. Özellikle, yarı sonsuz zemin yüzeyine oturan rijit dairesel plaklar için bulunan çözümler Bycroft (1956) tarafından bir başlangıç olarak yapı sistemlerinin deprem analizi için kullanılmıştır. Çeşitli geometrik şekildeki temeller için zemini yalnız elastik bir ortam değil viskoelastik bir ortam olarak da düşünüp daha gerçekçi çözümler de yapılmıştır (Thomson, 1963). Ayrıca zemine gömülü rijit temel plakları için de rijitlik ve sönüm ifadeleri bazı varsayımlarla yaklaşık olarak tanımlanmıştır (Dumanoğlu, 1979).

Temel plaklarına ait rijitlik ifadeleri sönüm etkisini de içerecek şekilde karmaşık ifadelerle verildiğinden hareket denklemleri önce frekans alanı içinde bir dizi frekans için çözümlenip daha sonra Fourier dönüşümleri yardımıyla zaman alanına dönüşüm yapılmaktadır.

Zeminin yay ve sönümleyicilerle temsil edilmiş olduğu bu matematik modelin uygulaması, rijitlik ve sönüm ifadeleri ile bilinen temel plağının şekli ile sınırlandırılmıştır. Ayrıca zemine gömülü temeller için bu ifadeler kesin olarak saptanamamaktadır. Homojen olmayan durumlar içinde bütün çözümler tam olarak sağlanamamaktadır. Bunlara ek olarak bu modelin benimsendiği uygulamalarda, dinamik yer hareketinin temel seviyesindeki değerleri zemin yüzeyinden alınan değerler olarak kabul edilmektedir. Başka bir tanımla matematik modelin tabanına verilen yer hareketinin değeri serbest zemin olarak tanımlanan üzerinde yapı bulunmayan yüksüz zemin yüzeyinden alınan değerlerdir. Gerçekte yapı ve zeminin karşılıklı etkileşimi ve temelin zemin içine gömülü olduğu durumlarda yer hareketi serbest zemin yüzeyinden alınan değerlerden farklıdır. Özellikle bu farklılıklar zemine kısmen gömülü ağır yapılarda çok daha fazla olup hesaplarda göz önüne alınması gerekmektedir (Dumanoğlu, 1979).



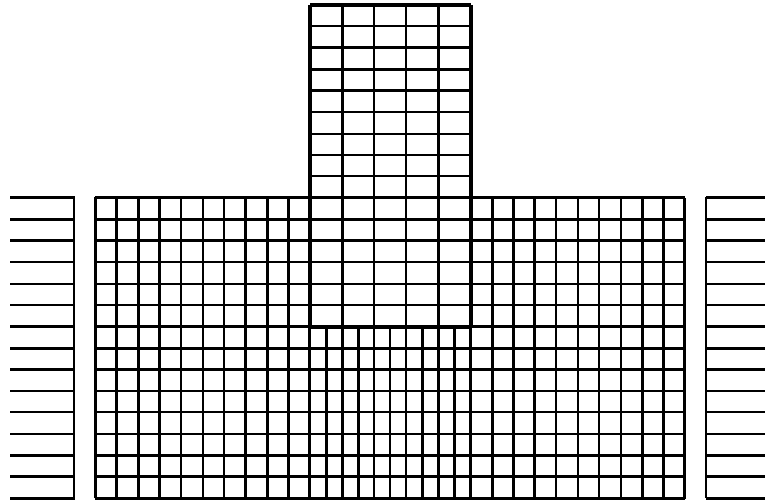
Şekil 1.8. Zeminin yapı davranışı üzerindeki etkilerinin yaylar ve sönümleyicilerle temsili

1.5.3. Sonlu Eleman Modeli

Yapı-zemin etkileşim sistemlerinin çözümünde kullanılan bu matematik model de (Şekil 1.9), yapı ve zeminden oluşan sistem ortak bir matematik model olarak tanımlanmakta ve sonlu eleman yöntemi ile çözüm yapılmaktadır. Son yıllarda mühendislik problemlerinin çözümünde bu yöntem daha çok tercih edilir hale gelmiştir. Bilindiği gibi sonlu eleman yönteminde sistem, sonlu küçük elemanlara bölünür ve her elemanın komşu elemanlarla yalnız düğüm noktalarında birleştiği kabul edilir. Eleman boyutlarının seçimine dikkat edilmesi halinde bu yöntemle bulunan sonuçlar kesin sonuçlara elde edilmektedir. Ayrıca, değişik sınır koşulları, geometrik özellikler ve malzeme bünyesindeki homojensizlikler bu yöntemde kolaylıkla dikkate alınabilmektedir.

Yapıların üzerinde inşa edildiği zemin bölgesinin sonsuz büyüklükte olması ve bu hacmin sınırlı büyüklükteki sonlu elemanlarla temsil edilmesi güçlüğü vardır. Lysmer vd. (1974), zemini sınırlı bir hacim olarak analizlerde dikkate aldılar. Bu tür bir yaklaşımda zemin hacminin büyümesi ile çözüm sonuçlarının doğruluk derecesi de artmaktadır. Teknolojik açıdan kısıtlı bir dönemde, çözüm zamanı açısından uygun olmayan bu durumu

bertaraf etmek için Vaish vd. (1973), yapı ve zeminden oluşan matematik modelin hareket denklemini yapı ve zemin grupları için ayrı ayrı ifade edilebilecek duruma indirgeyerek daha pratik çözüm yolları önermişlerdir. Gutierrez vd. (1977), zemine kısmen gömülü ağır yapıların deprem hesabında zemin için elde edilen dinamik rijitlik matrislerinin, hareket denklemlerinin çözümünde kolaylık sağladığını belirtmişlerdir. Aydınoglu (1977), zemin bölgesini belirli derinliğe kadar tabakalı ve lineer olmayan şekil değiştirmelerinin beklenebileceği kabulünü yaparak yalnız bu kısmı sonlu elemanlarla idealleştirmeyi ve bu derinlikten itibaren taban kayasına kadar olan kısmı da lineer elastik tek tabakalı sonsuz ortam olarak kabul eden bir matematik model önermiştir.



Şekil 1.9. Yapı-zemin etkileşim sisteminin sonlu elemanlarla temsili

Sonsuz büyüklükteki zemin hacmi sınırlı hacimdeki zemin ve sonlu elemanlarla temsil edilmek istenmektedir. Bu bağlamda, sonlu eleman yönteminin dinamik problemlere uygulanışı sınırlı hacimli problemlere uygulanışından farklıdır. Çünkü sınırsız hacmi sonlu hacimle belirtmek, sistem enerjisinin belirli bir bölgede sınırlandırılması anlamına gelmektedir. Bu durum ise dinamik sistemde dalgaların sürekli olarak sınır koşullarına bağlı olarak yansımaya neden olmakta ve bunun sonucu olarak yapay dinamik etkiler ortaya çıkmaktadır (Hadjian vd., 1975). Yapay dinamik etkiler, sınırların yapıdan uzak seçilmesi ve zeminde özel sınırlar kullanılması durumlarında giderilebilir.

Sınırların yapıdan çok uzakta seçilmesi ile yayılan enerji malzemenin iç sönüm etkisi ile sınırlara gelmeden absorbe edilecektir. Böylece seçilen matematik model gerçek bir

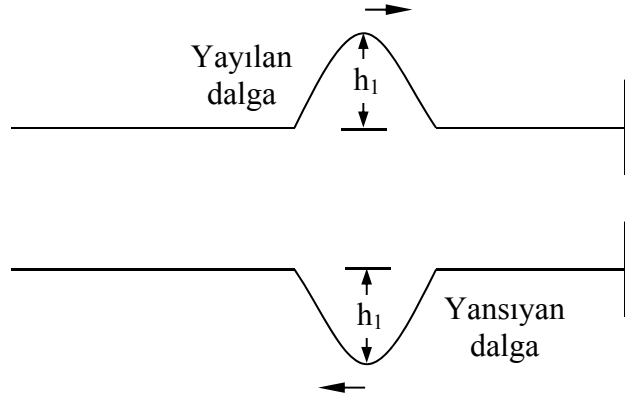
sistemin davranışını belirlemektedir. Ancak bu yaklaşım tarzı, çok sayıda eleman ve serbestlik derecesi oluşturacağından çözüm zamanı açısından uygun olmayacaktır. Bu durumun üstesinden gelmek için, yapı ve zemin gruplarını aynı anda içeren matematik modelde, yarı sonsuz zemin hacmi bazı özel sınırlar kullanılarak sınırlı bir hacme dinamik olarak eşdeğer kılma ihtiyacını ortaya çıkarmaktadır. Bu amaçla, sonsuz ortamda yayılan dalgalardaki enerjiyi absorbe edebilecek ve sonsuz hacmin sınırlı hacimle temsil edilmesini sağlayan sınırlar geliştirme ihtiyacı ortaya çıkmaktadır.

1.6. Çeşitli Sınır Şartları ve Dalga Yansıma Şekilleri

Bir ortam içerisinde bir dalganın hareketi, bulunduğu ortamın özelliklerine bağlı olarak şekillenir ve ortamın sınırlarına bağlı olarak çeşitli şekillerde yansır.

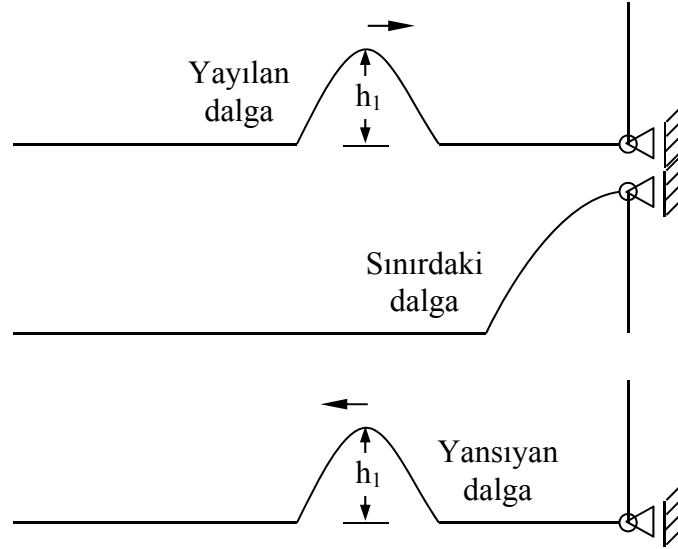
Yapı-zemin etkileşim sistemlerinin dinamik analizleri için oluşturulan analitik modellerde sonlu zemin hacminin sınırları, sistem içerisindeki dalga yayılımını değiştirmeyecek ve dalga sürekliliğini sağlayacak nitelikte olmalıdır. Bu bakımdan, yarı-sonsuz zemin ortamındaki dalga yayılımı ve yansıması bir tür sonsuz veya yarı sonsuz bir cismin dalga yayılımına benzetilmektedir. Bu amaçla yapılan çalışmalarda bir cismin sınırına gelen dalgaların, sınırların doğasına ya da sınır şartlarına bağlı olarak yansıdığı düşünülmektedir.

Birinci sınır şartı, rijit sınırdır. Rijit sınıra sahip bir sistemde belirli bir genlik ve hızla sınıra doğru ilerleyen dalgalar, rijit sınırdan yansıyarak 180° dönme ve aynı genlik ve hızla ters yönde ilerlemektedir (Şekil 1.10).



Şekil 1.10. Rijit sınıra sahip sistemde yayılan ve yansıyan dalgalar

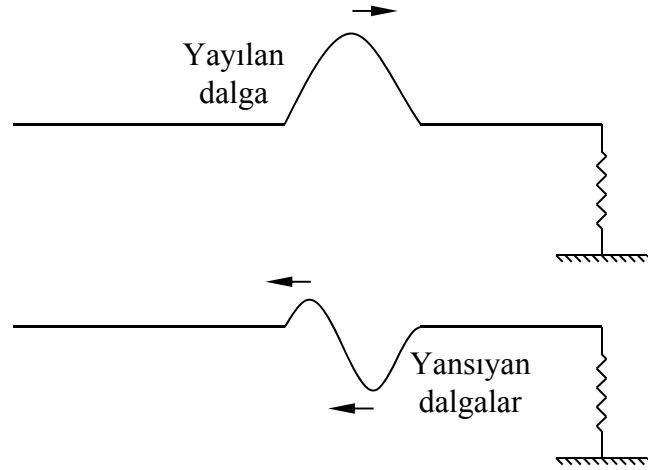
İkinci sınır şartı, hareketin yatay doğrultuda kısıtlandığı, düşey doğrultuda da serbest bırakıldığı sınır şartıdır. Belirli bir genlik ve hızla bu sınıra doğru ilerleyen dalgalar, sınırdan yansıyarak aynı genlik ve hızla geri dönmektedir (Şekil 1.11).



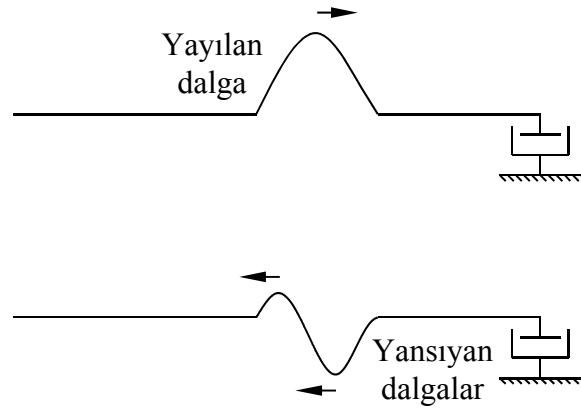
Şekil 1.11. Hareketin yatay doğrultuda kısıtlandığı, düşey doğrultuda serbest bırakıldığı sınıra sahip sistemde yayılan ve yansıyan dalgalar

Yay elemanı kullanılan ortam sınırına gelen belli hız ve genliğe sahip dalgalar, bu sınırdan yandıktan sonra yay elemanın sönüm değerine bağlı olarak iki farklı dalgaya dönüşmektedir. Farklı hız ve genliklere sahip bu dalgalardan biri 180° dönerek diğeri ise gelen dalga yolunu takip ederek yansımaktadır (Şekil 1.12).

Yay elemanı kullanılan sınıra sahip ortamdaki dalga yayılımında olduğu gibi, sönümleyici eleman kullanılan ortam sınırına gelen belli hız ve genliğe sahip dalgalar, bu sınırdan yandıktan sonra sönümleyicinin sönüm değerine bağlı olarak iki farklı dalgaya dönüşmektedir. Farklı hız ve genliklere sahip bu dalgalardan biri 180° dönerek diğeri ise gelen dalga yolunu takip ederek yansımaktadır (Şekil 1.13).

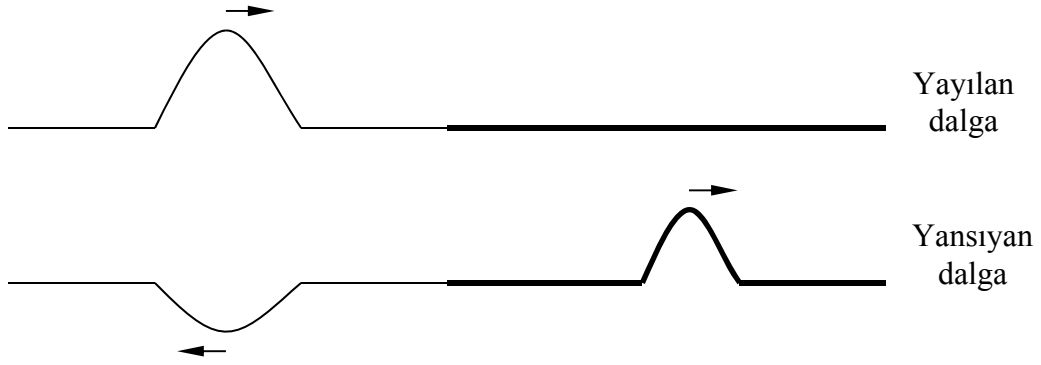


Şekil 1.12. Yay elemanlı sınıra sahip sistemde yayılan ve yansıyan dalgalar

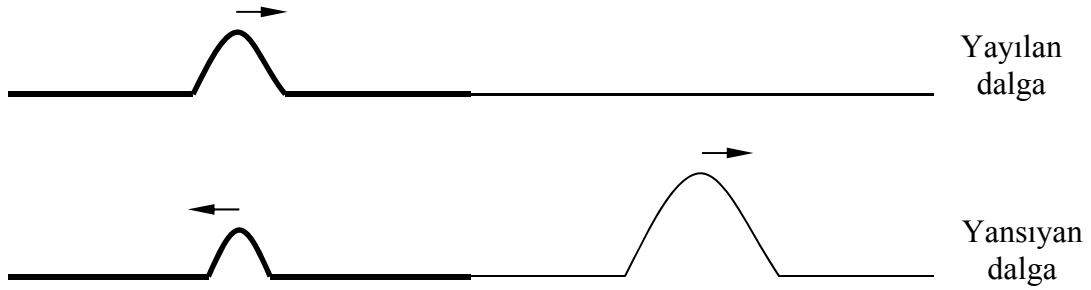


Şekil 1.13. Sönümleyici elemanlı sınıra sahip sistemde yayılan ve yansıyan dalgalar

Sınır şartlarına bağlı olarak değişim gösteren dalga yayılımı, ortam sürekliliğine bağlı olarak da büyük değişime uğramaktadır. Düşük yoğunluğa sahip bir ortamdaki yüksek yoğunluğa sahip ortama geçen dalgaların bir kısmı yoluna devam ederken bir kısmı Şekil 1.14'te görüldüğü gibi 180° dönerek ters yönde düşük yoğunluklu ortamda devam etmektedir. Aynı şekilde, yüksek yoğunluğa sahip bir ortamdaki düşük yoğunluklu bir ortama geçen dalgaların bir kısmı Şekil 1.15'te görüldüğü gibi yoluna devam etmekteyken, bir kısmı da 180° dönerek ters yönde yüksek yoğunluklu ortamda yoluna devam etmektedir.



Şekil 1.14. Düşük yoğunluklu ortamdan yüksek yoğunluklu ortama dalga yayılımı



Şekil 1.15. Yüksek yoğunluklu ortamdan düşük yoğunluklu ortama dalga yayılımı

1.7. Viskoz Sınırlar

Viskoz sınırlar Lysmer vd. (1969) tarafından, yarı sonsuz ortamda dalga yayılımından dolayı oluşan enerji kaybını sınırlı bir ortamda gerçekleştirmek için tanımlanmıştır. Çeşitli dinamik yapı-zemin etkileşim problemleri için bu süreçte birçok araştırmacı tarafından yapılan çalışmalarda kullanılmıştır (Fattah, 2012).

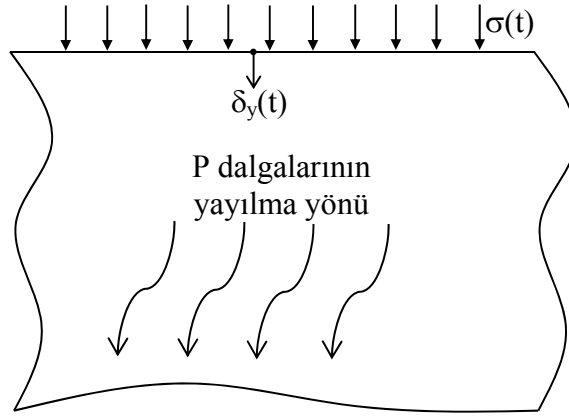
Bu düşüncenin esasını, çevresine yayılan bütün enerjiyi yutabilecek nitelikte sönümleyicinin kullanıldığı sınırlı bir ortamla temsil edilen yarı sonsuz ortam oluşturmaktadır. Bunun için düşey doğrultuda $\delta_y(t)$ yüzey yer değiştirmesi (veya $\sigma(t)$ düşey normal gerilmesi) verilen yarı sonsuz ortam (Şekil 1.16), sınırlarına sönüm katsayısı

$$C_n = A\rho V_p \quad (1)$$

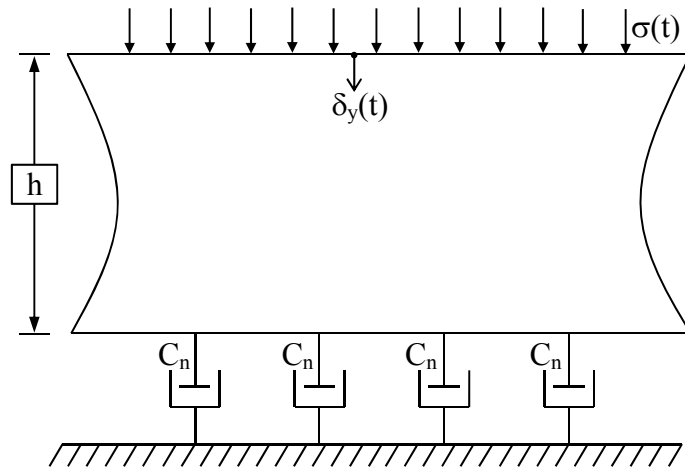
olan viskoz sönümleyici yerleştirilmiş sınırlı bir ortamla gösterilmektedir (Şekil 1.17). Bu sınırdaki normal gerilme,

$$\sigma(t) = \rho V_p \dot{\delta}_y(t) \quad (2)$$

ifadesi olmaktadır. Bu ifadelerde A , ρ , V_p ve $\dot{\delta}_y(t)$ sırasıyla, sönümleyicinin tanımlandığı düğüm noktasının şekil düzlemine dik yüzey alanı, birim hacim kütlesi, P dalgası hızı ve zamana göre düşey doğrultudaki yer değiştirmelerin türevi olan hızlardır.



Şekil 1.16. P dalgasına maruz yarı sonsuz ortam



Şekil 1.17. P dalgasına maruz ortamın viskoz sönümleyici elemanlarla idealleştirilmesi

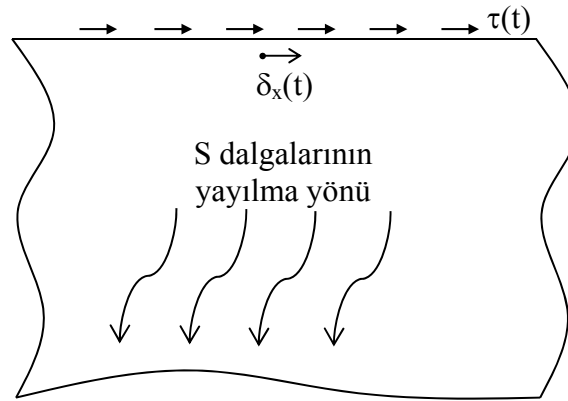
Benzer düşünce kayma dalgası içinde uygulanabilir. Yatay doğrultuda yüzeyde $\delta_x(t)$ yer değiştirmesi (veya $\tau(t)$ kayma gerilmesi etkisinde) bulunan yarı sonsuz ortam (Şekil 1.18), sınırlarına yatay doğrultuda sönüm katsayısı,

$$C_t = A\rho V_s \quad (3)$$

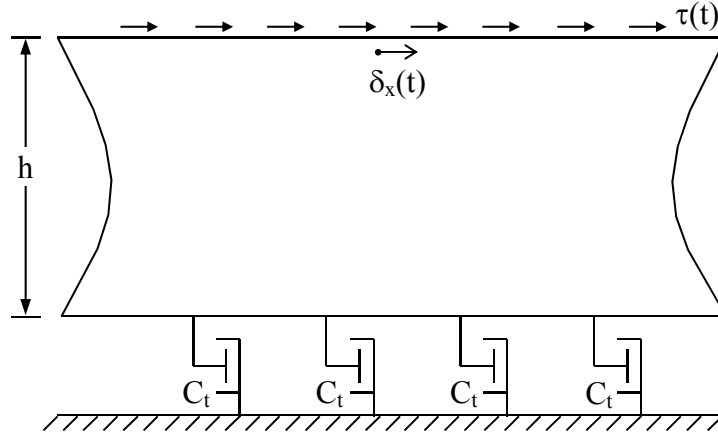
olan viskoz sönümleyici yerleştirilmiş sınırlı bir ortamla gösterilmektedir (Şekil 1.19). Bu sınırdaki kayma gerilmesi

$$\tau(t) = \rho V_s \dot{\delta}_x(t) \quad (4)$$

ifadesi olmaktadır. Bu ifadelerde V_s ve $\dot{\delta}_x(t)$ sırasıyla, S dalgası hızı ve zamana göre yatay doğrultudaki yer değiştirmelerin türevi olan hızlardır.



Şekil 1.18. S dalgasına maruz yarı sonsuz ortam



Şekil 1.19. S dalgasına maruz yarı sonsuz ortamın viskoz sönümleyici elemanlarla idealleştirilmesi

Bu ifadelerle, yapı-zemin etkileşim sisteminde zemin tabakaları içerisinde ilerleyen P ve S dalgaları sönümlenmekte ve sınırlı zemin ortamındaki etkileri ortadan kaldırılmaktadır.

1.7.1. Viskoz Sınırlı Yapı-Zemin Sisteminin Hareket Denklemi

Sonlu eleman metoduna göre analiz edilecek olan sistemin dinamik davranışını temsil eden hareket denklemi veya dinamik denge denklemi;

$$[M]\{\ddot{U}\} + [C]\{\dot{U}\} + [K]\{U\} = \{P\} - \{V\} \quad (5)$$

şeklinde yazılabilir. Burada $[M]$, $[C]$, $[K]$, $\{P\}$, $\{V\}$, $\{\ddot{U}\}$, $\{\dot{U}\}$ ve $\{U\}$ sırasıyla sistemin kütle matrisi, sistemin sönüm matrisi, sistemin rijitlik matrisi, sistemin yük vektörü, yatay ve düşey doğrultudaki viskoz sönüm kuvveti vektörü, sistemin ivme vektörü, sistemin hız vektörü ve sistemin yer değiştirme vektörüdür.

Burada viskoz sönüm kuvvetleri, sınır üzerinde tanımlanan viskoz sönümleyicinin etkili alanına bağlı olarak oluşan (2) ve (4) denklemlerinde ifade edilen gerilmeler üzerinden hesaplanmaktadır.

Kütle ve rijitlik matrisleri geçirgen sınırların hareket denklemlerinde de ifade edildiği gibi iki boyutlu dörtgen sonlu elemanın kütle ve rijitlik ifadelerinden oluşmaktadır.

Matematiksel olarak (5) denklemi, ikinci dereceden lineer diferansiyel denklem sistemini göstermektedir. Bu denklemlerin çözümü, sabit katsayılı lineer diferansiyel denklemlerin çözümü gibi elde edilebilir. Ancak, diferansiyel denklem sistemlerinin genel çözümü için uygulanan işlemler, eğer matrislerin dereceleri büyük ise çok zaman almaktadır (Akköse, 2004). Pratikte bu denklemlerin çözümü için etkili birçok yaklaşık sayısal metod bulunmaktadır. Burada direkt integrasyon tekniği olan Newmark metodu esas alınmaktadır.

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

1.7.1.1. Rayleigh Sönümü

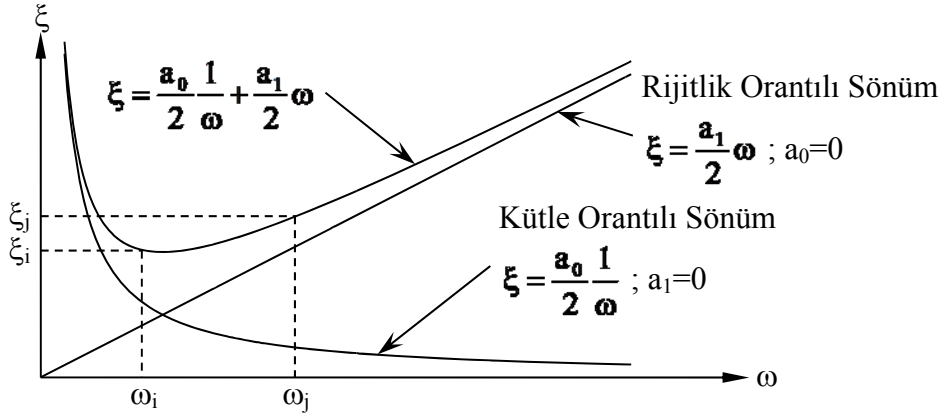
Direkt İntegrasyon Tekniğinin kullanıldığı analizlerde dikkate alınan Rayleigh sönümü,

$$[C] = a_0 [M] + a_1 [K] \quad (6)$$

şeklinde ifade edilmektedir (Chopra, 1995; Clough ve Penzien, 1993; Bathe, 1996). Burada $[C]$, $[M]$ ve $[K]$ sırasıyla sönüm matrisi, kütle matrisi ve rijitlik matrisidir. a_0 ve a_1 ise iki titreşim frekansı ile ilgili iki sönüm oranından elde edilen katsayılarıdır. Bu şekilde belirlenen sönüm matrisi, diyagonal bir matristir ve hesaplarda kolaylık sağlamaktadır. Rayleigh sönümünde, modal sönüm oranı ile doğal frekans arasında,

$$\xi_n = \frac{a_0}{2} \frac{1}{\omega_n} + \frac{a_1}{2} \omega_n \quad (7)$$

şeklinde bir bağıntı mevcuttur. Bu bağıntıdaki birinci terim, kütle orantılı sönüme sahip bir sistem için modal sönüm oranını, ikinci terim ise, rijitlik orantılı sönüme sahip bir sistem için modal sönüm oranını göstermektedir (Şekil 1.20).



Şekil 1.20. Rayleigh sönümü için sönüm oranı ile frekans arasındaki ilişki

Rayleigh sönüm katsayıları a_0 ve a_1 , i inci ve j inci modlardaki ξ_i ve ξ_j sönüm oranlarından belirlenebilir. Bu iki mod için (7) denklemi matris formda yazılırsa,

$$\frac{1}{2} \begin{bmatrix} 1/\omega_i & \omega_i \\ 1/\omega_j & \omega_j \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} a_0 \\ a_1 \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} \xi_i \\ \xi_j \end{Bmatrix} \quad (8)$$

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

$$a_0 = \xi \frac{2\omega_i\omega_j}{\omega_i + \omega_j} \text{ ve } a_1 = \xi \frac{2}{\omega_i + \omega_j} \quad (9)$$

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

1.7.1.2. Newmark Metodu

Direkt sayısal integrasyon, iki husus dikkate alınarak gerçekleştirilmektedir. Birincisi, herhangi bir t anında (5) denklemini sağlamaya çalışmak yerine, ayrı ayrı Δt zaman aralıklarında bu denklemi sağlamak amaçlanmaktadır. Bunun anlamı, basit olarak

atalet ve sönüm kuvvetlerini içeren statik dengenin, çözüm aralığı içerisinde her Δt zaman aralığında araştırılmasıdır. Bu nedenle, statik analizde kullanılan bütün çözüm tekniklerinin direk integrasyonda etkili bir şekilde kullanılabilirdiği gözükmektedir. İkinci husus, her Δt zaman aralığında yer değiştirme, hız ve ivme değerlerinin değişim göstermesidir. Bu değişim üzerinde yapılan kabulün şekli, çözümün doğruluğunu ve stabilitesini belirlemektedir (Akköse, 2004).

Çözümde $U_0, \dot{U}_0, \ddot{U}_0$ ile gösterilen, $t=0$ anındaki yer değiştirme, hız ve ivme vektörleri bilinmektedir. (5) denkleminin çözümü, $t=0$ ile $t=T$ zaman aralığında dikkate alınırsa, T çözüm zamanı n eşit zaman aralığına bölünür ($\Delta t = \frac{T}{n}$) . t anındaki çözüm bilindiği için, $t + \Delta t$ anındaki çözüm bulunabilir. Yani, başlangıç şartlarından hareketle, Δt zaman sonraki çözüm elde edilebilmektedir. Bu işlem, çözüm aralığı boyunca devam ettirilir.

1959 yılında, N.M. Newmark tarafından geliştirilen aşağıdaki formüller ile (5) ifadesi ile verilen dinamik denge denklemi adım adım çözülebilmektedir (Akköse, 2004).

$$\dot{U}_{i+1} = \dot{U}_i + [(1-\gamma)\Delta t] \ddot{U}_i + (\gamma\Delta t) \ddot{U}_{i+1} \quad (10a)$$

$$U_{i+1} = U_i + (\Delta t) \dot{U}_i + [(0.5-\beta)(\Delta t)^2] \ddot{U}_i + [\beta(\Delta t)^2] \ddot{U}_{i+1} \quad (10b)$$

Burada $U_i, U_{i+1}, \dot{U}_i, \dot{U}_{i+1}, \ddot{U}_i$ ve \ddot{U}_{i+1} sırasıyla, i anındaki yer değiştirme vektörü, $i+1$ anındaki yer değiştirme vektörü, i anındaki hız vektörü, $i+1$ anındaki hız vektörü, i anındaki ivme vektörü, $i+1$ anındaki ivme vektörüdür.

β ve γ parametreleri, Δt zaman aralığındaki ivmenin değişimini tanımlar. Ayrıca bu parametreler, kullanılan metodun stabilite ve doğruluk karakteristiklerini belirler. $\gamma = \frac{1}{2}$ ve

$\frac{1}{6} \leq \beta \leq \frac{1}{4}$ alınması metodun doğruluğu için tatminkardır (Akköse, 2004).

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

$$M\ddot{U}_i + C\dot{U}_i + KU_i = P_i - V_i \quad (11)$$

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

$$M\ddot{U}_{i+1} + C\dot{U}_{i+1} + KU_{i+1} = P_{i+1} - V_{i+1} \quad (12)$$

şeklinde yazılabilir. Eğer (12) denkleminde (11) denklemini çıkarılırsa artımsal hareket denklemini elde edilir.

$$M\Delta\ddot{U}_i + C\Delta\dot{U}_i + K\Delta U_i = \Delta P_i - \Delta V_i \quad (13)$$

Burada $\Delta\ddot{U}_i = \ddot{U}_{i+1} - \ddot{U}_i$, $\Delta\dot{U}_i = \dot{U}_{i+1} - \dot{U}_i$, $\Delta U_i = U_{i+1} - U_i$ şeklindedir. (10a) ve (10b) ifadeleri artımsal olarak düzenlenirse;

$$\Delta\dot{U}_i = (\Delta t)\ddot{U}_i + \gamma(\Delta t)\Delta\ddot{U}_i \quad (14a)$$

$$\Delta U_i = (\Delta t)\dot{U}_i + \frac{(\Delta t)^2}{2}\ddot{U}_i + \beta(\Delta t)^2\Delta\ddot{U}_i \quad (14b)$$

elde edilir. (14b) denkleminde $\Delta\ddot{U}_i$ çekilecek olursa;

$$\Delta\ddot{U}_i = \frac{1}{\beta(\Delta t)^2}\Delta U_i - \frac{1}{\beta(\Delta t)}\dot{U}_i - \frac{1}{2\beta}\ddot{U}_i \quad (15)$$

bulunur. (15) denklemini (14a) denkleminde yerine konursa,

$$\Delta\dot{U}_i = \frac{\gamma}{\beta(\Delta t)}\Delta U_i - \frac{\gamma}{\beta}\dot{U}_i + \Delta t\left(1 - \frac{\gamma}{2\beta}\right)\ddot{U}_i \quad (16)$$

elde edilir. (15) ve (16) denklemleri artımsal hareket denkleminde (13) yerine konur ve düzenlenirse ;

$$\left(K + \frac{\gamma}{\beta(\Delta t)}C + \frac{1}{\beta(\Delta t)^2}M\right)\Delta U_i = \Delta P_i - \Delta V_i + \left(\frac{1}{\beta(\Delta t)}M + \frac{\gamma}{\beta}C\right)\dot{U}_i + \left[\frac{1}{2\beta}M + \Delta t\left(\frac{\gamma}{2\beta} - 1\right)C\right]\ddot{U}_i \quad (17)$$

elde edilir. (17) denklemini şu şekilde de yazılabilir;

$$\hat{K}_i \Delta U_i = \Delta \hat{P}_i - \Delta \hat{V}_i \quad (18)$$

Burada ;

$$\hat{K}_i = K_L + \frac{\gamma}{\beta(\Delta t)} C + \frac{1}{\beta(\Delta t)^2} M \quad (19)$$

$$\Delta \hat{P}_i = \Delta P_i + \left(\frac{1}{\beta(\Delta t)} M + \frac{\gamma}{\beta} C \right) \dot{U}_i + \left[\frac{1}{2\beta} M + \Delta t \left(\frac{\gamma}{2\beta} - 1 \right) C \right] \ddot{U}_i \quad (20)$$

Görüldüğü gibi, dinamik hareket denkleminin, her Δt zaman aralığı içinde statik denge konumu sağlanarak çözümü elde edilmektedir. Burada adım adım çözümde ilk önce ΔU_i (18) denkleminde bulunur. Daha sonra, (15) ve (16) denklemleri yardımıyla $\Delta \dot{U}_i$ ve $\Delta \ddot{U}_i$ elde edilir. Bir sonraki adıma ait değerler,

$$\left. \begin{aligned} U_{i+1} &= U_i + \Delta U_i \\ \dot{U}_{i+1} &= \dot{U}_i + \Delta \dot{U}_i \\ \ddot{U}_{i+1} &= \ddot{U}_i + \Delta \ddot{U}_i \end{aligned} \right\} \quad (21)$$

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

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

1.8. Geçirgen Sınırlar

Sonsuz büyüklükte zemine sahip yapı-zemin etkileşim sistemi, sınırlı hacimde zemin ve sonlu elemanlarla temsil edilmek istenmektedir. Bu tip bir problem için sonlu

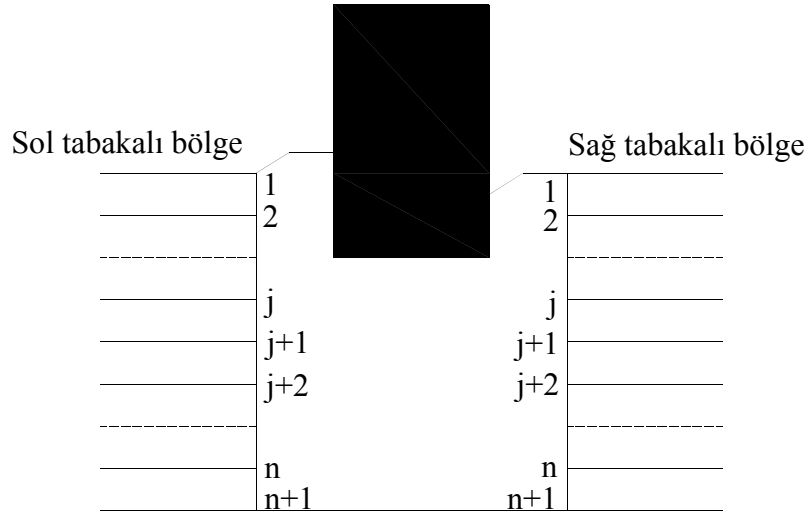
elemanların uygulanışı dinamik problemlere nazaran farklı olmaktadır. Çünkü sonsuz zemin hacmi, sonlu hacimde ifade edilerek sistem enerjisi belirli bir bölgede sınırlandırılmaktadır. Bu durum ise dinamik sistemde dalgaların sınır koşullarına bağlı bir biçimde yansımaya neden olmakta ve suni dinamik etkiler ortaya çıkarmaktadır. Waas (1972), düzlem ve eksenel simetrik durumlar için yüzey dalgalarını taşıyan enerjiyi absorbe edecek ve yarı sonsuz ortamın sınırlı bölgeye etkisini ilgili dinamik rijitlik matrisleriyle içerecek sınırlar tanımlamış ve ilgili hareket denklemlerini ortaya koymuştur. Sismik problemlere de Lysmer vd. (1972) tarafından uygulanan bu sınırlar, daha sonra ağır yapıların dinamik hesapları için Lysmer vd. (1975) tarafından benimsenerek yaygın olarak kullanılmıştır. Sonsuz zemin ortamının tabakalı olduğu kabul edilerek, tabakalı bölgenin başlangıcında kurulan ve sonsuz uzunlukta tabakaların hesap bölgesine olan dinamik etkilerini içeren bu sınırlar, geçirgen sınırlar olarak tanımlanmaktadır.

1.8.1. Tabaka Rijitlik Matrisinin Oluşturulması

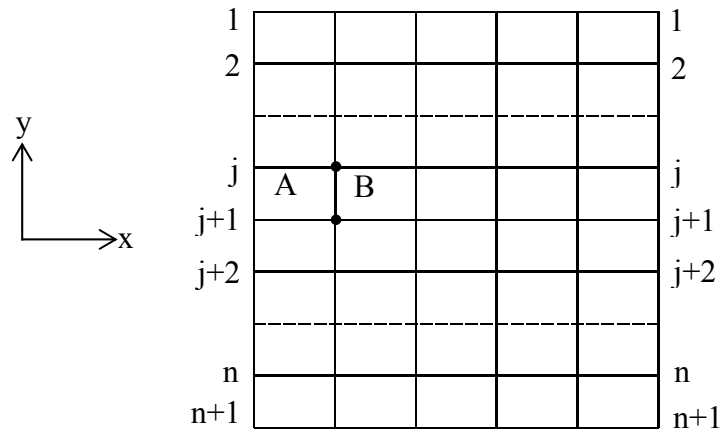
Şekil 1.21 ve Şekil 1.22' de gösterilen paralel tabakalı yarı sonsuz zemin ortamın düzlem şekil değiştirme durumuna maruz kaldığı ve her tabakanın birim hacim yoğunluğu ρ_j , kayma modülü G_j ve Lamé sabiti

$$\lambda_j = \frac{2G_j\nu_j}{1-2\nu_j} \quad (22)$$

olduğu düşünülmektedir. Burada ν_j , her tabakaya ait Poisson oranlarıdır. Tabakalı bölgede alınan sonlu elemanların genişlikleri h_j ve yükseklikleri d_j kabul edilmektedir.



Şekil 1.21. Yapı-zemin sisteminin kesiti



Şekil 1.22. Tabakalı zeminin sonlu elemanlara bölünüşü

Sonlu eleman yönteminde köşe yer değiştirmeleri ile kuvvetler arasında her eleman için şu bağıntı kullanılmaktadır;

$$\{P\}_e = [k]_e \{u\}_e \quad (23)$$

burada, $\{P\}_e$ kuvvet vektörü, $\{u\}_e$ köşe noktalara ait yer değiştirme vektörü ve $[k]_e$ eleman rijitlik matrisini göstermektedir. Bu çalışmada tabakalar, 4 düğüm noktalı yer değiştirme uyumlu izoparametrik dörtgen elemanlarla temsil edilmekte ve düğüm noktalarında yatay ve düşey doğrultuda iki lineer uç yer değiştirmesi bulunmaktadır. Düğüm noktalarında iki serbestlik derecesi bulunan dikdörtgen elemanların rijitlik matrisleri 8×8 boyutunda ve simetrik olmaktadır.

Yer değiştirmelerin eleman kenarları boyunca değişimi,

$$\begin{aligned} u_x &= c_1x + c_2y + c_3xy + c_4 \\ u_y &= c_5x + c_6y + c_7xy + c_8 \end{aligned} \quad (24)$$

ifadeleri ile verilmekte ve lineer olduğu kabul edilmektedir. Burada u_x ve u_y sırasıyla, yer değiştirmelerin yatay ve düşey doğrultulardaki bileşenleridir. c_i ($i=1, \dots, 8$) sabitlerdir. Yer değiştirme değişimi (24) ifadesi ile verilen dörtgen elemanlara ait rijitlik matrisi Bathe (1996) tarafından ifade edilmektedir .

Sürekli bir ortamda x-ekseni doğrultusunda ilerleyen, dalga yayılma hızı c , açısal frekansı ω olan düzlem Rayleigh dalgalarına ait x-ekseni doğrultusundaki yer değiştirme u_x ve y-ekseni doğrultusundaki yer değiştirme u_y şöyle yazılabilir (Schnabel vd., 1972),

$$\begin{aligned} u_x &= U_x(y)e^{i(\omega t - kx)} \\ u_y &= U_y(y)e^{i(\omega t - kx)} \end{aligned} \quad (25)$$

burada, $U_x(y)$, $U_y(y)$, ω , c ve $k = \frac{\omega}{c}$ sırasıyla, x-ekseni doğrultusundaki genlik fonksiyonu, y-ekseni doğrultusundaki genlik fonksiyonu, açısal frekans, sabit dalga yayılma hızı ve dalga sayısıdır. Şekil 1.16' da gösterilen tabakalı bölgedeki A elemanına ait köşe yer değiştirmeleri, A ve B elemanlarının ortak düğüm noktalarındaki yer değiştirmeler cinsinden (25) denklemini ile şöyle ifade edilebilmektedir.

$$\{u\}_A = e^{i\omega t} \begin{Bmatrix} U_{x,j+1} e^{ikh} \\ U_{y,j+1} e^{ikh} \\ U_{x,j+1} \\ U_{y,j+1} \\ U_{x,j} \\ U_{y,j} \\ U_{x,j} e^{ikh} \\ U_{y,j} e^{ikh} \end{Bmatrix} = [E] \{U\}_j \quad (26)$$

Bu ifadede kullanılan h , A ve B elemanlarının eşit genişliklerini göstermektedir. $[E]$ ise,

$$[E] = \begin{bmatrix} 0 & 0 & e^{ikh} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & e^{ikh} \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \\ 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ e^{ikh} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & e^{ikh} & 0 & 0 \end{bmatrix} \quad (27)$$

şeklinde ifade edilmektedir. j tabakasının üst ve alt sınırlarındaki yer değiştirme vektörü ise

$$\{U\}_j = \begin{Bmatrix} U_{x,j} \\ U_{y,j} \\ U_{x,j+1} \\ U_{y,j+1} \end{Bmatrix} \quad (28)$$

şeklinde verilmektedir. $U_{l,m}$ şeklinde ifade edilen yer değiştirme vektörünün bileşenlerinde m ve l sırasıyla, tabaka ve yer değiştirme yönünü tanımlamaktadır. Benzer yer değiştirme vektörü B elemanı için de yazılabilmektedir. Dalga yayılımı x -ekseninin pozitif yönünde olduğu düşünülürse,

$$\{u\}_B = \{u\}_A e^{-ikh} \quad (29)$$

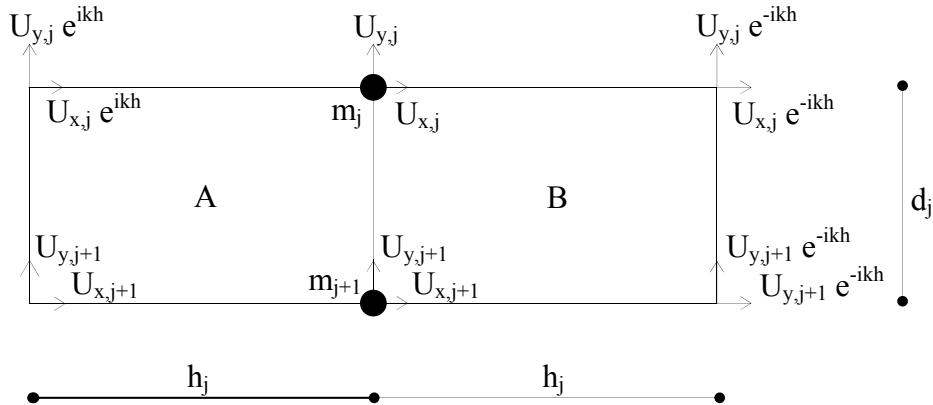
olarak elde edilir. $\{u\}_A$ vektörünün yerine (26) denklemindeki karşılığı yazılırsa,

$$\{u\}_B = [E]\{U\}_j e^{-ikh} \quad (30)$$

eşitliği bulunur. Böylece B elemanı için yer değiştirme vektörü yine j. tabakaya ait yer değiştirme vektörüne bağlı olarak saptanmış olmaktadır.

(26) ve (29) denklemlerinden anlaşılacağı gibi j tabakası içinde alınan sonlu elemanların köşe noktalarına ait yer değiştirme vektörü (26) denkleminde tanımlanan ve $\{U\}_j$ ile gösterilen j tabakasına ait yer değiştirme vektörüne bağlı olarak ifade edilebilmektedir.

A ve B elemanlarına ait yer değiştirme vektörleri bilindiğinde j tabakasında m_j ve m_{j+1} kütleleri ile iletilen kuvvetleri belirtmek mümkün olmaktadır (Şekil 1.23). m_j ve m_{j+1} kütleleri A ve B elemanlarının katkısı ile ortak düğüm noktaları j ve j+1. tabakalarda toplanmış kütlelerdir. Şekil 1.23'te j ve j+1 noktalarına etkiyen toplam statik kuvvetler o noktada birleşen elemanların rijitlik matrislerinin satırları ile yer değiştirme vektörlerinin çarpımlarının toplamı şeklinde aşağıdaki gibi ifade edilebilmektedir;



Şekil 1.23. A ve B elemanları uç yer değiştirmeleri

$$\begin{aligned}
Q_{x,j}^j &= [k_5]\{u\}_A + [k_7]\{u\}_B = ([k_5] + [k_7]e^{-ikh})[E]\{U\}_j \\
Q_{y,j}^j &= [k_6]\{u\}_A + [k_8]\{u\}_B = ([k_6] + [k_8]e^{-ikh})[E]\{U\}_j \\
Q_{y,j+1}^j &= [k_3]\{u\}_A + [k_1]\{u\}_B = ([k_3] + [k_1]e^{-ikh})[E]\{U\}_j \\
Q_{y,j+1}^j &= [k_4]\{u\}_A + [k_2]\{u\}_B = ([k_4] + [k_2]e^{-ikh})[E]\{U\}_j
\end{aligned} \tag{31}$$

Bu ifadede $Q_{x,j}^j$ ve $Q_{y,j}^j$ sırasıyla, j. tabakada m_j kütlesine yatay ve düşey doğrultuda etkiyen kuvvetleri, $Q_{y,j+1}^j$ ve $Q_{y,j+1}^j$ sırasıyla, j. tabakada m_{j+1} kütlesine yatay ve düşey doğrultuda etkiyen kuvvetleri ve $[k_r]$, dörtgen elemana ait rijitlik matrisinin r. satırını göstermektedir. (31) denklemini daha basit bir ifade ile

$$Q_j = [L]_j \{U\}_j \tag{32}$$

şeklinde yazılabilmektedir. Bir tabakaya ait rijitlik matrisi $[L]_j$, 4x4 boyutunda olmakla birlikte (31) denkleminde $[k_r]$ ve $[E]$ değerleri yerinde yazıldığında elde edilmektedir (Dumanoğlu. 1978).

