

**ALÜVYON TABANLI VADİLERİN KENAR BÖLGELERİNDE  
GÖZLENEN DEPREM ŞİDDETİ ARTIMLARININ ANALİTİK  
YAKLAŞIM VE BİR MODEL DENEYİ İLE İRDELENMESİ**

**Ahmet Hakan MUTLU**

**DOKTORA TEZİ  
İNŞAAT MÜHENDİSLİĞİ**

**GAZİ ÜNİVERSİTESİ  
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

**OCAK 2008  
ANKARA**

Ahmet Hakan MUTLU tarafından hazırlanan ALÜVYON TABANLI  
VADİLERİN KENAR BÖLGELERİNDE GÖZLENEN DEPREM ŞİDDETİ  
ARTIMLARININ ANALİTİK YAKLAŞIM VE BİR MODEL DENEYİ İLE  
İRDELENMESİ adlı bu tezin Doktora tezi olarak uygun olduğunu onaylarım.

Prof. Dr. Süleyman PAMPAL .....  
Tez Danışmanı, İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı

Bu çalışma, jürimiz tarafından oy birliği ile İnşaat Mühendisliği Anabilim  
Dalında Doktora tezi olarak kabul edilmiştir.

Prof. Dr. Turgut TOKDEMİR .....  
Mühendislik Bilimleri, ODTÜ  
Prof. Dr. Süleyman PAMPAL .....  
İnşaat Mühendisliği, Gazi Üniversitesi  
Prof. Dr. Nail ÜNSAL .....  
İnşaat Mühendisliği, Gazi Üniversitesi  
Doç. Dr. Mehmet ORHAN .....  
İnşaat Mühendisliği, Gazi Üniversitesi  
Dr. dipl. ing. Ünsal SOYGÜR .....  
İnşaat Mühendisliği, Gazi Üniversitesi

21/01/2008

Bu tez ile G.Ü. Fen Bilimleri Enstitüsü Yönetim Kurulu Doktora derecesini  
onamıştır.

Prof. Dr. Nermin ERTAN .....  
Fen Bilimleri Enstitüsü Müdürü

## **TEZ BİLDİRİMİ**

Tez içindeki bütün bilgilerin etik davranış ve akademik kurallar çerçevesinde elde edilerek sunulduğunu, ayrıca tez yazım kurallarına uygun olarak hazırlanan bu çalışmada orjinal olmayan her türlü kaynağa eksiksiz atıf yapıldığını bildiririm.

Ahmet Hakan MUTLU

**ALÜVYON TABANLI VADİLERİN KENAR BÖLGELERİNDE GÖZLENEN  
DEPREM ŞİDDETİ ARTIMLARININ ANALİTİK YAKLAŞIM VE BİR  
MODEL DENEYİ İLE İRDELENMESİ  
(Doktora Tezi)**

**GAZİ ÜNİVERSİTESİ  
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ  
Ocak 2008**

**ÖZET**

Sismik dalga hareketi üzerindeki topografik etki, birçok araştırmaya konu olmuştur. Bu çalışmada, alüvyon tabanlı vadilerin kenar bölgelerinde gözlenen deprem şiddeti artımları sonlu elemanlar yöntemi ve model deneyleri ile irdelenmeye çalışılmıştır. Çalışmada, biri üçgen, diğerleri trapez kesitli toplam beş farklı vadi eğimi ( $17^\circ$ ,  $22^\circ$ ,  $27^\circ$ ,  $37^\circ$ ,  $45^\circ$ ) üzerinde sonlu eleman modeli oluşturulmuş ve uygulanan bilgisayar programı (QUAD4M) ile; vadi kenarı, vadi eksenini ve ikisinin arasında bir noktada elde edilen ivme-zaman geçmişleri Fourier Genlik Spektrumları'na dönüştürülmüştür. Seçilen üç noktadaki ve anakayadaki genlik-frekans değişim değerleri, deprem süresi dört evreye bölünerek, bu evreler için ayrı ayrı irdelenmiştir. Yapılan dinamik analiz sonucunda deprem süresinin dört farklı evresinde, vadi üzerinde alınan üç farklı noktada, vadi eğimi değişimlerinin etkisi irdelenmeye çalışılmıştır. Ayrıca, laboratuvarda iki farklı malzeme kullanılarak model uygulaması yapılmıştır. İlk modelde, anakaya alçıyla temsil edilerek dinamik analizlerde kabul gören anakayanın sonsuz rijitliği elde edilmiş, ikinci modelde ise anakaya bu kez silikon-kum karışımı bir malzeme ile temsil edilerek doğadaki elastik özelliklere yakın anakaya modeli elde edilmeye çalışılmıştır. Her iki model için de alüvyon tabaka polivinilalkol çözeltisi ile boraks (sodyumtetraborat –  $\text{Na}_2\text{B}_4\text{O}_7$ ) çözeltisi belirli oranlarda karıştırılarak jel kıvamında bir malzeme ile temsil edilmeye çalışılmıştır. Modeller üzerinde farklı frekanslarda sinüzoidal

**dalga üretilerek sonlu eleman analizlerinde seçilen aynı üç noktada ivme değişimleri ile ilişkileri araştırılmıştır. Model deneylerinden elde edilen sonuçlar sonlu elemanlar uygulaması ile elde edilen sonuçlarla karşılaştırılmıştır.**

**Bilim Kodu : 911.1.050**  
**Anahtar Kelimeler : Topografik etki, vadi eğimi, sismik dalgalarda yansıma**  
**Sayfa Adedi : 127**  
**Tez Yöneticisi : Prof. Dr. Süleyman Pampal**

**EXAMINATION OF EARTHQUAKE INTENSITY INCREMENTS IN SIDE  
ZONES OF VALLEYS WITH ALLUVIAL BASINS BY AN ANALYTICAL  
APPROACH AND A MODEL EXPERIMENT**

**(Ph. D. Thesis)**

**Ahmet Hakan MUTLU**

**GAZİ UNIVERSITY  
INSTITUTE OF SCIENCE AND TECHNOLOGY**

**January 2008**

**ABSTRACT**

The effect of topography on the seismic wave motion has been of interest to many studies. In this study, the earthquake intensity increments (amplification) in side zones of valleys with alluvial basins were investigated using finite element method and model experiments. In the study, finite element models of valleys, one of which with a triangular cross section, and the rest with trapezoidal cross sections, with five different side slopes (17°, 22°, 27°, 37°, 45°) were formed. The acceleration-time histories obtained by the commercial finite element code (QUAD4M) at the valley sides, valley edges, and at intermediate points were converted to Fourier Amplitude Spectrums. The amplitude-frequency variations obtained at the three selected points of the valley as well as at the bedrock were investigated in each of the four selected phases of the earthquake time history. As a result of the performed dynamic analysis, the effect of the valley slope variation at three different points on the valley was examined at four separate phases of the earthquake time history. In addition, laboratory model experiments were performed using two different materials. In the first model, in order to represent the infinite rigidity assumed in the dynamic analyses, the model bedrock was formed of plaster. On the other hand, in the second model, the model bedrock was made up of a silicon-sand mixture to obtain elastic properties closer to those in the nature. For both models, the

**alluvial basin was represented by a material of gel-like consistency, obtained by mixing polyvinyl alcohol solution with borax (sodyumtetraborat –  $\text{Na}_2\text{B}_4\text{O}_7$ ) solution in predetermined proportions. By producing sinusoidal waves in various frequencies, accelelration time history measurements and correlations were performed on the models, at the same three points that were selected in the finite element analyses. The results obtained from the model experiments were compared with those obtianed from the finite element analyses.**

**Science Code : 911.1.050**  
**Key Words : Effects of topography, slope of valley, seismic reflection**  
**Page Numbers : 127**  
**Adviser : Prof. Dr. Süleyman PAMPAL**

## TEŞEKKÜR

Akademik hayata adım atmamı sağlayan ve desteği ile sürekli arkamda olduğu güvencesini veren sayın hocam Prof. Dr. Süleyman PAMPAL’a,  
 Yaklaşık on yıl süre ile asistanlığını yaptığım ve bu süre içinde hem teknik anlamda çok şey öğrendiğim, hem de hayat görüşü olarak ufkumu açan sayın hocam Dr. dipl. ing. Ünsal SOYGÜR’e,  
 Tez İzleme Komite Üyesi olarak bilgi ve tecrübesini aktaran sayın hocam Prof. Dr. Turgut TOKDEMİR’e,  
 Jürilerimde bulunarak, manevi desteğini hiçbir zaman esirgemeyen sayın hocam Prof. Dr. Nail ÜNSAL’a,  
 Tanışmamızın zaman itibariyle geç olduğunu düşündüğüm, ancak geç de olsa tanıştığım için kendimi şanslı hissettiğim, manevi desteği, bilgisi, deneyimi ile geç-gündüz yanımda olan sayın hocam İnş. Yük. Müh. Alkut AYTUN’a,  
 Deneyler sırasında ailesini ihmal etme pahasına bilgi ve becerisini paylaştan İnş. Yük. Müh. Uzman Aydın GÖKÇE’ye,  
 Katkılarından dolayı Uzman Faruk OGÜN’e,  
 Dr. Oğuzhan S. AKBAŞ, İnş. Yük. Müh. Deniz ARSLAN ve diğer çalışma arkadaşlarıma,  
 Çalışmalarım boyunca bana “katlanan” ve yokluğumu oğullarım ATA ve EGE’ye hissettirmeyen sevgili eşim Şengül MUTLU’ya,  
 Benimle birlikte aynı heyecanı taşıyarak ve maddi-manevi desteğini esirgemeyen babam Naim MUTLU’ya,  
 Ayrıca, çalışmamda kaynak olarak yararlandığım tüm araştırmacılara teşekkürü bir borç bilirim.

**ANNEM SABİHA MUTLU’ya...**



## İÇİNDEKİLER

### Sayfa

|                                                   |       |
|---------------------------------------------------|-------|
| ÖZET .....                                        | iv    |
| ABSTRACT .....                                    | vi    |
| TEŞEKKÜR.....                                     | viii  |
| İÇİNDEKİLER .....                                 | ix    |
| ÇİZELGELERİN LİSTESİ.....                         | xii   |
| ŞEKİLLERİN LİSTESİ .....                          | xiii  |
| RESİMLERİN LİSTESİ .....                          | xvi   |
| HARİTALARIN LİSTESİ.....                          | xvii  |
| SİMGELER VE KISALTMALAR.....                      | xviii |
| 1. GİRİŞ .....                                    | 1     |
| 2. TEMEL KAVRAMLAR.....                           | 5     |
| 2.1. Giriş.....                                   | 5     |
| 2.2. Ayrık Sistemlerin Dinamiği .....             | 5     |
| 2.2.1. Genel hareket denklemleri .....            | 6     |
| 2.3. Sismik Dalga Yayılımı.....                   | 11    |
| 2.3.1. Sismik dalgalar.....                       | 11    |
| 2.3.2. Sınırsız (sonsuz) ortamdaki dalgalar ..... | 14    |
| 2.3.3. Sismik dalgalarda yansıma ve kırılma ..... | 26    |
| 2.4. Viskoelastisite .....                        | 32    |
| 2.4.1. Viskoelastik davranış .....                | 32    |
| 2.4.2. Viskoz davranış.....                       | 34    |
| 2.4.3. Maxwell cismi.....                         | 35    |

**Sayfa**

|                                                                    |    |
|--------------------------------------------------------------------|----|
| 2.4.4. Kelvin cismi .....                                          | 38 |
| 2.4.5. Viskoelastik ortamdaki gerilme dalgaları .....              | 40 |
| 2.4.6. Rayleigh sönüm yaklaşımı .....                              | 46 |
| 3. ÇALIŞMANIN ÖRNEKLEME ALANINA UYGULANMASI.....                   | 48 |
| 3.1. Giriş ve Topografik Etki .....                                | 48 |
| 3.2. Konu ile İlgili Daha Önce Yapılan Çalışmalar .....            | 49 |
| 3.3. Topografya Etkisinin Yönetmeliklerdeki Yeri.....              | 55 |
| 3.4. (03.02.2002) Sultandağı – Çay Depremlerinin Özellikleri ..... | 56 |
| 3.5. Bölgenin Jeolojik Özellikleri .....                           | 57 |
| 3.5.1. Bölgesel ve yerel neotektonik konum .....                   | 58 |
| 3.5.2. Bölgenin sismo-tektmik özellikleri .....                    | 59 |
| 3.5.3. Bölgenin depremselliği .....                                | 60 |
| 3.5.4. Ağır hasarın jeolojik nedenleri.....                        | 61 |
| 3.6. Geoteknik İrdeleme .....                                      | 62 |
| 3.6.1. Deprem bölgeleri haritaları ve yönetmelik verileri.....     | 62 |
| 3.6.2. Yöresel ve yerel geoteknik özellikler.....                  | 63 |
| 3.6.3. Zemin etüdü bulguları .....                                 | 64 |
| 3.6.4. Ağır hasarın geoteknik nedenleri .....                      | 65 |
| 3.7. Uygulama .....                                                | 65 |
| 3.7.1. QUAD4M programı tanıtımı.....                               | 66 |
| 3.7.2. Modeller .....                                              | 68 |
| 3.8. Program Sonuçlarının Genel Yorumu.....                        | 88 |

|                                                                                                                                                        | <b>Sayfa</b> |
|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|--------------|
| 4. MODEL DENEYLERİ .....                                                                                                                               | 90           |
| 4.1. Giriş.....                                                                                                                                        | 90           |
| 4.2. Deney Düzenegi ve Kullanılan Aletlerin Özellikleri .....                                                                                          | 90           |
| 4.3. Mekanik Uyarı Uygulaması .....                                                                                                                    | 99           |
| 4.4. İlk Aşama Deney Sonuçlarının Değerlendirme ve Yorumları.....                                                                                      | 101          |
| 4.4.1. İlk aşama deneylerin beklenmeyen olgu ve oluşumlar<br>yönünden değerlendirme ve yorumları .....                                                 | 101          |
| 4.4.2. İlk aşama deneylerin pratik çıkarımlar-hesap uygulamaları ve<br>kazanılan bilgilerin belgelenmesi yönünden değerlendirilmesi<br>yorumları ..... | 108          |
| 5. SONUÇ VE ÖNERİLER .....                                                                                                                             | 112          |
| KAYNAKLAR .....                                                                                                                                        | 118          |
| EKLER.....                                                                                                                                             | 123          |
| EK-1 Ekli CD’de video dosyaları ve kısa açıklamaları .....                                                                                             | 124          |
| ÖZGEÇMİŞ .....                                                                                                                                         | 126          |

## ÇİZELGELERİN LİSTESİ

| Çizelge                                                                                                                  | Sayfa |
|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-------|
| Çizelge 2.1. Yansıyan ve geçen dalgaların yerdeğiştirme ve gerilme genlikleri üzerinde empedans oranının etkisi.....     | 30    |
| Çizelge 2.2. Richter notasyonları .....                                                                                  | 31    |
| Çizelge 2.3. Kumlarda kayma deformasyonuna bağlı $G/G_{max}$ ve $D/D_{max}$ değişimi .....                               | 40    |
| Çizelge 3.1. İki boyutlu jeolojik yapı etkileri .....                                                                    | 49    |
| Çizelge 4.1. Poisson Oranı'na göre zeminlerin dūřey yūk altında yanal geniřleme özellikleri ve sismik hız oranları ..... | 106   |

## ŞEKİLLERİN LİSTESİ

| Şekil                                                                                                                                                             | Sayfa |
|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-------|
| Şekil 2.1. Kuvvetler dengesi; (a) Dış dinamik yük $Q(t)$ 'ye maruz kalan sönümlemeli sistem, (b) kütleye etkiyen dinamik kuvvetler .....                          | 7     |
| Şekil 2.2. Cisim dalgalarının oluşturduğu deformasyonlar: (a) P dalgası, (b) SV dalgası.....                                                                      | 12    |
| Şekil 2.3. Yüzey dalgalarının oluşturduğu deformasyonlar: (a) Rayleigh dalgası, (b) Love dalgası .....                                                            | 12    |
| Şekil 2.4. Rayleigh dalgası genliğinin derinlikle değişimi .....                                                                                                  | 13    |
| Şekil 2.5. Bir boyutlu dalga yayılması için sıkıştırılmış, sonsuz çubuk .....                                                                                     | 15    |
| Şekil 2.6. Uzunluğu $dx$ ve enine kesit alanı $A$ olan elemanın uçlarındaki gerilmeler ve yerdeğiştirmeler .....                                                  | 15    |
| Şekil 2.7. Parçacık yerdeğiştirmesi; (a) zamanın ve (b) çubuk boyunca fonksiyonu olarak parçacık yerdeğiştirmesi.....                                             | 18    |
| Şekil 2.8. $(dx)(dy)(dz)$ boyutlarındaki bir elemanın gerilme bileşenleri .....                                                                                   | 19    |
| Şekil 2.9. Malzemenin ara yüzeyinde bir boyutlu dalga yayılması .....                                                                                             | 26    |
| Şekil 2.10. Gelen (a) P dalgasından, (b) SV dalgasından ve (c) SH dalgasından yansıyan ve kırılan ışınlar .....                                                   | 31    |
| Şekil 2.11. Viskoz davranışa ait şekiller; a) gerilme – şekil değiştirme; b) viskoz malzeme; c) şekil değiştirme süresi.....                                      | 34    |
| Şekil 2.12. Maxwell cismi davranış şekilleri; a) sabit gerilme – şekil değiştirme ilişkisi; b) sabit şekil değiştirme – gerilme ilişkisi; c) Maxwell modeli ..... | 37    |
| Şekil 2.13. Kelvin cismi davranış şekilleri; a) sabit gerilme – şekil değiştirme ilişkisi b) Kelvin modeli.....                                                   | 39    |
| Şekil 2.14. Kumlarda kayma deformasyonuna bağlı $G/G_{\max}$ ve $D/D_{\max}$ değişimi .....                                                                       | 41    |
| Şekil 2.15. Yatay sarsmaya maruz kalan bir Kelvin-Voight katısının ince elemanı .....                                                                             | 41    |

| <b>Şekil</b>                                                                                            | <b>Sayfa</b> |
|---------------------------------------------------------------------------------------------------------|--------------|
| Şekil 2.16. Histeres döngüsü ve sönümlenme oranı arasındaki ilişki .....                                | 43           |
| Şekil 3.1. Düzensiz yüzey topoğrafyasının iki boyutlu geometrileri .....                                | 48           |
| Şekil 3.2. Sultandağı ve Üçkuyu faylarını içeren yarım grabenin blok<br>diyagram halinde görünümü ..... | 61           |
| Şekil 3.3. Üç boyutlu vadi kesiti görünümü.....                                                         | 69           |
| Şekil 3.4. Alüvyon tabanlı vadiye uygulanan sonlu eleman modeli gösterimi.....                          | 70           |
| Şekil 3.5. Afyon – Sultandağı depremi ivme kayıtları.....                                               | 71           |
| Şekil 3.6. Anakaya deprem verilerinin dört farklı evre için Fourier<br>dönüşümleri.....                 | 72           |
| Şekil 3.7. Vadi eğimi 17° olarak seçilen modelin sonlu eleman ağı .....                                 | 73           |
| Şekil 3.8. Vadi eğimi 17°; 20. saniye – 52. saniye evresi .....                                         | 74           |
| Şekil 3.9. Vadi eğimi 17°; 52. saniye – 84. saniye evresi .....                                         | 74           |
| Şekil 3.10. Vadi eğimi 17°; 84. saniye – 116. saniye evresi .....                                       | 75           |
| Şekil 3.11. Vadi eğimi 17°; 116. saniye – 148. saniye evresi .....                                      | 75           |
| Şekil 3.12. Vadi eğimi 22° olarak seçilen modelin sonlu eleman ağı .....                                | 76           |
| Şekil 3.13. Vadi eğimi 22°; 20. saniye – 52. saniye evresi .....                                        | 77           |
| Şekil 3.14. Vadi eğimi 22°; 52. saniye – 84. saniye evresi .....                                        | 77           |
| Şekil 3.15. Vadi eğimi 22°; 84. saniye – 116. saniye evresi .....                                       | 78           |
| Şekil 3.16. Vadi eğimi 22°; 116. saniye – 148. saniye evresi .....                                      | 78           |
| Şekil 3.17. Vadi eğimi 27° olarak seçilen modelin sonlu eleman ağı .....                                | 79           |
| Şekil 3.18. Vadi eğimi 27°; 20. saniye – 52. saniye evresi .....                                        | 80           |
| Şekil 3.19. Vadi eğimi 27°; 52. saniye – 84. saniye evresi .....                                        | 80           |
| Şekil 3.20. Vadi eğimi 27°; 84. saniye – 116. saniye evresi .....                                       | 81           |

| <b>Şekil</b>                                                             | <b>Sayfa</b> |
|--------------------------------------------------------------------------|--------------|
| Şekil 3.21. Vadi eğimi 27°; 116. saniye – 148. saniye evresi .....       | 81           |
| Şekil 3.22. Vadi eğimi 37° olarak seçilen modelin sonlu eleman ağı ..... | 82           |
| Şekil 3.23. Vadi eğimi 37°; 20. saniye – 52. saniye evresi .....         | 83           |
| Şekil 3.24. Vadi eğimi 37°; 52. saniye – 84. saniye evresi .....         | 83           |
| Şekil 3.25. Vadi eğimi 37°; 84. saniye – 116. saniye evresi .....        | 84           |
| Şekil 3.26. Vadi eğimi 37°; 116. saniye – 148. saniye evresi .....       | 84           |
| Şekil 3.27. Vadi eğimi 45° olarak seçilen modelin sonlu eleman ağı ..... | 85           |
| Şekil 3.28. Vadi eğimi 45°; 20. saniye – 52. saniye evresi .....         | 86           |
| Şekil 3.29. Vadi eğimi 45°; 52. saniye – 84. saniye evresi .....         | 86           |
| Şekil 3.30. Vadi eğimi 45°; 84. saniye – 116. saniye evresi .....        | 87           |
| Şekil 3.31. Vadi eğimi 45°; 116. saniye – 148. saniye evresi .....       | 87           |
| Şekil 4.1. Deney düzeninin şematik gösterimi .....                       | 99           |

## RESİMLERİN LİSTESİ

| Resim                                                                                                                                                                                     | Sayfa |
|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-------|
| Resim 4.1. Model 1 .....                                                                                                                                                                  | 91    |
| Resim 4.2. Model 2 .....                                                                                                                                                                  | 91    |
| Resim 4.3. Anakayanın “sertleşmiş alçı” ile temsil edilen modeli (1. model).....                                                                                                          | 92    |
| Resim 4.4. Jel kıvamında hazırlanan “PVA + Boraks” malzeme numunesi .....                                                                                                                 | 92    |
| Resim 4.5. Model 1’de alçıpan yan duvarlara kaplanan PVC ambalaj malzemesi.....                                                                                                           | 93    |
| Resim 4.6. Model 2’de anakayayı temsil eden “silikon-kum karışımı” malzeme numunesi.....                                                                                                  | 94    |
| Resim 4.7. Model 2’de MDF malzeme ile yan duvarlara uygulanan yöntem .....                                                                                                                | 95    |
| Resim 4.8. Fonksiyon üretici.....                                                                                                                                                         | 96    |
| Resim 4.9. Deneylerin kullanım amacına uygun özel olarak tasarlanan ve imal edilen “işlevsel yükselteç” .....                                                                             | 96    |
| Resim 4.10. Deneylerin kullanım amacına uygun özel olarak tasarlanan ve imal edilen “elektromanyetik tahrik cihazı” .....                                                                 | 97    |
| Resim 4.11. İvmeölçer sistemi; (a) İvme sensörü, (b) sinyal koşullayıcı .....                                                                                                             | 98    |
| Resim 4.12. Osiloskop .....                                                                                                                                                               | 98    |
| Resim 4.13. Anakayayı temsilen “silikon + kum” karışımının kullanıldığı ikinci modelde, “x” doğrultusunda çekiçle verilen darbe sonucunda, alüvyon yüzeyinde elde edilen ivme kaydı ..... | 105   |



**HARİTALARIN LİSTESİ**

| <b>Harita</b>                                                                                        | <b>Sayfa</b> |
|------------------------------------------------------------------------------------------------------|--------------|
| Harita 3.1. 03.02.2002 Eber ve Çay deprem kırıkları ve yakın civarının<br>neotektonik haritası ..... | 58           |
| Harita 3.2. Güneybatı Türkiye'nin yalınlaştırılmış sismo-tektonik haritası .....                     | 60           |

## SİMGELER VE KISALTMALAR

Bu çalışmada kullanılmış bazı simgeler ve kısaltmalar, açıklamaları ile birlikte aşağıda sunulmuştur.

| <b>Simgeler</b>      | <b>Açıklama</b>           |
|----------------------|---------------------------|
| <b>E</b>             | Elastisite modülü         |
| <b>f</b>             | Frekans                   |
| <b>G</b>             | Kayma modülü              |
| <b>K</b>             | Bulk (sıkışmazlık) modülü |
| <b>M</b>             | Sıkışma modülü            |
| <b>T</b>             | Periyot                   |
| <b>V<sub>p</sub></b> | P dalgası hızı            |
| <b>V<sub>s</sub></b> | S dalgası hızı            |
| <b>w<sub>0</sub></b> | Doğal dairesel frekans    |
| <b>λ</b>             | Dalga boyu                |
| <b>ν</b>             | Poisson oranı             |
| <b>ρ</b>             | Yoğunluk                  |
| <b>σ<sub>T</sub></b> | Geçen dalga gerilmesi     |
| <b>σ<sub>R</sub></b> | Yansıyan dalga gerilmesi  |
| <b>ζ</b>             | Sönümleme oranı           |

| <b>Kısaltmalar</b> | <b>Açıklama</b>                               |
|--------------------|-----------------------------------------------|
| <b>DAD</b>         | Afet İşleri Genel Müd. Deprem Araştırma Dai.  |
| <b>ETHZ</b>        | Swiss Seismological Service                   |
| <b>HARVARD</b>     | Harvard University Seismology Group           |
| <b>KOERI</b>       | Kandilli Rasathanesi ve Deprem Araştırma Ens. |
| <b>PS-92</b>       | Fransız Deprem Yönetmeliği                    |
| <b>USGS</b>        | United States Geological Survey               |

## 1. GİRİŞ

Yerel zemin koşullarının kuvvetli deprem yer hareketlerini önemli ölçüde etkilediği, meydana gelen yıkıcı depremlerde gözlenen yapısal hasar ve aletsel ölçümlerle açıkça ortaya konmuştur [Özaydın, 1996]. Bu nedenle yerel zemin koşulları, depreme dayanıklı yapıların tasarımında önemli rol oynamaktadır. Yüzeye yakın zemin tabakaları içinden geçen deprem dalgalarının genliklerinde meydana gelen artış, zemin büyütmesi olarak bilinmektedir. Anakaya derinliği, anakaya üzerindeki zemin tabakalarının kalınlığı, cinsleri ve dinamik özellikleri, bu özelliklerin derinlikle ve deformasyonla değişimi, zemin tabakalarının yanal süreksizliği ve topografik özellikler gibi yerel zemin koşulları zemin büyütmesini etkileyen önemli faktörlerdir. Topografik özellikler, yüzeydeki ve yüzey altındaki zemin tabakalarının iki veya üç boyutlu geometrisiyle, bu tabakaları sınırlayan anakayanın geometrisini kapsamaktadır [Haşal ve İyisan, 2004].

Eğimli anakaya yüzeyinin üstünde oluşan tekrarlı deprem dalgası yansımaları sonucunda vadi merkezine doğru ilerleyen yüzey dalgaları oluşmaktadır [Şafak, 2001]. Bu dalgalar, zemin tabakalarının düşey ilerleyen kayma dalgaları karşısındaki dinamik davranışına dayanan bir boyutlu analizlerle tahmin edilemeyecek kadar kuvvetli ve uzun süreli yer hareketleri üretmektedirler. Vadinin kenarından ortasına doğru spektrumun uzun periyot tarafında büyütme artmakta, kritik konumlarda ise iki boyutlu büyütmenin maksimum etkisi ortaya çıkmaktadır [Rassem ve ark., 1997].

Gevşek yapılı zemin katmanlarının yanal olarak sınırlanması sonucu ova kenarlarında oluşan yüzey dalgaları ova içerisinde ilerleyerek belirli bir mesafede etkili olmaktadır. Yüzey dalgaları üç boyutlu ortamda oluşan dalgalara göre daha düşük hızlara sahip olup, periyotları da 0,5 saniyeden büyüktür. Ovanın çok geniş olması durumunda ise, bu dalgaların zeminin sönüm etkisi ile kaybolduğu; alüvyon ortamın dar bir vadinin içinde yer alması durumunda da yüzey dalgalarının vadi kenarlarından, üç boyutlu ortamda oluşan dalgaların da vadiyi sınırlayan kaya yüzeylerden karşılıklı yansımaları sonucu yer hareketinin yüzeyde önemli

değişikliklere uğradığı, bu tür etkilerin meydana geldiği birçok depremde açıkça gözlenmiştir [Bakır ve Erşahin, 1997].

Bu çalışmanın temel amacı; meydana gelen depremlerde, alüvyon tabanlı vadilerin kenar bölgelerinde deprem şiddet artımının sonlu elemanlar yöntemi uygulanarak sayısal (nicel) olarak ifade edilmesi ve laboratuarda oluşturulan model üzerinde de sinüzoidal dalga oluşturarak, alınan ölçümlerin sayısal çözümlerle karşılaştırılmasıdır.

Çalışmanın çıkış noktası 03.02.2002 tarihinde Afyon ili yakınlarında meydana gelen depremler olmuştur. Gazi Üniversitesi Mühendislik Mimarlık Fakültesi İnşaat Mühendisliği Bölümü Öğretim Elemanları'ndan bir kısmının oluşturduğu bir ekip tarafından “Çay İlçesi Küçük Sanayi Sitesi”nde oluşan ağır hasarın nedenlerini belirlemeyi amaçlayan bir inceleme yapılmıştır. Çalışma sonrasında Çay ilçesi Küçük Sanayi Sitesi'nin yer aldığı bölgenin topografik yapısının, yukarıda örnekleri verilen araştırmalarda gözlenen topografik koşullarla aynı karakterde olduğu belirlenmiştir.

Çay Küçük Sanayi Sitesi'nde meydana gelen hasar irdelemesi sonucunda; Pampal ve arkadaşları tarafından 2002 Çay Depremi'nde Çay Küçük Sanayi Sitesi'nde meydana gelen hasarın geoteknik ve jeolojik nedenleri ortaya konmuş, sismik kırılma ve yansıma konusuna dikkat çekilmiştir [Pampal ve ark., 2003].

Çalışmanın ikinci bölümünde; ayrı sistemlerin dinamiği, hareket denklemleri, sismik dalga yayılımı, sismik dalgalarda yansıma ve kırılma mekanizmaları ile viskoelastisite konularını içeren “Temel Kavramlar” üzerinde durulmuş, bu konularla ilgili özet bilgiler verilmeye çalışılmıştır.

Üçüncü bölümde ise; çalışmanın çıkış noktası olarak vurgulanan ve verileri kullanılan 03.02.2002 Eber (Sultandağı) – Çay Depremleri hakkında bilgi verilmiş, Çay Küçük Sanayi Sitesi'nde meydana gelen hasarın geoteknik ve jeolojik nedenleri anlatılmıştır. Daha sonra kullanılan sonlu eleman programı QUAD4M'in çalışma

prensipleri tanıtılmış, biri üçgen, diğerleri trapez kesitli toplam beş farklı vadi eğimi ( $17^\circ$ ,  $22^\circ$ ,  $27^\circ$ ,  $37^\circ$ ,  $45^\circ$ ) üzerinde sonlu eleman modeli oluşturulmuş ve uygulanan bilgisayar programı (QUAD4M) ile; vadi kenarı (A), vadi eksenini (C) ve ikisinin arasında bir noktada (B) elde edilen ivme-zaman geçmişleri Fourier Genlik Spektrumları'na dönüştürülmüştür. Seçilen üç noktadaki ve anakayadaki genlik-frekans değişim değerleri, deprem süresi dört evreye bölünerek, bu evreler için ayrı ayrı irdelenmiştir. Yapılan dinamik analiz sonucunda deprem süresinin dört farklı evresinde, vadi üzerinde alınan bu üç farklı noktada, vadi eğimi değişimlerinin etkisi irdelenmeye çalışılmıştır.

Gazi Üniversitesi Mühendislik Mimarlık Fakültesi İnşaat Mühendisliği laboratuvarlarında gerçekleştirilen deneylerde, bir önceki bölümde ayrıntılarıyla verilen sonlu eleman analizindeki geometrik şekillerden vadi eğimi  $27^\circ$  olan trapez kesit esas alınmıştır.

Dördüncü bölümde ise laboratuvarında oluşturulan iki farklı fiziksel model üzerinde deneyler yapılmıştır;

- Anakayanın “sertleşmiş alçı” ile, vadideki alüvyonun da “polivinilalkol (PVA) çözeltisi + sodyumtetraborat –  $\text{Na}_2\text{B}_4\text{O}_7$  (boraks) çözeltisi karışımı” (PVA + Boraks) ile temsil edildiği, sonlu eleman programı uygulamasına göre 1/40 ölçekli, fiziksel model.
- Anakayanın “silikon-kum karışımı” ile, alüvyonun da “polivinilalkol (PVA) çözeltisi + sodyumtetraborat –  $\text{Na}_2\text{B}_4\text{O}_7$  (boraks) çözeltisi karışımı” (PVA + Boraks) ile temsil edildiği, sonlu eleman programı uygulamasına göre 1/40 ölçekli, fiziksel model.

Birinci model, üçüncü bölümde kullanılan QUAD4M programındaki kabul esasına göre oluşturulmuş ve modelin anakaya bölümü rijit bir malzeme olan “sertleşmiş alçı” ile imal edilmiştir.

İkinci modelde ise anakaya “silikon-kum karışımı” ile temsil edilerek -doğadaki duruma daha yakın olmak amacıyla- sonsuz rijit olmayan bir malzeme üzerinde deneyler yapılmıştır.

Her iki modelde de, yüzeydeki serbest titreşimden hareketle doğal periyotlar bulunmuştur. Buna göre, hakim frekansın altında ve üstünde uygun genişlikte bir frekans bandını kapsamak üzere, farklı birkaç frekansta sinüs dalgası verilmiş ve “A”, “B” ve “C” noktalarındaki maksimum yatay ivmeler ölçülmüştür.

Tüm ölçümler sonucunda, model deneylerden elde edilen sonuçlar hem kendi içlerinde, hem de sonlu eleman programı ile yapılan analiz sonuçları ile karşılaştırılmış ve beşinci bölümde aktarılmıştır.

## **2. TEMEL KAVRAMLAR**

### **2.1. Giriş**

Bu bölümde, yapılan çalışmayla ilgili temel kavramlar hakkında genel bilgiler vermeye çalışılmıştır.

İlk olarak, ayırık sistemlerin dinamiği üzerinde durulmuş, dinamik problemlerin temelini oluşturan “Hareket Denklemleri” kısaca anlatılmıştır.

Geoteknik Deprem Mühendisliği çalışmalarının çıkış noktası olan sismik dalgalar, dalga yayılımının iki ve üç boyutlu analizleri ile dalgaların yansıma prensipleri yine bu bölüm içinde aktarılmaya çalışılmıştır.

Son olarak, çalışmada kullanılan programın viskoelastik malzemeler için kullanılan “Rayleigh Sönüm Yaklaşımı” ile çalışıyor olmasından dolayı, viskoelastisite konusu ana hatlarıyla tanıtılmış, viskoelastik ortamlarda dalga yayılımının eşitlikleri verilmiştir.

### **2.2. Ayırık Sistemlerin Dinamiği**

Yapı dinamiğindeki çoğu problemde yapı, kütlesi ihmal edilen yaylarla bağlanan rijit elemanlarla idealize edilirken, ender bir durum olsa da, zemin çökeli gibi devamlı sistemler de çok sayıda ayırık eleman topluluğu olarak idealize edilebilmektedir. Bu nedenle Geoteknik Deprem Mühendisliği analizlerinde kullanılan terimler ve kavramlar ayırık sistem dinamiği çerçevesinde açıklanabilmektedir.

Genellikle titreşim ve salınım sözcükleri aynı anlamda kullanılmasına karşın titreşimin bir dış kuvvet veya kuvvetler altında cismin hareketini ifade ettiği, salınımın cismin denge konumunda ileri ve geri hareketini yansıttığı bilinmektedir.

Titreşen sistemler “rijit” ve “uyumlu” olmak üzere iki ana grupta toplanabilir. Rijit sistemler, içerisinde birim deformasyonların gelişmediği, sistem içindeki tüm noktaların aynı fazda hareket ettiği, hareketinin tanımlanmasının basit bir kinematik işlem olduğu sistemler olarak tanımlanabilir. Uyumlu sistemler ise, sistem içindeki farklı noktaların birbirinden farklı hareket ettiği, kütlelerin dağılımı ile karakterize edilebilen sistemler olarak ifade edilebilir. Zeminlerin rijit olmaması nedeniyle Geoteknik Mühendisliği’nde uyumlu sistemler esas alınarak analizler yapılmaktadır.

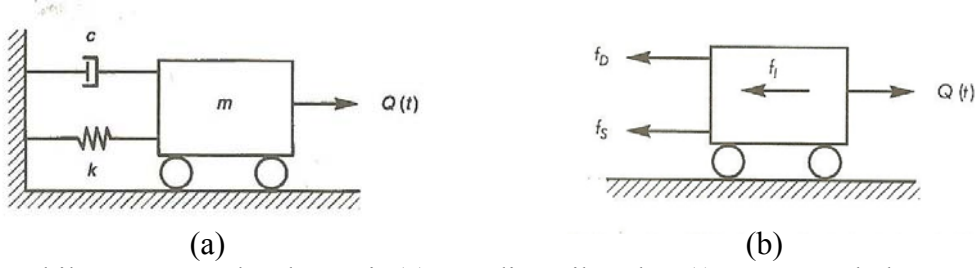
Bir sistemin önemli tüm kütlelerinin pozisyonunu tanımlamak için gerekli bağımsız değişkenlerinin sayısı, sistemin “dinamik serbestlik derecesi”ni vermektedir. Deprem Mühendisliği’nde sistemlerin serbestlik derecesi bir ile sonsuz arasında değişmektedir. Ayırık sistemler sonlu sayıda, devamlı sistemler ise sonsuz sayıda serbestlik derecesine sahiptir. Bazı analizlerde devamlı sistemler çok sayıda serbestlik derecesine sahip ayırık sistemler olarak idealize edilirken, bazı analizlerde de ayırık sistemler çok sayıdaki serbestlik derecesine sahip devamlı sistemler olarak idealize edilmektedir [Kramer, 1996].

### 2.2.1. Genel hareket denklemleri

Tek serbestlik dereceli sistemlerin çoğu dış yüklerin -Deprem Mühendisliği’nde dinamik yükleme gibi- etkisi altındadır. Tek serbestlik dereceli sistemin kütesine dinamik bir yükleme yapıldığında, hareket; kütlenin ataleti ile ve yay ile sönümleyici içinde gelişen kuvvetler tarafından engellenmeye çalışılır. Şekil 2.1’de görüldüğü üzere  $Q(t)$  dış kuvvetine; ters yönde  $f_I$  atalet (eylemsizlik) kuvveti,  $f_D$  viskoz sönümleme kuvveti ve  $f_s$  yay kuvveti karşı koymaktadır. Hareket denklemi de bu kuvvetlerin dinamik dengesi cinsinden ifade edilebilir:

$$f_I(t) + f_D(t) + f_s(t) = Q(t) \quad (2.1)$$





Şekil 2.1. Kuvvetler dengesi; (a) Dış dinamik yük  $Q(t)$ 'ye maruz kalan sönümlmeli sistem, (b) Kütleye etkiyen dinamik kuvvetler [Kramer, 1996]

Viskoz sönümlmeli bir sisteme ait diferansiyel denklem Newton'un ikinci yasasından yararlanılarak yazılabilir. Şekil 2.1a'da verilen kütle – yay ve viskoz sönümlendiriciden oluşan mekanik sistem üzerinde etkin olan dış kuvvetin deprem nedeniyle oluşan yer hareketinden kaynaklandığı varsayılırsa,  $u_g$  yerin yerdeğiştirmesini ve  $u$ ,  $m$  kütlelerinin denge konumundan itibaren yerdeğiştirmesini gösterir. Buna göre  $Q(t)$  dış kuvveti:

$$Q(t) = m \frac{\partial^2 u_g}{\partial t^2} = m \ddot{u}_g(t) \quad (2.2)$$

ile verilir [Hasselman ve ark., 1972; Kelly, 1993]. Göreceli yerdeğiştirmeye bağlı olarak atalet (eylemsizlik) kuvveti ise;

$$f_I(t) = m \frac{\partial^2 u}{\partial t^2} = m \ddot{u}(t) \quad (2.3)$$

olarak verilebilir. Viskoz bir sönümleyici için sönümleme kuvveti kütle hızı ile orantılı olup;

$$f_D = c \frac{\partial u}{\partial t} = c \dot{u}(t) \quad (2.4)$$

eşitliği ile ifade edilir [Chopra, 1995]. Yay ile sağlanan kuvvet de, yay rijitliği ile yerdeğiştirme miktarının çarpımına eşit olmaktadır:

$$f_s = ku(t) \quad (2.5)$$

Böylece, Newton'un ikinci hareket yasasından yararlanarak, titreşim sisteminin “t” anındaki denge koşulu, Şekil 2.1b yardımıyla, Eş. 2.1’de yerine konulduğunda;

$$m \frac{\partial^2 u}{\partial t^2} + c \frac{\partial u}{\partial t} + ku(t) = m \frac{\partial^2 u_g}{\partial t^2} \Rightarrow m\ddot{u}(t) + c\dot{u}(t) + ku(t) = m\ddot{u}_g(t) \quad (2.6)$$

diferansiyel denklemiyle verilebilir. Tek serbestlik dereceli bir titreşim sisteminin hareketini gösteren bu denkleme “Diferansiyel Hareket Denklemi” denir [Jacobsen ve ark, 1958; Johnson ve ark., 1972; Newmark ve ark., 1971]. Bu tür bir diferansiyel denklemin genel çözümü, homojen ve özel çözümün toplanmasıyla elde edilir. Çözümde bulunan integral sabitleri, titreşim sisteminin başlangıç zamanına (t=0) karşılık gelen durumunu gösterir ve başlangıç koşulları yardımı ile belirlenir.

Doğrusal bir tek serbestlik dereceli sistemin dinamik tepkisini değerlendirmek için, Eş. 2.6’da verilen diferansiyel hareket denkleminin çözülmesi gerekmektedir. Tek serbestlik dereceli sistemlerin dinamik tepkilerinin yaygın olarak hesaplandığı birkaç değişik durum bulunmaktadır. Kütlenin belirli bir Q(t) dış yüklemesine veya taban sarsmasına maruz kaldığı durumda gelişen titreşime “Zorlanmış Titreşim”, dış yükleme ve taban sarsmasının olmadığı durumda gelişen titreşime de “Serbest Titreşim” adı verilir. Sönümleme (c)’nin ve dış yükleme Q(t)’nin olup olmaması şartına göre dört farklı durum oluşmaktadır:

- Sönümlemesiz Serbest Titreşimler : c = 0, Q(t) = 0
- Sönümlemeli Serbest Titreşimler : c > 0, Q(t) = 0
- Sönümlemesiz Zorlanmış Titreşimler : c = 0, Q(t) ≠ 0
- Sönümlemeli Zorlanmış Titreşimler : c > 0, Q(t) ≠ 0

Bu bölümde, yukarıda belirtilen ilk üç durumun yerine, en genel olan ve hepsini birden kapsadığı düşünülen “Sönümlemeli Zorlanmış Titreşimler” üzerinde durulacaktır.

