

**ÇOK KATLI ÇERÇEVE TİPİ BETONARME
YAPILARIN ELASTİK ZEMİNLE DİNAMİK
ETKİLEŞİMİ**

ITU MERKEZ KÜTÜPHANESİ

Denirbaş No: 70788

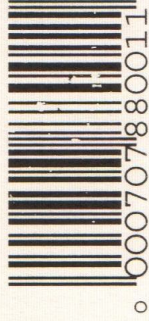
Sınıflama No:

İNŞ
U21410
KAP

YÜKSEK LİSANS TEZİ
İnş. Müh. Ahmet KAPTAN
(501970010011)

Tezin Enstitüye Verildiği Tarih : 28 Mayıs 1999
Tezin Savunulduğu Tarih : 18 Haziran 1999

Tez Danışmanı : Doç.Dr. A. Necmettin GÜNDÜZ 2/7/99
Diğer Jüri Üyeleri Prof.Dr. Nahit KUMBASAR
Prof.Dr. Zekeriya POLAT (Y.T.Ü.)



HAZİRAN 1999



ÖNSÖZ

İ.T.Ü. Fen Bilimleri Enstitüsünde yapmış olduğum Yüksek Lisans çalışmasında, Sayın Doç. Dr. A. Necmettin GÜNDÜZ'e sonsuz teşekkürlerimi sunarım. Tez süresince tez çalışmasına katkısı olan herkese teşekkür ederim.

İstanbul, 1999

Ahmet KAPTAN

İÇİNDEKİLER

TABLO LİSTESİ ŞEKİL LİSTESİ SEMBOL LİSTESİ ÖZET SUMMARY

IV
V
VIII
IX
XI

1. GİRİŞ

- 1.1 Giriş ve Çalışmanın Amacı
- 1.2 Yapı-Zemin Dinamik Etkileşimi
- 1.3 Kullanılan Hesap Yöntemleri

1
1
2
3

2. YARI SONSUZ ELASTİK ORTAM ÇÖZÜMLERİ

- 2.1 Giriş
- 2.2 Zemin Ortamının Modellenmesi
- 2.3 Sistemin Çözümü

5
5
7
10

3. SONLU ELEMEN YÖNTEMİ ÇÖZÜMLERİ

- 3.1 Giriş
- 3.2 Mikro-İdealleştirme
- 3.3 Makro-İdealleştirme
- 3.4 Hareket Denklemlerinin Çözülmesi
- 3.5 Sistemde Sönüm Değeri
 - 3.5.1 Viskoz sönüm elemanı
 - 3.5.2 Yaklaşık radyasyon sınır koşulu
 - 3.5.3 Zemin ortamında sönüm

12
12
13
14
15
19
21
22
24

4. YÖNTEMLERİN ÜSTÜNLÜK VE SAKINCALARI

- 4.1 Giriş
- 4.2 Yarı Sonsuz Elastik Ortam Çözümleri
- 4.3 Sonlu Eleman Yöntemi Çözümleri
- 4.4 Zemin Yüzeyine Yakın Yapılar

27
27
29
34
40

5. SAYISAL ÖRNEK

- 5.1 Yapı-Zemin Etkileşimine Ait Sayısal Örnek
- 5.2 Yapılan Çözümler

42
42
45

6. SONUÇLAR

51

KAYNAKLAR

53

EKLER

55

ÖZGEÇMİŞ

75

TABLO LİSTESİ

	Sayfa No
Tablo 5.1 10 Katlı çerçevedeki kolon boyutları	45
Tablo 5.2 Çözülen sistemlerin periyotları	49
Tablo 5.3 Çözülen sistemlerin periyotları	50

ŞEKİL LİSTESİ

Sayfa No

Şekil 1.1	: Hesap yöntemleri	4
Şekil 2.1	: Yarı sonsuz elastik uzayda dairesel plak ve harmonik yükler	6
Şekil 2.2	: Basitleştirilmiş kuvvet-yer değiştirme için model	8
Şekil 2.3	: Gerçek ve yaklaşık (basitleştirilmiş) rijitlik ve sönüm sabiti katsayılarının karşılaştırılması	9
Şekil 3.1	: Yapı-zemin sisteminin sonlu eleman modeli	13
Şekil 3.2	: Karmaşık rijitlikli tek serbestlik dereceli sistem	18
Şekil 3.3	: i ve j düğümleri arasında genel sönüm elemanı	21
Şekil 3.4	: Birim küpe etkileyen kuvvetler	22
Şekil 3.5	: Kayma etkisindeki Kelvin-Voight cismi	24
Şekil 3.6	: Histerisis halkası ve sönüm oranı ilişkisi	25
Şekil 4.1	: Yapı-zemin sisteminin yarı sonsuz ortam modeli	28
Şekil 4.2	: Yapı-zemin sisteminin sonlu eleman modeli	28
Şekil 4.3	: Bir ve iki tabakalı zemin hali	31
Şekil 4.4	: Kumlarda kayma şekil değiştirmesinin, kayma modülü ve sönüm oranına etkisi	31
Şekil 4.5	: Tokyo-Higashi-Matsuyama 1968 depreminde kayıt edilen maksimum ivmenin yapı derinliğince değişimi	33
Şekil 4.6	: Sonlu eleman metodunu kullanarak yapı-zemin etkileşim analizi	33
Şekil 4.7	: Değişken sönüm kullanılan sonlu eleman analizi	36
Şekil 4.8	: Sabit sönümlü sonlu eleman analizi (Modal analiz, %7 sönüm)	36
Şekil 4.9	: Rayleigh sönümü ile sonlu eleman analizi	39
Şekil 4.10	: Sonlu eleman metodunda eleman boyutunun etkisi	39
Şekil 5.1	: Çerçevenin plandaki görünüşü	43
Şekil 5.2	: Yapı-zemin etkileşim sistemi sonlu eleman modeli	43
Şekil 5.3	: 1992 Erzincan depremi doğu - batı doğrultusu ivme kaydı	44
Şekil 5.4	: İki tabakalı zemin ortamı için sonlu eleman modeli	47
Şekil A.1	: Rijit zemin için 10.kat yer değiştirmesinin zamanla değişimi	56
Şekil A.2	: Rijit zemin için 10 katlı çerçevedeki taban kesme kuvvetinin zamanla değişimi	56
Şekil A.3	: Kayma dalgası hızı 200 m/sn için 10.katın temele göre rölatif yer değiştirmesinin zamanla değişimi	57
Şekil A.4	: Kayma dalgası hızı 200 m/sn için 10 katlı çerçevedeki taban kesme kuvvetinin zamanla değişimi	57
Şekil A.5	: Kayma dalgası hızı 500 m/sn için 10.katın temele göre rölatif yer değiştirmesinin zamanla değişimi	58
Şekil A.6	: Kayma dalgası hızı 500 m/sn için 10 katlı çerçevedeki taban kesme kuvvetinin zamanla değişimi	58

Şekil A.7 : Kayma dalgası hızı 1000 m/sn için 10.katın temele göre rölatif yer değiştirmesinin zamanla değişimi	59
Şekil A.8 : Kayma dalgası hızı 1000 m/sn için 10 katlı çerçevedeki taban kesme kuvvetinin zamanla değişimi	59
Şekil A.9 : 10.kat rölatif yer değiştirmelerinin 200, 500 m/sn kayma dalgası hızları ve rijit zemin hali için zamanla değişimi	60
Şekil A.10 : 10 katlı çerçevede taban kesme kuvvetlerinin 200, 500 m/sn kayma dalgası hızları ve rijit zemin hali için zamanla değişimi ...	61
Şekil A.11 : Kayma dalgası hızı 200 m/sn ve rijit temel kirişi için 10.katın temele göre rölatif yer değiştirmesinin zamanla değişimi	62
Şekil A.12 : Kayma dalgası hızı 200 m/sn ve rijit temel kirişi için 10 katlı çerçevedeki taban kesme kuvvetinin zamanla değişimi	62
Şekil A.13 : Kayma dalgası hızı 200 m/sn için 5.katın temele göre rölatif yer değiştirmesinin zamanla değişimi	63
Şekil A.14 : Kayma dalgası hızı 200 m/sn için 5 katlı çerçevedeki taban kesme kuvvetinin zamanla değişimi	63
Şekil A.15 : Kayma dalgası hızı 200 m/sn için 10 katlı çerçeve temelının ortalama dönmesinin zamanla değişimi	64
Şekil A.16 : Kayma dalgası hızı 200 m/sn için 5 katlı çerçeve temelının ortalama dönmesinin zamanla değişimi	64
Şekil A.17 : Kayma dalgası hızı 200 m/sn için 10 katlı çerçeve temelının ortalama dönmesinden oluşan 10.kat yer değiştirmesinin zamanla değişimi	65
Şekil A.18 : Kayma dalgası hızı 200 m/sn için 5 katlı çerçeve temelının ortalama dönmesinden oluşan 5.kat yer değiştirmesinin zamanla değişimi	65
Şekil A.19 : Kayma dalgası hızı 200 m/sn ve 500 m/sn olan iki tabakadan oluşan zemin için 10.katın temele göre rölatif yer değiştirmesinin zamanla değişimi	66
Şekil A.20 : Kayma dalgası hızı 200 m/sn ve 500 m/sn olan iki tabakadan oluşan zemin için 10 katlı çerçevedeki taban kesme kuvvetinin zamanla değişimi	66
Şekil A.21 : Kayma dalgası hızı 200 m/sn için serbest alanda yüzey orta noktanın yer değiştirmesinin zamanla değişimi	67
Şekil A.22 : Kayma dalgası hızı 200 m/sn için etkileşimli sistemde 146 m genişlikli zemin ağında kontrol noktası yer değiştirmesinin zamanla değişimi	67
Şekil A.23 : Kayma dalgası hızı 200 m/sn için etkileşimli sistemde 222 m genişlikli zemin ağında kontrol noktası yer değiştirmesinin zamanla değişimi	68
Şekil A.24 : Kayma dalgası hızı 200 m/sn için serbest alanda yüzey orta noktanın ivme spektrum eğrisi	68
Şekil A.25 : Kayma dalgası hızı 200 m/sn için etkileşimli sistemde 146 m genişlikli zemin ağında kontrol noktası ivme spektrum eğrisi	69
Şekil A.26 : Kayma dalgası hızı 200 m/sn için etkileşimli sistemde 222 m genişlikli zemin ağında kontrol noktası ivme spektrum eğrisi	69
Şekil A.27 : Kayma dalgası hızı 200 m/sn için etkileşimli sistemde 222 m genişlikli zemin ağı halinde 10 katlı çerçevede taban kesme kuvvetinin zamanla değişimi	70

Şekil A.28 : Kayma dalgası hızı 200 m/sn için etkileşimli sistemde 222 m ve 146 m genişlikli zemin ağı için taban kesme kuvvetlerinin kıyaslanması	70
Şekil A.29 : Kayma dalgası hızı 200 m/sn için etkileşimli sistemde 222 m genişlikli zemin ağı halinde yapı tabanındaki ivme spektrum eğrisi	71
Şekil A.30 : 1992 Erzincan depremi doğu-batı doğrultusu ivme spektrum eğrisi	71

SEMBOL LİSTESİ

a, b	: Rayleigh sönümünde sönümü kontrol eden katsayılar
a_o	: Boyutsuz frekans parametresi
c	: Sönüm sabiti
$d_t^{(i)}$	: Viskoz sönüm elemanında toplam deplasman
$e_t^{(i)}$	: Viskoz sönüm elemanında sönüm kutusu deplasmanları
f_{ij}, g_{ij}	: Boyutsuz birim kuvvet matrisi i, j elemanları
$f_p^{(i)}, f_s^{(i)}, f_c^{(i)}$	: Viskoz sönüm elemanındaki kuvvetler
G	: Kayma modülü
G^*	: Karmaşık kayma modülü
k^*	: Karmaşık rijitliğe sahip yay
k_{ij}, c_{ij}	: ao ve v' 'ye bağlı koyutsuz katsayılar
k_x, k_y, c_x, c_y	: Basitleştirilmiş yay ve sönüm sabiti değerleri
$Me^{i\omega t}, Pe^{i\omega t}$	: Harmonik dış yükler
u	: Yer değiştirme
V_p	: Basınç dalgası yayılma hızı
V_s	: Kayma dalgası yayılma hızı
$[\phi]$	: Modal matris
$[C]$	: Sönüm matrisi
$[K]$	: Rijitlik matrisi
$[M]$	: Kütle matrisi
$\{\phi\}$	: Mod şeklini gösteren vektör
$\{m\}$	: Kütle matrisiyle ilişkili vektör
$\{q\}$	: Modal yer değiştirmeler
$\{u\}$	: Yer değiştirme vektörü
ω	: Frekans
ϖ	: Harmonik yüklemeye dış yükün frekansı
τ	: Kayma gerilmesi
γ	: Kayma şekil değiştirmesi
λ	: Lamé sabiti
ρ	: Malzemenin birim hacim kütlesi
ν	: Poisson oranı
β	: Sönüm değeri
ξ	: Sönüm oranı
λ_s	: Dalga hareketinin dalga boyu
β_s	: Sönüm oranı

ÇOK KATLI ÇERÇEVE TİPİ BETONARME YAPILARIN ELASTİK ZEMİNLE DİNAMİK ETKİLEŞİMİ

ÖZET

Bu tez çalışmasında, çok katlı çerçeve tipi betonarme üst yapı ile elastik zemin arasındaki dinamik etkileşim konusu üzerinde durulmuştur. Deprem sırasında üst yapının davranışına zeminin etkisi ve bu sırada da zeminin davranışına üst yapının etkisinin araştırıldığı analiz şekline yapı-zemin dinamik etkileşim analizi adı verilmektedir. Son yıllarda deprem bölgelerinde inşa edilmiş olan çok katlı binalar, barajlar, nükleer santraller gibi önemli yapılarda yapı-zemin etkileşimi tasarımı önemli olabilmektedir.

Tez çalışması altı bölümden oluşmaktadır. Giriş bölümü olan birinci bölümde, konu tanıtılmakta üst yapı ile zeminden oluşan etkileşim sisteminin modellenmesi ve çözümünde kullanılan yöntemler hakkında açıklayıcı bilgi verilmektedir.

İkinci bölümde, etkileşim sisteminin çözümünde kullanılan birinci grup çözüm yöntemlerinin ana başlığı olan yarı sonsuz elastik ortam çözümleriyle ilgili çalışmalar ele alınmıştır. Sistemde zeminin etkisini sembolize eden yay katsayısı ve sönüm sabiti değerlerini veren empedans fonksiyonlarından bahsedilmiştir.

Üçüncü bölümde, son yıllarda etkileşim problemi çözümünde daha sık kullanılan ve tezde ikinci grup çözüm yöntemi olarak incelenen sonlu eleman yöntemi çözümlerinden bahsedilmiştir. Sonlu eleman yöntemi ile çözüm, sistemin modellenmesi, hareket denklemlerinin çözülmesi, sistemde sönüm değeri gibi konuları da kapsayacak şekilde ayrıntılarıyla açıklanmıştır. Konuyla ilgili diğer yayınlardaki önerilere de yer verilmiştir.

Dördüncü bölümde ise, çözümde kullanılan yöntemlerin üstünlük ve sakıncaları konusu incelenmiştir. Yöntemlerin üstün ve kısıtlayıcı yanları çeşitli açıklamalarla beraber sunulmuştur. Karşılaştırmalı örneklerle konu detaylı biçimde ele alınmıştır.

Beşinci bölümde, çok katlı çerçeve tipi bir betonarme yapının elastik zeminle dinamik etkileşimi sonlu eleman yöntemiyle incelenmiştir. Modelde yer hareketi olarak 1992 Erzincan depremi doğu-batı doğrultusu ivme kaydı kullanılmıştır. Sistemi oluşturan zemin ve betonarme çerçeve için değişik koşulları yansıtan değerler kullanılarak sistemin davranışı incelenmiştir. Sistemde çok katlı betonarme çerçevenin değişik koşullardaki davranışına ait tablo ve şekiller açıklamalarıyla beraber sunulmuştur.

Tezin son bölümü olan altıncı ve sonuçlar bölümünde, gerek konuyla ilgili metinlerde değinilen, gerekse sayısal çözümlerden çıkarılan sonuçlar ifade edilmiştir. Birkaç önemli sonuca kısaca değinecek olursak;

- Etkileşimli sistemin dinamik özelliklikleri, rijit zemine mesnetli sistem halinden tamamen farklıdır.
- Etkileşimli sistemde birinci doğal periyot, rijit mesnetli sistem halinden daha büyüktür. Yani etkileşimli sistemde periyot uzar.
- Etkileşim nedeniyle yapı tabanındaki hareket, serbest alan hareketi ve ana kaya hareketinden farklıdır. Ayrıca rijit mesnetli sisteme göre önemli bir dönme bileşeni içerir.
- Etkileşimli sistemde yer değiştirmeler artmaktadır. Ayrıca etkileşimli sistemde yapının temelindeki dönme çok katlı binalarda önemli hale gelebilmektedir.

Diğer yayın ve yönetmeliklerdeki sonuçlardan da yararlanılarak tez konusu geniş bir yelpazede ele alınmıştır.

DYNAMIC INTERACTION BETWEEN FRAME TYPE MULTISTORY REINFORCED CONCRETE STRUCTURES AND ELASTIC FOUNDATION

SUMMARY

In this study, the dynamic interaction between frame type multistory reinforced concrete structures and elastic foundation is analyzed. During an earthquake, the existence of the soil medium effects the response of structure and meanwhile the existence of the structure effects the response of the soil. This interaction effect is called as dynamic soil-structure interaction. In recent years, many important structures such as multistory buildings, dams, nuclear power plants have been constructed in seismic zones. Interaction effects for these kind of structures can be important in the earthquake resistant design.

This study contains six chapters. In the first chapter, the interaction problem is defined. And the presentation of the interaction models and the analyzing methods in the soil-structure interaction is briefly introduced.

In the second chapter of the study, half space analysis or interaction spring analysis is presented. This is one of the two major ways in the soil-structure interaction analysis. In this method, the effects of the soil on the structural response is taken into consideration by a series of springs and dashpots which represents a theoretical half space surround the structure. The impedans functions aproach is introduced to determine these springs and dashpots values.

In the third chapter, the finite element method utilization is presented in the dynamic interaction problem which is the second analysis type in this study. And a detailed description of the finite element method utilization is given including modelling, solving the equations of motions and damping in the system etc. Suggestions from the previous studies are also taken into consideration.

In the fourth chapter, the advantages and disadvantages of the half space analysis and the finite element analysis are presented. Both of these methods are investigated in in a wide range and the solutions of previous investigations are also used.

In the fifth chapter, a numerical example is presented. The dynamic interaction problem is analysed modelling the multistory reinforced concrete frame and elastic foundation by the finite element method. In the interaction system the response of the multistory reinforced concrete frame in different conditions is given in the form of tables and figures, including related comments.

In the final chapter, the conclusions depending on the analysis and investigations are submitted. Some of these conclusions are;

- The interaction system has different dynamic characteristics than the rigidly mounted system.
- First natural period of the interaction system is longer than the rigidly mounted system.
- Due to the interaction, the motion at the base of the structure is different from the free field motion and the base rock motion. And may include an important rocking component in addition to a lateral or translational component.
- In the interaction system, the displacements increase with respect to rigidly mounted structures and the rocking component at the base of the structure may be significantly important for the multistory structures.

In the thesis, soil-structure interaction analysis has been presented in a wide range including the other studies, books and codes.

1. GİRİŞ

1.1 Giriş ve Çalışmanın Amacı

İnşaat mühendisliğinin insanlık tarihi içinde farklı bir yeri vardır. Mağaralardan modern yaşam tarzına ulaşan medeniyetlerin oluşmasında en etkin rol inşaat mühendislerinin olmuştur. Pek çok yaşamsal konuyla beraber, insanların en önemli ihtiyacı olan barınma ihtiyacına çözüm bulup hayat koşullarının iyileşmesi sağlanmıştır. Dünyanın her yanında tarihin gelişimini yansıtan yapılar, belirli bir mühendislik birikimi ve gelişimi sayesinde oluşmuştur. Gelişen bilim ve teknoloji sayesinde günümüz modern yaşam şekline ulaşılırken, yeni mühendislik dalları oluşturup, özel konularla ilgilenmek medeniyetin gelişimini hızlandırmıştır. Barınma ihtiyacının karşılanmasında bina türü yapılar kullanılırken, yapıların şekli, güvenliği, ekonomisi, tasarımı bilimdeki gelişmelere paralel olmuştur.

Tarih içerisinde görülen depremlerde yapıların hasar görmesi ya da yıkılması, insanları yapıların depremdeki davranışını incelemeye, depreme dayanıklı inşaat teknikleri geliştirmeye yöneltmiştir. Gelişen teknolojiyle beraber inşa edilen çok katlı binalar, kuleler, barajlar, nükleer santraller vb. yapıların depreme karşı dayanıklı tasarımı önemli bir konu haline gelmiştir. Yapılan araştırmalarda zeminin deprem sırasında yapının davranışına etkilerini inceleyen dinamik yapı-zemin etkileşiminin bu tür yapılarda önemli olabileceği ortaya konulmuştur.

Yapı mühendisliğinin ilgilendiği alanlardan birisi olan yapı-zemin dinamik etkileşimi bu tez çalışmasının konusunu oluşturmaktadır. Tez çalışmasında literatürde konuyla ilgili yayınlardan yararlanarak, daha önce yapılan bazı çalışmalarda ulaşılan sonuç ve görüşler özetlenmiş, verilen sayısal örneklerle konunun daha iyi anlaşılması için çalışılmıştır.

1.2 Yapı-Zemin Dinamik Etkileşimi

Deprem sırasında, yapı ve zemin birbirini etkileyecek şekilde titreşirler. Bu etkileşim yapı-zemin dinamik etkileşimi olarak adlandırılır ve nükleer santral gibi ağır yapıların depreme karşı boyutlandırılmasında önemli olmaktadır. Yapı ve zemin özellikleriyle beraber deprem karakteristikleri de problemde önemlidir.

Temeller yapının sabit ve hareketli yüklerinin zeminine güvenle aktarılmasını sağlayan yapı elemanlarıdır. Deprem sırasında zeminin hareketini yapıya iletirken, aynı sırada yapının titreşimini de zemine aktarır. Diğer bir değişle yapı ile zemin birbirlerinin hareketini temeller üzerinden etkiler.

Yapı-zemin etkileşiminin yapının hareketlerini etkileme derecesi, zeminin rijitliğine, yapının rijitlik ve kütle özelliklerine, seçilen temel sistemine göre değişir. Etkileşim yapının zeminle temasta olduğu bölgelerde mevcuttur. Deprem sırasında oluşan dalga hareketi temelin altına ulaşınca, temelden yapının içine geçen ve ilerleyen dalgalarla, temelden zemine geri yansıyan dalgalar olarak ikiye bölünürler. Yapının içinde ilerleyen dalgalar yapının tepesine ulaşınca titreşim hareketi oluşturup geri yansıyarak temele doğru hareket eder. Temele gelen dalgalardan bir kısmı zemine geçerken, diğer kısmı tekrar yapının tepesine doğru hareket etmek üzere yansır. Yapıdan zemine kaçan dalgalar radyasyon dalgaları (radiation waves) olarak adlandırılır. Eğer radyasyon dalgaları az miktardaysa, deprem dalgalarından yapıya geçen kısım yapının içinde kalmaya ve yapı titreşmeye uzun süre devam eder. Yapısal sönüm nedeniyle hareket belirli süre sonunda sönümlenerek biter. Deprem dalgalarının yapıya geçen kısmının tekrar zemine kaçışıyla oluşan sönüm de radyasyon sönümü olarak adlandırılır [1].

Yapı temeli düşey olarak titreşime maruz kalırsa, temellerin alt yüzeyi ile zemin arasında temas zemin gerilmeleri oluşur. Temas zemin gerilmelerinin dağılımı temel rijitliği, zemin cinsi, zeminin lineer olmayan davranışına bağlı olarak rijit, üniform veya parabolik dağılımda olabilir. Dağılımın değişik şekillerde oluşu zemine pek çok noktadan hareket iletilmesine neden olur. İletilen hareket zeminde karmaşık biçimde dalga hareketi oluşturur. Bu karmaşık form radyasyon dalgaları formudur. Zeminin çok tabakalı olması halinde yapıdan zemine geçen dalgalardan bazıları tabakalardan yansıyıp geri döner ve durum daha da zor ifade edilen bir hal alır.

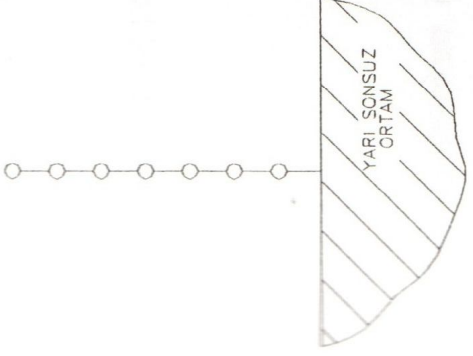
Üst yapıyla ilgili olarak, üst yapı rijitliği ve kütesinin etkileşimde önemi vardır. Yapının rijitliği ile ilgili etkileşime kinematik etkileşim, kütesiyle ilgili etkileşime eylemsizlik etkileşimi adı verilmektedir. Dinamik yapı-zemin etkileşiminde, rijit zemine oturan yapıların analizinden farklı olarak temelin dönmesi ve zeminin kütesi de hesaplara girmektedir. Özellikle yumuşak zemine oturan yapıların depremdeki hareketinde yatay temel hareketine ek olarak ortaya çıkan dönme bileşeni yüksek binaların davranışında çok belirgin bir öneme sahiptir.

Bir bölgedeki yapının deprem sırasındaki davranışını değerlendirmesinde, yapı-zemin sisteminin dinamik özelliklerinin anlaşılması gereklidir [2]. Zemin, yapının davranışını değişik şekillerde etkiler;

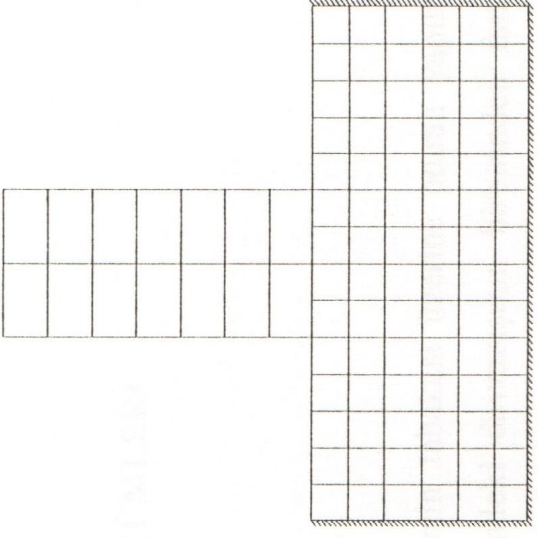
- a) Yapının altındaki zemin, ana kayadaki deprem etkisini değiştirerek verir. Bu bazı durumlarda etkinin büyümesi sonucunu doğurur.
- b) Zemin etkisiyle, yapının periyot ve mod şekilleri gibi dinamik özelliklerinde değişiklikler meydana gelir.
- c) Yapıdaki titreşim enerjisinin önemli bir kısmı, zemine mesnetlenmenin rijit olmaması, zemindeki sönüm ve zeminde yayılma etkisiyle (radyasyon) söner.
- d) Yapıda, üzerinde bulunduğu zeminin etkisiyle deprem sırasında farklı oturmalar meydana gelebilir.

1.3 Kullanılan Hesap Yöntemleri

Girişle tanıtılmaya çalışılan etkileşim problemi doğası itibari ile karmaşık bir konudur. Zemin, yapı ve deprem karakteristikleri problemde önemli rol oynar. Konuyu idealleştirmek için yapılan her kabule göre farklı sonuçlar elde edilebilir. Bu yüzden yöntemleri ayrıntılarıyla bilmek ve yapılan varsayımlar için detaylı inceleme sonucunda karar vermek yerinde olacaktır. Problemin çözümünde seçilen hesap yöntemi de önemlidir. Genelde hesap tekniği ile ilgili yayınlarda konuları iki ana başlık altında toplamak mümkündür. Bunlar yarı sonsuz elastik ortam çözümleri ve sonlu eleman yöntemi çözümleridir. Şekil 1.1’de hesap yöntemi modelleri gösterilmiştir.



a) Yarı Sonsuz Elastik Ortam Modeli



b) Sonlu Eleman Modeli

Şekil 1.1 : Hesap yöntemleri

a) Yarı sonsuz elastik ortam çözümleri : Yapı-zemin etkileşimini dikkate alacak çeşitli modeller, sonuçta yapının yarı sonsuz elastik bir zemin ortamı üzerinde oturması prensibini kullanır. Sonrasında modeller arasında hesap tekniği açısından bazı farklılaşmalar görülebilir. Sistem genellikle yarı sonsuz ortam davranışına denk olan yay ve sönüm elemanları ile temsil edilir. Bu analiz tekniğinin gelişimine Velestos-Wei'nin büyük katkıları olmuştur [3].

b) Sonlu eleman yöntemi çözümleri : Yapı-zemin etkileşim sistemi çözümünde dinamik sonlu eleman metodu kullanılır. Çözümde zemin ortamı sonlu eleman ağı ile modellenip, ana kayaya uygulanan ivme kaydı için ortak sistem çözülerek istenen değerler elde edilir.

Her iki yönteminde kendine has uygulamaya yönelik üstünlük ve sakıncaları vardır. Ayrıca son yıllarda geliştirilmiş olan sınır eleman yönteminin kullanıldığı çözümler de mevcuttur. Hangi yöntemle çözüm yapılırsa yapılsın, problemle ilgili karakteristiklerinin belirlenmesindeki güçlükler problemi karmaşık hale getirmektedir. Çok gelişmiş analiz teknikleri kullanılsa bile sonuçların gerçek durum ile birleştirilip değerlendirilmesi gerekecektir.

2. YARI SONSUZ ELASTİK ORTAM ÇÖZÜMLERİ

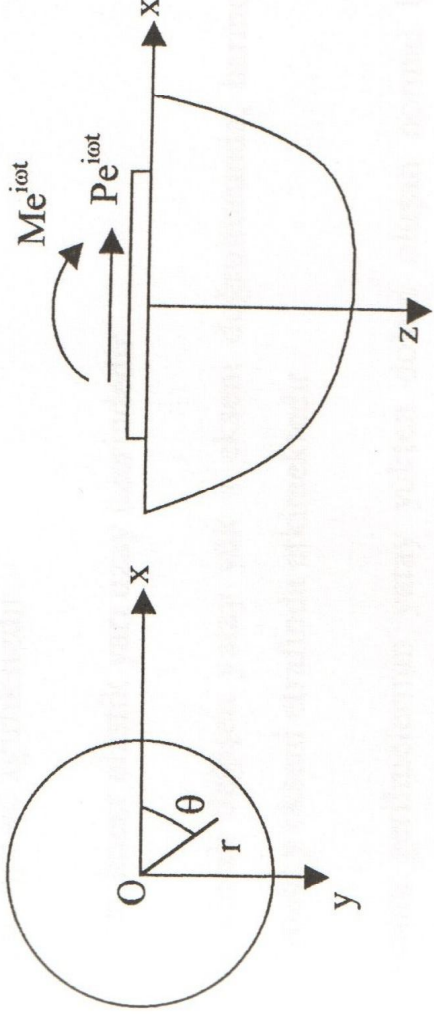
2.1 Giriş

Herhangi bir yer hareketi için, yumuşak zemin tabakası üzerine oturan yapının davranışı ile aynı yapının rijit zemin üzerindeki davranışının birbirinden farklı olduğu genel olarak bilinen bir durumdur. Depreme karşı dayanıklı yapı tasarımı hesaplarında yapının altındaki zeminin rijit ve yer hareketi ivme kaydının da serbest alandaki değerle aynı olduğu kabul edilir. Eğer yapıya mesnetlik eden zemin ortamı kaya tabakasından oluşuyorsa, yapılan varsayım doğrudur. Ancak yapı yumuşak zemine oturuyor ise, yapı temelinin hareketi serbest alan hareketinden farklı olacak ve yatay harekete ek olarak yapının davranışında önemli etkisi olan dönme bileşeni ortaya çıkacaktır. Özellikle yüksek binalarda dönme bileşeni etkisi önemli olmaktadır. Yumuşak zemine mesnetli yapıların davranışındaki farkın çeşitli sebepleri vardır [4].

