

T.C.
SAKARYA ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

**SİSMİK BARIYER MODELLERİNİN TABAKALI
ZEMİN ORTAMINDAKİ DALGA YAYILIŞINA
ETKİLERİ**

YÜKSEK LİSANS TEZİ

İnş. Müh. Osman KIRTEL

Enstitü Anabilim Dalı : İNŞAAT MÜHENDİSLİĞİ

Enstitü Bilim Dalı : YAPI

Tez Danışmanı : Yrd. Doç. Dr. Erkan ÇELEBİ

Haziran 2007

T.C.
SAKARYA ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

**SİSMİK BARIYER MODELLERİNİN TABAKALI
ZEMİN ORTAMINDAKİ DALGA YAYILIŞINA
ETKİLERİ**

YÜKSEK LİSANS TEZİ

İnş. Müh. Osman KIRTEL

Enstitü Anabilim Dalı : İNŞAAT MÜHENDİSLİĞİ

Enstitü Bilim Dalı : YAPI

Bu tez 06 / 06 /2007 tarihinde aşağıdaki jüri tarafından Oybirliği ile kabul edilmiştir.

**Yrd. Doç. Dr. Erkan Çelebi
Jüri Başkanı**

**Yrd. Doç. Dr. Zeki Özcan
Üye**

**Doç. Dr. Seyhan Fırat
Üye**

TEŞEKKÜR

Çalıőmalarım boyunca değerli bilgi, birikim ve yardımlarını esirgemeyen, çalıőmalarımı her aşamada izleyip değerlendirerek yön veren ve her türlü desteği sağlayan hocam sayın Yrd. Doç. Dr. Erkan ÇELEBİ'ye minnet ve őükranlarımı sunarım. Ayrıca çalıőmalarımda bilgi ve tecrübeleriyle katkılarını esirgemeyen değerli hocalarım Doç. Dr. Seyhan FIRAT, Yrd. Doç. Dr. Günay BEYHAN, Yrd. Doç. Dr. İlyas ÇANKAYA, Yrd. Doç. Dr. Naci ÇAğLAR, Yrd. Doç. Dr. Muharrem AKTAŐ ve Arő. Gör. Dilek MERCAN ERYILMAZ'a teőekkürlerimi sunarım. Çalıőmalarım sırasında her aşamada beraber çalıőtıęım ve desteğini esirgemeyen çok değerli arkadaőım Arő. Gör. İsa VURAL'a őükranlarımı sunarım. Eğitim-öğretimim boyunca beni teővik eden, maddi ve manevi hiçbir őeyi esirgemeyen sevgili anne ve babam Güllü-Ali KIRTEL'e ve kardeőlerime desteklerinden dolayı teőekkürü bir borç bilirim.

İÇİNDEKİLER

TEŞEKKÜR.....	ii
İÇİNDEKİLER	iii
SİMGELER VE KISALTMALAR LİSTESİ.....	v
ŞEKİLLER LİSTESİ	vii
TABLolar LİSTESİ.....	x
ÖZET.....	xi
SUMMARY.....	xii
BÖLÜM 1.	
GİRİŞ.....	1
1.1. Problemin Tanımı.....	1
1.2. İlgili Çalışmalar.....	2
1.3. Çalışmanın Amaç ve Kapsamı.....	6
BÖLÜM 2.	
ZEMİN ORTAMINDA DALGA YAYILIŞI.....	7
2.1. Cisim Dalgaları.....	8
2.1.1. P-dalgası.....	8
2.1.2. S-dalgası.....	9
2.2. Yüzey Dalgaları.....	10
2.2.1. Love dalgaları.....	11
2.2.2. Rayleigh dalgaları.....	11
2.3. Yük Kaynakları ve Etkileri.....	13
2.4. Zemin Dinamik Özelliklerinin Ölçülmesi.....	14

BÖLÜM 3.	
YAPI-ZEMİN DİNAMİK ETKİLEŞİM PROBLEMLERİNİN ÇÖZÜMLENMESİ.....	16
3.1. Altsistem Yaklaşımı.....	17
3.2. Doğrudan Çözüm Yaklaşımı.....	17
3.3. Zemin Ortamının Modellenme Şekilleri.....	18
3.3.1. Sonlu elemanlar kullanılarak zemin ortamının idealleştirilmesi.....	19
3.3.1.1. Sınır elemanlar yöntemiyle sınır şartlarının belirlenmesi.....	20
3.3.1.2. Viskoz sınır şartlarıyla modelleme.....	22
3.3.1.3. İnce Tabaka/Esnek Hacim yöntemiyle idealleştirme.....	23
BÖLÜM 4.	
SONLU ELEMANLAR YÖNTEMİ.....	25
4.1. Genel Olarak Modelleme.....	27
4.2. Modelleme ve Dikkat Edilmesi Gereken Hususlar.....	28
4.3. Sonlu Eleman Yönteminin Adımları.....	30
BÖLÜM 5.	
SAYISAL UYGULAMA.....	31
5.1. Zeminin Modellenmesi.....	31
5.2. Zeminin Sınır Şartlarının Belirlenmesi.....	34
5.3. Zemin Özelliklerinin ve Zemin Parametrelerinin Belirlenmesi.....	35
5.4. Matematik Modelin Kurulması.....	41
BÖLÜM 6.	
SONUÇLAR VE ÖNERİLER.....	58
KAYNAKLAR.....	61
ÖZGEÇMİŞ.....	64

SİMGELER VE KISALTMALAR LİSTESİ

ν	: Poisson oranı
r	: Dalga kaynağına olan uzaklık
c_p	: Basınç dalgası yayılma hızı
$c_s(v_s)$: Kayma dalgası yayılma hızı
E	: Elastisite modülü
ρ	: Zeminin yoğunluğu
λ	: Dalga boyu
c_R	: Rayleigh dalgası yayılma hızı
G	: Kayma modülü
D	: Sönüm oranı
h_i	: Zemin tabaka kalınlığı
α_i	: Tabakanın eğimi
T_i	: Dalga iletim katsayısı
R_i	: Dalga yansımaya katsayısı
μ_i	: Süseptibilite katsayısı (manyetiklik miktarı)
G_i	: Gravitasyon çekimi
ρ_i	: Zemin tabakalarının öz direnci
T	: Zemin hakim periyodu
B	: Zeminin gelen dalgaları büyütme miktarı
H_{si}	: Zemin bölgesinin yüksekliği
L_{si}	: Zemin bölgesinin genişliği
K	: Rijitlik
F	: Kuvvet
U_i	: Yatay yerdeğiştirme
V_i	: Düşey yerdeğiştirme

P_0	: Uygulanan harmonik yükün genliği
ω	: Uygulanan harmonik yükün açısal frekansı
T	: Periyot
B_t	: Dalga bariyerinin genişliği
H_t	: Dalga bariyerinin derinliği
L	: Temel blokları arasındaki mesafe
ξ	: Sönüm katsayısı
L_t	: Aktif yalıtımda bariyerle yük kaynağı arasındaki mesafe, pasif yalıtımda bariyerle korunacak yapı arasındaki mesafe
L_R	: Rayleigh dalgasının dalga boyu
\bar{l}	: Aktif ve pasif yalıtım için dalga bariyerinin temellere uzaklığının etkisi
\bar{b}	: Bariyer genişliğinin etkisi
\bar{h}	: Bariyer derinliğinin etkisi
IR	: Empedans oranı
ρ_b	: Bariyerin yoğunluğu
c_b	: Bariyerin kayma dalga hızı
A_t	: Dalga perdeleme oranı
\bar{U}_z	: Yalıtımsız durumda düşey yerdeğiştirme genliği
U_z	: Yalıtımlı durumda düşey yerdeğiştirme genliği
f	: Dış yükün frekansı

ŞEKİLLER LİSTESİ

Şekil 1.1.	Titreşim kaynağından dalgaların yayılması ve bir yalıtım aracıyla perdelenmesi.....	2
Şekil 2.1.	Rayleigh ve cisim dalgalarının yayılma hızlarının Poisson oranı ile değişimi.....	9
Şekil 2.2.	P-dalgası yayılma şekli.....	9
Şekil 2.3.	S-dalgası yayılma şekli.....	10
Şekil 2.4.	SV-dalgası ve SH- dalgası yayılma şekli.....	10
Şekil 2.5.	Love dalgası yayılma şekli.....	11
Şekil 2.6.	Rayleigh dalgası yayılma şekli.....	12
Şekil 2.7.	Rayleigh dalgalarının yatay ve düşey hareketi.....	12
Şekil 2.8.	Yük çeşitleri.....	13
Şekil 3.1.	Doğrudan çözüm yaklaşımında kullanılan yapı-zemin sistemi....	17
Şekil 3.2.	Zeminin eşdeğer statik yaylar ve sönümleyicilerle modellenmesi.....	18
Şekil 3.3.	Yapı-zemin etkileşimi için değişik modeller.....	19
Şekil 3.4.	Sınır elemanlar yöntemiyle zemin sınır şartlarının belirlenmesi...	21
Şekil 3.5.	Viskoz elemanlarla zemin sınırlarının idealleştirilmesi.....	22
Şekil 3.6.	İnce Tabaka/Esnek Hacim çözüm tekniğinde altsistem yaklaşımı	24
Şekil 4.1.	Bir sonlu eleman modelinin düğüm noktaları ve elemanlar.....	26
Şekil 4.2.	Çalışma aşamalarında uygulanan bir sonlu eleman modeli.....	26
Şekil 4.3.	Dört düğüm noktalı sonlu eleman.....	27
Şekil 4.4.	Yamuk modeller için açılı oranları.....	28
Şekil 5.1.	Zemin bölgesinin boyutları.....	31
Şekil 5.2.	Boyutlandırma çalışmasının yapıldığı zemin modeli.....	32
Şekil 5.3.	Modellemedeki sonlu eleman şekli.....	33
Şekil 5.4.	Belirlenen sonlu eleman örgüsü.....	33

Şekil 5.5.	Sınırdaki yay rijitliklerinin saptanması.....	34
Şekil 5.6.	Modellenmiş zemin bölgesi.....	35
Şekil 5.7.	Tabakalı zeminde dalga yayılımı ve yansımaları.....	36
Şekil 5.8.	Sismik kırılma deneyi kayıt cihazı.....	37
Şekil 5.9.	Sismik kırılma deneyi yük uygulama noktası.....	37
Şekil 5.10.	Sismik kırılma deneyi jeofon uygulaması.....	39
Şekil 5.11.	Sismik kırılma deneyi enine jeofon uygulaması.....	39
Şekil 5.12.	Zemin laboratuvar deneyleri için sondaj çalışması.....	40
Şekil 5.13.	Sondaj işleminde kullanılan numune alıcılarının değiştirilmesi.....	40
Şekil 5.14.	Bilgisayar ortamında hazırlanan matematik model.....	42
Şekil 5.15.	Yalıtımsız arazi modeli.....	43
Şekil 5.16.	Yalıtımsız durum matematik modeli.....	43
Şekil 5.17.	Aktif yalıtım arazi modeli.....	44
Şekil 5.18.	Aktif yalıtım matematik modeli.....	45
Şekil 5.19.	Pasif yalıtım arazi modeli.....	45
Şekil 5.20.	Pasif yalıtım matematik modeli.....	46
Şekil 5.21.	Aktif yalıtımda bariyerin boş olması durumu.....	48
Şekil 5.22.	Aktif yalıtımda betonarme bariyerin olması durumu.....	49
Şekil 5.23.	Aktif yalıtımda bariyerin içinin su dolu olması durumu.....	49
Şekil 5.24.	Pasif yalıtımda bariyerin boş olması durumu.....	50
Şekil 5.25.	Pasif yalıtımda betonarme bariyerin olması durumu.....	51
Şekil 5.26.	Pasif yalıtımda bariyerin içinin su dolu olması durumu.....	51
Şekil 5.27.	Yalıtımsız durumda frekans değişiminin yerdeğiştirmeye etkisi...	52
Şekil 5.28.	Aktif ve Pasif yalıtımda frekans değişiminin yerdeğiştirmeye etkisi.....	53
Şekil 5.29.	Aktif yalıtımda frekans değişiminin dalganın perdelenmesine etkisi.....	54
Şekil 5.30.	Pasif yalıtımda frekans değişiminin dalganın perdelenmesine etkisi.....	54
Şekil 5.31.	Pasif yalıtımda bariyer derinliğinin azaltma oranına etkisi.....	55
Şekil 5.32.	Aktif yalıtımda bariyerin içindeki malzemenin azaltma oranına etkisi.....	56

Şekil 5.33. Pasif yalıtımda bariyerin içindeki malzemenin azaltma oranına etkisi.....	56
Şekil 5.34. Bariyerin yapıdan olan uzaklığının azaltma oranına etkisi.....	57
Şekil 5.35. Bariyer genişliğinin azaltma oranına etkisi.....	57

TABLULAR LİSTESİ

Tablo 2.1.	Farklı dinamik yük durumları için frekans ve genlik aralığı.....	14
Tablo 2.2.	Zemin dinamik özelliklerinin ölçülmesi.....	15
Tablo 5.1.	Zemin ve kayada sismik dalgaların hızı.....	38
Tablo 5.2.	Farklı bentonit malzemelerinin özellikleri.....	46

ÖZET

Anahtar Kelimeler: Yapı-zemin dinamik etkileşimi, sonlu elemanlar yöntemi, aktif ve pasif yalıtım, sismik dalga bariyeri, dalga yayılımı

Titreşim kaynakları tarafından üretilen kuvvetli yer hareketleri sonucunda yapılarda meydana gelen büyük genlikli titreşimler, yaşanılabilir ortam koşullarını bozabileceği gibi binalarda çeşitli yapısal hasarlara da neden olabilirler. Meydana gelen olumsuz koşulları ortadan kaldırmak için titreşim kaynağı ile korunacak yapının arasına uygun bir dalga bariyeri modelinin geliştirilmesi bu çalışmanın konusunu oluşturmuştur.

Dalga bariyerinin geometrik özellikleri dikkate alınarak bir yük kaynağının ürettiği titreşimlerin yayılmasını önlemek (aktif yalıtım), yük kaynağından gelen dalgaların korunacak yapıya ulaşmasına engel olmak (pasif yalıtım) için en uygun dalga bariyerini geliştirme çalışmaları ayrıntılı bir şekilde yapılmıştır. Zemin bölgesinin ayrıklaştırılmasında, nümerik çözüm yöntemi olarak sonlu elemanlar yöntemi kullanılarak bilgisayar ortamında geliştirilen matematik modeller üzerinde kapsamlı parametrik araştırmalar yapılmış ve elde edilen sonuçlardan dalga bariyerinin etkisi farklı uygulama şekilleri için karşılaştırılmalı olarak gösterilmiştir.

THE EFFECTS OF SEISMIC BARRIER MODELS FOR WAVE PROPAGATION WITHIN LAYERED SOIL DOMAIN

SUMMARY

Keywords: Soil-structure interaction, finite element method, active and passive isolation, seismic wave barrier, wave propagation

Strong ground motions which are produced by vibration sources may cause high amplitude oscillations on the structures resulting damage on the buildings and discomfort the people's daily life. In this study, a wave barrier is proposed between the vibration source and the building.

Detailed parametric studies carried out to investigate isolation techniques that could be used either to prevent the propagation of vibrations from a source (active isolation) or to prevent incoming waves in the soil to reach a structure or an area that should be protected (passive isolation). Discretization of soil region is determined by using finite element method. Numerical investigations are performed through mathematical model extensively. Obtained results are shown for different wave barrier models by comparatively.

BÖLÜM 1. GİRİŞ

1.1. Problemin Tanımı

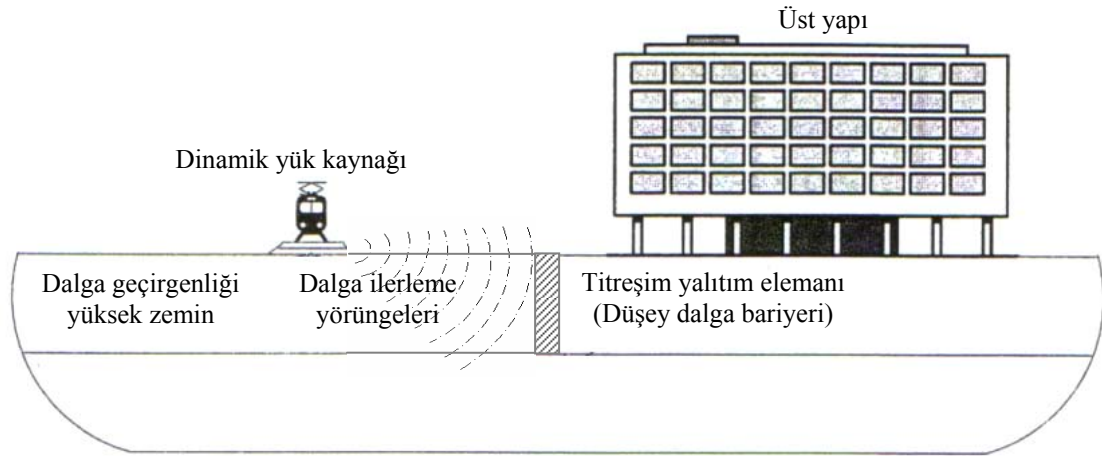
Ağır makine temelleri, yoğun ve hızlı trafik yükleri, masif inşaat aktiviteleri ve patlamalar gibi deprem yer hareketi dışındaki yüksek frekansta insan yapısı titreşim kaynaklarının oluşturduğu etkiler mühendislik yapıları için önemlidir. Bu titreşim kaynaklarının oluşturduğu dalgaların yumuşak zemin ortamında yayılışı ve yoğun yerleşim alanlarındaki yapılarla etkileşimi hassas aletlerde işlevsel bozukluklara, insanlarda rahatsızlık verici durumlara hatta yakın binalarda hasarlara neden olmaktadır.

Son yıllarda ülkemizde ulaşım problemlerinin artması, mesafelerin uzaması ve ulaşım zamanlarının artması insanların zamanlarını ekonomik kullanamamalarına neden olmakta, böylece insanların hayatlarında ve işlerinde verimli bir süreç yaşamaları güçleşmektedir. Bu yüzden gelişen teknolojiyle beraber ulaşım alanlarında da bir takım yenilikler yapılmaktadır. Bu yeniliklerin en önemlilerinden biriside demiryollarında tren hızlarının artırılması yani hızlı tren uygulamasıdır.

Bu 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. Bu nedenle çevreyi titreşim kaynaklarının belirtilen zararlı etkilerinden korumak için en uygun yalıtım aracının belirlenmesi zemin ortamında dalga yayılışının iyi anlaşılmasını gerektirir.

Kuvvetli yer hareketlerinin neden olduğu büyük genlikli titreşimleri önleyebilmek için korunacak yapı ile titreşim kaynağı arasına uygun bir yalıtım aracının yerleştirilmesi etkili bir çözüm olarak sunulabilir (Şekil 1.1). Böylece dinamik

yüklerin neden olduğu kuvvetli yer titreşimlerinin zemin ortamında yayılmasını, dalgaların yansımalarını veya kırılmasını sağlayarak geciktirmek dalganın yapıya etkili bir şekilde ulaşmasını önler. Sismik dalga yalıtım araçları olarak içi boş bariyerler olarak da isimlendirilen açık hendek tipi dalga engelleyiciler ve beton duvar tipi katı bariyerler yani içi yoğun malzemelerle doldurulmuş hendek tipi dalga engelleyiciler yaygın olarak kullanılmaktadır. Dalga yalıtım araçlarının titreşim kaynağının yakınına yerleştirilmesi aktif yalıtım yapıldığını, titreşim kaynağının uzağında korunacak yapının yakınında yer alması ise pasif yalıtım yapıldığını göstermektedir. Aktif ve pasif yalıtımda kullanılacak dalga bariyeri için en uygun malzeme ve geometri özelliklerine sahip dalga yalıtım modelinin belirlenmesi bu çalışmanın konusunu oluşturmaktadır. Dalga bariyeri modellerinin tabakalı zemin ortamında yüzeysel dalgaların yayılışına etkilerini anlamak için bariyerin ve zemin ortamının en uygun matematik modeli sayısal çözüm tekniklerinden yararlanarak bilgisayar ortamında geliştirilmiştir. Detaylı parametrik araştırmalar sonucunda elde edilen sonuçlar farklı titreşim yalıtım modelleri için karşılaştırılmalı olarak verilmiştir.



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

1.2. İlgili Çalışmalar

Dinamik yük kaynaklarının ürettiği büyük genlikli yer hareketlerinin önlenmesi veya azaltılabilmesi için titreşim yalıtım araçları ve etkileri ile ilgili literatürde sonlu eleman, sınır eleman ya da sınır integral yöntemlerine veya bu tekniklerin ortak kullanımına dayalı birçok sayısal çözüm yaklaşımları, analitik çözüm yolları ve deneysel çalışmalar ortaya konulmuştur.

Sonlu Elemanlar Yönteminin (SEY) mühendislik uygulamalarında karmaşık problemlerin çözümünde bilgisayar yazılımları ile birlikte kullanılmaya başlamasıyla, araştırmalar basit analitik çözümlerden çok bilinmeyenli sayısal modellemelere doğru kaymıştır. 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 yansıtacaktır. Bu durum sayısal çözümlerde farklı sonuçların ortaya çıkmasına neden olacaktır.

Yapı-zemin etkileşiminde zemin bölgesinin idealleştirilmesi için kullanılan iki temel yaklaşım, “Doğrudan Çözüm Yaklaşımı (Direkt Metot)” ile “Altsistem Yaklaşımı”dır. Aydınoglu [1] 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 ayrık düğüm noktalarında temsil edilen bir alt sistem olarak idealleştirilir.

Literatürde yapı-zemin problemlerinin incelenmesinde birçok araştırma yapılmıştır. Çelebi ve Gündüz [2] çok katlı bir yapının yarı sonsuz bir ortamda deprem etkisindeki davranışını incelemiş ve en uygun sonucu elde etmek için farklı modeller kurmuştur. Kurulan modellerde SEY 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.

SEY ile beraber kullanılan başka bir yaklaşım ise Sınır Elemanlar Yöntemi'dir. Bu yöntem yarı analitik olmasından dolayı sonsuz zemin bölgesinin modellenmesi daha kolay ve elde edilen sonuçlar daha gerçekçidir. Bu nedenle yapılan yapı-zemin modellerinde bazı araştırmacılar Sonlu Elemanlar Yöntemini üst yapının modellenmesinde, Sınır Elemanlar Yöntemini ise yarı sonsuz zemin bölgesinin sınırlarının modellenmesinde kullanmışlar.