$Q(t) = Q_0 \sin \bar{\omega} t$  şeklindeki basit harmonik yüklemeye maruz kalan sönümlenmeli bir tek serbestlik dereceli sistemin hareket denklemi;

$$m\ddot{u} + c\dot{u} + ku = Q_0 \sin \bar{\omega} t \quad (2.7)$$

ile ifade edilir. Burada  $\bar{\omega}$ , yükün uygulandığı dairesel frekans olarak tanımlanabilir. Sönümlenme oranı ( $\zeta$ ) ve sistemin doğal dairesel frekansı ( $w_0$ ) ise aşağıda eşitlikleri ile verilmiştir.

$$\zeta = \frac{c w_0}{2k} \quad (2.8)$$

$$w_0 = \sqrt{\frac{k}{m}} \quad (2.9)$$

Eş. 2.7, m ile bölünüp Eş. 2.8 ve Eş. 2.9 yerine konulduğunda,

$$\ddot{u} + 2\zeta w_0 \dot{u} + w_0^2 u = \frac{Q_0}{m} \sin \bar{\omega} t \quad (2.10)$$

eşitliği elde edilir. Denklemin sağ tarafını sıfır kabul ederek yapılan homojen çözüm aşağıdaki şekilde elde edilebilir:

$$u_c(t) = e^{\zeta w_0 t} (C_1 \sin w_d t + C_2 \cos w_d t) \quad (2.11)$$

Burada  $w_d$ , sistemin sönümlenmeli doğal dairesel frekansını temsil eder ve

$$w_d = w_0 \sqrt{1 - \zeta^2} \text{ olarak tanımlanır.}$$

Sönümlenmeli bir tek serbestlik dereceli sistemin tepkisi genellikle dış yük ile aynı fazda olmadığından, yerdeğiştirme, hız ve ivme için aşağıdaki şekilde harmonik özel çözüm varsayılabilir.

$$u_p(t) = C_3 \sin \bar{\omega} t + C_4 \cos \bar{\omega} t \quad (2.12a)$$

$$\dot{u}_p(t) = C_3 \bar{\omega} \cos \bar{\omega} t - C_4 \bar{\omega} \sin \bar{\omega} t \quad (2.12b)$$

$$\ddot{u}_p(t) = -\bar{\omega}^2 C_3 \sin \bar{\omega} t - \bar{\omega}^2 C_4 \cos \bar{\omega} t \quad (2.12c)$$

2.12 eşitliklerini hareket denklemindeki -Eş. 2.10'da- yerlerine koyarak ve  $\sin \bar{\omega} t$  ile  $\cos \bar{\omega} t$  terimlerini de toplayarak aşağıdaki form elde edilebilir:

$$\begin{aligned} (C_3 \omega_0^2 - C_3 \bar{\omega}^2 - 2\zeta \omega_0 C_4 \bar{\omega}) \sin \bar{\omega} t \\ + (C_4 \omega_0^2 - C_4 \bar{\omega}^2 - C_3 \bar{\omega} 2\zeta \omega_0) \cos \bar{\omega} t = \frac{Q_0}{m} \sin \bar{\omega} t \end{aligned} \quad (2.13)$$

$\bar{\omega} t = 0 + 2n\pi$  ( $n$  tamsayı) olan durumlarda  $\sin \bar{\omega} t = 0$  ve  $\cos \bar{\omega} t = 1$  olduğundan;

$$C_4 \omega_0^2 - C_4 \bar{\omega}^2 - C_3 \bar{\omega} 2\zeta \omega_0 = 0 \quad (2.14)$$

bağıntı şartı ile birlikte,  $\bar{\omega} t = \pi/2 + n\pi$  'de  $\cos \bar{\omega} t = 0$  ve  $\sin \bar{\omega} t = 1$  'in ifade ettiği;

$$C_3 \omega_0^2 - C_3 \bar{\omega}^2 - 2\zeta \omega_0 C_4 \bar{\omega} = \frac{Q_0}{m} \quad (2.15)$$

bağıntısındaki şart da sağlanmalıdır. Eş. 2.14 ve 2.15'teki  $C_3$  ve  $C_4$  bilinmeyenleri çözüldüğünde;

$$C_3 = \frac{Q_0}{k} \frac{1 - \beta^2}{(1 - \beta^2)^2 + (2\zeta\beta)^2} \quad (2.16)$$

$$C_4 = \frac{Q_0}{k} \frac{-2\zeta\beta^2}{(1 - \beta^2)^2 + (2\zeta\beta)^2} \quad (2.17)$$

elde edilir. Sönümlmeli zorlanmış titreşimin hareket denkleminin genel çözümü bu durumda homojen ve özel çözümlerin birleştirilmesiyle elde edilebilir:

$$u(t) = e^{\zeta \omega_0 t} (C_1 \sin \omega_d t + C_2 \cos \omega_d t) + \frac{Q_0}{k} \frac{1}{(1 - \beta^2)^2 + (2\zeta\beta)^2} [(1 - \beta^2) \sin \bar{\omega} t - 2\zeta\beta \cos \bar{\omega} t] \quad (2.18)$$

Eş. 2.18'den de görüleceği üzere başlangıç şartlarının etkilerini temsil eden çözüm zamanla azalmaktadır.

### 2.3. Sismik Dalga Yayılımı

#### 2.3.1. Sismik dalgalar

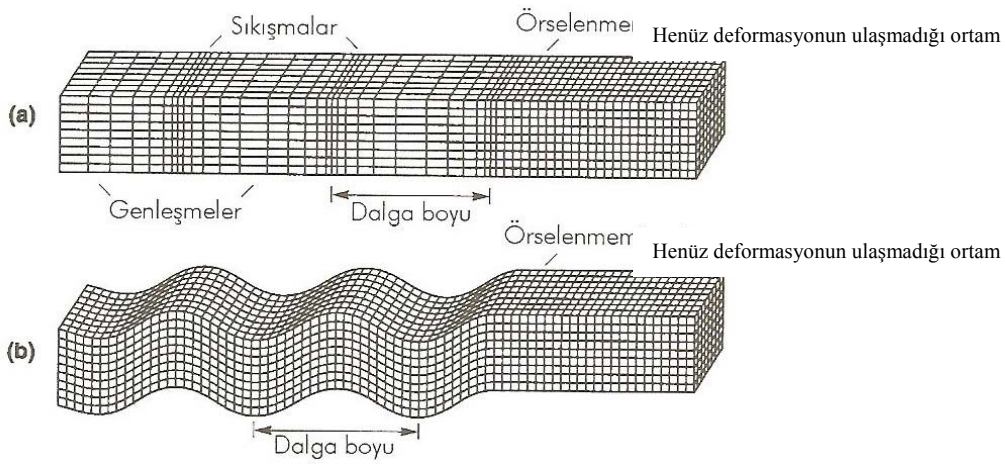
Herhangi bir ortamda dinamik bir etki oluştuğu veya oluşturulduğunda bir dalga alanı meydana gelmektedir. Bu dalgaların da hem yüzeyde hem de ortamın içinde yayıldığı bilinmektedir. Geoteknik Mühendisliği problemlerine konu olan ortam da zemin ve kayadan oluşmakta ve genelde elastik yarı sonsuz ortam olarak tanımlanmaktadır. Bu ortamda oluşturulan dalga alanı, ortam içinde yayılan “cisim dalgaları” ve ortamın yüzeyinde yayılan “yüzey dalgaları” olarak bilinen dalga tiplerini içermektedir.

Yerin iç kısmında hareket eden cisim dalgalarının “P” ve “S” olmak üzere iki çeşidi vardır (Şekil 2.2).

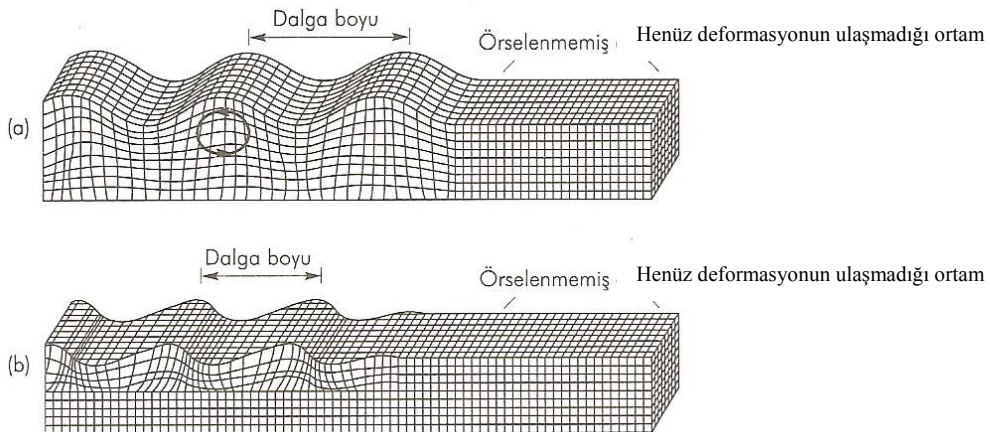
Birincil, boyuna ve basınç dalgası olarak da bilinen P dalgaları geçtikleri ortamda önce sıkışma sonra genleşme meydana getirir. Katı ve sıvı ortamlarda hareket edebilen ve ses dalgalarına benzeyen bu dalgalardan etkilenen bir parçacığın titreşimi dalga ilerleme yönüne paraleldir.

İkincil, enine veya kesme (kayma) dalgası olarak bilinen S dalgaları, içinden geçtikleri ortamda kayma deformasyonlarına yol açarlar. S dalgasından etkilenen bir parçacığın hareketi dalga ilerleme yönüne diktir. Kesme dalgaları parçacık hareketinin yönüne göre SV (düşey düzlemsel hareket) ve SH (yatay düzlemsel hareket) olmak üzere iki gruba ayrılmaktadır.

Cisim dalgalarının ilerleme hızı, içinden geçtikleri ortamın rijitliğine bağlıdır. Jeolojik birimler basınçta daha rijit olduklarından, P dalgaları diğer dalgalardan daha hızlıdır ve dolayısıyla da kayıt istasyonuna ilk olarak bu dalgalar gelir.



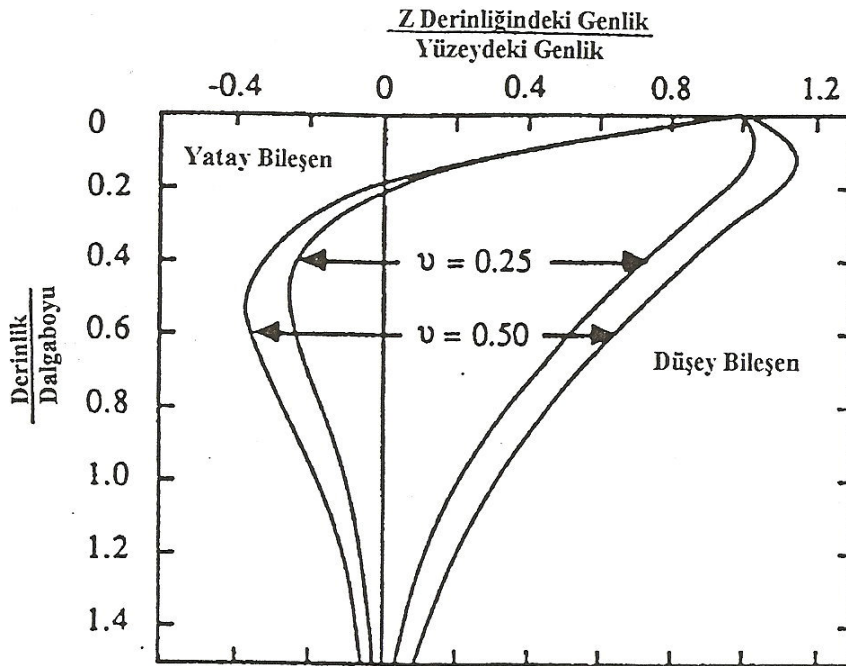
Şekil 2.2. Cisim dalgalarının oluşturduğu deformasyonlar: (a) P dalgası, (b) SV dalgası [Bolt, 1993]



Şekil 2.3. Yüzey dalgalarının oluşturduğu deformasyonlar; (a) Rayleigh dalgası, (b) Love dalgası [Bolt, 1993]

Yer yüzeyi ve yüzeydeki katmanlar ile cisim dalgaları arasındaki etkileşim sonucunda ortaya çıkan dalgalara yüzey dalgaları adı verilir. Bu dalgalar yer yüzeyinde ilerlerken, genlikleri derinlikle azalır (Şekil 2.3). Kaynaktan itibaren yerkabuğunun kalınlığının yaklaşık iki katından daha uzak mesafelerde maksimum yer hareketinin oluşmasında cisim dalgalarından çok yüzey dalgaları rol oynamaktadır. Mühendislik açısından en önemli yüzey dalgaları Rayleigh Dalgaları ve Love Dalgaları'dır.

P dalgaları ile SV dalgalarının yer yüzeyindeki etkileşiminden oluşan Rayleigh Dalgaları'nda parçacık, yatay ve düşey yönlerde hareket edebilir. Rayleigh dalga hızı, Poisson Oranı'na bağlı olarak kayma dalgası hızının ortalama %92'sine eşit olmaktadır [Roesset ve ark., 1990]. Rayleigh dalgasının genliği zemin yüzeyinden derine indikçe azalmakta ve dalga boyunun 1,5 katı derinlikte yüzeydeki genliğin %10'undan daha az bir değere ulaşmaktadır. Rayleigh dalgası genliğinin yatay ve düşey bileşeninin, dalga boyuna göre normalize edilmiş derinlikle Poisson Oranı'na bağlı değişimi Şekil 2.4'te verilmiştir [Richart ve ark., 1970].



Şekil 2.4. Rayleigh dalgası genliğinin derinlikle değişimi [Richart ve ark., 1970]

Love Dalgaları ise, SH dalgalarının yumuşak çökellerle etkileşimi sonucunda oluşur ve bunlarda parçacık titreşiminin düşey bileşeni yoktur [Kramer, 1996]. Bu yüzey dalgaları sadece, yüksek hızlı tabaka üzerinde görece düşük hızlı tabakaların yer aldığı durumlarda ortaya çıkmaktadır. Bu durumda, düşük hızlı tabakanın alt ve üst yüzeyleri arasında kayma dalgasının çok yönlü yansıması Love tipi dalgayı oluşturmaktadır [Love, 1911]. Love dalgası yayılma hızı dalga boyuna bağlıdır ve genelde düşük hızlı tabakanın kayma dalgası hızına eşittir.

### 2.3.2. Sınırsız (sonsuz) ortamdaki dalgalar

Gerilme dalgalarının yayılımının açıklanması için öncelikle sınırsız veya sonsuz bir ortamdaki yayılımın göz önüne alınması gerekmektedir. Sonsuz uzanımlı bir çubuk ile yapılan sınırsız ortamdaki bir boyutlu modellemede dalga denklemini oluşturmak ve çözmek için, kuvvetler dengesinin temel şartları, yerdeğiştirme uyumluluğu ilkesi ile birim deformasyon-yerdeğiştirme ve gerilme-birim deformasyon ilişkileri kullanılır. Bu işlemi, aynı şartları ve bağıntıları kullanarak, üç yönde sonsuz uzanımına sahip bir ortamda daha genel anlamdaki dalga yayılma durumu için de tekrarlamak mümkündür.

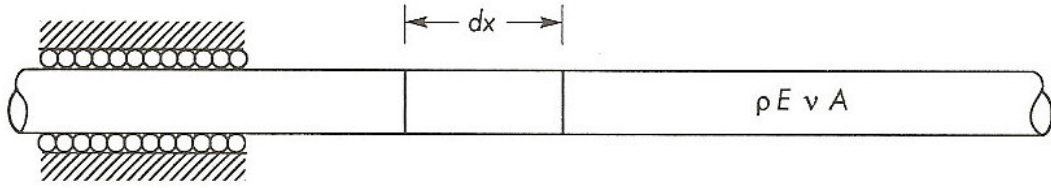
#### Tek boyutlu dalga yayılımı ve hareket denklemleri

İnce, sonsuz bir çubukta üç çeşit titreşim oluşabilir:

- Yanal yerdeğiştirme olmaksızın çubuk ekseninin uzayıp kısılması ile oluşan boyuna titreşim;
- Çubuk kesitlerinin kendi eksenini çevresinde -yanal yerdeğiştirme olmaksızın- döndüğü durumdaki burulma titreşimi
- Eksenin kendisinin yanal yönde hareket ettiği durumdaki bükülme titreşimi.

İlk iki titreşim durumu için zemin dinamiği konusunda dalga denklemleri türetmek ve çözmek oldukça basit olmakla birlikte, bükülme titreşiminin zemin dinamiğinde fazla bir uygulama alanı görülmemektedir.



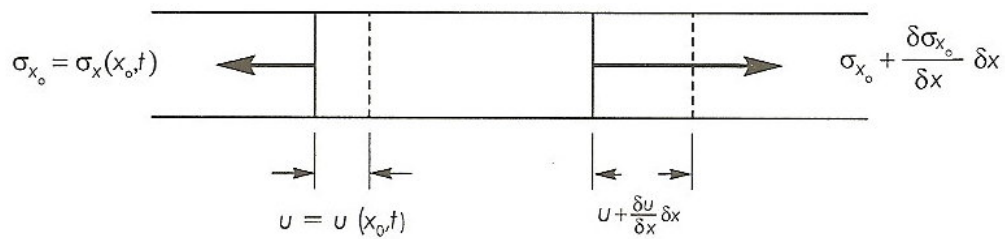


Şekil 2.5. Bir boyutlu dalga yayılması için sıkıştırılmış, sonsuz çubuk [Kramer, 1996]

Şekil 2.5'te sonsuz uzanımlı, doğrusal elastik ve taralı alan ile tutulmuş bir çubuğun kesit alanı  $A$ , elastisite modülü  $E$ , Poisson Oranı ( $\nu$ ) ve yoğunluğu da ( $\rho$ ) ile gösterilmiştir. Gerilme dağılımı uniform, enine kesiti düzlemsel olduğu kabul edildiğinde boyuna bir dalgadan kaynaklanan parçacık yerdeğiştirmesinin yönü çubuk eksenine paralel olacaktır. Şekil 2.6'da bir gerilme dalgasının çubukta ilerlemesi ve küçük elemandan geçişi gösterilmektedir. Elemanın sol ucundaki ( $x = x_0$ ) eksenel gerilme  $\sigma_{x0}$  ile, sağ uçtaki ( $x = x_0 + dx$ ) eksenel gerilme de  $\sigma_{x0} + (\partial\sigma_x/\partial x)dx$  olarak ifade edilmektedir. Bu durumda elemanın dinamik dengesi için aşağıdaki eşitlik yazılabilir;

$$\left( \sigma_{x0} + \frac{\partial\sigma_x}{\partial x} dx \right) A - \sigma_{x0} A = \rho A dx \frac{\partial^2 u}{\partial t^2} \quad (2.19)$$

Burada;  $u$ ,  $x$  yönündeki yerdeğiştirmeyi göstermektedir.



Şekil 2.6. Uzunluğu  $dx$  ve enine kesit alanı  $A$  olan elemanın uçlarındaki gerilmeler ve yerdeğiştirmeler [Kramer, 1996]

Eş. 2.19'da; sol taraf elemanın üzerine etkiyen dengelenmemiş dış kuvvetlerini, sağ taraf ise elemanın kütle ve ivmesinin neden olduğu atalet kuvvetini göstermektedir. Sadeleştirme işlemi yapıldıktan sonra tek boyutlu hareket eşitliği elde edilir:

$$\frac{\partial \sigma_x}{\partial x} = \rho \frac{\partial^2 u}{\partial t^2} \quad (2.20)$$

Eş. 2.20’de verilen hareket denklemi, her türlü gerilme-deformasyon davranışı için geçerlidir. Ancak, eşitlik, gerilmeler ile yerdeğiştirmelerin karışımından oluştuğu için çözümünün olmamasından dolayı, denklemin sol tarafı gerilme-birim deformasyon ilişkisi,  $\sigma_x = M \varepsilon_x$  kullanılarak yerdeğiştirme cinsinden ifade edilerek sadeleştirilmesi gerekir. Burada sıkıştırma modülü  $M = \{(1-\nu)/[(1+\nu)(1-2\nu)]\}E$  ve birim deformasyon-yerdeğiştirme bağıntısı  $\varepsilon_x = \partial u / \partial x$ ’dir. Hareket denklemi bu ifadelerin de yardımıyla, sıkıştırılmış çubuğun tek boyutlu denklemi olan ve iyi bilinen “Boyuna Dalga Denklemi” cinsinden ifade edilebilir:

$$\frac{\partial^2 u}{\partial t^2} = \frac{M}{\rho} \frac{\partial^2 u}{\partial x^2} \quad (2.21)$$

Tek boyutlu dalga denklemini Eş. 2.22’deki gibi yazmak da mümkündür:

$$\frac{\partial^2 u}{\partial t^2} = V_p^2 \frac{\partial^2 u}{\partial x^2} \quad (2.22)$$

Burada;  $V_p$  dalga yayılma hızıdır ve bu durumda dalga  $V_p = \sqrt{M/\rho}$  hızıyla yayılmaktadır. Bu eşitlikten de görüleceği üzere dalga yayılma hızı, sadece çubuk malzemenin özelliklerine (rijitliğine ve yoğunluğuna) bağlı olup gerilme dalgasının genliğinden bağımsızdır. Ayrıca dalga yayılma hızının artan rijitlik ile birlikte arttığı, artan yoğunluk ile de azaldığı görülmektedir [Kramer, 1996].

Dalga yayılma hızı, bir çubuk boyunca ilerleyen dalganın hızı olmakla birlikte, bu hız, dalganın geçişi sırasında herhangi bir noktadaki parçacığın hareketini ifade eden parçacık hızı ile de aynıdır. Birim deformasyon ilişkisinden  $\partial u = \varepsilon_x \partial x$ , gerilme-birim deformasyon ilişkisinden  $\varepsilon_x = \sigma_x / M$  ve dalga yayılımı hızı tanımından  $\partial u = V_p \partial t$  eşitlikleri yardımıyla, parçacık hızı,  $\dot{u}$ , aşağıdaki şekilde ifade edilebilir:

$$\dot{u} = \frac{\partial u}{\partial t} = \frac{\epsilon_x \partial x}{\partial t} = \frac{\sigma_x}{M} \frac{V_p \partial t}{\partial} = \frac{\sigma_x}{M} V_p = \frac{\sigma_x}{\rho V_p^2} V_p = \frac{\sigma_x}{\rho V_p} \quad (2.23)$$

Eş. 2.23, parçacık hızının çubuktaki eksenel gerilme ile doğru orantılı olduğunu göstermektedir.

Kısmi diferansiyel denklem olan tek boyutlu dalga denklemi aşağıdaki gibi yazılabilir:

$$\frac{\partial^2 u}{\partial t^2} = V^2 \frac{\partial^2 u}{\partial x^2} \quad (2.24)$$

Burada, V, gerilme dalgasının yayılma hızı olup böyle bir denklemin çözümü aşağıdaki gibi yazılabilir:

$$u(x, t) = f(Vt - x) + g(Vt + x) \quad (2.25)$$

Burada f ile g, eşitliği sağlayan herhangi fonksiyonlardır. Zamanın değişimi ile x artarken f teriminin, x azalırken de g teriminin sabit kaldığı Eş. 2.5'ten anlaşılmaktadır.

Çubuğun  $\sigma(t) = \sigma_0 \cos \bar{\omega} t$  dengeli harmonik gerilmeye maruz kalması halinde –ki burada  $\sigma_0$ : gerilme dalgası genliği ve  $\bar{\omega}$ : uygulanan dalga dairesel frekansdır– dalga sayısı olan  $k = \bar{\omega}/V$  'nin de kullanılmasıyla, çözüm aşağıdaki gibi olur;

$$u(x, t) = A \cos(\bar{\omega} t - kx) + B \cos(\bar{\omega} t + kx) \quad (2.26)$$

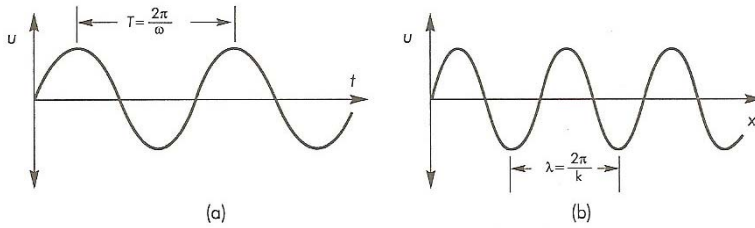
Buradaki ilk ve son terimler sırasıyla pozitif ve negatif x yönünde yayılan harmonik dalgaları tanımlamakta olup dalga sayısı ile dalga boyu ( $\lambda$ ) arasında aşağıdaki gibi bir ilişki vardır:

$$\lambda = V\bar{T} = \frac{V}{\bar{f}} = \frac{2\pi}{\bar{\omega}} V = \frac{2\pi}{k} \quad (2.27)$$

Burada;  $\bar{T}$  : uygulanan yükün periyodu ve  $\bar{f} = 1/\bar{T}$  'dir. Bu eşitliklerden, belirli bir frekansta dalga yayılma hızının artmasıyla dalga boyunun büyüdüğü görülmektedir. Şekil 2.6'da dalga sayısının dalga boyuyla; dairesel frekansın periyotla ilişkili oldukları görülmektedir. Sadece pozitif x yönünde ( $B = 0$ ) ilerleyen dalga için,  $u(x,t)$ 'nin iki kez x'e göre, iki kez de t'ye göre türevinin alınıp, sonra da eşitlik 2.24'te (dalga denkleminde) yerine konulduğunda;

$$\bar{\omega}^2 A \cos(\bar{\omega}t - kx) = -V^2 k^2 A \cos(\bar{\omega}t - kx) \quad (2.28)$$

elde edilir. Daha sonra bu eşitlik  $\bar{\omega} = kV$  şekline indirgenerek 2.26 eşitliğinin dalga denkleminin çözümü olduğu sağlanmış olur.



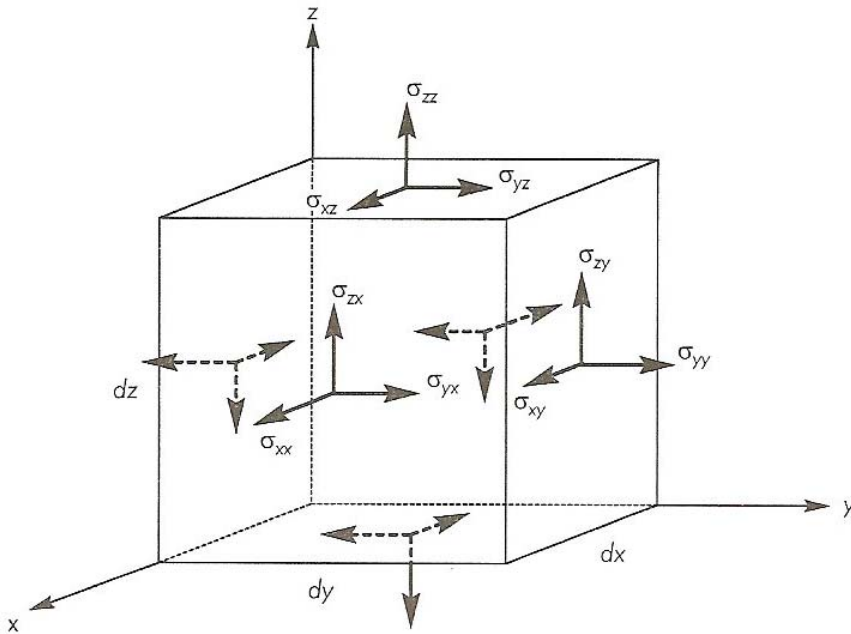
Şekil 2.7. Parçacık yerdeğiştirmesi; (a) zamanın ve (b) çubuk boyunca mesafenin fonksiyonu [Kramer, 1996]

### Üç boyutlu dalga yayılımı ve hareket denklemleri

Yukarıda verilen çubukta dalga yayılması açıklamalarında, dalga yayılmasının bazı temel ilkeleri ortaya konmuştur, fakat sismik dalgaların yer içinde yayılmasını tanımlamada sonsuz uzunluktaki çubuk modeli yeterli olmaktan çok uzaktır. Yerin kendisi ve sismik enerjinin kaynakları üç boyutlu olduğundan, sismik dalgaların üç boyutlu dalga yayılması cinsinden tanımlanması gerekir.

Üç boyutlu hareket denklemlerinin türetilmesinde izlenen adımlar, bir boyutluda kullanılanlar ile aynıdır. Hareket denklemlerinin şekillenmesi, denge bakış açısına, gerilme-birim deformasyon ilişkilerine ve birim deformasyon-yerdeğiştirme bağıntılarına göre yapılır [Kramer, 1996].

Bir katı içinden geçen herhangi bir düzlem üzerinde bir noktadaki gerilme, normal gerilme ve kayma gerilmesi olarak iki bileşene ayrılmaktadır. Şekil 2.8’de bir köşesi x-y-z kartezyen koordinat sisteminin merkezinde olan elemanın yüzeylerinde etkiyen dokuz gerilme bileşeni gösterilmiştir.



Şekil 2.8.  $(dx)(dy)(dz)$  boyutlarındaki bir elemanın gerilme bileşenleri [Kramer, 1996]

Şekil 2.8’de;  $\sigma_{xx}$ ,  $\sigma_{yy}$  ve  $\sigma_{zz}$  ile gösterilen gerilmeler normal,  $\sigma_{xy}$ ,  $\sigma_{yx}$ ,  $\sigma_{xz}$ ,  $\sigma_{zx}$ ,  $\sigma_{yz}$  ve  $\sigma_{zy}$  ile gösterilen gerilmeler ise kayma gerilmeleri olarak verilmiştir.

Üç boyutlu durum için birim deformasyon-yerdeğiştirme bağıntıları aşağıdaki gibi tanımlanmaktadır.

$$\begin{aligned}
\varepsilon_{xx} &= \frac{du}{dx} & \varepsilon_{yy} &= \frac{dv}{dy} & \varepsilon_{zz} &= \frac{dw}{dz} \\
\varepsilon_{xy} &= \frac{dv}{dx} + \frac{du}{dy} & \varepsilon_{yz} &= \frac{dw}{dy} + \frac{dv}{dz} & \varepsilon_{zx} &= \frac{du}{dz} + \frac{dw}{dx}
\end{aligned} \tag{2.29}$$

Rijit olarak kabul edilen cismin x, y, z eksenleri çevresinde dönmeleri ise, dönme-yerdeğiştirme eşitlikleri ile tanımlanır:

$$\Omega_x = \frac{1}{2} \left( \frac{dw}{dy} - \frac{dv}{dz} \right) \quad \Omega_y = \frac{1}{2} \left( \frac{du}{dz} - \frac{dw}{dx} \right) \quad \Omega_z = \frac{1}{2} \left( \frac{dv}{dx} - \frac{du}{dy} \right) \tag{2.30}$$

Doğrusal elastik bir cisimde gerilmeler ile birim deformasyonların doğru orantılı olduğu ve en genel biçimde Hooke Yasası ile tanımlanabildiği bilinmektedir:

$$\begin{aligned}
\sigma_{xx} &= c_{11}\varepsilon_{xx} + c_{12}\varepsilon_{yy} + c_{13}\varepsilon_{zz} + c_{14}\varepsilon_{xy} + c_{15}\varepsilon_{yz} + c_{16}\varepsilon_{zx} \\
\sigma_{yy} &= c_{21}\varepsilon_{xx} + c_{22}\varepsilon_{yy} + c_{23}\varepsilon_{zz} + c_{24}\varepsilon_{xy} + c_{25}\varepsilon_{yz} + c_{26}\varepsilon_{zx} \\
\sigma_{zz} &= c_{31}\varepsilon_{xx} + c_{32}\varepsilon_{yy} + c_{33}\varepsilon_{zz} + c_{34}\varepsilon_{xy} + c_{35}\varepsilon_{yz} + c_{36}\varepsilon_{zx} \\
\sigma_{xy} &= c_{41}\varepsilon_{xx} + c_{42}\varepsilon_{yy} + c_{43}\varepsilon_{zz} + c_{44}\varepsilon_{xy} + c_{45}\varepsilon_{yz} + c_{46}\varepsilon_{zx} \\
\sigma_{yz} &= c_{51}\varepsilon_{xx} + c_{52}\varepsilon_{yy} + c_{53}\varepsilon_{zz} + c_{54}\varepsilon_{xy} + c_{55}\varepsilon_{yz} + c_{56}\varepsilon_{zx} \\
\sigma_{zx} &= c_{61}\varepsilon_{xx} + c_{62}\varepsilon_{yy} + c_{63}\varepsilon_{zz} + c_{64}\varepsilon_{xy} + c_{65}\varepsilon_{yz} + c_{66}\varepsilon_{zx}
\end{aligned} \tag{2.31}$$

Eş. 2.31’de verilen ve “ $c_{ij}$ ” ile gösterilen 36 adet katsayı, malzemenin elastik sabitlerini göstermektedir. Elastik birim deformasyon enerjisinin, birim deformasyonun özel fonksiyonu olması nedeniyle katsayılar 21 adede düşer. Ayrıca, malzeme izotrop ve katsayıların da yöne göre bağımsız olduğu kabul edildiğinde;

$$\begin{aligned}
c_{12} &= c_{21} = c_{13} = c_{31} = c_{23} = c_{32} = \lambda \\
c_{44} &= c_{55} = c_{66} = \mu \\
c_{11} &= c_{22} = c_{33} = \lambda + 2\mu
\end{aligned} \tag{2.32}$$

ve diğer tüm bileşenler sıfır olur. Bu nedenle izotrop, doğrusal, elastik bir malzemenin tüm gerilme ve birim deformasyon bileşenleri, Hooke Yasasında, Lamé Sabitleri olarak bilinen  $\lambda$  ve  $\mu$  cinsinden ifade edilebilir.

İzotrop, doğrusal, elastik malzemelerin gerilme-birim deformasyon ilişkilerini tanımlamak ve uygulamada zemin yapılarının mühendislik özelliklerini belirlemek için bazı parametreler kullanılır. Bu parametreler, cisimlerin deforme olabilme, hacimsel sıkışabilme gibi özelliklerini tanımlar ve birbirleri ile ilişkilidir. Bu parametrelerin tanımları ve Lamé Sabitleri cinsinden eşitlikleri aşağıda verilmiştir:

Elastisite (Young) Modülü: Elemandaki normal gerilmenin, oluşan normal deformasyona oranıdır ve

$$E = \frac{\sigma}{\varepsilon} = \frac{\mu(3\lambda + 2\mu)}{\lambda + \mu} \quad (2.33)$$

ile verilir.

Poisson Oranı: Elemanda gelişen enine deformasyonun, boyuna deformasyonuna oranı olarak tanımlanır.

$$\nu = \frac{\varepsilon_{yy}}{\varepsilon_{xx}} = \frac{\lambda}{2(\lambda + \mu)} \quad (2.34)$$

Kayma (kesme-makaslama) Modülü: Elemanın birim kayma gerilmesine karşı dayanımının bir ölçüsü olup elastisite modülü ve Poisson oranı ile ilişkilidir.

$$G = \frac{E}{2(1 + \nu)} = \mu \quad (2.35)$$

Bulk (Sıkışmazlık) Modülü: Etkin gerilmeler, elemanda oluşturduğu deformasyona göre asal ve kayma (kesme-makaslama) gerilmesi olarak iki gruba ayrılır. Asal

gerilmeler, etkin olduğu eleman üzerinde yalnızca hacimsel değişim meydana getirirken, kayma gerilmeleri elemanda şekil bozulmaları oluştururlar. Bu nedenle, asal gerilme bileşenlerine “hidrostatik gerilme bileşenleri”, kayma gerilmesi bileşenlerine de “deviatorik gerilme bileşenleri” adı verilir [Timoshenko, 1951]. Bulk modülü de cismin veya elemanın hidrostatik gerilmeler altında sıkışabilirliğinin ölçüsü olarak tanımlanır ve aşağıdaki eşitlikle ifade edilir.

$$K = \frac{E}{3(1-2\nu)} = \lambda + \frac{2\mu}{3} \quad (2.36)$$

x, y, z eksenlerine paralel olarak sonsuz küçük bir küpe etkiyen değişimde; küpün her bir yüzeyindeki ortalama gerilmenin o yüzeyin ortasında gösterilen gerilme ile temsil edildiği göz önüne alındığında, x, y, z yönlerinde etkiyen kuvvetlerin bileşkeleri, dengelenmemiş dış kuvvetler ile aynı yöndeki atalet kuvvetleri ile eşitlenerek hesaplanabilir.

$$\begin{aligned} \rho dx dy dz \frac{\partial^2 u}{\partial t^2} = & \left( \sigma_{xx} + \frac{\partial \sigma_{xx}}{\partial x} \right) dy dz - \sigma_{xx} dy dz \\ & + \left( \sigma_{xy} + \frac{\partial \sigma_{xy}}{\partial y} \right) dx dz - \sigma_{xy} dx dz \\ & + \left( \sigma_{xz} + \frac{\partial \sigma_{xz}}{\partial z} \right) dx dy - \sigma_{xz} dx dy \end{aligned} \quad (2.37)$$

Bu eşitlik sadeleştirildiğinde:

$$\rho \frac{\partial^2 u}{\partial t^2} = \frac{\partial \sigma_{xx}}{\partial x} + \frac{\partial \sigma_{xy}}{\partial y} + \frac{\partial \sigma_{xz}}{\partial z} \quad (2.38)$$

eşitliği elde edilir. Bu sadeleştirme işlemi y ve z yönleri için de tekrarlandığında;



$$\rho \frac{\partial^2 v}{\partial t^2} = \frac{\partial \sigma_{yx}}{\partial x} + \frac{\partial \sigma_{yy}}{\partial y} + \frac{\partial \sigma_{yz}}{\partial z} \quad (2.39)$$

$$\rho \frac{\partial^2 w}{\partial t^2} = \frac{\partial \sigma_{zx}}{\partial x} + \frac{\partial \sigma_{zy}}{\partial y} + \frac{\partial \sigma_{zz}}{\partial z} \quad (2.40)$$

eşitlikleri elde edilebilir. Hooke Yasasından yararlanılarak Eş. 2.38, birim deformasyon cinsinden aşağıdaki şekilde yazılabilir:

$$\rho \frac{\partial^2 u}{\partial t^2} = \frac{\partial}{\partial x} (\lambda \bar{\epsilon} + 2\mu \epsilon_{xx}) + \frac{\partial}{\partial y} (\mu \epsilon_{xy}) + \frac{\partial}{\partial z} (2\mu \epsilon_{xz}) \quad (2.41)$$

Eş. 2.11’de verilen birim-deformasyon ilişkileri, Eş. 2.41’de yerine konulduğunda, yerdeğiştirmeler cinsinden hareket denklemi elde edilir:

$$\rho \frac{\partial^2 u}{\partial t^2} = (\lambda + \mu) \frac{\partial \bar{\epsilon}}{\partial x} + \mu \nabla^2 u \quad (2.42)$$

Buradaki Laplace operatörü  $\nabla^2$ ’nin açılımı aşağıdaki gibidir:

$$\nabla^2 = \frac{\partial^2}{\partial x^2} + \frac{\partial^2}{\partial y^2} + \frac{\partial^2}{\partial z^2} \quad (2.43)$$

Bu işlemler y ve z yönleri için de tekrarlandığında;

$$\rho \frac{\partial^2 v}{\partial t^2} = (\lambda + \mu) \frac{\partial \bar{\epsilon}}{\partial y} + \mu \nabla^2 v \quad (2.44)$$

$$\rho \frac{\partial^2 w}{\partial t^2} = (\lambda + \mu) \frac{\partial \bar{\epsilon}}{\partial z} + \mu \nabla^2 w \quad (2.45)$$

Eş. 2.42, 2.44 ve 2.45 ile verilen eşitlikler, izotrop, doğrusal, elastik katıdaki üç boyutlu hareket denklemlerini temsil etmektedir. Bu eşitlikler kullanılarak iki boyutlu dalga denklemleri de elde edilebilir.

Sonsuz bir elastik katıda, cisim dalgası olarak bilinen P ve S dalgalarının ilerlemesi söz konusu olabilir.

P dalgaları, içinden geçtikleri malzemede herhangi bir dönme oluşturmazlar ve  $V_p$  hızı ile yayılırlar. Buna “dönmesiz veya dilatasyonel dalga ilerlemesi” adı verilir. Bu tip bir dalga ilerlemesi için Eş. 2.46’da verilen dalga denklemi; Eş. 2.42, 2.44 ve 2.45’deki denklemlerin her birinin x, y, z’ye göre türevinin alınıp sonuçların toplanması, elde edilen eşitlikte de gerekli sadeleştirme işlemlerinin sırasıyla yapılmasıyla ifade edilebilir.

$$\frac{\partial^2 \bar{\epsilon}}{\partial t^2} = \frac{\lambda + 2\mu}{\rho} \nabla^2 \bar{\epsilon} \quad (2.46)$$

P dalgası iletme hızı olarak tanımlanan  $V_p$  de;

$$V_p = \sqrt{\frac{\lambda + 2\mu}{\rho}} \quad (2.47)$$

şeklinde ifade edilir.

Eş. 2.35 ve 2.36 kullanılarak  $V_p$ , kayma modülü ve Poisson Oranı cinsinden aşağıdaki gibi yazılabilir.

$$V_p = \sqrt{\frac{G(2 - 2\nu)}{\rho(1 - 2\nu)}} \quad (2.48)$$

Bir diğ er cisim dalgası olan S dalgaları ise geçtikleri ortamda hacim değişimine yol açmadan  $V_s$  hızı ile yayılırlar. Buna da eşhacimsel veya distorsiyonel dalga ilerlemesi adı verilir. Bu tip bir dalga ilerlemesi için de Eş. 2.31’de verilen dalga denklemi; Eş. 2.44’ n  $z$ ’ye, Eş. 2.45’in de  $y$ ’ye göre türevinin alınıp, birbirinden çıkarılması ve dönmenin tanımından hareketle aşağıdaki gibi ifade edilebilir:

$$\frac{\partial^2 \Omega_x}{\partial t^2} = \frac{\mu}{\rho} \nabla^2 \Omega_x \quad (2.49)$$

S dalgası yayılma hızı  $V_s$  de;

$$V_s = \sqrt{\frac{\mu}{\rho}} = \sqrt{\frac{G}{\rho}} \quad (2.50)$$

şeklinde ifade edilir.

P ve S dalgalarının hızları, katıda her bir dalganın neden olduğu deformasyona göre oluşan rijitliklere bağlı olup hızlar arasında bir karşılaştırma yapıldığında;

$$\frac{V_p}{V_s} = \sqrt{\frac{2-2\nu}{1-2\nu}} \quad (2.51)$$

olduğu görülür.

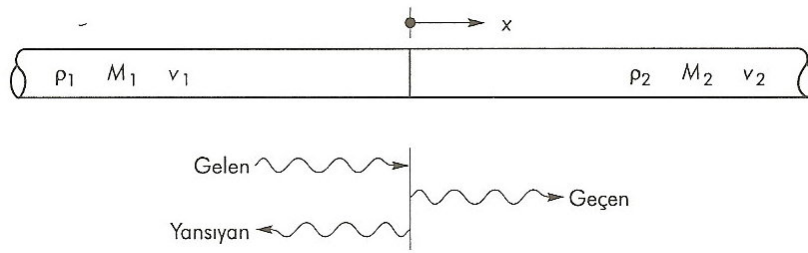
Geoteknik Mühendisliği’nin y zeeye yakın problemlerinde yeryüzü yarı sonsuz bir ortam olarak modellenmektedir. Serbest y zeeye ilgili sınır koşulları, hareket denklemlerine ek çözümler elde etmeye ve yüzey dalgalarını tanımlamaya yardımcı olmaktadır.