- a) Elastik mesnetli yapılar, ankastre mesnetli yapılara göre daha fazla serbestlik derecesine sahiptir. Dolayısıyla dinamik özellikleri tamamen farklıdır.
- b) Elastik mesnetli yapılarda, titreşim enerjisinin önemli kısmı radyasyon dalgaları ve zeminin malzeme sönümü ile sönümlenir.

Yapı-zemin dinamik etkileşimi konusu başlığında yapının ve zeminin dinamik yük altında birbirlerinin hareketine etkileri incelenmektedir. Bu konuda kullanılan hesap yöntemlerinden birisi de yarı sonsuz elastik ortam çözümleridir. Yarı sonsuz ortam çözümlerinde hesabın çeşitli aşamalarındaki bazı farklarla birbirinden ayrılan yöntemler kullanılmaktadır. Tüm hesap yöntemlerinin esasında yapının altındaki zeminin etkisini hesaplarda göz önüne almak için zemini temsil edecek yay ve sönüm elemanı kullanmak vardır.

Elastik mesnetli yapıların dinamik analizinde önemli bir adım, yarı sonsuz elastik uzay üzerindeki rijit, kütsüz plağın davranışının hesaplanmasıdır. Özel olarak harmonik yükleme için yatay bir kuvvet ve plak düzlemine dik bir moment dikkate alınması problemin yapı-zemin etkileşimi çözümlerinde kullanılması için önemli olmuştur. Problemden plak, tekil temeli ya da yapının temelinin tümünü, yükler de taban kesme kuvveti ve devrilme momentini temsil etmektedir. Bu plak ve yükler Şekil 2.1’de gösterilmiştir. $Me^{i\omega t}$ ve $Pe^{i\omega t}$ harmonik dış yüklerdir.



Şekil 2.1: Yarı sonsuz elastik uzayda dairesel plak ve harmonik yükler

Kütsüz, rijit, dairesel plağın davranışı belirlenirse, kütsüz olan plağın veya plağın üzerindeki lineer yapıların davranışı da standart yöntemlerle bulunabilir. Reisner’in elastik zemine oturan rijit, dairesel plağın harmonik davranışıyla ilgili 1936’daki çalışmasından itibaren konu pek çok başka araştırmacı tarafından ele alınmıştır. Bu çalışmalarda elastik zemine oturan rijit dairesel plağın davranışı yatay yük ve devrilme momentini de içeren çeşitli, yükleme durumları için incelenmiştir. Araştırmalarda birinci yol olarak, plak ile zemin arasındaki temas zemin gerilmelerinin dağılımdan plağın davranışı hesaplanmış, ikinci yol olarak ta sistem karışık sınır değer problemi olarak ele alınmıştır.

Konu üzerindeki çalışmalar ilerledikçe, ilgili yükleme doğrultusundaki yer değiştirmeler, yatay yük nedeniyle oluşan dönme, moment nedeniyle oluşan yatay yer değiştirme ve temas zemin gerilmeleri hesaplanmıştır. Bu çözümlerden yararlanarak, eşdeğer yay ve sönüm elemanlı sisteme ait değerleri hesaplamak mümkün olmuştur. Burada kısaca sözü edilen çalışmalar arasında en çok bilinen ve çeşitli yöntemlerde kullanılanı Veletos ve Wei’nin 1971 yılında yayınlamış oldukları yay ve sönüm sabiti değerlerinin hesaplanmasına yönelik çalışmalarıdır [3].

2.2 Zemin Ortamının Modellenmesi

Zemini çözümde yay ve sönüm sabitleri serisi şeklinde modellemek mümkündür. Bu konuda Velestos ve Wei'nin 1971 yılında yapmış oldukları çalışmadan yararlanılmaktadır [3]. Zemin özelliklerini yay ve sönüm sabiti ile temsil eden analize empedans analizi, yay ve sönüm değerlerine de empedans fonksiyonları denilmektedir. İlgili değerler belirlenirken bazı kabuller yapılmıştır;

- a) Plak kütesiz, rijit ve ağırlıksızdır.
- b) Plak homojen, lineer elastik yarı uzay üzerindedir.
- c) Harmonik olarak değişen yatay yük x eksenini doğrultusunda, harmonik olarak değişen moment y eksenini etrafında etkimektedir.
- d) Temas zemin gerilmelerinin yatay yükten dolayı oluşan normal bileşeni ile momentten dolayı oluşan yatay bileşeni ihmal edilmiştir.

Hareket denklemleri oluşturulurken devrilme momentinin etkisi ikinci türden Fredholm integrali ile tanımlanmıştır. Yatay kuvvetin etkisi de benzer şekilde iki integral sistemiyle tanımlanmıştır. İntegral denklemleri sayısal olarak lineer denklemlere çevrilerek Simpson kuralı ile çözülmüştür. Dönme ve yatay yer değiştirmeler arasındaki etkileşim için Betti karşılıklı kuralı uygulanmıştır. Sonuçta sistemin yer değiştirmeleri ile yükler arasındaki ilişki birim kuvvet matrisi kullanılarak (2.1) denkleminde ifade edilmiştir.

$$\begin{bmatrix} u \\ \phi \end{bmatrix} \begin{bmatrix} r_o \\ r_o \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} f_{11} + ig_{11} & f_{12} + ig_{12} \\ f_{21} + ig_{21} & f_{22} + ig_{22} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} u_{st} \\ \phi_{st} \end{bmatrix} \quad (2.1)$$

Burada f ve g 'ler boyutsuz birim kuvvet katsayılarını, u_{st} statik yatay P kuvveti nedeniyle oluşan yatay yer değiştirmeyi, ϕ_{st} statik M momenti nedeniyle oluşan dönmeyi, $i=\sqrt{-1}$ sayısını göstermektedir.

$$u_u = \frac{2-\nu}{8Gr_o} P = \frac{P}{K_x} \quad (2.2)$$

$$\phi_u = \frac{3(1-\nu)}{8Gr_o^3} M = \frac{M}{K_\phi} \quad (2.3)$$

(2.2) ve (2.3) denklemleriyle u_{st} , ϕ_{st} ifade edilmiştir. Burada v ve G elastik ortamın Poisson oranı ile kayma modülünü, r_0 plağın yarıçapını göstermektedir. f ve g katsayıları v ve a_0 boyutsuz frekans parametresinin fonksiyonudur.

$$a_0 = \frac{\omega r_0}{V_s} \quad (2.4)$$

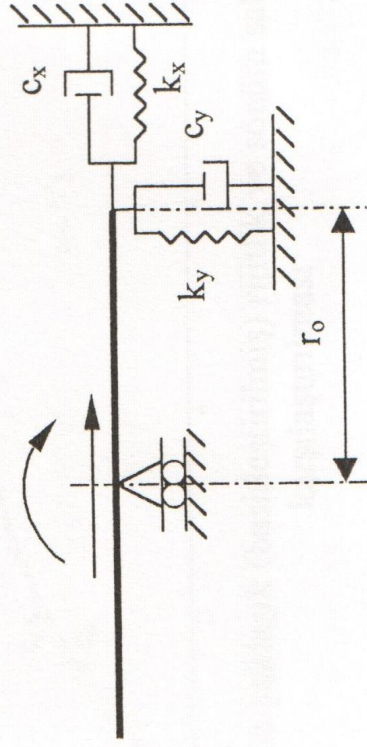
(2.4) denkleminde ω frekansı, V_s yarı sonsuz uzayda kayma dalgası yayılma hızını göstermektedir. Elde edilen bu değerleri kullanarak P ve M kuvvetleri için rijitlik ve sönüm değerlerine geçebiliriz.

$$\begin{bmatrix} P \\ M \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} (k_{11} + ia_0 c_{11})K_x & (k_{21} + ia_0 c_{21})K_x r_0 \\ (k_{21} + ia_0 c_{21})K_x r_0 & (k_{22} + ia_0 c_{22})K_\phi r_0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} u \\ \phi \end{bmatrix} \quad (2.5)$$

(2.5) denkleminde k ve c 'ler a_0 ve v 'ye bağlı boyutsuz katsayıları, $K_x = P/u_{st}$ ve $K_\phi = M/\phi_{st}$ 'yi göstermektedir. (2.5) denklemindeki katsayıların gerçel kısımları lineer yay katsayılarını, sanal kısımları da sönüm sabiti değerlerini göstermektedir. Bu gösterimle yay elemanları mesnetlik yapan zeminin mesnet tepkilerini ve atalet kuvvetlerini, sönüm elemanları ise radyasyonla yayılan sönümü temsil etmektedir. Burada belirtilen katsayıların değişkenlere bağlı sayısal değerleri mevcut yaynlarda bulunabilir [3].

$$\begin{bmatrix} P \\ M \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} (k_1 + ia_0 c_1)K_x & 0 \\ 0 & (k_2 + ia_0 c_2)K_\phi \end{bmatrix} \begin{bmatrix} u \\ \phi \end{bmatrix} \quad (2.6)$$

(2.5) denkleminde rijitlik ve sönümle ilgili matriste diyagonal dışındaki terimler, diyagonal üzerindeki terimlere göre ihmal edilebilecek mertebededir. Bu yapılırsa (2.6) denklemindeki basitleştirilmiş rijitlik ve sönüm değerlerine ulaşılır.



Şekil 2.2 : Basitleştirilmiş kuvvet-yer değiştirme için model

Şekil 2.2'de gösterilen sistem için yay ve sönüm sabiti değerlerini basitleştirilmiş rijitlik ve sönüm değerleri kullanılarak yazılırsa;

$$k_x = k_1 K_x \quad (2.7)$$

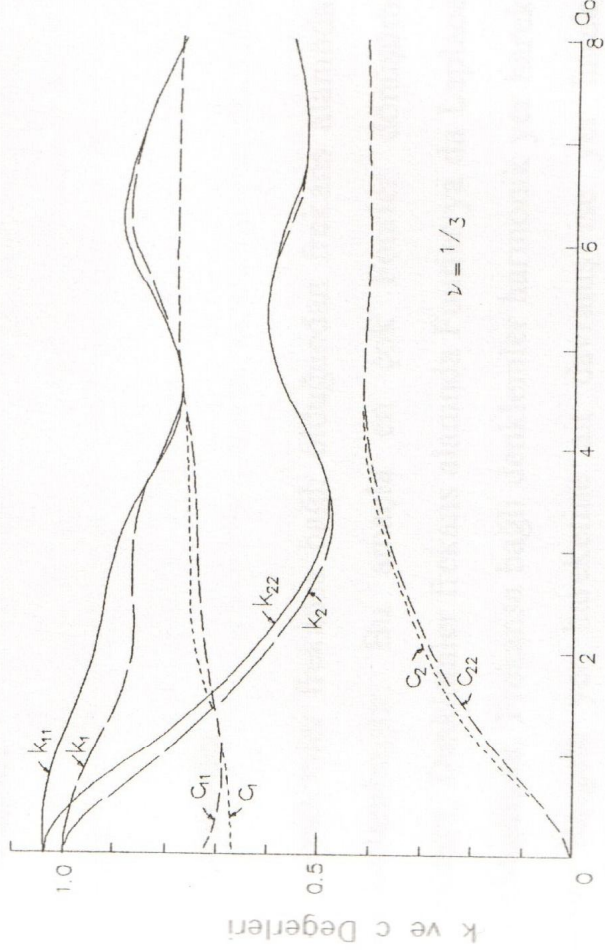
$$k_y = \frac{1}{r_o^2} k_2 K_\phi = \frac{2-\nu}{3(1-\nu)} k_2 K_x \quad (2.8)$$

$$c_x = \frac{a c_1}{\omega} K_x = c_1 \frac{K_{x0}}{V_s} \quad (2.9)$$

$$c_y = \frac{2-\nu}{3(1-\nu)} \frac{a c_2}{\omega} K_x = \frac{2-\nu}{3(1-\nu)} c_2 \frac{K_{x0}}{V_s} \quad (2.10)$$

Basitleştirilmiş değerleri kullanmanın hesaplarda kolaylık sağlayacağı gözükmemektedir. Bu bağıntılarda geçen k_1 , k_2 , c_1 , c_2 katsayılarının gerçek değeri ile olan yakınlığı Şekil 2.3'te gösterilmiştir. Aynı zamanda bu şekildeki $\nu=1/3$ ve a_0 için ilgili katsayıların değerleri de verilmiş olmaktadır.

Bu kısımda zeminin yay ve sönüm elemanlarıyla modellenmesi hakkında özet bilgi verilmiştir. Elde edilen sistemin çözülmesi ve gerekli büyüklüklerin belirlenmesi için kullanılacak hesap yöntemi de problemde önemli bir konudur.



Şekil 2.3 : Gerçek ve yaklaşık (basitleştirilmiş) rijitlik ve sönüm sabiti katsayılarının karşılaştırılması

2.3 Sistemin Çözümü

Yapı-zemin dinamik etkileşimi çözümlerinde üst yapı ve zemini içeren uygun modeli oluşturduktan sonra, sistemde dış yük olan deprem ivme kaydı için sistemin çözülmesi ve iç kuvvetler, yer değiştirmeler gibi mühendislikte kullanılan büyüklüklerin belirlenmesi gereklidir. Sistemin doğru olarak çözülmesi de en az modeli oluşturmak kadar güçtür.

Çeşitli yayınlarda yay ve sönüm sabitlerinin daha kolay kullanımına ilişkin tablo ve grafiklere rastlanmaktadır [4,5]. Ayrıca zeminin viskoelastik davranışı halini çeşitli yollarla dikkate alan bazı yöntemler de mevcuttur. Zeminin viskoelastik davranışı ile elastik davranışı arasındaki en belirgin fark artan sönüm oranı olarak görülmektedir

Sözö edilen yay ve sönüm sabiti katsayıları daha önce açıklandığı gibi dış yükün frekansına bağlı olarak bulunabilmektedir. Hesaplardaki asıl güçlüğü yaratan kısım da burasıdır. Bu yüzden elde edilen hareket denklemlerini yapı-zemin etkileşimi analizinde çözmek biraz karmaşık olan hesap yöntemleri gerektirir. Başlıca çözüm yöntemlerini sayacak olursak;

a) Fourier dönüşümü tekniği

b) Integral yaklaşımı

c) Modal analiz

d) Yaklaşık yöntemler

Elde edilen denklemler frekansa bağlı olduğundan frekans alanında çözüm yapan yöntemler kullanılmıştır. Bu amaçla en çok Fourier dönüşümü tekniği ile karşılaşılmaktadır. Denklemler frekans alanında Fourier ya da Laplace dönüşümü ile yeniden yazılmaktadır. Frekansa bağlı denklemler harmonik yer hareketinin frekansı için çözülür. Rasgele yer hareketine ait davranış ise yer hareketinin Fourier açılımıyla elde edilir. Çeşitli frekanslar için yapı ve zemin davranışları, frekans çözümlerinin zaman alanına çevrilmesiyle belirlenir. Uygulamada işlemler ayrık Fourier dönüşümü tekniğini kullanan hızlı Fourier dönüşümü algoritması ile yapılır. Çözümün elde edilmesi için çok sayıda frekans için çözümleme yapılması gereklidir. Buda çok serbestlik dereceli sistemlerde büyük bir işlem hacmi demektir.

İntegral yaklaşımında ise, sonuçlar zaman alanında elde edilir. Çözüm için zeminin impulsif yüklemedeki davranışının bilinmesi gereklidir. Daha sonraki fonksiyonlar impulsif yüklerden oluşan yer değiştirmeler ya da impulsif yer değiştirme için gereken kuvvetler olarak belirlenir. İmpulsif kuvvetler sadece lineer elastik zemin için belirlenmiş durumdadır. Bu çözüm yöntemi de büyük işlem hacmi gerektirmektedir.

Çözümlerin frekansa bağlı olması zemini temsil eden yay ve sönüm sabitlerinin yaklaşık olarak ama frekansa bağlı olmayan katsayılarla temsili arayışına ve yapı mühendisliğinde kullanılan standart işlemlerin uygulanmasına yöneltmiştir. Böyle bir yaklaşım çok katlı yapıların analizi için uygun sonuçlar verebilirken, örneğin betonarme ağırlık barajı gibi diğer yapılar için uygun olmayabilir. Zemin özellikleri frekanstan bağımsız katsayılar olarak seçilse bile, yapının ve zeminin sönüm değerleri nedeniyle klasik normal modlar kullanılamaz. Modların süperpozisyonu ve Ritz metodunu kullanarak çözümlene yapan hesap tarzı hakkında yayınlarda bilgiler mevcuttur [6].

Yaklaşık çözümler ise, hesaplarda belirli aşamalarda yapılan yorumlar sonucunda ulaşılmış bazı bilgilerden derlenen bağıntıların yardımıyla hesapları basitleştirici yaklaşımlardan oluşmaktadır. Yada hesap yöntemlerinin daha işlevsel kullanımını sağlamak amacıyla önerilen bazı düşünceler olarak ifade edilmiştir.

Konuyla ilgili pek çok yöntem ve yöntemlerin ayrıntılarını çeşitli yayınlarda bulmak mümkündür [4-8]. Yapı-zemin etkileşimi analizinde kullanılan ana çözüm yöntemlerinden birisi olan yarı sonsuz elastik ortam çözümleri hakkında açıklayıcı bilgiler sunulmuştur. Bu yöntemin kullanılmasıdaki en önemli eleştiri hesaplarda yapının davranışına zeminin etkisini alırken, zeminin davranışına yapının etkisini aynı anda almaması ve hesaplara zemindeki malzeme sönümünü etkisini yansıtamamasıdır. Yarı sonsuz elastik ortam çözümlerinin ve Bölüm 3'te açıklanmış olan sonlu eleman yöntemi çözümlerinin, üstün ve zayıf yanları ileride ayrıntılarıyla Bölüm 4'te ele alınmıştır.

3. SONLU ELEMAN YÖNTEMİ ÇÖZÜMLERİ

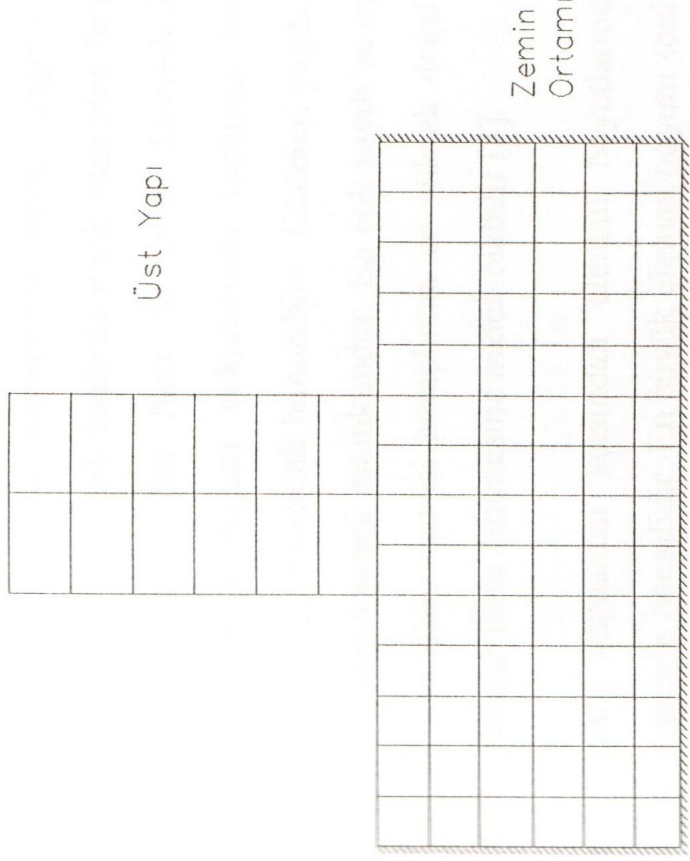
3.1 Giriş

Bu bölümde dinamik sonlu eleman metodunun yapı-zemin etkileşimi çözümünde kullanımına değinilmiştir. Dinamik sonlu eleman metodu üç ana kısma ayrılabilir;

- a) Geometrinin, malzemelerin ve yüklerin idealleştirilmesi,
- b) Rijitlik, kütle ve sönüm matrislerinin oluşturulması,
- c) Hareket denklemlerinin çözülmesi.

Yapının ve temelinin idealleştirilip, matematik modelinin kurulması problemdeki en zor aşamalardan biridir. Deprem hareketinin tahmini, zemin durumunun yeterli düzeyde yansıtılması, maliyet, uygun bilgisayar programı kullanımı, yapının modellenmesindeki zorluklar gibi pek çok faktörün göz önünde bulundurulacak olması ve bu aşamada yapılacak her kabulün sonuçları etkileyecek olması, iyi bir mühendislik yargısına sahip olunmasını gerekli kılar. Dinamik sonlu eleman modelinin oluşturulmasında her konudaki detayları mikro-idealleştirme ve modelin genel özelliklerini de makro-idealleştirme adlı iki konu altında toplayabiliriz. Şekil 3.1'de gösterilen 2 boyutlu, düzlem şekil değiştirme sonlu eleman modeli genel durumu temsil etmektedir.

Yer hareketinin, sonlu eleman modelinin altındaki sonsuz rijit ana kayada zaman alanında tanımlı ivme kaydı ve düşeyde hareket eden kayma dalgaları olacağı düşünülmektedir. İdealleştirme gerçekleştirilince rijitlik ve kütle matrislerinin oluşturulması kullanılan bilgisayar programının yaptığı işlemdir. Sönüm matrisinin oluşturulması, malzeme özellikleri ve kullanılan hesap metodu açısından üzerinde düşünülmesi gereken daha kritik bir konudur.



Şekil 3.1 : Yapı-zemin sisteminin sonlu eleman modeli

Elde edilen hareket denklemlerinin çözümü kendine has özellikleri olan pek çok metot kullanılarak yapılabilir.

3.2 Mikro-İdealleştirme

Mikro-idealleştirme, herhangi bir elemanın özel olarak ele alındığı geometrisinin, ortamdaki davranışının vb. konuların incelendiği tasarım aşamasıdır. Denge koşulları, fizik ve kinematik kurallar göz önünde tutulur [8].

Kinematik açıdan temel kabul, yer değiştirmelerin düğüm noktalarının yer değiştirmeleri ile tanımlandığıdır. Bu tüm sonlu eleman metotlarında geçerli bir kabuldür. Eleman içindeki yer değiştirmeler ise her elemanda tanımlanan enterpolasyon fonksiyonları kullanılarak elde edilir.

Fiziksel açıdan temel kabul, tüm gerilme şekil değiştirme bağıntılarının lineer olduğudur. Lineer olmayan malzeme davranışı için lineerleştirme tekniği kullanılarak, küçük zaman ya da yük aralıklarında lineerleştirme yapılarak, bu kabul uygulanır. Hooke yasası geçerlidir. Ayrıca gelişen bilgisayar programlarıyla farklı eleman davranışlarını, lineerleştirme yapmadan da kullanmak mümkündür. Kuvvetli deprem hareketinde zeminde lineer olmayan önemli etkiler oluşmaktadır. Bu etkileri dikkate alan metotlar kullanmak uygun olacaktır.

statik kabul olarak ta elemanlar arasında, kuvvetlerin sadece düğüm noktaları aracılığıyla aktarıldığı kabulü vardır. Dinamik analizde statik analizden farklı olarak atalet kuvvetleri de oluşur. Hem kütleler hem de atalet kuvvetleri düğüm noktalarında toplanmıştır. Elemanın düğüm noktalarında toplanan kütleler de enterpolasyon fonksiyonlarından yararlanılarak bulunabilir. Kütleleri yayılı, ayrı ve karışık kütle matrisi olarak hesaba katmak mümkün değildir. En çok yayılı ve ayrı kütle matrisleri kullanılır. Kullanılan kütle matrisi hesaplanan en yüksek doğal frekansı etkileyerek sonucun fazla yada az ifade edilmesine neden olabilir [8].

Maliyet, zaman ve program kapasitesi açısından eleman boyutlarının uygun seçilmesi hesapların hassaslığı için önemlidir. En büyük eleman boyutu sonlu eleman modelinde doğru olarak iletilmesi istenen hareketin en yüksek frekansına bağlıdır. Harmonik kayma dalgası hareketinde, elemanın maksimum boyutu dalga hareketinin dalga boyundan daha küçük olmalıdır. Lysmer'in önerisi olarak, h eleman boyutu ve λ_s dalga boyu olmak üzere,

$$h \leq \frac{1}{8} \lambda_s, \text{ ayrı kütle matrisi}$$

$$h \leq \frac{1}{8} \lambda_s, \text{ yayılı kütle matrisi}$$

$$h \leq \frac{1}{5} \lambda_s, \text{ karışık kütle matrisi}$$

değerlerinin kullanılması uygun olmaktadır [8]. Elemandaki sönüm değeri daha detaylı olarak ileride ele alınmıştır.

3.3 Makro-İdealleştirme

Makro-idealleştirme hesap modelinin genel konfigasyonunun tasarım aşamasıdır. Modelin genel boyutları, sınır koşulları, yapının modellenmesi vb. konularda verilen kararlarla model tamamlanır.

Zemin ağının sınırlarının belirlenmesi en önemli konulardan birisidir. Zemin ağını program kapasitesi nedeniyle istediğimiz kadar büyük alamayız. Dolayısıyla zeminin kesilip sınır oluşturulması hesaplarda bir miktar hataya sebep olabilir. Sınırdaki hareketin serbest alan hareketine benzemesi kuralı ile ağ sınırı bulunabilir. Sınırın verinin belirlenmesi ise en düşük frekansla ilgilidir [8]. Sınırın yeri için bir önemli

göstermektedir. Kullanılan programın hangi durumlarda daha iyi çözüm verebileceğini bilmek ve uygulamak gerçekçi olacaktır.

a) Modal analiz : Hareket denkleminin çözümünde uygulanan klasik metottur. Hesapların başında sönüm etkisinin var olmadığı sönümsüz serbest titreşim hali için özdeğer problemi çözülür. Bu durumda ω doğal frekansları ve $\{\phi\}$ mod şekillerini göstermek üzere (3.2) bağıntısı elde edilir [8].

$$([K] - \omega^2 [M]) \{\phi\} = \{0\} \quad (3.2)$$

Denklem (3.2)'de $[K] - \omega^2 [M]$ ifadesine frekans matrisi denilir. (3.2) denkleminin çözümü, frekans matrisinin determinantını sıfır yapan özdeğer probleminin çözülmesidir. Çözümle, n yer değiştirme vektörü $\{u\}$ 'nun boyutu olmak üzere, doğal frekanslar $\omega_1 < \omega_2 < \dots < \omega_n$ ve mod şekilleri $\{\phi\}_s$ $s = 1, \dots, n$, elde edilir. Ayrık denklemler elde etmek için (3.3) bağıntısıyla verilen değişken dönüşümü uygulanmalıdır [8].

$$\{u\} = [\phi] \{q\} \quad (3.3)$$

Denklem (3.3)'te $[\phi]$ mod şekillerini içeren $n \times n$ boyutunda modal matrisi, $\{q\}$ modal yer değiştirmeleri göstermektedir. Bu aşamada modların dikliğini kullanarak hareket denklemini yeniden yazılırsa n adet ayrık denklem elde edilir.

$$q_s + \omega_s^2 q_s = g_s(t) \quad s = 1, \dots, n \quad (3.4)$$

$$u_s(t) = \frac{\sum_{i=1}^n \phi_{is} \cdot m_i}{\sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n \phi_{is} \cdot m_{ij} \cdot \phi_{js}} \cdot \ddot{y}(t) \quad (3.5)$$

Denklem (3.4) ve (3.5)'te $q_s(t) = \{q\}$ 'nun s'inci bileşeni,

$m_i = \{m\}$ 'in i'inci elemanı,

$m_{ij} = [M]$ 'in (i,j) elemanını,

(3.5) denkleminin payı geliştirilmiş zorlama fonksiyonunu, paydası geliştirilmiş kütle göstermektedir. Bu aşamadan sonra modal analize sönüm oranı β_s eklenerek sönümlü sistem denklemi (3.6) bağıntısıyla ifade edilir.

$$\ddot{q}_s + 2\beta_s \omega_s \dot{q}_s + \omega_s^2 q_s = g_s(t) \quad s = 1, \dots, n \quad (3.6)$$

Denklemler modal yer değiştirmeler için çözülüp, lineer dönüşümle gerçek yer değiştirmeler elde edilerek analiz için istenen diğer değerler bulunur. β_s kullanılarak yapılan modal analiz, sistemin bazı elemanlarındaki malzeme sönümü ile doğrudan ilgili değildir. Bununla beraber, farklı modlar için farklı sönüm değerleri tanımlamak mümkündür.

Modal analizin klasik dinamik analiz problemlerindeki başarısı, yapıdaki iç kuvvet ve deplasmanlar için tüm mod şekillerinin belirlenmesinin gerekmemesidir. Böylece hesap süresi ve işlem hacmi kısalmaktadır. Ancak yapı-zemin etkileşimi problemi tasarım için ivme davranış spektrumu ve çok sayıda mod şekli gerektirmektedir.

b) Doğrudan integrasyon : Doğrudan integrasyon yöntemleri adım adım integrasyon olarak ta bilinir. Hareket denklemi verilen başlangıç koşullarından itibaren artan zaman aralıkları için adım adım integre edilerek, hareketin başından sonuna kadar tüm anlardaki değerlerin bulunması esasına dayanır. Analizdeki formülasyon farklılıkları metotlara adını vermiştir. Newmark metodu, lineer ivme metodu, kübik ivme metodu vb. en çok bilinen metotlardır.

Hesaplarda hassaslık açısından zaman aralıkları çok küçük alınmalıdır. Bu da yüksek bir işlem sayısı demektir. Sönüm matrisinin nasıl temsil edilmesi gerektiği de önemli bir problem teşkil etmektedir.

c) Karmaşık davranış analizi : Fourier analizinin geliştirilmiş şeklidir. Hareket denklemini frekans alanında çözer. Hızlı Fourier dönüşümü kullanarak frekans alanında çözümlenen değerleri, ters Fourier dönüşümüyle zaman alanına getirilmesi esasına dayanır [8].

Az bilinen bu metodu kısaca tanıtmak için, tek serbestlik dereceli viskoz sönümlü bir sistemin eşdeğer karmaşık davranış analizini harmonik dış yük için ifade edecek olursak, Q_0 dış yükün büyüklüğü ve ω yükün frekansını göstermek üzere, (3.8)

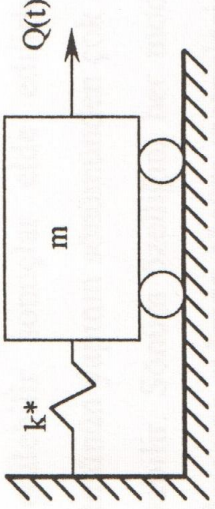
denklemleriyle tanımlanan hareket denklemi elde edilir. Hareket denkleminin kararlı titreşimleri için çözümü olarak $u(t)=U_0 e^{i\omega t}$ 'yi yerine yazarsak (3.9) denkleminde belirtilen çözüme ulaşılır [9].

$$Q(t) = Q_0 e^{i\omega t} \quad (3.7)$$

$$m\ddot{u} + c\dot{u} + ku = Q_0 e^{i\omega t} \quad (3.8)$$

$$u(t) = \frac{Q_0}{k - m\omega^2 + ic\omega} e^{i\omega t} \quad (3.9)$$

İkinci çözüm olarak, Şekil 3.2'de gösterilen sönüm sabiti olmayan ancak karmaşık rijitliğe sahip olan $k^*=k_1+ik_2$ yayı olması durumunda çözüm yapılır ve (3.10) ile ifade edilen hareket denkleminde tekrar $u(t)=U_0 e^{i\omega t}$ kullanılırsa, (3.11) denklemleriyle gösterilen çözüme ulaşılır.



Şekil 3.2 : Karmaşık rijitlikli tek serbestlik dereceli sistem

$$m\ddot{u} + k^* u = Q_0 e^{i\omega t} \quad (3.10)$$

$$u(t) = \frac{Q_0}{k^* - m\omega^2} e^{i\omega t} \quad (3.11)$$

İki çözümün kıyaslamasından $k^*=k+ic\omega$ elde edilir. k^* uygun biçimde seçilirse sonuçlar aynı olur ancak aralarında faz açısı vardır. Karmaşık rijitlik aşağıdaki biçimde tanımlanır.

$$k^* = k(1 - 2\xi^2 + 2i\xi\sqrt{1 - \xi^2}) \quad (3.12)$$

$\xi < 1$ ve genellikle küçük olduğundan ξ^2 li terim ihmal edilip $k^*=k(1+2i\xi)$ olarak ifade edilir. Karmaşık rijitlik kullanılarak elde edilen çözüm sonucu faz açısı kadar farklıdır. Özet olarak, viskoz sönümlü bir sistem karmaşık rijitlik kullanılarak

sönümsüz sistem haline getirilir. Ancak bu durum harmonik yükleme için geçerlidir. Yani yük ya periyodiktir yada harmonik seriler toplamıdır ve bu şekilde hesaplar kısılmaktadır. Tek serbestlikli sistemde tanıtılan metoden yapı-zemin etkileşimi probleminde kullanımında bilgisayar programı kullanılması kaçınılmaz olmakta ve karmaşık eleman matrislerinden yararlanılmaktadır. Matrisler karmaşık modül dışında gerçel değerli matrisler gibi hesaplanır [8].