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. [3] çalışmalarında Sınır Elemanlar Yöntemini kullanmış ve titreşimlerin azaltılması için farklı çözüm yöntemlerini incelemişlerdir. Rayleigh dalgalarını da inceleyerek farklı yük etkilerinde bu dalgaların nasıl bir davranış gösterdiklerini araştırmışlardır. Chouw ve Pflanz [4] Sınır Elemanlar Yöntemini kullanarak zemin-bariyer modelini oluşturmuşlar ve farklı kayma dalga hızları için düşey dalga bariyeri ile yatay dalga bariyerini etkisini karşılaştırmalı olarak incelemişlerdir. Al-Hussaini ve diğ. [5] trafik etkileri sonucu oluşan yüksek frekanslı titreşimlerin etkilerini azaltmak için açık ve içi dolu bariyerler kullanmış, sistem Sınır Elemanlar Yöntemi kullanılarak oluşturulmuş, bariyerler için malzeme ve geometrik özelliklerin değişiminin etkisi incelemişlerdir. Bunlara ek olarak da matematiksel araştırmalar yapılmış ve bazı formülasyonlar elde edilmiştir. Gao ve diğ. [6] yaptığı çalışmada titreşimlerin yalıtımında kazık gruplarının pasif yalıtım durumundaki etkisini incelemişlerdir. İlgili parametrelerin titreşimin izolasyonuna etkisi analiz edilmiş ve sunulmuştur. Andersen ve Nielsen [7] yaptıkları çalışmada yer titreşimlerinin bariyerler ile azaltılması veya demiryolu hattı boyunca zeminin

iyileştirilmesi hakkında incelemelerde bulunmuşlardır. Farklı frekanstaki taşıt yüklerinin etkisi araştırılmış ve düşük frekanslarda içi boş bariyerlerin dolu bariyerlere göre daha iyi sonuç verdiği görülmüştür. Ju ve Lin [8] trenlerin neden olduğu titreşimler ve kritik Rayleigh dalga hızlarının sonlu elemanlar metodu ile analizini yapmış ve nümerik analiz çalışmalarını karşılaştırmışlardır. Hildebrand [9] hissedilebilir tren titreşimlerinin zemin stabilizasyonuna etkisini incelemiş ve farklı frekanslara ait sonuçları yaptığı çalışmasında sunmuştur. Ayrıca Hunaidi [10] ve El Naggari ve Chehab [11] yaptıkları araştırmalarda trafik titreşimlerinin etkileri ve önlemleri hakkında çalışmalar yaparak sunmuşlardır.

Adam ve Van Estorff [12] açık ve içi dolu bariyerler kullanarak tren, trafik aktiviteleri ve ağır makine hareketleri sonucu zeminlerde oluşan titreşimlerin yapılarda oluşturacakları etkilerin azaltılmasını amaçlamışlardır. Modelleme yapılırken, yarı sonsuz zemin bölgesinde Sınır Elemanlar Yöntemi; yük kaynağı, bariyer ve yapıda Sonlu Elemanlar Yöntemi kullanılarak sistem modellenmiştir. Bariyerin geometrik ve malzeme özellikleri değiştirilerek yalıtım için en uygun modelin bulunması için çalışma yapılmıştır.

Lysemer ve diğ. [13-14] çalışmalarında, yapı-zemin sistemini İnce Tabakalar/Esnek Hacim Yöntemini kullanarak idealize etmişler ve bu teoriyi temel alan SASSI programını kullanmışlardır.

Bunlara ilave olarak Küçük ve Çelebi [15], Küçük ve diğ. [16], Kırtel ve diğ. [16] ve Kırtel ve diğ. [18] çalışmalarında dalgaların karakterleri ve zemin koşulları dikkate alınarak en uygun yalıtım durumunu veren koşullar incelenmiştir. 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. Forchab ve Verbic [19] yapı ve zemindeki titreşimleri ve bu titreşimlerin etkilerinin azaltılması için arazi deneyleri yapmışlardır. 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.

1.3. Çalışmanın Amaç ve Kapsamı

Bu çalışmanın amacı, deprem yer hareketi dışındaki yüksek frekansta insan yapısı titreşim kaynaklarının (taşıt etkileri, inşaat aktiviteleri, makine hareketleri, patlamalar vb.) yapılar üzerinde oluşturacakları hasar verici etkileri ve insanlar üzerindeki konfor bozucu hareketleri en aza indirmektir. Bu amaçla, öncelikle özellikleri yapılan zemin etütleri sonucunda belirlenen bir zemin bölgesi ile beraber yük kaynağının ve yapıyı temsil eden bir modelin oluşturulmasıdır. Zemin bölgesinin idealleştirilmesinde Doğrudan Çözüm Yaklaşımı kullanılmıştır. Modelleme Sonlu Elemanlar Metodu kullanılarak yapılmıştır. Zemin bölgesinin modellenmesinde yatay sınırlar radyasyon sönümü dikkate alınarak eşdeğer yaylar ve sönümleyicilerle modellenmiştir. Burada amaçlanan yük kaynağından yayılan dalgaların zemin sınırlarında yansıyor sisteme geri dönmesini engellemektir. Bu model oluşturulduktan sonra titreşim kaynağının ürettiği harmonik yükün yapı üzerinde oluşturacağı etkileri azaltmak için kaynak ile yapı arasına uygun bir dalga bariyeri modeli oluşturulmaya çalışılmıştır. Sayısal uygulamalarda sonlu elemanlar metoduna dayalı SAP2000 bilgisayar paket programı kullanılarak modeller üzerinde etkiler incelenmiştir. İlk olarak zemin bölgesinin büyüklüğü üzerine çalışmalar yapılmış ve sonuçları etkilemeyecek boyutlarda bir zemin bölgesi seçilmiştir. Daha sonra modeller için uygun bir sonlu eleman boyutu ve geometrisi belirlenmiştir. Aktif yalıtım (dalga bariyerinin kaynağa yakın olması) ve pasif yalıtım (dalga bariyerinin korunacak yapıya yakın olması) durumları için farklı parametreler üzerinde araştırmalar yapılmıştır. Bunlar dalga bariyerinin geometrik özellikleri (yüksekliği ve genişliği), bariyerin içinin boş olması, bariyerin içinin dolu olması durumunda farklı yoğunluktaki malzemelerle doldurulması, aktif yalıtım durumunda bariyerin titreşim kaynağına olan uzaklığı ve pasif yalıtım durumunda da bariyerin korunacak yapıya olan uzaklığının etkileri gibi birçok değişkenin dalganın perdelenmesine etkisi araştırılmıştır. Bu araştırmalar doğrultusunda elde edilen veriler yorumlanmış ve sonuçlar grafikler halinde verilmiştir.

BÖLÜM 2. ZEMİN ORTAMINDA DALGA YAYILIŞI

Deprem mühendisliğinin yüzeye yakın problemlerinde yerküre, dalga yayılma yönlerindeki uzanımı sonsuz olan bir ortamın, dış yüzeyinde gerilmelerin oluşmadığı varsayılan düzlemsel bir serbest yüzeyle sınırlandırılması şeklinde idealize edilerek yarı sonsuz bir ortam olarak tanımlanmaktadır.

Zemin ortamında oluşan titreşimler cisim dalgaları (basınç dalgaları ve kayma dalgaları) ya da yüzey dalgaları (Rayleigh dalgaları ve Love dalgaları) olarak yayılırlar. Yüzey dalgaları dinamik yüklerden dolayı ortaya çıkan enerjinin elastik ortamda soğurulmasında ayrı bir önem taşımaktadır. Doğrusal elastik izotrop olarak tanımlanan ve Poisson oranı $\nu=0.5$ olarak belirlenmiş bir yarı uzay zemin ortamda yer alan rijit dairesel temel plağının harmonik dış yükü sarsılması sonucu ortaya çıkan enerjinin % 67'si yüzey dalgaları tarafından taşınırken, geri kalan enerjinin % 26'sı kayma dalgaları, % 7'sini de basınç dalgaları taşımaktadır. Yüzeyde Rayleigh dalgalarının genliği;

$$1/\sqrt{r} \quad (2.1)$$

P ve S dalgalarının genliği ise;

$$1/r \quad (2.2)$$

ile azalmaktadır. Burada r , dalga kaynağına olan uzaklığı göstermektedir. Başka bir ifadeyle yüzey dalgaları cisim dalgalarından çok daha yavaş sönümlenirler [20].

2.1. Cisim Dalgaları

Elastik bir ortamda dinamik etkinin yayılması dalga hareketi şeklinde oluşur. Bu hareket sırasında yayılmaya ilk başlayanlar cisim dalgaları yani P- dalgası (basınç dalgası) ve S- dalgası (kayma dalgası)'dır. Bu iki dalganın yayılma hızları;

$$c_p^2 = \frac{(1 - \nu) \cdot E}{(1 - 2 \cdot \nu)(1 + \nu) \cdot \rho} \quad (2.3)$$

$$c_s^2 = \frac{E}{(1 + \nu) \cdot \rho} \quad (2.4)$$

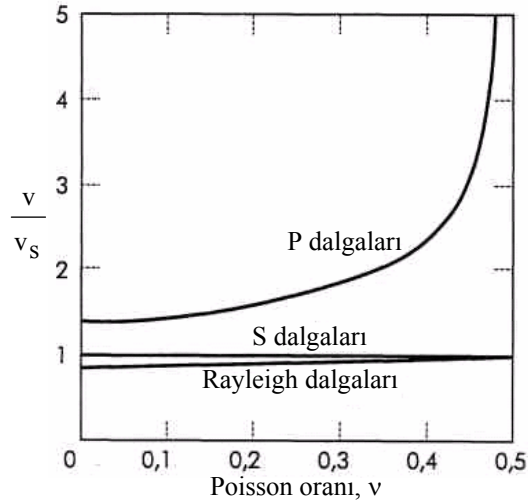
bağıntıları ile ifade edilmektedir. Burada c_p P-dalgası yayılma hızını, c_s S-dalgası yayılma hızını, ν poisson oranını, E elastisite modülünü ve ρ kütle yoğunluğunu ifade etmektedir. Bu iki dalga yayılma hızı arasında;

$$\frac{c_p^2}{c_s^2} = \frac{2 \cdot (1 - \nu)}{1 - 2\nu} \quad (0 \leq \nu \leq 0.5) \quad (2.5)$$

ile ifade edilen bir oran vardır. Burada $c_p > c_s$ olduğu görülür. Bu iki dalganın yayılması ortamın sınırlarından bağımsız olarak ortam içinde meydana geldiği için bu dalgalar, cisim dalgaları olarak adlandırılmışlardır [20].

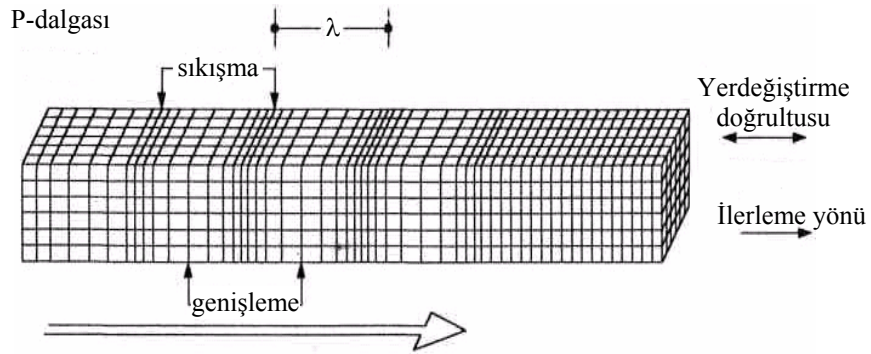
2.1.1. P-dalgası

Ana dalga ve basınç dalgası olarak da adlandırılan bu dalgalar kaynaktan yapılara ilk ulaşan dalgadır. Hızları diğer dalga türlerine göre büyüktür (Şekil 2.1).



Şekil 2.1. Rayleigh ve cisim dalgalarının yayılma hızlarının Poisson oranı ile değişimi [20]

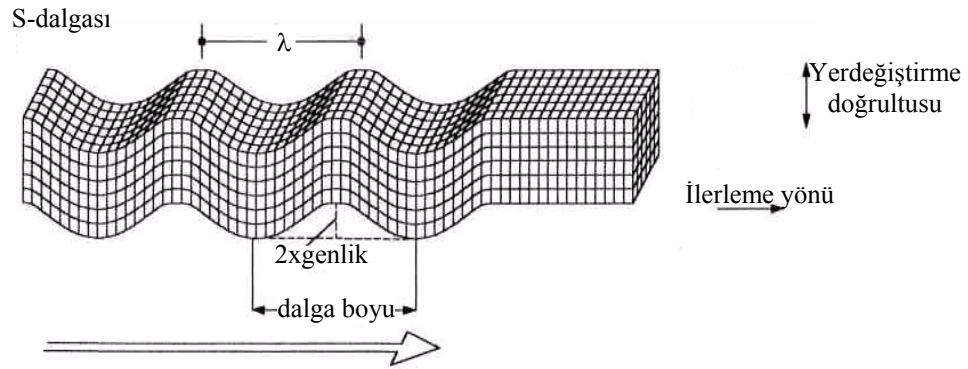
Bu tür dalga hareketinde ortam zamana bağlı olarak hacimsel değişikliğe uğrarken dalga hareketi yayılır (Şekil 2.2). Yayılma sırasında, yayılma doğrultusunda ve ona dik doğrultuda yerdeğiştirmeler ve normal gerilmeler meydana gelir.



Şekil 2.2. P-dalgası yayılma şekli [21]

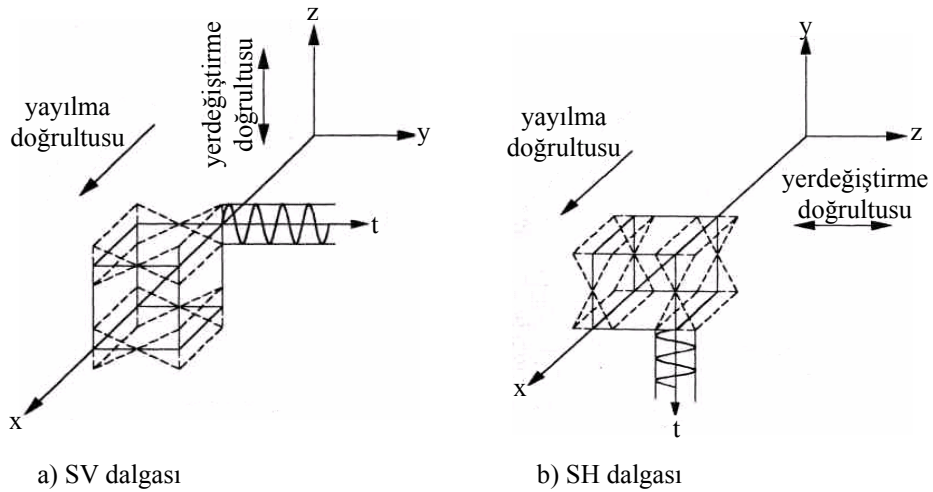
2.1.2. S-dalgası

İkincil dalga veya kayma dalgası olarak da ifade edilen bu tür dalgalarda hareket sırasında zemin ortamında hacim değişikliği olmadan biçim değişikliği meydana gelir. Yerdeğiştirmeler yayılma doğrultusuna dik olarak meydana gelir (Şekil 2.3). Bu dalgaların yayılışında elastik ortamda kayma gerilmeleri meydana gelir.



Şekil 2.3. S-dalgası yayılma şekli [21]

Bu dalga hareketinin özel olarak yatay ve düşey düzlemde meydana gelmesi durumlarında Yatay Kayma Dalgası (SH-Dalgası) ve Düşey Kayma Dalgası (SV-Dalgası) oluşmaktadır (Şekil 2.4).



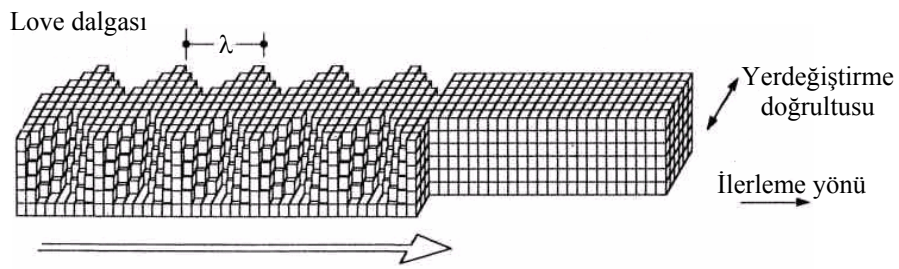
Şekil 2.4. SV-dalgası ve SH-Dalgası yayılma şekli [21]

2.2. Yüzey dalgaları

Yeryüzüne yakın olarak yayılan ortamın bir sınır yüzeye sahip olması nedeniyle P-dalgası ve S-dalgası yanında ortaya başka dalga türleri de çıkmaktadır. Bunlar Rayleigh dalgaları ve Love dalgalarıdır.

2.2.1 Love dalgaları

Deprem dalgaları incelendiğinde bunların yayılma doğrultusuna dik bileşenleri bulunan ve SH-dalgasına benzetebileceğimiz türden dalgalarda içerdiği gözlenmiştir (Şekil 2.5). Bu tür dalgalar yarı sonsuz homojen ortamın üzerinde elastik bir tabaka bulunması durumunda meydana gelmektedir. Love dalgasının yayılma hızı, Cisim dalgalarının ve Rayleigh dalgalarının aksine dalga boyuna bağlıdır. Değeri, üst tabaka ile alttaki ortamın kayma dalga hızları arasında bulunur.

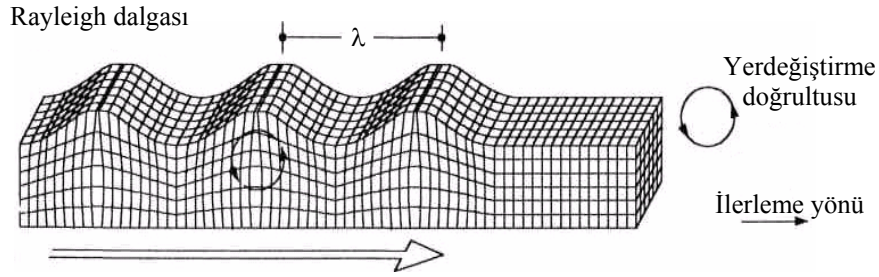


Şekil 2.5. Love dalgası yayılma şekli [21]

2.2.2. Rayleigh dalgaları

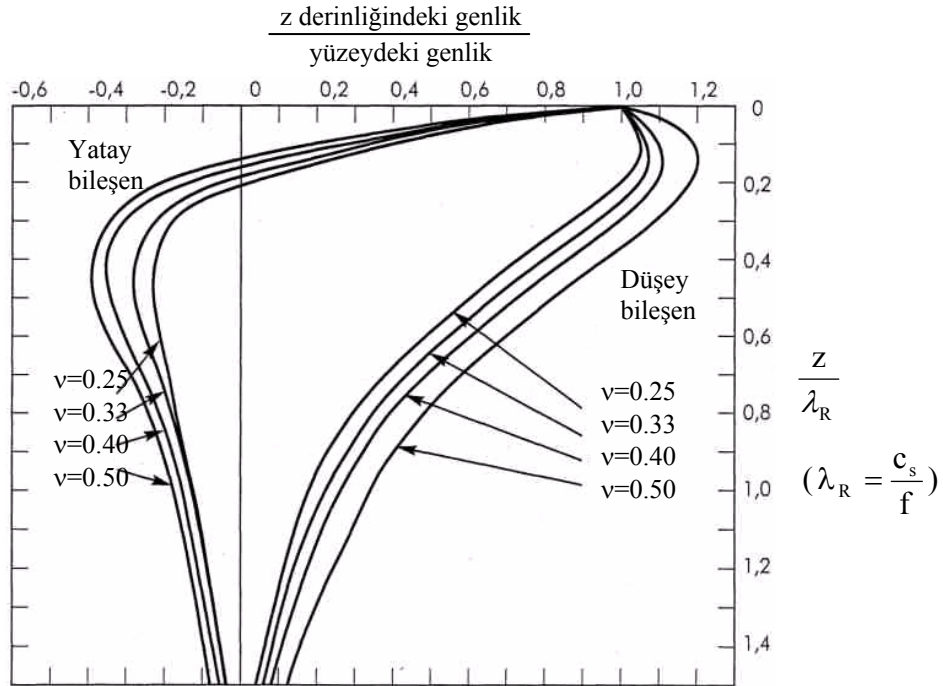
Titreşim kaynağından olan uzaklık yaklaşık olarak mevcut dalga boyunun iki katını aştığında yüzey dalgalarının etkisi önem kazanmaktadır. Geçmişte ve yakın zamandaki depremlerin üst yapılarda oluşturduğu hasarların büyük bir bölümüne yeryüzünün serbest yüzeyindeki yer hareketinin neden olması geoteknik deprem mühendisliği açısından Rayleigh yüzey dalgalarının ilerleme hızının önemini artırmıştır. Yüzeğe yakın zemin titreşim problemlerin analitik ifadelerinde bu dalgaların mekanik olarak oluşturulmasının kolay oluşundan tercih edilmektedir.

Bu tip dalgalar yarı sonsuz ortamın sığ bir bölgesi boyunca yüzeye paralel olarak yayılırlar. Bu yüzden bu tür dalgalara yüzeysel dalgalarda denir. Dalga yayılma doğrultusunda S dalgalarından biraz daha yavaş hareket ederler ($c_R \approx 0.9c_s$). Bu dalga türlerinde yer değiştirme yönü düşey ve yatay titreşimlerin ortak bir hareketi sonucunda ters elips şeklinde ortaya çıkmaktadır. Yani dalga yüzeye yakın derinlikte ilerlerken çevrimsel bir hareket meydana getirir (Şekil 2.6).



Şekil 2.6. Rayleigh dalgası yayılma şekli [21]

Bu dalgaları diğer dalga türlerinden ayıran en önemli fark titreşim genliklerinin derinlikle hızla azalmasıdır. Rayleigh dalga hareketinin titreşim genliklerinin derinliğe göre değişimi Poisson oranına bağlı olarak Şekil 2.7’de gösterilmiştir.



