

**T.C.
SAKARYA ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

**TABAKALI ZEMİNDE OLUŞTURULAN YAPAY
KAYANIN DALGA YAYILIŞINA ETKİLERİ**

YÜKSEK LİSANS TEZİ

İsa VURAL

Enstitü Anabilim Dalı : YAPI EĞİTİMİ

Tez Danışmanı : Doç. Dr. Seyhan FIRAT

Haziran 2007

T.C.
SAKARYA ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

**TABAKALI ZEMİNDE OLUŞTURULAN YAPAY
KAYANIN DALGA YAYILIŞINA ETKİLERİ**

YÜKSEK LİSANS TEZİ

İsa VURAL

Enstitü Anabilim Dalı : YAPI EĞİTİMİ

Bu tez 20 / 06 / 2007 tarihinde aşağıdaki jüri tarafından Oybirliği ile kabul edilmiştir.

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

**Yrd. Doç. Dr. İbrahim YÜKSEL
Üye**

**Yrd. Doç. Dr. Erkan ÇELEBİ
Üye**

ÖNSÖZ

Batı Avrupa'nın gelişmiş kentlerinde ve yakın gelecekte ülkemizde, demiryolu ulaşımında hem hız, hem de ağır yük ve yolcu taşımacılığındaki artışla birlikte bunların çevreye verdiği gürültü ve konfor bozucu titreşimler tartışılmaktadır. Bu nedenle çevreyi titreşim kaynaklarının belirtilen zararlı etkilerinden korumak için en uygun yalıtım aracının belirlenmesi ve zemin ortamında dalga yayılımının iyi anlaşılmasının gerekliliği ortaya çıkmıştır. Kuvvetli yer hareketlerinin neden olduğu büyük genlikli titreşimleri önleyebilmek için korunacak yapı ile titreşim kaynağı arasına uygun bir dalga bariyerinin yerleştirilmesi muhtemel bir çözüm olarak sunulabilir.

Bu çalışmada, bana sağladığı desteklerinden dolayı danışmanım Sayın Doç Dr. Seyhan FIRAT'a, idari anlayış ve desteklerinden Yapı eğitimi Bölüm Başkanı Sayın Prof. Dr. Ahmet Celal APAY'a, değerleri görüşlerini benden esirgemeyen Sayın Yrd. Doç. Dr. Erkan ÇELEBİ, Yrd. Doç. Dr. Günay BEYHAN, Yrd. Doç. Dr. İlyas ÇANKAYA'ya, değerli arkadaşım Arş. Gör. Tahir AKGÜL'e, bölüm hocalarımıza ve ayrıca yüksek lisans aşamasının tamamında maddi ve manevi bütün desteklerinden dolayı aileme teşekkürü bir borç bilirim.

Bu Yüksek Lisans Tez çalışması Sakarya Üniversitesi Bilimsel Araştırma Projeleri Komisyonu tarafından desteklenmiştir.

İÇİNDEKİLER

ÖNSÖZ	ii
İÇİNDEKİLER	iii
SİMGELER VE KISALTMALAR LİSTESİ.....	v
ŞEKİLLER LİSTESİ	vi
TABLolar LİSTESİ.....	ix
ÖZET.....	x
SUMMARY.....	xi
BÖLÜM 1.	
GİRİŞ.....	1
1.1. Problemin Tanımı	1
1.2. İlgili Çalışmalar	3
1.3. Çalışmanın Amaç ve Kapsamı.....	6
BÖLÜM 2.	
ZEMİNLERDE DALGA YAYILIMI.....	8
2.1. Giriş.....	8
2.2. Yarı Sonsuz Ortamda Dalga Yayılımı.....	12
2.2.1. Rayleigh yüzey dalgası.....	12
2.2.2. Love yüzey dalgası.....	14
2.2.3. Yüzey dalgalarının yayılımı.....	14
2.3. Bir Boyutlu Dalga Yayılması.....	16
2.3.1. Sonsuz uzun bir çubukta boyuna dalgalar.....	16
BÖLÜM 3.	
YAPI-ZEMİN SİSTEMLERİNİN ÇÖZÜMLENMESİ	19

3.1. Altsistem Yaklaşımı	20
3.2. Doğrudan Çözüm Yaklaşımı	20
3.3. Zemin Ortamının Modellenme Şekilleri.....	21
3.3.1. Sonlu elemanlar kullanılarak zemin ortamının idealleştirilmesi	22
3.3.1.1. Sınır elemanlar yöntemiyle sınır şartlarının belirlenmesi	24
3.3.1.2. Viskoz sınır şartlarıyla modelleme	25
BÖLÜM 4.	
ARAZİ ÇALIŞMALARI	27
4.1. Sismik Deneyler	27
4.2. Laboratuar Deneyleri	31
BÖLÜM 5.	
NÜMERİK ANALİZ ÇALIŞMALARI	34
5.1. Sonlu Elemanlar Yöntemi.....	34
5.1.1. Genel olarak modelleme.....	37
5.1.2. Ayrıklaştırmada dikkat edilmesi gerekli hususlar	38
5.1.3. Sonlu elemanlar metodunda çalışma yöntemi	40
5.2. Sayısal Uygulama Çalışmaları	40
BÖLÜM 6.	
SONUÇLAR VE ÖNERİLER	62
KAYNAKLAR.....	64
ÖZGEÇMİŞ.....	67

SİMGELER VE KISALTMALAR LİSTESİ

ρ	: Yoğunluk
c_p	: P dalgası hızı
c_s	: S dalgası hızı
c_R	: Rayleigh dalgası hızı
ν	: Poisson oranı
λ	: Dalga boyu
A	: Kesit alanı
σ	: Gerilme
u	: Yerdeğiştirme
M	: Sıkışma modülü
ε	: Birim deformasyon
c	: Efektif sönüm
E	: Elastisite modülü
SEY	: Sonlu elemanlar yöntemi
SEM	: Sonlu elemanlar metodu

ŞEKİLLER LİSTESİ

Şekil 1.1.	Titreşim kaynağından dalgaların yayılması ve bir yalıtım aracıyla perdelenmesi.....	2
Şekil 2.1.	Cisim dalgalarının oluşturduğu deformasyonlar a) P dalgası, b) S dalgası	8
Şekil 2.2.	Cisim dalgaları hızlarının yoğunlukla değişimi	10
Şekil 2.3.	Yüzey dalgalarının oluşturduğu deformasyonlar a) Rayleigh dalgası; b) Love dalgası	11
Şekil 2.4.	Yerküre ve iç yapısı.....	12
Şekil 2.5.	Love dalgalarında partikül yerdeğiştirme genliğinin derinlikle değişimi	14
Şekil 2.6.	Rayleigh yüzey dalgalarının yatay ve düşey hareketi	15
Şekil 2.7.	Bir boyutlu dalga yayılması için sıkıştırılmış, sonsuz çubuk.....	16
Şekil 3.1.	Doğrudan çözüm yaklaşımında kullanılan yapı-zemin sistem	21
Şekil 3.2.	Zeminin eşdeğer statik yaylar ve sönümleyicilerle modellenmesi.....	22
Şekil 3.3.	Yapı-zemin etkileşimi için değişik modeller	22
Şekil 3.4.	Sınır elemanlar yöntemiyle zemin sınır şartlarının belirlenmesi ...	24
Şekil 3.5.	Viskoz elemanlarla zemin sınırlarının idealleştirilmesi	25
Şekil 4.1.	Tabakalı zeminde dalga yayılımı ve yansıması	28
Şekil 4.2.	Sismik kırılma deneyi kayıt cihazı	29
Şekil 4.3.	Sismik kırılma deneyi yük uygulama noktası	29
Şekil 4.4.	Sismik kırılma deneyi jeofon uygulaması	30
Şekil 4.5.	Sismik kırılma deneyi enine jeofon uygulaması	31
Şekil 4.6.	Zemin laboratuvar deneyleri için sondaj çalışması	31
Şekil 4.7.	Zemin laboratuvar deneyleri için sondaj çalışması	32

Şekil 5.1.	Bir sonlu eleman modelinde düğüm noktaları ve elemanlar	35
Şekil 5.2.	Çalışma aşamalarında uygulanan bir sonlu eleman modeli	36
Şekil 5.3.	Bir sonlu eleman	37
Şekil 5.4.	Yamuk modeller için açı oranları	37
Şekil 5.5.	Matematik model boyutlandırma aşamaları	41
Şekil 5.6.	Çalışmada uygulanan matematik model	44
Şekil 5.7.	Yalıtımsız arazi modeli	45
Şekil 5.8.	Yalıtımsız durum matematik model	45
Şekil 5.9.	Aktif yalıtım arazi modeli	46
Şekil 5.10.	Aktif yalıtımlı matematik model	46
Şekil 5.11.	Pasif yalıtım arazi modeli	47
Şekil 5.12.	Pasif yalıtımlı matematik model	47
Şekil 5.13.	Pasif yalıtım durumunda B_a 'ya bağlı A_t 'nin değişimi ($f=25$ Hz) ..	49
Şekil 5.14.	Pasif yalıtım durumunda B_a 'ya bağlı A_t 'nin değişimi ($f=25$)	49
Şekil 5.15.	Pasif yalıtım durumunda H_a 'ya bağlı A_t 'nin değişimi ($f=25$ Hz) .	50
Şekil 5.16.	Pasif yalıtım durumunda B_a 'ya bağlı A_t 'nin değişimi ($f=25$ Hz) ..	50
Şekil 5.17.	Pasif yalıtım durumunda yapay kayanın yoğunluğuna bağlı A_t 'nin değişimi ($f=25$ Hz)	51
Şekil 5.18.	Pasif yalıtım durumunda A_t 'nin değişimi ($f=25$ Hz)	51
Şekil 5.19.	Aktif yalıtım durumunda B_a 'ya bağlı A_t 'nin değişimi ($f=25$ Hz) .	52
Şekil 5.20.	Aktif yalıtım durumunda H_a 'ya bağlı A_t 'nin değişimi ($f=25$ Hz) .	52
Şekil 5.21.	Aktif yalıtım durumunda B_a 'ya bağlı A_t 'nin değişimi ($f=25$ Hz) .	53
Şekil 5.22.	Aktif yalıtım durumunda H_a 'ya bağlı A_t 'nin değişimi ($f=25$ Hz) .	53
Şekil 5.23.	Aktif yalıtım durumunda H_a 'ya bağlı A_t 'nin değişimi ($f=25$ Hz) .	54
Şekil 5.24.	Aktif yalıtım durumunda A_t 'nin değişimi ($f=25$ Hz)	54
Şekil 5.25.	B_a 'ya bağlı A_t 'nin değişiminin yalıtım türlerine göre karşılaştırılması ($f=25$ Hz)	55
Şekil 5.26.	B_a ya bağlı A_t 'nin değişiminin yalıtım türlerine göre karşılaştırılması ($f=50$ Hz)	55
Şekil 5.27.	B_a 'ya bağlı A_t 'nin değişiminin yalıtım türlerine göre karşılaştırılması ($f=100$ Hz)	56
Şekil 5.28.	H_a 'ya bağlı A_t 'nin değişiminin yalıtım türlerine göre karşılaştırılması ($f=25$ Hz)	56

Şekil 5.29.	H_a ya bağlı A_t 'nin değişiminin yalıtım türlerine göre karşılaştırılması ($f=50$ Hz)	57
Şekil 5.30.	H_a 'ya bağlı A_t 'nin değişiminin yalıtım türlerine göre karşılaştırılması ($f=25$ Hz)	57
Şekil 5.31.	Aktif yalıtım durumunda yer değiştirmenin frekansa bağlı değişimi	58
Şekil 5.32.	Aktif yalıtım durumunda yer değiştirmenin uzaklığa bağlı değişimi	59
Şekil 5.33.	Tek tabakalı zeminde yapay kayanın boyu L_a ve kalınlığı B_a 'ya bağlı A_t 'nin değişimi	59
Şekil 5.34.	Perdeleme oranının yapay anakayanın kalınlığı B_a 'ya bağlı değişimi	60
Şekil 5.35.	Tek tabakalı zeminde yapay kayanın boyu ve derinliğine bağlı A_t 'nin değişimi	60
Şekil 5.36.	Farklı zemin formasyonlarında empedans oranına bağlı A_t 'nin değişimi	61
Şekil 5.37.	Farklı zemin formasyonlarında Yoğunluk - A_t değişimi	61

TABLULAR LİSTESİ

Tablo 4.1.	Zemin ve kayaçta sismik dalgaların hızı	30
Tablo 4.2	Sismik deney sonuçları	31
Tablo 4.3	Laboratuar deney sonuçları	33
Tablo 5.1.	Yapay tabankaya boyut hesabı için yapılan modelleme çalışmaları	41

ÖZET

Anahtar kelimeler: Zeminlerde dalga yayılımı, aktif yalıtım, pasif yalıtım, sonlu elemanlar metodu, yapay taban kaya

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

Bu araştırma safhalarında öncelikle sistemin bilgisayar modeli üzerinde irdeleme yapılmış, sonsuz zemin bölgesinden çıkartılan sonlu zemin modelinin gerçek durumu temsil edebilmesi için, yatayda uygun sınır koşulları belirlenerek sistemin bilgisayar ortamında matematik modeli ilgili sismik dalga bariyerleri de hesaba katılarak geliştirilmiştir. Ayrıca bu çalışmada temel plağının dinamik davranışı geliştirilen nümerik çözüm yöntemi ile sistematik bir parametrik çalışma (titreşim kaynağının frekans bileşenlerine, yapay taban kayanın geometrik şekli, boyutlarına ve malzeme özelliklerine, gömülme derinliğine, zeminin kayma modülüne, Poisson oranı ve malzeme sönümüne bağlı parametrelerin geliştirilmesi) yürütülerek incelenmiştir.

EFFECT OF ARTIFICIAL BEDROCK FOR WAVE PROPOGATION IN LAYERED SOIL

SUMMARY

Key Words: Wave propagation in soil, active isolation, passive isolation, finite element method, artificial bedrock

Strong ground motion may occur in soil and structure which is constructed on the soil under dynamic loads. These vibrations can cause damage on the structures and people life quality and comfort. Therefore wave propagation in soil may be reduced by constructing artificial bedrock under the vibration source or structures. In this research 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).

To reach our objectives the model is designed by using Finite Element Methods for numerical analysis. Half space model is derived from infinitive soil area to present real situation by determining horizontal boundary conditions in computer to obtain mathematical model related to seismic wave barriers. Also the behavior of foundations under dynamic loads is investigated in terms of number of key parameters such as frequency of wave source, geometrical shape of artificial bedrock, properties of artificial base rock, depth of embedment, shear modulus of soil, Poisson ratio and material damping ratio.

BÖLÜM 1. GİRİŞ

1.1. Problemin Tanımı

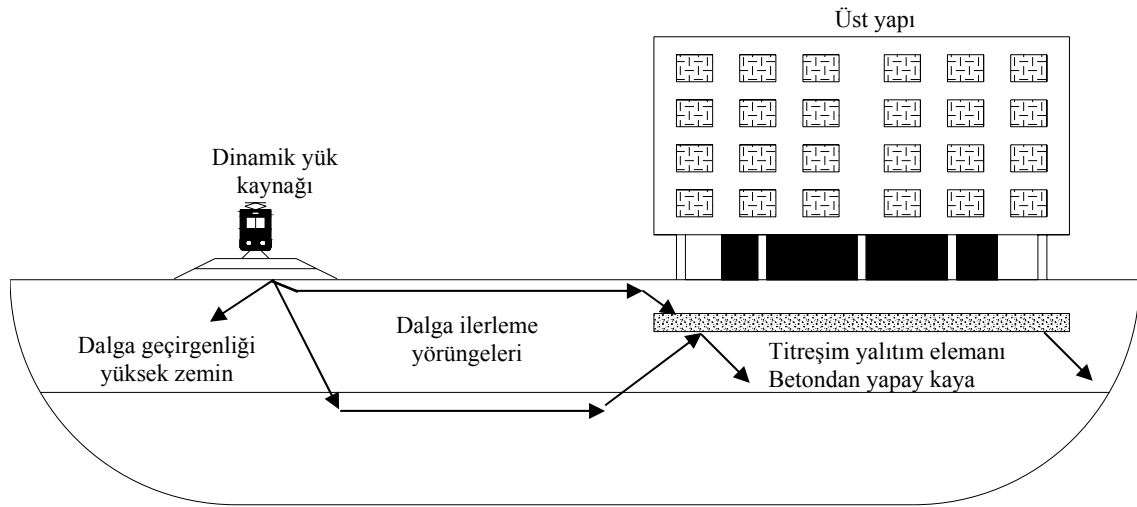
Hızlı ve yoğun trafik yükleri, ağır makine temelleri, masif inşaat aktiviteleri ve patlamalar gibi deprem yer hareketi dışındaki yüksek frekansta insan yapısı titreşim kaynaklarının oluşturduğu etkiler bütün dünyada son yılların en önemli problemlerindendir. Bu titreşim kaynaklarının oluşturduğu dalgaların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

Son yıllarda ülkemizde ulaşım problemlerinin artması, mesafelerin uzaması ve ulaşım zamanlarının artması insanların zamanlarını ekonomik kullanmalarına engel 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 ve en uygun yalıtım aracının belirlenmesi için zemin ortamında dalga yayılışının iyi anlaşılmasını gerektirir.

Kuvvetli yer hareketlerinin neden olduğu büyük genlikli titreşimleri önleyebilmek için korunacak yapı altına veya dalga kaynağının altına bir yapay taban kaya 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 önleyebilir. Dalga yalıtım araçlarının titreşim kaynağının altına yerleştirilmesi aktif yalıtım yapıldığını, titreşim kaynağının uzağında korunacak yapının altında yer alması ise pasif yalıtım yapıldığını göstermektedir. Aktif ve pasif yalıtımda kullanılacak dalga bariyerinin geometrik özelliklerinin tespiti ve farklı zemin formasyonlarında hangi derinliğe yerleştirileceği 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 yararlanılarak bilgisayar ortamında geliştirilmiştir. Detaylı parametrik araştırmalar neticesinde elde edilen sonuçlar farklı titreşim yalıtım modelleri için karşılaştırılmalı olarak verilmiştir.



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

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 yöntemlerin 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 başlanmasıyla, araştırmalar basit analitik çözümlerden çok bilinmeyenli sayısal modellemelere doğru kaymıştır. Sismolojide, cisim ve yüzey dalgalarının yayılımına ait çalışmalarda, sonlu elemanlar yaygın olarak kullanılmıştır [1]. 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 yansiyacaktır. Bu farklılıklarda yapılan analizlerde ve çözümlerinde gerçekçi olmayan sonuçlar oluşmasına neden olacaktır.