### 2.3.3. Sismik dalgalarda yansıma ve kırılma

Sismik dalgalarda yansıma ve kırılmayı açıklayabilmek için, dalga ilerlemesi konusunda gösterildiği gibi burada da bir çubuk üzerinde +x yönünde ilerleyen iki farklı malzemenin ara yüzeyine doğru yaklaşan bir harmonik gerilme dalgası incelenebilir (Şekil 2.9).

Şekil 2.9’da gösterilen gelen dalga, bir numaralı malzeme içinde ilerlediğinden, dalga boyu  $\lambda_1 = 2\pi / k_1$  olarak tanımlanabilir ve gerilme eşitliği de aşağıdaki gibi ifade edilebilir:

$$\sigma_1(x, t) = \sigma_1 e^{i(\omega t - k_1 x)} \quad (2.52)$$



Şekil 2.9. Malzemenin ara yüzeyinde bir boyutlu dalga yayılması [Kramer, 1996]

Şekil 2.9’da, gelen ve yansıyan dalgaların bir numaralı malzemede zıt yönde ilerledikleri, geçen dalga ise iki numaralı malzeme içinde gelen dalga ile aynı yönde ilerlediği görülmektedir. Geçen dalga için dalga boyu,  $\lambda_2 = 2\pi / k_2$  olarak tanımlanabilir ve geçen dalga ile yansıyan dalga gerilme eşitlikleri de aşağıdaki gibi ifade edilebilir:

$$\sigma_T(x, t) = \sigma_T e^{i(\omega t - k_1 x)} \quad (2.53)$$

$$\sigma_R(x, t) = \sigma_r e^{i(\omega t + k_1 x)} \quad (2.54)$$

Burada;  $\sigma_T$  : geçen dalganın gerilmesi,  $\sigma_R$  : yansıyan dalganın gerilmesi olarak tanımlanmaktadır ve bu dalgaların oluşturduğu yerdeğiştirmeler, gerilmeler ile aynı harmonik formda varsayıldığında;

$$u_i(x, t) = A_i e^{i(\omega t - k_1 x)} \quad (2.55)$$

$$u_R(x, t) = A_r e^{i(\omega t + k_1 x)} \quad (2.56)$$

$$u_T(x, t) = A_t e^{i(\omega t - k_2 x)} \quad (2.57)$$

eşitlikleri ile elde edilir. Eşitlikler içinde yer alan  $A_i$ ,  $A_r$  ve  $A_t$  değerleri sırasıyla gelen, yansıyan ve geçen dalgaların genlikleri olarak tanımlanmaktadır. Ayrıca, gerilme–birim deformasyon ve birim deformasyon–yerdeğiştirme eşitlikleri aşağıda verilmiştir:

$$\sigma_i(x, t) = M_1 \frac{\partial u_i(x, t)}{\partial x} = ik_1 M_1 A_i e^{i(\omega t - k_1 x)} \quad (2.58)$$

$$\sigma_R(x, t) = M_1 \frac{\partial u_R(x, t)}{\partial x} = ik_1 M_1 A_r e^{i(\omega t + k_1 x)} \quad (2.59)$$

$$\sigma_T(x, t) = M_2 \frac{\partial u_T(x, t)}{\partial x} = ik_2 M_2 A_t e^{i(\omega t - k_2 x)} \quad (2.60)$$

Bu eşitliklerden hareketle, gerilme genlikleri ile yerdeğiştirme genlikleri aşağıdaki gibi ilişkilendirilebilir:

$$\sigma_i = - ik_1 M_1 A_i \quad (2.61)$$

$$\sigma_r = + ik_1 M_1 A_r \quad (2.62)$$

$$\sigma_t = - ik_2 M_2 A_t \quad (2.63)$$

Ara yüzeylerde yerdeğiştirmelerin uyumluluğu ve gerilmelerin devamlılığı şartları sağlanmalıdır. Buna göre;

$$u_i(0, t) + u_r(0, t) = u_t(0, t) \quad (2.64)$$

$$c_i(0, t) + c_r(0, t) = c_t(0, t) \quad (2.65)$$

olmalıdır. Eş. 2.53 ve 2.54, Eş. 2.65'te, Eş. 2.55, 2.56 ve 2.57 ise Eş. 2.64'te yerine konulduğunda aşağıdaki eşitlikler elde edilir:

$$A_i + A_r = A_t \quad (2.66)$$

$$c_i + c_r = c_t \quad (2.67)$$

Eş. 2.61, 2.62 ve 2.63, Eş. 2.67'de,  $kM = wpu$  ilişkisi kullanılarak, yerine konulduğunda;

$$- \rho_1 v_1 A_i + \rho_1 v_1 A_r = - \rho_2 v_2 A_t = - \rho_2 v_2 (A_i + A_r) \quad (2.68)$$

elde edilir. Yansımış dalğanın yerdeğiştirme genliğini gelen dalğanın yerdeğiştirme genliği ile ilişkilendirmek için Eş. 2.68 yeniden dzenlendiğinde;

$$A_r = \frac{\rho_1 v_1 - \rho_2 v_2}{\rho_1 v_1 + \rho_2 v_2} A_i = \frac{1 - \rho_2 v_2 / \rho_1 v_1}{1 + \rho_2 v_2 / \rho_1 v_1} A_i \quad (2.69)$$

olur ve  $A_t$  için de;

$$A_t = \frac{2\rho_1 v_1}{\rho_1 v_1 + \rho_2 v_2} A_i = \frac{2}{1 + \rho_2 v_2 / \rho_1 v_1} A_i \quad (2.70)$$

eşitliği yazılabilir. Oransallık katsayısı olan  $\rho V_p$ , malzemenin özgül empedansı olarak adlandırılmakta ve bunun dalgaların sınırlardaki davranışını etkileyen önemli bir özellik olduğu bilinmektedir. Eş. 2.69 ve 2.70’te ara yüzeydeki enerji bölünmesinin sadece ara yüzeyin her iki yanındaki malzemelerin özgül empedans oranlarına bağlı olduğu görülmektedir. Empedans oranı;

$$\alpha_z = \frac{\rho_2 v_2}{\rho_1 v_1} \quad (2.71)$$

olarak tanımlandıktan sonra, yansıyan ve geçen dalgaların yer değiştirme genlikleri aşağıdaki gibi ifade edilebilir:

$$A_r = \frac{1 - \alpha_z}{1 + \alpha_z} A_i \quad (2.72)$$

$$A_t = \frac{2}{1 + \alpha_z} A_i \quad (2.73)$$

Ara yüzeyin yansıyan ve geçen dalgaların genlikleri üzerindeki etkisi belirlendikten sonra gerilme genlikleri üzerindeki etkileri de Eş. 2.61, 2.62 ve 2.63’ten yararlanarak aşağıdaki gibi ifade edilebilir:

$$\sigma_r = \frac{\alpha_z - 1}{1 + \alpha_z} \sigma_i \quad (2.74)$$

$$\sigma_t = \frac{2\alpha_z}{1 + \alpha_z} \sigma_i \quad (2.75)$$

Eş. 2.72, 2.73, 2.74 ve 2.75’in empedans oranının 1’den küçük veya 1’den büyük olduğu durumlarda çok farklı davranış şeklinin ortaya çıkacağını ifade ettiği anlaşılmaktadır. Empedans oranı 1’den küçük olduğu zaman gelen dalgaının daha

yumuşak bir malzemeye, 1'den büyük olduğu durumlarda ise daha rijit bir malzemeye yaklaştığı düşünülebilir. Sıfır ile sonsuz arasında değişen birkaç farklı empedans oranındaki sınırlarda yansıyan ve geçen dalgaların göreceli olarak gerilme ve yerdeğiştirme genlikleri Çizelge 2.1'de gösterilmiştir.

Çizelge 2.1. Yansıyan ve geçen dalgaların yerdeğiştirme ve gerilme genlikleri üzerinde empedans oranının etkisi [Kramer, 1996]

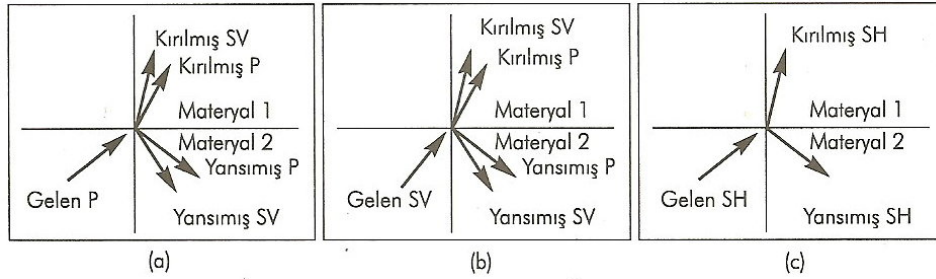
| Empedans Oranı, $\alpha_z$ | Yerdeğiştirme Genlikleri |             |            | Gerilme Genlikleri |                  |                 |
|----------------------------|--------------------------|-------------|------------|--------------------|------------------|-----------------|
|                            | Gelen                    | Yansıyan    | Geçen      | Gelen              | Yansıyan         | Geçen           |
| 0                          | $A_i$                    | $A_i$       | $2A_i$     | $\sigma_i$         | $-\sigma_i$      | 0               |
| $\frac{1}{4}$              | $A_i$                    | $3A_i / 5$  | $8A_i / 5$ | $\sigma_i$         | $-3\sigma_i / 5$ | $2\sigma_i / 5$ |
| $\frac{1}{2}$              | $A_i$                    | $A_i / 3$   | $4A_i / 3$ | $\sigma_i$         | $-\sigma_i / 3$  | $2\sigma_i / 3$ |
| 1                          | $A_i$                    | 0           | $A_i$      | $\sigma_i$         | 0                | $\sigma_i$      |
| 2                          | $A_i$                    | $-A_i / 3$  | $2A_i / 3$ | $\sigma_i$         | $\sigma_i / 3$   | $4\sigma_i / 3$ |
| 4                          | $A_i$                    | $-3A_i / 5$ | $2A_i / 5$ | $\sigma_i$         | $3\sigma_i / 5$  | $8\sigma_i / 5$ |
| $\infty$                   | $A_i$                    | $A_i$       | 0          | $\sigma_i$         | $\sigma_i$       | $2\sigma_i$     |

Dalgalar genelde ara yüzeylere dik olarak yaklaşmadıkları için ve ara yüzey boyunca enerjinin yansıma ve geçme tarzını önemli ölçüde etkilediğinden dolayı, eğimli dalga yöneliminin incelenmesi gereklidir. Fermat ilkesine göre; rasgele seçilen A ve B noktalarını bağlayan herhangi bir kesintisiz iz boyunca minimum ilerleme zamanı, iki nokta arasındaki sismik palsın yayılma zamanı olarak tanımlanmaktadır. Yönü genelde vektör ile gösterilen ışın, minimum ilerleme zamanını sağlayan ışın izi tanımlanır. Snell ise, dalga yayılma hızları farklı malzemelerin arasındaki yüzeylerde ışın izinin yön değişimini incelemiştir. Snell, Fermat ilkesini kullanarak ( $\sin i / V$ ) oranının sabit olduğunu göstermiştir. Burada;  $i$ , ışın izi ile ara yüzey normali arasındaki açı,  $V$  ise P veya S dalgasının hızı olarak tanımlanabilmektedir.

Şekil 2.10'da gelen P, SV ve SH dalgalarının iki malzemenin ara yüzeyinde yansıması ve kırılması sonucu oluşan durum gösterilmiştir. Şekilde, gelen P ve SV dalgalarındaki parçacık hareketi ara yüzey düzlemine dik olduğundan, bunların ikisinin de yansımış ve kırılmış P ve SV dalgalarını ürettiği, gelen SH dalgasının ise



ara yüzeye dik bir parçacık hareketi olmaması nedeni ile sadece yansıyan ve kırılan SH dalgalarını ürettiği görülmektedir.



Şekil 2.10. Gelen (a) P dalgasından, (b) SV dalgasından ve (c) SH dalgasından yansıyan ve kırılan ışınlar [Kramer, 1996]

Ara yüzeyde üretilen dalgaların yönü ve genliği, gelen dalganın yönü ve genliğine bağlıdır. Snell yasası ile birlikte denge ve uyumluluk şartlarını kullanarak bu yönler ve genlikler belirlenebilir.

Çizelge 2.2. Richter notasyonları [Richter, 1958]

| Dalga Türü | Hız | Genlik | Normal ile Açısı |
|------------|-----|--------|------------------|
| Gelen P    | U   | A      | A                |
| Gelen S    | V   | B      | B                |
| Yansımış P | U   | C      | C                |
| Yansımış S | V   | D      | D                |
| Kırılmış P | Y   | E      | E                |
| Kırılmış S | Z   | F      | F                |

Richter'in Çizelge 2.2'de verilen notasyonları kullanılarak, tüm dalgaların yönleri, gelen dalganın yönü ile Snell Yasası yardımı ile aşağıdaki gibi ilişkilendirilebilir:

$$\frac{\sin a}{U} = \frac{\sin b}{V} = \frac{\sin c}{U} = \frac{\sin d}{V} = \frac{\sin e}{Y} = \frac{\sin f}{Z} \quad (2.76)$$

Snell Yasası'na göre; yüksek hıza sahip bir malzemeden düşük hıza sahip bir malzemeye geçen dalgaların ara yüzeyin normaline yaklaşarak kırıldığı

bilinmektedir. Bir başka deyişle; yeryüzünde olduğu gibi dalga iletme hızları üste doğru giderek azalan yatay tabakalı bir durumda yukarı doğru ilerleyen dalgalar, düşey doğrultuya giderek yaklaşan şekilde kırılmaktadır [Kramer, 1996].

## **2.4. Viskoelastisite**

### **2.4.1. Viskoelastik davranış**

Viskoelastisite teorisi ilk olarak, [Boltzman, 1874] ve [Volterra, 1900] tarafından ortaya atılmıştır. Boltzman ve Volterra, şekil değiştirmenin, malzemenin geçmişine bağlı olduğunu matematiksel olarak ifade etmişlerdir. Daha sonra özellikle 1943 ve 1944 yıllarında sırasıyla Leaderman ve Alfrey, elastisite teorisi prensiplerini esas alarak viskoelastisite teorisini geliştirmişler, bu tür problemlerin çözümü için yöntemler üzerinde çalışmışlardır.

Malzeme davranışları;

- İdeal Elastik,
- İdeal Plastik,
- Elastoplastik,
- Viskoz,
- Viskoelastik,
- Viskoplastik

olarak sıralanabilir. Ancak gerçekte hiçbir malzeme, ideal elastik davranış göz önüne alınarak açıklanamaz. Bu malzemelerin davranışları, Hooke kanunu yardımı ile elastik özelliklerin yanı sıra viskoz özellikleri de dikkate alınarak belirlenebilir. Malzemenin, viskoz sıvı ve doğrusal elastik davranışı birlikte sergilemesine “Viskoelastik Davranış”, malzemeye “Viskoelastik Malzeme” ve bu teoriye de “Viskoelastisite Teorisi” adı verilmektedir.

Mühendislik yapıları tasarlanırken, hesap kolaylığı sağlamak amacıyla, malzemeler elastik olarak kabul edilmektedir. Gerçekte tüm malzemelerin özellikleri, viskoz ve elastik parametreler dikkate alınarak açıklanabilmektedir. Zeminler de elastik bir

malzeme olmamasına karşın, tasarıma yönelik yapılan tüm hesaplamalar, genelde, elastik kabuller doğrultusundadır. Ancak, zeminlerde sismik dalga yayılımını modelleyebilmek için, öncelikle gerçekleştirilecek fiziksel model, elastik olmayan etkiler göz önüne alınarak oluşturulmalıdır. Zeminlerde oluşan elastik olmayan davranış mekanizmaları, ancak dânesel boyutta açıklanabildiğinden, matematiksel çözümlerde zorluklar yaşanabilir. Bunun için, gerçek zemin ortamlarında gözlenen süreci tanımlayabilmek amacıyla, “doğrusal viskoelastisite” modeli uygulanabilir. Bu modelde viskoelastik malzeme olarak zemindeki, gerilme – birim deformasyon tepkilerinin elastik kabullerde olduğu gibi ani olarak gerçekleşmediği, söz konusu tepkilerin belli bir zamanda olduğu kabulü yapılır. Bir başka anlatım şekliyle elastik davranışta bünye eşitlikleri, gerilme ve şekil değiştirmelerin bir fonksiyonu olduğu halde, viskoelastik davranışta bünye düzensizliklerinde gerilme ve şekil değiştirme sadece yüklemeye değil, yüklemenin hızına, uygulanan yükün büyüklüğü ve süresine bağlıdır.

Viskoelastisite terimi modelin viskoz sıvı davranışını ve doğrusal elastik davranışını birleştirerek uygulamasından kaynaklanmaktadır. Viskoelastisite teorisini kullanmada ortaya çıkan sorun, şu an gelişme halinde olan şekliyle, sadece doğrusal olan malzemelerde uygulanıyor olması ve zeminlerin de doğrusal özellikler göstermemesidir.

Viskoelastik ortamlar, bu ortamda yayılan sismik dalgalar üzerinde genel kinematik etkilere sahiptir. Örneğin, doğrusal elastik malzemelerde yayılan sismik dalga hızı frekanstan bağımsız olduğu halde, viskoelastik ortamlarda hız, frekansa bağlıdır. Bu durumun en belirgin özelliği olarak, viskoelastik ortamlarda ilerleyen dalgaların şekil değiştirmesi gösterilebilir.

Viskoelastik malzemelerin bazı özellikleri – daha sonraki bölümlerde ayrıntılı olarak verilecek olan – aşağıda sıralanmıştır:

- Eğer gerilme sabit ise, birim şekil değiştirme zamanla artar (sünme).
- Eğer birim şekil değiştirme sabit ise, gerilme zamanla azalır (gevşeme).

- Efektif rijitlik yükün uygulanma anına bağlıdır.
- Periyodik yük uygulandığında kesinti (faz gecikmesi) meydana gelir, bu durum mekanik enerjinin dağılmasına neden olur.

Viskoelastik davranış; elastik davranışı temsil eden bir yay ile viskoz davranışı temsil eden iç sürtünmeli bir yağ kutusu ile açıklanabilmekte ve bu iki modelin farklı şekillerdeki süper pozisyonundan oluşan modeller sistemi ile de malzeme davranışı kolayca ve açık bir biçimde matematiksel model haline dönüştürülebilmektedir.

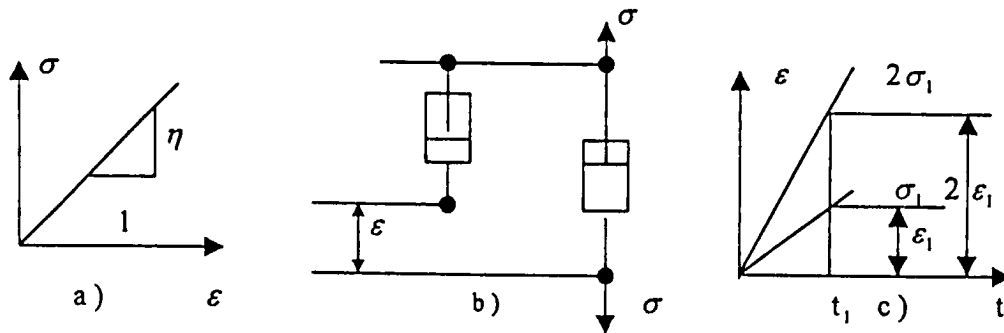
#### 2.4.2. Viskoz Davranış

Viskoz davranışta gerilme ile şekil değiştirme doğru orantılı olup, bu ideal özelliğe sahip olarak oluşturulan cisme Newton cismi adı verilmektedir.

Newton cismi şekilde de gösterildiği üzere, bir sönümleyici ile temsil edilmektedir. Viskoz davranışı gösteren eşitlik;

$$\sigma = \eta \cdot \dot{\epsilon} \quad (2.77)$$

şeklinde ifade edilebilir. Burada,  $\eta$  viskozite katsayısıdır.



Şekil 2.11. Viskoz davranışa ait şekiller; a) gerilme – şekil değiştirme; b) viskoz malzeme; c) şekil değiştirme süresi

$\sigma_1$  sabit gerilme altındaki şekil değiştirme aşağıdaki ifade ile gösterilir.

$$\varepsilon = \frac{\sigma_1}{\eta} \cdot t \quad (2.78)$$

Şekil 2.11'den de görüldüğü üzere, sabit gerilme altında şekil değiştirme zamana bağlı olarak sürekli artmakta, cisme etki eden yük kaldırıldığında şekil değiştirme ulaştığı son halini korumaktadır.

Modellemede Hooke ve Newton cisimlerinin uygun şekilde kullanılması ile değişik viskoelastik davranış şekilleri açıklanabilir.

#### 2.4.3. Maxwell cismi

Maxwell modeli, doğrusal yay ile sönüm kutusu elemanlarının seri olarak birleştirilmesinden oluşmaktadır (Şekil 2.12).

Bu modelin bünye eşitlikleri aşağıdaki gibi yazılabilir:

$$\varepsilon = \varepsilon_1 + \varepsilon_2 \quad (2.79)$$

Eş. 2.79'da,

$\varepsilon$  :  $\sigma$  gerilmesi etkisinde modelin toplam uzaması,

$\varepsilon_1$  : yaydaki uzama ve sönüm

$\varepsilon_2$  : kutudaki uzamadır.

Eş. 2.79'un zamana göre türevi aşağıda verilmiştir.

$$\varepsilon' = \varepsilon_1' + \varepsilon_2' \quad (2.80)$$

Elastik cismi temsil eden bünye eşitliği aşağıda verilmiştir.

$$\varepsilon_1 = \frac{\sigma}{E}, \quad \varepsilon_1' = \frac{\sigma'}{E} \quad (2.81)$$

Viskoz davranışı temsil eden sönüm kutusunun bünye eşitliği ise aşağıdaki gibidir.

$$\varepsilon_2' = \frac{\sigma}{\eta} \quad (2.82)$$

Eş. 2.81 ve 2.82, Eş. 2.80'de yerine konulduğunda Maxwell cisminin mekanik davranışını temsil eden diferansiyel eşitlik aşağıdaki gibi elde edilir.

$$\varepsilon' = \frac{\sigma'}{E} + \frac{\sigma}{\eta} \quad (2.83)$$

Eş. 2.83'te gerilme ya da şekil değiştirme parametrelerine değerler verilerek bu cismin davranışı incelenebilir.

Maxwel cismine  $\sigma = \sigma_0$  gerilmesi uygulandığında davranışı temsil eden diferansiyel eşitliğin integrasyonundan aşağıdaki sönme ifadesi elde edilir.

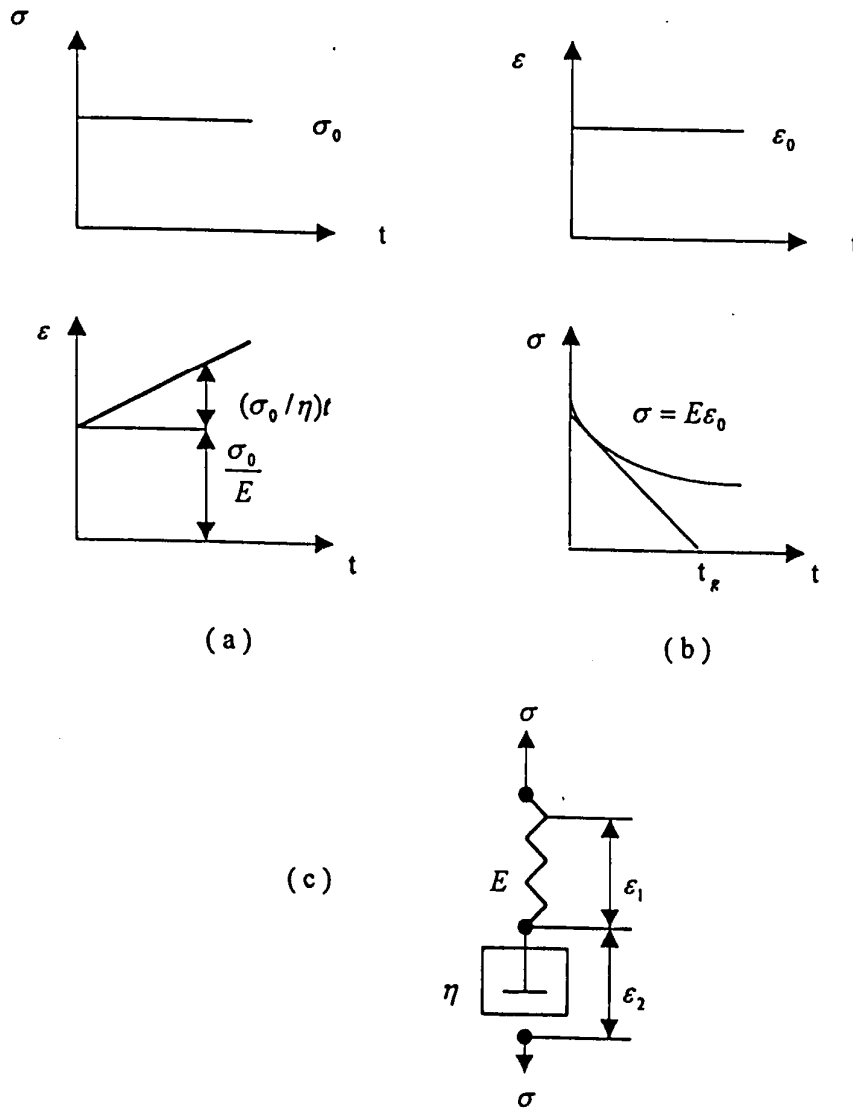
$$\varepsilon = \frac{\sigma_0}{E} + \frac{\sigma_0}{\eta} t \quad (2.84)$$

Şekil 2.12'den de anlaşılacağı üzere  $\sigma_0$  gerilmesi uygulandığında önce ani olarak  $\sigma_0 / E$  elastik şekil değiştirme, daha sonra onu izleyen ve zamanla artarak devam eden  $\sigma_0 / \eta.t$  viskoz şekil değiştirme oluşur. Yük kaldırılınca yaydaki şekil değiştirme geri dönüp sıfıra ulaşır, viskoz akma ise aynı kalır.

Maxwell cismine önce  $\varepsilon = \varepsilon_0$  uzaması uygulanır ve sabit tutulursa, gerilmede zamanla azalma olduğu görülür. Buna gevşeme ya da gerilme reaksiyonu adı verilir. Maxwell cisim davranışının diferansiyel eşitliğine  $\varepsilon = \varepsilon_0$  değeri konulduğunda;

$$\sigma = \sigma_0 \cdot e^{-(E/\eta)t} \quad (2.85)$$

ifadesi elde edilir. Burada  $\sigma_0 = E \cdot \varepsilon_0$  gerilmenin başlangıç değeridir. Gerilmenin zamanla azalması Şekil 2.12'de çizilen eğri ile gösterilmiştir. Bu eğrinin  $t = 0$  anındaki teğeti zaman eksenini  $t_g = \eta / E$  noktasında keser. Burada  $t_g$  malzemenin karakteristik bir özelliği olup, “gevşeme süresi” olarak tanımlanabilir.



Şekil 2.12. Maxwell cismi davranışları şekilleri; a) sabit gerilme – şekil değiştirme ilişkisi; b) sabit şekil değiştirme – gerilme ilişkisi; c) Maxwell modeli

#### 2.4.4. Kelvin cismi

Yay elemanı ve sönüm kutusu elemanının paralel olarak birleştirilmesinden oluşan Kelvin cismini temsil eden modelin eşitlikleri aşağıda verilmiştir. Burada toplam gerilme;

$$\sigma = \sigma_1 + \sigma_2 \quad (2.86)$$

olup, yaydaki gerilme ve sönüm kutusundaki gerilmeler sırasıyla;

$$\sigma_1 = E \cdot \varepsilon \quad (2.87)$$

$$\sigma_2 = \eta \cdot \varepsilon' \quad (2.88)$$

şeklindedir.

Eş. 2.87 ve 2.88, Eş. 2.86'da yerine konulursa cismin mekanik davranışını gösteren diferansiyel eşitlik elde edilir.

$$\sigma = E \cdot \varepsilon + \eta \cdot \varepsilon' \quad (2.89)$$

Kelvin cismine sabit bir gerilme uygulandığında oluşan sünme, şekil değiştirme davranışını gösteren diferansiyel eşitlik yardımı ile bulunabilir.  $\sigma = \sigma_0$  için integrali alınan diferansiyel eşitlik aşağıdaki sünme eşitliğini vermektedir.

$$\varepsilon = \frac{\sigma_0}{E} (1 - e^{-(E/\eta)t}) \quad (2.90)$$

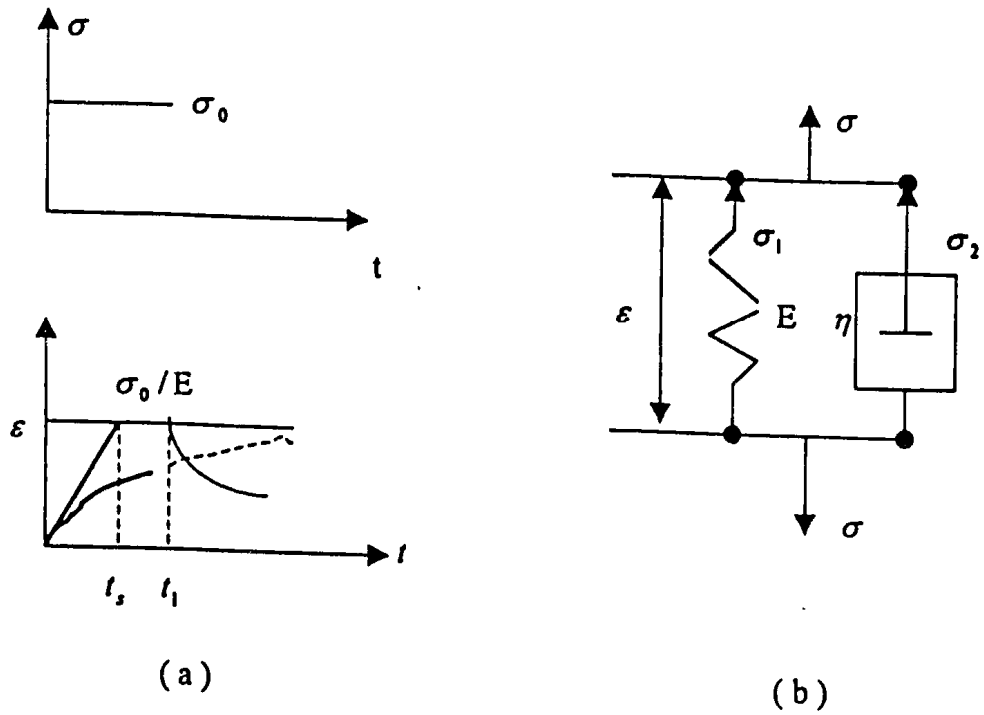
Bu eşitliğe göre sabit  $\sigma_0$  gerilmesi uygulandığında hızı zamanla azalan sürekli bir uzama oluşur ve  $t = \infty$  olduğunda  $\sigma_0 / E$  değerini alır. Şekil 2.13'te görüldüğü üzere cismin sünmesinin asimptotik değeri elastik deformasyona eşittir. Sünme eğrisinin  $t = 0$  noktasındaki teğeti yatay asimptotu, t'nin  $t_s = \eta / E$  değerinde keser. Burada  $t_s$  malzemenin karakteristik bir özelliği olup, Kelvin cisminin gecikme süresi olarak



tanımlanabilir.  $t = t_1$  anında gerilme değerinin sıfır olmasından sonra oluşacak şekil değiştirme;

$$\varepsilon = \frac{\sigma_0}{E} (e^{-(E/\eta)t} - 1) \cdot e^{-(E/\eta)t} \quad (2.91)$$

şeklindedir. Eş. 2.91'e göre şekil değiştirme sürekli azalma gösterir ve  $t = \infty$  değeri için sıfıra ulaşır. Tüm bu yükleme – boşaltma işlemlerinden elde edilen sonuca göre Kelvin cisminin gecikmiş bir elastik davranış gösterdiği belirlenebilir. Yük kaldırıldıktan sonra tam geri dönüş olur ve cisim ilk boyuna ulaşmış olur. Kelvin cismine sabit şekil değiştirme uygulanırsa, bu kez gerilmenin sabit kalacağı görülür.



Şekil 2.13. Kelvin cismi davranış şekilleri; a) sabit gerilme – şekil değiştirme ilişkisi  
b) Kelvin modeli

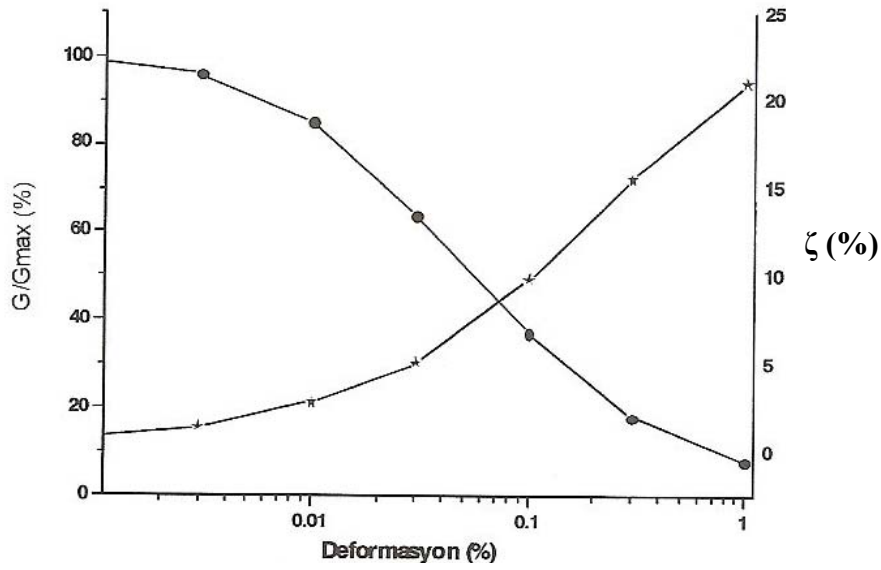
#### 2.4.5. Viskoelastik ortamdaki gerilme dalgaları

Gerilme dalgaları, homojen doğrusal elastik malzemelerde genliklerinde herhangi bir değişiklik olmaksızın yayılırlar. Ancak, bu tür davranış şekli gerçek malzemelerde oluşmaz. Yerkabuğunu oluşturan birimlerde olduğu gibi, gerçek malzemelerdeki gerilme dalgalarının genlikleri de mesafe ile birlikte sönüme uğramaktadır. Bunun nedeni, ilerleyen (yayılan) bir dalganın elastik enerjisinin bir kısmının sürekli ısı enerjisine dönüşmesidir. Elastik enerjinin sönümlenmesini – matematiksel açıdan uygunluğu açısından – temsil için genellikle viskoz sönümleme kullanılır.

Zemin birimlerindeki sönüm üzerine bazı deneysel çalışmalar yapılmış, bunlar içerisinde, titreşim genliğinin sönüm üzerindeki etkisi, elastik dalga enerjisinin kumlarda sönümlenmesi ve dalga yayılımı da incelenmiştir [Hall ve ark., 1963]. daneli zemin birimlerinde Ayrıca, deprem anında zemin davranışı ve özelliklerinin etkisi incelenmiş, farklı bölgelere ait kumlu zemin birimleri üzerinde yapılan deneysel çalışmalar sonucunda, kayma deformasyonuna bağlı olarak kayma gerilmesi ve sönüm ilişkisi araştırılmıştır [Idriss ve ark., 1968]. Çizelge 2.3 ve Şekil 2.14'te Seed ve arkadaşları tarafından elde edilen sonuçlar gösterilmiştir [Seed ve ark., 1969].

Çizelge 2.3. Kumlarda kayma deformasyonuna bağlı  $G/G_{\max}$  ve sönüm oranı ( $\zeta$ ) değişimi [Seed ve ark., 1969]

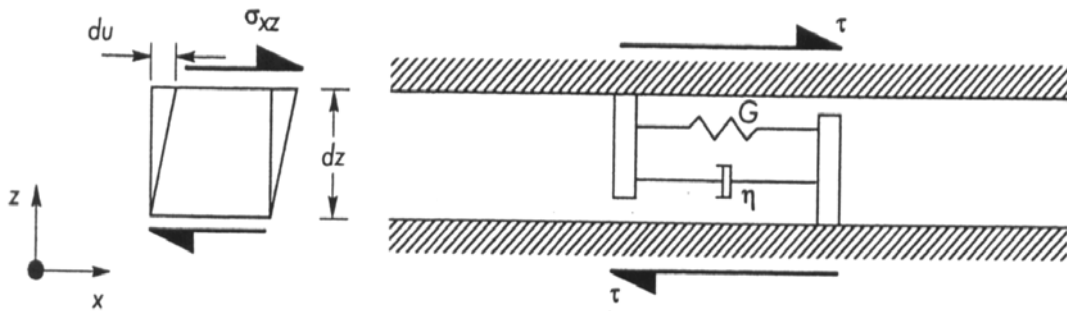
| Kayma deformasyonu (%) | $G/G_{\max}$ (%) | $\zeta$ (%) |
|------------------------|------------------|-------------|
| 0,0001                 | 100              | 0,24        |
| 0,0003                 | 100              | 0,42        |
| 0,001                  | 99               | 0,8         |
| 0,003                  | 96               | 1,4         |
| 0,01                   | 85               | 2,8         |
| 0,03                   | 64               | 5,1         |
| 0,1                    | 37               | 9,8         |
| 0,3                    | 18               | 15,5        |
| 1                      | 8                | 21          |



Şekil 2.14. Kumlarda kayma deformasyonuna bağlı  $G/G_{\max}$  ve  $\zeta$  (%) değişimi [Seed ve ark., 1969]

Bu bölümde viskoelastik ortamda yayılan dalgaları modelleyebilmek için sıkça kullanılan Kelvin cismi (Kelvin-Voight Katısı) örneklenmiş, ayrıca çalışmanın sonlu eleman model analizinde kullanılan bilgisayar programının esas aldığı “Rayleigh Sönüm Yaklaşımı” verilmiştir.

Kaymaya maruz kalan bir Kelvin-Voight katısı için gerilme-birim deformasyon ilişkisi aşağıdaki gibi verilmektedir.



Şekil 2.15. Yatay sarsmaya maruz kalan bir Kelvin-Voight katısının ince elamanı

Kayma deformasyonuna gösterilen toplam direnç, bir elastik bileşenin (yay) ve viskoz bir bileşenin (sönümleyici) toplamı olarak ifade edilir.

$$\tau = G\gamma + \eta \frac{\partial \gamma}{\partial t} \quad (2.92)$$

Burada,

$\tau (= \sigma_{xz})$  : kayma gerilmesi,

$\gamma (= \partial u / \partial z)$  : kayma birim deformasyonu

$\eta$  : malzemenin viskozitesi

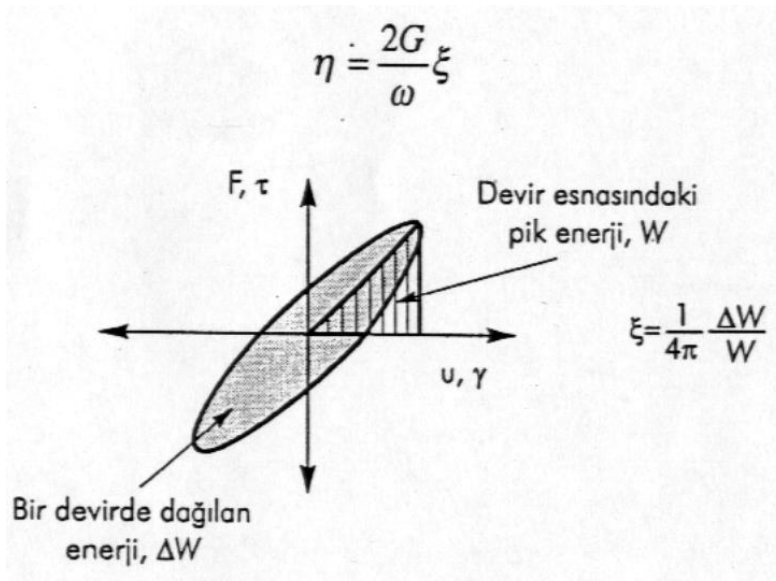
olarak tanımlanmaktadır. Bu nedenle kayma gerilmesi elastik kısım (birim deformasyon ile doğru orantılı) ile viskoz kısmın (birim deformasyon oranı ile doğru orantılı) toplamıdır.

$$\gamma = \gamma_0 \cdot \sin(\omega t) \quad (2.93)$$

şeklindeki harmonik bir kayma birim deformasyonu için kayma gerilmesi,

$$\tau = G\gamma_0 \sin \omega t + \omega \eta \gamma_0 \cos \omega t \quad (2.94)$$

şeklindedir. Eş. 2.93 ve 2.94, Kelvin-Voight katısında oluşan gerilme-birim deformasyon döngüsünün bir elips olduğunu gösterir (Şekil 2.16).



Şekil 2.16. Histeres döngüsü ve sönümlenme oranı arasındaki ilişki [Kramer, 1996]

Sadece bir döngüde sönümlenen elastik enerji, elipsin alanı olarak ifade edilir, veya:

$$\Delta W = \int_0^{t_0+2\pi/\omega} \tau \frac{\partial \gamma}{\partial t} dt = \pi \eta \omega \gamma_0^2 \quad (2.95)$$

olur. Bu ilişki, sönümlenen enerjinin yükleme frekansı ile orantılı olduğunu ifade eder. Ancak, gerçek zeminler elastik enerjiyi (danelerin birbirine göre kayması aracılığıyla) histeres halkasına uygun olarak sönümlendirirler. Sonuçta bunların enerji sönümlenme özellikleri frekansa karşı duyarlı değildir. Özel Kelvin-Voight sistemleri için, sönümlenme oranı  $\xi$  ile ifade edilir:

$$\xi = \frac{1}{4\pi} \frac{\pi \eta \omega \gamma_0^2}{\frac{1}{2} G \gamma_0^2} = \frac{\eta \omega}{2 G} \quad (2.96)$$

ve döngüde depolanan pik enerji:

$$W = \frac{1}{2} G \gamma_0^2 \quad (2.97)$$

şeklinde tanımlanmaktadır. Bir taraftan viskoelastik eşitliğin korunup, diğer taraftan da frekans bağımlılığını ortadan kaldırmak için, Eş. 2.96, frekans ile ters orantılı bir eşdeğer viskozite üretecek şekilde çoğu zaman yeniden düzenlenir. Bu eşdeğer viskozitenin kullanılması, sönümlleme oranının frekanstan bağımsız olmasını kesinleştirir.

$$\eta = \frac{2 G}{\omega} \xi \quad (2.98)$$

Düşey olarak yayılan SH dalgaları için bir boyutlu hareket denklemi,

$$\rho \frac{\partial^2 u}{\partial t^2} = \frac{\partial \sigma_{xz}}{\partial z} \quad (2.99)$$

şeklinde yazılabilir.