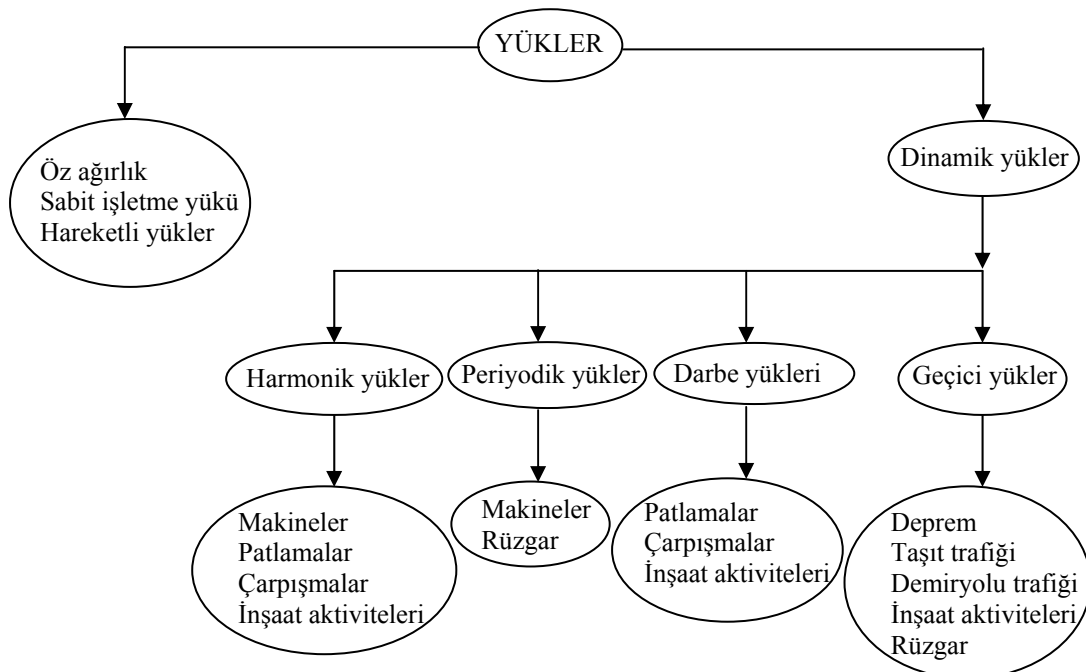
Şekil 2.7. Rayleigh Dalgalarının yatay ve düşey hareketi [20]

Şekil 2.7’de görüldüğü gibi düşey yer değiştirme en büyük değerine ulaştığında yatay yer değiştirme sıfır olmaktadır. Aynı şekilde düşey titreşim genliğinin kohezyonsuz bir zeminde ($v=0,25$) $z/\lambda_R=1$ 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

düsey yer değiştirme bileşeni derinlikle sürekli azalırken yatay yer değiştirme bileşeni $z/\lambda_R=0.2$ değerinde sıfır değerini almaktadır.

2.3. 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 mevcuttur (şekil 2.8).



şekil 2.8. Yük çeşitleri

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 2.1’de gösterilmiştir.

Tablo 2.1. Farklı dinamik yük durumları için frekans ve genlik aralığı [22]

Dinamik Yük Durumları	Frekans Aralığı [Hz]	Genlik Aralığı [μm]
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

2.4. Zemin Dinamik Özelliklerinin Ölçülmesi

Geoteknik mühendisliği, çok değişik yükleme şekli ve pek çok potansiyel yenilme 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 problemlerin 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 birbirilerine 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. Tekrarlı olarak yüklenen zeminlerde bu özellikler çok büyük önem kazanmaktadır. Bu önemli zemin özelliklerinin laboratuvar ve arazide hangi yöntemlerle ölçüldüğü, bu yöntemlerle hangi parametrelerin belirlenebildiği ve bu ölçüm tekniklerinin ne gibi özelliklerinin olduğu Tablo 2.2’de karşılaştırmalı olarak gösterilmiştir.

Tablo 2.2. Zemin dinamik özelliklerinin ölçülmesi

Yöntemler	Araştırma teknikleri	Ölçülebilir dinamik büyüklükler	Avantajlar	Dezavantajlar
Üç eksenli	Laboratuvar deneyi	G, ρ, D, v	Gerilmeye bağlı kayma modülü fonksiyonun belirlenmesi	Her zeminden numune alınmaması
Rezonant kolon deneyi	Laboratuvar deneyi	G, ρ, 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, ρ, G	Maliyeti düşük, lineer faz farklılıklarının çok kolay elde edilmesi	Modların ayrıklaştırılmasına ihtiyaç duyulması, lineer faz farklılıklarının her zaman elde edilememesi
Elektrik, manyetik, termal, yer çekimi	Arazi deneyi	μ_i, G_i, ρ_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

BÖLÜM 3. YAPI - ZEMİN DİNAMİK ETKİLEŞİM PROBLEMLERİNİN ÇÖZÜMLENMESİ

Zemin ortamının üst yapıya oranla çok rijit olduğu durumlar dışında üst yapı ve zemin, her ikisi de şekil değiştirebilen sistemler olarak statik ve dinamik dış etkilere karşı birlikte davranış gösterirler. Bu nedenle gerçek davranışın göz önüne alınabilmesi için zemin bölgesi de yapısal sistemin bir parçası olarak tanımlanmalı ve yapıyla beraber analiz edilmelidir. Analiz ve tasarımlarda dikkat edilmesi gereken konu, üst yapının zemine etkisi olduğu gibi zemininde üst yapıya karşı etkisi olmaktadır. Yani yapı ile zemin arasındaki etkileşim dikkate alınmalıdır. Buradaki yapı-zemin etkileşimi ortak sistemin iki parçasını oluşturan yapı ile zeminin birbirilerine karşılıklı etkisini ifade eden bir olguyu tanımlamaktadır [1].

Üst yapı ve zemin ilişkisi incelenirken dikkat edilmesi gereken unsurlardan biride sistemin maruz kaldığı etkinin türüdür. Sistemin dinamik bir dış etki altındaki durumuyla statik bir dış etki altındaki durumu çok farklıdır. Dinamik yükleme durumunda geometrik uygunluk ve denge koşulları dışında zemin ortamında sağlanması gereken başka bir koşulda zeminin “radyasyon sönümü” etkisidir. İnsan yapısı titreşim kaynakları (ağır makine temelleri, yoğun ve hızlı trafik yükleri, masif inşaat aktiviteleri, patlamalar vs.) ve deprem hareketi etkisiyle zemin ortamında yayılan dalgalar, zemin ortamının sınırsızlığı nedeniyle radyasyona uğrarlar. Dinamik dış etkiler sonucunda oluşan enerjinin bir kısmı, zeminin dinamik malzeme davranışından tamamı ile bağımsız olarak yalnızca zemin ortamının geometrik özelliklerinden dolayı sönümlenmektedir. Bu durum zeminin geometrik özelliklerinin etkisi ile oluştuğu için “geometrik sönüm” olarak ta adlandırılmaktadır.

Dış etkiler altında yapı-zemin etkileşimi, zemin ortamının üstyapı ile beraber analiz edilmesi ile dikkate alınır. Burada temel sorun zemin ortamının yapısal anlamda nasıl

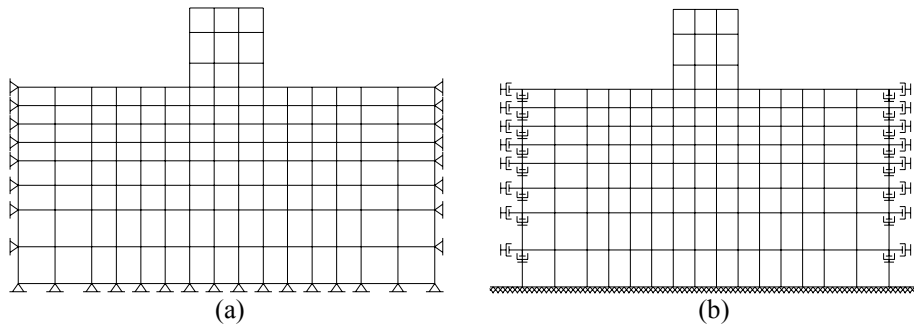
idealleştirileceğidir. Seçilen yönteme bağlı olarak, yapı-zemin etkileşiminin tanımlanması için Doğrudan Çözüm Yaklaşımı ve Altsistem Yaklaşımı kullanılabilir.

3.1. Altsistem Yaklaşımı

Altsistem yaklaşımında üst yapı ve zemin bölgeleri iki ayrı sistem olarak ele alınır. Bu iki sistem için ayrı ayrı denge denklemleri yazılır. Yazılan denge denklemleri daha sonra yapı-zemin ara yüzeyindeki denge koşulları ve geometrik uygunluk şartları dikkate alınarak birleştirilir. Böylece zemin ortamı sadece yapı-zemin ara yüzeyinde, sınırlı sayıda ayırık düğüm noktalarında temsil edilen bir altsistem olarak idealleştirilmiş olur.

3.2. Doğrudan Çözüm Yaklaşımı (Direkt Metot)

Bu yöntem, zemin ortamının da yapı sistemi gibi ayrıklaştırılmasını ve oluşturulan yapı-zemin modelinin, tanımlanan statik ve ya dinamik etkiler altında doğrudan analizini öngörür. Burada statik ve dinamik etki durumlarında zemin ortamının sınırlarının belirlenmesinde farklılıklar vardır. Statik durumda zemin ortamının sınırları, yerdeğiştirmelerin yeteri kadar küçüldüğü düğüm noktalarıyla tanımlanır. Bu düğüm noktalarına basit mesnet konulması ile zemin ortamı idealleştirilmiş olur (Şekil 3.1a). Dinamik durumda ise radyasyon sönümü nedeni ile zemin ortamı ne kadar büyütülürse büyütülsün, sınırlar basit mesnetli olarak tanımlanamaz. Bu nedenle modellemede radyasyon koşulunu sağlayan mesnetlerin kullanılması gerekmektedir (Şekil 3.1b). Geçirgen sınırlar olarak ta adlandırılan bu tür mesnetler, sonlu elemanlarla modellenen zemin bölgesinden dışa doğru yayılan dalgaların içeri doğru yansıtılıp yutulmasını sağlar [1].



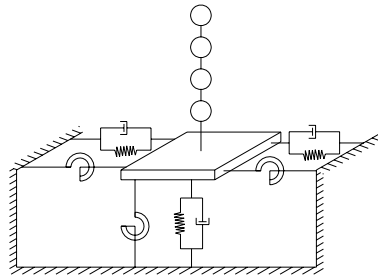
Şekil 3.1. Doğrudan çözüm yaklaşımında kullanılan yapı-zemin sistemi

3.3. Zemin Ortamının Modellenme Şekilleri

Yapı-zemin etkileşimi problemi, sınırsız zemin ortamında dinamik enerjinin yayılması, zemin sönümü, yapının ve zeminin birbirlerinin davranışını etkilemesi, zeminin doğrusal olmayan davranışı gibi özellikleri nedeni ile çözümü son derece karmaşık ve zor olan bir problemdir. Ayrıca zemindeki süreksizlikler, zeminin yarı sonsuz bir ortam olması, zemindeki tabakalaşma ve bu tabakaların değişkenliği, zemindeki yeraltı suyu, zeminin çekme gerilmesi olmayan bir malzeme olması gibi olgular zemin yapı etkileşim problemlerini klasik analiz problemlerinden farklı kılan özelliklerdir. Zeminin dinamik karakterlerinin belirlenmesinde, zemin rijitliğini, sönümü ve zemin ortamında yüzeyden yansıyan dalganın geri dönmeyecek şekilde yayılmasını göz önüne alan modeller çeşitli yaklaşıklıkta geliştirilebilir.

Yapı-zemin analizi için ele alınan zemin ortamı çeşitli şekillerde modellenmekte ve çeşitli hesap yöntemleri kullanılmaktadır. Analiz için seçilen matematik modelin ve hesap metodunun çeşitli avantaj ve dezavantajları bulunmaktadır.

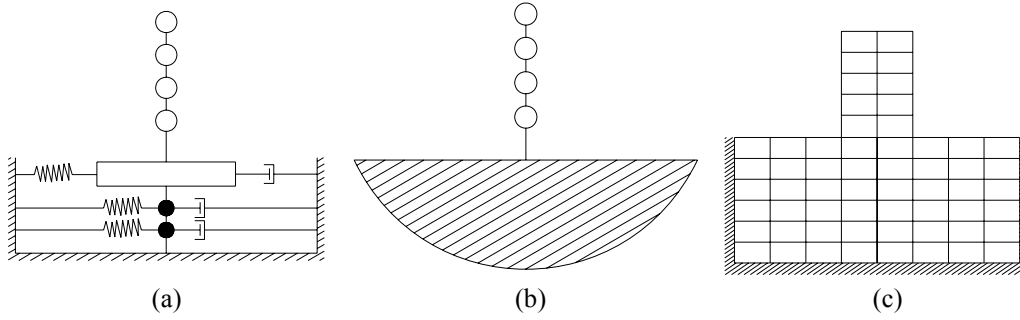
Modelleme yöntemlerinden ilki zeminin eşdeğer statik yaylar ve sönümleyicilerle modellenmesidir. Burada elastik düzlemin dış yüklerle karşı koyma davranışı lineer elastik yaylar ve sönümleyicilerin bileşimi ile temsil edilebilmektedir (Şekil 3.2).



Şekil 3.2. Zeminin eşdeğer statik yaylar ve sönümleyicilerle modellenmesi

Bu gösterimde yaylar, zeminin şekil değiştirebilme (fleksibilite) özelliğini, sönümleyiciler ise enerji kaybına eşdeğer anlamda karşı gelen eşdeğer (fiktif) zemin sönümünü (radyasyon sönümü veya geometrik sönüm) açıklamaktadır [23]. Yay ve sönüm katsayılarının dış yükün frekansına bağlı dikkate alınması radyasyon sönümünü daha gerçekçi ifade etmektedir.

Zeminin yaylar ve sönümleyicilerle modellenmesinin yanında değişik yaklaşımlarda kullanılmaktadır. Bunlardan bazıları; zeminin düşey doğrultuda elastik yayların ve sönümlerin bir araya gelmesinden oluşan kayma kirişi modeli (Şekil 3.3a), yapının elastik veya viskoelastik yarı sonsuz zemin ortamında mesnetli olarak modellenmesi (Şekil 3.3b) ve zeminin iki veya üç boyutlu sonlu elemanlarla modellenmesidir (Şekil 3.3c).



Şekil 3.3. Yapı-zemin etkileşimi için değişik modeller

Son yapılan araştırmalar neticesinde, yukarıda ifade edilen idealleştirme yöntemleri içerisinde gerçeğe en yakın sonucu sonlu elemanlar kullanılarak geliştirilen modeller vermektedir.

3.3.1. Sonlu elemanlar kullanılarak zemin ortamının idealleştirilmesi

Sonlu elemanlar kullanılarak yapılan idealleştirmelerde de bazı unsurlar önem kazanmaktadır. Gerçeğe yakın sonuçlar elde edebilmek için zemin bölgesinin sınır kesim yüzeylerinin yapıdan yeterince uygun mesafede seçilmesi gerekmektedir. Fakat modelin çözülebilir olması için Sonlu elemanlar bölgesinin çok büyük olması istenmez. Kesim sınırları ile sınırlanan zemin bölgesi SEM ile modellendiğinde kapalı ortam içerisinde yayılan dalgalar sınırlara çarparak tekrar analiz ortamına döner ve çözümü olumsuz etkilerler. Bu durumun engellenmesi için kesim sınırlarının özel sınır şartları ile dalga geçirimsizliğini sağlayacak şekilde düzenlenmesi gerekir. Yapılan parametrik çalışmalar, zemin sonlu eleman ağının, özellikle geometrik sönümün (radyasyonun) önemli olduğu yüksek frekanslı yer hareketlerinde ve zeminin sönümünün büyük olması gibi özel durumlarda, yapı temel taban genişliğinin sağ ve solunda 8~10 katına kadar uzatılmasının yeterli olacağı belirtilmektedir [24].

Ayrıklaştırılan bölgenin boyutu küçüldükçe, sınır şartlarının probleme etkisi daha büyük olmaktadır. Hesap hacminin azaltılması açısından sonlu eleman analizindeki eleman sayısı olabildiğince az tutulmaya çalışılır. Eleman sayısının azaltılması iri (kaba) ağılı sonlu eleman modellerinin kullanılması anlamına gelmektedir. Sürekli ortam mekaniğinin elasto-dinamik problemlerinde dalga yayılışının incelendiği ortamın sonlu eleman örgüsünün dalgaların sınırlardan geri yansıyor bölgeye dönmesi açısından küçük tutulmaması gerekir. Sonlu elemanların maksimum boyutları dalga yayılma hızı ve belirli bir frekans aralığı ile kontrol edildiğinden, elemanların sayısının azaltılması demek genellikle ayrıklaştırılan bölgenin boyutunu küçültmek anlamına gelir. Ayrıca kısa dalga boylu frekans bileşenleri geniş aralıklı düğümlerle modellendiğinde, yüksek frekans bileşenleri filtrelenebilir. Sonuçların tutarlılığı açısından sayısal modelde kullanılan sonlu eleman boyutlarının en kısa dalga boyunun sekizde biri ile onda biri arasında sınırlandırılmasına dikkat edilmesi gerekir.

Modellemede zemin bölgesinin idealleştirilmesinin yayında önemli diğer bir unsurda ayrıklaştırılan zemin bölgesinin sınır şartlarının nasıl belirleneceğidir. Zemin ortamının sonsuzluğundan dolayı sınırlarda geometrik sönümün ifade edilmesi gerekmektedir. Sınır şartları için en gerçekçi sonuçlar, Sınır elemanlar yöntemiyle ve viskoz sınır şartlarıyla tanımlanan modellerde elde edilmiştir.

3.3.1.1. Sınır elemanlar yöntemiyle sınır şartlarının belirlenmesi

Sürekli sistemlerin uygun bir sayısal yöntem kullanılması sonucunda ayrık bir sistem olarak ele alınmasında, serbestlik derecesi çoğaltılarak çözümün yaklaşıklık derecesi artırılabilir. Yakınsamanın kabul edilmesi durumunda, matematik olarak kesin bir çözüm, serbestlik derecesinin sonsuza yaklaştırılmasıyla elde edilir. Sonsuz büyük bir zemin bölgesi gibi sürekli bir ortam sonsuz serbestlik dereceli ayrık bir sisteme dönüştürülebilir. Böyle bir sistemin hareket denklemi, ortamın sonsuz küçük bir eleman parçasının göz önüne alınmasıyla kısmi diferansiyel denklemi ile ifade edilebilir. Sınır elemanlar yönteminin kullanımına ait çözüm, sürekli ortamlar mekaniği problemlerinin hareketi için yazılan diferansiyel denklem takımının sınır

integral formülasyonuna dönüştürülmesi esasına dayanır ve analitik olarak da bu diferansiyel denklemin kesin çözümünün bilinmesi gerekir (3.1).

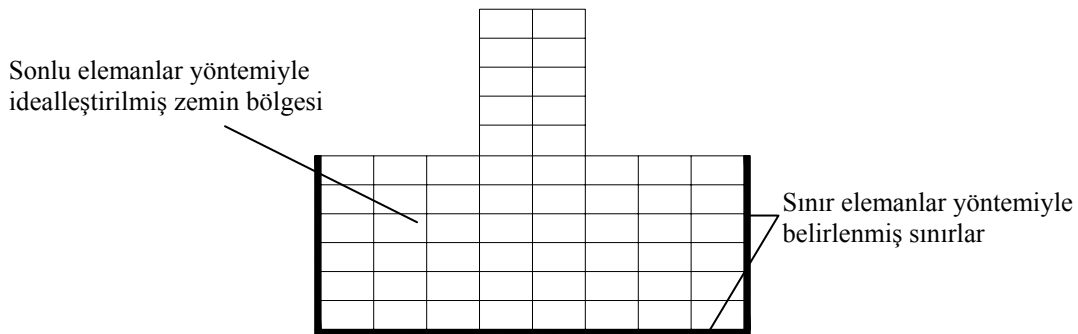
$$cu(\xi) = \sum_{e=1}^{N_e} \left(\int_{\Gamma^e} \tilde{u} * \partial\Gamma \right) t^e - \sum_{e=1}^{N_e} \left(\int_{\Gamma^e} \tilde{t} * \partial\Gamma \right) u^e \quad (3.1)$$

Bu eşitlikte yer alan u^e ve t^e vektörlerinin terimleri, e nolu seçilmiş elemanın her bir ayrık düğüm noktasına karşı gelen üçer adet yerdeğiştirme ve gerilme bileşenlerinden meydana gelmektedir. Sınır integral bağıntısı lineer denklem sistemine indirgenerek tekrar düzenlendiğinde, sınır elemanlar yönteminin temel denklemi olarak da ifade edilen aşağıdaki matris eşitliği elde edilir (3.2).

$$\tilde{U}\tilde{t} = \tilde{T}\tilde{u} ; U^1 t^m = T^1 u^m + \sum_{k=1}^{m-1} [T^{(m-k+1)} u^k - U^{(m-k+1)} t^k] \quad (3.2)$$

Burada \tilde{u} ve \tilde{t} vektörleri, sınır elemanların ağırlık merkezinde tanımlanan düğüm noktalarına karşı gelen frekansa bağlı kompleks yerdeğiştirme ve gerilme bileşenlerini göstermektedir. \tilde{U} ve \tilde{T} matrisleri ise her bir sınır eleman yüzeyi Γ^e için tanımlanan ve problemin temel çözüm terimlerini içeren katsayılar matrislerinden meydana gelmektedir.

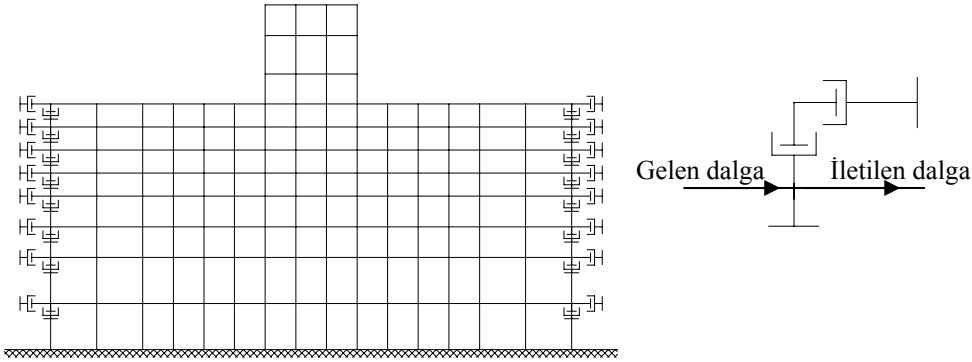
Lineer problemlerde incelenen bölgenin sadece sınırlarının ayrıklaştırılmasıyla çözüm boyutunun bir mertebe indirgenmesiyle daha az bilinmeyen kullanılması ve sınırdaki radyasyon koşulunu doğrudan sağlaması (Şekil 3.4), sınır elemanlar yönteminin sürekli ortamlar mekaniğinde dalga yayılımı problemleri için uygun bir nümerik yaklaşım olduğunu göstermektedir [25].