1.8.2. Tabakalı Bölgenin Toplam Rijitlik Matrisi

Bir tabakaya ait rijitlik matrisi bilindikten sonra n tabakalı bölgeye ait toplam rijitlik matrisi, bu matrislerin yapı sistemlerine matris yöntem uygulaması ilkelerine göre birleştirilmesiyle elde edilmektedir.

n tabakalı bölgenin yer değiştirme vektörü

$$\{U\} = \begin{Bmatrix} U_{x,1} \\ U_{y,1} \\ \vdots \\ U_{x,n} \\ U_{y,n} \end{Bmatrix} \tag{33}$$

şeklinde ifade edilmektedir. Burada $U_{x,1}$ ve $U_{y,1}$, j. tabakanın üst sırasındaki x- ve y- eksenleri doğrultusundaki yatay ve düşey yer değiştirmelerdir. (33) denklemindeki değerler (6) denklemi ile verilen tabaka yer değiştirmelerini kapsamaktadır. Tabakalı bölgenin serbestlik derecesi $2n$ 'dir.

Kuvvet vektörü her tabakanın katkısını sağlayacak şekilde olmakta ve

$$\{Q\} = \begin{Bmatrix} Q_{x,1} \\ Q_{y,1} \\ \vdots \\ Q_{x,j} \\ Q_{y,j} \\ \vdots \\ Q_{x,n+1} \\ Q_{y,n+1} \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} Q_{x,1}^1 \\ Q_{y,1}^1 \\ \vdots \\ Q_{x,j}^{j-1} + Q_{x,j}^j \\ Q_{y,j}^{j-1} + Q_{y,j}^j \\ \vdots \\ Q_{x,j}^{j-1} + Q_{x,j}^j \\ Q_{y,j}^{j-1} + Q_{y,j}^j \\ \vdots \\ Q_{x,n+1}^n + P_x \\ Q_{y,n+1}^n + P_y \end{Bmatrix} \quad (34)$$

şeklinde yazılmaktadır. Burada $Q_{l,j}^m$ olarak gösterilen değer, j sınırına m tabakasından gelen ve l doğrultusunda etkiyen kuvveti göstermektedir. (34) denkleminde $Q_{x,j}^j$ olarak tanımlanan değerler (31) denklemi ile verilen kuvvet bileşenleridir. P_x ve P_y , tabana etkiyen dış kuvvetleri göstermektedir. (32), (33) ve (34) ifadeleri kullanılarak tabakalı bölgenin kuvvet vektörü, rijitlik matrisi ve yer değiştirme vektörü,

$$\{Q\} = [K]\{U\} \quad (35)$$

şeklinde yazılmaktadır. $[K]$ matrisi, 4×4 boyutundaki tabaka rijitlik matrisinin, $[L]_j$, birleşiminden meydana gelmekte ve 4×4 boyutunda olmaktadır.

1.8.3. Hareket Denklemi

Dinamik kuvvet etkisi altındaki tabakalı bölgenin j . tabaka sınırındaki kütlelere ait hareket denklemi Newton'un ikinci hareket kanunundan yararlanarak yatay ve düşey doğrultuda sırası ile

$$\begin{aligned} -\omega^2 u_{x,j-1} m_{j,j-1} - \omega^2 u_{x,j} m_{j,j} - \omega^2 u_{x,j+1} m_{j,j+1} &= -Q_{x,j} \\ -\omega^2 u_{y,j-1} m_{j,j-1} - \omega^2 u_{y,j} m_{j,j} - \omega^2 u_{y,j+1} m_{j,j+1} &= -Q_{y,j} \end{aligned} \quad (36)$$

yazılabilir. Bu ifadelerde ω , $m_{l,j}$, $u_{x,j}$, $u_{y,j}$, $Q_{x,j}$, $Q_{y,j}$ sırasıyla, açısal frekansı, j sınırındaki ivme nedeniyle l sınırındaki eş değer kütle (Bu tanım ancak kütlelerin yayılı olması halinde geçerli olmaktadır. Tekil kütle halinde $i \neq j$ ise $m_{l,j} = 0$), j sınırında x -ekseni doğrultusunda yer değiştirmeyi, j sınırında y -ekseni doğrultusunda yer değiştirmeyi, j sınırında x -ekseni doğrultusunda kuvveti, j sınırında y -ekseni doğrultusunda kuvveti göstermektedir. Her tabaka sınırında (36) hareket denklemi yazılıp matris notasyonu kullanılırsa,

$$-\omega^2 [M] \{u\} = -\{Q\} \quad (37)$$

denklemi elde edilir. Bu ifade de $-\{Q\}$, dinamik eylemsizlik kuvvetleri olup (34) denklemi ile verilen statik kuvvetlere eşittir. $[M]$, tabakalı bütün bölgenin kütle matrisidir. Tekil kütle halinde yalnız diagonal üzerinde değerleri olan ve yayılı kütle halinde diagonal dışı terimleri de kapsayan 4×4 boyutlu tabaka kütle matrislerinin birleştirilmesi ile elde edilmektedir. (35) ve (37) denklemleri kullanılarak tabakalı bölgenin hareket denklemi

$$([K] - \omega^2 [M]) \{u\} = \begin{Bmatrix} 0 \\ P \end{Bmatrix} \quad (38)$$

şeklinde yazılmaktadır. Burada P , (34) denkleminin son iki satırında bulunan, tabana etkiyen kuvvetlerdir.

Gerçekte sürekli bir sistem olan tabakalı bölgenin sonlu elemanlarla temsil edilebilen bir bölgeye özdeş olduğu varsayımı yapılmaktadır. Bunun için sonlu elemanların x-ekseni doğrultusundaki genişliği (h) ile y-ekseni doğrultusundaki yüksekliği (d) en büyük frekansa ait dalga boyuna oranla küçük değerler alması gerekmektedir. Genellikle bu uzunlukların dalga boyunun (λ) beşte birinden küçük olması gerektiği Kuhlemeyer vd. (1973) tarafından ortaya konmuştur.

Seçilen sonlu elemanların genişliklerinin, h, yeterince küçük seçilmesi halinde sonlu eleman kullanılarak elde edilen çözüm sonuçları sürekli ortam için kesin çözümlere yaklaşmaktadır. h değerinin limite sıfıra yaklaşması halinde (38) denklemi ve bunun kapsamında bulunan tabaka rijitlik matrisi, $[L]_j$, sistem rijitlik matrisi, $[K]$, tabaka kütle matrisi, $[M]_j$ ve sistem kütle matrisinin, $[M]$, limit değerlerinin bulunması gerekmektedir. Bu değerler,

$$\begin{aligned}\lim_{h \rightarrow 0} [L]_j &= h [L^0]_j \\ \lim_{h \rightarrow 0} [K] &= h [K^0] \\ \lim_{h \rightarrow 0} [M]_j &= h [M^0]_j\end{aligned}\tag{39}$$

ifadeleri ile mümkündür. Burada,

$$[L^0]_j = \begin{bmatrix} 2adk^2 + \frac{6b}{d} & 2ipk & adk^2 - \frac{6b}{d} & 2iqk \\ -2ipk & 2bdk^2 + \frac{6a}{d} & 2iqk & bdk^2 - \frac{6a}{k} \\ adk^2 - \frac{6b}{d} & -2iqk & 2qdk^2 + \frac{6b}{d} & -2ipk \\ -2iqk & bdk^2 - \frac{6a}{d} & 2ipk & 2bdk^2 + \frac{6a}{d} \end{bmatrix}\tag{40}$$

eşitliği $[L]_j$ matrisinin her teriminin $h \rightarrow 0$ için limitlerinden elde edilmektedir.

Tekil ve yayılı kütle matrisleri sırasıyla,

$$[M^0]_j = \frac{\rho d}{2} \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (41a)$$

$$[M^0]_j = \rho d \begin{bmatrix} \frac{1}{3} & 0 & \frac{1}{6} & 0 \\ 0 & \frac{1}{3} & 0 & \frac{1}{6} \\ \frac{1}{6} & 0 & \frac{1}{3} & 0 \\ 0 & \frac{1}{6} & 0 & \frac{1}{3} \end{bmatrix} \quad (41b)$$

olmaktadır. (38) denklemi yerine (39) denklemi ile verilen ifadeler kullanılıp bütün tabakalı bölgenin hareket denklemi olarak,

$$([K^0] - \omega^2 [M^0]) \{U\} = \begin{Bmatrix} 0 \\ P \end{Bmatrix} \quad (42)$$

yazılmaktadır. Ancak burada $[K^0]$ matrisini oluşturabilmek için $[L^0]_j$ matrisinin

$$[K^0]_j = [L^0]_j = k^2 [A]_j + ik [B]_j + [G]_j \quad (43)$$

gibi üç ayrı matristen oluşabileceğini düşünmek gerekmektedir. Burada $[A]_j$, $[B]_j$ ve $[G]_j$ matrisleri, her j tabakası için $[L^0]_j$ matrisinden yararlanarak dörtgen elemanın rijitlik matrisinde tanımlı değerlerine bağlı olarak,

$$[A]_j = \frac{d_j}{6} \begin{bmatrix} 2(2G_j + \lambda_j) & 0 & 2G_j + \lambda_j & 0 \\ 0 & 2G_j & 0 & G_j \\ 2G_j + \lambda_j & 0 & 2(2G_j + \lambda_j) & 0 \\ 0 & 2G_j & 0 & G_j \end{bmatrix} \quad (44a)$$

$$[B]_j = \frac{1}{2} \begin{bmatrix} 0 & G_j + \lambda_j & 0 & G_j + \lambda_j \\ -(G_j + \lambda_j) & 0 & G_j + \lambda_j & 0 \\ 0 & G_j + \lambda_j & 0 & -(G_j + \lambda_j) \\ -(G_j + \lambda_j) & 0 & G_j + \lambda_j & 0 \end{bmatrix} \quad (44b)$$

$$[G]_j = \frac{1}{d_j} \begin{bmatrix} G_j & 0 & -G_j & 0 \\ 0 & G_j + \lambda_j & 0 & -G_j + \lambda_j \\ -G_j & 0 & G_j & 0 \\ 0 & -(2G_j + \lambda_j) & 0 & 2G_j + \lambda_j \end{bmatrix} \quad (44c)$$

şeklinde elde edilmektedir. (42) denklemi ile verilen bütün tabakalı bölgenin hareket denklemi, (45) denklemi ile verilen her tabakaya ait matrislerin matris yöntem ilkelerine uygun olarak birleştirilmesi ile elde edilmektedir. Tabana tesir eden herhangi bir dış kuvvet yoksa (42) denklemi (43) denkleminde yararlanarak organize edildiğinde,

$$(k^2[A] + ik[B] + [G] - \omega^2[M])\{U\} = \{0\} \quad (45)$$

şeklinde yazılabilir. Bu ifadedeki matrisler bütün tabakalı bölgeye aittir. (45) denklemi açık olarak tabakalı bölgeye ait sonlu eleman genişliğine bağlı olmadığı görülmektedir. Buradan sonlu elemanlarla temsil edilen tabakalı bölgenin hareket denklemlerinin sürekli bir ortamınki ile aynı olduğu anlaşılmaktadır. Bu hareket denklemi tabakalı düşey bir düzlem içerisinde yatay ve düşey doğrultuda deplasman bileşenleri olan Rayleigh dalgalarına ait hareket denklemidir. (45) denklemi ilk defa Lysmer (1970) tarafından Rayleigh dalgaları için olan tekil kütle matrisleri için çıkartılmış ve Love ve Rayleigh dalgalarına daha genel olarak Waas (1972) tarafından uygulanmıştır (Dumanoğlu, 1978). (45) denkleminin tanımlandığı hareket şekil düzlemi içinde olmakta ve düzlem içindeki her

noktanın yatay ve düşey doğrultuda olmak üzere iki serbestlik derecesi vardır. Bu denklemdeki $[A]$, $[G]$, $[M]$ matrisleri simetrik olup bant genişlikleri dördttür. Her sınırda iki bilinmeyen olduğundan bütün sistemdeki bilinmeyenlerin sayısı $2n$ 'dir (n tabaka sınır sayısı).

Bu denklemin çözümünü seçilen her ω değeri için yapmak mümkün olmaktadır. ω açısal frekansı seçildiğinde $2n \times 2n$ boyutunda $[C]$ ifadesi

$$[C] = [G] - \omega^2 [M] \quad (46)$$

şeklinde edilmektedir. (46) denklemi basit olarak

$$(k^2 [A] + ik [B] + [C]) \{U\} = \{0\} \quad (47)$$

elde edilmektedir. (47) denkleminin çözümünün olması için katsayılar determinantının sıfıra eşit olması gerekmektedir.

$$|k^2 [A] + ik [B] + [C]| = \{0\} \quad (48)$$

Bu denklemin çözümü Rayleigh dalgalarına ait dalga sayısı, k_s , ve mod şekillerini $\{U\}_s$, vermektedir.

(47) ve (48) denklemi özel değerler denklemi olup gerçel veya kompleks değerli olmak üzere denklemin $4n$ çözümü vardır. (48) denkleminin çözümü ile bulunacak $4n$ tane özel değerlere, k_s , karşılık (47) denkleminde yine aynı sayıda özel vektörler $\{U\}_s$ hesaplanmaktadır. Bu çözümler arasında $2n$ tanesi sağdaki tabakalı bölge içinde sağa doğru yayılan dalgalara, $2n$ tanesi de sol taraftaki tabakalı bölgede sola doğru yayılan dalgalara ait olmaktadır. k_s değerinin yalnız sanal değer olması hali bir dalga yayılması değil (25) denkleminde görüleceği gibi zamana bağlı gittikçe genliği azalan bir titreşim hareketi olmaktadır.

1.8.4. Tabakalı Bölgenin Dinamik Rijitlik Matrisi

Tabakalı bölge içindeki yer değiştirmeler özel değer ve özel vektörlere bağlı olarak,

$$\{u\} = \sum_{s=1}^{2n} \{U\}_s e^{i(\omega t - k_s x)} \quad (49)$$

şeklinde yazılmaktadır. Tabakalı bölgenin başlangıç sınırını düşey y eksenini gösterip, bu sınır üzerinde $x=0$ olacaktır (Şekil 1.22). Bu sınır boyunca tabakalara ait u_j ($j=1, \dots, 2n$) yer değiştirmelerini (49) denkleminde $x=0$ yazarak zaman faktörünü denklemlere katmadan $2n$ tane özel değerlin lineer kombinasyonu olarak

$$\{u\}^R = \sum_{s=1}^{2n} \{U\}_s a_s = [U] \{a\} \quad (50)$$

şeklinde yazılmaktadır. Burada $[U]$ özel vektörlerden oluşan matristir ve $2n \times 2n$ boyutundadır. $\{a\}$ ise mod katılma faktörlerinden, a_s , oluşmaktadır. (50) denkleminde mod katılma faktörünü yer değiştirmelere bağlı olarak,

$$\{a\} = [U]^{-1} \{u\}^R \quad (51)$$

şeklinde elde etmek mümkün olmaktadır. $x=0$ sınırı boyunca düğüm noktalarına etkiyen kuvvetler, şekil değiştirmeler ve gerilmeler göz önünde bulundurularak hesaplanmaktadır. Yatay kuvvetler normal gerilmeler nedeniyle, düşey kuvvetlerde sınırlar boyunca etkiyen kayma gerilmelerinden oluşmaktadır. Düzlem şekil değiştirme halinde şekil değiştirme ile gerilmeler arasında

$$\begin{aligned} \sigma_x &= (\lambda + 2G) \varepsilon_x + \lambda \varepsilon_y \\ \sigma_y &= \lambda \varepsilon_x + (\lambda + 2G) \varepsilon_y \\ \tau_{xy} &= G \gamma_{xy} \end{aligned} \quad (52)$$

bağıntıları vardır. $x=0$, başlangıç sınırındaki şekil değiştirmeler (25) denklemi ile verilen yer değiştirmelerin türevlerinden elde edilmektedir. Denklemlerde ortak olan zaman faktörü $e^{i\omega t}$, düşülerek şekil değiştirmeler

$$\begin{aligned}\varepsilon_x &= \frac{du_x}{dx} = -ik_s U_x(y) \\ \varepsilon_y &= \frac{du_y}{dy} = \frac{dU_y(y)}{dy} \\ \gamma_{xy} &= \frac{du_x}{dy} + \frac{du_y}{dx} = \frac{dU_x(y)}{dy} - ik_s U_y(y)\end{aligned}\quad (53)$$

şeklinde elde edilmektedir. $U_x(y)$ ve $U_y(y)$ her tabaka içinde lineer olarak değiştiği varsayımı yapıлып (52) ve (53) denklemlerinden yararlanarak gerilmeler, j . tabaka sınırındaki yer değiştirmelerine bağlı olarak her özel değer için elde edilmektedir (Dumanoğlu, 1978). Bu gerilmelerle dengede olan ve tabaka sınırlarına etkileyen tekil kuvvetler, gerilmelerin tabakalar içerisinde lineer olarak değiştiği göz önünde bulundurulurken hesaplanmaktadır. Sınırlara etkileyen bu kuvvetler her tabaka için matris formunda

$$\begin{Bmatrix} p_{x,j} \\ p_{y,j} \\ p_{x,j+1} \\ p_{y,j+1} \end{Bmatrix} = \sum_{s=1}^{2n} (i[A]_j \cdot k_s + [D]_j) \begin{Bmatrix} U_{x,j} \\ U_{y,j} \\ U_{x,j+1} \\ U_{y,j+1} \end{Bmatrix}_s \alpha_s \quad (54)$$

şeklinde gösterilmektedir. Burada tanımlanan $[A]_j$ matrisi (43) denklemindeki tabaka matrisinin aynısıdır. s indisi hangi özel vektöre ait olduğunu göstermektedir.

$[D]_j$ matrisi ise,

$$[D]_j = \begin{bmatrix} 0 & \frac{1}{2}\lambda_j & 0 & -\frac{1}{2}\lambda_j \\ \frac{1}{2}G_j & 0 & -\frac{1}{2}G_j & 0 \\ 0 & \frac{1}{2}\lambda_j & 0 & -\frac{1}{2}\lambda_j \\ \frac{1}{2}G_j & 0 & -\frac{1}{2}G_j & 0 \end{bmatrix} \quad (55)$$

şeklinde olmaktadır. Aynı sınırdaki birleşen iki tabakanın katkısı ile tabakalı bölgenin $x=0$ eksenini boyunca tabaka sınırlarına etkiyen kuvvetleri, (54) denkleminde yararlanarak matris formunda

$$\{p\}^R = (i[A][U][K] + [D][U])\{a\} \quad (56)$$

şeklinde yazılmaktadır. Burada $\{p\}^R$ sağ tabakalı bölgeye etkiyen kuvvetleri (Şekil 1.24), $[K]$ dalga sayılarını kapsayan diagonal matris, $[U]$ özel vektörler matrisi, $[A]$ ise $[A]_j$ tabaka matrislerinden oluşan ve bütün tabakalı bölgeye ait matristir. (56) denkleminde katılma faktörleri matrisi, $\{\alpha\}$, yerine (51) denklemini yazılırsa

$$\{p\}^R = [R]\{U\}^R \quad (57)$$

ifadesi elde edilir. Burada $[R]$,

$$[R] = i[A][U][k][U]^{-1} + [D] \quad (58)$$

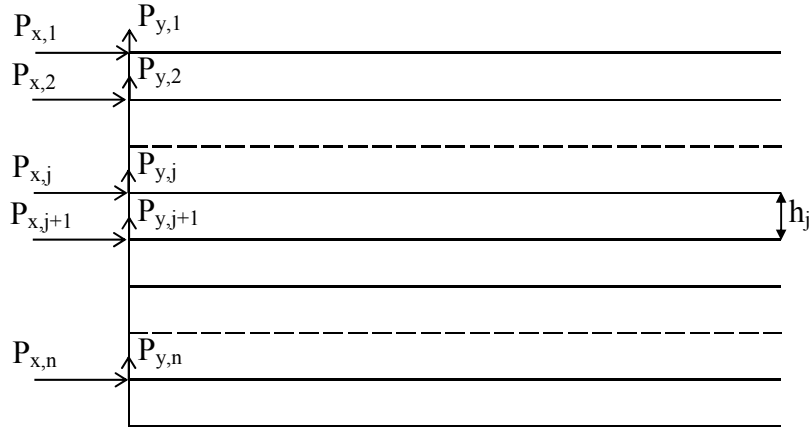
ifadesine eşit olmaktadır. $2n \times 2n$ boyutunda olan R matrisi yarı sonsuz sağ tabakalı bölgeye ait dinamik rijitlik matrisidir. Bu matris $x=0$ sağ sınırı boyunca düğüm noktalarına etkiyen

kuvvetlerle düğüm noktaları yer değiştirmeleri arasındaki bağıntıyı veren simetrik bir matristir.

Şekil 1.21 ve Şekil 1.22’ de görülen sol tabakalı bölgeye ait dinamik rijitlik matrisi, $[L]$, sağ tabakalı bölgeye ait dinamik rijitlik matrisine, $[R]$, benzer biçimde bulunabilmektedir. Sağ ve sol tabakalı bölgeler arasındaki fark sadece eksen takımlarına göre olan pozisyonlarıdır. Bu nedenle sol tabakalı bölgedeki dalga yayılması sağ tabakalı bölge için kullanılan dalga denklemlerine benzemektedir. Sol tabakalı bölge için dalga sayıları ile yatay yer değiştirmeler ve yatay kuvvetlere ait bileşenlerin işaretleri seçilen eksen takımına ve sağ tabakalı bölgeye göre ters olduğu düşünülürse, $[L]$ matrisi $[R]$ matrisinden kolayca elde edilebilmektedir. Bunun için $[R]$ matrisinde yatay kuvvetleri düşey yer değiştirmeye veya düşey kuvvetleri yatay yer değiştirmelere bağlayan terimlerin işaretleri değiştirilirse $[L]$ matrisi bulunmuş olmaktadır. $[L]$ matrisini kullanarak sol tabakalı bölgeye etkileyen kuvvetleri sol tabakalı bölgenin yer değiştirmelerine bağlı olarak

$$\{p\}^L = [L]\{u\}^L \quad (59)$$

yazılabilmektedir.



Şekil 1.24. Sağ tabakalı bölge ve kuvvetlerin yerleşimi

Böylece, bir defa sağ ve sol tabakalı bölge için dinamik rijitlik matrisi bilinince bu matrisin terimleri sınırlı zemin bölgesi üzerine etkileyen, tabaka uzunluğu sonsuz, komşu

bölgelerden gelen ve dalga yayılımı ile oluşan kuvvetleri tanımlamaktadır. Yapının üzerine oturduğu zemin, tabakalı olduğu gibi herhangi karışık formda da olabilmektedir. Çünkü dinamik rijitlik matrisleri göz önüne alınan alt yapının formundan tamamen bağımsız olarak elde edilmiştir. Sonlu elemanlarla temsil edilecek bu bölgenin dışında kalan sağ ve sol bölgelerin tabakalı olma varsayımı yapılmıştır. Özellikleri farklı bölgeleri yatay tabakalar halinde idealleştirmek mümkün olmaktadır.

1.8.5. Geçirgen Sınırların Yapı-Zemin Etkileşimi Sonlu Eleman Modeline Uygulanışı

Sonlu eleman yönteminde sürekli ortam küçük sonlu bölgeler ayrılarak her küçük bölgenin komşu bölgeye köşe noktalarında bağlı olduğu düşünülmektedir. Eleman sınırlarına etkiyen gerilmelerle düğüm noktaları ile iletilen kuvvetlerin dengede oluşu bütün sistem için çözülmesi gereken lineer denklem takımını vermektedir. Bu denklem takımının çözümü ile bilinmeyen olarak seçilen düğüm noktalarına ait yer değiştirmeler bulunmaktadır. Yer değiştirmelerden de uygun bağıntılarla gerilmeler ve iç kuvvetler hesaplanmaktadır.

Sonlu eleman yönteminin yapı-zemin etkileşim sistemlerine uygulanışı genellikle

- Sınır koşullarının ve matematik modelin tanımı
- Rijitlik, kütle ve sönüm matrislerinin kurulması
- Hareket denklemleri ve çözümü

şeklinde üç adımda gerçekleştirilmektedir.

1.8.5.1. Eleman Boyutu

Dumanoğlu (1978), genellikle sonlu eleman yönteminin dinamik problemlere uygulandığındaki en büyük sakıncalardan birinin seçilecek eleman boyutlarına bağlı bilgisayar gereksinimi, çözüm maliyeti olduğunu belirtmiş ve yaptığı hata analizleri sonucunda

$$\lambda_{\min} = \frac{V_s}{f_{\max}} \quad (60)$$

ifadesini elde etmiştir. Burada λ_{\min} , V_s , f_{\max} sırasıyla en küçük dalga boyu, ortama ait kayma dalgası hızı, en büyük frekans olmaktadır. Ortalama kütle matrisi kullanıldığında eleman yüksekliğinin, (h),

$$h \leq \frac{\lambda_{\min}}{5} \quad (61)$$

denklemindeki gibi en küçük dalga boyuna bağlı olarak seçilmesi durumunda hata limitleri düşük tutulacağını ortaya koymuştur.

Zemin bölgesi içerisinde deprem hareketi düşey doğrultuda yayılan kayma dalgalarından oluştuğu kabul edildiğinden yalnız düşey boyutlara ait sonlu eleman yüksekliğindeki limitler araştırılmıştır. Derinlerdeki zemin tabakalarına ait kayma dalgası hızları genellikle daha büyük olduğundan bu bölgeler için eleman yüksekliklerini daha büyük seçmek mümkün olmaktadır. Ayrıca yapıdan yatay doğrultuda uzaklaştıkça yer değiştirmeler azalacağından daha büyük boyutta elemanlar bu bölgeler seçilebilmektedir (Dumanoğlu, 1978).

1.8.5.2. Eleman Rijitlik Matrislerinin Oluşturulması

Kullanılacak olan yapı-zemin etkileşim sistemi, bir düzlem şekil değiştirme problemi olarak dikkate alındığında, sistemdeki bütün yer değiştirmeler x- ve y-eksenlerinin tanımlanmış olduğu düşey şekil düzlemi içerisinde meydana gelmektedir ve şekil düzlemine dik doğrultudaki yer değiştirmeler ihmal edilmektedir. Bu doğrultuda kullanılacak olan dörtgen elemanların düğüm noktalarında yatay ve düşey doğrultudaki yer değiştirmelere ait iki serbestlik derecesi vardır.

Problemin çözümünde kullanılmak üzere genel şekilde bir dörtgen sonlu elemana ait rijitlik matrisi u_x ve u_y sırasıyla, yatay ve düşey yer değiştirmelerin lineer olduğu varsayımı ile

$$\begin{aligned} u_x &= c_1x + c_2y + c_3xy + c_4 \\ u_y &= c_5x + c_6y + c_7xy + c_8 \end{aligned} \quad (62)$$

şeklinde tanımlanmaktadır. Lineer yer değıştirme fonksiyonları için dörtgen elemana ait rijitlik matrisi hacim üzerinde alınan integrale,

$$[k]_e = \int_v [B]^t [D][B] dv \quad (63)$$

şeklinde elde edilmektedir. Burada $[B]$, şekil değıştirmelerini düğüm noktalarındaki yer değıştirmelere bağlayan bir matristir. Poisson oranı ve elastisite modülü gibi malzeme özelliklerinin bir fonksiyonu olan $[D]$ matrisi,

$$\{\sigma\} = [D]\{\varepsilon\} \quad (64)$$

ifadesindeki gibi gerilmeleri şekil değıştirmelere bağlayan bir kare matristir.

1.8.5.3. Eleman Kütle Matrisinin Oluşturulması

Dörtgen sonlu elemanlara ait yayılı kütle matrisi hacim üzerine integral ile

$$[m]_y = \int_v [A]^t [A] \rho dv \quad (65)$$

şeklinde verilmektedir (Bathe, 1996). Bu ifadedeki $[A]$, kenarlar üzerindeki herhangi noktanın yer değıştirmelerinin düğüm noktalarındaki yer değıştirmeleri bağlayan ve terimleri x ve y koordinatlarının bir fonksiyonu olan bir matristir. ρ ise birim hacim kütesidir. Yayılı kütle matrisinde diagonal dışında farklı terimler vardır. Pek çok dinamik hesaplarda sonlu elemanların kütesinin düğüm noktalarında toplandığı kabulü yapılmıştır. Bu düşünce ile geliştirilen tekil kütle matrisinin yalnız diagonal üzerinde sıfırdan farklı terimleri vardır.

Bu çalışmada eleman kütle matrisleri için yayılı ve tekil kütle matrislerinin aritmetik ortalamasından elde edilen ortalama kütle matrisi kullanılmaktadır. Dumanoğlu (1978), yaptığı hata analizlerinde ortalama kütle matrisinin kullanılması halinde hata değışiminin daha az olduğunu ortaya koymuştur. Ayrıca, yalnız yayılı kütle matrisinin kullanılması durumunda (rijit tabanın derinde olması durumu), daha küçük sonlu elemanlar

kullanmak gerekmektedir ve benzer özellik tekil kütle matrisleri içinde geçerli olmaktadır. Bu nedenle kütle matrisi her elemanın yayılı ve tekil kütle matrislerine bağlı olarak

$$[m]_e = \alpha [m]_y + (1-\alpha)[m]_t \quad (66)$$

şeklinde hesaplanmaktadır. Burada $[m]_e$, $[m]_y$, $[m]_t$, α sırasıyla, dörtgen elemanlara ait ortalama kütle matrisi, dörtgen elemana ait yayılı kütle matrisi, dörtgen elemana ait tekil kütle matrisi ve 0-1.0 arasında değişen bir büyüklüktür.

1.8.5.4. Sönüm Matrisinin Oluşturulması

Sönüm problemi yapı dinamiği alanında henüz kesin olarak açıklanamayan bir problemdir. Malzeme özelliklerine bağlı olarak seçilen viskoz sönüm, dinamik problemlerin çözümünde kullanılan yöntemlerinde seçimini etkilemektedir.

Yapı-zemin etkileşim sistemlerinin dinamik hesabında zemine ait sönüm oranlarının bölgelere bağlı olarak değişeceği ve yapıya ait sönüm oranından çok daha büyük değerler alacağından tek bir sönüm oranı ile bütün sisteme ait sönümü belirtme zorluğu ortaya çıkmaktadır. Bu mahzuru gidermek için Idris vd. (1970), her elemana ait sönüm matrisini $[c]_e$ eleman rijitlik matrisi $[k]_e$ ve kütle matrisine $[m]_e$ bağlı olarak,

$$[c]_e = a [m]_e + b [k]_e \quad (67)$$

şeklinde ifade etmişlerdir. Burada a ve b sabit değerlerdir. Sönüm matrisinin bu şekilde seçilmesi ile bütün sistem içerisinde her eleman için ayrı sönüm değerleri alınması mümkün olmaktadır. (67) denkleminde yararlanarak herhangi bir moda ait sönüm oranı

$$\beta = \frac{1}{2} \left(\frac{a}{\omega} + b\omega \right) \quad (68)$$

şeklinde hesaplanmaktadır. Bu ifadeden görüldüğü gibi sönüm matrisi, rijitlik ve kütle matrislerinin lineer bir kombinasyonu olarak seçildiğinde sönüm oranları frekansın bir fonksiyonu olmaktadır. a ve b sabitleri genellikle

$$\begin{aligned} a &= \beta_1 \omega_1 \\ b &= \frac{\beta_1}{\omega_1} \end{aligned} \quad (69)$$

olmaktadır. Burada ω_1 ve β_1 sırasıyla ilk doğal frekans ve ilk moda ait sönüm oranıdır. Bu değerlerden yararlanarak (69) denklemi

$$\beta = \frac{1}{2} \left(\frac{\omega}{\omega_1} + \frac{\omega_1}{\omega} \right) \beta_1 \quad (70)$$

şekline dönüşmektedir.

(70) denklemi ile tanımlanan sönüm oranları, yapı-zemin sistemlerinin ilk doğal açısal frekansları ω_1 küçük olduğundan yüksek frekans değerleri için gerçek değerlerden daha büyük sönüme neden olacaktır.

Yüksek frekans bölgesi içerisinde çözümü istenen yapı türleri için belirtilen bu sorunu gidermek için kompleks kayma modülü ve elastisite modülü tanımlanarak malzeme sönümü yapı rijitlik matrisi içinde ifade edilmiştir. Bu amaçla, kompleks elastisite modülü E^* ve kompleks kayma modülü G^* için

$$\begin{aligned} E^* &= E \left(1 - 2\beta^2 + 2i\beta\sqrt{1 - 2\beta^2} \right) \\ G^* &= G \left(1 - 2\beta^2 + 2i\beta\sqrt{1 - 2\beta^2} \right) \end{aligned} \quad (71)$$

ifadesi ortaya konmuştur (Dumanoğlu, 1978).

(71) denklemi basit harmonik hareket yapan dinamik sistemlerde modların süperpozisyonu yöntemi ile bulunan sonuçlarla, sönümü içeren kompleks rijitlik ifadesi kullanarak bulunan sonuçların aynı olması ilkesine göre çıkartılmıştır. Bu ifadelerdeki E ve G elastisite ve kayma modülü olup β da sönüm oranıdır. $i = \sqrt{-1}$ olan sanal bir sayıdır. (71) formülleri, sönüm oranının malzeme içinde bölgeden bölgeye değişmesi halinde her bölge için seçilecek farklı β , E veya G değerleri alınarak kullanılmaktadır. Seed vd. (1970), zemine ait kayma modülü ve sönüm oranını zemin içindeki kayma şekil

değiştirmesinin bir fonksiyonu olarak düzgün eğrilerle tanımlamışlardır. Sönüm oranının küçük olması halinde (71) denklemi basitleştirilerek,

$$\begin{aligned} E^* &= E(1+2i\beta) \\ G^* &= G(1+2i\beta) \end{aligned} \quad (72)$$

şeklinde kullanılmaktadır. Elastisite ve kayma modüllerinin kompleks bir ifade ile sönüm oranlarına bağlı olarak elde edilişi eleman sönüm matrisi, kompleks terimli eleman rijitlik matrisleri içinde ifade edilmiş olacaktır. Sönümün bu şekilde tanımı dinamik hareket denklemlerinin frekans alanında yapılan çözümleri için büyük kolaylıklar sağlamaktadır.

1.8.5.5. Geçirgen Sınırlı Yapı-Zemin Sistemlerinin Hareket Denklemi

Yapı-zemin etkileşim sistemini temsil eden iki boyutlu sonlu eleman modeli için hareket denklemi Lysmer ve arkadaşları (1975) tarafından

$$[M]\{\ddot{u}\} + [K]\{u\} = -\{m\}\ddot{y} + \{F\} - \{T\} \quad (73)$$

şeklinde önerilmektedir. Burada $\{u\}$, $[M]$, $[K]$ ve $\{m\}$ sırasıyla, düğüm noktalarının rijit tabana göre yer değiştirmeleri, sistemin kütle matrisi, sistemin rijitlik matrisi ve kütle matrisi ile rijit taban ivmesinin, \ddot{y} , yönüne ilişkin bir vektör olmaktadır. $[K]$ matrisi aynı zamanda kompleks değerli olup malzeme sönümünü de içerebilmektedir.

$\{F\}$ vektörü, matematik modelin sağ ve sol geçirgen sınırlarında düğüm noktalarına düşey doğrultuda etkiyen statik kuvvetlerdir. Bu kuvvetler, sağ ve sol tabakalı bölgenin her sınırındaki yer değiştirmelerin farklı oluşu nedeniyle sınırlara etkiyen kayma gerilmeleri ile dengede olan kuvvetlerdir. Yer değiştirmeler, tabakalar içerisinde lineer olarak değiştiği göz önünde tutulması durumunda basitçe hesap edilebilmektedir. Bir tabakanın birim genişliği için yazılan kuvvet denklemi (Dumanoğlu, 1978), diğer tabakalarında katkısı düşünülerek bütün tabakalı bölge için matris formunda

$$\{F\} = [G]\{u\}_f \quad (74)$$

şeklinde yazılmaktadır. Bu ifadedeki $\{u\}_f$, tabakalı bölgeye ait yer değiştirme vektörüdür. $[G]$ ise, tabakalı sistemin kayma modüllerinden oluşan titreşim frekansından bağımsız bir matristir.

$\{T\}$ vektörü, sağ ve sol tabakalı bölgede enerji yayılımından oluşan ve her iki geçirgen sınırlardaki düğüm noktalarına etkiyen kuvvetleri göstermektedir. Bu kuvvetlerin bu sınırlar üzerindeki yatay ve düşey serbestlik derecelerine göre iki bileşeni vardır. Sağ ve sol geçirgen sınırlarda enerji yayılımından oluşan kuvvet vektörleri

$$\begin{aligned} \{T\}_{\text{sağ}} &= [R](\{u\} - \{u\}_f) \\ \{T\}_{\text{sol}} &= [L](\{u\} - \{u\}_f) \end{aligned} \quad (75)$$

ifadeleri ile verilmektedir. $[R]$ ve $[L]$, (58) denklemindeki gibi sağ ve sol tabakalı bölgenin dinamik rijitlik matrisidir. Her iki matris, çözüm frekansına bağlı olarak değişmektedir. $\{u\}$ ve $\{u_f\}$, yapı-zemin modeli ile serbest zemin yer değiştirme vektörleridir.

Bu hareket denklemi, çözümün kolay olması ve malzeme sönümünü frekanstan bağımsız olarak içermesi sebebiyle Kompleks Davranış Tekniği veya Fourier Dönüşüm Yöntemi ile çözülmektedir.

Bu yöntemin temel ilkesi hareket denklemlerini önce frekans alanında çözmek daha sonra zaman alanına dönüştürmektir. Bu amaçla, Fourier dönüşüm tekniğinin uygulanışında sisteme zaman alanında verilen etki, kuvvet veya ivme çifti sayısı, N , kadar noktada eşit Δt zaman aralıklarında,

$$f_k = f(k, \Delta t) \quad (76)$$

$k = 0, 1, \dots, N-1$ olmak üzere tanımlanırsa aynı dinamik etki

$$f(t) = \text{Re} \sum_{s=0}^{N/2} F_s e^{i\omega_s k \Delta t} \quad (77)$$

şeklinde tanımlanabilir. Bu ifadedeki $f(t)$ sürekli bir eğri olup f_k yerine kullanılmaktadır. Toplam süre $T = N \cdot \Delta t$ dir. Re, toplam içindeki ifadelerin gerçel kısımlarının alınacağını göstermektedir. i kompleks sayı olup değeri $\sqrt{-1}$ dir. Burada,

$$\omega_s = 2\pi f_s = \frac{2\pi s}{N \cdot \Delta t}, s = 0, 1, \dots, N/2 \quad (78)$$

ve

$$F_s = \begin{cases} \frac{1}{N} \sum_{k=0}^{N-1} f_k e^{-i\omega_s k \Delta t}, s = 0, s = \frac{N}{2} \\ \frac{2}{N} \sum_{k=0}^{N-1} f_k e^{-i\omega_s k \Delta t}, 1 \leq s < \frac{N}{2} \end{cases} \quad (79)$$

olmaktadır.

Kompleks ifadeler olan F_s değerleri, reel değerler olan f_k değerlerinden Fast Fourier dönüşümlerinden çok hızlı bir şekilde elde edilebilmektedir (Dumanoğlu, 1978). F_s değerleri bilindiğinde (77) denkleminin sağlanması da daha hızlı yapılmaktadır. Bu yöntemin kullanılabilmesi için N sayısının 2 nin üslü değerlerine karşılık gelmesi gerekmektedir. Ancak bu özellik yöntemin kullanılışı için bir sakınca değildir. Yani gerçek değerli deprem katsayılarının sonunda hiçbir değeri olmayan sıfır değerli sakin bir bölge varmış gibi düşünüp deprem etkisini, periyodu

$$T = N \cdot \Delta t \quad (80)$$

olan bir kayıt düşünülebilir. Fourier dönüşüm tekniği kullanılarak frekans alanında yapılan çözümlerin süperpozisyonu ile yapının zaman alanında istenilen dinamik büyüklüğü (77) denkleminde benzer bir şekilde elde edilebilmektedir. Her $F_s e^{i\omega_s t}$ terimine karşılık gelen çözüm vektörü $\ddot{y}_s e^{i\omega_s t}$ ise, toplam çözüm

$$\ddot{y}(t) = \text{Re} \sum_{s=0}^{N/2} \ddot{y}_s e^{i\omega_s t} \quad (81)$$

olmaktadır. (81) denklemi ile tanımlanan frekans alanından zaman tanım alanına geçiş işlemi Fast Fourier Dönüşümleri ile yapılmaktadır.

Bu yöntemin (77) ve (81) denklemleri ile tanımlandığı gibi kullanılması durumunda büyük bir frekans alanı içinde yüzlerce frekans için ayrı ayrı çözüm gerektireceğinden oldukça pahalı olmaktadır. Örneğin 1500 noktada ve $\Delta t = 0.005$ saniyelik zaman aralığı ile değerleri bilinen deprem ivme kaydı için $N = 2^{11} = 2048$ noktada alınarak, kayıt sonuna hiçbir değeri olmayan bölge ilave edilmelidir. Denklem takımı böyle bir kayıt için frekans alanında (77) ve (79) denklemlerinde görüldüğü gibi $\frac{N}{2} + 1 = 1025$ defa çözülmesi gerekmektedir. Ancak bu miktarda çözüm sayısı önemli derecede iki türlü indirgenebilmektedir.

- (78) denkleminde görüldüğü gibi $s = \frac{N}{2}$ ve $\Delta t = 0.005$ için maksimum çözüm

frekansı $f_{N/2} = \frac{1}{2 \cdot \Delta t} = 100$ devir/saniye olmaktadır. Bu frekans zemine kısmen

gömülü yapı türleri için projelendirmede kullanılacak maksimum frekanstan büyük olmaktadır. Hesaplar için istenen en büyük frekans 20 devir/saniye ise bu frekansa karşın çözüm sayısı (78) denkleminde $s = 20 \times 2048 \times 0.005 = 205$ olacaktır (Lysmer vd., 1975).

- Üst yapıya ait herhangi bir dinamik büyüklük bileşeni D_i ile aynı türden olan yer hareketinin genlikleri, D_1 , arasındaki oran D_i / D_1 artım (amplifikasyon) fonksiyonu olarak tanımlanmaktadır. Bu fonksiyonlar frekans alanı içerisinde hesap edildiğinde düzgün eğriler elde edilmektedir. Artım fonksiyonlarındaki düzgünlük nedeniyle frekans alanında yapılacak belirli adım aralıklarına ait frekanslar için her ($s=0,4,8,\dots$), dört frekansta bir ara değerleri tersleri üzerinde yapılacak lineer interpolasyonla hesap edilebilmektedir (Dumanoğlu, 1978).

Böylece 1025 çözüm yerine frekans alanında yalnız 51 çözüm yapılarak çok büyük bir ekonomi sağlanmaktadır.

(73) denklemi ile verilen genel hareket denklemi, Fourier Dönüşüm Tekniği kullanılarak çözülmektedir. Üzerinde yapı bulunmayan yüksüz serbest zemin için yer değiştirmeler $\{u\}_f$ ve sonlu eleman ağı ile temsil edilen matematik modelin herhangi bir noktasındaki yer değiştirmeler, $\{u\}$, benzer şekilde

$$\begin{aligned}\{u\} &= \text{Re} \sum_{s=0}^{N/2} \{U\}_s e^{i\omega_s t} \\ \{u\}_f &= \text{Re} \sum_{s=0}^{N/2} \{U_f\}_s e^{i\omega_s t}\end{aligned}\quad (82)$$

elde edilmektedir. (82) denklemi ω_s frekansı için (73) denkleminde yerine yazılırsa frekans alanında

$$\begin{aligned}\left([K] + [R]_s + [L]_s + \frac{i\omega_s}{L} [C] - \omega_s^2 [M] \right) \{U\}_s = \\ -\{m\} \ddot{y}_s + \left([G] + [R]_s + [L]_s + \frac{i\omega_s}{L} [C] \right) \{U_f\}_s\end{aligned}\quad (83)$$

denklemi elde edilmektedir. Bu denklem daha genel olarak,

$$[K]_s \{A\}_s = \{P\}_s \quad (84)$$

tanımlanmaktadır. Burada

$$[K]_s = [K] + [R]_s + [L]_s - \omega_s^2 [M] \quad (85)$$

$$\{P\}_s = \left([G] + [R]_s + [L]_s \right) \{A_f\}_s - \{m\} \quad (86)$$

olmaktadır. $[K]_s$, çözüm frekansına bağlı kompleks terimli rijitlik matrisidir. $\{P\}_s$ ise, her frekans için değişen, rijit taban hareketinin birim genliğine ($\ddot{y}_s = 1$) karşılık gelen alan kuvvet vektörüdür. s indisi, frekans sayısını ve frekansa bağlı olduğunu tanımlamaktadır. $\{A_f\}_s$, serbest zemin bölgesinin verilen deprem ivmesi için frekans alanındaki yer değiştirme genlikleridir. $\{A\}_s$, yapı-zemin etkileşim sisteminin frekans alanında yapılan çözümle bulunan kompleks yer değiştirme genlikleridir.

(83) denklemi kompleks terimli lineer bir denklem takımı olup çözümü Gauss eliminasyon yöntemi ile yapılmaktadır. Bu çözüm sonunda bulunan $\{A\}_s$ değerlerinden yararlanarak yer değiştirmeler (82) ifadesindeki gibi,

$$\{u\} = \text{Re} \sum_{s=0}^{N/2} \{A\}_s \ddot{y}_s e^{i\omega_s t} \quad (87)$$

şeklinde zaman alanında ters Fourier dönüşümü ile seçilen her t zaman aralığı için elde edilebilir (Lysmer vd., 1975).

(83) denklemi için çözüm aşamaları şu şekilde özetlenmektedir.

- Bütün sistemin kompleks rijitlik matrisi, $[K]_s$, ve kütle matrisi, $[M]$, kurulur.
- Toplam yer değiştirmelerin frekans alanındaki genlikleri $\{U_f\}_s$ hesaplanır.
- $[G]$ matrisi kurulur.
- Tabakalı bölgenin dinamik rijitlik matrisleri, $[R]$ ve $[L]$, hesaplanır.
- $[K]_s$, oluşturulur.
- $\{P\}_s$, hesaplanır.
- (61) denklemi seçilen her frekans için Gauss eliminasyon yöntemi ile çözülerek $\{U\}_s$ hesaplanır.

1.8.5.6. Serbest Zemin Hareketi

Deprem esnasında yerel zemin şartlarının davranış üzerindeki etkilerini hesaplamak gerekmektedir. Bunun için zemin tabakalarının davranışının yeraltındaki kaya formundan yukarı doğru ilerleyen kayma dalgalarıyla meydana geldiğini kabul edilmektedir. Bu doğrultuda oluşturulacak analitik yöntemler

- Yeraltındaki kaya formundaki mevcut gelişimini belirlemek için hareketlerin karakteristiğinin kayıt altına alınması
- Zemin tabakalarının dinamik özelliklerini saptanması
- Taban kayasının hareketi için zemin tabakalarının davranışının belirlenmesi

gibi işlem adımlarını gerçekleştirmelidir. Bu adımlar aynı zamanda bir boyutlu dalga yayılımı teorisini ifade etmektedir. Lineer viskoelastik sistem boyunca ilerleyen kayma dalgalarının etkisi altında oluşan davranışları esas alan bu teori, Schnabel vd (1972) tarafından geliştirilen programda kullanılmış ve istenilen herhangi bir zemin tabakasına ait dinamik davranış o tabakanın dinamik özelliklerine göre elde edilebilmiştir.

(74), (75) ve (82) denklemlerinde görülen serbest zemin hareketi $\{U\}_f$,

$$\{U\}_f = \{A_f\}_s \ddot{y}_s \quad (88)$$

şeklinde ifade edilebilir (Lysmer vd., 1975). Yapılacak olan dinamik analizde kullanılacak sismik veri, Δt zaman aralığında herhangi bir noktadaki yatay ya da düşey ivme-zaman değerlerinden oluşmaktadır. Bu veri, herhangi bir j. zemin tabakasının üst noktası için özelleştirilmektedir. Bunun için (88) denkleminin tersi alınarak elde edilen

$$\ddot{y}_s = \frac{U_{js}}{A_{js}} \quad (89)$$

ifadesiyle rijit taban ivmeleri belirlenmektedir. Burada U_{js} ve A_{js} sırasıyla j. tabakaya ait $\{U\}_f$ ve $\{A_f\}_s$ değerleridir.

Yer yüzeyinden alınan deprem yer hareketinin tabakaların dinamik karakteristiklerine göre mevcut tüm tabakalar için bu şekilde idealleştirilmiş hali indirgenmiş yer hareketi olarak adlandırılmaktadır. Böylece mevcut yapı-zemin sistemleri, indirgenmiş rijit taban hareketi altında analiz edilerek, daha gerçekçi davranışlar elde edilmiş olmaktadır.