$\tau = \sigma_{xz}$  ve  $\gamma = \partial u / \partial z$  ile birlikte, Eş. 2.92, Eş. 2.99'da yerine koyulup, sağ tarafın türevi alınırsa, dalga denklemi aşağıdaki gibi ifade edilebilir.

$$\rho \frac{\partial^2 u}{\partial t^2} = G \frac{\partial^2 u}{\partial z^2} + \eta \frac{\partial^3 u}{\partial z^2 \partial t} \quad (2.100)$$

Harmonik dalgalar için yerdeğişirmeler şu şekilde yazılabilir;

$$u(z,t) = U(z) e^{i \omega t} \quad (2.101)$$

Bu eşitlik, Eş. 2.100'deki dalga denkleminde yerine konulursa aşağıdaki adi diferansiyel denklem elde edilir;

$$(G + i \omega \eta) \frac{d^2 U}{dz^2} = -\rho \omega^2 U \quad (2.102)$$

veya,

$$G^* \frac{d^2 U}{dz^2} = \rho \omega^2 U \quad (2.103)$$

Burada,  $G^* = G + i \omega \eta$ : kompleks kayma modülü olup frekans bağımlılığından kurtulmak için Eş. 2.98 kullanılarak, kompleks kayma modülü  $G^* = G (1 + 2 / \xi)$  şeklinde de ifade edilebilir. Hareket denkleminin çözümü:

$$u(z, t) = A e^{i(\omega x - k^* z)} + B e^{i(\omega x + k^* z)} \quad (2.104)$$

şeklindedir. Burada, A ve B sınır koşullarına bağlıdır ve;

$k^* = \omega \sqrt{\rho / G^*}$  : kompleks dalga sayısıdır.  $k^*$  aşağıdaki gibi ifade edilebilir;

$$k^* = k_1 + i k_2 \quad (2.105)$$

Burada,

$$k_1^2 = \frac{\rho \omega^2}{2 G (1 + 4 \xi^2)} (\sqrt{1 + 4 \xi^2} + 1) \quad (2.106)$$

ve

$$k_2^2 = \frac{\rho \omega^2}{2 G (1 + 4 \xi^2)} (\sqrt{1 + 4 \xi^2} - 1) \quad (2.107)$$

olup, sadece  $k_1$  pozitif kökü ile  $k_2$  negatif kökünün fiziksel bir önemi vardır. Viskoz olmayan durum ( $\eta = \xi = 0$ ) için  $k_2 = 0$  ve  $k_1 = 0$  olduğuna dikkat edilmelidir. Pozitif z yönünde yayılan bir dalga için çözüm aşağıdaki gibi yazılabilir;

$$u(z,t) = A e^{k_2 z} e^{i(\omega x - k_{1z})} \quad (2.108)$$

Bu ifade, ( $k_2$  negatif olduğundan) malzeme sönümlenmesinin mesafeye bağlı olarak dalga genliğinde üssel bir azalışa neden olduğunu gösterir.

Kelvin-Voight modeli zeminlerde bugüne kadar kullanılan en yaygın modeli oluştursa da, sonsuz sayıdaki reolojik modellerden sadece bir tanesini temsil etmektedir. Yeniden düzenleme ve daha çok sayıda yay ve sönümleyici ekleyerek çok sayıda değişik davranış modellenebilir fakat yay ve sönümleyicilerin sayısı artarken dalga denkleminin çözümü de çok daha karmaşık olmaktadır [Kramer, 1996].

#### 2.4.6. Rayleigh sönüm yaklaşımı

Viskoz sönümün uygulamalarından biri olan “Rayleigh Sönüm Yaklaşımı”, bu çalışmanın sonlu elemanlar analizlerinde kullanılan bilgisayar programında esas alınan sönüm yaklaşımıdır. Coughy sönüm yaklaşımının özel bir hali olarak kabul edilen bu yaklaşım, gerçekte fiziksel anlamı olmayan bir yaklaşımdır [Cook, 1995]. Fakat, özellikle titreşim sistemlerini ifade eden doğrusal diferansiyel denklemlere yine doğrusal bir terim olarak katılmasından ve hesaplarda kolaylık sağlamasından dolayı sıklıkla tercih edilmektedir. Rayleigh yaklaşımında sönüm;

$$C = \alpha m + \beta k \quad (2.109)$$

eşitliği ile ifade edilebilmektedir. Burada, “m”, mekanik titreşim sistemi için kütle, “k” ise sıklık değeri olarak tanımlanabilir. “ $\alpha$ ” ve “ $\beta$ ” katsayıları da titreşim sisteminde ilgilenilen frekans aralığı ve sönüm oranına bağlı olarak belirlenen sabitlerdir. Sönüm oranı,  $\zeta_n$  ve frekans değeri,  $\omega_i$  Eş. 2.110’den elde edilebilir.

$$\zeta_n = \frac{\alpha}{2\omega_n} + \frac{\beta\omega_n}{2} \quad (2.110)$$



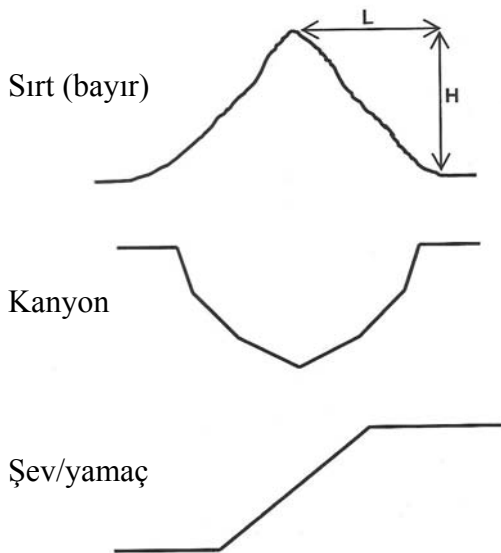
Yukarıda verilen sönüm eşitliğinde; ilk terim, titreşim sisteminin kütlesiyle, ikinci terim ise sistemin sıklık değeri ile doğru orantılı sönüm uygulamaktadır. Uygulamada frekans ve sönüm oranı kullanıcı tarafından belirlenmekte olup, Eş. 2.109’da verilen “ $\alpha$ ” ve “ $\beta$ ” katsayılarının hesaplanması için uygulanan yöntem, başlangıç anında titreşimin istenilen frekans aralığında kalmasını sağlayacak şekilde, bir diğer ifade ile sabitlerin ilgilenilen frekans aralığında en küçük sönüm değerlerini verecek şekilde seçilmesidir. Bu işlem, başlangıç anında titreşim hareketinin temel frekans değerinin kullanılması şeklindedir [Idriss ve ark., 1973; Idriss ve ark., 1992].

Rayleigh Sönüm Yaklaşımı, homojen ve yapı elemanlarına ait fiziksel özelliklerin birbirine yakın olduğu durumlar için daha uygundur [Cook, 1995].

### 3. ÇALIŞMANIN ÖRNEKLEME ALANINA UYGULANMASI

#### 3.1. Giriş ve Topografya Etkisi

Yerel zemin koşullarının kuvvetli deprem yer hareketlerini önemli ölçüde etkilediği, meydana gelen yıkıcı depremlerde gözlenen yapısal hasar ve aletsel ölçümlerle açıkça ortaya konmuştur [Özaydın, 1996]. Bu nedenle yerel zemin koşulları, depreme dayanıklı yapıların tasarımında önemli rol oynamaktadır. Yüzeye yakın zemin tabakaları içinden geçen deprem dalgalarının genliklerinde meydana gelen artış, zemin büyütmesi olarak bilinmektedir. Anakaya derinliği, anakaya üzerindeki zemin tabakalarının kalınlığı, cinsleri ve dinamik özellikleri, bu özelliklerin derinlikle ve deformasyonla değişimi, zemin tabakalarının yanal süreksizliği ve topografik özellikler gibi yerel zemin koşulları zemin büyütmesini etkileyen önemli faktörlerdir. Topografik özellikler, yüzeydeki ve yüzey altındaki zemin tabakalarının iki veya üç boyutlu geometrisiyle, bu tabakaları sınırlayan anakayanın geometrisini kapsamaktadır [Haşal ve İyisan, 2004]. Şekil 3.1’de görülen iki boyutlu geometrik şekiller, sırt (bayır), kanyon ve şev/yamaç olarak sınıflara ayrılabilir [Stewart, 2001].



Şekil 3.1. Düzensiz yüzey topoğrafyasının iki boyutlu geometrileri [Stewart, 2001]

Bu çalışmada; alüvyon tabanlı vadilerin kenar bölgelerinde deprem şiddeti değişimleri incelenmiştir. Bunun için sonlu elemanlar yöntemi ile farklı eğim

açılarına sahip vadiler modellenerek elde edilen sonuçlar, laboratuvar ortamında oluşturulan modeller üzerinde sinüzoidal dalga oluşturularak alınan ölçümlerle karşılaştırılmıştır.

### 3.2. Konu ile İlgili Daha Önce Yapılan Çalışmalar

Sismik yer tepki (yanıt) analizlerine etki eden yüzey topografyası, özellikle son yıllarda hem sayısal hem de deneysel birçok çalışmaya konu olmuştur. Çizelge 3.1’de yüzey topografyası ve zemin çökelleri ile kaplı vadilerin arazi büyütme davranışı üzerinde etkileri ve tek boyutlu analiz sonuçlarının uygulanabilirliği hakkında değerlendirmeler özetlenmiştir [Silva, 1989].

Çizelge 3.1. İki boyutlu jeolojik yapı etkileri [Silva, 1989]

| Jeolojik Yapı                        | Etkilenme Koşulları                                                                                                                    | Etki Tipi                                                                    | Etki Derecesi                                                                                                                                                   | Niceliksel Öngörülebilirlik                                                                                         |
|--------------------------------------|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|------------------------------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| Yüzey Topografyası                   | Biçim oranına duyarlı, oranın 0,20-0,60 arası değerleri için en büyük. Dalga boyu, tepe genişliğine eşit olduğu zaman etki daha büyük. | Tepede büyütme, tabanda büyütme ve sönüm, yamaçlarda genlik fazı değişimleri | Büyütme faktörleri genellikle 2-10 arası, 30’a kadar çıkabilir                                                                                                  | Zayıf: genellikle yamaç etkileşimi ve üç boyut etkileri nedeniyle gerçekten küçük tahmin.                           |
| <b>Zemin Çökelli Vadiler</b>         |                                                                                                                                        |                                                                              |                                                                                                                                                                 |                                                                                                                     |
| 1) Sığ ve geniş (Biçim oranı < 0,25) | Etkiler en çok kenarlarda öne çıkar. Büyük oranda kenarlardan düşey yönde yayılan kayma dalgaları.                                     | Vadi genişliğince bütün vadi modlarından dolayı, geniş aralık içinde büyütme | Tek boyutlu analizlerde yüksek frekanslarda kenarlarda yarı yarıya düşük değerler                                                                               | İyi: kenarlardan uzaklaştıkça tek boyutlu analiz yeterli, kenarlarda tek boyutlu büyütme frekansları genişletilmeli |
| 2) Derin ve dar (Biçim oranı ≥ 0,25) | Bütün vadi genişliğince etkiler                                                                                                        | Vadi genişliğince bütün vadi modlarından dolayı, geniş aralık içinde büyütme | Geniş bant genişliği için tek boyutlu analiz öngörümüleri kenarlarda 2-4 katı küçük değerler alınabilir. Tek boyutlu analize göre rezonans frekanslarında sapma | Orta: malzeme özelliklerinin düşey ve yatay doğrultuda ayrıntılı tanımlanması halinde                               |
| 3) Genel                             | Sığ çökellerde yerel değişiklikler                                                                                                     | Artan süre                                                                   | Önemli hareketlerin süresi iki kat artabilir                                                                                                                    | Orta                                                                                                                |
| 4) Genel                             | Kütle dalgalarından sığ kırılma açılarında uzun periyotlu yüzey dalgaları                                                              | Hapsedilmiş yüzey dalgalarından dolayı artan büyütme ve süreler              | Önemli hareketler için tek boyutlu analiz öngörülerinden daha büyük büyütme ve süreler                                                                          | 1 saniyeden büyük periyotlar için iyi                                                                               |

Eğimli anakaya yüzeyinin üstünde oluşan tekrarlı deprem dalgası yansımaları sonucunda vadi merkezine doğru ilerleyen yüzey dalgaları oluşmaktadır [Şafak, 2001]. Bu dalgalar, zemin tabakalarının düşey ilerleyen kayma dalgaları karşısındaki dinamik davranışına dayanan bir boyutlu analizlerle tahmin edilemeyecek kadar kuvvetli ve uzun süreli yer hareketlerini üretmektedirler. Vadinin kenarından ortasına doğru spektrumunun periyot bölgesinde büyütme artmakta, kritik konumlarda iki boyutlu büyütmenin maksimum etkisi ortaya çıkmaktadır [Rassem ve ark., 1997]

Aki ve Larner, yüzey dalgalarının süperpoze edilmesi için sayısal bir yöntem üzerinde çalışmışlardır [Aki ve Larner, 1970]. Daha sonra bu yöntem diğer araştırmacılar tarafından geliştirilmiştir [Boore, 1972; Bouchon, 1973; Bard, 1982; Geli ve ark., 1988]. Geliştirilen bu yöntemle yapılan çalışmalar da literatürde yerini almıştır [Wong ve Trifunac, 1974; Wong, 1982; Sanchez-Sesma ve ark., 1985].

Bouchon, yüzey hareketi üzerindeki topografik etkiyi, farklı dalga boyuna sahip sismik dalga açıları için araştırmış, sırt tepe noktasının yanında yer alan bölgelerde büyütme olduğu sonucuna ulaşmıştır [Bouchon, 1973].

1971 San Fernando depreminden sonra, kanyon geometrilerinin lineer-elastik ortamda yer hareketine etkisi üzerine yapılan çalışmalarda; kanyon boyutlarının önemi vurgulanmış, maksimum büyütme 0,5'den büyük normalize edilmiş frekans değerleri için kanyon kenarlarında elde edildiği sonucuna ulaşılmıştır [Trifunac, 1973].

1999 Atina depreminden sonra iki boyutlu sismik yer tepki analizleri Kifissos nehir kanyonundaki iki bölge üzerinde yapılmış, yerel topografyanın hasar dağılımına etkisi irdelenmiştir [Bouckovalas ve ark., 2001]. Aynı depremden sonra yapılan diğer bir çalışmada, enerji odaklanma mekanizmasının değişimine; yerel stratigrafinin, homojen olmayan malzemenin ve zemin-yapı etkileşiminin etkisi araştırılmıştır [Asimaki ve ark., 2005].

Şev yüzeyi geometrisi konusunda yapılan araştırmalarda; gelen SV dalgalarının düşey şev yüzeyinde yukarı doğru ilerlerken büyütmenin önemli derecede arttığı belirlenmiştir [Ashford, 1997].

Sismik dalgaların derin vadilerde, düşük ve orta frekans değerlerinde ( $f < 1$  Hz), % 50 daha büyük genliklere ulaştığı belirlenmiştir [Graves ve ark., 1998].

1971 San Fernando, California depreminden sonra yapılan çalışmalarda; alüvyon tabanlı vadilerde dalga yayılımı Elastik Sonlu Farklar Yöntemi ile modellenmiştir [Vidale ve Helmberger, 1988]. Yine aynı depremde yerel sismik dalga hızlarının topografya etkisi ile değişimi incelenmiştir [Liu ve Heaton, 1984].

Chang ve arkadaşları tarafından yapılan çalışmada; iki boyutlu sismik havza tepkileri, tek boyutlu yer tepki analizlerinden elde edilen seriler kullanılarak basitleştirilmiştir [Chang ve ark., 1996]. Bir diğer araştırmada ise; büyütmenin havza kenar bölgelerinde olduğu, arazi gözlemleri ve sayısal çalışmalarla ortaya konmuştur [Graves ve ark., 1998].

Sismik dalgaların havza tabanından yukarı doğru ilerlerken vadi kenarlarında dağılırarak tekrar havza içine doğru ilerlediği Kobe Depremi'nden sonra yapılan çalışmalarla belirlenmiştir [Kawase, 1996; Pitarka ve ark., 1998].

Afganistan yakınlarında Chusal Vadisi üzerinde yapılan bir boyutlu yer tepki analizi çalışmalarında; vadi kenarları ile ortası arasında büyütme açısından çok büyük farklılıklar gözlemlendiği, hareketin bu bölgelerde farklı olduğu sonucuna ulaşılmıştır [King ve Tucker, 1984].

Bard ve Gariel, sığ ve derin alüvyon havzalar için yaptıkları bir ve iki boyutlu analitik çalışmalarda; büyütme faktörünün vadi kenarlarında daha yüksek olduğunu belirlemişlerdir [Bard ve Gariel, 1986].

Alüvyon tabanlı vadilerin sismik tepki analizleri üzerinde yapılan çalışmalarda; dar ve derin vadilerde ( $B/D < 10$ ) iki boyutlu analizlerin yapılması gerektiği, geniş ve sığ vadilerde ( $B/D \geq 10$ ) tek boyutlu analizlerin yeterli olabileceği sonucuna ulaşılmıştır [Rassem ve ark., 1997].

Zemin tabakalarının yatay yönde sınırlı olması, vadi kenarlarında dalga hareketi dönüşümlerine ve yüzey dalgalarının oluşmasına neden olmakta, iki boyutlu rezonans modelleri ortaya çıkmaktadır. Bu durumda yer hareketinin frekans içeriği vadilerin ortasından kenarlarına doğru değişmekte, kuvvetli yer hareketinin süresi ve genliği de artmaktadır. Dolayısıyla vadilerde zemin büyütmesi, zemin cinsi ve dinamik özellikleri ile deprem dalgasının hakim periyodu ve genliğine bağlı olmakla birlikte deprem hareketine karşı davranışı bulunacak yerin vadi içindeki konumu da önemli olmaktadır [Psarropoulos ve ark., 1999; Pitilakis, 2004].

1988 Ermenistan Depremi'nden sonra Kirovakan'da tek boyutlu dalga yayılımı analizleri yapılmış ve hasar gözlemleri karşılaştırılmıştır [Yegian ve ark., 1994]. Aynı deprem için yapılan iki boyutlu analizlerde ise bir boyutlu analiz sonuçlarından farklı olarak 4-5 katlı yapıların daha fazla hasar gördüğü belirlenmiştir [Bielak ve ark., 1999].

Semblat tarafından, Nice (Fransa) ve Caracas (Venezuela) kentlerinin bulunduğu vadilerde yapılan iki boyutlu analizlerin, havza etkisini daha doğru yansıttığı sonucuna ulaşılmıştır [Semblat, 2002].

Bakır ve Erşahin tarafından 1995 Dinar Depremi sonrasında yapılan çalışmada; gevşek yapılı zemin katmanlarının yanal olarak sınırlandırılması sonucunda ova kenarlarında oluşan yüzey dalgalarının ova içerisinde ilerleyerek belirli bir mesafede etkili olduğu, yüzey dalgalarının üç boyutlu ortamda oluşan dalgalara göre daha düşük hızlara sahip oldukları, periyotlarının da 0,5 saniyeden büyük olduğu belirtilmiştir. Ovanın çok geniş olması durumunda ise, bu dalgaların zeminin sönüm etkisi ile kaybolduğu; alüvyon ortamın dar bir vadinin içinde yer alması durumunda ise yüzey dalgalarının vadi kenarlarından, üç boyutlu ortamda oluşan dalgaların da

vadiyi sınırlayan kaya yüzeylerden karşılıklı yansıması sonucunda yer hareketinin yüzeyde önemli değişikliklere uğradığı, bu tür etkilerin meydana gelen birçok depremde açıkça gözlemlendiği vurgulanmıştır [Bakır ve Erşahin, 1997].

Yine 1988 Ermenistan depremi sonrasında yapılan araştırmalarda Leninakan ve Kirovakan şehirlerindeki hasarın yerel zemin şartları ile olan ilişkisi gösterilmiştir. Kirovakan'da şehir içerisindeki bir bölgede ortaya çıkan yoğun hasarın bu bölgenin altında konik bir alüvyon vadisi içinde yansımalar ve vadi kenarlarından kaynaklanan yüzey dalgaları sonucunda meydana geldiği belirlenmiştir [Yegian ve ark., 1994].

Lysmer ve Kuhlemeyer çalışmalarında; düşey ve yatay sınırlara, ilgili tabakaların kayma ve basınç dalgası hızları ile orantılı olarak hesaplanan sönümleyiciler konusunda, bu dalgaların farklı birçok geliş açısında sönümlenebileceğini ve daha gerçekçi sonuçların elde edilebileceğini göstermişlerdir [Lysmer ve Kuhlemeyer, 1969].

Ditmar ve arkadaşları tarafından yapılan çalışmada; sismik kırılma ve sismik yansıma mekanizmaları incelenmiş, Ginzburg ve Ben-Abraham tarafından yapılan çalışmada ise İsrail'deki Dead Sea Kuzey Havzası'ndaki sismik kırılma ile ilgili incelemelere yer verilmiştir [Ditmar ve ark., 1999; Ginzburg ve Ben-Abraham, 1997].

Vashisth ve Gogna tarafından yapılan çalışmada; sismik dalgaların kırılma ve yansıma davranışlarının, gevşek zeminlerden sert zeminlere geçiş bölgelerindeki etkileri incelenmiştir [Vashisth ve Gonga, 1993].

29 Temmuz 1967 tarihinde Venezuela'da meydana gelen depremde Caracas vadisindeki sismik dalga yayılımı ve büyütme ile ilgili incelemeler yapılmıştır. Bir çökelti vadisi üzerine oturan Palos Grandes Bölgesi'ndeki yüksek hasara, 3 km. uzunluğundaki vadinin kuzeyini sınırlayan dik eğimli ana kayadan kaynaklanan

yansımaların ve yüzey dalgalarının neden olduğu belirlenmiştir [Schnabel ve ark., 1972; Papageorgiou ve ark., 1991; Papageorgiou ve Kim, 1991].

1971 San Fernando, California depreminde alınan kayıtlar San Fernando yakınlarında derin alüvyon havzalarda yüzey dalgalarının yer hareketinin süresi ve diğer parametreleri üzerindeki belirgin etkilerini açıkça ortaya koymuştur [Hanks, 1975; Liu ve ark., 1984; Vidale ve ark., 1988].

Cılız tarafından yapılan doktora tezi çalışmasında; havza kenar eğiminin zemin tabakalarının dinamik tepkisine etkisi bir ve iki boyutlu sayısal analizlerle değerlendirilmiş, farklı geometrileri ve zemin tipini temsil eden yamuk en kesite sahip 24 havza modeli oluşturulmuştur. Sabit bir havza kenar eğimi ve sabit bir zemin hakim periyodunun deprem hakim periyoduna oranı için, farklı zemin tipleri, havza derinlikleri ve zemin hareketleri ile elde edilen dinamik tepkilerin oldukça benzer olduğu belirlenmiştir [Cılız, 2007].

İyisan ve Haşal tarafından yapılan çalışmada da; trapez kesitli vadi modellerinde, yerel zemin koşullarının dinamik davranışa etkisi incelenmiştir. Kenarlardaki anakaya eğimi  $45^\circ$  olan, yatay yönde zemin tabakalaşmasına sahip, derinlik ve genişliği farklı vadi modelleri kullanılarak, bir ve iki boyutlu dinamik analizler yapılmıştır. Sonuç olarak; zemin kesitinde ani rijitlik değişimi olan modellerde, eğimli anakayanın yüzeydeki izdüşüm bölgelerinde büyütmelemin göreceli olarak arttığı, bir ve iki boyutlu analizlerin ancak, vadilerin çok geniş olması halinde, vadi ortasına yakın bölgeler için benzer sonuçlar verdiği belirtilmiştir [İyisan ve Haşal, 2007].

03.02.2002 tarihinde Afyon ili yakınlarında meydana gelen depremler sonrasında ise, Gazi Üniversitesi Mühendislik Mimarlık Fakültesi İnşaat Mühendisliği Bölümü Öğretim Elemanları'ndan bir kısmının oluşturduğu bir ekip tarafından bir bölümü tamamen çöken, bir bölümü ise çökme sınırında çok ağır hasar gören "Çay İlçesi Küçük Sanayi Sitesi"nde, bu ağır hasarın oluşum nedenlerini belirlemeyi amaçlayan bir inceleme yapılmıştır. Çalışma sonrasında Çay ilçesi Küçük Sanayi Sitesi'nin yer



aldığı bölgenin topografik yapısının, yukarıda örnekleri verilen depremlerde gözlenen topografik koşullarla aynı karakterde olduğu belirlenmiştir.

Çay Küçük Sanayi Sitesi'nde meydana gelen hasar irdelemesi sonucunda; Pampal ve arkadaşları tarafından 2002 Çay Depremi'nde Çay Küçük Sanayi Sitesi'nde meydana gelen hasarın geoteknik ve jeolojik nedenleri ortaya konmuş, sismik kırılma ve yansıma konusuna dikkat çekilmiştir [Pampal ve ark., 2003].

### 3.3. Topografya Etkisinin Yönetmeliklerdeki Yeri

Son yıllarda, topografik etkiler de yönetmelikler içinde yer almaya başlamıştır. Ancak, yönetmeliklerde yer alan ve aşağıda ayrıntıları verilen bu etkiler halen yüzey topografyası ile ilgili olup, taban topografyası ya da bir başka ifade tarzı ile yer altı topografyasını kapsamamaktadır. Topografyanın etkisini göz önüne alan yaptırımlar Fransız Deprem Yönetmeliği'ne (PS-92) 1990 yılında konmuş olmasına karşın, 1992 yılında zemin etkileri konusunda düzenlenen bir çalışmaya katılanlar, bu tür yaptırımların A.B.D. Yapı Yönetmeliği'ne konması için henüz erken olduğunu ileri sürmüşlerdir [Whitman, 1992].

Fransız Deprem Yönetmeliği (PS-92) ve Eurocode 8 (1. Bölüm, Taslak No:6, Ocak 2003 taslağı) içinde bu etkiler, topografik büyütme faktörleri olarak ele alınmıştır.

Eurocode 8'de; önem katsayısı 1'den büyük yapılar için topografik büyütme faktörlerinin hesaplara dahil edilmesi zorunluluğu getirilmiştir. "ST" ile gösterilen faktörlerin titreşim periyotlarından bağımsız olduğu düşünülmüş ve bundan dolayı EN1998-1'de verilen elastik tasarım tepki spektrumlarında yer alan sabit ölçeklendirme faktörü ile çarpılması zorunlu hale getirilmiştir. Bu büyütme faktörlerinin, iki boyutlu topografik düzensizliklere sahip şevler (yüksekliği 30 m'den büyük sırt (bayır) ve uçurumlar) için uygulanmasının gerekliliği vurgulanmıştır [prEN 1998-5:2003, Annex A].

Eurocode 8’de ayrıca, topografik etkilerin, ortalama şev açısının  $15^\circ$ ’den düşük olması durumunda ihmal edilebileceği belirtilmiştir.  $15^\circ$ ’den büyük açılar için ise aşağıda sıralanan öneriler getirilmiştir:

1. Ayrılmış uçurum ve şevlerde; tepe kenarlarındaki bölgede  $ST > 1,2$
2. Taban genişliğinden çok daha küçük tepe genişliğine sahip sırtlarda;  
     Şev açısı  $30^\circ$ ’den büyük ise şev tepesi civarında  $ST > 1,4$   
     Şev açısı  $30^\circ$ ’den küçük ise şev tepesi civarında  $ST > 1,2$
3. Zayıf yüzey tabakalarında (1) ve (2)’de verilen ST değerlerinin % 20 oranında artırılması gerektiği vurgulanmıştır.
4. Ayrıca ST değerinin tepeden tabana doğru doğrusal fonksiyon şeklinde azalabileceği belirtilmiştir.

Fransız Deprem Yönetmeliği’nde ise; sismik hareket üzerindeki topografik etki dinamik analizlerde hesaba direkt olarak dahil edildiği halde stabilite sağlanamıyorsa; sonuçların “T” ile gösterilen tepki faktörü (topografya faktörü) ile çarpılması zorunlu kılınmıştır.

$1 \leq T \leq 1,4$  şartı için;  $T = 1 + 0,8 (I - i - 0,4)$  eşitliğinde “T” ve “i”, sırasıyla en düşük ve en yüksek eğim değerlerini temsil etmektedir.

Topografik etkilerin hesaplara dahil edilmesi için; Fransız Deprem Yönetmeliği  $H > 10$  m ve  $i > 22^\circ$  şartı ararken, Eurocode 8’de bu şart  $H > 30$  m ve  $i > 17^\circ$  olarak verilmiştir.

### **3.4. (03.02.2002) Sultandağı – Çay Depremlerinin Özellikleri**

03.02.2002 tarihinde, saat 9:11:28’de Afyon ili, Çay ilçesi çevresindeki Eber yakınlarında üst merkezi bulunan ve çeşitli kayıt istasyonları tarafından yeri ve büyüklüğü farklı kaydedilen bir deprem meydana gelmiş, 41 ölüm, 200 civarında yaralanma ortaya çıkmıştır. Belirlemelere göre toplam 889 konut, 226 işyeri ağır hasar; 368 konut, 52 işyeri orta hasar ve 1957 konut ve 122 işyeri hafif hasarlıdır. 9:11:28’de meydana gelen depremden sonra meydana gelen ve genellikle artçı

olduğu bildirilen depremin ise artçı değil fakat, farklı bir faya bağlı ikinci bağımsız bir deprem olduğu düşünülmektedir. İkinci depremin üst merkezinin ise Çay ilçesi ile Maltepe köyü arasında olduğu belirtilmektedir. Sözü edilen iki farklı deprem yerel saatle sırası ile 9:11 ve 11:26'da meydana gelmiş olup, sırasıyla  $M = 6.5$  ve  $M = 6.0$  büyüklüğündedir.

Sultandağı Depremi olarak bildirilen ilk depremin üst merkezi, USGS (United States Geological Survey), KOERI (Kandilli Rasathanesi ve Deprem Araştırma Enstitüsü) ve ETHZ (Swiss Seismological Service) istasyonları tarafından Eber ve Akşehir Gölü arasında, DAD (Afet İşleri Genel Müdürlüğü Deprem Araştırma Dairesi) tarafından Çay İlçesinin güneybatısında, Sultandağı Fayı üzerinde, HARVARD (Harvard University Seismology Group) tarafından ise Çay İlçesi yakın doğusu olarak bildirilmiştir.

Ana şoktan yaklaşık iki saat sonra meydana gelen ve HARVARD tarafından 5.8, USGS tarafından ise 5.6 büyüklüğünde olduğu bildirilen depremin de Çay İlçesi yakın çevresinde olduğu tespit edilmiştir. Ana şok büyüklüğü; KOERI tarafından  $M = 6,0$ , USGS tarafından  $M = 6,5$ , DAD tarafından  $M = 6,1$ , HARVARD tarafından  $M = 6,5$  ve ETHZ tarafından  $M = 6,2$  olarak verilmiştir. Sultandağı (Eber) Depremi olarak adlandırılan birinci depremin odak derinliği yukarıda belirtilen farklı istasyonlar tarafından 5–10 km. olarak verilmektedir. Saat 11.26'da meydana gelen Çay Depremi'nin büyüklüğü ise; USGS tarafından  $M = 5,8$ , KOERI tarafından  $M = 5,3$ , DAD tarafından  $M = 5,2$  olarak verilmiştir. Bu depremden hemen sonra saat 13.54'de  $M = 5,1$  ve  $M = 5,0$  olan iki büyük artçı deprem daha kaydedilmiştir. Çay Depremi'nin odak derinliği de 2.2–10 km arasında verilmektedir.

### 3.5. Bölgenin Jeolojik Özellikleri

Çay İlçesi çevresi adı geçen depremlerden en çok etkilenen bölge olarak dikkat çekmektedir. Halen geçerli deprem bölgeleri haritasında 1. derece deprem bölgesi içinde yer alan yörede, yerinde yapılan incelemeler sonucunda depreme yol açan

fayın önemli bir kısmının bu yerleşim alanı içinden geçtiği, yüzey kırıkları ve yapısal hasarlardan açıkça gözlenmiş olup, deprem hasarlarında etkin faktörler olan;

- Yapıların faya olan mesafesine,
- Fayın özelliklerine,
- Yapıların fay düzlemi doğrultusuna göre konumuna,
- Zeminin özelliklerine,
- Yapının özellik ve niteliklerine

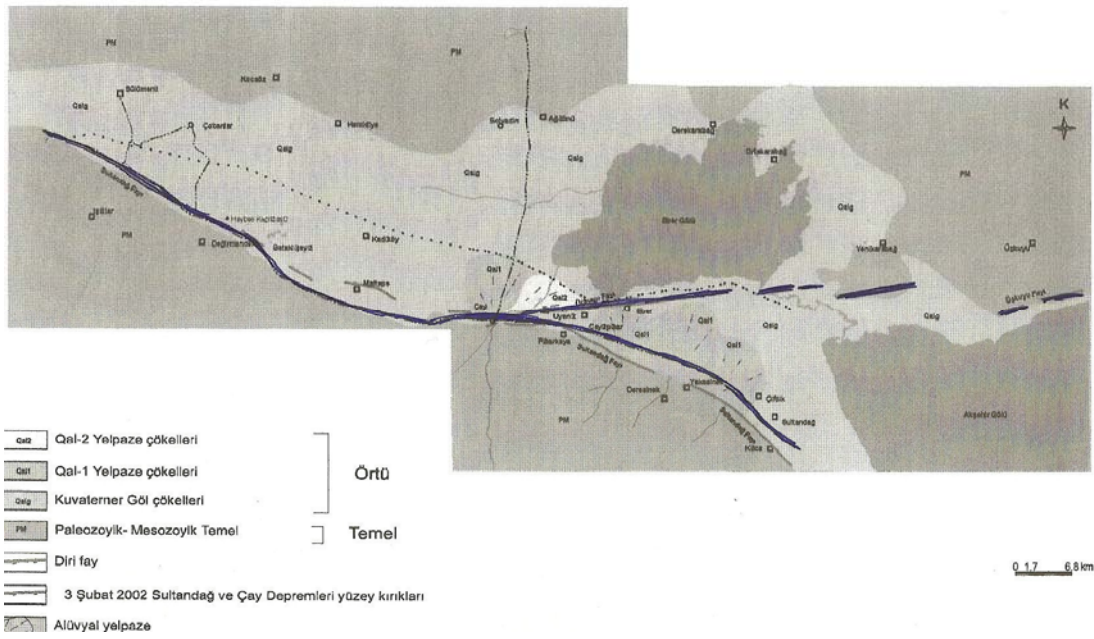
bağlı olduğu gerçeği son derecede açık ve belirgin bir şekilde göze çarpmaktadır. Çay Küçük Sanayi Sitesi başta olmak üzere yerleşim alanı yeniden kırılan ve Maltepe Köyü - Cumhuriyet Köyü - Çay İlçesi - Küçük Sanayi Sitesi - Eber Kasabası-Akşehir Gölü yönünde uzanan ve bilinen bir kırık olarak açıkça izlenen Üçkuyu Fayı'nın üzerinde bulunmaktadır. Fayın, yapılan çalışmalarda eğim atımı belirgin, düşük açılı, normal bir fay karakterinde, zeminin ise son derecede gevşek, genç alüvyon özellikte olduğu belirlenmiştir.

Çay ilçesi çevresinin genel jeolojik durumu incelendiğinde; burada Sultandağı Fayı ile sınırlanan yüksek topoğrafya şekilleri ile düzlük genç çökellerin bulunduğu belirlenmektedir. Belirtilen yükseltilerde ve temelde genellikle Paleozoyik– Mesozoyik yaşlı metamorfik kaya birimleri yer almaktadır. Akşehir Gölü – Eber Gölü – Çay ilçesi ve Afyon yönünde uzanan ova ise Kuvaterner yaşlı yelpaze çökelleri ve genç kuvaterner gölsel çökeller tarafından örtülü durumdadır (Harita 3.1). Yerleşim alanları da deprem açısından uygun olmayan bu kesim üzerinde bulunmaktadır. Belirtilen genç çökellerin hem zemin ve hem de topoğrafik özellikleri bakımından depremde hasarın artmasında etkin olduğu açıkça gözlenebilmektedir.

### **3.5.1. Bölgesel ve yerel neotektonik konum**

Bölge, Türkiye'yi kontrol eden aktif tektonik kuşaklardan oldukça etkilenen ve güneybatı Türkiye olarak kıta içi genişleme rejiminin egemen olduğu bir bölge özelliğindedir. Güneyden sıkışma, kuzeyden ise sağ yanal doğrultu atımlı Kuzey Anadolu Fayı'nın etkisinde neotektonik gelişimini sürdürmekte olup, güneybatı Türkiye genelinde genişleme tektoniği ile uyumlu olarak horst – graben sistemleri

oluşmakta ve bunun da sonucunda son derece yüksek eğim atımlarına sahip normal faylanmalar ile bunlara bağlı deprem aktivitesi ortaya çıkmaktadır. Belirtilen dönemin Üst Miyosen sonrası dönemde başladığı, yöre için Neotektonik dönemin bu dönemden beri süregeldiği söylenebilmektedir.



Harita 3.1. 03.02.2002 Eber ve Çay deprem kırıkları ve yakın civarının neotektonik haritası [Koçyiğit, 1986]

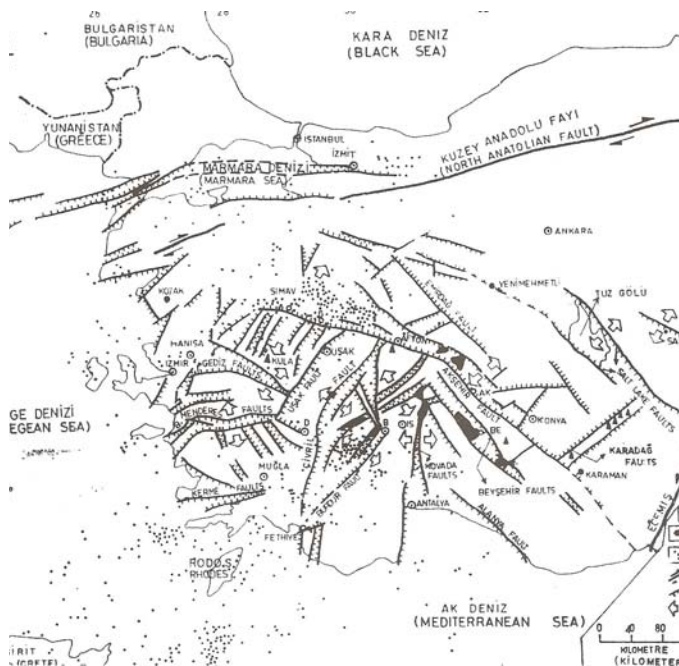
### 3.5.2. Bölgenin sismo-tektonik özellikleri

03.02.2002 tarihinde meydana gelen depremler sırasında ortaya çıkan yüzey kırıkları, ana şok kayıtları ve çeşitli kurumlar tarafından yapılan artçı deprem kayıtları birlikte incelenip değerlendirildiğinde; Çay ilçesi ve Sanayi Sitesi'nde meydana gelen ve hasarlara yol açan birinci depremin Çay ilçesi doğusunda, Uyanık – Eber – Yeni Karabağ yönünde uzanan ve Eber ile Akşehir gölleri arasında uzanan Üçkuyu fayından kaynaklandığı anlaşılmaktadır. İkinci depremi doğuran ve Çay ilçesi batısında bulunan fayın ise Maltepe köyü – Cumhuriyet köyü yakın kuzeyi, Çay ilçesi yönünde uzandığı açıkça izlenebilmektedir. İncelemeye konu Çay Küçük Sanayi Sitesi yerleşim alanı, Sultandağ fayı ile Üçkuyu fayının tam da kesişme noktası üzerinde, iki fay tarafından sınırlanmış bir alanda bulunmaktadır (Harita 3.1).

Her iki fayla ilgili olarak belirtilen depremlerden sonra yüzeysel kırılmalarda yaklaşık 25-30 cm. düşey atımlar belirlenmiştir. Belirtilen fay zonu, bilinen Sultandağı fayı ile paralellikler göstermekte ve bu fayın bileşeni olduğu anlaşılmaktadır. Üçkuyu fayı Sultandağı fayı ile açı yaparak NE-SW yönünde uzanmaktadır.

### 3.5.3. Bölgenin deprenselliği

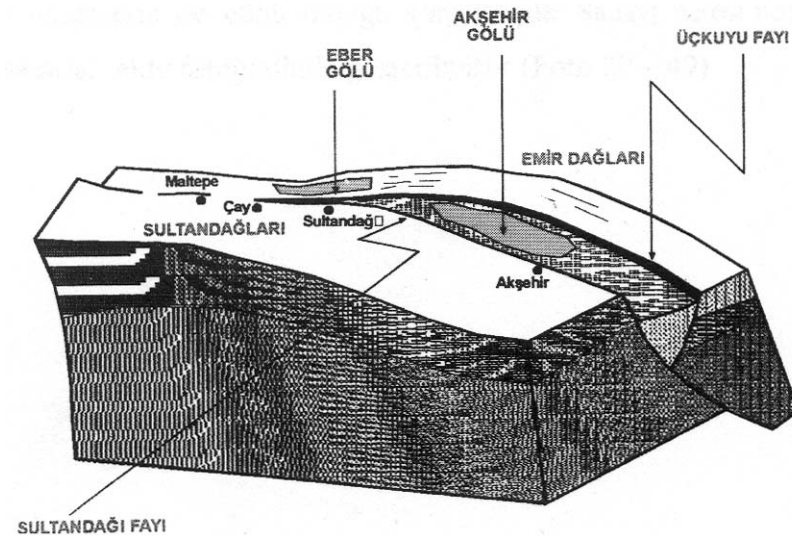
Bölge hem güncel, hem de tarihsel dönemde sismik açıdan son derece aktif bir rol sergilerken, can ve mal kayıpları bakımından da önemli depremlere sahne olmuştur. 03.02.2002 depremi sonrasında yörede 1900 – 2002 döneminde oluşan depremler incelendiğinde Sultandağı fayının 5-6 ayrı parçadan oluştuğu ve 100 km. kadar boyu olduğu, hasar yapıcı depremlerin zaman içinde doğudan batıya doğru göç ettiği, bu durumda yakın gelecekte beklenebilecek depremin Çay ilçesinin batısında Maltepe köyü – Çobanlar- Afyon yönünde uzanan parça üzerinde olabileceği tahmin edilmektedir (Harita 3.2) [Demirtaş ve ark., 1996].



Harita 3.2. Güneybatı Türkiye'nin yalınlaştırılmış sismo-tektonik haritası [Koçyiğit, 1986]

### 3.5.4. Ağır hasarın jeolojik nedenleri

Ana şoku izleyen ikinci depremin de Çay ilçesi yakın civarında (Çay-Maltepe arası) olması, depremi yaratan fayın, yerleşim alanı içinden geçmesi, Sanayi Sitesi'nde ortaya çıkan hasarın miktarını artıran bir faktördür. Ayrıca her iki depremi doğuran fayın, fay düzlemi doğrultusu üzerinde bulunan Çay Küçük Sanayi Sitesi yapıları, dalga yayılma doğrultusu üzerinde bulunmanın ötesinde kuzeyden Üçkuyu fayı, güneyden ise Sultandağı fayı tarafından sınırlanan graben yapısının içinde yer almaktadır (Şekil 3.2). Dolayısıyla 03.02.2002 tarihinde meydana gelen her iki depremin de etkisini en üst seviyede yaşamak durumunda kalmıştır. Zira fay düzlemi üzerinde bulunan deprem odağından yayılmaya başlayan deprem dalgaları, karşısında bulunan fay düzlemine çarparak kırılmakta, yansımakta ve gelen dalgalarla çarpışarak anormal büyüklüklere ulaşabilmektedir. Bu durum, çevrede bulunan yapıları, çanağın dışında kalan yapılara oranla daha şiddetli ve uzun süreli bir etki altında bırakarak, yıkıcı etkiyi artırmış ve beklenmeyen hasarların oluşmasına yol açmıştır.