Şekil 3.4. Sınır elemanlar yöntemiyle zemin sınır şartlarının belirlenmesi

3.3.1.2. Viskoz sınır şartlarıyla modelleme

Zeminin radyasyon sönümü şartını sağlayabilmek için kullanılabilir bir diğer yöntem ise zeminin kesim yüzeylerinde sınırların eşdeğer statik yaylar ve sönümleyiciler ile idealleştirilmesidir. Bu sınır şartlarıyla titreşim kaynağından yayılan dalgaların sınırlarda yansıyor sisteme geri dönmesi engellenmiş ve zeminin sonsuzluğunun oluşturduğu geometrik sönüm ifade edilmiş olur (Şekil 3.5).



Şekil 3.5. Viskoz elemanlarla zemin sınırlarının idealleştirilmesi

Viskoz sınır şartlarının kullanılması durumunda zemin bölgesinin uygun sonlu elemanlara bölünmeli ve zemin kesim bölgesi de yapıdan yeteri kadar uzaklıkta seçilmelidir. Aynı zamanda düzlem dalga yayılımının izotrop ve lineer elastik bir ortamda gerçekleşmesi gerekmektedir.

Viskoz sınır şartı efektif rijitlik ve efektif sönüm değerleri tanımlanmıştır. Efektif rijitlik, ilgili noktanın bir birimlik yer değiştirmesi için gereken kuvvet olarak belirlenir. Efektif sönüm ise aşağıdaki denklemden yararlanılarak hesaplanır;

$$c = \rho v_s A \quad (3.3)$$

burada v_s zeminin kayma dalga hızı ve A ise etkili alandır. Zeminin kayma dalgası;

$$v_s = \sqrt{\frac{G}{\rho}} \quad (3.4)$$

olarak tanımlanmıştır.

Burada G , zeminin kayma modülüdür ve bu değer;

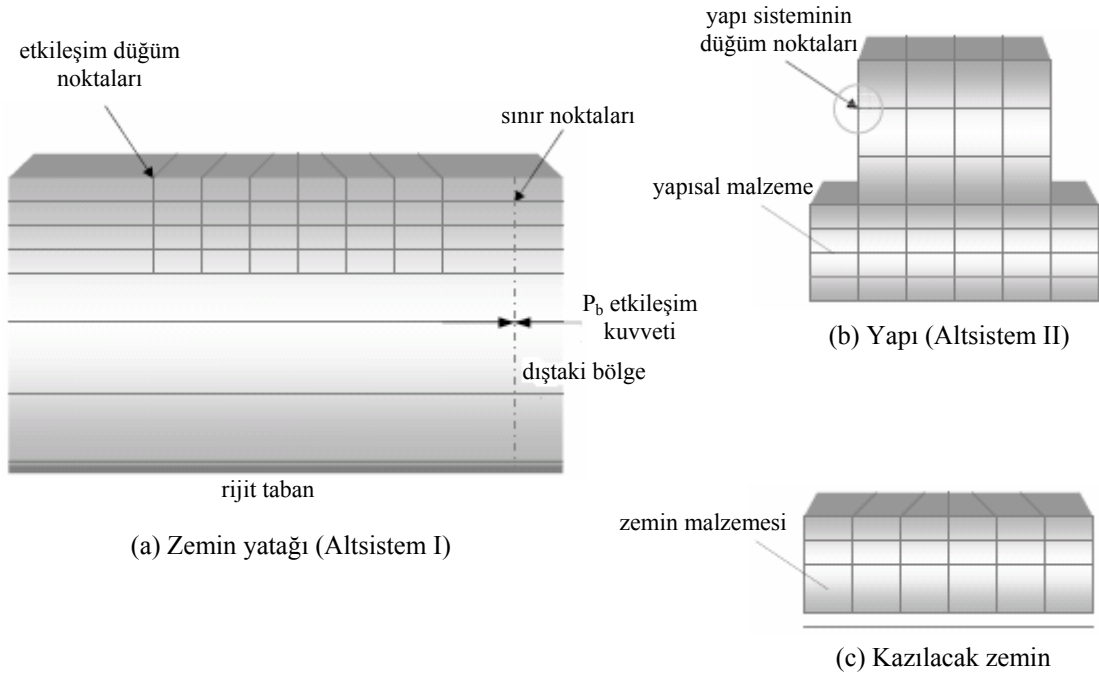
$$G = \frac{E}{2(1 + \nu)} \quad (3.5)$$

olarak tanımlanmıştır. Burada E zeminin elastisite modülüdür [2].

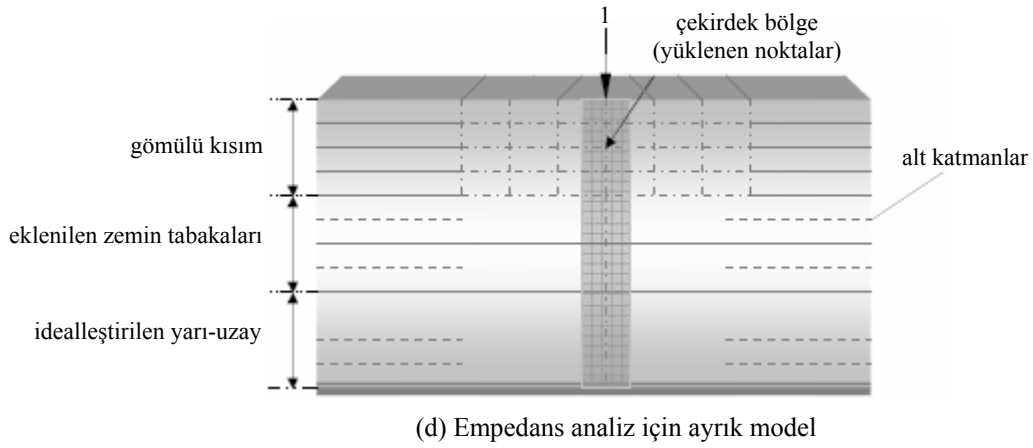
3.3.1.3. İnce Tabaka/Esnek Hacim yöntemiyle idealleştirme

Gömülü yapıların genel durumlarında, sayısal modelinin gerçekleştirilebilmesi için üç alt bölge tespit edilir: Bunlar, yapının yer almadığı yapısız zemin bölgesi, gömülü parçasıyla birlikte yapının kendisi ve yapının gömülü kısmı için kazılacak zemin parçasıdır (Sekil6a-c).

Birinci altsistem olarak sınıflandırılan zemin bölgesi İnce Tabakalar Yöntemi (İTY) olarak isimlendirilen yarı ayırık bir çözüm tekniğiyle ele alınmaktadır. Burada zemin yatağı, anakayaya ya da yarı sonsuz uzayın üzerinde yer alan lineer elastik veya visko elastik malzemeli yarı sonsuz yatay katmanlardan meydana geldiği varsayılmaktadır. İkinci ve üçüncü altsistemler olarak tanımlanan gömülü temel ile birlikte üstyapı ve kazılacak zemin parçası sonlu elemanlar yöntemiyle (SEY) idealize edilir. Kazılıp çıkartılacak zemin, temel ile birlikte dikkate alınmaktadır. Yapı ile temel arasındaki etkileşim sadece arakesit yüzeyindeki düğüm noktalarında değil, gömülü bölgenin tüm noktalarında gerçekleşmektedir. Yukarıda tanımlanan bu üç altsistem birbirlerine her bir altsisteme ait etkileşim düğüm noktaları aracılığıyla bağlanırlar. Tüm sistemin birleştirilmesinde Esnek Hacim Yöntemi (EHY) kullanılır [26]. Çıkartılacak zemin bölgesini temsil eden hacim elemanları ile yatay tabakaların kesişme noktaları, İTY/EHY yaklaşımında etkileşim düğüm noktaları olarak tanımlanmaktadır (Sekil 6d). SASSI programının da temelini oluşturan bu yöntemin detaylı teorik bilgilerine literatürden ulaşılabilir [13-14].



*Fleksibilite terimleri için
birim yüklemeli SE modeli*



Şekil 3.6. İnce Tabaka/Esnek Hacim çözüm tekniğinde altsistem yaklaşımı [26]

BÖLÜM 4. SONLU ELEMANLAR YÖNTEMİ

Sonlu elemanlar yöntemi (SEY) ya da Sonlu elemanlar metodu (SEM), kısmi diferansiyel denklemlerle ifade edilen problemleri çözmek için kullanılan nümerik bir tekniktir. Sonlu elemanlardaki yaklaşık fonksiyonlar, araştırılan fiziki alanın nokta değer terimlerinde belirlenmektedir. Sürekli fiziksel problem, bilinmeyen düğüm noktalarına bağlı, kesikli sonlu eleman problemine dönüştürülmektedir. Bu yöntemin uygulanması için basit yaklaşım fonksiyonları oluşturulmalıdır.

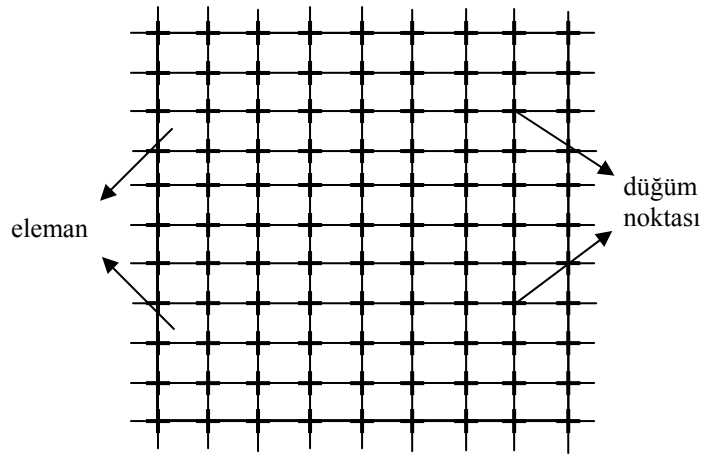
Sonlu Elemanlar Yöntemi, katı mekaniği, sıvı mekaniği, akustik, elektromanyetizma, biyomekanik, ısı transferi, geoteknik modellemeler vb. gibi alanlarda karşıya çıkan

- a. Karmaşık sınır koşullarına sahip sistemlere
- b. Düzgün olmayan geometriye sahip sistemlere
- c. Kararlı hal, zamana bağlı ve özdeğer problemlerine
- d. Lineer ve lineer olmayan problemlere

uygulanmaktadır.

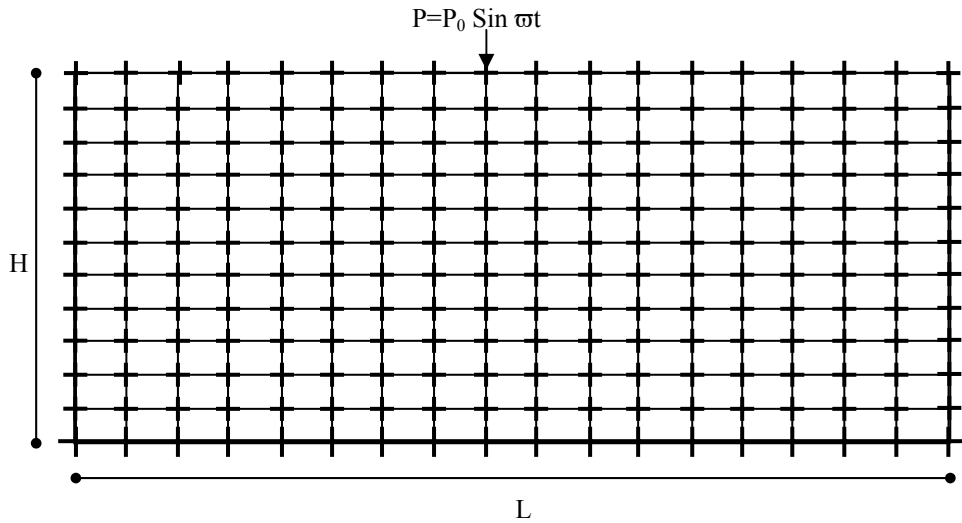
Sonlu eleman yaklaşımında problemin genel bir denkleminin yazımı ve denklemin çözümü yerine önce ortam sonlu elemanlara ayrılır ve her eleman için problemin bütünü göz önüne alınarak denklemler çıkartılır. Mevcut sınır şartları dikkate alınarak elemanlar birleştirilir ve ortamın tamamı için matris denklemleri elde edilir. Elde edilen denklem takımları veya takımı çözümlenerek bilinmeyenler hesaplanır.

Bu yöntemde sürekli ortam önce Şekil 4.1 de görüldüğü gibi her birine eleman adı verilen sonlu sayıda elemanlara bölünür. Bu elemanlar birbirine düğüm noktaları olarak adlandırılan sonlu sayıda noktalarla bağlıdırlar.



Şekil 4.1. Bir sonlu eleman modelinde düğüm noktaları ve elemanlar

Her elemanın düğüm noktalarına serbestlik derecesi kadar bilinmeyen sayısı vardır. Eleman davranışı bu bilinmeyen serbestlik dereceleri içeren denklemlerle ifade edilir. Gerek düğüm noktalarında gerekse eleman sınır yüzeylerinde bazı süreklilik şartları sağlandığında cismin veya yapının matematiksel bir modeli elde edilmiş olur. Böylece sonsuz serbestlik derecesi olan bir modele dönüştürülür. Bu elde edilen modele sistemin sonlu eleman ağı adı verilir (Şekil 4.2).



Şekil 4.2. Çalışma aşamalarında uygulanan bir sonlu eleman modeli

Sonlu elemanlar metodunda yapı, davranışı daha önce belirlenmiş olan bir çok elemana bölünür. Elemanlar "düğüm noktası" adı verilen yerlerde tekrar birleştirilirler (Şekil 4.2). Bu şekilde cebrik bir denklem takımı elde edilir. İncelenen probleme bağlı olarak bu şekilde yüzlerce hatta binlerce denklem elde edilir. Bu denklem takımının çözümü ise bilgisayar kullanımını zorunlu kılmaktadır. Sonlu elemanlar metodunda temel fikir sürekli fonksiyonları bölgesel sürekli fonksiyonlar

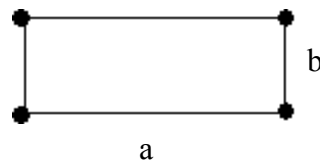
(genellikle polinomlar) ile temsil etmektir. Bunun anlamı bir eleman içerisinde hesaplanması istenen büyüklüğün (örneğin yerdeğiştirmenin) değeri o elemanın düğüm noktalarındaki değerler kullanılarak interpolasyon ile bulunur. Bu nedenle sonlu elemanlar metodunda bilinmeyen ve hesaplanması istenen değerler düğüm noktalarındaki değerlerdir. Enerjinin minimum olması prensibi kullanılarak büyüklük alanının düğüm noktalarındaki değerleri için bir denklem takımı elde edildiğinde, bu denklem takımının matris formundaki gösterimi ;

$$[M][\ddot{U}] + [C][\dot{U}] + [K][U] = [F] \quad (4.1)$$

şeklinde dir. Burada $[U]$ büyüklük alanının düğüm noktalarındaki bilinmeyen değerlerini temsil eden vektör, $[\dot{U}]$ hız vektörü, $[\ddot{U}]$ ivme vektörü, $[F]$ bilinen yük vektörü, $[C]$ sönüm matrisi, $[M]$ kütle matrisi ve $[K]$ ise bilinen sabitler matrisidir. Gerilme analizinde $[K]$ rijitlik matrisi olarak bilinmektedir.

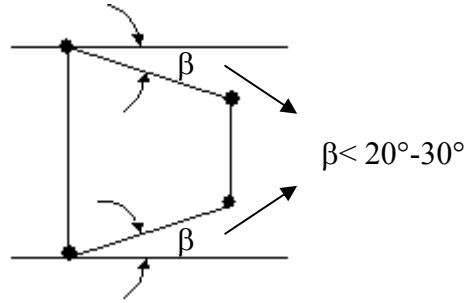
4.1. Genel Olarak Modelleme

Modelleme bir fiziksel yapı veya sürecin analitik veya sayısal olarak yeniden inşa edilmesidir. Sonlu elemanlar metodunda modelleme basitçe düğüm noktası ve elemanlardan oluşan bir ağ yapısı hazırlamak değildir. Problemi gerekli şekilde modelleyebilmek için gerekli sayı ve tipteki elemana karar vermek ancak problemin fiziğinin iyi şekilde anlaşılmasıyla mümkündür. Kötü şekil verilmiş elemanlar ile hesaplanması istenilen büyüklüğün hesaplama alanı içindeki değişimini yansıtamayacak kadar büyük boyutlu elemanlar modellemede istenmez. Diğer yandan zaman ve bilgisayar olanaklarını boş yere harcamamıza neden olacak, gereğinden fazla sayıda elemanlardan oluşan bir modellemede istenmemektedir. Hesaplanması istenilen büyüklüğü ve hesaplama alanı içindeki değişimini yeterli doğrulukta verecek kadar sıklıkta bir eleman dağılımına ihtiyaç vardır.



Şekil 4.3. Dört düğüm noktalı sonlu eleman

Eleman boyutları küçüldükçe sonuç daha yakın olacaktır. Bu hesaba göre eleman boyutları arasında bir oran kabulü en doğru yöntemdir. Ayrıca yamuk şeklinde kullanılan elemanların yatay düzlem ile açısını β kabul edersek, bu açılar eşit ve belirli sınırlar içinde olmalıdır (Şekil 4.4).



Şekil 4.4. Yamuk modeller için açı oranları

4.2. Modelleme ve Dikkat Edilmesi Gerekli Hususlar

Bir problemin sonlu elemanlar metoduyla çözümü için kaç adet eleman gerektiğinin tespiti problemin en önemli aşamalarından biridir. Yapılan analizlerde yeni bir deney için eleman sayısını arttırdığımızda, analizde daha fazla sayıda eleman ile daha sık bir ağ kullanılırsa sonlu eleman modeli daha küçük bir ayrıklaştırma hatası verecektir. Ayrıca gerçek fiziksel objenin (yapı, yapı malzemesi, zemin yapısı vb.) geometrisi daha iyi modellenmiş olacaktır. Eğer analiz neticesinde bulduğumuz sonuçlar arasında önemli bir fark yoksa sonuçların yakınsamış olduğu kabul edilebilir.

Yazılımlarda genelde bir takım hatalar bulunabilir. Sonlu eleman paket programları oldukça büyük yazılımlar olup, devamlı düzeltmeler yapılmaktadır. Elde edilen hatalı sonuçlar için programı suçlamak kolay bir yol olmasına rağmen, hatalı sonuçlara genelde yanlış modellemeler neden olmaktadır. Doğru modelleme yapabilmek için ayrıklaştırma esnasında bir takım hususlara dikkat edilmesi gerekmektedir [27].

Sonlu elemanlar ağının mümkün olduğu kadar üniform olmasına dikkat edilmelidir. Fakat yüklemeye ve yapının davranışında hızlı değişimlerin görüldüğü bölgelerde daha sık bir ağ yapısı için üniformluğun bozulmasına müsaade edilebilir. Bu durumlar aşağıda olduğu gibi izah edilebilir:

- a. Dörtkenarlı elemanların üçgen elemana göre birçok avantajı olması nedeniyle, dörtkenarlı elemanlar daima üçgen elemanlara tercih edilmelidir. Fakat geometrinin ve/veya yüklemenin üçgen eleman gerektirdiği durumlarda bu kural bozulabilir.
- b. Deplasman analizi için gerilme analizinde kullanıldığı kadar sık ağ yapısına gerek yoktur.
- c. Geometride veya malzemede düzgün doğrusal olmamayı hesaba katan analizler için doğrusal analizlere kıyasla daha sık bir ağ yapısına ihtiyaç vardır.
- d. Titreşim hesabı doğal frekansların hesabına kıyasla daha sık ağ yapısı gerektirmektedir.
- e. Düğüm noktalarının numaralandırılması mümkün olduğu kadar büyük yerdeğiştirme olan bölgelerden küçük yerdeğiştirme olan bölgelere doğru yapılmalıdır. Fakat genelde sonlu eleman paket programlarında sonuçlar numaralandırmadan etkilenmezler
- f. Eğrisel yüzeylerin düzlemsel elemanlar ile tarif edilmesi durumunda yüzey normali etrafındaki dönme serbestliği kaldırılmalıdır. Aksi takdirde kötü koşullu bir matrisle uğraşılması gerekecektir.
- g. Yüksek mertebeden elemanlar için ara düğüm noktalarının dağılımı mümkün olduğu kadar üniform olmalıdır.
- h. Sonlu eleman hesaplarının ilk kontrolü için yüklerin, kuvvetlerin ve reaksiyonların dengesinin kontrol edilmesi tavsiye edilmektedir.
- i. Eğer analiz edilen yapı ve yükleme simetrik ise, hesaplamalarda bu avantaj kullanılmalıdır. Yani analiz için yapının yarısı veya dörtte biri modelleme için kullanılabilir. Fakat burkulma ve özdeğer problemlerinde dikkatli olunması gerekir. Çünkü simetrik olmayan düğüm noktaları bu problemler için önemli olabilir.
- j. Yüksek frekanslı tepkisel değerlerin önemli olmadığı dinamik analizler için. statik analizde kullanılabilecek bir ağ yapısı yeterli olacaktır.
- k. Yüksek uzunluk oranlı dörtgen elemanlar, büyük açılı üçgen eleman gibi elemanlardan mümkün olduğu kadar sakınılması gerekmektedir.
- l. Yüksek ve düşük mertebeden elemanların birbirine bağlanması gerilmelerde düzensizliklere neden olacaktır.

- m. Eleman boyutlarında hızlı değişiklikler mümkün olduğu kadar minimize edilmelidir
- n. Anizotropik malzemeler için Poisson oranı açıkça tanımlanmalıdır. Ayrıca ν , E ve G değerlerinin teorik limitlerinin aşılp aşılmadığı kontrol edilmelidir.
- o. Kompleks yapıların sonlu elemanlar metoduyla analizinde, tüm yapı göreceli olarak kaba bir ağ yapısıyla analiz edilir. Bu analiz sonuçları yapı içinde detaylı bilgi sahibi olmak istediğimiz bölge için sınır koşulu kullanılarak, bu bölge daha sıkı bir ağ yapısı ile analiz edilebilir.