3.8 Sistemde Sönüm Değeri

Yapı-zemin etkileşiminde sönüm değerinin hesaplara doğru olarak yansıtılması önemli bir konu olup, analizi yapılacak malzeme özellikleriyle doğrudan ilgilidir. Yapı sistemlerinin çözümünde enerji sönümü çeşitli metotlarla dikkate alınmaktadır.

Klasik metot olan modal analizde viskoz sönüm özellikleri analizde her mod için kritik sönüm yüzdesi olarak hesaba katılmaktadır. Yani sönüm herhangi bir elemanın özelliği olarak ele alınmamakta, genel sistem sönümü kullanılmaktadır. Üst yapı analizleri için kabul edilebilir sonuçlar elde edilirken, yapı-zemin etkileşimi analizinde zeminin sönümünün yapının sönümünden çok daha fazla olması sebebiyle bu durum uygun olmayabilir. Sönüm özelliğini her modda farklı olarak düşünmek tatminkar bir seçenek olmasına rağmen sönüm matrislerinin kullanılması gerekliliğini ve peşinden de bu matrislerin nasıl oluşturulacağı sorusunu getirir [8].

Yapı mühendisliğinde, viskoz, hıza bağlı sönüme sahip gerçek yapılar görmek çok zordur. Az sayıdaki sınırlı elemanda gerçek viskoz sönüm değerleri ölçülebilmektedir. Pek çok durumda yapıdaki bilinmeyen lineer olmayan enerji kaybını yaklaşık olarak temsil etmesi için modal sönüm oranı kullanılmaktadır. Yapının deprem analizinde her mod için %5 sönüm oranı kullanılmakta ve bu durum için az sayıda pratik ve teorik geçerlilik bulunmaktadır [10].

Modal sönüm kullanmak çok serbestlik dereceli sistemlerin analizinde taban kesme kuvvetinin hesabında farklılık oluşturmaktadır [10]. Temelde kolonların kesme kuvvetlerinin toplamından bulunan taban kesme kuvveti ile kütlelere ilgili doğrultudaki depremde etkileyen mutlak ivmelere bulunan atalet kuvvetlerinin toplamından elde edilen taban kesme kuvveti birbirinden farklıdır. Aynı çözümde iki farklı değer bulunmuş olur. Bu farklılığın nedeni modal sönümle gerçekte var

olmayan sönüm kuvvetlerinin yapıya uygulanmış olmasıdır ki bu da fiziksel olarak imkansızdır. Gerçekte yapıdaki noktalarda atalet ve sönüm kuvvetleri aynı anda etkir. Modal sönümün sonuçlardaki bu farklılığı iki düğüm noktası arasında enerji yutan eleman kullanmakla aşılabılır.

Sönüm için bir temsil biçimi de, kütle ve rijitlik matrisleriyle orantılı olan Rayleigh sönümü kullanmaktır. (3.13) bağıntısıyla ifade edilen Rayleigh sönümü ifadesinde, a ve b katsayıları sönüm değerini kontrol eden katsayılardır. Sönüm frekansa bağlıdır. Denklem (3.14) sönüm β ile frekans ω arasındaki ilişkiyi göstermektedir.

$$[C] = a[M] + b[K] \quad (3.13)$$

$$\beta = \frac{1}{2} \left(\frac{a}{\omega} + b\omega \right) \quad (3.14)$$

Denklem (3.14)'te $a = \beta_0 \omega_0$ ve $b = \beta_0 / \omega_0$ olarak ifade edilip, ω_0 yapı-zemin sisteminin doğal frekansını, β_0 da bu frekanstaki sönüm değerini göstermektedir. Sonuçta denklem (3.15) yazılır.

$$\beta = \frac{1}{2} \left(\frac{\omega}{\omega_0} + \frac{\omega_0}{\omega} \right) \beta_0 \quad (3.15)$$

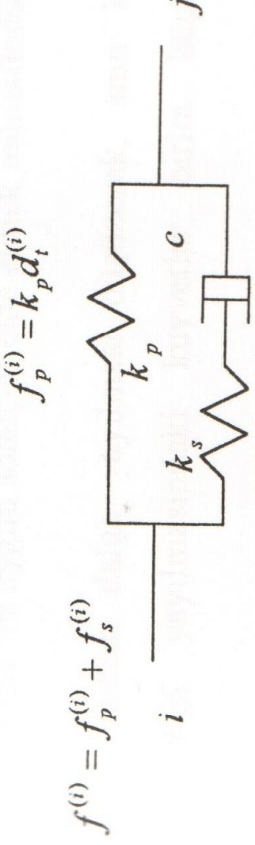
Denklem (3.15)'ten görülen, β 'nın sistemin doğal frekansı için maksimum olacağıdır. Yapı-zemin etkileşimi modellerinde derin zemin tabakasının varlığı sebebiyle ortak frekans üst yapı çözümlerindeki frekanslardan çok daha düşüktür. Dolayısıyla yüksek frekanslar için yüksek sönümler elde edilir. Bu yüzden Rayleigh sönümü kullanırken denklem (3.14)'teki frekans sınırlarına dikkat edilmelidir.

Karmaşık davranış analizi metodunda sönüm karmaşık eleman rijitlik matrisinden elde edilir. Karmaşık modül kullanılarak etkili sönüm oranını frekanstan bağımsız elde etmekte mümkündür. Zemin davranışını iyi olarak temsil eden bir metottur.

Son yıllarda yapısal analize enerji yutan elemanlar eklenebilmesi sönüm hakkında daha detaylı algoritmalar, nümerik çözümler, farklı türde lineer olmayan enerji yutan eleman tipleri geliştirilmesi sağlamıştır [10]. Yapıdaki enerji kaybı yer değiştirmenin büyüklüğüne bağlı lineer olmayan bir fonksiyondur. Bununla beraber uygulamada bu davranış eşdeğer lineer sönüm kullanılarak temsil edilebilir.

3.5.1 Viskoz Sönüm Elemanı

Küçük yer değiştirmeye maruz bazı malzemelerde lineer yani hızla bağlı enerji kayıpları görülmektedir. Viskoz lineer olmayan eleman özellikleri basit lineer viskoz kuvvetlerle analiz edilmektedir [10]. Bu sönüm kuvvetleri hızın kuvveti ile orantılıdır. Bu kısımda sönüm kuvvetleri için sönüm elemanı davranışı sembolize eden bir iterasyon sunulmuştur. Şekil 3.3'te i, j düğüm noktaları arasındaki sönüm elemanı ve etkiyen kuvvetler gösterilmiştir.



$$f_s^{(i)} = k_s (d_t^{(i)} - e_t^{(i)}) = \text{sign}(\dot{e}_t^{(i)}) \dot{e}_t^{(i)^N} c$$

Şekil 3.3 : i ve j düğümleri arasında genel sönüm elemanı

Her adımda elemandaki dengeyi sağlamak için sönüm kutusu üzerinde toplam deplasmanlar, $e_t^{(i)}$ hassasça hesaplanmalıdır. Deformasyonları tahmin etmek için sonlu farklar metodu kullanılır. Bunun ifadesi denklem (3.16)'tür.

$$e_t^{(i)} = e_{t-\Delta t} + \int_{t-\Delta t}^t \dot{e}_\tau d\tau = e_{t-\Delta t} + \frac{\Delta t}{2} (\dot{e}_{t-\Delta t} + \dot{e}_t^{(i)}) \quad (3.16)$$

Lineer olmayan viskoz eleman kuvvetleri için iterasyon algoritması ise;

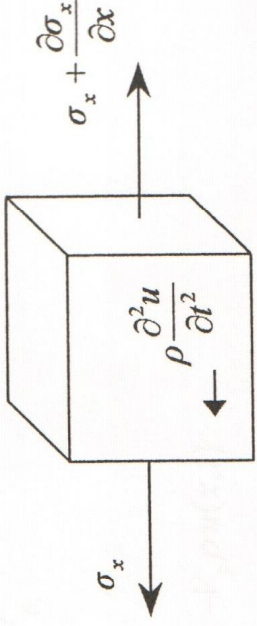
- 1.) Son iterasyondan sönüm kuvvetleri tahmin edilir: $f_c^{(i)} = k_s (d_t^{(i)} - e_t^{(i-1)})$
- 2.) Sönüm hızı tahmin edilir: $\dot{e}_t^{(i)} = \left(\frac{f_c^{(i)}}{c}\right)^{\frac{1}{N}} \text{sign}(f_c^{(i)})$
- 3.) Sönüm deformasyonları tahmin edilir: $e_t^{(i)} = e_{t-\Delta t} + \frac{1}{2\Delta t} (\dot{e}_{t-\Delta t} + \dot{e}_t^{(i)})$
- 4.) İterasyon adımıdaki kuvvetler belirlenir: $f_t^{(i)} = k_p d_t^{(i)} + k_s (d_t^{(i)} - e_t^{(i)})$

Eğer viskoz sönüm kullanarak, yapıda sonlu sayıda enerji yutan eleman kullanmak mümkündür. Deneyisel olarak belirlenen eleman özellikleri bu sayede hesap modelinde doğrudan kullanılabilir. SAP2000 programı lineer olmayan çözüm kısmında bu elemanı kullanmaktadır.

3.5.2 Yaklaşık Radyasyon Sınır Koşulu

Eğer temel hacmi büyük ve modal sönüm yüksekse, ankastre sınır koşulu ile yakınsak sonuçlar elde edilebilir. Bununla beraber, enerji yutan sınırlar kullanarak temel hacmini küçültmek ve uygun sonuçlar elde etmek mümkündür [10].

X doğrultusunda düzlem dalg yayılması düşünerek, sınır koşulu özellikleri hesaplanabilir. Dalg yayılmasındaki kuvvetler birim küpte Şekil 3.4'te gösterilmiştir.



Şekil 3.4 : Birim küpe etkiyen kuvvetler

X doğrultusundaki denge denkleminde;

$$\rho \frac{\partial^2 u}{\partial t^2} - \frac{\partial \sigma_x}{\partial x} = 0 \quad (3.17)$$

Denklem (3.17)'yi $\sigma_x = \lambda \varepsilon_x = \lambda \frac{\partial u}{\partial x}$ bağıntısını kullanarak yeniden düzenlersek, klasik dalg yayılması formuna ulaşırız.

$$\frac{\partial^2 u}{\partial t^2} - V_p^2 \frac{\partial^2 u}{\partial x^2} = 0 \quad (3.18)$$

$$V_p = \sqrt{\frac{\lambda}{\rho}} \quad (3.19)$$

$$\lambda = \frac{1-\nu}{(1+\nu)(1-2\nu)} E \quad (3.20)$$

Burada V_p malzemenin dalga yayılma hızı, ρ birim hacim kütlesi, λ Lamé sabitini göstermektedir. Pozitif x doğrultusunda denklem (3.18)'in çözümünün yer değiştirme formu;

$$u(t, x) = U \left[\sin\left(\omega t - \frac{\omega x}{V_p}\right) + \cos\left(\omega t - \frac{\omega x}{V_p}\right) \right] \quad (3.21)$$

Çözüm denklemde yerine yazılarak kontrol edilebilir. ω harmonik hareketin frekansıdır. Herhangi bir x noktasındaki parçacığın hızı;

$$\dot{u}(t, x) = U\omega \left[\cos\left(\omega t - \frac{\omega x}{V_p}\right) - \sin\left(\omega t - \frac{\omega x}{V_p}\right) \right] \quad (3.22)$$

X doğrultusundaki şekil değiştirme ise;

$$\epsilon(x, t) = \frac{\partial u}{\partial x} = -\frac{\dot{u}(x, t)}{V_p} \quad (3.23)$$

İlgili gerilme de ;

$$\sigma(x, t) = \lambda \epsilon(x, t) = -V_p \rho \dot{u}(x, t) \quad (3.24)$$

Basınç gerilmeleri, sınır üzerindeki birim alanda $V_p \rho$ sabit sönüm değerine sahip viskoz sönüm elemanındaki kuvvetle aynıdır. Bu sayede sınırlarda dalganın yansımadan geçmesini ve şekil değiştirme enerjisinin temelden uzağa yayılmasını sağlayan eleman kullanılabilir [10].

Gösterilebilir ki, eğer sönüm değeri birim alanda $V_p \rho$ olarak verilmişse kayma dalgası sınır koşulu, serbest sınıra paraleldir [10]. Kayma dalgası hızı ise, G kayma modülü olmak üzere denklem (3.25)'te gösterilmiştir.

$$V_s = \sqrt{\frac{G}{\rho}} \quad (3.25)$$

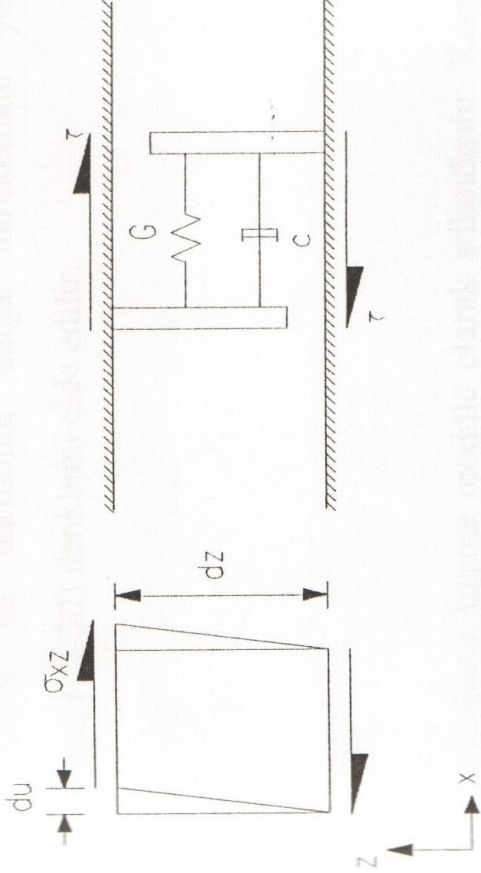
Burada açıklanan koşullarla çözüm yapan bilgisayar programlarından birisi SAP2000 programıdır. Zaman alanında çözüm için bu tarzda sınır koşulları kullanılır. Sadece basınç dalgaları varsa sıvı sınır koşulu da kullanılabilir.

3.5.3 Zemin Ortamında Sönüm

Zemin barındırdığı belirsizlikler nedeniyle hesaplara birebir yansıtılması mümkün olmayan malzemedir. Sönüm malzeme özellikleri ile doğrudan ilgili olduğundan, zemin konusunda tanımlanan sönüm de belirsizlik içerir. Zeminin özelliği nedeniyle karşılaşılan başlıca sönüm tipi olarak malzeme sönümü ve radyasyon sönümü sayılır.

a) Malzeme sönümü : Homojen, lineer elastik ortamda dalga hareketi genliğinde değişime olmaksızın hareketini sürdürür. Ancak gerçek malzemede bu durum oluşmaz. Zemin içinde dalganın genliği mesafeyle beraber kısalmır [9]. Hareket eden dalganın elastik enerjisinin bir kısmı ısıya dönüşür. Enerjideki azalma hareketin genliğinin azalması olarak gözlenir. Lineer olmayan bir davranış gösteren zeminde malzemenin yapısından kaynaklanan sönüm yüksektir. Analizde zemini viskoelastik bir malzeme olarak dikkate alan modeller de kullanılmaktadır. Sık karşılaşılan Kelvin-Voigt modelinden özet şeklinde kısaca bahsedilmiştir.

Enerjideki azalmayı viskoz sönümle ifade edip, viskoelastik dalga yayılmasını Kelvin-Voigt cismiyle yani kayma deformasyonuna elastik ve viskoz kısım karşı koyan cisim olarak modellenebilir. Şekil 3.5 Kelvin-Voigt cismi gösterilmiştir.



Şekil 3.5 : Kayma etkisindeki Kelvin-Voigt cismi

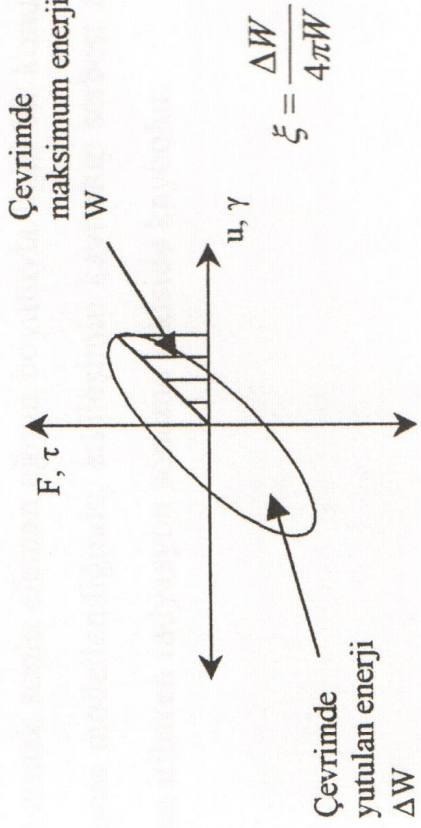
$$\tau = G\gamma + c \frac{\partial \gamma}{\partial t} \quad (3.26)$$

γ kayma gerilmesini, γ kayma şekil değişimini, G kayma modülünü, c viskoz sönümü sabitini göstermektedir. Harmonik kayma şekil değişimi için γ ve τ, denklem (3.27) ve (3.28)'de gösterilmiştir.

$$\gamma = \gamma_0 \sin \omega t \quad (3.27)$$

$$\tau = G\gamma_0 \sin \omega t + \omega c\gamma_0 \cos \omega t \quad (3.28)$$

Kelvin-Voigt cismi için gerilme şekil değiştirme çevrimi eliptiktir. Şekil 3.6’te bu duruma ait diyagram gösterilmiştir. Bir çevrimde kaybolan enerji $\Delta W = \pi c \omega \gamma_0^2$ ’dir. Buradan yutulan enerjinin frekansla orantılı olduğu görülür, gerçekte zeminde taneler arasındaki sürtünme etkisinin neden olduğu histeritik sönüm de vardır.



Şekil 3.6 : Histerisis halkası ve sönüm oranı ilişkisi

$W = G\gamma_0^2/2$ için $\xi = c\omega/(2G)$ elde edilir. Kelvin-Voigt cismi düşey SH dalgası için hareket denklemi yazılır ve harmonik dalga hareketinde yer değiştirme, $u(z,t) = U(z)e^{i\omega t}$ kullanılırsa (3.30) denklemi elde edilir.

$$\rho \frac{\partial^2 u}{\partial t^2} = G \frac{\partial^2 u}{\partial z^2} + c \frac{\partial^3 u}{\partial z^2 \partial t} \quad (3.29)$$

$$(G + i\omega c) \frac{\partial^2 u}{\partial z^2} = -\rho \omega^2 U \quad (3.30)$$

Burada $G^* = G + i\omega c$ karmaşık kayma modülü olarak adlandırılır. Karmaşık davranış analizinde ki gibi istenirse karmaşık kayma modülünün frekansa bağımlılığı kaldırılıp, $G^* = G + 2i\xi$ biçimine ulaşılır. Hareket denkleminin çözümü de sınır koşullarına bağlı olarak elde edilir [9].

Burada modelin özellikleri hakkında bir miktar bilgi verilmiştir. Bu ve modelin daha geliştirilmiş özelliklerini kendi hesap modeline uygulayıp çözümleme yapan metotlar mevcuttur. Zemin için geliştirilmiş daha farklı modeller de kullanılmaktadır.

b) Radyasyon sönümü : Malzeme sönümü dalga hareketi enerjisinin bir kısmını ısıya çevirir. Buna ek olarak bir kaynaktan yayılan enerji daha geniş bir hacime geçince dalga hareketinin genliğinde azalma olur. Daha geniş bir ortama yayılmanın sebep olduğu sönüme radyasyon sönümü denir. Radyasyon sönümü geometrik sönüm olarak ta bilinir ve karışık bir dalga yapısı formuna sahiptir. Temellerin titreşiminde önemli olmaktadır. Temel çevresinde radyasyon sönümü malzeme sönümünden önemli olabilir.

Yapı temelleri ve zemin arasındaki etkileşimde, radyasyon sönümünü hesaplara doğru olarak yansıtmak sonlu eleman ağının boyutuyla ilgili bir konudur. Zemindeki mevcut tabakalaşma modellendiğinde, etkileşimin kaybolup serbest alan değerlerine geçildiği noktadan itibaren radyasyon sönümü etkisinde kaybolur.

4. YÖNTEMLERİN ÜSTÜNLÜK VE SAKINICALARI

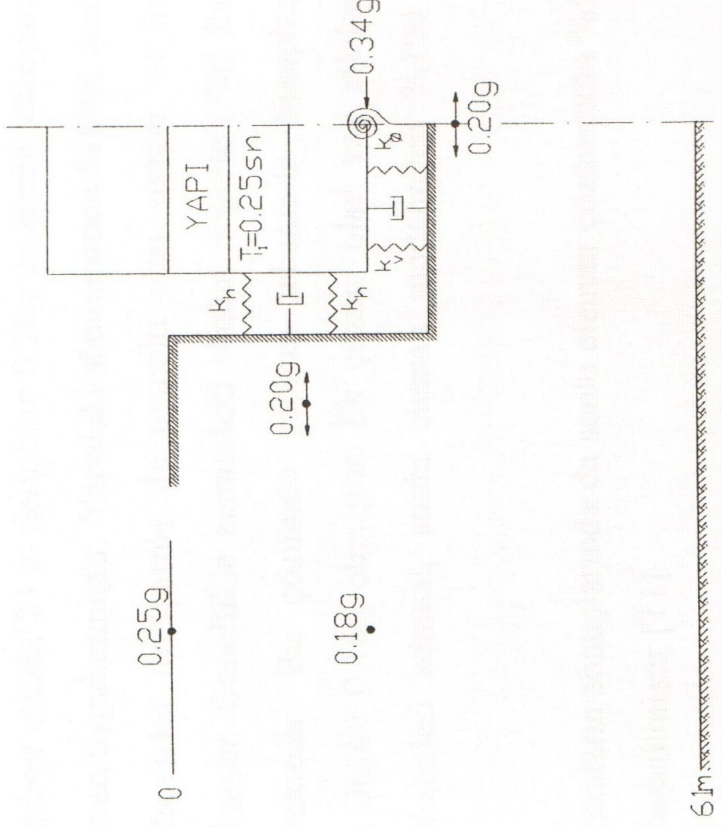
4.1 Giriş

Önceki bölümlerde açıklanmış olan hesap yöntemlerinin kullanımında görülen üstün ve zayıf yanlar bu bölümde ele alınmıştır. Yayınlarda zemin ortamını dikkate alan, yapıların depreme dayanıklı tasarımı ile ilgili çalışmalarla artan sıklıkla karşılaşlmaktadır. Bu duruma daha çok nükleer santrallerin, çok katlı binaların, kulelerin ve barajların boyutlandırılmasında rastlanmaktadır. Tipik bir örnek Şekil 4.1 ve Şekil 4.2’de gösterilmiştir. Bu örnekte yapı yüksekliği 37 m, doğal titreşim periyodu 0.25 sn olup, yapı temeli zemin yüzeyinden 23 m derinde gömüldür [11].

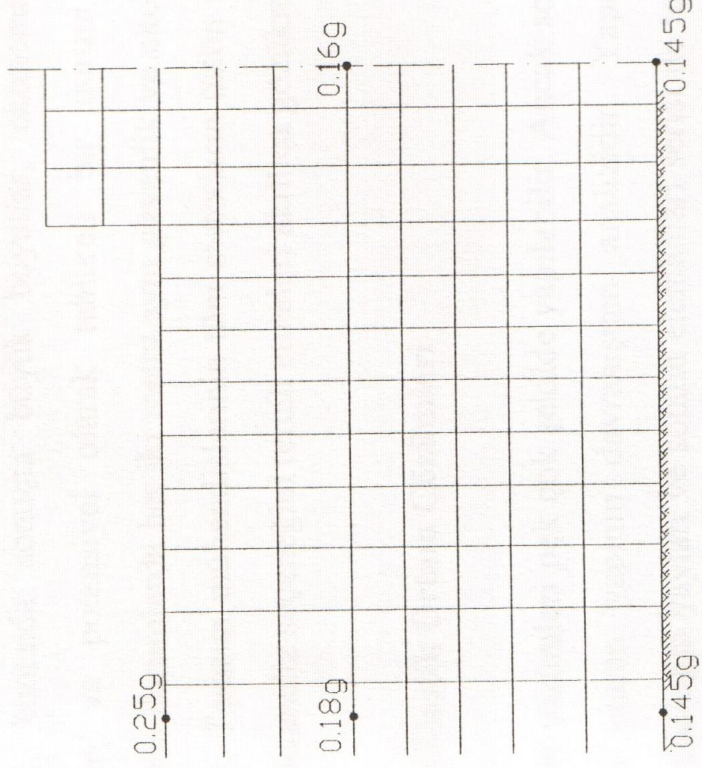
Böyle bir yapının depreme dayanıklı olarak dizaynında önemli bir konu, yapı ile çevresindeki zemin arasındaki dinamik etkileşimin belirlenebilmesidir. Yapılan çözüm genellikle aşağıda tanımlanan iki yoldan birisini kullanarak gerçekleştirilmektedir.

- a) Zemini, yapının çevresini saran yarı sonsuz ortamı temsil eden yay ve sönüm elemanlarıyla modelleyip, yapının davranışında zemini dikkate almak (Şekil 4.1)
- b) Yapı-zemin sistemini sonlu eleman yöntemi ile modellemek (Şekil 4.2)

Her iki metodun da avantajlı ve sınırlayıcı yönleri bulunmaktadır. Bazen birbirinden belirgin fakları olan sonuçlar elde edilmektedir. Şekil 4.1’de gösterilen yapıda zemin yüzeyindeki maksimum ivme değeri 0.25g olan yatay deprem hareketi ele alınmıştır. Zemin yumuşak kaya formasyonuna oturan, kayma dalgası hızı 550 m/sn olan 61 m derinlikli kum ve çakıl tabakasından oluşmaktadır. Eğer rölatif olarak kalın olan bu zemin tabakasındaki yüzey hareketlerinin yatay kayma dalgalarından oluştuğu düşünülürse, problem maksimum ivmenin ve zeminde diğer derinliklerdeki hareketlerin belirlenmesidir. Bu örnekte 23 m derinlikteki maksimum ivme 0.18g ve tabandaki kayada maksimum ivme 0.145g olan bir ivme kaydı uygulanmıştır [11].



Şekil 4.1 : Yapı-zemin sisteminin yarı sonsuz ortam modeli



Şekil 4.2 : Yapı-zemin sisteminin sonlu eleman modeli

Şekil 4.1’de verilen yay-sönüm elemanlı modelde yüzeyden 23 m derinde yapının altında, zemindeki maksimum ivme değeri 0.20g olarak alınmıştır. Analizde yay katsayıları literatürdeki metotlar ile belirlenip, sistem sönüm oranı %7 ve %15 olarak seçilmiştir. Hesaplamalar sonucundaki maksimum ivme değerleri sırasıyla 0.38g ve 0.32g’dir [11].

Aynı yapının davranışı ile ilgili diğer analiz ise Şekil 4.2’de gösterilen sonlu eleman modeli ile yapılmıştır. Bu durumda sisteme daha önce kullanılan maksimum ivme

değeri 0.145g , serbest alanda 23 m derinlikte 0.18g ve zemin yüzeyinde 0.25g olan taban kayası hareketi uygulanmıştır. Yapıdaki sönüm oranı %5'tir. Ancak zemindeki farklı elemanlarda, şekil değiştirme ile uyumlu olan sönüm ve kayma modülü değerleri kullanılmıştır. Genellikle zemindeki sönüm değerleri %5 ila %15 arsında değişim göstermektedir. Bu çözümde yapının tabanında hesaplanan hareketin maksimum ivme değeri 0.16g olmuştur. İlk çözüm olan yay etkileşim yada yarı sonsuz ortam çözümleri sonucu, sonlu eleman modelinden %100 büyük değer vermiştir [11].

Diğer bazı araştırmaların sonuçlarında da sonlu eleman çözümünün %50 daha büyük değerler verdiği belirtilmiştir [11].

Tasarım amaçlı çalışmalarda her iki metot ta uygulanmaktadır. Analiz sonuçlarının seçilen metoda bağlı olarak değişeceği, yapısal davranışın fazla yada az olarak hesaplanabileceği, bunda sonuçta büyük boyutlar, ekonomik olarak uygun olmayan sonuçlar ve potansiyel olarak tehlikeli bir durum oluşturabileceği görülmektedir. Bazı durumlarda her iki metot aynı güvenlik ve ekonomi derecesinde sonuçlar verebilir. Tasarım mühendislerinin tüm metotların üstün ve zayıf yanlarını bilmeleri ve uygun analiz seçeneğini tercih etmeleri akılcıca görülmektedir.

4.2 Yarı Sonsuz Elastik Ortam Çözümleri

Yarı sonsuz ortam çözümleri pek çok şekilde yapılabilir. Ancak sonuçta yarı sonsuz uzayın yüzeyine oturan yapının davranışının analizidir. Yapının çevresindeki zeminin etkisini etkileşim yayları ve sönüm elemanları serisi ile temsil etmek en sık rastlanan yoldur (Şekil 4.1). Yarı sonsuz elastik ortam çözümünde yapının altındaki zemin kaldırılıp yerine davranışını temsil eden yay ve sönüm katsayısı değerleri konulur. Farklı zemin koşulları için ilgili katsayı ve değerler aynı tarzda belirlenebilir. İstenen değerler daha önce Bölüm 2'de değinildiği gibi hazırlanmış tablolar aracılığı ile literatürdeki çalışmalarda mevcuttur [3]. Sönüm değerleri de benzer şekilde bulunabilir, pratik uygulamalarda değerler %7 - %10 arasındadır.

Yay ve sönüm sabitleri belirlenince, yay-sönüm elemanlı sisteminin çevresindeki zeminde gelişen belirli bir hareket için dinamik analiz uygulanır. Biraz daha karışık olan diğer çözümleme biçimi, yay ve sönüm elemanı değerlerini empedans

fonksiyonları ile ifade etmektedir. Bu metodun avantajlı tarafı yapıdan uzakta serbest alanda kontrol hareketi belirlenebilmesi ve yapı çevresindeki zemin hareketlerindeki değişimin dikkate alınabilmesidir.

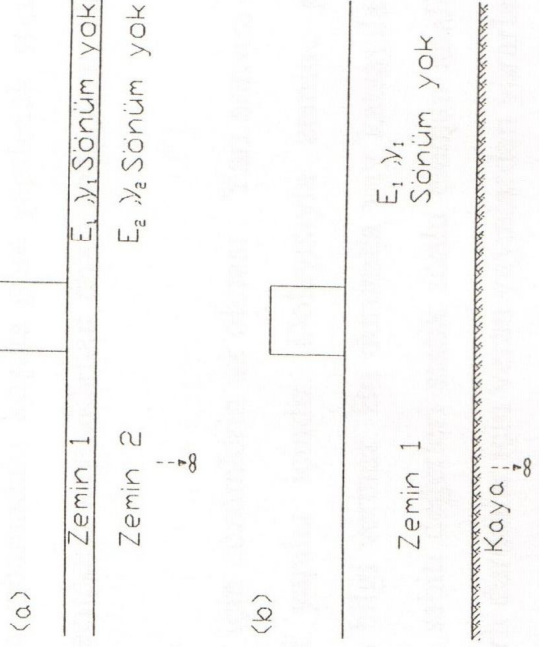
Yarı sonsuz ortam çözümünde dizayn mühendisinin farkında olması gereken kabuller ve bazı kısıtlamalar vardır. Bunlardan başlıcalarını sayarsak;

a) Analiz malzeme sönümü içermez : Dinamik davranış analizlerinde, hareket sırasındaki enerji kaybı, analiz amacı için sistemde sönüm olarak ifade edilir. Yapı-zemin etkileşim çözümünde enerji hem yapısal sönüm olarak yapıda hem de malzeme sönümü olarak zeminde kayba uğrar. Ayrıca yapı tabanından çevredeki zemin ortamına geçen radyasyon dalgaları olarak ta bir enerji kaybı vardır. Bu durum radyasyon sönümü yada uzaysal sönüm olarak adlandırılır. Temellerin titreşim probleminde ki önemi deprem davranış analizine oranla çok daha fazladır.