Yapı-zemin etkileşiminde zemin bölgesinin idealleştirilmesi için kullanılan iki temel yaklaşım, “Doğrudan Çözüm Yaklaşımı (Direkt Metot)” ile “Alt sistem Yaklaşımı”dır. Aydınoglu [2] Doğrudan Çözüm Yaklaşımında, zemin ortamının da üstyapı taşıyıcı sistem gibi SEY ile ayrıştırılmasını ve oluşturulan yapı-zemin ortak sisteminin, tanımlanan statik veya dinamik dış etkiler altında doğrudan analizini öngörür. Alt sistem Yaklaşımında ise yapı ve zemin iki ayrı sistem olarak düşünülür ve her iki sistem için ayrı ayrı yazılan denge denklemleri, daha sonra yapı-

zemin arakesitindeki geometrik uygunluk ve denge koşulları dikkate alınarak birleştirilir. Bu durumda zemin ortamı sadece yapı-zemin arakesitinde, sınırlı sayıdaki ayırık düğüm noktalarında temsil edilen bir alt sistem olarak idealleştirilir.

Literatürde yapı-zemin problemlerinin incelenmesinde birçok araştırma yapılmıştır. Çelebi ve Gündüz 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 kullanılmış ve öncelikle çok büyük bir zemin bölgesi alınmış, daha sonra yatay sınırları basit mesnetli olan bir zemin bölgesi alınmış ve sonucunda ise radyasyon sönümü dikkate alınarak yatay sınırlar eşdeğer statik yaylar ve sönümleyiciler (viskoz sınır şartları) kullanılarak zemin bölgesi üç farklı şekilde modellenmiştir. Yapılan bu modellerde kayma dalga hızı, periyod 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 [3].

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 SEY üst yapının ve zemin bölgesinin modellenmesinde, Sınır Elemanlar Yöntemini ise yarı sonsuz zemin bölgesinin sınırlarının modellenmesinde kullanmışlardır.

Yapı-zemin dinamik etkileşimi problemlerinin çözümlenmesindeki gelişmelere paralel olarak insanlar tarafından oluşturulan hasar verici veya yıkıcı titreşimlerin engellenmesi ve yapılara zarar vermemesi için titreşim kaynağı ile korunacak yapı arasına bir dalga bariyeri konulması düşünülmüştür. Yapı-zemin etkileşimi dikkate alınarak uygun dalga bariyerinin belirlenmesi için bazı araştırmacılar bir takım çalışmalar yapmıştır. Klein ve diğ. çalışmalarında Sınır Elemanlar Yöntemini kullanmış ve titreşimlerin azaltılması için farklı çözüm yöntemlerini incelemiştir [4]. Rayleigh dalgalarını da inceleyerek farklı yük etkilerinde bu dalgaların nasıl bir davranış gösterdiklerini araştırmışlardır. Chouw ve Pflanz Sınır Elemanlar Yöntemini kullanarak zemin-bariyer modelini oluşturmuşlar ve farklı kayma dalga

hızları için düşey dalga bariyeri ile yatay dalga bariyerini etkisini karşılaştırmalı olarak incelemişlerdir [5]. Al-Hussaini 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 etkisini incelemişlerdir [6]. Bunlara ek olarak bazı analitik araştırmalar yapılmış ve bazı formülasyonlar elde edilmiştir. Bu yöntemlerin etkinliği ve uygulanabilirliği dalgaların karakterlerine ve zemin koşullarına bağlıdır [7]. Adam ve Estorff açık ve içi dolu bariyerler kullanarak tren, trafik aktiviteleri ve ağır makine hareketleri sonucu zeminlerde oluşan titreşimlerin yapılarada oluşturacakları etkilerin azaltılmasını amaçlamışlardır [8]. Daha önce yapılan bazı deneysel çalışmaların sonuçları da özel durumlar için yönetmeliklerde yer almış ve faaliyet alanı dar kapsamda tutulmuştur [9]. Schmid'e göre bölgesel zemin üzerindeki dalga yayılımını değiştirmenin temeli; belirlenen bir rijitlikte, boyutlarda ve derinlikte katı bir kütle yerleştirilmesi esasına dayanmaktadır. Bu katı kütle yapay bir ana kaya görevi üstlenir. Zemine iletilen büyüklükleri belli dalgalar ile zemin anakaya arasındaki, sınır ve ince kalınlıklara sahip tabakaların, tanımlanması mümkündür [10]. Modelleme yapılırken, yarı sonsuz zemin bölgesinde 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. Bunlara ilave olarak yapılan diğer çalışmalarda, Küyük ve Çelebi [11], Küyük ve diğ. [12], Vural ve diğ. [13], Vural ve diğ. [14], Kırtel ve diğ. [15] ve Kırtel ve diğ. [16] dalgaların karakterleri ve zemin koşulları dikkate alınarak en uygun yalıtım durumunu veren modelleri incelenmişlerdir. Bunun için birçok parametre üzerinde (kayma dalga hızı, bariyer yoğunluğu, bariyerin geometrik özellikleri, bariyerin yapıya veya yük kaynağına olan uzaklığı vb.) aktif ve pasif yalıtım durumlarında incelemeler yapılmış ve en yüksek yalıtımı veren şartlar araştırılmıştır. Forchap ve Verbic yapı ve zemindeki titreşimleri ve bu titreşimlerin etkilerinin azaltılması için arazi deneyleri yapmışlardır [17]. Ana kaya üzerini örten tek tabakalı zemin ortamının temel titreşim frekans değerinin altında kalan dış yükün frekans değerlerinde dalga yayılışlarının olmadığını göstermişlerdir. İstenilen yerlerde ana kaya bulmanın zorluğu veya olmaması nedeniyle zemin içerisinde ana kaya özelliğini taşıyan bir yapay taban kaya önermişlerdir. Gao ve diğ. yaptıkları

çalışmada titreşimlerin izolasyonunda kazık grupların pasif yalıtım durumundaki etkisini incelemişlerdir [18]. Andersen ve Nielsen [19] yaptıkları çalışmada yer titreşimlerinin bariyerler ile azaltılması veya demiryolu hattı boyunca zeminin iyileştirilmesi hakkında incelemelerde bulunmuşlardır. Haw Ju ve Ta Lin [20] trenlerin neden olduğu titreşimler ve kritik Rayleigh dalga hızlarının sonlu elemanlar metodu ile analizini yapmış ve nümerik analiz çalışmalarını karşılaştırmışlardır. Hildebrand hissedilebilir tren titreşimlerinin zemin stabilizasyonu etkisini incelemiş ve farklı frekanslara ait sonuçları yapığı çalışmasında sunmuştur [21]. Ayrıca Hunaidi [22] ve El Naggar ve Chehab [23] ülkelerinde yaptıkları araştırmalarda trafik titreşimlerinin etkileri ve önlemleri hakkında çalışmalar yaparak sunmuşlardır.

1.3. Çalışmanın Amaç ve Kapsamı

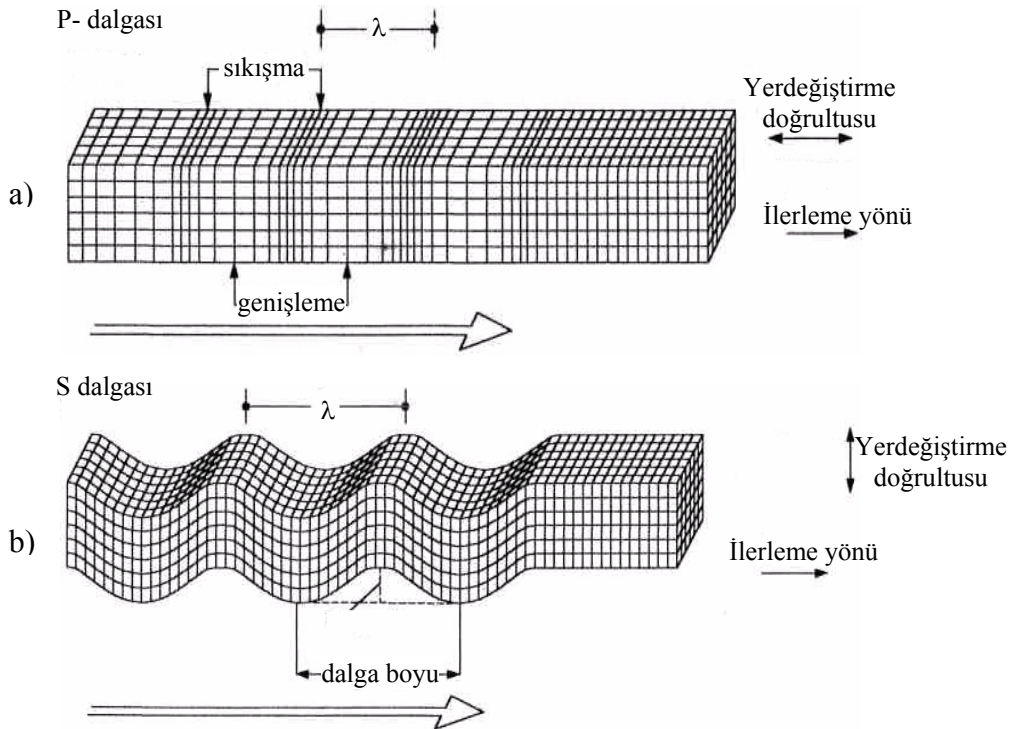
Bu çalışmanın amacı, deprem yer hareketi dışındaki yüksek frekansta insan yapısı titreşim kaynaklarının (taşıt etkileri, inşaat aktiviteleri, makine hareketleri, patlamalar vb.) yapılarımız üzerinde oluşturacakları hasar verici etkileri ve insanlar üzerindeki konfor bozucu rahatsızlıkları en aza indirmektir. Bu amaçla, öncelikle deneylerin yapılacağı arazinin zemin özelliklerini belirlemek için zemin sondajı ve laboratuvar deneyleri ile sismik kırılma ve yansıma deneyleri yapılmıştır. Zemin bölgesinin idealleştirilmesinde Doğrudan Çözüm Yaklaşımı kullanılmıştır. Modelleme Sonlu Elemanlar Yöntemi 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 yapıda 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 kaynağın altında olması) ve pasif yalıtım (dalga bariyerinin korunacak yapının altında olması) durumları için farklı parametreler üzerinde

araştırmalar yapılmıştır. Dalga bariyerinin geometrik özellikleri (ykseklėđi ve genişliği) ve çeşitli boyutlardaki bariyerin farklı derinliklerdeki etkisi araştırılmıştır. Ayrıca bariyerin cidarlı imal edilmesi durumunda boş olması durumu, bariyerin iinin dolu olması durumu ve farklı yoğunluktaki malzemelerle doldurulması gibi birçok değişkenin dalganın perdelenmesine etkisi araştırılmıştır. Bu araştırmalar neticesinde elde edilen sonuçlar yorumlanmış ve grafikler halinde karşılaştırmalı olarak verilmiştir.

BÖLÜM 2. ZEMİNLERDE DALGA YAYILIMI

2.1. Giriş

Zeminlerde oluşan titreşimler sonucu cisim dalgaları ve yüzey dalgaları adı verilen iki farklı dalga türü ortaya çıkar. Zemin içerisinde hareket eden cisim dalgalarının P ve S olmak üzere iki çeşidi vardır (Şekil 2.1). P dalgaları boyuna olup basınç dalgaları olarak bilinir ve geçtikleri ortamda önce sıkışma sonra genişleme meydana getirirler. Ses dalgalarına benzerler ve bu dalgalardan etkilenen bir parçacık titreşimi dalga ilerleme yönüne paraleldir. Bu dalgalar ses dalgalarında olduğu gibi katı ve sıvı ortamdaki geçebilir. Enine ve kesme dalgaları olarak bilinen S dalgasından etkilenen bir parçacık hareketi dalga ilerleme yönüne diktir. Sonsuz bir ortamda P dalgasının yayılma hızı, S dalgasının yayılma hızından en az 2 kat daha fazladır [24]. Cisim dalgalarının ilerleme hızı, içinden geçtikleri ortamın rijitliğine bağlıdır.



Şekil 2.1 Cisim dalgalarının oluşturduğu deformasyonlar a) P dalgası, b) S dalgası

Jeolojik bir yapı olan zemin basınçta daha rijit olduğundan, P dalgaları diğer dalgalardan daha hızlıdır ve dolayısıyla da kayıt istasyonuna ilk olarak bu dalgalar ulaşır. P dalgalarının hızı, dalganın yayıldığı ortamın rijitliğine, yoğunluğuna ve elastik özelliklerine göre değişim gösterebilmektedir. P dalgasının hızı c_p aşağıdaki formülle bulunabilir [25];

$$c_p^2 = \frac{(1 - \nu)E}{(1 - 2\nu)(1 + \nu)\rho} \quad (2.1)$$

Burada;

c_p : P dalgası hızı

ν : Poisson oranı

ρ : Zeminin yoğunluğu

E : Elastisite modülüdür.

P dalgalarında olduğu gibi S dalgalarında da hız, yerin derinliğine doğru inildikçe artmaktadır. S dalgalarının hızı c_s aşağıdaki formülle bulunabilir [25];

$$c_s^2 = \frac{E}{(1 + \nu)\rho} \quad (2.2)$$

Burada;

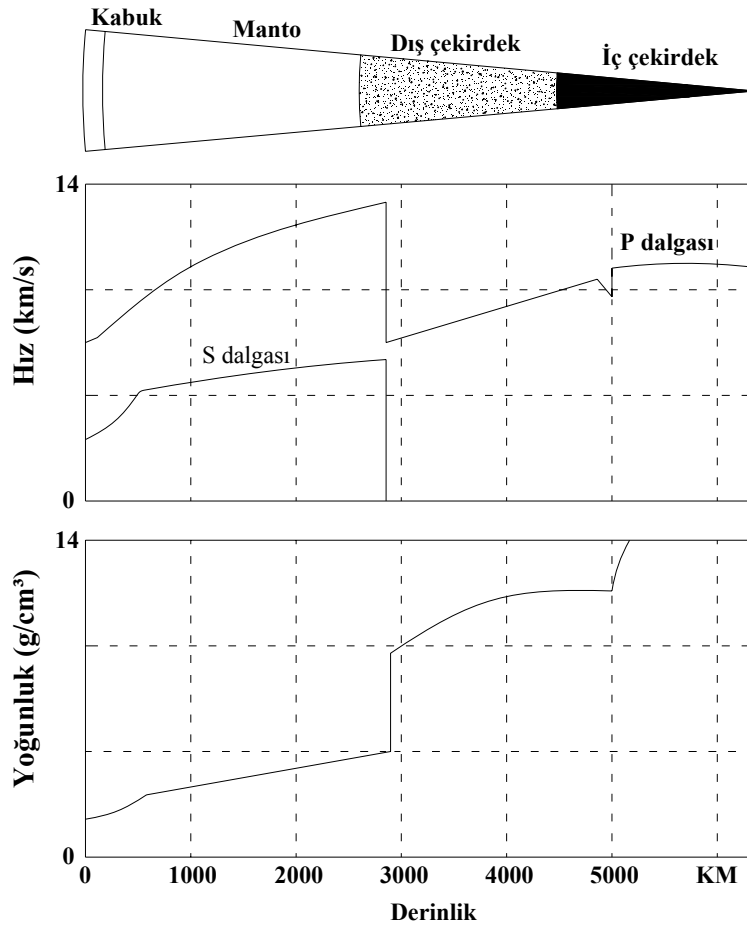
c_s : S dalgası hızıdır.

Yukarıdaki eşitliklerde 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 [25];

$$\frac{c_p^2}{c_s^2} = \frac{2 \cdot (1 - \nu)}{1 - 2\nu} \quad (0 \leq \nu \leq 0.5) \quad (2.3)$$

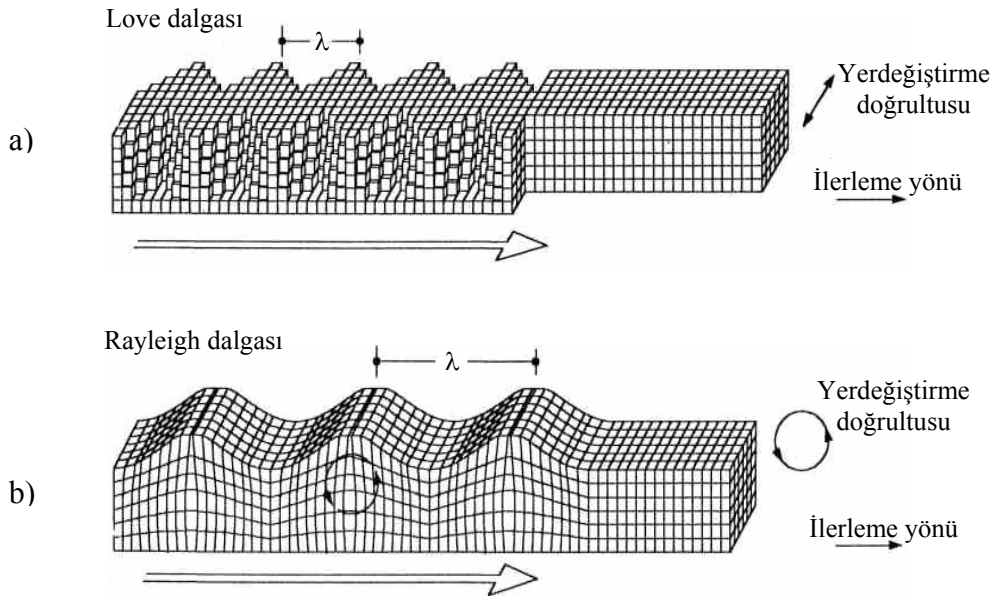
ile ifade edilen bir oran vardır. Burada $c_p > c_s$ olduğu görülmektedir. Bu iki dalganın yayılması ortamın sınırlarından bağımsız olarak ortam içinde meydana geldiği için bu dalgalar, cisim dalgaları olarak adlandırılmışlardır.



Şekil 2.2 Cisim dalgaları hızlarının yoğunlukla değişimi

Yüzey dalgaları, yer yüzeyindeki katmanlar ile cisim dalgaları arasındaki etkileşim sonucunda ortaya çıkmaktadır. Bu dalgalar, genlikleri kabaca derinliğe göre üssel olarak azalan şekilde yer yüzeyinde ilerler (Şekil 2.2), [26]. Yüzey dalgaları titreşim kaynağından çok uzak mesafelerde daha baskın olmaktadır. Titreşim kaynağından uzak mesafelerde en büyük yer hareketinin oluşmasında cisim dalgalarından daha çok yüzey dalgaları rol oynamaktadır. Mühendislik açısından en önemli olan yüzey dalgaları Rayleigh dalgaları ve Love dalgalarıdır. P dalgaları ve S dalgalarının yer

yüzeyi ile etkileşiminden oluşan Rayleigh dalgalarında partikülün yatay ve düşey yönlerin ikisinde de hareket etmesi sözkonusudur. Love dalgaları S dalgalarının yumuşak çökellerle etkileşimi sonucu ortaya çıkar ve bunlarda partikül titreşiminin düşey bileşeni yoktur [15].