2. YAPILAN ÇALIŞMALAR

2.1. Giriş

Bu tez çalışmasında, zemin sınır şartlarının yapı-zemin etkileşim sistemlerinin dinamik davranışına etkisi belirlenmeye çalışılmıştır. Bu amaçla, uygulama olarak yapı-zemin etkileşimine maruz ve zemine gömülü ağır yapı türünden olan Sarıyar beton ağırlık barajı seçilmiştir. “Genel Bilgiler” bölümünde ayrıntılı olarak açıklanan, klasik yapı-zemin etkileşim analitik modelleri (rijit, sabit ya da ankastre sınırlı) ve dinamik etki sonucu zemin içerisinde meydana gelen P ve S dalgalarının sınırlardaki etkisini ortadan kaldıracak *viskoz sönümleyiciler* kullanılarak hazırlanan yapı-zemin etkileşim sistemi analitik modellerinin dinamik analizi ANSYS analiz programında gerçekleştirilmiştir. Dinamik etkiyle zemin içerisinde oluşan Rayleigh dalgalarını sönümleyen ve yarı-sonsuz ortamın dinamik rijitlik matrisini içeren *geçirgen sınırların* kullanıldığı yapı-zemin etkileşim analitik modeli ile klasik yapı-zemin etkileşim analitik modellerinin (rijit, sabit ya da ankastre sınırlı) dinamik analizi için ise, yapı-zemin etkileşim problemlerinin yaklaşık üç boyutlu analiz programı-FLUSH (Lysmer vd., 1975) kullanılmıştır.

Bu bölümde, ilk olarak Sarıyar beton ağırlık barajı tanıtılmıştır. Bu kısmı takiben uygulamaya ait baraj-rezervuar etkileşimi, yapı-zemin etkileşimi ve dikkate alınan parametreler açıklanmaktadır. Sarıyar barajı için oluşturulan yapı-zemin etkileşim analitik modelleri ayrıntılı olarak verilmektedir. Seçilen yer hareketinin tanıtılmasından sonra, seçilen baraja ait yapı-zemin etkileşimi dinamik analizlerinin nasıl gerçekleştirildiği ve analizlerde yapılan bazı kabuller anlatılmıştır.

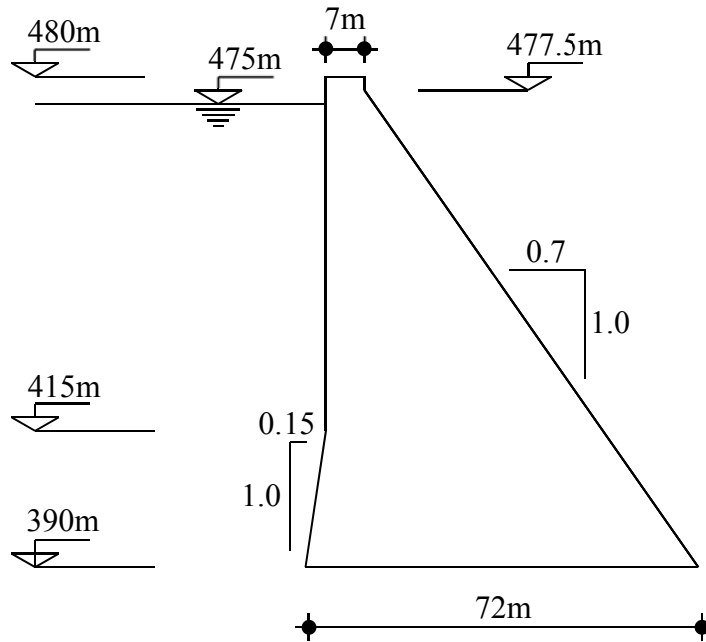
2.2. Sarıyar Beton Ağırlık Barajı

Sarıyar Barajı (Şekil 2.1), Ankara'nın Nallıhan ilçesinin Sarıyar köyünde olup, Sakarya Nehri üzerinde hidroelektrik enerji üretimi amacıyla 1951-1956 yılları arasında inşa edilmiştir. Türkiye'nin ilk büyük HES (Hidroelektrik Santrali) barajıdır. Türkiye'deki tek santral atölyesine sahiptir ve Türkiye baraj gölü sıralamasında altıncı sırada yer almaktadır. Beton ağırlık tipi olan barajın gövde hacmi 568.000m³, talvegten yüksekliği 90m, rezervuar yüksekliği 85m ve zemine gömülü temel derinliği 18m'dir. Normal su

kotunda göl hacmi 1.900hm^3 , normal su kotunda göl alanı $83,83\text{km}^2$ 'dir. 4 alternatör ile çalışan 160MW gücündeki hidroelektrik santralinden yılda 378GWh saat elektrik enerjisi elde edilmektedir. Şekil 2.2'de Sarıyar beton ağırlık barajının enkesiti verilmektedir.



Şekil 2.1. Sarıyar Barajı'nın görünümü

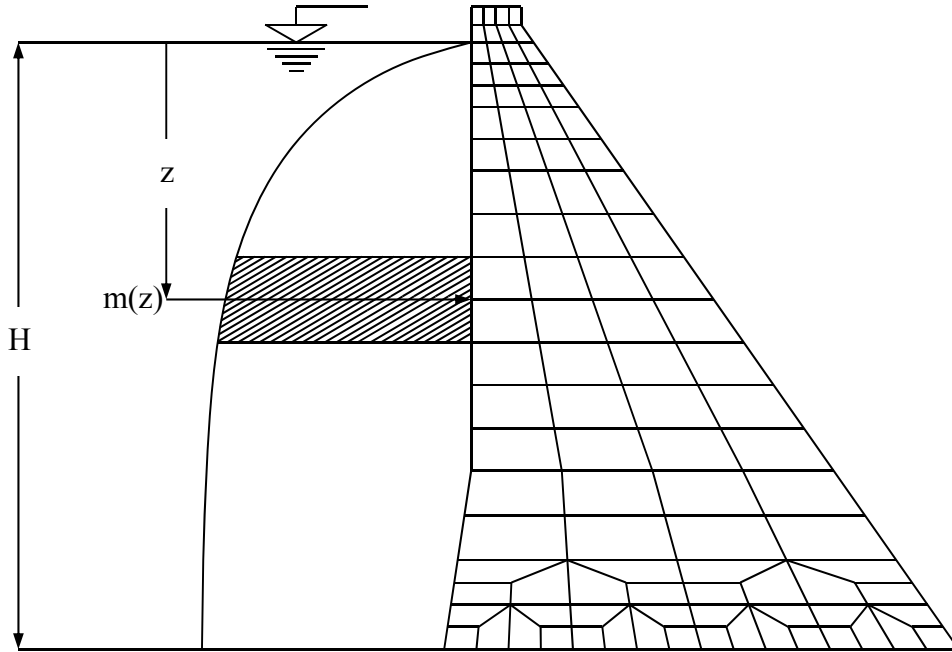


Şekil 2.2. Sarıyar Barajı'nın enkesiti

2.2.1. Baraj-Rezervuar Etkileşimi

Barajlar, çok büyük su kütleleri ile temasta olduklarından sıvı-yapı etkileşimine maruz yapı grubunda dikkate alınmalıdır. Deprem gibi dinamik bir etki ile yapı ve sıvı davranışları önemli ölçüde değişir. Bu yüzden, barajların dinamik analizinde, rezervuarın barajın dinamik özellikleri ve davranışı üzerindeki etkileri ihmal edilmemelidir (Akköse, 1997).

Burada yapılan analizlerde, deprem esnasında oluşan hidrodinamik basınçların hesabı için Westergaard yaklaşımı kullanılmıştır. Bu yaklaşımda, barajın rijit, sonsuz uzun ve düşey memba yüzeyli olduğu, rezervuarın memba doğrultusunda sonsuza uzadığı, suyun sıkışamaz olduğu ve sıvı yüzey dalgalarının oluşmadığı kabul edilmektedir. Dinamik etki sonucunda baraj memba yüzeyi boyunca oluşan hidrodinamik basınç dağılımı, baraj ile birlikte titreşen bir kütle dağılımı olarak göz önüne alınmaktadır. Söz konusu kütle dağılımından tekil kütleler hesaplanıp sonlu eleman ağı baraj memba yüzeyindeki düğüm noktalarının kütlelerine eklenerek rezervuarın hidrodinamik etkisi dikkate alınmaktadır. Şekil 2.3, bu yaklaşımdan elde edilen su kütlelerinin derinliğe bağlı olarak değişimini göstermektedir.



Şekil 2.3. Hidrodinamik Basınç Dağılımı

Şekil 2.3'e göre tekil kütleler aşağıdaki ifade ile elde edilmektedir;

$$m(z) = \frac{7}{8} \frac{w}{g} \sqrt{Hz} \quad (90)$$

Burada $m(z)$, w , g , H , z sırasıyla rezervuar derinliğine bağlı kütle dağılımı, suyun birim ağırlığı, yerçekimi ivmesi, rezervuar derinliği, su yüzeyinden itibaren su derinliğini temsil etmektedir.

2.2.2. Baraj-Zemin Etkileşimi

Şiddetli depremler, yeryüzünden 15-30km derinlikte, yer kabuğu içinde uzun sürelerde oluşan gerilme birikimlerinin fay hatlarında meydana gelen ani yırtılmalarla boşalmasından kaynaklanmaktadır. Böylece ortaya çıkan sismik dalgalar yer kabuğu içerisinde yayılmakta ve yer yüzeyine ulaşmaktadır. Eğer sert yer kabuğu ile söz konusu yapının bulunduğu bölgedeki yer yüzeyi arasında yumuşak bir zemin tabakası mevcut ise, sismik dalgalar bu tabaka tarafından belirli bir biçimde filtre edilerek yapıya ulaşırlar. Öte yandan yer yüzeyindeki yapı, baraj gibi büyük bir kütleyle sahip ise, bu kütle kendi altındaki zeminin dinamik karakteristiklerini etkileyecek ve zeminden geçen sismik dalgaların karakterini değiştirecektir (Akköse, 1997).

Yapıların deprem sırasında davranışlarının doğru tahmin edilebilmesi doğabilecek hasarların en aza inmesini sağlar. Bu nedenle seçilecek matematiksel modelin davranışı mümkün olduğunca doğru yansıtması gerekir.

Yapıların dinamik hesabında yapı ve zemin ilişkileri değerlendirilmesi gerekli önemli etkilerden biridir. Seçilen matematik model içinde, zemin özelliklerinin derinliğe ve yer hareketinin şiddetine bağlı olarak değişebileceği hesaplar kapsamına alınabilmelidir. Zeminin titreşim dalgalarının her yönde yayılmasına neden oluşu gibi, enerji absorbe eden özelliği de yapı zemin modeli içinde belirlenebilmelidir. Öyle ki, yarı-sonsuz zemin ortamı dalga yayılım açısından sınırlı hacme eşitlenebilmelidir. Matematik modelde yer hareketinin kesit boyunca değişebileceği belirlenebilmelidir. Yarı-sonsuz ortam içerisinde yayılan dalgaların genlikleri, zemin ortamının özelliklerine bağlı olarak değişir. Dolayısıyla titreşim süresince oluşan en büyük etki değişebileceği gibi yapının zemin içinde kalan bölgesi üzerine etkileyen dinamik kuvvetlerde derinliğe ve zemin özelliklerine

bağlı olarak değişecektir. Seçilen matematik model problemin üç boyutlu özelliğini gösterebilmelidir (Soyluk, 2009).

Daha önce ifade edildiği gibi baraj gibi zemine gömülü ağır yapıların davranışlarını iyi bir şekilde temsil edebilmek için en uygun model, sonlu eleman modeli olmaktadır. Bu şekilde zemine ait dinamik karakteristikler ve derinliğe göre değişimi en iyi şekilde temsil edilebilmektedir.

Sağlam ve orta sağlamlıktaki kaya zeminlerde inşa edilen beton ağırlık barajlar, beton gövde üzerine dolusavak oturtulabildiğinden dolusavak hafriyatının zor olduğu (U) veya (UV) şeklindeki vadilerde avantaj sağlamaktadırlar. Ancak baraj yüksekliği arttıkça diğer baraj tiplerine oranla daha pahalı olmaktadır.

Bu çalışmada, gerek beton ağırlık barajın inşa edilebileceği özelliklere gerekse de yapının olası dinamik davranışını verecek ve sonuçlara tesir etmeyecek derinliğe sahip zemin modeli oluşturulmaya çalışılmıştır. Sonuçların hassasiyeti açısından (61) denklemiyle verilen eleman boyut kriteri göz önünde bulundurularak optimum sonlu eleman ağı seçilmiştir.

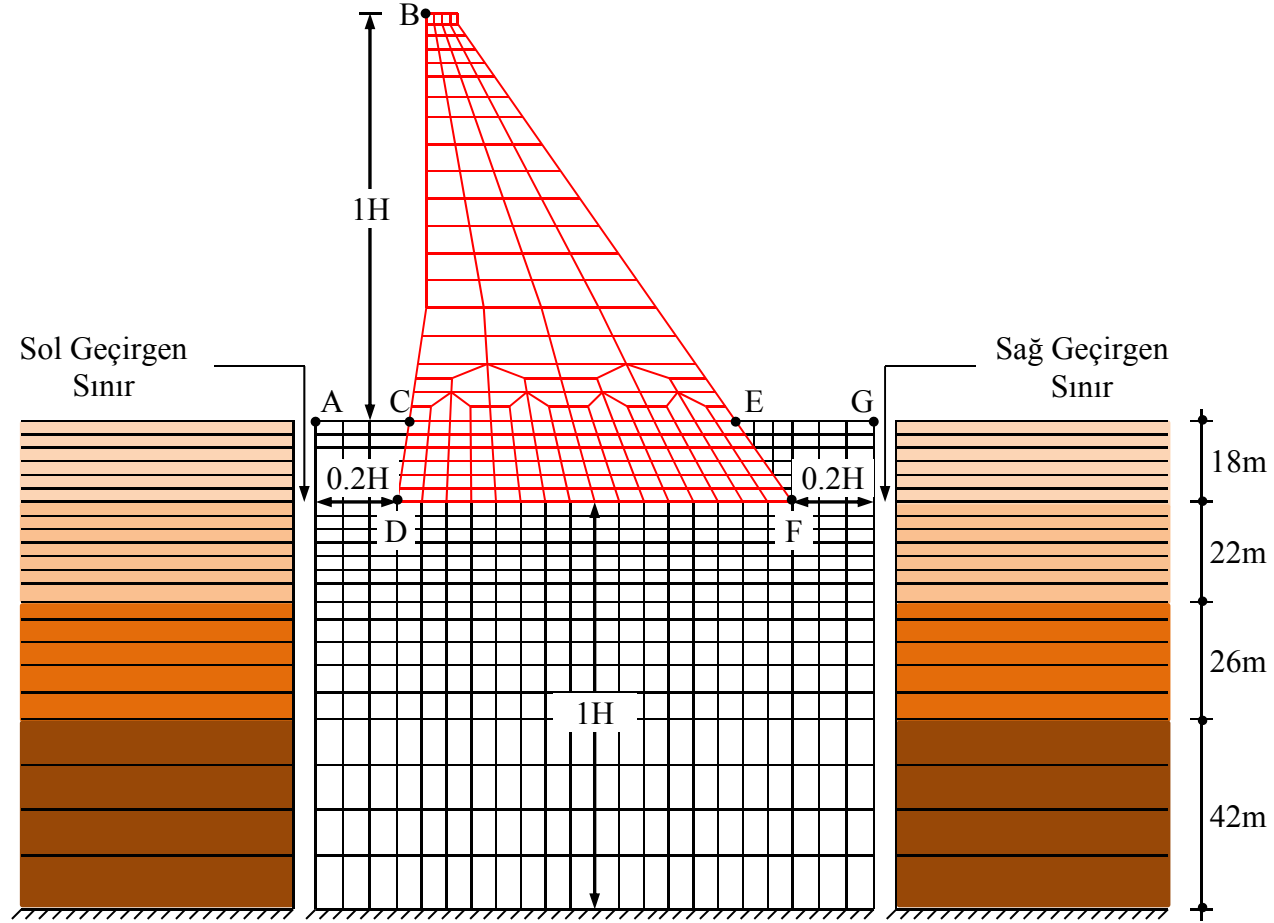
2.2.3. Analitik Modeller

Daha önce ifade edildiği gibi yapı-zemin etkileşim sistemleri için olası davranışı temsil edecek analitik modellerin oluşturulması, yapılan çalışmanın esasını teşkil etmektedir. Beton ağırlık tipi barajların sağlam kaya ortamına inşa edilen yapılar olması sebebiyle, belirli derinlikten sonra düşey doğrultuda yer değiştirmeyen rijit bir tabakanın varlığı kabul edilmiştir. Bu sebeple oluşturulacak tüm analitik modellerin sonlu zemin derinliği, barajın talvegten yüksekliğinin bir katı (1H) alınmıştır.

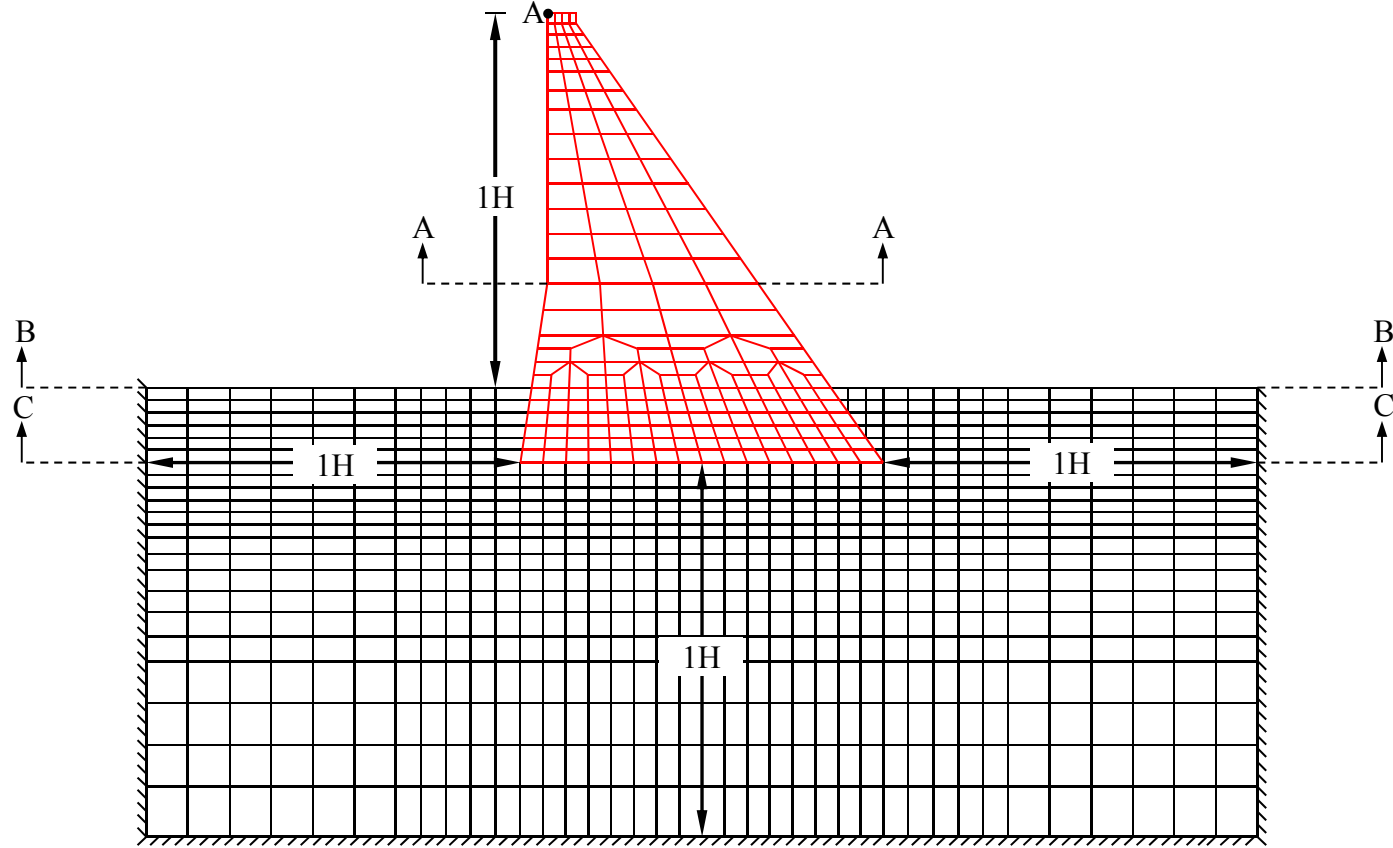
Geleneksel sınırlar (rijit, sabit, ankastre) kullanılarak oluşturulan modellerde zemin içerisinde yayılan dalgalar mevcut sınırlarda yansiyarak suni dinamik davranış meydana getirmektedir. Bu yansımaları engellemek için zemin sınırına yarı-sonsuz ortamın davranışını temsil edecek farklı sınır şartları tanımlamak ve bunlar için yeterli zemin sınırlarını belirlemek gerekmektedir. Geçirgen sınırlar için yanal zemin sınırı yapıya yakın seçilmesi yeterli olmaktadır (Lysmer vd. 1975). Bu fikirle, geçirgen sınırlar yapı yan sınırından 18m uzaklıkta yerleştirilerek sonlu eleman analitik modeli oluşturulmuştur (Şekil 2.4). Geleneksel sınırlar için yapı yan sınırından itibaren 1H-5H uzaklıklarında 0.5H artımlarla 9 farklı zemin hacmine sahip yapı-zemin etkileşimi sonlu eleman analitik

modelleri oluşturulmuştur. Viskoz sınırlar için farklı bir analitik model oluşturulmamış ve geleneksel sınırlar için oluşturulan analitik modeller viskoz sınırlar için de kullanılmıştır.

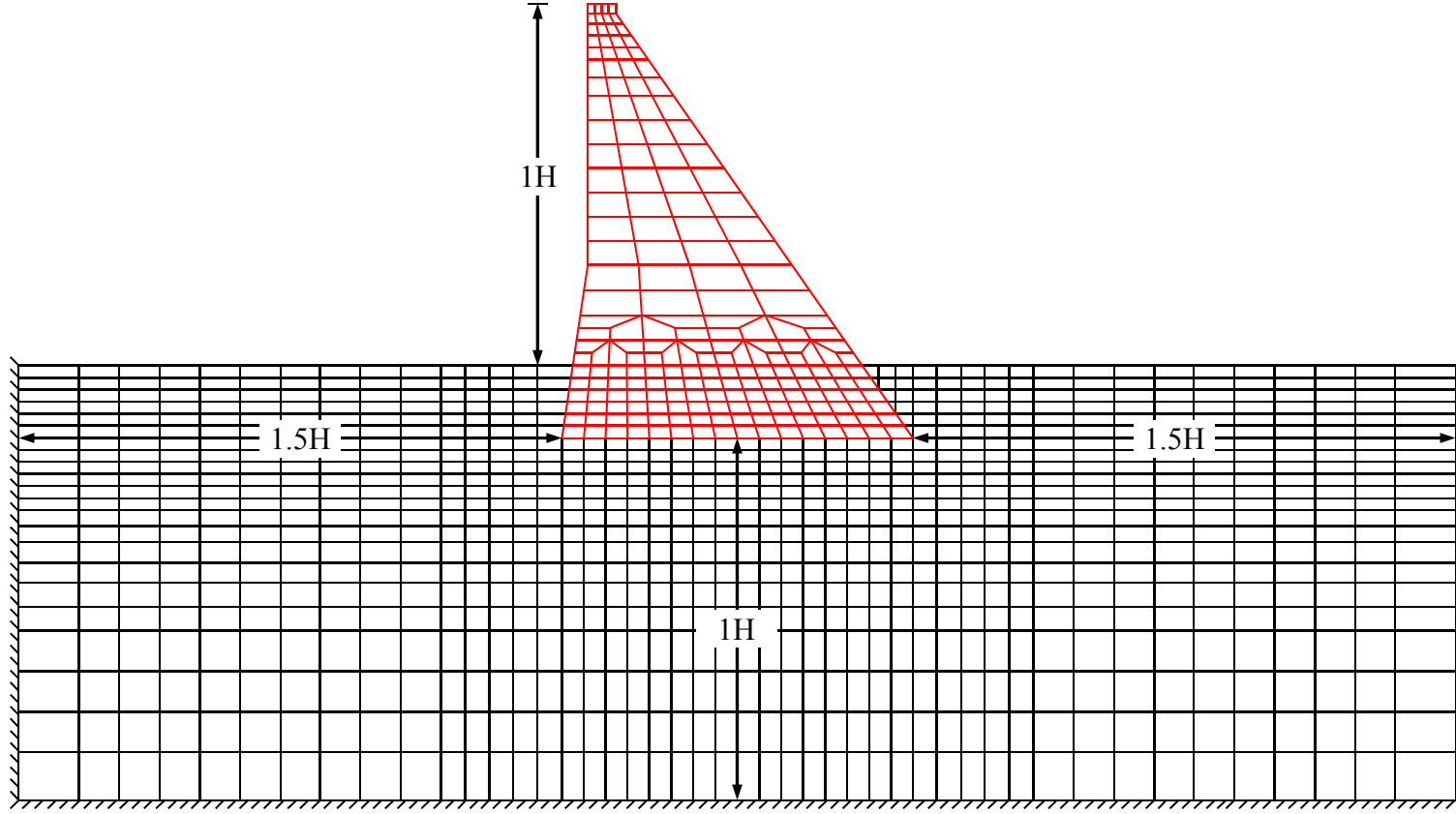
Sonlu eleman ağları, (61) denklemindeki eleman boyut şartına uyularak dört düğüm noktalı izoparametrik düzlem şekildeğiştirme elemanları kullanılarak oluşturulmuştur. Bu şekilde oluşturulan geçirgen sınır modelinde 596 eleman (Şekil 2.4) kullanılmıştır. Geleneksel ve viskoz sınırlar için ise; baraj yan sınırlarından itibaren yanal zemin uzunluğu $1H$ seçilmesi durumunda 948 (Şekil 2.5), $1.5H$ seçilmesi durumunda 1124 (Şekil 2.6), $2H$ seçilmesi durumunda 1344 (Şekil 2.7), $2.5H$ seçilmesi durumunda 1520 (Şekil 2.8), $3H$ seçilmesi durumunda 1740 (Şekil 2.9), $3.5H$ seçilmesi durumunda 1916 (Şekil 2.10), $4H$ seçilmesi durumunda 2136 (Şekil 2.11), $4.5H$ seçilmesi durumunda 2312 (Şekil 2.12), $5H$ seçilmesi durumunda 2532 (Şekil 2.13) eleman kullanılmıştır.



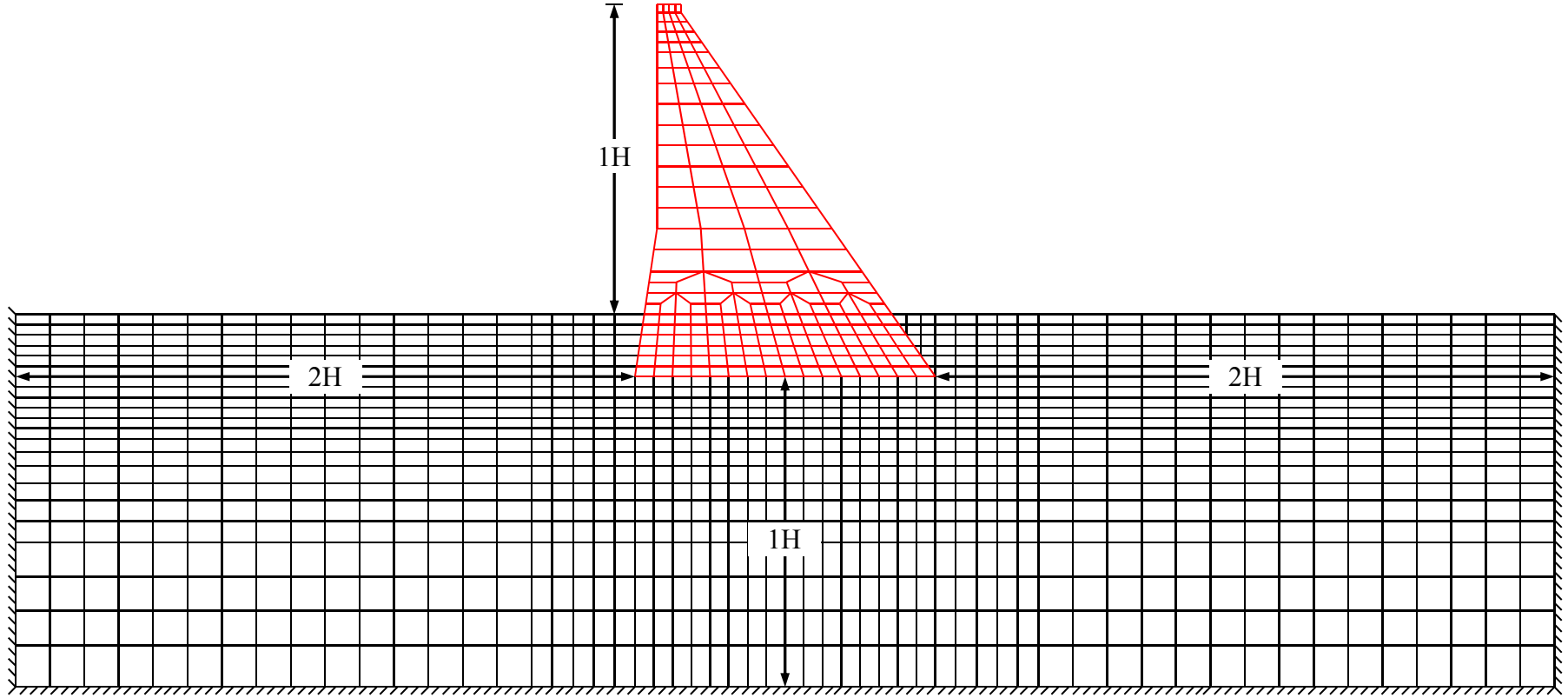
Şekil 2.4. Geçirgen Sınır Kullanılarak Oluşturulan Yapı-Zemin Etkileşimi Sonlu Eleman Modeli ve Tabakalı Yarı-Sonsuz Zemin Ortamı



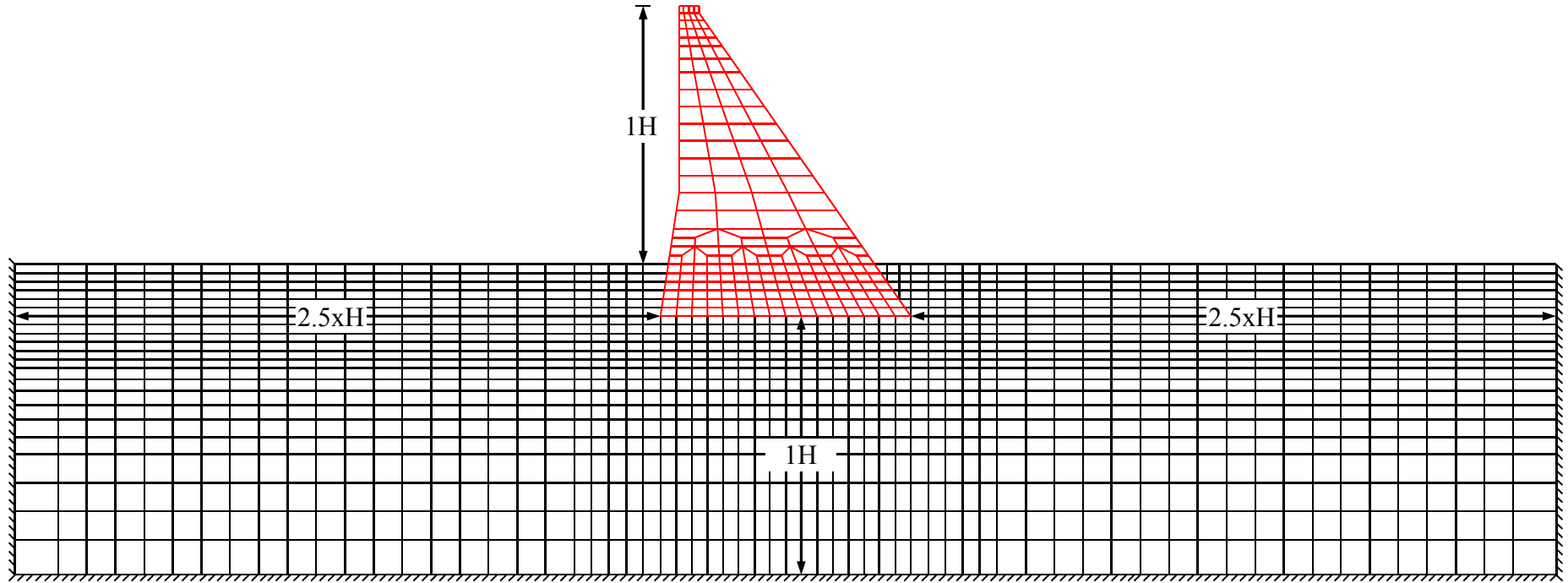
Şekil 2.5. Barajın Yan Sınırından $1.0H$ Uzaklıkta Rijit ve Viskoz Sınır Kullanılarak Oluşturulan Yapı-Zemin Etkileşimi Sonlu Eleman Modeli



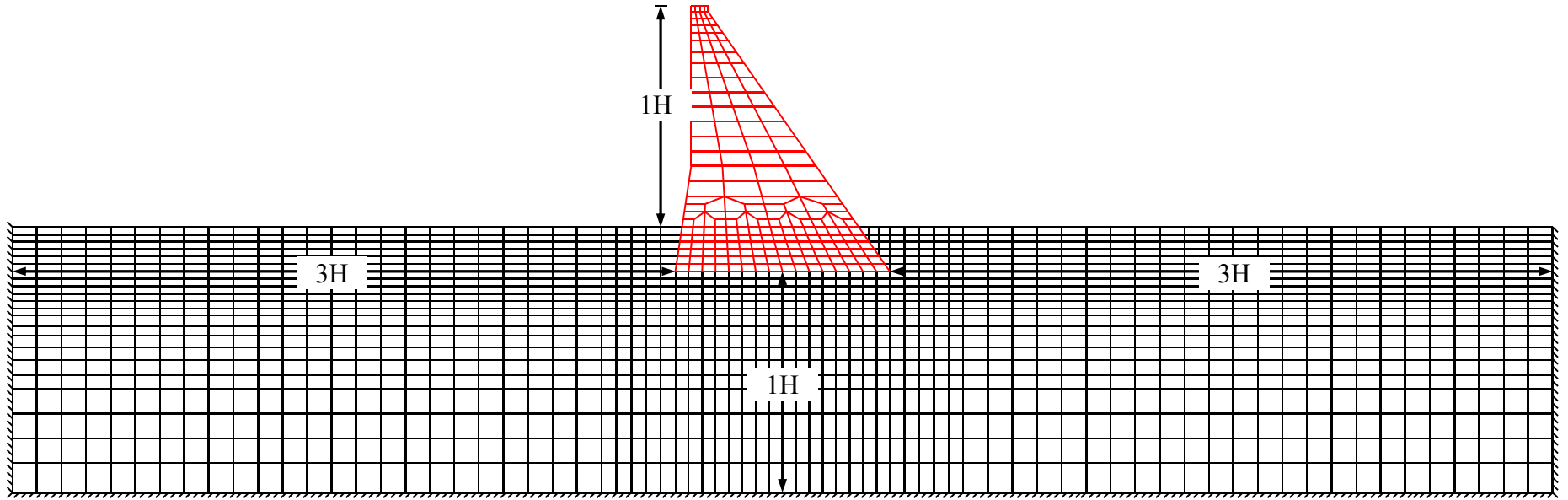
Şekil 2.6. Barajın Yan Sınırından $1.5H$ Uzaklıkta Rijit ve Viskoz Sınır Kullanılarak Oluşturulan Yapı-Zemin Etkileşimi Sonlu Eleman Modeli



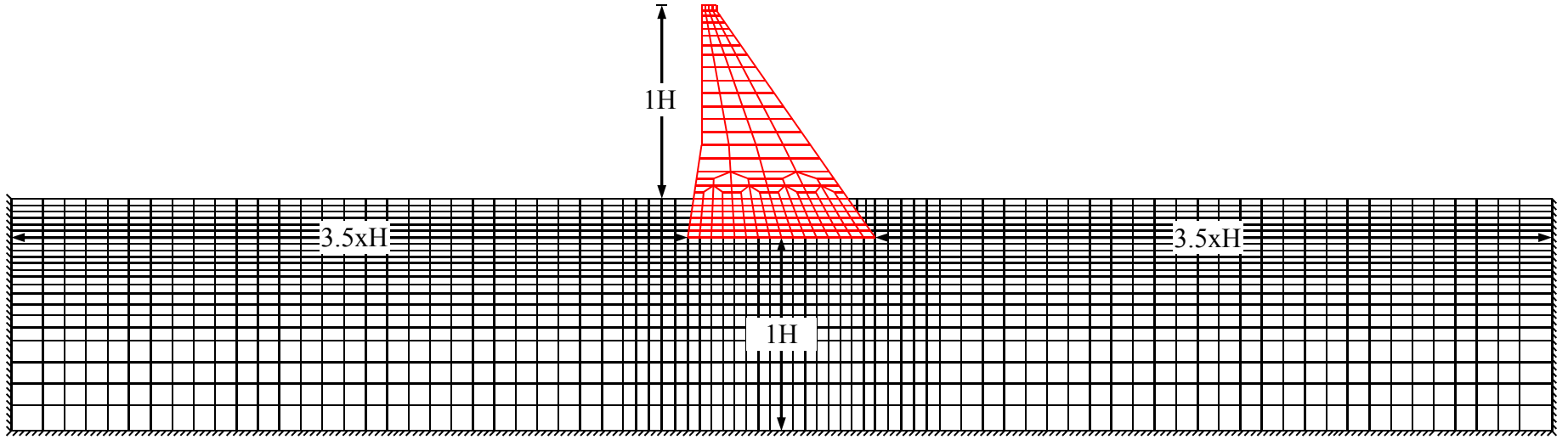
Şekil 2.7. Barajın Yan Sınırından $2.0H$ Uzaklıkta Rijit ve Viskoz Sınır Kullanılarak Oluşturulan Yapı-Zemin Etkileşimi Sonlu Eleman Modeli



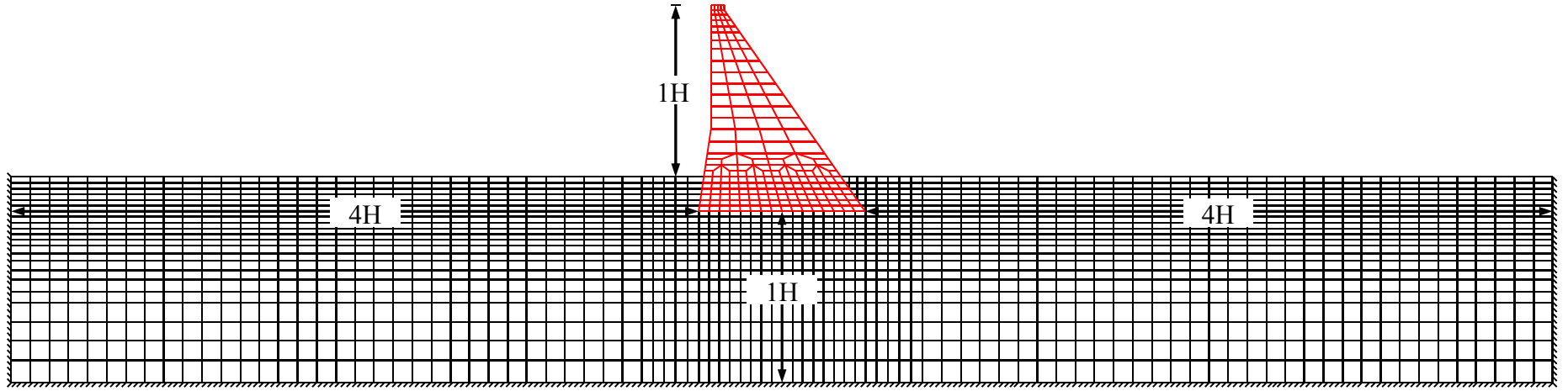
Şekil 2.8. Barajın Yan Sınırından $2.5H$ Uzaklıkta Rijit ve Viskoz Sınır Kullanılarak Oluşturulan Yapı-Zemin Etkileşimi Sonlu Eleman Modeli



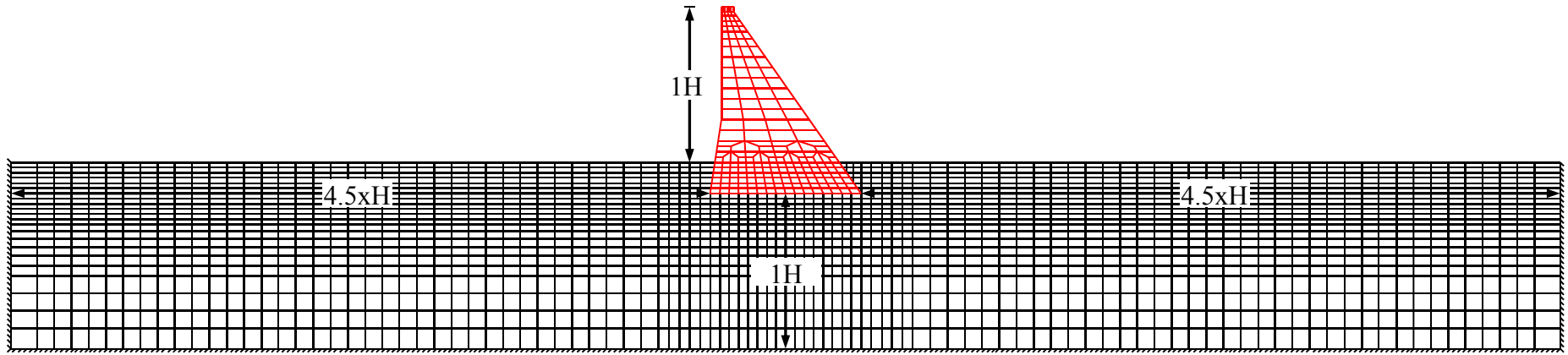
Şekil 2.9. Barajın Yan Sınırından $3.0H$ Uzaklıkta Rijit ve Viskoz Sınır Kullanılarak Oluşturulan Yapı-Zemin Etkileşimi Sonlu Eleman Modeli



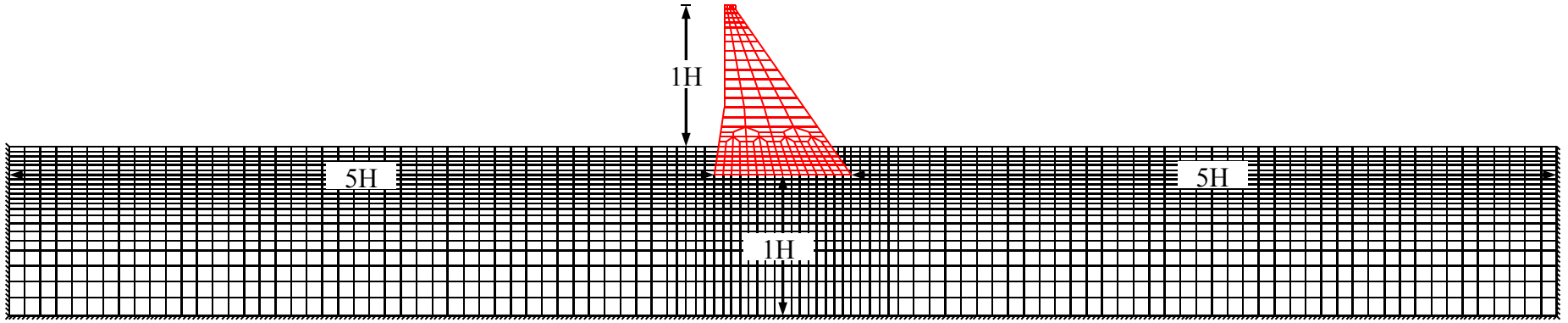
Şekil 2.10. Barajın Yan Sınırından $3.5H$ Uzaklıkta Rijit Sınır Kullanılarak Oluşturulan Yapı-Zemin Etkileşimi Sonlu Eleman Modeli



Şekil 2.11. Barajın Yan Sınırından $4.0H$ Uzaklıkta Rijit Sınır Kullanılarak Oluşturulan Yapı-Zemin Etkileşimi Sonlu Eleman Modeli



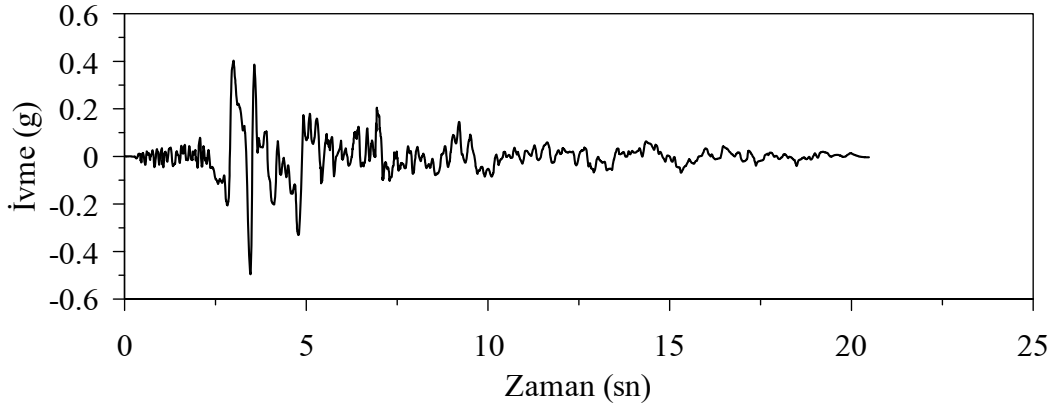
Şekil 2.12. Barajın Yan Sınırından $4.5H$ Uzaklıkta Rijit Sınır Kullanılarak Oluşturulan Yapı-Zemin Etkileşimi Sonlu Eleman Modeli



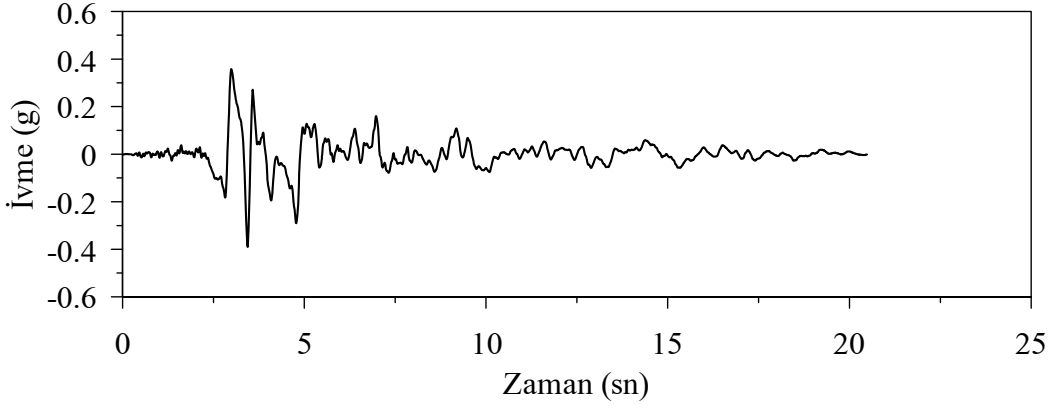
Şekil 2.13. Barajın Yan Sınırından $5.0H$ Uzaklıkta Rijit Sınır Kullanılarak Oluşturulan Yapı-Zemin Etkileşimi Sonlu Eleman Modeli

2.2.4. Serbest Zemin Hareketi

Sarıyar beton ağırlık barajının Direkt İntegrasyon Tekniği (Ansys Programı) ve Kompleks Davranış Tekniği (Flush Programı) ile yapılan dinamik analizlerinde, yer hareketi olarak baraj bölgesinde oluşması muhtemel deprem türüne örnek olması açısından, 13 Mart 1992 Erzincan deprem kaydının doğu-batı bileşeni seçilmiştir (URL-4, 2013). Deprem ivmesi baraja memba-mansap doğrultusunda uygulanmakta ve zaman adımı olarak 0,005s kullanılmaktadır (Şekil 2.14). Kompleks Davranış Tekniği ile yapılan analizlerde tabakaların karakteristiklerine bağlı olarak sistemde mevcut tabakaların dinamik davranışları elde edilebilmektedir. Bu şekilde, idealleştirilmiş yarı-sonsuz zemin ortamının altında meydana gelen rijit taban hareketi (Şekil 2.15) etkisinde analizler gerçekleştirilmektedir. Adım adım integrasyon yöntemiyle analizlerde ise yüzeyden alınan, indirgenmemiş ivme kayıtları kullanılmaktadır.



Şekil 2.14. 13 Mart 1992 Erzincan Depremi Doğu-Batı Bileşeni



Şekil 2.15. 13 Mart 1992 Erzincan Depremi Doğu-Batı Bileşeninin Tabakalı Zemin İçin İndirgenmiş Rijit Taban Hareketi

2.3. Sarıyar Barajının Dinamik Analizi

Bu tezde, uygulama olarak seçilen Sarıyar barajına ait yapı-zemin etkileşim modellerinin dinamik analizi, kullanılan farklı sınır şartlarından dolayı iki aşamada gerçekleştirilmiştir. Viskoz sınırların etkinliğini ortaya koymak ve geleneksel sınırlarla karşılaştırmak için Direkt İntegrasyon Tekniği olan Newton yöntemi (ANSYS programı) kullanılmıştır. Geçirgen sınırların etkinliğini ortaya koymak ve geleneksel (rijit, sabit, ankastre) sınırla karşılaştırmak için Kompleks Davranış Tekniği (FLUSH Programı) kullanılmıştır. İki çözüm tekniğiyle de analiz edilen geleneksel modeller aynı olmaktadır. Fakat her iki çözüm tekniğinde yapılan kabullerin farklılığından dolayı geleneksel modeller bu çözüm teknikleriyle ayrı ayrı analiz edilmektedir.

