

T.C.  
SAKARYA ÜNİVERSİTESİ  
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

**HARMONİK CİSİM DALGALARININ ZEMİN  
ORTAMINDA SÖNÜMLENMESİ**

**YÜKSEK LİSANS TEZİ**

**Ümit BALKAN**

**Enstitü Anabilim Dalı : YAPI EĞİTİMİ**

**Tez Danışmanı : Doç. Dr. Seyhan FIRAT**

**Eylül 2007**

T.C.  
SAKARYA ÜNİVERSİTESİ  
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

**HARMONİK CİSİM DALGALARININ ZEMİN  
ORTAMINDA SÖNÜMLENMESİ**

**YÜKSEK LİSANS TEZİ**

**Ümit BALKAN**

**Enstitü Anabilim Dalı : YAPI EĞİTİMİ**

**Bu tez 04 / 09 / 2007 tarihinde aşağıdaki jüri tarafından Oybirliği ile kabul edilmiştir.**

**Doç. Dr. Seyhan FIRAT  
Jüri Başkanı**

**Yrd. Doç. Dr. Mehmet SARIBIYIK  
Üye**

**Yrd. Doç. Dr. İlyas ÇANKAYA  
Üye**



## ÖNSÖZ

Dünyanın jeolojik yapısı plak tektoniğinin hareketi ile sürekli bir devinim halindedir. Ülkemiz coğrafyası da bu hareket tektoniğinin en aktif faylarının bulunduğu bölgede yer almaktadır. Bu açıdan bakıldığında depremin yaratmış olduğu büyük genlikli yer hareketleri binalarda yapısal hasarlara ve insan yaşantısında olumsuz etkilere yol açmaktadır.

Benzer olarak insan kaynağının üretmiş olduğu büyük genlikli titreşim üreten ve insan yaşamını önemli derecede etkileyen, konfor bozucu titreşim kaynakları da vardır. Bu sebeple hızlı tren, yoğun taşıt trafiği, büyük genlikli titreşim oluşturabilen ağır sanayi makineleri vb. titreşim kaynaklarının belirtilen zararlı etkilerinden korunmak için en uygun yalıtım aracının belirlenmesi ve zemin ortamında dalga yayılışının iyi anlaşılmasının gerekliliği ortaya çıkmıştır. Bu çalışma ile insanların yaratmış olduğu olumsuz sonuçları, titreşim kaynağından gelen ve elastik zemin ortamında yayılan dalgaların genliğini azaltmak için yapay yolla oluşturulmuş, farklı genliklerde sismik dalgaların zemin ortamında yayılımı ve bu yayılımın farklı dalga bariyerleri ile sönümlenerek korunacak yapıya zarar verme olanağını azaltması amaçlanmaktadır.

Gerçekleştirdiğim bu çalışmada, bana sağladığı desteklerinden dolayı danışmanım Sayın Doç. Dr. Seyhan FIRAT'a, değerleri görüşlerini ve zamanlarını benden esirgemeyen Sayın Yrd. Doç. Dr. İlyas ÇANKAYA'ya, Yrd. Doç. Dr. Günay BEYHAN'a, Yrd. Doç. Dr. Erkan ÇELEBİ'ye, değerli arkadaşlarım Arş. Gör. İsa VURAL ve Jeofizik Mühendisi Murat SANDALCI'ya, kıymetli bölüm hocalarımıza, ayrıca yüksek lisans öğrenimimin her safhasında yitirdiğim ümidimin geri kazanımında bana destek olan ve eksilen azmimi tamamlamama yardımcı olan biricik eşim Asuman BALKAN'a, ilk gözbebeğim oğlum Elvir Ege BALKAN'a ve beni yetiştiren en kıymetli değerlerim anne-babama teşekkürü bir borç bilirim.

## İÇİNDEKİLER

ÖNSÖZ .....	ii
İÇİNDEKİLER .....	iii
SİMGELER VE KISALTMALAR LİSTESİ.....	vi
ŞEKİLLER LİSTESİ .....	viii
TABLolar LİSTESİ.....	xii
ÖZET.....	xiii
SUMMARY.....	xiv
BÖLÜM 1.	
GİRİŞ.....	1
1.1. Problemin Tanımı .....	1
1.2. İlgili Çalışmalar .....	3
1.3. Çalışmanın Amaç ve Kapsamı.....	7
BÖLÜM 2.	
ZEMİN ORTAMINDA DALGA YAYILIŞI .....	8
2.1. Giriş.....	8
2.2. Dalga Hareketinin Teorisi.....	10
2.3. Dalga Yayılma Prensipleri.....	11
2.3.1. Huygens prensibi.....	12
2.3.2. Fermat prensibi.....	12
2.3.3 Snell yasası.....	13
2.3.4. Tersinirlik prensibi.....	13
2.3.5. Süperpozisyon prensibi.....	14
2.4. Sismik Dalga Türleri.....	15
2.4.1. Cisim dalgaları.....	16

2.4.1.1. P-basınç dalgaları.....	16
2.4.1.2. S-kayma dalgaları.....	17
2.4.2. Yüzey dalgaları.....	20
2.4.2.1. Rayleigh dalgaları.....	21
2.4.2.2. Love dalgaları.....	23
2.5. Sismik Dalgaların Yayılması.....	24
2.5.1. Yansıma.....	25
2.5.2. İletim (Kırılma).....	26
2.5.3. Difraksiyon.....	27
2.6. Dalga Yayılma Hızı.....	28
2.7. Sönümlenme (Atenüasyon) ve Ölçme Yöntemleri.....	28
2.7.1. Geometrik yayılma.....	29
2.7.2. Soğurma (Absorbsiyon).....	29
2.7.3. Sınırdaki enerjinin paylaşılması.....	30
2.8. Zeminin Dinamik Özelliklerinin Ölçülmesi.....	32
2.9. Yük Kaynakları ve Etkileri.....	34
<b>BÖLÜM 3.</b>	
<b>ARAZİ UYGULAMALARI.....</b>	<b>35</b>
3.1. Laboratuvar Deneyleri .....	36
3.2. Arazi Sismik Deneyleri.....	38
3.2.1. Yansıma ve kırılma deneyleri.....	38
3.2.2. Deneyin uygulanışı.....	41
3.3. Düşey Dalga Bariyeri Deneyleri.....	43
3.3.1. Dalga bariyerinin modellenmesi.....	46
<b>BÖLÜM 4.</b>	
<b>HARMONİK DALGA ANALİZ ÇALIŞMALARINI.....</b>	<b>50</b>
4.1. Ham Kayıt Verilerinin SeismoSignal Analizleri.....	50
4.2. İşlenmiş Verilerin Matlab Analizleri.....	54
4.3. Dalga Grafiklerinin Yorumlanması.....	56
4.3.1. Aktif yalıtım analizleri.....	56
4.3.2. Pasif yalıtım analizleri.....	64

4.4. Sonuçların Karşılaştırılması.....	73
BÖLÜM 5.	
SONUÇLAR VE ÖNERİLER.....	76
KAYNAKLAR.....	79
ÖZGEÇMİŞ.....	83

## SİMGELER VE KISALTMALAR LİSTESİ

$T$	: Periyot
$F$	: Frekans
$\omega$	: Orantı katsayısı
$t$	: Zaman
$\delta$	: Faz Açısı
$\rho$	: Yoğunluk
$c_p$	: P dalgası hızı
$c_s$	: S dalgası hızı
$c_r$	: Rayleigh dalgası hızı
$\nu$	: Poisson oranı
$\lambda$	: Dalga boyu
$a$	: Genlik
$\sigma$	: Gerilme
$u$	: Yerdeğiştirme
$z$	: Akustik Empedans
$\varepsilon$	: Birim deformasyon
$c$	: Dalga hızı
$E$	: Elastisite modülü
$R$	: Dalga yansımaya katsayısı
$T_r$	: Dalga iletim katsayısı
$E_t$	: Dalga cephesi toplam enerji miktarı
$\bar{a}_r$	: Genlik sönüm faktörü
$\alpha$	: Dalga soğurma katsayısı
$H$	: Tabaka kalınlığı
SEY	: Sonlu elemanlar yöntemi
$i$	: Sismik dalga yansımaya ve kırılma açısı



$r$	: Dalga yayılma cephesi
$q$	: Dalga girişim
$z$	: Derinlik
$S_r$	: Yansıya S-dalgası
$P_r$	: Yansıyan P-dalgası
$S_t$	: Kırılan S-dalgası
$P_t$	: Kırılan P-dalgası
$\acute{ı}_{St}$	: S-dalgası kırılma açısı
$\acute{ı}_{Pt}$	: S-dalgası kırılma açısı
$\acute{ı}_{Sr}$	: S-dalgası kırılma açısı
$\acute{ı}_{Pr}$	: P-dalgası kırılma açısı
$e_s$	: Birim yüzeye düşen enerji miktarı
$a_0$	: Başlangıçtaki dalga genliği
$e$	: Logaritmik taban
$N$	: Newton
$^{\circ}C$	: Santigrat derece

## TABLULAR LİSTESİ

Tablo 2.1.	Zemin dinamik özelliklerinin ölçülmesi .....	33
Tablo 2.2.	Farklı dinamik yük durumları için frekans ve genlik aralığı .....	34
Tablo 3.1.	Laboratuvar deney sonuçları .....	37
Tablo 3.2.	Zemin ve kayada sismik dalgaların hızı .....	42
Tablo 3.3.	Sismik deney sonuçları .....	43

## ŞEKİLLER LİSTESİ

Şekil 1.1.	Titreşim kaynağından dalgaların yayılması ve bir yalıtım aracıyla perdelenmesi.....	3
Şekil 2.1.	Dalga şeması.....	9
Şekil 2.2.	Cisim dalgalarının oluşturduğu deformasyonlar a)Basınç dalgası b) Kayma dalgası .....	10
Şekil 2.3.	Basit harmonik salınımın tanecik hareketinin zamana bağlı yerdeğiştirme hız ve ivme grafiği .....	11
Şekil 2.4.	Tersinirlik prensibinde uygulanan kuvvet $f(t)$ ile meydana getireceği yerdeğiştirme $d(t)$ arasındaki ilişki .....	14
Şekil 2.5.	Farklı frekans ve genliklere sahip olan iki basit harmonik salınımın girişimi .....	15
Şekil 2.6.	P-basınç dalgası yayılma şekli .....	17
Şekil 2.7.	S-kayma dalgası yayılma şekli .....	18
Şekil 2.8.	Bir sismogramda görülen tipik deprem dalgaları .....	18
Şekil 2.9.	SV-dalgası ve SH-dalgası yayılma şekli .....	19
Şekil 2.10.	Yerküre ve iç yapısı .....	20
Şekil 2.11.	Rayleigh dalgasının oluşturduğu deformasyonlar .....	21
Şekil 2.12.	Rayleigh yüzey dalgalarının poisson oranına bağlı olarak yatay ve düşey hareketi .....	22
Şekil 2.13.	Love dalgaları yayılma şekli .....	23
Şekil 2.14.	Love dalgalarında partikül yerdeğiştirme genliğinin derinlikle değişimi .....	24
Şekil 2.15.	Bir sınıra gelen dalganın yansıma şekli (a)Normal geliş (b)Eğik geliş hali .....	26
Şekil 2.16.	Tabakalı bir ortamda yansıyan ve kırılan dalgalar .....	27
Şekil 2.17.	İki tabakalı bir ortamda basit tekrarlı yansıma .....	31

Şekil 2.18.	Çok tabakalı bir ortamda iletim ve yansıma .....	32
Şekil 2.19.	Yük çeşitleri .....	34
Şekil 3.1.	Zemin laboratuvar deneyleri için sondaj çalışması.....	36
Şekil 3.2.	Sondaj çalışması uç değişimi .....	36
Şekil 3.3.	Yüzey dalgalarının spektral analizinde kullanılan genelleştirilmiş dizilim .....	38
Şekil 3.4.	Jeofonların kayıt için yerleştirilmesi .....	39
Şekil 3.5.	Veri kayıt cihazı .....	39
Şekil 3.6.	Yük kaynağı .....	40
Şekil 3.7.	Deney uygulama sahası .....	41
Şekil 3.8.	Jeofon uygulaması saha modeli .....	42
Şekil 3.9.	Sarsma cihazı .....	44
Şekil 3.10.	Yük kontrol cihazı .....	45
Şekil 3.11.	İvme ölçerler.....	45
Şekil 3.12.	Isı kontrol cihazı .....	45
Şekil 3.13.	Yalıtımsız arazi modeli .....	46
Şekil 3.14.	Aktif yalıtım arazi modeli .....	47
Şekil 3.15.	Düşey dalga bariyerleri: a) İçi boş bariyer b) İçi su dolu bariyer c) İçi bentonit dolu bariyer d) İçi beton dolu bariyer.....	48
Şekil 3.16.	Pasif yalıtım arazi modeli .....	49
Şekil 4.1.	Ham kayıt dosya bilgi girişi .....	51
Şekil 4.2.	Ham kayıt ivme-hız, yerdeğiştirme-zaman grafikleri .....	52
Şekil 4.3.	Filtreleme uygulama şekli .....	53
Şekil 4.4.	İşlenmiş veri gurubu ivme, hız, yerdeğiştirme-zaman grafikleri ..	53
Şekil 4.5.	Matlap grafik çizim programı .....	55
Şekil 4.6.	Aktif yalıtım arazi modeli .....	56
Şekil 4.7.	Aktif yalıtım A <sub>1</sub> istasyonu 10 Hz zamana bağlı yerdeğiştirme grafiği .....	57
Şekil 4.8.	Aktif yalıtım A <sub>1</sub> istasyonu 25 Hz zamana bağlı yerdeğiştirme grafiği .....	58
Şekil 4.9.	Aktif yalıtım A <sub>1</sub> istasyonu 50 Hz zamana bağlı yerdeğiştirme grafiği .....	59

Şekil 4.10.	Aktif yalıtım A <sub>1</sub> istasyonu 75 Hz zamana bağlı yerdeğiştirme grafiği .....	60
Şekil 4.11.	Aktif yalıtım A <sub>1</sub> istasyonu 95 Hz zamana bağlı yerdeğiştirme grafiği.....	60
Şekil 4.12.	Aktif yalıtım A <sub>4</sub> istasyonu 10 Hz zamana bağlı yerdeğiştirme grafiği .....	61
Şekil 4.13.	Aktif yalıtım A <sub>4</sub> istasyonu 25 Hz zamana bağlı yerdeğiştirme grafiği .....	62
Şekil 4.14.	Aktif yalıtım A <sub>4</sub> istasyonu 50 Hz zamana bağlı yerdeğiştirme grafiği .....	62
Şekil 4.15.	Aktif yalıtım A <sub>4</sub> istasyonu 75 Hz zamana bağlı yerdeğiştirme grafiği .....	63
Şekil 4.16.	Aktif yalıtım A <sub>4</sub> istasyonu 95 Hz zamana bağlı yerdeğiştirme grafiği .....	63
Şekil 4.17.	Pasif yalıtım arazi modeli .....	64
Şekil 4.18.	Pasif yalıtım A <sub>1</sub> istasyonu 10 Hz zamana bağlı yerdeğiştirme grafiği .....	65
Şekil 4.19.	Pasif yalıtım A <sub>1</sub> istasyonu 25 Hz zamana bağlı yerdeğiştirme grafiği .....	66
Şekil 4.20.	Pasif yalıtım A <sub>1</sub> istasyonu 50 Hz. zamana bağlı yerdeğiştirme grafiği .....	66
Şekil 4.21.	Pasif yalıtım A <sub>1</sub> istasyonu 75 Hz zamana bağlı yerdeğiştirme grafiği .....	67
Şekil 4.22.	Pasif yalıtım A <sub>1</sub> istasyonu 95 Hz zamana bağlı yerdeğiştirme grafiği .....	67
Şekil 4.23.	Pasif yalıtım A <sub>4</sub> istasyonu 10 Hz zamana bağlı yerdeğiştirme grafiği .....	69
Şekil 4.24.	Pasif yalıtım A <sub>4</sub> istasyonu 25 Hz zamana bağlı yerdeğiştirme grafiği .....	70
Şekil 4.25.	Pasif yalıtım A <sub>4</sub> istasyonu 50 Hz zamana bağlı yerdeğiştirme grafiği .....	71
Şekil 4.26.	Pasif yalıtım A <sub>4</sub> istasyonu 75 Hz zamana bağlı yerdeğiştirme grafiği .....	71

Şekil 4.27. Pasif yalıtım A <sub>4</sub> istasyonu 95 Hz zamana bağlı yerdeğiştirme grafiği .....	72
Şekil 4.28. Pasif yalıtım A <sub>4</sub> istasyonu su dolu yalıtım uygulaması zamana bağlı yerdeğiştirme grafiği .....	73
Şekil 4.29. Pasif yalıtım A <sub>4</sub> istasyonu bentonit dolu yalıtım uygulaması zamana bağlı yerdeğiştirme grafiği .....	74
Şekil 4.30. Pasif yalıtım A <sub>4</sub> istasyonu beton dolu yalıtım uygulaması zamana bağlı yerdeğiştirme grafiği .....	75

## ÖZET

Anahtar kelimeler: Harmonik dalga, zeminlerde dalga yayılımı, aktif yalıtım, pasif yalıtım, dalga bariyeri, sönümlleme.

Doğal yada yapay dinamik yüklemeler sonucu zeminlerde ve zemin üzerindeki yapılarda kuvvetli yer hareketleri oluşabilir. Bu titreşimler, mevcut yapılara hasar verebileceği gibi, insan yaşamındaki konforu ve yaşanabilir ortam koşullarını da bozabilir. Bu nedenle titreşim kaynağından gelen ve elastik zemin ortamında yayılan dalgaların genliğini azaltmak için titreşim kaynağının yakınına ya da korunacak yapının yakınına bir dalga bariyeri modeli geliştirilebilir. Bu çalışmada doğal yada yapay bir dalga kaynağının ürettiği titreşimlerin yayılmasını önlemek (aktif yalıtım) veya titreşim kaynağından gelen dalgaların zemin ortamında yayılarak korunacak bir yapıya veya alana ulaşmasına engel olmak (pasif yalıtım) için kullanılacak en uygun dalga bariyeri modelini belirlemek üzere sistematik araştırmalar yapılmıştır.

Gerçekleştirilen bu araştırmaların deneysel uygulamalarında öncelikle modelin arazi çalışma şartları hazırlanmış, zemin bölgesinden çıkartılan sondaj numuneleri ile zemin yapısı, özellikleri ve değerleri elde edilmiştir. Zeminin tabaka kalınlıklarının belirlenmesi için sismik yansıma deneyi yapılmış geometrik yapı belirlenmiştir. Harmonik dalga yayılımını sönümleyecek en uygun dalga bariyerinin belirlenmesi için yalıtımsız durum, aktif yalıtımlı durum ve pasif yalıtımlı durumlarında dalga yayılımının yük kaynağına ve korunacak yapıya dair etkilerinin farklı yalıtım modellerinde tanecik hareketine etkileri incelenmiştir. Kullanılan yalıtım modelleri; dalga bariyerinin içinin boş, su dolu, bentonit dolu ve beton dolu olması durumları için gerçekleştirilmiştir.

# **HARMONIC BODY WAVES ATTENUATION IN THE GROUND LAYER**

## **SUMMARY**

Key Words: Harmonic wave, wave spread in the ground, active isolation, passive isolation, wave barrier, attenuation.

There may be strong shaking in the ground or on the buildings because of natural or unnatural dynamic loading. These vibrations may damage both the buildings and people's life quality and their comfort. Therefore a wave barrier may be developed near by the source of vibration or nearly the building which we want to protect to reduce the wavelength which comes from source of vibrations and spreads in elastic ground. In this study there are some scientific researches about determining the optimal wave barrier model either to prevent the spreading of vibrations which come from natural and unnatural wave sources (active isolation) or to prevent the reaching of the waves which come from sources of the vibrations by to the buildings or to the area that should be protected (passive isolation).

In this study ground conditions are obtained by drilling bore holes on the site. Also seismic refraction test is carried out on the situ to obtain geometric structure. The most suitable wave barrier model for non isolation, active and passive isolations cases are investigated in terms of protection the structure and vibration source. The wave barriers are used in this research as open trench, water filled trench, bentonite trench and concrete trench.



# BÖLÜM 1. GİRİŞ

## 1.1. Problemin Tanımı

Titreşim kaynakları; deprem yer hareketi ile üretilen çok büyük genlikli titreşimler ve insan yapısı ile üretilen ve farklı genliklerde oluşturulabilen titreşimler olmak üzere iki sınıfta ele alınıp incelenmektedir.

Deprem ülkemizin vazgeçilemez bir gerçeğidir. Ülkemiz jeolojik konumu itibari ile dünya deprem kuşağının en aktif faylarının bulunduğu bölge içerisinde yer almaktadır. Dünyanın önemli aktif kuşaklarından biri olan Alp-Himalaya orojenik kuşağı üzerinde yer alan ülkemizin karmaşık jeolojik ve jeodinamik yapısından dolayı, çok sayıda önemli büyüklükte deprem oluşturabilecek boyutlarda aktif kırık fay zonu mevcuttur [1]. Bu bölgede gerçekleşen büyük genlikli kuvvetli yer hareketleri nedeniyle oluşan depremlerde çok fazla yapısal hasar gerçekleşmektedir. Ne yazık ki insan hayatını olumsuz etkileyen bu yapısal hasarlar beraberinde can kayıplarına sebep olmaktadır.

Diğer yandan hızlı ve yoğun trafik yükleri, ağır makine temelleri, masif inşaat aktiviteleri ve patlamalar gibi deprem yer hareketi dışındaki yüksek frekansta insan yapısı titreşim kaynaklarının oluşturduğu etkiler bütün dünyada son yılların en önemli problemlerindendir. Bu titreşim kaynaklarının oluşturduğu dalgaların yumuşak zemin ortamında yayılışı ve yoğun yerleşim alanlarındaki yapılarla etkileşimi hassas aletlerde işlevsel bozukluklara, insanlarda rahatsızlık verici durumlara hatta yakın binalarda hasarlara neden olmaktadır [2].

Ülkemizde nüfus artışı ile paralel son yıllardaki ulaşım problemlerinin artışı, mesafelerin uzaması ve ulaşım zamanlarının artması insanların zamanlarını ekonomik kullanmalarına engel olmakta, hayatlarında ve işlerinde verimli bir süreç yaşamalarını güçleştirmektedir. Bu yüzden gelişen teknolojiden faydalanarak ulaşım

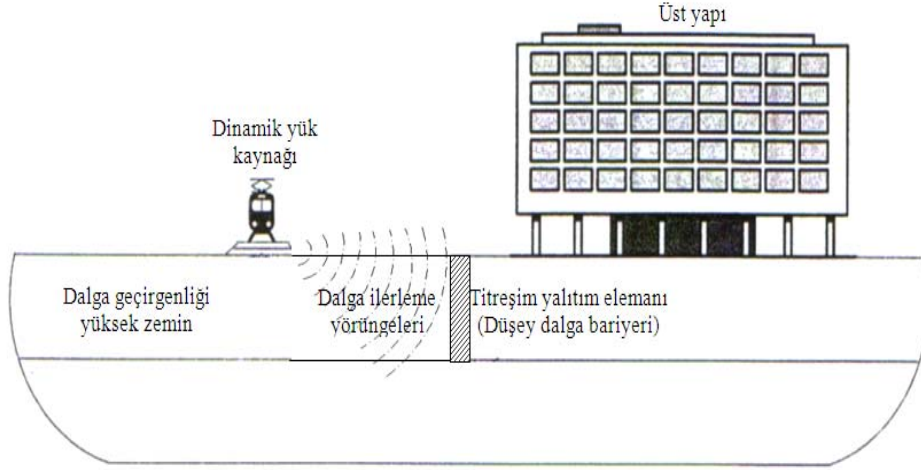
alanlarında da bir takım yenilikler yapılmaktadır. Bu yeniliklerin en önemlilerinden biriside demiryollarında tren hızlarının artırılmasıdır. Tren hızlarının artışı ile zeminde meydana gelen titreşim genliklerinin artışı yakın binalarda hasarlara ve yaşam konforunu olumsuz etkilemeye neden olmaktadır.

Teknolojik gelişmelerin insan hayatını kolaylaştırmasının yanında, araç hızlarının ve güçlerinin artmasının etkisiyle bu araçlardan kaynaklanan titreşimler binalarda ve aletlerde olumsuz etkiler oluşturmakta, bunlarda insanların yaşamlarını zorlayıcı etkiler meydana getirmektedir [3].

Zemin titreşimlerinin yapılara verebileceği hasarları azaltmak için çeşitli yöntemler kullanılmaktadır. Bu yöntemlerin etkinliği ve uygulanabilirliği dalgaların karakterlerine ve zemin koşullarına bağlıdır. Bilindiği üzere dinamik yükler ya da yapay yolla oluşturulan sismik dalgaların zemin ortamındaki davranış ve seyahatini zemin tabakalarının malzeme ve geometrik özellikleri başta olmak üzere dalganın karakteristiği belirlemektedir. Bu nedenle çevreyi titreşim kaynaklarının belirtilen zararlı etkilerinden korumak ve en uygun yalıtım modelini belirleyebilmek için zemin ortamında dalga yayılışını iyi anlamak gerekmektedir.

Kuvvetli yer hareketlerinin neden olduğu büyük genlikli titreşimleri önleyebilmek için korunacak yapı çevresine, dalga geliş istikametine, korunacak yapının altına veya dalga kaynağının bahsi geçen bölgelerine çeşitli yalıtım malzemesi yerleştirilmesi etkili bir çözüm olarak sunulabilir (Şekil 1.1.). Böylece dinamik yüklerin neden olduğu kuvvetli yer titreşimlerinin zemin ortamında yayılmasında, dalgaların soğurulmasını, yansımalarını veya kırılmasını sağlayarak etkilerini azaltmak ve geciktirmek, dalganın yapıya etkili bir şekilde ulaşmasını engellemek mümkün olabilmektedir. Dalga yalıtım malzemesinin titreşim kaynağının yakın bölgesine yayılım doğrultusunda dik yerleştirilmesi aktif yalıtım yapıldığını, titreşim kaynağının uzağında korunacak yapının yakın bölgesine dik yerleştirilmesi ise pasif yalıtım yapıldığını göstermektedir. Aktif ve pasif yalıtımda kullanılacak dalga bariyerinin geometrik özelliklerinin tespiti ve farklı zemin formasyonlarında hangi derinliğe yerleştirileceği önceki çalışmalardan elde edilmiş bilgiler doğrultusunda belirlenmiştir. Dalga bariyeri modellerinin tabakalı zemin ortamında cisim dalgalarının yayılışına etkilerini anlamak için bariyerin ve zemin ortamının deneysel

modeli uygun saha şartlarında, sayısal çözümü ise paket programlardan yararlanılarak bilgisayar ortamında geliştirilmiştir. Detaylı parametrik araştırmalar neticesinde elde edilen sonuçlar farklı titreşim yalıtım modelleri için karşılaştırılmalı olarak verilmiştir.



Şekil 1.1. Titreşim kaynağından dalgaların yayılması ve bir yalıtım aracıyla perdelenmesi [3]

## 1.2. İlgili Çalışmalar

Yapı-zemin arasındaki dinamik etkileşim ile ilgili her yıl çeşitli sayıda farklı makaleler yayımlanmaktadır. Son on yıl içerisinde, yurtdışındaki yayınlarda yeni teorik yaklaşımlar ve sayısal yöntemlerin geliştirilmesi ele alınmıştır. Çeşitli dinamik yük kaynaklarının ürettiği büyük genlikli yer hareketlerinin önlenmesi veya azaltılabilmesi için titreşim yalıtım araçları ve etkileri ile ilgili literatürde sınır eleman, sınır integral, ya da sonlu eleman yöntemlerine yada bu yöntemlerin ortak kullanımına dayalı birçok sayısal çözüm yaklaşımları, analitik çözüm yolları ve deneysel çalışmalar ortaya konulmuştur.

Yapı-zemin dinamik etkileşimi problemlerinin çözümlenmesindeki gelişmelere paralel olarak insanlar tarafından oluşturulan hasar verici veya yıkıcı titreşimlerin engellenmesi ve yapılara zarar vermemesi için titreşim kaynağı ile korunacak yapı arasına bir dalga bariyeri konulması düşünülmüştür. Yapı-zemin etkileşimi dikkate

alınarak uygun dalga bariyerinin belirlenmesi için bazı araştırmacılar bir takım çalışmalar yapmıştır. Klein ve diğ. çalışmalarında Sınır Elemanlar Yöntemini kullanmış ve titreşimlerin azaltılması için farklı çözüm yöntemlerini incelemiştir [4]. Rayleigh dalgalarını da inceleyerek farklı yük etkilerinde bu dalgaların nasıl bir davranış gösterdiklerini araştırmışlardır. Chouw ve Pflanz Sınır Elemanlar Yöntemini kullanarak zemin-bariyer modelini oluşturmuşlar ve farklı kayma dalga hızları için düşey dalga bariyeri ile yatay dalga bariyerinin etkisini karşılaştırmalı olarak incelemiştir. Her iki dalga bariyerinin de belli frekanslarda dalga sönümlenme yetisine sahip olduğunu tespit etmişlerdir [5]. Tahmeed M. Al-Hussaini trafik etkileri sonucu oluşan yüksek frekanslı titreşimlerin etkilerini azaltmak için içi boş ve içi dolu bariyerler kullanmış, sistem Sınır Elemanlar Yöntemi kullanılarak oluşturulmuş, bariyerler için malzeme ve geometrik özelliklerin değişiminin etkisini incelemiştir [6]. Bunlara ek olarak Leung ve diğerleri bazı analitik araştırmalar yapmışlar ve bazı formülasyonlar elde etmiştir. Bu yöntemlerin etkinliği ve uygulanabilirliği dalgaların karakterlerine ve zemin koşullarına bağlıdır [7]. Adam ve Estorff açık ve içi dolu bariyerler kullanarak tren, trafik aktiviteleri ve ağır makine hareketleri sonucu zeminlerde oluşan titreşimlerin yapılarda oluşturacakları etkilerin azaltılmasını amaçlamışlardır. Yaptıkları çalışmada hendek tipi açık ve bentonit ile doldurulmuş dalga bariyerlerini kullanmışlardır [8]. Daha önce yapılan bazı deneysel çalışmaların sonuçları da özel durumlar için yönetmeliklerde yer almış ve faaliyet alanı dar kapsamda tutulmuştur [9].

Schmid'e göre bölgesel zemin üzerindeki dalga yayılımını değiştirmenin temeli; belirlenen bir rijitlikte, boyutlarda ve derinlikte katı bir kütle yerleştirilmesi esasına dayanmaktadır. Bu katı kütle yapay bir ana kaya görevi üstlenir. Zemine iletilen büyüklükleri belli dalgalar ile zemin anakaya arasındaki, sınır ve ince kalınlıklara sahip tabakaların, tanımlanması mümkündür [10]. Modelleme yapılırken, yarı sonsuz zemin bölgesinde bariyerin geometrik ve malzeme özellikleri değiştirilerek yalıtım için en uygun modelin bulunması için çalışmalar yapılmıştır.

Sonlu Elemanlar Yönteminin (SEY) mühendislik uygulamalarında karmaşık problemlerin çözümünde bilgisayar yazılımları ile birlikte kullanılmaya başlanmasıyla, araştırmalar basit analitik çözümlerden çok bilinmeyenli sayısal modellemelere doğru kaymıştır. Sismolojide, cisim ve yüzey dalgalarının yayılımına

ait çalışmalarda, sonlu elemanlar yaygın olarak kullanılmıştır. SEY kullanılarak yapı-zemin etkileşimi daha detaylı araştırılmıştır. Yapı-zemin sistemi, zemin bölgesinin yarı sonsuz uzay olarak kabul edilmesinden dolayı sonsuz zemin bölgesinde sonlu bir zemin alınarak modellenmektedir. Yapı-zemin sisteminin birlikte modellenmesini öngören metoda doğrudan çözüm yaklaşımı denilmektedir. Burada sınırlı bir zemin bölgesi alınmakta ve zemin ara yüzeylerinde yapay sınırlar oluşturulmaktadır. Yapılan çalışmalarda öncelikle zemin bölgesinin bu yapay sınır şartlarının nasıl belirleneceği araştırılmıştır. Çünkü dinamik analizlerde gerekli sınır şartları uygulanmazsa kaynaktan yayılan dalgalar bu sınırlara çarpacak ve zeminin uygun olarak temsil edilmediği bu sınırlarda dalgalar farklı şekilde kırılacak veya yansıyacaktır. Bu farklılıklarda yapılan analizlerde ve çözümlenelerde gerçekçi olmayan sonuçlar oluşmasına neden olacaktır [11].