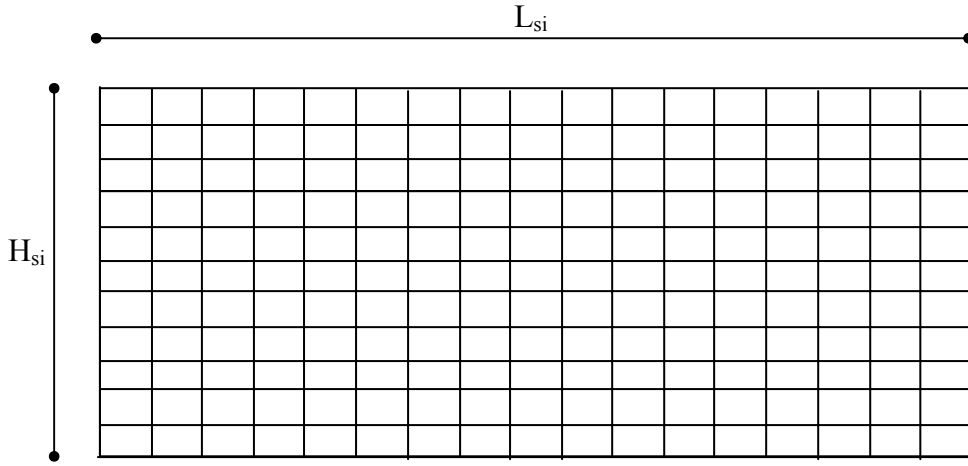
4.3. Sonlu Eleman Yönteminin Adımları

1. Problem ve onun sürekli ortamı tanımlanır
2. Sınır şartlarının belirlenir
3. Koordinat sistemi teşkil edilir
4. Sürekli ortam elemanlara ayrılır
5. Elemanlar için yaklaşık fonksiyonlar yazılır
6. Koordinatların dönüşümü gerçekleştirilir
7. Eleman matrisleri ve denklemleri elde edilir
8. Eleman matrisleri birleştirilerek sistem matrisi elde edilir
9. Sistem matrisine sınır şartları uygulanır
10. Elde edilen denklemlerin çözümü gerçekleştirilir
11. Problemin denklemleri hazırlanır
12. Yerdeğiştirmeler, şekil değiştirmeler ve gerilmeler hesaplanır
13. Sonuçlar yorumlanır

BÖLÜM 5. SAYISAL UYGULAMA

5.1. Zeminin Modellenmesi

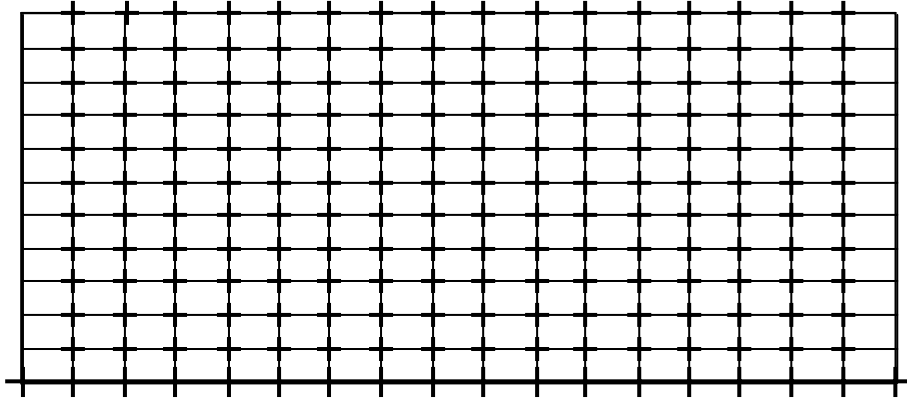
Sayısal uygulamaya başlamadan ilk olarak yapılması gereken matematik modelde kullanılacak ayrıklaştırılmış zemin bölgesinin gerçeğe yakın zemin koşullarını yansıtabilmesi için yatay ve düşey boyutlarının belirlenmesidir (Şekil 5.1).



Şekil 5.1. Zemin bölgesinin boyutları

Sayısal modelde ele alınan zemin bölgesinin büyüklüğünün sonuçlar üzerindeki etkisini incelemek için boyutlandırma yapılmıştır. Seçilen zemin bölgesinin sınır koşulları belirlenirken tabanda anakayanın varlığı dikkate alınmış ve modelde tabandaki tüm noktaların yerdeğiştirme bileşenleri kısıtlanmış olarak tanımlanmıştır. Zeminin yatay kesim noktaları ise boyutların etkisinin görülmesi için her iki kesim tarafında da düşey doğrultuda tüm düğüm noktaları serbest bırakılmıştır (Şekil 5.2). Bu şekilde tanımlanan zemin bölgesinin tam orta noktasından belirli bir harmonik yük ($P = P_0 \sin \omega t$) uygulanarak yükün altındaki ve zeminin yatay uzanımını dik kesen düğüm noktalarındaki yerdeğiştirmeler ölçülmüştür. Yukarıda belirtilen çalışmalar

zemin bölgesinin farklı yükseklikte (H_{si}) ve genişlikte (L_{si}) olması durumları için tek tek yapılmıştır.



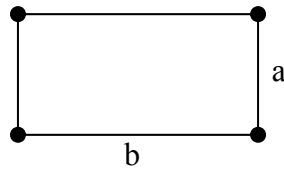
Şekil 5.2.Boyutlandırma çalışmasının yapıldığı zemin modeli

Bu analizler sonucunda zeminin yüzeyde yatay doğrultuda tam ortasında etki eden yükün altındaki ve sınırlardaki yatay ve düşey yer değiştirme bileşenleri elde edilmiştir. Elde edilen bu veriler incelenerek farklı yükseklikte ve genişlikte modellenen zemin bölgeleri için uygulanan yükün etkisi sonucunda, yükün uygulandığı noktadan itibaren yatayda zemin sınırlarına doğru gidildikçe oluşan yerdeğiştirme bileşenlerinin ne kadar azaldığı tespit edilmiştir. Araştırma sonucunda zemin bölgesi boyutlarının bu azalma miktarına etkisine bakıldığında zemin genişliğinin, yüksekliğinden daha fazla sonuçlara etki ettiği görülmüştür. Bu araştırmalar farklı zemin genişlikleri ve yükseklikleri için küçük boyutlardan büyük boyutlara doğru yapılmış, yükün uygulandığı noktadan zemin sınırlarına doğru oluşan yerdeğiştirmeler hesaplanmıştır. Küçük boyuttaki modellerden daha büyük boyuttaki modellere geçildiğinde oluşan yerdeğiştirmeler birbirilerine göre ihmal edilebilir düzeye ulaşana kadar analizler yapılmış, seçilen zemin bölgesinin işlemlerin hesap sürelerini uzatmaması ve işlem hacmini de arttırmaması için optimum boyutlar seçilmiştir. Bütün bu unsurlar dikkate alındığında zemin bölgesinin genişliği, $L_s=160$ m ve yüksekliği de, $H_s= 50$ m olarak belirlenmiştir.

Ayrıklaştırılan zeminin boyutları seçildikten sonra ikinci aşamada da zemin bölgesindeki sonlu eleman ağı belirlenmeye çalışılmıştır. Sonlu eleman ağının çok sıkı olması yani küçük boyutlarda sonlu elemanlar kullanılması daha uygun sonuçlar vermesinin yanında işlem hacmini büyük ölçüde arttırmaktadır. Dalga mekaniği

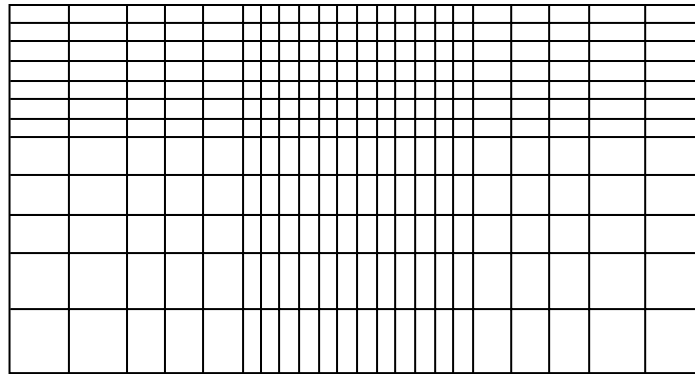
problemde zemin ortamının sonlu eleman örgüsünün yayılan dalgaların sınırlardan geri yansıyor bölgeye dönmesi açısından küçük tutulmamasına dikkat edilmiştir. Ayrıca kısa dalga boylu frekans bileşenleri geniş aralıklı düğümlerle modellendiğinde, yüksek frekans bileşenleri filtrelenebilir. Sonuçların tutarlılığı açısından sonlu eleman boyutları sayısal modelde kullanılan en kısa dalga boyunun sekizde biri ile onda biri arasında sınırlandırılmıştır.

Bu çalışmada 4 düğüm noktalı sonlu eleman kullanılmıştır (Şekil 5.3).



Şekil 5.3. Modellemedeki sonlu eleman şekli

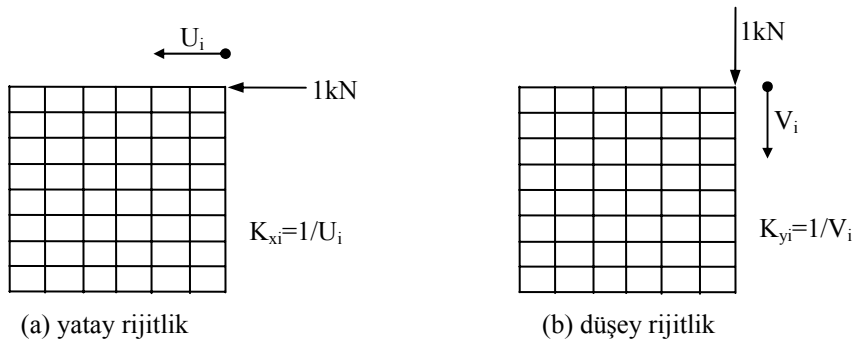
Sonlu eleman örgüsü belirlenirken yük kaynağının etkili olduğu bölgeler daha küçük boyutlu elemanlarla modellenmiş, etkili bölgeden uzaklaştıkça sonlu eleman boyutları da orantılı bir şekilde arttırılmıştır (Şekil 5.4). Etkili alan içerisinde boyutları 1m x1m olan kare elemanlar kullanılmış dışa doğru eleman boyutları 1m x 2m, 1m x 3m, 2m x 3m ve en dışta da 3m x 3m boyutlarında sonlu elemanlar kullanılmıştır.



Şekil 5.4. Belirlenen sonlu eleman örgüsü

5.2. Zemin Sınır Şartlarının Belirlenmesi

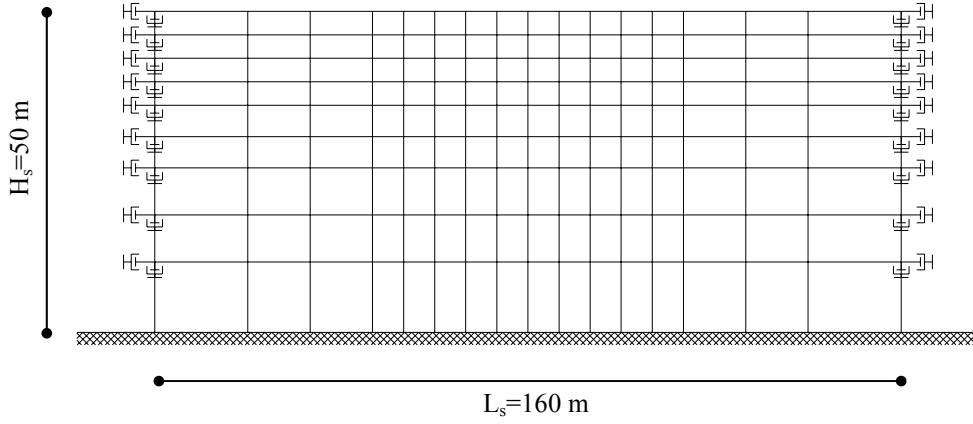
Bu aşamada boyutları ve sonlu eleman ağı belirlenen zemin bölgesinin yatay ve düşey yayılım doğrultularındaki sınır koşulları tanımlanmıştır. Düşey doğrultuda yeterli zemin yüksekliğinin alındığı düşünülerek, tabanda anakaya olduğu kabul edilmiş ve alttaki bütün düğüm noktaları yatay ve düşey yerdeğiştirme yapmayacak şekilde modellenmiştir. Zeminin yatay doğrultu sınır kesim yüzeylerindeki düğüm noktalarında ise daha önceden de bahsedildiği gibi zeminin elastik yarı sonsuz ortam olmasından dolayı zemindeki radyasyon sönümü (geometrik sönüm) etkisinin dikkate alınabilmesi için bu düğüm noktalarında yatay ve düşey yerdeğiştirme hareketi engellenemez. Zeminin bu özelliğini ifade edebilmek için bu noktalar ya sınır elemanlarla tanımlanmalı ya da viskoz sönümleyiciler (eşdeğer statik yaylar ve sönümleyiciler) kullanılmalıdır. Bu çalışmada radyasyon sönümü için viskoz sönümleyiciler kullanılmıştır. Viskoz sönümleyiciler de her bir düğüm noktası için yatay ve düşey doğrultulardaki rijitlik değerinin bilinmesi gerekmektedir. Bu değerleri hesaplamak için her bir düğüm noktası için ayrı ayrı iki doğrultuda da birim yükleme yapılmış ve bu yükleme karşı düğüm noktasında meydana gelen yerdeğiştirmeler bulunmuştur (Şekil 5.5). Burada bir düğüm noktasına yük uygulanırken sınırlardaki diğer bütün düğüm noktalarında yatay ve düşey yerdeğiştirmeler engellenmiştir. Kuvvet, yerdeğiştirme ve rijitlik ilişkisi kullanılarak düğüm noktalarının her iki doğrultudaki rijitlikleri hesaplanmıştır.



Şekil 5.5. Sınırdaki yay rijitliklerinin saptanması

Çalışmalar sonucunda elde edilen rijitlik ve sönüm değerleriyle yatay sınırlardaki her bir düğüm noktası viskoz sönümleyici olarak tanımlanmıştır. Yapılan çalışmalar

neticesinde zemin bölgesinin boyutları, sınır koşulları ve sonlu eleman örgüsü belirlenmiştir (Şekil 5.6).



Şekil 5.6. Modellenmiş zemin bölgesi

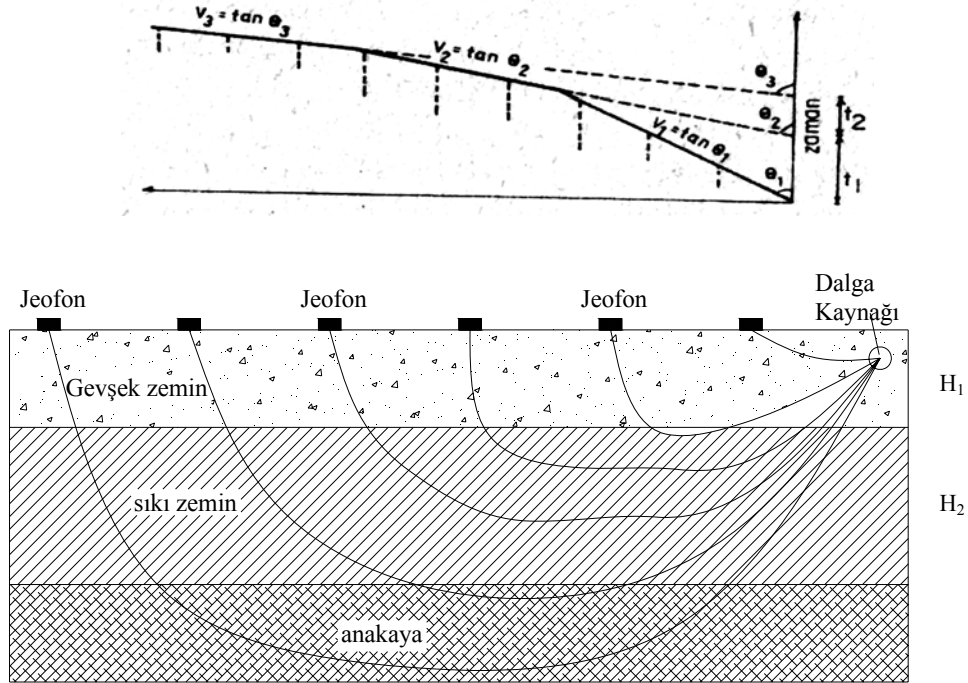
5.3. Zemin Özelliklerinin ve Zemin Parametrelerinin Belirlenmesi

Nümerik analiz için boyutları, sınır şartları ve sonlu eleman örgüsü belirlenen zemin bölgesinin malzeme özellikleri, çalışmalar sonucunda elde edilen verilerin daha iyi değerlendirilmesi ve ileride yapılacak deneysel çalışmalarla karşılaştırılabilmesi için belirlenen bir arazi üzerinde geoteknik deneyler kullanılarak elde edilmiştir. Bu tez çalışmasında kullanılan zemin malzeme özellikleri arazide yapılan sismik kırılma deneyi ve zemin sondajları ile alınan numunelerin laboratuarda analiz edilmesi sonucunda elde edilen verilere göre matematik modele aktarılmıştır.

İlk aşamada öncelikle zemin profilinin belirlenmesi, tabakaların kayma dalga hızlarının ve Poisson oranlarının tespiti ile zemin profili hakkında bilgi edinmek amacıyla sismik kırılma deneyi yapılmıştır. Sismik kırılma deneyi ile aynı zamanda zemin tabakalarının P ve S dalgası özellikleri de belirlenmiştir.

Sismik kırılma ve yansıma deneyleri ses dalgalarının ortamda hareket hızlarının incelenmesiyle zemin ve kayacın özelliklerinin ölçümü esasına dayanmaktadır. Geoteknik mühendisliğinde en geniş uygulama alanı bulmuş ölçüm yöntemi, yüzeyde darbe yükü ya da patlama ile oluşturulmuş titreşimin değişik tabakalardan yansıma zamanının ölçülmesiyle yapılır (Şekil 5.7). Sismik yansıma metodu ses

dalgalarının homojen elastik ortamda hareketi teorisinden geliştirilmiş olup, dalgaların hızı malzemenin elastisite modülü ve birim hacim ağırlığına bağlıdır.



Şekil 5.7. Tabakalı zeminde dalga yayılımı ve yansıması

Sismik yansıma deyinde zemindeki dalga hareketleri jeofon adı verilen aletlerin yüzeyde zemine sabitlenerek verilerin toplanması ve bir işlemcide işlenmesiyle belirlenir. Yüzeyde belirli aralıklarla yerleştirilmiş jeofonlar uygulanan etki sonucu oluşan dalgaların zemin tabakalarında yansıma zamanını otomatik olarak kaydederler (Şekil 5.8-5.9). Yansıma hızı zeminlerde yaklaşık 300–2000 m/s, kayada ise 3000-7500 m/s arasında değişmektedir. Zeminde bulunan yeraltı suyu dalgaların ilerleme hızını düşürmektedir [28].

Yüzeyde dalga üretildikten sonra elde edilen ölçümler jeofon uzaklığı-yansıma zamanı olarak bir grafik üzerinde noktalanır. Burada bir doğru üzerine düşen noktalar birleştirildiğinde doğruların kesişme noktaları farklı katmanlara geçişi gösterecektir. Yansıma hızları doğruların eğimlerinden hesaplanır ve katman kalınlıkları da bu dalga hızlarına bağlı olarak bulunur.

$$H_1 = \frac{t_1 v_1 v_2}{2\sqrt{v_2^2 - v_1^2}} \quad (5.1)$$

$$H_2 = \frac{t_2 v_2 v_3}{2\sqrt{v_3^2 - v_2^2}} \quad (5.2)$$



Şekil 5.8. Sismik kırılma deneyi kayıt cihazı



Şekil 5.9. Sismik kırılma deneyi yük uygulama noktası

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. Yükün uygulandığı yerdeki titreşim etkisini görmek için levhaya yakın bir jeofon zemine sabitlenmiştir (Şekil 5.9). 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. 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.

Titreşim kaynağına en yakın dinleyiciler üst tabakadan geçen dalgaları kaydetmektedir. Alt tabakalardan yansıma daha geç olduğundan uzaktaki jeofonlar bu dalgaları almaktadırlar. Tablo 5.1'de jeolojik malzemeler için yansıma hızı limitleri verilmektedir.

Tablo 5.1 Zemin ve kayada sismik dalgaların hızı

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, gnays	3500-7500

Sismik kırılma ve yansıma deneyleri arazi deneyleri olup, günümüzde gelişmiş cihazlar aracılığı ile deney sırasında dahi dalga hareketlerinin görülebilmesi mümkündür (Şekil 5.10-5.11).



Şekil 5.10. Sismik kırılma deneyi jeofon uygulaması



Şekil 5.11. Sismik kırılma deneyi enine jeofon uygulaması

Sismik kırılma deneyinden sonra arazide iki adet sondaj yapılmış ve zemin laboratuvar deneyleri için numuneler alınmıştır (Şekiller 5.12-5.13). Bu çalışmalarda elde edilen zemin verilerinin tamamı nümerik modelin sayısal uygulamaları aşamalarında kullanılmıştır.



Şekil 5.12. Zemin laboratuvar deneyleri için sondaj çalışması



Şekil 5.13. Sondaj işleminde kullanılan numune alıcılarının değiştirilmesi

Zemin sondajı sonucunda alınan numunelerle zemin laboratuvar deneyleri yapılmış, saha profiline ait parametreler elde edilmiş ve bu tabakalı zemine ait parametreler matematik modele yansıtılmıştır. Bu şekilde nümerik modelde kullanılan zemin parametreleri literatürde kullanılanları değil gerçek saha koşullarını içermiştir.

5.4. Matematik Modelin Kurulması

Zemin bölgesinin geometrik özellikleri ve sınır koşulları belirlendikten sonra zemin bölgesinin malzeme özellikleri, üstyapı ve uygulanacak yük tanımlanabilir. İlk olarak zemin bölgesinin malzeme özellikleri tanımlanmıştır.