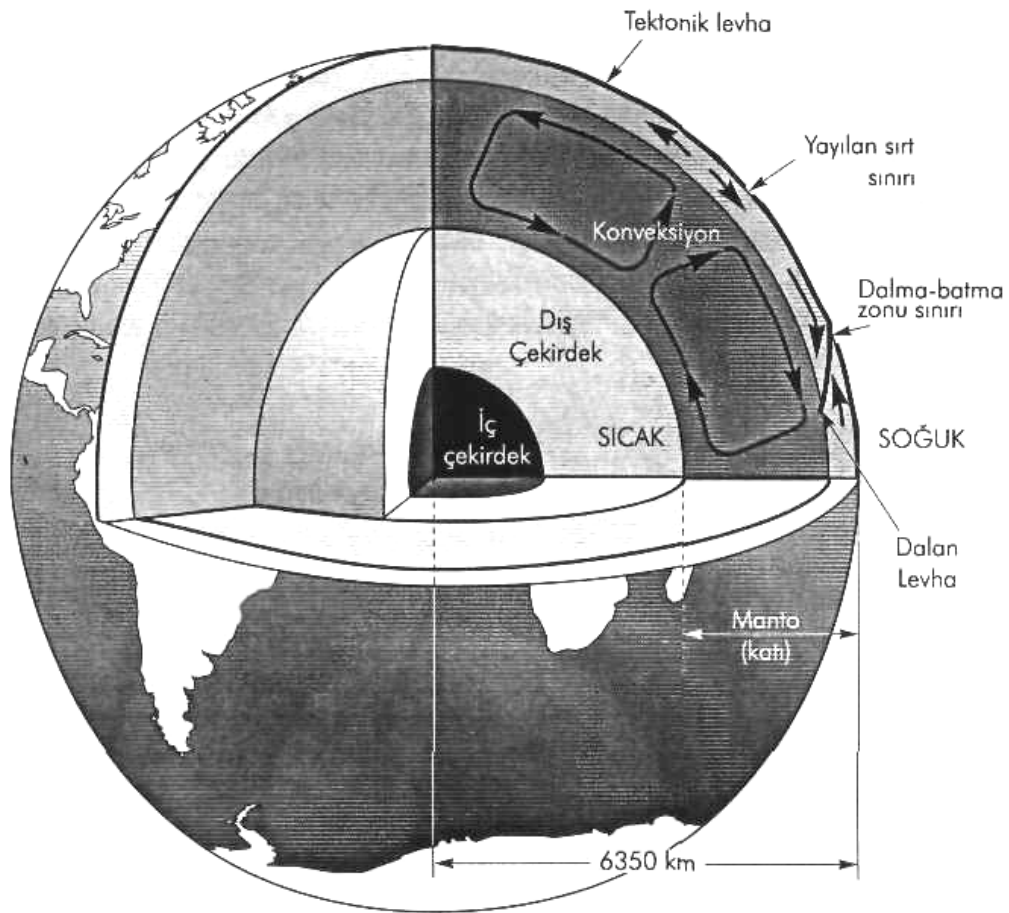


Şekil 2.3 Yüzey dalgalarının oluşturduğu deformasyonlar a) Rayleigh dalgası, b) Love dalgası

Kaynak bölgesinden yayılan sismik dalgalar, geçiş yolu üzerindeki geometri ve malzeme özelliklerinden etkilenir. P ve S dalgaları geçiş yolu boyunca farklı malzeme özelliklerine sahip tabakaların ara yüzleriyle karşılaştıklarında yansılar veya kırılırlar. Bu dalgalar arasında farklılık, enerji kaynağından çıkan dalgaların genliklerinde bölgesel bir artış veya azalışla sonuçlanabilir. Geçiş yolundaki diğer düzensizlikler (yüzey topografyası, süreksizliklerdeki ve malzeme özelliklerindeki değişimler vb.) yansıma ve kırılma olaylarını büyük bir karmaşıklığa sokar. Yüzey topografyası ve yüzeye yakın tabakalanma da yüzey dalgalarının özelliklerini etkiler [25].

2.2. Yarı Sonsuz Ortamda Dalga Yayılımı

Yerküre sonsuz olmayan ve dış yüzeyinde gerilmelerin oluşmadığı çok büyük bir küredir (Şekil 2.4) [26]. Mühendislik açısından yüzeye yakın problemlerin analizinde yer küre çoğu zaman düzlemsel bir serbest yüzey ile birlikte yarı sonsuz bir ortam olarak modellenmektedir. Bu tür modellemeler ve çözümler, hareketi serbest yüzeye yakın sığ bir zonda yoğunlaşmış dalgaları yani yüzey dalgalarını tanımlamaktadır.



Şekil 2.4 Yerküre ve iç yapısı

2.2.1. Rayleigh yüzey dalgası

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

Çoğunlukla yüzeyde oluşan en yaygın dalga Rayleigh dalgasıdır. Rayleigh dalgasının yayılma hızı (c_R), aşağıda verilen denklemin pozitif gerçek köküdür [26].

$$4c_s \left[(c_p^2 - c_R^2)(c_s^2 - c_R^2) \right]^{1/2} = c_p (2c_s^2 - c_R^2) \quad (2.4)$$

Burada;

c_p : P dalgası hızı

c_s : S dalgası hızı

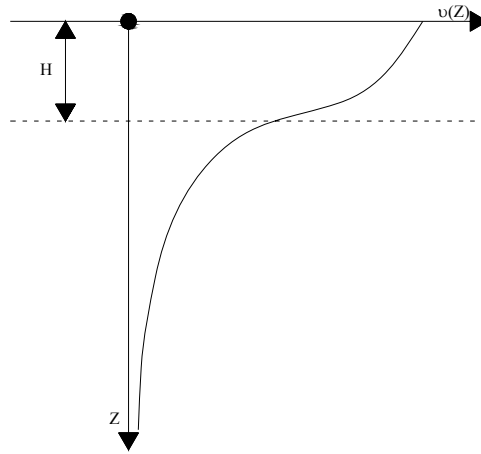
c_R : Rayleigh dalgası hızıdır.

Rayleigh dalgasının yayılımı, yaklaşık S dalgası hızında olmasına rağmen, Love dalgasının yayılma hızı, yüzey tabakasındaki ve alt tabakadaki S dalgalarının yayılma hızları arasındaki bir değerde olur.

Bu dalgaları diğerlerinden ayıran en önemli fark titreşim genliklerinin derinlikle hızla azalmasıdır. Bu tip dalgalar yarı sonsuz ortamın sığ bir bölgesi boyunca yüzeye paralel olarak yayılırlar. Bu yüzden bu tür dalgalara yüzeysel dalgalarda denir. Dalga yayılma doğrultusunda S dalgalarından biraz daha yavaş hareket ederler ($c_R \cong 0.9 c_s$). 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.

2.2.2. Love yüzey dalgası

Homojen elastik yarı uzay bir ortamda sadece S, P ve Rayleigh dalgaları bulunur. Ancak, yarı sonsuz ortamın kendinden daha düşük cisim dalgası iletme hızına sahip bir katman ile örtülmesi halinde, Love dalgaları oluşabilir. Love dalgaları aslında yüzey katmanları içinde çoklu yansımalar vasıtasıyla kapanlanmış S dalgalarından oluşur. Love dalgası yerdeğiştirme genliği yüzeydeki katmanda sinüzoidal olarak değişir ve alttaki yarı sonsuz ortamda derinlikle birlikte üssel olarak sönümlenir. Love dalgası hızları yarı sonsuz ortamın (çok düşük frekanslardaki) S dalga hızı ile yüzey katmanının (çok yüksek frekanslardaki) S dalga hızı arasındadır (Şekil 2.5) [26].



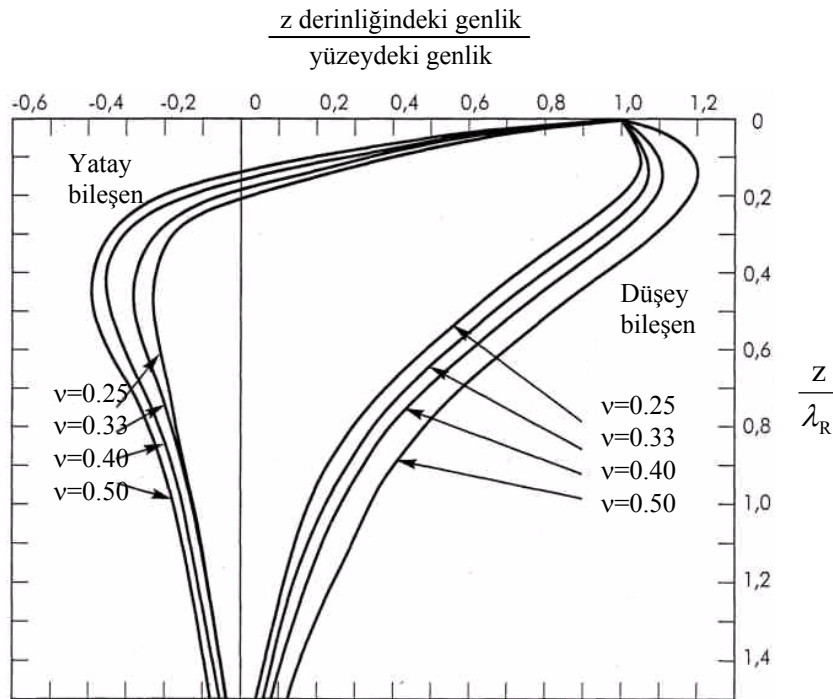
Şekil 2.5 Love dalgalarında partikül yerdeğiştirme genliğinin derinlikle değişimi

2.2.3. Yüzey Dalgalarının Yayılımı

Cisim dalgası hızları derinlikle birlikte değişmediğinden, homojen yarı sonsuz ortamdaki Rayleigh dalga hızı frekanstan bağımsızdır. Ancak Love dalgasının hızı bir üst sınır ile alt sınır aralığındaki frekansa bağlı olarak değişir.

Farklı frekanstaki (farklı dalga boyundaki) dalgaların farklı hızlarda yayılması olayı dispersiyon olarak adlandırılmaktadır. Bu sebepten dolayı Love dalgaları dispersif ve homojen yarı sonsuz ortamda Rayleigh dalgaları dispersif değildir. Ancak, yerin yüzeyine yakın kesimde zemin ve kayaların rijitlikleri derinlikle birlikte

değişmektedir. Rayleigh dalgasının neden olduğu önemli yer değiştirmenin geliştiği derinlik, büyüyen dalga boyu ile birlikte arttığından (Şekil 2.6) uzun dalga boylu (düşük frekanslı) Rayleigh dalgalarından daha hızlı yayılmaktadır. Bu nedenle heterojen malzemeden oluşan gerçek ortamlarda Rayleigh dalgaları dispersiftir. Rayleigh ve Love dalgalarının hızları artan frekansla birlikte azaldığından, düşük frekanslı bileşenlerin, belirli bir sahaya yüksek frekanslı yüzey dalgalarından önce ulaşması beklenir [26].



Şekil 2.6 Rayleigh yüzey dalgalarının yatay ve düşey hareketi

Şekil 2.6 incelendiğinde düşey yer değiştirme en büyük değerine ulaştığında yatay yer değiştirmenin sıfır olduğu görülmektedir [26]. Aynı şekilde düşey titreşim genliğinin kohezyonsuz bir zeminde ($\nu=0.25$) $z/\lambda_R=1$ olduğu derinlikte serbest yüzeydeki genliği %20 değerine ulaşmaktadır. Buradan da anlaşılıyor ki $z/\lambda_R=2$ olduğu derinlikte düşey titreşim meydana gelemeyecek nitelikte olacaktır. Dalga hareketinin düşey yer değiştirme bileşeni derinlikle sürekli azalırken yatay yer değiştirme bileşeni $z/\lambda_R=0.2$ değerinde sıfır değerini almaktadır.

2.3. Bir Boyutlu Dalga Yayılması

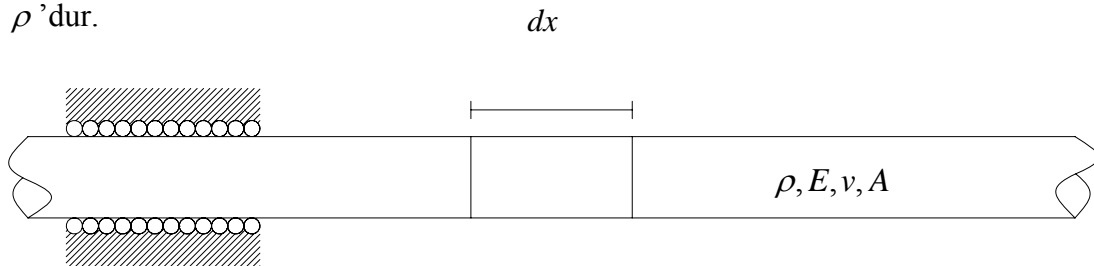
İnce bir çubukta üç titreşim oluşabilir. Bunlar: çubuk ekseninin yanal yerdeğiştirme olmadan uzayıp kısılması esnasındaki boyuna titreşim, çubuğun kendi eksenini etrafında yanal yer değiştirme olmadan döndüğü durumdaki burulma titreşimi ve eksenin kendisinin yanal yönde hareket ettiği durumdaki bükülme titreşimi. Bükülme titreşiminin zemin dinamiğinde fazla bir uygulama alanı yoktur. Diğer iki durum ise zemin dinamiğinde yaygın olarak kullanılmaktadır.

2.3.1. Sonsuz uzun bir çubukta boyuna dalgalar

Sonsuz uzun bir çubukta boyuna dalgaların davranışı zemin içindeki dalga yayılımına benzerlik göstermektedir. Çubuğun birim deformasyona karşı kısıtlanmış olması halinde, boyuna bir dalganın neden olacağı partikül yerdeğiştirmesinin yönü, çubuk eksenine paralel olacaktır. Enine kesit düzlemlerinin düzlemsel kalacağını ve gerilme dağılımının her bir enine kesitte üniform dağıldığı varsayımına göre bir gerilme dalgasının çubukta ilerlemesi Şekil 2.7'de gösterilen küçük elemandan geçişi sırasında, elemanın sol ucundaki ($x = x_0$) aksenal gerilme σ_{x_0} 'dir. Sağ uçtaki ($x = x_0 + dx$) aksenal gerilmede de $\sigma_{x_0} + (\partial\sigma_x / \partial x)dx$ 'dir. Elemanın dinamik dengesi için;

$$\left(\sigma_{x_0} + \frac{\partial\sigma_x}{\partial x} dx \right) A - \sigma_{x_0} A = \rho A dx \frac{\partial^2 u}{\partial t^2} \quad (2.5)$$

Burada çubuğun kesit alanı A, elastisite modülü E, Poisson oranı ν ve yoğunluğu da ρ 'dur.



Şekil 2.7 Bir boyutlu dalga yayılması için sıkıştırılmış, sonsuz çubuk

Bağıntıda “u” x yönündeki yerdeğiştirmedir. Bu eşitlik elemanın üzerine etkiyen dengelenmiş dış kuvvetlerin, elemanın kütle ivmesinin neden olduğu atalet kuvvetine eşit olması gerektiğini ifade eder. Sadeleştirme yapıldıktan sonra bir boyutlu hareket denklemi elde edilir;

$$\frac{\partial \sigma_x}{\partial x} = \rho \frac{\partial^2 u}{\partial t^2} \quad (2.6)$$

Bu şekilde verilen hareket denklemi, her türlü gerilme-birim deformasyon davranışı için geçerlidir fakat, gerilmeler ile yerdeğiştirmelerin karışımından ibaret olduğundan dolayı, doğrudan çözümü yoktur. Hareket denklemi, gerilme birim deformasyon ilişkisi $\omega_x = M \varepsilon_x$ kullanılarak yerdeğiştirme cinsinden ifade edilmek suretiyle sadeleştirilebilir. Burada, sıkışma modülü $M = \{(1 - \nu) / [(1 + \nu)(1 - 2\nu)]\} E$ ve birim deformasyon yerdeğiştirme bağıntısı $\varepsilon_x = \partial u / \partial x$ 'dır. Hareket denklemi bu ifadelerin de yardımıyla, çubuğun bir boyutlu denklemi olan ve bilinen boyuna dalga denklemi cinsinden ifade edilebilir;

$$\frac{\partial^2 u}{\partial t^2} = \frac{M}{\rho} \frac{\partial^2 u}{\partial x^2} \quad (2.7)$$

veya

$$\frac{\partial^2 u}{\partial t^2} = v_p^2 \frac{\partial^2 u}{\partial x^2} \quad (2.8)$$

Burada, v_p dalga yayılım hızıdır; bu durumda $v_p = \sqrt{M / \rho}$ hızıyla yayılmaktadır. Dalga yayılma hızı sadece malzeme özelliklerine (rijitliğine ve yoğunluğuna) bağlı ve gerilme dalgasının genliğinden bağımsızdır. Dalga yayılma hızı artan rijitlik ile birlikte artmakta, fakat aynı zamanda artan yoğunluk ile birlikte azalmaktadır [25].

Dalga yayılma hızı, bir çubuk boyunca ilerleyen dalganın hızıdır. Bu hız, çubuk içinden dalganın geçişi sırasında herhangi bir noktadaki partikülün hareketini sağlayan partikül hızı ile aynıdır. Birim deformasyon ilişkisinden $\partial u = \varepsilon_x \partial x$, gerilme-birim deformasyon eşitliği $\varepsilon_x = \sigma_x / M$ ve dalga hızı tanımını $\partial u = v_p \partial t$ bağıntılarını yardımıyla partikül hızı \dot{u} aşağıdaki şekilde ifade edilir;

$$\dot{u} = \frac{\partial u}{\partial t} = \frac{\varepsilon_x \partial x}{\partial t} = \frac{\sigma_x}{M} \frac{v_p \partial t}{\partial t} = \frac{\sigma_x}{M} v_p = \frac{\sigma_x}{\rho v_p^2} v_p = \frac{\sigma_x}{\rho v_p} \quad (2.9)$$

Bu eşitlik, partikül hızının çubukta ki aksenal gerilme ile doğru orantılı olduğunu göstermektedir. Oransallık katsayısı olan ρv_p malzemenin özgül empedansı olarak adlandırılır.

Bu bölümde çalışmada incelenen dalga yayılımının bariyerler aracılığı ile azaltılmasının anlaşılması amacıyla özet olarak zeminlerde dalga yayılımı anlatılmıştır. Konu ile ilgili olarak dalga türleri, zemin içindeki yayılma formasyonları, yayılım hızlarının değişimi ve hesaplamaları gösterilmiştir.