Literatürde yapı-zemin problemlerinin incelenmesinde birçok araştırma yapılmıştır. E. Çelebi ve A.N. Gündüz [12] çok katlı bir yapının yarı sonsuz bir ortamda deprem etkisindeki davranışını incelemiş ve en uygun sonucu elde etmek için farklı modeller kurmuştur. Kurulan modellerde Sonlu Eleman Yöntemi kullanılmıştır. Çalışmanın ilk aşamasında büyük bir zemin bölgesi ayrıklaştırılmıştır. İkinci aşamada, zeminin yatay uzanımını dik kesen düğüm noktalarındaki yerdeğiştirmeler kısıtlanarak zemin modellenmiştir. Son olarak ise yatay sınırlar eşdeğer statik yaylar ve sönümleyiciler (vizkoz sınır şartları) kullanılarak zemin bölgesi modellenmiştir. Yapılan bu modellerde kayma dalga hızı, periyot ve taban kesme kuvveti hesaplanmış ve karşılaştırılmıştır. Sonuç olarak çok büyük bir zemin bölgesi alınarak kurulan model ile sönümleyiciler ve yaylar kullanılarak yapılan modelden elde edilen sonuçların birbirine çok yakın sonuçlar verdiği görülmüştür.

Yapı-zemin etkileşiminde zemin bölgesinin idealleştirilmesi için kullanılan iki temel yaklaşım, “Doğrudan Çözüm Yaklaşımı (Direkt Metot)” ile “Altsistem Yaklaşımı”dır. M.N. Aydınoglu [13] Doğrudan Çözüm Yaklaşımında, zemin ortamının da üstyapı taşıyıcı sistem gibi SEY ile ayrıklaştırılmasını ve oluşturulan yapı-zemin ortak sisteminin, tanımlanan statik veya dinamik dış etkiler altında doğrudan analizini öngörür. Altsistem Yaklaşımında ise yapı ve zemin iki ayrı sistem olarak düşünülür ve her iki sistem için ayrı ayrı yazılan denge denklemleri, daha sonra yapı-zemin arakesitindeki geometrik uygunluk ve denge koşulları dikkate alınarak

birleştirilir. Bu durumda zemin ortamı sadece yapı-zemin arakesitinde, sınırlı sayıdaki ayırık düğüm noktalarında temsil edilen bir alt sistem olarak idealleştirilir.

Bahsi geçen çalışmalara ilave olarak yapılan diğer araştırmalar, Küyük ve Çelebi [14], Küyük ve diğ. [15], Vural ve diğ. [16], Vural ve diğ. [17], Kırtel ve diğ. [18] ve Kırtel ve diğ. [19] dalgaların karakterleri ve zemin koşulları dikkate alınarak en uygun yalıtım durumunu veren modelleri incelemişlerdir. Bunun için birçok parametre üzerinde (kayma dalga hızı, bariyer yoğunluğu, bariyerin geometrik özellikleri, bariyerin yapıya veya yük kaynağına olan uzaklığı vb.) aktif ve pasif yalıtım durumlarında incelemeler yapılmış ve en yüksek yalıtımı veren şartlar araştırılmıştır. Forchap ve Verbic yapı ve zemindeki titreşimleri ve bu titreşimlerin etkilerinin azaltılması için arazi deneyleri yapmışlardır [20]. Ana kaya üzerini örten tek tabakalı zemin ortamının temel titreşim frekans değerinin altında kalan dış yükün frekans değerlerinde dalga yayılışlarının olmadığını göstermişlerdir. İstenilen yerlerde ana kaya bulmanın zorluğu veya olmaması nedeniyle zemin içerisinde ana kaya özelliğini taşıyan bir yapay taban kaya önermişlerdir. Gao ve diğ. yaptıkları çalışmada titreşimlerin izolasyonunda kazık gruplarının pasif yalıtım durumundaki etkisini incelemişlerdir [21]. Andersen ve Nielsen yaptıkları çalışmada yer titreşimlerinin bariyerler ile azaltılması veya demiryolu hattı boyunca zeminin iyileştirilmesi hakkında incelemelerde bulunmuşlardır. İçi boş hendek tipi dalga bariyeri yönteminde olumlu sonuçlar elde etmişlerdir [22]. Haw Ju ve Ta Lin trenlerin neden olduğu titreşimler ve kritik Rayleigh dalga hızlarının sonlu elemanlar metodu ile analizini yapmış ve nümerik analiz çalışmalarını karşılaştırmışlardır [23]. Hildebrand yaptığı çalışmasında hissedilebilir tren titreşimlerinin zemin stabilizasyonuna etkisini incelemiş ve farklı frekanslara ait sonuçları sunmuştur [24]. Ayrıca Hunaidi [25] ve El Naggat ve Chehab [26] ülkelerinde yaptıkları araştırmalarda trafik titreşimlerinin etkileri ve önlemleri hakkında çalışmalar yaparak sunmuşlardır.

Dikdörtgen temeller için Dominguez ve Roesset [27], ve çözüm yönteminin kesin ifadesini yazan Gazetas [28] tarafından yayınlanmıştır. Sieffert [29] bilinen bütün empedans fonksiyonlarını uygulanabilir biçimde bir çalışmada yayınlamıştır. Wolf yakın zamanda empedans fonksiyonlarının hesabı için yeni ayrıntılı yaklaşımlar ileri sürmüştür [30].

### 1.3. Çalışmanın Amaç ve Kapsamı

Bu çalışmanın amacı, kuvvetli bir dalga kaynağının ürettiği titreşimlerin yayılmasını ve etkisini azaltmak, deprem yer hareketi dışındaki yüksek frekansta insan yapısı titreşim kaynaklarının (taşıt etkileri, inşaat aktiviteleri, makine hareketleri, patlamalar vb.) yapılar üzerinde oluşturacakları hasar verici etkileri, insanlar üzerindeki konfor bozucu rahatsızlıkları en aza indirmektir. Bu amaçla, en uygun dalga sönümleme yetisine sahip zemin modelinin oluşturulmasını sağlamak öncelikli hedef alınmıştır.

Deneilerin yapılacağı arazinin zemin özelliklerini belirlemek için zemin sondajı ve laboratuvar deneyleri yapılmıştır. Arazide deneysel çalışmanın gerçekleştirilmesi için gerekli malzemeler temin edilip, deneysel düzenek oluşturulmuştur. Bu çalışmada amaçlanan, yük kaynağından yayılan dalgaların bariyerlerde ve zemin sınırlarında yansiyip sisteme geri dönmesini engellemektir. Bu model oluşturulduktan sonra titreşim kaynağının ürettiği harmonik yükün yapıda oluşturacağı etkileri azaltmak için kaynak ile yapı arasına uygun bir dalga bariyeri modeli oluşturulmaya çalışılmıştır. Aktif yalıtım (dalga bariyerinin kaynağın önünde olması) ve pasif yalıtım (dalga bariyerinin korunacak yapının önünde olması) durumları için farklı parametreler üzerinde araştırmalar yapılmıştır. Dalga bariyerinin geometrik özellikleri (yüksekliği ve genişliği) ve çeşitli boyutlardaki bariyerin farklı derinliklerdeki etkisi gerçekleştirilmiş literatür tarama çalışmalarının sonuçlarından elde edilmiştir. Ayrıca bariyerin cidarlı imal edilmesi durumunda boş olması durumu, bariyerin içinin dolu olması durumu ve farklı yoğunluktaki malzemelerle doldurulması gibi birçok değişkenin dalgaının perdelenmesine etkisi araştırılmıştır. Bu araştırmalar neticesinde elde edilen sonuçlar yorumlanmış ve grafikler halinde karşılaştırmalı olarak verilmiştir.

## BÖLÜM 2. ZEMİN ORTAMINDA DALGA YAYILIŞI

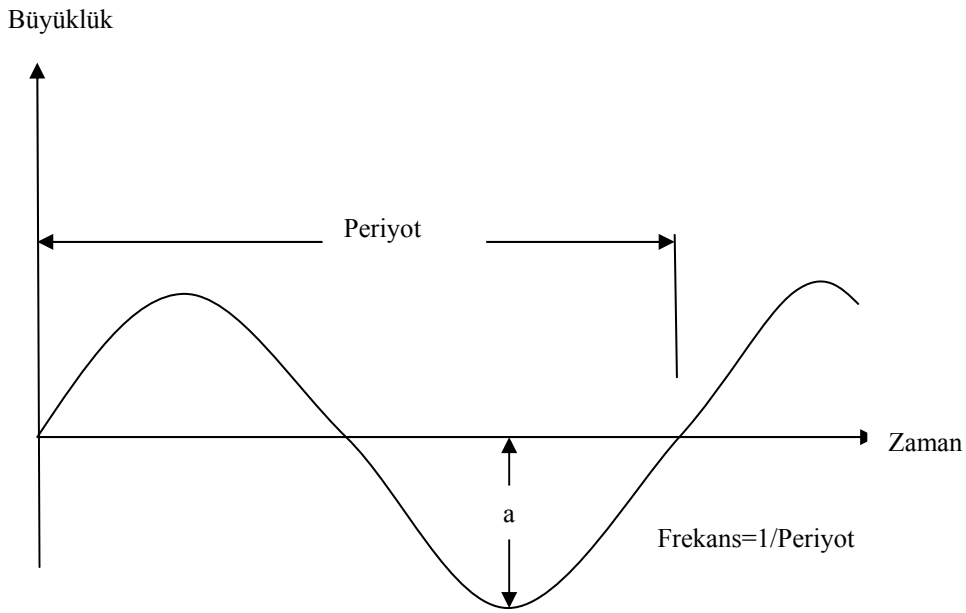
### 2.1. Giriş

Küçük bir su birikintisine atılan taşla, durgun suda meydana gelen dalgalanma olgusu herkes tarafından çok iyi bilinir. Suyu atılan taş dairesel yavaş yavaş genişleyen ve sürtünmeyle enerjisini eninde sonunda kaybedecek bir dalga yaratır. Bu olgudaki en dikkate değer özellik dalga dışı doğru ilerlerken göldeki su taneciklerinin aşağı ve yukarı hareket edip oldukları yerde kalmalarıdır. Diğer farklı doğal olgularda benzer sonuçlar yaratır. Bir ses kaynağından çıkan dalga havada her yöne doğru dairesel olarak yayılır, ışık dalgaları da ışık kaynağından etrafa aynı biçimde dağılır, zemin ortamında oluşan doğal veya yapay, büyük yada küçük genlikli dalgalarda buldukları ortamda dairesel ve üç boyutlu olarak dağılır. Tüm bu olgularda dalgaların yayıldığı ortam hareket etmez, ancak hareket eden dalganın enerjisi ile ortamın düzeni bozulur [31].

Bütün bu dalgaların hareketleri üç farklı nicelikle ifade edilir (Şekil 2.1.) :

- 1) Tam bir dalga salınımının başlangıcı ile sonu arasında geçen süre, yani periyot ( $T$ ),
- 2) Genlik ( $a$ ), dalga salınımının büyüklüğü,
- 3) Frekans ( $F$ ), birim zamandaki (genellikle saniyedeki) dalga salınım sayısı,





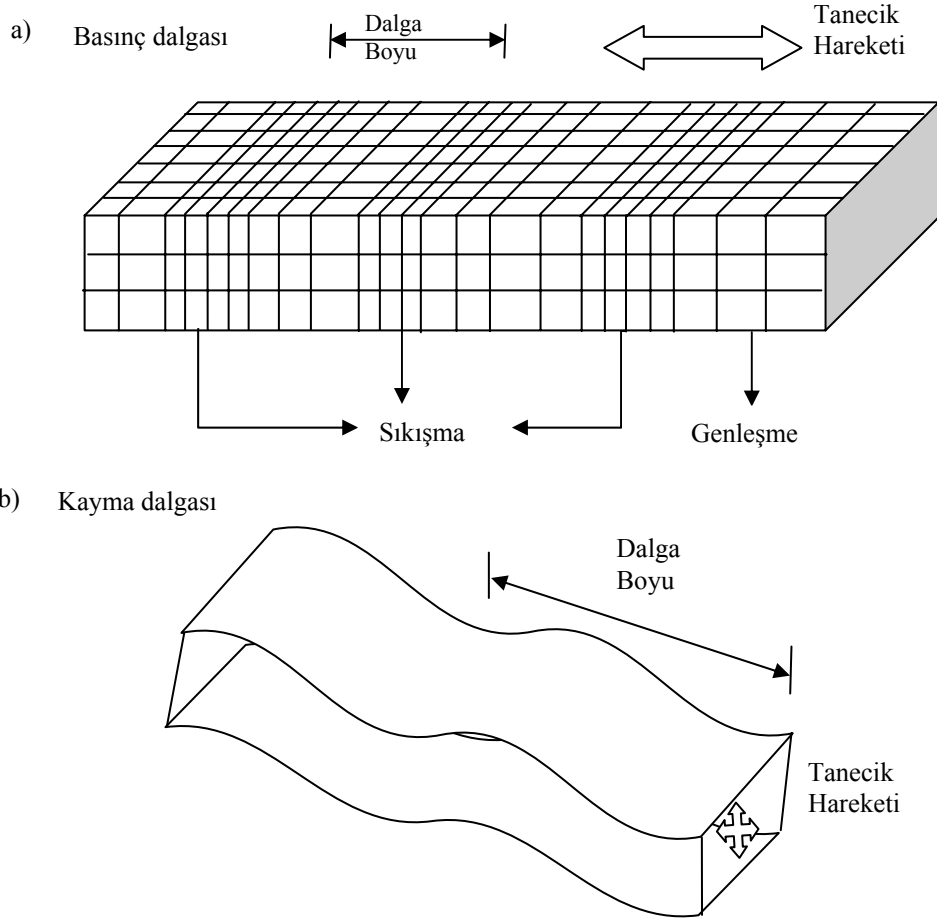
Şekil 2.1. Dalga Şeması [31]

Şekil 2.1.'de dalga davranışları kesin olarak görünse de dalgaların hareket yönleri sergilenemez [31].

Bazı dalgalar ses dalgası gibi yayıldıkları ortamın hareket doğrultusunda ileri geri hareket ederler, doğrultu boyunca ortamı bir sıkıştırıp bir genişleten bu dalgalara boyuna dalgalar (P-basınç dalgaları) denir, başka bir çeşit dalgada içinde buldukları ortamı, dalgaların hareket yönüne dik olan açılarda yukarı aşağı hareket ettirir, bu dalgalara da enine dalgalar (S-kayma dalgaları) denir (Şekil 2.2. (a), (b)).

Zeminlerde oluşan titreşimler sonucu cisim dalgaları ve yüzey dalgaları adı verilen iki farklı dalga türü ortaya çıkar. Zemin içerisinde hareket eden cisim dalgalarının P ve S olmak üzere iki çeşidi vardır. P dalgaları boyuna olup basınç dalgaları olarak bilinir ve geçtikleri ortamda önce sıkışma sonra genişleme meydana getirirler. Ses dalgalarına benzerler ve bu dalgalardan etkilenen bir parçacık titreşimi dalga ilerleme yönüne paraleldir. Bu dalgalar ses dalgalarında olduğu gibi katı ve sıvı ortamdan geçebilir. Enine ve kesme dalgaları olarak bilinen S dalgasından etkilenen bir parçacık hareketi dalga ilerleme yönüne diktir. Sonsuz bir ortamda P dalgasının yayılma hızı, S dalgasının yayılma hızından en az 2 kat daha fazladır [32]. Cisim

dalgalarının ilerleme hızı, içinden geçtikleri ortamın rijitliğine bağlıdır. Sismik dalga türlerinden bölüm 2.4.'te ayrıntılı şekilde bahsedilecektir.



Şekil 2.2. Cisim dalgalarının oluşturduğu deformasyonlar a) Basınç dalgası, b) Kayma dalgası [32]

## 2.2. Dalga Hareketinin Teorisi

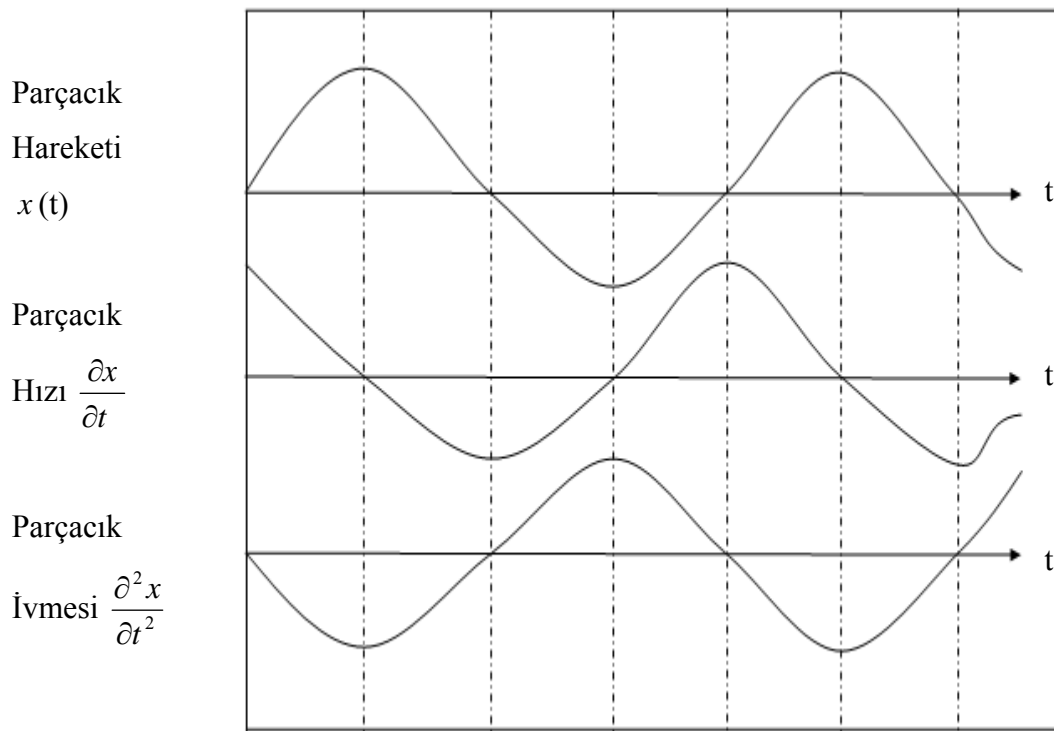
Bir ortam içinde mekanik bir titreşim kaynağı bulunduğu zaman ortaya çıkan enerji kaynaktan dışarı doğru her yönde yayılır. Bu yayılış esnasında ortamda kalıcı bir bozulma olmamasına rağmen enerji dalga denklemi denen bir diferansiyel denklem ile belirlenir. Bu denklem basit harmonik salınım denklemi ile ifade edilir [34].

Basit harmonik salınım; basit harmonik hareket periyodik hareketin özel bir halidir ve titreşen nokta yerdeğiştirme ile orantılı bir ivme ile hareket eder. Noktanın harekete başladığı merkezden uzaklığını  $x$  ile gösterirsek, basit harmonik hareket aşağıdaki diferansiyel denklem ile gösterilir.

$$\frac{\partial^2 x}{\partial t^2} = -\omega^2 x \quad (2.1)$$

$$x = x_1 \cos(\omega t) + x_2 \sin(\omega t) \quad (2.2)$$

Buradaki  $\omega$  orantı katsayısıdır ve negatif işaret ivmenin yerdeğiştirmeye ters yönde olduğunu belirtir. Tanecik hareketi ve yerdeğiştirmenin zamanın bir fonksiyonu olarak değişimi Şekil 2.3.'te verilmiştir.



Şekil 2.3. Basit harmonik salınımın tanecik hareketinin zamana bağlı yerdeğiştirme hız ve ivme grafiği [34]

### 2.3. Dalga Yayılma Prensipleri

Sabit bir hızla bir doğru boyunca yayılan tek boyutlu bir dalgayı düşünebilmek nispeten kolaydır. Bununla birlikte heterojen bir ortamda yayılan iki ve üç boyutlu dalgaların yayılma mekanizması oldukça karışıktır. Her ne kadar dalga denkleminin çözümü hareketin matematiksel ifadesini verirse de karmaşık durumlarda dalganın

nasıl yayıldığını anlayabilmek ve canlandırabilmek için bazı prensipler ortaya konulmuştur.

### **2.3.1. Huygens prensibi**

Bu prensibe göre dalga cephesi üzerindeki her nokta ikinci bir kaynak olarak düşünülebilir. Bu ikincil kaynaklardan yayılan dalgaların dalga cephelerinin zarfı ilk dalganın belirli bir zaman sonraki durumunu belirler. Huygens'in dalga yayılımına göre ikincil dalgacıkların zarf yüzeyine değdikleri noktalar dışında uyarı sıfır olur.

Yansıma, kırılma ve difraksiyon (saçılma) nedeniyle dalganın yayılma doğrultusundaki değişimi bu prensipten yararlanılarak bulunabilir. Böylece her an için dalga cephelerinin bilinmesi ile dalganın yayılımı tam ve doğru olarak tanımlanmış olur. Gerçekte dalga cephesi üzerindeki her nokta dalga cephesine dik doğrultuda ilerler. İlerleyen dalga cephesine daima dik kalan çizgiler ışın (yörünge) olarak adlandırılır. Dalga hareketini ilerleyen dalga cephesi yerine ışınlarla açıklamak daha uygundur.

Homojen bir ortamda ışınlar düz bir çizgi olmasına rağmen homojen olmayan ortamlarda eğriseldirler. Işın yolunun geometrik şeklinin anlaşılması sismolojik çalışmalarda zaman-uzaklık eğrilerinin yorumlanmasında faydalı olmaktadır [34].

### **2.3.2. Fermat prensibi**

Fermat prensibine göre; ışığın tercih ettiği bir yörünge boyunca üzerinde geçmesi için gereken zamandan daha küçüktür. Bu prensibe göre bir dalga geçiş zamanı minimum olan yörüngeyi izleyerek gelir. Hız dağılımı verilen ortamda Fermat prensibi kullanılarak dalga yörüngesinin geometrik şeklini belirlemek mümkündür.

Bu prensibin bir sonucu olarak; homojen bir ortamda yayılan bir dalganın dalga yörüngeleri doğru çizgilerdir. Yansıma ve kırılma yasalarının Fermat prensibinin bir sonucu olduğu gösterilebilir [35].

### 2.3.3. Snell yasası

İlk olarak ışığın davranışı ve geometrisinin açıklanması amacıyla uygulanmıştır. Burada temel kural ışığın az yoğun ortamdan çok yoğun ortama, çok yoğun ortamdan az yoğun ortama geçişlerde sergilediği davranışı açıklayabilmektedir. Bu yasaya göre kaynaktan çıkan ışınlar ya arakesitte yansiyarak yüzeye çıkacaklar, ya da kritik açıyı yakalayıp sismik kırılmayı gerçekleştireceklerdir [34].

Farklı türdeki sismik dalgalar yerin iç yapısından hareket ederken farklı özellikteki katman sınırlarında kırılır ve yansımaya uğrarlar ve yeryüzüne farklı yollardan ulaşırlar. Bu kırılma ve yansımalarla ilgili olarak XX. yüzyılın başında yapılan araştırmalar yerin yapısının katmanlı olduğunu ortaya çıkarmış ve her katmanın kendine özgü soğrulma niteliklerine sahip olduğunu göstermiştir.

Her bir kaynaktan alıcıya (jeofona) en çok üç farklı yoldan sismik dalga gelebilir.

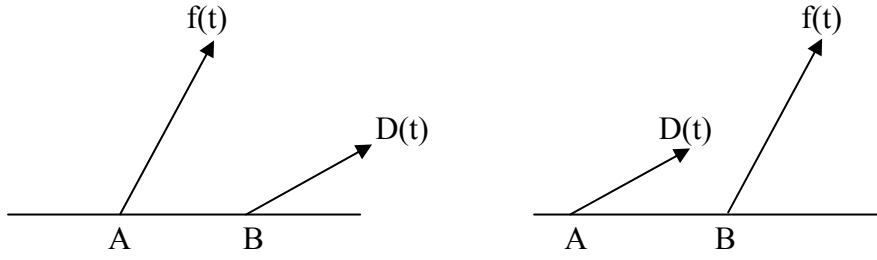
Bunlar:

- 1) Doğrudan gelen dalga
- 2) Yansiyıp gelen dalga
- 3) Kırılıp gelen dalga

Bu farklı yollardan gelen dalgaların alıcı ile kaynak arasındaki uzaklığı değiştirilerek ya da çok sayıda alıcı kullanılarak çeşitli geometrik sistemlerle incelemek mümkündür [34].

### 2.3.4. Tersinirlik prensibi

Bir ortam içerisinde A noktasına uygulanan  $f(t)$  kuvveti aynı ortam içindeki ikinci bir B noktasında  $D(t)$  yerdeğiştirmesine neden olursa  $f(t)$  kuvvetinin B noktasına uygulanması ile A noktasında aynı  $D(t)$  yerdeğiştirmesi meydana gelir (Şekil 2.4.). Bu prensibe göre kaynak ile alıcının yerleri karşılıklı olarak yer değiştirirse dalga yörüngesinin özellikleri aynı kalır.



Şekil 2.4. Tersinirlik prensibinde uygulanan kuvvet  $f(t)$  ile meydana getireceği yerdeğiştirme  $D(t)$  arasındaki ilişki [34]

Tersinirlik prensibi sınırları keyfi olarak seçilebilecek elastik bir ortama homojen ve izotrop olmasa bile uygulanabilir. Bu prensip kullanılarak sismik kaynağın derinliği arttıkça oluşacak yüzey dalgasının zayıflayacağı söylenebilir.

### 2.3.5. Süperpozisyon prensibi

Süperpozisyon prensibinin uygulanmasına örnek olarak aksi yönde yayılan iki harmonik dalgadan durağan bir dalga oluşturulması gösterilebilir. Bu prensibin esası dalga denkleminin lineer olmasından kaynaklanır. Süperpozisyon prensibinin diğer bir uygulaması genlikleri farklı fakat frekansları birbirlerine yakın olan iki basit harmonik salınım girişimidir.

Girişim; dalga yörüngeleri çakışan iki veya daha fazla dalga dizisi süperpozisyon prensibine göre toplanır. Bu toplama işlemi sonucu fazları aynı olan noktalarda genlikler artar. Genliğin artması birleşen dalgalar arasındaki faz farkına bağlıdır. Dalgalar aynı fazda oldukları zaman (faz farkı sıfır) yapıcı girişim, aynı fazda olmayıp aralarında  $\pi$  kadar faz farkı varsa bozucu girişim elde edilir.

İki basit harmonik hareketin denklemi;

$$q_1 = a_1 \sin(\omega_1 t) \quad (2.3)$$

$$q_2 = a_2 \sin(\omega_2 t) \quad (2.4)$$

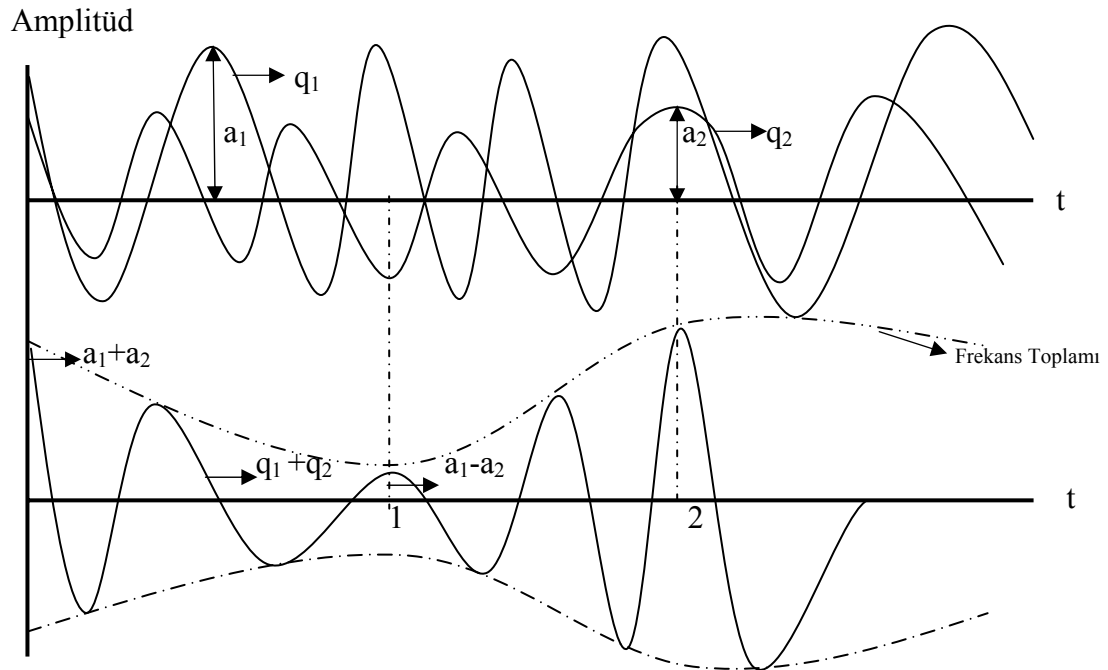
olduğunu kabul ederek,

$q_1 + q_2 = a \sin(\omega_1 t - \delta)$  yazar ve  $\sin(\omega_1 t)$  ve  $\cos(\omega_1 t)$  'nin katsayılarını eşitlersek

$$a^2 = a_1^2 + a_2^2 + 2a_1 a_2 \cos(\omega_1 - \omega_2)t \quad (2.5)$$

$$\delta = \frac{a_2 \sin(\omega_1 - \omega_2)t}{a_2 \cos(\omega_1 - \omega_2)t + a_1} \quad (2.6)$$

elde edilir. Burada  $\delta$  faz açısını ifade etmektedir. Bu şekilde elde edilen hareket harmonik olmayan, dairesel frekansı  $\omega$  ve zamanla değişen genliği  $a$  olan bir salınımdır. Süperpozisyon prensibinin bir sonucu olarak birleşen dalgalar birbirlerini etkilemezler. Örneğin aynı ortamda yayılan iki dalgadan her biri sanki ortamda yalnız başına yayılıyormuş gibi davranacaktır (Şekil 2.5.).



Şekil 2.5. Farklı frekans ve genliklere sahip olan iki basit harmonik salınımmın girişimi [34]

## 2.4. Sismik Dalga Türleri

Herhangi bir zemin ortamında sismik dalga yayılırken dalganın zemin ortamında geçtiği kısımlarda bazı değişimler olur. Bu değişimlerin türü ve miktarı büyük

ölçüde dalganın enerji içeriğine ve ortamın fiziksel özelliklerine bağlıdır. Bir sismik dalganın geçişi nedeniyle bir ortamda meydana gelen ana değişim türleri;

- 1) İç kuvvetlerin yeniden düzenlenmesi,
- 2) Geometrik şekil değişimleridir.

Bu iki ana değişim ile ilgili durumları zeminin elastisite teorisi açıklar [30]. Zemin ortamı için gerçekleştirilen gerilme-deformasyon analizinden elde edilen sonuçlar deformasyonun iki tür gerçekleştiğini ortaya koymaktadır. Bunlardan birisi öteleme, diğeri ise dönmedir. İlk tür; yani öteleme veya hacim deformasyonu “boyuna dalgalar”, ikinci tür; yani kayma deformasyonu ise, kayma dalgası diye adlandırılır. Bu iki dalga türü sınırsız homojen bir ortamda yayılan dalgalar grubundaki cisim dalgalarına mensupturlar.

#### **2.4.1. Cisim dalgaları**

İki tektonik levha birbirlerine göre aniden hareket edince, odaktan yeryüzüne cisim dalgaları denilen iki çeşit dalga dairesel olarak yayılmaya başlar. Sismik dalgaların tümünün çıkış kaynağı cisim dalgalarıdır [33].

Elastik bir ortamda dinamik etkinin yayılması dalga hareketi şeklinde oluşur. Bu hareket sırasında yayılmaya ilk başlayanlar cisim dalgaları yani P- basınç dalgası ve S- kayma dalgasıdır.