Şekil 3.2. Sultandağı ve Üçkuyu faylarını içeren yarım grabenin blok diyagram halinde görünümü [Demirtaş ve ark., 1996]

Sanayi Sitesi yapılarının uzun eksenleri deprem dalgalarının yayılma doğrultusuna dik şekilde konumlanmış bulunmaktadır. Bu da, hasar derecesini negatif yönde

etkileyen bir durum olarak değerlendirilmektedir. Fayların düşen blokları tarafında kalan yapıların daha büyük hasar gördüğü gözlenmiştir.

Fayların başlangıç ve bitiş noktaları çevresinde anormal gerilme birikimi ve buna bağlı olarak hasar miktarı daha büyük olmaktadır. Üçkuyu ve Sultandağı fayının bitiş ve bunun yanında belli bir açı ile kesişme noktaları Çay Küçük Sanayi Sitesi'nin bulunduğu bölgeye denk gelmekte ve doğal olarak da hasar derecesinin artmış olabileceği varsayılmaktadır.

Jeolojik birimlerin tektonik hatlarla birbirinden ayrıldığı Sultandağı metamorfik kaya birimleri ile Eber Gölü çevresi alüvyon birimlerinin sınırında yer alan Çay Küçük Sanayi Sitesi, depremde yüzey altı topografyasının negatif etkisini de yaşamak zorunda kalmıştır. Jeolojik birimlerin geçiş zonları, deprem dalgalarının yüzeye çıkarak zon üzerindeki yapılarda beklenmeyen hasarlara yol açabildiği yerlerdir. Çay Küçük Sanayi Sitesi yerleşim alanında bu durumun da mevcut olduğu söylenebilir.

### 3.6. Geoteknik İrdeleme

#### 3.6.1. Deprem bölgeleri haritaları ve yönetmelik verileri

Bilindiği üzere “Türkiye Deprem Bölgeleri Haritaları” Bakanlar Kurulu kararı ile yürürlüğe konulmakta ve uyulması, uygulanması zorunlu, “Afet Bölgelerinde Yapılacak Yapılar Hakkında Yönetmelik” ile birlikte kullanılmaktadır. Afyon, Çay, Bolvadin ve Sultandağı 18.04.1996 yürürlük tarihli haritada birinci derece deprem bölgelerinde yer almaktadır. Bunun yanında, “Deprem Tehlikesi Haritaları” incelendiğinde Afyon, Çay, Bolvadin ve Sultandağı'nın taban kayası ivmeleri 10000 yıl için 0.20g - 0.40g, 475 ve 225 yıl için 0.10g-0.20g olarak belirlenmiştir.

Bu çalışmaya konu olan Çay ilçesi Küçük Sanayi Sitesi'nin bugün geçerli “Deprem Bölgeleri Haritası” ve 01.01.1998 tarihinde yürürlüğe giren yönetmelik hükümleri kullanılarak saptanan tasarım ölçütleri aşağıda verilmiştir.



|                                    |                                        |
|------------------------------------|----------------------------------------|
| Deprem Bölgesi                     | : Birinci Derece                       |
| Etkin Yer İvmesi Katsayısı         | : $A_0 = 0.40$                         |
| Bina Önem Katsayısı                | : $I = 1$                              |
| Taşıyıcı Sistem Davranış Katsayısı | : $R = 4 (8)$                          |
| Zemin Grubu                        | : C2 – D2                              |
| Yerel Zemin Sınıfı                 | : Z 4                                  |
| Spektrum Karakteristik Periyotları | : $T_A = 0.20$ sn.<br>$T_B = 0.90$ sn. |

### 3.6.2. Yöresel ve yerel geoteknik özellikler

03.02.2002 tarihinde meydana gelen depremin hasar yarattığı alanın, KB–GD doğrultusunda uzanan Akşehir (Sultandağı) fayının kuzey-kuzeydoğusunda uzanan graben olduğu gözlenmektedir. Akşehir (Sultandağı) fayının kuzey bloğu düşmekte olup, Akşehir ve Eber Gölleri, düşen blok üzerinde meydana gelmiştir. Faya asılı olarak kalmış taraçalar, asılı vadiler ve faya doğru eğimlenmiş alüvyon yelpazeleri fayın aktif olduğuna işaret etmektedir. Kuzey blok aşağı düştüğüne göre hareketin normal faylanma olduğu anlaşılmaktadır.

Çöküntüyü Neojen yaşlı ve Pliyo–kuvaterner kayalar ve kuvaterner yaşlı, gevşek–tam anlamı ile tutturulmamış çökeller doldurmaktadır. Pliyo – kuvaterner birimlerin kalınlığı 570 m. civarında olup, bugünkü çöküntüyü meydana getiren ve pek çok yerleşimin yer aldığı kuvaterner birimler ise; alüvyon, alüvyon konisi, yamaç molozları ve gölsel çökellerden oluşan gevşek - tam anlamı ile tutturulmamış, su ile doygun çökeller olarak tanımlanmaktadır.

Çay ilçesi, güneyindeki tepelerin eteğinden başlayan ve Eber Gölü havzasına kadar devam eden güney – kuzey yönünde hafif eğimli bir yamaç molozu ve sel malzemesi üzerinde kurulmuştur. Bu yörede, Afyon–Konya Karayolu’na yaklaştıkça yüzeydeki yamaç molozu kalınlığı azalmakta, buna karşılık Eber Gölü’nün eski havzası içinde çökelmiş ince daneli gölsel çökeller hakim zemin sınıfını oluşturmaktadır. Afyon –

Konya Karayolu'nun kuzeyindeki çöküntü alanı ise tümüyle gevşek yerleşmiş ince kum, silt ve yumuşak – orta katı gölsel çökellerden oluşmuştur.

Çay Küçük Sanayi Sitesi yerleşim alanı, DSİ tarafından iyileştirilmiş Çay Deresi'nin eski yatak bölgesinde yer almaktadır. Ortam, yamaç molozlarının altında kalan, gevşek yerleşmiş kum – çakıl ile yumuşak – orta katı alüvyon tabakalardan oluşmaktadır.

Çay Küçük Sanayi Sitesi yerleşim alanında temel zeminin, özellikle küçük taban gerilmeleri için taşıma gücü ve tasmanlar açısından herhangi bir sorun sergilemesi beklenmemekle birlikte, deprem davranışı ve deprem etkisi açısından çok riskli olduğu belirtilmelidir.

### **3.6.3. Zemin etüdü bulguları**

Deprem bölgesinde en yoğun hasar alanı olarak gözlenen Çay Küçük Sanayi Sitesi'nin yakınındaki yarmada, Çay Deresi'nin bu eski yatağında depolanmış tutturulmamış kum ve çakılların gözlenmiş olmasına rağmen, zemin ortamının sondajlar yardımı ile de tanınması istenmiş olup, üç adet sondaj yapılmış, SK1 25.00 m., SK2 30.00 m., SK3 25.00 m. derinliklere kadar sürdürülen sondajlarda arazi deneyi olarak SPT (Standart Penetrasyon Testi) yapılmış, örselenmiş numuneler üzerinde de tanımlama deneyleri sonuçlandırılmıştır.

Sondajlarda kesilen zemin sınıfları aşağıdaki gibi olup, hiçbir sondajda yer altı suyuna rastlanmamıştır:

SK1'e göre; -Çakıllı kum, -seyrek çakıllı, kumlu, killi silt, - çakıllı, yer yer bloklu killi siltli kum.

SK2'ye göre; - Çakıllı, seyrek bloklu az killi siltli kum

SK3'e göre; - Az siltli çakıllı kum, - Seyrek çakıllı killi silt, - Siltli çakıllı kum, - Seyrek çakıllı killi silt, - Siltli seyrek çakıllı ince-orta kum.

Örselenmiş numuneler üzerinde yapılan tanımlama testleri, sondaj logu kayıtlarını doğrulamış olup, dane dağılım eğrileri zeminin uniform daneli olmadığını göstermektedir. Yerleşim alanı SPT –  $N_{30}$  verileri, orta sıkı – sıkı veya orta katı – katı zeminlere işaret etmektedir.

#### **3.6.4. Ağır hasarın geoteknik nedenleri**

03.02.2002 tarihinde meydana gelen depremin sonucunda, yörede en çok hasar gören Çay Küçük Sanayi Sitesi yerleşim alanı, aktif bir tektonik süreksizliğin hemen yakınında veya hat üzerinde, kırığın düşen bloğunda, gevşek, yumuşak ve kalın bir alüvyon ortamda, kaya yamaç – alüvyon geçiş zonunda ve yakın iki dış merkezi birleştiren hattın hemen ortasında yer almakta olup, yerleşim alanının, deprem etkisi açısından, bir zemin ortamının, sıvılaşma hariç, bütün menfi niteliklerine sahip olduğu söylenebilmektedir. Tüm bunların yanında, alüvyon ile alüvyon altına kuzeye doğru dalım yapan ana kaya yüzeyinde, Çay Küçük Sanayi Sitesi yerleşim alanının çok yakınında veya hemen altında, deprem dalgalarının yansımaları ve/veya kırılmaları sonucunda, meydana gelebilecek odaklaşmanın negatif etkisi vardır.

#### **3.7. Uygulama**

Bu çalışmanın temel amacı; meydana gelen depremlerde, alüvyon tabanlı vadilerin kenar bölgelerinde deprem şiddet artımının sonlu elemanlar yöntemi uygulanarak sayısallaştırılması ve laboratuarda oluşturulan model üzerinde de sinüzoidal dalga oluşturularak, alınan ölçümlerin sayısal çözümlerle karşılaştırılmasıdır.

Bu bölümde, sayısal modellemede uygulanan sonlu elemanlar yöntemi için kullanılan QUAD4M programından elde edilen sonuçlar üzerinde durulacak, laboratuarda gerçekleştirilen model deneyleri ise çalışmanın dördüncü bölümünde aktarılabacaktır.

### 3.7.1. QUAD4M programı tanıtımı

Çalışmada kullanılan QUAD4M bilgisayar programı, ilk olarak, 1968 yılında QUAD4 adıyla I. M. Idriss tarafından yazılmıştır. Genel bir topografyaya ve değişik fiziksel özelliklere sahip zemin katmanlarının (anakaya dahil) deprem altındaki dinamik davranışını analiz etmeye yöneliktir.

Katmanları oluşturan fiziksel ortamı iki boyutlu “düzlem şekil değiştirme” (plane strain) esasına göre ele alan bir sonlu elemanlar programı olan QUAD4M’de, zemin katmanlarından aşağı doğru alınan düşey dilimde yatay doğrultu “x”, düşey doğrultu ise “y” olarak kabul edilmiştir. Dilim düzlemine dik olan doğrultu “z” olmakla birlikte, bu doğrultuda hesap yapılmamakta, eleman kalınlığı “birim” 1 olarak alınmaktadır.

“Düzlem şekil değiştirme” prensibinde, adından da anlaşılacağı üzere, analizde dikkate alınan dilim, düzlemine dik doğrultuda, her iki yönde de yeteri genişliğe, aynı özellik ve koşullara sahip (sonsuz da olabilir) bir ortamı temsil etmektedir. Bu durumda değişiklik, sadece “x” ve “y” doğrultusunda söz konusu olabilir. Bununla uyumlu olarak, belli düğüm noktalarında, “x” ve “y” doğrultularında girdiler (deprem ivmeleri, gerilmeler, sismik katsayılar) verilebilmekte, buna karşın istenen düğüm noktalarında da çıktılar alınabilmektedir. Tüm dilimler için durum aynı olup dinamik davranış, zaman boyunca adım adım integrasyon ile yapılmaktadır. Zeminlerde önemli bir faktör olan kayma modülü “G” ve sönüm “ $\zeta$ ”, şekil değiştirmenin birer fonksiyonu oldukları için aşağıdaki değerler kullanılabilmektedir (Bkz. Şekil 2.14). Böylece, doğrusal olmayan (non-linear) davranış, her zaman adımında değiştirilip yeniden ayarlanabilen, eşdeğer doğrusal (linear) davranış ile temsil edilebilmektedir. Bu durum, zemin deformasyonu arttıkça, daha düşük kayma modüllerinin yanı sıra daha yüksek sönüm değerleri vermektedir. Ancak, güvenli tarafta kalma endişesiyle zemin deformasyonunu aşırı büyük almak gerçekçi olmamakla birlikte amaca ulaştırmayacaktır.

Elemanların dinamik analizinde kullanılan diferansiyel denklem takımlarının daha kolay çözülebilmesi amacıyla, kütle ve rijitlik matrislerinin yanında, sönüm matrisinin elde edilmesinde, daha önce İkinci Bölüm’de ayrıntıları verilen  $\alpha m + \beta k = C$  şeklindeki “Rayleigh Sönüm Yaklaşımı” benimsenmiştir. Bundan dolayı sönümün frekansa bağımlılığı söz konusu olmuş ve bu amaçla “depremin hakim frekansı” kavramı literatürdeki yerini almıştır. Deprem verilerinin yanı sıra, bu değerin de doğru olarak verilmesi, sonuçların tutarlılığı açısından önem kazanmaktadır.

Zeminlerin dinamik davranışı analizlerinde genellikle kabul edilen “yarı sonsuz ortam”, kuramsal olarak sorun çıkarmamakla (hatta kolaylık sağlamakta) birlikte, düğüm ve eleman sayısının artması, hesaplamayı zorlaştıracak için, istenmeyen bir durumdur. Bu zorluk özel sınır elemanlarının kullanılması ile aşılmıştır. Bu sınır elemanlarının düğüm noktaları, “x” ve “y” yönlerinde sabit yada kayar olarak alınabildiği gibi, yüksek sönüm özelliğine sahip olarak da analizlere dahil edilebilmektedir. Böylece doğada olmayan yapay yansımaların sonuca etkisi engellenmiş olmaktadır.

QUAD4M programı, 1968 yılındaki ilk yazılışından bugüne kadar, hem yazılım tekniği, hem de doğadaki durumu daha uygun temsil edebilmesi açılarından birçok değişiklikten geçmiş ve gelişmiştir. Birinci grup gelişmeler; “veri yapıları”, iç depolama tekniği” gibi alanlarda olup, bu çalışmayı doğrudan ilgilendirmeyen gelişmelerdir. İkinci grup gelişmelerin bazıları aşağıda kronolojik sırayla verilmiştir.

1972 : Üçgen elemanlara, dörtgen elemanların eklenmesi.

1973 : Şekil değiştirme ile değişen kayma modülü ve sönüm oranı kavramının benimsenmesi.

1992 : “Eleman” bazında, oluşan ivmenin kütleye bölünmesi ile “sismik katsayı”nın elde edilebilmesi.

1993 : Sönümlenmenin iki frekansta verilebilmesi.

2003 : “Belli zemin katmanları” bazında “sismik katsayı” kavramı ve hesabının getirilmesi.

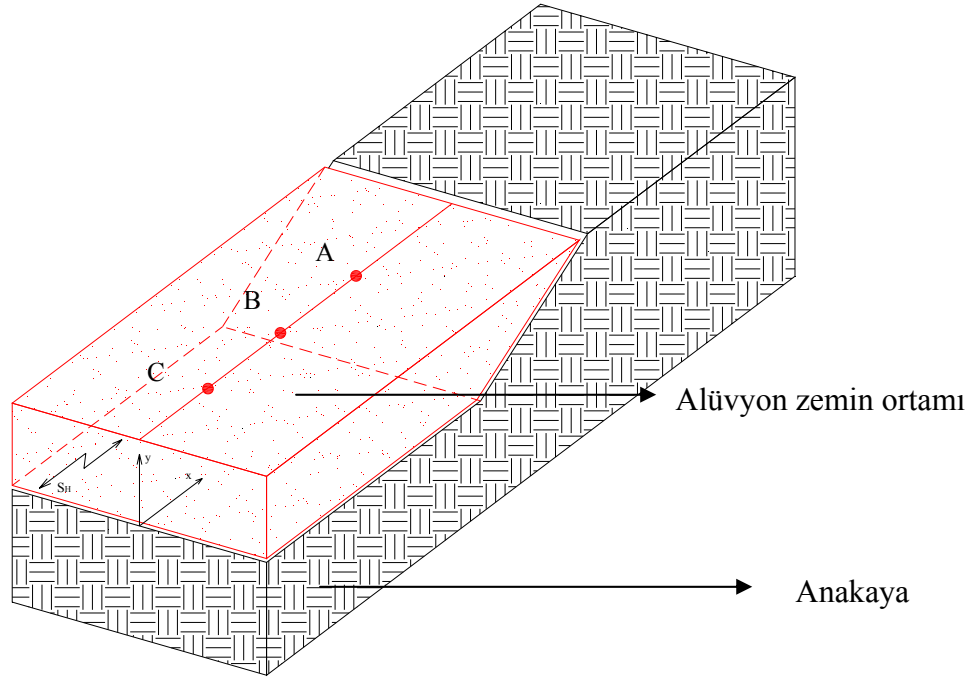
QUAD4M programına ilişkin geliştirmelere günümüzde de devam edilmekte olup, halen “güncel” ve “güvenilir” bir analiz tekniği olarak tanınmaktadır.

Daha önce yaygın olarak kullanılan, ancak tek boyutlu -zemin katmanları değişimini düşey yönde- analiz yapan SHAKE versiyonlarının ve santrifüj deneylerinin verdiği sonuçlar ile çok sayıda doğrulama işlemi yapılmış, gerçek deprem gözlemleri ile karşılaştırılmıştır. SHAKE versiyonlarında zemin katmanlarının iki boyutlu topografyasının dikkate alınması söz konusu olmadığı halde QUAD4M ile dinamik analizler iki boyutlu olarak yapılabilir. Ayrıca, QUAD4M programı, zeminde boşluk suyunun basınç ve şekil değişiklikleri sonucundaki hareketini dikkate alan MODFLOW programı ile kombine edilerek, günümüzde sıvılaşma analizleri için sıklıkla kullanılmakta, buna da “coupled analysis” adı verilmektedir.

### **3.7.2. Modeller**

Yukarıda tanıtımı yapılan QUAD4M, düzlem-şekil değiştirme (plane-strain) esası üzerine, “x” ve “y” doğrultularında iki boyutlu dinamik analizler için kullanılan bir programdır. Düzleme dik “z” doğrultusu göz önüne alınmayan programda değişken olarak vadi kenarının açısı seçilmiş ve beş farklı açı değeri için (17°, 22°, 27°, 37°, 45°) dinamik analizler yapılmıştır. Sonuçta, şekil 3.3’te A, B ve C noktalarındaki yatay ivmeler zamanın fonksiyonu olarak elde edilmiştir.

Oluşturulan tüm modellerde vadi simetri prensibinden yararlanılarak ikiye bölünmüş, vadi kenarı ile vadi eksenini arası 2000 m (2 km), alüvyon kısmının derinliği ise 600 m olarak alınmıştır.

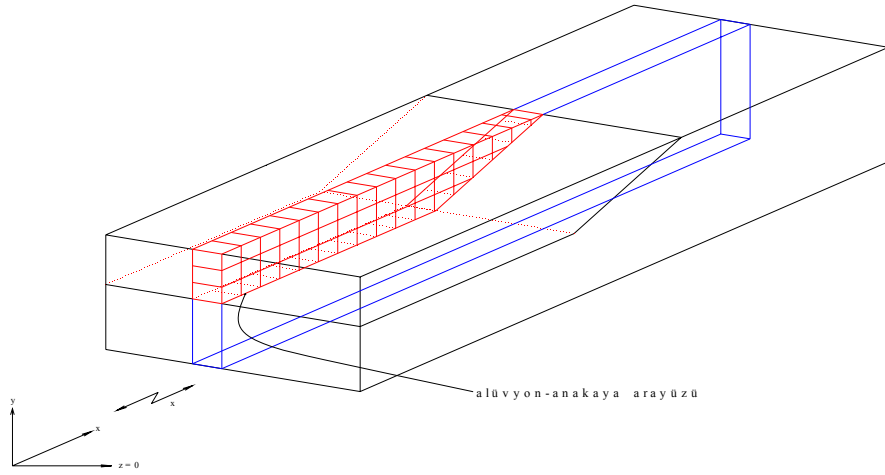


Şekil 3.3. Üç boyutlu vadi kesiti görünümü

Dinamik analizlerde kullanılan QUAD4m programı için Şekil 3.3.'de gösterilen üç boyutlu vadinin alüvyon zemin ortamı sonlu elemanlara ayrılmış (Şekil 3.4), ortam ara yüzeylerinden yatay (x yönünde) deprem kuvveti uygulanmıştır. Böylelikle doğada meydana gelen ve deprem kaynağından çıkarak ana kaya içinde yukarı doğru tırmanan deprem dalgalarının daha doğru bir yaklaşımla temsil edilebileceği düşünülmüştür.

03.02.2002 tarihinde meydana gelen depremlerden sonra uygulama alanında yapılan çalışmalardan elde edilen ve dinamik analizlerde kullanılabilecek zemin verileri aşağıda verilmiştir:

|                                           |                           |
|-------------------------------------------|---------------------------|
| Zeminin birim hacim ağırlığı ( $\gamma$ ) | : 19,4 kN/m <sup>3</sup>  |
| Kayma Modülü (G)                          | : 5550 kN/m <sup>2</sup>  |
| Kayma Modülü Oranı                        | : 0,6 $G_{max}$           |
| Poisson Oranı ( )                         | : 0.35                    |
| Elastisite Modülü ( $E_s$ )               | : 25000 kN/m <sup>2</sup> |



Şekil 3.4. Alüvyon tabanlı vadiye uygulanan sonlu eleman modeli gösterimi

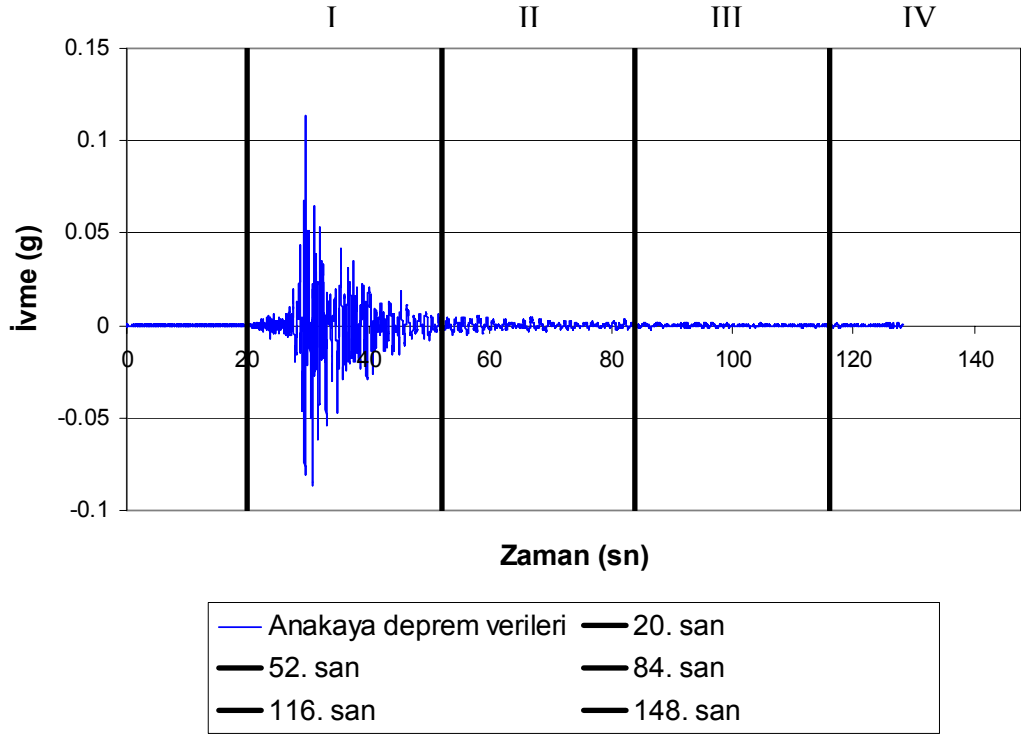
Ayrıca, 03.02.2002 tarihinde meydana gelen depremin ivme kayıtları, T.C. Bayındırlık ve İskan Bakanlığı Afet İşleri Genel Müdürlüğü Deprem Araştırma Dairesi'nin resmi internet sitesinden alınmıştır.

Alınan ivme kayıtları Şekil 3.5'te görüldüğü gibi dört evreye ayrılmış ve pek bir değişimin görülmediği ilk 20 saniyelik evreden sonra gelen;

- 20. saniye – 52. saniye evresi "I",
- 52. saniye – 84. saniye evresi "II",
- 84. saniye – 116. saniye evresi "III"
- 116. saniye – 148. saniye evresi "IV"

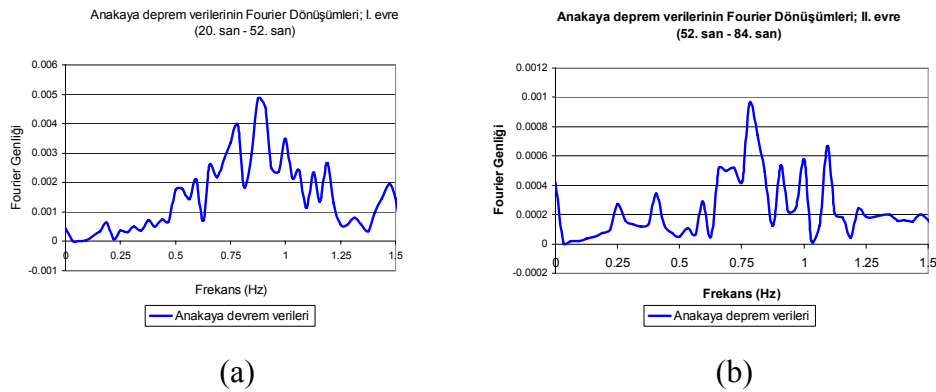
ile gösterilmiştir.



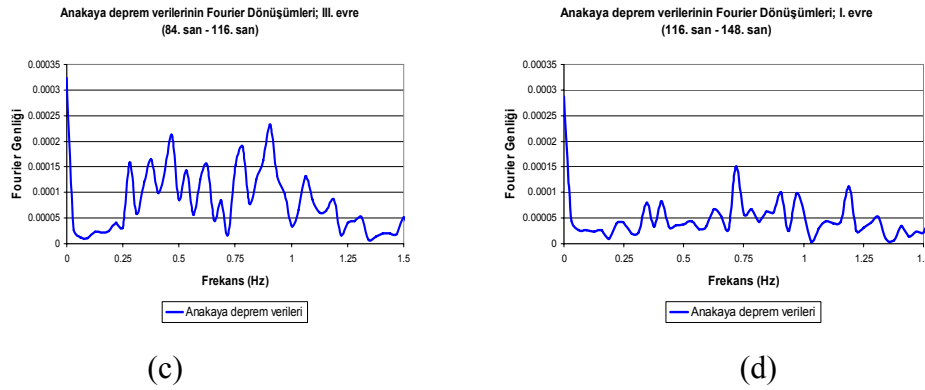


Şekil 3.5. Afyon – Sultandağı depremi ivme kayıtları

Örnek olarak alınan ve dört evrede incelenen ivme kayıtlarının her evre için Hızlı Fourier Dönüşümleri (HFD) (Fast Fourier Transform – FFT) yapılmış ve Şekil 3.5’de (a, b, c, d) gösterilmiştir.



Şekil 3.6. Anakaya deprem verilerinin dört farklı evre için Fourier dönüşümleri; (a) birinci evre, (b) ikinci evre



Şekil 3.6 (Devam). Anakaya deprem verilerinin dört farklı evre için Fourier dönüşümleri; (c) üçüncü evre, (d) dördüncü evre

Aşağıda grafikleri verilen beş ayrı model için -anakaya deprem verilerinde olduğu gibi- A, B, C noktalarındaki ivme-zaman geçmişlerinin Fourier Genlik Spektrum’ları elde edilmiş ve birbirleriyle karşılaştırılmıştır. Spektrumlar elde edilirken yukarıda da belirtildiği üzere Hızlı Fourier Dönüşümü (HFD) programı kullanılmıştır. Yapılan HFD işlemlerinde veri noktası adedinin 2’nin tam üsleri (örneğin  $2^{10} = 1024$ ,  $2^{11} = 2048$  gibi) ile ifade edilmesi, işlemleri kısaltmakta, sonuca çabuk erişilmesini sağlamaktadır. Pratikte veri nokta adedinin bu şekilde bir sayıya uymasının zor olması nedeniyle, veri kaydının son bölümüne sıfır eklenerek bu adede erişilmesi gerekmektedir. Ayrıca, nokta adedinin çok olması frekans ayırımı gücünü artırmaktadır. Kullanılan deprem kaydı,  $\Delta t = 0.008$  saniye aralıklarıyla sıralanmış 16000’i aşkın veri noktasını içermekte ve program kapasitesinin üzerine çıkmaktadır. Bunun yanında, sayısal değerlerin sıfırdan başlayarak kademeli olarak artması ve yine kademeli olarak sıfıra inmesi gerekmektedir. Aksi takdirde elde edilen spektrumda anormal (yapay) sıçramalar oluşmaktadır.

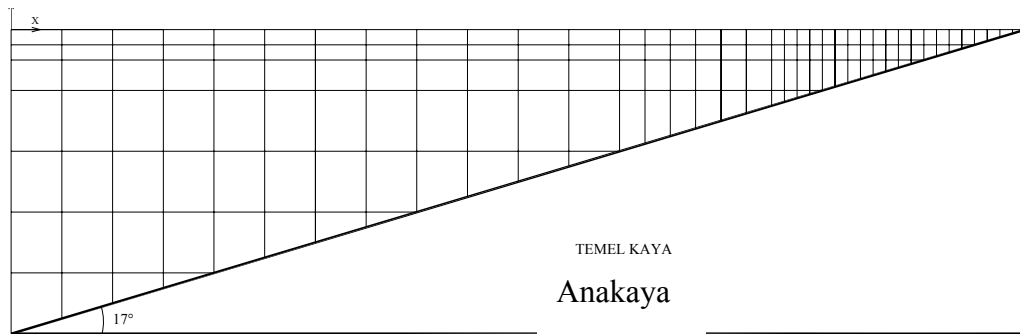
Yukarıda yapılan açıklamalardan dolayı, hem anakayadaki deprem hareketinin, hem de A, B ve C noktalarındaki ivme-zaman geçmişlerinin formu birlikte dikkate alındığında, verilerin yer aldığı zamanı 4096 noktalık (32 saniyelik) dört evreye ayırmak mümkündür.  $4096 = 2^{12}$  olduğundan, nokta adedi Fourier analizindeki yaklaşıma uygun gelmektedir. Bu nedenle, hem anakayadaki, hem de A, B ve C noktalarındaki ivme-zaman geçmişleri, 4096 noktalık (32 saniyelik) dört zaman

evresine bölünmüş, her bir evre için sıfırdan başlayıp sıfırdan son bulması amacıyla gerekli küçük değişiklikler yapılmıştır. Böylece HFD hesap koşulları da yerine getirilmiştir.

Bu şekilde deprem süresinin dört evre olarak incelenmesi yorumların daha kapsamlı yapılabilmesini de sağlamıştır. Çünkü depremin genlik-frekans kompozisyonunun zamanla da değişim gösterdiği görülmektedir. Ayrıca, verilerin 4096 noktalık dört zaman evresi halinde ifade edilmesinin anlamlı ve tutarlı yorumlara götürdüğü görülmüştür.

### Model 1

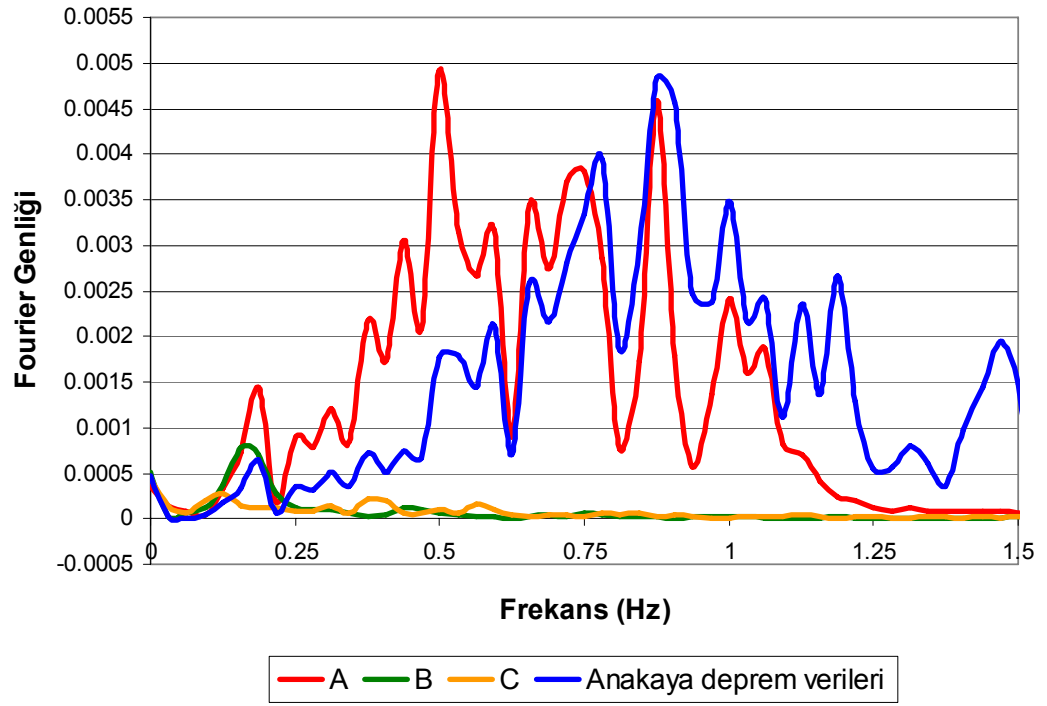
Yukarıda özellikleri belirtilen program  $17^\circ$  eğimli bir model üzerine uygulanmıştır (Şekil 3.7).



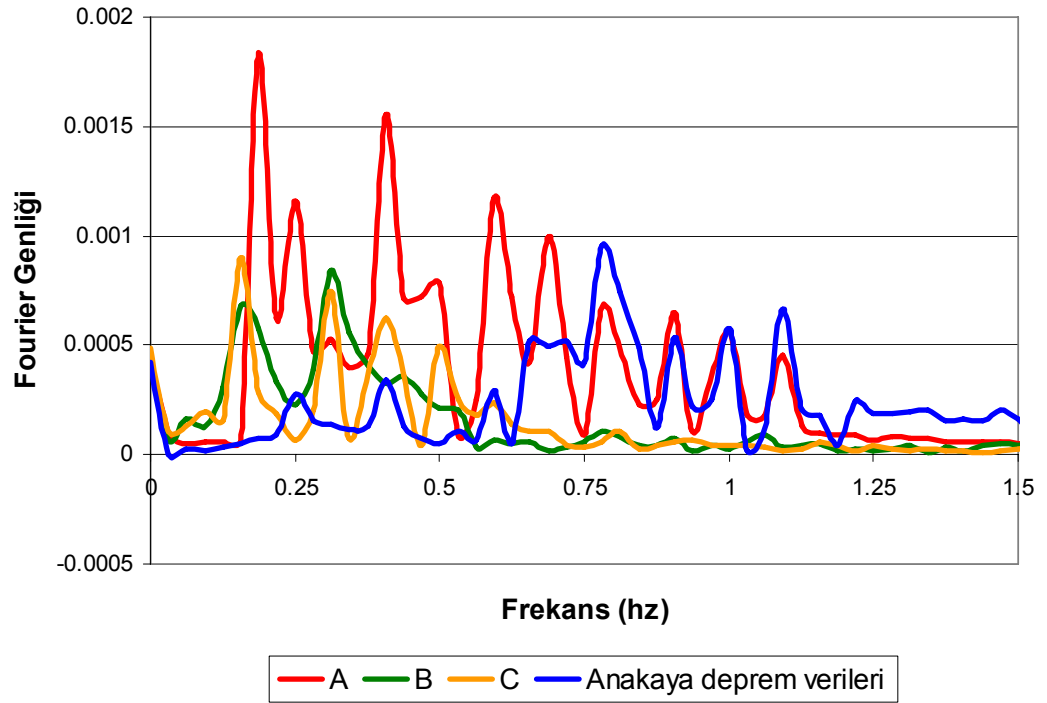
Şekil 3.7. Vadi eğimi  $17^\circ$  olarak seçilen modelin sonlu eleman ağı

Bu modelde, vadi ekseninin bulunduğu noktaya kadar gelen anakaya ile birlikte, yarım eşkenar üçgen bir alüvyon tabaka sonlu elemanlara ayrılmıştır. Bu modelin düşük eğimli kanyonu da temsil ettiği düşünülebilir.

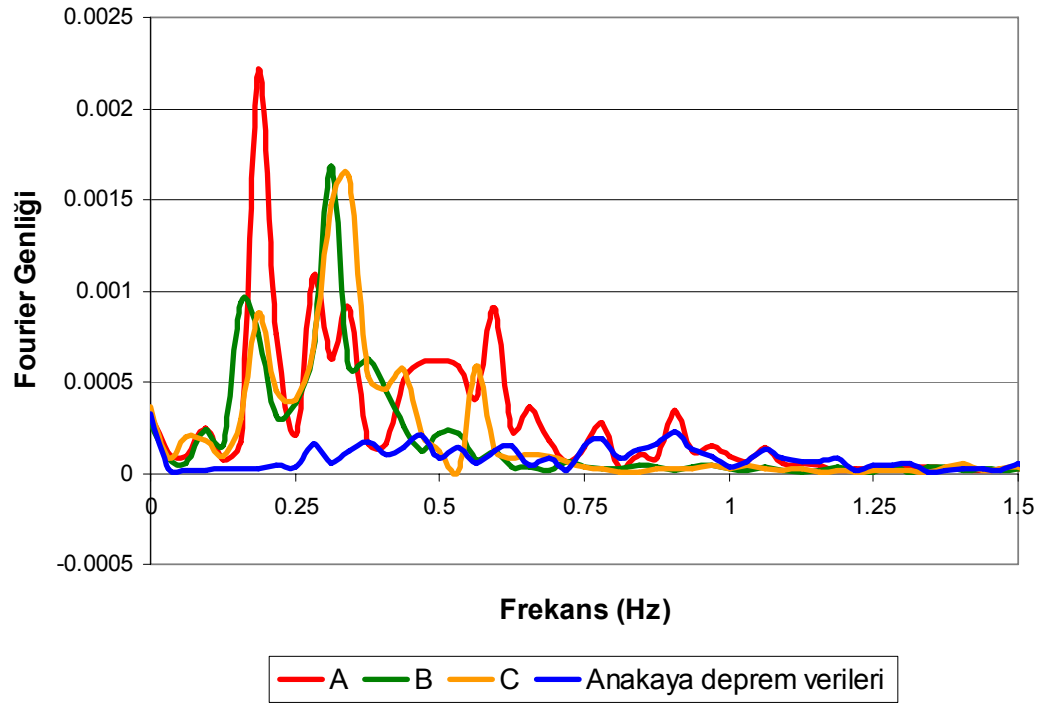
Vadi ekseninden itibaren 1800. m’de “A”, 900. m’de “B” ve 100. m’de C noktalarında (sırasıyla 167, 67 ve 9. düğüm noktaları) yapılan dinamik analizler sonucunda elde edilen HFD uygulamaları, anakaya deprem verileri ile birlikte aşağıda gösterilmiştir.



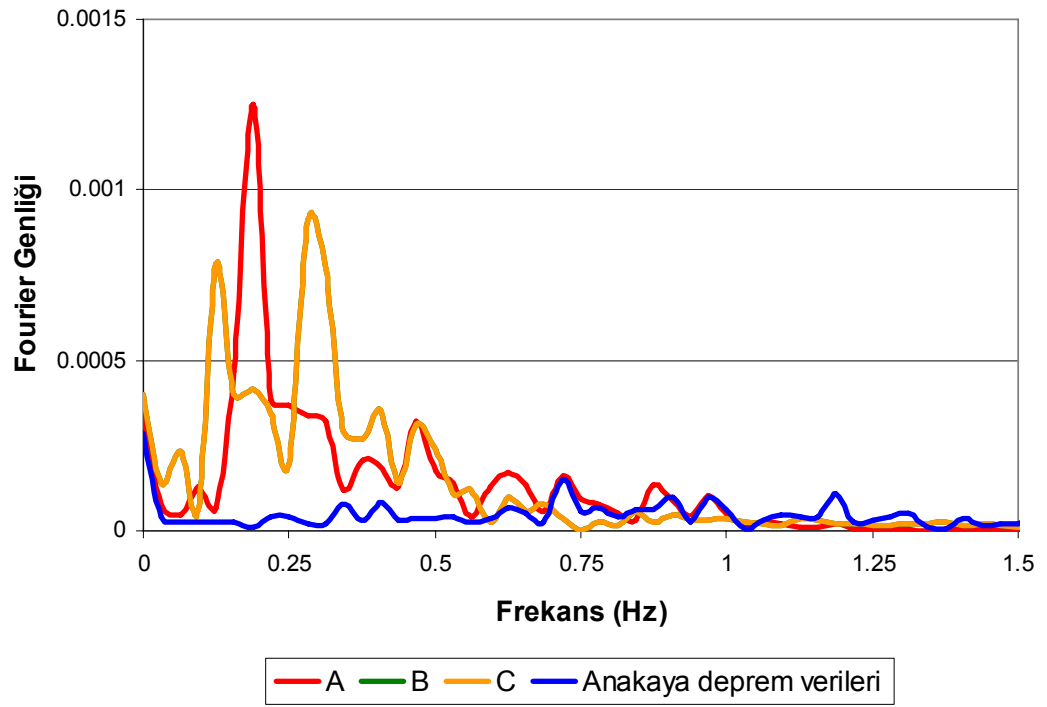
Şekil 3.8. Vadi eğimi 17°; 20. saniye – 52. saniye evresi



Şekil 3.9. Vadi eğimi 17°; 52. saniye – 84. saniye evresi



Şekil 3.10. Vadi eğimi 17°; 84. saniye – 116. saniye evresi

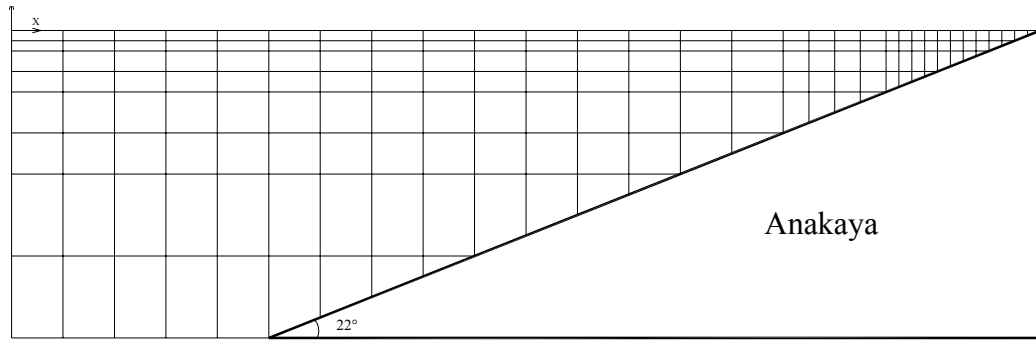


Şekil 3.11. Vadi eğimi 17°; 116. saniye – 148. saniye evresi

A noktasının, tüm evrelerde özellikle düşük frekanslarda en yüksek değerlere ulaştığı ve genliklerin niceliksel olarak zamanla birlikte azaldığı, B ve C noktalarının genelde aynı davranışı sergilediği ve ikinci evre ile birlikte anakaya genliklerinin üstüne çıktığı, ancak hiçbir zaman A noktasının genliğine yaklaşamadığı görülmüştür.