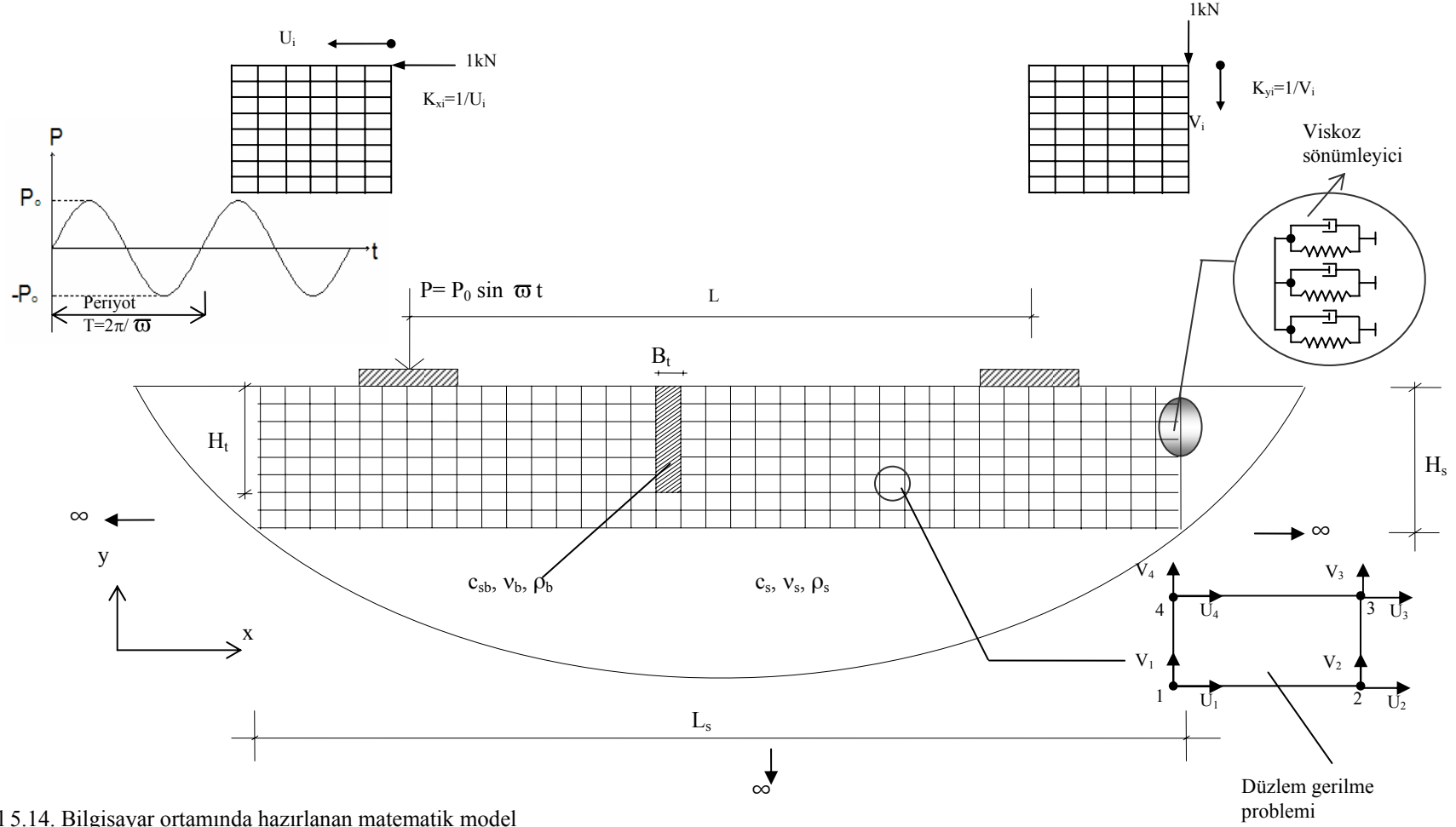
Zemin bölgesi özellikleri için, Sakarya ili, Geyve ilçesinde belirlenen bir arazi üzerinde zemin etüdü yapılmış ve bu zeminin özellikleri kullanılmıştır. Zemin bölgesi tabakalı bir bölge olduğu için her tabaka da farklı değerler söz konusudur. Birinci tabakanın kalınlığı 4 m olup kayma dalga hızı $c_{s1} = 200$ m/s, zemin yoğunluğu $\rho_1 = 2$ t/m³ ve Poisson oranı $\nu_1=0.33$ 'dür. İkinci tabakanın kalınlığı 6 m olup kayma dalga hızı $c_{s2} = 600$ m/s, zemin yoğunluğu $\rho_2 = 2$ t/m³ ve Poisson oranı $\nu_2=0.33$ 'dür. Üçüncü tabakanın kalınlığı 40 m olup kayma dalga hızı $c_{s3} = 1200$ m/s, zemin yoğunluğu $\rho_3 = 2$ t/m³ ve Poisson oranı $\nu_3 = 0.33$ 'dür.

Sisteme harmonik karakter de, genliği $P_0= 200$ kN olan sinüzoidal bir yük uygulanmıştır (5.3). Burada ω dış yükün açısal frekansını temsil etmektedir.

$$P= P_0 \sin \omega t \quad (5.3)$$

Üstyapı olarak ta boyutları 1m x 0.5 m olan 2 adet betonarme temel bloğu kullanılmıştır. Beton malzemesi olarak C25 sınıfı beton kullanılmıştır. Bu iki temel bloğu arasındaki mesafe, $L= 25$ m'dir. Bütün bu veriler doğrultusunda sayısal analizler için kullanılacak matematik model hazır hale getirilmiştir (Şekil 5.14).

Sınırdaki yay rijitliklerinin saptanması:



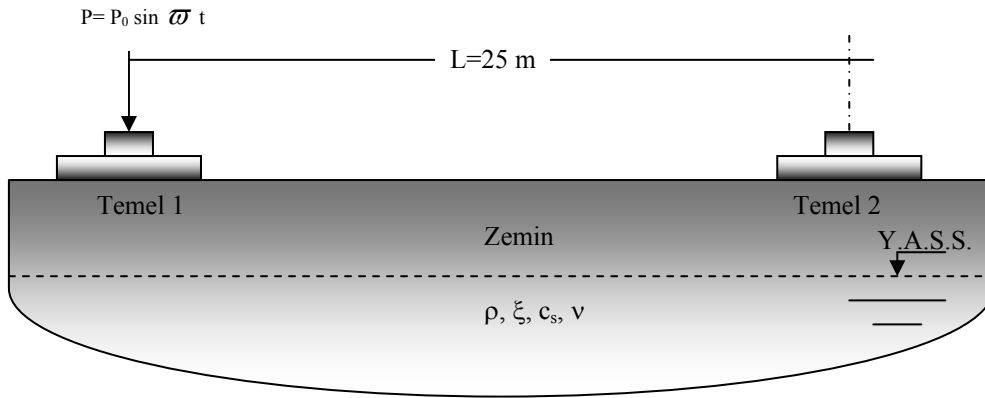
Şekil 5.14. Bilgisayar ortamında hazırlanan matematik model

Analiz çalışmaları üç kısımdan oluşmaktadır:

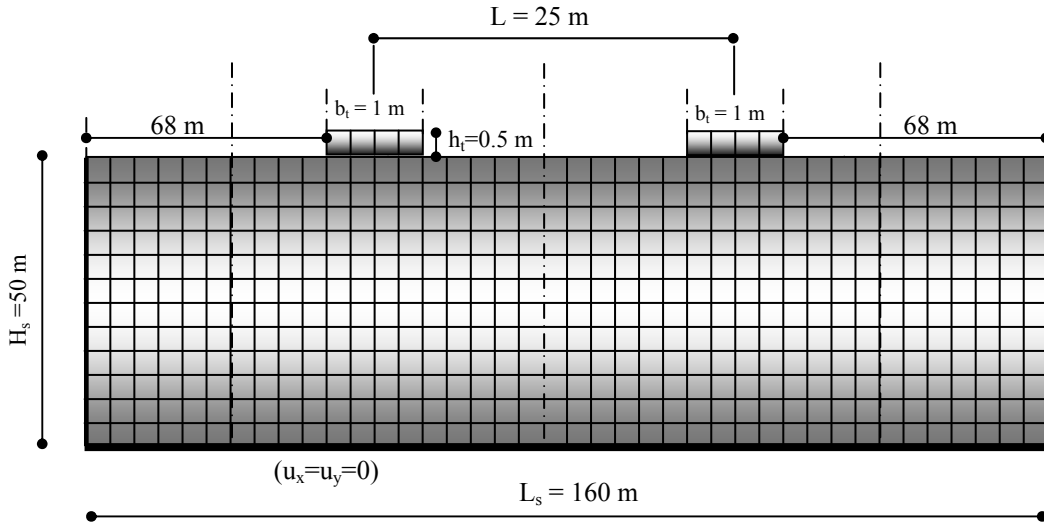
- 1) Yalıtımsız durum
- 2) Aktif yalıtım durumu
- 3) Pasif yalıtım durumu

Belirtilen bu üç aşama için detaylı parametrik analizler yapılmış ve elde edilen sonuçlar karşılaştırılmalı olarak sunulmuştur.

Sayısal uygulamaların birinci aşamasında tabakalı zemin yüzeyine oturan ve aralarında 25 m mesafe bulunan beton temel bloklarından birine belirli frekans aralıkları için (12.5 Hz-100 Hz) tanımlanan harmonik düşey yük uygulanmış ve bu yükün diğer temelin üst noktasında oluşturduğu titreşimlerin genliği yerdeğiştirme cinsinden belirlenmiştir (Şekil 5.15-5.16).



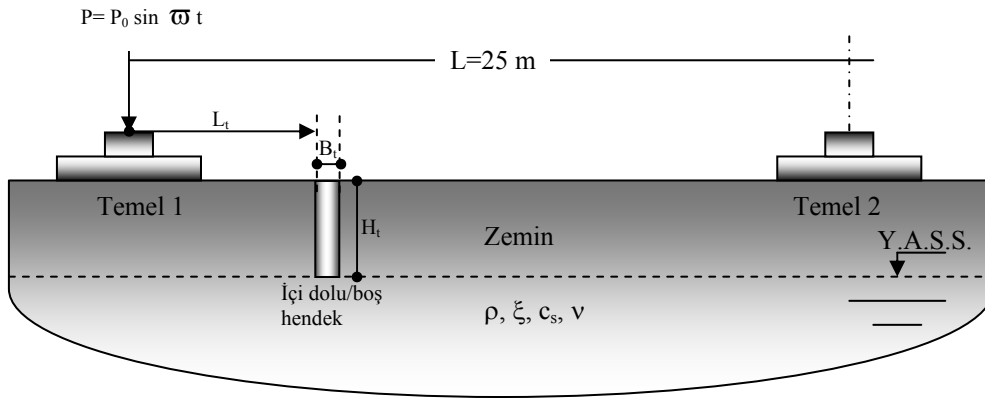
Şekil 5.15. Yalıtımsız arazi modeli



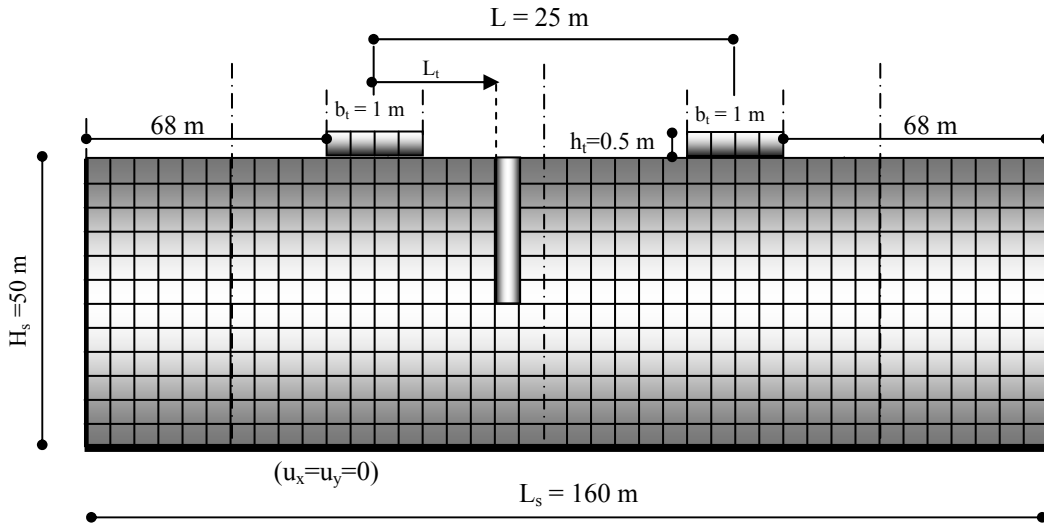
Şekil 5.16. Yalıtımsız durum matematik modeli (SEY)

Yalıtımsız durumda belirli frekanslar için sonuçlar elde edildikten sonra aktif yalıtım ve pasif yalıtım için analizler yapılmıştır. İlk olarak aktif yalıtım için çalışmalar yapılmıştır.

Aktif yalıtımda, yükün uygulandığı temel bloğu (yük kaynağı) ile belirli bir mesafe ötedeki temel bloğu (korunacak yapı) arasına konulan titreşim azaltıcı bariyer yük kaynağına yakın olarak konuşlandırılmıştır. Yani bariyer kaynaktan yayılan dalgaları engellemektedir. Bu şartlar doğrultusunda analizler yapılmış, farklı parametrelerin değişiminin dalganın yayılmasına etkisi incelenmiş ve sonuçlar elde edilmiştir. Araştırılan parametreler; öncelikle bariyerin boyutlarının etkisi (bariyerin yüksekliği (H_t), bariyerin genişliği (B_t)), bariyerin yük kaynağına olan uzaklığının etkisi (L_t), bariyer içinin boş olması durumu, bariyerin içinin dolu olması durumu ve içindeki malzemenin yoğunluğunun etkisi incelenmiştir. Ayrıca dış yükün farklı frekans değerleri dikkate alınarak analizler yapılmıştır (Şekil 5.17-5.18).

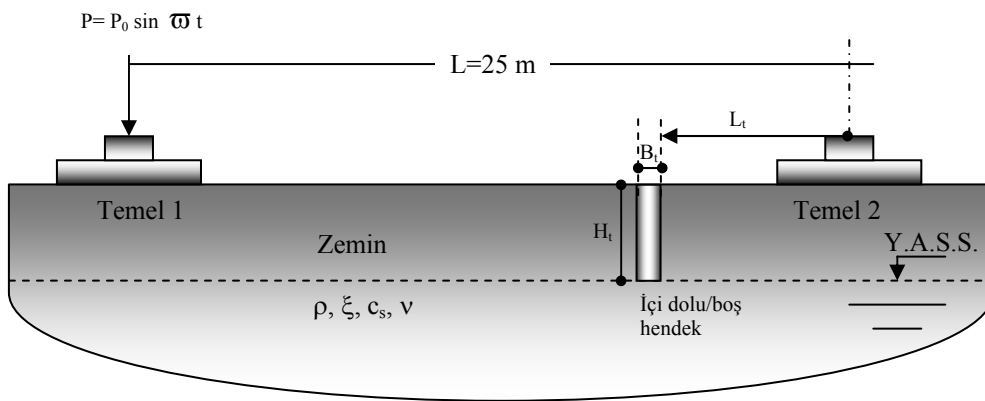


Şekil 5.17. Aktif yalıtım arazi modeli

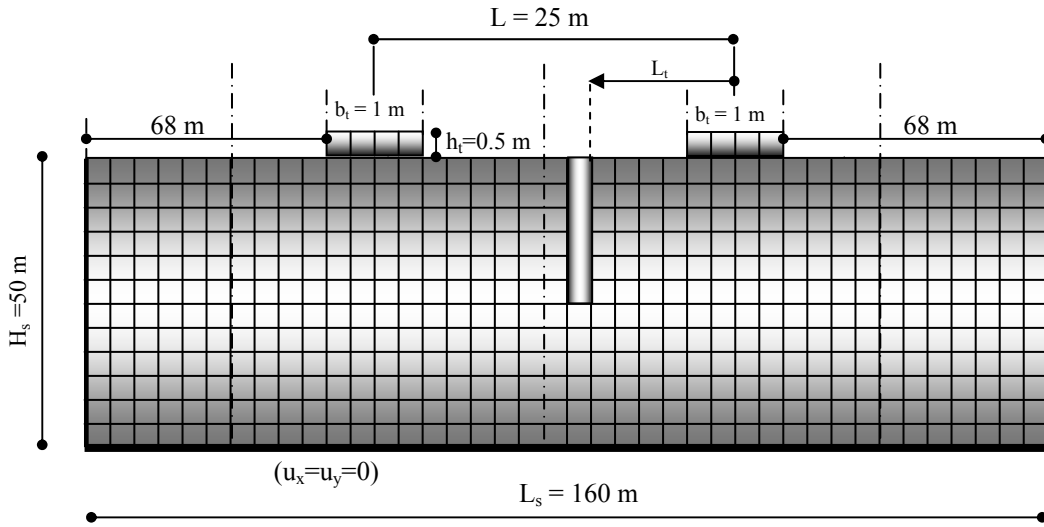


Şekil 5.18. Aktif yalıtım matematik modeli (SEY)

Son aşamada ise korunacak yapıyı yük kaynağından yayılan dalgalardan korumak (pasif yalıtım) için korunacak yapının yakınına titreşim azaltıcı bariyer konulmuştur. Bu şekilde hazırlanan modelde farklı parametrelerin değişiminin yapının gelen dalgalardan korunmasına etkisi incelenmiş ve sonuçlar elde edilmiştir. Araştırılan parametreler; öncelikle bariyerin boyutlarının etkisi (bariyerin yüksekliği (H_t), bariyerin genişliği (B_t)), bariyerin korunacak yapıya olan uzaklığının etkisi (L_t), bariyer içinin boş olması durumu, bariyerin içinin dolu olması durumu ve içindeki malzemenin yoğunluğunun etkisi incelenmiştir. Ayrıca dış yükün farklı frekans değerleri için analizler yapılmıştır (Şekil 5.19-5.20).



Şekil 5.19. Pasif yalıtım arazi modeli



Şekil 5.20. Pasif yalıtım matematik modeli (SEY)

Yalıtımsız durum, aktif yalıtım ve pasif yalıtım durumları için gerekli parametrik araştırmalar yapılmış ve sonuçlar karşılaştırmalı olarak verilmiştir. Çalışmada bariyerin içinin dolu olması durumunda kullanılan malzemeler; su, betonarme ve farklı yoğunluktaki bentonit malzemesidir. Suyun yoğunluğu $\rho = 1 \text{ t/m}^3$, betonarmenin yoğunluğu $\rho = 2.5 \text{ t/m}^3$ alınmıştır. Kullanılan bentonit malzemeleri tablo 5.1’de verilmiştir.

Tablo 5.2. Farklı bentonit malzemelerinin özellikleri

Zemin-bentonit karışımı	Yoğunluk ρ (t/m^3)	Kayma dalga hızı c_s (m/s)	Poisson oranı ν (-)
Karışım 1	1.2	30	0.45
Karışım 2	1.6	60	0.33
Karışım 3	2	90	0.25

Gerçekleştirilen uygulamalara ait sayısal sonuçları daha iyi değerlendirebilmek için boyutsuz parametreler geliştirilmiştir. Bunlar;

Aktif ve pasif yalıtım için dalga bariyerinin temellere uzaklığının etkisi \bar{l} ile ifade edilmiş ve;

$$\bar{l} = \frac{L_t}{L_R} \quad (5.4)$$

şeklinde tanımlanmıştır. Burada L_R Rayleigh yüzey dalgasının dalga boyudur ve yüzey dalgası yayılma hızına (c_R) ve zorlayıcı yükün titreşim frekansına (f) bağlı hesap edilmektedir.

$$c_R \cong 0.9c_s \quad (5.5)$$

$$L_R = \frac{c_R}{f} \quad (5.6)$$

Bariyer genişliğinin etkisi \bar{b} ile ifade edilmiş ve;

$$\bar{b} = \frac{B_t}{L_R} \quad (5.7)$$

bağıntısıyla hesaplanmıştır.

Bariyer derinliğinin etkisi \bar{h} ile gösterilmiş;

$$\bar{h} = \frac{H_t}{L_R} \quad (5.8)$$

Dalga bariyerinin içine konulan malzemenin zemine göre dinamik rijitlik etkisini tanımlamak üzere IR (empedans oranı) boyutsuz parametresi;

$$IR = \frac{\rho_b c_b}{\rho_s c_s} \quad (5.9)$$

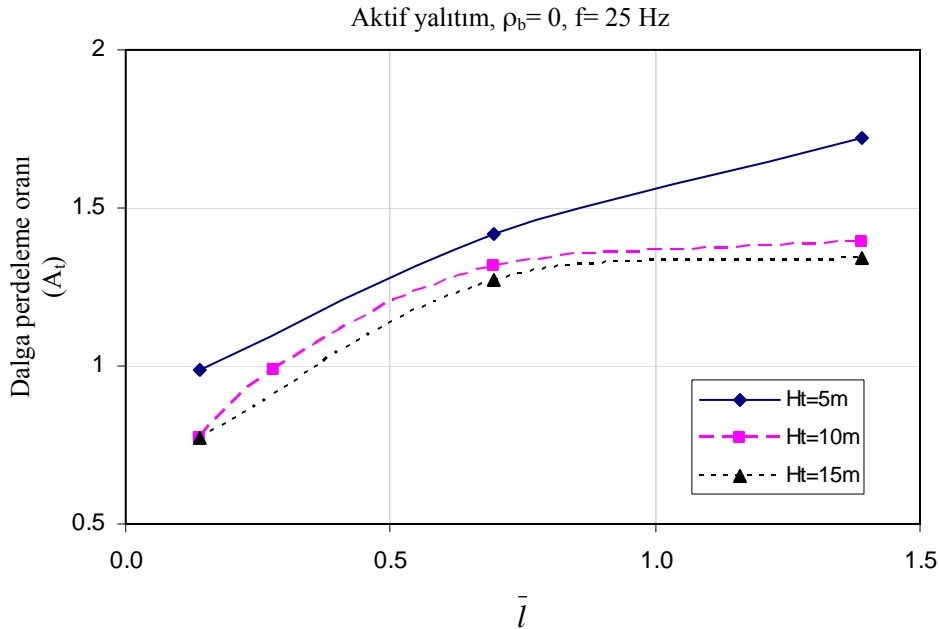
bağıntısıyla hesaplanmıştır.