Dinamik analizlerde su-yapı dinamik etkileşimi Westergaard yaklaşımı ile dikkate alınmıştır. Rezervuar su seviyesi 85m (tam dolu) olarak dikkate alınıp hesaplanan su kütleleri her bir modelin su-yapı etkileşim yüzeyindeki düğüm noktalarına etkilmiştir.

Daha önce ifade edildiği gibi beton ağırlık tipi barajların sağlam kaya ortamına inşa edilen yapılar olması sebebiyle, belirli derinlikten sonra düşey doğrultuda yer değiştirmeyen rijit bir tabakanın varlığı kabul edilmiştir. Direkt İntegrasyon Tekniği ile yapılan analizler (ANSYS programı) için tek bir zemin cinsi seçilmiştir. Tüm modellerde kullanılan beton ve zemine ait malzeme özellikleri Tablo 2.1’de verilmektedir.

Tablo 2.1. Adım adım integrasyon (ANSYS programı) analizleri için kullanılan malzeme özellikleri

Baraj Betonu	Zemin
$E_c=35 \times 10^9 \text{ N/m}^2$	$E_s=30 \times 10^9 \text{ N/m}^2$
$\nu_c=0.15$	$\nu_s=0.20$
$\gamma_c=24000 \text{ N/m}^3$	$\gamma_s=26000 \text{ N/m}^3$

Kompleks Davranış Tekniği (FLUSH programı) ile yapılan analizlerde zeminin tabakalı ve şekil değiştirmeden bağımsız olduğu varsayımı yapılmıştır. Oluşturulan zemin tabakalarının altında düşey doğrultuda yer değiştirmeyen rijit bir tabakanın olduğu kabul edilmektedir. Bu sebeple yüzeyden tabana doğru dört farklı sağlam zeminden oluşan zemin profili seçilmiştir (Şekil 2.16). Baraj gövde betonuna ait malzeme özelliği adım adım integrasyon tekniğindeki değerlere benzer olarak alınmıştır (Tablo 2.1).

	Çakıllı Taş	$E=25 \times 10^9 \text{ N/m}^2$ $\gamma=23000 \text{ N/m}^3$ $\nu=0.30$
	Sağlam, Bozulmamış Şist	$E=35 \times 10^9 \text{ N/m}^2$ $\gamma=24000 \text{ N/m}^3$ $\nu=0.25$
	Sağlam, Bozulmamış Kireçtaşı	$E=50 \times 10^9 \text{ N/m}^2$ $\gamma=26000 \text{ N/m}^3$ $\nu=0.25$
	Sağlam, Bozulmamış Magmatik Kayaç	$E=70 \times 10^9 \text{ N/m}^2$ $\gamma=26000 \text{ N/m}^3$ $\nu=0.25$

Şekil 2.16. Kompleks davranış tekniği (FLUSH programı) analizleri için kullanılan zemin profili ve mekanik özellikler

Direkt İntegrasyon Tekniği (ANSYS programı) ile yapılan analizlerde tüm yapı-zemin etkileşim analitik modelleri için Rayleigh sönüm sabitleri 3 ile 15Hz frekansları kullanılarak %5 sönüm oranına göre hesaplanmıştır.

Kompleks Davranış Tekniği (FLUSH programı) ile yapılan analizlerde tüm yapı-zemin etkileşim analitik modellerinde kullanılan malzeme ve elemanların her biri için %5 sönüm değeri dikkate alınmıştır. Sisteme ait en büyük frekans değeri, 20Hz olarak kabul edilmiştir. Aynı zamanda tüm analitik modellerin sonlu eleman boyutları bu frekans değerine göre belirlenmiştir.

Analizler sonucu, Direkt İntegrasyon Tekniği (ANSYS programı) ile yapılan analizlerde, baraj memba yüzeyindeki yer değiştirme ve gerilmelerin yükseklik boyunca değişimleri, baraj gövdesinde alınan A-A, B-B ve C-C kesitleri boyunca gerilmelerin değişimleri, baraj kretinde alınan A nokrasına (Şekil 2.5) ait yer değiştirme ve ivmelerin zamana bağlı değişimleri elde edilmiştir. Kompleks Davranış Tekniği (FLUSH programı) ile yapılan analizlerde, yapı-zemin etkileşim modeli üzerinde alınan A, B, C, D, E, F ve G noktalarına (Şekil 2.4) ait yer değiştirme spektrumu, ivme spektrumu, hız spektrumu, zamana bağlı ivme değişimleri elde edilmiştir.

3. BULGULAR VE İRDELEMELER

3.1. Giriş

Tezin bu bölümünde, Sarıyar beton ağırlık barajının yapı-zemin dinamik etkileşimi analitik modellerinin zemin sınırlarında *geleneksel sınır, viskoz sınır ve geçirgen sınır* kullanılarak gerçekleştirilen dinamik analizlerinden elde edilen bulgular verilmektedir. Zemin ortamı içerisinde dinamik etki neticesinde ortaya çıkan P- ve S-dalgalarını absorbe edecek *viskoz sınırlar ve geleneksel sınırların* kullanıldığı yapı-zemin etkileşimi analitik modellerinin dinamik analizi, Direkt İntegrasyon Tekniği Newmark metodunu kullanan ANSYS programı ile gerçekleştirilmektedir. Rayleigh dalgalarını absorbe eden ve yarı-sonsuz ortamın dinamik rijitlik matrislerini içeren *geçirgen sınırlar ve geleneksel sınırların* kullanıldığı yapı-zemin etkileşimi analitik modellerinin dinamik analizi ise Kompleks Davranış Tekniğini kullanan FLUSH programı ile gerçekleştirilmektedir.

Direkt İntegrasyon Tekniği (ANSYS programı) ile yapılan analizler sonucu baraj memba yüzeyindeki yer değiştirme ve gerilmelerin yükseklik boyunca değişimleri, baraj gövdesinde alınan A-A, B-B ve C-C kesitleri boyunca gerilmelerin değişimleri, baraj kretinde alınan A nokrasına (Şekil 2.5) ait yer değiştirme ve ivmelerin zamana bağlı değişimleri irdelenmiştir. Kompleks Davranış Tekniği (FLUSH programı) ile yapılan analizlerde, yapı-zemin etkileşim modeli üzerinde alınan A, B, C, D, E, F ve G noktalarına (Şekil 2.4) ait yer değiştirme spektrumu, ivme spektrumu, hız spektrumu, zamana bağlı ivme değişimleri irdelenmiştir. Dinamik analizlerde kullanılan çözüm yöntemlerinin ve programların veri türlerinin farklılığından dolayı elde edilen verilerin ve sonuçların farklı olması sebebiyle tüm analiz sonuçları kendi içerisinde değerlendirilmektedir.

3.2. ANSYS Programı ile Yapılan Analiz Sonuçlarının Değerlendirilmesi

3.2.1. Zemin Sınırlarında Geleneksel Sınırların Kullanılması

Bu kısımda, Şekil 2.5 ve 2.13 arasında verilen Sarıyar barajı yapı-zemin etkileşimi analitik modellerin tümünün zemin sınırlarında *geleneksel* (rijit, sabit, ankastre) sınırlar

kullanılmıştır. Analizler sonucu elde edilen yer değiştirme, ivme, gerilmeler ayrıntılı olarak verilmektedir.

3.2.1.1. Yer Değiştirmeler

Sarıyar barajının geleneksel sınırlı yapı-zemin etkileşimi analitik modellerinin dinamik analizi sonucu, barajın memba yüzeyinde elde edilen yer değiştirmelerin mutlak değerce maksimum değerlerinin baraj yüksekliği boyunca değişimi ve baraj kret yer değiştirmelerinin dinamik etki süresince değişimi belirlenerek incelenmiştir.

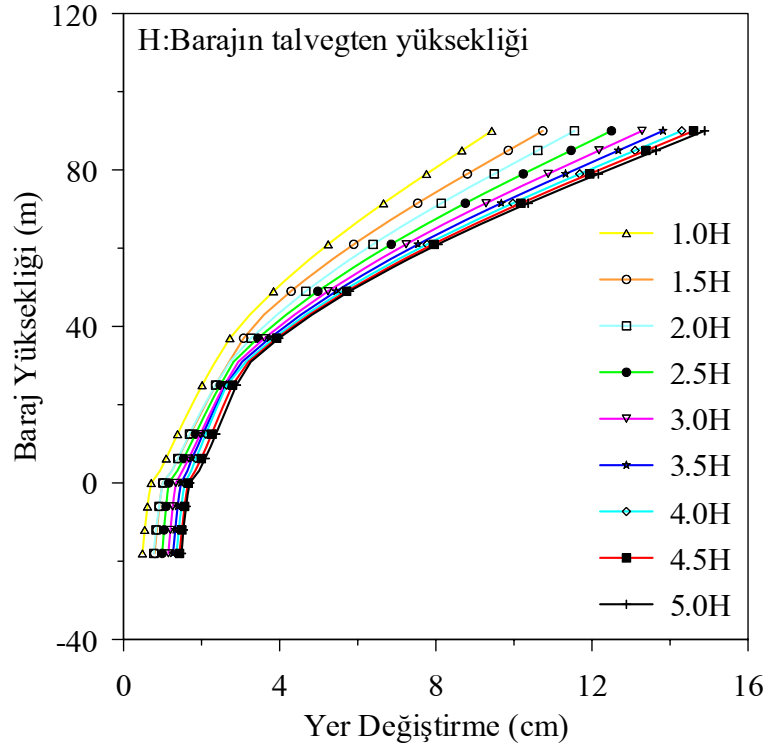
Baraj kesitinin memba yüzeyinde, memba-mansap doğrultusunda elde edilen yer değiştirmelerin mutlak değerce maksimum değerlerinin baraj yüksekliği boyunca değişimi Şekil 3.1’de verilmektedir. Bu yer değiştirmeler, her bir analitik model için yüksekliğe bağlı olarak artmakta ve baraj kretinde en büyük değeri almaktadır. Her bir model için, baraj kretinin mutlak değerce maksimum yer değiştirme değerleri sırasıyla, 9.43, 10.74, 11.55, 12.50, 13.28, 13.82, 14.30, 14.60, 14.88, 14.99, 15.06 olmaktadır. Buna göre, geleneksel sınırlar için kret noktasındaki yer değiştirmelerin değişimi, sınırlar barajdan 5H mesafe ve civarında olması durumunda sıfıra yaklaşmakta ve zemin sınırlarının etkisi kaybolmaktadır.

Baraj davranışının değerlendirilmesinde kret yer değiştirmeleri çok önemli olduğundan, bu yer değiştirmelerin dinamik etki süresince değişimi de incelenmiştir. Şekil 3.2’ den 3.10’a kadar geleneksel sınırlar kullanılması durumunda baraj kretinde elde edilen yer değiştirmelerin dinamik etki süresince değişimi verilmiştir. Bu Şekiller incelendiğinde zemin sınırının yapıdan 5H uzaklık ve civarında olması durumunda davranışın değişmediği görölmektedir.

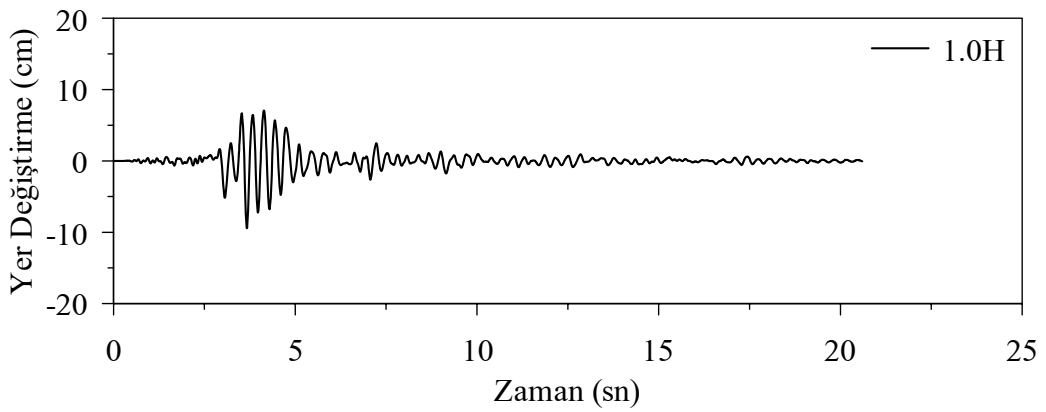
3.2.1.2. İvmeler

Şekil 2.5 ve 2.13 arasında verilen Sarıyar barajının geleneksel sınırlar kullanılarak elde edilen yapı-zemin etkileşimi analitik modellerin dinamik analizleri sonucu, baraj kret noktasındaki ivmelerin dinamik etki süresince değişimleri Şekil 3.11-3.19 arasında verilmiştir. Bu Şekillerden göröldüğü gibi, ivme değerleri geleneksel sınırların yapıdan

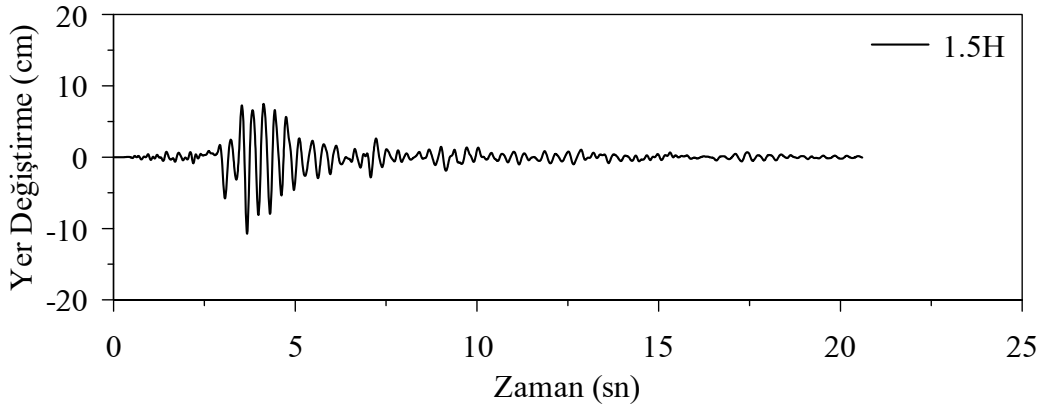
uzaklığı arttıkça artmakta ve zemin sınırının yapıdan 5H ve civarı uzaklıkta olması durumunda davranışın değişmediği görülmektedir.



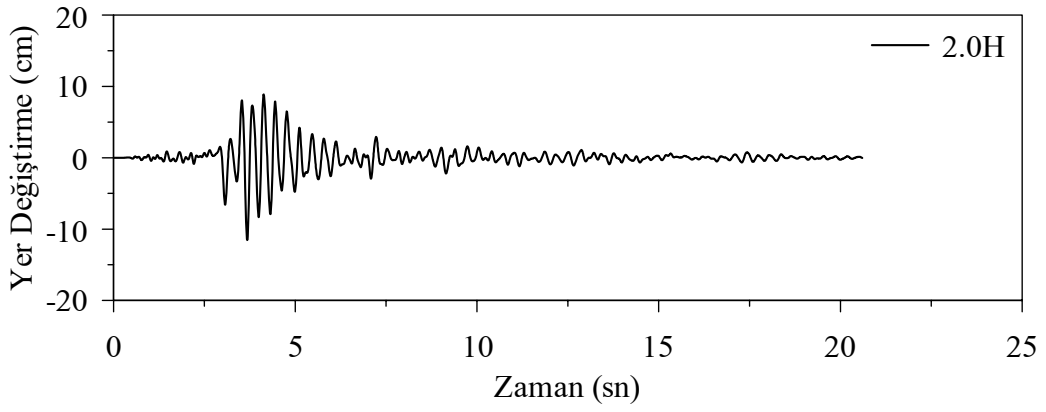
Şekil 3.1. Rijit sınır için baraj memba yüzeyi yükseklik-yer değiştirme değişimi



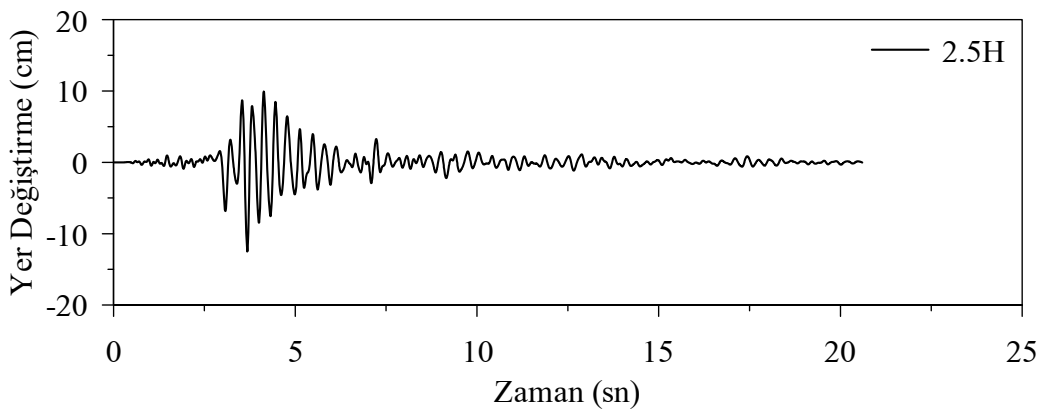
Şekil 3.2. Geleneksel sınırların 1H uzakta olması durumunda baraj kret noktasındaki yer değiştirmenin zamana bağlı değişimi



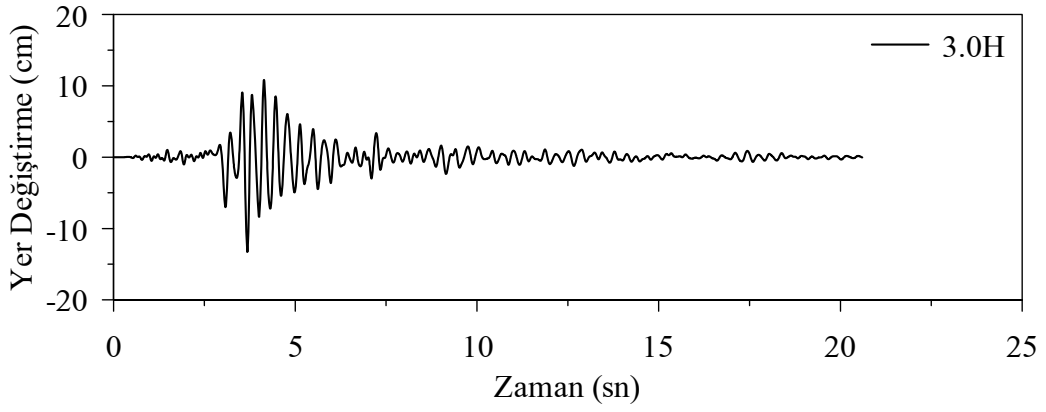
Şekil 3.3. Geleneksel sınırların 1.5H uzakta olması durumunda baraj kret noktasındaki yer değiştirmenin zamana bağlı değişimi



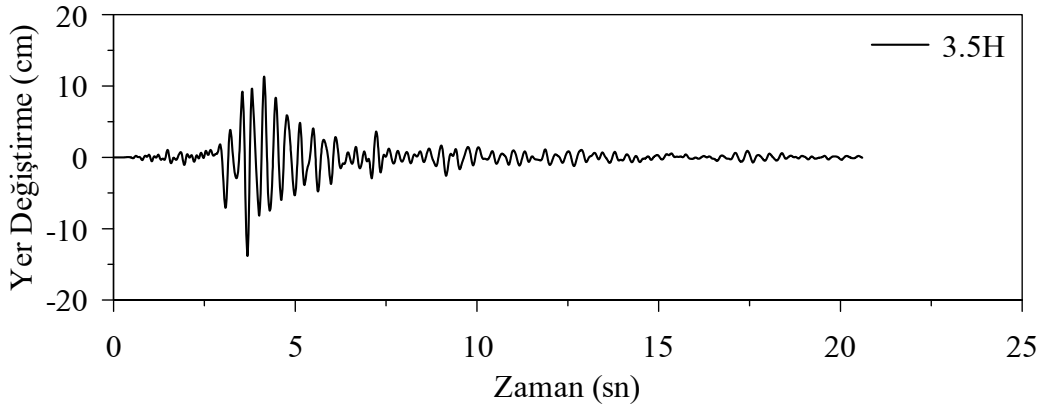
Şekil 3.4. Geleneksel sınırların 2H uzakta olması durumunda baraj kret noktasındaki yer değiştirmenin zamana bağlı değişimi



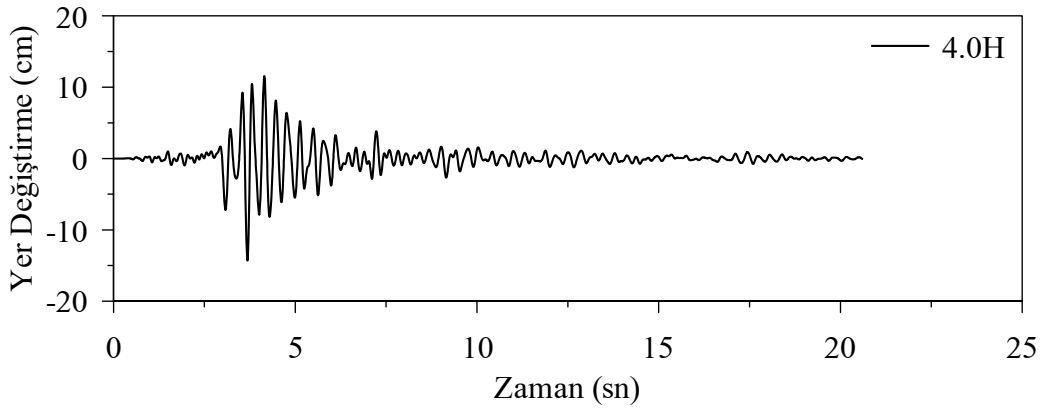
Şekil 3.5. Geleneksel sınırların 2.5H uzakta olması durumunda baraj kret noktasındaki yer değiştirmenin zamana bağlı değişimi



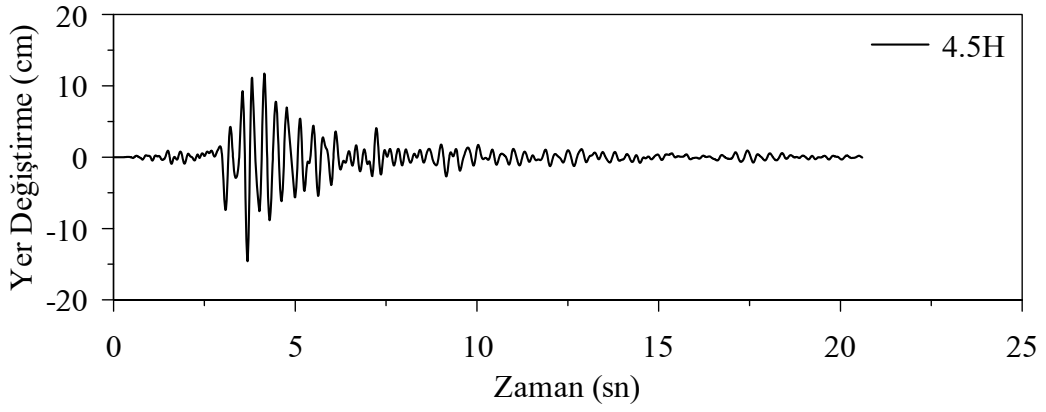
Şekil 3.6. Geleneksel sınırların 3H uzakta olması durumunda baraj kret noktasındaki yer değiştirmenin zamana bağlı değişimi



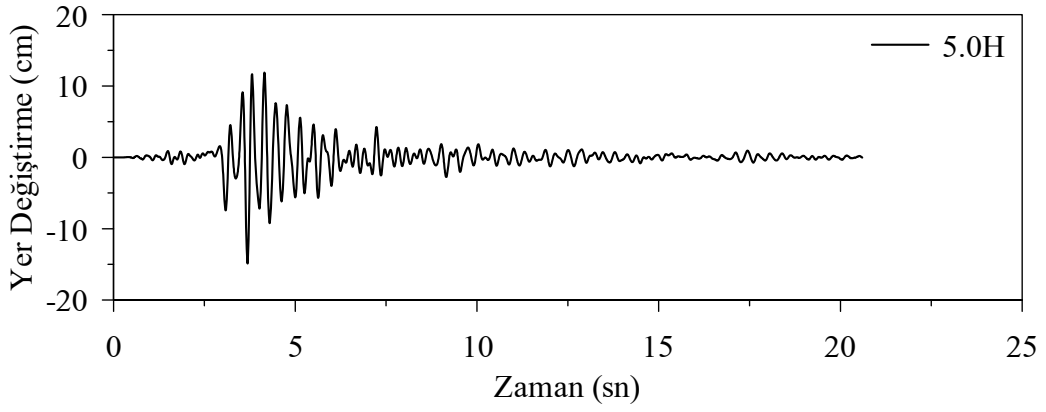
Şekil 3.7. Geleneksel sınırların 3.5H uzakta olması durumunda baraj kret noktasındaki yer değiştirmenin zamana bağlı değişimi



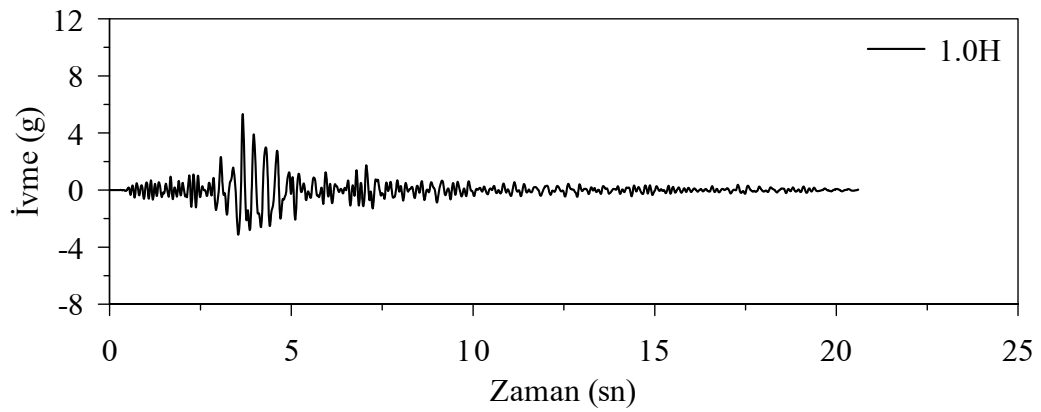
Şekil 3.8. Geleneksel sınırların 4H uzakta olması durumunda baraj kret noktasındaki yer değiştirmenin zamana bağlı değişimi



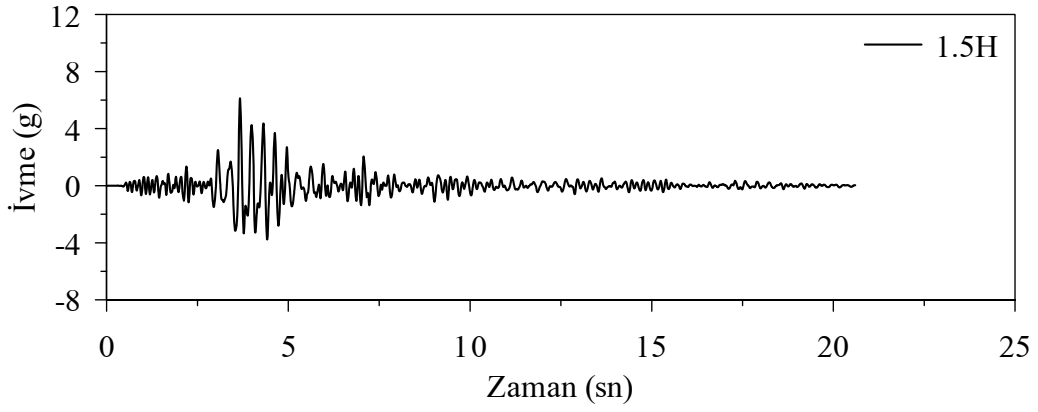
Şekil 3.9. Geleneksel sınırların 4.5H uzakta olması durumunda baraj kret noktasındaki yer değiştirmenin zamana bağlı değişimi



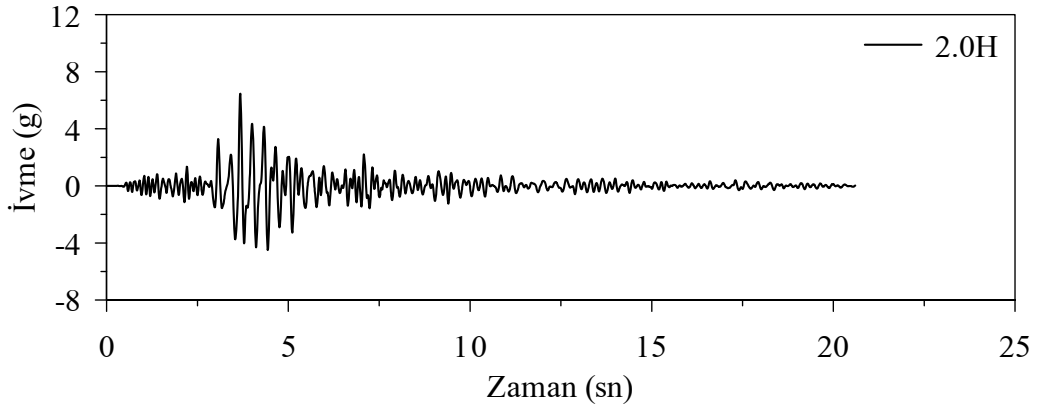
Şekil 3.10. Geleneksel sınırların 5H uzakta olması durumunda baraj kret noktasındaki yer değiştirmenin zamana bağlı değişimi



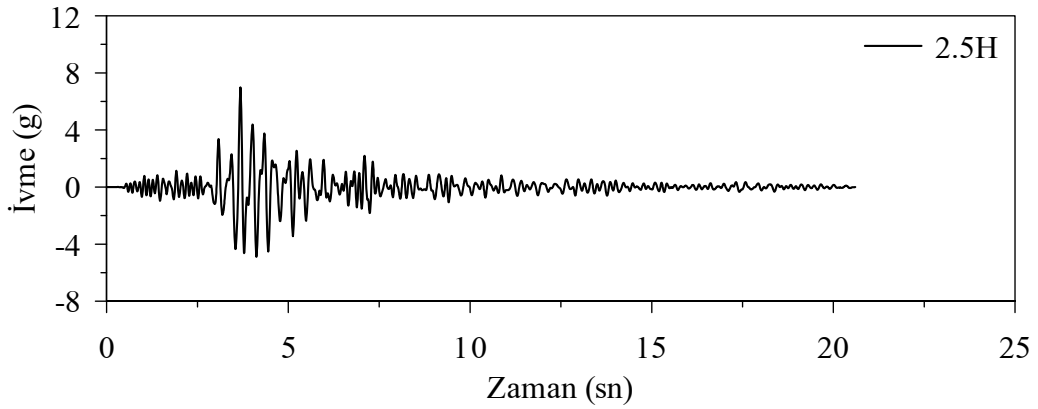
Şekil 3.11. Geleneksel sınırların 1H uzakta olması durumunda baraj kret noktasındaki ivmenin zamana bağlı değişimi



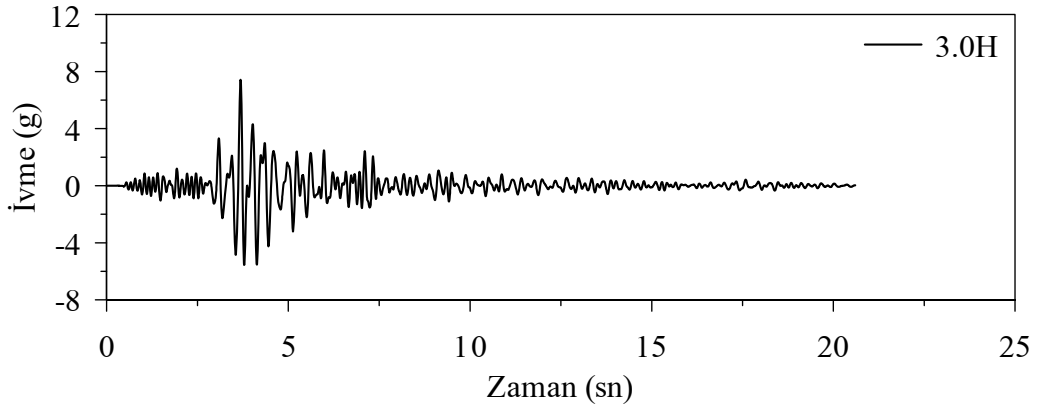
Şekil 3.12. Geleneksel sınırların 1.5H uzakta olması durumunda baraj kret noktasındaki ivmenin zamana bağlı değişimi



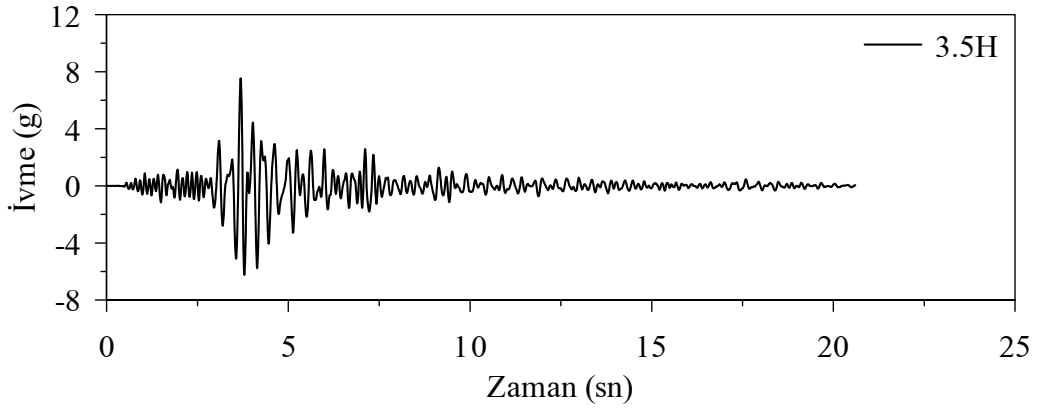
Şekil 3.13. Geleneksel sınırların 2H uzakta olması durumunda baraj kret noktasındaki ivmenin zamana bağlı değişimi



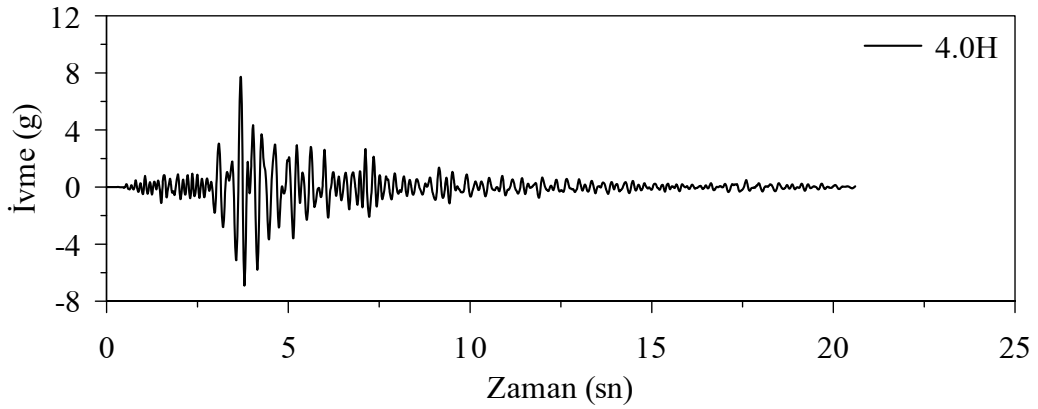
Şekil 3.14. Geleneksel sınırların 2.5H uzakta olması durumunda baraj kret noktasındaki ivmenin zamana bağlı değişimi



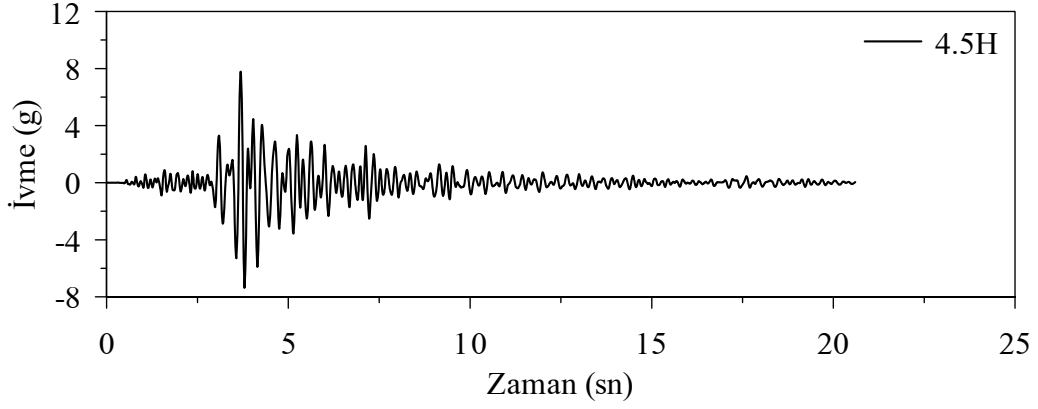
Şekil 3.15. Geleneksel sınırların 3H uzakta olması durumunda baraj kret noktasındaki ivmenin zamana bağlı değişimi



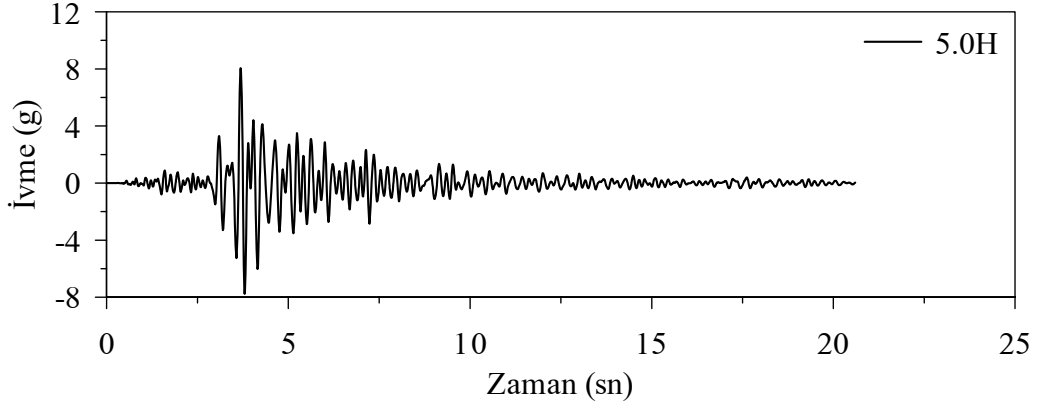
Şekil 3.16. Geleneksel sınırların 3.5H uzakta olması durumunda baraj kret noktasındaki ivmenin zamana bağlı değişimi



Şekil 3.17. Geleneksel sınırların 4H uzakta olması durumunda baraj kret noktasındaki ivmenin zamana bağlı değişimi



Şekil 3.18. Geleneksel sınırların 4.5H uzakta olması durumunda baraj kret noktasındaki ivmenin zamana bağlı değişimi



Şekil 3.19. Geleneksel sınırların 5H uzakta olması durumunda baraj kret noktasındaki ivmenin zamana bağlı değişimi

3.2.1.3. Gerilmeler

Sarıyar barajının geleneksel sınırlı yapı-zemin etkileşimi analitik modellerinin dinamik analizi sonucu, barajın memba yüzeyinde elde edilen gerilmelerin mutlak değerce maksimum değerlerinin baraj yüksekliği boyunca değişimi ve baraj gövdesinde alınan A-A, B-B ve C-C kesitleri üzerinde membadan uzaklık boyunca gerilme değişimleri elde edilmiştir.

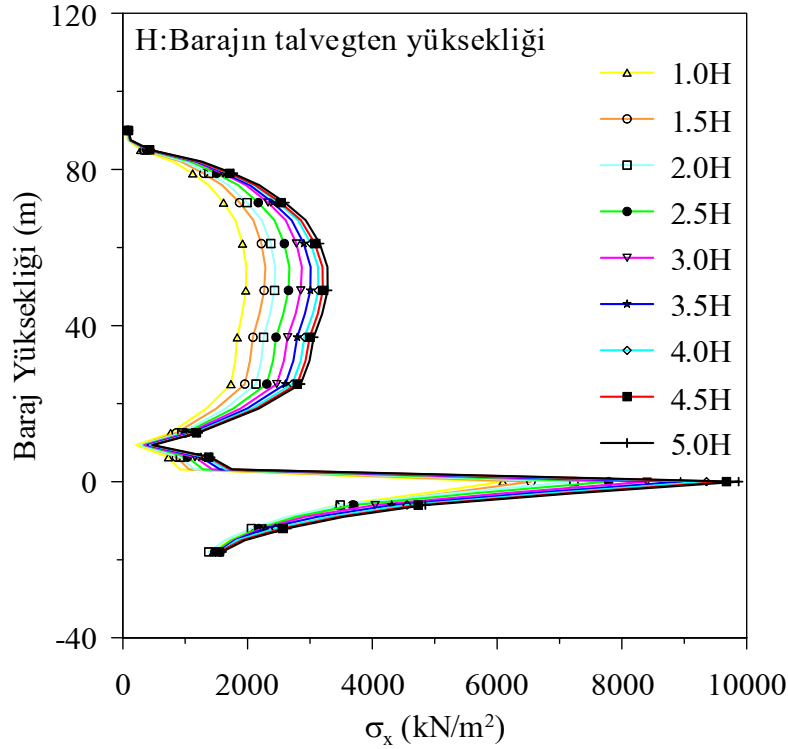
Baraj kesitinin memba yüzeyinde elde edilen gerilmelerin mutlak değerce maksimum değerlerinin baraj yüksekliği boyunca değişimi Şekil 3.20 ile Şekil 3.22 arasında verilmektedir. Her bir analitik model için yüksekliğe bağlı olarak değişim gösteren gerilmeler, zemin yüzeyine yakın noktalarda maksimum değerler almaktadır. Her bir

model için, maksimum σ_x -normal gerilmeleri, +0 kotunda oluşmakta ve sırasıyla, 6090.15, 6543.05, 7230.21, 7787.57, 8404.32, 8940.48, 9357.11, 9674.91, 9871.55 kN/m² olmaktadır. Her bir model için maksimum σ_y -normal gerilmeleri, +3.125 kotunda oluşmakta ve sırasıyla, 15930.40, 18020.30, 19392.10, 21169.80, 22816.10, 24156.80, 25152.50, 25916.80, 26337.50 kN/m² olmaktadır. Her bir model için maksimum τ_{xy} -gerilmeleri, +0 kotunda oluşmakta ve sırasıyla, 5767.01, 6375.63, 6964.73, 7515.72, 7515.72, 8532.71, 8886.87, 9173.55, 9326.33 kN/m² olmaktadır. Buna göre, geleneksel sınırlar için kret noktasındaki gerilmelerin değişimi, barajdan 5H mesafesinden sonra azalmakta ve bu mesafeden sonra zemin sınırlarının etkisi kaybolmaktadır.

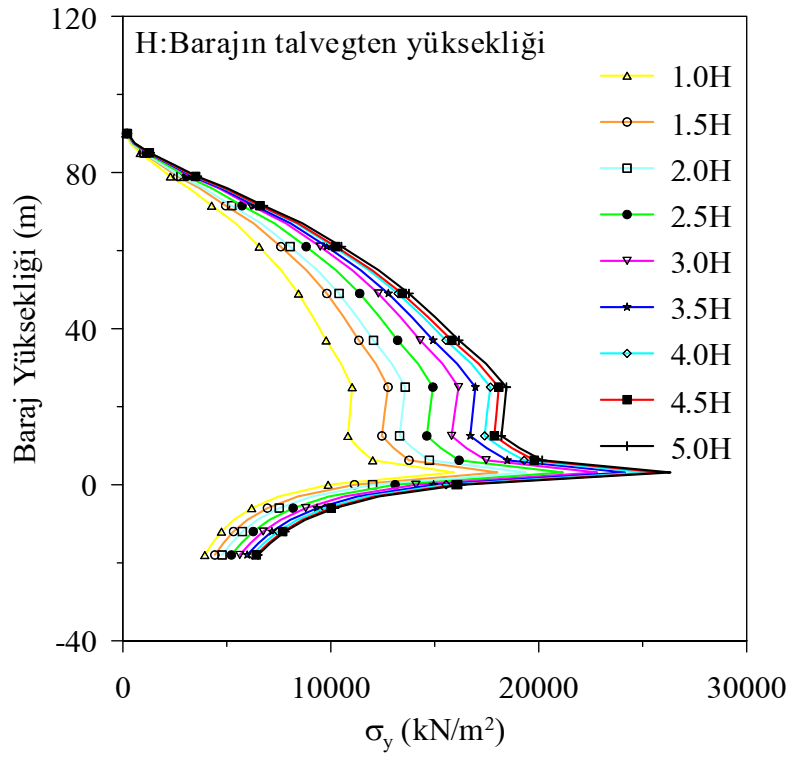
Yapı davranışının değerlendirilmesinde en önemli parametrelerden bir tanesi de dayanım olduğu için, barajın en çok zorlandığı noktaları bulmak ve davranışı buna göre değerlendirmek gerekmektedir. Bu doğrultuda mevcut baraj gövdesinde dinamik etki altında büyük gerilmelere maruz kalacağı düşünülen A-A, B-B ve C-C kesitlerindeki gerilme değerleri değerlendirmeye alınmıştır. A-A kesitinde her bir model için maksimum σ_x -normal gerilmeleri, membadan 38.0625 m uzakta oluşmakta ve sırasıyla, 1777.89, 2010.74, 2210.32, 2400.29, 2589.35, 2750.14, 2867.10, 2950.40, 3013.08 kN/m² olmaktadır. A-A kesitinde her bir model için maksimum σ_y -normal gerilmeleri, memba yüzeyinde oluşmakta ve sırasıyla, 11026.20, 12754.50, 13581.80, 14911.50, 16147.70, 16952.40, 17676.40, 18080.90, 18445.60 kN/m² olmaktadır. A-A kesitinde her bir model için maksimum τ_{xy} -gerilmeleri, mansap yüzeyinde oluşmakta ve sırasıyla, 4162.48, 4746.38, 5138.31, 5584.19, 5989.18, 6314.93, 6569.55, 6753.81, 6916.35 kN/m² olmaktadır. A-A kesitindeki gerilmelerin değişimi Şekil 3.23-25 arasında verilmektedir. B-B kesitinde her bir model için maksimum σ_x -normal gerilmeleri, membadan 72m uzaklıktaki baraj mansap yüzeyi-zemin yüzeyi kesişim noktasında oluşmakta ve sırasıyla, 7441.45, 7897.17, 8490.88, 9170.01, 9860.06, 10438.00, 10911.10, 11258.60, 11504.20 kN/m² olmaktadır. B-B kesitinde her bir model için maksimum σ_y -normal gerilmeleri, baraj memba yüzeyi-zemin yüzeyi kesişim noktasında oluşmakta ve sırasıyla, 9873.33, 11140.50, 12009.90, 13094.10, 14098.90, 14941.20, 15543.10, 16026.30, 16287.80 kN/m² olmaktadır. B-B kesitinde her bir model için maksimum τ_{xy} -gerilmeleri, baraj memba yüzeyi-zemin yüzeyi kesişim noktasında oluşmakta ve sırasıyla 5767.01, 6375.63, 6964.73, 7515.72, 8052.54, 8532.71, 8886.87, 9173.55, 9326.33 kN/m² olmaktadır. B-B kesitindeki gerilmelerin değişimi Şekil 3.26-28 arasında verilmektedir. C-C kesitinde her

bir model için maksimum σ_x -normal gerilmeleri, baraj burun noktasında oluşmakta ve sırasıyla 2244.65, 2428.5, 2198.73, 2342.85, 2343.02, 2434.71, 2613.44, 2726.05, 2814.58 kN/m^2 olmaktadır. C-C kesitinde her bir model için maksimum σ_y -normal gerilmeleri, membadan 5.4562 m uzaklıkta oluşmakta ve sırasıyla 4528.43, 5106.2, 5483.79, 6002.44, 6486.61, 6881.38, 7164.49, 7388.42, 7476.92 kN/m^2 olmaktadır. C-C kesitinde her bir model için maksimum τ_{xy} -gerilmeleri, membadan 81.8437 m uzaklıkta oluşmakta ve sırasıyla 1738.11, 1921.44, 1949.99, 2040.03, 2163.51, 2258.44, 2340.95, 2389.42, 2443.90 kN/m^2 olmaktadır. C-C kesitindeki gerilmelerin değişimi Şekil 3.29-31 arasında verilmektedir

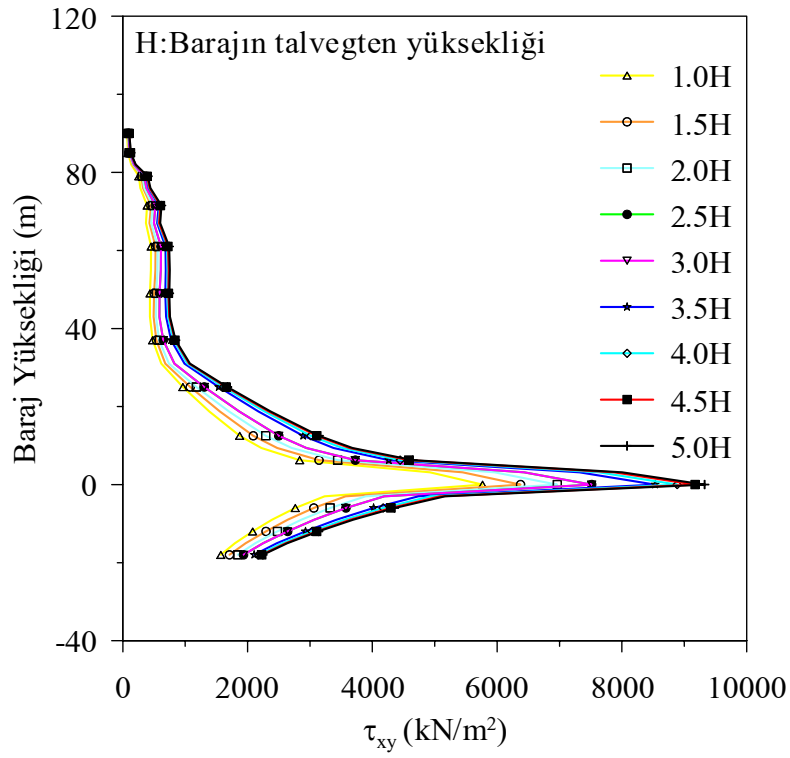
İlgili şekillerden de görüleceği gibi geleneksel sınırlı modeller için zemin sınırının 5H uzaklık ve civarında olması durumunda davranış sabit değer almakta ve sınırların davranış üzerindeki etkisi kaybolmaktadır.