BÖLÜM 3. YAPI-ZEMİN SİSTEMLERİNİN 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 zeminde 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 [2].

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

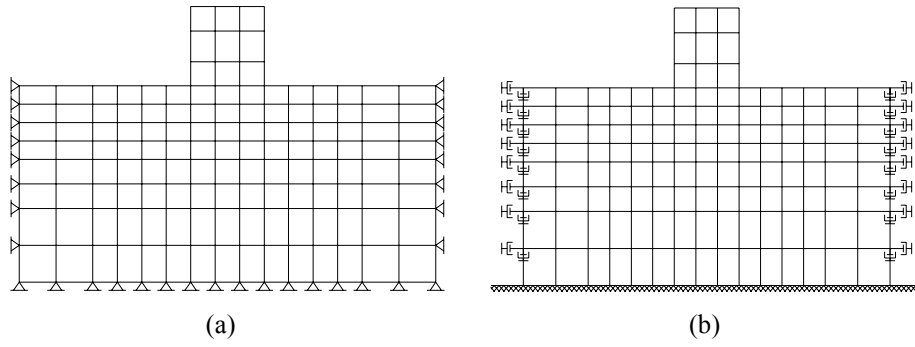
tanımlanması için Doğrudan Çözüm Yaklaşımı ve Alt sistem Yaklaşımı kullanılabilir.

3.1. Alt sistem Yaklaşımı

Alt sistem 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 [2].



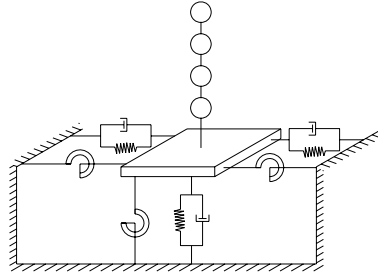
Şekil 3.1. Doğrudan çözüm yaklaşımında kullanılan yapı-zemin sistemi

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 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.

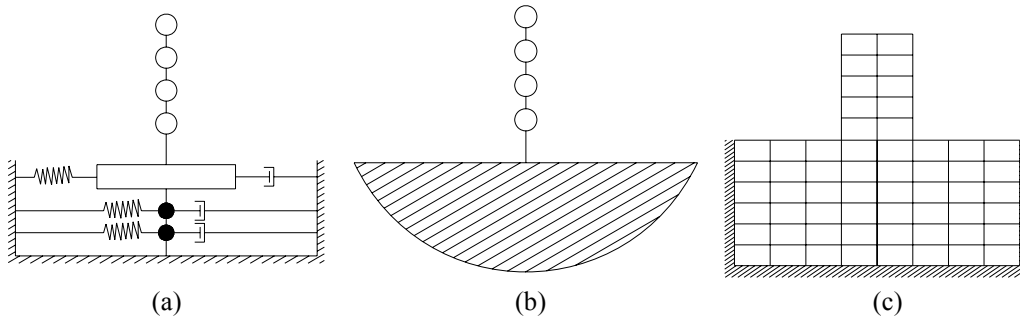
Modelleme yöntemlerinden ilki zeminin eşdeğer statik yaylar ve sönümleyicilerle modellenmesidir. Burada elastik düzlemin dış yüklerle karşı koyma davranışı lineer elastik yaylar ve sönümleyicilerin bileşimi ile temsil edilebilmektedir (Şekil 3.2).



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 [27].

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 [28].

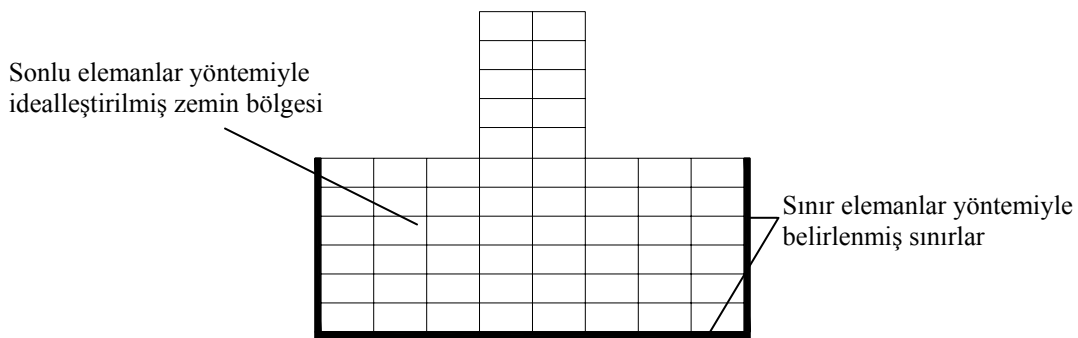
Ayrıklaştırılan bölgenin boyutu küçüldükçe, sınır şartlarının probleme etkisi daha büyük olmaktadır. Hesap hacminin azaltılması açısından sonlu eleman analizindeki eleman sayısı olabildiğince az tutulmaya çalışılır. Eleman sayısının azaltılması iri (kaba) ağı sonlu eleman modellerinin kullanılması anlamına 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 yanında 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 ayırık 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 ayırık 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.

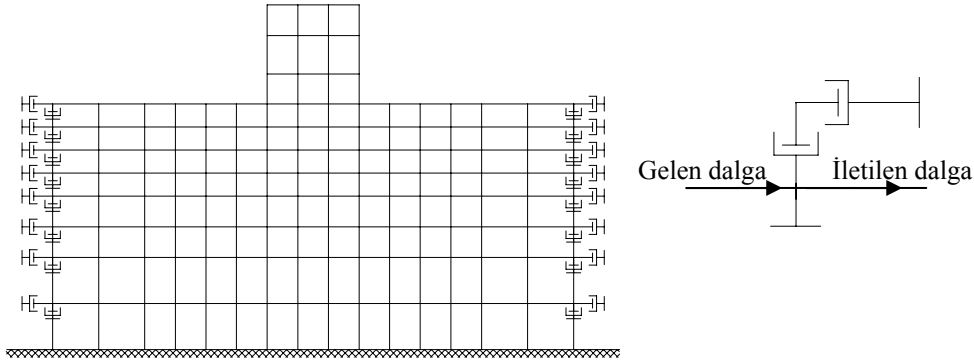
Lineer problemlerde incelenen bölgenin sadece sınırlarının ayrıklaştırılmasıyla çözüm boyutunun bir mertebe indirgenmesiyle daha az bilinmeyen kullanılması ve sınırdaki radyasyon koşulunu doğrudan sağlaması (Şekil 3.4), sınır elemanlar yönteminin sürekli ortamlar mekaniğinde dalga yayılımı problemleri için uygun bir nümerik yaklaşım olduğunu göstermektedir [29].



Şekil 3.4. Sınır elemanlar yöntemiyle zemin sınır şartlarının belirlenmesi

3.3.1.2. Viskoz sınır şartlarıyla modelleme

Zeminin radyasyon sönümü şartını sağlayabilmek için kullanılacak 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;

$$c = \rho c_s A \quad (3.1)$$

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

$$c_s = \sqrt{\frac{G}{\rho}} \quad (3.2)$$

olarak tanımlanmıştır.

Burada G , zeminin kayma modülüdür ve bu değer;

$$G = \frac{E}{2(1 + \nu)} \quad (3.3)$$

olarak tanımlanmıştır. Burada E zeminin elastisite modülüdür [30].

Zemin ortamının ve üst yapı 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. Bu bölümde analiz ve tasarımlarda dikkat edilmesi gereken konular anlatılmıştır. Yani yapı ile zemin arasındaki etkileşim dikkate alınarak, yapı-zemin etkileşimi ortak sistemin iki parçasını oluşturan yapı ile zeminin birbirilerine karşılıklı etkisini ifade eden bir olgu tanımlanmıştır.

4. ARAZİ ÇALIŞMALARI

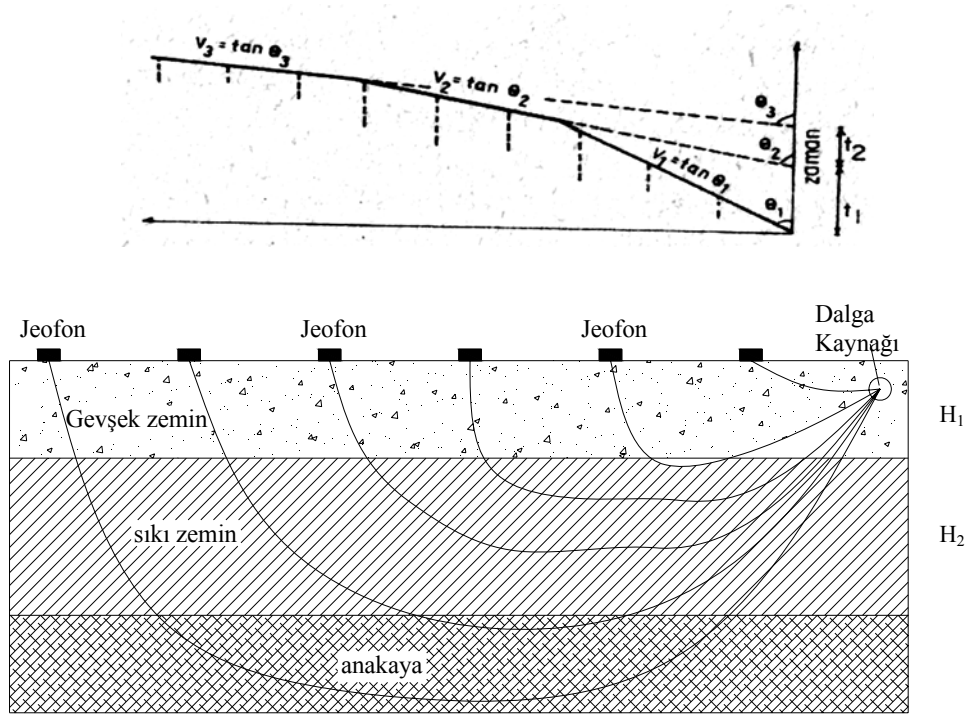
Bilindiği üzere nümerik çalışmalar her zaman gerçek koşullar ile aynı sonuçları vermemektedir. Bu nedenle her zaman uygulamalı arazi çalışmaları elde edilen verilerin geçerliliğini sağlamak için en geçerli ve gerçekçi yöntemdir. Ancak mevcut koşullar altında bu karşılaştırmayı yapmak her zaman mümkün olmamaktadır. Bu tez çalışmasında kullanılan zemin parametreleri arazide yapılan sismik kırılma, sismik yansıma ve sondajlar ile alınan numunelerin laboratuarda analiz edilmesi ile elde edilen verilere göre matematik modele aktarılmıştır.

4.1. Sismik Deneyler

Bu aşamada öncelikle zemin profilinin kayma dalga hızlarının tespiti ile zemin profili hakkında bilgi edinmek amacıyla sismik kırılma deneyi yapılmıştır

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 dalga ya da patlama ile oluşturulmuş titreşimin değişik tabakalardan yansıma zamanının ölçülmesiyle yapılır (Şekil 4.1). Sismik yansıma metodu ses dalgalarının homojen elastik ortamda hareketi teorisinden geliştirilmiş olup, hızı malzemenin elastisite modülü ve birim hacim ağırlığına bağlıdır.

Yüzeyde bilinen aralıklar ile yerleştirilmiş jeofonlar yansıma zamanını otomatik olarak kaydederler (Şekil 4.2 ve 4.3). Yansıma hızı zeminlerde yaklaşık 300-2000 m/s, kayaçta ise 3000/7500 m/s arasında değişmektedir. Zeminde bulunan yeraltı suyu dalgaların ilerleme hızını düşürmektedir [31].



Şekil 4.1 Tabakalı zeminde dalga yayılımı ve yansımaları

Çok sayıda jeofonla yapılan ölçümlerde yüzeyde dalga üretildikten sonra jeofon uzaklığı-yansıma zamanı grafiği noktalanır. Burada bir doğru üzerine düşen noktalar birleştirildiğinde doğruların kesişme noktaları farklı katmanlara geçişi gösterecektir. Yansıma hızları doğruların eğimlerinden hesaplanır ve katman kalınlıkları da bu dalga hızlarına bağlı olarak bulunur;

$$H_1 = \frac{t_1 v_1 v_2}{2\sqrt{v_2^2 - v_1^2}} \quad (4.1)$$

$$H_2 = \frac{t_2 v_2 v_3}{2\sqrt{v_3^2 - v_2^2}} \quad (4.2)$$

Burada;

H_1 :Birinci tabakanın kalınlığı

H_2 :İkinci tabakanın kalınlığı

v_1, v_2, v_3 : Jeofonlar arası dalga yayılma hızı

t_1, t_2, t_3 : Jeofonlar arası dalga yayılma süresi



Şekil 4.2 Sismik kırılma deneyi kayıt cihazı



Şekil 4.3 Sismik kırılma deneyi yük uygulama noktası

Titreşim kaynağına en yakın dinleyiciler üst tabakadan geçen dalgaları kaydetmektedir. Alt tabakalardan yansıma daha geç olduğundan uzaktaki jeofonlar bu dalgaları almaktadırlar. Tablo 4.1’de jeolojik malzemeler için yansıma hızı limitleri verilmektedir [31].

Tablo 4.1 Zemin ve kayaçta 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 deneyleridir. Günümüzde gelişmiş cihazlar aracılığı ile deney aşamasında dalga hareketlerini elektronik cihazlar ile görebilmek mümkündür (Şekil 4.4 ve 4.5).



Şekil 4.4 Sismik kırılma deneyi jeofon uygulaması



Şekil 4.5 Sismik kırılma deneyi için jeofon uygulaması

Yapılan arazi deneyleri ve hesaplamalar ile zemine ait kayma dalga hızları ve diğer parametreleri elde edilmiştir (Tablo 4.1.)

Tablo 4.2 Sismik deney sonuçları

Malzeme	Özgül ağılık ρ (t/m^3)	P kayma dalga hızı c_p (m/s)	S kayma dalga hızı c_s (m/s)	Poisson oranı ν	(m)
Zemin					
Tabaka-I	1.49	580	220	0.42	2.0
Tabaka -II	1.717	1012	341	0.44	7.0
Tabaka -III	1.80	1079	570	0.35	∞

4.2. Laboratuvar Deneyleri

Arazide iki adet sondaj yapılarak zemin laboratuvar deneyleri için numuneler alınmıştır (Şekiller 4.6 ve 4.7). Bu çalışmalarda elde edilen verilerin tamamı nümerik modelleme işlemi aşamalarında kullanılmıştır.



Şekil 4.6 Zemin laboratuar deneyleri için sondaj çalışması



Şekil 4.7 Sondaj çalışması uç değişimi

Alınan bu numunelere zemin laboratuar deneyleri yapılarak saha profiline ait dinamik parametreler elde edilmiş (Tablo 4.2) ve bu tabakalı zemine ait parametreler matematik modele yansıtılmıştır. Bu şekilde nümerik modelde kullanılan zemin parametreleri literatürü değil gerçek saha koşullarını içermiştir.

Tablo 4.3 Laboratuvar deney sonuçları

SAKARYA ÜNİVERSİTESİ		Mühendislik Fakültesi		İnşaat Mühendisliği Bölümü		Geoteknik Laboratuvarı		DENEY SONUÇLARI ÖZET TABLOSU													
DENEYİ YAPTIRAN KURULUŞ			ERKAN ÇELEBİ DTP PROJESİ						NUM.GİR.TAR.		18.06.2006		NUM.ÇIKIŞ TAR.		13.07.2006						
Rapor No :	06/0327		Elek Analizi		Atterberg Limitleri			Zemin Sınıfı	Su Oranı	Birim Ağırlık		Serbest Basınç	Üç Eksenli		Konsolidasyon			Hidrometri			
Proje Adı :	YAPI-ZEMİN DİNAMİK ETKİLEŞİM PROBLEMLERİNDE TEMEL TİTREŞİMLERİNİN AZALTILMASI İÇİN YENİ TEKNİKLERİN GELİŞTİRİLMESİ		+# 4	- # 200	LL	PL	PI	Aralık 2000.		Değal B.A.	Kuru B.A.	q_u	MP_a	Densite	Değal	Boş Oran	Sonrakı	Boş Oran	Özgül Ağırlık	-0,076	-0,005
Kuyu No	Örnek No	Derinlik	%	%	%	%	%	TS1500	%	kN / m^3		kPa	c	ϕ	e_n	e_f	Özgül Ağırlık	%	%		
SK1	SPT 1	1,00-1,45	0	98	42	22	20	CI	32										98	46	
	SPT2	2,00-2,45	0	87	27	20	7	CL	32										87	18	
	UD1	2,50-3,00	0	85	26	20	6	CL	32	ÜÇ EKSENLİ HÜCRE BASMA DENEYİ YAPILAMAMIŞTIR.										85	16
	SPT 3	3,00-3,45	50	21	NP	NP	NP	GM	9												
	SPT 4	4,50-4,95	59	5	NP	NP	NP	GW-GM	7												
	SPT 5	6,00-6,45	0	84	28	22	6	CL	26										84	14	
	SPT 6	7,50-7,95	46	6	NP	NP	NP	GW-GM	12												
	SPT 7	9,00-9,45	62	5	NP	NP	NP	GW-GM	7												
	SPT 8	10,00-10,45	91	1	NP	NP	NP	GW	4												
SK2	SPT1	1,50-1,95	0	98	39	21	18	CI	28												
	UD1	2,50-3,00	0	95	40	21	19	CI	35	17,77	12,93		27	1							
	SPT2	3,00-3,45	0	93	38	22	16	CI	33												
	SPT3	4,50-4,95	54	5	NP	NP	NP	GW-GM	9												
	SPT4	6,00-6,45	0	88	28	21	7	CL	37										88	18	
	SPT5	7,50-7,95	47	21	NP	NP	NP	GM	14												
	SPT6	9,00-9,45	81	6	NP	NP	NP	GW-GM	6												

BÖLÜM 5. NÜMERİK ANALİZ ÇALIŞMALARI

Problemin matematik modelini oluşturmak için, tabakalı zemin ortamında sismik bariyer modellenmiştir. Bu model üzerinde dalga yayılımı etkilerini değerlendirebilmek amacı ile sonlu elemanlar yönteminde sistemin bilgisayar ortamında davranışı incelenmiştir. Kapsamlı parametrik araştırmalar yürütülerek sayısal sonuçlar farklı dalga yalıtım modelleri için karşılaştırmalı olarak incelenmeye çalışılmıştır. Bu aşamada ana kaya tabanlı sonsuz zemin bölgesinin ayrıklaştırılmasında, sonlu elemanlar yöntemi nümerik çözüm yöntemi olarak kullanılmıştır. Bilgisayar modeli içinde sonlu elemanlar metoduna uygun olan SAP2000 paket programı kullanılmıştır.