Yarı sonsuz elastik ortam teorisi ile yapılan analizlerin genelinde yapı rijit ve zemin ortamının malzeme sönümü içermediği kabul edilir. Bundan dolayı mevcut analitik çözümlerde zeminin malzeme sönümü içermediği kabul edilmiştir. Aslında zemindeki malzeme sönümü çok yüksek değerde olup, yapı-zemin etkileşimde oldukça önemli bir faktör ihmal edilmiştir. Bu eksikliği yenmek için analizde sönüm değeri belirlenirken malzeme sönümünü de içerecek bir kabul yapmak uygundur.

b) Çok tabakalı zemin için analizin zorluğu : Yarı sonsuz ortam çözümleri bir yada iki tabakalı zeminler için uygulanmakta ve iki tabakalı analiz çözümü oldukça zahmetli olmaktadır. Çözümler alttaki tabaka sonsuz derinlikte olan iki tabakalı (Şekil 4.3a) veya kaya üzerinde bir tabakalı sistem (Şekil 4.3b) halleri içindir. Bunlar uygulamada pek sık karşılaşılan durumlar değildir.

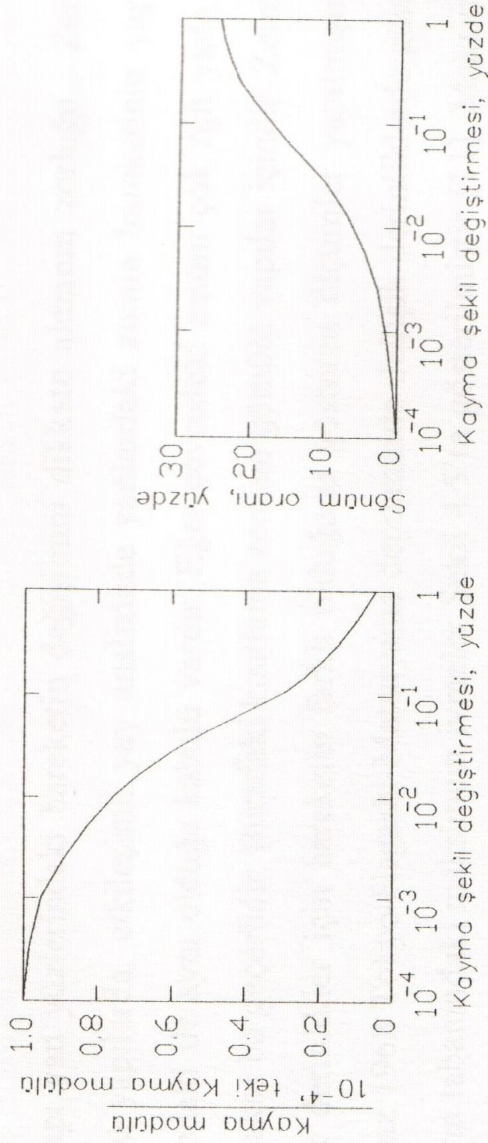
Genellikle arazide zemin, ana kayanın üstünde farklı türden çok sayıda tabaka halindedir. Bu durumda yapılacak kabul, Şekil 4.3a için radyasyon sönümünün, alttaki tabaka varlığının tabana enerji dağılmasını önlemesinden dolayı fazla miktarda hesaplara girmesine, Şekil 4.3b'de de tek zemin tabakasıyla gerçek durumun fazla basitleştirilip radyasyon sönümünü yeterli ifade edilememesine neden olabilir. Bir yada iki tabakalı sistemin sınırlaması herhangi bir tasarım durumunda radyasyon sönümünün ifadesindeki belirsizliktir.



Şekil 4.3 : Bir ve iki tabakalı zemin hali

c) Ortak sönüm etkisinin ifadesindeki zorluklar : Radyasyon sönümünün etkisi hassas olarak, malzeme sönümünün etkisi ise hiç hesaba katılmadığından, bu iki faktörün etkisi dizayn amacı için tahmin edilmelidir. Belirsizlikler düşünülerek sistem sönümünde güvenli yönde kalacak tahmin yapılır.

d) Zemin kayma modülü ve yay katsayısını belirlemedeki zorluklar : Yay katsayısı için uygun değerler belirlemek yerine, yapıya yakın kısımlardaki zeminin deformasyon modülünün bilinmesi daha önemlidir. Kayma modülü zemindeki şekil değiştirmelere bağlıdır [8,11]. Kum için Şekil 4.4'te gösterilmiştir.



Şekil 4.4 : Kumlarda kayma şekil değiştirmesinin, kayma modülü ve sönüm oranına etkisi

Yarı sonsuz ortam çözümleri zemindeki şekil değiştirmelerle ilgili bilgi vermez, bu nedenle uygun kayma modülü seçilemez. Analizde ya lineer elastik zemin kabulü ya da depremden serbest alanda oluşan şekil değiştirmeler için kayma modülü seçilebilir. Zemine gömülü yapıların yay katsayıları içinde yüzeye yakın koşula göre

ya da derin temelin tabanındaki koşula göre yapılacak seçim sonuçları etkililer. Bu durumda yapılan seçimden kaynaklanan farklı sonuçların elde edileceği görülen bir gerçektir.

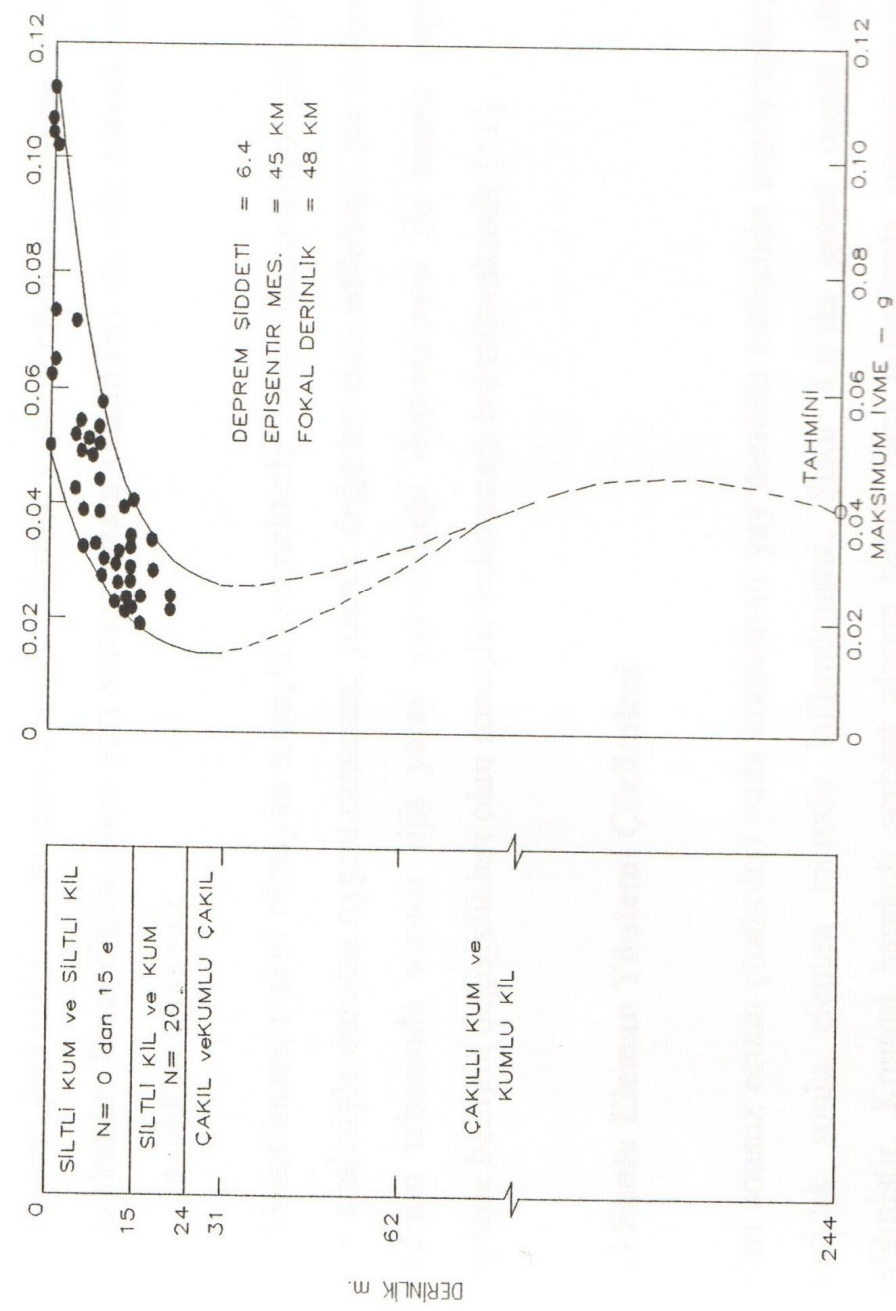
e) Gömülü yapılar için çözümlerin az olması : Yanı sonsuz ortam çözümleri sadece zemin yüzeyindeki yapılar içindir. Dolayısıyla zemine gömülü yapılarla ilgili katsayılar hakkında bilgi vermez. Bu durumda yay katsayıları statik sonlu elemanla bulunurken, sönüm sabiti değerleri statik sonlu eleman analizi ile bulunamaz. İlgili katsayıları bazı sınırlı durumlar için veren yayınlardan yararlanmak gerekir [11].

f) Taban hareketinin belirlenmesi : Yapı-zemin etkileşiminin anlamı, zeminin varlığının yapının hareketlerini ve buna karşılık yapının varlığının zeminin hareketlerini etkilemesidir. Yapının tabanındaki yer hareketi ile serbest alanda aynı seviyedeki yer hareketi birbirinden farklıdır. Aynı seviye için elde edilecek davranış spektrumları, etkileşim etkilerinin var olup olmamasına göre değişim gösterir.

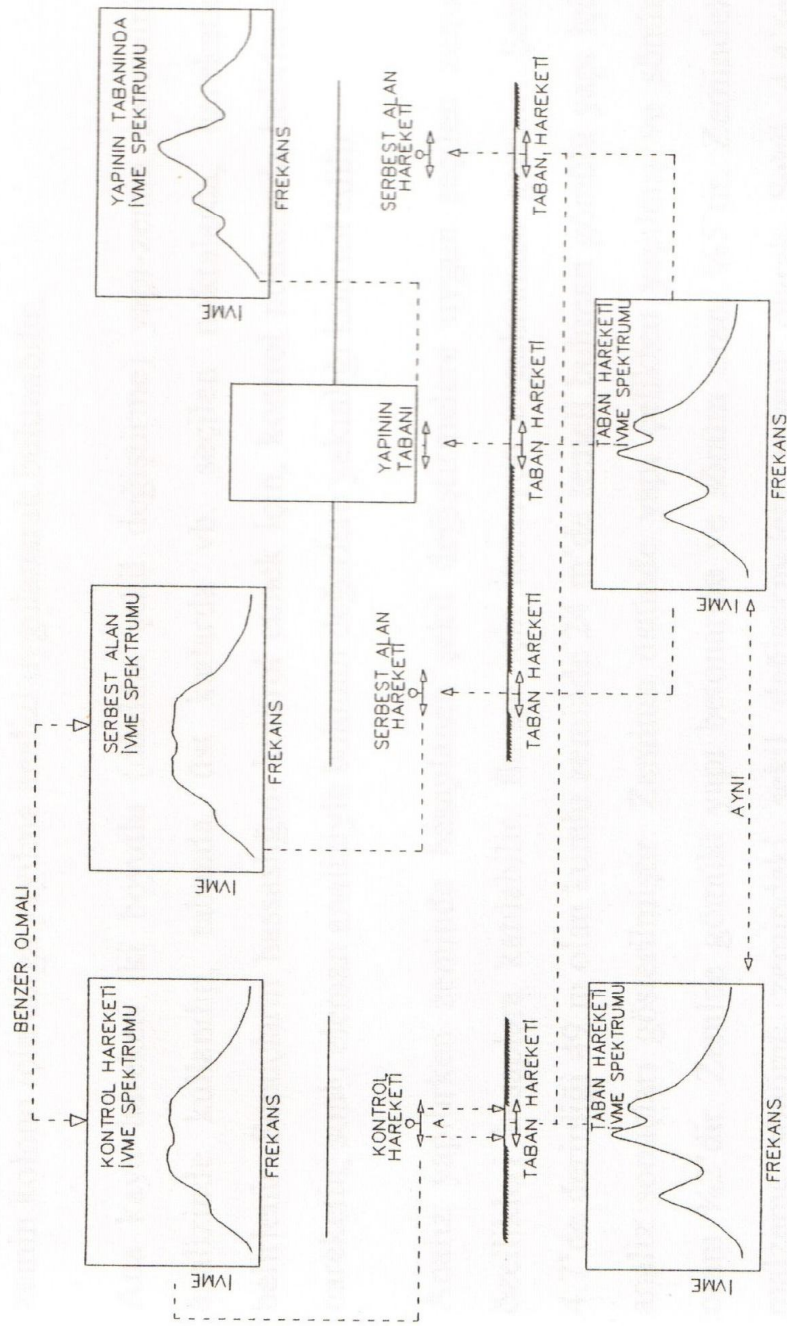
Empedans fonksiyonları yaklaşımı ile yapının varlığının, yapı tabanındaki hareketin gelişimine etkisi belirlenebilir. Etkileşimli yay analizi genellikle yapı tabanındaki hareketin serbest alandaki hareketle aynı olması varsayımına dayanır. Böylece yapı-zemin etkileşimi yapının hareketini etkilerken aynı zamanda zeminin hareketini etkilemiyor sonucu çıkar. Bu da tutarlı bir durum değildir.

g) Yapı yan yüzlerindeki hareketin değişimini dikkate almanın zorluğu : Zemine gömülü yapılarda, etkileşimli yay analizinde yanlardaki zemin hareketinin yapının tabanındaki ile aynı olduğu kabulü vardır. Eğer çevredeki zemin çok rijit yada çok yumuşaksa bu geçerlidir. Buradaki kısıtlama zemine gömülü yapılar içindir. Zeminde değişik derinlikler için hareketin farklı olduğunu gösteren ölçümler yapılmıştır. 1 Temmuz 1968 Tokyo-Hagashi-Matsuyama depreminde değişik derinliklerde gömülü yapıların tabanındaki maksimum ivmeler Şekil 4.5'te gösterilmiştir [11]. Maksimum ivme yüzeye yakın yerlerde gözlenmiş olup, 24 m derindeki ivmenin dört katına yakındır.

Eğer yan yüzler için ivme dağılımında zemin rijit ama yapıdaki etkileşim etkileri için deforme olabilir kabul edilirse, pek tutarlı bir yaklaşım yapılmış olmaz. Bu kabul yapılmış olsa zaten zeminin rijit varsayılmasıyla, yapıdaki ivmenin zemindekine eşit olacağı ve yapı-zemin etkileşimi analizine gerek kalmayacağı açıktır.



Şekil 4.5 : Tokyo-Higashi-Matsuyama 1968 depreminde kayıt edilen maksimum ivmenin yapı derinliğince değişimi



a) ZEMİN MODELİ

b) YAPI-ZEMİN SİSTEMİNİN SONLU ELEMAN MODELİ

Şekil 4.6 : Sonlu eleman metodunu kullanarak yapı-zemin etkileşim analizi

h) Komşu yapı etkisini katmanın zorluğu : Komşu yapının etkileşime katkısı olacağı muhakkaktır. Buna dikkat eden yarı sonsuz ortam çözümleri ile etki karışık hesap tarzı ile dikkate alınabilir.

ı) Metot bazen makul olmayan sonuçlar vermektedir : Bazı durumlarda etkileşimli yay analiziyle duruma uygun olmayan, yüksek değerler elde edilebilir. Bu durumda yapının tabanında sonsuz rijit yatay yay olduğu düşünülmesi ile bazen yapısal tepkide belirgin değişiklikleri olan sonuçlar bulunacağı belirtilmektedir [11].

4.3 Sonlu Eleman Yöntemi Çözümleri

Yarı sonsuz ortam çözümleri yada etkileşimli yay metodu analizinin sınırlamalarına karşılık sonlu eleman metodu kullanılmıştır. Şekil 4.6'da genel metot ifade edilmiştir. Kontrol hareketi serbest alanda belirli bazı noktalarda tanımlanmıştır. (Şekil 4.6'da A noktası gibi) Analizde kontrol noktasında belirli hareket üretmek yerine kaya formasyonunda gelişecek hareketi tanımlamak gerekir. Bunu çeşitli yollarla çözmek mümkündür. SHAKE adlı bilgisayar programı ile serbest alanda zemin kolonu için dalga yayılma analizi uygulanarak bulunabilir.

Ana kaya hareketi iki boyutlu (düzlem şekil değiştirme) yapı-zemin sisteminin analizinde kullanılıp, tabanda, üst katlarda vb. seçilen noktalarda, hareketler belirlenir. Sonuçların hassaslığını kontrol etmek için, kontrol noktasında belirlenen hareketin, sonlu eleman analiziyle bulunan değerlere yakınlığı kontrol edilir.

Analiz yapılırken zeminde hesaplanan şekil değiştirmelere uygun seçilen zemin özellikleri hesaplara katılabilir. Bunun için iterasyon uygulanması gerekir. Şekil 4.7'de derinliği 49 m olan kumlu zeminde 24 m'de temeli bulunan gömülü yapı için analiz sonuçları gösterilmiştir. Zeminin üstünde yapı çelikten yapılmış ve sönüm oranı %2'dir. Zemine gömülü yapı betonarme ve sönüm oranı %5'tir. Zemindeki malzeme sönümü zemindeki şekil değiştirmelere uygun olarak Şekil 4.4'ten seçilmiştir. Değerler %11 ila %18 arasında değişmektedir [11].

Şekil 4.7'de görüleceği gibi A noktasındaki hareket için hesaplanan tepki spektrumu serbest alandaki kontrol hareketi ile aynıdır. Kritik noktalar olan yapı tabanı ve

işletme katı için tepki spektrumları gösterilmiştir. Bu noktalardaki hareket serbest alanda aynı noktadaki hareketten belirgin biçimde farklıdır.

Sonlu eleman analizi yarı sonsuz ortam çözümlerinin bazı sınırlamalarını ortadan kaldırmaktadır;

1) Analizde çevredeki zeminin deforme olabileceği ve zemin profilinde ivmenin değişimi dikkate alınabilir.

2) Yapının tabanındaki hareketin serbest alandaki hareketle aynı alınmasını gerektirmez.

3) Analizle komşu yapıların hareketine etkisi alınabilir.

4) Zemin zellikleri hassas şekilde belirlenebilir.

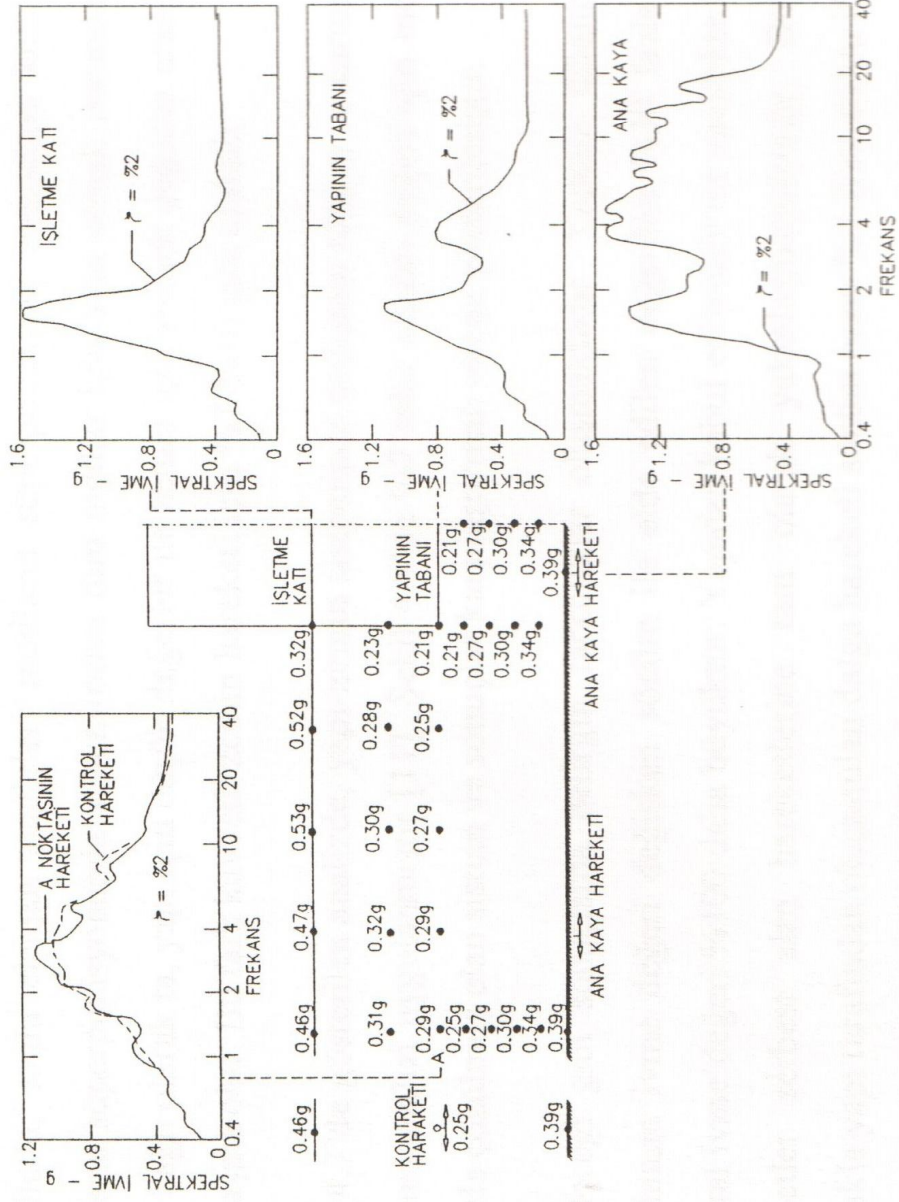
5) Malzeme sönümü analize katılabilir.

6) Radyasyon sönümü uygun şekilde analize katılabilir.

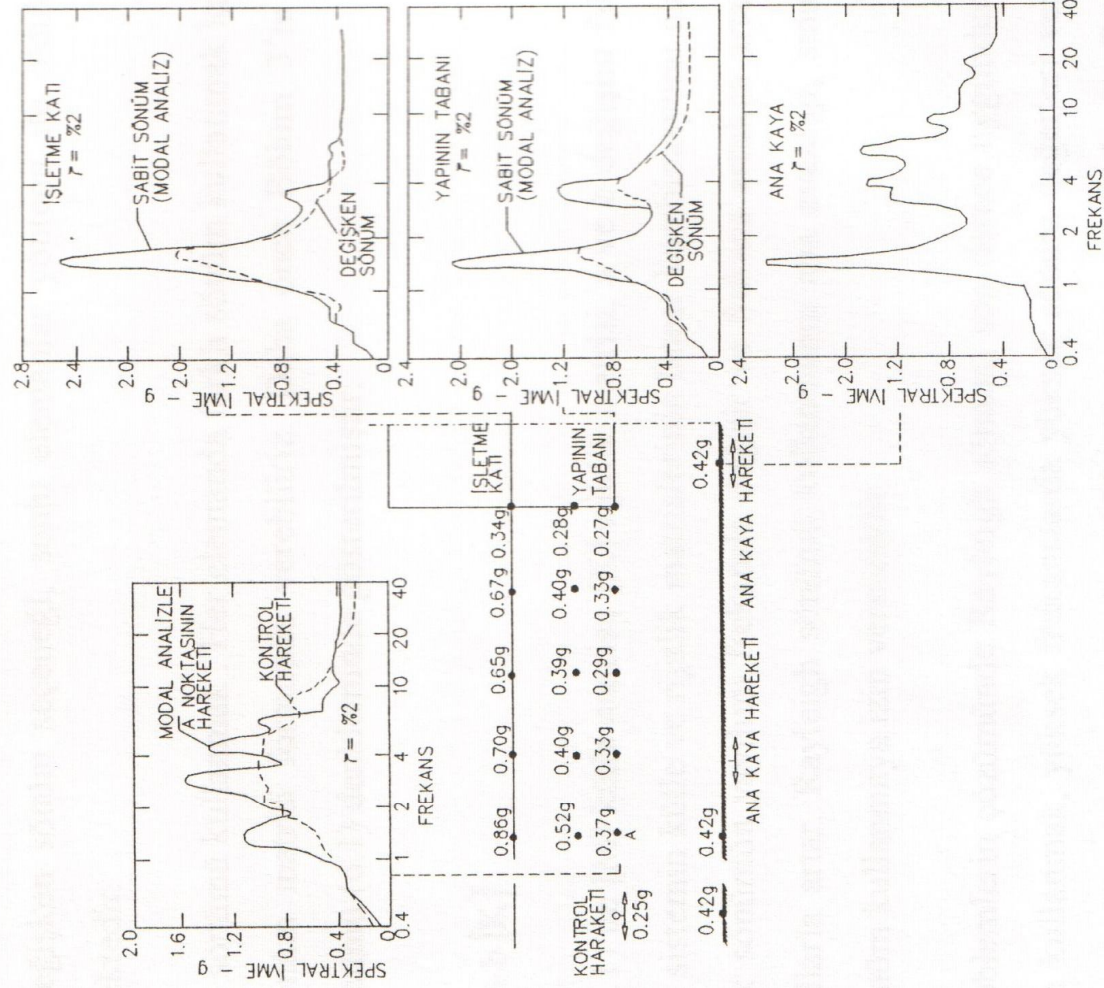
Yarı sonsuz ortam çözümlerindeki bazı sınırlamaların kalmasına rağmen sonlu elemanlar metodu kendisi bazı sınırlamalar getirmektedir. Bunlar daha çok hesaplama tekniğiyle ilgilidir, ancak sonuçlarda farklılık oluşturabilir. Başlıca sınırlamaları sayacak olursak;

a) Yapı-zemin sisteminde değişken sönümü dikkate alabilmenin gerekliliği : Kuvvetli yer hareketlerinde zemindeki malzeme sönümü, yapıdaki sönümden çok daha yüksektir. Yapıya olan derinlik ve yanal mesafeye göre de değişir. Yapının kendi içerisinde bazı kısımlarda da sönüm değeri farklılık gösterir.

Açıkçası, sonlu elemanlardaki sönüm değerini her elemanda birbirinden farklı ve tamamen kontrollü bir şekilde hesaplarda kullanabilmek istenen durumdur. Az sayıda analitik çözüm yolunda bu mümkündür. Bütün sonlu eleman metodları her elemanda farklı deformasyon modülü tanımlamaya izin verir ama ya tüm elemanlar için tek sönüm değeri kullanmaya ya da tüm modlarda belirli değerlerle kontrol edilemeyen değişken sönüm kullanmaya izin verir. Bu eksiklikler sonuçlarda bir miktar hataya neden olur.



Şekil 4.7 : Değişken sönüm kullanılan sonlu eleman analizi



Şekil 4.8 : Sabit sönümlü sonlu eleman analizi (Modal analiz, %7 sönüm)

Genellikle, sonlu eleman analizleri modların süperpozisyonu metodunu kullanır. Modların süperpozisyonunda sönüm oranı tüm modlar için aynı olmak zorundadır. Buna bağlı olarak ta, yapı için düşük değerler ile zemin için yüksek değerler arasında uzaklaşma olur. Bu fark kuvvetli zemin hareketi için %7-%10 gibi olabilir.

Şekil 4.7’de gösterilen analizde, yapı-zemin sisteminde değişken sönüm ve karmaşık davranış analizi uygulanmıştır [11]. Şekil 4.8’de %7 sabit sönüm değeri için modal analizle çözülmüş olan sistem ve sonuçlar karşılaştırmalı olarak gösterilmiştir.

Görüleceği gibi sonuçlarda belirgin farklılıklar oluşmaktadır. Yapının tabanında maksimum ivme değeri değişken sönüm ile elde edilen değerden %30 fazla ve spektral ivme değeri %100 daha büyüktür. Yapıdan kabul edilebilir bir uzaklıkta bile hareketler serbest alan hareketlerine tam olarak yakınlaşmamaktadır. Büyük olasılıkla yapı tarafından oluşturulan dalga hareketi sönüm oranı %7 iken doğru ifade edilememektedir. Değişken sönümde zemin sönümü gerçek değer olarak %15-%18 iken yapı yan yüzünden yaklaşık 98 m’de serbest alan değerlerine geçilmektedir

Kontrollü değişken sönüm seçeneği, sonlu elemanlar yöntemi ile oldukça uygun sonuç vermektedir.

b) Rayleigh sönümü kullanmak : Her elemanda farklı sönüm kullanmak için sönümü Rayleigh sönüm matrisi formunda verebiliriz. Daha önce Bölüm 3’te açıklanan Rayleigh sönümü (6.1) denkleminde gösterilmiştir.

$$[C] = a [M] + b [K] \quad (6.1)$$

Denklem (6.1)’de $[M]$ kütle matrisi, $[K]$ rijitlik matrisi, a ve b değişim faktörleridir. Yani sönüm sistemin kütle ve rijitlik matrislerinin lineer kombinasyonu olarak ifade edilir. Kritik sönümün yayılımı frekansla değişir ve frekans arttıkça artar. Örneğin yüksek modlarla artar. Rayleigh sönümü kullanmanın ana avantajı, sınırlı da olsa değişken sönüm kullanmaya izin vermesidir.

Bazı tip problemlerin çözümünde Rayleigh sönümü son derece uygundur. Frekansa bağlı sönüm kullanmak, yüksek frekanslarda yüksek sönüm değerleri vereceğinden yüksek frekansa ait değerler yapısal tepkiden tamamen sönümlenir. Bazen toprak barajlar gibi yapısal tepkinin ilk birkaç mod tarafından kontrol edildiği yapılarda

önemli bir hata oluşturmaz ancak örneğin nükleer santraller gibi yüksek modların önemli olduğu yapılarda ciddi sınırlamalar vardır.