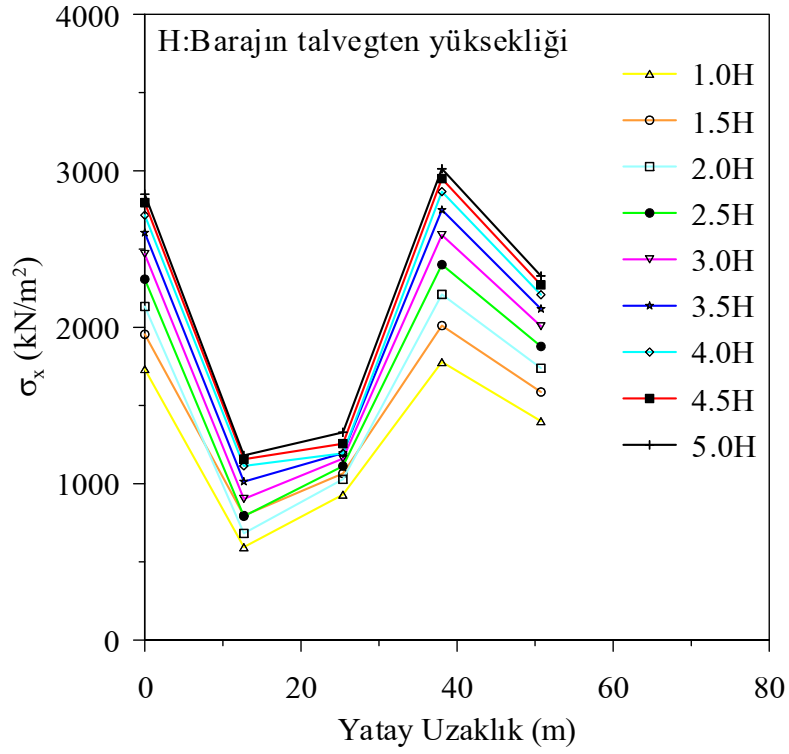
Şekil 3.20. Rijit sınır için baraj memba yüzeyi yükseklik- σ_x değişimi



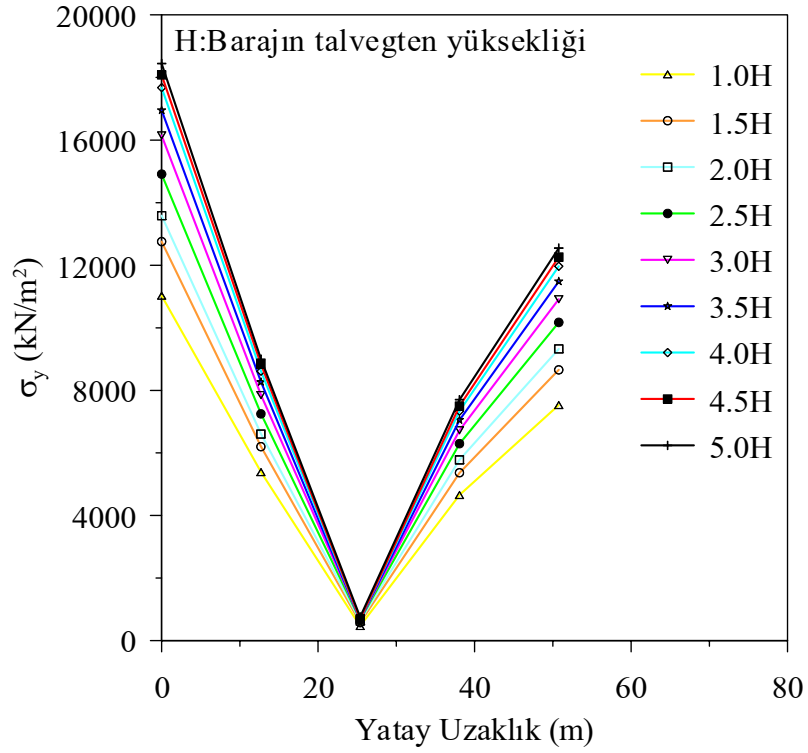
Şekil 3.21. Rijit sınır için baraj memba yüzeyi yükseklik- σ_y değişimi



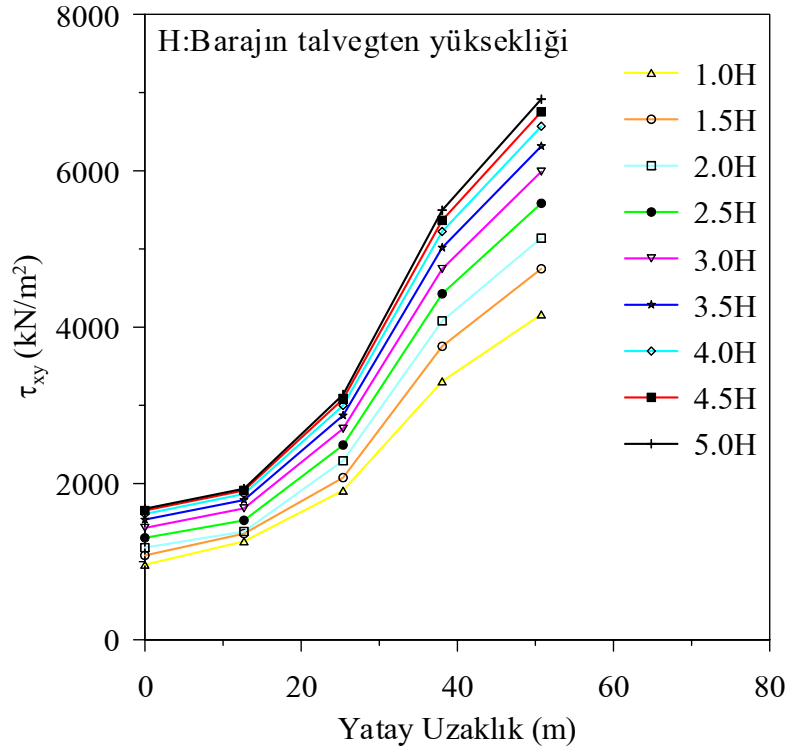
Şekil 3.22. Rijit sınır için baraj memba yüzeyi yükseklik- τ_{xy} değişimi



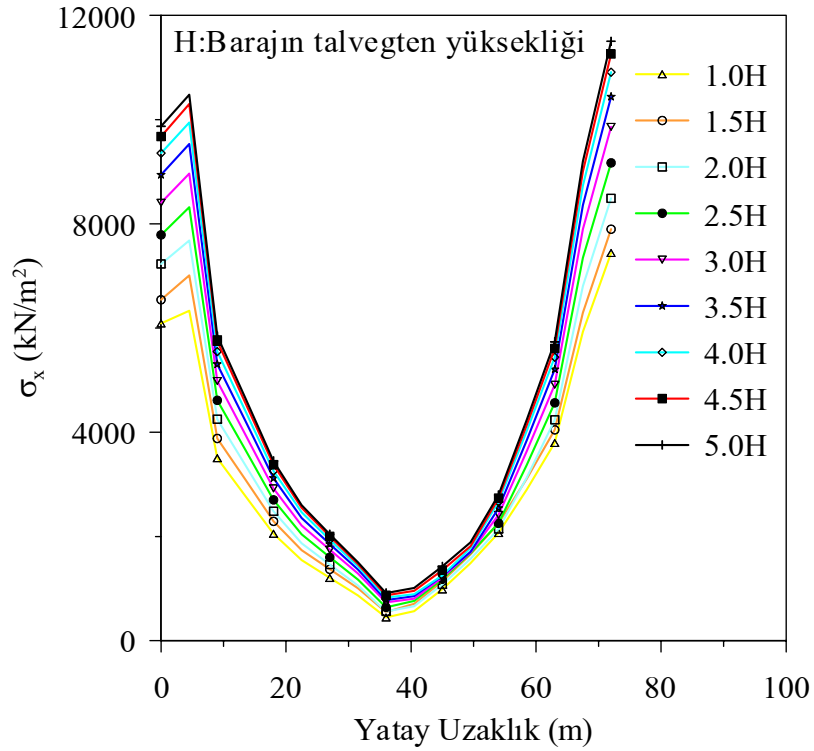
Şekil 3.23. Rijit sınır için A-A kesiti boyunca σ_x -normal gerilme değişimi



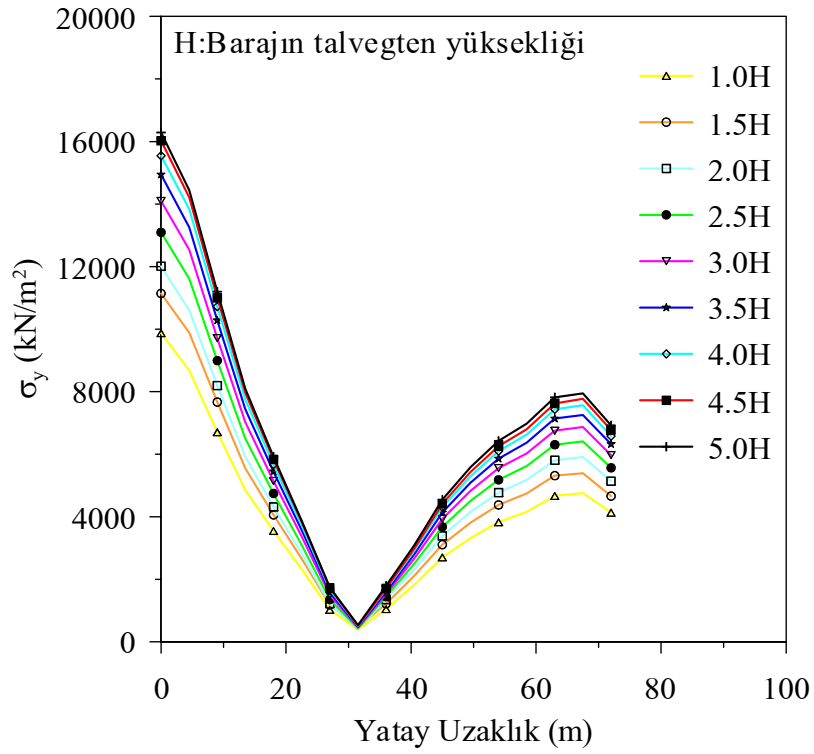
Şekil 3.24. Rijit sınır için A-A kesiti boyunca σ_y -normal gerilme değişimi



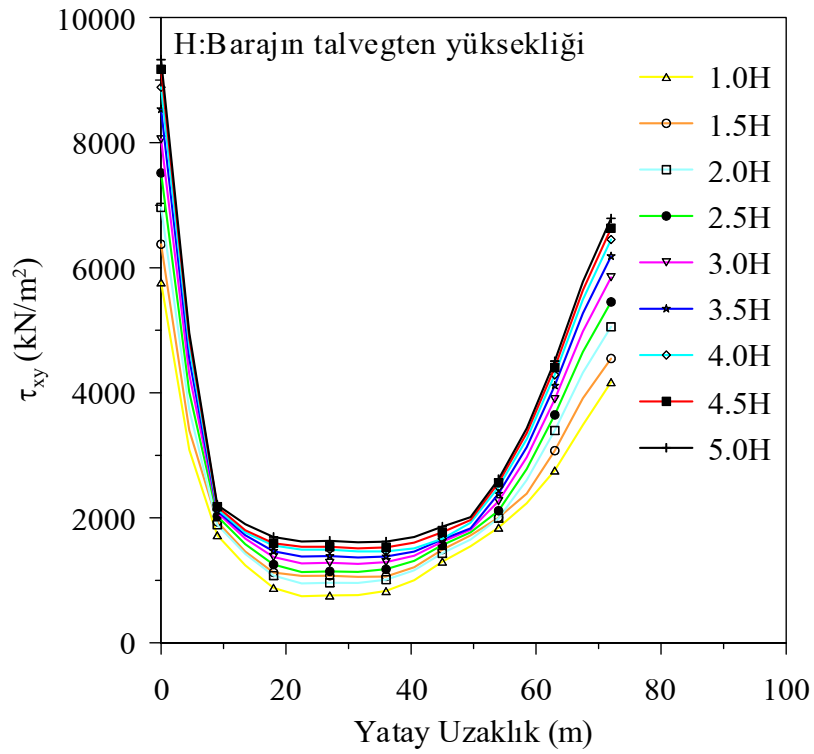
Şekil 3.25. Rijit sınır için A-A kesiti boyunca τ_{xy} -kayma gerilmesi değişimi



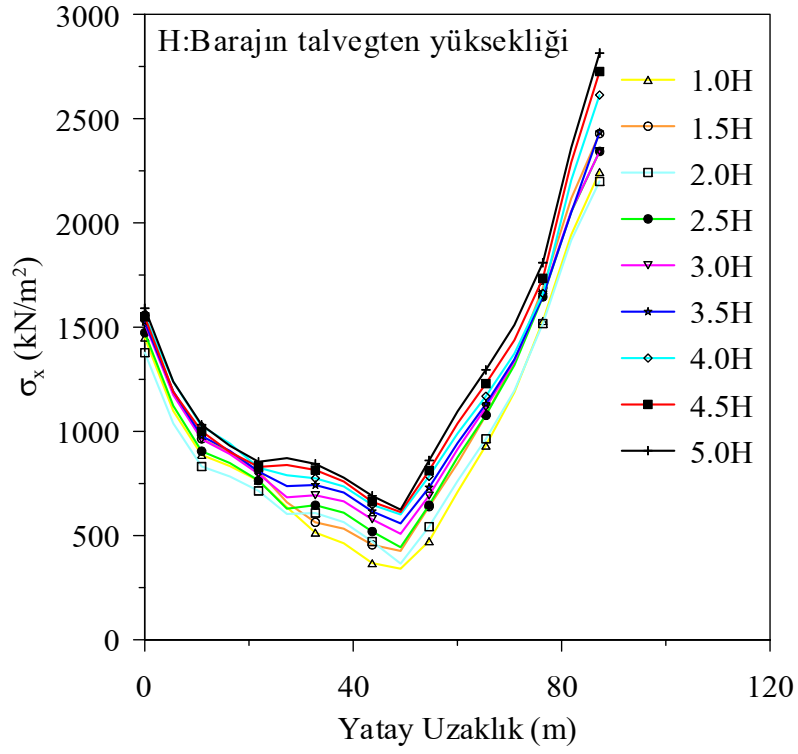
Şekil 3.26. Rijit sınır için B-B kesiti boyunca σ_x -normal gerilme değişimi



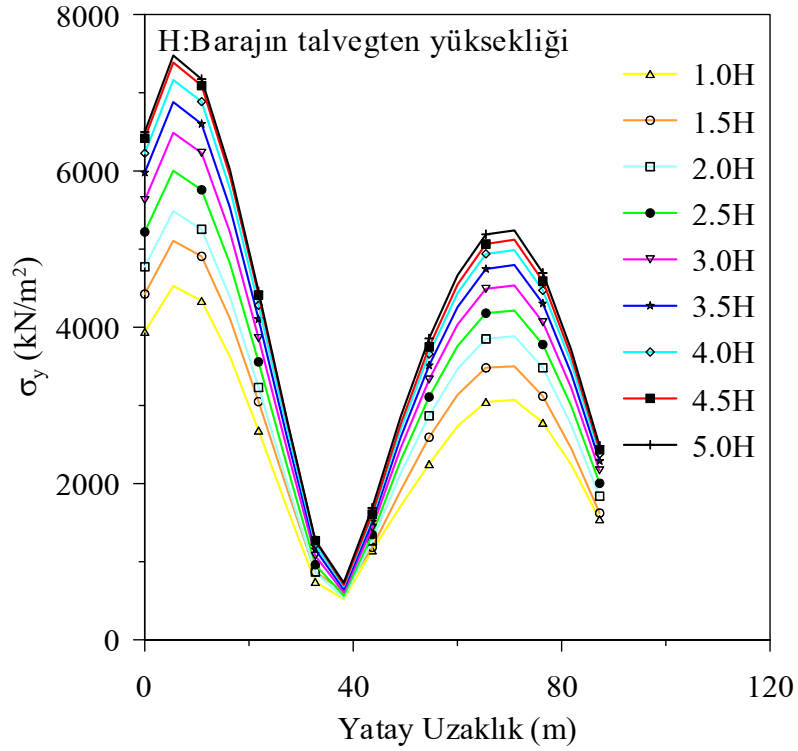
Şekil 3.27. Rijit sınır için B-B kesiti boyunca σ_y -normal gerilme değişimi



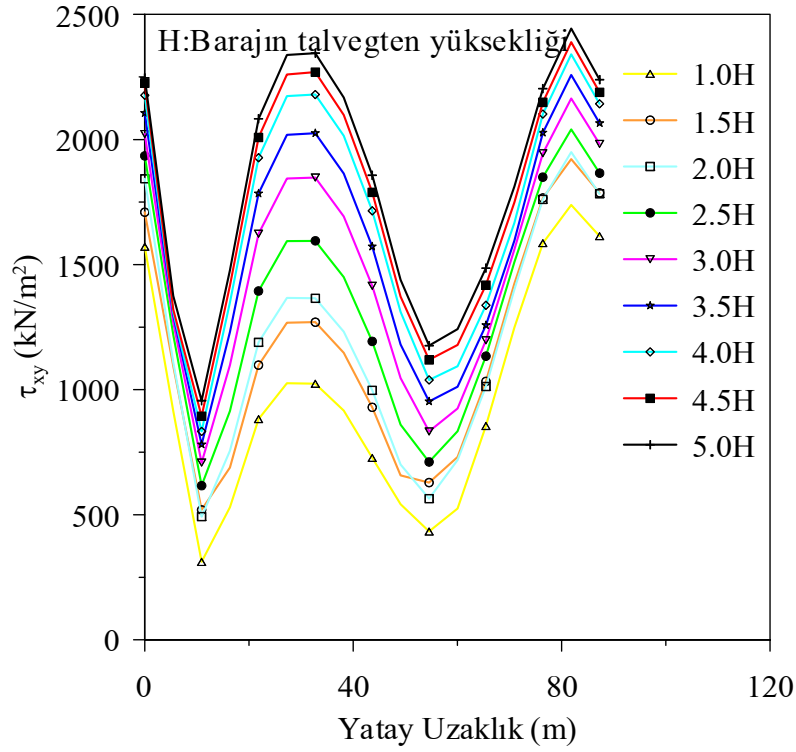
Şekil 3.28. Rijit sınır için B-B kesiti boyunca τ_{xy} -kayma gerilmesi değişimi



Şekil 3.29. Rijit sınır için C-C kesiti boyunca σ_x -normal gerilme değişimi



Şekil 3.30. Rijit sınır için C-C kesiti boyunca σ_y -normal gerilme değişimi



Şekil 3.31. Rijit sınır için C-C kesiti boyunca τ_{xy} -kayma gerilmesi değişimi

3.2.2. Zemin Sınırlarında Viskoz Sönümleyicilerin Kullanılması

Bu kısımda, Şekil 2.5 ve 2.9 arasında verilen Sarıyar barajı yapı-zemin etkileşimi analitik modellerin zemin sınırlarında viskoz sınırlar kullanılmıştır. Analizler sonucu elde edilen yer değiştirme, ivme, gerilmeler ayrıntılı olarak verilmektedir.

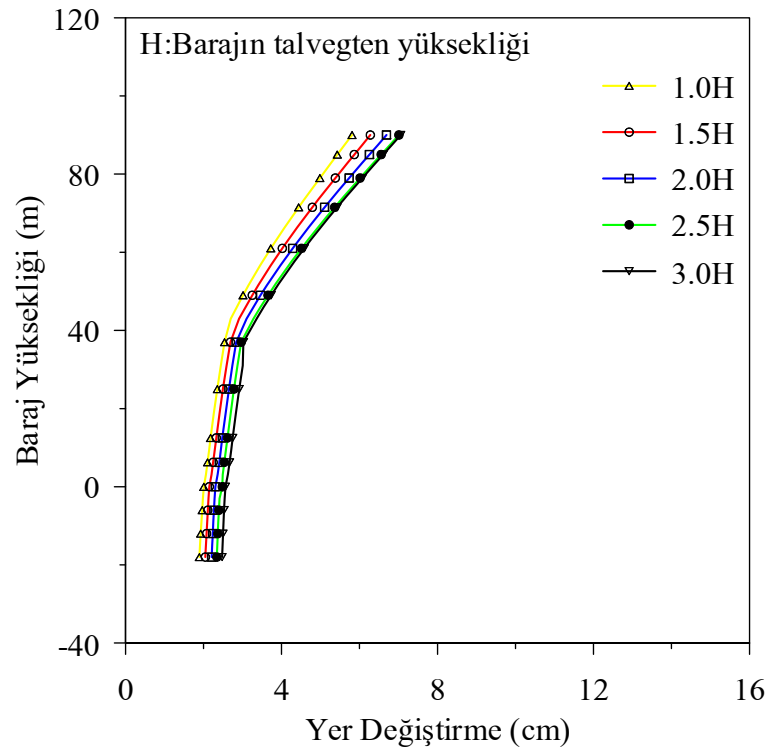
3.2.2.1. Yer Değiştirmeler

Sarıyar barajının viskoz sınırlı yapı-zemin etkileşimi analitik modellerinin dinamik analizi sonucu, barajın memba yüzeyinde elde edilen yer değiştirmelerin mutlak değerce maksimum değerlerinin baraj yüksekliği boyunca değişimi ve baraj kret yer değiştirmelerinin dinamik etki süresince değişimi belirlenerek incelenmiştir.

Baraj kesitinin memba yüzeyinde, memba-mansap doğrultusunda elde edilen yer değiştirmelerin mutlak değerce maksimum değerlerinin baraj yüksekliği boyunca değişimi Şekil 3.32'de verilmektedir. Bu yer değiştirmeler, her bir analitik model için yüksekliğe bağlı olarak artmakta ve baraj kretinde en büyük değeri almaktadır. Her bir model için,

baraj kretinin mutlak değerce maksimum yer değıştirme değeri sırasıyla 5.80, 6.28, 6.69, 7.01, 7.06 cm olmaktadır. Buna göre, geleneksel sınırlar için kret noktasındaki yer değıştirmelerin değışimi, barajdan 3H mesafesinden sonra sıfıra yaklaşmakta ve zemin sınırlarının etkisi kaybolmaktadır.

Şekil 3.33'ten 3.37'a kadar viskoz sınırlar kullanılması durumunda baraj kretinde elde edilen yer değıştirmelerin dinamik etki süresince değışimi verilmiştir. Bu şekiller incelendiğinde zemin sınırının 3H uzaklık ve civarında olması durumunda davranışın değışmediği görülmektedir.

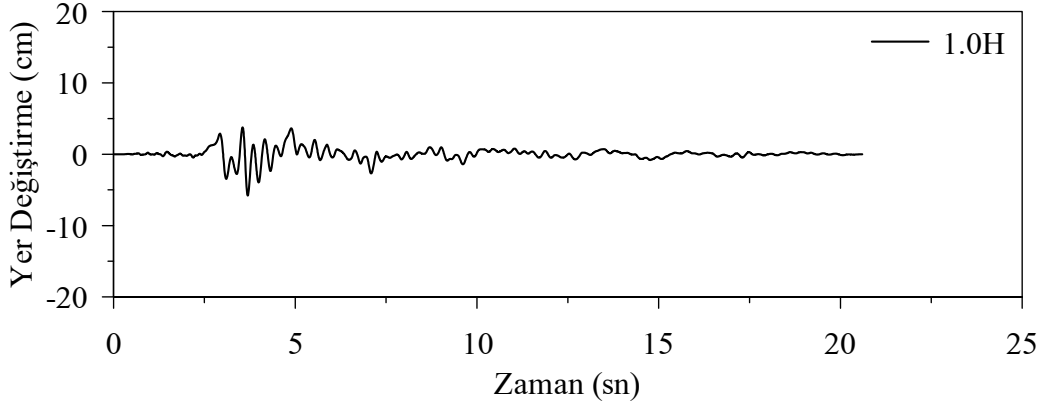


Şekil 3.32. Viskoz sınır için baraj memba yüzeyi yükseklik-yer değıştirme değışimi

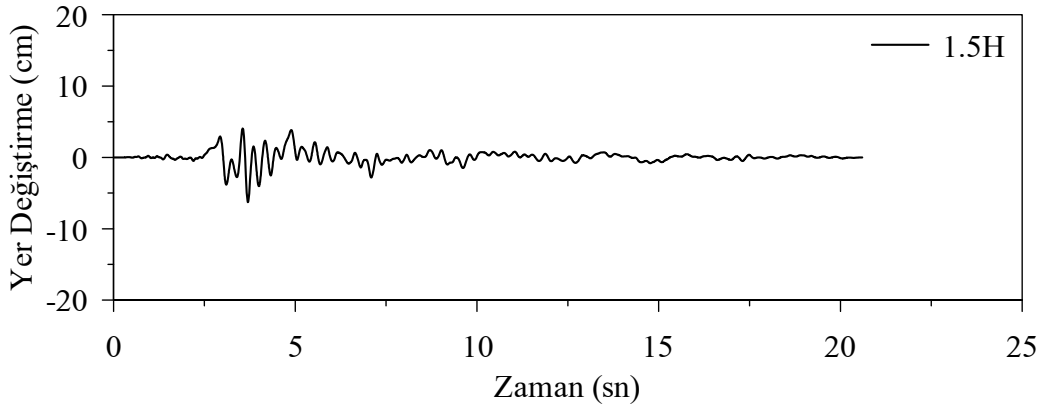
3.2.2.2. İvmeler

Şekil 2.5 ve 2.13 arasında verilen Sarıyar barajının viskoz sınırlar kullanılarak elde edilen yapı-zemin etkileşimi analitik modellerin dinamik analizleri sonucu, baraj kret noktasındaki ivmelerin dinamik etki süresince değışimleri Şekil 3.33-3.42 arasında verilmiştir. Bu şekillerden görüldüğü gibi, ivmeler geleneksel sınırların yapıdan uzaklığı

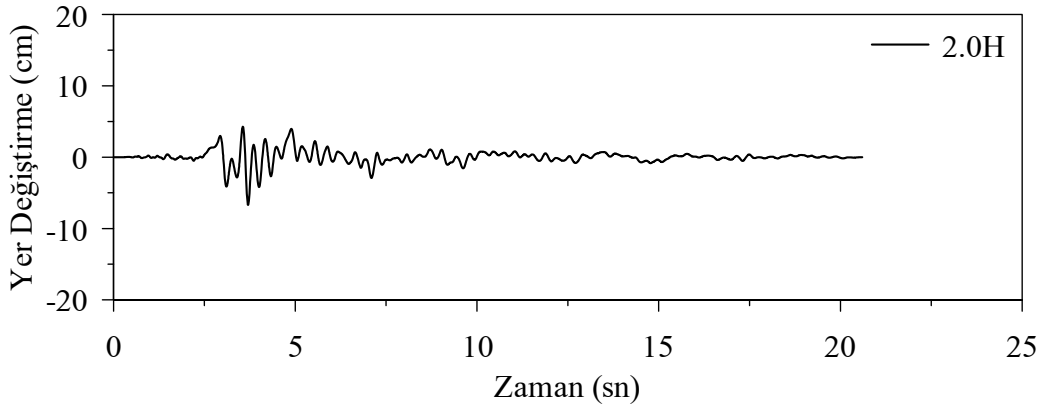
arttıkça artmakta ve zemin sınırı 5H uzakta olması durumunda davranışın değişmediği görülmektedir.



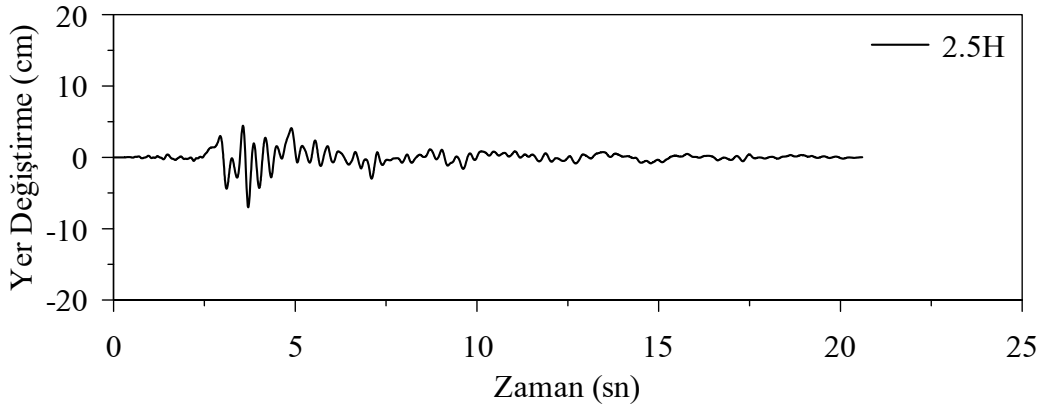
Şekil 3.33. Viskoz sınırların 1H uzakta olması durumunda baraj kret noktasındaki yer değiştirmenin zamana bağlı değişimi



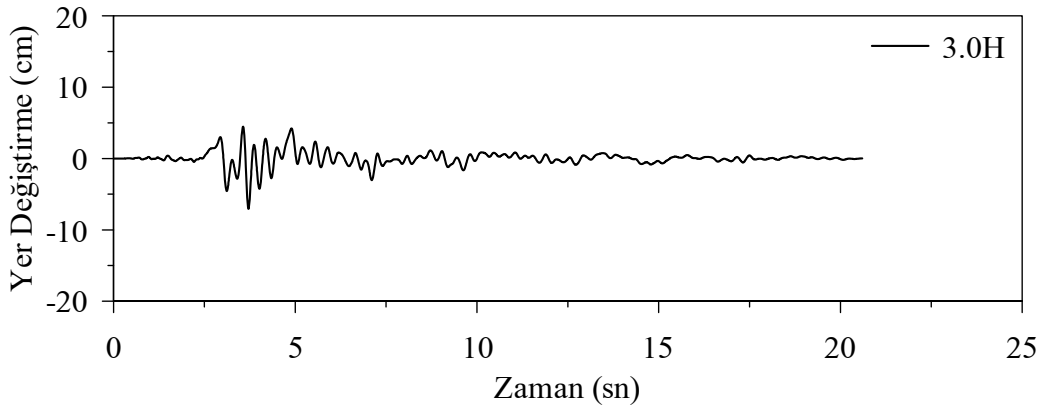
Şekil 3.34. Viskoz sınırların 1.5H uzakta olması durumunda baraj kret noktasındaki yer değiştirmenin zamana bağlı değişimi



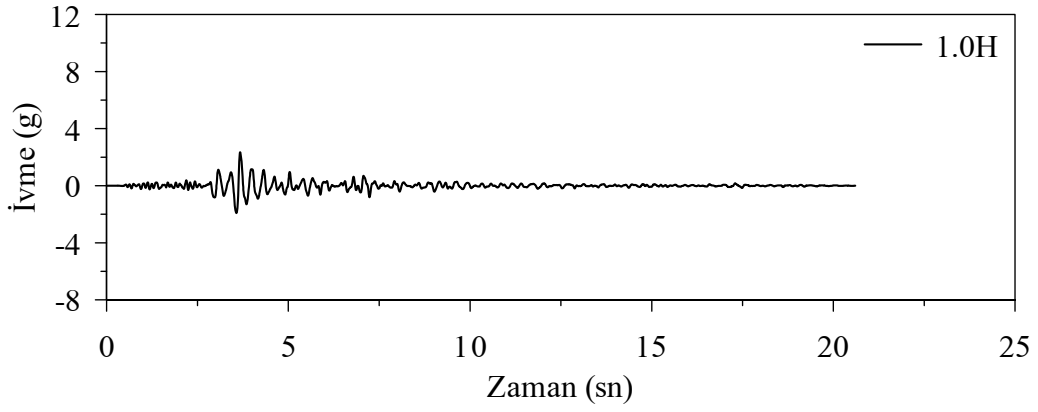
Şekil 3.35. Viskoz sınırların 2H uzakta olması durumunda baraj kret noktasındaki yer değiştirmenin zamana bağlı değişimi



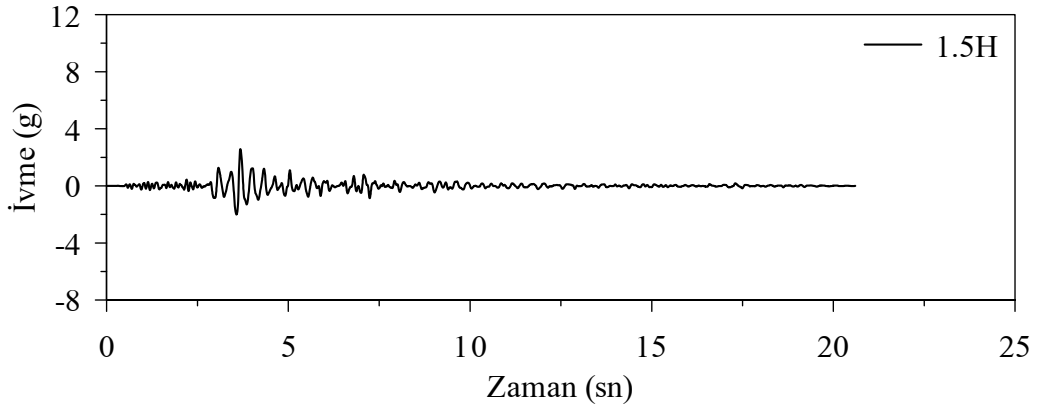
Şekil 3.36. Viskoz sınırların 2.5H uzakta olması durumunda baraj kret noktasındaki yer değiştirmenin zamana bağlı değişimi



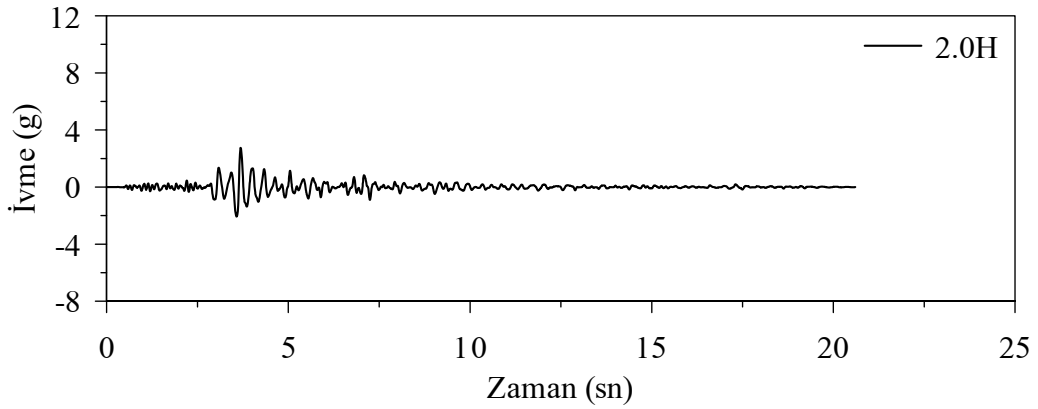
Şekil 3.37. Viskoz sınırların 3H uzakta olması durumunda baraj kret noktasındaki yer değiştirmenin zamana bağlı değişimi



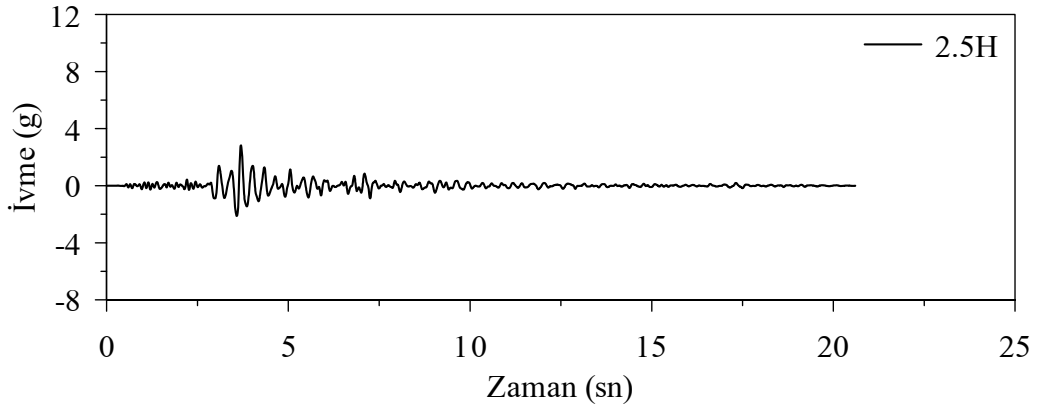
Şekil 3.38. Viskoz sınırların 1H uzakta olması durumunda baraj kret noktasındaki ivmenin zamana bağlı değişimi



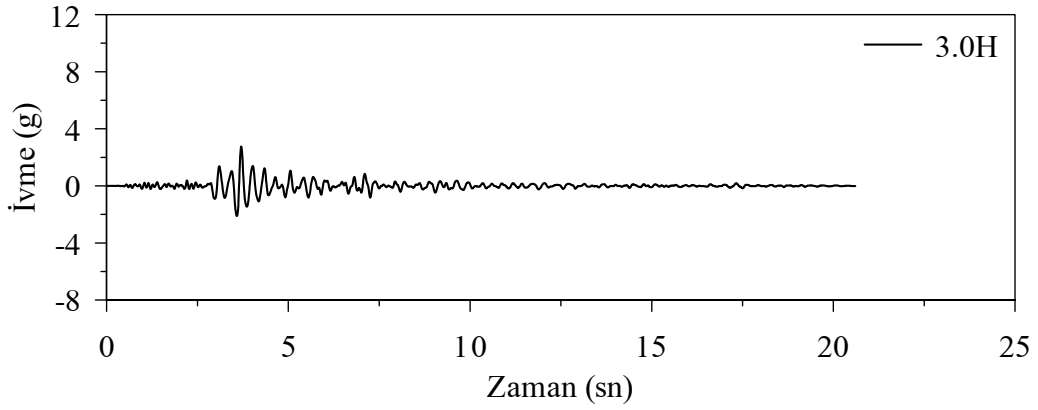
Şekil 3.39. Viskoz sınırların 1.5H uzakta olması durumunda baraj kret noktasındaki ivmenin zamana bağlı değişimi



Şekil 3.40. Viskoz sınırların 2H uzakta olması durumunda baraj kret noktasındaki ivmenin zamana bağlı değişimi



Şekil 3.41. Viskoz sınırların 2.5H uzakta olması durumunda baraj kret noktasındaki ivmenin zamana bağlı değişimi



Şekil 3.42. Viskoz sınırların 3H uzakta olması durumunda baraj kret noktasındaki ivmenin zamana bağlı değişimi

3.2.2.3. Gerilmeler

Sarıyar barajının viskoz sınırlı yapı-zemin etkileşimi analitik modellerinin dinamik analizi sonucu, barajın memba yüzeyinde elde edilen gerilmelerin mutlak değerce maksimum değerlerinin baraj yüksekliği boyunca değişimi ve baraj gövdesinde alınan A-A, B-B ve C-C kesitleri üzerinde membadan uzaklık boyunca gerilme değişimleri elde edilmiştir.

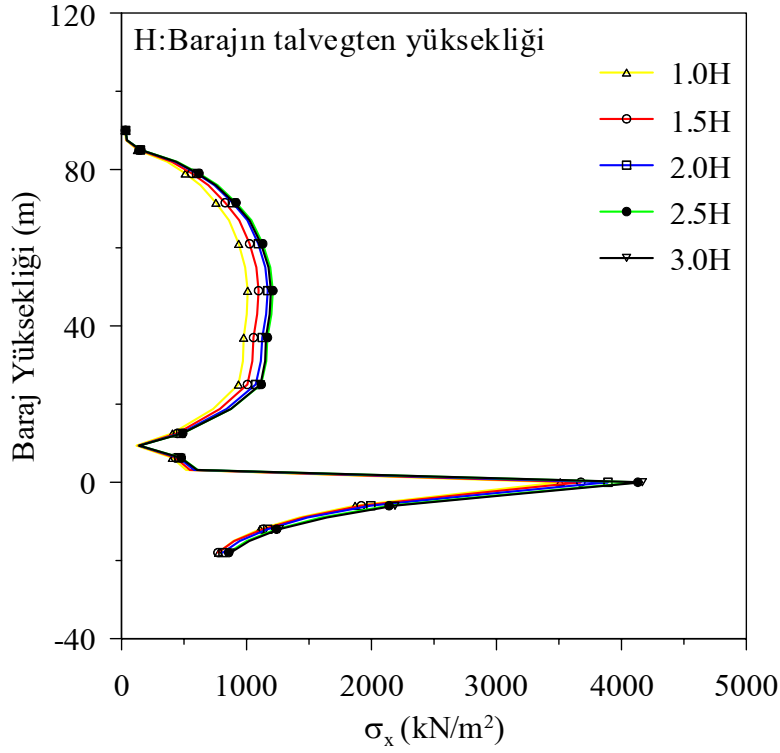
Baraj kesitinin memba yüzeyinde elde edilen gerilmelerin mutlak değerce maksimum değerlerinin baraj yüksekliği boyunca değişimi Şekil 3.43 ile Şekil 3.45 arasında verilmektedir. Her bir analitik model için yüksekliğe bağlı olarak değişim gösteren gerilmeler, zemin yüzeyine yakın noktalarda maksimum değerler almaktadır. Her bir

model için, maksimum σ_x -normal gerilmeleri, +0 kotunda oluşmakta ve sırasıyla 3509.47, 3675.49, 3893.53, 4131.79, 4167.78 kN/m² olmaktadır. Her bir model için maksimum σ_y -normal gerilmeleri, +3.125 kotunda oluşmakta ve sırasıyla, 8436.37, 9070.74, 9663.21, 10052.6, 9983.31 kN/m² olmaktadır. Her bir model için maksimum τ_{xy} -gerilmeleri, +0 kotunda oluşmakta ve sırasıyla 3509.47, 3675.49, 3893.53, 4131.79, 4167.78 kN/m² olmaktadır. Buna göre, geleneksel sınırlar için kret noktasındaki gerilmelerin değişimi, barajdan 3H mesafesinden sonra azaldığı ve bu mesafeden sonra zemin sınırlarının etkisi kaybolduğu görülmektedir.

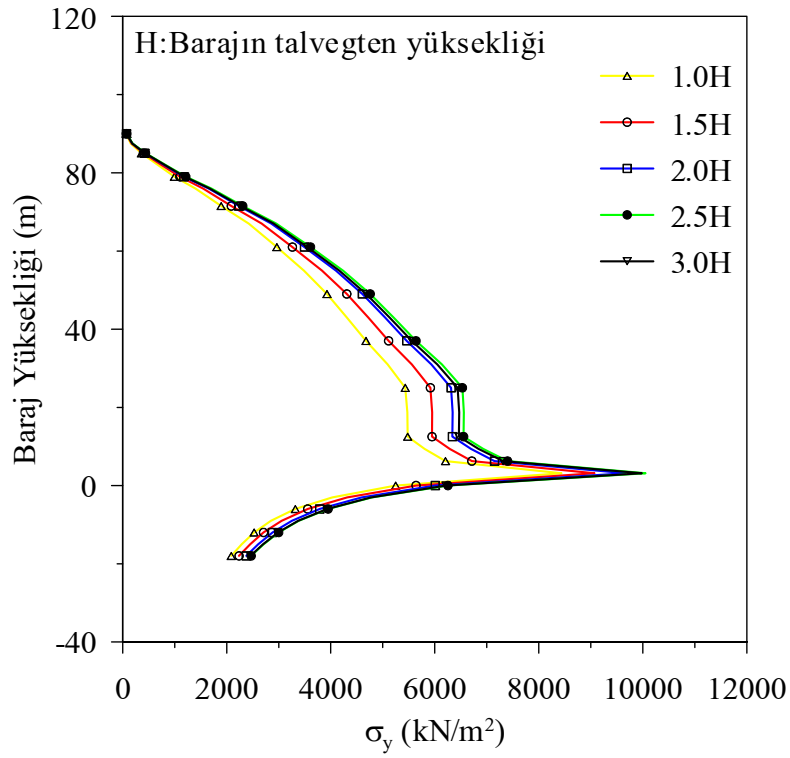
Mevcut baraj gövdesinde dinamik etki altında büyük gerilmelere maruz kalacağı düşünülen A-A, B-B ve C-C kesitlerindeki gerilme değerleri değerlendirmeye alınmıştır. A-A kesitinde her bir model için maksimum σ_x -normal gerilmeleri, membadan 38.0625 m uzakta oluşmakta ve sırasıyla 996.937, 1073.02, 1142.61, 1185.56, 1175.93 kN/m² olmaktadır. A-A kesitinde her bir model için maksimum σ_y -normal gerilmeleri, memba yüzeyinde oluşmakta ve sırasıyla 5431.44, 5915.89, 6314.65, 6530.69, 6438.02 kN/m² olmaktadır. A-A kesitinde her bir model için maksimum τ_{xy} -gerilmeleri, mansap yüzeyinde oluşmakta ve sırasıyla 2199.16, 2379.46, 2537.92, 2632.6, 2606.93 kN/m² olmaktadır. A-A kesitindeki gerilmelerin değişimi Şekil 3.46-48 arasında verilmektedir. B-B kesitinde her bir model için maksimum σ_x -normal gerilmeleri, membadan 72m uzaklıktaki baraj mansap yüzeyi-zemin yüzeyi kesişim noktasında oluşmakta ve sırasıyla 4107.97, 4340.17, 4623.16, 4873.48, 4898.86 kN/m² olmaktadır. B-B kesitinde her bir model için maksimum σ_y -normal gerilmeleri, baraj memba yüzeyi-zemin yüzeyi kesişim noktasında oluşmakta ve sırasıyla 5250.35, 5640.26, 6007.93, 6253.37, 6215.11 kN/m² olmaktadır. B-B kesitinde her bir model için maksimum τ_{xy} -gerilmeleri, baraj memba yüzeyi-zemin yüzeyi kesişim noktasında oluşmakta ve sırasıyla 3210.79, 3408.47, 3624.57, 3807.36, 3812.89 kN/m² olmaktadır. B-B kesitindeki gerilmelerin değişimi Şekil 3.49-51 arasında verilmektedir. C-C kesitinde her bir model için maksimum σ_x -normal gerilmeleri, baraj burun noktasında oluşmakta ve sırasıyla 1173.29, 1190.85, 1259.52, 1328.96, 1346.41 kN/m² olmaktadır. C-C kesitinde her bir model için maksimum σ_y -normal gerilmeleri, membadan 5.4562 m uzaklıkta oluşmakta ve sırasıyla 2369.15, 2547.89, 2705.95, 2808.32, 2789.49 kN/m² olmaktadır. C-C kesitinde her bir model için maksimum τ_{xy} -gerilmeleri, membadan 81.8437 m uzaklıkta oluşmakta ve sırasıyla 870.039, 961.041, 1021.31, 1042.3, 1030.83

kN/m^2 olmaktadır. C-C kesitindeki gerilmelerin değişimi Şekil 3.51-53 arasında verilmektedir

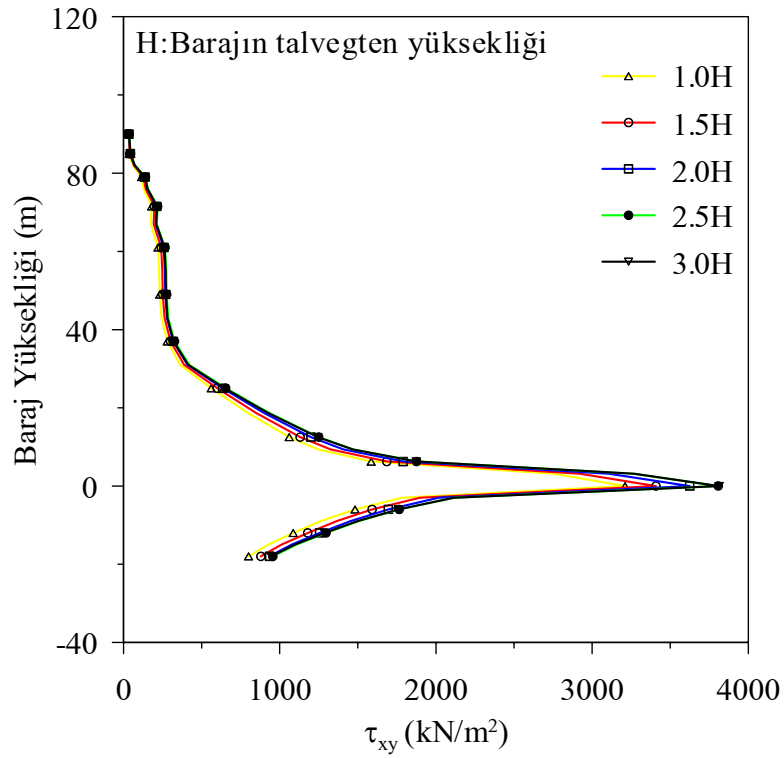
İlgili şekillerden de görüleceği gibi viskoz sınırlı modeller için zemin sınırının $3H$ uzaklık ve civarında olması durumunda davranış sabit kalmakta ve sınırların davranış üzerindeki etkisi kaybolmaktadır.