Dalga bariyerinin dalgayı perdeleme etkisini göstermek için;

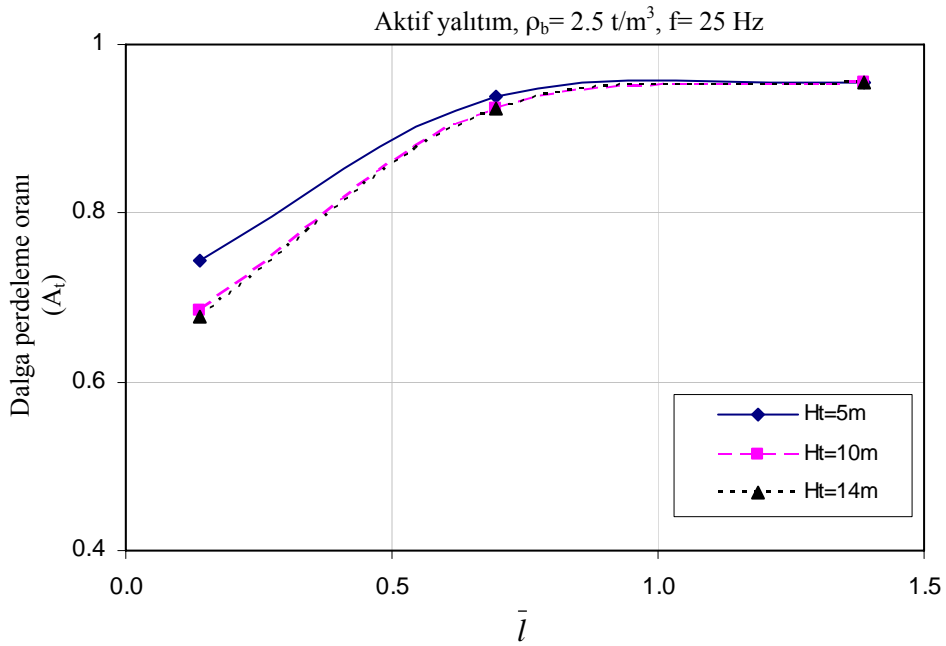
A_t dalgayı perdeleme oranını göstermek üzere, $A_t = U_z / \bar{U}_z$ olacak şekilde boyutsuzlaştırılmıştır. Burada \bar{U}_z dalga bariyeri olmadığı durumda maksimum düşey yer değiştirme genliğini (yalıtımsız durumu), U_z ise bariyer olduğu durumdaki maksimum düşey titreşim genliğini ifade etmektedir. A_t değerinin araştırma açısından anlam kazandığı yani etkili olduğu durum sıfır ile bir arasında kalmasıdır. A_t değerinin sıfır'a yaklaşması bariyerin etkisinin arttığını, bir'e yaklaşması bariyerin etkisinin azaldığını göstermektedir.

$$(\text{çok etkili}) \quad 0 \leq A_t \leq 1 \quad (\text{etki yok}) \quad (5.10)$$

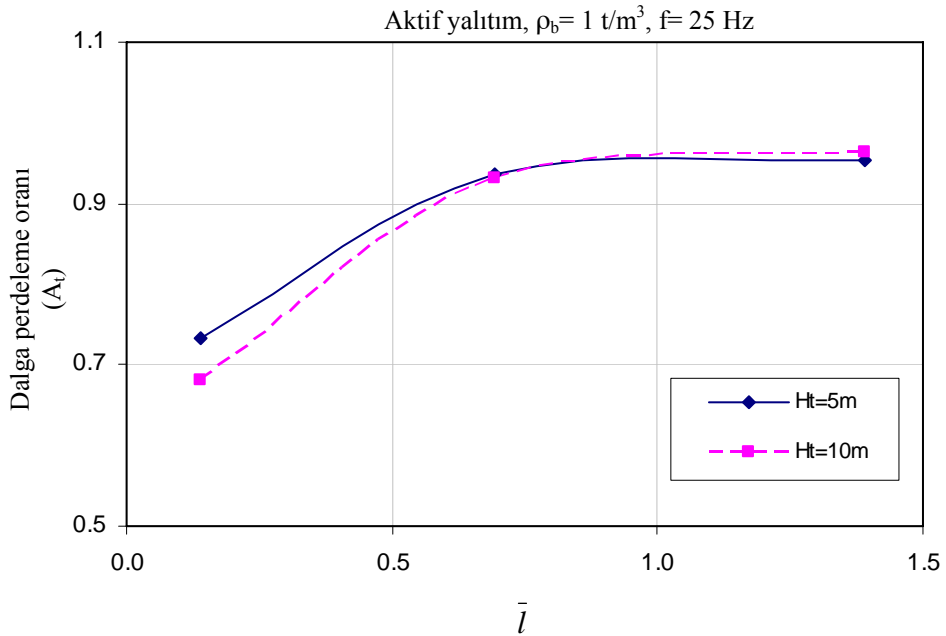
Aktif yalıtımda; şekil 5.21’de bariyerin içinin boş olması durumunda derinlik arttırıldıkça, bariyer dalgayı engelleyici etki göstermektedir. Burada %25 mertebesinde dalganın etkisinin azalması söz konusudur. Bunun yanında bariyer yük kaynağından uzaklaştırıldıkça dalganın perdelenmesine olan etkisi azalmaktadır. Şekil 5.22’de bariyerin betonarme bir malzemeden yapılması durumunda da analizler yapılmış ve bariyerin; derinliği arttırıldıkça perdeleme etkisinin arttığı, yük kaynağından uzaklaştırıldıkça dalgayı perdeleme etkisinin azaldığı görülmüştür. Bariyerin betonarmeden yapılması boş duruma göre daha etkili sonuçlar vermiş, bütün şartlar için bariyer %5-%25 arasında dalganın genliğini azaltma etkisi göstermiştir. Yalıtım aracı içinin su dolu olması durumu da incelenmiş ve yalıtım aracının derinliği arttıkça dalganın etkisini azaltma oranı artmış, yük kaynağından uzaklaştırıldıkça etkisinin azaldığı görülmüştür (Şekil 5.23). Burada bariyerin kaynağa yakın olması ve belirli bir derinlikte olması durumunda %30’lara varan bir azaltma etkisi görülmüştür. Yapılan çalışmalar sonucunda aktif yalıtımda bariyerin içinin dolu olmasının boş olması durumuna göre dalganın perdelenmesinde daha etkili olduğu görülmüştür.



Şekil 5.21. Aktif yalıtımda bariyerin boş olması durumu



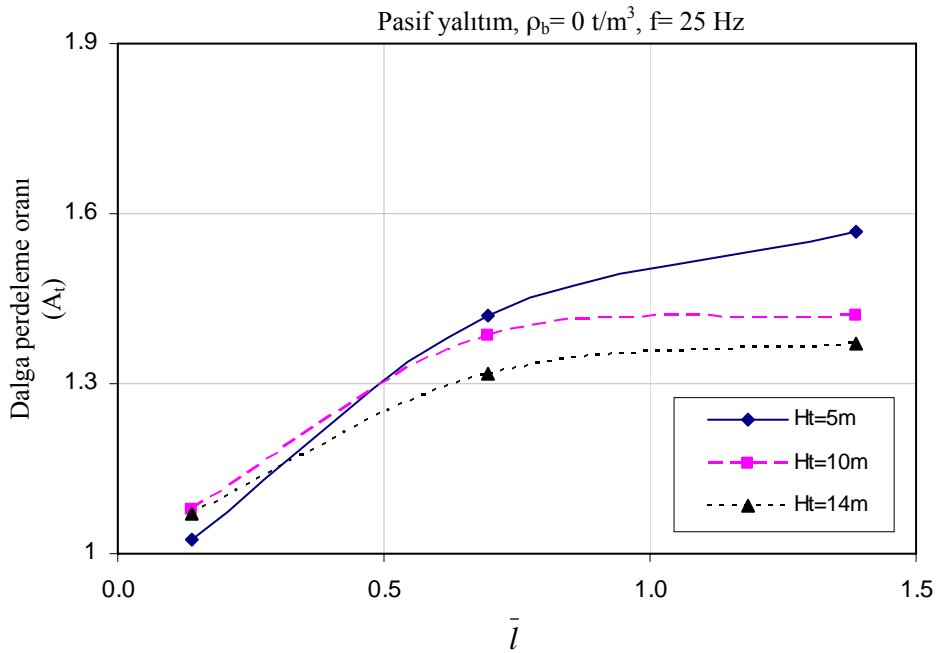
Şekil 5.22. Aktif yalıtımda betonarme bariyerin olması durumu



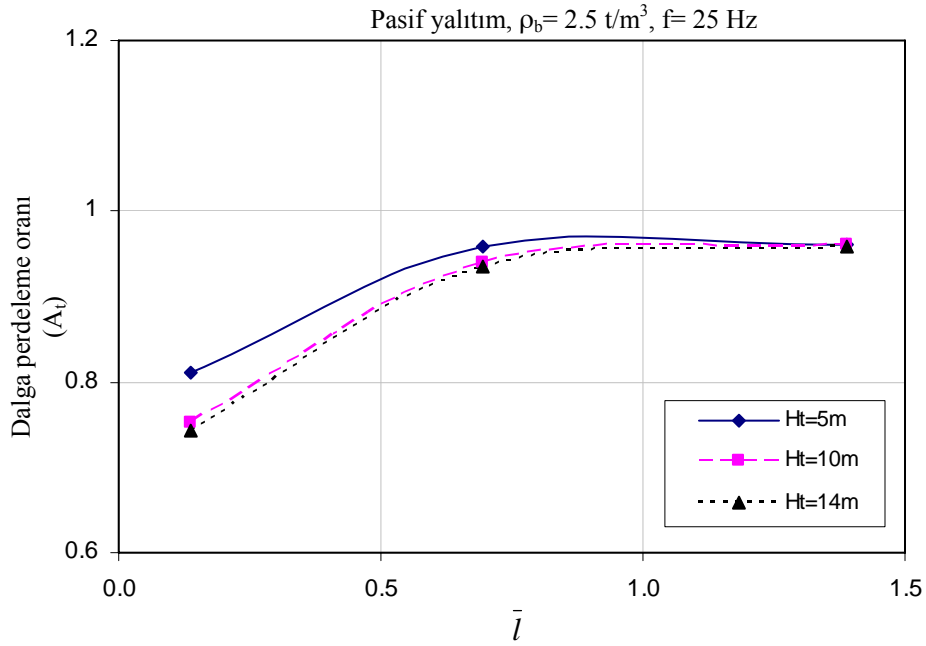
Şekil 5.23. Aktif yalıtımda bariyerin içinin su dolu olması durumu

Pasif yalıtımda (şekil 5.24) bariyerin içinin boş olması durumu için yalıtım aracı farklı durumlarda denenmiş fakat dalga perdeleme oranı $A_t \geq 1$ olduğundan bu çalışmada bariyerin etkisi görülmemiştir. Bununla beraber bariyer derinliği arttırıldıkça bariyerin daha etkili olduğu görülmüştür. Bariyerin korunacak yapıdan

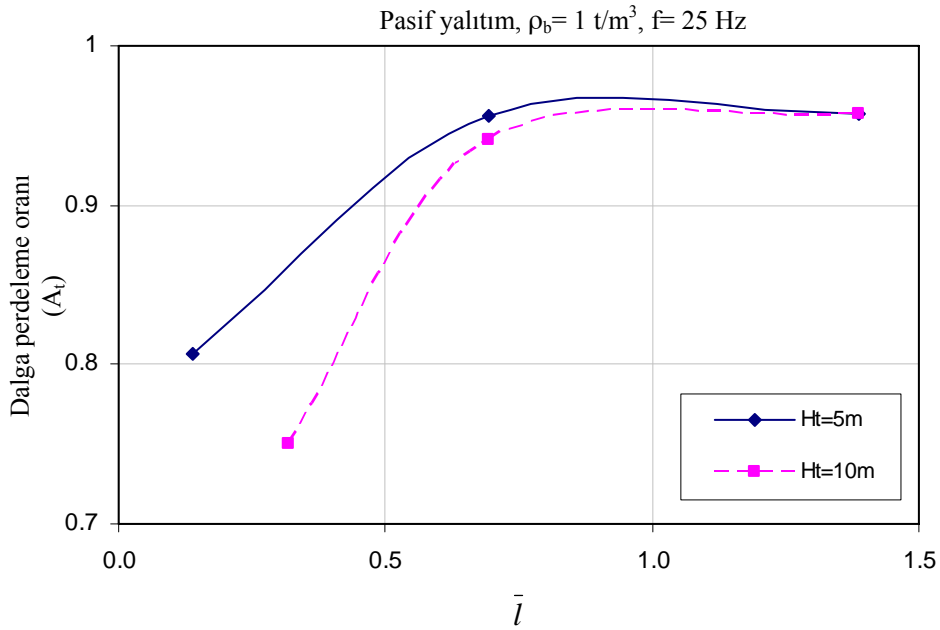
uzaklaştırılması ise dalganın perdelenmesine olan etkisini azaltmaktadır. Şekil 5.25’de bariyerin betonarme bir malzemeden yapılması durumunda analizler yapılmış ve bariyerin; derinliği arttırıldıkça perdeleme etkisinin arttığı, korunacak yapıdan uzaklaştırıldıkça dalgayı perdeleme etkisinin azaldığı görülmüştür. Çalışma sonucunda dalga genliğinde %25’lere varan bir azalma görülmüştür. Yalıtım aracı içinin su dolu olması durumunda da incelenmiş ve yalıtım aracının derinliği arttıkça dalganın etkisini azaltma oranı artmış, korunacak yapıdan uzaklaştırıldıkça etkisinin azaldığı görülmüştür (Şekil 5.26). Yapılan araştırmalar sonucunda pasif yalıtımda bariyerin içinin dolu olmasının (betonarme, içi su dolu) boş olması durumuna göre dalganın perdelenmesinde daha etkili olduğu görülmüştür. Bariyer içinin dolu olduğu bütün durumlar için %5-%25 oranları arasında bir azaltma etkisi görülmüştür. İçi boş durumda herhangi bir yalıtım görülmemiştir.



Şekil 5.24. Pasif yalıtımda bariyerin boş olması durumu



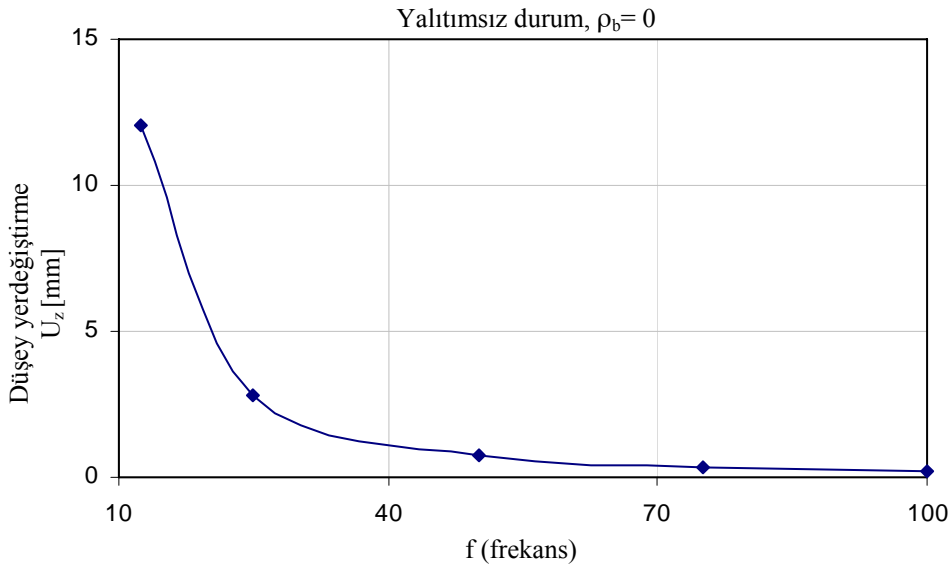
Şekil 5.25. Pasif yalıtımda betonarme bariyerin olması durumu



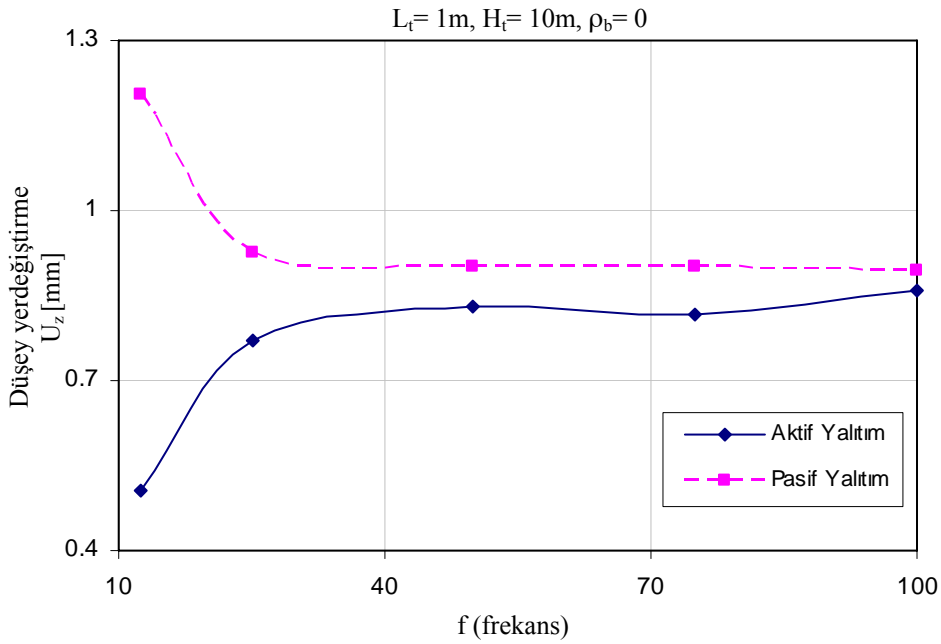
Şekil 5.26. Pasif yalıtımda bariyerin içinin su dolu olması durumu

Dış yükün frekans değerinin yerdeğıştirmeye olan etkisini görmek için yalıtımsız durum, aktif yalıtım ve pasif yalıtım için analizler yapılmıştır. Yalıtımsız durumda frekans değışiminin etkisine bakıldığında frekans değeri arttıkça oluşan

yerdeşiftirmelerin genliklerinin azaldığı görülmüştür (şekil 5.27). Bunun nedeni ise, dış yükün frekansı arttıkça yayılan dalgaların dalga boyu küçülür. Dalga boyu küçüldükçe zemindeki partikül hareketleri de azalır. Zemindeki partikül hareketi azaldıkça yapıdaki yerdeşiftirmeler de azalacaktır. Dalga bariyerinin olduğu durumda da araştırmalar yapılmış ve aktif yalıtımda, bariyer kaynağa yakın olduğu için dalganın bariyerden olan yansımalarıyla ilave etkiler oluşur. Bu nedenle aktif yalıtımda frekans arttıkça yerdeşiftirmeninde arttığı görülmüştür. Pasif yalıtımda ise zemin ortamında yayılan dalgalar ortam tarafından sönümlendiği için dış yükün frekansı arttıkça yerdeşiftirme genliklerinin azaldığı görülmüştür (şekil 5.28).

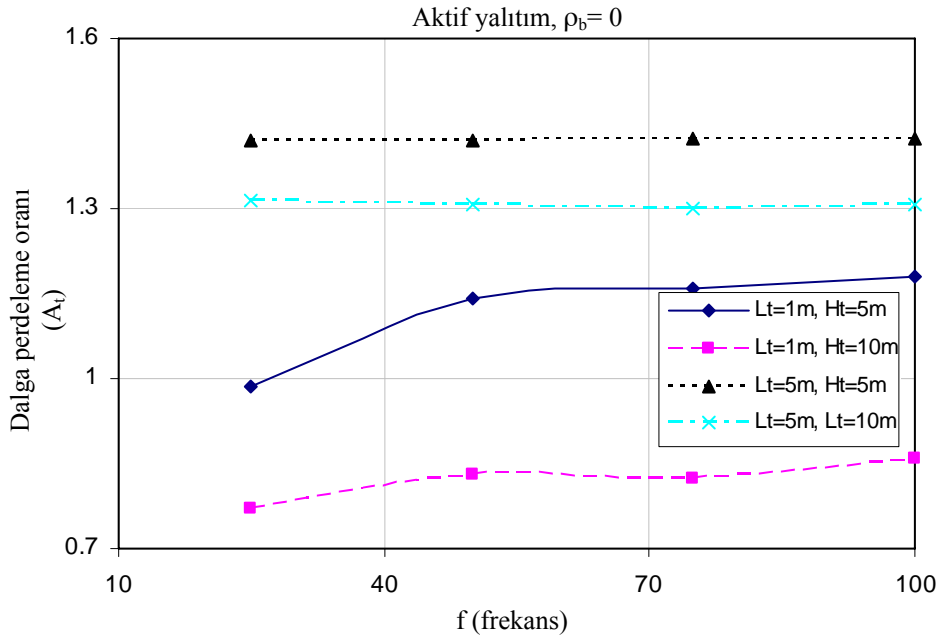


şekil 5.27. Yalıtımsız durumda frekans değişiminin yerdeşiftirmeye etkisi

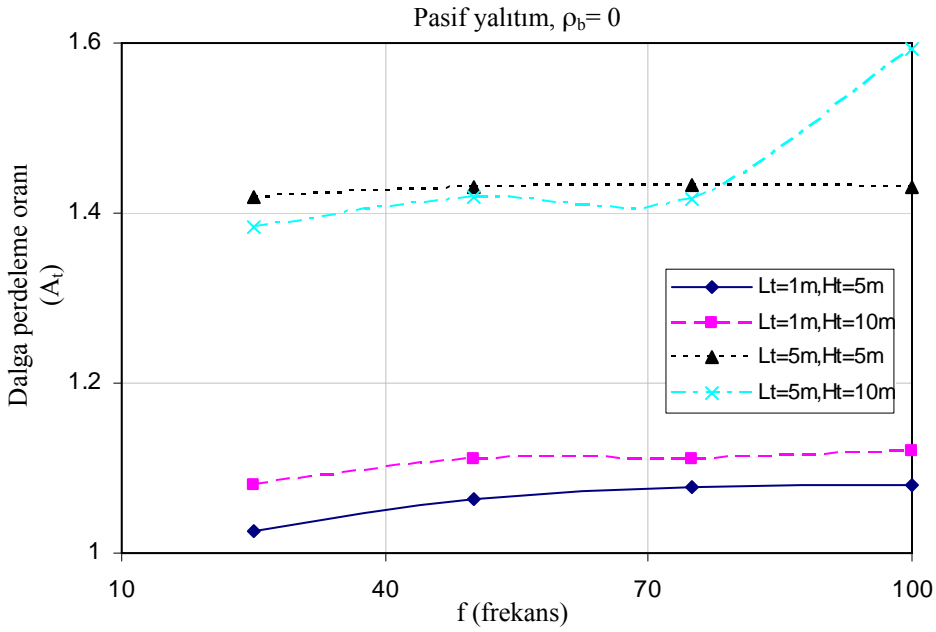


Şekil 5.28. Aktif ve Pasif yalıtımda frekans değişiminin yerdeğiştirmeye etkisi

Aktif ve pasif yalıtım durumlarında farklı bariyer derinliği ve bariyerin değişik konumları için frekans değişiminin dalga perdeleme oranına etkisi incelenmiştir. Aktif yalıtım durumunda yüksek frekans değerleri için bariyerin dalgayı perdeleme etkisinin azaldığı görülmektedir (Şekil 5.29). Pasif yalıtımda da dış yükün frekansı arttıkça bariyerin dalğanın şiddetini azaltma etkisinin azaldığı görülmüştür (Şekil 5.30). Sayısal uygulamaların sonuçları incelendiğinde, aktif ve pasif yalıtım durumları için içi boş dalga kullanılması, yalıtıma katkı sağlamadığı, yayılan dalgaları perdeleyerek titreşim genliklerini azaltmadığı anlaşılmaktadır.