Şekil 4.9'da daha önce kontrollü değişken sönüm için çözülen sistem bu kez Rayleigh sönümü kullanılarak çözülmüştür. Serbest alanda A noktasında hesaplanan hareket ile kontrol hareketi karşılaştırılırsa, hareketteki yüksek frekans etkilerinin kaybolduğu görülür. Eğer yüksek frekans etkileri önemli ise analizde sönümün seçimi önemlidir.

c) Eleman boyutunun etkisi : Sonlu eleman analizinde diğer önemli konu sonlu eleman boyutlarıdır. Özellikle düşey doğrultudaki eleman boyutudur. Dalga yayılması doğrultusundaki eleman boyutunun geçen hareketin frekansı üzerinde önemli etkisi olmaktadır. Büyük eleman boyutu ile yüksek frekanslı ve dolayısıyla kısa dalga boylu hareket iletilememektedir [11]. Ampirik kural olarak Kuhlmeier ve Lysmer etkili hareket iletimi için ağdaki eleman boyutunun, hareketin dalga boyutunun $\frac{1}{4}$ 'ü yada tercihen $\frac{1}{8}$ 'i olarak seçilmesini önermektedir [8]. Nükleer santral analizinde eleman boyutunun oldukça küçülmesi gerekmektedir. Şekil 4.10'da düşey kayma dalgası yayılımı için eleman boyutunun önemi gösterilmiştir. 45 m'lik kum profilinde;

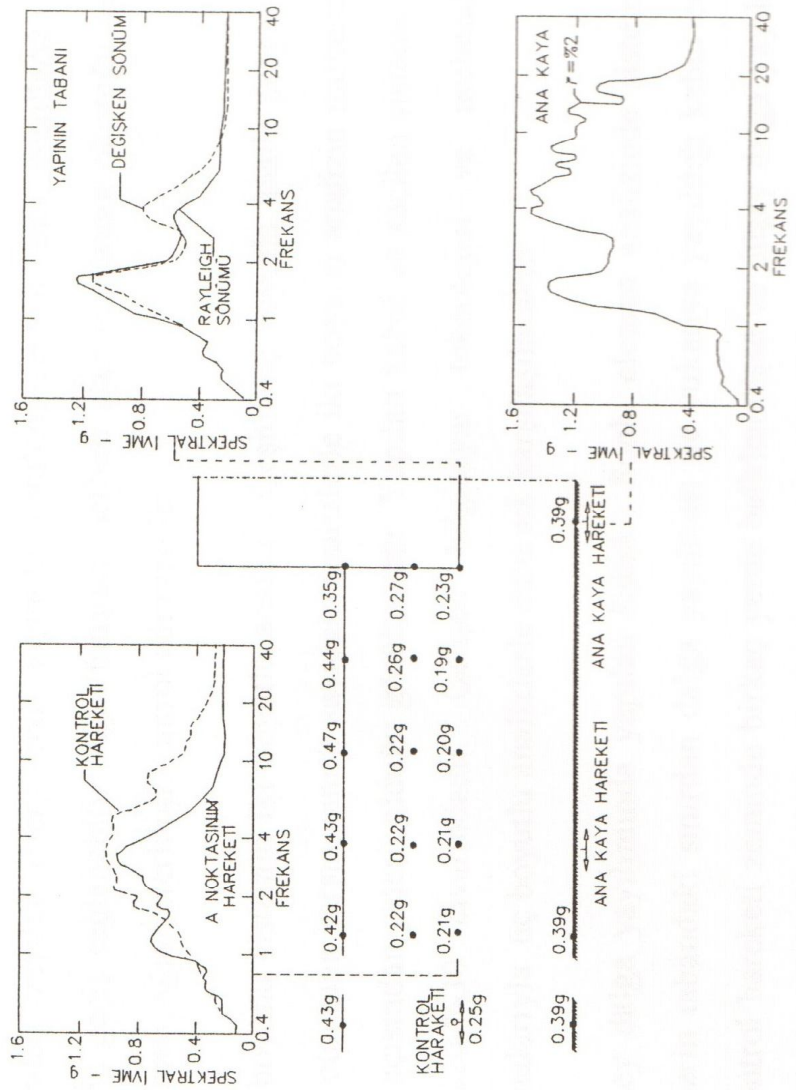
1) Dalga yayılımı tekniği

2) Sık eleman ağı ve kontrollü değişken sönümlü sonlu eleman analizi

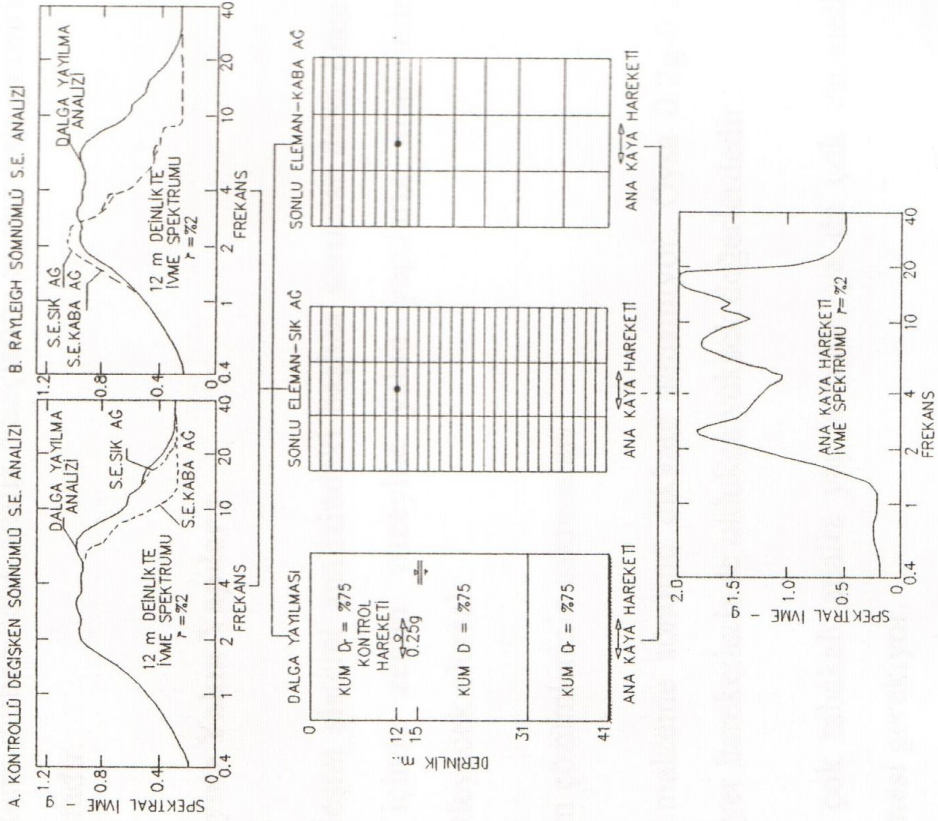
3) Kaba ağ ve kontrollü değişken sönümlü sonlu eleman analizi uygulanmıştır.

Rölatif olarak kaba ağ düşük frekanslarda ($f = 5 - 6$ devir/sn'den sonra) tepkide azalmaya neden olmuştur. Yüksek frekans etkileri altında eleman boyutunu önemli olduğu görülmüştür. Eğer Rayleigh sönümü uygulansa bu fark görülemeyecekti, çünkü yüksek frekans etkileri sönümlenecekti.

d) Sonlu eleman ağının genişliği : Sonlu eleman analizi ile zemin yanal olarak istenildiği kadar geniş alınamaz. Yanal mesafe radyasyon sönümü etkisi için önemlidir. Eğer sonlu ağ yanal sınırdan yeterince uzak değilse sistemden yayılan enerji sınırlardan yansıyarak geri döner. Bu durum enerji yutan sınırlar kullanarak kaldırılabilir. Eğer zemindeki malzeme sönümü yüksekse, yapı



Şekil 4.9 : Rayleigh sönümü ile sonlu eleman analizi



Şekil 4.10 : Sonlu eleman metodunda eleman boyutunun etkisi

çevresinden yayılan enerji hızlı biçimde yutulup, serbest alan koşullarına kısa mesafede geçiş sağlanabilir. Ağın bitişinde serbest alan etkilerinin oluştuğu yer iyi belirlenmeli, ağır yeterliliği kontrol edilmelidir.

e) Üç boyutlu sistemin iki boyutlu analizi : Çeşitli üç boyutlu analiz programları mevcut olmasına karşın, sınırlı sayıdaki analizlerle iki boyutlu analizin mühendislik dizaynı açısından yeterli olduğu görülmüştür. Yapılan kabul ve seçilen sisteme göre hata %20-%30 civarındadır. Gelişen bilgisayar teknolojisi ve mühendislik uygulamalarıyla üç boyutlu analizlerle daha sık karşılaşılabacaktır.

f) Düşey dalga yayılımında yapılan kabul : Sonlu eleman analizinde sistemdeki hareketlerin tabandaki sınırdan dalga yayılması ile yukarıya yayıldığı kabul edilir. Eğer kontrol hareketi zeminde birkaç yerde belirlenmişse ve düşey dalga yayılması analizi kullanılarak alttaki yumuşak zemin yada kayadaki hareketten bulunmuşsa, doğrudur. Aynı taban hareketi sonlu eleman analizinde kullanılabilir. Bu zemindeki deprem hareketinin tam hassas ifadesi olmasa da, uygun modellenmiş halidir. Karmaşık bir sistemi mühendislik analiz amaçlarına uygun hale getirirken bir miktar hata da yapılmaktadır.

4.4 Zemin Yüzeyine Yakın Yapılar :

Yapı-zemin etkileşim sistemi analizindeki başlıca sorunlar daha önce anlatılmıştır. Her iki metot içinde zemin yüzeyine yakın yapıların analizinde karşılaşılan sınırlamaları özetleyecek olursak:

Yarı sonsuz ortam çözümlerinin sakıncaları :

- a) Çözümlerde malzeme sönümü dikkate alınmıyor. Oysa 0.2g-0.25g civarında ivmeye sahip yer hareketlerinde oldukça yüksek değerlerdedir.
- b) Çözümlerde çok tabakalı analiz yapılamıyor, ya da çok zahmetli olan hesap şeklinin izlenmesi gerekiyor.
- c) Çözümlerde zemindeki şekil değiştirmeye bağlı değişimler, derinlikle ilgili değişimler dikkate alınmıyor.
- d) Yapısal tepkiye komşu yapıların katkısı alınmıyor.

Sonlu eleman analizinin sakıncaları :

- a) Genelde üç boyutlu sistem yerine iki boyutlu analiz yapıp, daha düşük tepki elde edilebilir.
- b) Yüksek frekans etkileri kaba sonlu eleman ağı, az sayıda mod alınması, Rayleigh sönümü kullanılması gibi sebeplerle maskelenebilir.
- c) Alınan sonlu eleman ağı büyüklüğü radyasyon sönümünü yansıtmada yetersiz kalabilir.
- d) Özel durumlarda yapıdaki lokal tepkiler için detaylı modelleme yapılamayabilir.

Bunlardan çıkarılacak sonuç olarak, üç boyutlu analizin, kontrollü değişken sönümün kullanıldığı, uygun eleman boyut ve ağ büyüklüğünün kullanıldığı, zemindeki mümkün olan değişimlerin tanımlandığı bir analiz gerçek durumun oldukça iyi bir analizi olacaktır.

Zemine gömülü yapılar içinde yarı sonsuz ortam ve sonlu eleman çözümleri için ana hatları açıklanmış olan benzer üstünlük ve sakıncalar sayılabilir [11].

Bu bölümle yapı-zemin dinamik etkileşimi üzerine çeşitli düşünce ve eleştiriler belirtilmiştir. Gelişmeler ve yeni bilgiler ışığında tasarım sistematiği, hesaplama tekniği, analizlerin hassaslığı ılerlemektedir. Belirtilen sınırlamalar, zemin özelliklerinin ve yer hareketinin karakteristiklerinin belirlenmesindeki güçlükler problemi karmaşık hale getirmektedir. Çok gelişmiş analiz teknikleri kullanılsa bile sonuçların gerçek durum ile birleştirilip değerlendirilmesi gerekecektir. Bu ve benzeri yazılar sayesinde problemdeki faktörleri kavrayıp, sonuçları değerlendirmek etkileşim probleminin her zaman önemli bir parçası olacaktır.

5. SAYISAL ÖRNEK

5.1 Yapı-Zemin Etkileşimine Ait Sayısal Örnek

Bu bölümdeki sayısal örneklerde çok katlı çerçeve tipi bir betonarme yapının elastik zeminle dinamik etkileşimi sonlu elemanlar yöntemi ile incelenmiştir. Sistemi oluşturan zemin ve betonarme çerçeve için değişik koşulları yansıtan değerler kullanılarak sistemin davranışı araştırılmıştır.

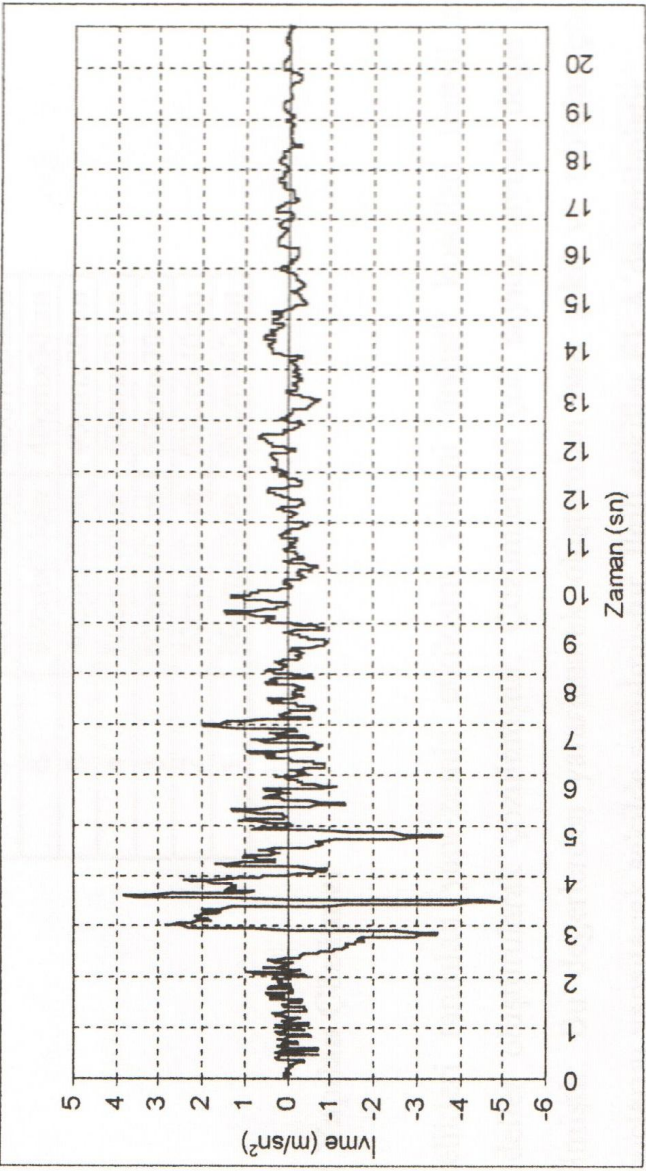
Yapı-zemin etkileşimi problemine konu olan yapı sistemi lineer elastik sonlu kalınlıklı zemin tabakası ve çok katlı betonarme çerçeveden oluşmaktadır. Sistem Şekil 5.1 ve Şekil 5.2'de gösterilmiştir. Hesaplarda yapılan varsayım ve idealleştirmeleri üst yapı özellikleri, zemin özellikleri, deprem hareketi özellikleri başlıkları altında toplayabiliriz.

a) Üst yapı özellikleri: Üst yapı sisteminin birbirini sabit eksen aralıkları ile kapı eden çerçevelerden oluşan çok katlı betonarme yapı olduğu varsayılmıştır. Hesabın da bu çerçevelerden birisi için yapıldığı düşünülmüştür. Şekil 5.1'de gösterildiği gibi eksen aralağı 6 m alınmıştır. Boyutlandırmada kat kirişleri 25 cm x 60 cm olarak, kolonlar ise 10 katlı çerçeve için tablo 5.1'de gösterilen boyutlarda alınmıştır. Dinamik analiz için hesaplanacak kütleler eleman üzerinde yayılı olarak verilmiştir. Çerçevede katların yatay yer değiştirmeleri için kat hareketi tanımlanmıştır. Kütlelere 6 m eksen aralığundan döşemenin katkısı da düşünülmüştür. Lineer elastik betonarme çerçevenin elastisite modülü BS20 sınıfı beton için $2.85 \times 10^7 \text{ kN/m}^2$ alınmıştır. Temel de kolonları bağlayan sürekli temel kirişi altındaki zemin ağına uygun olarak bölünmüştür.

b) Zemin özellikleri: Zemin ortamı sonlu elaman ağında homojen lineer elastik malzeme olarak alınmıştır. Zeminin malzeme özellikleri göz önüne alınan kayma dalgası hızları olan 200, 500 ve 1000 m/sn değerleri için belirlenmiştir. Zeminin Poisson oranı 1/3 alınmıştır. Zemin ağı üst yapı gibi 6 m'lik eksen aralığı için

Zemin yanal sınırlarında geri kalan zeminin etkisinin modellenmesi için yatay doğrultuda yay kullanılmıştır. Yay katsayıları statik sonlu eleman metodu ile belirlenmiştir.

c) Deprem hareketinin özellikleri : Sistemde dış yük olarak 1992 Erzincan depreminin doğu – batı doğrultusundaki ivme kaydı kullanılmıştır. Şekil 5.3'te gösterilen deprem ivme kaydı ana kayaya uygulanarak sistem çözülmüştür.



Şekil 5.3 : 1992 Erzincan depremi doğu – batı doğrultusu ivme kaydı

Yurdumuz için önemli depremlerden birisi olan Erzincan depreminin büyüklüğü 6.8 olup, 13 Mart 1992 günü saat 19:19'da Erzincan ve çevresinde etkili olmuştur. Bu bölgede tarih içerisinde çok sayıda önemli deprem gözlemlenmiştir. Şekil 5.3'ten görüleceği üzere doğu – batı doğrultusunda 0.50g mertebesine varan bir yatay ivme kaydedilmiştir. Elde edilen kayıtlardaki büyüklükler ender rastlanan büyüklüklerdir. Yörede havzadaki tabakalaşmanın bir etkisi olarak, depremin hakim periyodu 0.4 ~ 0.5 sn civarında olduğu görülmüştür [2]. Deprem önemli hasar ve yıkıma neden olmuştur. Önemli bir deprem olan 1992 Erzincan depreminin ivme kaydı hesaplarda kullanılmıştır.

Sistemin çözümünde İnşaat Mühendisliğinde yaygın kullanım alanı olan SAP90 ve SAP2000 bilgisayar programlarından yararlanılmıştır. Programlarda lineer olarak modellenebilen sistem modal analiz yöntemiyle çözülmüştür. Modal analizde Ritz vektörleri kullanılmıştır. Etkileşimli sistem sönümü olarak zemindeki malzeme sönümünü de dikkate alacağı düşünülen ve Seed ve diğ. (1975) de hesaplarında

kullandıkları %7 sönüm oranı kullanılmıştır. Gerekli mod sayısı hesaplardaki etkin kütle oranının %90'dan az olmaması kuralına göre belirlenmiştir.

Tablo 5.1 : 10 katlı çerçevedeki kolon boyutları

KAT NUMARASI	İÇ KOLONLAR	DIŞ KOLONLAR
10	40cmx30cm	40cmx30cm
9	40cmx30cm	40cmx30cm
8	40cmx30cm	40cmx30cm
7	40cmx30cm	40cmx30cm
6	50cmx30cm	40cmx30cm
5	50cmx30cm	40cmx30cm
4	60cmx40cm	50cmx30cm
3	60cmx40cm	50cmx30cm
2	80cmx40cm	60cmx40cm
1	80cmx40cm	60cmx40cm

5.2 Yapılan Çözümler

Özellikleri tanıtılan yapı-zemin etkileşim sistemi değişik koşulları temsil eden modeller oluşturularak çözülmüştür. Çözümlerden çok sayıda sayısal değer elde edilmiştir. Bu değerlerden yararlanarak oluşturulan bazı şekil ve tablolar çözüm sonuçlarını yansıtacak şekilde sunulmuştur. İlgili şekiller Ek A'da verilmiştir.

Öncelikle 10 katlı betonarme çerçeve sistemi rijit zemin hali için çözülmüştür. Yapı-zemin etkileşiminin söz konusu olmadığı, rijit zemin kabulü nedeniyle serbest alandaki ivme kaydı ile yapı tabanındaki ivme kaydının aynı olduğu klasik çerçeve analizinde, temelden ankastre sistem verilen 1992 Erzincan ivme kaydı ve %5 yapısal sönüm için çözülmüştür. Sonuçta 10.katın yer değiştirmeleri ve çerçeveye etkiyen taban kesme kuvveti elde edilmiştir. İlgili değerler Şekil A.1 ve Şekil A.2'te gösterilmiştir.

Zemin ağı ve 10 katlı betonarme çerçeveden oluşan etkileşimli sistem sırasıyla 200, 500 ve 1000 m/sn kayma dalgası hızlarına sahip zemin ortamı için çözülmüştür. Üst yapı özellikleri her üç çözümde de aynı kalırken, zemin ortamındaki eleman özellikleri kayma dalgası hızına bağlı olarak değiştirilmiştir. Çerçevenin 10.katının yer değiştirmelerinden temeldeki düğüm noktasının yapmış olduğu yer değiştirmeler çıkartılarak 10.katın temele göre yapmış olduğu rölatif yer değiştirmeler elde edilmiştir. Ayrıca 1.kat kolonlarındaki kesme kuvveti değerlerinin toplamından taban kesme kuvvetleri bulunmuştur. İlgili değerler kullanılarak elde edilmiş olan grafikler

Şekil A.3 – Şekil A.10’da gösterilmiştir. Yapılan bu dört çözüme ait periyotlar da tablo 5.2’de kıyaslamalı olarak sunulmuştur.

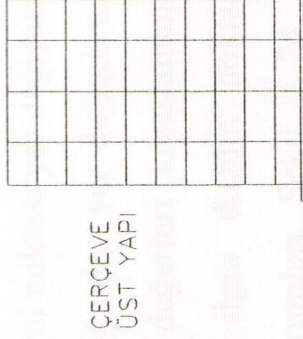
Etkileşimli sistem ile rijit sistemin dinamik özellikleri birbirinden tamamen farklıdır. Dolayısıyla davranışlarında da farklılık olacaktır. Bu çözümlerden görüleceği gibi, mühendislik özellikleri açısından pek iyi durumda olmayan kayma dalgası hızı 200 m/sn olan yumuşak zeminle, daha iyi durumdaki kayma dalgası hızları 500 ve 1000 m/sn olan zeminler iki gurup oluşturmaktadır. Yumuşak zeminde bu etkileşimin daha önemli olduğu görülmektedir. Taban kesme kuvveti ve 10.kat rölatif yer değiştirmeleri diğer iki çözümden daha büyüktür. Bu etkileşim sistemi için yumuşak zeminin etkiyi arttırdığı, yer değiştirmeleri daha fazlalaştırdığı ve temeldeki dönme etkisinin önemli hale geldiği yorumlarına ulaşmak mümkündür. Daha iyi özelliklerdeki 500 ve 1000 m/sn kayma dalgası hızlarındaki zeminler için yapılan çözümlerin birbirlerine ve rijit zemin çözümüne daha yakın oldukları görülmektedir. Periyotlarda ise elde edilen çözümlerin, etkileşimli sistemde periyotların uzaması öngörüsü ile uyduğu görülmektedir. En büyük periyot en yumuşak zeminli sistemde görülmüştür. Periyotları sıralarsak, aynı sistem de zemin özelliklerini yansıtan kayma dalgası hızı arttıkça periyodun azalacağı söylenebilir. Elde edilen bu çözümlerin daha kolay kıyaslanabilmesi için, 200 ve 500 m/sn kayma dalgası hızları ile rijit zemin haline ait olan çözümler aynı grafik üzerinde gösterilmiştir. Kayma dalgası hızı 1000 m/sn hali, 500 m/sn sonuçlarına yakın olduğundan grafiği karmaşık hale getirmemek için kıyaslama değerleri içerisine alınmamıştır.

Etkileşimli sistemde çerçeve tabanında mevcut olan sürekli temel kirişi daha önce yapılmış olan çözümlerde elastik olarak tanımlanmıştı. Kayma dalgası hızı 200 m/sn hali için etkileşimli sistemde temel kirişi rijit olarak tanımlanarak çözüm yapılmış ve buna ait değerler Şekil A.11 ve Şekil A.12’de gösterilmiştir. Sonuçlardan görüleceği gibi bu sistemde rijit ve elastik temel kirişi arasındaki fark ihmal edilecek kadar küçüktür.

Yapı temelindeki dönmeler çok katlı yapılarda, üst kattaki yer değiştirmeler açısından önemli olmaktadır. Bu durumu değerlendirebilmek açısından sistem kayma dalgası hızı 200 m/sn ve üzerinde 5 katlı betonarme çerçeve hali için çözülmüştür. Bu durum Şekil 5.2’de gösterilen 10 katlı etkileşim sisteminde 10 katlı çerçeve yerine 5 katlı çerçevenin kullanılması halidir. İlgili çözümden 5.katın rölatif yer

değiştirmesi ve çerçevdeki taban kesme kuvveti Şekil A.13 ve Şekil A.14'te gösterilmiştir. Temelde iki uçtaki düğüm noktalarının düşey yer değiştirmelerinin farkının aradaki mesafeye bölünmesinden elde edilen ortalama dönme 10 ve 5 katlı sistem için Şekil A.15 ve Şekil A.16'da gösterilmiştir. Temeldeki ortalama dönme değerlerine bakılacak olursa, 10 katlı sistem değerlerinin 5 katlı sisteme göre daha büyük olduğu görölr. Temelin ortalama dönmeleri ile kat yüksekliklerinin çarpımı soncunda elde edilmiş olan yer değiştirme grafikleri de Şekil A.17 ve Şekil A.18'de gösterilmiştir. Ortalama değer ile kat yüksekliğinin çarpılmasıyla bulunan dönmenden dolayı oluşacak yatay yer değiştirmenin önemi kat sayısı arttıkça artmaktadır. Doğal olarak en büyük yer değiştirmenin yanında katların birbirine göre yapmış oldukları görelili yer değiştirmelerde önemlidir ve incelenmesi gerekir. Dönme bileşeni etkisiyle önemli hale gelebilen ikinci mertebe etkilerini dikkate alabilen hesap tarzı izlemek uygun olacaktır.

Daha sonraki aşamada, zeminin tek tabakalı değil de iki tabakalı olarak modellenmesi incelenmiştir. Zeminin alttan 14 m'sinin kayma dalgası hızı 500 m/sn ve diğeri 14 m'sinin 200 m/sn olan iki tabakadan oluştuğu düşünülmüştür. İlgili model Şekil 5.4'te gösterilmiştir. Çözüm sonucunda elde edilen grafikler Şekil A.19 ve Şekil A.20'de gösterilmiştir. Sonuçlardan elde edilen değerlerin tek tabakalı kayma dalgası hızları 200 ve 500 m/sn olan sistemlerin arasında olduğu görölmektedir. İki tabakalı ve 5 katlı sistem çözümlerinin periyotları tablo 5.3'te gösterilmiştir.



KAYMA DALGASI HIZI 200 m/sn OLAN ZEMİN TABAKASI	143
KAYMA DALGASI HIZI 500 m/sn OLAN ZEMİN TABAKASI	143

Şekil 5.4 : İki tabakalı zemin ortamı için sonlu eleman modeli

Son olarak, etkileşimin daha önemli olduğu 200 m/sn kayma dalgası hızına sahip sistemde zemin derinliğinin 2 katı alınan yanal sınır haline ait çözümle, serbest alan değerleri karşılaştırılmıştır. Böylece yanal sınır kontrol edilmiştir. Konuyla ilgili yayınlarda, serbest alana ait yer değiştirme, hız ve ivme değerlerinin bulunmasında zeminin kayma elemanı olarak modellendiği yöntemlerle karşılaşılmakta ve bu şekilde çözüm yapan SHAKE adlı bilgisayar programından bahsedilmektedir. Bunun için mevcut sonlu eleman programlarından SAP2000 kullanılarak, serbest alan değerleri üzerinde çerçeve olmayan zemin ağının verilen ivme kaydı için %5 sönümle çözümden elde edilmiştir. Kıyaslama için serbest alan hareketi, ağır ortasında yüzeydeki düğüm noktasının hareketi olarak alınmıştır. Bu değerle etkileşimli sistemdeki zemin sınırından biraz içeride ve Şekil 5.2’de A noktasındaki ile gösterilmiş olan kontrol değeri kıyaslanmıştır. Elde edilen yer değiştirme değerlerine ait grafikler Şekil A.21 ve Şekil A.22’de gösterilmiştir. Diyagramlardan görüleceği gibi zemin ortamında bulunan sonuçlar bu sistem için çok yakınsak gözükmemektedir. İlgili değerleri kıyaslarken, zeminin yan sınırını kesmek ve burada serbest alandan farklı sınır koşulu tanımlamak zorunda kalmamız sonuçlarda bir miktar hataya sebep olmuştur. Bu nedenle hatayı azaltmak için, yanal sınırdan biraz içteki A noktası ele alınmış ve modelleyemediğimiz zemin kısmı için de yaylar kullanılmıştır.

Sistemde zemin ağını büyütürsek, yanal sınırdan bir miktar içeride yüzeydeki düğüm noktasında serbest alana daha yakın sonuçlar bulabiliriz. Bunun için zemin ağı boyutları 28 m x 222 m’ye çıkartılıp çözüm yapılmış ve kıyaslama için zemin yanal sınırından içerdeki kontrol noktası yer değiştirme grafiği Şekil A.23’te gösterilmiştir. Kıyaslama yaparken doğrudan yer değiştirmeler yada ivmeler değil de bunlardan elde edilecek spektral değerleri kıyaslamanın daha doğru olacağı düşünüülerek, SAP2000 programıyla ilgili düğüm noktalarında ivme spektrumları da elde edilmiştir. İvme spektrumları Şekil A.24 - Şekil A.26’de gösterilmiştir. Bu şekillerden de ağı büyütürerek yapılan çözümün serbest alan değerlerine yakınlaştığı görülmektedir. Ağı büyütürerek zemin ortamını daha iyi modellendiği sonucuna ulaşılabilir.

Ayrıca zemin ağını büyütmenin üst yapıdaki iç kuvvetleri nasıl etkilediğini görmek için, bu çözümdeki taban kesme kuvveti de hesaplanmış ve Şekil A.27’de gösterilmiştir. Küçük ağ çözümü ile kıyaslama yapılabilmesi için 146 m ve 222 m

genişlikli zemin ortamı hallerine ait taban kesme kuvvetleri Şekil A.28'de gösterilmiştir. Bu grafikten de kesme kuvvetinin önceki hale göre bir miktar değiştiği görülmektedir. Bu örnekte zemin ağını genişleterek yapılan çözümde zemin ortamında serbest alan değerlerine yakınlaşma, üst yapıdaki taban kesme kuvvetindeki değişimden çok daha hızlı olmuştur.

Yapılan bu son çözümde etkileşim sonucunda yapı tabanındaki hareketin serbest alan ve ana kaya değerlerinden ne kadar değiştiğinin görülmesi için de, yapı tabanı ve çözümünde kullanılan ana kaya hareketi olan 1992 Erzincan depreminin doğu - batı doğrultusu ivme kaydına ait ivme spektrumları Şekil A.29 ve Şekil A.30'da gösterilmiştir. Ana kaya hareketi için elde edilmiş olan ivme spektrumu diğer yayınlarda verilmiş olan ivme spektrumları ile uyusmaktadır [2]. Grafiklerden görüleceği gibi yapı ile zemin arasındaki etkileşim yapı taban hareketini serbest alan hareketinden farklı bir şekle getirmiştir. Ayrıca 200 m/sn kayma dalgası hızına sahip zemin ortamı ana kayadaki deprem hareketi etkisini üst yapıya atıtarak iletmiştir.

Tablo 5.2 : Çözülen sistemlerin periyotları

MOD NUMARASI	PERİYOT (sn)			
	ELASTİK ZEMİN		RİJİT ZEMİN	
	Vs = 200 m /sn	Vs = 500 m /sn	Vs = 1000 m /sn	Vs = ∞
1	1.7652	1.6121	1.5876	0.9919
2	0.6064	0.5674	0.5642	0.3718
3	0.4638	0.3328	0.3301	0.2353
4	0.4467	0.2375	0.2347	0.1780
5	0.3441	0.2093	0.1743	0.1453
6	0.3117	0.1929	0.1599	0.1433
7	0.3015	0.1653	0.1327	0.1196
8	0.2783	0.1387	0.1274	0.1171
9	0.2467	0.1257	0.1029	0.1002
10	0.2289	0.1113	0.0948	0.0929
11	0.1986	0.1020	0.0700	0.0645
12	0.1658	0.0904	0.0566	0.0555
13	0.1244	0.0580	0.0441	0.0521
14	0.0847	0.0545	0.0414	0.0369
15	0.0690	0.0310	0.0190	0.0247

MOD NUMARASI	PERİYOT (sn)	
	İKİ TABAKALI SİSTEM Vs = 200 - 500 m /sn	5 KATLI SİSTEM Vs = 200 m /sn
1	1.7248	1.0555
2	0.5855	0.4791
3	0.3598	0.3826
4	0.3370	0.3268
5	0.3040	0.3069
6	0.2480	0.3031
7	0.2390	0.2782
8	0.2122	0.2472
9	0.1772	0.2369
10	0.1629	0.1994
11	0.1345	0.1776
12	0.1218	0.1228
13	0.0826	0.1187
14	0.0680	0.0668
15	0.0507	0.0655

6. SONUÇLAR

Çok katlı çerçeve tipi betonarme yapıların elastik zeminle dinamik etkileşimi konulu tez çalışmasının daha önceki bölümlerinde ulaşılan bazı sonuçlar bu bölümde toplu halde sunulmuştur. Buradaki sonuçlar üzerine ilgili bölümlerde detaylı açıklamalar mevcuttur. Ayrıca Eurocode 8 taslağında yapı-zemin etkileşimi konusunda yer almış olan bazı maddeler tez sonuçlarıyla uyumaktadır [12,13]. Tez çalışması neticesinde ulaşılan sonuçları sıralayacak olursak;

- 1) Etkileşimli sistemde rijit zemin halinden farklı olarak, zemin ortamının rijitlik, kütle ve sönüm özellikleri de vardır. Etkileşimli sistemde doğal periyotlar, mod şekilleri vb. büyüklükler, kısaca sistemin dinamik özellikleri tamamen farklıdır.
- 2) Zemini dikkate almanın sistemin doğal periyotlarını uzattığı bilinen bir sonuçtur. Bu durum yapılmış olan sayısal örnek çözümlerinde ve tablo 5.1’de açıkça görülmektedir. Etkileşimli sistemde birinci doğal periyot, rijit zemin halinden daha büyüktür.
- 3) Yapı-zemin etkileşim sisteminde yapının tabanındaki hareket, aynı seviyedeki serbest alan hareketinden ve ana kayadaki hareketten farklıdır. Sistemdeki etkileşim yapı tabanındaki hareketi değiştirmiştir. Ayrıca taban hareketi rijit zemine mesnetli yapı haline göre önemli bir dönme bileşeni içermektedir. Yapılmış olan çözümlerden de görüldüğü gibi modeldeki zemin ortamı ana kayadaki deprem hareketi etkisini üst yapıya arttırarak yada azaltarak iletmektedir. Etkileşimli sistemde üst yapı taban kesme kuvveti de rijit mesnetli sisteme göre artabilir ya da azalabilir. Sistemdeki zemin ortamının kayma dalgası hızı azaldıkça etkileşim daha önemli hale gelmektedir.
- 4) Sistemde sönümü oluşturan nedenler; üst yapının yapısal sönümü, zeminin malzeme sönümü ve temeller ile zemin arasındaki radyasyon sönümüdür. Bunun için tüm sönüm etkilerinin tanımlanabildiği hesap tarzı izlemek ya da mevcut hesap yönteminde bu etkileri dikkate alan kabuller yapmak uygun olacaktır.