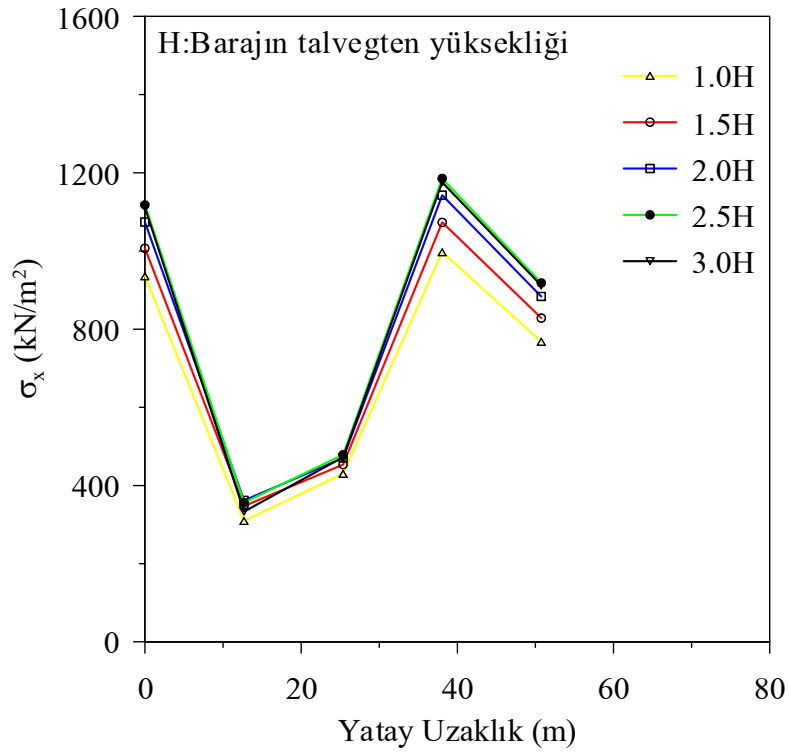
Şekil 3.43. Viskoz sınır için baraj memba yüzeyi yükseklik- σ_x değişimi



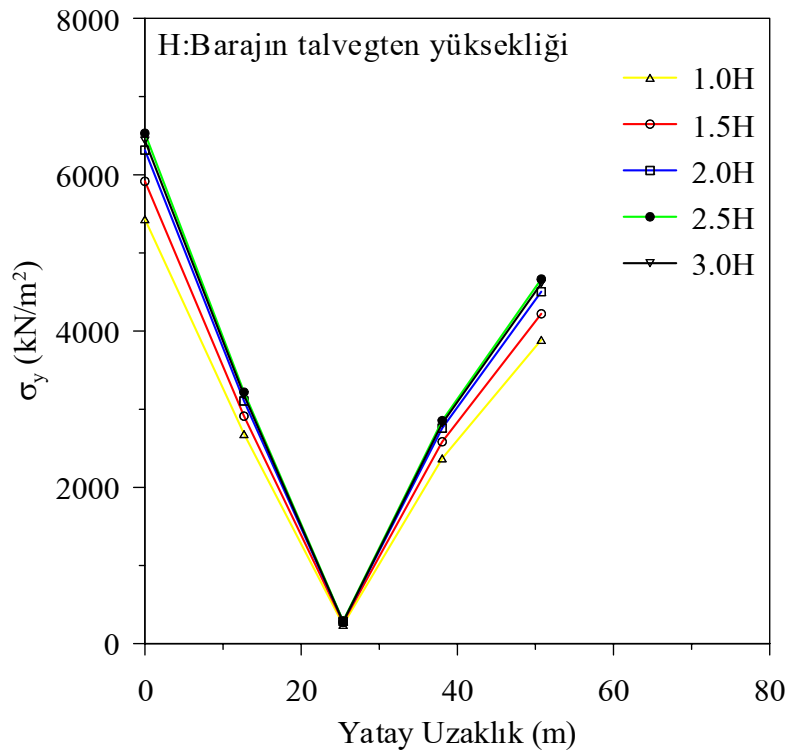
Şekil 3.44. Viskoz sınır için baraj memba yüzeyi yükseklik- σ_y değişimi



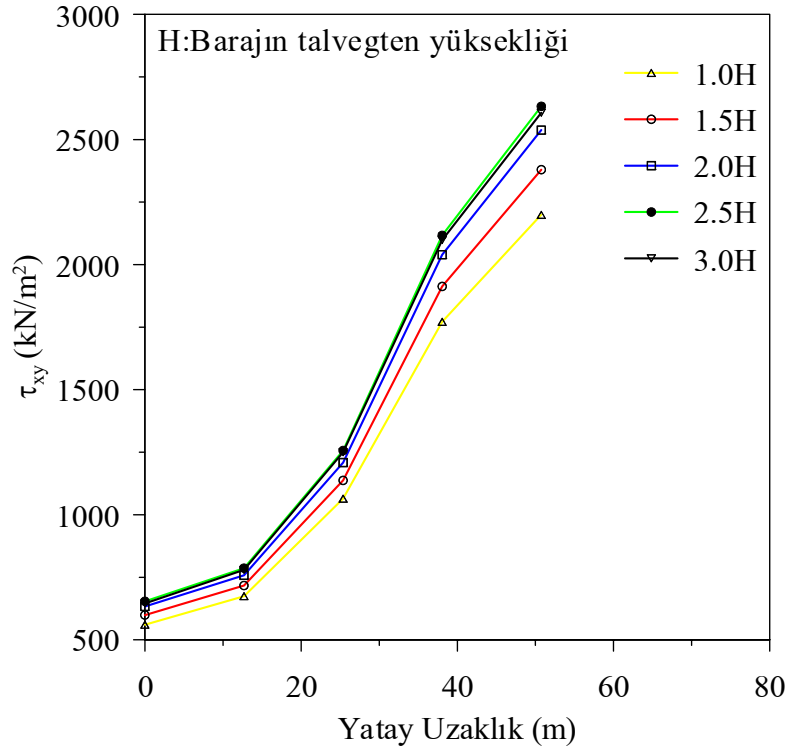
Şekil 3.45. Viskoz sınır için baraj memba yüzeyi yükseklik- τ_y değişimi



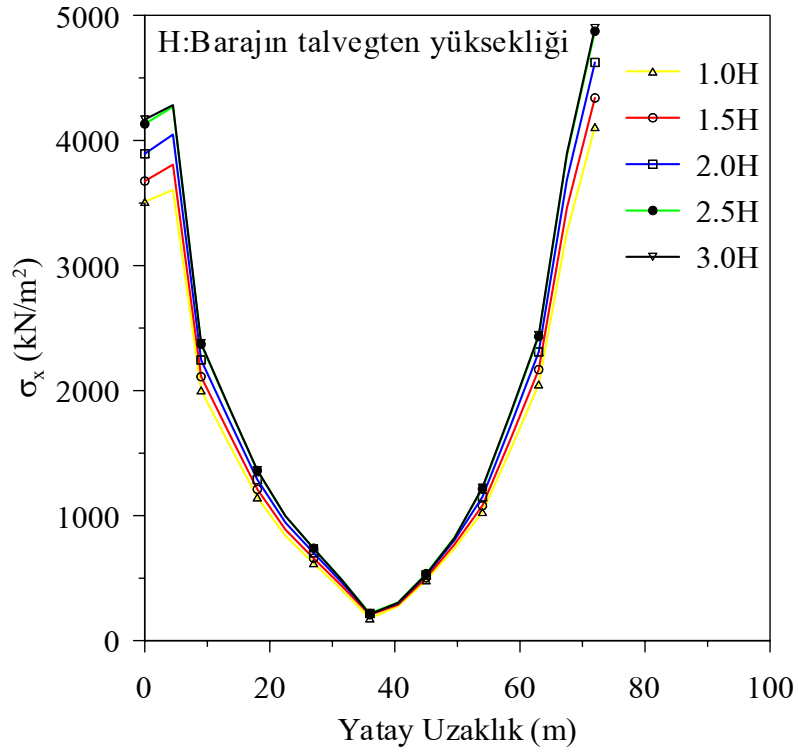
Şekil 3.46. Viskoz sınır için A-A kesiti boyunca σ_x -normal gerilme değişimi



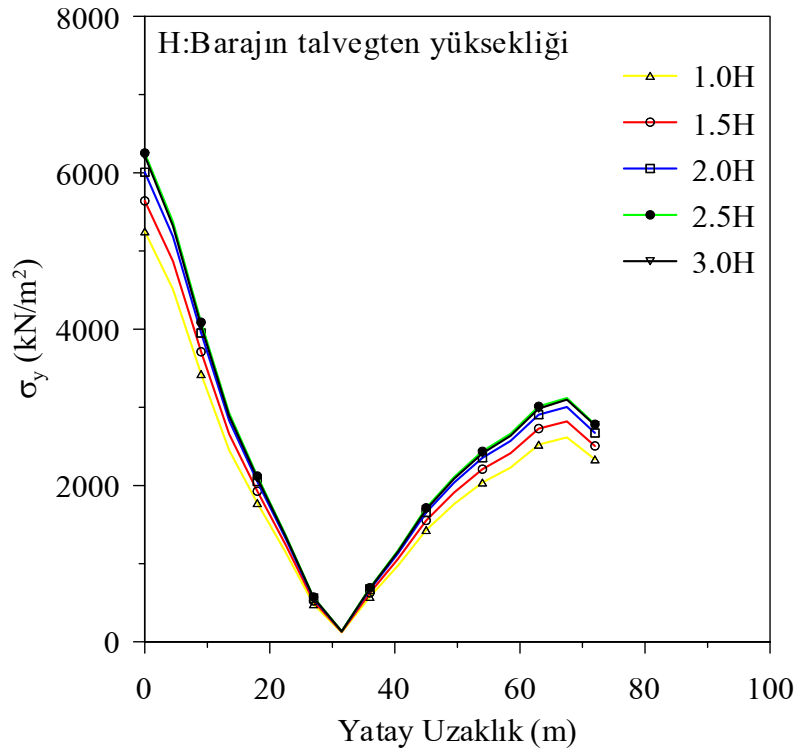
Şekil 3.47. Viskoz sınır için A-A kesiti boyunca σ_y -normal gerilme değişimi



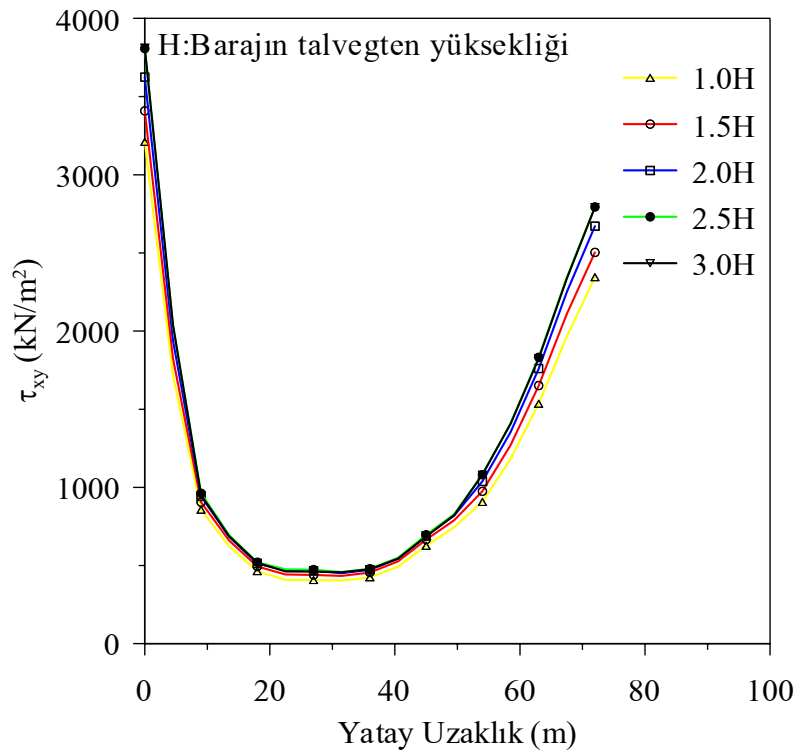
Şekil 3.48. Viskoz sınır için A-A kesiti boyunca τ_{xy} -kayma gerilmesi değişimi



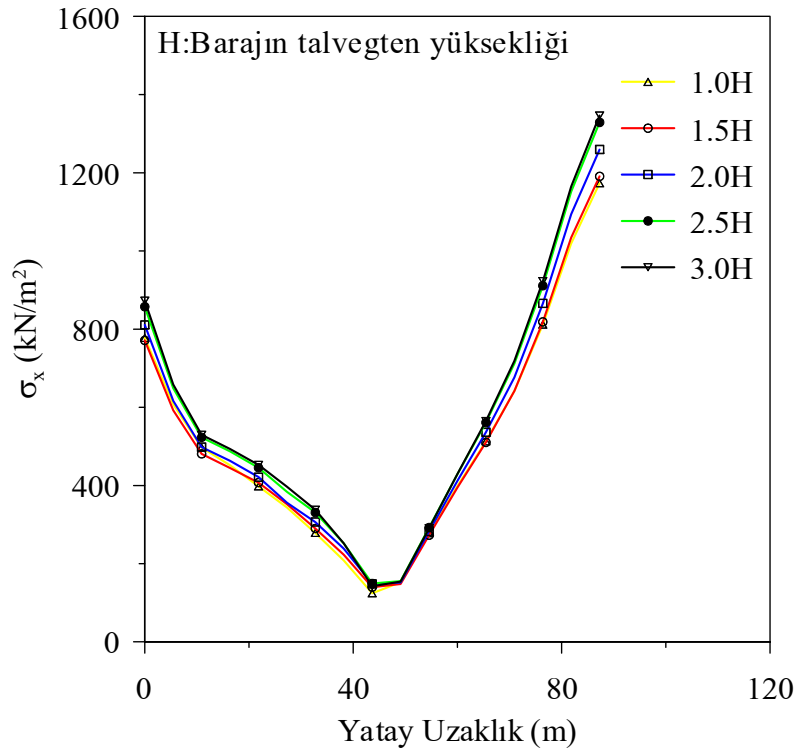
Şekil 3.49. Viskoz sınır için B-B kesiti boyunca σ_x -normal gerilme değişimi



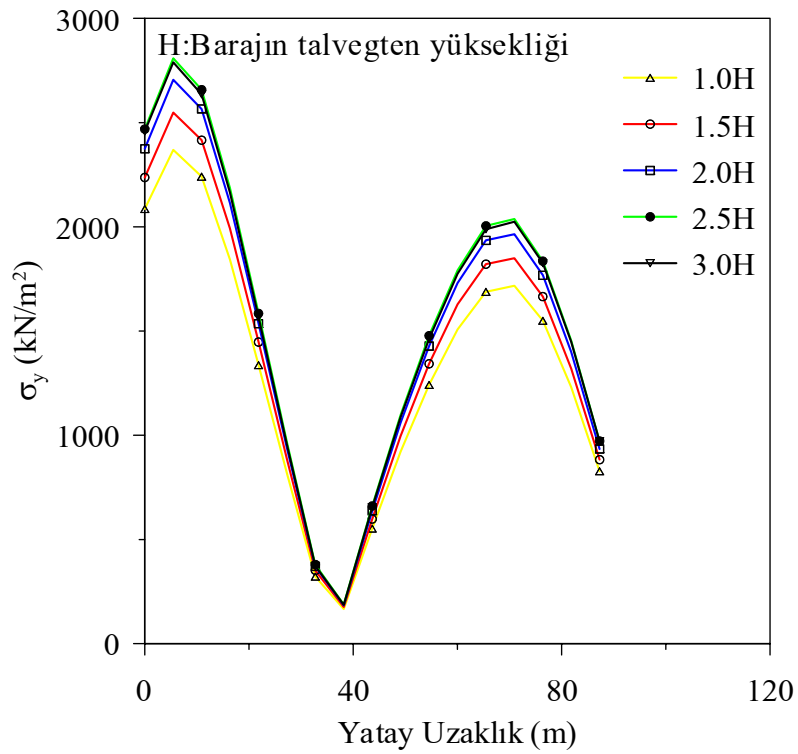
Şekil 3.50. Viskoz sınır için B-B kesiti boyunca σ_y -normal gerilme değişimi



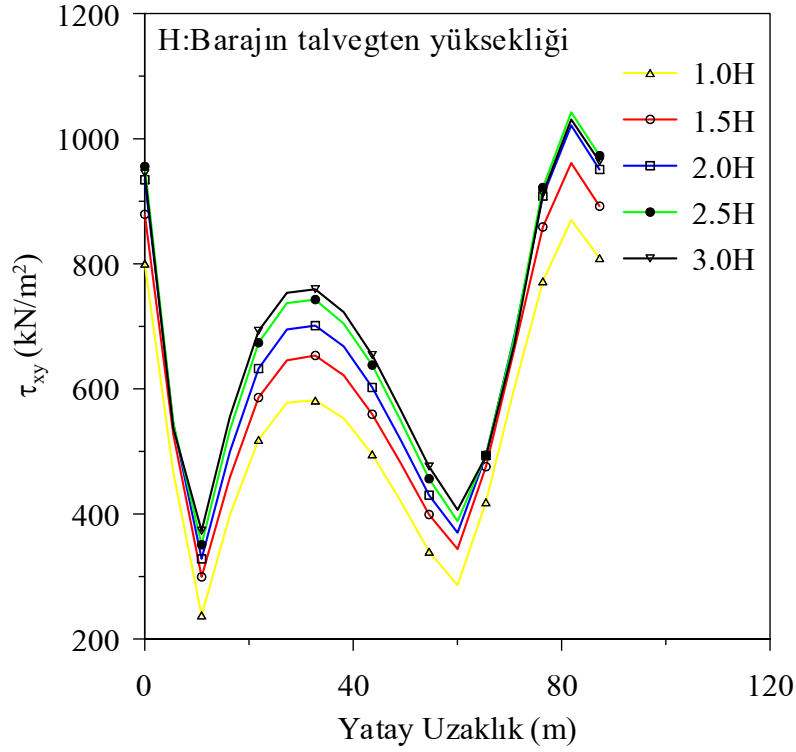
Şekil 3.51. Viskoz sınır için B-B kesiti boyunca τ_{xy} -kayma gerilmesi değişimi



Şekil 3.52. Viskoz sınır için C-C kesiti boyunca σ_x -normal gerilme değişimi



Şekil 3.53. Viskoz sınır için C-C kesiti boyunca σ_y -normal gerilme değişimi



Şekil 3.54. Viskoz sınır için C-C kesiti boyunca τ_{xy} -kayma gerilmesi değişimi

3.3. FLUSH Programı ile Elde Edilen Analiz Sonuçlarının Değerlendirilmesi

Bu kısımda, Şekil 2.4'te verilen analitik modelin yan sınırlarında geçirgen sınır ve Şekil 2.5, Şekil 2.7, Şekil 2.9, Şekil 2.11, Şekil 2.13 arasında verilen 1H, 2H, 3H, 4H ve 5H zemin sınırlarına sahip analitik modellerin tümünün zemin sınırlarında geleneksel (rijit, sabit, ankastre) sınırlar kullanılmıştır. Analizler sonucu elde edilen yer değiştirme spektrumu, ivme spektrumu, hız spektrumu, zamana bağlı ivme değişimleri ayrıntılı olarak verilmektedir.

3.3.1. Yer Değiştirmeler

Sarıyar barajının geleneksel sınırlı ve geçirgen sınırlı yapı-zemin etkileşimi analitik modellerinin dinamik analizi sonucu, Şekil 2.4'te gösterildiği gibi dinamik etki süresince barajın en çok zorlanacağı A, B, C, D, E, F, G noktalarının frekansa bağlı yer

değiştirmeleri Şekil 3.55-61 arasında verilmektedir. Şekiller incelendiğinde geleneksel sınırlı modellerin analizleri sonucunda zemin sınırlarının davranış üzerine etkisinin, zemin sınırı 5H ve civarında olması durumunda değişmediği ve 3 eleman uzaklıkta (0.2H) geçirgen sınırlar kullanılarak bu değerlere ulaşıldığı görülmektedir.

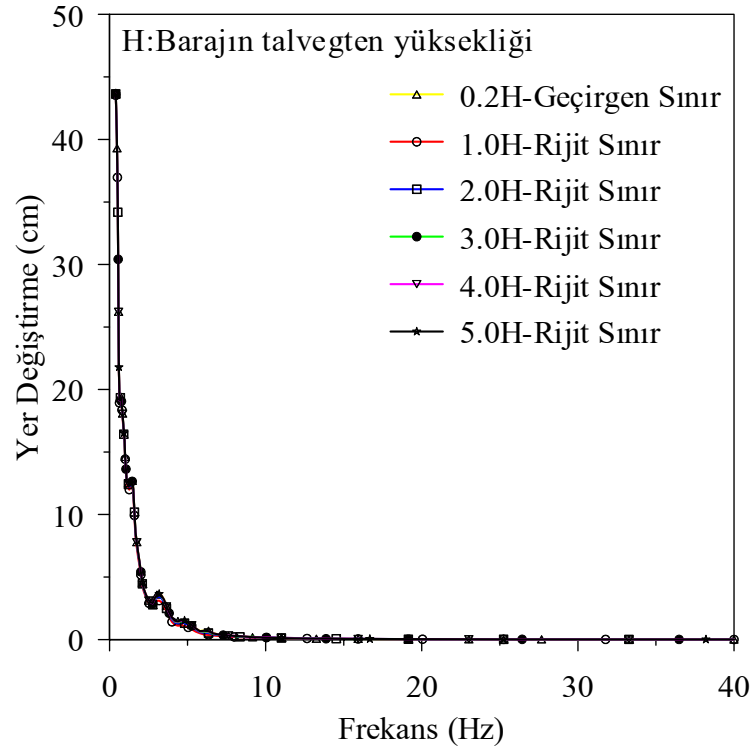
3.3.2. Hızlar

Sarıyar barajının geleneksel sınırlı ve geçirgen sınırlı yapı-zemin etkileşimi analitik modellerinin dinamik analizi sonucu, Şekil 2.4'te gösterildiği gibi dinamik etki süresince barajın en çok zorlanacağı A, B, C, D, E, F, G noktalarının frekansa bağlı hız değişimleri Şekil 3.62-68 arasında verilmektedir. Şekiller incelendiğinde geleneksel sınırlı modellerin analizleri sonucunda zemin sınırlarının davranış üzerine etkisinin, zemin sınırı 5H ve civarında olması durumunda değişmediği ve 3 eleman uzaklıkta (0.2H) geçirgen sınırlar kullanılarak bu değerlere ulaşıldığı görülmektedir.

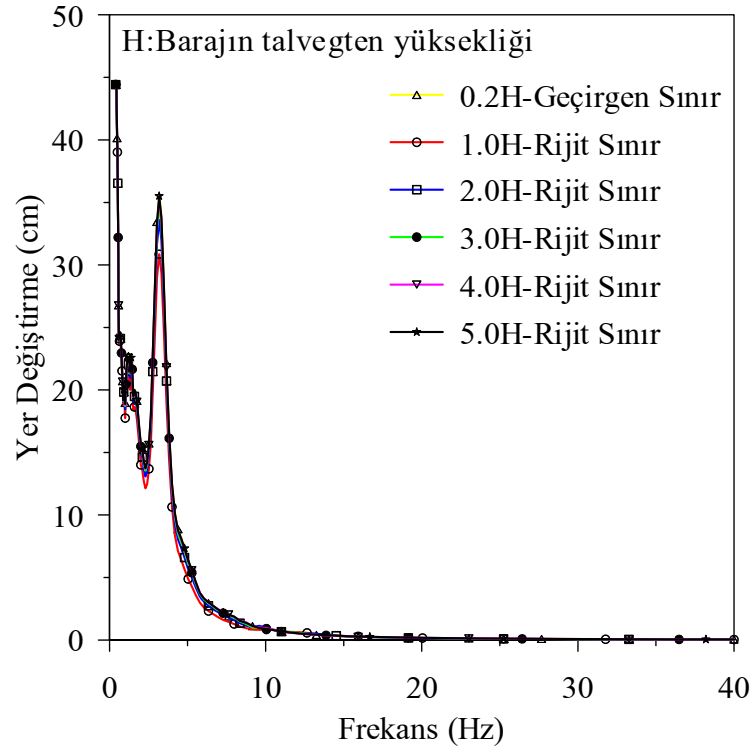
3.3.3. İvmeler

Sarıyar barajının geleneksel sınırlı ve geçirgen sınırlı yapı-zemin etkileşimi analitik modellerinin dinamik analizi sonucu, Şekil 2.4'te gösterildiği gibi dinamik etki süresince barajın en çok zorlanacağı A, B, C, D, E, F, G noktalarının frekansa bağlı ivme değişimleri Şekil 3.69-75 arasında verilmektedir. Şekiller incelendiğinde geleneksel sınırlı modellerin analizleri sonucunda zemin sınırlarının davranış üzerine etkisinin, zemin sınırı 5H ve civarında olması durumunda değişmediği ve 3 eleman uzaklıkta (0.2H) geçirgen sınırlar kullanılarak bu değerlere ulaşıldığı görülmektedir.

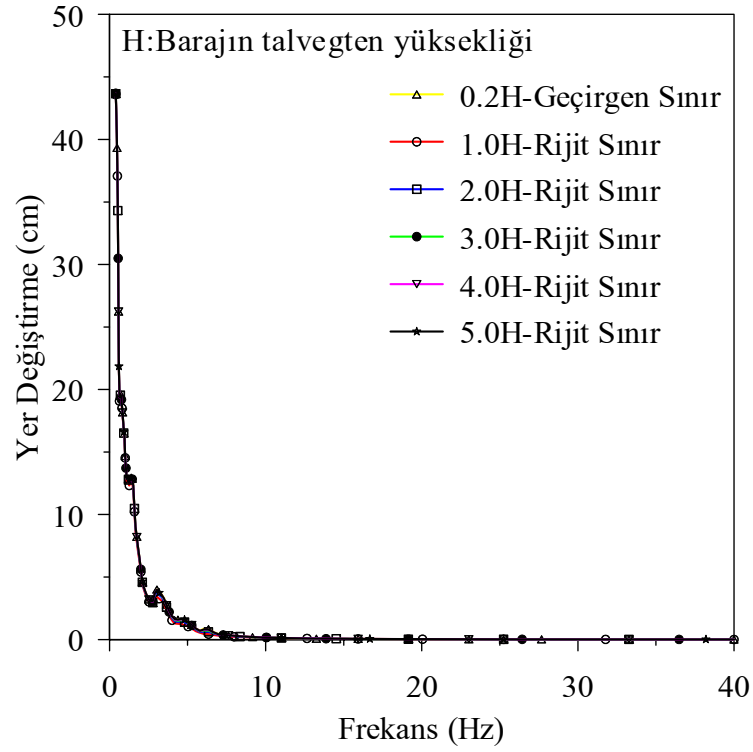
Ayrıca seçilen bu noktalara ait ivmelerin dinamik etki süresince değişimi de incelenmiştir. Şekil 3.76' dan 3.117'ye kadar kullanılan sınır durumları için seçilen noktaların ivmelerinin dinamik etki süresince değişimi verilmiştir. Bu Şekiller incelendiğinde zemin sınırının 5H uzaklık ve civarında olması durumunda zemin sınırlarının etkisinin kaybolduğu ve geçirgen sınırlarla bu davranışın elde edilebildiği görülmektedir.



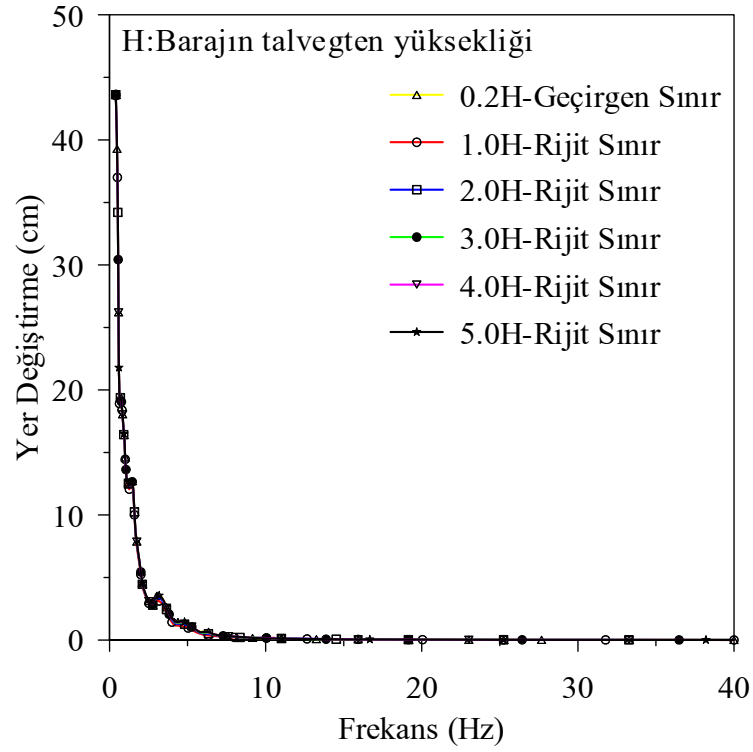
Şekil 3.55. A noktasına ait yer değiştirme spektrumları



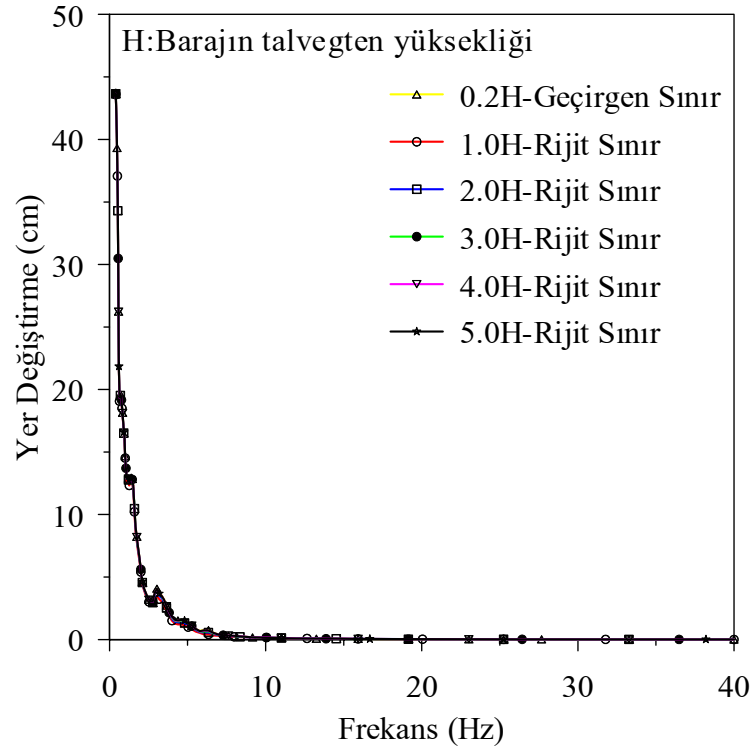
Şekil 3.56. B noktasına ait yer değiştirme spektrumları



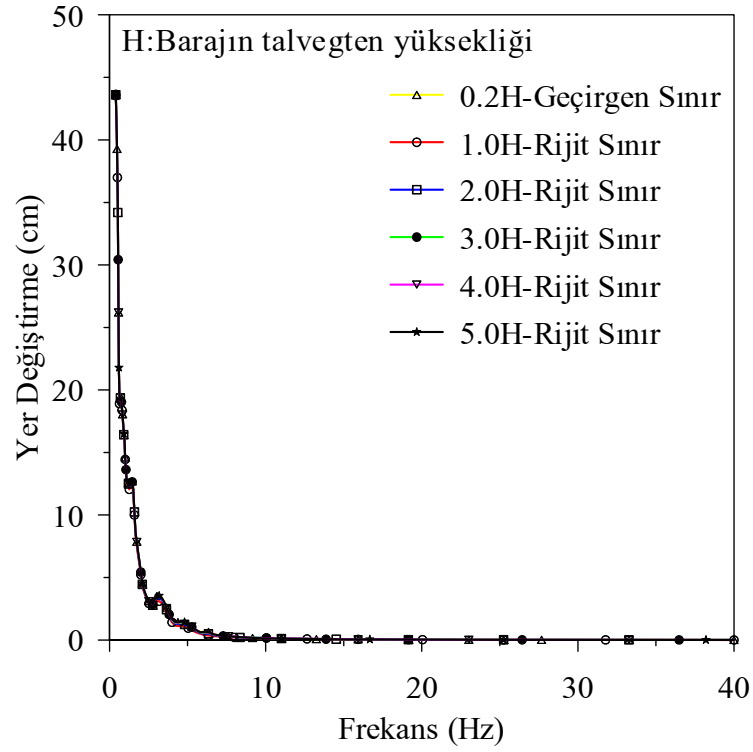
Şekil 3.57. C noktasına ait yer değiştirme spektrumları



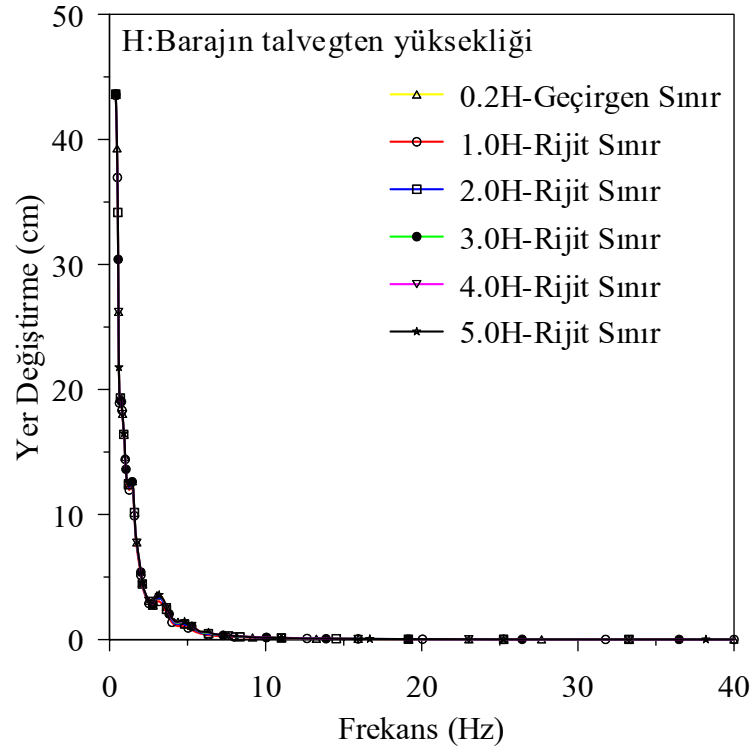
Şekil 3.58. D noktasına ait yer değiştirme spektrumları



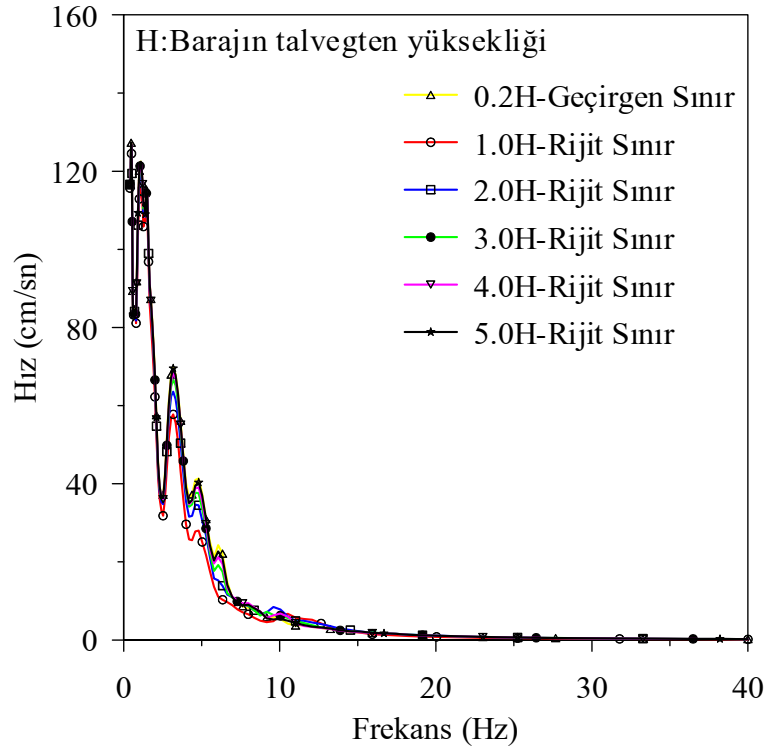
Şekil 3.59. E noktasına ait yer değiştirme spektrumları



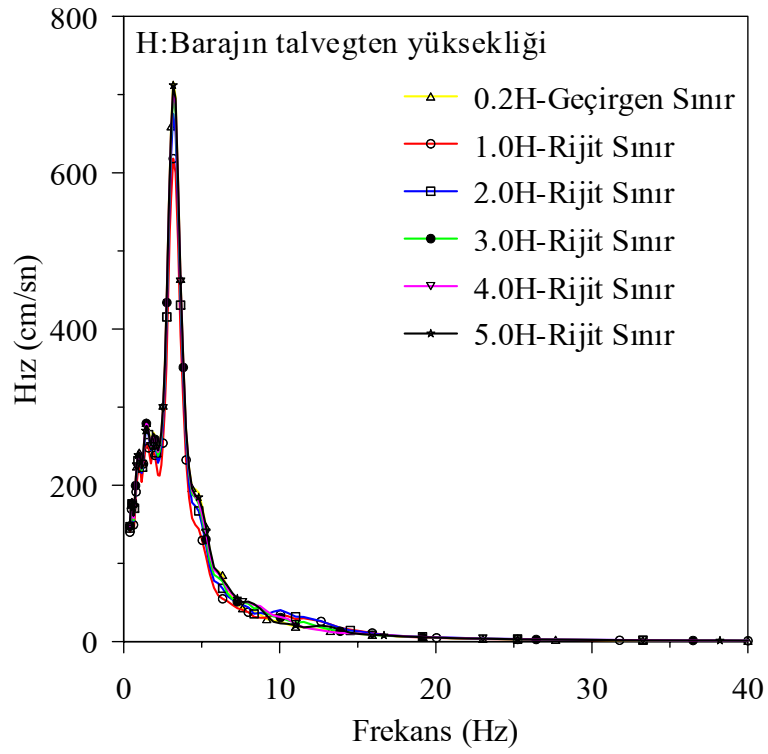
Şekil 3.60. F noktasına ait yer değiştirme spektrumları



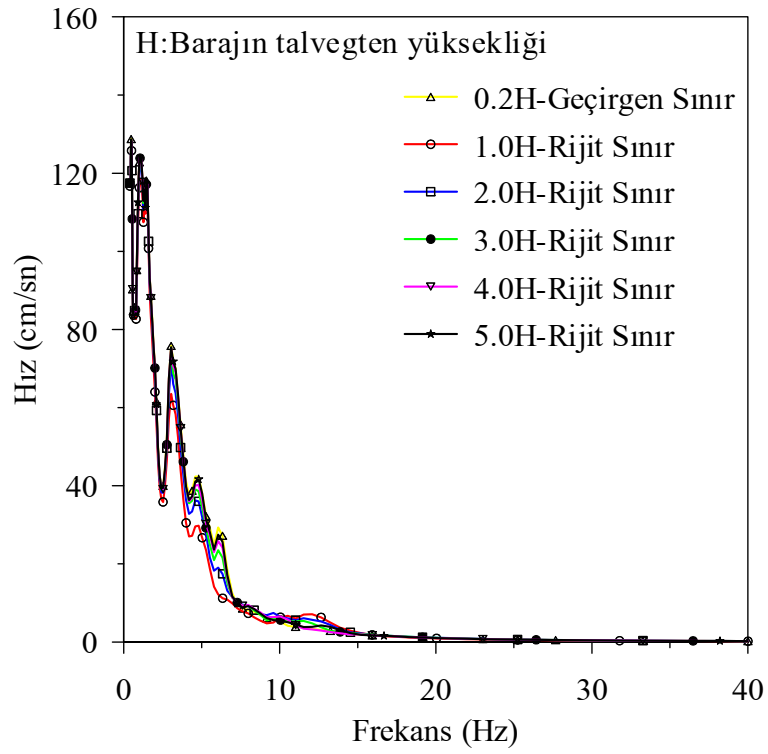
Şekil 3.61. G noktasına ait yer değiştirme spektrumları



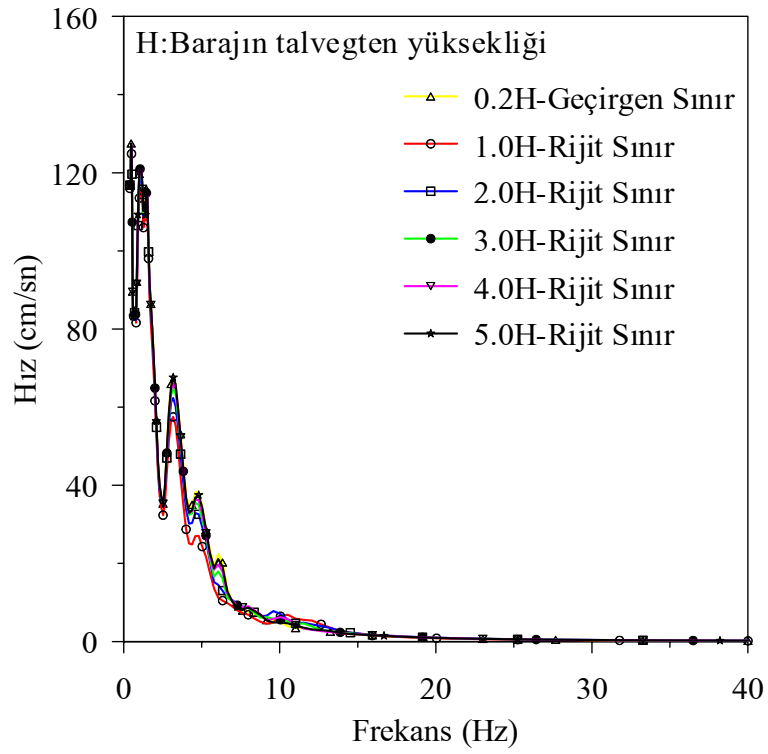
Şekil 3.62. A noktasına ait hız spektrumları



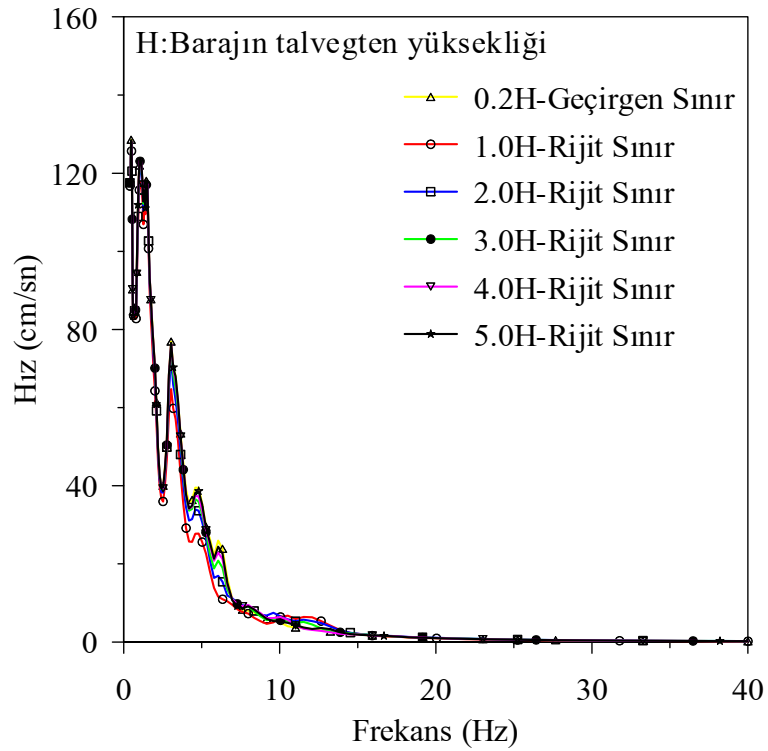
Şekil 3.63. B noktasına ait hız spektrumları



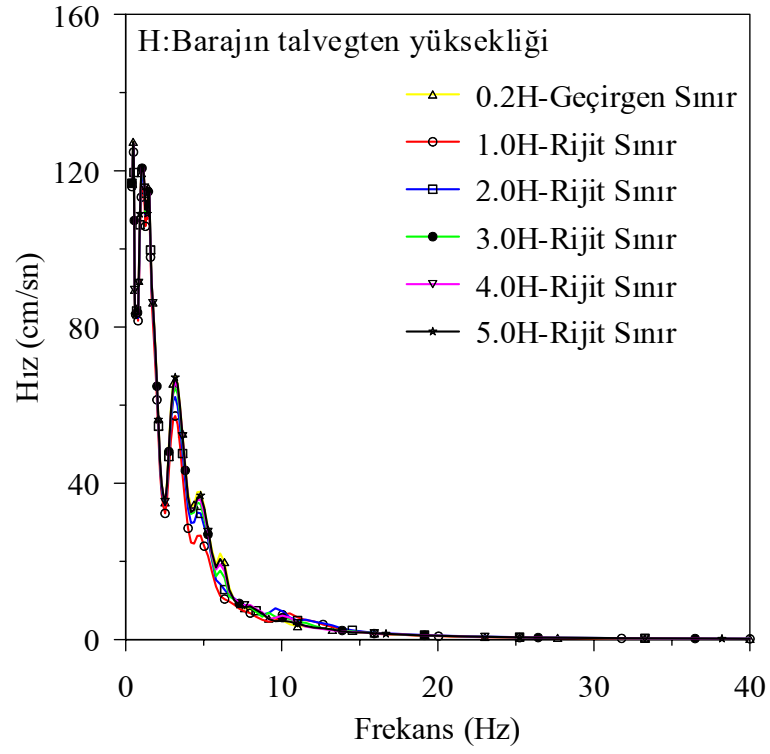
Şekil 3.64. C noktasına ait hız spektrumları



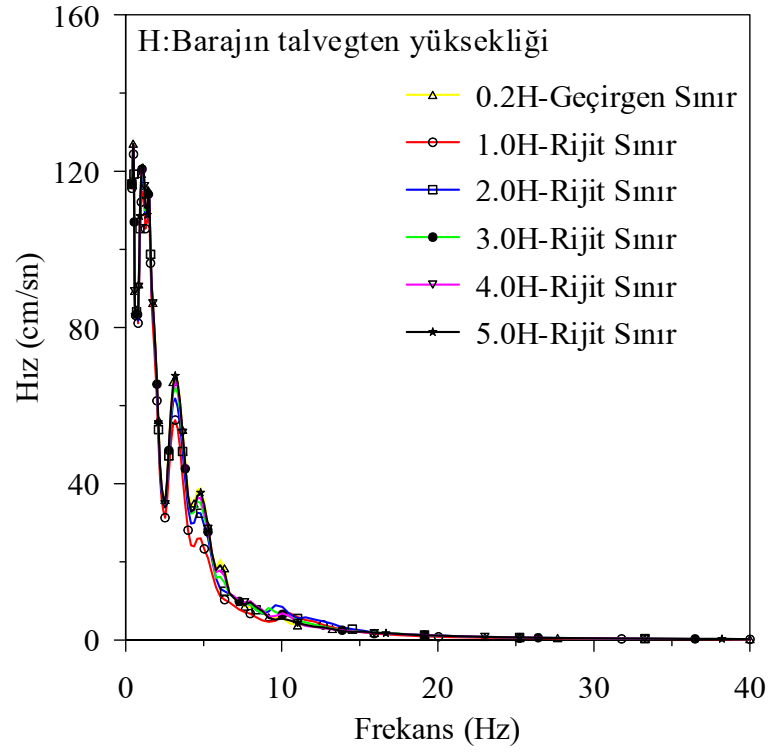
Şekil 3.65. D noktasına ait hız spektrumları