##### **2.4.1.1. P- basınç dalgaları**

Bu dalga türü “kompresyonal” veya “primer” (ilk) dalga olarak da bilinirler. P dalgaları boyuna olup basınç dalgaları olarak bilinir ve geçtikleri ortamda önce sıkışma sonra genişleme meydana getirirler. Ses dalgalarına benzerler ve bu dalgalardan etkilenen bir parçacık titreşimi dalga ilerleme yönüne paraleldir. Bu dalgalar ses dalgalarında olduğu gibi katı ve sıvı ortamdan geçebilir. Bu durumda yayılan bozulma kübik deformasyon veya hacim deformasyondur. P dalgasının yayıldığı yörünge boyunca tekrarlayan sıkışma ve genişleme bölgeleri bulunur (Şekil



2.6.) [32]. Ortam içinde taneciklerin titreşim hareketleri dalga yörüngesi boyuncadır. P dalgası bir ortam içinde en hızlı yayılan dalgadır. Bu nedenle normal şartlarda deprem sismograflarında ilk kayıt edilen dalgalardır [34]. Sismik yansıma ve kırılma etütlerinde çoğunlukla karşılaşılan bu dalgaların hızı “ $c_p$ ” ile gösterilir ve aşağıdaki formül ile hesaplanır [36].

$$c_p^2 = \frac{(1-\nu)E}{(1-2\nu)(1+\nu)\rho} \quad (2.7)$$

Burada;

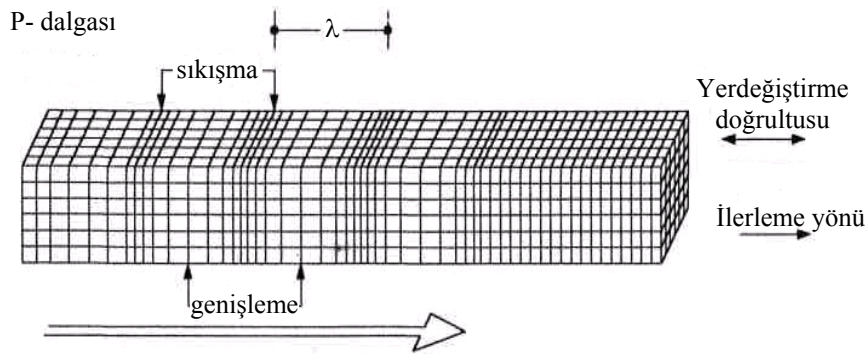
$c_p$  : P dalgası hızı,

$\nu$  : Poisson oranı,

$\rho$  : Zeminin yoğunluğu,

$E$  : Elastisite modülüdür.

Jeolojik bir yapı olan zemin basınçta daha rijit olduğundan P dalgaları diğer dalgalardan daha hızlıdır ve dolayısıyla da kayıt istasyonuna ilk olarak bu dalgalar ulaşır. P dalgalarının hızı, dalganın yayıldığı ortamın rijitliğine, yoğunluğuna ve elastik özelliklerine göre değişim gösterebilmektedir.

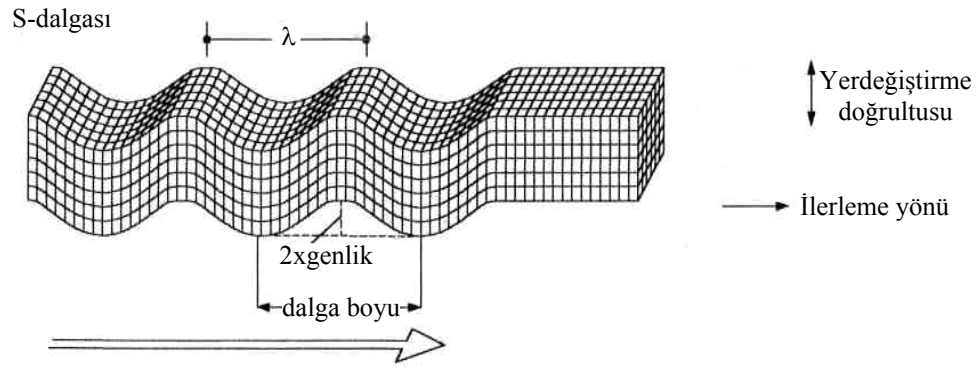


Şekil 2.6. P- basınç dalgası yayılma şekli [32]

#### 2.4.1.2. S- kayma dalgaları

Bu durumda yayılan deformasyon kayma deformasyonu veya şekil değiştirme deformasyonudur. S dalgası tarafından geçilen ortamda bir hacim değişikliği gerçekleşmez. Kayma deformasyonu sonucu tanecikler dalganın yayılma

doğrultusuna dik yönde titreşirler. Bu karakteri nedeniyle bu dalgalara “kayma” ya da “enine dalgalar” da denir. Yerdeğiştirmeler yayılma doğrultusuna dik olarak meydana gelir (Şekil 2.7.) [32]. Bu dalgaların yayılışında elastik ortamda kayma gerilmeleri meydana gelir.



Şekil 2.7. S-kayma dalgası yayılma şekli [32]

Bu tür dalgalar rijitliği olmayan sıvı ortamlarda yayılamazlar. İlk hissedilen dalga, yayılma hızı  $c_p$  nin daha büyük olması nedeniyle P-dalgasıdır. P-dalgası yıkıcı özellikte olmayıp daha sonra gelen ikinci dalga S-dalgası yapıyı etkileyen dalgadır (Şekil 2.8.). İki dalganın geliş süreleri arasındaki fark iki bakımdan önemlidir:



Şekil 2.8. Bir sismografda görülen tipik deprem dalgaları [37]

- 1) Depremin odak noktasının analitik olarak belirlenmesi,
- 2) Hayati önem taşıyan elektrik santralleri ve doğal gaz dağıtım merkezlerinde enerjinin kesilmesi açısından gerekli bir zaman aralığı oluşturması [37].

P dalgalarında olduğu gibi S dalgalarında da hız, yerin derinliğine doğru inildikçe artmaktadır. Çünkü etkili oldukları bölge yerin sığ olmayan derinlikleridir, sismik dalgalar odak merkezinden uzaklaştıkça genlikleri azalır. S dalgalarının hızı  $c_s$  aşağıdaki formülle bulunabilir [36];

$$c_s^2 = \frac{E}{(1+\nu)\rho} \quad (2.8)$$

Burada;

$c_s$  : S dalgası hızını,

$\nu$  : Poisson oranını,

$E$  : Elastisite modülünü,

$\rho$  : Kütle yoğunluğunu, ifade etmektedir.

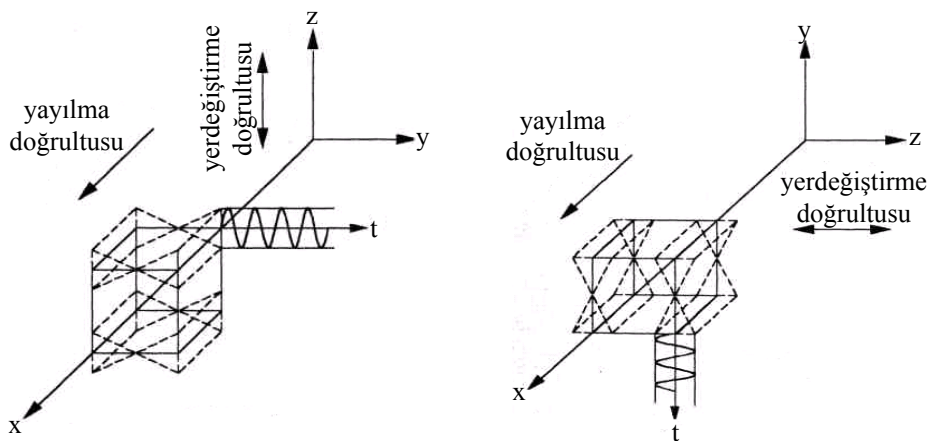
Yukarıdaki eşitliklerde iki dalga yayılma hızları arasında;

$$c_p/c_s \approx \sqrt{3} \quad (2.9)$$

$$c_s \approx 6c_p \quad (2.10)$$

$$\frac{c_p^2}{c_s^2} = \frac{2(1-\nu)}{1-2\nu} \quad (0 \leq \nu \leq 0.5) \quad (2.11)$$

ile ifade edilen bir oran vardır. Burada  $c_p > c_s$  olduğu görülmektedir. Bu iki dalganın yayılması ortamın sınırlarından bağımsız olarak ortam içinde meydana geldiği için bu dalgalar, cisim dalgaları olarak adlandırılmışlardır [36]. Bu dalga hareketinin özel olarak yatay ve düşey düzlemde meydana gelmesi durumlarında düşey kayma dalgası (SV-dalgası) (Şekil 2.9. (a)) ve yatay kayma dalgası (SH-dalgası) (Şekil 2.9. (b)) oluşmaktadır.

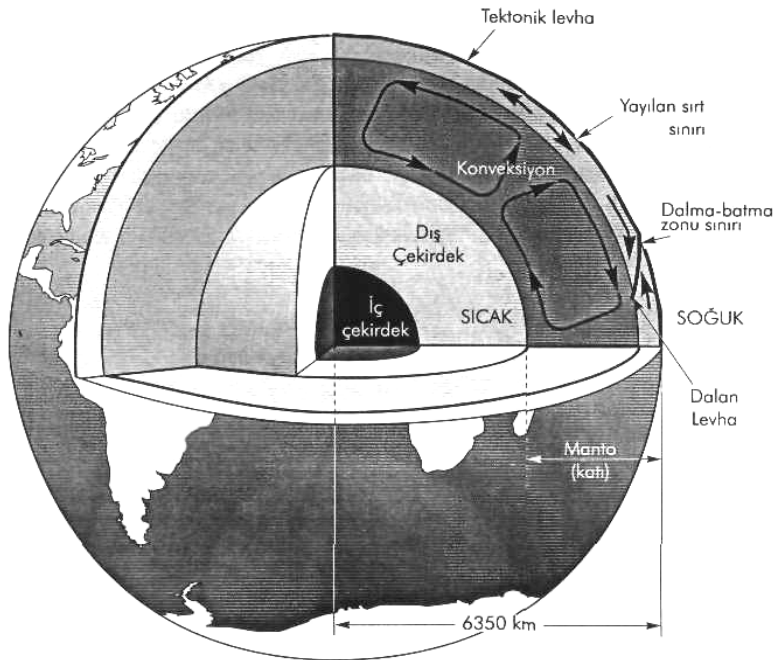


Şekil 2.9. SV-dalgası ve SH-dalgası yayılma şekli [3]

## 2.4.2. Yüzey dalgaları

Yerküre sonsuz olmayan ve dış yüzeyinde gerilmelerin oluşmadığı çok büyük bir küredir (Şekil 2.10.). Mühendislik açısından yüzeğe yakın problemlerin analizinde yerküre çoğu zaman düzlemsel bir serbest yüzeğe ile birlikte yarı sonsuz bir ortam olarak modellenmektedir. Bu tür modellemeler ve çözümler, hareketi serbest yüzeğe yakın sığ bir tabakada yoğunlaşmış dalgaları yani yüzeğe dalgalarını tanımlamaktadır [33].

Yüzeğe dalgaları yer yüzeyi ve yüzeğedeki katmanlar ile cisim dalgaları arasındaki etkileşim sonucu ortaya çıkar. Bu dalgalar, genlikleri kabaca derinliğe göre üssel olarak azalan şekilde yer yüzeyinde ilerler [33].



Şekil 2.10. Yerküre ve yerin içyapısı [33]

Yüzeğe dalgaları titreşim kaynağından çok uzak mesafelerde daha baskın olmaktadır. Titreşim kaynağından uzak mesafelerde en büyük yer hareketinin oluşmasında cisim dalgalarından daha çok yüzeğe dalgaları rol oynamaktadır. Mühendislik açısından en önemli olan yüzeğe dalgaları Rayleigh dalgaları ve Love dalgalarıdır. P dalgaları ve S dalgalarının yer yüzeyi ile etkileşiminden oluşan Rayleigh dalgalarında partikülün yatay ve düşey yönlerin ikisinde de hareket etmesi söz konusudur. Love dalgaları S

dalgalarının yumuşak çökellerle etkileşimi sonucu ortaya çıkar ve bunlarda partikül titreşiminin düşey bileşeni yoktur [38].

#### 2.4.2.1. Rayleigh dalgaları

Bu dalga türü yarı sonsuz bir ortamın serbest yüzeyinde gelişir. Artan derinlikle dalga genliği süratle azalır. Zeminde yayılan deformasyon dilatasyon ve kayma gerilmelerinin karışımıdır. Dilatasyon gerilmesi; birim hacimdeki hacimsel değişikliktir. Tanecik hareketi yayılma doğrultusunu içinde bulunduran düşey bir düzlem içerisinde olup ters yönde eliptik bir yörünge çizer (Şekil 2.11.). Elipsin dalganın yayılma doğrultusuna paralel olan küçük eksenini düşey olan büyük eksenin üçte ikisi kadardır. Rayleigh dalgası aşağıda ifade edilen  $c_r$  hızı ile yayılır [36];

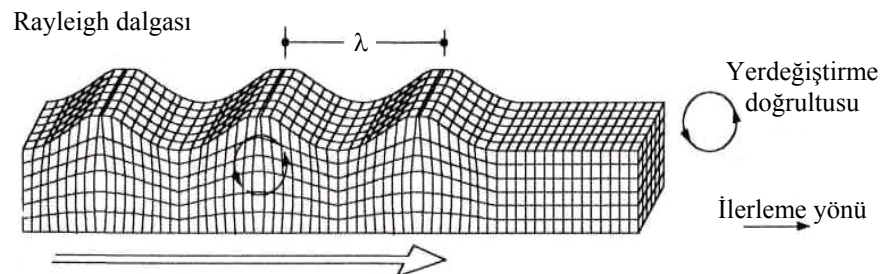
$$c_r = 0,92c_s \quad (2.12)$$

Burada;

$c_r$  : Rayleigh dalgasının yayılma hızını,

$c_s$  : Aynı ortamdaki S-dalgası hızını ifade etmektedir.

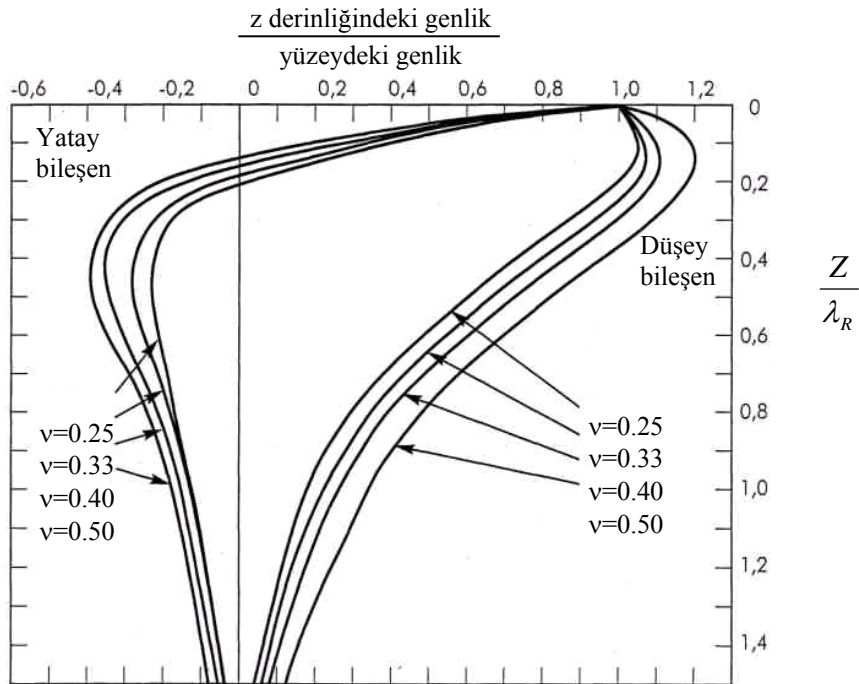
Yarı sonsuz ortamın üstünde daha düşük hızlı bir yüzey tabakası bulunduğu zaman Rayleigh dalgaları normal dispersiyon gösterir. Daha büyük periyodlu bileşenler daha hızlı yayılır. Bunun sonucu dalga dizisinin başlangıcından sonuna doğru genel bir periyod küçülmesi görülür.



Şekil 2.11. Rayleigh dalgasının oluşturduğu deformasyonlar [33]

Bu dalgaları diğerlerinden ayıran en önemli fark titreşim genliklerinin derinlikle hızla azalmasıdır. Bu tip dalgalar yarı sonsuz ortamın sığ bir bölgesi boyunca yüzeye paralel olarak yayılırlar. Rayleigh dalga hareketinin titreşim genliklerinin derinliğe göre değişimi poisson oranına bağlı olarak farklılık göstermektedir (Şekil 2.12.). Bu tür dalgalar dalga yayılma doğrultusunda S dalgalarından biraz daha yavaş hareket ederler. Dalga yüzeye yakın derinlikte ilerlerken çevrimsel bir hareket meydana getirir. Titreşim kaynağından olan uzaklık yaklaşık olarak mevcut dalga boyunun iki katını aştığında yüzey dalgalarının etkisi önem kazanmaktadır. Geçmişte ve yakın zamandaki depremlerin üst yapılarda oluşturduğu hasarların büyük bir bölümüne yeryüzünün serbest yüzeyindeki yer hareketinin neden olması geoteknik deprem mühendisliği açısından Rayleigh yüzey dalgalarının ilerleme hızının önemini artırmıştır. Yüzeye yakın zemin titreşim problemlerin analitik ifadelerinde bu dalgaların mekanik olarak oluşturulmasının kolay oluşundan tercih edilmektedir.

Yayınım doğrultusu soldan sağa olduğunda parçacık hareketi saat yönünün tersidir. Yörünge uzun ekseninde düşey olan bir elips olduğundan bu tür dalgalar P ve S dalgalarının bileşkesi gibi düşünülebilir. Sismik yansıma kayıtlarında görülen zemin dalgalanması adı (ground roll) verilen gürültüleri oluşturan dalgalardır [34].

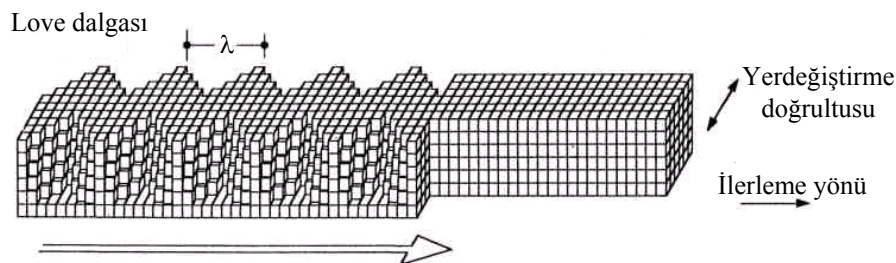


Şekil 2.12. Rayleigh yüzey dalgalarının poisson oranına bağlı olarak yatay ve düşey hareketi [33]

Şekil 2.12.'de görüldüğü gibi düşey yer değiştirme en büyük değerine ulaştığında yatay yer değiştirme sıfır olmaktadır. Aynı şekilde düşey titreşim genliğinin kohezyonsuz bir zeminde ( $\nu=0.25$ )  $z/\lambda_R=1$  olduğu derinlikte serbest yüzeydeki genliği %20 değerine ulaşmaktadır. Buradan da anlaşılıyor ki  $Z/\lambda_R=2$  olduğu derinlikte düşey titreşim meydana gelemeyecek nitelikte olacaktır. Dalga hareketinin düşey yer değiştirme bileşeni derinlikle sürekli azalırken yatay yer değiştirme bileşeni  $Z/\lambda_R=0.2$  değerinde sıfır değerini almaktadır [3].

#### 2.4.2.2. Love dalgaları

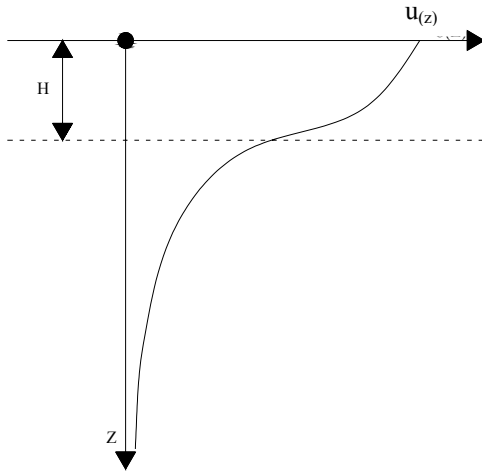
Yarı sonsuz ortamın üstünde bulunan düşük hızlı bir tabaka içinde gelişen diğer bir yüzey dalgası türüdür. Tanecik hareketi yatay düzlemde olup yayılma doğrultusuna diktir (Şekil 2.13.). Bu dalga türü yüzey tabakasının alt ve üst sınırlarında tekrarlı yansımalarla yayılır. Tabakalı ortamlarda oluşan Love dalgaları daima dispersiyon gösterirler [39]. Farklı frekanstaki (farklı dalga boyundaki) dalgaların farklı hızlarda yayılması olayı dispersiyon olarak adlandırılmaktadır. Bu sebepten dolayı Love dalgaları dispersif, yarı sonsuz ve homojen ortamda Rayleigh dalgaları ise dispersif değildirler. Love dalgasının yayılma hızı, cisim dalgalarının ve Rayleigh dalgalarının aksine dalga boyuna bağlıdır. Değeri, üst tabaka ile alttaki ortamın kayma dalga hızları arasında bulunur. Yayılma hızları; çok kısa dalga boyları için yüzey tabakasında, çok uzun dalga boyları için ise ortam içerisinde S-dalgası hızına yaklaşır. Tanecik titreşiminin genliği zemin ortamındaki artan derinlik ile süratle azalır [33].



Şekil 2.13. Love dalgası yayılma şekli [33]

Hareketin düşey bileşeni bulunmadığından Love dalgaları jeofonlarda ve diğer düşey bileşen sismograflarında kaydedilmezler.

Homojen elastik yarı sonsuz bir ortamda sadece S, P ve Rayleigh dalgaları bulunabilir. Ancak yarı sonsuz bir ortamın kendinden daha düşük cisim dalgaları iletme hızına sahip bir katman ile örtülmesi halinde Love dalgaları gelişebilir. Bu dalgalar yüzey katmanları içinde çoklu yansımalar vasıtasıyla kaplanmış SH dalgalarından oluşur. Love dalgası hızları yarı sonsuz ortamın (çok düşük frekanslardaki) S dalga hızı ile yüzey katmanının (çok yüksek frekanslardaki) S dalga hızı arasındadır (Şekil 2.14.) [33].



Şekil 2.14. Love dalgalarında partikül yerdeğiştirme genliğinin derinlikle değişimi [33]

## 2.5. Sismik Dalgaların Yayılması

Sismik dalgalar kaynaktan uzaklara doğru bölüm 2.3.'te "Dalga Yayılma Prensipleri" bölümünde anlatılan prensiplere uygun olarak yayılırlar. Dalga türü, hızı ve yayılma istikameti ortamın fiziksel özelliklerine ve boyutlarına göre değişir. Dalga yayılması için en basit ortam homojen, izotrop ve tam elastik bir modelde dalgalar doğrusal yörüngeler boyunca sabit hızla yayılırlar [39].

Tabiatta ortam sınırlı olup çoğunlukla fiziksel özellikleri birbirinden farklı tabakalardan oluşur. Bu şartlarda sismik dalga sınıra her gelişinde değişikliklere uğrar. Dalga bir tabakadan diğerine geçtikçe dalga hızı, yayılma istikameti, spektral yapısı ve enerji muhtevası değişir. İlave olarak, sınırlarda yeni dalga fazları



oluşabilir. Zemin ortamında yayılan dalganın davranışı aşağıda ana hatlarıyla açıklanmaktadır.

### 2.5.1. Yansıma

Bir düzlem sınırına gelen sismik dalga kısmen yansır, kısmen de ikincil ortama iletilir. Sınırın iki tarafındaki ortamların hızları ve yoğunlukları farklı ise yansıma oluşabilir (Şekil 2.15.). Yansımayı ifade eden önemli parametrelerden biri olan akustik empedans ( $\check{z}$ ), hız ile yoğunluğun çarpımı olup bu iki parametrenin birleşik etkisini ifade eder.

$$\check{z} = \rho \times c \quad (2.13)$$

Burada;

$\check{z}$  : Akustik empedansı,

$c$  : Aynı ortamdaki dalga hızını,

$\rho$  : Ortamın yoğunluğunu, ifade etmektedir.

Akustik empedans farkı büyüdükçe yansıma da o denli kuvvetli olur. Sınırın iki tarafında hızlar ve yoğunluklar farklı olsalar bile “ $\check{z}$ ” değeri farklı değilse sınırda yansıma oluşmaz.

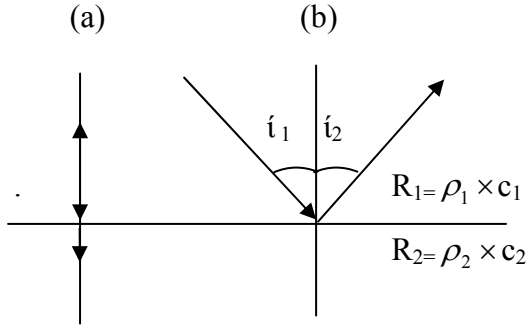
Bir düzlem sınırına dik olarak gelen, yani geliş açısı sıfır olan P-dalgası göz önüne alındığında enerjinin bir kısmı yansıyarak geri dönecektir (Şekil 2.15. (a)). Yansıyan dalganın genliğinin gelen dalganın genliğine oranına “yansıma katsayısı” denir. Aşağıdaki formül ile ifade edilir;

$$R = (\check{z}_2 - \check{z}_1) / (\check{z}_2 + \check{z}_1) \quad (2.14)$$

$$R = (\rho_2 \times c_2 - \rho_1 \times c_1) / (\rho_2 \times c_2 + \rho_1 \times c_1) \quad (2.15)$$

Bir düzlem sınırına eğik geliş halinde ise durum daha karışıktır. Eğik bir yörünge ile sınıra gelen P-dalgası için sınırda hem yatay hem de düşey tanecik hareketi vardır. Yatay bileşen kırılan ve yansıyan kayma dalgalarını oluşturur (Şekil 2.15. (b)).

P-dalgasının kendisi hem yansır hem kırılır. Bu nedenle eğik geliş halinde “R” hem geliş açısına hem de akustik empedansa bağlıdır. Literatürde geliş açısının bir fonksiyonu olarak yansıma katsayıları, çizelgeler ve grafikler halinde verilir.



Şekil 2.15. Bir sınıra gelen dalganın yansıma şekli (a)Normal geliş (b)Eğik geliş hali [34]

### 2.5.2. İletim (Kırılma)

İletim terimi dalga yayılımında enerjinin sınırı geçtiği durumu açıklamak için kullanılır. Sınırdaki yansıyan enerjinin miktarı yansıma katsayısı ile belirlenir, gelen dalga enerjisinden kalan kısım ikinci ortama iletilir. İletim katsayısı, iletilen dalganın genliğinin gelen dalganın genliğine oranı olarak tanımlanır [34]. Normal geliş için geliş-dönüş iletim katsayısı ( $T_r$ ) aşağıdaki formül ile hesaplanır.

$$T_r = 4z_1 \times z_2 / (z_1 + z_2)^2 \quad (2.16)$$

$$T_r = \frac{4\rho_1\rho_2 \times c_1c_2}{(\rho_1c_1 \times \rho_2c_2)^2} \quad (2.17)$$

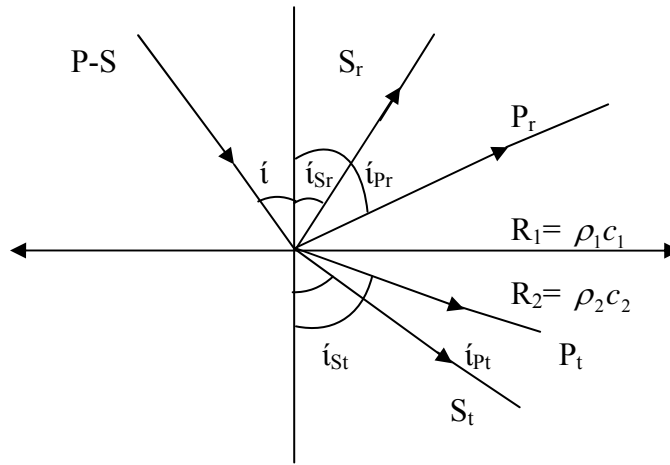
$T_r$  (iletim) katsayısı ile yansıma katsayısı  $R$  arasında aşağıdaki bağıntı vardır.

$$T_r = 1 - R^2 \quad (2.18)$$

Dalga yayılımında farklı ortama giren dalganın yayılma istikameti değiştiği zaman iletim “kırılma” diye adlandırılır. Bu durum dalganın eğik geliş halinde ortaya çıkar. Kırılmanın derecesi (yani yörüngenin bükülme derecesi) iki ortam arasındaki hız farkına bağlı olup yansıma da olduğu gibi akustik empedans farkına bağlı değildir.

İkinci ortamın hızı birinciden büyük olduğu zaman kırılan dalga normalden uzaklaşır, aksi halde ise normale yaklaşır. Bir sismik dalga Snell kanununa uyarak kırılır.

Kaynaktan çıkarak sınıra gelen bir sismik dalganın kırılması durumunda yeni dalga fazları oluşur. Böylece yoğunlukları farklı iki ortamı ayıran sınırdaki dört adet dalga fazları gelişir. Bunlar yansıyan P, S dalgaları ( $P_r$ ,  $S_r$ ), diğeri ise kırılan P ve S dalgalarıdır ( $P_t$ ,  $S_t$ ) (Şekil 2.16.) [34].



Şekil 2.16. Tabakalı bir ortamda yansıyan ve kırılan dalgalar [34]

### 2.5.3. Difraksiyon

Bir engelleyici nedeniyle dalga yörüngesindeki bükülmeye “difraksiyon” denir ve bu engelleyiciden uzaklaşan dalgalara da “difraksiyon dalgaları” denir.

Difraksiyona uğrayan dalganın dalga cephesini çizmek için Huygens prensibinden yararlanılabilir [41]. Bunun için engelleyicinin tüm noktaları ikincil dalgacıklar için nokta kaynaklar gibi düşünülür. Bütün bu dalgaların zarfını oluşturan yüzey difraksiyon dalgasının dalga cephesini belirler. Bütün sismik dalga türleri difraksiyona uğrayabilirler.

Sismik kayıtlarda difraksiyonları diğer dalga fazlarından ayırmak zordur. Bununla birlikte, diğer dalga türlerinden farklı olması itibari ile yayılma zamanının uzun olması difraksiyonun tanınmasında iyi bir kriterdir.

## 2.6. Dalga Yayılma Hızı

Hızın sismik arama faaliyetlerinin her safhasında önemli bir parametre olduğu iyi bilinmektedir. Bir sismik dalganın yayılma istikametini her ne kadar ortamın geometrik durumu kontrol ederse de yayılma hızını kontrol eden ortamın fiziksel özellikleri olan yoğunluk ve elastisitesidir.

Bir sınırdaki yoğunluk ile hız değişimleri bu sınırdaki yansıma ve iletim kalitesini belirler. Yansıma ve iletim katsayılarından (formül 2.14 ve 2.16) bunu hemen görebiliriz.

Hız elastik dalganın türüne ve ortamın fiziksel özelliklerine göre değişir. Verilen bir ortamda P-dalgaları, S-dalgalarından ve Rayleigh dalgalarından hızlı yayılır. Poisson oranının ( $\nu$ ) yaklaşık olarak 0,25 olduğu yer içinde P-dalgası S- dalgasından 1,7, Rayleigh dalgasından 1,9 defa hızlı yayılır. Bu nedenle tipik bir deprem sismografında önce P-dalgaları, sonra S-dalgaları ve daha sonra Rayleigh dalgaları görülür [3].

Her ne kadar hız formüllerinde  $c_p$ ,  $c_s$ ,  $c_r$ 'nin hızlarının yoğunluğunun kare kökü ile ters orantılı olduğunu gösterirse de, hızın yoğunluk ile arttığı gözlenmiştir [40].

Bu ifade şöyle açıklanabilir; malzeme sıkıştıkça yani yoğunluk arttıkça elastiklik yoğunluğunun artış etkisini karşılayacak şekilde artar. Üstteki malzemenin basıncı nedeniyle yeraltındaki kayaçların sıkılığı derinlik ile ve jeolojik yaş ile artar. Bunun sonucu olarak elastisite de artar ve dolayısı ile hız da artar.

## 2.7. Sönümlenme (Atenüasyon) ve Ölçme Yöntemleri

En genel anlamıyla atenüasyon bir dalga enerjisinin çeşitli faktörler göz önüne alınarak belli bir periyotta azalmasıdır. Sönümlenme genel olarak;

- 1) İç sönüm,
- 2) Dış sönüm [41], şeklinde sınıflandırılabilir.

Geoteknikte iç sönüm; yayılan bir dalgacığın tanecikler arasında ısıya dönüşerek ve etkisinin azalarak bitmesidir. Dış sönüm ise, yayılan bir dalgacığın korunacak bir yapıya etkisinin azaltılması amacıyla yapay dalga sönümleyiciler uygulanmasıdır.

Zemin içerisinde yayılan bir elastik dalganın taşıdığı enerji dalga yörüngesi boyunca ilerledikçe azalır. Enerji azalması, kaynağın olduğu kadar ortamın fiziksel özelliklerinin de bir fonksiyondur. Farklı kayıp mekanizmalara bağlı olarak üç ana türde dalga sönümü vardır [34].

### 2.7.1. Geometrik yayılma

Geometrik yayılma etkisi ilerleyen dalganın dalga cephesi kaynaktan uzaklaştıkça genliğin azalmasıdır. Homojen ve izotrop bir ortam halinde kaynaktan çıkan enerji ortamda küresel dalgalar halinde yayılır. Bu durumda, dalga cepheleri yarıçapları gittikçe büyüyen iç içe küre yüzeylerdir. Kırılan dalga uzaklık ile yansıyan veya doğrudan yayılan dalgalara kıyasla daha çabuk sönümlenir.