5) Etkileşimli sistemde yer değiştirmeler artmaktadır. Yapılmış olan çözümlerde görüldüğü gibi, yapının temelindeki dönme bileşeni çok katlı binalar ile ikinci mertebe etkilerinin önemli olduğu yapılarda belirgin bir öneme sahiptir. Eurocode 8'de de yapı yüksekliğinin minimum temel boyutuna oranı 6 ya da daha fazla olan yapılarda dönme etkisinin önemli olacağını belirtmektedir [12]. Hesaplarda üst yapıdaki ikinci mertebe etkileri dikkate almak uygun olacaktır.

6) Hesap modeli sistemin tüm özelliklerini yansıtacak düzeyde olmalıdır. Model yapı zemine gömülü ise gömülü derinliği, altta ana kaya var ise kayayı, zemindeki mevcut tabakaları vb. özellikleri içermelidir. Modelde eleman boyutları, sonlu eleman ağının büyüklüğü, zemin yanal sınırlarının uygunluğu kontrol edilmelidir.

7) Sistemin idealleştirilmesi ve çözümü sırasında yapılacak her kabul sonuçları etkileyebilmektedir. Bu yüzden karar vermeden önce ayrıntılı bir inceleme yapmak doğru olacaktır.

Bütün bunlara ek olarak yapı-zemin etkileşimi çözümünün yapılacağı durumlar olarak ağır veya zemine gömülü yapılar, narin ve yüksek binalar, ikinci mertebe değerlerinin önemli olduğu yapılar ve kayma dalgası hızının 100 m/sn'den küçük olduğu haller sayılabilir [13].

Çözümünde bilgisayar programı kullanmak kaçınılmazdır. Kullanılacak program, lineer olmayan özellikler, değişken sönüm, enerji yutan eleman, özel sınır koşulları, temeller ile zemin arasında çekme almayan eleman kullanıyor ve 3 boyutlu hesap yapabiliyorsa, problemde kullanılması uygun olacaktır.

Mevcut çözüm teknikleri çok ileri bir düzeyde olsa bile sonuçları gerçek durumla bağdaştırıp, değerlendirmek ve çeşitli yorumlar yapmak tasarımın önemli bir aşaması olacaktır.

KAYNAKLAR

- [1] **Kobori, T.**, 1990, Verification Studies on Dynamic Soil-Structure Interaction, *Proceedings of Thirteenth Regional Seminar on Earthquake Engineering*, Istanbul, 532-560.
- [2] **Celep, Z. ve Kumbasar, N.**, 1993, Deprem Mühendisliğine Giriş ve Depreme Dayanıklı Yapı Tasarımı, Sema Matbaacılık, İstanbul.
- [3] **Velestos, A.S., Wei, Y.T.**, 1971, Lateral and Rocking Vibration of Footings, *Journal of The Soil Mechanics and Foundation Division, ASCE*, **SM9**, 1227-1248.
- [4] **Velestos, A.S., Meek, J.W.**, 1974, Dynamic Behaviour of Building-Foundation Systems, *Earthquake Engineering and Structural Dynamics*, **Vol. 3**, 121-138.
- [5] **Akturan, C.**, 1996, Yatay Yönde Zorlanmış Silindirik Sıvı Tanklarının Zemin-Yapı Etkileşimi Üzerine Bir Çalışma, *Yüksek Lisans Tezi*, İ.T.Ü. Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul.
- [6] **Chopra, A.K., Gutierrez, J.A.**, 1974, Earthquake Response Analysis of Multistorey Building Including Foundation Interaction, *Earthquake Engineering and Structural Dynamics*, **Vol. 3**, 65-77.
- [7] **Gencer, O.**, 1998, Üstyapı-Zemin Ortak Sisteminin Dinamik Etkileşim Problemi, *Yüksek Lisans Tezi*, İ.T.Ü. Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul.
- [8] **Idris, I.M., Kennedy, R.P., Agrawal, P.K., Hadjian, A.H., Kausel, E., Lysmer, J., Seed, H.B., Whitman, R.V.**, 1979, Analyses For Soil-Structure Interaction Effects For Nuclear Power Plants, Report by The Ad Hoc Group on Soil-Structure Interaction of The Committee on Nuclear Structures and Materials of The Structural Division of ASCE.
- [9] **Kramer S.L.**, 1996, Geotechnical Earthquake Engineering, Prentice-Hall International Series, New Jersey.

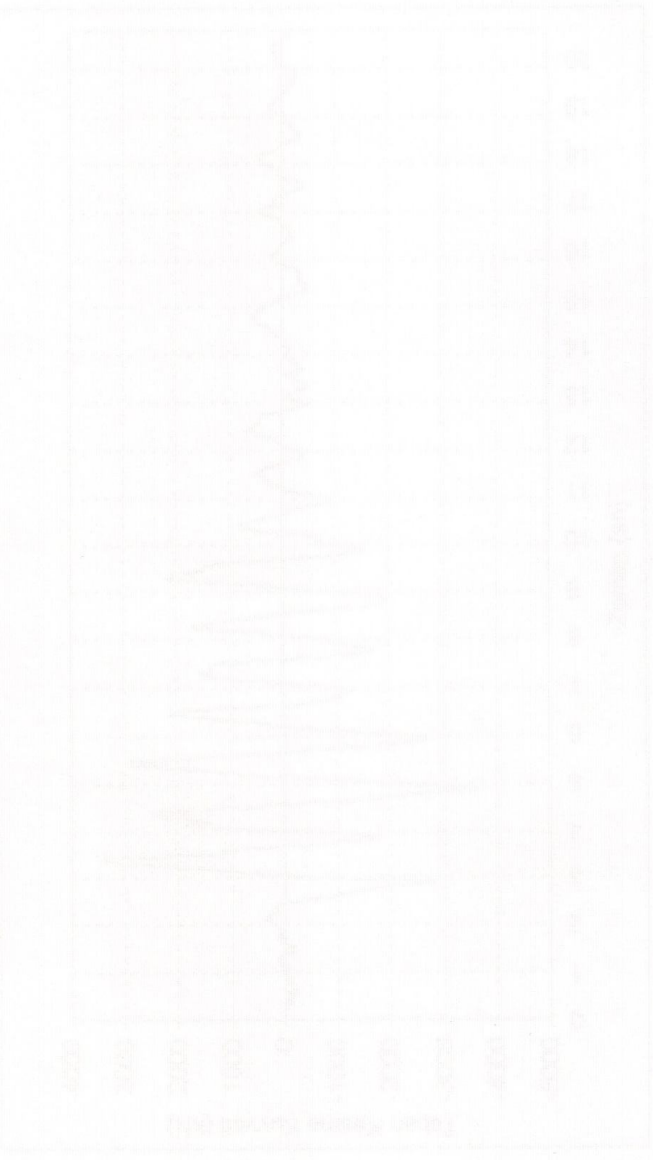
- [10] **Wilson, E.L.**, 1997, Three Dimensional Dynamic Analysis of Structures With Emphasis on Earthquake Engineering, Computers and Structures Inc.
- [11] **Seed, H.B., Lysmer, J., Hwang, R.**, 1975, Soil-Structure Interaction Analyses For Seismic Response, *Journal of The Geotechnical Engineering Division, ASCE*, **GT5**, 439-457.
- [12] **Eurocode 8**, April 1996, Design of Structures For Earthquake Resistance, Part 3: Towers, Masts and Chimneys
- [13] **Eurocode 8**, June 1994, Design of Structures For Earthquake Resistance, Part 5: Foundation, Retaining Structures and Geotechnical Aspects.



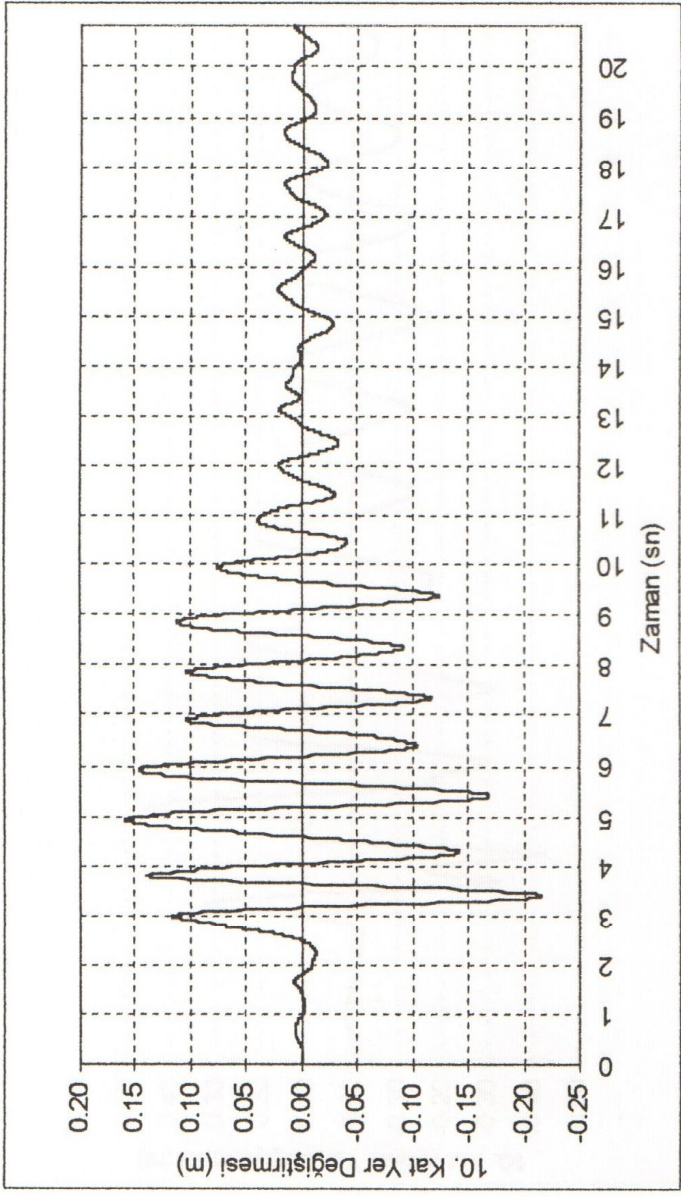
Şekil A.1: Elde edilen 10 kHz periyotlu bir sinyal için zamanla değişim.

EK A

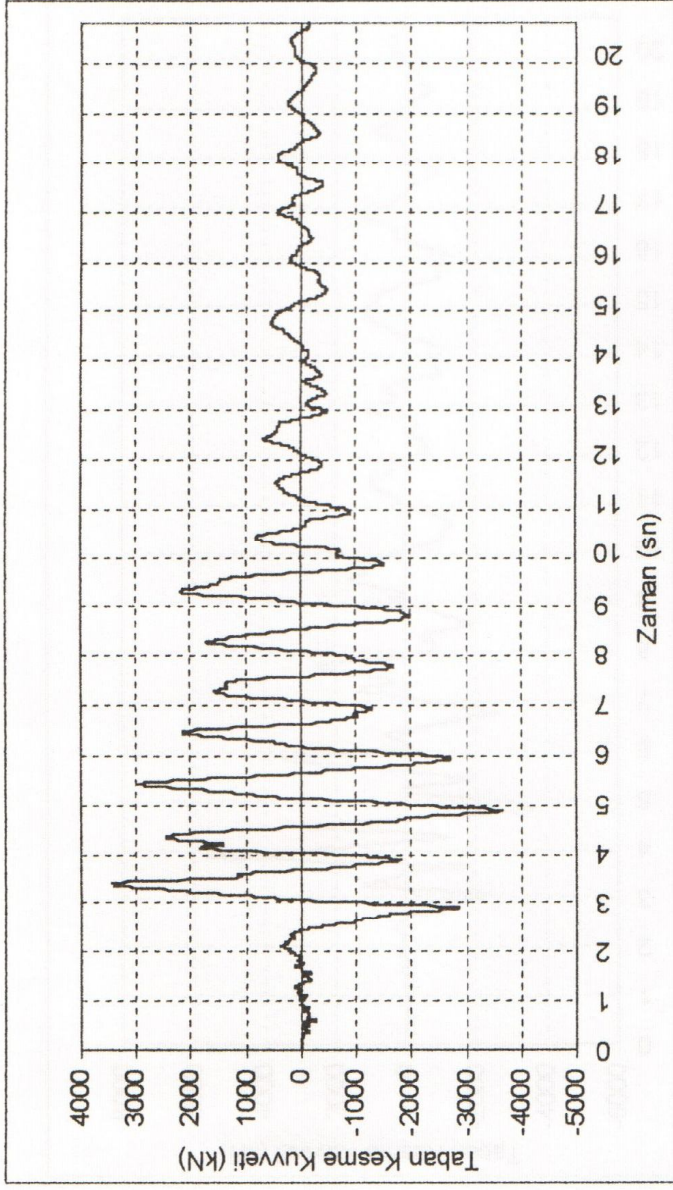
Sayısal Örnek Çözümlerinden Elde Edilen Şekiller



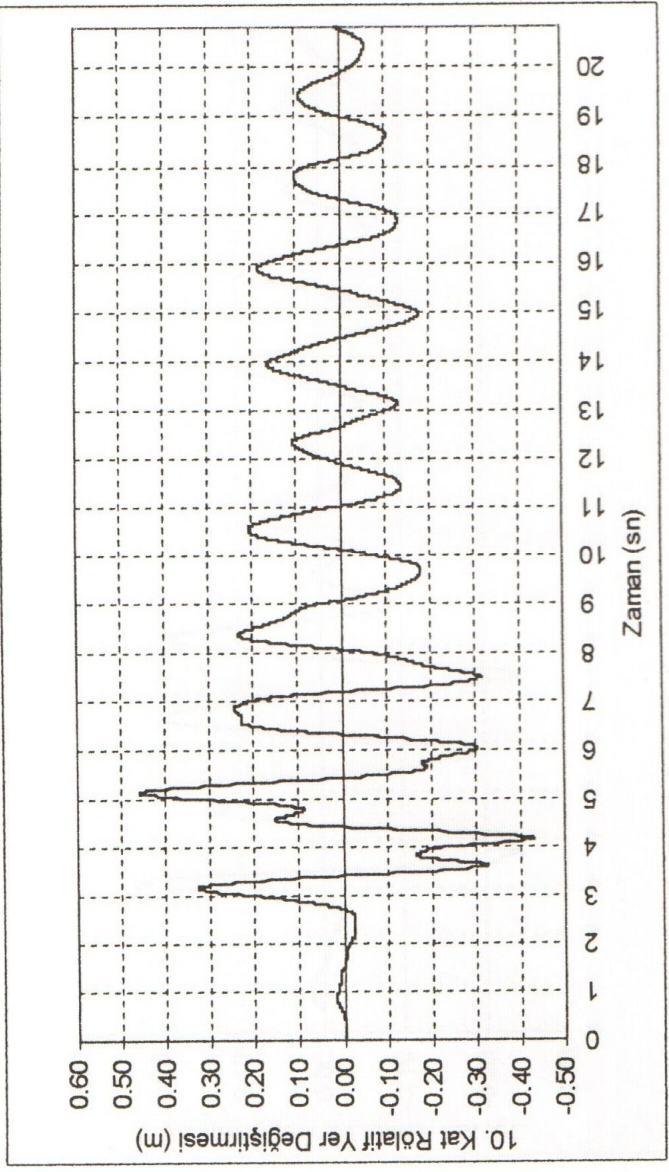
Şekil A.2: Elde edilen 10 kHz periyotlu bir sinyal için zamanla değişim.



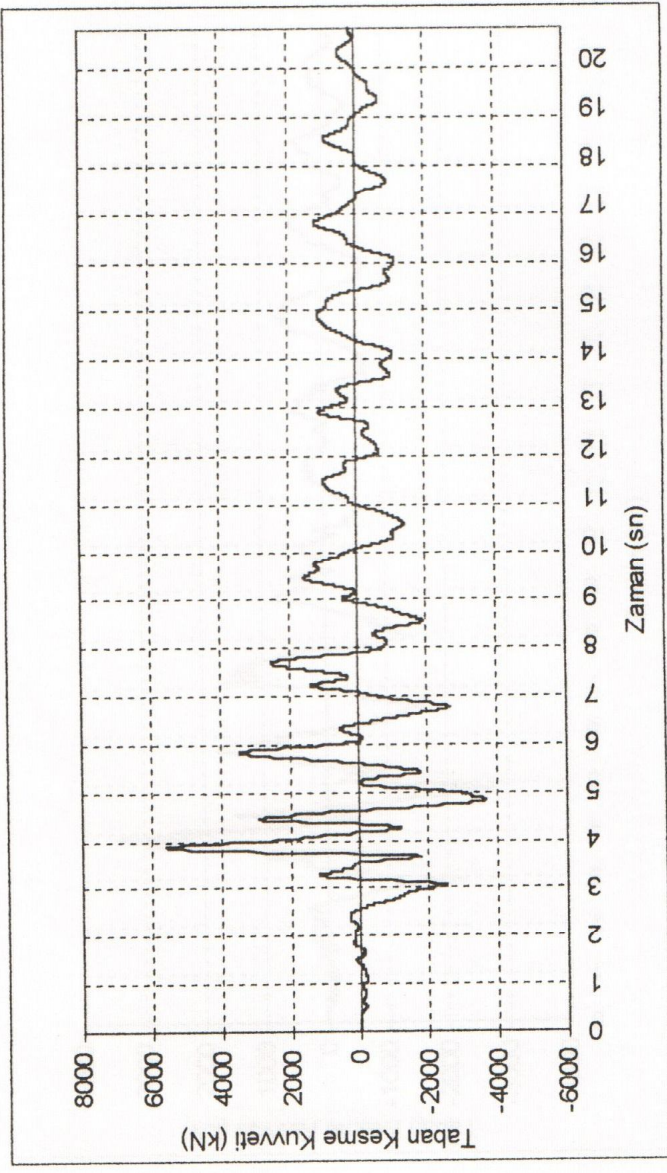
Şekil A.1 : Rijit zemin için 10.kat yer değiştirmesinin zamanla değişimi



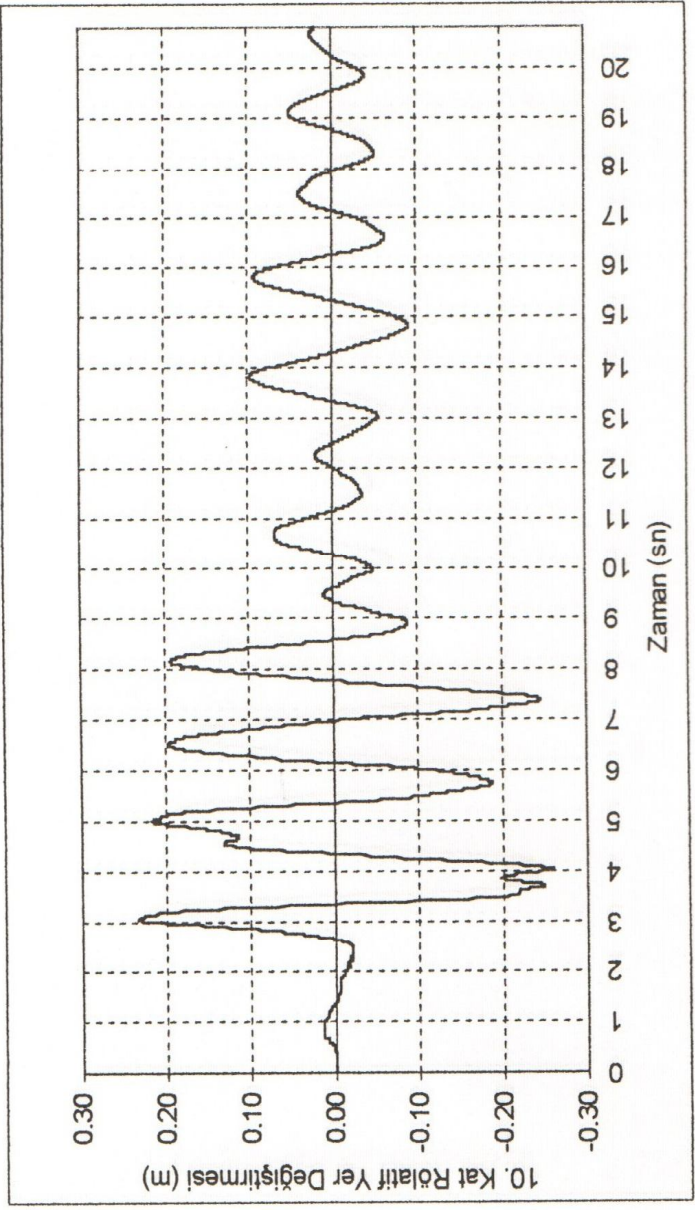
Şekil A.2 : Rijit zemin için 10 katlı çerçevedeki taban kesme kuvvetinin zamanla değişimi



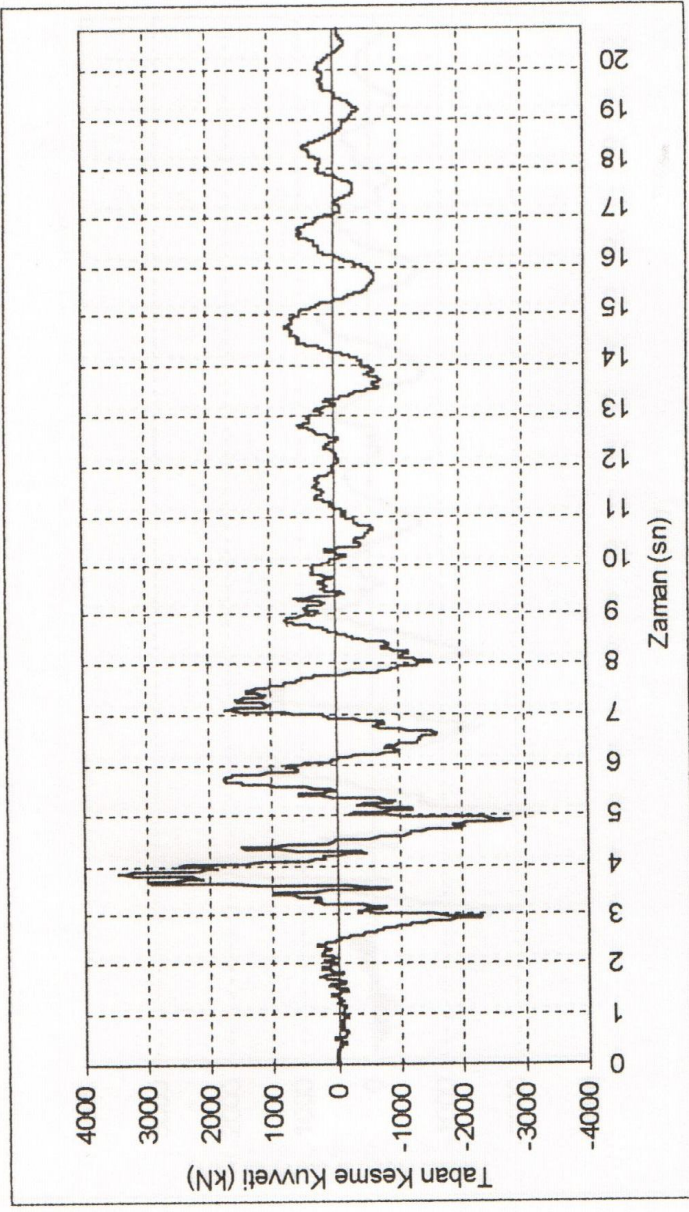
Şekil A.3 : Kayma dalgası hızı 200 m/sn için 10.katın temele göre rölatif yer değiştirmesinin zamanla değişimi



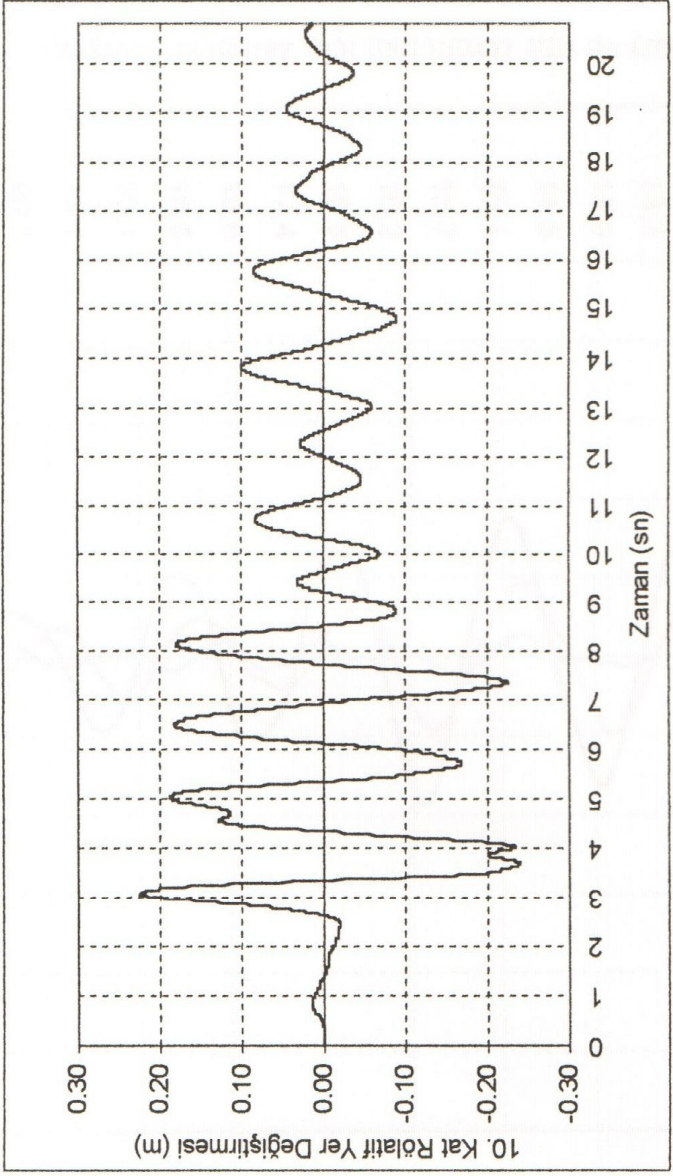
Şekil A.4 : Kayma dalgası hızı 200 m/sn için 10 katlı çerçevedeki taban kesme kuvvetinin zamanla değişimi



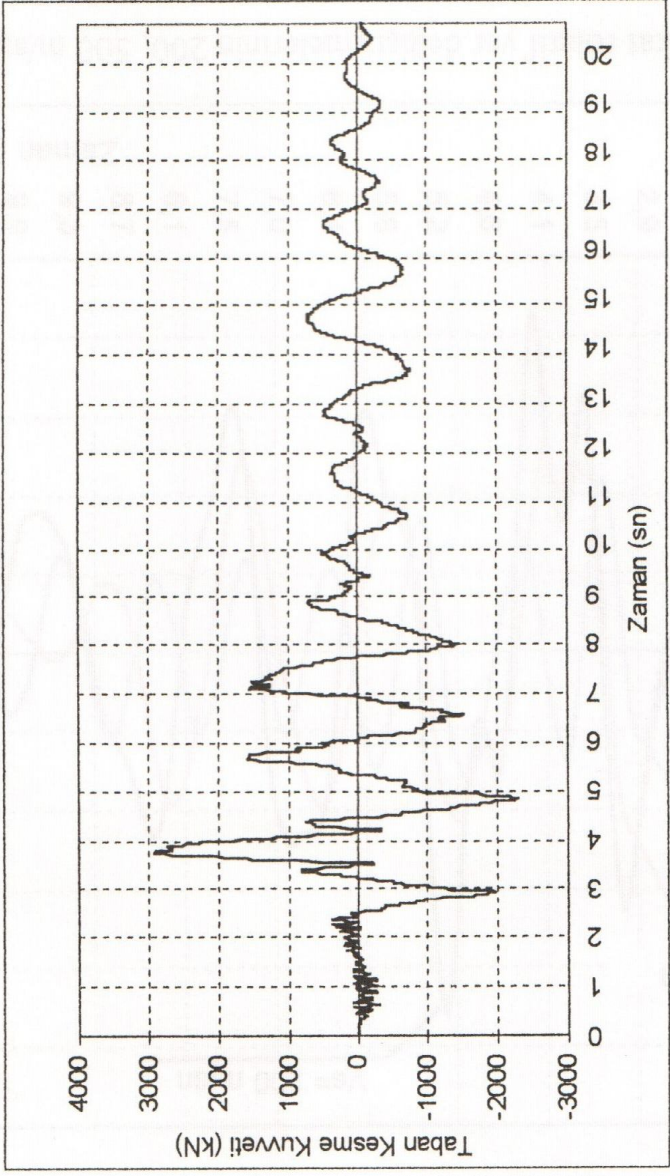
Şekil A.5 : Kayma dalgası hızı 500 m/sn için 10.katın temele göre rölatif yer değişiminin zamanla değişimi



Şekil A.6 : Kayma dalgası hızı 500 m/sn için 10 katlı çerçevedeki taban kesme kuvvetinin zamanla değişimi