5.1 Sonlu Elemanlar Yöntemi

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.

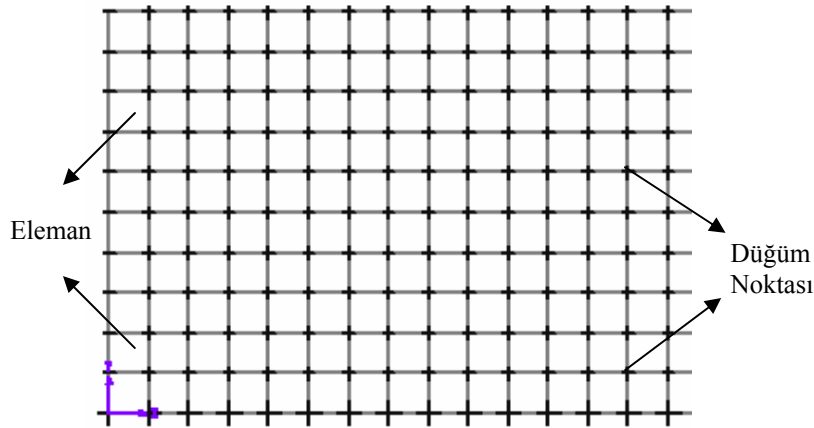
Sonlu Elemanlar Yöntemi, katı mekaniği, sıvı mekaniği, akustik, elektromanyetizma, biyomekanik, ısı transferi, geoteknik modellemeler vb. gibi alanlarda karşıya çıkan

- 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.

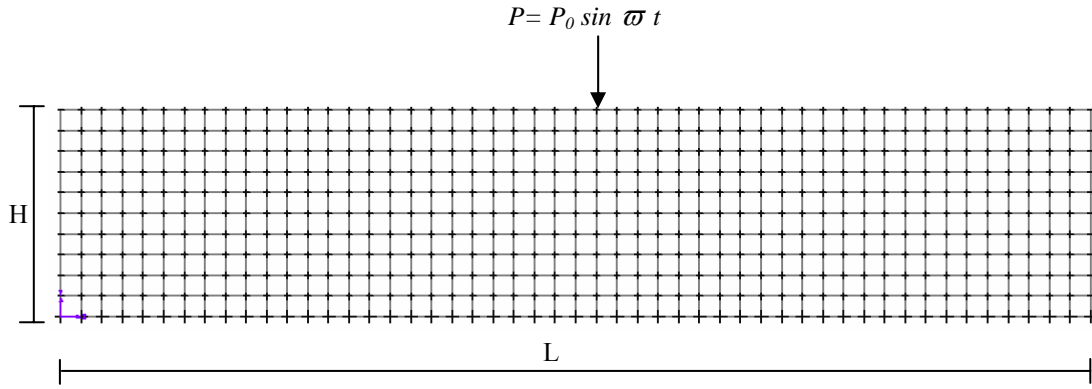
Sonlu eleman yaklaşımında problemin genel bir denkleminin yazımı ve denklemin çözümü yerine önce ortam sonlu elemanlara ayrılır ve her eleman için problemin bütünü göz önüne alınarak denklemler çıkartılır. Mevcut sınır şartları dikkate alınarak elemanlar birleştirilir ve ortamın tamamı için matris denklemleri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

Bu yöntemde sürekli ortam önce Şekil 5.1 de görüldüğü gibi her birine eleman adı verilen sonlu sayıda elemanlara bölünür. Bu elemanlar birbirine düğüm noktaları olarak adlandırılan sonlu sayıda noktalarla bağlıdır.



Şekil 5.1 Bir sonlu eleman modelinde düğüm noktaları ve elemanlar

Her elemanın düğüm noktalarında serbestlik derecesi kadar bilinmeyen sayısı vardır. Eleman davranışı bu bilinmeyen serbestlik dereceleri içeren denklemlerle ifade edilir. Gerek düğüm noktalarında gerekse eleman sınır yüzeylelerinde 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 5.2).



Şekil 5.2 Çalışma aşamalarında uygulanan bir sonlu eleman modeli

Sonlu elemanlar metodunda yapı, davranışı daha önce belirlenmiş olan birçok elemana bölünür. Elemanlar “düğüm noktası” adı verilen yerlerde tekrar birleştirilirler (Şekil 5.2). 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.

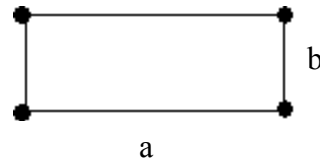
Sonlu elemanlar metodunda temel fikir sürekli fonksiyonları bölgesel sürekli fonksiyonlar ile temsil etmektir. Bunun anlamı bir eleman içerisinde hesaplanması istenen büyüklük (örneğin yerdeğiştirme) o elemanın düğüm noktalarındaki değerler kullanılarak interpolasyon ile bulunur. Bu nedenle sonlu elemanlar 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;~

$$\underline{K}\underline{U} + C\dot{\underline{U}} + M\ddot{\underline{U}} = \underline{F} \quad (5.1)$$

şekindedir. Burada; \underline{U} büyüklük alanının düğüm noktalarındaki bilinmeyen değerlerini temsil eden vektör, \underline{F} bilinen yük vektörü, M kütle ve K ise bilinen sabitler matrisidir. Gerilme analizinde K rijitlik matrisi olarak bilinmektedir.

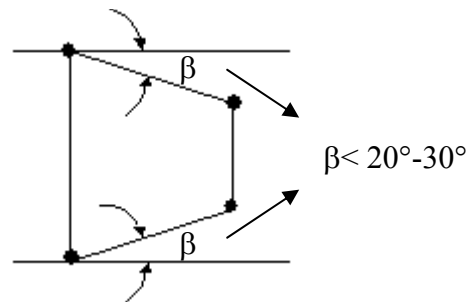
5.1.1 Genel olarak modelleme

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 5.3 Bir sonlu eleman

Sonlu eleman boyutlandırmasında eleman kenar uzunlukları a ve b olarak tanımlarsak (Şekil 5.3), kenar uzunluk oranı " a/b " için genelde sonlu elemanlar yönteminde $10/1$ oranına kadar müsaade edilebilir. 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 5.4).



Şekil 5.4 Yamuk modeller için açı oranları

5.1.2 Ayırıklaştırma ve dikkat edilmesi gerekli hususlar

Bir problemin sonlu elemanlar metoduyla çözümünü 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 ayırıklaştırma 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 ayırıklaştırma esnasında bir takım hususlara dikkat edilmesi gerekmektedir [32].

Sonlu elemanlar örgü 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. Dügüm 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. Elemanların kenar uzunluk oranları eleman tipleri arasında değişiklik gösterebilir. Eleman boyutlandırmasında eleman kenar uzunlukları a ve b olarak tanımlandığında, kenar uzunluk oranı “a/b” için genelde SEY’de 10/1 oranına kadar müsaade edilebilir. Eleman boyutları küçüldükçe sonuç daha yakın olacaktır. Bu oran yerdeğiştirme hesapları için 10’un altında, gerilme hesapları için ise 5’in altında kalmalıdır.
- h. Yüksek mertebeden elemanlar için ara düğüm noktalarının dağılımı mümkün olduğu kadar üniform olmalıdır.
- i. Sonlu eleman hesaplarının ilk kontrolü için yüklerin, kuvvetlerin ve reaksiyonların dengesinin kontrol edilmesi tavsiye edilmektedir.
- j. 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.
- k. Yüksek frekanslı tepkisel değerlerin önemli olmadığı dinamik analizler için, statik analizde kullanılabilecek bir ağ yapısı yeterli olacaktır.
- l. Yüksek uzunluk oranlı dörtgen elemanlar, büyük açılı üçgen eleman gibi elemanlardan mümkün olduğu kadar sakınılması gerekmektedir.
- m. Yüksek ve düşük mertebeden elemanların birbirine bağlanması gerilmelerde düzensizliklere neden olacaktır.
- n. Eleman boyutlarında hızlı değişiklikler mümkün olduğu kadar minimize edilmelidir
- o. Anizotropik malzemeler için Poisson oranı açıkça tanımlanmalıdır. Ayrıca ν , E ve G değerlerinin teorik limitlerinin aşılmaması kontrol edilmelidir.

- p. 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.

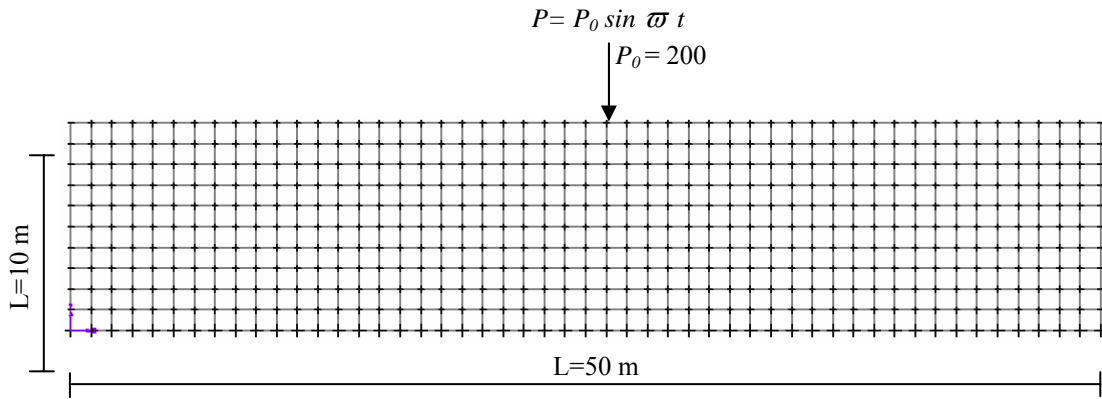
5.1.3 Sonlu eleman metodunda çalışma yöntemi

1. Problem ve onun sürekli ortamı tanımlanır
2. Sürekli ortam elemanlara ayrılır
3. Sınır şartlarının tanımlanır
4. Problemin denklemi hazırlanır
5. Koordinat sistemi teşkil edilir
6. Elemanlar için yaklaşık fonksiyonlar yazılır
7. Eleman matrisleri ve denklemleri elde edilir
8. Koordinatların dönüşümü gerçekleştirilir
9. Eleman denklemleri birleştirilir
10. Eleman matrislerinin birleştirilmesiyle elde edilen sistem matrisine sınır şartları uygulanır
11. Elde edilen denklemlerin çözümü gerçekleştirilir
12. Sonuçlar yorumlanır

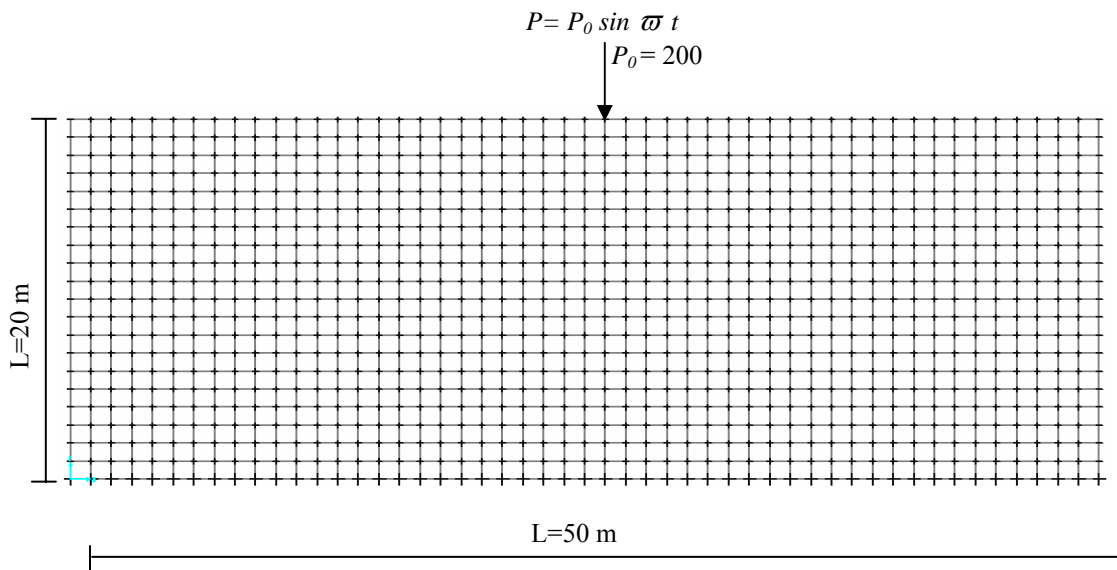
5.2 Sayısal Uygulama Çalışmaları

Sonsuz eleman bölgesinin, kurulan bilgisayar modelinde sonlu zemin modelinin gerçek durumunu temsil edebilmesi için iki aşamalı bir çalışma yürütülmüştür.

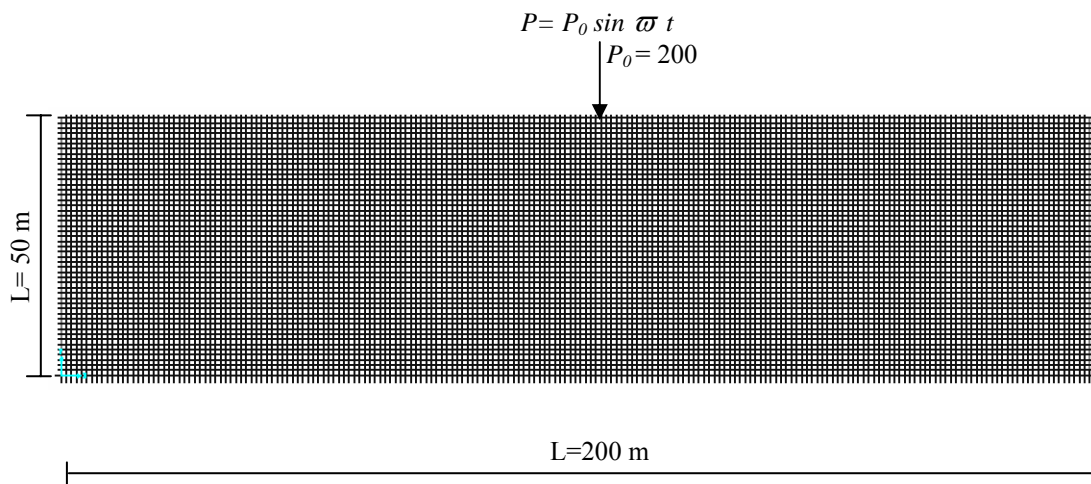
Çalışmanın ilk aşamasında modelin boyutlarının gerçeğe yakın olması için boyutlandırma çalışmaları yapılmıştır. Bu aşamada genliği 200 kN olan harmonik yük altında matematik modelinin L boyu, H yüksekliği olmak üzere, farklı boyutlarda ve farklı özelliklerde modellerin davranış durumları incelenmiştir (Şekil 5.5).



a) Modelleme çalışmaları 10x50 m



b) Modelleme çalışmaları 20x50 m



c) Modelleme çalışmaları 50x200 m

Şekil 5.5 Matematik model boyutlandırma aşamaları

Modelin boyutlandırılması aşamasında, merkez ve uç noktadaki düğümlerin yer değiştirmeleri tespit edilmiştir (Tablo 5.1). Bu şekilde yapılan incelemede yükün uygulandığı merkezde ki maksimum yerdeğiştirmenin ne kadar mesafe sonra zemin içinde sönümlendiği tespit edilmeye çalışılmıştır. Tablo 5.1’ de görüldüğü gibi elde edilen veriler incelendiğinde modelin boyutları arttıkça yer değiştirmelerde de azalma görülmektedir. Bu azalma küçük modellerden daha büyük modellere geçildiğinde ilk yerdeğiştirmelere göre ihmal edilebilir düzeylere ulaştığından dolayı modelin boyutlarının L=200, H=50 olarak çalışmaların yapılmasının uygun olacağı tespit edilmiştir.