Yarıçapı “ $r$ ” olan küresel dalga cephesinin birim yüzeyine düşen enerjinin  $e_s$  olduğu kabul edilirse dalga cephesinin tamamı üzerindeki toplam enerji  $E_t$  aşağıdaki formül ile hesaplanır [34].

$$E_t = 4 \pi r^2 e_s \quad (2.19)$$

$E_t$  sabit olduğundan  $e_s$  enerjisi  $r^2$  ile ters orantılıdır.

### 2.7.2. Soğurma (Absorpsiyon)

Jeolojik ortam, elastik ve homojen olmayan tabiatından ötürü içerisinde yayılan dalgaların enerjisini soğurur. Bu özelliklere sahip olan bir ortamda titreşen tanecikler arasındaki sürtünme kuvvetlerinden dolayı dalga enerjisinin bir kısmı ısı haline dönüşür. Ortamın elastik özelliği ne kadar iyi ise enerji kaybı da o kadar azdır. Buna göre iyi sıralanmış ve iyi çimentolaşmış taneciklerden oluşan bir jeolojik ortam,

tanecikleri iyi sıralanmamış ve iyi sıkışmamış bir ortamdan daha az soğurucudur. Bu nedenle, soğurmanın derinlik ile dalga genliğinin azalması beklenir.

Soğurma ve saçılmanın ortak etkisinden ileri gelen sönüm kaynaktan uzaklık ile üstel olarak değişim gösterir. Sismolojide genlik sönüm faktörü  $\bar{a}_r$  şu şekilde hesaplanır [43];

$$\bar{a}_r = a_0 e^{-\alpha r} \quad (2.20)$$

veya,

$$\bar{a}_r = a_0 e^{-\alpha c(t)} \quad (2.21)$$

Buradaki;

$\bar{a}_r$  : Sönüm faktörünü,

$a_0$  : Başlangıçtaki dalga genliğini,

$\alpha$  : Soğurma katsayısını,

$r$  : Dalga yörünge uzunluğunu,

$t$  : Yayılma zamanını,

$e$  : Logaritma tabanını, göstermektedir.

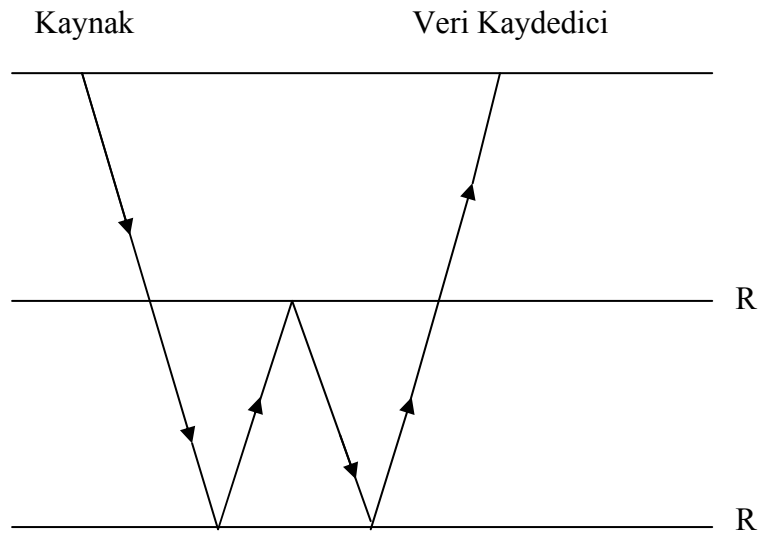
### 2.7.3. Sınırdaki enerjinin paylaşılması

Tam elastik bir ortamda yansıma, kırılma, difraksiyon ve saçılma ile dalga yörüngesinin yön değiştirmesi halinde enerjinin kaybolması söz konusu değildir. Ancak yapılan gözlem çalışmalarına göre, bu olaylar genliğin azalmasına neden olur. Bu nedenle, örneğin sadece yansıma gelişleri ile ilgileniyorsak, kırılma ve saçılma gibi olayları yansıma enerjisini azaltan kaynaklar gibi düşünebiliriz.

Bir sınıra gelen dalğanın enerjisi yansıyan ve kırılan dalgalar arasında paylaşıldığından yansıyarak ve kırılarak oluşan ikincil dalgaların enerjileri gelen dalğanın enerjisinden azdır.

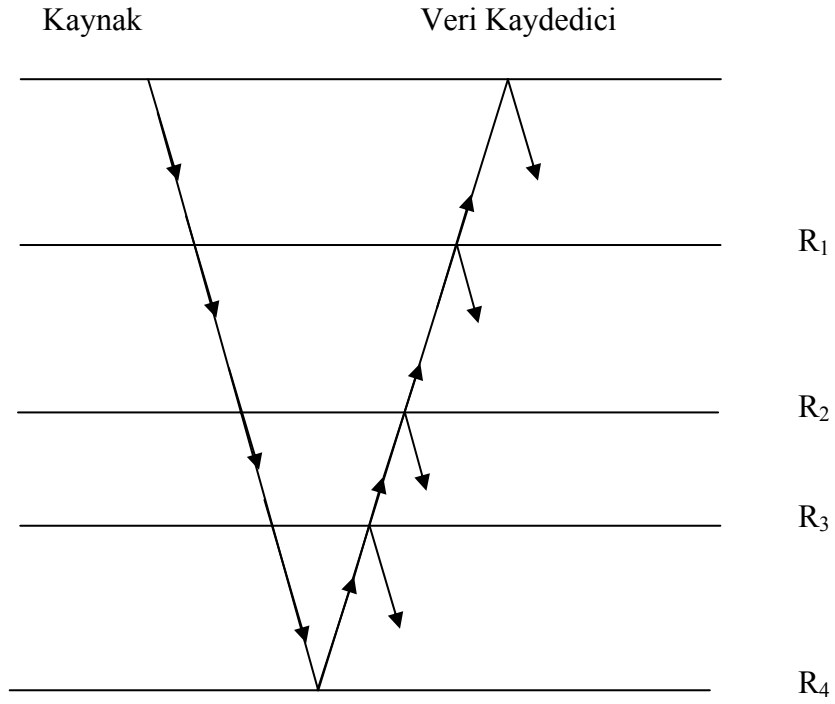
Tekrarlı yansımalarda bu olay her yansımada tekrarlandığından ortam içinde veya yüzeydeki bir noktada gözlenen dalganın zayıflamasına sebep olacaktır. Sınıra gelen bir dalganın enerjisinin sınırda oluşan dalgalar arasında paylaşılmasında önemli rol oynayan faktörler akustik empedans kontrastı ve ortamın homojenlikten ayrılma derecesidir.

Yer içinde bir sınırın sismik enerjiyi yansıtabilme derecesi yansıma katsayısı  $R$  ile verilir. Yansıma katsayısı, sınırın iki tarafındaki malzemenin akustik empedanslarının bir fonksiyonudur.  $R=0,2$  alınırsa (bu aslında büyük bir değerdir) üç defa yansıtılarak yeryüzüne gelen bir dalganın (Şekil 2.17.) genliği  $0,2^3$  kadar azalacaktır [34].



Şekil 2.17. İki tabakalı bir ortamda basit tekrarlı yansıma [34]

Çok tabakalı yarı sonsuz bir ortamda (Şekil 2.18.) sönüm, dalga tarafından geçilen tüm sınırların iletim ve yansıma katsayılarının bir fonksiyonudur. Bu durumda etkili olan yansıma katsayısı  $R$ , dalga tarafından geçilen sınırların yansıma katsayıları cinsinden ifade edilebilir.



Şekil 2.18. Çok tabakalı bir ortamda iletim ve yansımalar [34]

## 2.8. Zemin Dinamik Özelliklerinin Ölçülmesi

Geoteknik mühendisliği, çok değişik yükleme şekli ve pek çok potansiyel yenileme mekanizmasından oluşan çok geniş bir aralıktaki problemleri kapsar ve değişik zemin özellikleri değişik problemler karşısında zemin davranışını etkiler. Pek çok önemli problemde ve özellikle de dalga yayılma etkilerinin egemen olduğu durumlarda zeminde sadece düşük seviyeli birim deformasyonlar oluşmaktadır. Dinamik yüklere maruz kalan zemin davranışı dinamik zemin özellikleri tarafından belirlenmektedir.

Zemin problemlerinin çözümünde dinamik zemin özelliklerinin ölçülmesi çok önemli bir yer oluşturmaktadır. Bu ölçümlerle ilgili değişik arazi ve laboratuvar yöntemleri mevcut olup bunların her birinin farklı problemler açısından birbirlerine karşı üstünlükleri ve sınırlamaları vardır. Bu yüzden dinamik zemin özelliklerinin belirlenmesinde kullanılacak yöntem karar verilirken, üzerinde çalışılan problemin dikkatlice incelenmesi ve anlaşılması gerekmektedir.



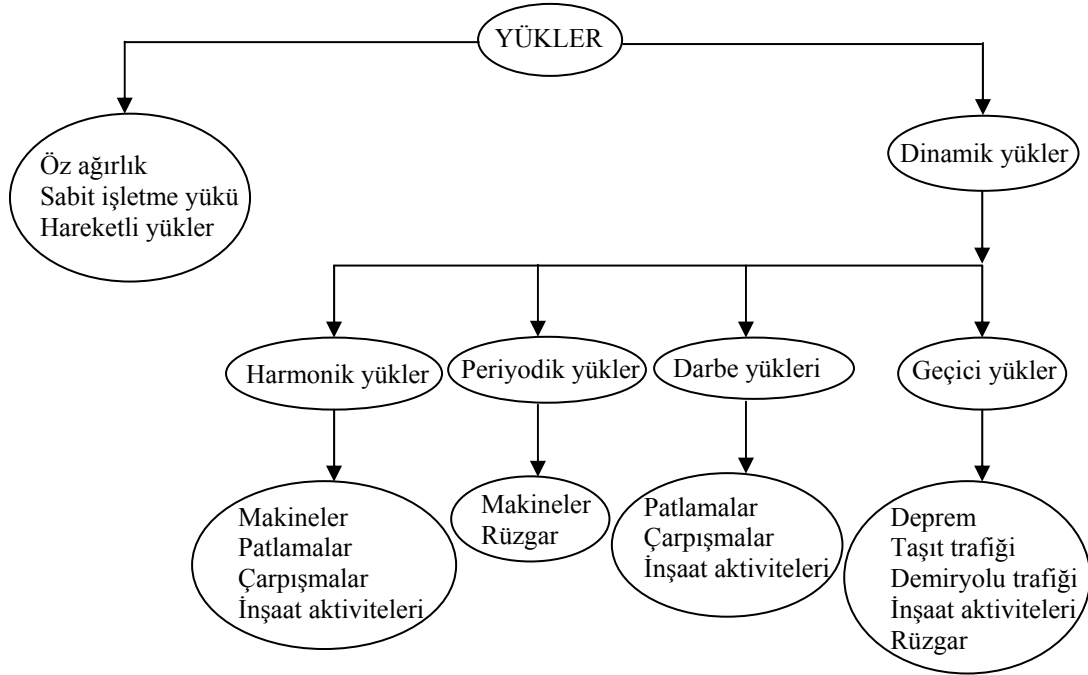
Dalga yayılmasını etkileyen parametrelerin başında malzeme ve radyasyon sönümü, rijitlik, yoğunluk ve poisson oranı gelmektedir [33]. Tekrarlı olarak yüklenen zeminlerde bu özellikler çok büyük önem kazanmaktadır. Bu önemli zemin özelliklerinin laboratuarda ve arazide hangi yöntemlerle ölçüldüğü, bu yöntemlerle hangi parametrelerin belirlenebildiği ve bu ölçüm tekniklerinin ne gibi özelliklerinin olduğu Tablo 2.1.'de karşılaştırmalı olarak gösterilmiştir [3].

Tablo 2.1. Zemin dinamik özelliklerinin ölçülmesi [3]

Yöntemler	Araştırma teknikleri	Ölçülebilir dinamik büyüklükler	Avantajlar	Dezavantajlar
Üç eksenli	Laboratuvar deneyi	$G, \rho, D, v$	Gerilmeye bağlı kayma modülü fonksiyonun belirlenmesi	Örselenmemiş numune ile deney yapılması
Rezonant kolon deneyi	Laboratuvar deneyi	$G, \rho, D, v, c_s$	Gerilmeye bağlı kayma modülü fonksiyonun belirlenmesi	Örselenmiş numune ile deney yapılması
Kuyudan kuyuya sismik	Arazi deneyi	$c_s, c_p$	Kesin değerler	Yüksek maliyet, yeraltı suyu hassasiyeti
Sismik kuyu aşağı ve yukarı	Arazi deneyi	$c_s, c_p$	Kesin değerler	Yeraltı suyu hassasiyeti
Sismik kırılma	Arazi deneyi	$c_s, c_p, \rho, h_i, \alpha_i$	Örselenme olayının gerçekleşmemesi	Basınç dalgasının derinlikle artma zorunluluğu
Sismik yansımaya	Arazi deneyi	$c_s, c_p, \rho, h_i, \alpha_i, T_i, R_i$	Örselenme olayının gerçekleşmemesi, zemin profilinin yüksek derinliklere kadar elde edilmesi	Yüksek teknik ve tecrübeli eleman gerekliliği
Rayleigh dalgası, Love dalgası ve dispersiyon	Arazi deneyi	$c_R, c_s, \rho, G$	Maliyeti düşük, lineer faz farklılıklarının çok kolay elde edilmesi	Modların ayrıştırılmasına ihtiyaç duyulması, lineer faz farklılıklarının her zaman elde edilememesi
Elektrik, manyetik, termal, yer çekimi	Arazi deneyi	$\mu_i, G_i, \rho_i$	Kesin değerler	Hava koşullarına karşı hassas, maliyeti yüksek ve tecrübeli eleman gerekliliği
Mikrotremör	Arazi deneyi	$T, B$	Kesin değerler	Hava koşullarına karşı hassas, maliyeti yüksek ve tecrübeli eleman gerekliliği

## 2.9. Yük Kaynakları ve Etkileri

Yer kürede şekil ve etki bakımından bir birinden farklı yük kaynakları mevcuttur. Bu yükler arasında insanların etkisiyle oluşan yükler, sismik etkiler, doğa etkileri vb. gibi çok farklı yük etkileri sıralanabilir (Şekil 2.19.) [3].



Şekil 2.19. Yük çeşitleri [3]

Yüksek frekansta insan yapısı titreşim kaynaklarının zemin yüzeyinde oluşturduğu kuvvetli yer hareketleri ve yer kabuğundaki doğal sismik sarsıntılar, farklı özelliklere sahip olduklarından alıcılar tarafından değişik şekillerde ve hassasiyette algılanırlar. Dinamik yük üreten kaynaklara ait temel özellikler Tablo 2.2.'de gösterilmiştir.

Tablo 2.2. Farklı dinamik yük durumları için frekans ve genlik aralığı [3]

Dinamik Yük Durumları	Frekans Aralığı [Hz]	Genlik Aralığı [ $\mu\text{m}$ ]
Trafik yükleri	1-80	1-200
Patlamalar	1-300	100-2500
Makine titreşimleri	1-300	100-500
Rüzgâr etkileri	0.1-10	10-10000
Deprem etkileri	0.001-5	10-10000

### 3. ARAZİ UYGULAMALARI

Zemin titreşimlerinin yapılara verebileceği hasarları azaltmak için çeşitli yöntemler kullanılmaktadır. Bu yöntemlerin etkinliği ve uygulanabilirliği dalgaların karakterlerine ve zemin koşullarına bağlıdır [45]. Dinamik yük kaynaklarının ürettiği büyük genlikli yer hareketlerinin önlenmesi veya azaltılabilmesi için titreşim yalıtım araçları ve etkileri ile ilgili literatürde sonlu elemanlar yöntemi, sınır elemanlar yöntemi, sınır integral yöntemi ya da bu tekniklerin ortak kullanımına dayalı birçok sayısal çözüm yaklaşımları, analitik çözüm yolları ortaya konmuştur. Forchab ve Verbic [20] yapı ve zemindeki titreşimleri ve bu titreşimlerin etkilerinin azaltılması için arazi deneyleri yapmışlardır. Bu alanda yalıtım araçları olarak gerek düşey dalga bariyerleri [6, 9, 16], gerek yatay dalga bariyerleri [5, 11] ile ilgili çok sayıda araştırma sonuçları yayınlanmıştır. Fakat parametrik çalışmalar bu alanda oldukça sınırlı kalmıştır. Daha önce yapılan bazı deneysel çalışmaların sonuçları da özel durumlar için yönetmeliklerde yer almış ve faaliyet alanı dar kapsamda tutulmuştur [9]. Gerçekleştirilen bilimsel çalışmalar sonucunda elde edilen sonuçların sayısal analiz ve deneysel çalışma verileri her zaman aynı yada birbirleriyle paralellik arz eden sonuçlar vermemektedir. Bu nedenle uygulamalı arazi çalışmaları, elde edilen verilerin geçerliliğini sağlamak için en olumlu yöntem olmuştur. Ancak mevcut koşullar altında bu karşılaştırmayı yapmak her zaman mümkün olmamaktadır. Bu tez çalışmasında kullanılan zemin parametreleri arazide yapılan sondajlar ile alınan numunelerin laboratuarda analiz edilmesi ile elde edilen verilerden yararlanılmıştır.

### 3.1. Laboratuvar Deneyleri

Deneyel saha çalışmalarının yapıldığı arazinin zemin özelliklerini ve değerlerini elde etmek amacı ile iki ayrı noktada iki adet sandıklı sondaj yapılarak zemin numuneleri alınmıştır (Şekiller 3.1. ve 3.2.). Laboratuvar da bu zemin numuneleri üzerinde zemin sınıflandırma, elek analizi, hidrometre, birim hacim ağırlık, atterberg limitleri ve üç eksenli test deneyleri yapılmıştır. Çalışma sahasının kil, çakıl ve killi-çakıl zemin sınıfları olduğu tespit edilmiştir. Deney sahasında yer altı su seviyesinin 1,8 m olduğu arazi sondaj loglarından elde edilmiştir. Bu çalışmalarda elde edilen verilerin tamamı bir başka çalışmanın konusunu oluşturan sayısal modelleme işlemi aşamalarında kullanılmıştır.



Şekil 3.1. Zemin laboratuvar deneyleri için sondaj çalışması



Şekil 3.2. Sondaj çalışması uç değişimi

Alınan bu numunelere yukarıda sözü edilen zemin laboratuvar deneyleri yapılarak saha profiline ait dinamik parametreler elde edilmiştir (Tablo 3.1.).

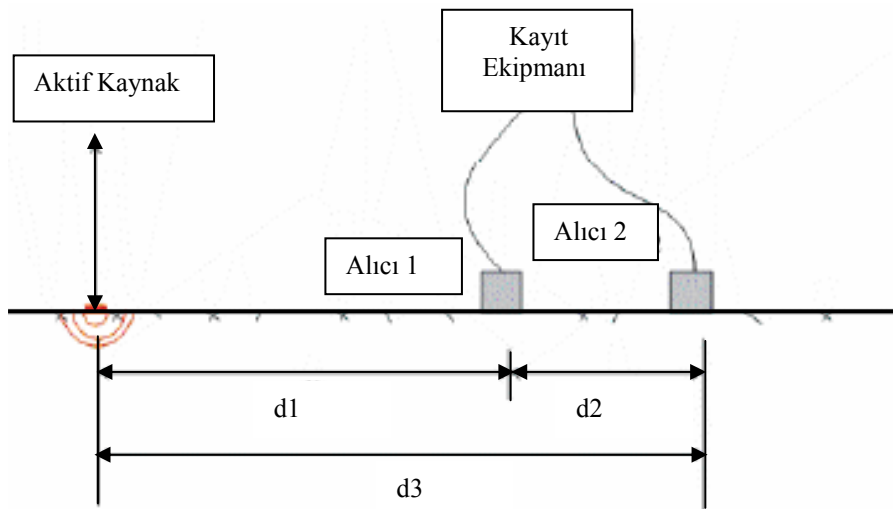
Tablo 3.1. Laboratuvar deney sonuçları

GEOTEKNİK LABORATUVARI DENey SONUÇ ÖZET TABLOSU															
Kuyu No	Örnek No	Derinlik	Elek Analizi		Atterberg Limitleri			Zemin Sınıfı	Su Oranı	Birim Hacim Ağırlık		Üç Eksenli		Hidrometre	
			4 Nolu Elek	200 Nolu Elek	LL	PL	PI			D.B.H.A.	K. B.H. A.	kPa	De rec e	0,07	0.005
			%	%	%	%	%								
SK1	SPT1	1.0–1.45	0	98	42	22	20	CI	32					98	46
	SPT2	2.0–2.45	0	87	27	20	7	CL	32					87	18
	UD1	2.5–3.00	0	85	26	20	6	CL	32	Üç Eksenli Deney Yapılamamıştır				85	16
	SPT3	3.0–3.45	50	21	NP	NP	NP	GM	9						
	SPT4	4.5–4.95	59	5	NP	NP	NP	GW-GM	7						
	SPT5	6.0–6.45	0	84	28	22	6	CL	26					84	14
	SPT6	7.5–7.95	46	6	NP	NP	NP	GW-GM	12						
	SPT7	9.0–9.45	62	5	NP	NP	NP	GW-GM	7						
	SPT8	10–10.45	91	1	NP	NP	NP	GW	4						
SK2	SPT1	1.5–1.95	0	98	39	21	18	CI	28						
	UD1	2.5–3.00	0	95	40	21	19	CI	35	17.77	12.9	27	1		
	SPT2	3.0–3.45	0	93	38	22	16	CI	33						
	SPT3	4.5–4.95	54	5	NP	NP	NP	GW-GM	9						
	SPT4	6.0–6.45	0	88	28	21	7	CL	37					88	18
	SPT5	7.5–7.95	47	21	NP	NP	NP	GM	14						
	SPT6	9.0–9.45	81	6	NP	NP	NP	GW-GM	6						

### 3.2. Arazi Sismik Deneyleri

#### 3.2.1. Yansıma ve kırılma deneyleri

Laboratuar deney çalışmalarının ardından saha zemin profilinin belirlenmesi, tabakaların kayma dalga hızı ve poisson oranlarının tespiti ile zemin profili hakkında bilgi edinmek amacıyla sismik kırılma ve yansıma deneyleri yapılmıştır (Şekil 3.3.). Bu deney ile aynı zamanda zemin tabakalarının P ve S dalga özellikleri de belirlenmiştir.



Şekil 3.3. Yüzey dalgalarının spektral analizinde kullanılan genelleştirilmiş dizilim [46]

Sismik kırılma ve yansıma deneyleri sismik dalgaların ortamda hareket hızlarının incelenmesiyle zemin ve kayacın özelliklerinin ölçümü esasına dayanmaktadır. Geoteknik mühendisliğinde en geniş uygulama alanı bulmuş ölçüm yöntemi, yüzeyde dalga ya da patlama ile oluşturulmuş titreşimin değişik tabakalardan yansıma zamanının ölçülmesiyle yapılır. Sismik yansıma metodu dalgaların homojen elastik ortamda hareketi teorisinden geliştirilmiş olup, hızı malzemenin elastisite modülü ve birim hacim ağırlığına bağlıdır [38].

Bu deneyler esnasında dalga geometrisini belirlemek amacıyla üç farklı sismik deney aparatı kullanılmıştır. Bunlar;

- 1) Yüzeide bilinen aralıklar ile yerleştirilmiş jeofonlar, (yansıma zamanını otomatik olarak kaydederler) (şekil 3.4.),
- 2) Deney veri kayıt cihazı (şekil 3.5.),
- 3) Yüek uygulanan kaynak (şekil 3.6.),



şekil 3.4. Jeofonların kayıt için yerleştirilmesi

Arazide bilinen aralıklar ile yerleştirilmiş jeofonlar yansıma zamanını otomatik olarak kaydederler. Yansıma hızı zeminlerde yaklaşık 300–2000 m/s, kayada ise 3000/7500 m/s arasında değişmektedir. Zeminde bulunan yeraltı suyu dalgaların ilerleme hızını düşürmektedir [44].



şekil 3.5. Veri kayıt cihazı

Çok sayıda jeofonla yapılan ölçümlerde yüzeyde dalga üretildikten sonra jeofon uzaklığı-yansıma zamanı grafiği noktalanır. Burada bir doğru üzerine düşen noktalar birleştirildiğinde doğruların kesişme noktaları farklı katmanlara geçişi gösterir.



Şekil 3.6. Yük kaynağı

Yansıma hızları doğruların eğimlerinden hesaplanır ve katman kalınlıkları da bu dalga hızlarına bağlı olarak bulunur [38];

$$H_1 = \frac{t_1 v_1 v_2}{2\sqrt{v_2^2 - v_1^2}} \quad (3.1)$$

$$H_2 = \frac{t_2 v_2 v_3}{2\sqrt{v_3^2 - v_2^2}} \quad (3.2)$$

Burada;

$H_1$  :Birinci tabakanın kalınlığı

$H_2$  :İkinci tabakanın kalınlığı

$v_1, v_2, v_3$ : Jeofonlar arası dalga yayılma hızı

$t_1, t_2, t_3$  : Jeofonlar arası dalga yayılma süresi



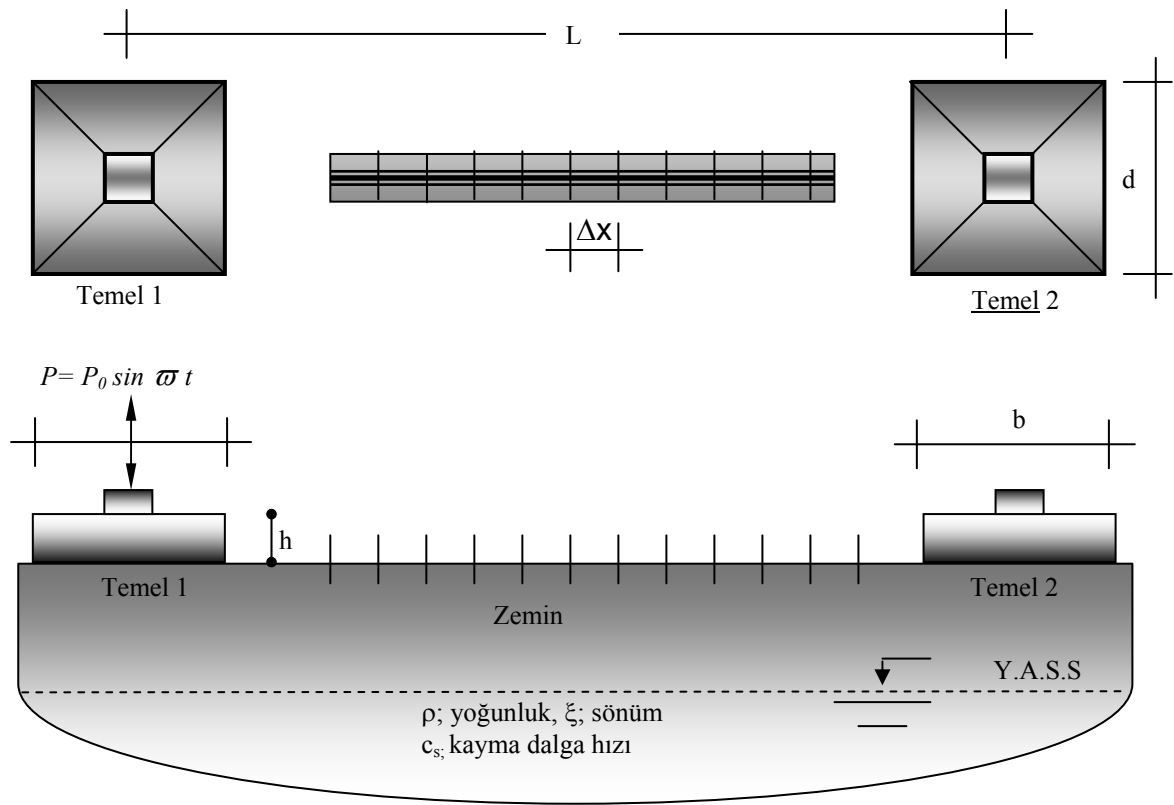
### 3.2.2. Deneyin uygulanışı

Arazi düzleminde her iki doğrultuda belirli aralıklarla, zemin kesitinin belirlenmesi için deneyler yapılmıştır. Her bir kesit de öncelikle zemin içerisinde etkili ve ölçülebilir bir titreşim oluşturabilmek için darbe yükü çelik bir levhanın üzerine uygulanmıştır (Şekil 3.7.). Yükün uygulandığı yerdeki titreşim etkisini görmek için levhaya yakın bir jeofon zemine sabitlenmiştir. Daha sonra bir şerit boyunca P ve S dalgası için ilgili jeofonlar belirli aralıklarla dizilmiştir. Burada P ve S dalgası için ayrı ayrı 12 adet jeofon kullanılmıştır. Jeofonlar 1 m ve 2 m aralıklarla dizilerek deneyler yapılmıştır (Şekil 3.8.). P dalgası için darbe yükü direkt olarak zeminin üzerine konulan çelik levhanın üzerine uygulanmıştır. S dalgası için ise zemin de bir çukur açılmış ve levha bu çukura dik olarak konularak yük uygulanmıştır. Jeofonlar aracılığıyla ölçülen veriler kayıt cihazına aktarılmış ve veriler işlenerek zemin profili belirlenmiştir.



Şekil 3.7. Deney uygulama sahası

Titreşim kaynağına en yakın algılayıcılar üst tabakadan geçen dalgaları kaydetmektedir. Alt tabakalardan yansıma daha geç olduğundan uzaktaki jeofonlar bu dalgaları almaktadırlar. Tablo 3.2.'de jeolojik malzemeler için yansıma hızı limitleri verilmektedir [44].



Şekil 3.8. Jeofon uygulaması saha modeli

Tablo 3.2. Zemin ve kayada sismik dalgaların hızı [44]

Jeolojik Malzeme	Dalga hızı (m/s)
Kuru ve gevşek kum	150-450
Nemli, sert kil	600-1200
Alüvyon	500-2000
Kil	1000-2800
Kumtaşı	1400-4250
Kireçtaşı	1700-6400
Granit	3900-5700
Kuarsit	4000-6100
Şist ve gnays	3500-7500

Yapılan arazi deneyleri ve hesaplamalar ile zemine ait kayma dalga hızları ve diğer parametreleri elde edilmiştir (Tablo 3.3.).

Tablo 3.3. Sismik deney sonuçları

Malzeme	Özgül ağırlık $\rho$ (t/m <sup>3</sup> )	P kayma dalga hızı $c_p$ (m/s)	S kayma dalga hızı $c_s$ (m/s)	Poisson oranı $\nu$	(m)
Zemin					
Tabaka-I	1.49	580	220	0.42	2.0
Tabaka -II	1.717	1012	341	0.44	7.0
Tabaka-III	1.80	1079	570	0.35	$\infty$

### 3.3. Düşey Dalga Bariyeri Deneyleri

Tabakalı bir zeminde sismik dalganın korunacak bir yapıya etkisinin azaltılması amacıyla uygulanan dalga sönümlenme yöntemlerinden biri de düşey dalga bariyeridir.

Zemin yapısı ve geometrisi belirlenmiş olan arazide deney düzeneğinin oluşturulması ilk iş olarak gerçekleştirilmiştir. Bu çalışma için yükün uygulanacağı yapıyı ve korunacak yapıyı temsil eden iki adet betonarme temel plağı imal edilmiştir. Bu temel plağın en ve genişlik ölçüleri 1 m dir. Uygulama sahasında bu iki plak arası mesafe merkezden merkeze  $L=25$  m olarak belirlenmiştir. Dalga geometrisi ve yayılımını esnasında zeminde gerçekleşen tanecik hareketinin belirlenmesi amacıyla birtakım yardımcı sismik aletler kullanılmıştır. Deneysel çalışmada yararlanılan sismik aletler şunlardan oluşmaktadır;

- 1) Veri kayıt cihazı,
- 2) Sarsma cihazı (Inertial shaker) (Şekil 3.9.),
- 3) Yük kontrol cihazı (Şekil 3.10.),
- 4) İvme ölçerler (Şekil 3.11.),
- 5) Isı kontrol cihazı (Şekil 3.12.),

Veri kayıt cihazı; ivme ölçerler tarafından algılanan verilerin elektronik ortamda kayıt edilmesini sağlar (Şekil 3.5.). Gelişmiş operatör yazılımı ve veri işleme özelliği olup çok çeşitli algılayıcılar ile doğrudan bağlanabilir. 64 kanal kapasitesine çıkabilir. Kullanılabilecek yazılım programları ile frekans analizleri ve sayısal filtreleme yapabilir.