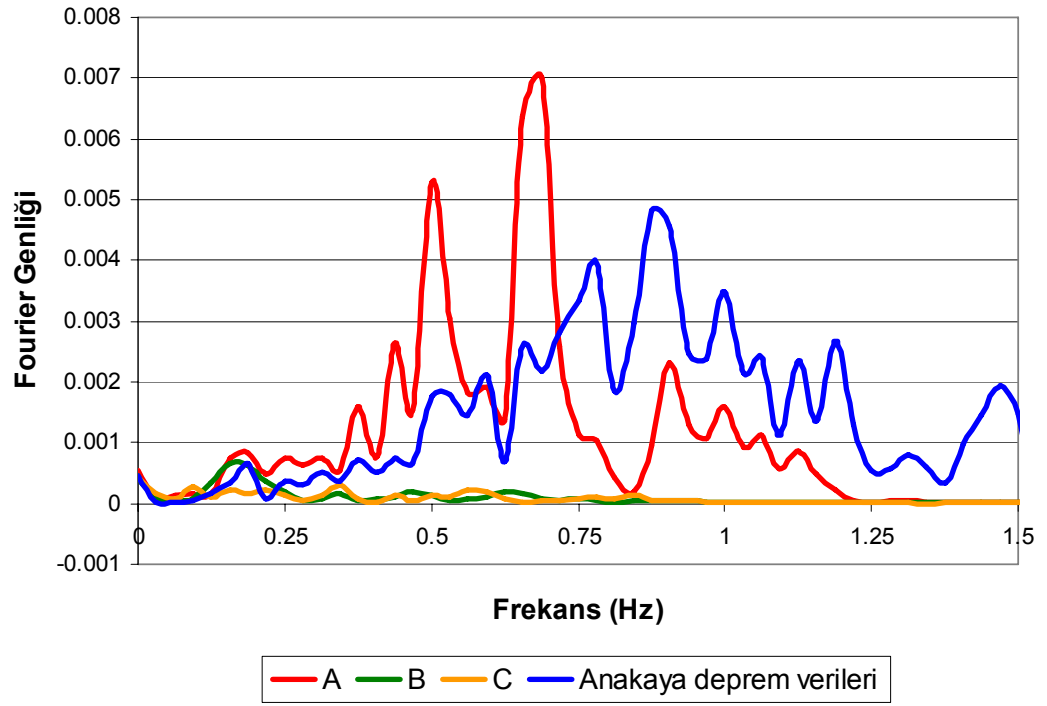
### Model 2

Bu modelde, vadi eğimi  $22^\circ$  alınarak sonlu eleman ağı çizilmiş, ilk modelde alınan dinamik parametreler yinelenmiştir (Şekil 3.12).

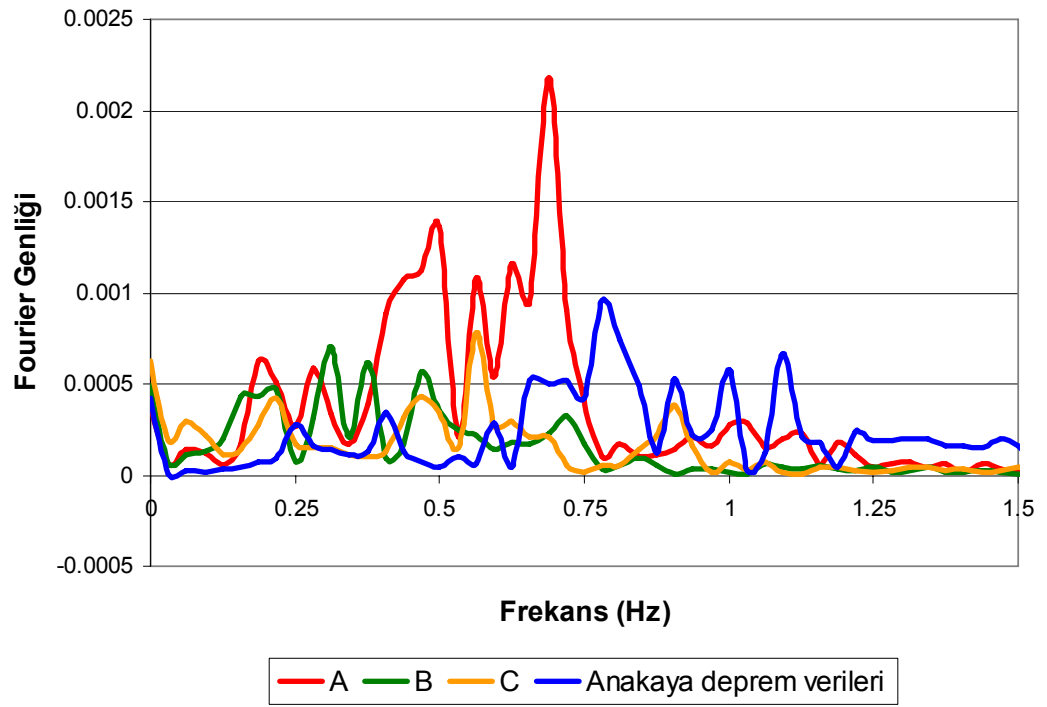


Şekil 3.12. Vadi eğimi  $22^\circ$  olarak seçilen modelin sonlu eleman ağı

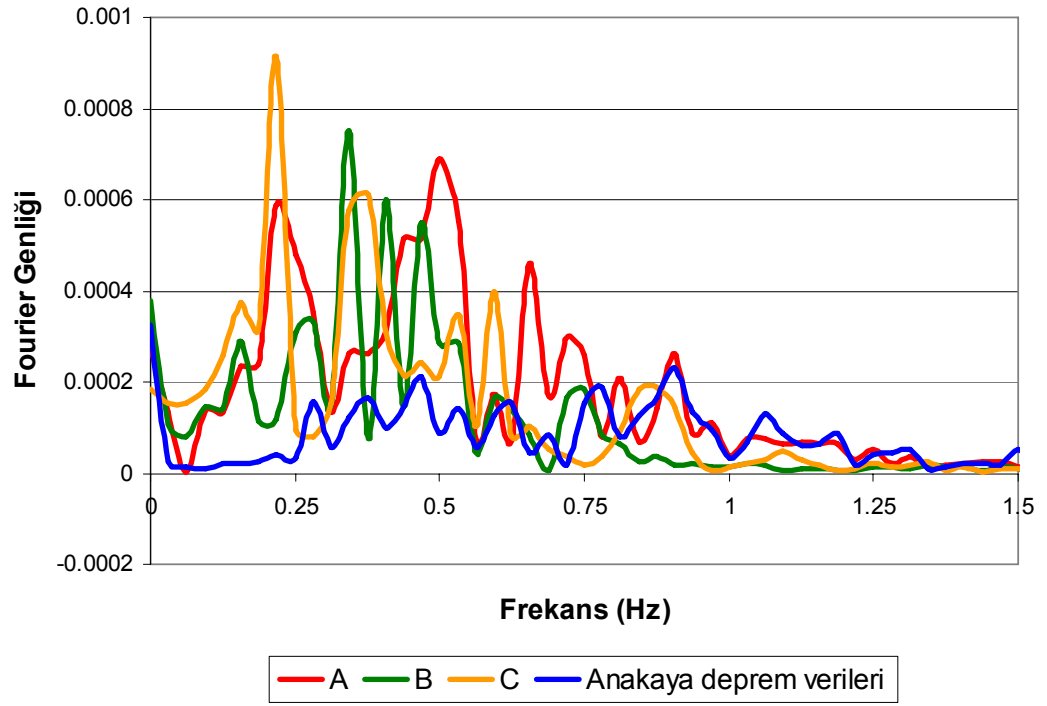
Vadi ekseninden itibaren 1800. m’de “A”, 900. m’de “B” ve 100. m’de C noktalarında (sırasıyla 172, 82 ve 10. düğüm noktaları) yapılan dinamik analizler sonucunda elde edilen HFD uygulamaları, anakaya deprem verileri ile birlikte aşağıda gösterilmiştir.



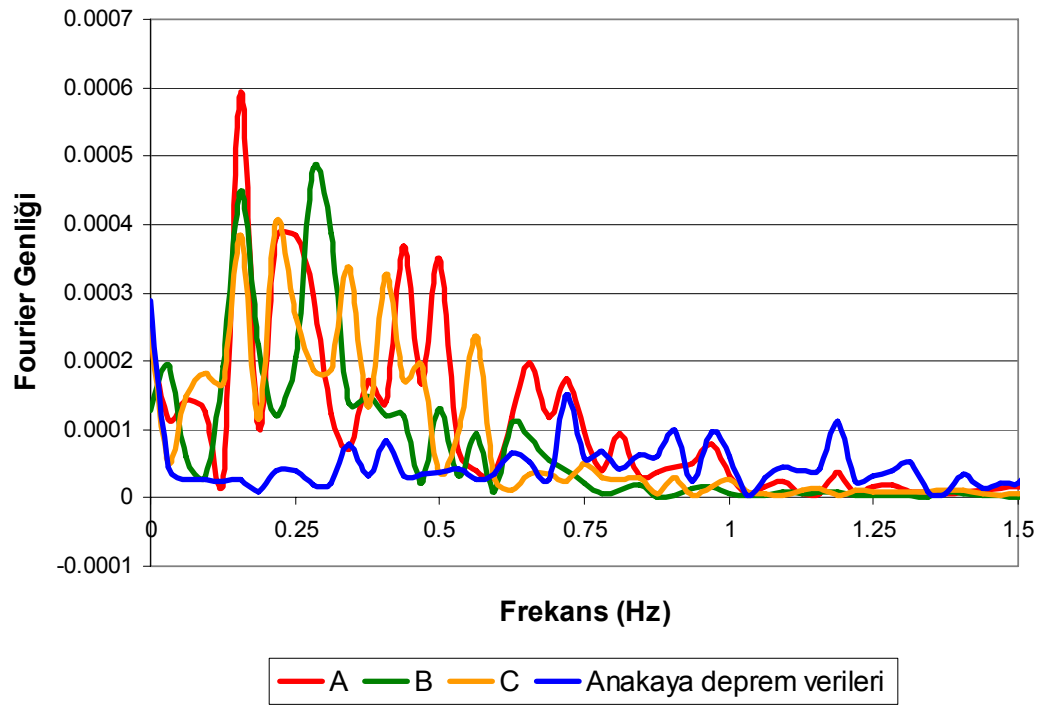
Şekil 3.13. Vadi eğimi 22°; 20. saniye – 52. saniye evresi



Şekil 3.14. Vadi eğimi 22°; 52. saniye – 84. saniye evresi



Şekil 3.15. Vadi eğimi 22°; 84. saniye – 116. saniye evresi



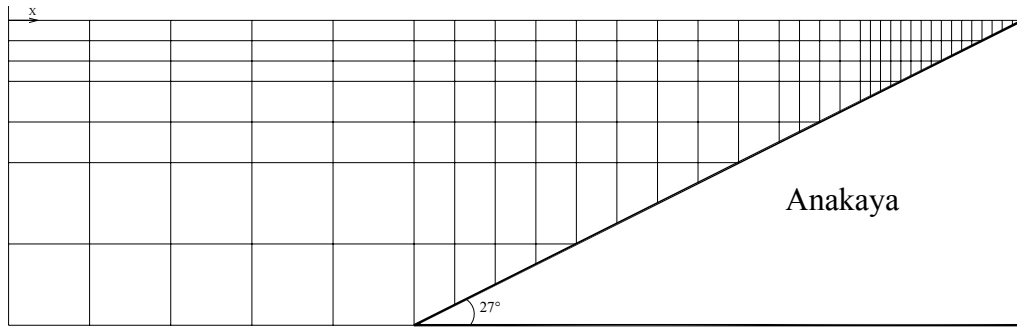
Şekil 3.16. Vadi eğimi 22°; 116. saniye – 148. saniye evresi



Model 2’de ise, A noktasının, hemen tüm evrelerde özellikle düşük frekanslarda en yüksek değerlere ulaştığı ve genliklerin niceliksel olarak zamanla birlikte azaldığı, B ve C noktalarının genelde aynı davranışı sergilediği ve ikinci evre ile birlikte anakaya genliklerinin üstüne çıktığı, ancak bu kez Model 1’den farklı olarak B ve C noktalarının; üçüncü evrede (84. saniye – 116. saniye) A noktasının genliğini niceliksel olarak geçtikleri görülmüştür.

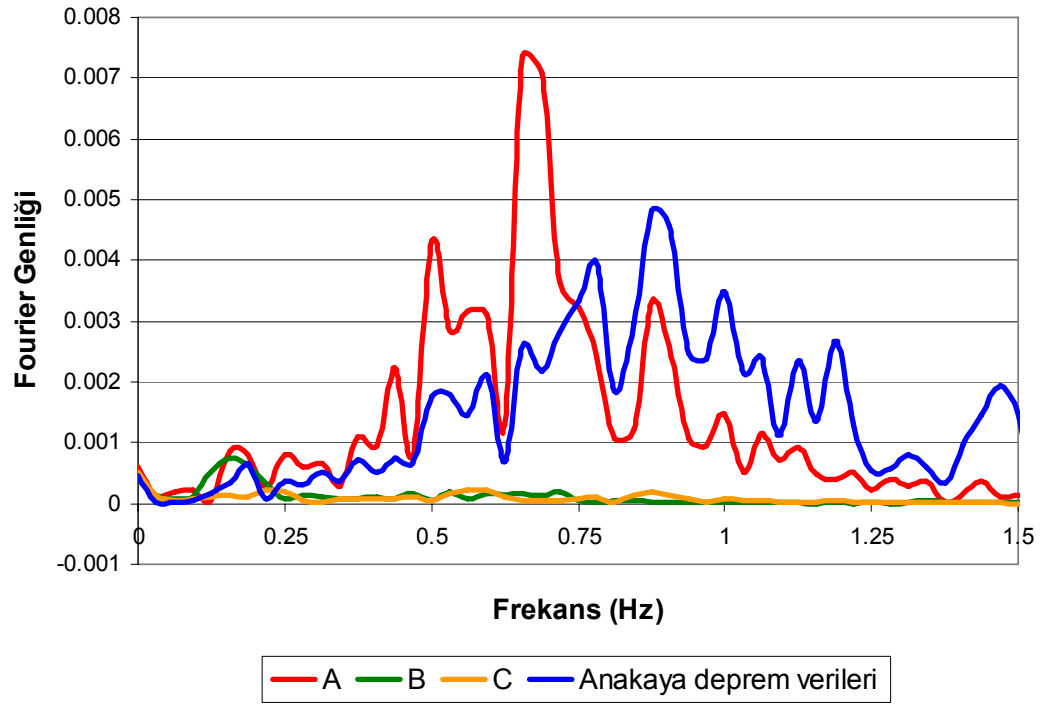
### Model 3

Bu modelde vadi eğimi  $27^\circ$  alınmış ve ilk iki modele göre eğim artırılmıştır (Şekil 3.17).

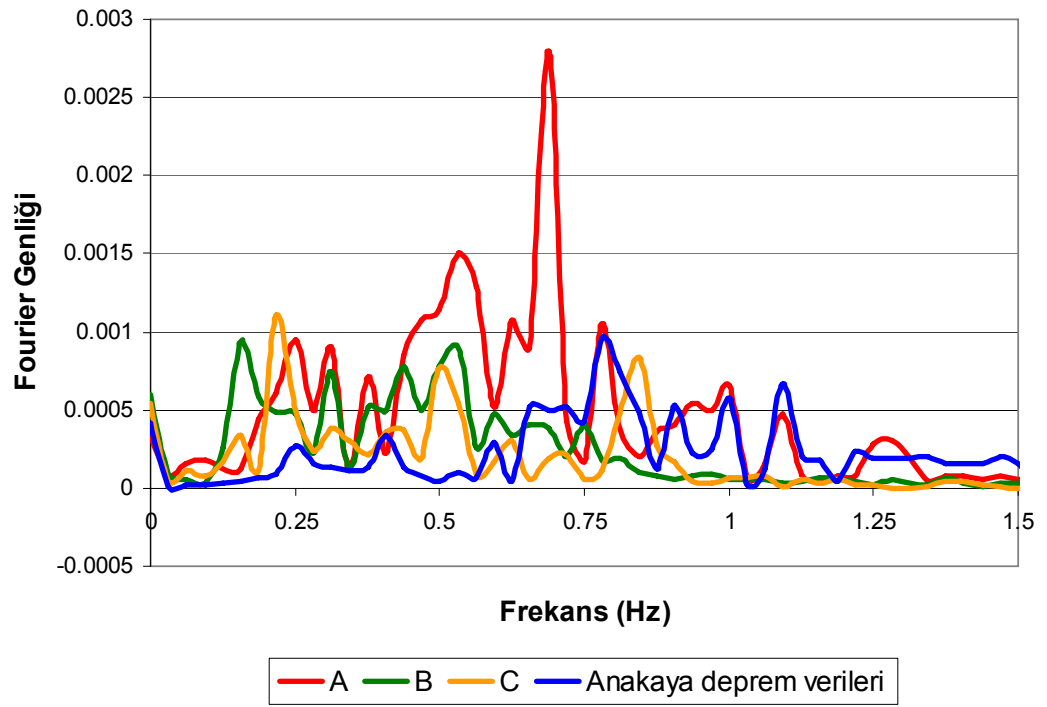


Şekil 3.17. Vadi eğimi  $27^\circ$  olarak seçilen modelin sonlu eleman ağı

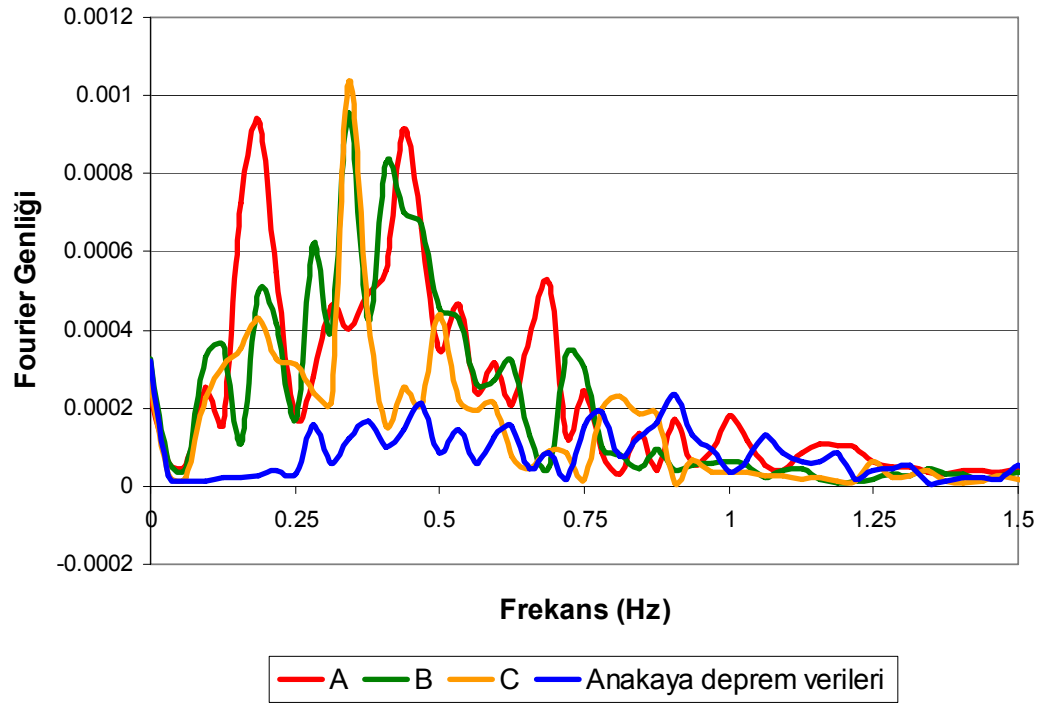
Vadi ekseninden itibaren 1800. m’de “A”, 880. m’de “B” ve 160. m’de C noktalarında (sırasıyla 181, 55 ve 10. düğüm noktaları) yapılan dinamik analizler sonucunda elde edilen HFD uygulamaları, anakaya deprem verileri ile birlikte aşağıda gösterilmiştir.



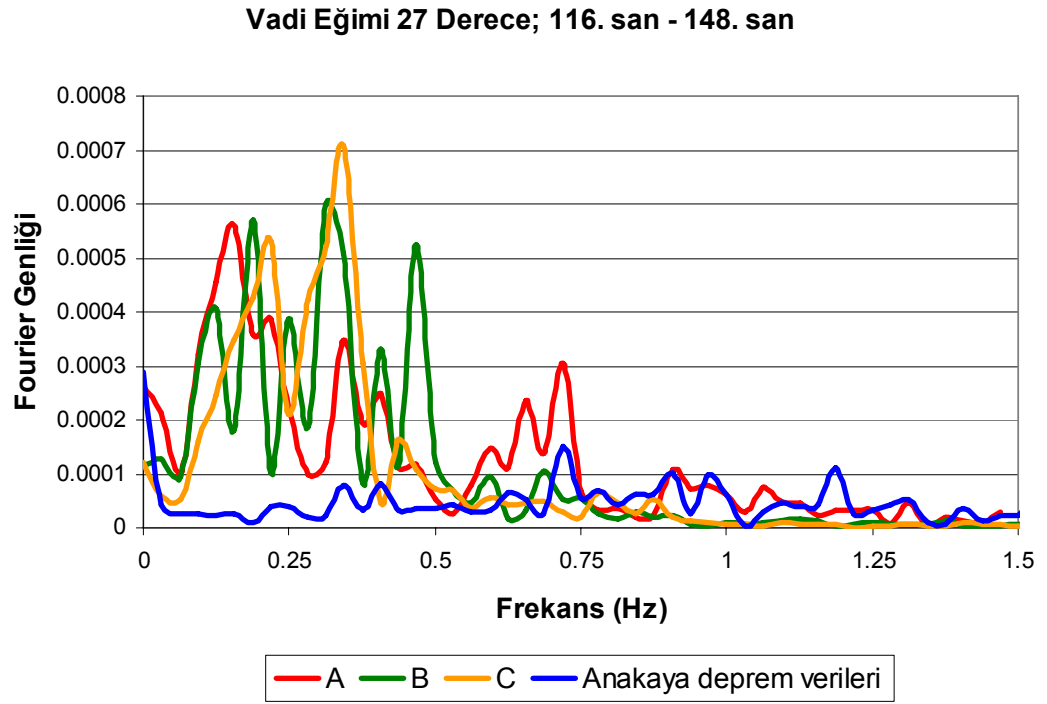
Şekil 3.18. Vadi eğimi 27°; 20. saniye – 52. saniye evresi



Şekil 3.19. Vadi eğimi 27°; 52. saniye – 84. saniye evresi



Şekil 3.20. Vadi eğimi 27°; 84. saniye – 116. saniye evresi

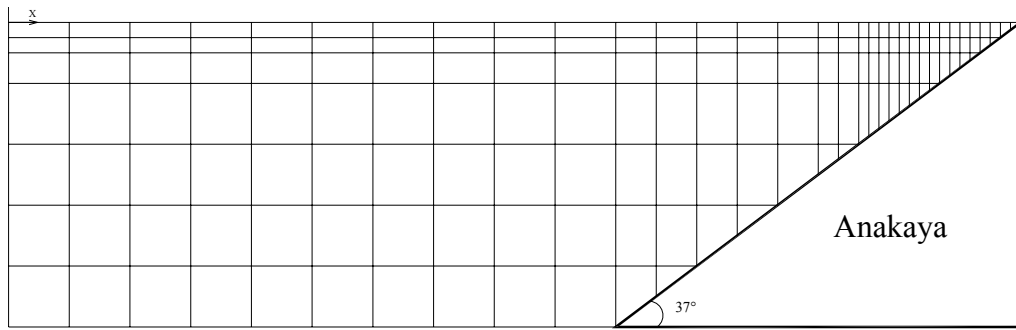


Şekil 3.21. Vadi eğimi 27°; 116. saniye – 148. saniye evresi

Model 3’de de, Model 2’ye benzer bir durumla karşılaşılmış, A noktası genliklerinin düşük frekanslarda üçüncü evre hariç en yüksek değerlere ulaştığı görülmüştür.

#### Model 4

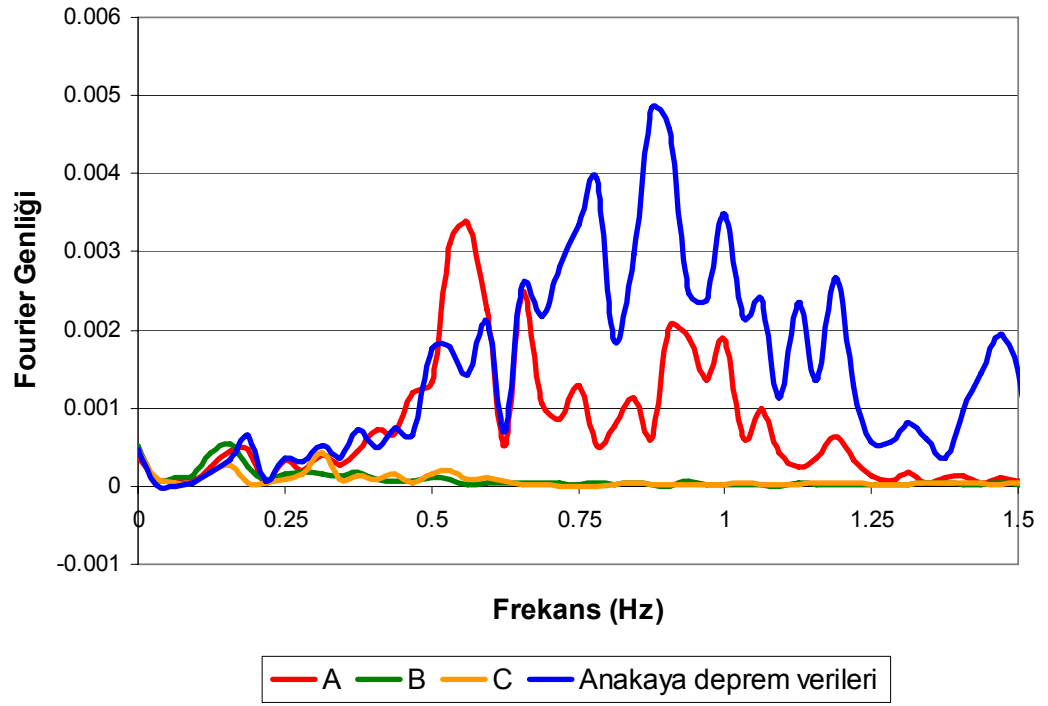
Bu modelde ise vadi eğimi  $37^\circ$  alınarak sonuçlar elde edilmeye çalışılmıştır. (Şekil 3.22).



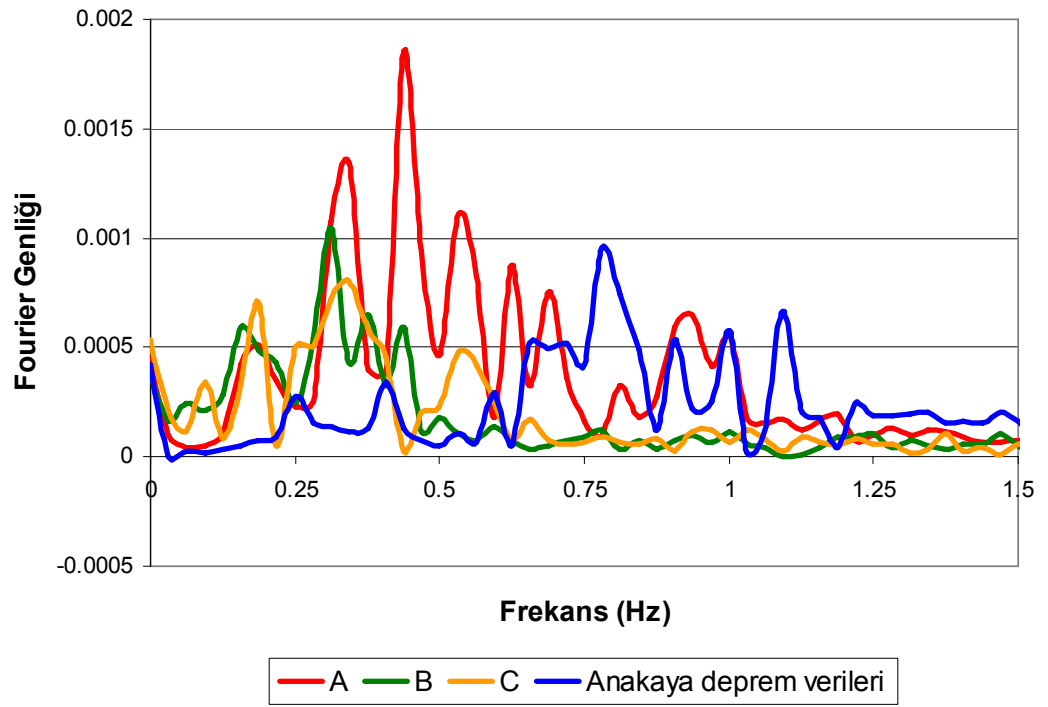
Şekil 3.22. Vadi eğimi  $37^\circ$  olarak seçilen modelin sonlu eleman ağı

Vadi ekseninden itibaren 1800. m’de “A”, 960. m’de “B” ve 120. m’de C noktalarında (sırasıyla 159, 65 ve 9. düğüm noktaları) yapılan dinamik analizler sonucunda elde edilen HFD uygulamaları, anakaya deprem verileri ile birlikte aşağıda gösterilmiştir.

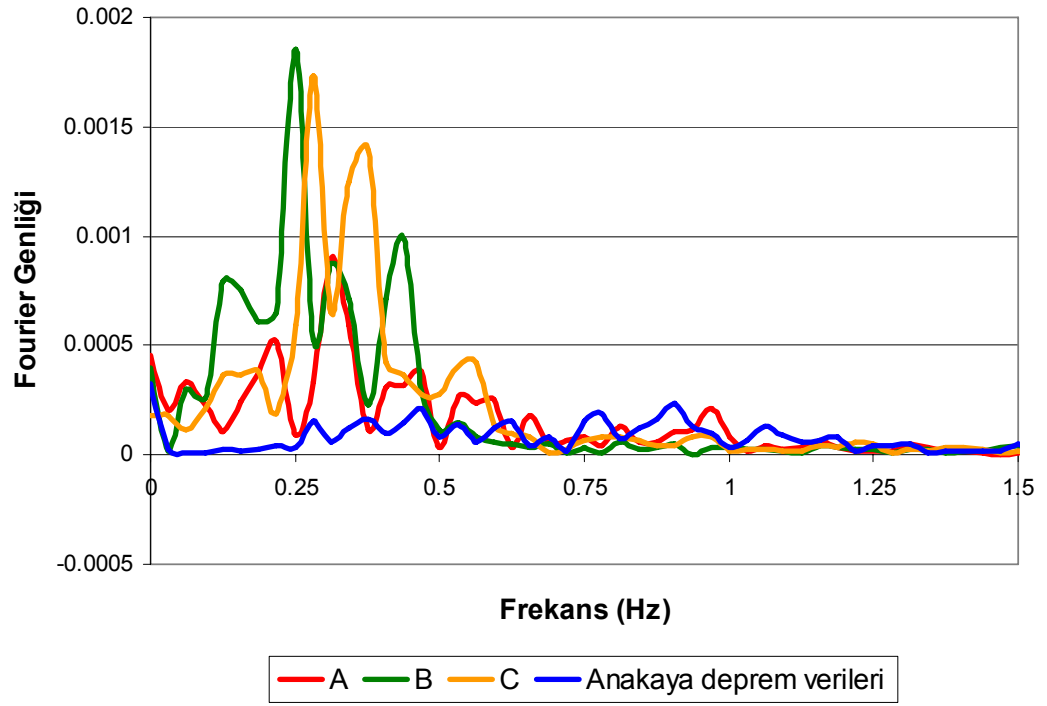
Bu modelde ise vadi eğim açısının büyümesi ile birlikte, diğer üç modelde düşük frekanslarda çok yüksek genliklere ulaşan A noktasının genliklerinde diğer noktalar ve anakaya deprem verilerine göre azalmalar meydana geldiği, aksine vadi eksen ve vadi eksen ile vadi kenarı arasında bulunan C ve B noktalarının genliklerinde artışlar olduğu görülmüştür.



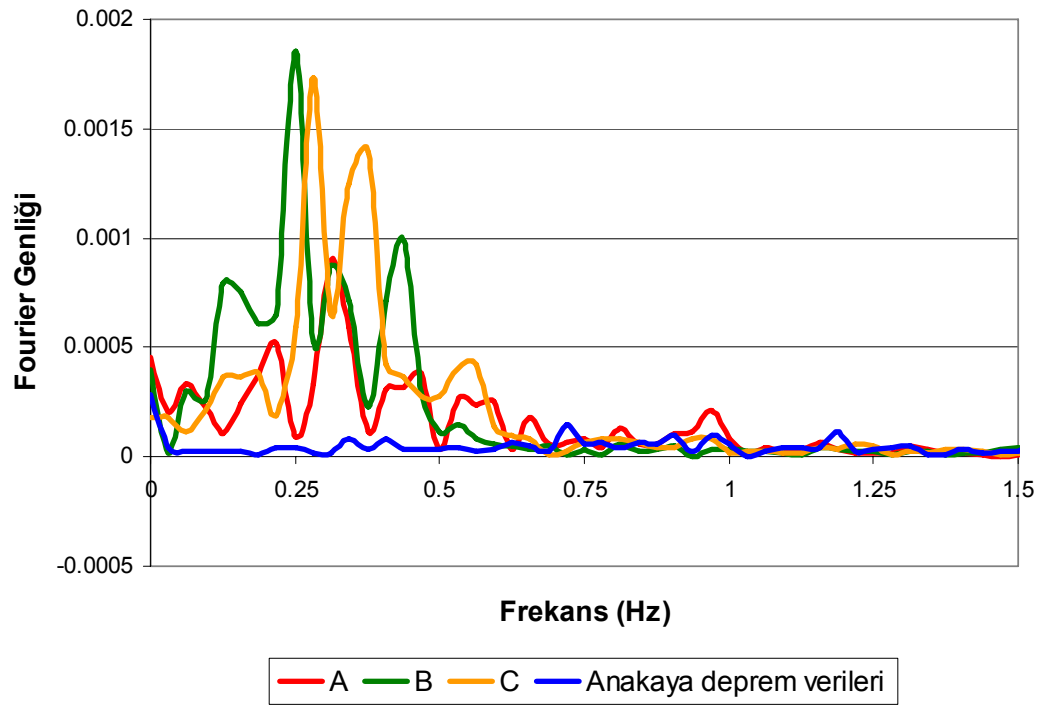
Şekil 3.23. Vadi eğimi 37°; 20. saniye – 52. saniye evresi



Şekil 3.24. Vadi eğimi 37°; 52. saniye – 84. saniye evresi



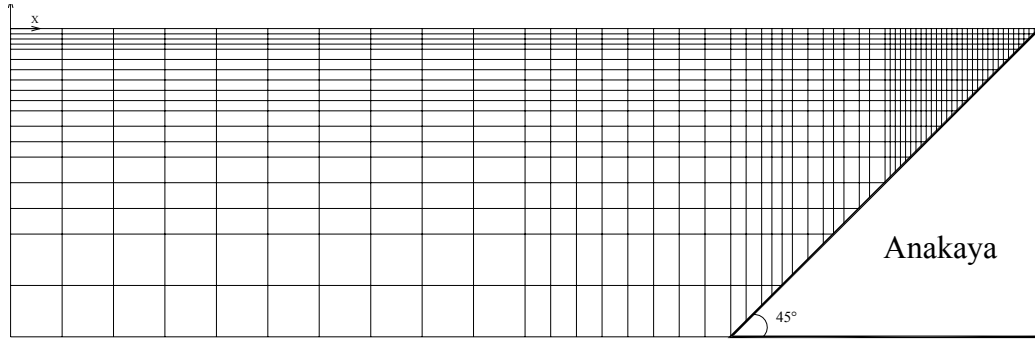
Şekil 3.25. Vadi eğimi 37°; 84. saniye – 116. saniye evresi



Şekil 3.26. Vadi eğimi 37°; 116. saniye – 148. saniye evresi

### Model 5

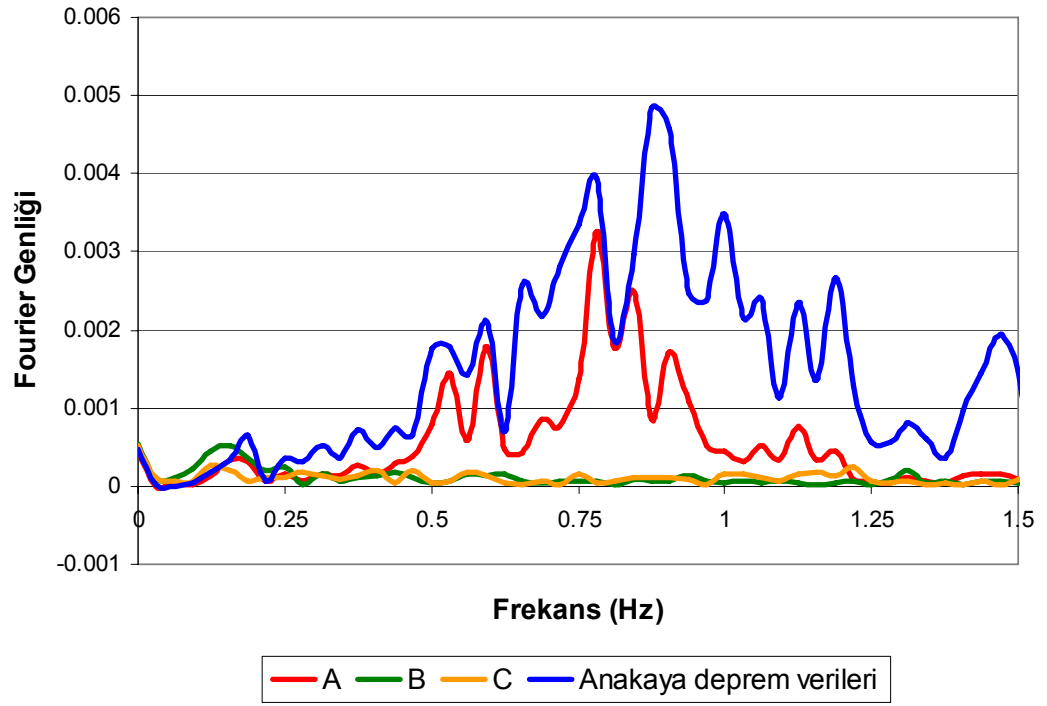
Son olarak vadi eğimi  $45^\circ$  seçilmiş, çıkan sonuçlar diğer model uygulamalarıyla karşılaştırılmıştır (Şekil 3.27).



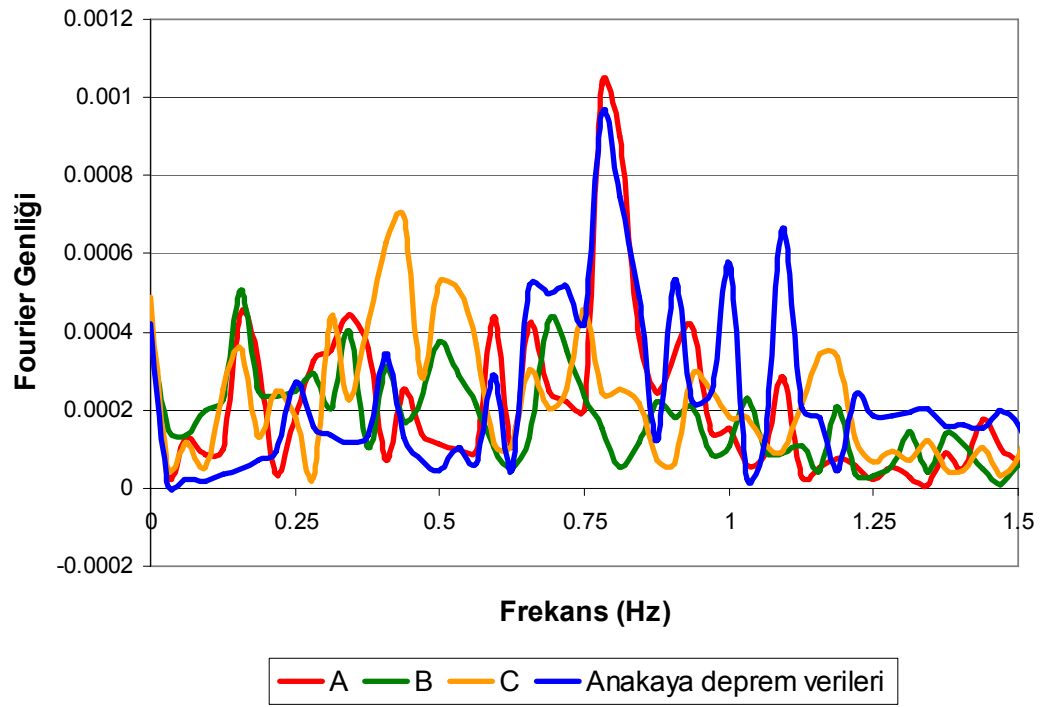
Şekil 3.27. Vadi eğimi  $45^\circ$  olarak seçilen modelin sonlu eleman ağı

Vadi ekseninden itibaren 1800. m’de “A”, 900. m’de “B” ve 100. m’de C noktalarında (sırasıyla 700, 172 ve 20. düğüm noktaları) yapılan dinamik analizler sonucunda elde edilen HFD uygulamaları, anakaya deprem verileri ile birlikte aşağıda gösterilmiştir.

Model 4 olarak adlandırılan ve vadi eğimi  $37^\circ$  olarak seçilen modelle birlikte  $45^\circ$  eğimli Model 5’in Frekans-Fourier Genliği grafiklerinin benzer olduğu görülmüş, A noktasındaki genliklerde azalma, B ve C noktalarının genliğinde ise artışın olduğu belirlenmiştir. Bu durum, [Cılız, 2007] tarafından yapılan doktora çalışmasında elde edilen; vadi eğim açısının artması ile birlikte kritik bölgenin vadi köşesinden vadi ortasına doğru kaydığı doğrultusundaki sonuçları ile örtüşmektedir.