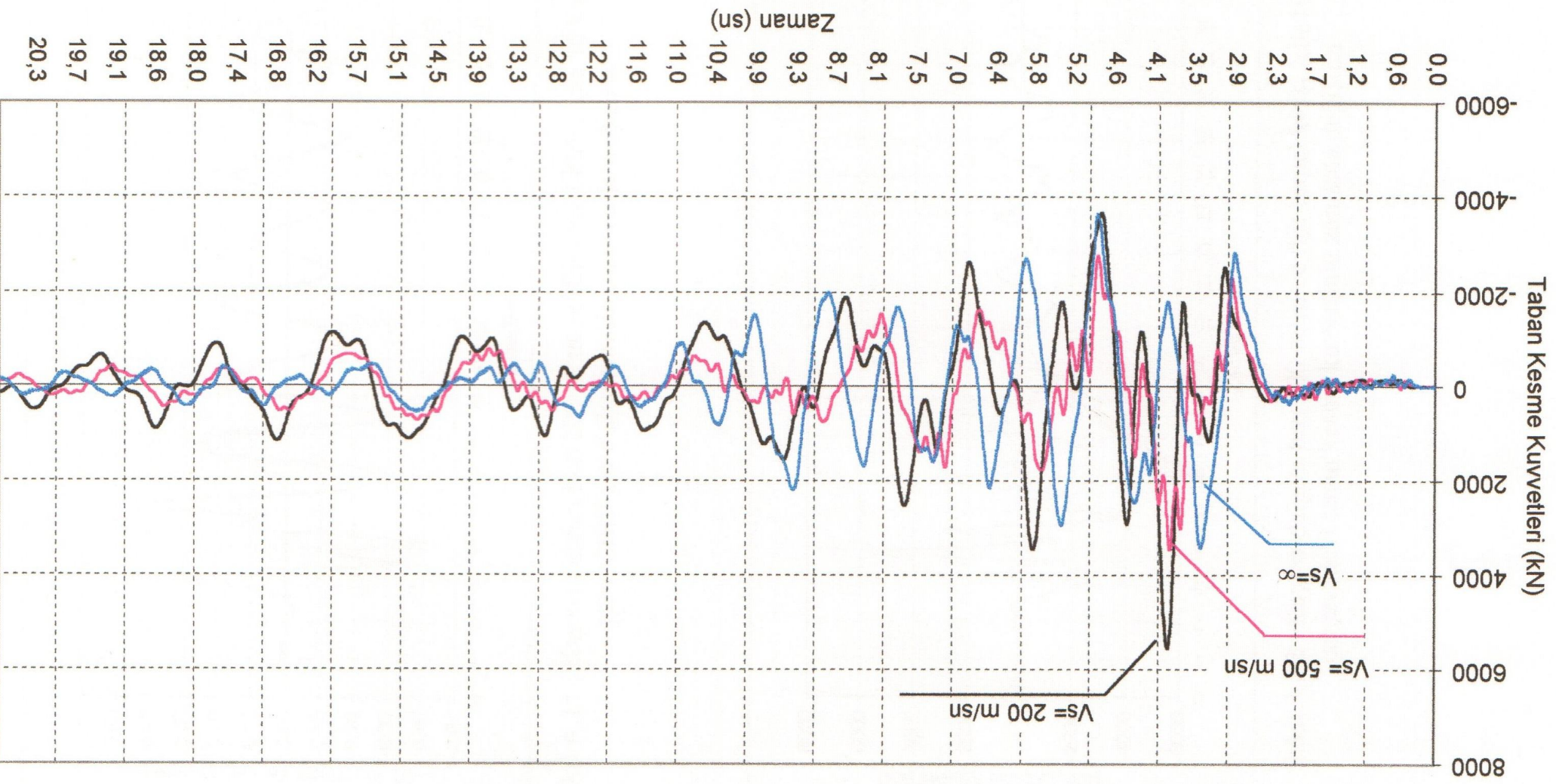


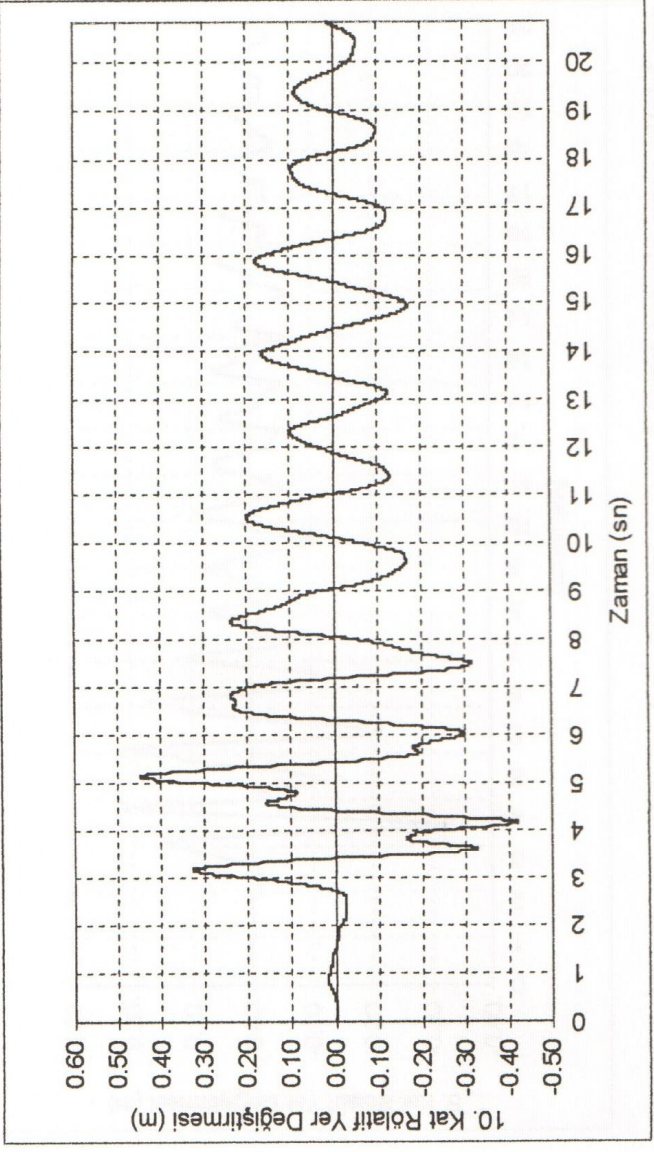
Şekil A.7 : Kayma dalgası hızı 1000 m/sn için 10.katın temele göre rölatif yer değişirmesinin zamanla değişimi



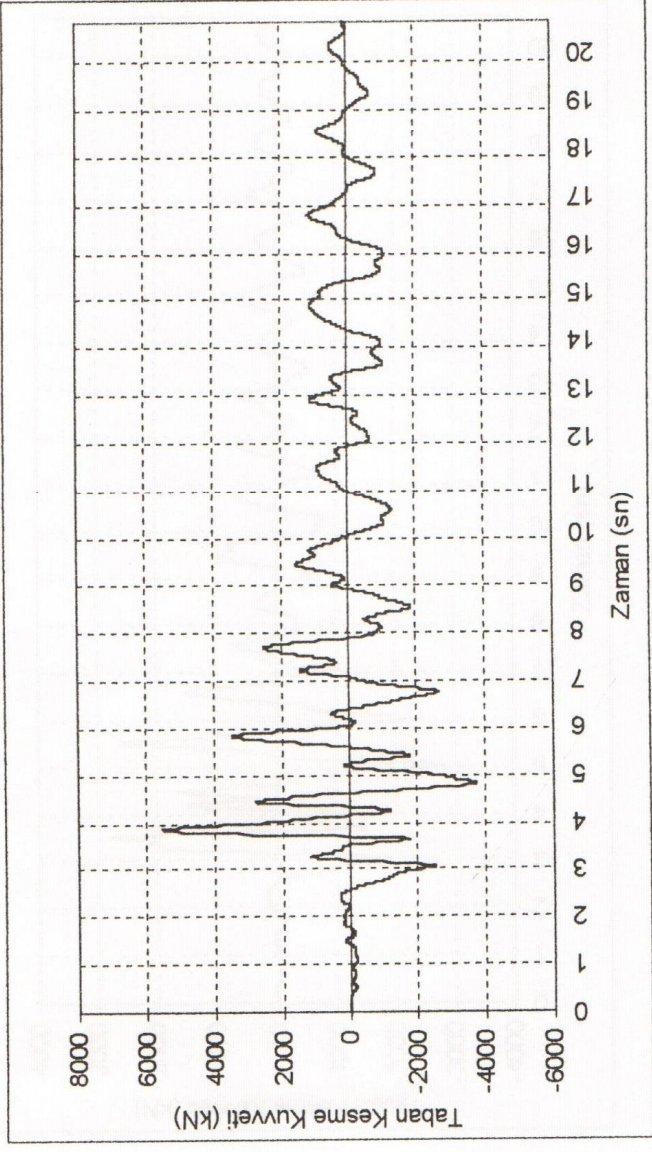
Şekil A.8 : Kayma dalgası hızı 1000 m/sn için 10 katlı çerçevedeki taban kesme kuvvetinin zamanla değişimi

Şekil A.10 : 10 katlı gerçekte taban kesme kuvvetlerinin 200, 500 m/sn kayma dalgası hızları için zemin hali için zamanla değişimi

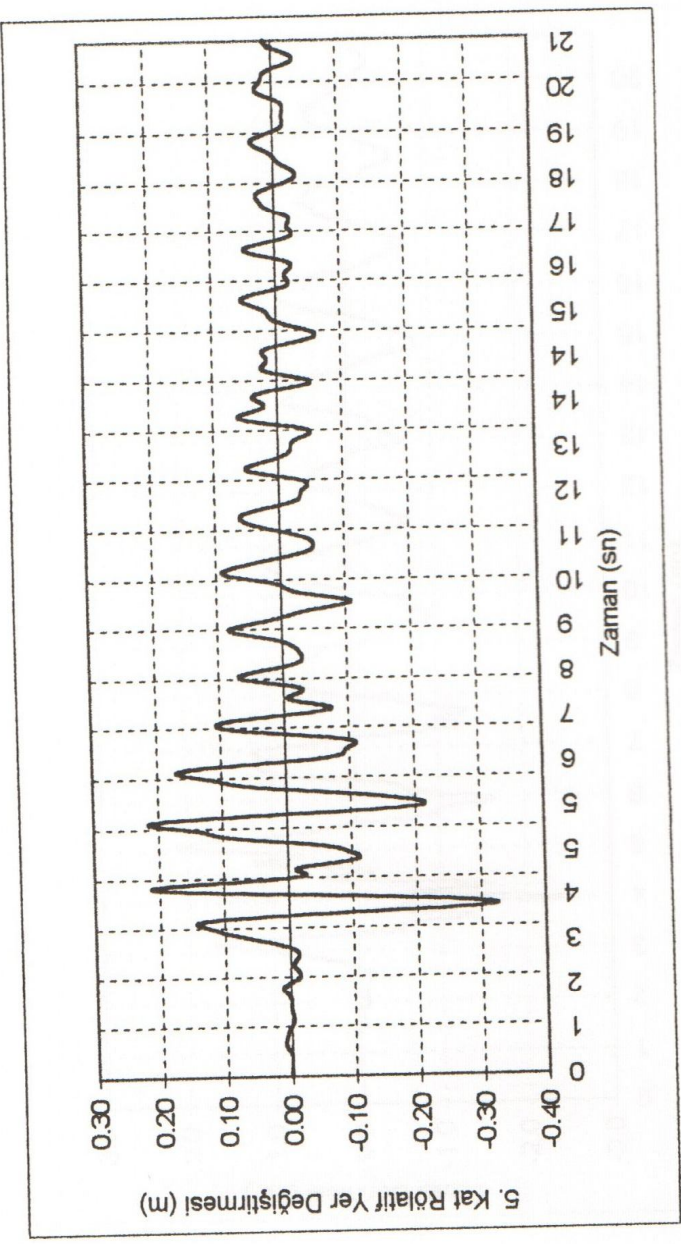




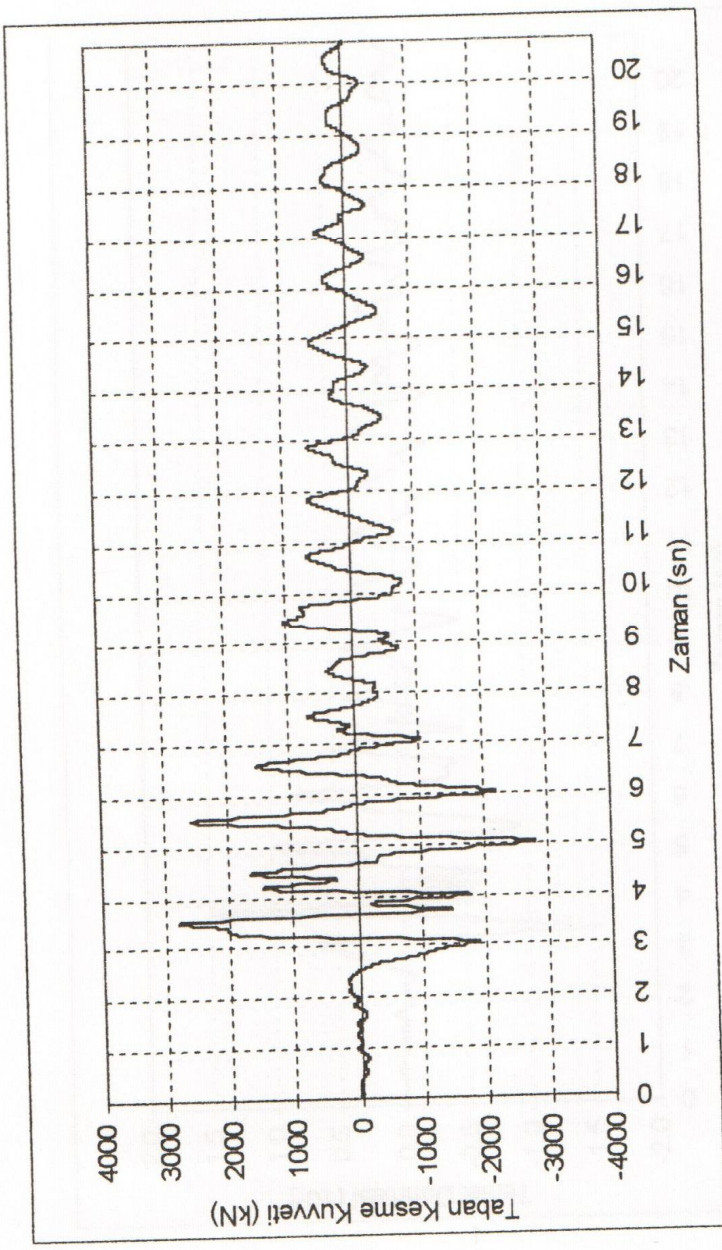
şekil A.11 : Kayma dalgası hızı 200 m/sn ve rijit temel kirişi için 10 katın temele göre rölatif yer değiştirmesinin zamanla değişimi



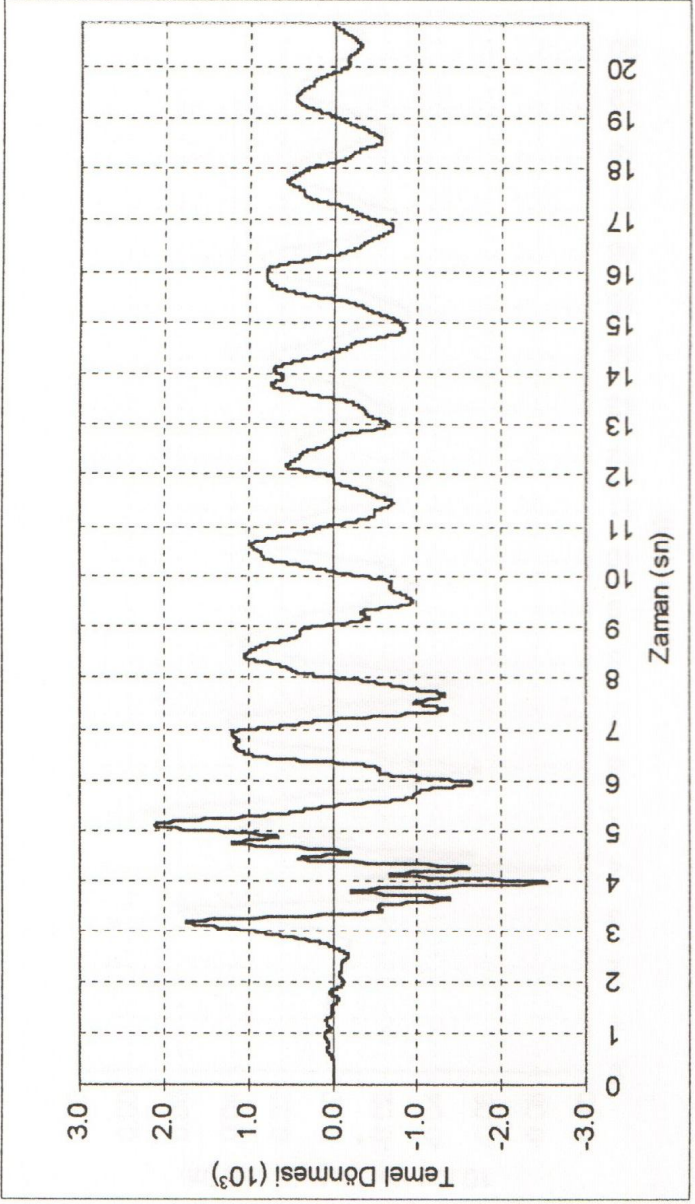
şekil A.12 : Kayma dalgası hızı 200 m/sn ve rijit temel kirişi için 10 katlı çerçevedeki taban kesme kuvvetinin zamanla değişimi



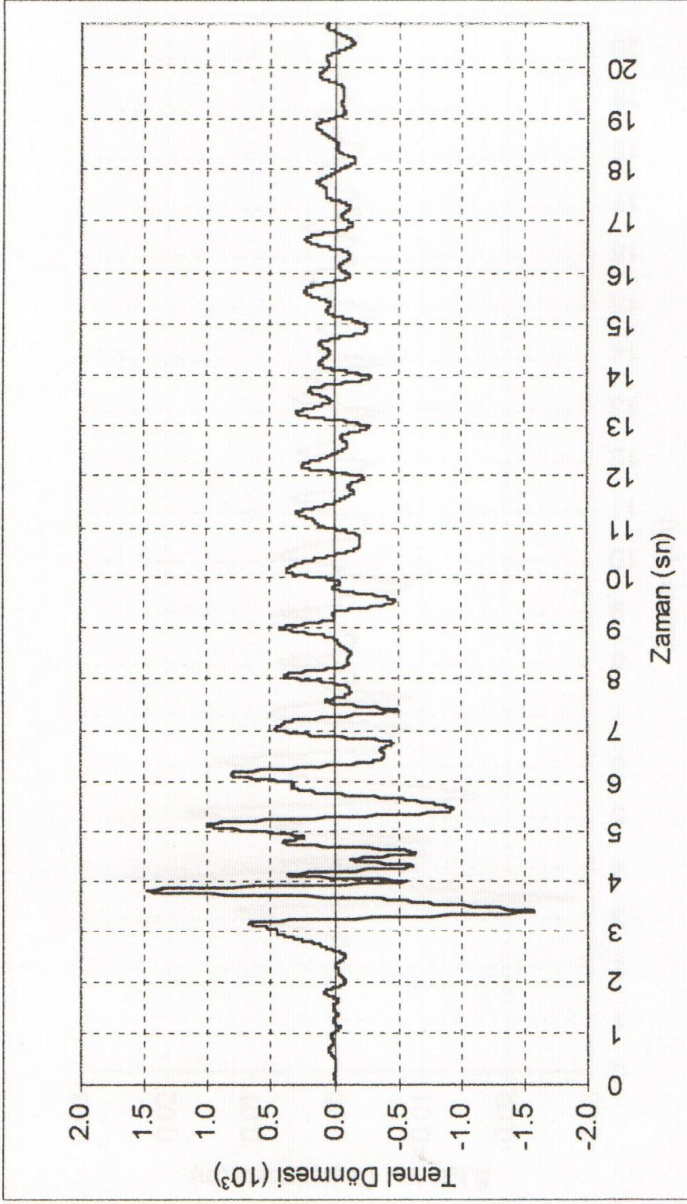
Şekil A.13 : Kayma dalgası hızı 200 m/sn için 5.katın temele göre rölatif yer değişiminin zamanla değişimi



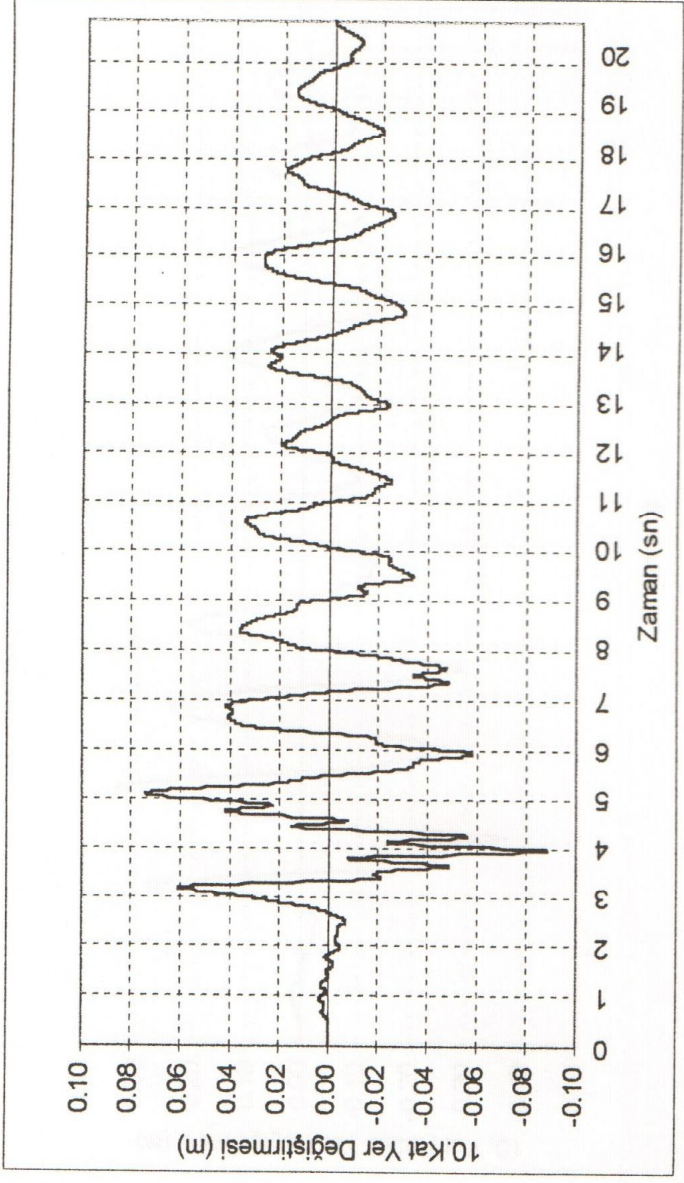
Şekil A.14 : Kayma dalgası hızı 200 m/sn için 5 katlı çerçevedeki taban kesme kuvvetinin zamanla değişimi



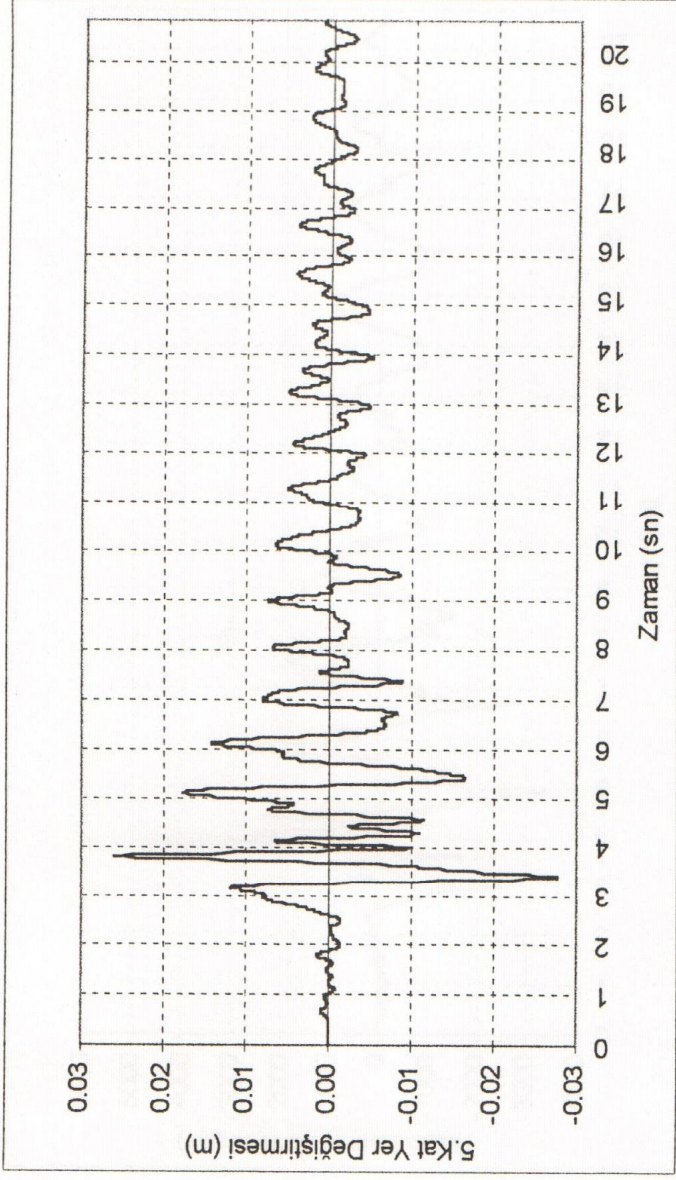
Şekil A.15 : Kayma dalgası hızı 200 m/sn için 10 katlı çerçeve temelinin ortalama dönmesinin zamanla değişimi



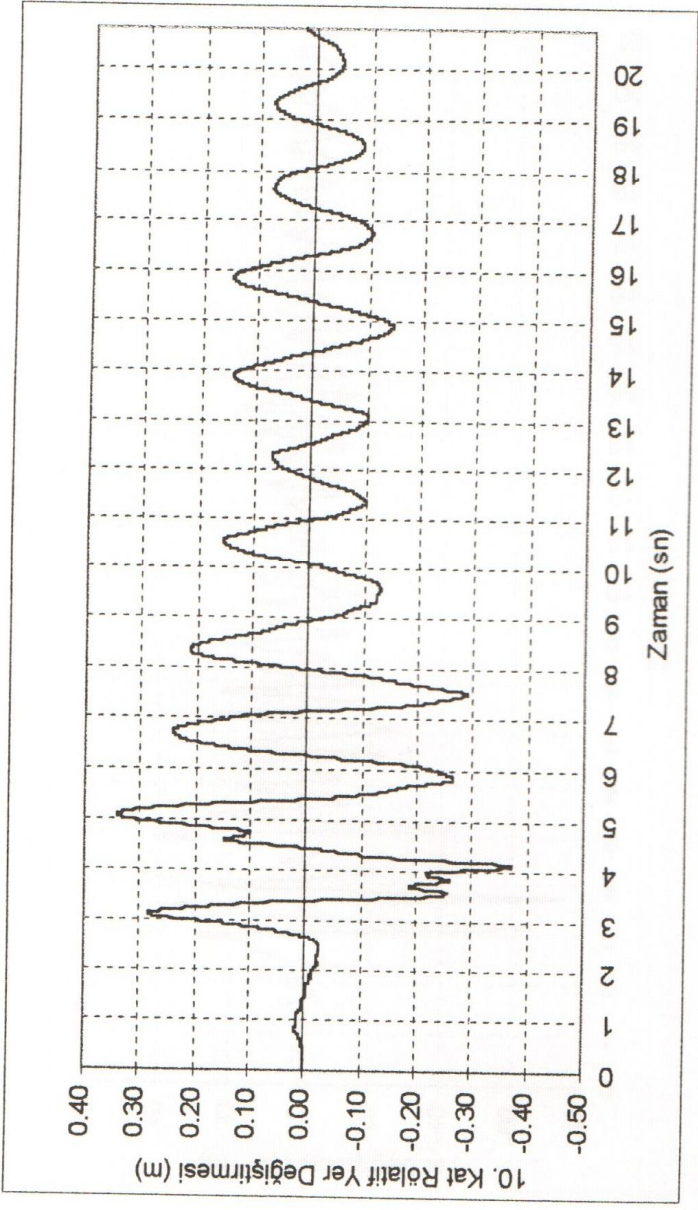
Şekil A.16 : Kayma dalgası hızı 200 m/sn için 5 katlı çerçeve temelinin ortalama dönmesinin zamanla değişimi



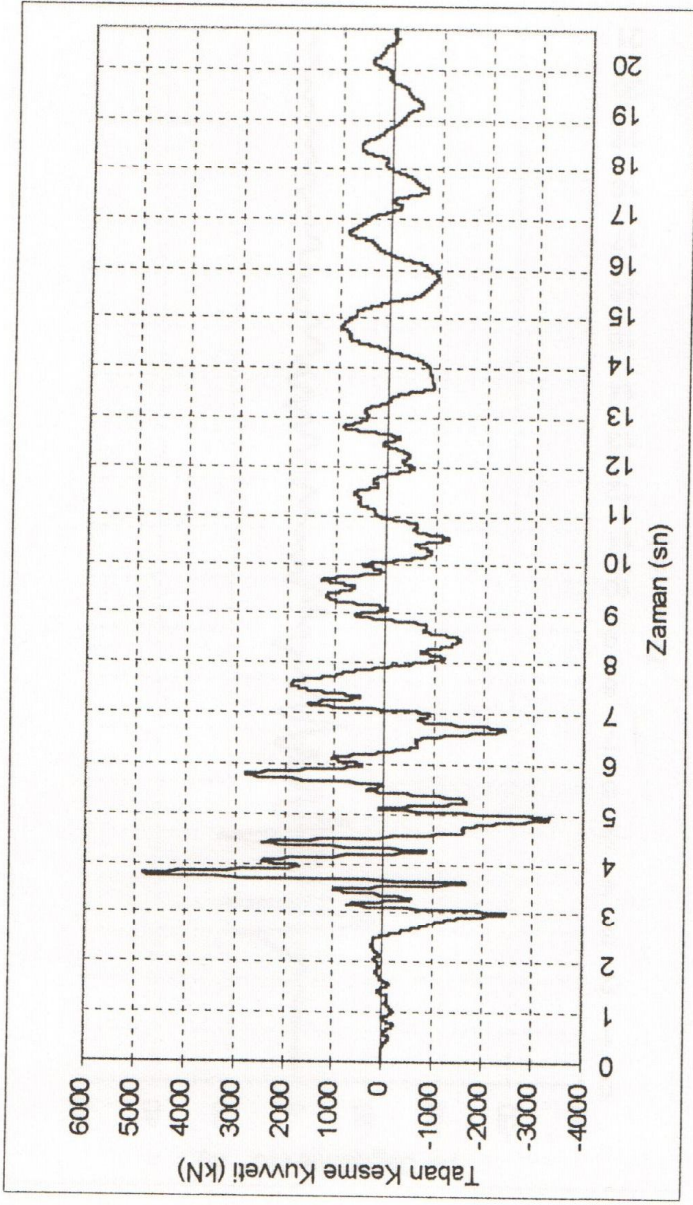
şekil A.17 : Kayma dalgası hızı 200 m/sn için 10 katlı çerçeve temelinin ortalama dönmesinden oluşan 10.kat yer değiştirmesinin zamanla değişimi



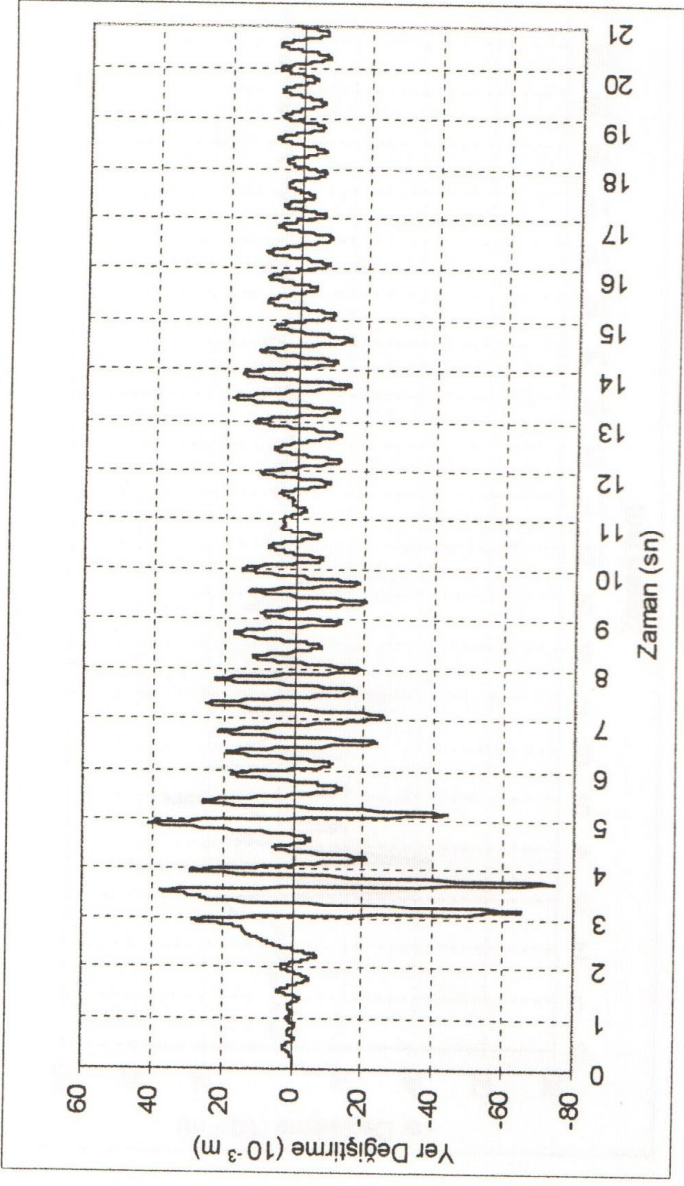
şekil A.18 : Kayma dalgası hızı 200 m/sn için 5 katlı çerçeve temelinin ortalama dönmesinden oluşan 5.kat yer değiştirmesinin zamanla değişimi