Sarsma cihazı (Inertial shaker); temel plağına 16 sn'lik zaman dilimi içinde istenilen genliklerde harmonik bir yük uygulanmasını sağlar (Şekil 3.9.). Maksimum yük uygulama kapasitesi 250 N'dur. Çalışır durumda oluşturmuş olduğu ağırlık rezonansı 20 Hz'lik bir etki yaratır, 0-40 °C arasında hatasız çalışır.



Şekil 3.9. Sarsma cihazı (Inertial shaker)

Yük kontrol cihazı; betonarme plağa uygulanacak olan yükün Newton olarak değerini belirlemek amacıyla kullanılır (Şekil 3.10.). Sarsma cihazı tarafından uygulanacak yükün 0–250 N arasında hangi değerde uygulanacağını ve sarsma cihazının elektrik gücü ihtiyacını karşılar.

İvme ölçerler; her iki temel bloğunun üstüne yerleştirilmiş olan ivme ölçerler harmonik dalganın zemin içerisinde yayılımı esnasında güçlü sarsıntının yere vuruş ivmesini ölçen aygıt olarak kullanılır. Deprem araştırmalarından, patlama-şok tespitine kadar geniş alanda kullanılabilen aygıt tek ve çok eksenli piezoelektrik tabanlı titreşim algılayıcıları mevcuttur (Şekil 3.11.). Çalışmamızda tek eksenli titreşim algılayıcısı kullanılmıştır. Dizüstü bilgisayar, algılama ve kayıt birimi, dönüştürücü ve çizici yardımcı malzemeleri ile beraber çalışır.



3.10. Yük Kontrol Cihazı



3.11. İvme ölçer

Isı Kontrol Cihazı; uzun süreli çalışan cihazların ısınmasını gidererek fan görevi sağlar, ısı kontrolünü gerçekleştirir (Şekil 3.12.). Çalışma süreleri uzadıkça cihazların en hatasız şekilde veri kaydı yapabilmesi için belli bir sıcaklıkta (25–30 °C ısı seviyesinde) çalışmasını sağlar.



Şekil 3.12. Isı kontrol cihazı

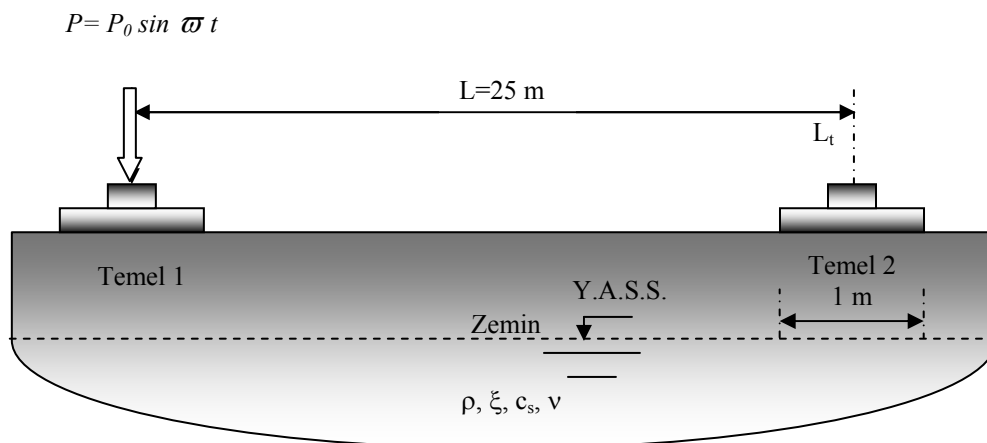
### 3.3.1. Dalga bariyerinin modellenmesi

Uygun dalga bariyerinin modellenmesinde birçok etken dikkate alınmıştır. Bu etkenlerin başında titreşim kaynağının frekansı, dalga bariyerinin boyutları, dalga bariyerinin içinin dolu ya da boş olması, dolu olması durumunda içindeki malzeme özellikleri ve zemin malzeme özellikleri gelmektedir. Bu belirtilen unsurlar göz önüne alınarak dalga bariyerinin, titreşim kaynağının yakınına konulması (aktif yalıtım) ve korunacak yapının yakınına konulması (pasif yalıtım) için ayrı ayrı çözümlenmeler yapılmıştır.

Analiz çalışmaları üç kısımdan oluşmaktadır:

- 1) Yalıtımsız durum
- 2) Aktif yalıtım durumu
- 3) Pasif yalıtım durumu

Çalışmanın birinci aşamasını tabakalı zemin yüzeyine oturan ve aralarındaki mesafenin 25 m olduğu beton temel plaklardan birine belirli bir frekans aralığında (10 Hz'den 100 Hz'e kadar 5 Hz'lik dilimler aralıklarında) tanımlanan harmonik düşey yüklerin uygulanması ve bu uygulanan yüklerin diğer temel plağında oluşturduğu titreşimlerin genliğinin yer değiştirme cinsinden belirlenmesi oluşturmaktadır (yalıtımsız durum Şekil 3.13.).



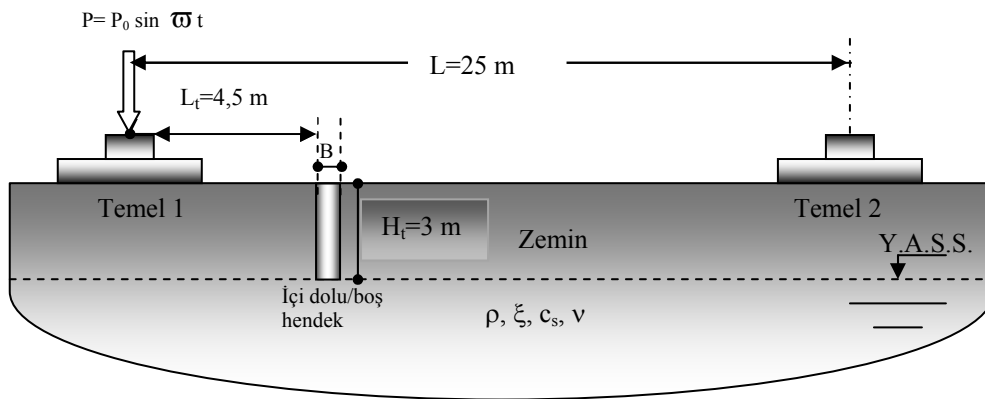
Şekil 3.13. Yalıtımsız arazi modeli [3]

Çalışmanın ikinci aşamasında aktif yalıtım uygulaması olarak, yükün uygulandığı temel bloğu (Temel 1, yük kaynağı) ile belirli bir mesafedeki diğer temel bloğu

(korunacak yapı) arasına konulan titreşim azaltıcı düşey dalga bariyeri yük kaynağına yakın olarak konuşlandırılmıştır (Şekil 3.14.). Yani bariyer kaynaktan yayılan dalgaları engellemektedir. Konuşlandırılan bariyerin geometrik ölçüleri; derinlik 3 m, genişlik 1m, en ise 2,5 m olarak belirlenmiştir. Bu uygulamada sismik dalga bariyerinin yük kaynağına olan uzaklığı merkezden merkeze 5 m, korunacak yapıya olan uzaklığı ise 10 m olarak uygulanmıştır. İvme ölçerler hem yük kaynağına, hem de korunacak yapıya uygun bir şekilde yerleştirilip, yük kaynağındaki ivmeölçer  $A_1$ , korunacak yapıdaki ivme ölçer ise  $A_4$  kayıt istasyonu başlığında kayıt altına alınmıştır. Çalışmanın amacı olan farklı frekanslardaki titreşim genliklerinin yük kaynağı ve korunacak yapıya olan titreşim etkilerinin azaltılması için en uygun yalıtım malzemesinin belirlenmesi için dört farklı yalıtım yöntemi uygulanmış ve ivme kayıtları elde edilmiştir. Uygulanan yalıtım yöntemleri;

- 1) İçi Boş Yalıtımsız Durum (Şekil 3.15. (a)),
- 2) İçi Su Dolu Yalıtımlı Durum (Şekil 3.15. (b)),
- 3) İçi Bentonit Dolu Yalıtımlı Durum (Şekil 3.15. (c)),
- 4) İçi Beton Dolu Yalıtımlı Durum (Şekil 3.15. (d)),

olarak belirlenmiştir. Bu şartlar doğrultusunda analizler yapılmış farklı parametrelerin değişiminin dalga geometrisine ve yayılmasına etkisi incelenmiş, sonuçlar elde edilmiştir.



Şekil 3.14. Aktif yalıtım arazi modeli [3]



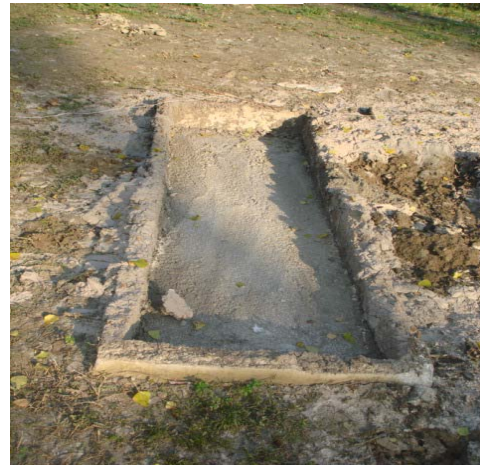
(a)



(b)



(c)

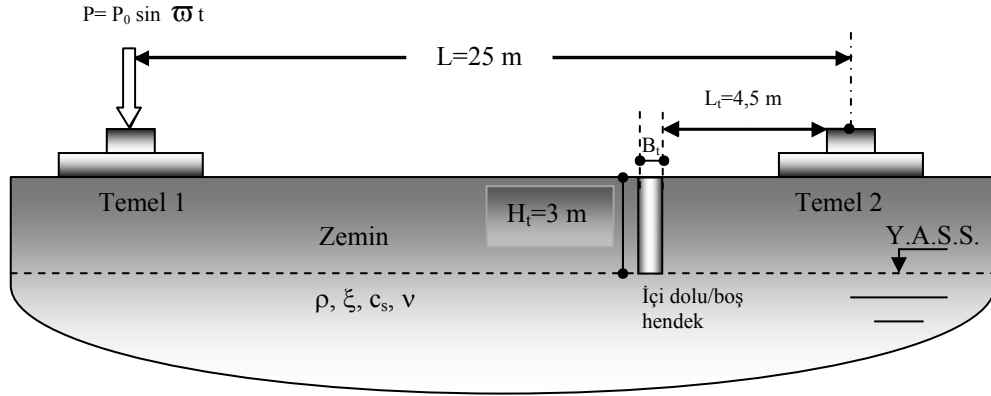


(d)

Şekil 3.15. Düşey dalga bariyerleri: a) İçi boş bariyer b) İçi su dolu bariyer c) İçi bentonit dolu bariyer d) İçi beton dolu bariyer

Son aşamada pasif yalıtım uygulaması olarak, korunacak yapıyı (Temel 2) yük kaynağından (Temel 1) yayılan dalgalardan korumak, yani pasif yalıtım uygulaması gerçekleştirmek için korunacak yapının yakınına titreşim azaltıcı düşey dalga bariyeri konulmuştur (Şekil 3.16.). Dalga bariyerinin geometrik ölçüleri ve yük kaynağı, korunacak yapı mesafeleri aktif yalıtım uygulaması ile bir değişiklik göstermemektedir. İvme ölçerler aktif yalıtım da olduğu gibi yine hem yük kaynağına, hem de korunacak yapıya uygun bir şekilde yerleştirilip, yük kaynağındaki ivme ölçer  $A_1$ , korunacak yapıdaki ivme ölçer ise  $A_4$  başlığında kayıt altına alınmıştır. Bu şekilde hazırlanan modelde aktif yalıtımda uygulanan dört farklı dalga yalıtım yöntemi (İçi Boş, Su Dolu, Bentonit, Beton) uygulanıp yapının yayılan dalgalardan korunmasına etkisi irdelenmiş ve sonuçlar elde edilmiştir. Pasif yalıtım için dinamik yüklerin etkisinin yer değiştirme cinsinden değişimleri incelenmiştir.





Şekil 3.16. Pasif yalıtım arazi modeli [3]

Belirtilen bu üç aşama için de detaylı parametrik analizler yapılmış ve elde edilen sonuçlar karşılaştırmalı olarak dördüncü bölümde sunulmuştur.

## **BÖLÜM 4. HARMONİK DALGA ANALİZ ÇALIŞMALARI**

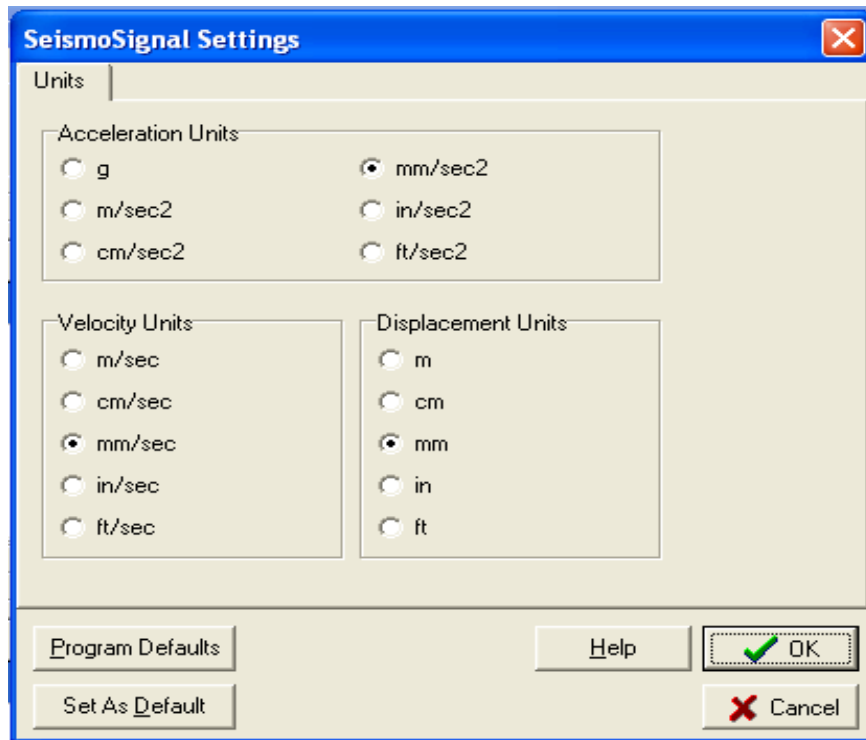
Saha çalışmalarının verileri problemin elektronik ortamdaki modelini oluşturmak için kayıt altına alınmıştır. Bu model üzerinde sismik dalga yayılımı etkilerini değerlendirebilmek amacı ile band-geçiren filtreleme yöntemiyle sonuçların daha sağlıklı verilere dönüştürülüp dalga geometrisinin davranışı incelenmiştir. Kapsamlı parametrik araştırmalar yürütülerek sayısal sonuçlar yalıtımsız durum ve farklı dalga yalıtım modelleri için aktiflik ve pasiflik durumları da göz önünde bulundurularak karşılaştırmalı olarak incelenmeye çalışılmıştır. Bu aşamada düşey sismik dalga bariyeri analizleri için SeismoSignal 3.02 ve Matlab 7.0 paket programları kullanılmıştır.

### **4.1. Ham Kayıt Verilerinin SeismoSignal Analizleri**

SeismoSignal 3.02 paket programı, tabakalı zemin ortamında ivme ölçerler tarafından kayıt altına alınan belirli bir periyottaki veri grubunun ivme-zaman boyutunda grafiğinin çizilmesini sağlamaktadır. Aynı paket program bu veri grubunun zeminde dalga yayılımının, tanecik hareketindeki frekans genliklerinden dalganın hız-zaman ve yerdeğiştirme-zaman grafiklerine dönüşümünü gerçekleştirir. Ancak öncelikle saha koşullarındaki çalışmalarda farklı frekanslardaki veri kaydı gerçekleştirilirken, hassas bir kayıt cihazı olan ivme ölçerler sadece uygulanan harmonik yükün değil çalışma sahasındaki rüzgar, ses, titreşim yaratan çalışan motorlu araçlar vb. tüm çevresel etkileri de kayıt altına almalarından dolayı bu etkileri veri tabanından ayırklaştırmak gerekmektedir. Bu amaçla veri tabanı SeismoSignal 3.02 paket programında, uygulanan harmonik yükün frekans değerinin (+1) bir üst değerine kadar olan kısmı alıp üstünde kalan değerler band-geçiren filtreleme işlemine tabi tutulur. Bu filtreleme işlemi veri kaydındaki dalga geometrisi ve yayılım etkisi dışındaki tüm etkilerden verilerin ayırklaştırılmasını sağlamaktadır.

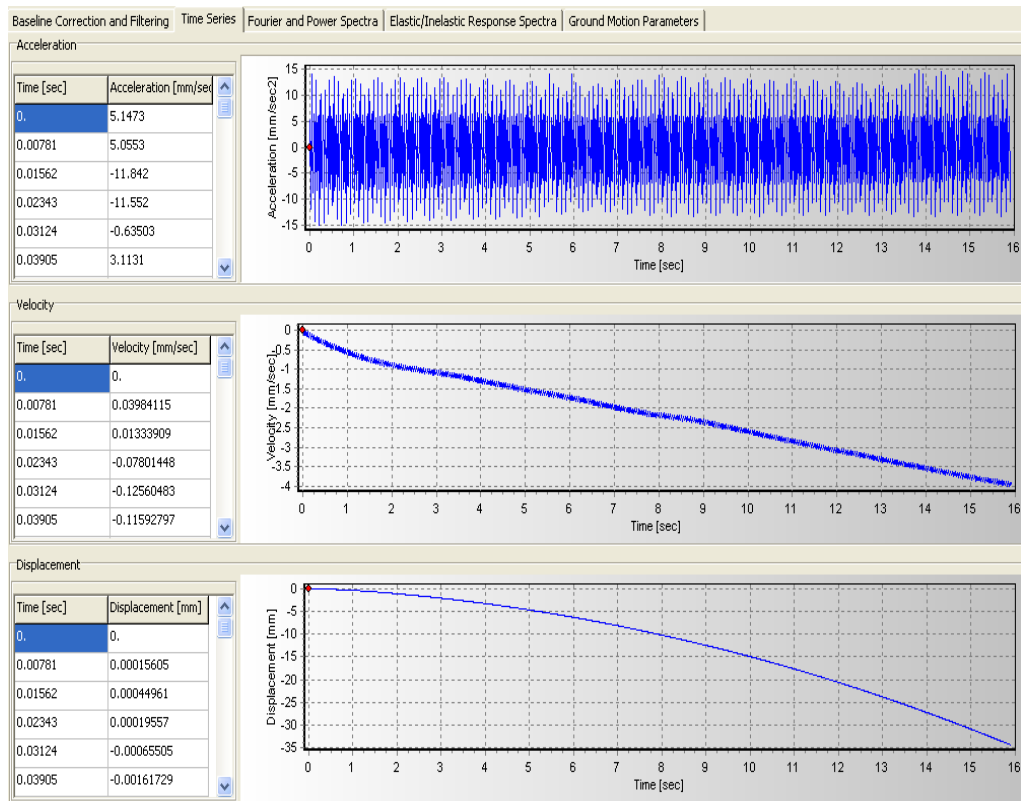
Arazi çalışmalarından elde edilen ham kayıt verileri yalıtımsız durum, aktif yalıtım ve pasif yalıtım aşamaları için ayrı ayrı kayıt altına alınıp, band-geçiren filtreleme işlemine tabi tutulup, yeni bir veri gurubu oluşturulup, ilgili bilgisayar paket programına aktarılmıştır. Bu işlenmiş yeni veri gurubunun A<sub>1</sub> ve A<sub>4</sub> kayıt istasyonlarındaki ivme-zaman, hız-zaman ve yerdeğiştirme-zaman grafikleri her harmonik yük uygulaması için ve her farklı yalıtım durumu için çizdirilmiştir. Bu uygulamalar aşağıdaki işlem basamaklarından geçirilmek kaydıyla sırasıyla gerçekleştirilmiştir:

- 1) İlk olarak yalıtımsız durum için 10 Hz'den 100 Hz'e kadar Txt. uzantılı tüm ham kayıt verileri önce A<sub>1</sub> sonra A<sub>4</sub> istasyon verileri olarak dosya giriş bilgileri; ivme, hız ve yerdeğiştirme ölçüm birimleri belirlenmiştir (Şekil 4.1.). Birimler ivme için mm/sn<sup>2</sup>, hız için mm/sn, yerdeğiştirme için mm ve zaman boyutu ise sn olarak seçilmiştir. Yukarıda sözü edilen frekans değerleri aralığındaki ivme ölçerlerin veri kaydı, 0-16 saniyelik zaman diliminde ve 0.00781 saniyelik basamak aralığındaki ham kayıt saha kaydını içermektedir.



Şekil 4.1. Ham kayıt dosya bilgi girişi

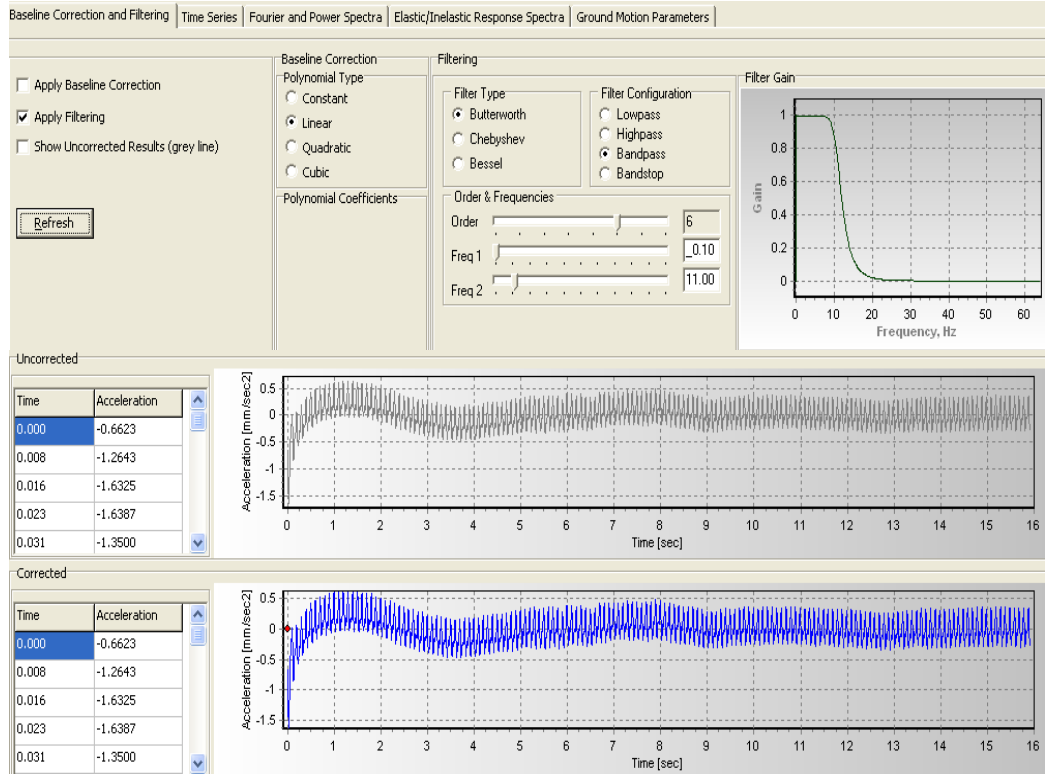
Gerçekleştirilen dosya bilgi girişinden sonra filtre edilmemiş ham kayıtların zamana bağlı ivme, hız ve yerdeğiştirme grafiklerinin çizilmesini sağlar (Şekil 4.2.).



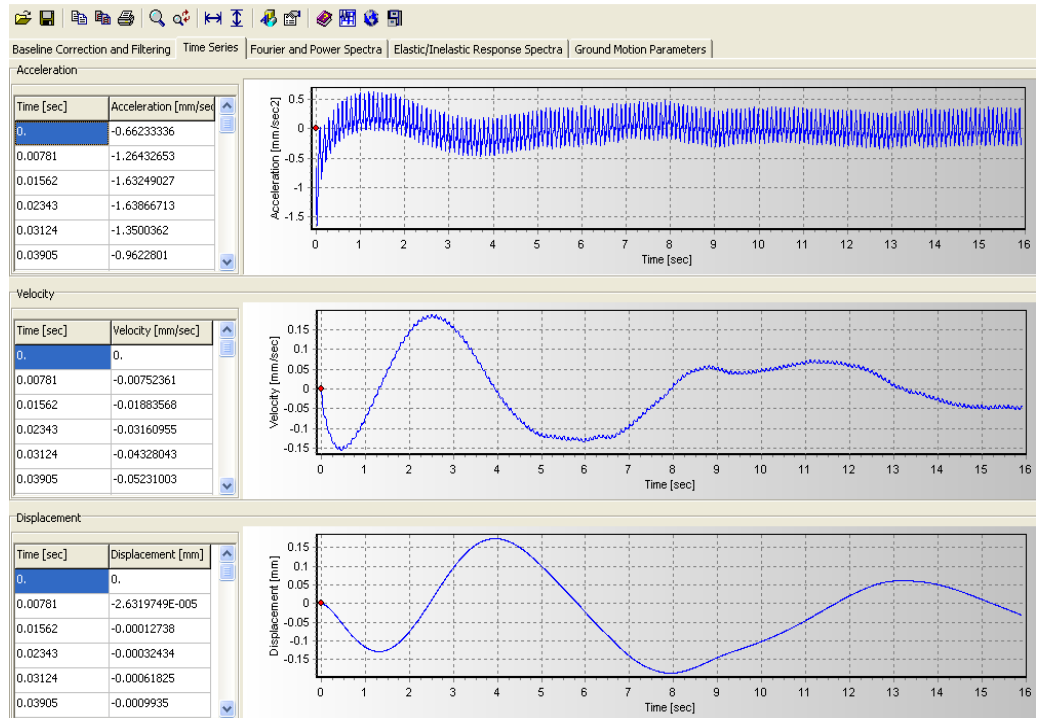
Şekil 4.2. Ham kayıt ivme-hız, yerdeğiştirme-zaman grafikleri

- 2) İkinci adımda ham kayıt verilerine filtre uygulamak amacıyla Baseline Correction and Filtering (Baseline Düzeltmesi ve Filtreleme) butonunu işaretleyerek gerekli filtreleme uygulama safhasına geçilir (Şekil 4.3.).

Bu kısımda filtreleme işleminde uygulanan harmonik yükün frekans olarak karşılığının bir üstünü sınır değer olarak belirleyip (örneğin; 50 Hz lik bir harmonik yükleme için 51 Hz üst sınır değeri gibi) Şekil 4.3.'teki order butonuna bu değer girilir, filtre konfigürasyonunda bandpass filtreleme yöntemi seçilip filtre uygula ve ardından yenile (Refresh) komutlarıyla belirlenen sınırlar üzerindeki veriler süzgeçlenmiş olur. Artık bu safhadan sonra işlenmiş veri kayıtlarından oluşan yeni bir veri gurubu ve bu verilere bağlı yeni ivme, hız, yerdeğiştirme-zaman grafikleri çizilmiş olur (Şekil 4.4.).



Şekil 4.3. Filtreleme uygulama şekli



Şekil 4.4. İşlenmiş veri gurubu ivme, hız, yerdeğiştirme-zaman grafikleri

- 3) Son olarak elde edilen yeni veri grubu farklı kaydet butonundan Txt. uzantısı Dat. uzantısı olarak dönüştürülmüş olur.

Yalıtımsız durumun tüm frekans uygulamalarındaki hem  $A_1$  ve hem de  $A_4$  istasyon kayıtları için elde edilen yeni veri grupları için uygulanan bu işlemlerin hepsi, sismik dalga bariyeri uyguladığımız hem aktif yalıtım, hem pasif yalıtım durumlarında dalga bariyerinin içi boş yalıtım durumu, su dolu yalıtım durumu, bentonit dolu yalıtım durumu, beton dolu yalıtım durumları için ayrı ayrı gerçekleştirilmiştir.

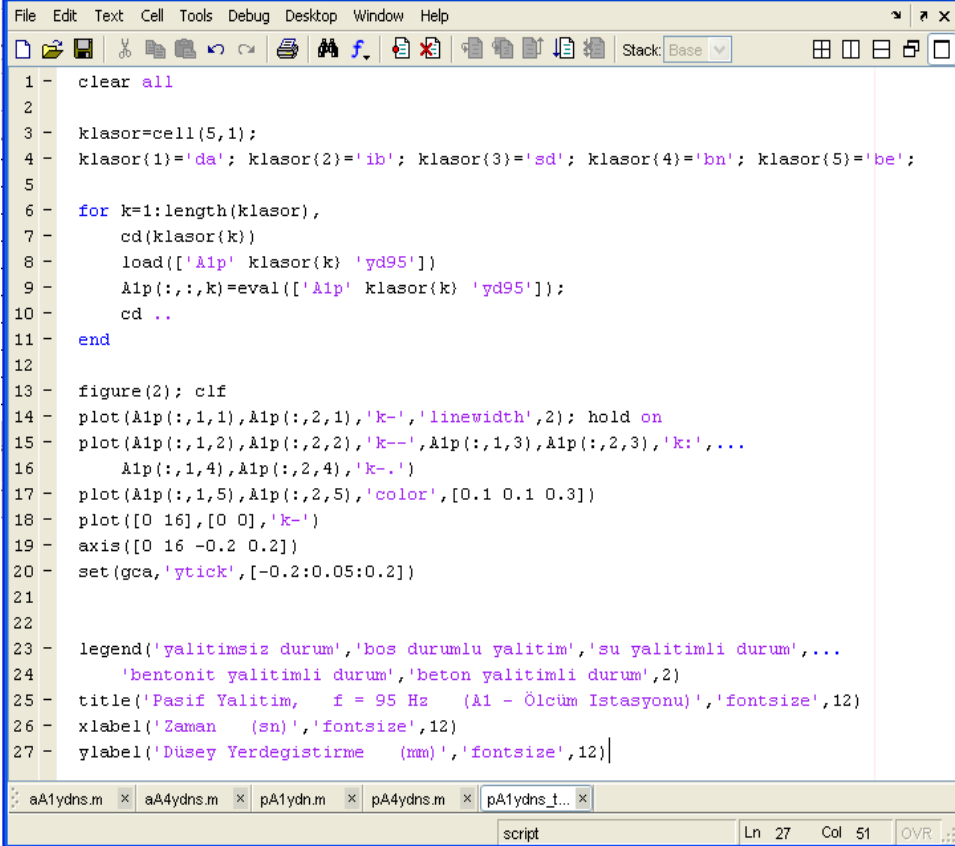
#### 4.2. İşlenmiş Verilerin Matlap Analizleri

İşlenmiş veri kayıtlarının analizinde kullanmış olduğumuz Matlap 7.0 bilgisayar paket programı, program dili oluşturabilme, yazılan program ile ilgili sayısal analiz yapabilme ve grafik çizibilme noktasında oldukça fayda sağlamaktadır. Özellikle yalıtımsız ve yalıtım uygulanmış durumdaki sismik dalga bariyerinin farklı yalıtım durumları için titreşim azaltabilme kabiliyetlerinin karşılaştırmalı olarak tek bir grafik üstünde çizdirilebilme noktasındaki katkısı sonuç ve değerlendirmenin daha sağlıklı ve gerçekçi olmasını sağlamıştır.

SeismoSignal 3.02 sismik veri analiz programında işlenmiş veri haline dönüştürülen filtre edilmiş ham kayıt saha verilerinde, analiz edilmesi planlanan veri grubu yerdeğiştirme-zaman verilerinin dosya uzantısı Dat. olduğundan bu verilerin Matlap 7.0 programında çalıştırılabilmesi için bir takım işlemlerden geçirilmesi gerekmektedir. Bu işlem basamakları şunlardır:

- 1) İlk olarak SeismoSignal programında veriler Dat. uzantılı olarak çağırılır,
- 2) Daha sonra Matlap 7.0 paket programında M. uzantılı bir veri dosyası açılır.
- 3) M. uzantılı veri dosyası uygulanan yalıtım yöntem ve malzemeleri göz önünde bulundurularak geliştirilen bir kodlama diliyle dosya adı oluşturularak kayıt altına alınır. Örneğin;  $A_1$  kayıt istasyonundaki pasif su dolu yalıtım uygulamasının yerdeğiştirme verileri 75 Hz'lik dinamik yük uygulamasındaki için  $A_1$ psdyd75 şeklinde bir kodlama dili gibi.