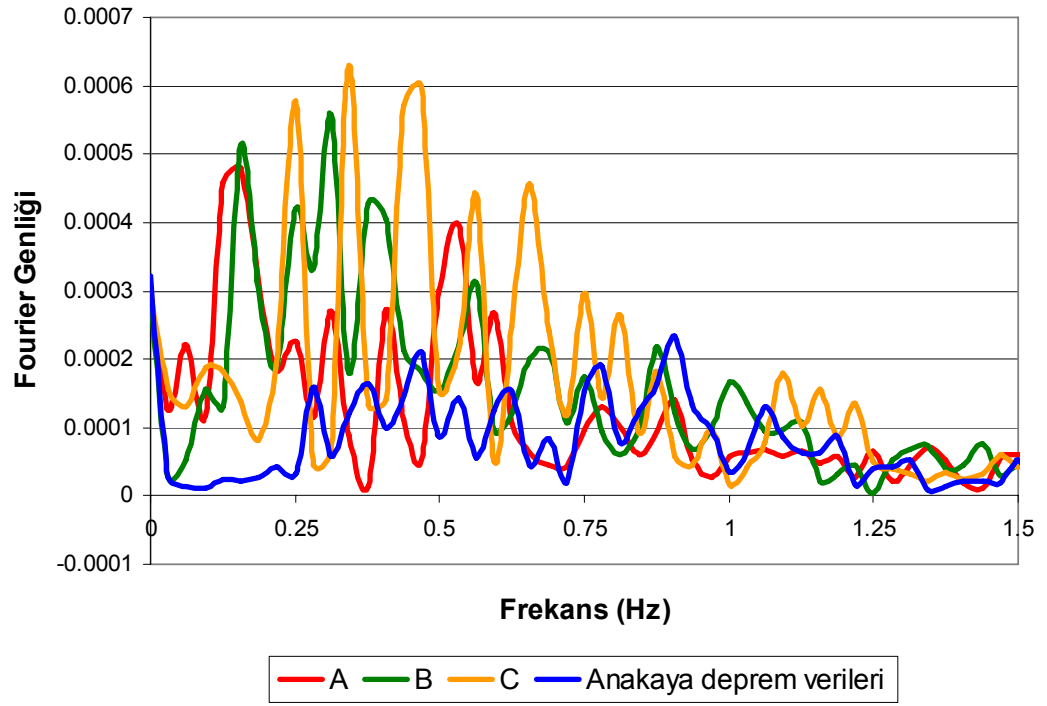


Şekil 3.28. Vadi eğimi 45°; 20. saniye – 52. saniye evresi

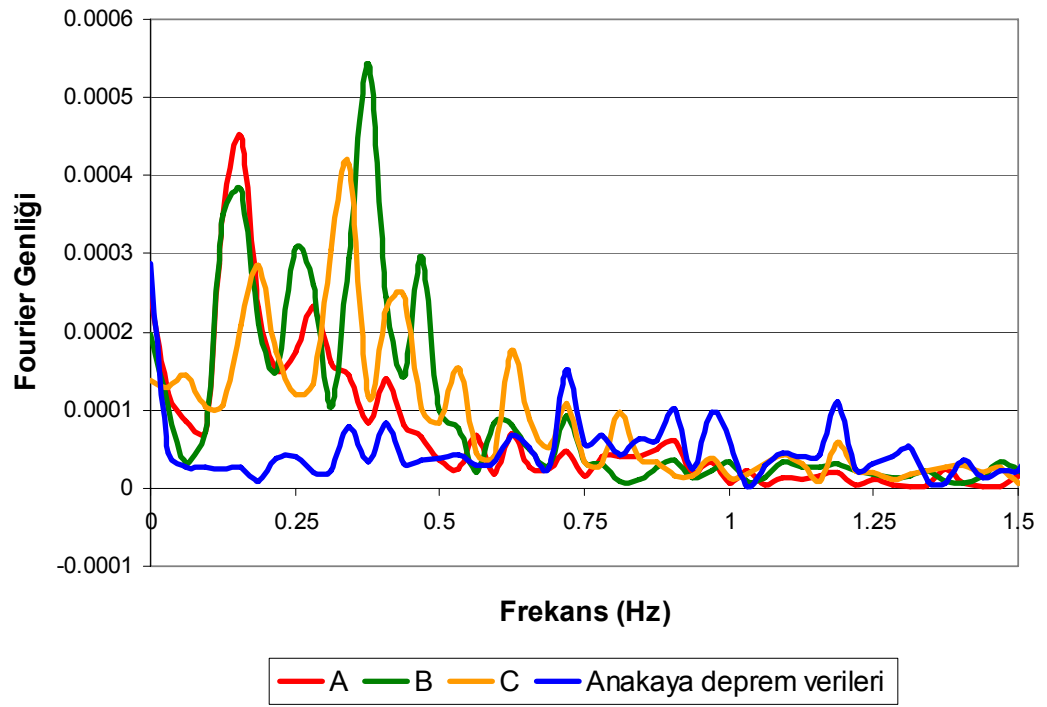


Şekil 3.29. Vadi eğimi 45°; 52. saniye – 84. saniye evresi





Şekil 3.30. Vadi eğimi 45°; 84. saniye – 116. saniye evresi



Şekil 3.31. Vadi eğimi 45°; 116. saniye – 148. saniye evresi

### 3.8. Program Sonuçlarının Genel Yorumu

Dinamik analizleri yapılan A, B ve C noktalarının ivme-zaman geçmişleri gözle incelendiğinde vadi kenarında bulunan A noktasındaki durumun en uygunsuz olduğu düşünülebilmektedir. Ancak, bu yorumun niteliksel değil de niceliksel olarak yapılabilmesi amacı ile elde edilen, anakayadaki ve vadi yüzeyinde alınan üç noktadaki ivme-zaman geçmişlerinin Fourier Genlik Spektrumları genel değerlendirmeleri aşağıda verilmiştir.

Çalışmada örnek alınan deprem 128 saniye gibi bir toplam süre tutmakla birlikte, etkileri belli zaman evrelerinde farklılıklar göstermektedir. Bu etki farklılıkları evrelere özgü frekans-genlik kombinasyonuna bağlanabilir.

C noktası, vadinin en derin olduğu yere denk geldiğinden dolayı, zemin hakim frekans (yada tersi hakim periyot) etkisinin en çok beklenebileceği yerdir. Burada zemin hakim frekansındaki deprem dalga bileşenlerinin büyütülmüş etkisinin görülmesi, daha düşük ve yüksek frekanslardaki bileşenlerin de zayıflatılması beklenir ki, bu durum yapılan analizler sonucunda görülmektedir. Sinüs formundaki basit dalgalar, bu nokta civarında gözle seçilebilir ve tanınabilir formlarını koruyabilmişlerdir.

A noktasında, çeşitli yansıma ve üst üste binmelerin (süperpozisyon) olması önceden hissedilebilecek bir olgudur. Böyle bir mekanizmanın varlığından hareket edilmemiş olmakla birlikte, elde edilen sayısal sonuçların -özellikle düşük eğimli durumlarda- diğer iki noktadan (B ve C) düşük frekanslarda genlik artımı yönünden daha uygunsuz çıkması, doğada gerçek depremlerde karşılaşılan hasar dağılımları ile de örtüşmektedir. Tekrar edilecek olursa; burada sözü edilen mekanizmanın varlığı hesap yöntemlerini yönlendirecek bir müdahale ile varsayılmamış olup ancak dolaylı bir yorum olarak ortaya çıkmaktadır.

B noktasındaki durumun ise; A ile C noktaları arasındaki konum için doğada gözlenene uygun bir görünüme sahip olduğu, sonuçların tutarlılığı açısından bir kontrol noktası olarak görülebileceği görüşüne ulaşılmıştır.

QUAD4M programı ile yapılan sonlu eleman analizleri ile ulaşılan bir diğer sonuç ise; vadi eğim açısının büyümesi ile birlikte vadi kenar bölgelerindeki genlik artışının vadi ortasına kaydığı yönündedir ki; bu durum da, [Cılız, 2007] tarafından yapılan doktora çalışmasında elde edilen sonuçlarla bire bir örtüşmektedir.

## 4. MODEL DENEYLERİ

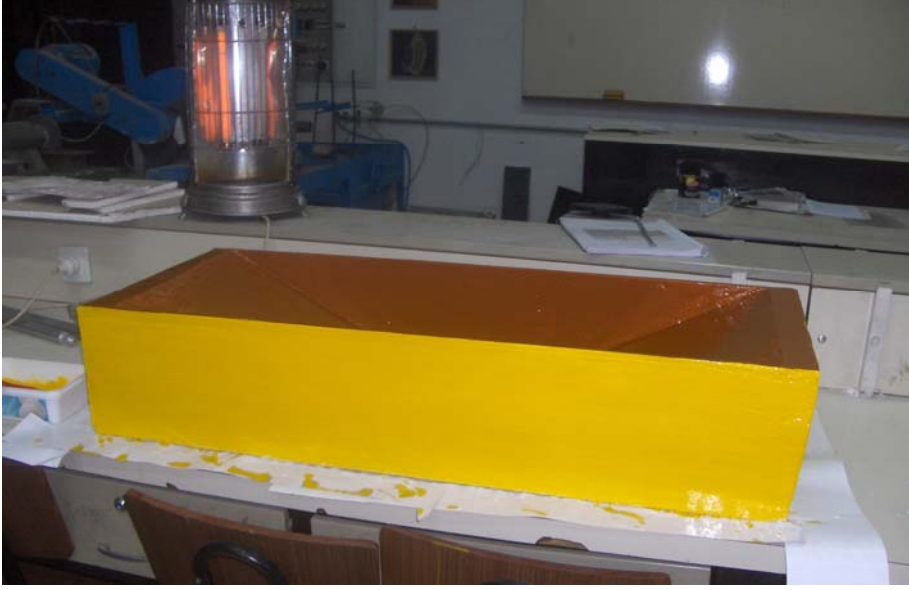
### 4.1. Giriş

Gazi Üniversitesi Mühendislik Mimarlık Fakültesi İnşaat Mühendisliği laboratuvarlarında gerçekleştirilen deneylerde, bir önceki bölümde ayrıntılarıyla verilen sonlu eleman analizindeki geometrik şekillerden vadi eğimi  $27^\circ$  olan trapez kesit esas alınmıştır. Hazırlanan modellerin fiziksel özellikleri, deney düzeneği, uygulama ve deney sonuçlarının yorumu aşağıda sunulmuştur.

### 4.2. Deney Düzeneği ve Kullanılan Aletlerin Özellikleri

Laboratuvar deneylerinde iki farklı model hazırlanmıştır:

- Anakayanın “sertleşmiş alçı” ile, vadideki alüvyonun da “polivinilalkol (PVA) çözeltisi + sodyumtetraborat –  $\text{Na}_2\text{B}_4\text{O}_7$  (boraks) çözeltisi karışımı” (PVA + Boraks) ile temsil edildiği, sonlu eleman programı uygulamasına göre 1/4000 ölçekli, fiziksel model (Resim 4.1).
- Anakayanın “silikon-kum karışımı” ile, alüvyonun da “polivinilalkol (PVA) çözeltisi + sodyumtetraborat –  $\text{Na}_2\text{B}_4\text{O}_7$  (boraks) çözeltisi karışımı” (PVA + Boraks) ile temsil edildiği, sonlu eleman programı uygulamasına göre 1/4000 ölçekli, fiziksel model (Resim 4.2).

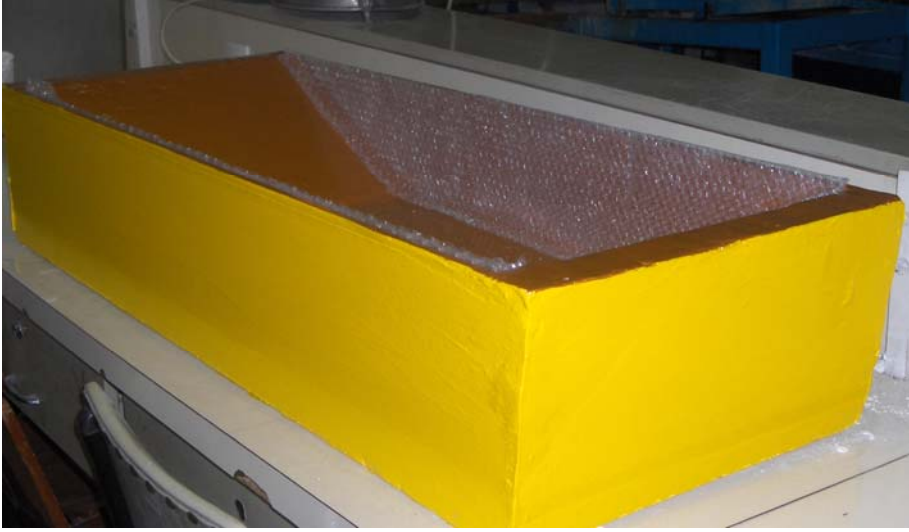


Resim 4.1. Model 1



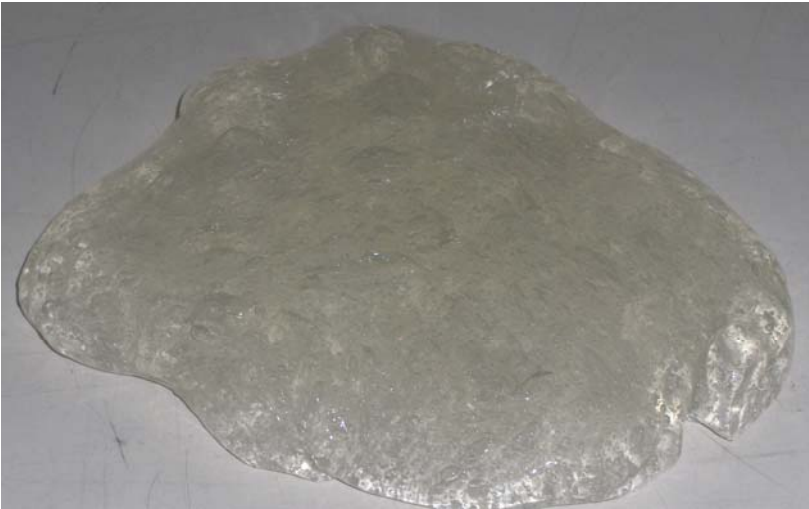
Resim 4.2. Model 2

Çalışmanın QUAD4M programı kullanılarak yapılan bölümünde, anakayanın rijit olduğu ve bir bütün olarak davrandığı kabulü yapılmıştır. Birinci fiziksel modelde de “sertleşmiş alçı”nın bir bütün olarak, her noktasının aynı fazda, “rigid-body motion” tanımına uygun hareket yaptığı varsayılmıştır (Resim 4.3).



Resim 4.3. Anakayanın “sertleşmiş alçı” ile temsil edilen modeli (1. model)

Resim 4.4’te görülen jel kıvamındaki “(PVA + Boraks)” malzemenin elastisite modülü (E) ve kayma modülü (G) değerleri çok düşüktür ve kolayca titreştirilebilir niteliktedir.



Resim 4.4. Jel kıvamında hazırlanan “PVA + Boraks” malzeme numunesi

Üçüncü bölümde de işaret edildiği üzere; QUAD4M programında, düzlem şekil değiştirme (plane strain) kabulü, yani göz önüne alınan düzlemin her iki tarafında da sonsuz genişlikte malzeme bulunduğu kabulü yapılmıştır. Fiziksel modeldeki alüvyon vadinin 40 cm’lik genişliği, ivme sensörünü yerleştirerek ölçme yapılan orta

bant için “sonsuz genişlik” gibi görüldüğü düşünülmüştür. Yanlarda, PVA + Boraks’ın dökülmemesi için modele monte edilen alçıpan duvarların bu kabule aykırı olarak yapacağı etkiyi en aza indirmek amacıyla, duvarların içi hava kabarcıkları içeren, esnek-şeffaf PVC ambalaj malzemesi ile kaplanmıştır. Bunun, “alçıpan yan duvarlar”dan “PVA + Boraks” malzemeye etki eden “x” yönündeki kayma kuvvetlerini yeterince azaltacağı düşünülmüştür (Resim 4.5).



Resim 4.5. Model 1’de alçıpan yan duvarlara kaplanan PVC ambalaj malzemesi

Doğadaki durum ilk modelde uygulanan rijit kap örneği gibi değildir. Deprem kaynağından çıkan dalga ışınları anakaya içinden geçerken yukarı doğru bükülen eğrisel yörüngeler izleyerek alüvyon tabanındaki noktalara ulaşmakta, sonra da bu noktalar yeni titreşim kaynakları olarak değişik yönlerde yeni dalgalar yaymaktadır. Bu sürece değişik yansımalar, kırılmalar ve süperpozisyonlar eşlik etmektedir. “*Rijit kab*” modelinin bütün bunları temsil edemeyeceği açıktır. Bunun yerine, ikinci modelde, değişik malzeme seçenekleri denendikten sonra anakaya, “silikon-kum karışımı” ile temsil edilmekte olup (Resim 4.6), QUAD4M programında yapılan kabulün ötesinde, anakayanın sonsuz rijit olmadığı kabulü ile deney yapılabilme olanağı tanımaktadır.



Resim 4.6. Model 2’de anakayayı temsil eden “silikon-kum karışımı” malzemesinin karot numunesi

Buna uygun olarak, modelin farklı yerlerinden anakayaya dalga hareketi verilebilmektedir. Bu durumda yan duvarların -birinci modeldeki gibi- rijit yapılmasının, ortamdan dalga iletilmesine müdahale edebilme olasılığına karşılık aşağıdaki yöntem uygulanmıştır (Resim 4.7).

Piyasada parke-lam adıyla satılan 7,5 mm kalınlığındaki MDF (medium-density fiberboard) malzemeden, 5,00 cm genişliğinde ve yeteri uzunlukta dilimler kesilerek, bunların her biri modelin iki yanına da ikişer ahşap vidası ile tutturulmuştur. Dilimler arasında bırakılan 7,5 mm genişliğindeki boşlukların, “x” yönünde ortamdan iletilen dalga hareketine müdahale olasılığını ortadan kaldıracığı düşünülmüştür. PVA + Boraks’ın yanlardan dökülmesini önlemek amacı ile bunların iç yüzeyi yine hava kabarcıklı PVC ambalaj malzemesi ile kaplanmıştır.





Resim 4.7. Model 2’de MDF malzeme ile yan duvarlara uygulanan yöntem

Deneylerde, aşağıda kısaca özellikleri ve uygulama amaçları belirtilen aletler kullanılmıştır:

#### *Fonksiyon Üretici (Function Generator)*

Bu aletle, 0.0001 Hz – 2 MHz aralığında seçilebilen bir frekansta “sinüs eğrisi”, “kare”, “ikizkenar üçgen” ve “testere dişi” formunda, mutlak genliğinin en büyük değeri 0’dan 1 Volt’a kadar ayarlanabilen elektriksel gerilim dalgaları elde edilebilmektedir (Resim 4.8).

“Fonksiyon Üretici”, fizik ve elektrik mühendisliği alanındaki çalışmalarda yaygın olarak kullanılan ve uluslararası elektronik piyasasında çeşitleri bulunan temel cihazlardan biridir. Bu çalışmadaki rolü, belirli frekans ve genlikteki sinüzoidal mekanik dalgaları elde etmek için ihtiyaç duyulan elektriksel referans sinyaliyi oluşturmaktır. Deneyde uygulanması söz konusu frekanslar (10 Hz – 250 Hz), yukarıda belirtilen aralığın orta bölgesinde, görece dar bir bant içinde kalmaktadır.

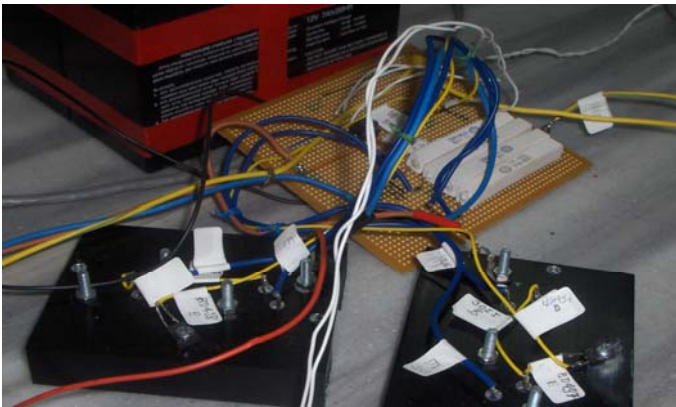


Resim 4.8. Fonksiyon üretici

#### *İşlevsel Yükselteç (Operational Amplifier)*

Bu alet, “Fonksiyon Üretici”nden elde edilen ve deneyde doğrudan kullanılamayacak kadar zayıf olan elektriksel referans sinyalini girdi olarak alıp, onu güçlü ve akım şiddeti yüksek bir elektrik akımına dönüştürmektedir.

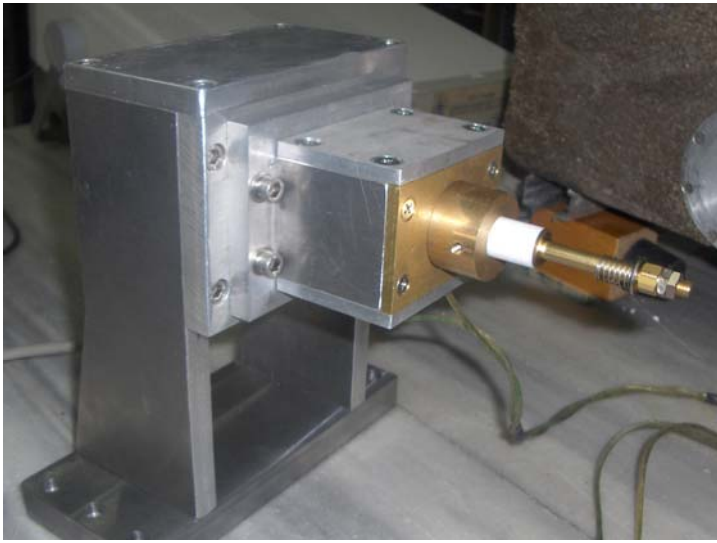
Böylece bu akım, deneyde kullanmaya uygun enerji düzeyinde, sinüzoidal mekanik dalgalar elde etmekte kullanılabilmektedir. Alet, elektronik piyasasında hazır bulunmadığı için, deney koşullarına uyacak şekilde özel olarak tasarlanmış ve imal edilmiştir.  $\pm 12$ 'luk Volt akü ile çalışmaktadır (Resim 4.9).



Resim 4.9. Deneylerin kullanım amacına uygun özel olarak tasarlanan ve imal edilen “işlevsel yükselteç”

### *Elektromagnetik Tahrik Cihazı (Electromagnetic Actuator)*

Bu aletle, “İşlevsel Yükselteç”in oluşturduğu güçlü elektrik akımları mekanik dalga hareketine dönüştürülmekte, böylece “fiziksel model”in uygun bölgelerine, deney yapmaya elverişli enerji düzeyinde sinüs dalgaları verilebilmektedir. Alet, elektronik piyasasında hazır bulunmadığı için, deney koşullarına uyacak şekilde özel olarak tasarlanmış ve imal edilmiştir (Resim 4.10).



Resim 4.10. Deneylerin kullanım amacına uygun özel olarak tasarlanan ve imal edilen “elektromanyetik tahrik cihazı”

### *İvme Sensörü ve Sinyal Koşullayıcı (Acceleration Sensor and Signal Conditioner)*

Uygun bölgelerine sinüs dalgaları verilmiş olan “fiziksel model”in değişik noktalarında oluşan ivmeler, bu noktalara mekanik olarak monte edilen “ivme sensörü” ve ona kablo ile bağlı “sinyal koşullayıcı” kombinasyonu ile, zamana göre değişen elektrik gerilimlerine dönüştürülmektedir. “İvme sensörleri” titreşim mühendisliğinde yaygın olarak kullanılan ve uluslararası piyasada çeşitleri bulunan temel öğelerdendir. Deneyde kullanılan “ivme sensörü” ve ona bağlı “sinyal koşullayıcı”nın oluşturduğu bütün, 0.1 Hz – 150 Hz frekans aralığında, 0.0005g – 3.0g arasında değişen ivmeleri % 5 duyarlılıkla ölçebilmektedir. Bu kapasite,

çalışmada gerçekleştirilen deneyler için gerekli olan bölgeden daha geniştir (Resim 4.11a ve 4.11b).



(a)



(b)

Resim 4.11. İvme ölçer sistemi; (a) İvme sensörü, (b) sinyal koşullayıcı

#### *Osiloskop (Oscilloscope)*

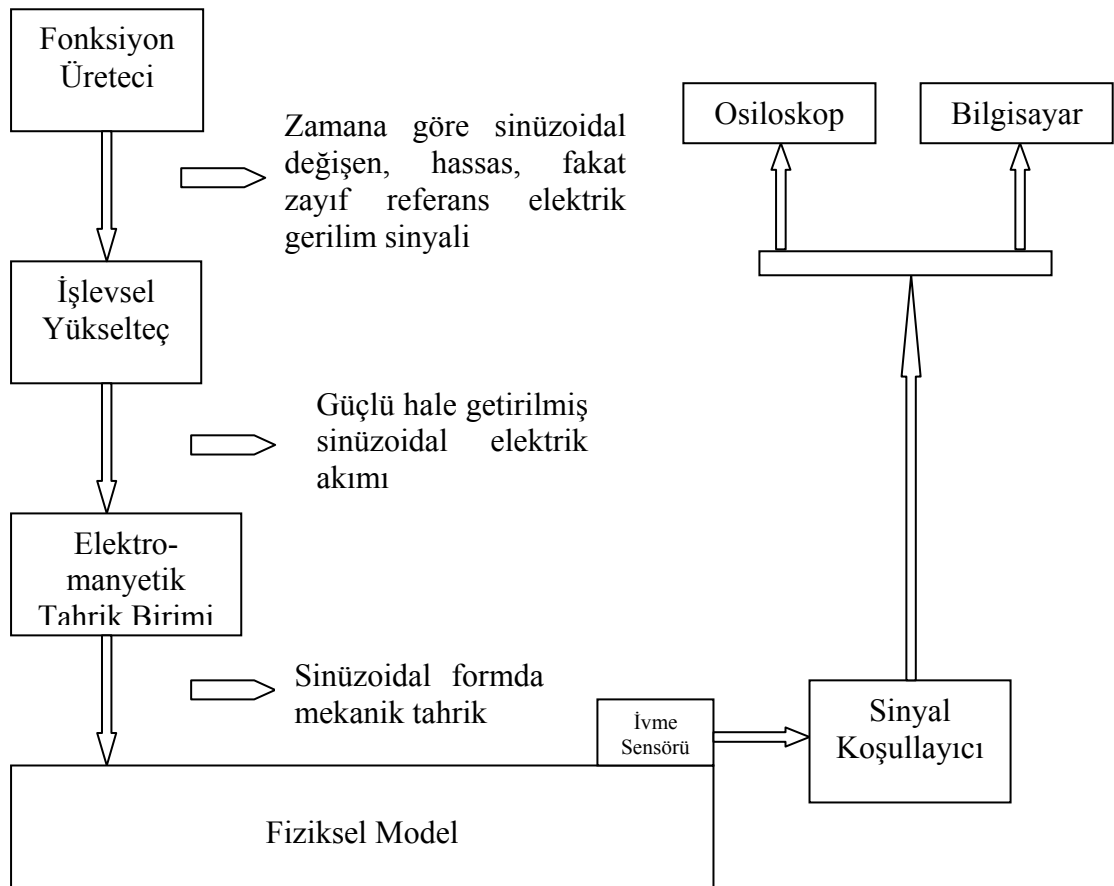
“*Osiloskop*”, fizik ve elektrik mühendisliği alanındaki çalışmalarda yaygın olarak kullanılan ve uluslararası elektronik piyasasında çeşitleri bulunan temel cihazlardan biridir. “*İvme sensörü-sinyal koşullayıcı*” kombinasyonunun çıktısı olan ve ivme ile orantılı olarak değişen elektrik gerilimi, “*osiloskop*” ekranında gözle görülebilir hale getirilmektedir. Böylece, “*sensör*”ün monte edildiği noktadaki ivmenin zamana göre değişimi izlenebilmekte, genlikleri de ölçülebilmektedir (Resim 4.12).



Resim 4.12. Osiloskop

### 4.3. Mekanik Uyarı Uygulaması

Deneyle, anakayanın “sertleşmiş alçı” ve “silikon + kum karışımı” ile temsil edildiği iki fiziksel model (Resim 4.1 ve Resim 4.2) üzerinde yapılmıştır. Her ikisinde de alüvyon dolgu, aynı “PVA + Boraks Çözeltisi” ile temsil edilmiştir. QUAD4M programı ile yapılan analizde anakaya sonsuz rijit kabul edilmiş olup, birinci model bu durumu temsil etmektedir. İkinci model ise anakayanın, az da olsa, esnek olduğu durumu temsil etmekte olup, bilgisayar analizi yapılmamış olan bu durumdaki farklılığı deneysel olarak izlemek amacı ile yapılmıştır. Aşağıda deney düzeninin şematik gösterimi verilmiştir.



Şekil 4.1. Deney düzeninin şematik gösterimi

Olanaklar dahilinde sadece, Bölüm 4.2’de özellikleri ile birlikte sıralanan aletlerin bulunması nedeniyle, bilgisayar analizinde “sayısal uyarı” olarak uygulanmış olan deprem ivme kayıtları, bire bir “mekanik uyarı” formuna dönüştürülerek, deneylerde fiziksel modeller üzerinde uygulanamamıştır. Bunun yerine, özel olarak bu amaçla tasarılanmış ve imal edilmiş olan elektronik tahrik cihazı kullanılarak (Resim 4.10 ve ekte sunulan CD’deki 2 numaralı video dosyası), sırasıyla, seçilen frekanslarda sinüs dalgaları uygulanmış, ayrıca çekiç ile darbe (impulse) etkisi verilmiş, bunların sonucunda A, B ve C noktalarında (Şekil 3.3) oluşan yatay ivmelerin zamana göre değişimi, osiloskop ekranında izlenmiştir. Hem bu uyarıların doğrultusu, hem de ivmeölçerin duyarlı olduğu doğrultu, QUAD4M programında kabul edilen “x” doğrultusu (Şekil 3.3 ve Şekil 3.4) ile tutarlıdır.

Yukarıdaki açıklanan iki tür mekanik uyarı da, deprem ivme kaydının belirli frekans, genlik ve fazdaki sinüs dalgalarının toplamından oluştuğu kabulüne dayanan “Fourier Analizi Felsefesi” ile uyumludur. Bu nedenlerle, sinüs dalgası uygulamaları tek tek incelendiğinde, bunların “gerçek deprem hareketi” olmamakla beraber, “onu oluşturan bir dizi bileşenden biri” niteliğini taşımasının, bazı temel gerçeklere ışık tutacağı düşünülmüştür. Yine aynı şekilde, çekiç ile verilen darbe (impulse) etkisinin, zaman tanım alanındaki (time domain) basit görünümüne karşın, frekans tanım alanında (frequency domain) çok geniş bir frekans bandında bileşenler içerdiği, dolayısı ile sistemin dinamik davranışına ilişkin kapsamlı sonuçlar verdiği bilinmektedir. Yapılan deneyler, yukarıdaki açıklamaları kuvvetle doğrulamıştır.

Ayrıca elle, “PVA + Boraks” malzemenin yüzeyinde düzenli periyodik dalgalar üretilmiş ve oluşan davranış şekilleri izlenmiştir.

Deneyler sırasında anlamlı olduğu düşünülen sekansların video görüntüleri de kaydedilmiştir. Yazılı metin içinde bu görüntüleri gösterebilmek mümkün olmadığı için, bunlar, bir CD’de 14 dosya halinde toplanmış ve ekte sunulmuştur. Dosyaların sıra numaraları, özet içerikleri ile birlikte, tez metninin sonundaki “Ekler” Bölümü’nde verilmiştir. Aşağıda yapılan açıklamalarda ekte sunulan video

dosyalarına, sıra numaraları ile birlikte atıfta bulunulmuş, deney sonuçlarının değerlendirme ve yorumları da Bölüm 4.4'te anlatılmıştır.

#### **4.4. İlk Aşama Deney Sonuçlarının Değerlendirme ve Yorumları**

Hem Bölüm 4.3'ün ilk paragrafında, hem de aşağıda açıklamaları yapılan Bölüm 4.4.1'de belirtilen nedenlerle, deneyler, “İlk Aşama” olarak nitelendirilmiştir. Böylelikle, bunların, ileride yapılabilecek daha kapsamlı deneysel çalışmalar için “ilk adım” sayılabileceği, buna karşın aydınlatıcı ve yol açıcı nitelik taşıdığı vurgulanmaya çalışılmıştır.

“İlk Aşama” deneylerde, hem depremlerdeki gözlemlerle hem de bu çalışma içinde QUAD4M programı ile elde edilen sonuçlarla bire bir uyumluluk gösteren bir dinamik davranış gözlenememiş, aksine, bazı beklenmedik olgu ve oluşumlarla karşılaşmıştır. Özetle, jel kıvamındaki malzemenin, deneysel çalışmanın iki ana hedefi olan “gerçek zemini temsil etme” ve “QUAD4M bilgisayar programı sonuçlarını doğrulama” beklentilerini tam olarak karşılamadığı görülmüştür. Ancak, bunu, “bir araştırmada beklenenin her zaman bulunamayabileceği” ve “bir şeyin niçin olduğu kadar, niçin olmadığını da görme ve açıklamanın önümüzü aydınlatacağı” görüşüyle değerlendirmek yararlı olacaktır.

Aşağıda, Bölüm 4.4.1'de “beklenmeyen olgu ve oluşumlar”, Bölüm 4.4.2'de de “kazanımlar”, yönünden yapılan değerlendirme ve yorumlar yer almaktadır.

##### **4.4.1. İlk aşama deneylerin beklenmeyen olgu ve oluşumlar yönünden değerlendirme ve yorumu**

“Sertleşmiş alçı” modelde, “serbest titreşim”, “harmonik zorlanmış titreşim” ve “impulse response” yöntemleri ile, “x” doğrultusundaki (Şekil 3.3 ve Şekil 3.4) doğal (hakim) periyot  $T_x = 0.29$  saniye, “z” doğrultusundaki doğal (hakim) periyot da  $T_z = 0.26$  saniye olarak bulunmuştur. Aslında, “z” doğrultusu ile ilgilenilmemektedir. “x” doğrultusundaki doğal periyot,  $f_x = 1 / 0.29 = 3.45$  Hz'lik

bir doğal frekansa karşılık gelmektedir. Bu durumda, (QUAD4M bilgisayar programında olduğu gibi) “tek parça rijit cisim” (rigid body) olarak kabul edilen anakaya (alçı), tabanından, yine programdaki gibi,  $f_x$  değerini ortalayan 1,7 Hz – 7,0 Hz aralığında değiştirilen frekanslarda “x” doğrultusunda titreştirilerek, A, B ve C noktalarındaki durum incelenmiştir.

Benzer uygulama, “silikon + kum karışımı” modelde de (ancak bu kez anakayanın belli bir esnekliğe sahip olması gerçeğine uygun olarak, tabandan değil de gövdedeki yükleme plakası üzerinden) tekrarlanmış ve ilk modelden büyük ölçüde farkı olmayan sonuçlar elde edilmiştir.

Beklenmeyen olgu ve oluşumların ne şekilde ortaya çıktığı, nelerden kaynaklandığı ve bunların yorumları, aşağıda altı madde halinde sıralanmıştır:

- a) Hem serbest, hem de zorlanmış titreşim hallerinde A, B ve C noktalarında (Şekil 3.3),  $T_0 = 4H / V_s$  eşitliğine uyacak şekilde) birbirinden belirgin farklılıklar gösteren “hakim periyotlar” elde edilemediği gibi, bunların fonksiyonu olması beklenen “yöresel büyütme”le de karşılaşmamıştır. Onun yerine trapez kesitli hacmi dolduran jel kıvamındaki kitlenin, titreşimde belli mod şekillerini sergileyen homojen, tek parça ve her bölgesi birbiriyle yüksek derecede tutarlılık (coherency) gösteren bir elastik sistem olarak davrandığı izlenmiştir. Başka bir deyişle, kitle yüzeyindeki A, B ve C noktaları, aynen bir “betonarme yapı strüktürü”, “gemi strüktürü” yada “uçak gövdesi” gibi bütünlüklü bir sistemin elemanın davranışını sergileyerek aynı frekansta titreşmişlerdir.

Bilindiği gibi, bir yapı, denge konumundan biraz ayırıp bırakıldığında, yada sinüzoidal bir etken ile titreştirildiğinde, maddesel noktaların genlikleri ilgili mod şeklindeki konumlarına bağlı olarak değişebilecek, ancak fazları ya birbirinin aynı yada birbirinden 180° farklı olacaktır; aynı bir mod içinde, faz bakımından, bu ikisinin dışında bir durumun olması mümkün değildir. Yine aynı nedenle, bir yapının doğal periyodu örneğin 1,2 saniye ise, bu her katta



kendini aynı değer olarak gösterecek ve değişiklik göstermeyecektir. Deneylerde de alüvyonu temsil eden jel kıvamındaki malzeme, yukarıda anlatılan davranışı sergilemiştir.

- b) Gerçek yaşamda zeminler ayrık danelerden oluşmakta ve dane aralarındaki çekme kuvveti, basınç durumuna göre ihmal edilebilecek kadar küçük değerlerde kalmaktadır. Modellerde kullanılan jel kıvamındaki malzemenin çekme dayanımı ise basınç dayanımıyla karşılaştırılabilecek düzeydedir. Bu özelliğin de, malzemeye doğadaki zeminden farklı bir davranış şekli kazandırdığı anlaşılmaktadır.

Buna ek olarak, jel kıvamındaki malzeme, imal edildikten bir süre sonra, yüzeyinde kabuk oluşturmaktadır. Bunu muhallebinin yüzeyinin diğer bölümlerden farklı oluşuna benzetmek mümkündür. Sonuçta, sudaki “yüzey gerilimi”ne benzer, ancak ondan daha kuvvetli bir etki meydana gelmektedir.

(Ekte sunulan CD’de 4 numaralı video dosyasındaki “slow-motion” tekniği ile çekilmiş görüntüde, malzemeye bir çubuğun düşey yönde batırılması sırasında meydana gelen davranış biçimleri ve kabuğun dinamik davranışa etkisi görsel olarak izlenebilmektedir. Batırma sırasında çevredeki yüzey parçacıkları, hem batırma noktasına hem de aşağıya doğru yer değiştirmekte, kohezyonsuz zeminlerde yeraltı suyunun drene edilmesi halinde oluşan ters-koni benzeri su-yüzeyi profiline benzer bir görünüm oluşmaktadır. Batma sonucunda, kabukta silindirik bir “zımbalama deliği” de oluşmakta, bunu izleyen serbestleme darbesinin etkisiyle  $S_v$  dalgaları ışınsal olarak etrafa yayılmaktadır. Yine CD’deki 3 numaralı dosyada, malzemeden bir parçanın elle çıkarılması sırasında oluşan durum gösterilmektedir ki bu da kabuğun varlığının ve etkisinin diğer bir kanıtıdır).

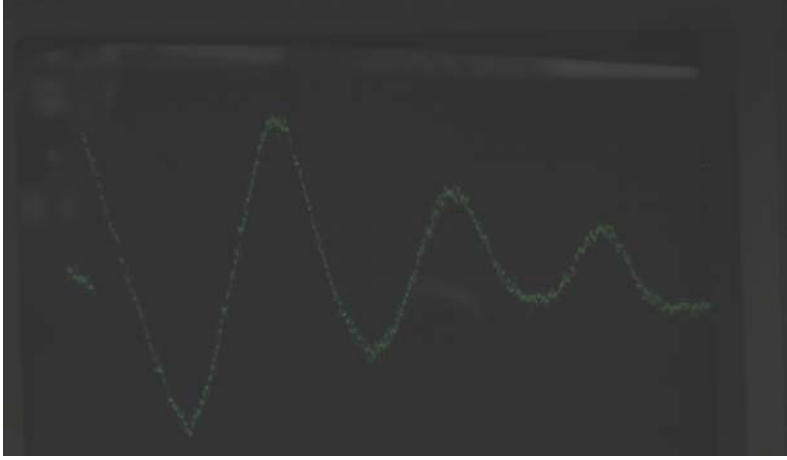
Sayılan nedenlerle, kabuk üzerindeki A, B ve C noktaları (Şekil 3.3), zorunlu olarak, adeta birlikte gidiş-gelişler yapmışlar ve beklenen farklı hareketleri sergileyememişlerdir.

- c) Kabuğun varlığını bu derece somut olarak göstermesine karşın, yüzeye bırakılan pek hafif cisimlerin (örneğin CD'deki 4 numaralı video dosyasındaki görüntüde çevreye dizildiği görülen 5 kuruşluk madeni paraların) bile kısa sürede malzemeye gömüldüğü görülmüştür. Aynı şekilde, yüzeysel titreşimleri en az kütleli müdahale ile algılamak amacıyla küçük bir taban levhasına monte edilen minyatür ivmeölçerin de bir süre sonra malzemeye batma-gömülme eğiliminde olduğu gözlenmiştir. Taban levhasını genişleterek, ona bir “sal” (Resim 4.11a) niteliğinin kazandırılması, kaçınılmaz sonucu değiştirmemektedir. Bu nedenle, ivmeölçer yüzeye temas ederek onunla birlikte titreşebilmekle beraber, ağırlığını neredeyse tamamen başka bir sisteme aktardığı özel bir düzenek geliştirilmiş ve deneylerde bu kullanılmıştır.

Jel kıvamındaki malzemeden elle çıkarılan kitle (CD'deki 3 numaralı video dosyası), olduğu gibi yada daha küçük parçalara bölündükten sonra, yüzeye bırakıldığında, çok geçmeden ana kitle ile bütünleşmekte, iz kalmaksızın yeniden düzgün bir yüzey meydana gelmektedir.

Bu nedenlerle, Bölüm 2.4'te belirtilen “non-linear” ve “viskoelastik” davranış özelliklerinin malzemede bulunduğu, ancak genliklerin küçük ve (uygulanan frekanslara bağlı olarak) kayma gerilmelerinin yön değiştirme hızının yüksek (belirli bir gerilmenin kendini hissettirme süresinin kısa) oluşu nedeniyle, dinamik davranışta kendini belirgin olarak gösteremediği anlaşılmaktadır.

- d) Zeminlerde sönüm değerinin, deformasyon düzeyine bağlı olmakla birlikte, orta şiddette bir depremde teorik olarak  $\zeta = 0,10$  ya da daha büyük alınabilmesine karşın, kullanılan jel kıvamındaki malzemede, bunun yüksek deformasyon düzeylerinde bile çok düşük kaldığı görülmüştür. Serbest sönümlü titreşimdeki genliklerin logaritmik azalımından (Resim 4.13) “impulse response” ve “logarithmic decrement), bu değerin 0,05'i aşmadığı düşünülmektedir.



Resim 4.13. Anakayayı temsilen “silikon + kum” karışımının kullanıldığı ikinci modelde, “x” doğrultusunda çekiçle verilen darbe sonucunda, alüvyon yüzeyinde elde edilen ivme kaydı

- e) Her iki fiziksel modelde de, olası yansımaları en aza indirmek amacı ile yan duvarlar kabarcıklı şeffaf ambalaj plastiği (Resim 4.5.) ile kaplanmıştı. Bu, malzemenin sönümleme etkisinin, aynen QUAD4M programında kullanılan sönümleyici sınır elemanları gibi bir rol oynayarak (ancak “z” doğrultusunda ve her iki yönde) sonsuz uzunlukları temsil etmesi beklenmişti. Fakat deneyler sırasında birçok ardışık yansıma görsel olarak izlenmiş ve malzemenin beklenen bu rolü oynamadığı anlaşılmıştır.

Hem (d) maddesinde, hem de burada, belirtilen nedenlerle, oluşturulan dalgalar, görece uzun yolları önemli bir enerji kaybına uğramadan geçebilmişler, ardışık yansımalar sonucunda birçok dalgaın süperpoze olmasıyla, osiloskop ekranındaki kayıtların son derece karmaşık olmasına yol açmışlardır. Ekte sunulan CD’deki 14 numaralı dosyada, sözü edilen yansımaların ne kadar belirgin olduğu görülmektedir.

Bir dizi sensörden oluşan “serilim”le alınan anlık kayıtlara dayanarak, jeofizikte uygulanan yansıma (reflection) analizi ile bunları ayırt etmenin mümkün olabileceği, düşünce düzeyinde akla gelse de, elde bu ölçek ve nitelikte bir serilim ve kayıt düzeni olmadığı için, deneylerde bu yöntem uygulanmamıştır.