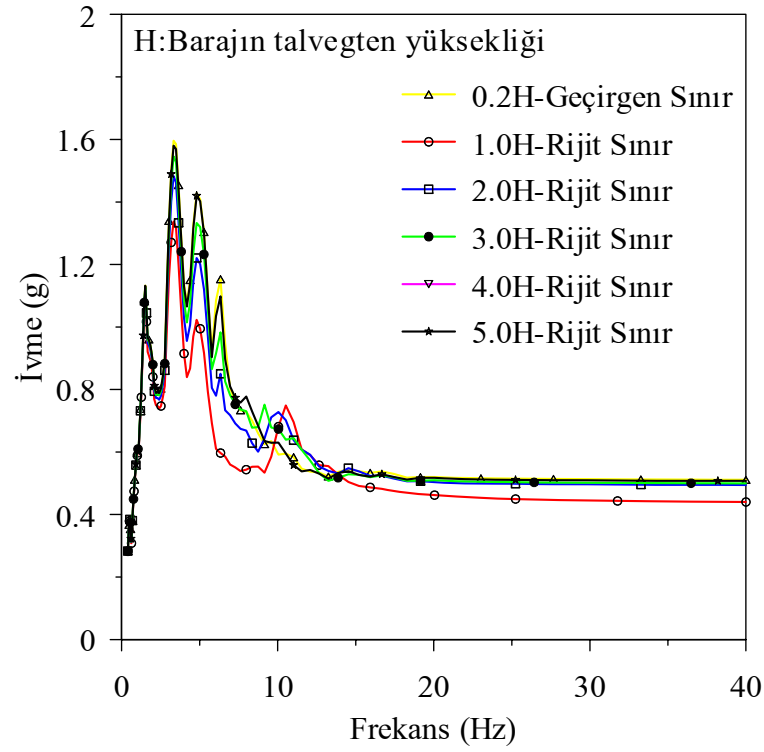
Şekil 3.66. E noktasına ait hız spektrumları



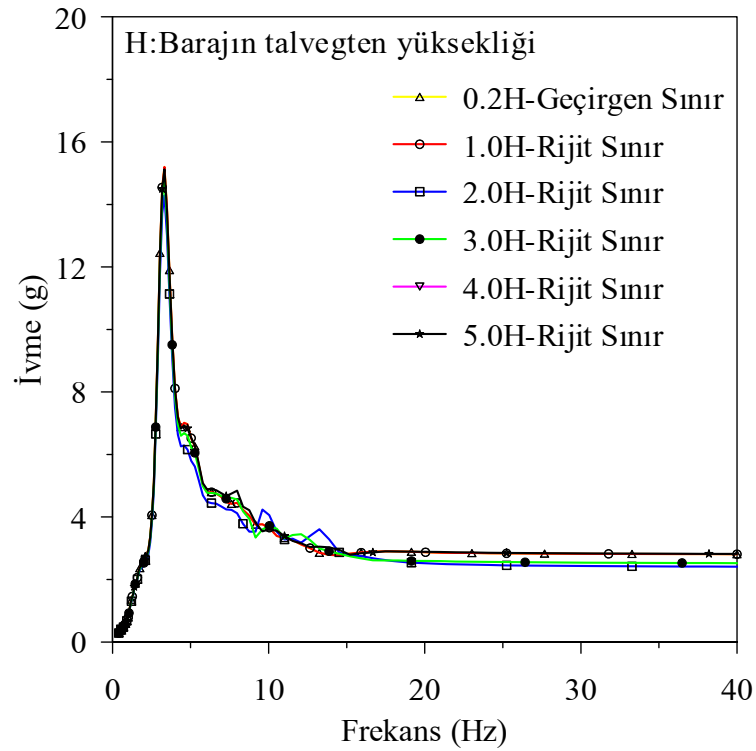
Şekil 3.67. F noktasına ait hız spektrumları



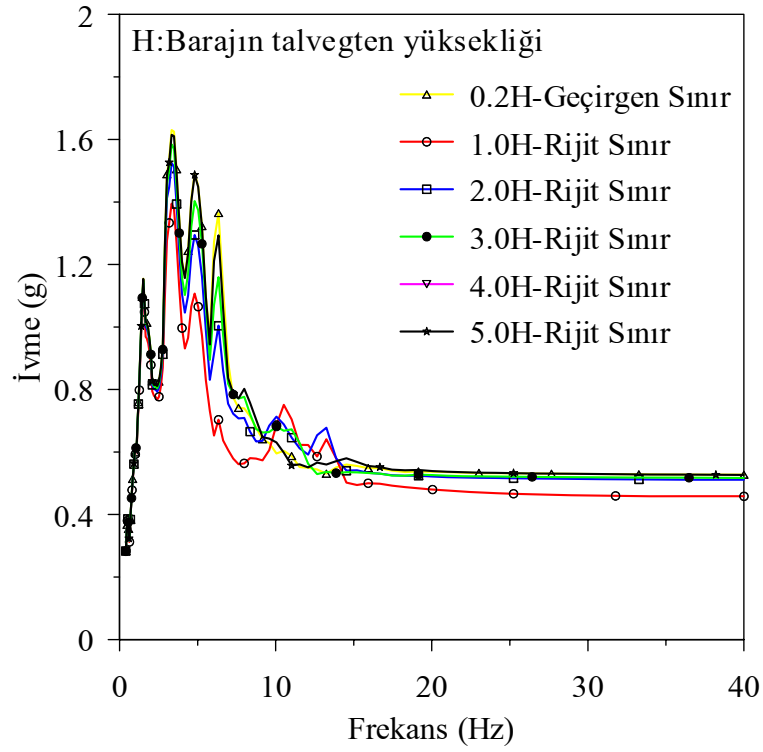
Şekil 3.68. G noktasına ait hız spektrumları



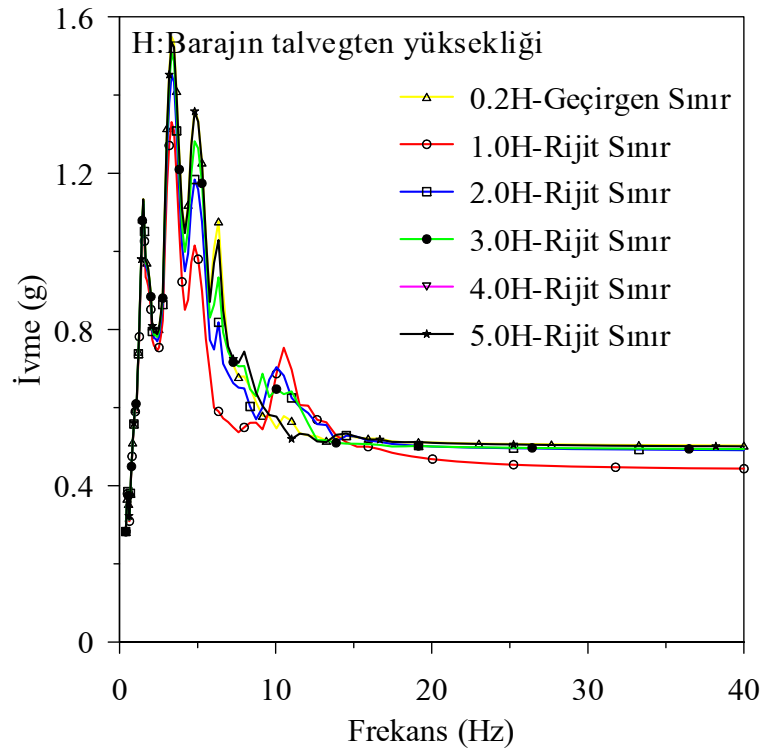
Şekil 3.69. A noktasına ait ivme spektrumları



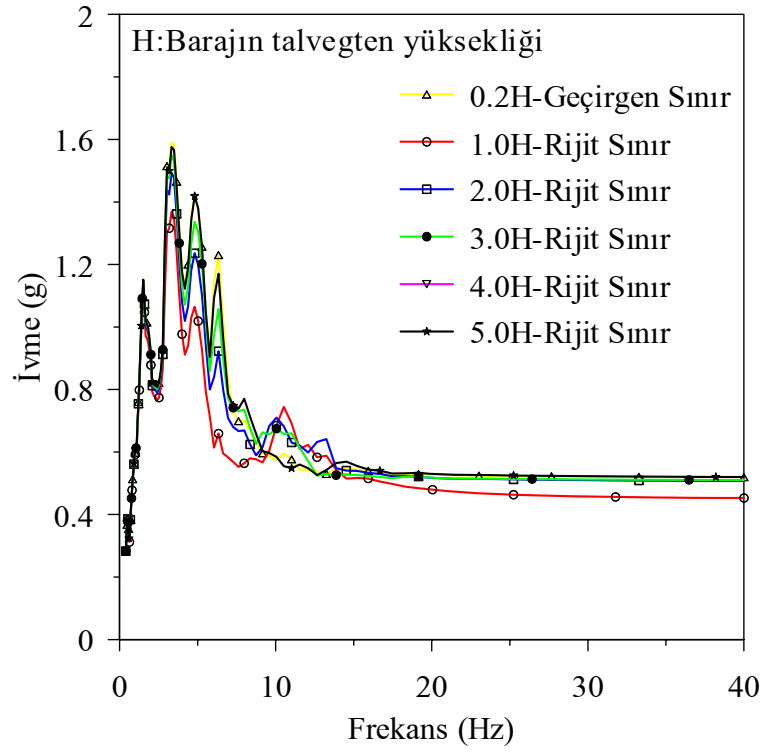
Şekil 3.70. B noktasına ait ivme spektrumları



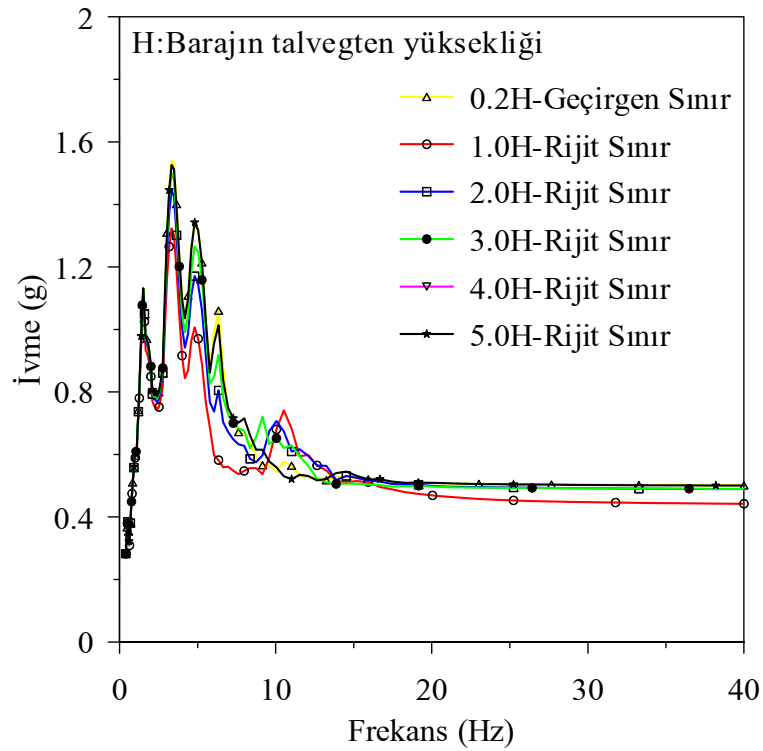
Şekil 3.71. C noktasına ait ivme spektrumları



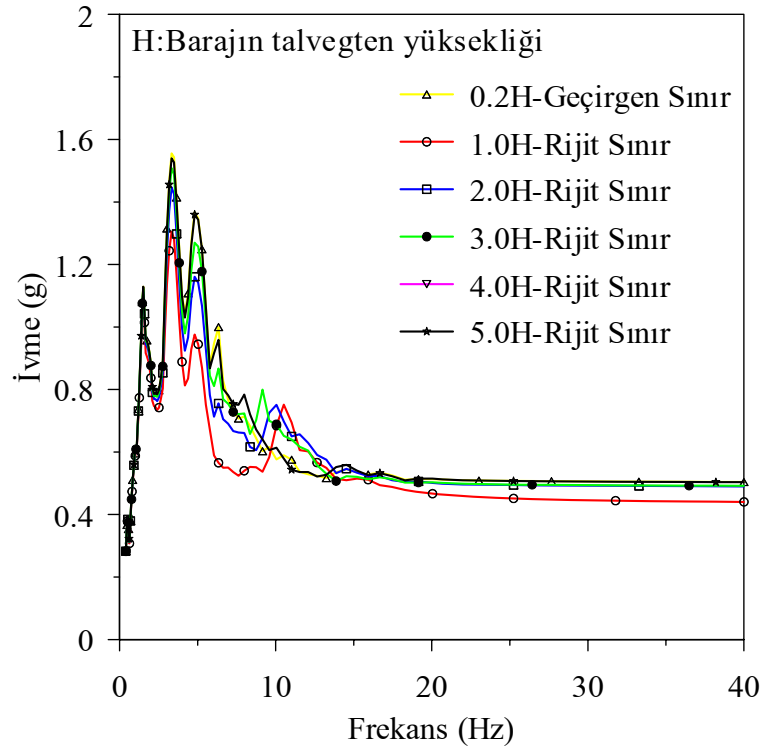
Şekil 3.72. D noktasına ait ivme spektrumları



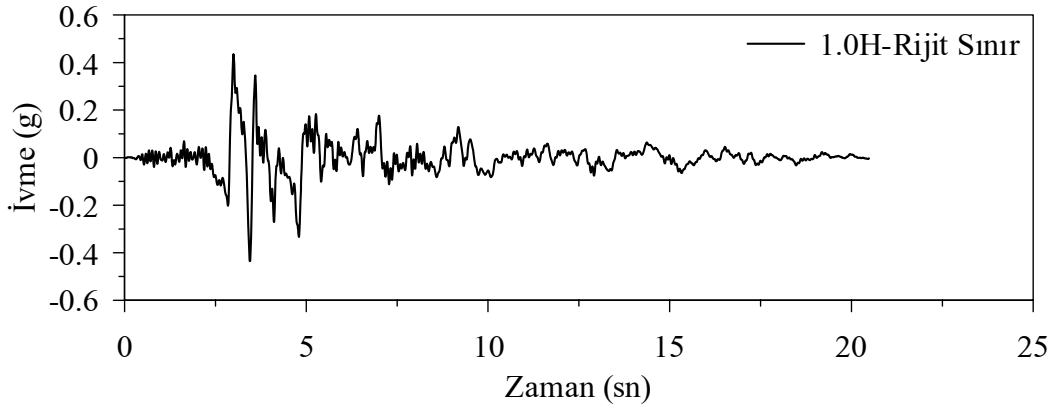
Şekil 3.73. E noktasına ait ivme spektrumları



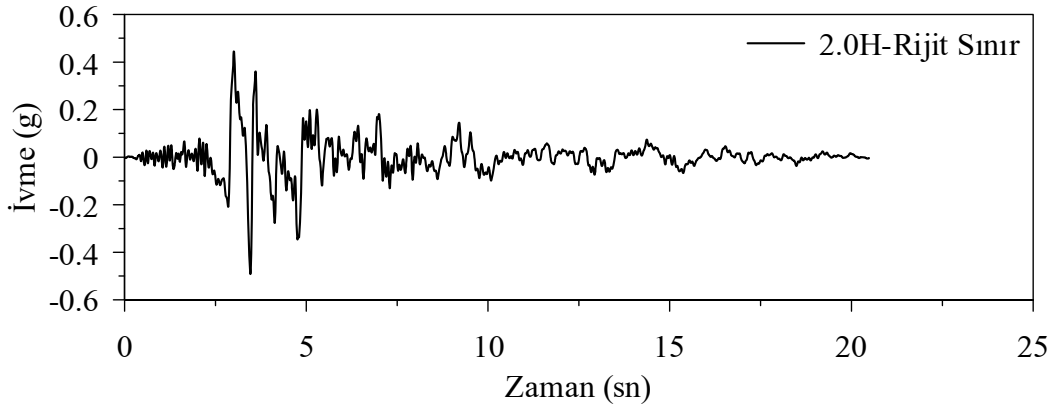
Şekil 3.74. F noktasına ait ivme spektrumları



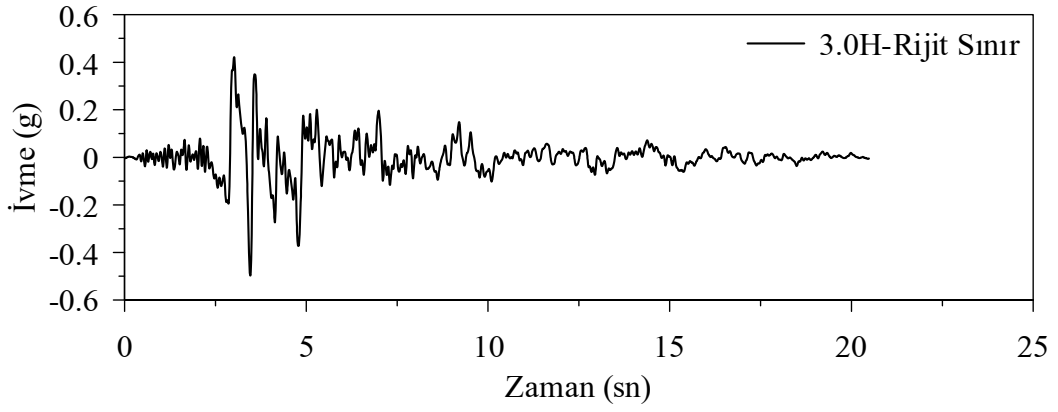
Şekil 3.75. G noktasına ait ivme spektrumları



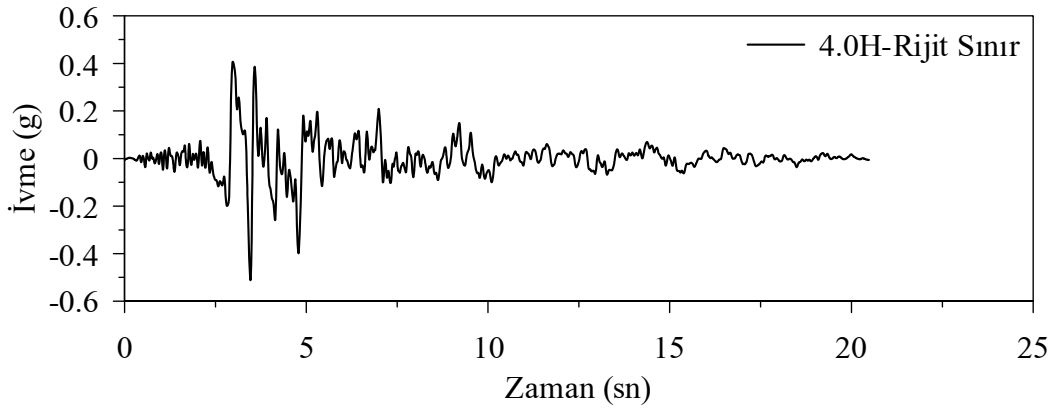
Şekil 3.76. Yapıdan 1H uzaklıkta rijit sınır olması durumunda A noktasına ait zamana bağlı ivme değişimi



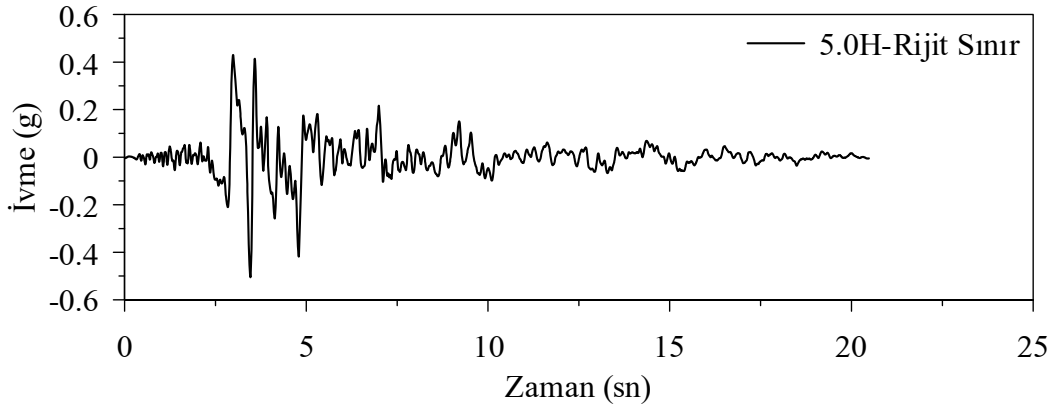
Şekil 3.77. Yapıdan 2H uzaklıkta rijit sınır olması durumunda A noktasına ait zamana bağlı ivme değişimi



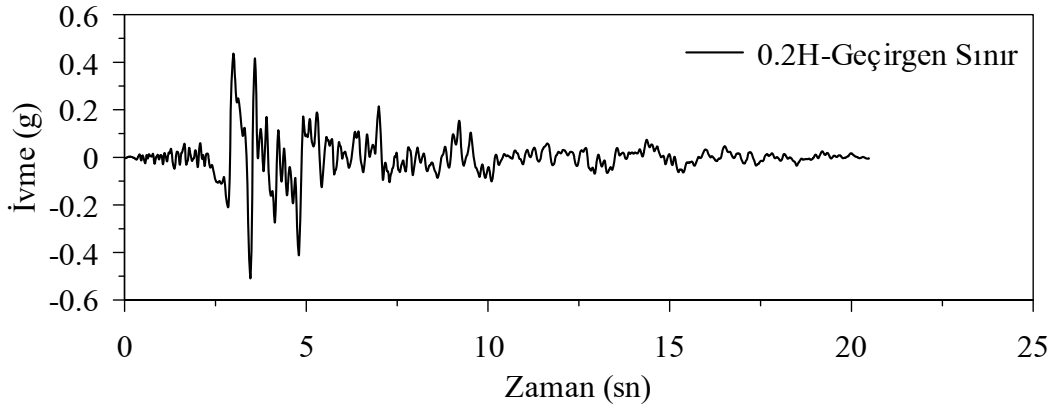
Şekil 3.78. Yapıdan 3H uzaklıkta rijit sınır olması durumunda A noktasına ait zamana bağlı ivme değişimi



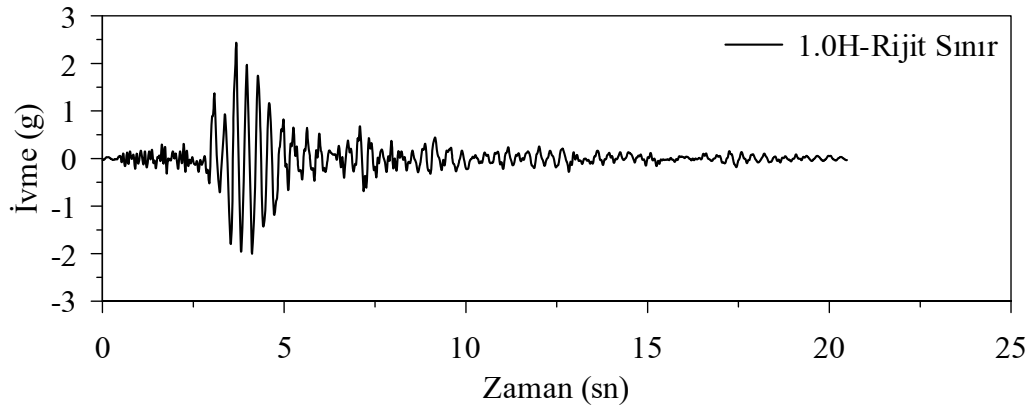
Şekil 3.79. Yapıdan 4H uzaklıkta rijit sınır olması durumunda A noktasına ait zamana bağlı ivme değişimi



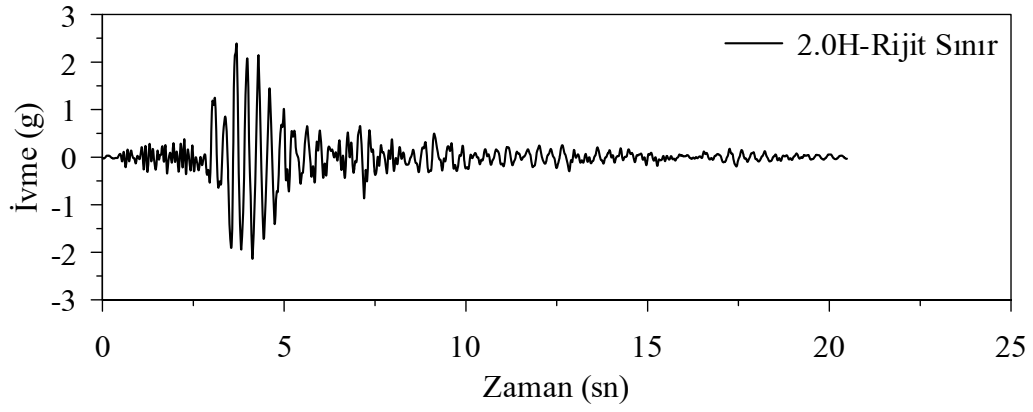
Şekil 3.80. Yapıdan 5H uzaklıkta rijit sınır olması durumunda A noktasına ait zamana bağlı ivme değişimi



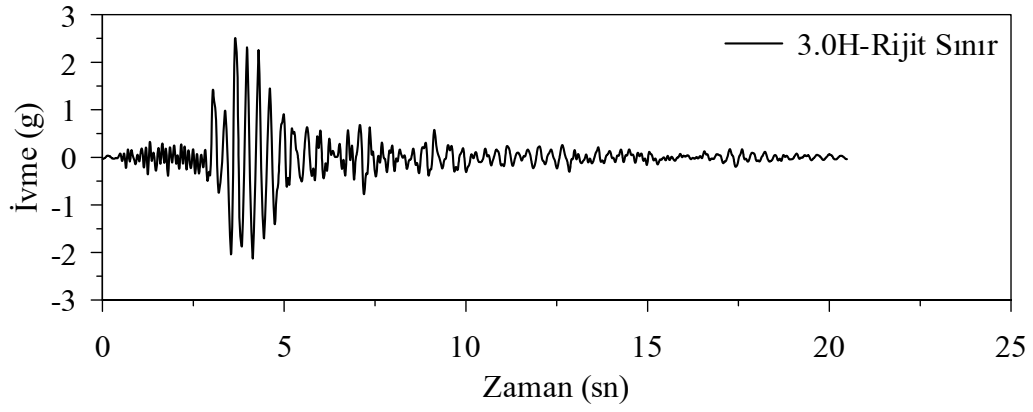
Şekil 3.81. Yapıdan 0.2H uzaklıkta geçirgen sınır olması durumunda A noktasına ait zamana bağlı ivme değişimi



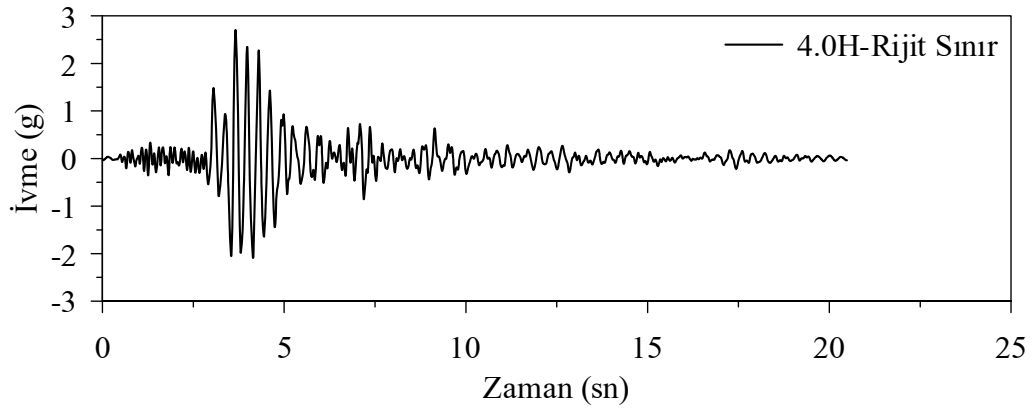
Şekil 3.82. Yapıdan 1H uzaklıkta rijit sınır olması durumunda B noktasına ait zamana bağlı ivme değişimi



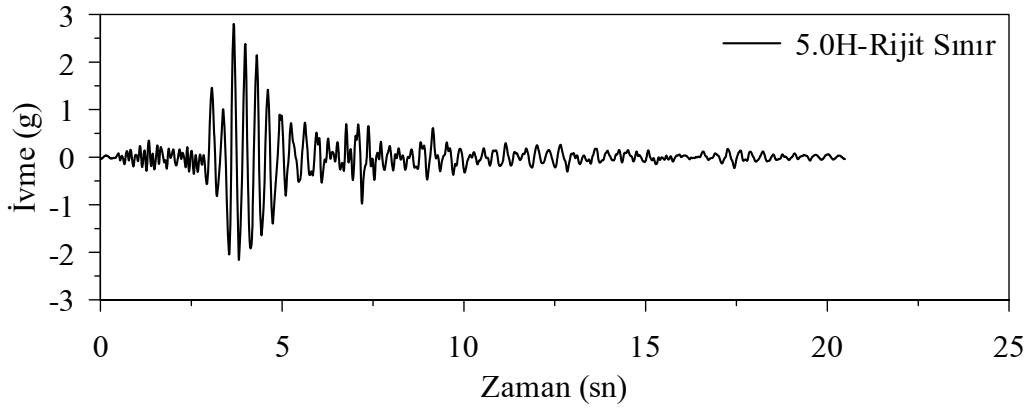
Şekil 3.83. Yapıdan 2H uzaklıkta rijit sınır olması durumunda B noktasına ait zamana bağlı ivme değişimi



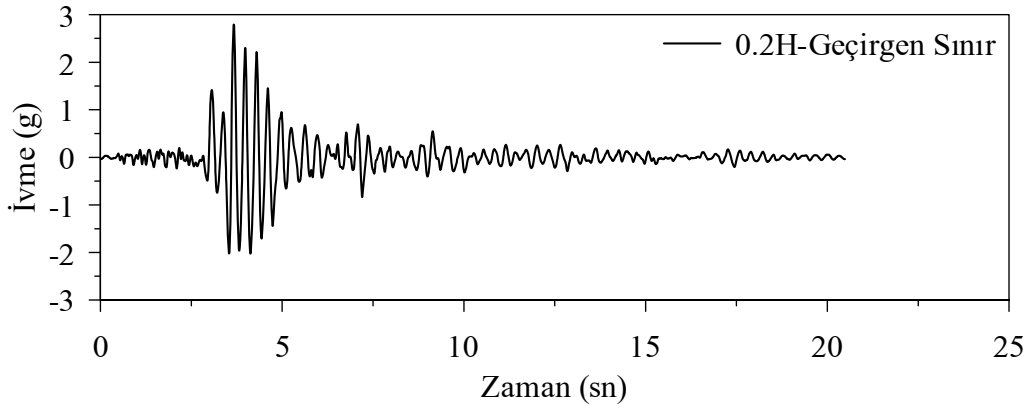
Şekil 3.84. Yapıdan 3H uzaklıkta rijit sınır olması durumunda B noktasına ait zamana bağlı ivme değişimi



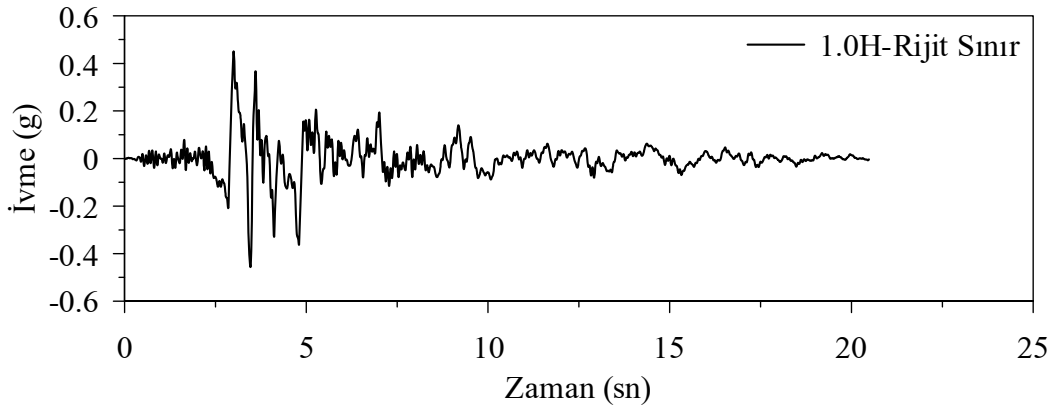
Şekil 3.85. Yapıdan 4H uzaklıkta rijit sınır olması durumunda B noktasına ait zamana bağlı ivme değişimi



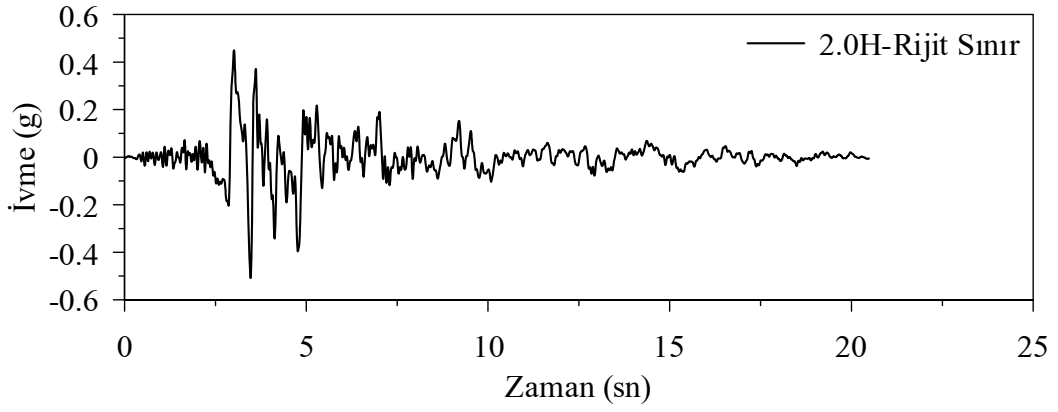
Şekil 3.86. Yapıdan 5H uzaklıkta rijit sınır olması durumunda B noktasına ait zamana bağlı ivme değişimi



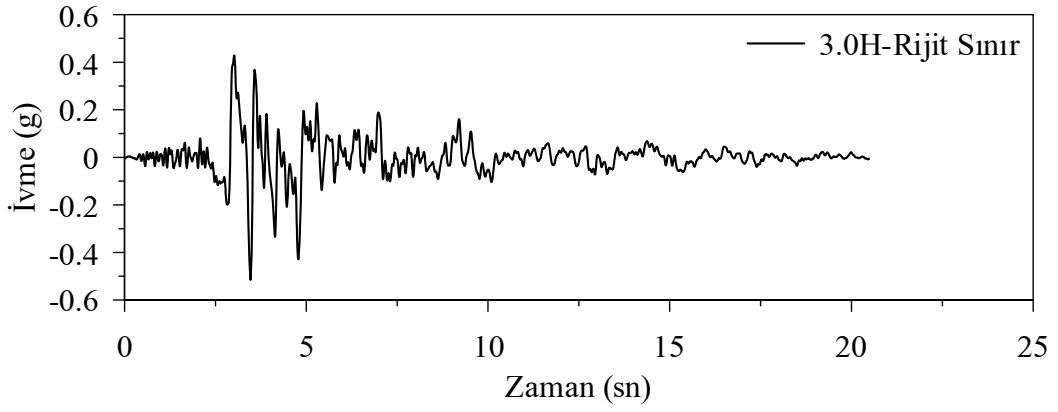
Şekil 3.87. Yapıdan 0.2H uzaklıkta geçirgen sınır olması durumunda B noktasına ait zamana bağlı ivme değişimi



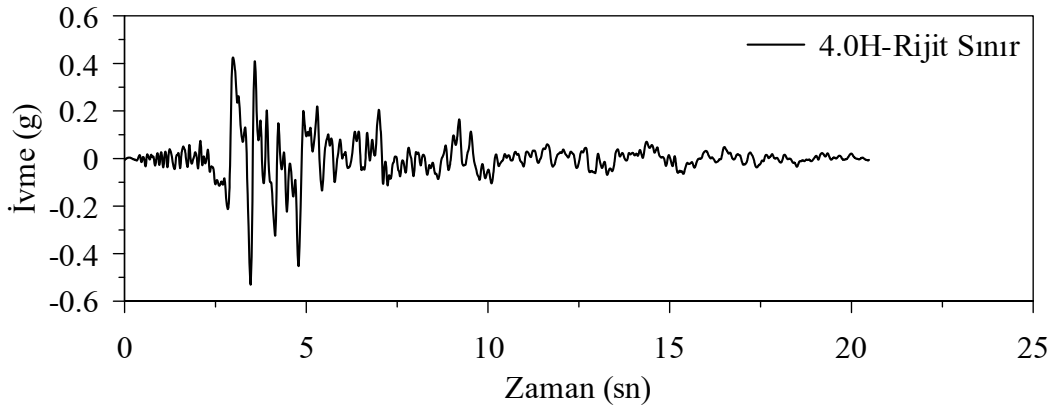
Şekil 3.88. Yapıdan 1H uzaklıkta rijit sınır olması durumunda C noktasına ait zamana bağlı ivme değişimi



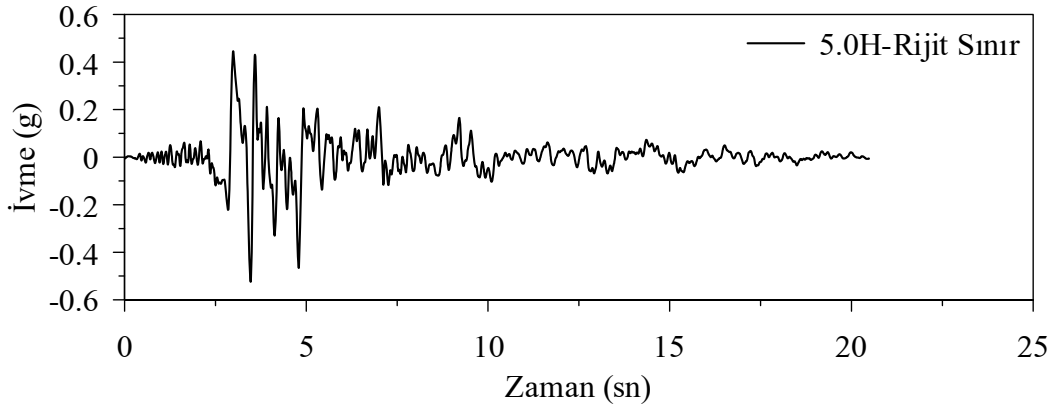
Şekil 3.89. Yapıdan 2H uzaklıkta rijit sınır olması durumunda C noktasına ait zamana bağlı ivme değişimi



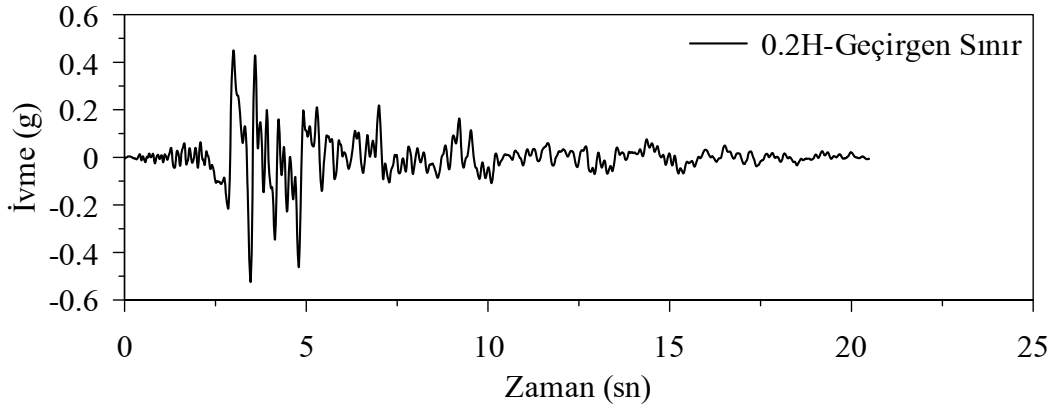
Şekil 3.90. Yapıdan 3H uzaklıkta rijit sınır olması durumunda C noktasına ait zamana bağlı ivme değişimi



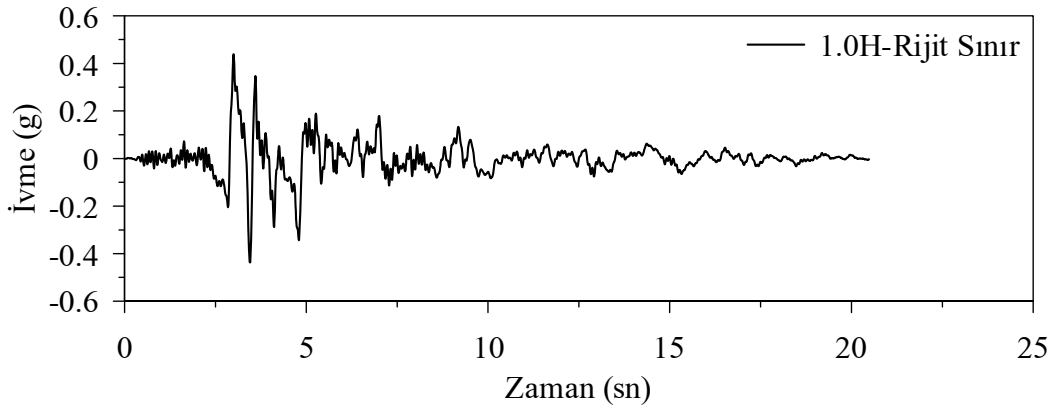
Şekil 3.91. Yapıdan 4H uzaklıkta rijit sınır olması durumunda C noktasına ait zamana bağlı ivme değişimi



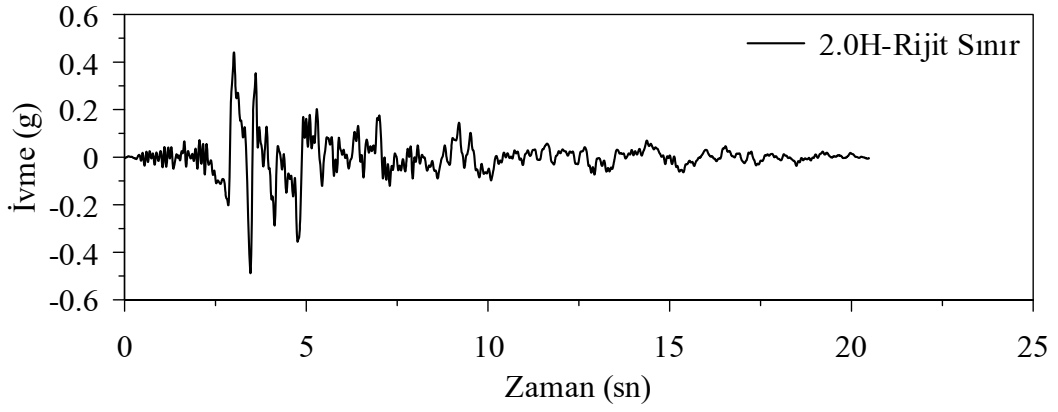
Şekil 3.92. Yapıdan 5H uzaklıkta rijit sınır olması durumunda C noktasına ait zamana bağlı ivme değişimi



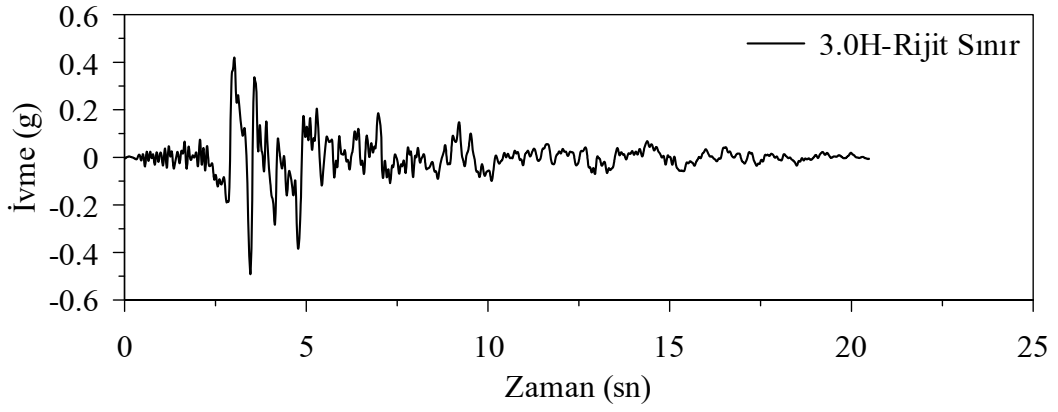
Şekil 3.93. Yapıdan 0.2H uzaklıkta geçirgen sınır olması durumunda C noktasına ait zamana bağlı ivme değişimi



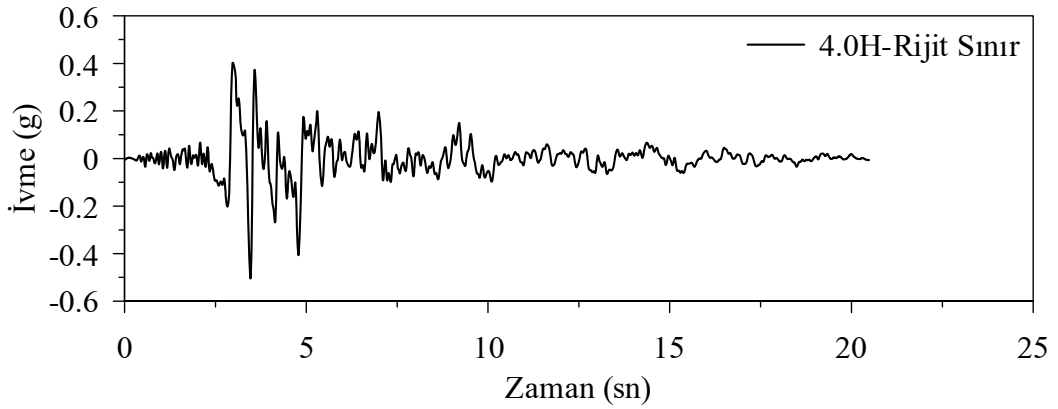
Şekil 3.94. Yapıdan 1H uzaklıkta rijit sınır olması durumunda D noktasına ait zamana bağlı ivme değişimi



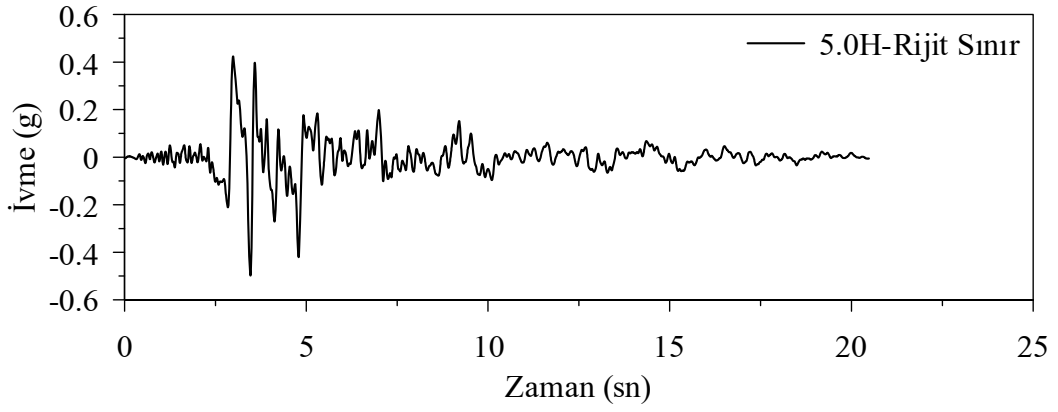
Şekil 3.95. Yapıdan 2H uzaklıkta rijit sınır olması durumunda D noktasına ait zamana bağlı ivme değişimi



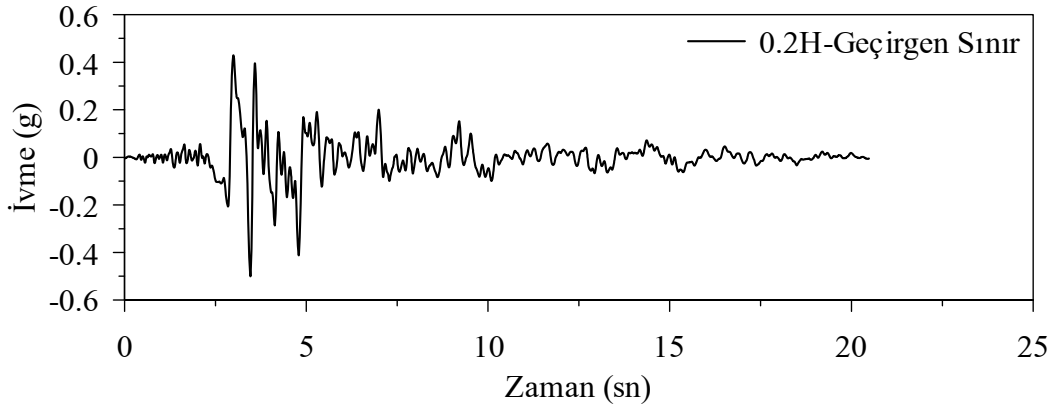
Şekil 3.96. Yapıdan 3H uzaklıkta rijit sınır olması durumunda D noktasına ait zamana bağlı ivme değişimi



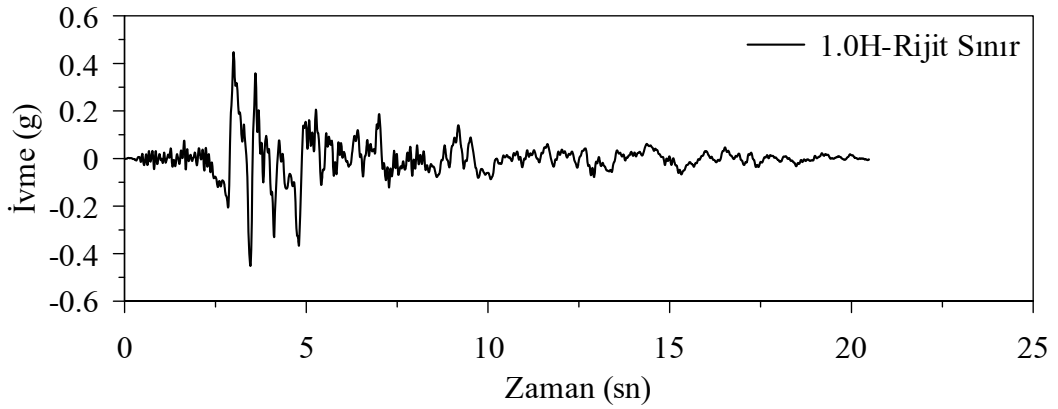
Şekil 3.97. Yapıdan 4H uzaklıkta rijit sınır olması durumunda D noktasına ait zamana bağlı ivme değişimi