- 4) SeismoSignal programındaki yerdeğiştirme-zaman veri gurubu kopyalanarak Matlap 7.0 paket programında M. uzantılı olarak oluşturulan dosyaya kaydedilir.
- 5) Bu uygulanan işlemlerin tümü, uygulanan harmonik yüklemelerin hepsi hem yalıtımsız durum, hem de aktif ve pasif yalıtım durumlarının A<sub>1</sub>-A<sub>4</sub> kayıt istasyonlarında uygulanan yalıtım çalışmaları için ayrı ayrı kayıt altına alınır.
- 6) Akabinde her durum için kaydedilen yerdeğiştirme-zaman verilerinin tüm yalıtım durumları için karşılaştırılmalı olarak incelenebilmesi ve zamana bağlı yerdeğiştirmelerinin tek bir grafik üzerinde çizdirilmesi için Matlap'da bir program yazılır (Şekil 4.5.). Bu program ile örneğin; 95 Hz'lik yüklemenin gerçekleştirildiği tüm pasif yalıtım uygulamalarındaki yük kaynağı olan A<sub>1</sub> istasyonunda dalga bariyerinin hangi yalıtım uygulamasında daha fazla titreşimi soğurduğu ve korunacak yapı olan Temel 2'deki yerdeğiştirmeyi azalttığı tek bir grafik üzerinde gözlenmiş olur.



```

File Edit Text Cell Tools Debug Desktop Window Help
Stack: Base
1 - clear all
2
3 - klasor=cell(5,1);
4 - klasor(1)='da'; klasor(2)='ib'; klasor(3)='sd'; klasor(4)='bn'; klasor(5)='be';
5
6 - for k=1:length(klasor),
7 -     cd(klasor(k))
8 -     load(['A1p' klasor(k) 'yd95'])
9 -     A1p(:,:,k)=eval(['A1p' klasor(k) 'yd95']);
10 -    cd ..
11 - end
12
13 - figure(2); clf
14 - plot(A1p(:,1,1),A1p(:,2,1),'k-','linewidth',2); hold on
15 - plot(A1p(:,1,2),A1p(:,2,2),'k--',A1p(:,1,3),A1p(:,2,3),'k:',...
16 -     A1p(:,1,4),A1p(:,2,4),'k-.'))
17 - plot(A1p(:,1,5),A1p(:,2,5),'color',[0.1 0.1 0.3])
18 - plot([0 16],[0 0],'k-')
19 - axis([0 16 -0.2 0.2])
20 - set(gca,'ytick',[-0.2:0.05:0.2])
21
22
23 - legend('yalıtımsız durum','bos durumlu yalıtım','su yalıtımlı durum',...
24 -     'bentonit yalıtımlı durum','beton yalıtımlı durum',2)
25 - title('Pasif Yalıtım, f = 95 Hz (A1 - Ölçüm İstasyonu)','fontsize',12)
26 - xlabel('Zaman (sn)','fontsize',12)
27 - ylabel('Düsey Yerdeğistirme (mm)','fontsize',12)

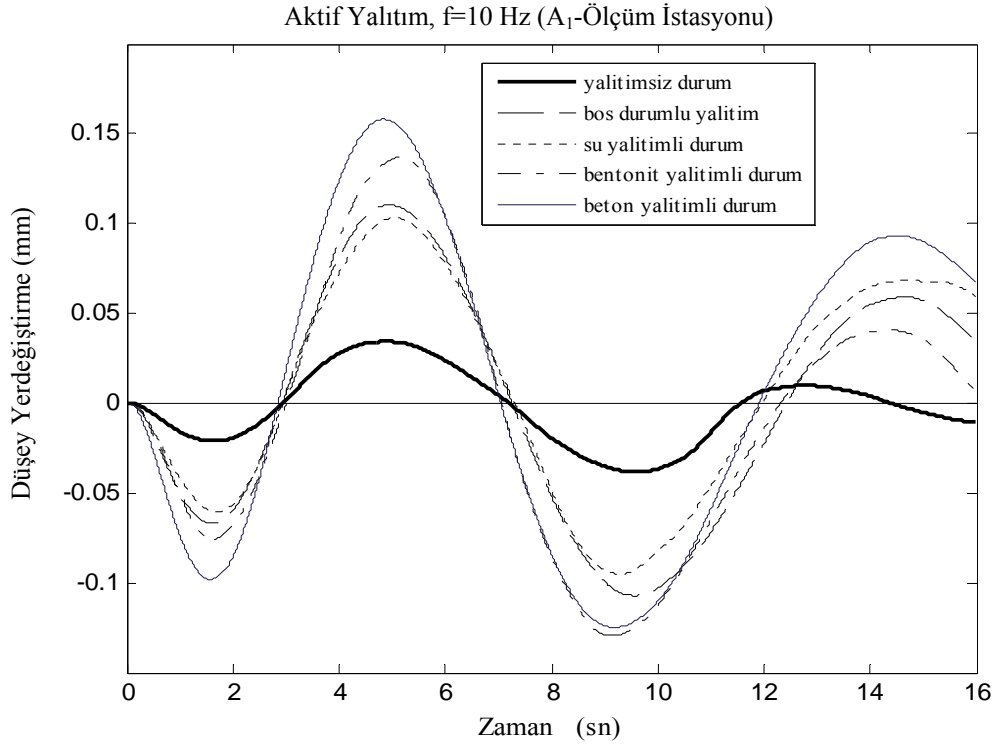
```

Şekil 4.5. Matlap grafik çizim programı



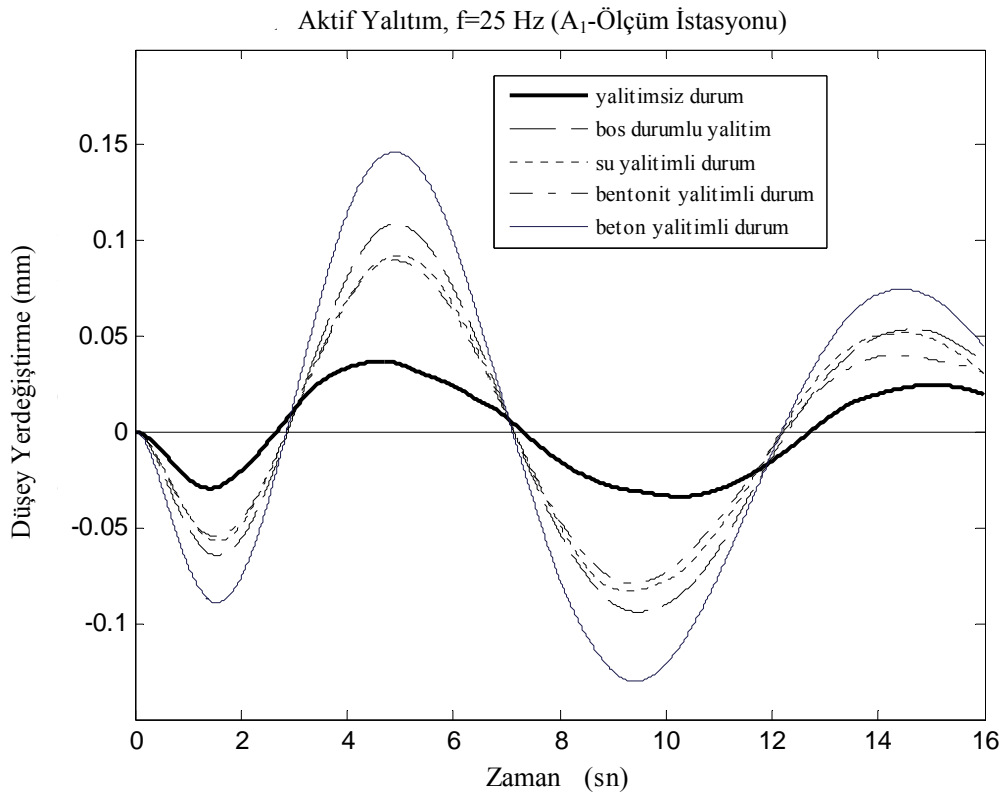


10 Hz'lik dinamik yüklemde; yalıtımsız durumda dalga soğurumu (absorbtion) daha yüksektir (Şekil 4.7.). Dalganın frekansı azaldıkça dalganın yayıldığı ortamda nüfuz derinliği artar [33]. Bu frekansta dalganın derinlere nüfuz etmesi daha kolay gerçekleşeceğinden sığ ortamda seyhati daha azdır. Su dolu yalıtım durumunda diğer uygulamalara nazaran daha iyi yalıtım elde edilmiştir.



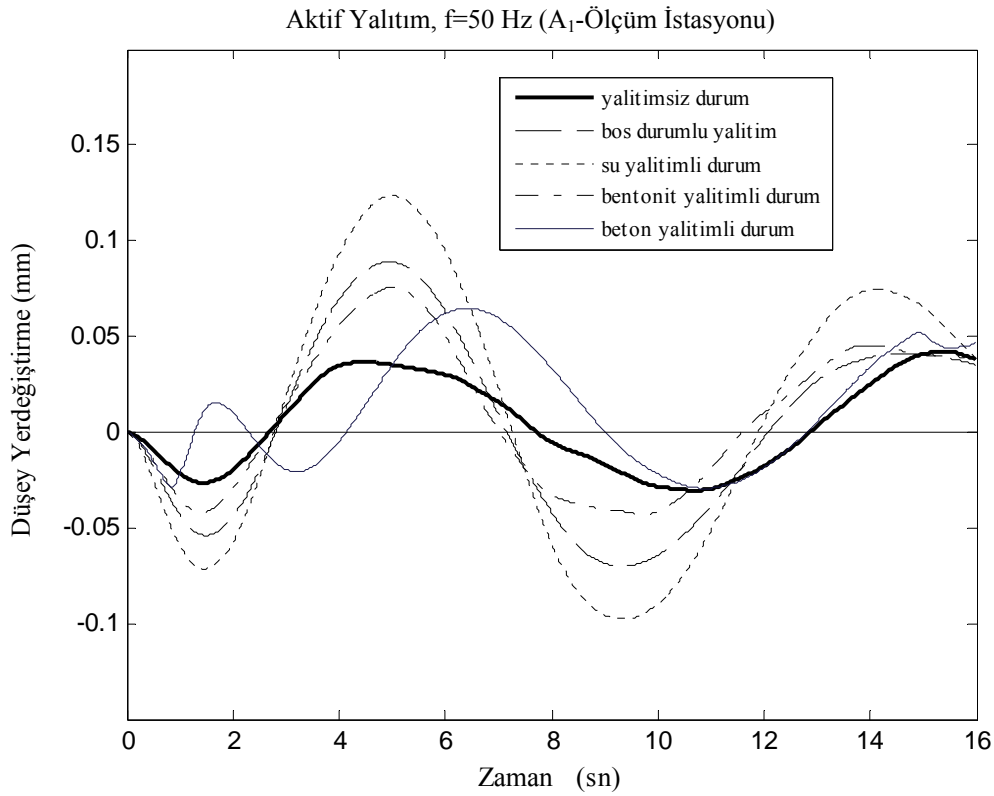
Şekil 4.7. Aktif yalıtım A<sub>1</sub> istasyonu 10 Hz zamana bağlı yerdeğiştirme grafiği

25 Hz'lik dinamik yüklemde; dalga 10 Hz'e göre biraz daha sığda yayıldığı için, bariyerin etkisi daha belirgin olmaya başlamıştır. Yalıtımlı ve yalıtımsız durum eğrileri birbirlerine yaklaşmaktadır (Şekil 4.8.). Burada ise bentonit ve su dolu durumlar içi boş ve beton yalıtımlı durumlara göre daha iyi yalıtım oluşturmaktadır.



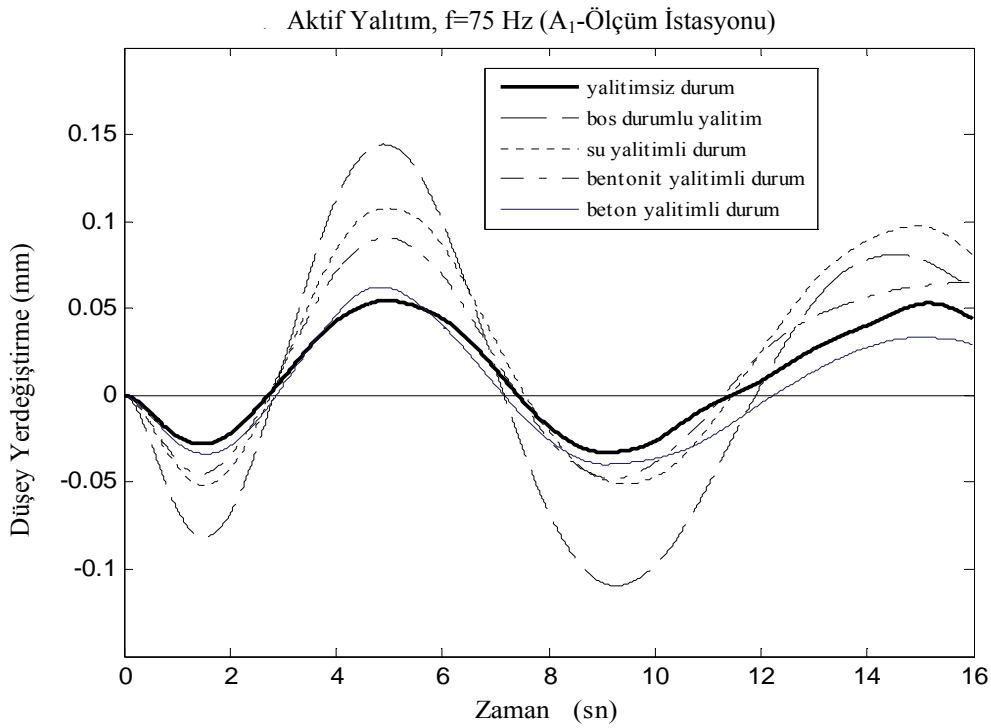
Şekil 4.8. Aktif yalıtım  $A_1$  istasyonu 25 Hz zamana bağlı yerdeğiştirme grafiği

50 Hz'lik dinamik yüklemde; dalga yayılımının daha düşük frekanslara göre daha yüzeysel olması dolayısıyla, yalıtım uygulanmış yapının etkisi daha belirgindir. Burada beton izolasyonlu bariyer durumunda dalga daha hızlı yayılmaktadır ve düşük frekans uygulamalardaki sinüzoidal yapısı bozulmuştur (Şekil 4.9.). Öte yandan, en iyi yalıtım uygulaması da beton izolasyonlu bariyer durumunda olduğu görülmektedir. Yalıtımlı durumla yalıtımsız durumun grafik eğrilerinin görüntüleri birbirlerine paralel hale gelmeye başlamaktadır. Dalga daha yüzeyden yayıldığı için tüm uygulamalar için yalıtım daha düşük frekanslara göre daha iyidir.



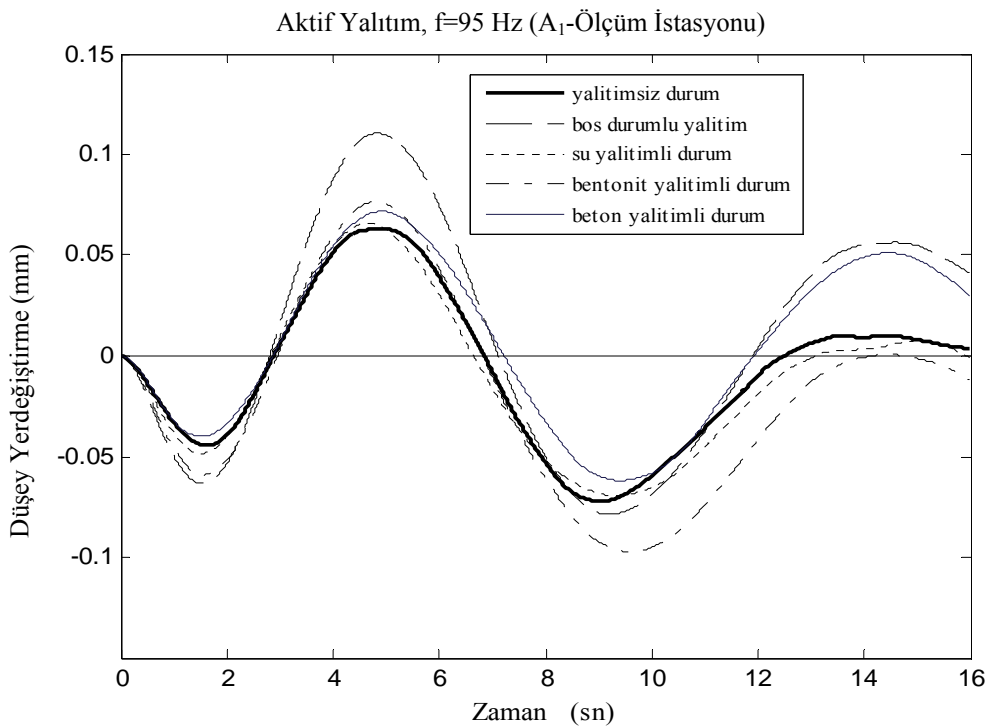
Şekil 4.9. Aktif yalıtım A<sub>1</sub> istasyonu 50 Hz zamana bağlı yerdeğiştirme grafiği

75 Hz'lik dinamik yüklemede; beton bariyer yalıtım uygulamadan daha iyi sonuç alınmıştır. Beton bariyerli yalıtım en düşük frekans uygulamasındaki maksimum yerdeğiştirme değerini yaklaşık olarak üçte bir oranında azalttığı görülmektedir. 10 Hz uygulamasında 0,158 mm olan maksimum yerdeğiştirme değeri 0,056 mm'ye gerilemiştir. Dalga yayılımının artık oldukça yüzeyden olması dolayısıyla, bariyerli durumlarda önceki düşük frekans uygulamalarına kıyasla daha iyi yalıtım sağlanmıştır. Uygulanan frekans arttıkça farklı değerlerde seyreden yerdeğiştirme değerleri giderek ortak bir karaktere bürünmektedir (Şekil 4.10.).



Şekil 4.10. Aktif yalıtım  $A_1$  istasyonu 75 Hz zamana bağlı yerdeğiştirme grafiği

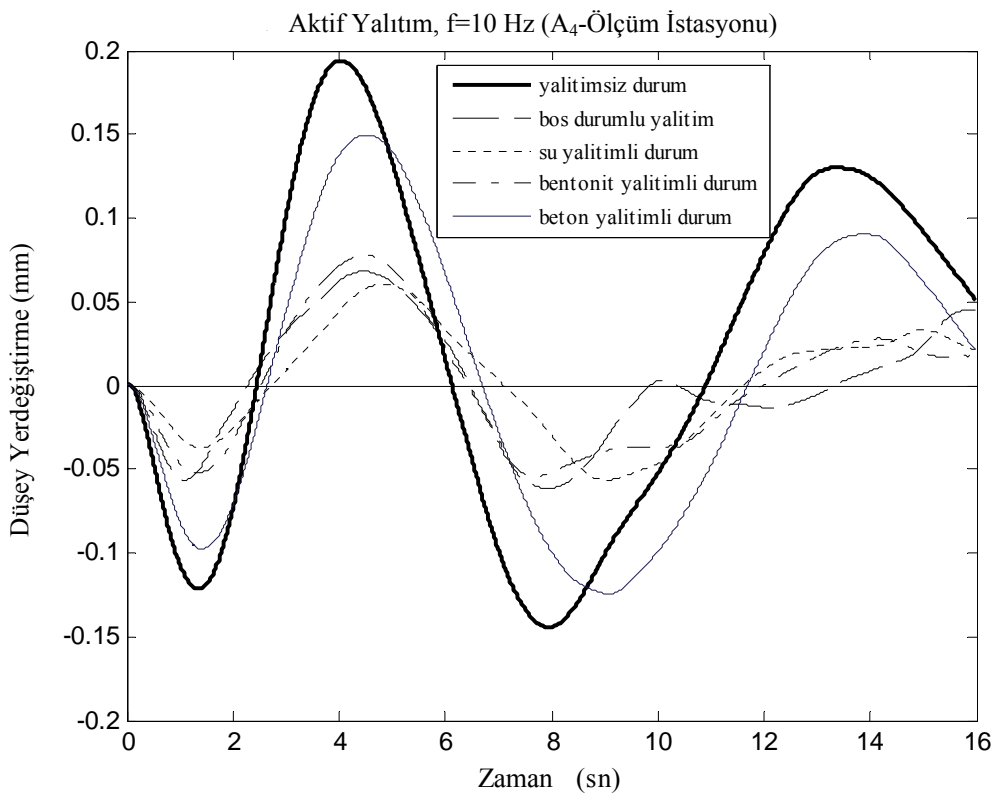
95 Hz'lik dinamik yüklemde; artık dalga neredeyse ilk tabakada seyahat ettiğinden, bariyersiz durumla yalıtım uygulanmış durum birbirine paralel hale gelmiştir (Şekil 4.11.). Burada da beton yalıtımlı yapının daha etkili olduğu görülmektedir.



Şekil 4.11. Aktif yalıtım  $A_1$  istasyonu 95 Hz zamana bağlı yerdeğiştirme grafiği

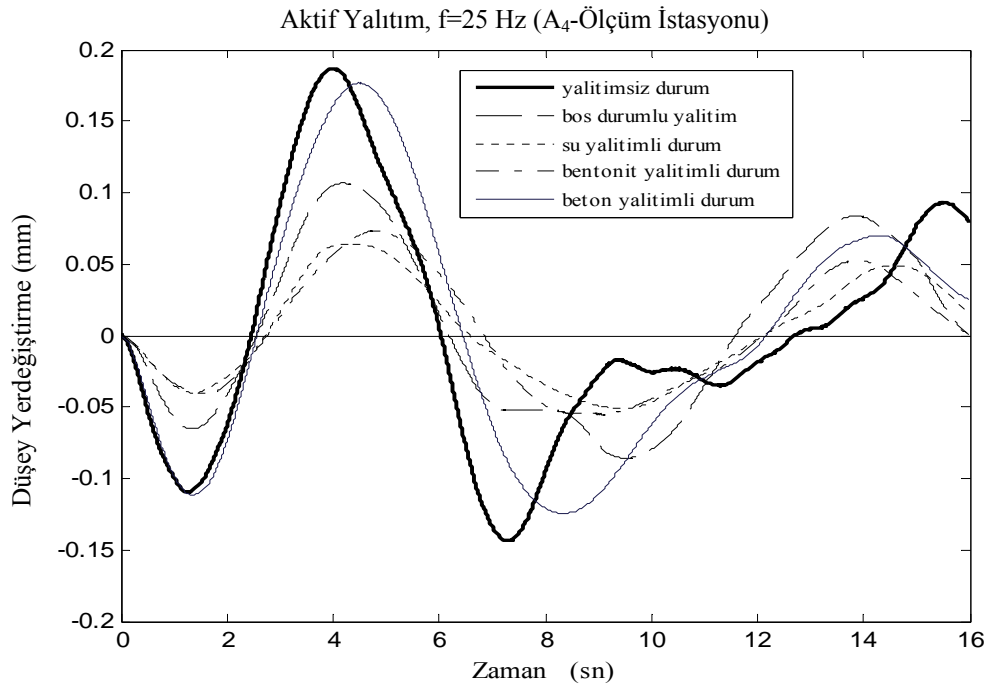
Aktif izolasyon çalışmasının  $A_4$  kayıt istasyonu (korunacak yapı) sonuçları şu şekilde yorumlanmıştır:

10 Hz'lik dinamik yüklemde pasif izolasyondan farklı olarak beton ve yalıtımsız durum dışında, diğer yalıtım uygulanmış modellerde düşük yerdeğiştirme değerleri elde edilmiştir (Şekil 4.12.). Bu durum tüm spektrum için geçerlidir. 8. sn'ye kadar su dolu yalıtım malzeme iyi yalıtım oluştururken 8. sn'den sonra ise yalıtım uygulayan malzeme fazlarında karışıklık söz konusudur.



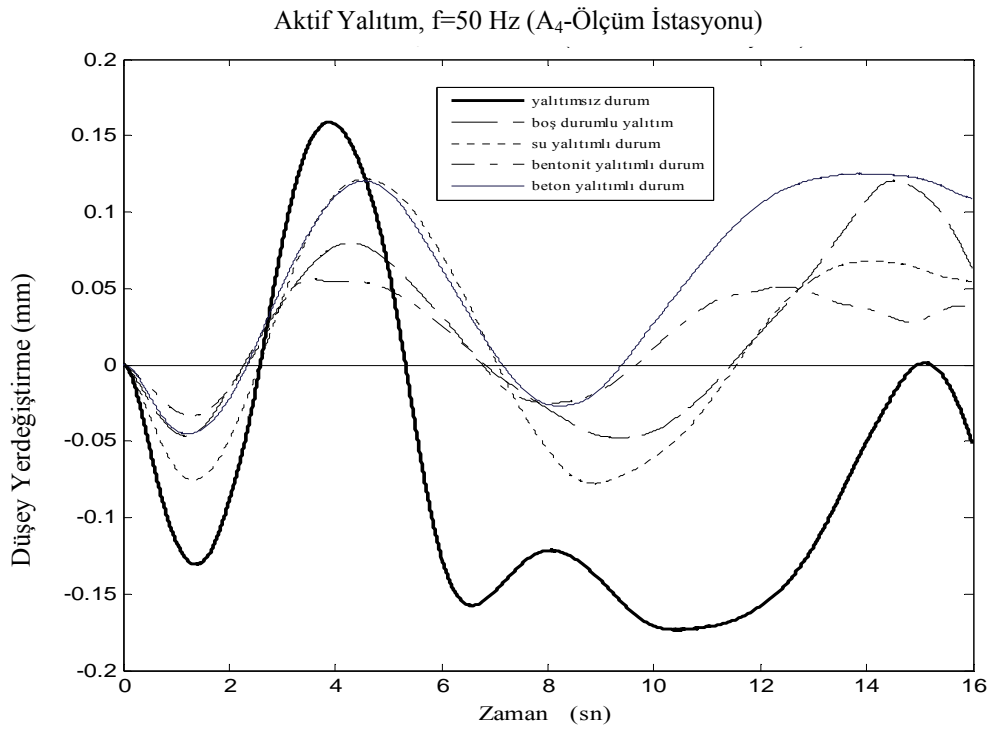
Şekil 4.12. Aktif yalıtım  $A_4$  istasyonu 10 Hz zamana bağlı yerdeğiştirme grafiği

25 Hz'lik dinamik yüklemde; tıpkı 10 Hz'de olduğu gibi pasif yalıtımdan farklı olarak beton ve yalıtımsız durum dışında, diğer yalıtım malzemelerinde düşük yerdeğiştirmeler elde edilmiştir (Şekil 4.13.). Beton yalıtım dışındaki diğer dalga bariyerleri daha iyi sonuç vermiştir. Bu frekans için en iyi yalıtımı birbiriyle yakın değerler vermiş olmaları ile birlikte su dolu dalga bariyerli yapının sağladığı söylenebilir.

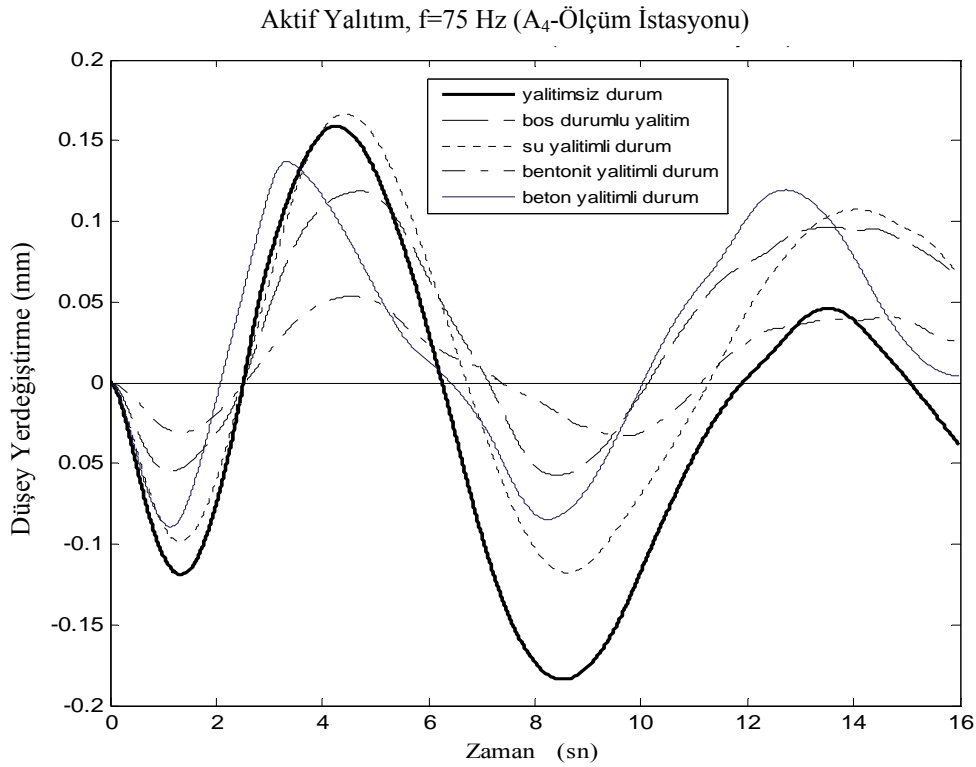


Şekil 4.13. Aktif yalıtım A<sub>4</sub> istasyonu 25 Hz zamana bağlı yerdeğiştirme grafiği

50 Hz ve 75 Hz'lik dinamik yüklemelerde; her iki durumda da bentonit yalıtımlı uygulamanın daha iyi yalıtım malzemesi olduğu görülmektedir (Şekil 4.14.). Özellikle 50 Hz'de bozulan yapı 75 Hz'de tekrar sinüzoidal oluşuma dönüşmektedir (Şekil 4.15.). Yine 75 Hz'lik frekansta dalga daha hızlı yayılmaktadır.

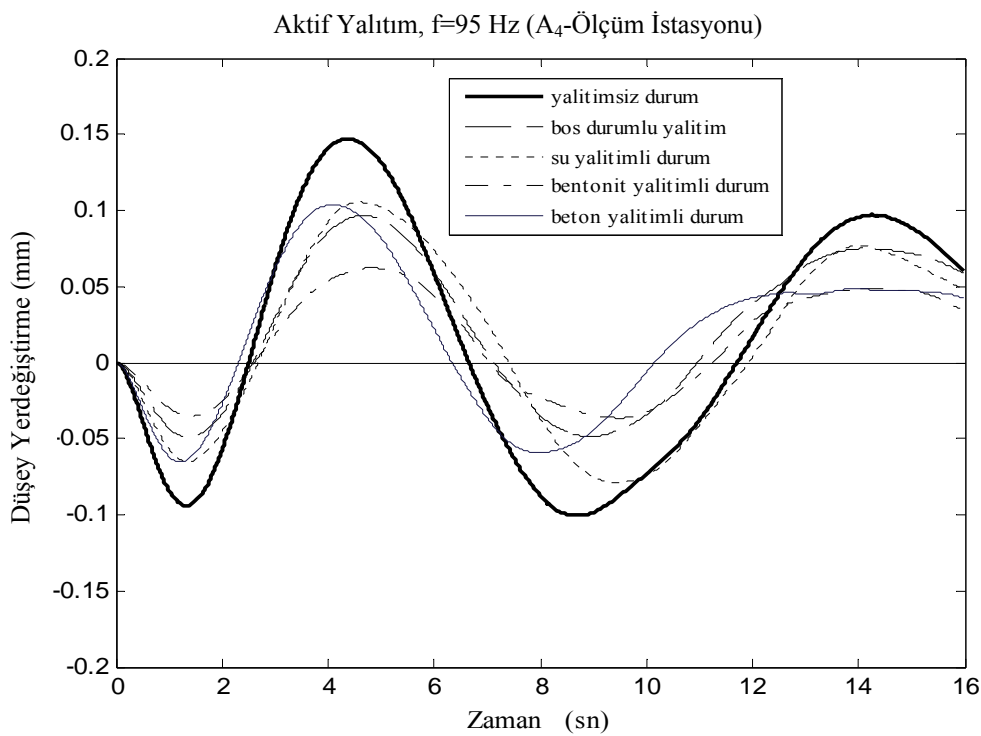


Şekil 4.14. Aktif yalıtım A<sub>4</sub> istasyonu 50 Hz zamana bağlı yerdeğiştirme grafiği



Şekil 4.15. Aktif yalıtım  $A_4$  istasyonu 75 Hz zamana bağlı yerdeğiştirme grafiği

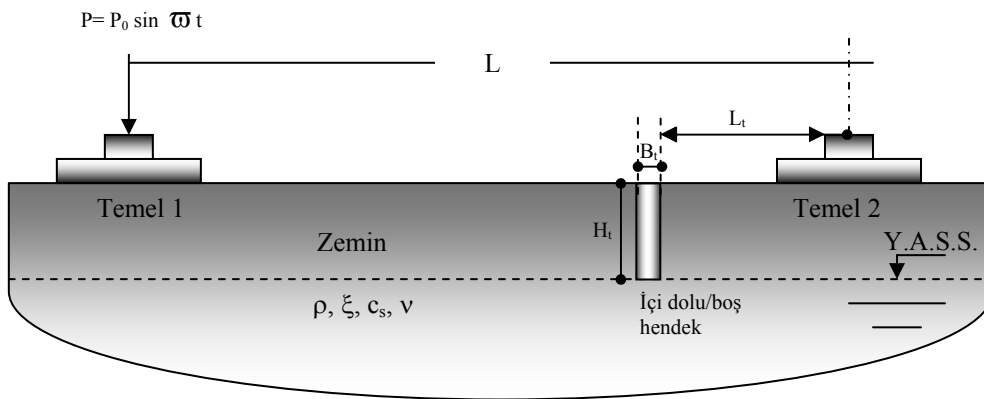
95 Hz'lik dinamik yüklemde; dalga artık daha yüzeyden yayılmaktadır. Burada da bentonit yalıtım uygulaması daha iyi yalıtım göstermektedir (Şekil 4.16.).