Tablo 5.1 Yapay tabankaya boyut hesabı için yapılan modelleme çalışmaları

Değişken Parametre	Model	L (m)	H (m)	Merkez yer değiştirme (mm)		Uç noktalarda yer değiştirme (mm)	
				u_x	u_y	u_x	u_y
$\xi=0,04$ $\nu=0,33$	M ₁	10	10	0,00817	345,9	35,5	144,9
	M ₂	20	10	0,00225	242,2	21,19	7,049
	M ₃	30	10	0,00204	201,9	6,8	7,049
	M ₄	40	10	0,00111	137,4	13,05	17,55
	M ₅	50	10	0,00212	103,7	8,2	17,51
	M ₆	100	10	0,00029	46,17	1,55	6,95
	M ₇	200	10	0,00250	13,88	1,86	2,46
	M ₈	10	20	0,00080	178,2	63,08	187,8
	M ₉	20	20	0,00192	70,97	4,729	92,39
	M ₁₀	50	20	0,00296	54,29	2,914	20,16
	M ₁₁	200	50	0,00023	-26,11	0,197	2,508
	M ₁₂	100	50	0,00018	34,44	0,877	1,893
	M ₁₃	50	50	0,00017	39,66	1,904	16,43
	M ₁₄	150	50	0,00012	32,11	0,168	3,218
	M ₁₅	250	50	0,00018	22,56	0,255	2,084
	M ₁₆	300	50	0,00014	19,56	0,019	2,009
	M ₁₇	600	50	0,00013	14,25	0,011	2,003
$\xi=0,02$ $\nu=0,33$	M ₁₈	200	50	0,00038	29,49	0,206	2,873
	M ₁₉	250	50	0,00053	22,85	0,293	1,856

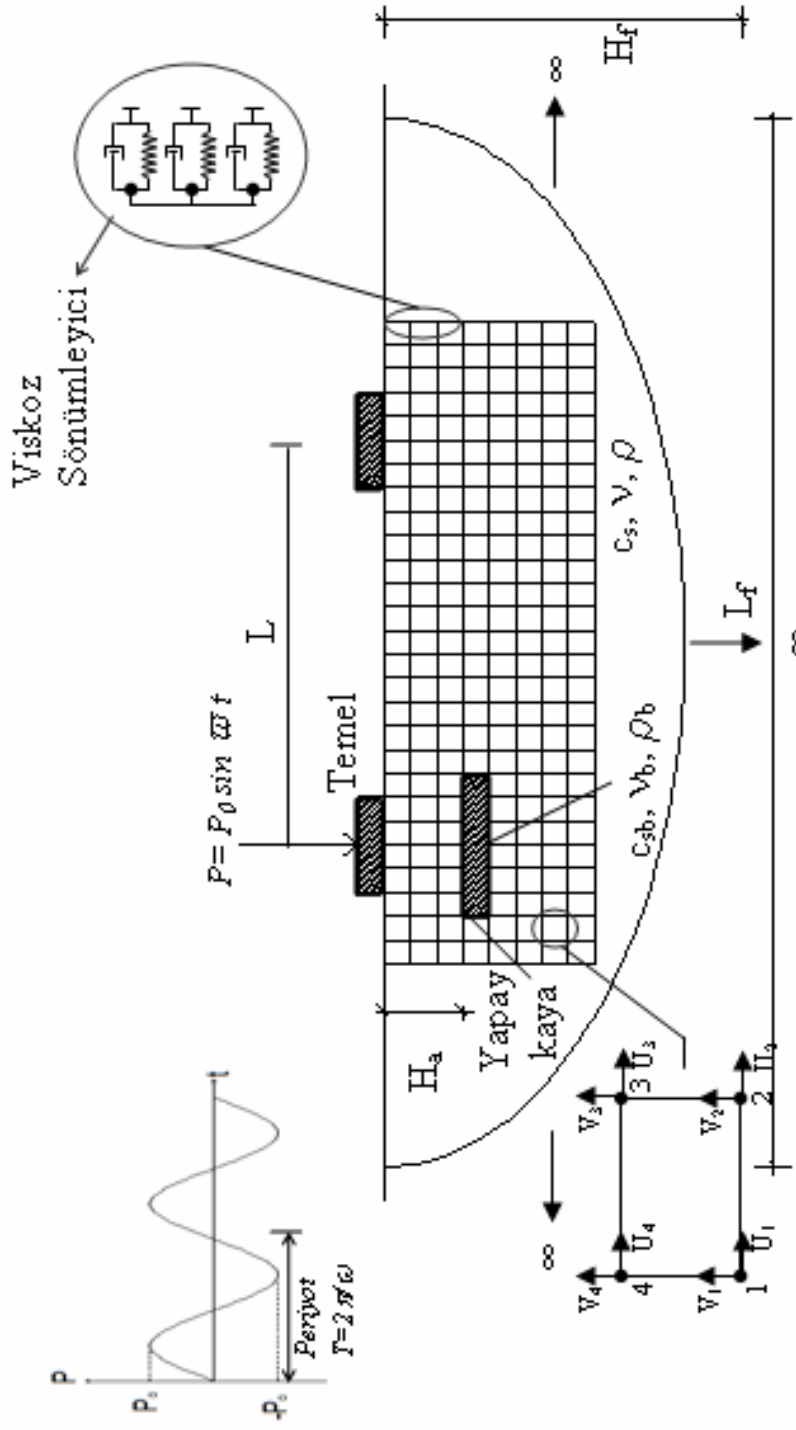
Çalışmanın ikinci aşamasında boyutları belirlenen ayrıklaştırılmış bölgenin sonsuz durumunu modellemede sınırlandırmamak için sonlu zemine uygun sınır şartlarının tespiti yapılmıştır. Bu safhada nümerik modelin sınır elemanlarındaki düğüm noktalarına sönümleyiciler yerleştirilmiştir. Sönümleyicilerin rijitlik katsayılarını hesaplamak için, sınır bölgelerindeki düğüm noktalarına her eksen için 1 birim yük uygulanarak birim yerdeğiştirmeler bulunmuştur. Bu yerdeğiştirmeler “U”, uygulanan

birim yük “F” olmak üzere her düğüm noktası için ayrı ayrı düşey ve yatay sönüm katsayıları hesaplanmıştır.

$$F_{x,y} = K_{x,y} U_{x,y} \quad (5.1)$$

Yapılan hesaplamalarla sönüm katsayıları belirlenmiş sönümleyicilerin sınır elemanların düğüm noktalarına tanımlanması sağlanmıştır. Bu tanımlamalar yapıldıktan sonra tanımlanan matematik model ile yapılan nümerik analiz çalışmalarından elde edilen veriler, viskoz sönümleyicilerin sınır şartlarını belirlemede modelleme için uygun olduğunu göstermiştir. Bu çalışmalar sonucunda sınırdaki düğüm noktaları eşdeğer statik yaylar ve sönümleyicilerle tespit edilmiş, boyutları 200x50 m olan, örgü aralıkları derinliğe ve mesafeye bağlı olarak tanımlanan bir bilgisayar modeli gerçekleştirilmiştir. (Şekil 5.6).

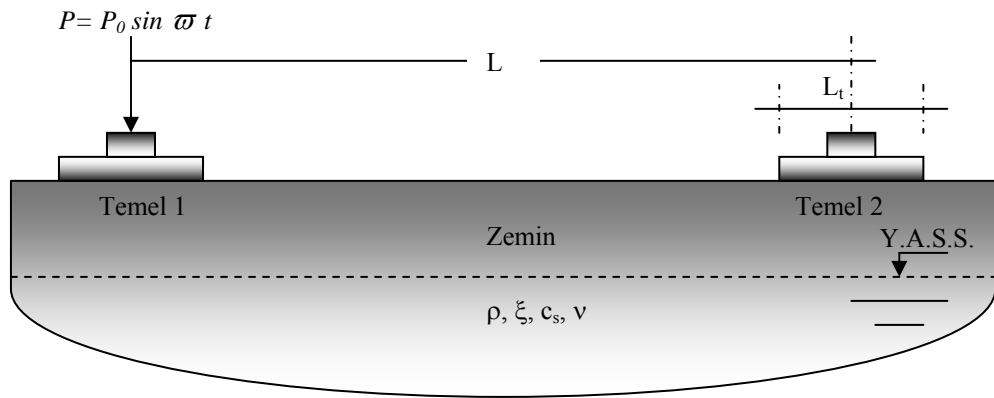
Geliştirilen matematik modelde kullanılan parametreler; yapay taban kayanın geometrik özelliklerini tanımlamak üzere H_a yapay tabankaya derinliğini, B_a kalınlığını, L_a uzunluğunu ifade etmektedir. Yapay tabankayanın malzeme özelliğini tanımlamak için ρ_b kullanılmıştır. Matematik modelde tanımlanan zemin çok tabakalı bir zeminden oluşmakta olup, her tabaka için farklı parametreler tanımlanmıştır. Birinci tabakanın kalınlığı 2 m olup kayma dalga hızı $c_{s1}=200$ m/s, özgül ağırlığı $\rho_1=1,5$ t/m³ ve Poisson oranı $\nu_1=0.42$ 'dür. İkinci tabakanın kalınlığı 6 m olup kayma dalga hızı $c_{s2}=340$ m/s, özgül ağırlığı $\rho_2=1,7$ t/m³ ve Poisson oranı $\nu_2=0.44$ 'dür. Üçüncü tabakanın kalınlığı 40 m olup kayma dalga hızı $c_{s3}=600$ m/s, özgül ağırlığı $\rho_3=1,8$ t/m³ ve Poisson oranı $\nu_3=0.35$ 'dür. Bütün tabakalar için malzeme sönümü $\xi=0.02$ olarak alınmıştır.



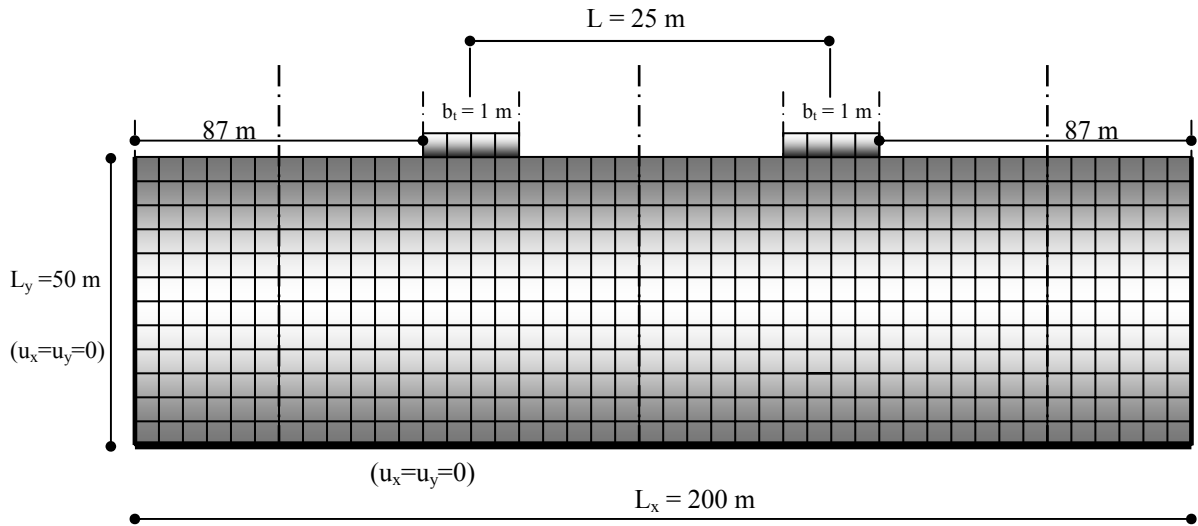
Şekil 5.6 Çalışmada uygulanan matematik model

Çalışma basamakları üç aşamadan oluşmaktadır;

Çalışmanın birinci aşamasını tabakalı zemin yüzeyine oturan ve birbirinden farklı uzaklıklardaki beton temel plaklardan birine belirli bir frekans aralığında harmonik yüklerin uygulanması ve diğer temel plağında meydana gelen titreşimlerin yer değiştirme cinsinden belirlenmesi oluşturmaktadır (yalıtımsız durum Şekil 5.7 ve 5.8).

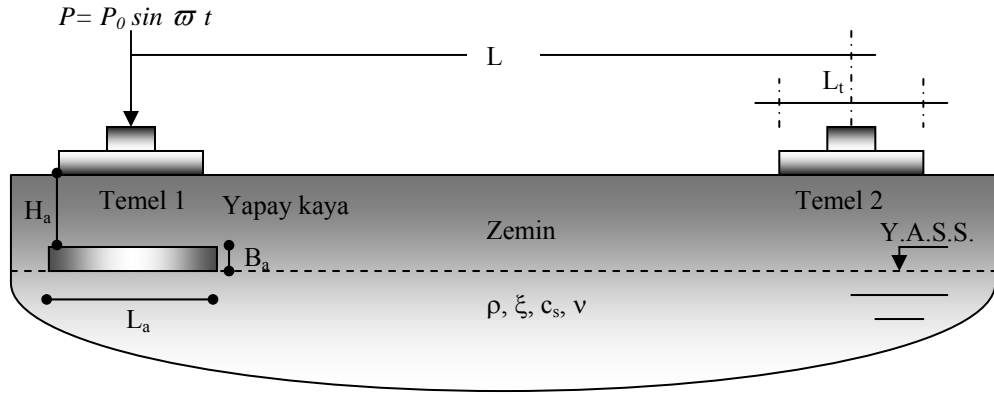


Şekil 5.7 Yalıtımsız arazi modeli

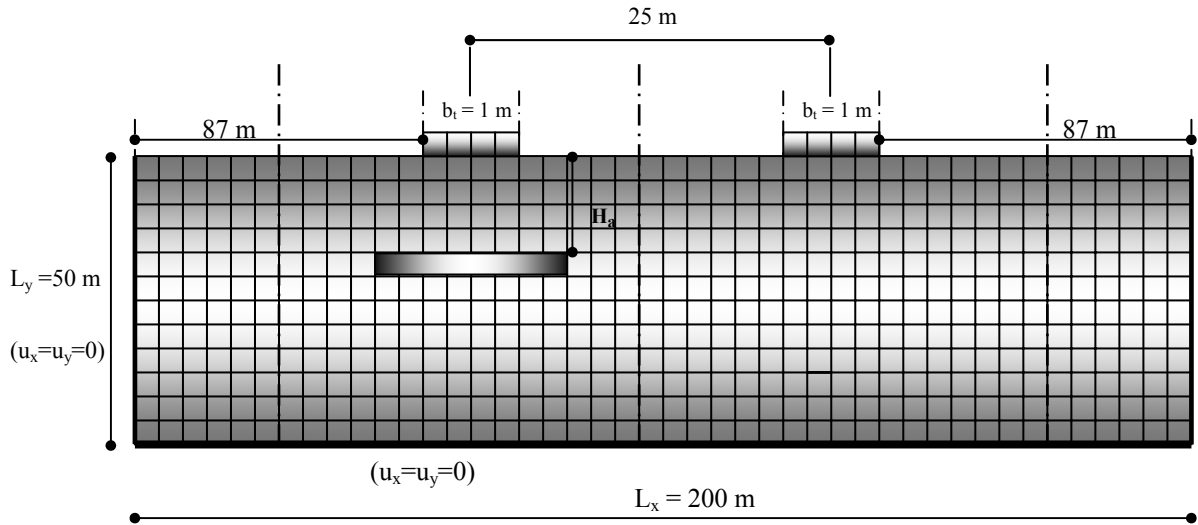


Şekil 5.8 Yalıtımsız durum matematik model (SEY)

İkinci aşamada aktif yalıtım uygulaması olarak, yükün uygulandığı temel bloğuna düşey doğrultuda ve farklı derinliklerde dikdörtgen kesitli bir yapay kaya oluşturulmuş (Şekil 5.9 ve 5.10) ve titreşim kaynağından uzaktaki temel bloğunda oluşan titreşimlerin yer değiştirme cinsinden değerleri bulunmuştur.

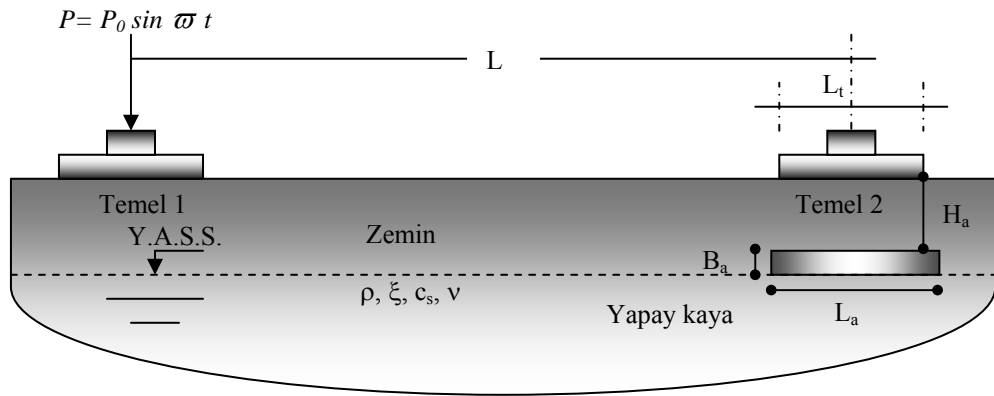


Şekil 5.9 Aktif yalıtım arazi modeli

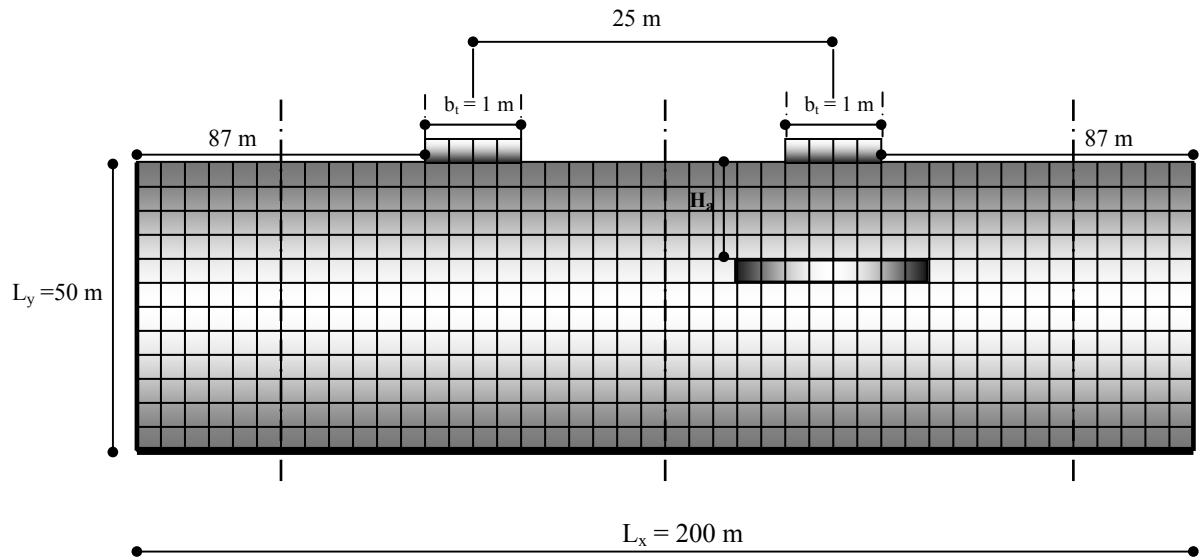


Şekil 5.10 Aktif yalıtımlı matematik model (SEY)

Son aşamada pasif yalıtım uygulaması olarak, dış yükün uzağındaki temel plağına farklı derinliklerde ve düşey doğrultuda bir yapay kaya oluşturulmuş (Şekil 5.11 ve 5.12) ve dinamik yüklerin etkisinin yer değiştirme cinsinden değişimleri incelenmiştir.



Şekil 5.11 Pasif yalıtım arazi modeli



Şekil 5.12 Pasif yalıtımlı matematik model (SEY)

Uygulamalarda 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.

$$(\text{çok etkili}) \quad 0 \leq A_t \leq 1 \quad (\text{etki yok}) \quad (5.2)$$

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

$$IR = \frac{c_{sb} \rho_b}{c_{ss} \rho_s} \quad (5.3)$$

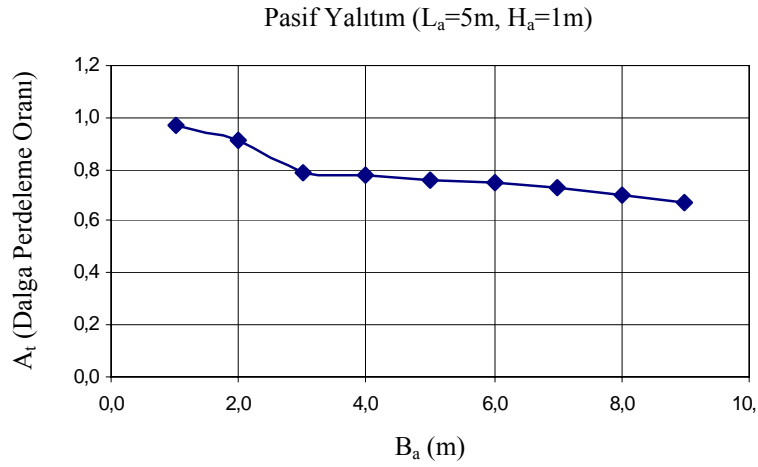
bağıntısıyla hesaplanmıştır. Burada;

c_{sb} : yapay anakayanın S dalgası kayma hızı

ρ_b : yapay anakayanın yoğunluğu

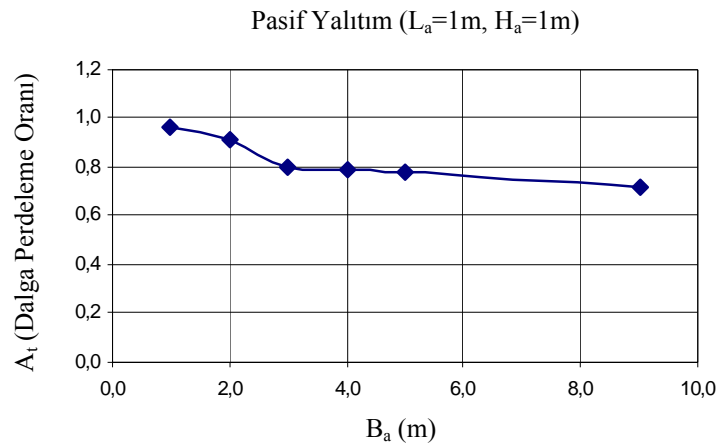
c_{ss} : zeminin kayma dalga hızı

ρ_s : zeminin yoğunluğunu ifade etmektedir.