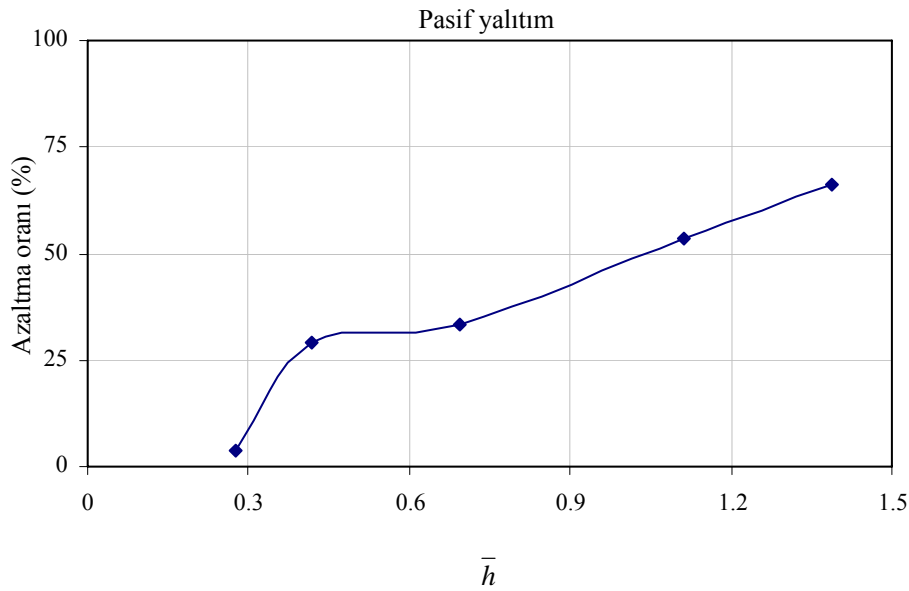
Şekil 5.29. Aktif yalıtımda frekans değişiminin dalganın perdelenmesine etkisi



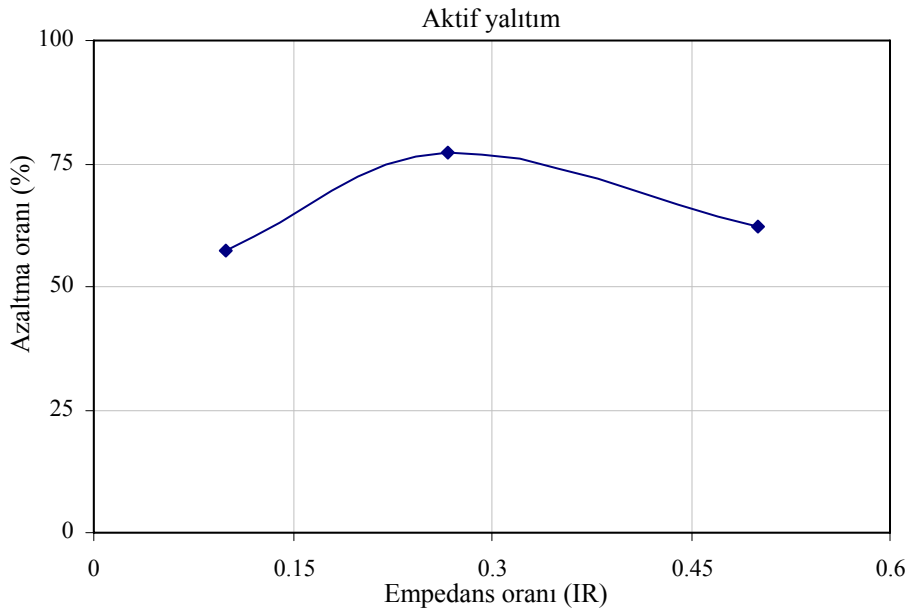
Şekil 5.30. Pasif yalıtımda frekans değişiminin dalganın perdelenmesine etkisi

Şekil 5.31’de görüldüğü gibi bariyer derinliği arttıkça, yani derinliğin dalga boyuna göre değişimi büyüdükçe, dalga bariyerinin titreşimi perdeleme etkisi belirginleşmiş ve buna bağlı olarak düşey yer değiştirmeyi azaltma oranı artmıştır. Yer değiştirmeyi

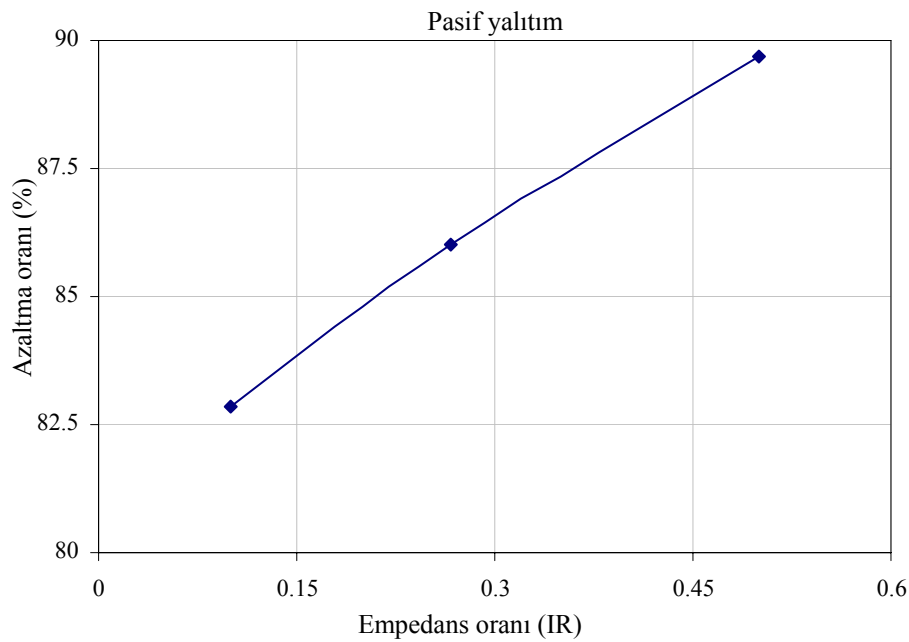
en büyük azaltma etkisi (burada %65 civarında), derinliğin dalga boyunun 1.5 katı olması durumunda görülmektedir. Şekil 5.32’de aktif yalıtım durumuna göre, bariyer rijitliğinin belli bir değere kadar artırılması genliklerin azalmasına sebep olmakta fakat belirli bir yerden sonra artması bu rijit bariyerin düşey titreşime olan etkisini azaltmaktadır. Burada eşik değerden itibaren zeminin rezonansa geçtiği, zeminde yansıma ve kırılmaların olduğu söylenebilir. Pasif yalıtım durumunda bariyerin içine daha yoğun bir malzeme konulması, yani rijitliğinin zemine göre artırılması sonucunda, düşey yer değiştirme genlikleri hesaplandığında büyük oranda azalmalar meydana geldiği görülmüştür (Şekil 5.33).



Şekil 5.31. Pasif yalıtımda bariyer derinliğinin azaltma oranına etkisi

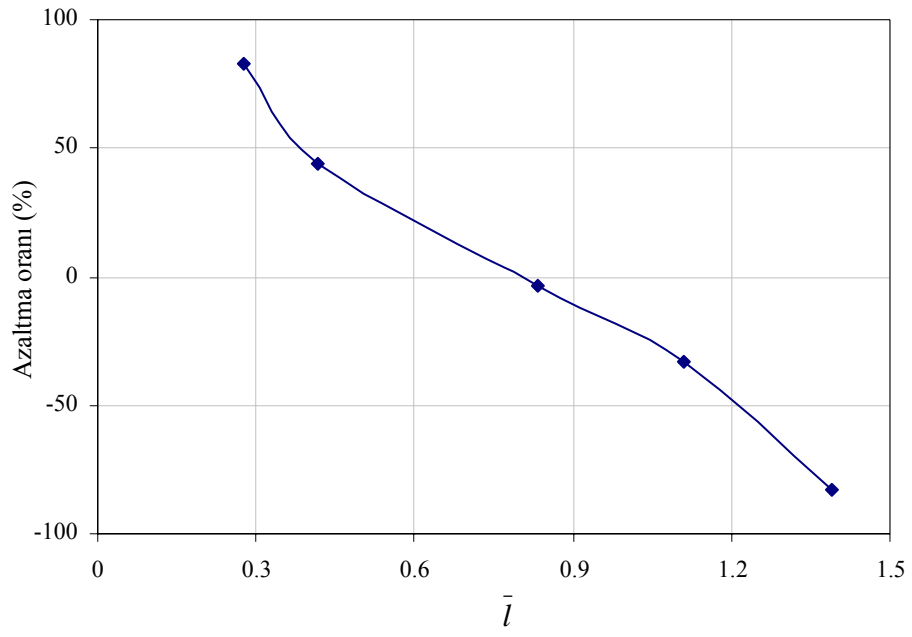


Şekil 5.32. Aktif yalıtımda bariyerin içindeki malzemenin azaltma oranına etkisi

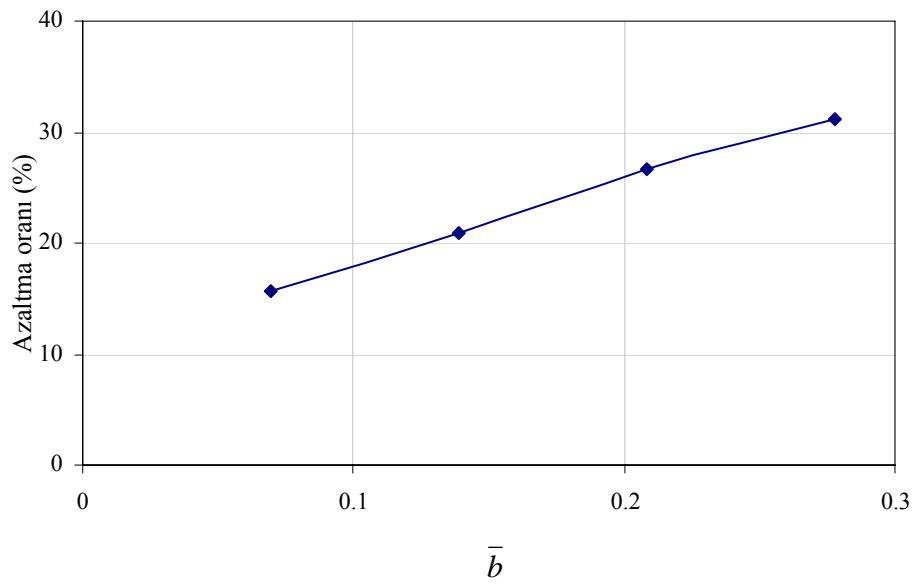


Şekil 5.33. Pasif yalıtımda bariyerin içindeki malzemenin azaltma oranına etkisi

Şekil 5.34'da dalga bariyeri korunacak yapıdan uzaklaştırıldıkça bariyerin titreşimi perdeleme oranı azalmaktadır ve bunun sonucunda da düşey yer değiştirme genliklerini azaltma etkisinin zayıfladığı görülmektedir. Dalga bariyerinin genişliği arttırıldıkça, yani dalga boyuna göre değeri büyütüldükçe, düşey yer değiştirme genliklerinde azalmalar meydana gelmektedir (Şekil 5.35).



Şekil 5.34. Bariyerin yapıdan olan uzaklığının azaltma oranına etkisi



Şekil 5.35. Bariyer genişliğinin azaltma oranına etkisi

BÖLÜM 6. SONUÇLAR VE ÖNERİLER

Bu çalışmada deprem yer hareketi dışındaki hareketlerin etkisi sonucu yapılarda oluşabilecek zararlı etkileri ve titreşimleri azaltabilmek için kullanılabilecek bir düşey dalga bariyeri modeli araştırılmıştır.

Yumuşak zeminlerde inşa edilen önemli yapıları insan yapımı 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 sonlu elemanlar yöntemiyle geliştirilen bir bilgisayar modeli sunulmuştur. Bu bilgisayar modeli yardımıyla farklı sismik dalga bariyeri modelleri için sistematik ve ayrıntılı parametrik araştırmalar yapılarak sayısal sonuçlar elde edilmiş ve farklı özellikteki dalga bariyerlerinin titreşim azaltıcı etkileri gösterilmiştir.

Kurulan matematik modelde 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 grafikler halinde karşılaştırmalı olarak sunulmuştur.

Elde edilen sonuçlar aşağıda verilmiştir:

- a. Aktif yalıtım durumunda; derinlik arttırıldıkça, bariyer dalğanın genliğini azaltıcı etki göstermiştir. Aynı zamanda bariyer kaynağa yaklaştırıldıkça kaynaktan yayılan dalgaların şiddetini azaltmıştır. Bariyer yoğunluğunun etkisi incelendiğinde, bariyer, yoğunluğu arttırıldıkça daha etkili olmuştur. 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. Bariyerin zemine göre rijitliği incelendiğinde bir eşik değere kadar etkili olmuş, daha sonra etkisi azalmıştır. Bu eşik değerde zemin ortamında yansımaların ve kırılmaların etkisinin arttığı, bir rezonans etkisinin oluştuğu düşünülmüştür.
- b. Pasif yalıtım durumunda; derinlik arttırıldıkça bariyer dalğanın genliğini azaltıcı etki göstermiştir. Aynı zamanda dalga bariyeri korunacak yapıya yaklaştırıldıkça, kaynaktan yayılan dalgaların yapıya etkili bir şekilde ulaşmasını engellemiştir. Bariyer yoğunluğunun etkisi incelendiğinde, bariyer, yoğunluğu arttırıldıkça daha etkili olmuştur. 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. Bariyerin zemine göre rijitliği incelendiğinde bariyer yoğunluğu arttırıldıkça bariyerin dalgayı perdeleme etkisi de artmıştır.
- c. Aktif ve pasif yalıtım durumları karşılaştırıldığında bariyerin yoğun malzemededen yapılması durumunda pasif yalıtımda dalga bariyerinin daha etkili olduğu ve yapıyı dalğanın etkisinden önemli ölçüde koruduğu görülmüştür.

Yapılan nümerik analiz sonucunda elde edilen sonuçların tutarlılığını ve gerçekçiliğini kontrol etmek için deneysel olarak da çalışmalar yapılmalı, bu iki çalışmanın sonuçları karşılaştırılmalıdır. Böylece deneysel çalışma sonucunda elde edilen veriler, kurulan matematik modelden elde edilen verilerle örtüşüyorsa yapılan modelleme çalışmasının uygun olduğu sonucu ortaya çıkar. Eğer değilse, bu veriler ışığında kurulan model geliştirilerek deneysel sonuçlar yakalanmaya çalışılmalıdır. Uygun bir model kurulursa daha sonra yapılacak bütün çalışmalarda büyük zaman

alan ve aynı zamanda büyük bütçeler gerektiren deneysel çalışmalar yerine gerçekçi sonuçlar veren matematik model kullanılabilir.

KAYNAKLAR

- [1] Aydınoğlu M.N., Yapı Analizi ve Tasarımı süresince Statik ve Dinamik Yapı-Zemin Etkileşimi, Zemin Mekaniği ve Temel Mühendisliği 5. Ulusal Kongresi, ODTÜ, Ankara, 1994
- [2] Çelebi E., Gündüz 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
- [3] Klein R., Antest H., Honedect D.L., Efficient 3D modelling of vibration isolation by open trenches, Computers and Structures, 809-817, 1997
- [4] Chouw N., Pflanz G., Reduction of structural vibrations due to moving load, Wave2000, 251-268, Chouw&Schmid, Balkema, Rotterdam
- [5] Tahmeed M.Al-Hussaini, Shahid Ahmad, Lames M.Baker, Numerical and experimental studies on vibration screening by open and in-filled trench barriers, Wave2000, 241-250, Chouw&Schmid, Balkema, Rotterdam
- [6] 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
- [7] L., Andersen, S.R.K., Nielsen, Reduction of ground vibration by means of barriers or soil improvement along a railway track, Soil Dynamics and Earthquake Engineering 25, 2005, 701–716
- [8] 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
- [9] Hildebrand, R., Effect of soil stabilization on audible band railway ground vibration, Soil Dynamics and Earthquake Engineering 24, 2004, 411–424
- [10] Hunaidi, O., Traffic Vibrations in Buildings, National Research, Council of Canada, June 2000, ISSN 1206-1220

- [11] M. Hesham El Naggar and Abdul Ghafar Chehab, Vibration barriers for shock-producing equipment, *Can. Geotech. J.* 42: 297–306 (2005)
- [12] Adam M., Estorff O.V., Reduction of train-induced building vibrations by using open and filled trenches, *Computers and Structures*, 83, 11-24, 2005
- [13] Lysemer, J., Ostadan, F., Tabatabaie, M., Vahdani, S. and Tajirian, F., 1988a. “SASSI – A system for analysis of soil-structure interaction.”, Theoretical manual.
- [14] Lysemer, J., Ostadan, F., Tabatabaie, M., Vahdani, S. and Tajirian, F., 1988b. “SASSI – A system for analysis of soil-structure interaction.”, User’s manual.
- [15] Küyük, H. S. ve Çelebi, E., Titreşim azaltıcı dalga bariyerlerinin sonlu elemanlar yöntemi ile simülasyonu, *Kocaeli Deprem Sempozyumu*, 1061-1066, Kocaeli, 23-25 Mart , 2005
- [16] Küyük, S., Sümer, Y., Kırtel, O., Vural, İ., Çelebi E., ve Fırat S., Sismik bariyer modellerinin tabakalı zemin ortamındaki dalga yayılışına etkileri, İMO Teknik Kongre, Antalya Yöresinin İnşaat Mühendisliği Sorunları Kongresi, Antalya, 22-24 Eylül, 2005
- [17] Kırtel O., Çelebi E., Vural İ., Fırat S., Sismik bariyer modellerinin elastik ortamda dalga yayılışına etkileri, *Yedinci Uluslararası İnşaat Mühendisliğinde Gelişmeler Kongresi*, İstanbul, Türkiye, 11-13 Ekim 2006
- [18] Kırtel O., Çelebi E., Vural İ., Fırat S., Kuvvetli yer hareketlerinin azaltılması için geliştirilen bir dalga bariyeri modeli, *Zemin Mekaniği ve Temel Mühendisliği 11. Ulusal Kongresi*, Trabzon, Türkiye, 7-8 Eylül 2006
- [19] Forchap, E. and Verbic, B., Wave propagation and reduction of foundation vibrations, *Berg-Verlag GmbH*, pp. 165-178, Bochum, 1994
- [20] Kramer, S. L., *Geoteknik deprem mühendisliği*, Gazi Kitabevi, 2003
- [21] Celep Z., Kumbasar N., *Deprem Mühendisliğine Giriş ve Depreme Dayanıklı Yapı Tasarımı*, İstanbul, 2004
- [22] DIN 4150 Teil 3, *Erschütterung im Bauwesen – Einwirkungen auf baulische Anlagen*, Beuth Verlag GmbH, Berlin, 1986
- [23] Çelebi E., *Planda Simetrik Olmayan Yapıların Zeminle Dinamik Etkileşimi*, TDV/TR 041-70, İstanbul, Temmuz, 2001

- [24] Gürsoy, Ş., Durmuş, A., Betonarme İstinat Duvarlarının Zemin Etkileşimini de Dikkate Alarak Çeşitli Yöntemlerle Karşılaştırmalı Deprem Hesabı, Zemin Mekaniği ve Temel Mühendisliği 9. Ulusal Kongresi., Bildiriler Kitabı, Sayfa 228-237, Anadolu Üniversitesi, Eskişehir, 21-22 Ekim, 2002
- [25] Çelebi E., Fırat S., Çankaya İ., Dikdörtgen Rijit Temellerin Dinamik Empedans fonksiyonları, İMO Teknik Dergi, Yazı 252, 2006
- [26] Çelebi E., Hareket Eden Katar Yüklerinin Meydana Getirdiği Kuvvetli Zemin Titreşimlerinin İnce Tabaka/Esnek Hacim Yöntemiyle Araştırılması, Zemin Mekaniği ve Temel Mühendisliği 11. Ulusal Kongresi, Trabzon, Türkiye, 7-8 Eylül 2006
- [27] Ay, Z., Süleyman Demirel Üniversitesi mühendislik mimarlık fakültesi inşaat mühendisliği bölümü, Isparta 2002
- [28] Önalp, A., Geoteknik Bilgisi, Trabzon, 1982

ÖZGEÇMİŞ

Osman KIRTEL, 18.11.1984 de Elazığ' da doğdu. İlkokulu Harput'ta, orta ve lise eğitimini Elazığ'da tamamladı. 2000 yılında Elazığ Mehmet Akif Ersoy Lisesinden mezun oldu. 2000 yılında başladığı Sakarya Üniversitesi Mühendislik Fakültesi İnşaat Mühendisliği bölümünü 2004 yılında bitirdi. Aynı yıl Sakarya Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, İnşaat Mühendisliği ABD, Yapı EBD' da yüksek lisansa başladı. 13.12.2004–31.05.2005 tarihleri arasında Beton Yapı Denetim Şirketinde Yardımcı Kontrol Elemanı olarak çalıştı. 2005 yılında Sakarya Üniversitesi Mühendislik Fakültesi İnşaat Mühendisliği bölümün' de Araştırma Görevlisi olarak göreve başladı. Halen Sakarya Üniversitesi'ndeki görevine devam etmektedir.