Şekil 4.16. Aktif yalıtım  $A_4$  istasyonu 95 Hz zamana bağlı yerdeğiştirme grafiği

Aktif yalıtım uygulamasının  $A_1$ - $A_4$  kayıt istasyonları sonuçları karşılıklı olarak mukayese edildiğinde; yük kaynağındaki yalıtımsız durumda yerdeğiştirme değerlerinin düşük frekanslarda yüksek çıkması ve frekans değerlerinin arttıkça yalıtımın beton yalıtım durumu lehine artması ve 95 Hz'de ise yalıtımsız durum ile yalıtım uygulanmış durumların hemen hemen yakın değerlerde seyretmesi yük kaynağındaki  $A_1$  istasyonunda gerçekçi manada bir yalıtımın olmadığı sonucunu ortaya koymaktadır. Bizler için asıl önem arz eden korunacak yapıdaki yerdeğiştirme değerlerinde ise tüm frekanslarda hemen hemen bütün yalıtım uygulamalarının yalıtımsız durum değerlerinden düşük çıkması, harmonik dalga sönümünün sağlandığının bir kanıtıdır. Düşük frekanslarda beton yalıtım hariç tüm uygulamalarda yalıtım sağlanmıştır, fakat su dolu yalıtım uygulamasında dalga sönümü daha belirgin olarak ön plana çıkmıştır. Yüksek frekanslarda ise (50 ve üzeri) bentonit yalıtımlı durumun daha fazla dalga sönümlediği gözlemlenmiştir. 50 Hz ve daha yüksek frekanslarda 0-3 sn arasında çok iyi yalıtım sağlanmıştır.

#### 4.3.2. Pasif yalıtım analizleri



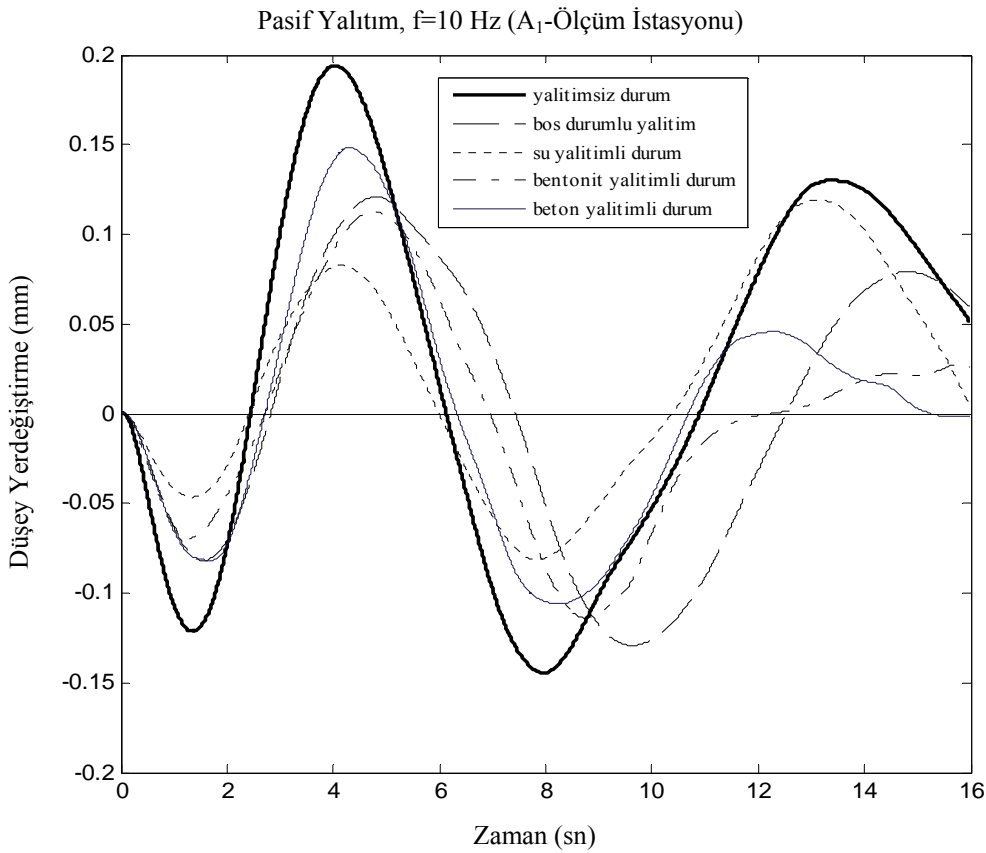
Şekil 4.17. Pasif yalıtım arazi modeli

Pasif yalıtım uygulamasında; ifade edildiği üzere Temel 1 üzerindeki sarsıcı ve üzerindeki kayıt istasyonu  $A_1$ , uygulanan harmonik yükleme sonucu düşey dalga bariyerinin korunacak yapı olan istasyonu Temel 2 ise  $A_4$  olarak tanımlanmıştır.

Pasif yalıtım çalışmasının  $A_1$  kayıt istasyonu grafik sonuçları şu şekilde yorumlanmıştır:

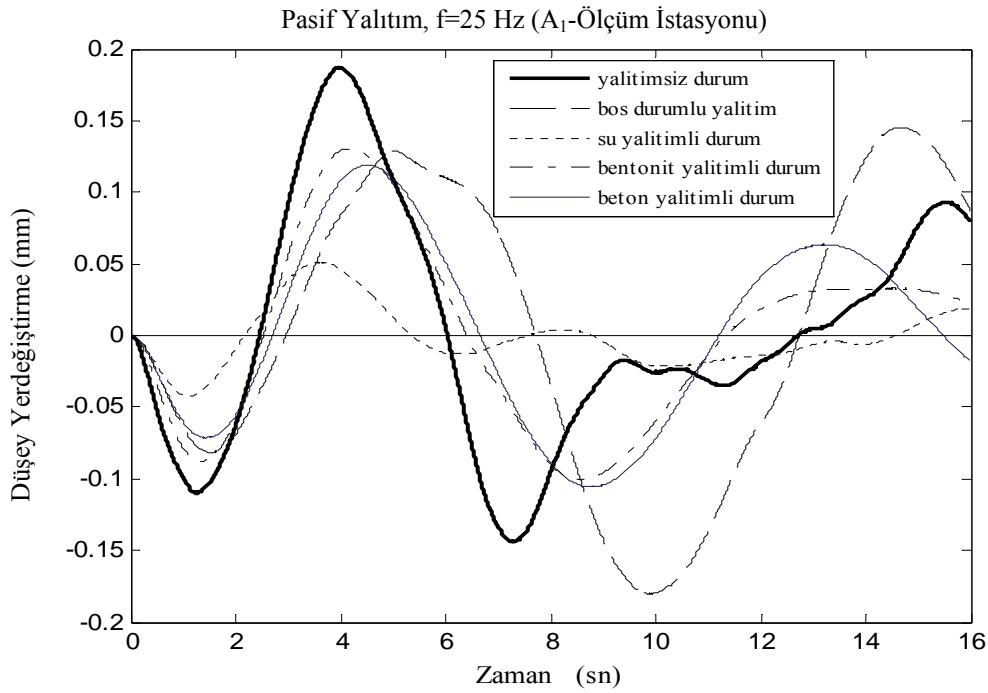


10 Hz'lik dinamik yüklemde; yalıtımsız durumda en büyük yerdeğiştirme değeri görülmektedir (Şekil 4.18.). Düşey dalga yalıtım bariyerinin su dolu durumu ise, en iyi yalıtım aktivasyonunu vermektedir, bunu bentonit dolu yalıtım bariyeri izlemektedir. Bu frekanstaki yüklemde ilk 6 sn'ye kadar en iyi yalıtımın su dolu bariyer uygulaması olmasına karşın, daha sonraki zaman diliminde ise, önce içi boş bariyerin, sonrasında da beton ve bentonit yalıtım modelinin daha iyi sonuç verdiği görülmektedir.



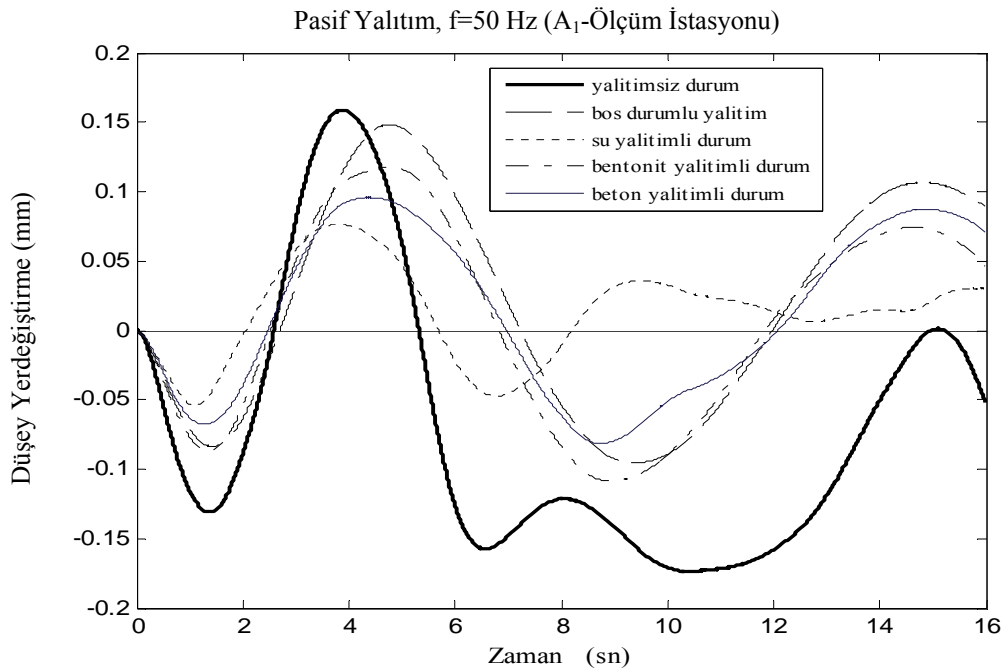
Şekil 4.18. Pasif yalıtım  $A_1$  istasyonu 10 Hz zamana bağlı yerdeğiştirme grafiği

25 Hz'lik dinamik yüklemde; yalıtımsız durumda yine en büyük yerdeğiştirmenin gerçekleştiği görülmektedir (Şekil 4.19.). Yalıtım modellerinden su dolu izolasyon durumu ise en iyi yalıtım uygulamasını vermektedir, bunu içi boş yalıtım modeli izlemektedir. 6. sn'den sonra sinüzoidal yapı bozulmaktadır.

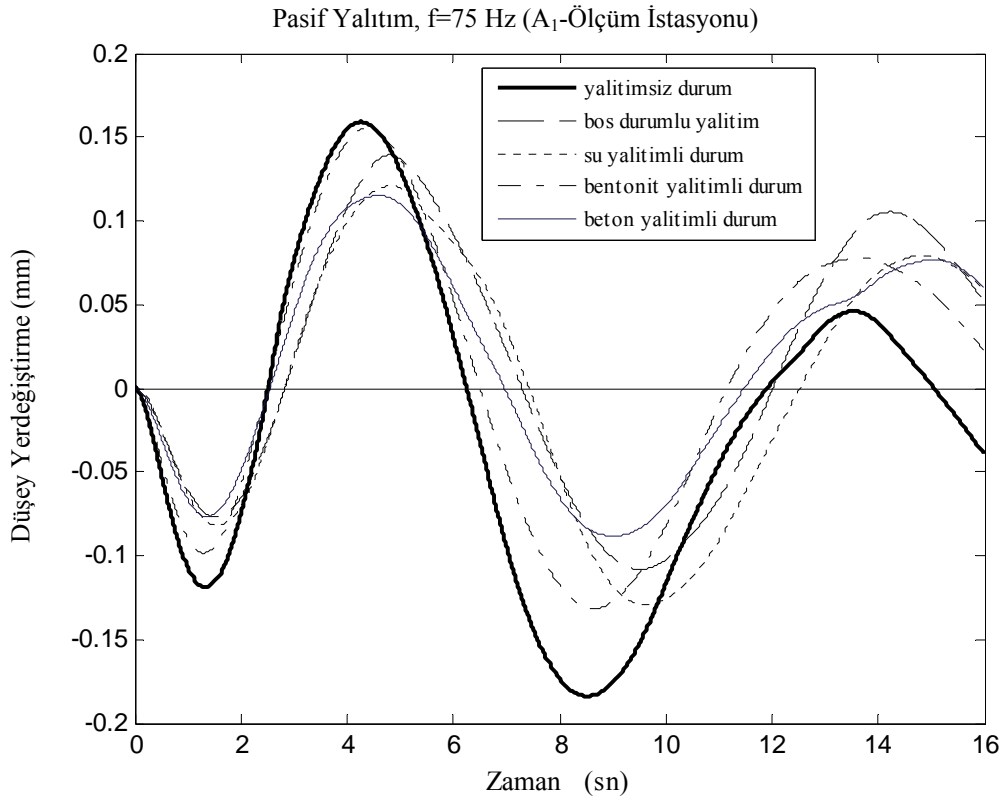


Şekil 4.19. Pasif yalıtım  $A_1$  istasyonu 25 Hz zamana bağlı yerdeğiştirme grafiği

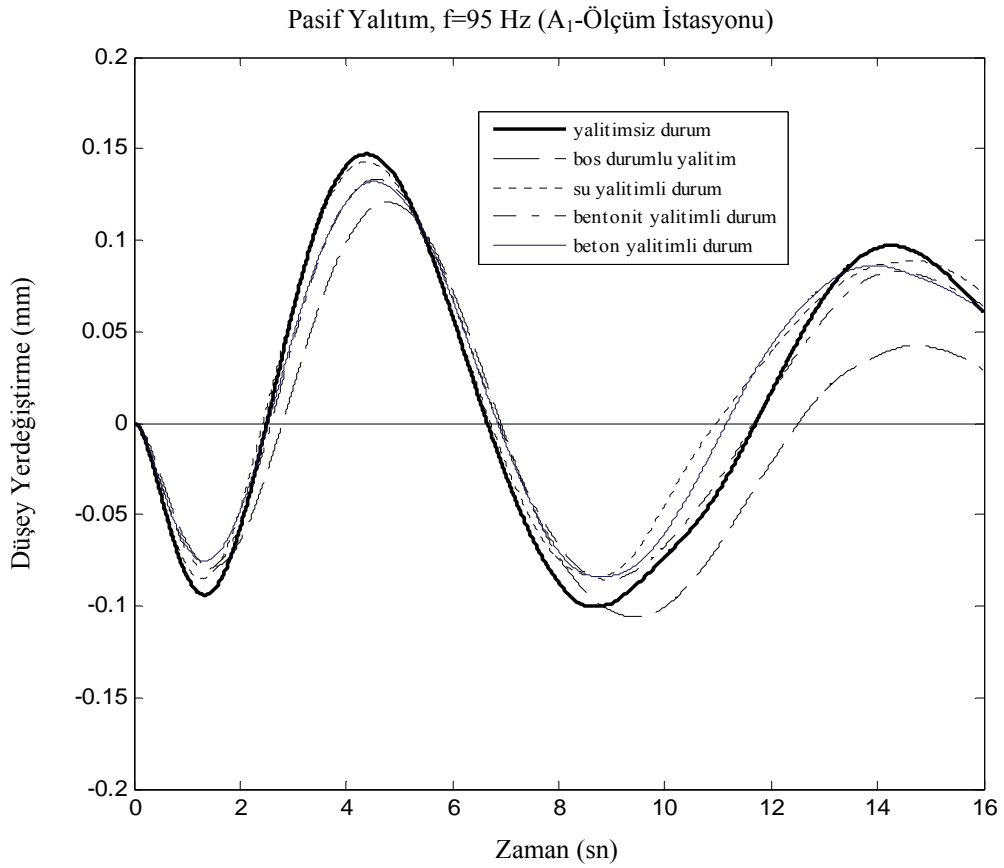
50 Hz, 75 Hz ve 95 Hz'lik dinamik yüklemelerde; her üç durumda da en iyi yalıtımın su dolu dalga bariyerinde olduğu belirlenmiştir (Şekil 4.20., 4.21., 4.22.). Yerdeğiştirme değerlerindeki sünizoidal yapı bozulması aktif yalıtımda olduğu gibi pasif yalıtımdaki 50 Hz'lik uygulama içinde söylenebilir. Aynı zamanda dinamik yüklemenin miktarı arttıkça yerdeğiştirme değerlerinde de kısmi bir azalış sözkonusudur.



Şekil 4.20. Pasif yalıtım  $A_1$  istasyonu 50 Hz zamana bağlı yerdeğiştirme grafiği



Şekil 4.21. Pasif yalıtım  $A_1$  istasyonu 75 Hz zamana bağlı yerdeğiştirme grafiği



Şekil 4.22. Pasif yalıtım  $A_1$  istasyonu 95 Hz zamana bağlı yerdeğiştirme grafiği

10 Hz, 25 Hz, 50 Hz, 75Hz ve 95 Hz frekansları incelendiğinde, düşük frekanslara ait grafiklerde görülen dağınık yapının yüksek frekanslara doğru daha düzenli olduğu ve birbirlerine paralel hale geldiği izlenmektedir. Buradan da aslında yüksek frekanslarda özellikle 75 Hz ve üzerindeki frekanslarda dalga daha sık ortamdan (yüzeğe yakın) yayınımına devam ettiği için, bütün yalıtım malzemelerinde yaklaşık olarak birbirine benzer aynı davranışları sergilediği söylenebilir. Aktif yalıtım  $A_1$  kayıt uygulamaları ile kısmi bir benzerlik söz konusudur. Fakat pasif yalıtımın  $A_1$ 'deki tüm frekans uygulamalarında yerdeğiştirme değerleri aktif yalıtım  $A_1$ 'e nazaran yalıtımsız durumun altında çıkması burada yalıtımın sağlandığının bir göstergesidir.

Yalıtımsız durumda dalga herhangi bir engelle karşılaşmadığı için en yüksek faz hızı bu ölçümlerde alınmıştır. Dalga bariyerlerinin olduğu durumlarda ise 50 Hz frekans uygulamasına kadar su yalıtımlı durumda dalga hızlı yayılmaktadır. 10 Hz dışında 6-8. sn'den sonra yalıtımsız durumda yerdeğiştirme miktarında azalmalar söz konusudur.

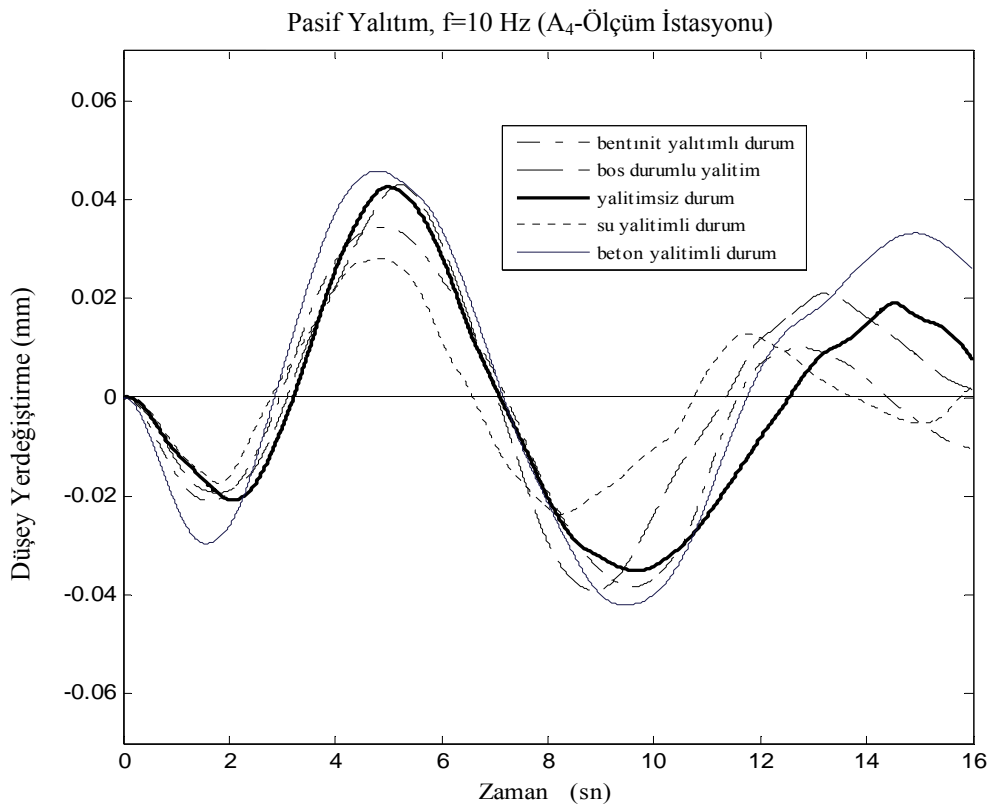
Pasif yalıtımda, yalıtımsız (düz arazi) durumdaki dalganın genliği de, dalganın faz hızı da en yüksek değerdedir. Tüm frekanslar için su dolu yalıtım durumunda en az genlik değeri görülmesine rağmen, en büyük faz hızı elde edilmiştir. Çünkü bu durumda tanecik yerdeğiştirmesi en az olduğundan, dalganın yayılma hızı da yüksek olacaktır.

Yalıtım malzemeleri içinde en az yalıtım betonda görülmektedir. Tablo 3.3.'de verilen zemin profili incelendiğinde, zemine ait ilk üç tabakanın kalınlığının yarısı yaklaşık olarak dalga bariyerinin derinliğine eşittir. Bu yüzden kaynaktan yayılan dalgalar her üç tabaka içinde de kolayca seyahat edeceklerinden, beton yalıtımlı dalga bariyeri yansiyarak hızlı bir şekilde geri geleceklerdir. Öte yandan uygulanan yükün düşey olması dolayısıyla, zemindeki tabakalardan olan düşey yansımalarda her durumda ilave etkiler meydana getirecektir. Ancak bu etkiler, yüksek frekanslarda görülmezler. Özellikle düşük frekanslarda görülen (50 Hz'deki değerlere kadar) dalga yapısındaki ve dolayısıyla yerdeğiştirme değerlerindeki sinüzoidal yapı bozukluğunun nedeni de dalganın yayınımında gerçekleşen yansımaların kayıtlarda algılanmasındandır. Dalga düşük frekanslarda, zeminin derin

tabakalarında yayılır. Çünkü, daha yüksek frekanslarda dalgalar daha yüzeysel olarak yayıldıklarından, daha derindeki tabakalardan olan yansımalar zayıf kalırlar. Öte yandan, düşük frekanslarda dalgalar daha derinlere nüfuz edeceklerinden, zemin tabakaları içerisinde çok sayıda dalga grupları oluşacağından, kayıtlarda da büyük yerdeğişimler görülecektir. Düşük frekans, derin zemin katmanlarında seyahat ederken, yüksek frekanslar ise daha yüzeysel tabakalarda seyahat ederler.

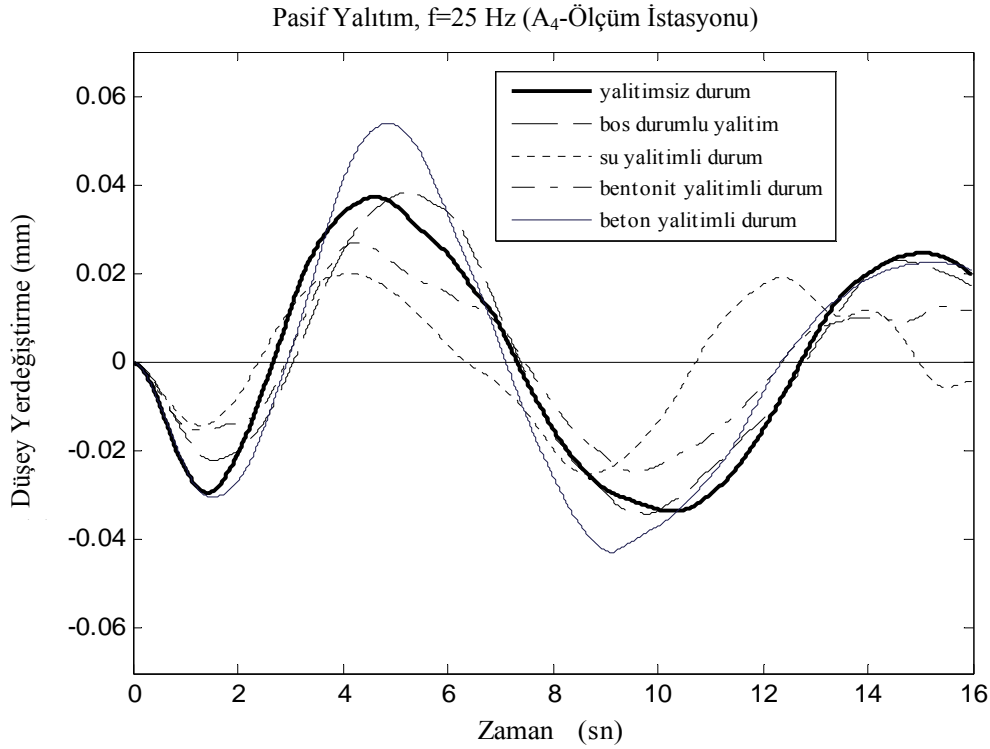
Pasif yalıtım çalışmasının A<sub>4</sub> kayıt istasyonu grafik sonuçları şu şekilde yorumlanmıştır:

10 Hz'lik dinamik yüklemeye; doğal olarak daha düşük yerdeğişimler görülmektedir. A<sub>1</sub>'e göre, ortalama 4 kat daha düşük yerdeğişimler elde edilmiştir. Bu durum bize korunacak yapının dalga yalıtımının tüm yalıtım malzeme uygulamaları için de sağlandığının en büyük kanıtıdır. Yerdeğişimler açısından, yalıtımsız durum beton yalıtım uygulaması ile paralellik arz etmemektedir. A<sub>1</sub>'de olduğu gibi, ortalama 6. sn'ye kadar bu kez düşük frekanslarda su dolu ve bentonit yalıtımlı modelin daha iyi yalıtım özelliği olduğu gözle çarpılmaktadır (Şekil 4.23.).



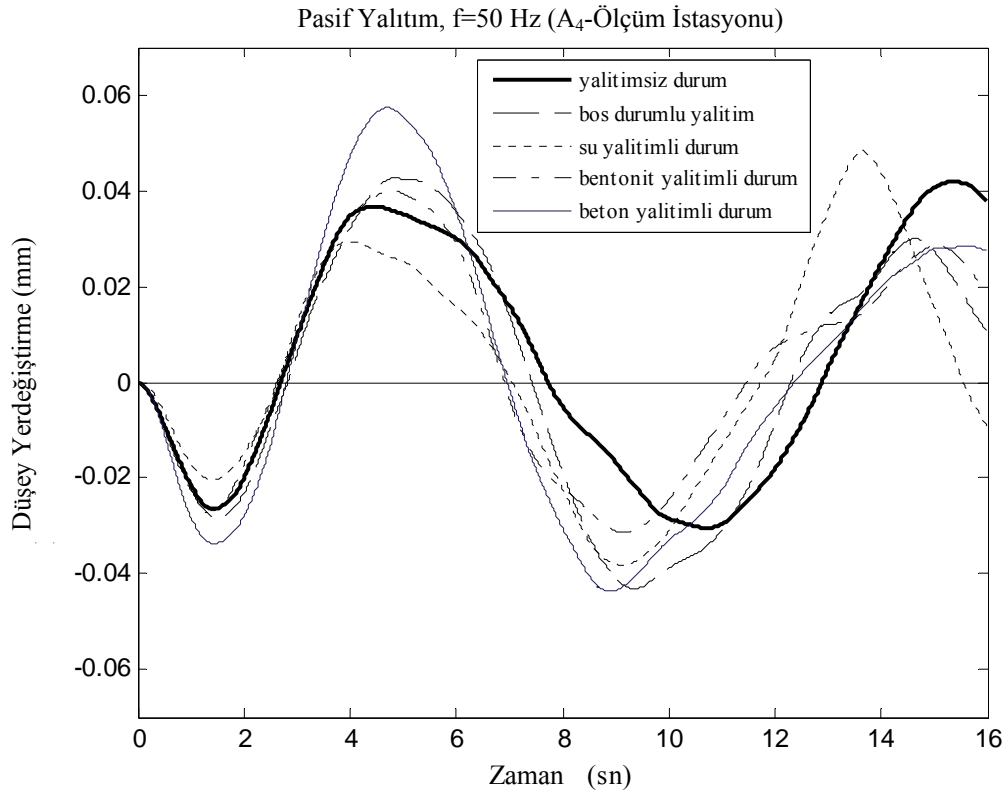
Şekil 4.23. Pasif yalıtım A<sub>4</sub> istasyonu 10 Hz zamana bağlı yerdeğiştirme grafiği

25 Hz'lik dinamik yüklemde; su dolu yalıtım durumunda en az yerdeğiştirmeler elde edilmiştir (şekil 4.24.). Düşük frekanslarda su dolu yalıtımın bentonit yalıtım uygulamasına göre nispeten daha iyi olduğu görülmektedir.