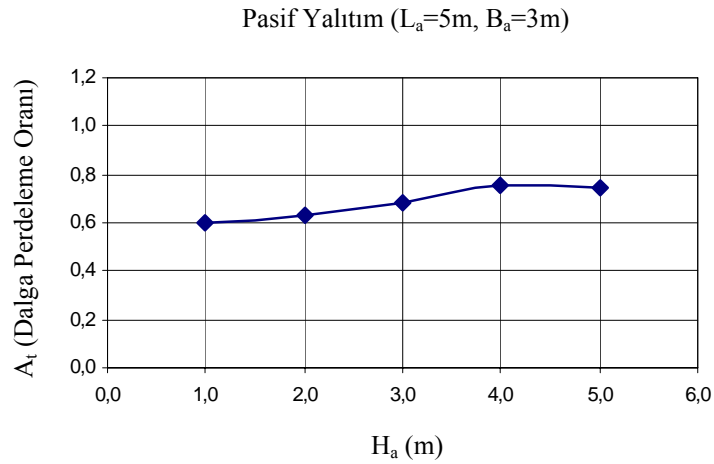


Şekil 5.13 Pasif yalıtım durumunda B_a 'ya bağlı A_t 'nin değişimi ($f=25$ Hz)

Şekil 5.13'de 25 Hz'te, pasif yalıtım için, yapay tabankayanın boyu $L_a=5$ m, yerleştirildiği derinlik $H_a=1$ m olmak üzere yapay kayanın farklı kalınlıklardaki (B_a) dalga perdeleme oranı incelenmiş ve yapay tabankayanın kalınlığının artmasına bağlı olarak, dalga perdeleme oranının da arttığı tespit edilmiştir. En yüksek kalınlık olarak $B_a=9$ m'lik bir yapay tabankaya modellenmesi incelenmiş ve yaklaşık % 30'luk bir perdeleme oranı tespit edilmiştir. Bir sonraki aşamada (Şekil 5.14) yapay kayanın boyunun değişimi incelenmiş ve aynı şekilde bu çalışmada da 9 m derinlikte yaklaşık % 30'a varan bir perdeleme oranı belirlenmiştir.

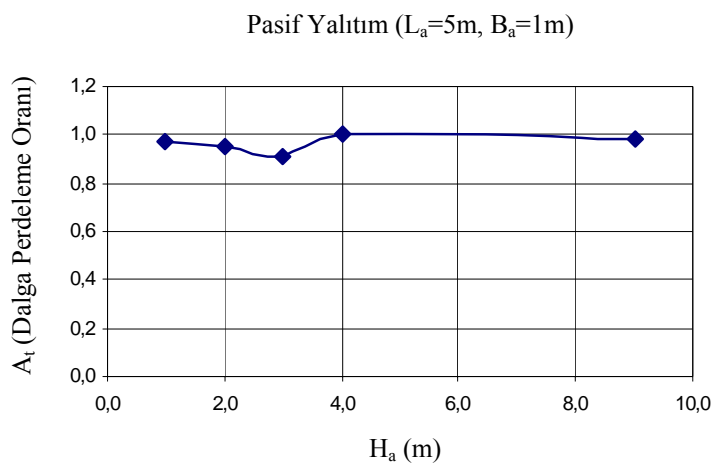


Şekil 5.14 Pasif yalıtım durumunda B_a 'ya bağlı A_t 'nin değişimi ($f=25$ Hz)

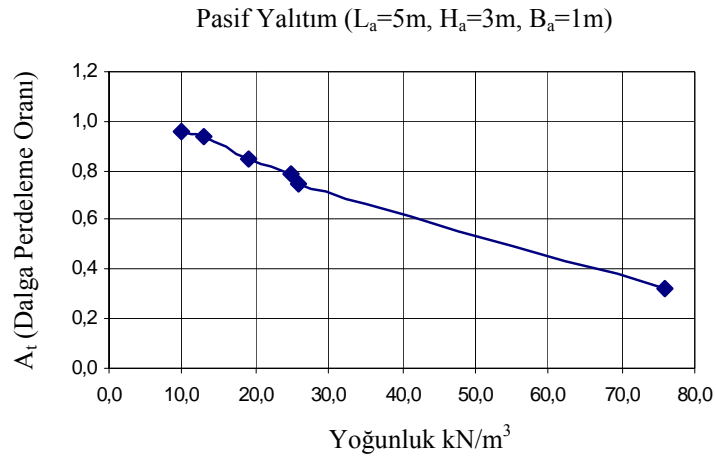


Şekil 5.15 Pasif yalıtım durumunda H_a 'ya bağlı A_t 'nin değişimi ($f=25$ Hz)

Şekil 5.15 ve Şekil 5.16'da 25 Hz'te, pasif yalıtım durumunda, yapay tabankayanın boyu 5 m olup, kalınlığı 1 m ve 3 m seçilmek üzere dalga bariyerinin etkisinin derinlik ile değişimi incelenmiştir. Çalışma sonuçları değerlendirildiğinde, aynı koşullar altında 3 m yüksekliğinde, 1 m derinliğinde olan dalga bariyerinde yaklaşık % 40 yalıtım olduğu tespit edilmiştir. Ancak bu etkinin derinlik ile beraber azaldığı ve bariyer yüksekliğinin azaltılması ile beraber bariyerin yalıtım özelliğini kaybettiği belirlenmiştir.

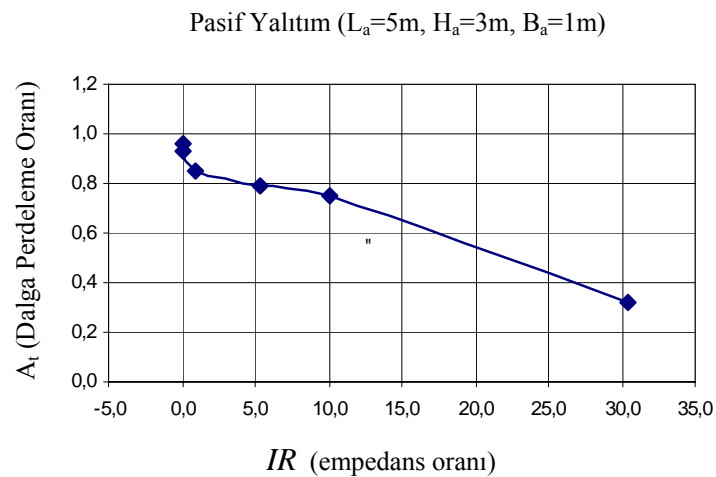


Şekil 5.16 Pasif yalıtım durumunda B_a 'ya bağlı A_t 'nin değişimi ($f=25$ Hz)

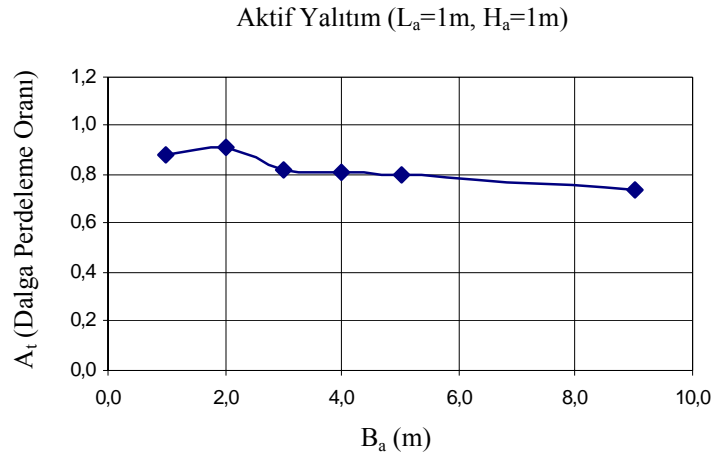


Şekil 5.17 Pasif yalıtım durumunda yapay kayanın yoğunluğuna bağlı A_t 'nin değişimi ($f=25$ Hz)

Bir diğer çalışma olarak dalga bariyerinin farklı yoğunluklarda imal edilmesi durumunda yalıtım etkisi incelenmiş ve sistemin rijitliğine bağlı empedans oranları araştırılmıştır (Şekil 5.17 ve 5.18). Bu çalışmalardan elde edilen sonuçlara göre, dalga bariyerinin imal edildiği betonun yoğunluğu arttıkça yalıtım etkisi de artmaktadır. Yoğunluğu 75 kN/m^3 olan bir malzeme ile bu dalga bariyerinin imal edildiği durumda, bu zemin koşullarında yaklaşık % 70 bir yalıtım sağlanacağı belirlenmiştir.

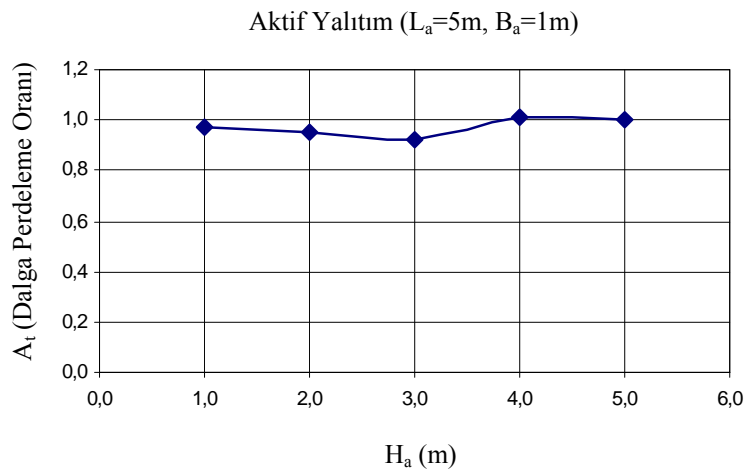


Şekil 5.18 Pasif yalıtım durumunda empedans oranına bağlı A_t 'nin değişimi ($f=25$ Hz)

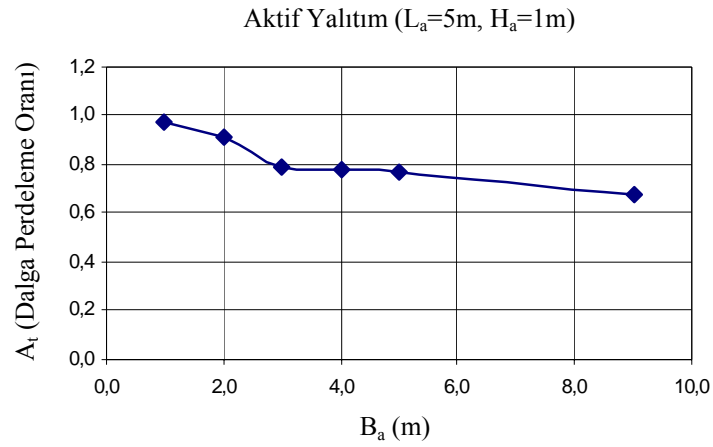


Şekil 5.19 Aktif yalıtım durumunda B_a 'ya bağlı A_t 'nin değişimi ($f=25$ Hz)

Şekil 5.19'da yapay tabankayanın boyu ve derinliği 1 m de sabit tutulmak koşulu ile bariyer kalınlığının aktif yalıtım pozisyonunda iken yalıtım etkisi görülmektedir. Burada da pasif yalıtımda olduğu gibi bariyerin kalınlığının artması ile beraber yalıtım etkisinin arttığı görülmektedir. Diğer bir çalışma olarak aktif yalıtım durumunda yapay tabankayanın yalıtım etkisinin derinlik ile beraber değişimini incelediğinde, sonuçlar pasif yalıtımda ki etki ile paralellik göstermiş ve derinlik ile beraber etkisini kaybetmiştir (Şekil 5.20).

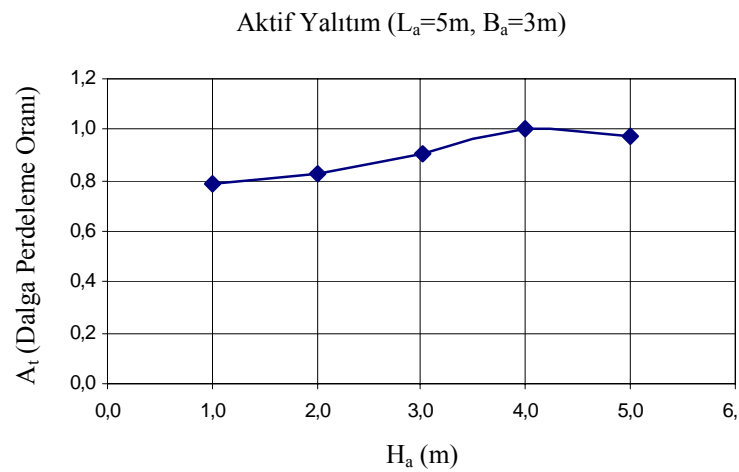


Şekil 5.20 Aktif yalıtım durumunda H_a 'ya bağlı A_t 'nin değişimi ($f=25$ Hz)

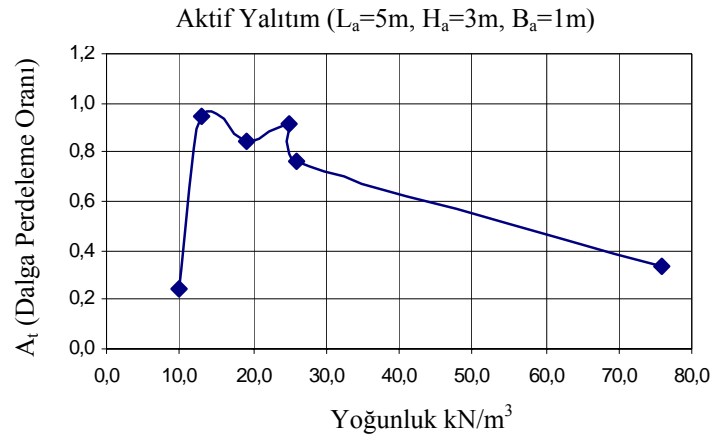


Şekil 5.21 Aktif yalıtım durumunda B_a 'ya bağlı A_t 'nin değişimi ($f=25$ Hz)

Dalga bariyerinin boyu 5 m ve yerleştirildiği derinlik 1 m seçilmiş ve yüksekliği ile beraber yalıtım etkisinin değişimi aktif durum için incelenmiştir. Bu durumda dalga bariyeri pasif yalıtımda ki davranışa benzerlik göstermiş ve kalınlığının artması ile beraber yalıtım etkisinin arttığını göstermiştir (Şekil 5.21). Aynı zemin koşullarında bariyerin boyu 5 m ve yüksekliği 3 m olmak üzere aktif durumda yalıtım etkisini incelediğinde boyutlarının büyütülmesine rağmen yapay tabankayanın yalıtım etkisinin genel bir azalma eğilimi içinde olduğu tespit edilmiştir (Şekil 5.22).

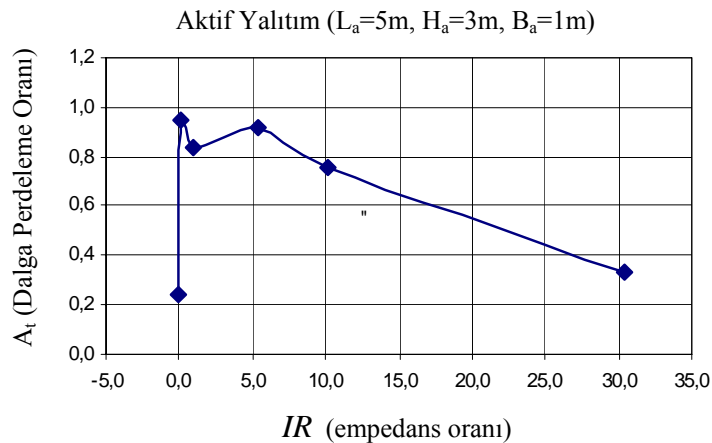


Şekil 5.22 Aktif yalıtım durumunda H_a 'ya bağlı A_t 'nin değişimi ($f=25$ Hz)

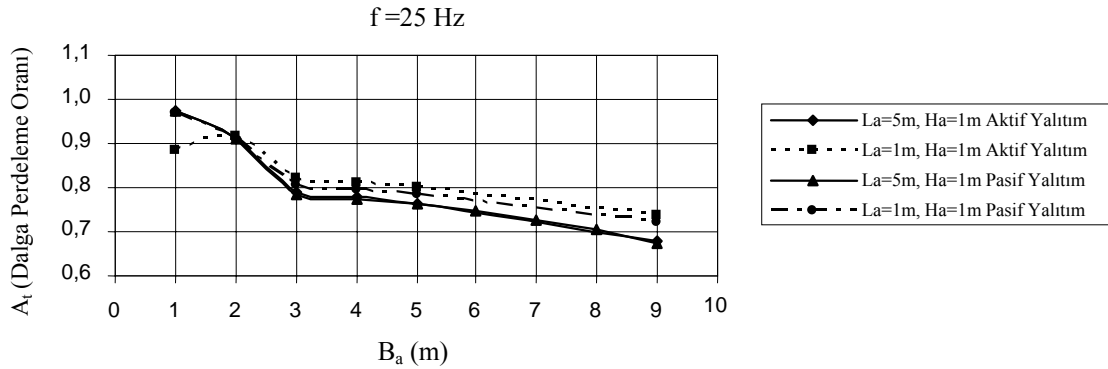


Şekil 5.23 Aktif yalıtım durumunda H_a 'ya bağlı A_t 'nin değişimi ($f=25\text{ Hz}$)

Aktif yalıtımda da bariyerin farklı yoğunluklarda imal edilmesi durumunda yalıtım etkisi incelenmiş (Şekil 5.23) ve sistemin rijitliğine bağlı empedans oranları araştırılmıştır (Şekil 5.24). Bu çalışmalar sonucunda, dalga bariyerinin imal edildiği malzemenin yoğunluğu arttıkça yalıtım etkisinin de arttığı görülmüştür. Dalga bariyerinin imal edildiği betonun yoğunluğu arttıkça yalıtım etkisi de artmaktadır. Yoğunluğu 75 kN/m^3 olan bir malzeme ile bu dalga bariyerinin imal edildiği durumda, bu zemin koşullarında yaklaşık % 70 bir yalıtım sağlanacağı belirlenmiştir.