- f) Doğada, tüm malzemelerin Poisson Oranları fiziki nedenlerle, 0,0 ile 0,5 arasında olmak zorundadır. 0,0 değeri “tam sıkışabilirlik”, 0,5 de “tam sıkışmazlık” durumunu göstermektedir. Örneğin suyun Poisson Oranı 0,5’e çok yakındır. Gerçek zeminlerin Poisson Oranı ise 0,35 - 0,45 arasında olup bu durum, onların belli ölçüde bir “sıkışabilirlik” özelliğine sahip olduklarının göstergesidir.

Oysa, “PVA + Boraks” malzemenin aynen bir sıvı gibi “sıkışmazlık” özelliğine sahip olduğu (Resim 4.4) açıktır.  $K = E / [3(1 - 2v)]$  eşitliğinden görüldüğü gibi, “Sıkışmazlık” (Bulk) Modülü, “E” ve “v” değerlerinin bir fonksiyonudur.

$G = E / 2 (1 + v)$  eşitliğinden görüldüğü gibi “G” Kayma Modülü de “E” ve “v” ile ilişkilidir. Elastisite (Young) Modülü olan “E” ile Kayma Modülü olan “G”, sağlam zeminlerde yüksek değerler alabilmektedir. Modelde kullanılan “PVA + Boraks” karışımının ise hem “E” hem de “G” değerlerinin son derece düşük olmasına karşın, Poisson Oranı (v) çok yüksektir ve 0,5’e yakındır. Karıştırma sırasında yapıya giren hava kabarcıklarının tamamen çıkmadığı düşünüldüğünde, bu değer 0,45 olarak alınabilir. Bu durumda bile malzeme, çok yüksek bir “Sıkışmazlık Modülü”ne sahip olmaktadır.

Malzemedeki Poisson Oranı’nın yüksek oluşunun doğurduğu diğer sonuçlar da aşağıdaki gibi sıralanabilir:

Eş. 2.48, Eş. 2.50 ve Eş. 2.51’de, sırası ile  $V_p$  ve  $V_s$  dalga hızları ile  $V_p / V_s$  oranının hangi değişkenlere bağlı olduğu, aşağıda gösterilmiştir:

$$V_p = \sqrt{\frac{G(2-2v)}{\rho(1-2v)}}, \quad V_s = \sqrt{\frac{G}{\rho}}, \quad \frac{V_p}{V_s} = \sqrt{\frac{2-2v}{1-2v}}$$

İnternet'ten değiştirilerek uyarlanan aşağıdaki çizelgede, sahip oldukları Poisson Oranı'na göre, zeminlerin, yanal genişleme özellikleri ve sismik hız oranları gösterilmiştir:

Çizelge 4.1. Poisson Oranı'na göre zeminlerin düşey yük altında yanal genişleme özellikleri ve sismik hız oranları

| Poisson Oranı ( $\nu$ ) | Zeminin yanal genişleme özelliği           | $V_p / V_s$     |
|-------------------------|--------------------------------------------|-----------------|
| 0,50                    | Cıvık – sıvı                               | $\infty$        |
| 0,40 – 0,49             | Boy kısalttığı kadar yanal genişleme yapar | 2,49 – $\infty$ |
| 0,30 – 0,39             | Biraz yanal genişleyerek boy kısaltabilir  | 1,87 – 2,49     |
| 0,20 – 0,29             | Pek az yanal genişleyerek boy kısaltabilir | 1,71 – 1,87     |
| 0,10 – 0,19             | Yana doğru genişlemeden boy kısaltabilir   | 1,50 – 1,71     |
| 0,00 – 0,09             | Kof ve gaza doymuş                         | 1,41 – 1,50     |

Şekil 2.3'te Rayleigh dalgasının geçişi sırasında, ortamın parçacık hareketleri gösterilmiştir. Şekil 2.4'teki grafiklerde ise Poisson Oranı'nın Rayleigh dalgası genliklerini artırıcı etkisi gösterilmektedir.

Tüm bu açıklamalara dayanarak, jel kıvamındaki malzemenin yüzeyinde oluşan Rayleigh dalgalarının, hatta doğadakinin de baskın bir şekilde, deneyde kendini gösterdiği ileri sürülebilir. Hem “düşük sönüm” ve “kabuk etkisi”nin yanında Poisson Oranı'nın yüksekliği, hem de Rayleigh dalgalarının geçişi sırasında ortam parçacıklarının sergilediği “retrograd” hareketin oluşturduğu izlenim, deneyi izleyenler tarafından, halk dilindeki “bingıldama” sözcüğü ile ifade edilmiştir (Makine Mühendisliği'nde de, çeliğin kütsel bir şekilde kullanıldığı metal işleme tezgahlarının yüzeyinde, kullanım sırasında gözle izlenememekle birlikte ölçülebilen, benzer nitelikte Rayleigh dalgalarının oluştuğu bilinmektedir).

Gerçek zeminlerin deprem davranışının ise yukarıda a, b, c, d, e ve f maddelerinde belirtildiği gibi olmadığı bilinmektedir. Bu nedenle tekrar belirtmek gerekir ki deneylerde kullanılan jel kıvamındaki malzeme “gerçek zemini temsil etme” ve

“QUAD4M bilgisayar analizi sonuçlarını doğrulama” yönünden beklentileri karşılamamaktadır.

Buna karşın, “İlk Aşama Deneyler”in ileride yapılacak olan daha kapsamlı deneysel çalışmalar için bir ilk adım oluşturduğu, bunlar için aydınlatıcı ve yol açıcı nitelik taşıdığı ileri sürülebilir.

#### **4.4.2. İlk aşama deneylerin pratik çıkarımlar - hesap uygulamaları ve kazanılan bilgilerin belgelenmesi yönünden değerlendirilmesi**

Yukarıda belirtilenleri, “bir araştırmada beklenenin her zaman bulunamayacağı” ve “bir şeyin niçin olduğu kadar, niçin olmadığını da görmenin ve açıklamanın önümüzü aydınlatacağı” görüşüyle değerlendirmek yararlı olacaktır. Bölüm 4.4.1’de belirtilen deney beklentilerinin karşılanamamasının nedeninin, aletlerin sınırlılığından ya da uygulanan deney tekniklerinin yetersizliğinden değil, “alüvyonu temsilen kullanılan malzemenin uygun olmayışından” kaynaklandığı anlaşılmaktadır. Bu açılardan bakıldığında, görünürdeki olumsuzluğa karşın, deneylerden aşağıda iki madde halinde sıralanan yararların elde edildiği söylenebilir:

- a) Hem “malzeme”, hem de “deney düzeni ve ölçme tekniği” bakımlarından, belli bir disipline girilerek, eldeki olanakların elden geldiğince iyi kullanımı ile belli uygulamalar yapılmış, sonuçları alınmış ve belgelenmiştir. Buna ek olarak, bazı pratik çıkarımlar, hesap uygulamaları ve karşılaştırmalar yapılmıştır. Bunların bazıları hem ulusal hem de uluslararası ölçekte birer “ilk örnek” niteliğindedir. Bundan sonra artık daha ileri adımların atılabileceği bu noktaya, “azımsanmayacak bir mesafenin aşılmasıyla gelindiği” söylenebilir.
- b) Dalga hareketinin oluşturulması, yayılımı ve ölçülmesine ilişkin, eğitici nitelik taşıyan, kalıcı nitelikte video çekimleri (bkz. Ekli CD’deki 14 video dosyası) yapılmış ve sunulmuştur. Bu video dosyalarının her birinin kısa açıklaması, “Ekler” bölümündeki listede verilmiştir.

Yukarıda, (a) maddesi kapsamında sözü edilen pratik çıkarım, hesap uygulaması ve karşılaştırmalara ilişkin bazı örnekler aşağıda verilmektedir.

*Dalga Boyu - Kayma Hızı – Dolgu Yüksekliği - Zemin Doğal Periyodu İlişkilerinin Kullanımına Örnek*

Deneyde “x” doğrultusundaki zemin doğal periyodunun  $T_x = 0.29$  san., “z” doğrultusundakinin de  $T_z = 0.26$  san. olduğu ölçülmüştür. “x” doğrultusundaki genişliğin yaklaşık 0,94 m, “z” doğrultusundakinin de 0,40 m olduğu dikkate alındığında, boy ve endeki farklılıkların bunda etken olduğu, her iki doğrultuda da genişliğin sonsuz olması halinde, yaklaşık bir interpolasyonla, bütün doğrultularda  $T_0 = 0.32$  san.’lik bir doğal periyot değerinin elde edilebileceği düşünülebilir.

Ekler bölümünde sunulan CD’deki 6 numaralı video dosyasında, elle  $S_H$  dalgalarının üretildiği ve dalga boyunun yaklaşık  $L = 0,47$  m olduğu görülmektedir. “L” dalga boyu ile “ $T_0$ ” periyodu ve  $V_s$  kayma dalgası hızı arasındaki  $L = V_s \cdot T_0$  ilişkisinden, kayma dalgası hızı,  $V_s = L / T_0 = 0,47 / 0,26 = 1,807$  m/san. olarak elde edilir.

Modeldeki zemin doğal periyodu ise buradan:

$T_0 = 4H / V_s = 4 \times 0,145 / 1,807 = 0,32$  san. olarak elde edilir ki, bunun da yukarıdaki değerle tutarlı olduğu görülmektedir.

*Kayma Dalgası Hızı - Kayma Modülü – Spesifik Kütle İlişkilerinin Kullanımına Örnek*

Eş. 2.50’den  $V_s = \sqrt{\frac{G}{\rho}}$ , buradan da  $V_s^2 = \frac{G}{\rho}$  ve  $G = \rho V_s^2$  elde edilir.

“PVA + Boraks” çözeltilisinin özgül kütlesi suya çok yakın (su içinde tam batmaya yakın derecede yüzmekte) olup,  $\rho = 1000$  kg / m<sup>3</sup> civarındadır. Buradan “alüvyon”u temsil eden malzemenin kayma modülü:

$G = 1000 \times (1,807)^2 = 3265,2 \text{ N / m}^2$  olarak elde edilir.

*Kayma Modülü – Elastisite Modülü – Poisson Oranı İlişkilerinin Kullanımına Örnek*

$G = \frac{E}{2(1+\nu)}$  eşitliğinden  $E = 2G (1 + \nu)$  elde edilir.

“PVA + boraks çözeltisi”nin suya yakın görünümünden dolayı Poisson Oranı’nın  $\nu = 0,5$  civarında olduğu, ancak karıştırma işlemi sırasında bünyeye giren havadan dolayı 0,45’e düştüğü kabul edildiğinde, buradan “alüvyon”u temsil eden malzemenin elastisite modülü:

$E = 2 \times 3265,2 \times (1 + 0.45) = 9469,08 \text{ N / m}^2$  olarak elde edilir.

*P Dalgası Hızı – S Dalgası Hızı –  $V_p / V_s$  Oranı İlişkilerinin Kullanımına Örnek*

Eş. 2.48’den,  $V_p = \sqrt{\frac{G(2-2\nu)}{\rho(1-2\nu)}} = \sqrt{\frac{9469,08(2-2 \times 0,45)}{1000(1-2 \times 0,45)}} = 10,21 \text{ m/san. bulunur.}$

(Bir deneme olarak, Poisson oranı’nın  $\nu = 0.47$  olduğu varsayımıyla P dalga hızı yeniden hesaplandığında,

$V_p = \sqrt{\frac{G(2-2\nu)}{\rho(1-2\nu)}} = \sqrt{\frac{9469,08(2-2 \times 0,47)}{1000(1-2 \times 0,47)}} = 12,93 \text{ m/san. bulunur.}$

Bu sonuç, P dalga hızının Poisson Oranı’nın 0,5 civarındaki değişimlerine karşı ne kadar duyarlı olduğunu göstermektedir.)

Eş. 2.51’den,  $\nu = 0,45$  için P ve S dalga hızlarının oranı,



$$\frac{V_p}{V_s} = \sqrt{\frac{2-2\nu}{1-2\nu}} = \sqrt{\frac{2-2 \times 0,45}{1-2 \times 0,45}} = 3,32$$

(Bir deneme olarak  $\nu = 0.47$  için bu oran 4,20 olarak elde edilir ki, bu da gerçek zeminlerle karşılaştırıldığında oldukça büyük bir değerdir).

## 5. SONUÇ VE ÖNERİLER

Bu bölüm açıklamalarını (elde edilen sonuçlar, getirilen yenilikler ve öneriler) aşağıdaki gibi üç grupta toplamak mümkündür:

*Çalışmanın “Yapı-Zemin Etkileşimi” Araştırmaları İçindeki Yeri ve Yapılar Açısından Olası Pratik Sonuçları; Buradan Hareketle Yapılan İleriye Dönük Öneriler*

Anakaya üzerinde belli özelliklere sahip zemin katmanlarının bulunması, anakayadan zemine iletilen deprem hareketi sonucunda zemin yüzeyinde oluşacak hareketi etkilemektedir. Zeminin anakayadan gelen deprem enerjisine yeni bir enerji katmadığı, hatta daneli yapısı nedeniyle enerjiyi bir miktar sönmülendirdiği bilinmektedir; ancak, aşağıdaki iki farklı olgu ortaya çıkabilir:

- a) Zemin, anakayadaki hakim deprem frekansını değiştirip başka bir değere kaydırabilir. Bu etki, deprem hareketinin bazı frekans bantlarındaki bileşenlerin genliklerini azaltması, buna karşın diğer bantlardakini de artırması sonucunda ortaya çıkar. Bilindiği üzere yapılar, kendi doğal frekanslarındaki titreşimlerden en çok etkilenmektedirler. Eğer anakayadaki deprem hareketi, yapının doğal frekansına eş ya da ona yakın bantlarda enerji taşıyor, zemin de bu bantlardaki genlikleri büyütüyorsa yapı için tehlikeli bir durumun söz konusu olduğu ve zeminin o tür yapılar için “deprem şiddetini artırıcı” bir etki gösterdiği söylenebilir. Doğal titreşim frekansı zemininkinden çok farklı bir yapı için böyle bir “şiddet artışı” söz konusu değildir. Dolayısı ile bir yörede belli bir yapı için ortaya çıkan “şiddet artırıcı etki”nin (büyütmenin) her yapı için aynı olması beklenmemelidir. Bu etki, yapı ve zeminin frekanslarının yakınlık derecesine bağlı olup, “rezonans etkisi” olarak da adlandırılabilir.
- b) Zemin-anakaya ara yüzünün pratikte sonsuz bir düzlem olmayan topografyası tarafından, değişik sismik dalgaların yansıtılması ve bunların

birbiriyle süperpoze olması sonucunda da, zemin yüzeyinin belirli bölgelerinde deprem “şiddet artışı” görülebilir.

Her iki durum da daha genel bir başlık olan “zemin-yapı etkileşimi”nin kapsamına girmektedir. Bu kapsama giren farklı birkaç olgu daha sayılabilmekle beraber, bu çalışmada elde edilen asıl yeni bulgular, yukarıdaki (b) grubuna aittir.

Yapı eğer yeterli dayanımına ek olarak, sönüm (zarar görmeden enerji absorbe etme) özelliğine sahip değilse, bu şiddet artımlarından etkilenebilir, genliklerin büyüklüğüne ve tekrarlanma adedine bağlı olarak değişik derecelerde hasar görebilir, hatta yıkılabilir. Sonuç olarak, her iki grup etkileşim de, yapılar için zararlı olma potansiyelini taşımaktadır.

Uluslararası ve Ulusal Deprem Yönetmeliklerinde (a) kapsamındaki hükümler son yıllarda giderek gelişmiş ve ayrıntılandırılmış olup mühendislerce de benimsenmiştir. (b) için ise henüz bunu söylemek mümkün değildir. Bu ikinci grup etkileşim üzerinde, bugün pek az yönetmelikte (bkz. Bölüm 3.3) ancak birkaç hüküm bulunduğu gibi, inşaat mühendisliği çevresinde de çoğunluğa mal olmuş, yerleşik kanaatler henüz oluşmamıştır. Ancak, deprem sonrası gözlemlerde (söz konusu edilen Afyon – Çay Depremi’nde olduğu gibi) (b) grubundaki etkileşimlere sıkça rastlandığı, bunlara da bu çalışmadaki gibi net bilimsel açıklamalar (bkz. Bölüm 3.2) getirilebildiği için, artık yeterli bilinç ve güvene sahip olarak, yeni Deprem Yönetmeliklerinde ilgili hükümlere yer verilmesi beklenmelidir.

*Çalışmada QUAD4M Programı ile Yapılan Sonlu Eleman Dinamik Analizlerinin Özet Sonuçları ve Getirdiği Yenilikler; Buradan Hareketle Yapılan İleriye Dönük Öneriler*

Sonlu Elemanlar Analizi için, vadiler beş farklı eğimde ( $17^\circ$ ,  $22^\circ$ ,  $27^\circ$ ,  $37^\circ$  ve  $45^\circ$ ) modellenmiş, vadi kenarında (“A”), vadi ekseninde (“C”) ve ara bölgede (“B”) yer alan üç noktada QUAD4M programı ile yapılan dinamik analizler sonucunda bu noktalardaki “Fourier Genlik Spektrumları”, anakayada deprem verilerinden elde

edilenlerle karşılaştırmalı olarak değerlendirilmiştir. Bu üç farklı durumun bir dizi eğim açısı için ele alınması, bunun yanında deprem etkisinin sadece tümüyle değil evre”ler itibariyle de incelenmesi (bkz. Bölüm 3.7.2) çalışmanın getirdiği yeniliklerdir.

“C” noktası vadinin ortasına (genellikle en derin olduğu yere) isabet ettiğinden dolayı, bilindiği üzere, zemin hakim frekans (ya da tersi: hakim periyot) etkisinin en belirgin şekilde ortaya çıkmasının bekleneceği yerdir. Buna göre; burada zemin hakim frekansındaki deprem dalga bileşenlerinin büyütülmüş etkisinin ön plana çıkması, daha düşük ve daha yüksek frekanslardaki bileşenlerin de zayıflatılarak arka plana atılması beklenir ki, bu tahminin doğruluğu analizlerimiz sonucunda görülmektedir. Nitekim görece sade bir durum sergileyen “C” yöresinde, anakayadan gelen basit sinüzoidal dalgaların, alüvyon yüzeyine eriştiklerinde de gözle seçilebilir ve tanınabilir formlarını koruyabildikleri görülmüştür.

“A” noktasında ise çeşitli yansıma ve üst üste binmeler (süperpozisyonlar), son derece karmaşık dalga formlarının oluşmasına yol açmaktadır. Klasik bilgilere dayanarak, bu durumun yorumlanması ve isabetli kestirimlerin yapılması mümkün değildir; hatta birçok mühendis, burada alüvyon kalınlığının azalmasından dolayı hakim periyodun kısılacağı, bundan dolayı da birçok yapının tehlikeden uzaklaşacağı tahmininde bulunabilir. Oysa Afyon – Çay Depremi’nde hiç de böyle olmamıştır. Sonlu Eleman Dinamik Analizlerimizde böyle bir mekanizmanın varlığından yola çıkılarak hareket edilmemiş olmakla birlikte, “A”da elde edilen sayısal sonuçların –özellikle düşük eğimli durumlarda- diğer iki noktadan (“B” ve “C”), düşük frekanslardaki genlik artımı yönünden daha uygunsuz çıkması, doğada gerçek depremlerde karşılaşılan hasar dağılımları ile örtüşmektedir. Tekrar edilecek olursa, burada sözü edilen mekanizmanın işlediği, hesap işlemlerini yönlendirecek bir müdahale ya da varsayım sonucunda elde edilmemiş, aksine, kendiliğinden oluşan bir sonuç olarak ortaya çıkmıştır.

“B” noktasındaki durumun ise, “A” ve “C” noktaları arasındaki yörede doğada gözlenenle uyumlu olduğu, sonuçların tutarlılığı açısından bir kontrol noktası olarak görülebileceği görüşüne ulaşılmıştır.

QUAD4M programı ile yapılan sonlu eleman analizleri ile ulaşılan diğer bir sonuç ise, vadi eğim açısının büyümesi ile birlikte vadi kenar bölgelerinde görülen genlik artışının vadi eksenine doğru kaydığı yönündedir ki bu durum [Cılız, 2007] tarafından yapılan doktora çalışmasındaki sonuçlarla bire bir örtüşmektedir.

QUAD4M programı, ilk ortaya çıktığı 1968 yılından bugüne kadar çeşitli gelişmeler geçirmiştir. Bu çalışmada, bugünkü haliyle, doğadaki durumu önemli ölçüde temsil edebilmiştir. Ancak, test amacıyla, programın bazı sanal durumları canlandırması istendiğinde, zeminlerin dinamik davranışını daha iyi temsil edebilme adına, malzeme ve sönüm değerlerinin uygun kullanımı yönünde, bir dizi gelişmeye daha ihtiyaç olduğu kanısına varılmıştır. Ancak bu başlı başına yeni bir çalışma gerektirdiği için, burada sadece gereksinime değinmekle yetinilmiştir.

#### *Laboratuar Deneylerinin Özet Sonuçları ve Getirilen Yenilikler; Buradan Hareketle Yapılan İleriye Dönük Öneriler*

Deney sonuçları ve getirilen yenilikler hakkında kritik bir değerlendirme yukarıda Bölüm 4.4’te yapılmış olduğu için, burada daha çok ileriye dönük önerilere yer verilmiştir. Bunlar da aşağıda üç grup halinde sıralanmıştır:

##### *a) Deneylerde “anakaya” ve “alüvyon”u temsil eden malzemeler bakımından*

Anakaya olarak “sertleşmiş alçı”nın “tek parça rijit davranış”ta, “silikon + kum karışımı”nın da “yarı esnek davranış”ta, kendilerinden beklenenleri verdiği, bu nedenle uygun deney malzemeleri oldukları kanısına varılmıştır. “Alçı kalıp”ın tabanından bütününe aynı titreşim verilebilmekte “silikon + kum karışımı”na da “noktasal” ya da “küçük alan” mekanik uyarıları yapılarak, “ışınsal dalga yayılımı” etkisi elde edilebilmektedir (“silikon + kum karışımı”nın bütününe tabandan yine

aynı titreşim verilebilmektedir). Ayrıca, her ikisi de fiziksel özelliklerini uzunca bir zaman süresi boyunca koruyabilmektedir. Bu nedenlerle, ileride yapılacak deneylerde (daha iyisi bulunmadığı takdirde) yine bunların kullanılması düşünülebilir.

Ancak alüvyon olarak “PVA + Boraks” çözeltisinin, hem Bölüm 4.4.1’de sayılan bazı olumsuz özellikleri, hem de hava ile temas eden yüzeylerin kabuk bağlaması ve zamanla suyunu kaybederek sertleşmesi nedeniyle, amaca uygun bir malzeme olamayacağı anlaşılmıştır. Dolayısı ile ileride yapılacak deneyler için, daha uygun bir malzeme aranmalıdır. Uç bir örnek olsa da, elektrik ampulünde filament olarak, ancak binlerce malzemenin usanmadan denenmesinden sonra başarıya ulaşıldığının hatırlanması yararlı olacaktır.

Bir alternatif olarak “yerinden alınmış gerçek zemin numuneleri”nin kullanımı akla gelse de “ölçekli model kanunları”ndan (scale model rules) kaynaklanan gerçekler nedeniyle, bu, çalışmanın amacı ve eldeki olanaklar bakımından, uygun bir çözüm olamamaktadır.

*b) Deneylerin QUAD4M programına bakış açımıza yenilik getirmesi bakımından*

“PVA + Boraks” malzeme ile “alüvyon”un doğadaki deprem davranışının elde edilememesi nedenlerinin araştırılması kapsamında, Bölüm 4.4.1’de sayılan özelliklerin bazılarının QUAD4M programına veri olarak girilip, benzer olumsuzlukların orada da görülüp görülmediğini ortaya çıkarmak amacıyla yapılan sanal uygulamalar sonucunda, programda bazı geliştirmelere daha ihtiyaç duyulduğu anlaşılmıştır. Deneyler, bu tür geliştirme çabalarının deneyle birlikte gitmesi halinde daha gerçekçi sonuçlar alınabileceğinin işaretini vermiştir. Bu da başlı başına yeni bir çalışma konusu olduğundan, burada sadece değinmekle yetinilmiştir.

*c) Deney düzeni, kullanılan aletler, olanaklar ve ekip bakımından*

Daha nitelikli ve çok daha çeşitli işlevleri yerine getirebilen bir alet koleksiyonunun varlığı doğal olarak arzu edilmekle birlikte, Bölüm 4.2’de belirtilenlerle de, bilinçli kullanıldıkları takdirde, yararlı birçok deneysel çalışmanın yapılabileceği kanısı edinilmiştir.

Deneyler sırasında, işlevselliği artıracak birtakım aksesuar ve ek parçalar tasarımlanmış, imal edilmiş ve kullanılmış olup bu süreçte yaşananların ve edinilen deneyimin gelecekteki deneysel çalışmalarda zaman kazandıracağına, verimliliği artıracağına inanılmaktadır.

Piyasadan satın alınmış olup da kullanılan aletlerin geliştirilmeye ihtiyaç duyulan bazı noktaları not edilmiş ve bunlar imalatçı firmalarına “geri bildirim” (feedback) olarak bildirilmiştir.

Yaşananlar, diğer taraftan, deneysel çalışmalarda gerekli öğelerin her zaman önceden isabetle tahmin edilemeyeceği, beklenmedik zaman ve konularda ortaya çıkan sorunlara çabuk çözüm getirebilmek için “donanımlı atölyelere ulaşım” ve (parasal tutarı az da olsa) “piyasadan süratli tedarik” olanağının elde bulunmasının yaşamsal önem taşıdığını göstermektedir.

Son olarak, ekip elemanlarının mesleki niteliklerinin, birbirlerine bağlılıklarının, güven ve motivasyon yüksekliğinin, deneysel çalışmaların “olmazsa olmaz”ı olduğunu belirtmek gerekir.

## KAYNAKLAR

- Aki, K., Larner, K.L., "Surface motion of a layered medium having an irregular interface due to incident plane SH-waves", *Journal of Geophysical Research*, 75: 1921-1941 (1970).
- Ashford, S.A., Sitar, N., Lysmer, J., Deng, N., "Topographic effects on the seismic response of steep slopes", *Bull. Seism. Soc. Am.*, 87: 701-709 (1997).
- Assimakia, D., Kausel, E., Gazetas, G., "Wave propagation and soil- structure interaction on a cliff crest during the 1999 Athens Earthquake", *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, 25: 513-527 (2005).
- Bakır, B.S., Erşahin, B., "Alüvyon Vadi ve Havzalarında Gömülü Topografyanın Kuvvetli Yer Hareketi Üzerindeki Etkileri", *4. Ulusal Deprem Mühendisliği Konferansı*, ODTÜ Kongre ve Kültür Merkezi, Ankara, 79-87 (1997).
- Bard, P.Y., "Diffracted waves and displacement field over twodimensional elevated topographies", *Journal of Royal Astronomy Society*, 731-760 (1982).
- Bard, P.Y., Gariel, J.C., "The seismic response of two dimensional sedimentary deposits with large vertical velocity gradients", *Bulletin of Seismological Society of America*, 76: 343-356 (1986).
- Bielak, J., Xu, J., Ghattas, O., "Earthquake ground motion and structural response in alluvial valleys", *Journal of Geotechnial and Geoenvironmental Engineering*, 413-423 (1999).
- Bolt, B.A., "Earthquakes", *W.H. Freeman*, Newyork, 115-150 (1993).
- Boore, D.M., "A note on the effect of simple topography on seismic SH waves", *Bulletin of the Seismological Society of America*, 62 (1): 275-284 (1972).
- Bouchon, M., "Effect of topography on surface motions", *Bulletin of the Seismological Society of America*, 63 (3): 615-632 (1973).
- Bouckovalas, G.D., Kouretzis, G., "Review of soil and topography effects in the September 7, 1999 Athens (Greece) Earthquake", *Proceedings: Fourth International Conference on Recent Advance in Geotechnical Earthquake Engineering*, San Diego, California, 129-135 (2001).
- Chang, S.W., Bray, J.D., Seed, R.B., "Engineering implications of ground motions from the Northridge earthquake," *Bull. Seism. Soc. Am.*, 86: 270-288 (1996).
- Chopra, A., "Dynamics of structures: Theory and Applications to Earthquake Engineering", *Prentice-Hall Inc*, Newyork, 112-126 (1995).



Cılız, S., “The Effect of Basin Edge Slope on the Dynamic Response of Soil Deposits”, Doktora Tezi, **ODTÜ Fen Bilimleri Enstitüsü**, Ankara, 60-65 (2007).

Cook, R.D., “Finite Element Modeling for Stress Analysis, **John Wiley and Sons Inc**, Newyork, 223-246 (1995).

Ditmar, P., Penopp, J., Kasig, R., Makris, J., “Interpretation of Shallow Refraction Seismic Data by Reflection / Refraction Tomography”, **Geophysical Prospecting**, 47: 871-901 (1999).

Eurocode 8, “Design of structures for earthquake resistance-Part 5: Foundations, retaining structures and geotechnical aspects”, **European Standart**, 33-34 (2003).

Geli, L., Bard, P.Y., Jullien, B., “The effect of topography on earthquake ground motion: a review and new results”, **Bulletin of the Seismological Society of America**, 78(1): 42-63 (1988).

Ginzburg, A., Avraham, Z.B., “A Seismic Refraction Study of the North Basin of the Dead Sea, Israel”, **Geophysical Research Letters**, 24 (16): 2063-2066 (1997).

Graves, R.W., Pitarka, A., Somerville, G., “Ground motion amplification in the Santa Monica Area: Effect of shallow basin edge structure”, **Bulletin of Seim. Soc. Am.**, 88: 1224-1242 (1998).

Hall, J.R., Richart, F.E., “Dissipation of elastic wave energy in granular soils”, **Journal of the soil and Foundations Division**, ASCE, 89 (SM6): 27-56 (1963).

Hanks, T.C., “Strong ground motion of the San Fernando California earthquake, ground displacement”, **Bulletin of the Seismological Society of America**, 65: 193-225 (1975).

Hasselman, T.K., Hart G.C., “Modal analysis of random structural systems, **Journal of the Engineering Mechanics Division**, EM3: 561-579 (1972).

Haşal, M., İyisan, R., “Trapez Kesitli Vadi Modelinde Yerel Zemin Koşullarının Dinamik Davranışa Etkisi”, **İTÜ Dergisi**, 6: 3-14 (2007).

Haşal, M., İyisan, R., “Yerel zemin koşullarının zemin büyütmesine etkisi: bir ve iki boyutlu analiz, **ZM 10 Kongresi**, İstanbul, 343-352 (2004).

Idriss, I.M., Sun, J.I., “SHAKE91: A computer program for conducting equivalent linear seismic response analyses of horizontally layered soil deposits”, **Center for Geotech. Modeling**, Univ. of California, Davis, 1-5 (1992).

Idriss, I.M., Lysmer, J., Hwang, R., Seed, H.B., “Quad4: A computer program for evaluating the seismic response of soil structures by variable damping finite element procedures”, EERC Report 73-16, **University of California**, Berkeley, 1-28 (1973).

Idriss, I.M., Seed, H.B., “Seismic Response of Horizontal Soil Layers”, *Journal of the Soil Mechanics and Foundations Division*, ASCE, 94 (SM4) (1968).

İnternet : “İvme Kayıtları”, T.C. Bayındırlık ve İskan Bakanlığı Afet İşleri Genel Müdürlüğü Deprem Araştırma Dairesi, [www.deprem.gov.tr](http://www.deprem.gov.tr) (2007).

Jacobsen, L.S., Ayre, R.S., “Engineering Vibrations with Applications to Structures and Machinery”, *McGraw-Hill Book Corp.*, Newyork, 156-178 (1958).

Johnson, S.E., Hurty, W.C., “Convergence in model synthesis”, *Journal of Engineering Mechanics Division*, EM 5: 1105-1114 (1972).

Kawase, H., “The cause of the damage belt in Kobe: ‘The basin edge effect,’ constructive interference of the direct S-wave with the basin induced diffracted / Rayleigh waves”, *Seism. Res. Lett.*, 67(5): 25-34 (1996).

Kelly, S.G., “Fundamentals of Mechanical Vibrations”, International Edition, *McGraw-Hill Corp*, Newyork, 324-338 (1993).

King, J.L., Tucker, B.E., “Observed variations of earthquake motion across sediment filled valley”, *Bulletin of the Seismological Society of America*, 74: 137-151 (1984).

Kramer, S.L., “Geotechnical Earthquake Engineering”, William J. Hole, *Prentice-Hall International Series*, London, 168-199 (1996).

Liu, H.L., Heaton, T.H., “Array analysis of the ground velocities and accelerations from the 1971 San Fernando, California Earthquake”, *Bulletin of the Seismological Society of America*, 74: 1951-1968 (1984).

Lysmer, J., Kuhlemeyer, R.L., “Finite Dynamic Model for Infinite Media” *Journal of the Engineering Mechanics Division*, Proceedings of the American Society of Civil Engineers, EM4: 859-877 (1969).

Newmark, N.M., Rosenblueth, E., “Fundamentals of Earthquake Engineering”, *Prentice-Hall*, London, 229-243 (1971).

Özaydın, K., “Yer hareketleri üzerinde yerel zemin koşullarının etkisi ve zemin büyütmesi”, *TDV*, TDV/TR 96-003, İstanbul, 2-6 (1996).

REGLES, “Regl s de Costruction Parasismique, R gles PS Applicables Aux B timents”, Dites R gles PS-92, Norme Française, *AFNOR*, France, 123-125 (1995).

Pampal, S., Soygür,  ., Mutlu, A.H., “The impact of topography on  ay Small Scale Industrial Complex earthquake damages inflicted by 03.02.2002 Eber (Sultandağı) and  ay Earthquakes”, *ZM 2003*, Lefko a, K.K.T.C, 207-213 (2003).

Papageorgiou, A.S., Kim, J., “Study of the propagation and amplification of seismic waves in Caracas Valley with reference to the 29 July 1967 Earthquake: SH waves”, *Bulletin of the Seismological Society of America*, 81 (6): 2214-2233 (1991).

Pitarka, A., Irikura, K., Iwata, T., Sekiguchi, H., “Threedimensional simulation of the near-fault ground motion for the 1995 Hyogoken Nanbu (Kobe), Japan, earthquake”, *Bull. Seism. Soc. Am.*, 88: 428-440 (1998).

Rassem, M., Ghobarah, A., Heidebrecht, A.C., “Engineering perspective for the seismic site response of alluvial valleys”, *Earthquake Engineering and Structural Dynamics*, 26: 477-493 (1997).

Richter, C.F., “Elementary Seismology”, *W.H. Freeman*, San Francisco, 66-75 (1958).

Pitillakis, K., “Recent Advances in Earthquake Geotechnical Engineering and Microzonation, A. Ansal (ed.), *Kluwer Academic Publishers*, 139-193 (2004).

Psarropoulos, P.N., Gazetas, G., Tazoh, T., “Seismic response analysis of alluvial valley at bridge site”, *Proceedings of the Second Int. Conf. On Earthquake Geotechnical Engineering*, 41-47 (1999).

Sanchez-Sesma, F.J., Bravo, M.A., Herrera, J., “Surface motion of topographical irregularities for incident P, SV, Rayleigh waves”, *Bulletin of the Seismological Society of America*, 75: 263-269 (1985).

Schnabel, P.B., Lysmer, J., Seed, H.B., “SHAKE: A computer program for earthquake response analysis of horizontally layered sites”, EERC 72/12, *Earthquake Engineering Research Center*, Univ. of California, Berkeley, 1-25 (1972).

Silva, W.J., “Site geometry and global characteristic, state of the art report”, *Proceedings of workshop on dynamic soil properties and site characterization*, National Science Foundation and Electric Power Research Institute, Palo Alto, California, Berkeley, 252-262 (1988).

Seed, H.B., Idriss, I.M., Kiefer, F.W., “Characteristics of rock motions during earthquakes, *ASCE Journal of the Soil Mechanics and Foundation Division*, 95 (5): 1199-1218 (1969).

Semblat, J.F., Dangla, P., Kham, M., Duval, A.M., “Seismic site effects for shallow and deep alluvial basins: in-depth motion and focusing effect”, *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, 22: 849-854 (2002).

Stewart, P.J., Chiou, S.J., Bray, J.D., Graves, R.W., Somerville, P.G., Abrahamson, N.A., “Ground motion evaluation procedures for performancebased design”, *PEER Report*, 22-38 (2001).

Şafak, E., “Local site effects and dynamic soil behaviour”, *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, 21: 453-458 (2001).

Timoshenko, S.P., “Theory of Elasticity”, *McGraw Hill*, New York, 267-282 (1951).

Trifunac, M.D., “Scattering of SH waves by a semi cylindrical canyon”, *Earthquake Engrg. Struct. Dyn.*, 1(3): 267-281 (1973).

Vashisth, A.K., Gogna, M.L., “The effect of loose boundaries on wave propagation in a porous solid: reflection and refraction of seismic waves across a plane interface”, *Int. J. Solids Structures*, 30 (18): 2485-2499 (1993).

Vidale, J.E., Helmberger, D.V., “Elastic finite-difference modeling of the 1971 San Fernando, California Earthquake”, *Bulletin of the Seismological Society of America*, 78 (1): 122-141 (1988).

Whitman, R.V., “Proceeding for the site effects workshop”, Technical Report NCEER-92-0006, *National Center for Earthquake Research, State University of New York*, Buffalo, 35 (1992).

Wong, H.L., Trifunac, M.D., “Scattering of plane SH-wave by a semielliptical canyon”, *Journal of Earthquake Engineering and Soil Dynamics*, 3: 157-169 (1974).

Wong, H.L., “Effect of surface topography on the diffraction of P, SV and Rayleigh waves”, *Bulletin of the Seismological Society of America*, 72: 1167-1183 (1982).

Yegian, M.K., Ghahraman, V.G., Gazetas, G., “1988 Armenia Earthquake, II: damage statistics versus geologic and soil profiles”, *Journal of Geotechnical Engineering*, 120: 21-45 (1994).

**EKLER**

EK-1 Ekli CD'deki video dosyaları ve kısa açıklamaları

(Dosyalar “Windows Media Player” ile izlenebilir)

1. Kullanılan iki modelin (bkz. Resim 4.2 ve 4.3) ve deney düzeninin (Resim 4.8. – 4.12.) değişik açılardan görünümü.
2. “Elektromanyetik tahrik cihazı” (Resim 4.10.) ve değişik frekanslarda yaptığı sinüzoidal hareket.
3. Alüvyonu temsil etmek amacı ile kullanılan “polivinil alkol + boraks” malzemenin (Şekil 4.4.) görünümü ve davranışı hakkında fikir vermek üzere, elle bir parçasının çıkarılması.
4. “Polivinil alkol + boraks” malzemeye çubuk batırma deneyi (Kabuğun etkisiyle yüzey, kohezyonsuz ortamda yeraltı suyunun pompa ile alçaltılmasında oluşan su profiline benzeyen şekilde deforme olmaktadır. Referans olarak çevreye dizilen 5 kuruşlar bunu gösterecek şekilde, hem merkeze yaklaşmakta, hem de o yöne eğilmektedir).
5. “Silikon+kum karışımı”ndan oluşan modelin bir ucunda dipteki yuvarlak yükleme plakasından (anakayaya), “x” doğrultusunda (bkz Şekil 3.3 ve Şekil 3.4), frekansı değişen sinüzoidal ivme verilmesi sonucunda alüvyonun C noktasında oluşan ivmeler.
6. “Sertleşmiş alçı” modelde, alüvyon yüzeyine iliştirilen alüminyum plaka ile elle, genlikleri “z” doğrultusunda (Şekil 3.4.) olan  $S_H$  dalgalarının üretilmesi.
7. “Sertleşmiş alçı” modelde, alüvyon yüzeyine iliştirilen alüminyum plaka ile elle, genlikleri “y” doğrultusunda (Şekil 3.4) olan  $S_V$  dalgalarının üretilmesi.
8. “Sertleşmiş alçı” modelde, alüvyon yüzeyinin kenarına elle uygulanan tek bir düşey darbeye  $S_V$  dalgalarının oluşturulması.
9. “Sertleşmiş alçı” modelde, alüvyon yüzeyinin kenarına elle uygulanan ardışık düşey darbelerle  $S_V$  dalgalarının oluşturulması.
10. “Sertleşmiş alçı” modelde, alüvyon yüzeyinin bir köşesinde, elle, diyagonal doğrultuda ilerleyen  $S_H$  dalgalarının oluşturulması ve ardışık yansımalarının izlenmesi.

EK-1 (Devam) Ekli CD'deki video dosyaları ve kısa açıklamaları

11. “Silikon+kum karışımı”ndan oluşan modelin bir ucunda dipteki yükleme plakasına dik yöndeki bir çekiç darbesiyle, anakayanın A’ya yakın bir noktasında oluşan ivmeler.
12. “Silikon+kum karışımı”ndan oluşan modelin bir ucunda dipteki yükleme plakasına dik yöndeki çekiç darbeleriyle, alüvyonun C’ye yakın bir noktasında oluşan ivmeler.
13. “Sertleşmiş alçı” modelin bir ucunda, eksantrik bir kütlenin matkap motoruyla değişik hızlarla eksen etrafında döndürülmesiyle oluşturulan sinüzoidal kuvvetlerin etkisi altında alüvyonun titreşimi (Anakayanın tümüyle “rigid-body motion” yaptığı kabul edilebilir).
14. “Sertleşmiş alçı” modelin yan duvarının ortasında, yukarıdaki yöntemle duvara dik yönde uygulanan sinüzoidal kuvvetlerle, “z” doğrultusunda (Şekil 3.4.) yayılan P ve S<sub>v</sub> dalgalarının oluşturularak ardışık yansımalarının ve girişimlerinin izlenmesi (Sadece yansımalar dikkate alındığında, tüm duvarların rijit olduğu kabul edilebilir).

## ÖZGEÇMİŞ

### Kişisel Bilgiler

Soyadı, adı : MUTLU, Ahmet Hakan  
 Uyruğu : T.C.  
 Doğum tarihi ve yeri : 17.04.1973 Kahramanmaraş  
 Medeni hali : Evli  
 Telefon : 0 (312) 231 74 00 / 2204  
 e-mail : [hmutlu@gazi.edu.tr](mailto:hmutlu@gazi.edu.tr)

### Eğitim

| Derece        | Eğitim Birimi                   | Mezuniyet tarihi |
|---------------|---------------------------------|------------------|
| Yüksek lisans | Gazi Üni / İnş. Müh. Böl.       | 2002             |
| Lisans        | Gaziantep Üni. / İnş. Müh. Böl. | 2000             |
| Lise          | Ankara Cumhuriyet Lisesi        | 1996             |

### İş Deneyimi

| Yıl       | Yer               | Görev               |
|-----------|-------------------|---------------------|
| 1998-2008 | Gazi Üniversitesi | Araştırma Görevlisi |
| 1997-1998 | Alta Müh.         | İnşaat Mühendisi    |

### Yabancı Dil

İngilizce

### Yayınlar

- 1) Pampal S., Soygür Ü., **Mutlu, A.H.**, “The Impact of Topography on Çay Small Scale Industrial Complex Earthquake Damages Inflicted by 03.02.2002 Eber (Sultandagi) and Çay Earthquakes”, International Conference on New Developments in Soil Mechanics and Geotechnical Engineering”, Lefkosa, North Cyprus, Vol. 1, pp. 207-212, (May 2003).



- 2) Soygür Ü, **Mutlu, A.H.**, “Jeoteknik – Geoteknik Kavram Kargaşası ve Eksik Standartların Hizmetin Niteliğine Etkisi”, Geoteknik Sempozyumu, Adana, Türkiye, pp. 3-14, (Ekim 2005).