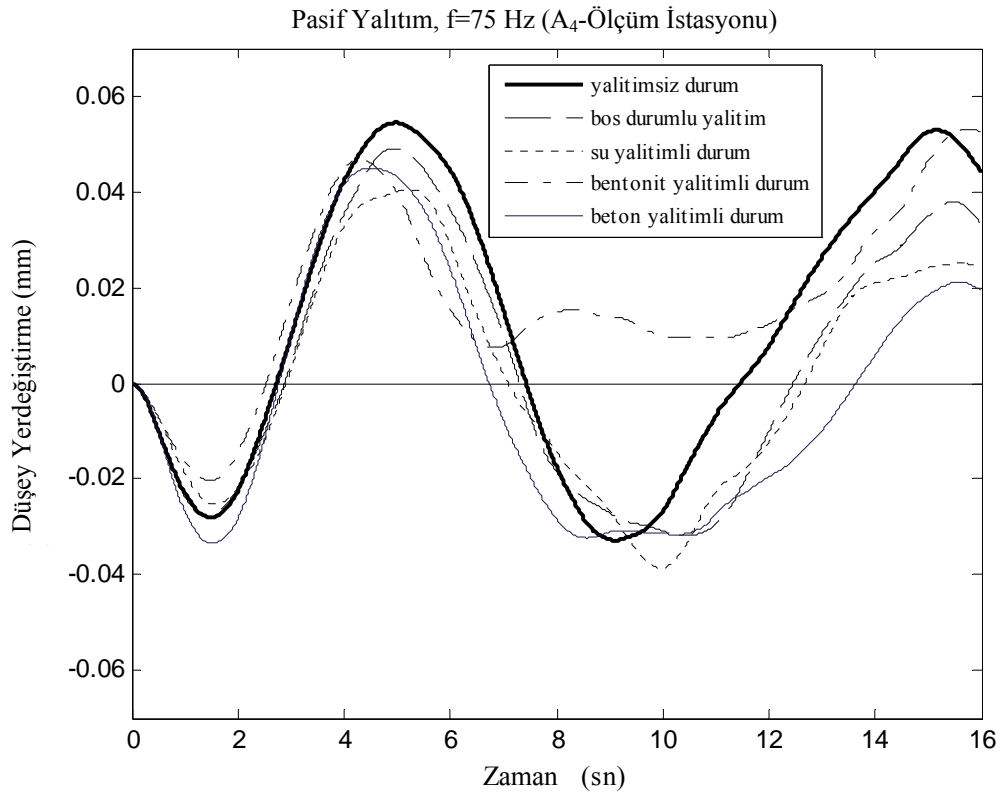


şekil 4.24. Pasif yalıtım A<sub>4</sub> istasyonu 25 Hz zamana bağlı yerdeğiştirme grafiği

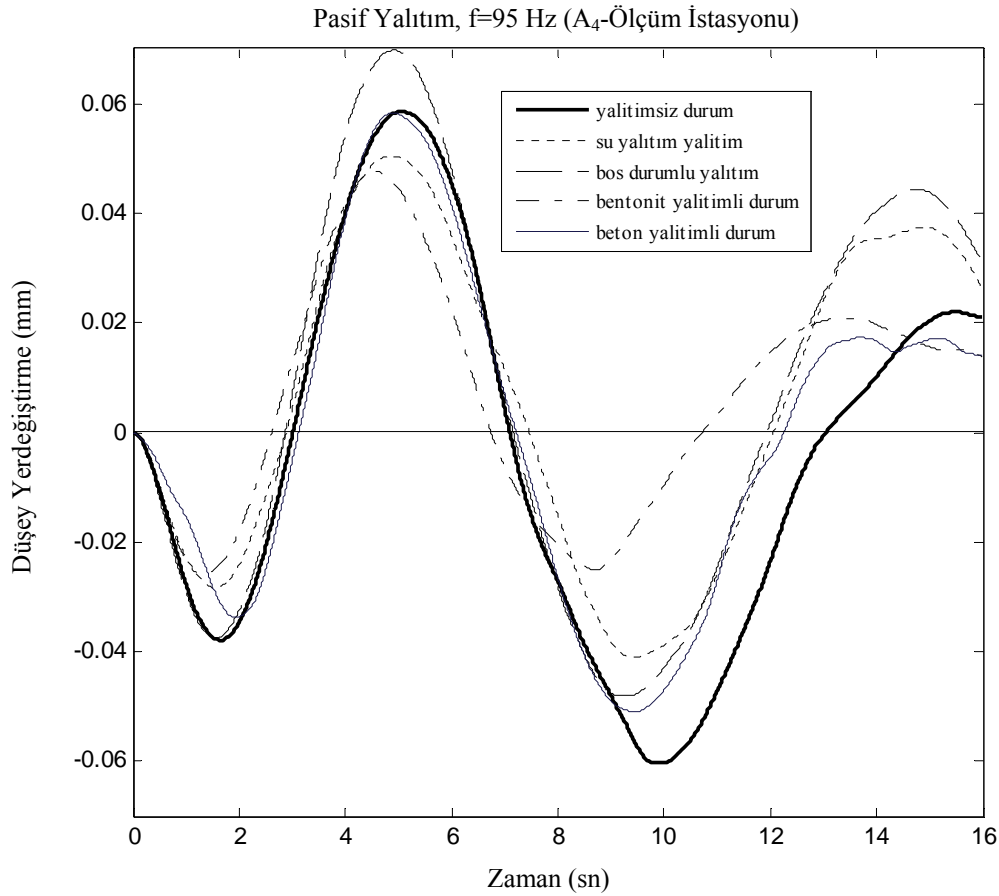
50 Hz ve yukarısı için gerçekteştirilen dinamik yüklemelerde; diğer düşük frekans uygulamalarındaki gibi su dolu ve bentonit yalıtımlı durumlara ait malzemelerin daha iyi bir yalıtım aracı olduğu anlaşılmaktadır (şekil 4.25.). Ancak bu frekanslarda dalgalar daha yüzeyden seyahat ettikleri için, gürültü olarak nitelendirilebilecek türden özellikler sergilemektedirler, tıpkı deprem dalgalarından Love dalgaları gibi. Çünkü, bunun en belirgin görüntüsü özellikle 50 Hz'de su dolu yalıtımın 13. sn'de beton yalıtıma eşdeğer bir maksimum yerdeğiştirme yapması bir tezatlık oluşturmaktadır (şekil 4.26.). Keza yine 75 Hz'de bentonit yalıtım uygulamasında ve 95 Hz'de su yalıtım uygulamalarında kayıt periyodunun 15. sn'lerinde bu durum yine göze çarpmaktadır (şekil 4.27.).



Şekil 4.25. Pasif yalıtım  $A_4$  istasyonu 50 Hz zamana bağlı yerdeğiştirme grafiği



Şekil 4.26. Pasif yalıtım  $A_4$  istasyonu 75 Hz zamana bağlı yerdeğiştirme grafiği



Şekil 4.27. Pasif yalıtım  $A_4$  istasyonu 95 Hz zamana bağlı yerdeğiştirme

Burada da aynen  $A_1$  istasyon kaydında olduğu gibi, düşük frekanslarda daha düzenli grafikler göze çarpmaktadır. Frekans değerleri arttıkça eğriler daha düzensizleşmektedir.  $A_1$  kadar belirgin olmasa da 10 Hz'de beton yalıtım durumunun faz hızının daha yüksek olduğu, 25 Hz'de ise su dolu dalga bariyer durumunun faz hızının daha yüksek olduğu görülmektedir. Düşük frekans uygulamalarında su dolu yalıtım uygulamasının bentonite nazaran daha iyi bir yalıtım göstermesine rağmen, yüksek frekans uygulamalarında ise bentonit yalıtım uygulaması su dolu yalıtım uygulamasına nazaran sönümlenme özelliği biraz daha iyidir. Frekansın artması bentonit yalıtım uygulamasında yoğunluğunun suya göre daha fazla olması göz önünde bulundurulursa bir avantaj sağladığı sonucunu ortaya koymaktadır. Yani düşük frekanslarda yoğunluğu az olan yalıtım malzemeleri yoğunluğu fazla olan yalıtım malzemelerine göre daha fazla yalıtılabilir özelliği sergilerken, yüksek frekanslarda ise yoğunluğu fazla olan yalıtım malzemeleri yoğunluğu az olan yalıtım malzemelerine nazaran daha iyi bir yalıtım özelliği sağlamaktadırlar. Yalıtımsız

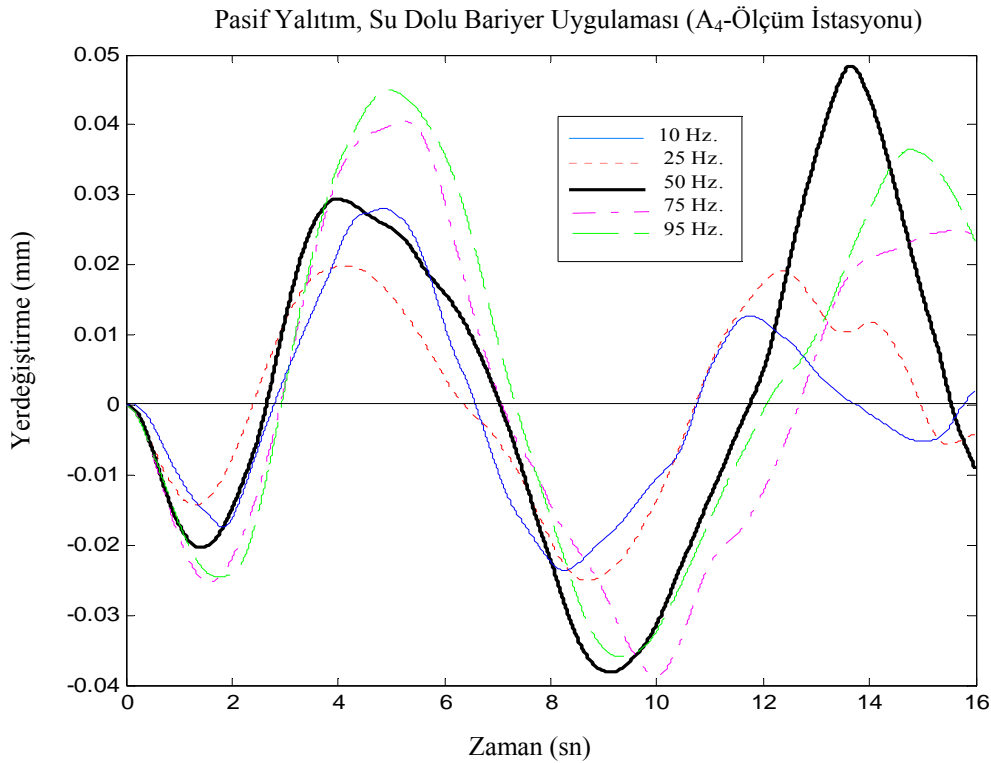


durumun yerdeğiştirmesi bütün frekanslar için yaklaşık aynı olup, diğer eğrilerin ortalama değerlerine sahip bir seviyede izlenmektedir.

#### 4.4. Sonuçların Karşılaştırılması

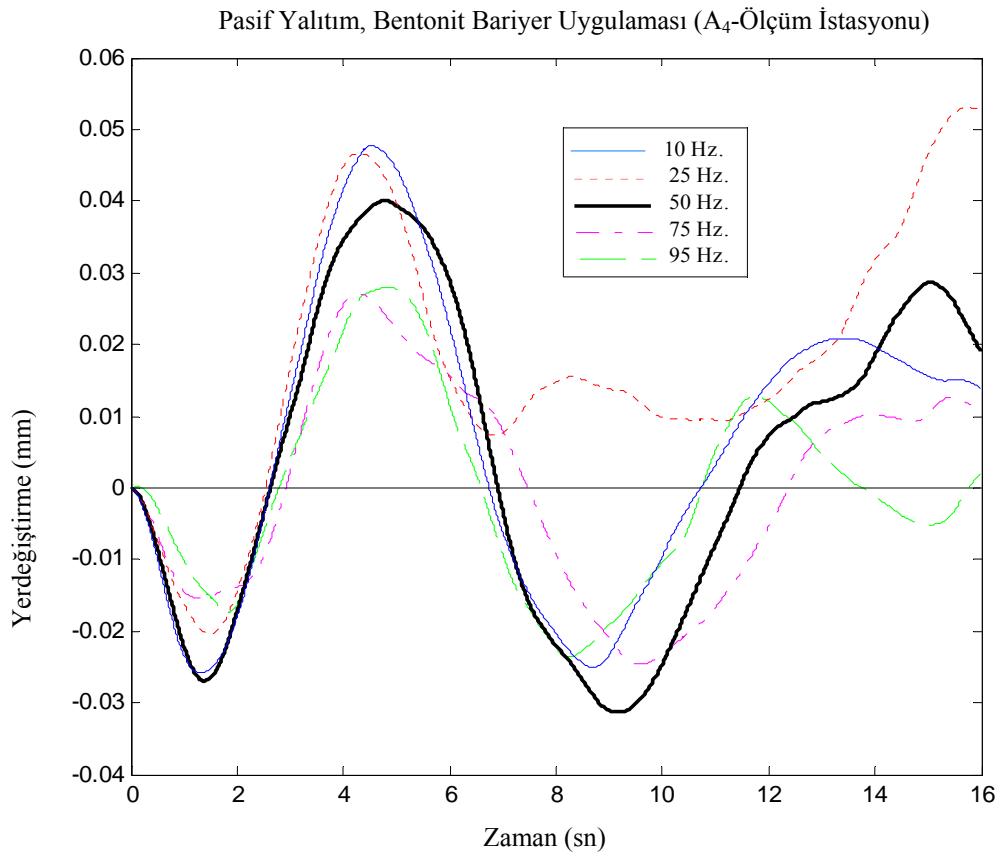
Elde edilen verilerin sonucunda en pozitif yalıtımın sağlandığı pasif yalıtım uygulamasının korunacak yapı grafikleri gözden geçirilerek, grafiklerin kullanılan yalıtım malzemesinin her dinamik yüklemdeki yerdeğiştirme-zaman boyutu grafikleri çizdirildi. Bu grafikler en iyi yalıtım malzemesinin kullanıldığı su dolu yalıtım ve bentonit yalıtım uygulamaları için ve aynı zamanda en kötü yalıtım malzemesi beton yalıtım uygulamaları için elde edildi. Sonuçlar eldeki diğer grafikler ile karşılaştırıldı.

Düşey dalga bariyerinin korunacak yapıya yakın olan uygulaması pasif yalıtımda tüm frekanslarda su dolu ve bentonit dolu yalıtım uygulamasının diğer yalıtım uygulamalarına nazaran daha iyi sonuçlar verdiği grafik analizleri kısmında ifade edilmiştir.



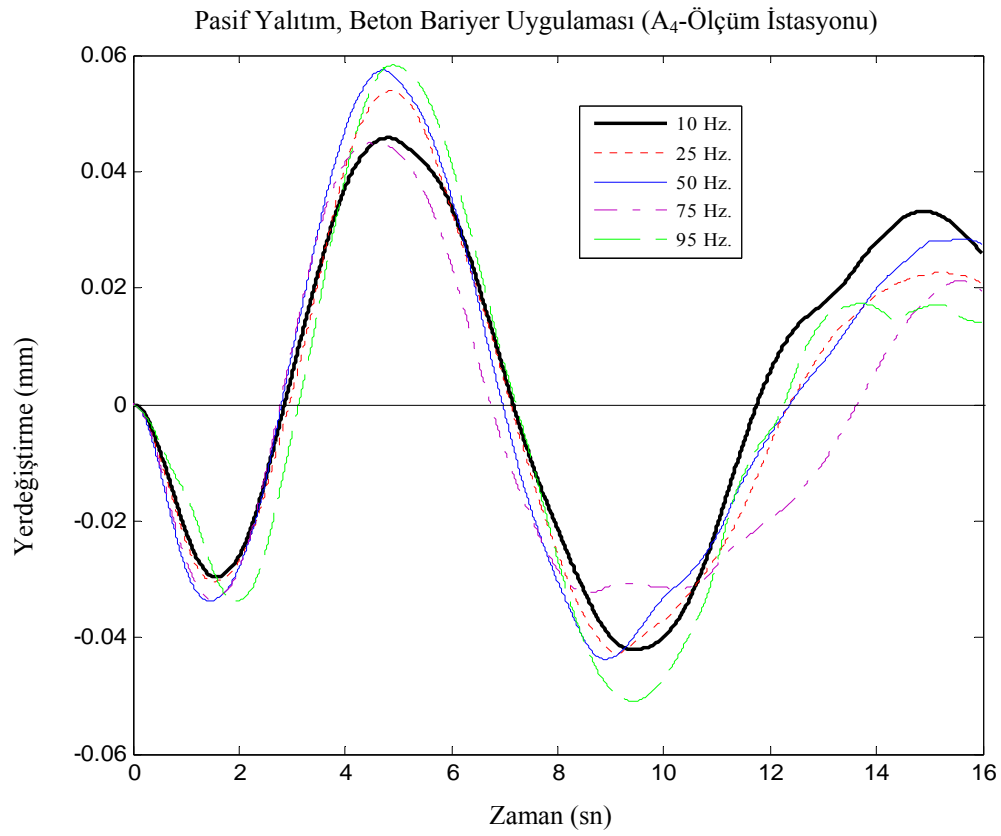
Şekil 4.28. Pasif yalıtım A<sub>4</sub> istasyonu su dolu yalıtım uygulaması zamana bağlı yerdeğiştirme grafiği

Şekil 4.28.'de görüldüğü üzere su dolu yalıtım dalga bariyerinde düşük frekanslarda 10 Hz–25 Hz ve kısmen de 50 Hz'lik dinamik yüklemelerde su dolu yalıtım bentonite göre daha iyi sonuçlar vermiştir. Olumlu sonuç elde ettiğimiz diğer bir yalıtım uygulaması bentonit yalıtımında ise uygulanan yüksek frekanslarda elde edilen sonuçların su dolu yalıtıma göre daha pozitif olduğu görülmektedir (Şekil 4.29.). Birbirlerine göre karşılıklı olarak farklı frekanslarda göstermiş oldukları bu üstünlüğe sebep olarak malzemelerin yoğunluklarının farklı olması söylenebilir.



Şekil 4.29. Pasif yalıtım A<sub>4</sub> istasyonu bentonit yalıtım uygulaması zamana bağlı yerdeğiştirme grafiği

Pasif yalıtımın korunacak yapı istasyon kayıt verilerinde en olumsuz yalıtımı sağlayan yöntem olan beton malzeme yalıtım uygulaması tüm frekanslarda yüksek yerdeğiştirme değerleri elde etmemize neden olmuştur (Şekil 4.30.).



Şekil 4.30. Pasif yalıtım A<sub>4</sub> istasyonu beton dolu yalıtım uygulaması zamana bağlı yerdeğiştirme grafiği

## **BÖLÜM 5. SONUÇLAR VE ÖNERİLER**

Gerçekleştirilen bu deneysel çalışma belli bir devirde yayılan harmonik karakterdeki dalgaların korunacak türdeki yapılarda oluşabilecek titreşimin yarattığı zararlı etkileri ve bu titreşimleri azaltabilmek için kullanılabilir bir düşey dalga bariyeri modeli araştırılmıştır.

Özellikle Adapazarı gibi alüvyonlu ve yumuşak zemin tabakalarında inşa edilen yapıların sismik ya da yapay yükler altındaki davranışları yapı ile zemin etkileşimi bakımından önem arz etmektedir. Yumuşak zeminlerde inşa edilen önemli yapıları çeşitli titreşim kaynaklarının oluşturduğu büyük genlikli dalgaların hasar verici etkilerinden korumak ve bu zararlı titreşimlerin genliklerini azaltmak için en uygun geometrik ve malzeme özelliklerine sahip sismik dalga bariyerini belirlemek üzere farklı malzemelerden oluşturulmuş deneysel bir model kurulmuştur. Bu model yardımıyla farklı sismik dalga bariyeri yalıtım çalışmaları ile sistematik ve ayrıntılı parametrik araştırmalar yapılarak bir takım sayısal sonuçlar elde edilmiş ve farklı özellikteki dalga bariyerlerinin titreşim azaltıcı etkileri gözlenmiştir.

Gerçekleştirilen deneysel sismik dalga yalıtım modelinde bir temel bloğu harmonik yük etkisi altında sarsılmış (yük kaynağı) ve belirli bir mesafe ötedeki diğer temel bloğundaki (korunacak yapı) etkisi incelenmiştir. Bu sistem ilk olarak her hangi bir yalıtım aracı olmaksızın (yalıtımsız durum) kurulmuş ve dış yükün farklı frekans değerleri için analizler yapılmış ve sonuçlar elde edilmiştir. İkinci aşamada titreşim azaltıcı düşey dalga bariyeri yük kaynağının yakınına yerleştirilerek (aktif yalıtım) model kurulmuş, bu şekilde dalga bariyerinin malzeme ve geometrik özelliklerinin ve dalga bariyerinin kaynağa olan uzaklığının etkisi farklı frekans değerleri için araştırılmış ve sonuçlar elde edilmiştir. Son aşamada dalga bariyeri korunacak yapıya yaklaştırılarak (pasif yalıtım) sistem hazırlanmış ve bariyerin malzeme özelliklerinin, geometrik özelliklerinin ve bariyerin yapıya olan uzaklığının etkisi farklı frekans

değerleri için elde edilmiştir. Yalıtımsız durum, aktif yalıtım ve pasif yalıtım durumları için elde edilen sonuçlar incelenmiş ve sonuçlar karşılaştırmalı olarak sunulmuştur.

Çalışmalar sonucunda elde edilen analiz yorumları aşağıda verilmiştir:

- 1) Aktif yalıtımın yük kaynağındaki verilerde tüm yalıtım uygulamalarında gerçek anlamda bir yalıtım sağlandığı ifade edilemez. Çünkü yalıtımsız durum modelinde yalıtım uygulanmış modellere nazaran yerdeğiştirme değerleri daha azdır. Yüksek frekanslarda bu yapı değişerek yaklaşık benzer yerdeğiştirme değerlerine doğru bir benzerlik oluşmaktadır. Yerdeğiştirme değerleri yüksektir.
- 2) Aktif yalıtımın korunacak yapı modelinde ise kısmi bir yalıtım elde edilmiştir. Tüm frekans değerlerinde yalıtımsız durum yerdeğiştirme değerleri yalıtım uygulanmış yerdeğiştirme değerlerinden yüksektir. Dış yükün frekansının etkisi incelendiğinde, yüksek frekanslarda, bariyerin yük kaynağına yakın olmasından dolayı zemin ortamında oluşan yansımaların etkisiyle ikincil etkiler oluşmuş ve bariyer etkili olamamıştır.
- 3) Pasif yalıtım yük kaynağı konumunda; tüm değerleri için kısmi bir yalıtım söz konusudur. Değerler yalıtımsız durum (düz arazi) ile kıyaslandığında hemen hemen tüm yalıtım uygulamalarında sismik dalga sönümlemesi sağlanmıştır. Tüm frekanslarda su dolu yalıtım uygulaması fayda sağlamıştır. Sonuçlar aktif yalıtım korunacak yapı grafikleri ile benzerlik arz etmektedir.
- 4) Asıl istenen ve hedeflenen yerde sonuçların sağlandığı pasif yalıtımın korunacak yapı verilerinde tüm frekanslarda dalga yalıtımı sağlanmıştır. Aktif yalıtım korunacak yapı verileri grafikleri ile mukayese edildiğinde yaklaşık olarak 2~3 kat oranında değişen bir azalma söz konusudur. Düşük frekanslarda su ve bentonit yalıtımı diğer uygulamalara nazaran daha iyi yalıtılabilir özelliği gösterirken su, bentonit yalıtımdan bir adım öne geçmektedir. Yükselen frekanslarda ise bu yapı tersine değişerek bentonit, su uygulamasından biraz daha iyi yalıtım sağlamaktadır. Bariyer yoğunluğunun etkisi incelendiğinde bentonit sudan yoğunluk olarak daha büyük olduğu için yüksek frekansta bariyer yoğunluğu arttırıldıkça daha etkili olmuştur.
- 5) Korunacak yapıdaki sonuçların yalıtımın gerçekleştiği yönünde çıkmasının bir diğer nedeninin zemin soğurma faktöründen kaynaklandığı söylenebilir.

- 6) Dış yükün frekansının etkisi incelendiğinde, yüksek frekanslarda dalga zemin yüzeyinden seyahat ettiğinden (sığ bir ortamda hareket ettiğinden) ve zeminde soğrulmaya uğradığından, frekans arttıkça bariyer daha etkili olmuştur.
- 7) Aynı zamanda dalga bariyeri korunacak yapıya yaklaştırıldıkça, kaynaktan yayılan dalgaların yapıya etkili bir şekilde ulaşmasını engellemiştir.
- 8) Yapılan çalışmalarda, aktif yalıtım ile pasif yalıtım arasında etki farkları gözlenmiş olup, pasif yalıtımın aktif yalıtıma oranla daha etkin olduğu tespit edilmiştir.

Yapılan uygulamalı deneysel analiz sonucunda elde edilen sonuçların tutarlılığını ve gerçekçiliğini kontrol etmek için sayısal olarak da çalışmalar yapılmalı, bu iki çalışmanın sonuçları karşılaştırılmalıdır. Böylece sayısal çalışma sonucunda elde edilen veriler, kurulan modelden elde edilen verilerle örtüşüyor ve paralellik arz ediyorsa bulunan değerlerin geçerliliği sabitlenmiş olur.

## KAYNAKLAR

- [1] EMRE, Ö., TAYMAZ, T., DUMAN, T.Y., DOĞAN, A., Gölcük ve Düzce Depremlerinin Yüzey Kırıkları ve Sismolojik Özellikleri, Tübitak Bilim ve Teknik Dergisi, Sayı 386, 2000.
- [2] VURAL, İ., Tabakalı Zeminde Oluşturulan Yapay Kayanın Dalga Yayılışına Etkileri, Yüksek Lisans Tezi, Sakarya Üniversitesi, Sakarya, 2007.
- [3] KIRTEL, O., Sismik Bariyer Modellerinin Tabakalı Zemin Ortamındaki Dalga Yayılışına Etkileri, Yüksek Lisans Tezi, Sakarya Üniversitesi, Sakarya, 2007.
- [4] KLEIN, R., ANTEST, H., HONEDECT, D.L., Efficient 3D modeling of vibration isolation by open trenches, Computers and Structures, 809-817, 1997.
- [5] CHOUW, N., PFLANZ, G., Reduction of structural vibrations due to moving load, 251-268, Chouw and Schmid, Balkema, Rotterdam, 2000.
- [6] AL-HUSSAINI, T. M., Vibration isolation by wave barriers, Ph. D. Dissertation, State University of New York at Buffalo, USA, 1992.
- [7] LEUNG, K. L., BESKOS, D. E., AND VARDOULAKIS, I. G., Vibration isolation using open or filled trenches, Part 3: 2-D non-homogeneous soil, Computational Mechanics, 1990, 7, pp. 137-148.
- [8] ADAM M., ESTORFF O. V., Reduction of train-induced building vibrations by using open and filled trenches, Computers and Structures, 83, 11-24, 2005.
- [9] BAKER, J., M., An experimental study on vibration screening by in-filled trench barriers, M. S. Thesis, State University of New York at Buffalo, 1994, USA.
- [10] SCHMID, G., CHOUW, N., Soil vibration reduction due to local soil modification, the 10th earthquake engineering symposium, 1998, volume 3 pp. 2647-2651.

- [11] KIRTEL, O., ÇELEBİ, E., FIRAT, S., VURAL, İ., Kuvvetli Yer Hareketlerinin Azaltılması İçin Geliştirilen Bir Dalga Bariyeri Modeli, Zemin Mekaniği ve Temel Mühendisliği Onbirinci Ulusal Kongresi, 2006, Trabzon, Türkiye.
- [12] CELEBI, E., GUNDUZ A.N., Dynamic response of multistory buildings including soil-structure interaction in elastic layered media, European Conference on Computational Mechanics, München, Germany, August 31-September 3, 1999.
- [13] AYDINOĞLU, M. N., Yapı Analizi ve Tasarımı süresince Statik ve Dinamik Yapı-Zemin Etkileşimi, Zemin Mekaniği ve Temel Mühendisliği 5. Ulusal Kongresi, ODTÜ, Ankara, 1994.
- [14] KÜYÜK, H. S. ve ÇELEBİ, E., Titreşim azaltıcı dalga bariyerlerinin sonlu elemanlar yöntemi ile simülasyonu, Kocaeli Deprem Sempozyumu, 23-25 Mart 2005, Kocaeli, 1061-1066.
- [15] KÜYÜK, S., SÜMER, Y., KIRTEL, O., VURAL, İ., ÇELEBİ, E. ve FIRAT, S., Sismik bariyer modellerinin tabakalı zemin ortamındaki dalga yayılışına etkileri, İMO Teknik Kongre, Antalya Yöresinin İnşaat Mühendisliği Sorunları Kongresi, 22-24 Eylül 2005, Antalya.
- [16] VURAL, İ., FIRAT, S., ÇELEBİ, E., KIRTEL, O., Dinamik Yükler Etkisi Altında Temel Titreşimlerinin Azaltılması İçin Sonlu Elemanlar Modeli, Zemin Mekaniği ve Temel Mühendisliği Onbirinci Ulusal Kongresi, 2006, Trabzon, Türkiye.
- [17] VURAL, İ., FIRAT, S., ÇELEBİ, E. ve KIRTEL, O., Elastik Ortamda Yapay Ana Kayanın Dalga Yayılışına Etkileri, Yedinci Uluslar arası İnşaat Mühendisliğinde Gelişmeler Kongresi, 11-13 Ekim, Yıldız Teknik Üniversitesi, 2006, İstanbul, Türkiye.
- [18] KIRTEL, O., ÇELEBİ, E., FIRAT, S., VURAL, İ., Kuvvetli Yer Hareketlerinin Azaltılması İçin Geliştirilen Bir Dalga Bariyeri Modeli, Zemin Mekaniği ve Temel Mühendisliği Onbirinci Ulusal Kongresi, Trabzon, Türkiye, 2006.
- [19] KIRTEL, O., ÇELEBİ, E., FIRAT, S. ve VURAL, İ., Sismik Bariyer Modellerinin Elastik Ortamda Dalga Yayılışına Etkileri, Yedinci Uluslar arası İnşaat Mühendisliğinde Gelişmeler Kongresi, 11-13 Ekim, Yıldız Teknik Üniversitesi, İstanbul, Türkiye, 2006.
- [20] FORCHAP, E., VERBIC, B., Wave propagation and reduction of foundation vibrations, Berg-Verlag GmbH, Bochum, 1994, pp. 165-178.
- [21] G.Y. GAO, Z.Y. LIA, CH. QIUB, Z.Q. YUE, Three-dimensional analysis of rows of piles as passive barriers for ground vibration isolation, Soil Dynamics and Earthquake Engineering 26, 2006, 1015–1027.



- [22] ANDERSEN, L., NIELSEN, S.R.K., Reduction of ground vibration by means of barriers or soil improvement along a railway track, *Soil Dynamics and Earthquake Engineering* 25, 2005, 701–716.
- [23] SHEN-HAW JU, HUNG-TA LIN, Analysis of train-induced vibrations and vibration reduction schemes above and below critical Rayleigh speeds by finite element method, *Soil Dynamics and Earthquake Engineering* 24, 2004, 993–1002.
- [24] HILDEBRAND, R., Effect of soil stabilization on audible band railway ground vibration, *Soil Dynamics and Earthquake Engineering* 24, 2004, 411–424.
- [25] HUNAIDI, O., *Traffic Vibrations in Buildings*, National Research, Council of Canada, June 2000, ISSN 1206-1220.
- [26] M. HESHAM EL NAGGAR and ABDUL GHAFAR CHEHAB, Vibration barriers for shock-producing equipment, *Can. Geotech. J.* 42: 297–306, 2005.
- [27] ROESSET, M. J., *Stiffness and Damping Coefficients in Foundations, Dynamic response of pile foundations*, ASCE, 1-30, 1980.
- [28] GAZETAS, G., DOBRY, R., Simple Radiation Damping Model for Piles and Footings, *Journal of Engineering Mechanics*, ASCE, 110, 937-956.
- [29] BU, S., *Impedance Functions of Square Foundations Embedded in an Incompressible Half-Space*, *Engineering Analysis with Boundary Element*, Elsevier, 221-231, 1998.
- [30] WOLF, P. J., CHUHAN, Z., *Dynamic soil-structure interaction*, Prentice-Hall, Englewood Cliffs, NJ, 1996.
- [31] YILDIRAR, Y., *Beklenen Büyük Marmara Depremi, Sınır Ötesi Yayınları*, s. 54-64, Kasım, 2000.
- [32] ERCAN, A., *Yer araştırma yöntemleri*, İstanbul, 2001.
- [33] KRAMER, S. L., *Geoteknik deprem mühendisliği*, 2003.
- [34] AL-SADİ, H. N., *Sismik Arama Teknikleri ve İşlemleri*, Mart, İstanbul, 1992.
- [35] BATH, M., *Mathematical Aspects of Seismology*, (Elsevier, Amsterdam), 415 pp. 174-186, 1978.
- [36] CELEP Z., *Deprem mühendisliğine giriş ve depreme dayanıklı yapı tasarımı*, İstanbul, 2000.

- [37] BEYHAN, G., Yüksek Lisans Sismik Yansıma Ders Notları, 2007.
- [38] CANITEZ, N., Jeofizikte modelleme, İstanbul, 1997.
- [39] KADIOĞLU, S., Mühendislik Jeofiziği ve Uygulamaları, Ankara, 2004.
- [40] NAFE, J. E. ve DRAKE, C. L., Physical Properties of Marine Sediments, The Sea, (Interscience, NewYork), 794-815, 1998.
- [41] TAYMAZ, T., Gölcük Sapanca Depremlerinin Kaynak Mekanizması Çözümleri, Batı Anadolu Depremselliği Sempozyumu, 23-25 Mart 2003, İstanbul, 1061-1066.
- [42] ÇAVDAR, E., Betonarme Binaların Sismik Değerlendirilmesi, Yüksek Lisans Tezi, Eylül, 2005.
- [43] SERTÇELİK, F., Marmara Bölgesinde Sismik Dalgaların Soğurulması, Yüksek Lisans Tezi, Şubat, 2006.
- [44] ÖNALP, A., Geoteknik Bilgisi, Trabzon, 1982.
- [45] VURAL, İ., KIRTEL, O., BEYHAN, G., ÇANKAYA, İ., FIRAT, S., ÇELEBİ, E., Hareketli Yüklerden Kaynaklanan Yapı Titreşimlerinin Azaltılması, Uluslararası Demiryolu Sempozyumu, 13-16 Aralık 2006, İstanbul, 1061-1066.
- [46] YARAMANCI, U., Jeofizikte Modelleme, İstanbul, 1984.

## ÖZGEÇMİŞ

Ümit BALKAN, 03.01.1977 de Bursa' da doğdu. İlk, orta ve lise eğitimini Bursa' da tamamladı. 1994 yılında Bursa Hürriyet Teknik Lisesi, İnşaat Bölümünden mezun oldu. Yine aynı yıl başladığı Abant İzzet Baysal Üniversitesi Yapı Öğretmenliği bölümünden 1999 yılında mezun oldu. 1999 yılı Ekim ayında Şırnak/Cizre Endüstri Meslek Lisesinde Yapı Öğretmeni olarak memuriyet görevine başladı. 2004 yılına kadar görev aldığı bu okulda bölüm şefliği, müdür yardımcılığı görevlerinde bulundu. 2004 yılında Sakarya Fatih Endüstri Meslek Lisesine Yapı Öğretmeni olarak tayin oldu. Şu anda halen aynı okulda Yapı Öğretmeni olarak görev yapmaktadır.