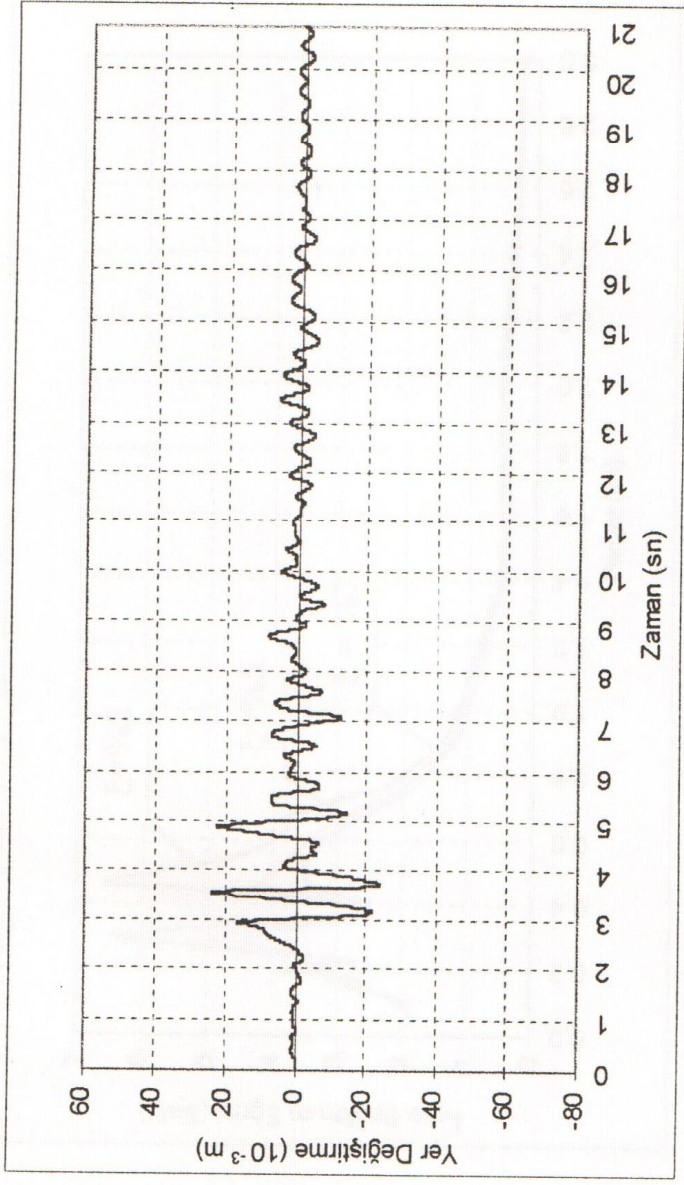
şekil A.19 : Kayma dalgası hızı 200 m/sn ve 500 m/sn olan iki tabakadan oluşan zemin için 10.katın temele göre rölatif yer değiştirmesinin zamanla değişimi



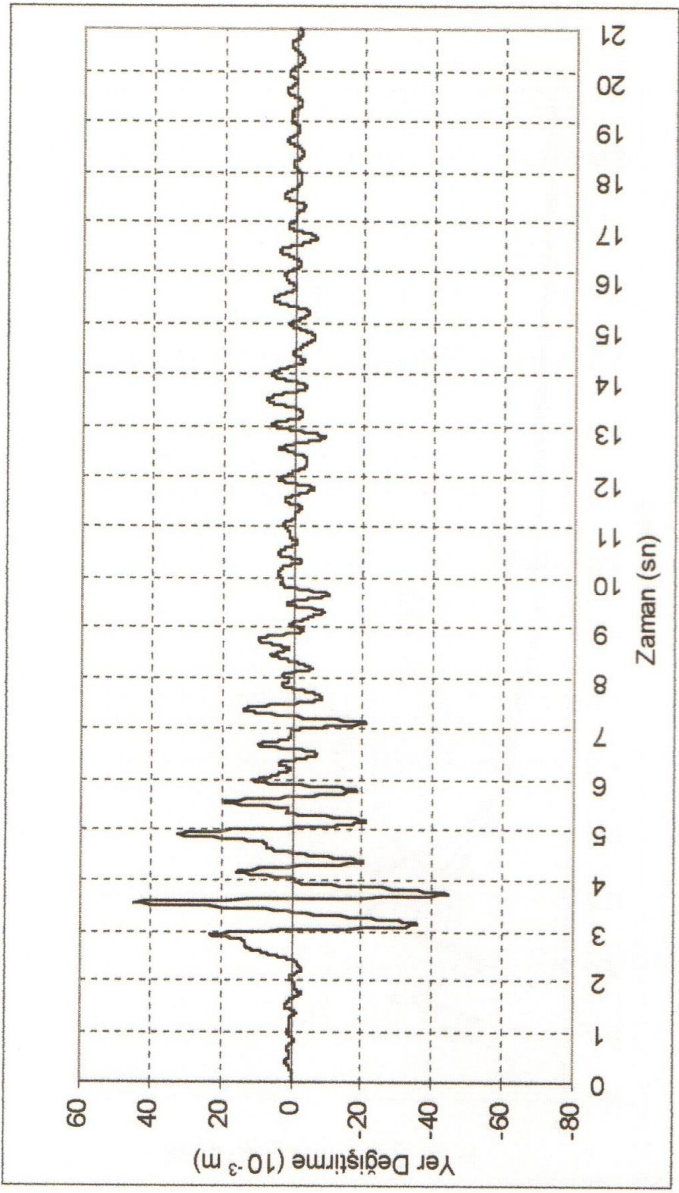
şekil A.20 : Kayma dalgası hızı 200 m/sn ve 500 m/sn olan iki tabakadan oluşan zemin için 10 katlı çerçeve'deki taban kesme kuvvetinin zamanla değişimi



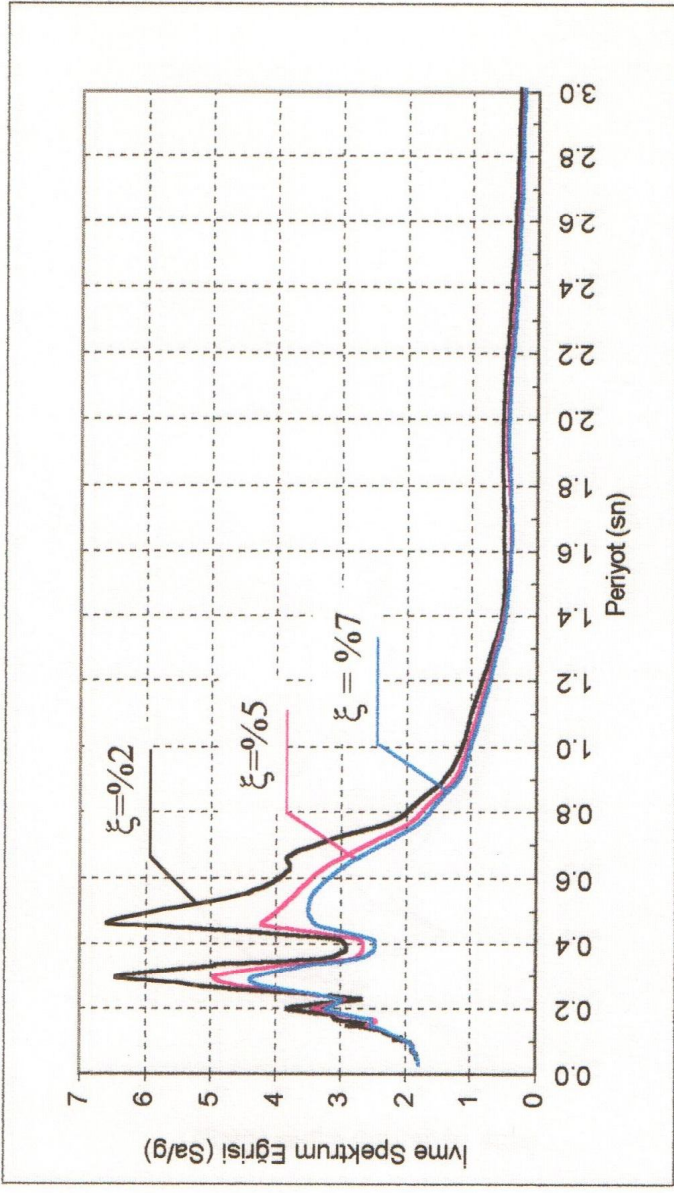
Şekil A.21 : Kayma dalgası hızı 200 m/sn için serbest alanda yüzey orta noktanın yer değişiminin zamanla değişimi



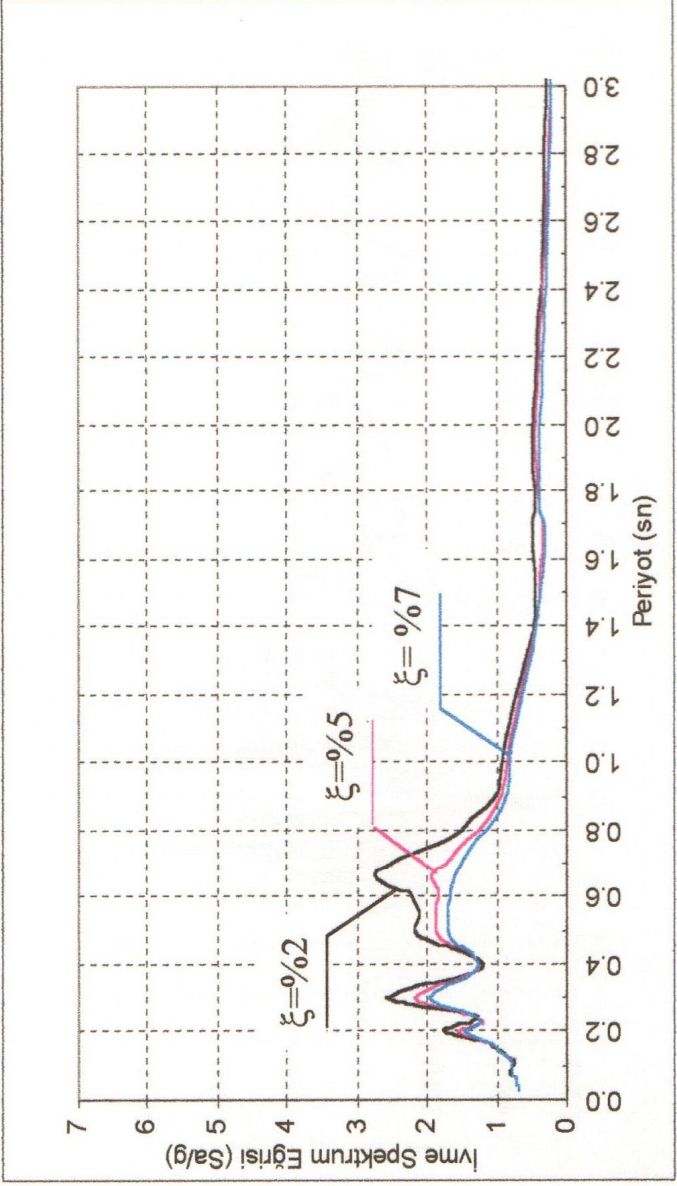
Şekil A.22 : Kayma dalgası hızı 200 m/sn için etkileşimli sistemde 146 m genişlikli zemin ağında kontrol noktası yer değişiminin zamanla değişimi



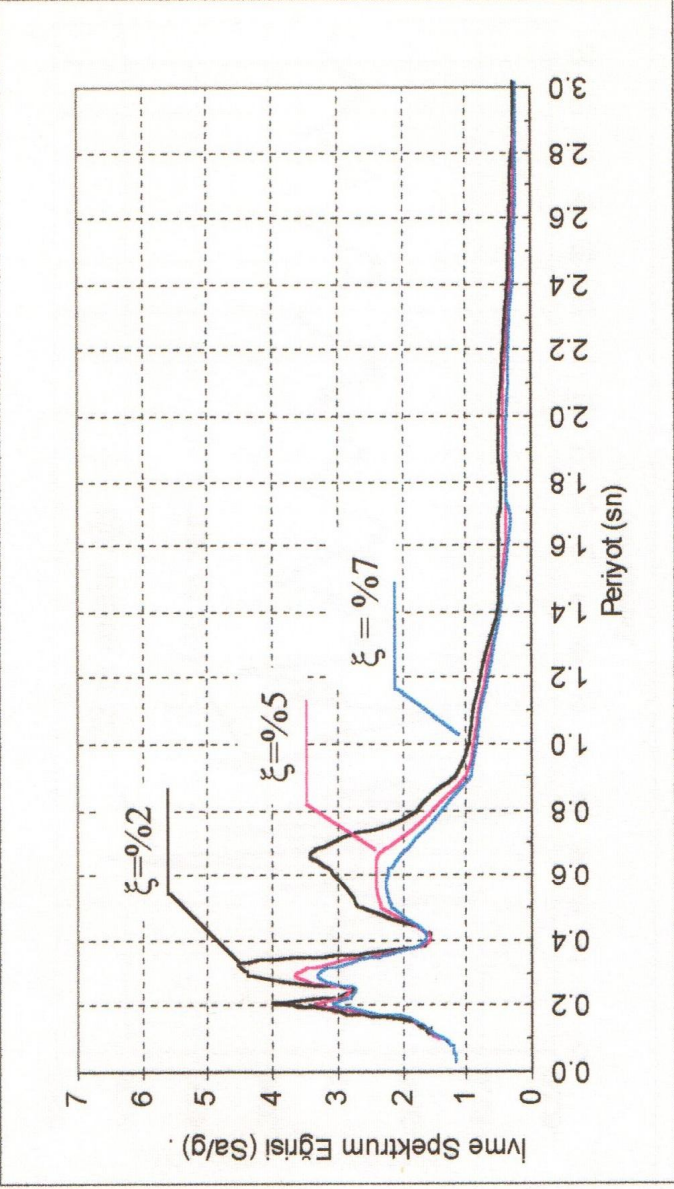
Şekil A.23 : Kayma dalgası hızı 200 m/sn için etkileşimli sistemde 222 m genişlikli zemin ağında kontrol noktası yer değiştirmesinin zamanla değişimi



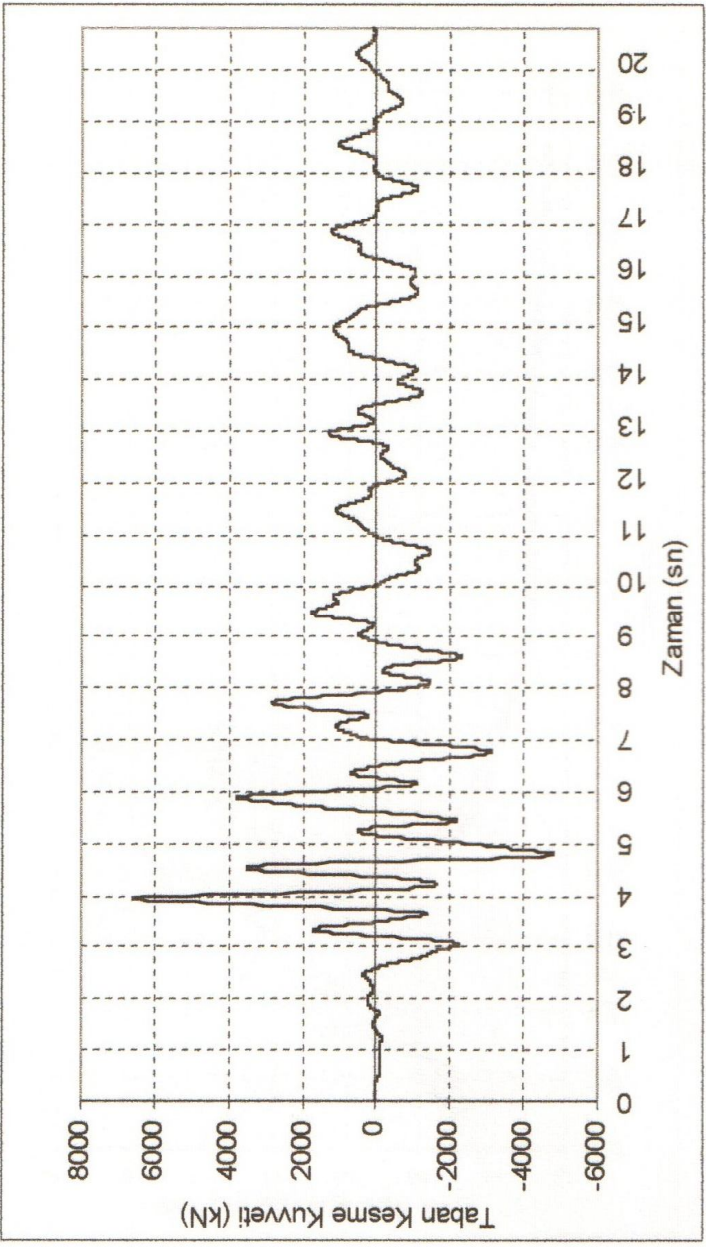
Şekil A.24 : Kayma dalgası hızı 200 m/sn için serbest alanda yüzey orta noktanın ivme spektrum eğrisi



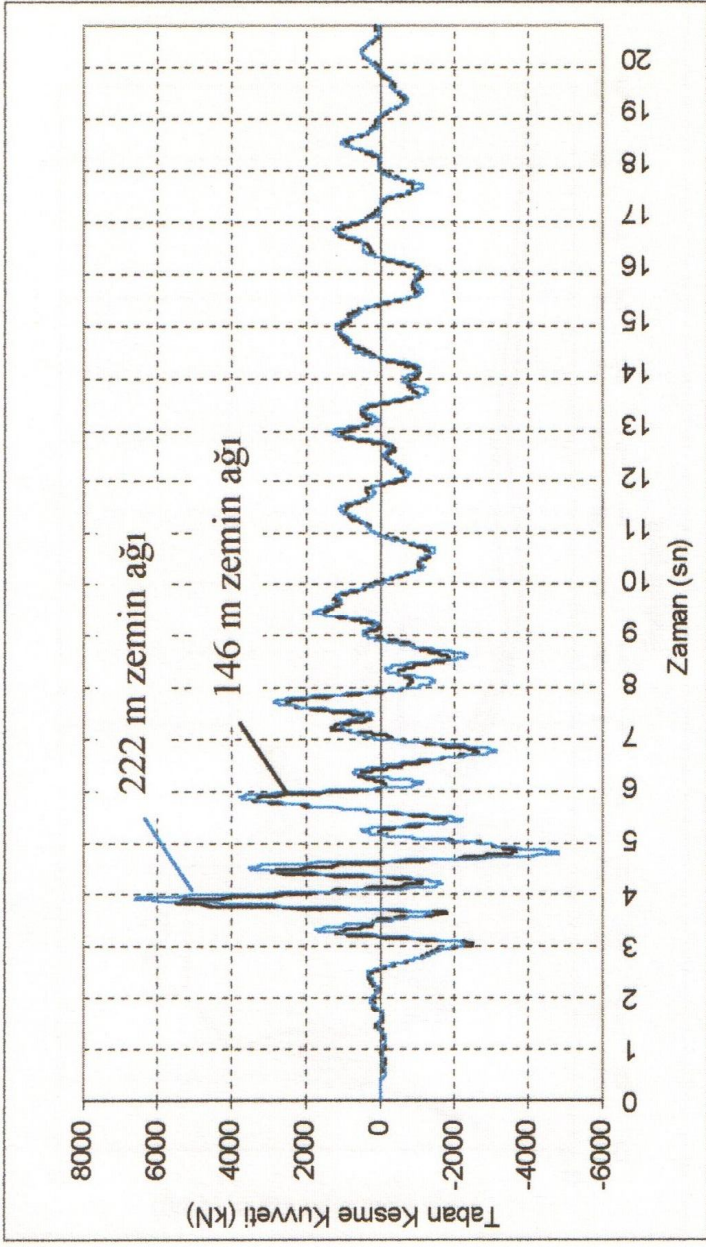
Şekil A.25 : Kayma dalgası hızı 200 m/sn için etkileşimli sistemde 146 m genişlikli zemin ağında kontrol noktası ivme spektrum eğrisi



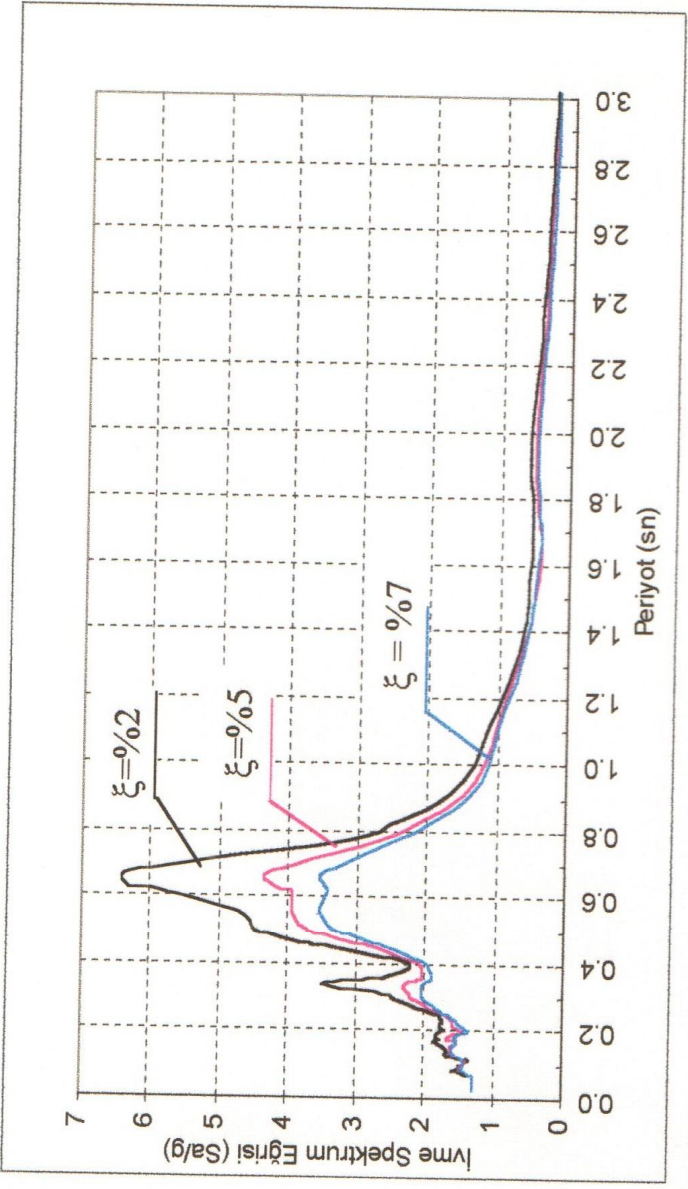
Şekil A.26 : Kayma dalgası hızı 200 m/sn için etkileşimli sistemde 222 m genişlikli zemin ağında kontrol noktası ivme spektrum eğrisi



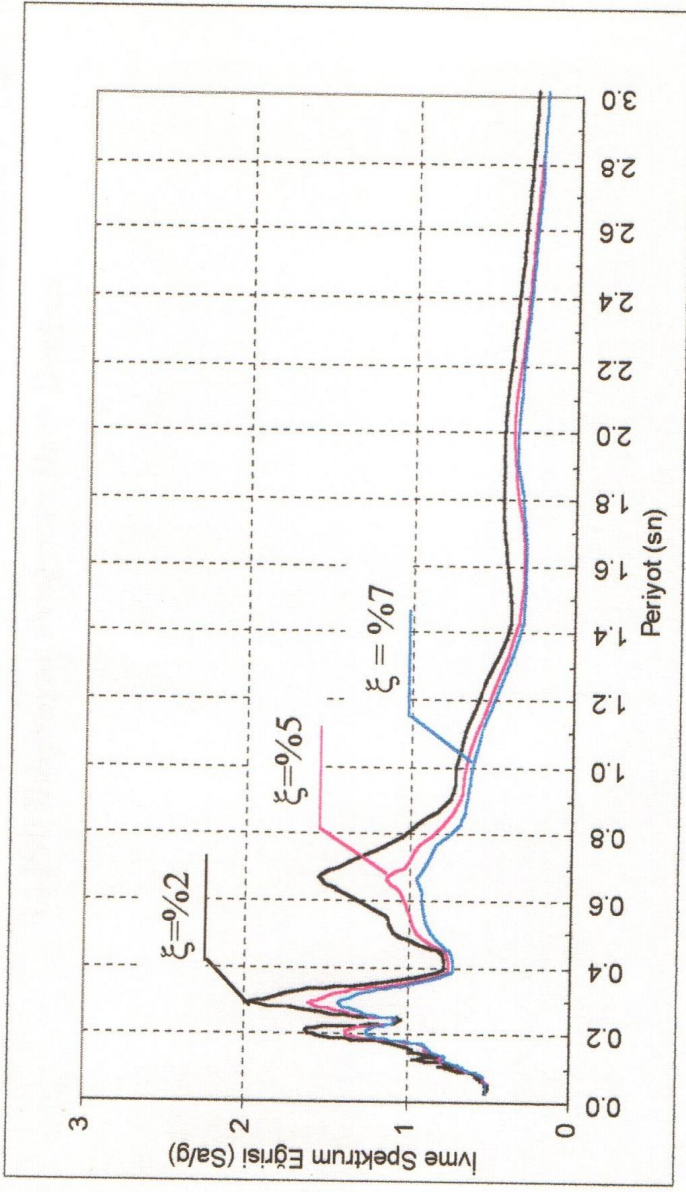
Şekil A.27 : Kayma dalgası hızı 200 m/sn için etkileşimli sistemde 222 m genişlikli zemin ağı halinde 10 katlı çerçevede taban kesme kuvvetinin zamanla değişimi



Şekil A.28 : Kayma dalgası hızı 200 m/sn için etkileşimli sistemde 222 m ve 146 m genişlikli zemin ağı için taban kesme kuvvetlerinin kıyaslaması



Şekil A.29 : Kayma dalgası hızı 200 m/sn için etkileşimli sistemde 222 m genişlikli zemin ağı halinde yapı tabanındaki ivme spektrum eğrisi



Şekil A.30 : 1992 Erzincan depremi doğu-batı doğrultusu ivme spektrum eğrisi

EK B

Kayma Dalgası Hızı 200 m/sn Olan Etkileşimli Sistem Çözümünde Kullanılan SAP90 Bilgisayar Programı Data Dosyası

YAPI-ZEMİN ETKİLEŞİMİ

C

SYSTEM

L=1 Z=15

C

JOINTS

1 X=0 Y=0

147 X=146

4117 X=0 Y=28

4263 X=146

Q=1,147,4117,4263,1,147

4264 X=62 Y=31.5

4309 X=62 Y=63 G=4264,4309,5

4265 X=67 Y=31.5

4310 X=67 Y=63 G=4265,4310,5

4266 X=73 Y=31.5

4311 X=73 Y=63 G=4266,4311,5

4267 X=79 Y=31.5

4312 X=79 Y=63 G=4267,4312,5

4268 X=84 Y=31.5

4313 X=84 Y=63 G=4268,4313,5

C

RESTRAINTS

1 147 1 R=1,1,1,1,1 :ANA KAYA

148 4116 1 R=0,0,1,1,1 :ZEMİN AGİ

4117 4176 1 R=0,0,1,1,1 :ZEMİN AGİ

4177 4203 1 R=0,0,1,1,0 :TEMEL KIRISI D.N.LARI

4204 4263 1 R=0,0,1,1,1 :ZEMİN AGİ

4264 4313 1 R=0,0,1,1,0 :ÇERÇEVE D.N.LARI

148 4117 147 R=0,1,1,1,1 :YANAL SINIR

294 4263 147 R=0,1,1,1,1 :YANAL SINIR

C

SPRINGS

148 4117 147 K=794280,0 :c= 200 m/sn İCİN YAY KATSAYILARI

294 4263 147 K=794280,0 :c= 200 m/sn İCİN YAY KATSAYILARI

C

CONSTRAINTS

4310 4313 1 C=4309,0,0,0,0 : 10. KAT HAREKETİ

4305 4308 1 C=4304,0,0,0,0 : 9. KAT HAREKETİ

4300 4303 1 C=4299,0,0,0,0 : 8. KAT HAREKETİ

4295 4298 1 C=4294,0,0,0,0 : 7. KAT HAREKETİ

4290 4293 1 C=4289,0,0,0,0 : 6. KAT HAREKETİ

4285 4288 1 C=4284,0,0,0,0 : 5. KAT HAREKETİ

4280 4283 1 C=4279,0,0,0,0 : 4. KAT HAREKETİ

4275 4278 1 C=4274,0,0,0,0 : 3. KAT HAREKETİ

4270 4273 1 C=4269,0,0,0,0 : 2. KAT HAREKETİ

4265 4268 1 C=4264,0,0,0,0 : 1. KAT HAREKETİ

C

FRAME

NM=6

1 SH=R T=0.60,0.25 E=2.85E7 M=34.35/9.81 :KIRISLER
 2 SH=R T=0.40,0.30 E=2.85E7 M=0.40*0.30*25/9.81 :KOLONLAR
 3 SH=R T=0.50,0.30 E=2.85E7 M=0.50*0.30*25/9.81 :KOLONLAR
 4 SH=R T=0.60,0.40 E=2.85E7 M=0.60*0.40*25/9.81 :KOLONLAR
 5 SH=R T=0.80,0.40 E=2.85E7 M=0.80*0.40*25/9.81 :KOLONLAR
 6 SH=T T=1.00,2.00,0.50,1.00 E=2.85E7 M=1.50*25/9.81 :TEMEL KIRIŞI

C KIRIŞLER

113 4309 4310 M=1,1,1 LP=1,0 G=3,1,1,1
 104 4304 4305 M=1,1,1 LP=1,0 G=3,1,1,1
 95 4299 4300 M=1,1,1 LP=1,0 G=3,1,1,1
 86 4294 4295 M=1,1,1 LP=1,0 G=3,1,1,1
 77 4289 4290 M=1,1,1 LP=1,0 G=3,1,1,1
 68 4284 4285 M=1,1,1 LP=1,0 G=3,1,1,1
 59 4279 4280 M=1,1,1 LP=1,0 G=3,1,1,1
 50 4274 4275 M=1,1,1 LP=1,0 G=3,1,1,1
 41 4269 4270 M=1,1,1 LP=1,0 G=3,1,1,1
 32 4264 4265 M=1,1,1 LP=1,0 G=3,1,1,1

C KOLONLAR

108 4304 4309 M=2,2,1 LP=1,0 G=4,1,1,1
 99 4299 4304 M=2,2,1 LP=1,0 G=4,1,1,1
 90 4294 4299 M=2,2,1 LP=1,0 G=4,1,1,1
 81 4289 4294 M=2,2,1 LP=1,0 G=4,1,1,1
 72 4284 4289 M=2,2,1 LP=1,0 G=1,4,4,4
 73 4285 4290 M=3,3,1 LP=1,0 G=2,1,1,1
 63 4279 4284 M=2,2,1 LP=1,0 G=1,4,4,4
 64 4280 4285 M=3,3,1 LP=1,0 G=2,1,1,1
 54 4274 4279 M=3,3,1 LP=1,0 G=1,4,4,4
 55 4275 4280 M=4,4,1 LP=1,0 G=2,1,1,1
 45 4269 4274 M=3,3,1 LP=1,0 G=1,4,4,4
 46 4270 4275 M=4,4,1 LP=1,0 G=2,1,1,1
 36 4264 4269 M=4,4,1 LP=1,0 G=1,4,4,4
 37 4265 4270 M=5,5,1 LP=1,0 G=2,1,1,1
 27 4179 4264 M=4,4,1 LP=1,0 G=1,4,22,4
 28 4184 4265 M=5,5,1 LP=1,0 G=2,1,6,1

C TEMEL KIRIŞI

1 4177 4178 M=6,6,1 LP=1,0 G=25,1,1,1

C

ASOLID

NM=1 ETYPE=1 MAXN=1

1 NUMT=1 M=18/9.81

T=0 E=195719,195719 U=1/3,1/3 G=73395 :c=200 m/sn

1 JQ=1,2,148,149 M=1 TZ=0 TH=6 G=146,28 LP=1

C

TIMEH

ATYPE=0 NSTEP=2083 DT=0.01 NF=1 D=0.07 NV=15

NF=1 NPL=1 DT=0.01 NAM=erzcew.txt PRIN=1

LC=-1 NF=1 S=1 ANGLE=0 AT=0

ÖZGEÇMİŞ

1975 yılında Bursa’da doğdu. Gençlik yılları ile ilk, orta ve lise eğitimini 1981-1992 yılları arasında Bursa’nın Gemlik ilçesinde tamamladı. 1992 yılında İstanbul Teknik Üniversitesi İnşaat Fakültesi İnşaat Mühendisliği bölümünde lisans eğitimine başladı. 1997 yılı yaz döneminde İnşaat Mühendisliği Bölüm birincisi olarak mezun oldu. Aynı yıl İstanbul Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü İnşaat Mühendisliği Ana Bilim Dalı Yapı Mühendisliği Programında Yüksek Lisans eğitimine başladı. Yüksek lisans eğitimi sırasında Erdemli Proje Müşavirlik Ltd. Şti.’nde İnşaat Mühendisi olarak çalışmıştır.