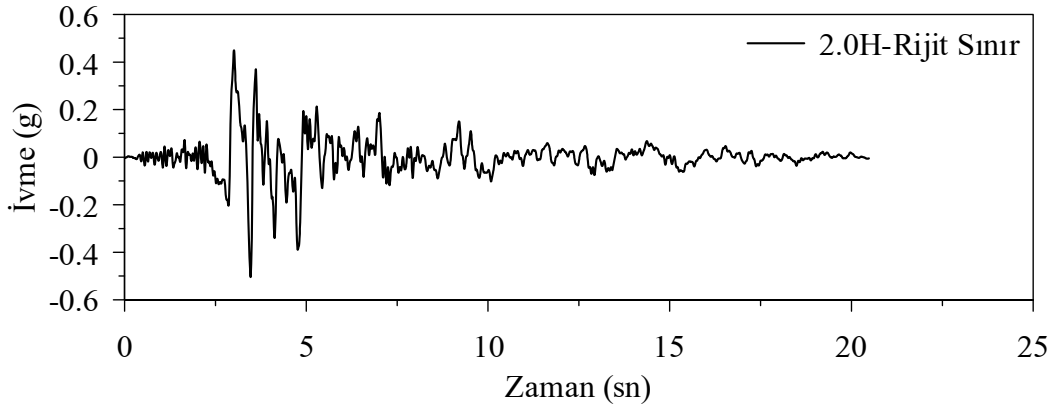
Şekil 3.98. Yapıdan 5H uzaklıkta rijit sınır olması durumunda D noktasına ait zamana bağlı ivme değişimi



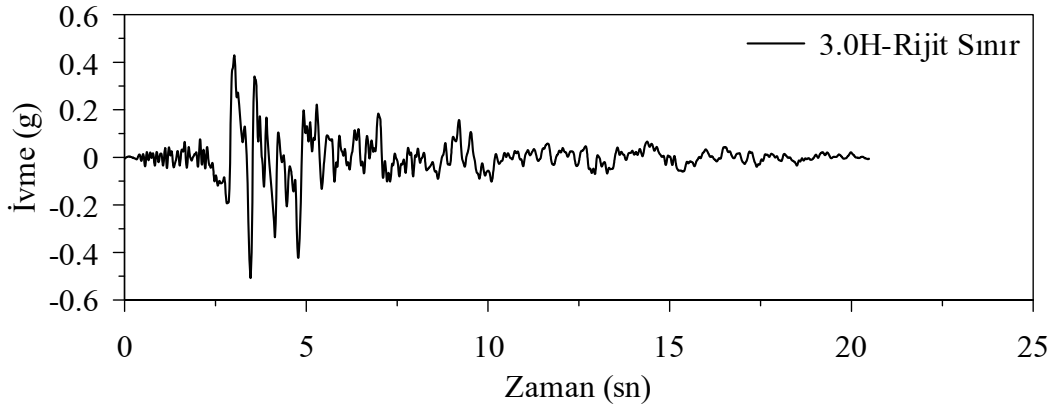
Şekil 3.99. Yapıdan 0.2H uzaklıkta geçirgen sınır olması durumunda D noktasına ait zamana bağlı ivme değişimi



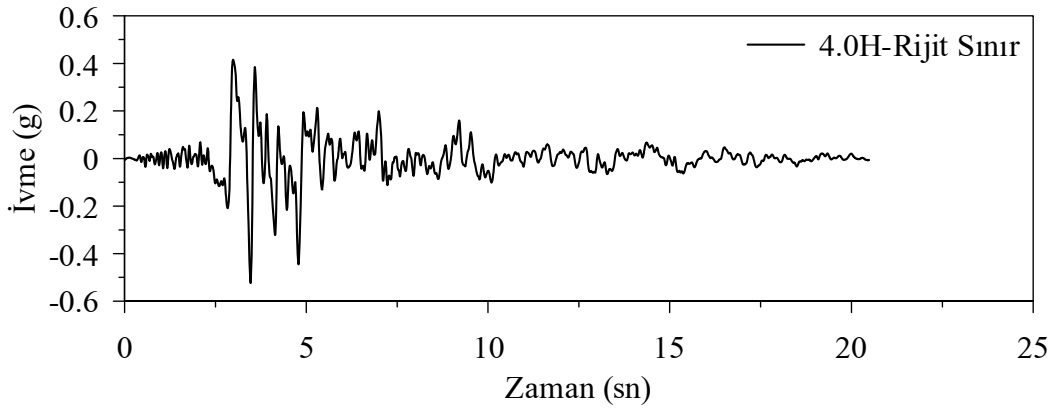
Şekil 3.100. Yapıdan 1H uzaklıkta rijit sınır olması durumunda E noktasına ait zamana bağlı ivme değişimi



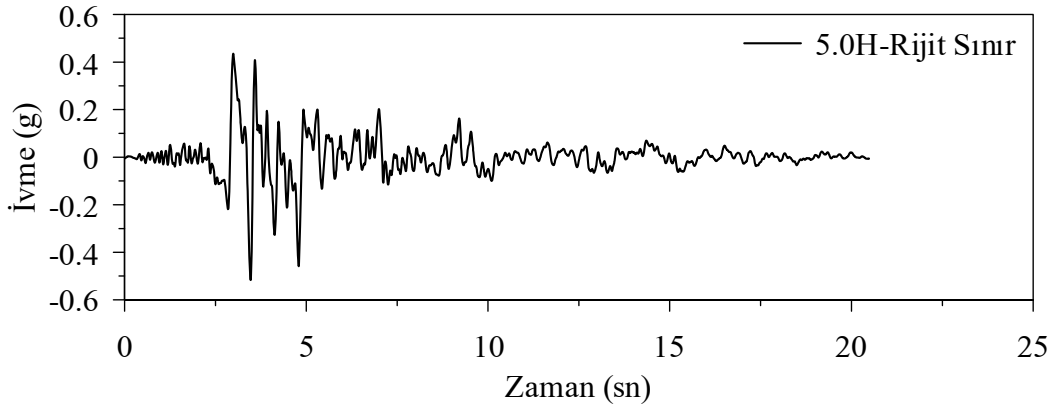
Şekil 3.101. Yapıdan 2H uzaklıkta rijit sınır olması durumunda E noktasına ait zamana bağlı ivme değişimi



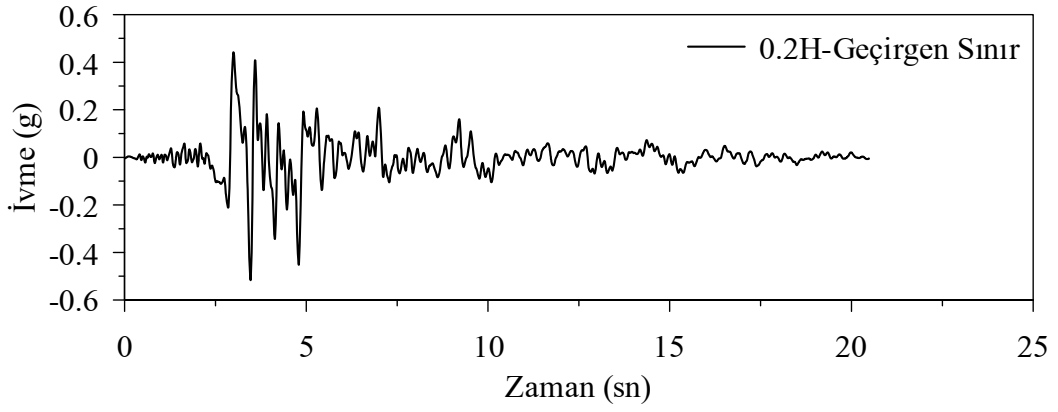
Şekil 3.102. Yapıdan 3H uzaklıkta rijit sınır olması durumunda E noktasına ait zamana bağlı ivme değişimi



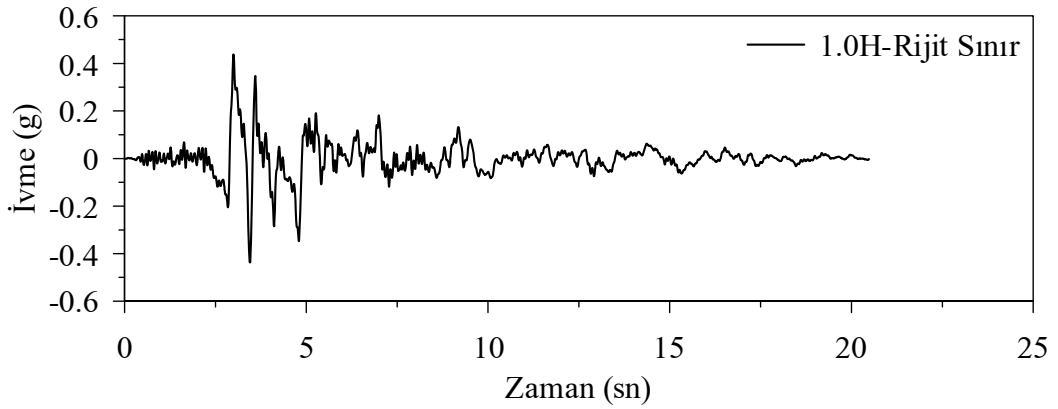
Şekil 3.103. Yapıdan 4H uzaklıkta rijit sınır olması durumunda E noktasına ait zamana bağlı ivme değişimi



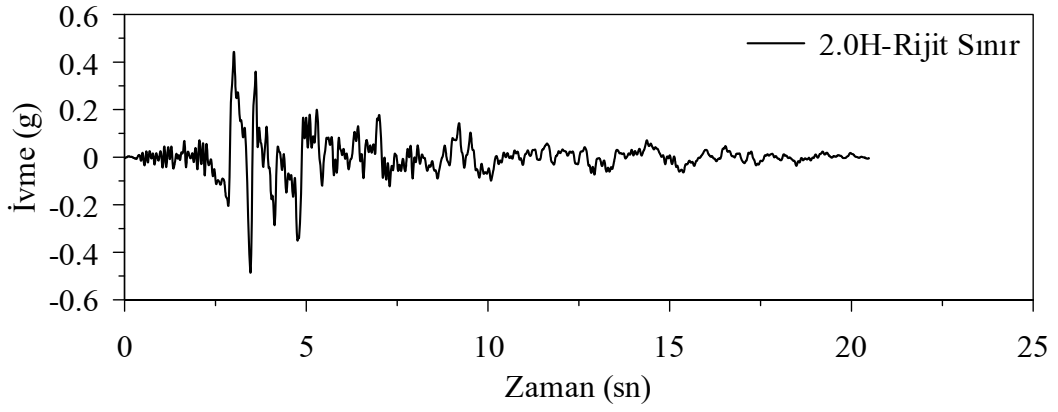
Şekil 3.104. Yapıdan 5H uzaklıkta rijit sınır olması durumunda E noktasına ait zamana bağlı ivme değişimi



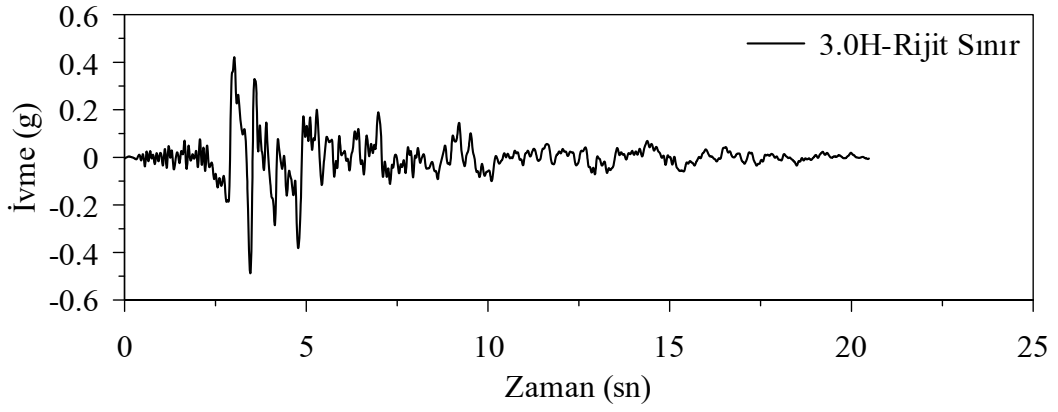
Şekil 3.105. Yapıdan 0.2H uzaklıkta geçirgen sınır olması durumunda E noktasına ait zamana bağlı ivme değişimi



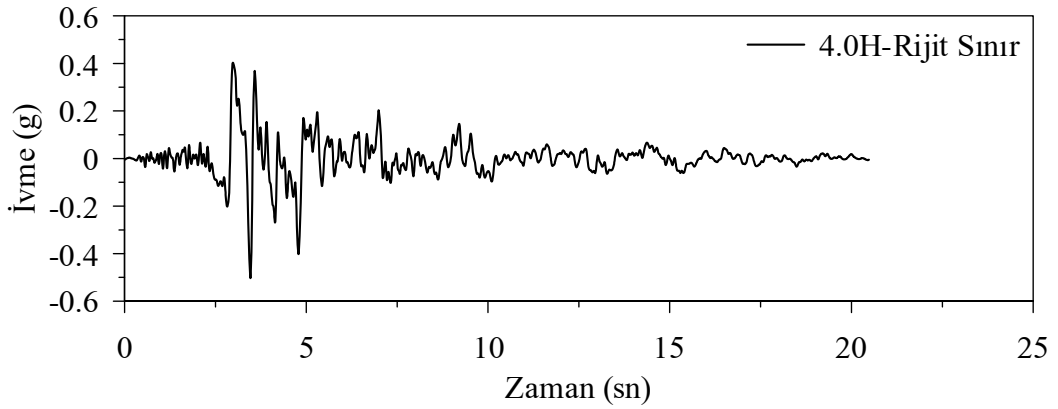
Şekil 3.106. Yapıdan 1H uzaklıkta rijit sınır olması durumunda F noktasına ait zamana bağlı ivme değişimi



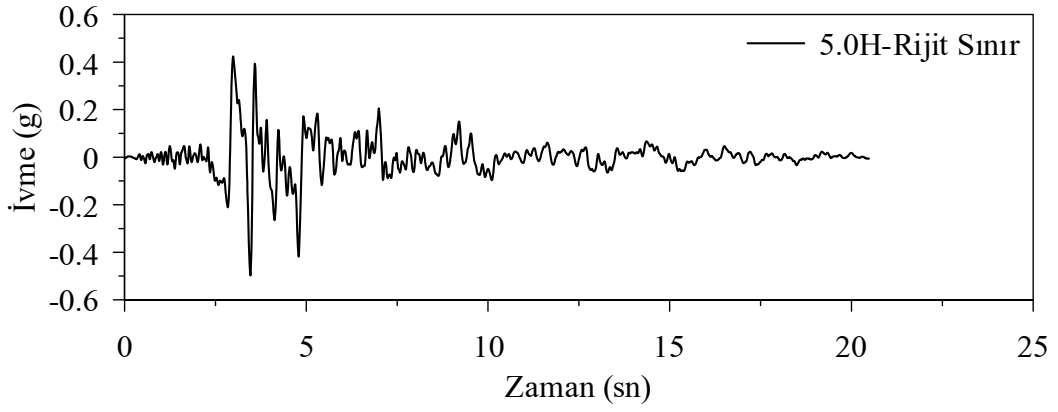
Şekil 3.107. Yapıdan 2H uzaklıkta rijit sınır olması durumunda F noktasına ait zamana bağlı ivme değişimi



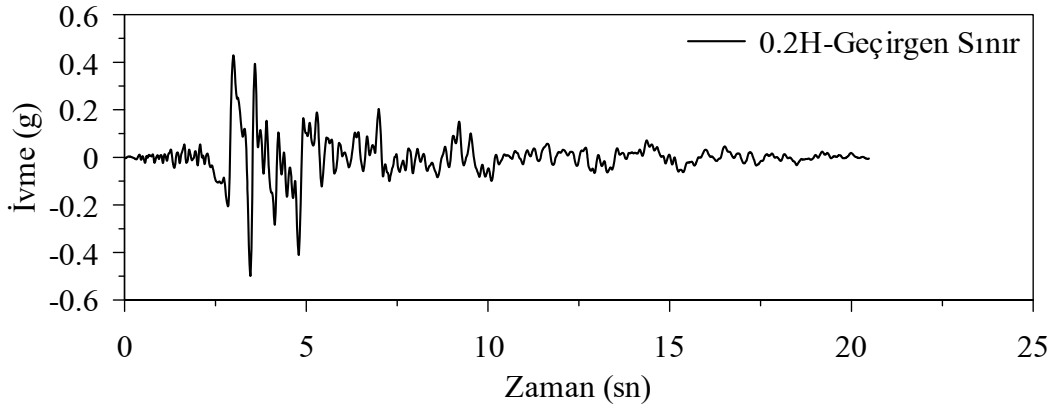
Şekil 3.108. Yapıdan 3H uzaklıkta rijit sınır olması durumunda F noktasına ait zamana bağlı ivme değişimi



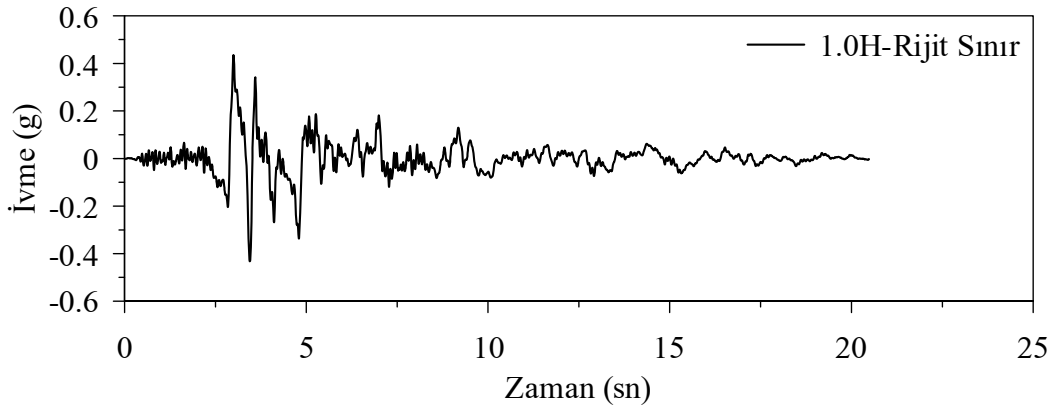
Şekil 3.109. Yapıdan 4H uzaklıkta rijit sınır olması durumunda F noktasına ait zamana bağlı ivme değişimi



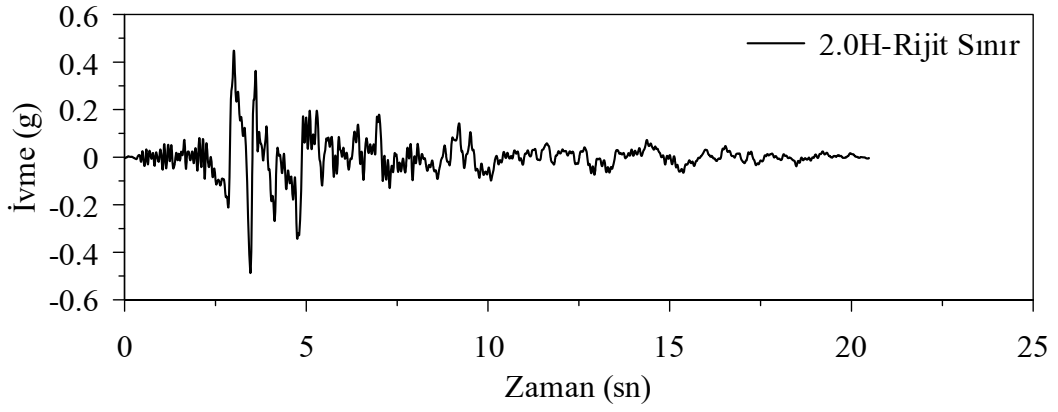
Şekil 3.110. Yapıdan 5H uzaklıkta rijit sınır olması durumunda F noktasına ait zamana bağlı ivme değişimi



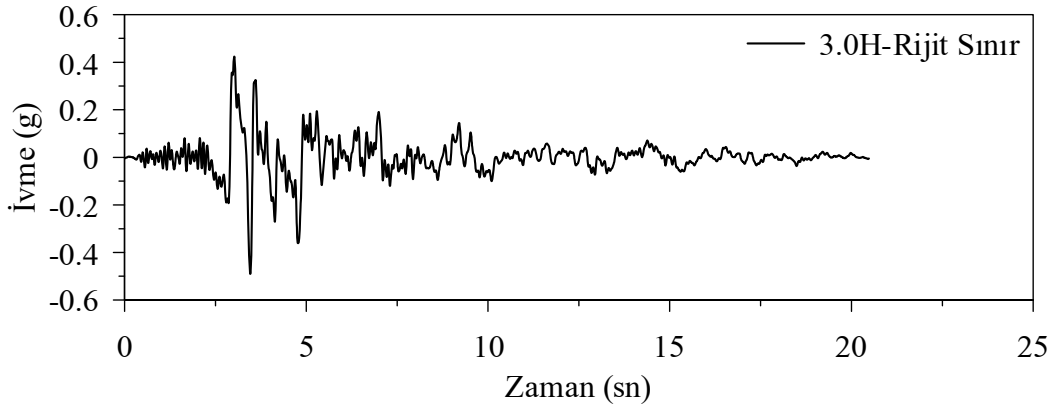
Şekil 3.111. Yapıdan 0.2H uzaklıkta geçirgen sınır olması durumunda F noktasına ait zamana bağlı ivme değişimi



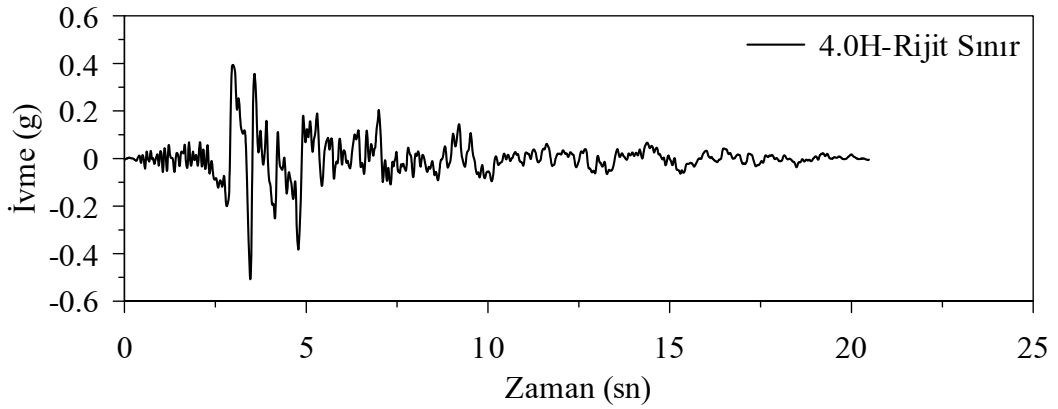
Şekil 3.112. Yapıdan 1H uzaklıkta rijit sınır olması durumunda G noktasına ait zamana bağlı ivme değişimi



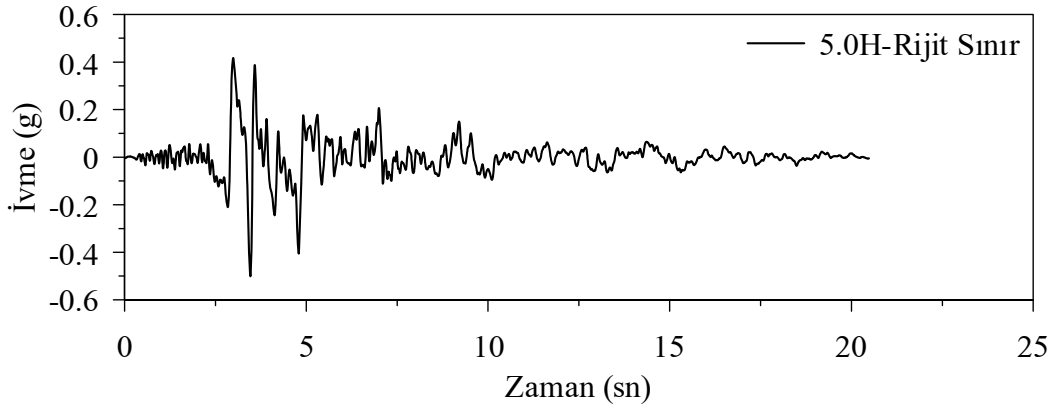
Şekil 3.113. Yapıdan 2H uzaklıkta rijit sınır olması durumunda G noktasına ait zamana bağlı ivme değişimi



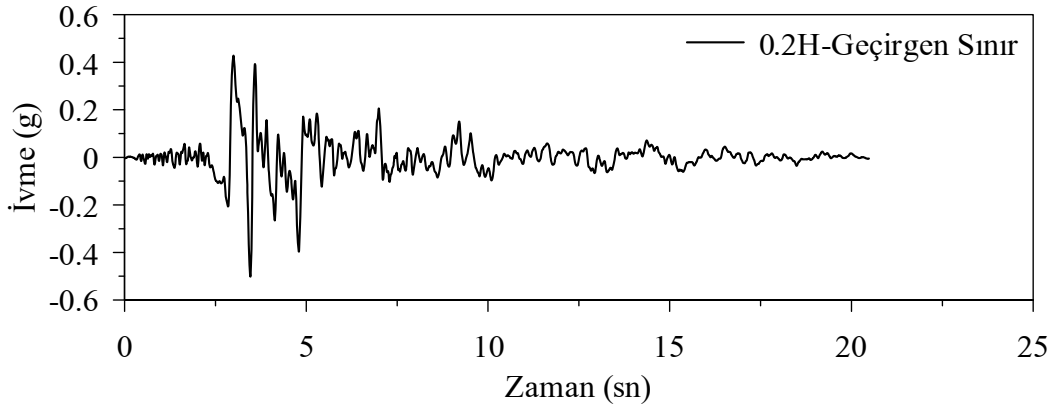
Şekil 3.114. Yapıdan 3H uzaklıkta rijit sınır olması durumunda G noktasına ait zamana bağlı ivme değişimi



Şekil 3.115. Yapıdan 4H uzaklıkta rijit sınır olması durumunda G noktasına ait zamana bağlı ivme değişimi



Şekil 3.116. Yapıdan 5H uzaklıkta rijit sınır olması durumunda G noktasına ait zamana bağlı ivme değişimi



Şekil 3.117. Yapıdan 0.2H uzaklıkta geçirgen sınır olması durumunda G noktasına ait zamana bağlı ivme değişimi

4. SONUÇLAR VE ÖNERİLER

Dinamik etki altında yapı ve zeminin karşılıklı etkileşimi sonucu yapısal davranışlar önemli ölçüde değişmektedir. Özellikle de yıkılmaları veya zarar görmeleri durumunda çok büyük zararlara yol açacak baraj ve nükleer güç santralleri gibi sosyoekonomik açıdan büyük yapıların dinamik etkiler altındaki davranışları inşa edildikleri zemin özelliklerinden bağımsız olarak düşünülememektedir.

Yapı-zemin etkileşimi dinamik analizinde dinamik etkiye maruz yapının titreşimi sonucu oluşan ve dinamik etkiyle zemin içerisinde meydana gelen dalgaların etkisini ortaya koyacak sınırsız zemin ortamının ifade edilebilmesi gerekmektedir. Bu sebeple dinamik analizler için oluşturulacak analitik modeller, yapı ve zeminin birbiri üzerindeki tesirini tam manasıyla idealleştirebilmelidir.

Yapı-zemin etkileşimi dinamik analizleri için kabul gören en uygun analitik model, sonlu elaman yöntemiyle çözümü yapılan, yapı ve zemini içine alan ortak bir model olmaktadır. Fakat böyle bir analitik modelde, yarı-sonsuz zemin ortamı sınırlı zemin hacmiyle temsil edildiği için sistem enerjisi sınırlı bölgede kalarak sönümlenememekte ve yapı davranışı üzerinde suni etkiler ortaya çıkmaktadır. Bu olumsuz durumu ortadan kaldırmak için analitik model içerisinde, bu enerjiyi sönümleyecek geniş bir zemin hacmini kullanmak gerekmektedir. Geniş hacimli zeminle oluşturulacak böyle bir model, uzun ve ekonomik olmayan çözüme sebep olmaktadır. Bu durumda alternatif sınır şartlarının kullanılması ve en uygun zemin hacminin belirlenmesi gerekmektedir.

Bu çalışmada, yapı-zemin etkileşim sistemleri için genel olan *geleneksel sınırlar* (sabit, rijit ve ankastre), dinamik etki sonucu zemin ortamında oluşan Rayleigh dalgalarını sönümleyen ve yarı-sonsuz zemin ortamının dinamik rijitlik matrisini içeren *geçirgen sınırlar* ve dinamik etki sonucu zemin ortamında oluşan P ve S dalgalarını sönümleyen *viskoz sınırların* etkinlikleri incelenmiştir.

Uygulama amacıyla, 1951-1956 yılları arasında Ankara'nın Nallıhan ilçesinde Sakarya nehri üzerinde inşa edilen Sarıyar Barajı seçilmiştir. Rijit kaya tabakasının derinliği baraj yüksekliğinin 1 katı olduğu kabul edilerek, zemin yan sınırlarının yapıdan uzaklığı baraj yüksekliğinin sırasıyla 0.2, 1, 1.5, 2, 2.5, 3, 3.5, 4, 4.5, 5 katı olan 10 farklı yapı-zemin etkileşimi analitik modeli dikkate alınmıştır. Yapıdan 0.2H uzaklıkta sınıra sahip analitik modelin zemin yan sınırlarında geçirgen sınırlar ve diğer 9 modelin

sınırlarında geleneksel ve viskoz sınırlar kullanılmıştır. Yer hareketi olarak bu bölgede oluşması muhtemel deprem türüne örnek olması açısından, 13 Mart 1992 tarihinde meydana gelen Erzincan depreminin doğu-batı bileşeni seçilmiştir.

Geçirgen sınır ve viskoz sınırların kullanıldığı analitik modellerin analizi farklı yöntem (Kompleks Davranış Tekniği ve Direkt İntegrasyon Tekniği) ve programlarda (FLUSH ve ANSYS) gerçekleştirilebildiği için her iki sınıra sahip analitik modellerin analiz sonuçlarını kıyaslayabilmek amacıyla, geleneksel sınırlı analitik modellerin analizleri her iki yöntem içinde ayrıca yapılmıştır.

Rezervuar su seviyesi 85m (tam dolu) olarak dikkate alınarak Westergaard yaklaşımıyla hesaplanan su kütleleri her bir modelin su-yapı etkileşim yüzeyindeki düğüm noktalarına etkilmiştir.

Direkt İntegrasyon Tekniği (ANSYS) ile yapılan analizlerde, yapı ile zeminin Rayleigh sönüm sabitleri, 3 ile 15Hz frekansları kullanılarak %5 sönüm oranına göre hesaplanmıştır.

Kompleks Davranış Tekniği (FLUSH) ile yapılan analizlerde, yapı ile dört farklı tabakadan oluştuğu kabul edilen zeminin sönüm değeri %5 ve sisteme ait en büyük frekans değeri 20 Hz olarak alınmıştır.

Yapılan analizler sonucu elde edilen bulgulardan aşağıdaki sonuçlara ulaşılmıştır:

1. Zemin sınırlarında geleneksel sınırlar tanımlanarak oluşturulan analitik modellerin iki farklı analiz tekniği ile gerçekleştirilen analizleri sonucunda, zeminin sınırı yapıdan 5H ve civarı uzaklıklarda olması durumunda yapı davranışı değişmemektedir.
2. Zemin sınırlarında viskoz sınırlar tanımlanarak oluşturulan analitik modellerin direkt integrasyon tekniği ile gerçekleştirilen analizleri sonucunda, zemin sınırı yapıdan 3H ve civarı uzaklıklarda olması durumunda davranış değişmemektedir.
3. Geleneksel ve viskoz sınırlı yapı-zemin etkileşim sisteminin, sabit rijit kaya tabakası derinliği dikkate alınarak Direkt İntegrasyon Tekniği ile gerçekleştirilen dinamik analizleri neticesinde elde edilen değerler her iki sınır şartı için farklı olmaktadır.
4. Zemin sınırlarında yapıdan 0.2H uzaklıkta kullanılan geçirgen sınırlar tanımlanarak oluşturulan analitik modelin Kompleks Davranış Tekniği ile gerçekleştirilen dinamik analizleri sonucunda, geleneksel sınırların yapıdan 5H ve civarında kullanılmasıyla elde edilen sonuçlarla benzer olmaktadır. Buradan geçirgen

sınırların yarı-sonsuz ortamın rijitliğini sağladığı ve sınırlara gelen dalgaları absorbe ettiği anlaşılmaktadır.

5. Üç farklı sınır şartının dikkate alındığı bu çalışmada analizler için yeterli görülen zemin hacimleri dikkate alındığında, geleneksel sınır için 2532, viskoz sınır için 1740 ve geçirgen sınır için 596 sonlu eleman kullanılmıştır. Böylece viskoz ve geçirgen sınırlar kullanıldığında işlem hacminin büyük oranda azaldığı görülmüştür.

Sarıyar barajının geleneksel, viskoz ve geçirgen sınırlar kullanılarak oluşturulan yapı-zemin etkileşimi analitik modellerinin dinamik analizlerinde elde edilen sonuçlardan sonra, aşağıdaki hususların da üzerinde durulması ve araştırma ve incelemelerin devam ettirilmesi tavsiye edilmektedir:

1. Tabanda rijit kaya tabakasının varlığı kabul edilerek sabit bir zemin derinliği seçilmesi durumunda yapı-zemin etkileşim sisteminin olası dinamik davranış elde edilememektedir. Bu sebeple sonuçlara daha az tesir edecek zemin derinliği araştırılmalıdır ve geçirgen sınırlara benzer olarak tabanda da aynı etkiyi gösterecek yeni sınır şartlarına başvurulmalıdır.
2. Yapılan bu çalışmada problemin bir tür düzlem şekil değiştirme problemi olduğu düşünülerek iki boyutlu çalışma yapılmıştır. Bu durum, etki edeceği zemin alanı küçük olan çok küçük yapılar için geçerli olabilir, fakat baraj gibi üçüncü boyutu çok büyük yapıların bu doğrultudaki zemin karakteristikleri değişebileceğinden dolayı üç boyutlu analizler kaçınılmaz olmaktadır. Bu sebeple, baraj türü yapılar için üç boyutlu yapı-zemin etkileşim analizleri gerçekleştirilmelidir.
3. Bu çalışmada malzemelerin lineer davranış gösterdiği ve zemin özelliklerinin tabaka boyunca değişmediği kabul edilmiştir. Bu tür çalışmalar için malzemelerin lineer olmayan davranışları altında çözüm yapılmalı ve yapı sınırına yakın zemin alanı için geçiş elemanları tanımlanmalıdır.
4. Yapılan çalışmada sadece suyun barajla olan etkileşimi göz önünde bulundurularak Westergaard yaklaşımıyla hesaplanan hidrodinamik su kütleleri baraj yüzeyine eklenmiştir. Rezervuarda bulunan su kütlelerinin çok büyük bir alanda zeminle etkileşim içerisinde olması sebebiyle su-yapı-zemin üçlü etkileşimi dikkate alınmalı ve Lagrange ve Euler yaklaşımıyla su kütlesi sonlu eleman ağı içerisinde ifade edilmelidir.

5. KAYNAKLAR

- Akköse, M., 1997. Kemer Barajların Lineer ve Lineer Olmayan İki ve Üç Boyutlu Statik ve Dinamik Analizi, Yüksek Lisans Tezi, Karadeniz Teknik Üniversitesi, Trabzon.
- Akköse, M., 2004. Lagrange Yaklaşımı ile Kemer Baraj-Su-Zemin Sistemlerinin Malzeme Bakımından Lineer ve Lineer Olmayan Dinamik Analizi, Doktora Tezi, Karadeniz Teknik Üniversitesi, Trabzon.
- Anderson, J., C., 1972. Seismic Response Effects on Embedded Structures, Bullettin of the Seismological Society of America, 62, 1, 177-194.
- Aydinoğlu, M., N., 1977, Üstyapı-Zemin Ortak Sisteminin Deprem Hesabı, Doktora Tezi, İTÜ, İstanbul.
- Aydinoğlu, M., N., 1992. Development of Analytical Techniques in Soil-Structure Interaction, NATO ASI Series-Developments in Dynamic Soil-Structure Interaction, 390, 25-42.
- Bathe, K., J., 1996. Finite Element Procedure, Prentice Hall, New Jersey.
- Bazyar, M., H. ve Song, C., 2006. Transient Analysis of Wave Propagation in Non-Homogeneous Elastic Unbounded Domains by Using the Scaled Boundary Finite-Element Method, Earthquake Engineering and Structural Dynamics, 35, 1787-1806.
- Berger, E., Lysmer, J. ve Seed, H., B., 1975. Comparison of Plane Strain and Axisymmetric Soil-Structure Interaction Analyses, Second ASCE Specialty Conference on Structural Design of Nuclear Plant Facilities, New Orleans, 1-A, 786-808.
- Birk, C. ve Ruge, P., 2006. A Symmetric Time-Domain Model for 3D Dam-Reservoir Interaction Including Radiation Damping, Earthquake Engineering and Structural Dynamics, 36, 661-682.
- Bouaanani, N. ve Miquel, B., 2009. A New Formulation and Error Analysis for Vibrating Dam-Reservoir with Upstream Transmitting Boundary Conditions, Journal of Sound and Vibration, 329, 1924-1953.
- Bycroft, G., N., 1956. Forced Vibrations of a Rigid Circular Plate on a Semi-Infinite Elastic Space and on an Elastic Stratum, Phil. Trans. Royal Society of London, Series A, 948, 327-368.
- Chopra, A., K., 1995. Dynamics of Structures, Prentice-Hall, New Jersey, USA.

- Chuhan, Z., Xinfeng, C. ve Guanglun, W., 1999. A Coupling Model of FE-BE-IE-IBE for Non-Linear Layered Soil-Structure Interactions, Earthquake Engineering and Structural Dynamics, 28, 421-441.
- Clayton, R. ve Engquist, B., 1977. Absorbing Boundary Conditions for Acoustic and Elastic Wave Equations, Bulletin of the Seismological Society of America, 67, 6, 1529-1540.
- Clough, R., W. ve Penzien, J., 1993. Dynamics of Structures, Second Edition, McGraw-Hill Book Company, Singapore.
- Clouteau, D., Broc, D., Devesa, G., Guyonvarh, V. ve Massin, P., 2011. Calculation Methods of Structure-Soil-Structure Interaction (3SI) for Embedded Buildings: Application to NUPEC tests, Soil Dynamics and Earthquake Engineering, 32, 129-142.
- Deeks, A., J. ve Randolph, M., F., 1992. Axisymmetric Time-Domain Transmitting Boundaries, Journal of the Engineering Mechanics, 120, 1, 25-42.
- DSİ, 2005. Türkiye'deki Barajlar ve Hidroelektrik Santraller.
- Du, X., Zhang, Y., Zhang, B., 2006. Nonlinear Seismic Response Analysis of Arch Dam-Foundation Systems-Part I Dam-Foundation Rock Interaction, Bull Earthquake Engineering, 5, 105-119.
- Dumanoğlu, A., A., 1978. Zemine Kısmen Gömülü Ağır Yapıların Dinamik Hesabı, Doçentlik Tezi, Karadeniz Teknik Üniversitesi, Trabzon.
- Dumanoğlu, A., A., 1979. Ağır Yapıların Dinamik Analizinde Matematik Model Seçimi, Deprem Araştırma Enstitüsü Bülteni, 7, 16-27.
- Dumanoğlu, A., A., 1980. A method for the Dynamic Analysis of Embedded Structures, The Seventh World Conference on Earthquake Engineering, İstanbul, 5, 335-339.
- Fattah, M., Y., Schanz, T. ve Dawood, S., H., 2012. The Role of Transmitting Boundaries in Modeling Dynamic Soil-Structure Interaction Problems, International Journal of Engineering and Technology, 2, 2, 236-258.
- Fujimori, T., Tsunoda, T., Izumi, M., Minami, T. ve Taira, T., 1993. Seismic Responses of Embedded Structures (Embedment Effect Tests on Soil-Structure Interaction), Elsevier Science Publishers B.V., 55-60.
- Graff, K., F., 1975. Wave Motion in Elastic Solids, Dover Publications, Inc., New York.
- Gutierrez, J., A. ve Chopra, A., K., 1977. A Substructure Method for Earthquake Analysis of Structures Including Structure-Soil Interaction, Earthquake Engineering and Structural Dynamics, 6, 51-69.

- Hadjian, A., H., 1974. Soil-Structure Interaction: Continuum or Finite Element?, Nuclear Engineering and Design, 31, 151-167.
- Hadjian, A., H., 1975. Soil-Structure Interaction-An Engineering Evaluation, Nuclear Engineering and Design, 38, 2, 267-272.
- Hwang, R., N., Lysmer, J. ve Berger, E., 1975. Simplified Three-Dimensional Soil-Structure Interaction Study, Second ASCE Specialty Conference on Structural Design of Nuclear Plant Facilities, New Orleans, 786-808.
- Isenberg, J. ve Adham, S., A., 1972. Interaction of Soil and Power Plants in Earthquakes, Journal of the Power Division, 98, 273-291.
- Idriss, I., M. ve Seed, H., B., 1970. Seismic Response of Soil Deposits, Journal of the Soil Mechanics and Foundation Division, 96, 631-638.
- Kellezi, L., 2000. Local Transmitting Boundaries for Transient Elastic Analysis, Soil Dynamics and Earthquake Engineering, 19, 533-547.
- Kim, K., J., Koh, H., M., Kwon, K., J. ve Yi, J., S., 2000. A Three-Dimensional Transmitting Boundary Formulated in Cartesian Co-ordinate System for the Dynamics of Non-Axisymmetric Foundations, Earthquake Engineering and Structural Dynamics, 29, 1527-1546.
- Kuhlemeyer, L. ve Lysmer, J., 1973. Finite Element Method Accuracy for Wave Propagation Problems, Journal of the Soil Mechanics and Foundations Division, 99, SM5, 421-427.
- Lamb, H., O., 1904. The Propagation of Tremors over the Surface of An Elastic Solids, Philosophical Transactions. Royal Society, 203, 1-42.
- Liao, Z., P. ve Wong, H., L., 1984. A Transmitting Boundary for the Numerical Simulation of Elastic Wave Propagation, Soil Dynamics and Earthquake Engineering, 3, 4, 174-182.
- Liu, J., Gu, Y., Wang, Y. ve Li, B., 2006. Efficient Procedure for Seismic Analysis of Soil-Structure Interaction System, Tsinghua Science and Technology, 11, 6, 625-631.
- Lysmer, J., Kuhlemeyer, R. ve L., 1969. Finite Dynamic Model for Infinite Media, Journal of the Engineering Mechanics Division, 95, 859-877.
- Lysmer, J., 1970. Lumped Mass Method For Rayleigh Waves, Bullettin of the Seismological Society of America, 60, 1, 89-104.
- Lysmer, J. ve Drake, L., 1972. A Finite Element Method for Seismology, Methods in Computational Physics, 2, 181-216.

- Lysmer, J., Udaka, T., Seed, H.B. ve Hwang, R., 1974. LUSH-A Computer Program for Complex Response Analysis of Soil-Structure Systems, EERC 74-4, Earthquake Engineering Research Center, University of California, Berkeley, California.
- Lysmer, J., Udaka, T., Tsai, C. ve Seed, H., B., 1975. FLUSH-A Computer Program for Approximate 3-D Analysis of Soil-Structure Interaction Problems, Report No. EERC 75-30, Earthquake Engineering Research Center, University of California, Berkeley, California.
- Nakamura, N., 2008. Nonlinear Response Analyses of A Soil-Structure Interaction System Using Transformed Energy Transmitting Boundary in the Time Domain, Soil Dynamics and Earthquake Engineering, 29, 799-808.
- Nakamura, N., 2008. Seismic Response Analysis of Deeply Embedded Nuclear Reactor Buildings Considering Frequency-Dependent Soil Empedance in Time Domain, Nuclear Engineering and Design, 238, 1845-1854.
- Park, S. ve Antin, N., 2003. A Discontinuous Galerkin Method for Seismic Soil-Structure Interaction Analysis in the Time Domain, Earthquake Engineering and Structural Dynamics, 33, 285-293.
- Parmelee, R., A., Perelman, D., S. ve Lee, S., 1969. Seismic Response of Multiple-Story Structures on Flexible Foundations, Bullettin of the Seismological Society of America, 59, 3, 1061-1070.
- Richart, F., E., Hall, J., R. ve Woods, R., D., 1970. Vibrations of Soils and Foundations, Prentice-Hall, Inc., Englewood Cliffs, New Jersey.
- 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 Center, University of California, Berkeley, California.
- Seed, H., B. ve Idriss, I., M., 1970. Soil Moduli and Damping Factors for Dynamic Response Analyses, Report No. EERC 70-10, Earthquake Engineering Research Center, University of California, Berkeley, California.
- Seed, H., B. ve Idriss, I., M., 1973. Soil-Structure Interaction of Massive Embedded Structures During Earthquakes, Fifth World Conference on Earthquake Engineering, Rome, 2, 1881-1891.
- Soares, D., Jr. ve Mansur, W., J., 2006. Dynamic Analysis of Fluid-Soil-Structure Interaction Problems by the Boundary Element Method, Journal of Computational Physics, 219, 498-512.
- Soyluk, K. ve Sıcacık, E., A., 2009. Zemin Sınırlarının Geçirgen Sınırlarla Modellendiği Kablolü Köprülerin Dinamik Analizi, Uluslararası Sakarya Deprem Sempozyumu, Sakarya, S0703, 440-450.

Thomson, W., T. ve Kobori, T., 1963. Dynamic Compliance of Rectangular Foundations on an Elastic Half-Space, Journal of Applied Mechanics, 30, 579-584.

URL-1, www.koeri.boun.edu.tr/sismo/Personel/comoglu/depremnedir/. 20 Mart 2013.

URL-2, www.deprem.gov.tr/sarbis/Deprem/DepremNedir.aspx. 20 Mart 2013.

URL-3, <http://www.olcayeti.com/fizik-9sinif-konu-ozetleri/279-deprem-dalgalari-love-ve-rayleigh-dalgalari-.html>. 20 Mart 2013.

URL-4, <http://peer.berkeley.edu/svbin/GeneralSearch>. 16 Ocak 2013.

Vaish, A., K. ve Chopra, A., K., 1973. Earthquake Analysis of Structure-Foundation Systems, Report No. EERC 73-9, Earthquake Engineering Research Center, University of California, Berkeley, California.

Valera, J., E., Seed, H., B., Tsai, C., F. ve Lysmer, J., 1977. Seismic Soil-Structure Interaction Effects at Humboldt Bay Power Plant, Journal of the Geotechnical Engineering Division, 103, 10, 1143-1161.

Waas, G., 1972. Linear Two-Dimensional Analysis of Soil Dynamics Problems in Semi-Infinite Layered Media, Ph. D. Disertation, University of California, Berkeley.

Wolf, J., P. ve Song, C., 2000. Finite-Element Modelling of Unbounded Media, John Wiley & Sons Ltd., Chichester.

Yang, J., Li, J., B. ve Lin, G., 2005. A Simple Approach to Integration of Acceleration Data for Dynamic Soil-Structure Interaction Analysis, Soil Dynamics and Earthquake Engineering, 26, 725-734.

Yurdakul, M., 2011. Üç Eğrilikli Sürtünmeli Sarkaç Mesnetli Yapıların Dinamik Davranışına Zemin Eğilebilirliğinin Etkisi, Yüksek Lisans Tezi, Karadeniz Teknik Üniversitesi, Trabzon.

Zhong, H., Li, J. ve Chen, J., 2007. An Efficient Time-Domain Damping Solvent Extraction Algorithm and Its Application to Arch Dam-Foundation Interaction Analysis, Communications in Numerical Methods in Engineering, 24, 727-748.

ÖZGEÇMİŞ

Hasan SESLİ, 1988 yılında Artvin iline bağlı Arhavi ilçesinde doğdu. İlköğretimi, 1994-1998 yılları arasında Fatih Sultan Mehmet İlköğretim Okulu'nda devam ettikten sonra 1998-2002 yılları arasında Atatürk İlköğretim Okulu'nda tamamladı. Ortaöğretimi ise, 2002-2005 yılları arasında Arhavi Lisesi'nde okul dördüncüsü olarak tamamladı. Mezun olduğu yıl girdiği Öğrenci Seçme Sınavı'nda gösterdiği başarı neticesinde Karadeniz Teknik Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, İnşaat Mühendisliği Bölümü'nde lisans eğitimi almaya hak kazandı. 2005-2006 yılları arasında Karadeniz Teknik Üniversitesi'nde İngilizce hazırlık eğitimi aldı. Lisans eğitimini 2010 yılında bölüm birincisi olarak tamamladı ve aynı yıl içerisinde Karadeniz Teknik Üniversitesi, İnşaat Mühendisliği Bölümü'nde yüksek lisans eğitimine başladı. Daha sonra, Şubat 2011'de Karadeniz Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı'na araştırma görevlisi olarak atandı. İngilizce bilen SESLİ, halen Karadeniz Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı'nda görevine devam etmektedir.