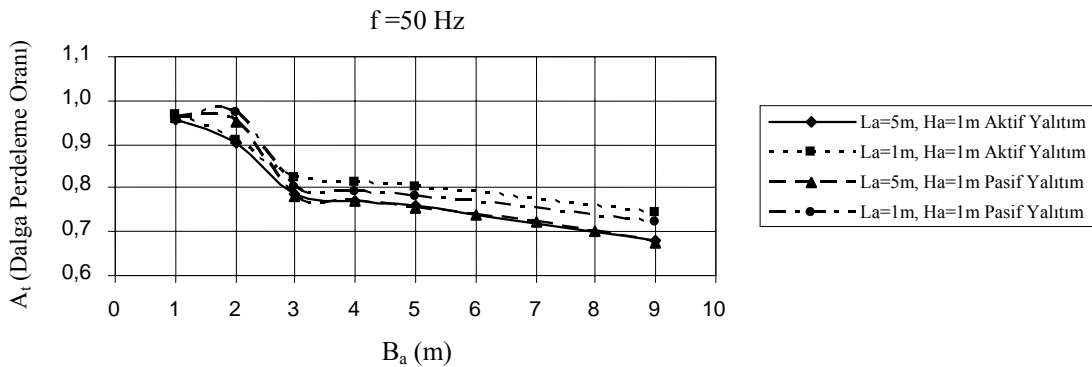


Şekil 5.24 Aktif yalıtım durumunda A_t 'nin değişimi ($f=25\text{ Hz}$)

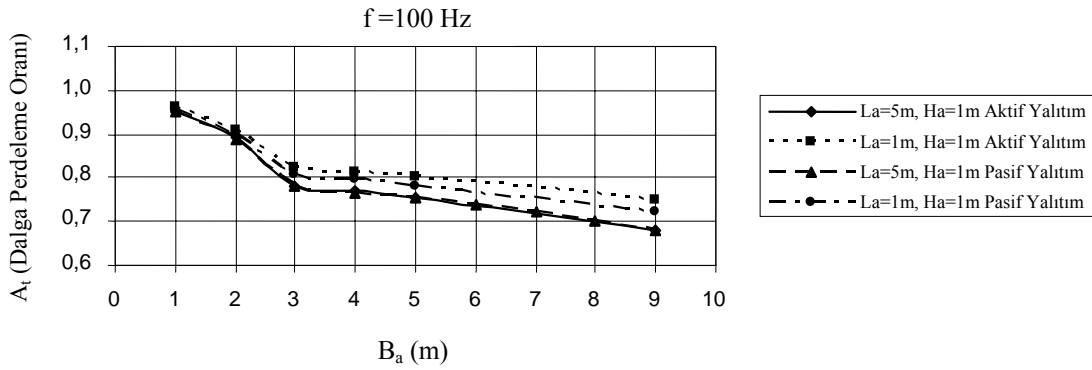


Şekil 5.25 B_a ya bağlı A_t'nin değişiminin yalıtım türlerine göre karşılaştırılması (f=25 Hz)

Şekil 5.25 de farklı boyutlarda aktif ve pasif yalıtım türünde dalga perdeleme oranının yapay tabankayanın yüksekliği ile değişimi gösterilmiştir. Yapılan araştırmalar sonucunda uygulanan yükün frekansı 25 Hz olması durumunda hem aktif yalıtım, hem de pasif yalıtım için dalga bariyerinin kalınlığının artması ile yalıtım etkisinin arttığı belirlenmiştir. Ayrıca bariyerin boyunun daha uzun olduğu durumlarda dalga bariyerinin daha iyi sonuç verdiği tespit edilmiştir. Uygulanan yükün frekansı 50 Hz olduğunda dalga perdeleme oranı, frekansın 25 Hz olduğu durumdaki gibi dalga bariyerinin kalınlığının artması ile yalıtım etkisinin arttığı belirlenmiştir. Dalga perdeleme oranının bariyer boyunun daha uzun olduğu durumlarda daha iyi sonuç verdiği tespit edilmiştir (Şekil 5.26).

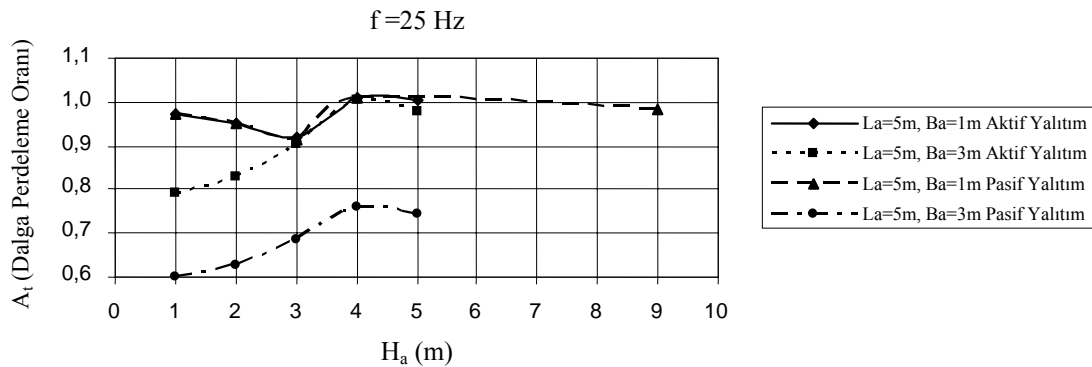


Şekil 5.26 B_a ya bağlı A_t'nin değişiminin yalıtım türlerine göre karşılaştırılması (f=50 Hz)

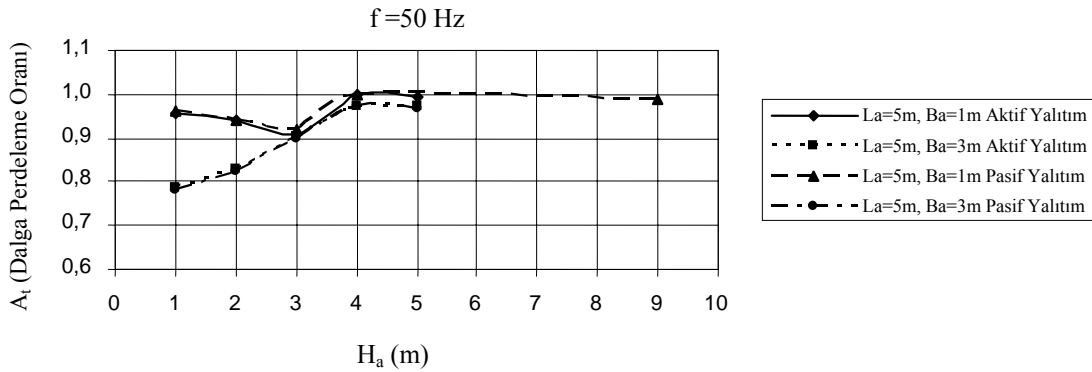


Şekil 5.27 B_a ya bağlı A_t 'nin değişiminin yalıtım türlerine göre karşılaştırılması ($f=100$ Hz)

Şekil 5.27'de aktif ve pasif yalıtım durumlarında, yapay tabankayanın kalınlığının değişimi ile perdeleme oranı arasında ki değişim gösterilmiştir. Burada şekil 5.25 ve şekil 5.26'da da görüldüğü gibi aktif yalıtım durumunda ve pasif yalıtım durumunda bariyerin boyunun uzaması yalıtım etkisini arttırmaktadır. Ayrıca farklı frekanslarda olmalarına rağmen dalga perdeleme oranları birbirlerine oldukça yakın değerler ortaya koymaktadır. Şekil 5.28'de $f=25$ Hz'te iki farklı boyuttaki yapay anakayanın derinlik ile değişimine bağlı olarak aktif ve pasif yalıtım durumunda yalıtım oranları gösterilmiştir. Bariyerin yüksekliğinin 3 m olduğu durumda hem aktif hemde pasif yalıtım durumlarının her ikisi içinde aynı etki gözlenmiş olup, pasif yalıtım durumunun aktif yalıtıma göre daha etkili olduğu belirlenmiştir.

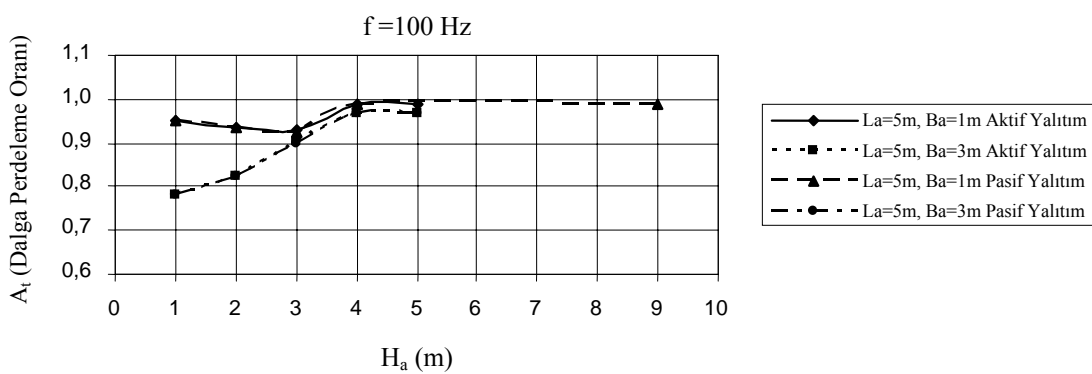


Şekil 5.28 H_a 'ya bağlı A_t 'nin değişiminin yalıtım türlerine göre karşılaştırılması ($f=25$ Hz)

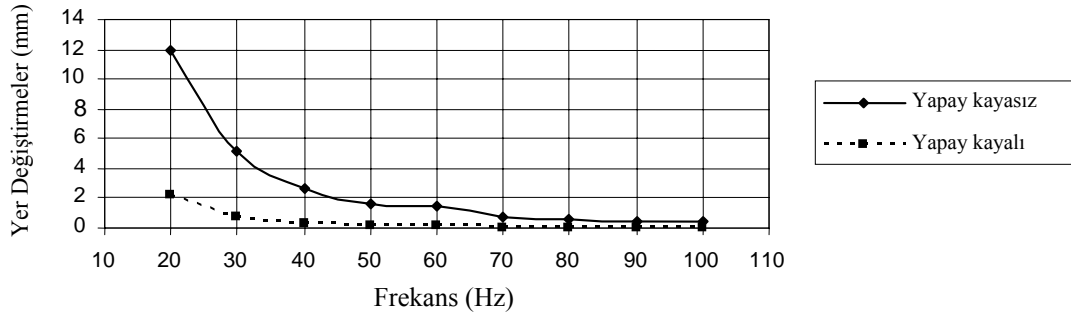


Şekil 5.29 H_a 'ya bağlı A_t 'nin değişiminin yalıtım türlerine göre karşılaştırılması ($f=50$ Hz)

Şekil 5.29 ve 5.30'da yüksek frekans değerlerinde iki farklı boyuttaki yapay tabankayanın derinlik ile değişimine bağlı olarak aktif ve pasif yalıtım durumunda dalga perdeleme oranları gösterilmiştir. Her iki durumda da boyu 5 m yüksekliği 3 m olan yapay anakayanın daha etkili olduğu belirlenmiştir. Burada aktif yalıtım durumundaki sonuçlar ile pasif yalıtımdaki sonuçlar birbirine çok yakındır. Yapay tabankayanın derinliğini incelediğimizde $f=25$ Hz'te ortaya çıkan sonuçlarda olduğu gibi bu iki frekansta da bariyerin 1 m derinlikte imal edilmesi durumunda, bu zemin formasyonunda % 25'lik bir yalıtım oranı ile daha etkili sonuç alınacağı tespit edilmiştir.

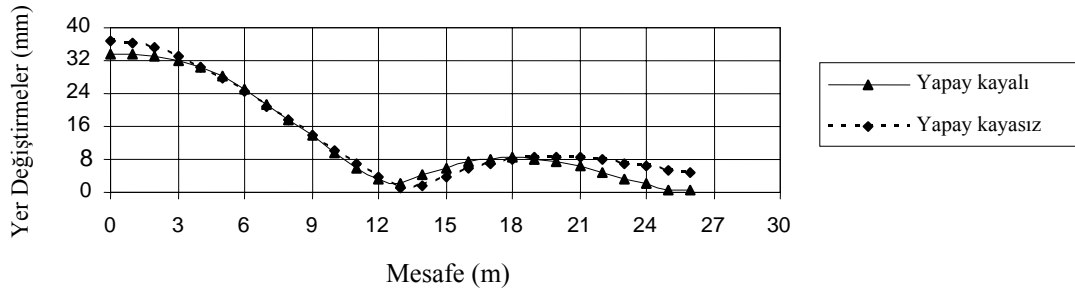


Şekil 5.30 H_a ya bağlı A_t 'nin değişiminin yalıtım türlerine göre karşılaştırılması ($f=25$ Hz)

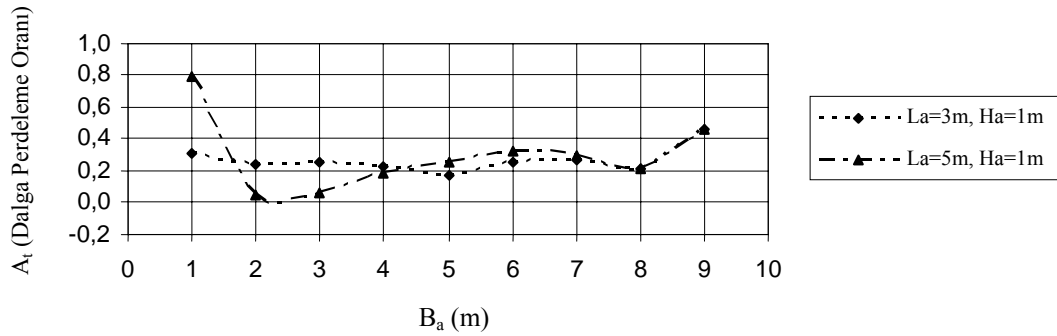


Şekil 5.31 Aktif yalıtım durumunda yer değiştirmenin frekansa bağlı değişimi

Şekil 5.31’de yer değiştirmenin frekansa bağlı değişimi incelenmiş olup, düşük frekansta daha büyük değerlerde yer değiştirmeler olduğu gözlenmiştir. Aynı şekilde yapay kayalı durumda da frekans değeri arttıkça yer değiştirmenin azaldığı, ayrıca yapay tabankayanın düşük frekanslarda daha fazla yalıtım özelliği sağladığı görülmüştür. Frekans büyüdükçe periyot küçülür. Küçük periyotlu dalgalarda büyük enerjili dalgalar anlamına gelir. Küçük periyotlu dalgalar tıpkı depremde olduğu gibi yer yüzeyinde büyük hareketlerin oluşmasına neden olur. Ayrıca bu dalgalar küçük periyotlu oldukları için nüfuz derinliği daha fazladır. Doğal olarak partiküllerin yerdeğiştirmesi daha büyük oranda gerçekleşecektir. Yer değiştirmenin iki temel blok arasındaki değişimi incelendiğinde minimum yer değiştirmelerin iki temel arasındaki mesafenin orta bölgesinde ve korunmak istenen yapının bulunduğu aralıkta olduğu belirlenmiştir. Bu duruma yapay tabankayanın yalıtım etkisinin katkısı da söz konusudur (Şekil 5.32).

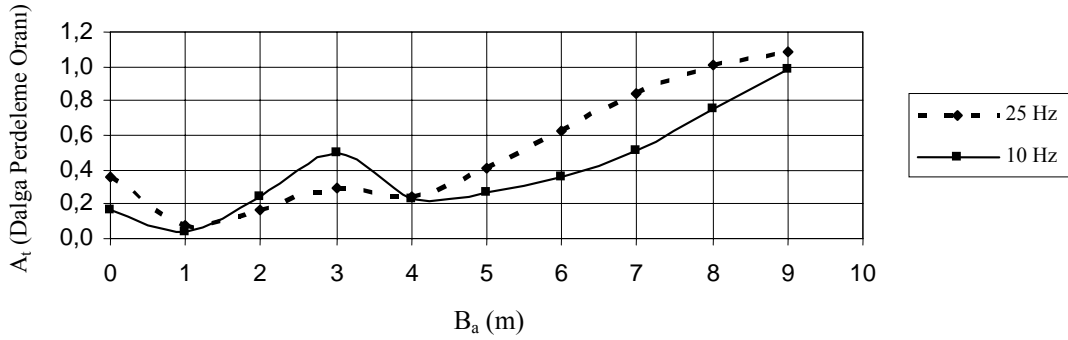


Şekil 5.32 Aktif yalıtım durumunda yer değiştirmenin uzaklığa bağlı değişimi

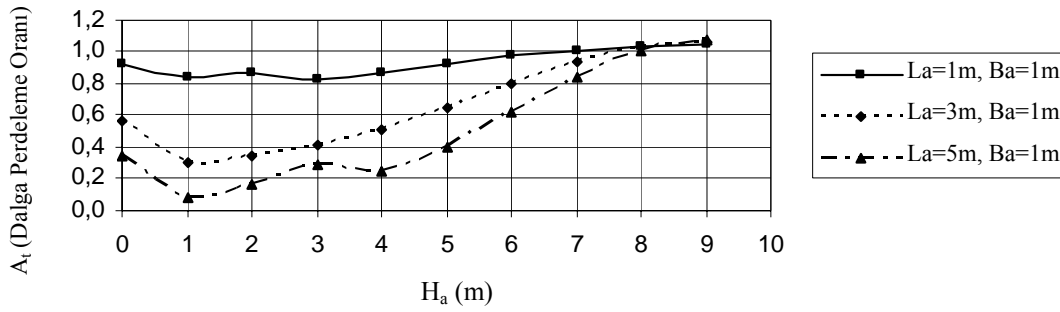


Şekil 5.33 Tek tabakalı zeminde yapay kayanın boyu L_a ve kalınlığı B_a 'ya bağlı A_t 'nin değişimi

Yapay tabankayanın inşa edildiği bölgenin tek tabakalı olarak incelemesi de yapılmıştır. Bu koşullarda yapay kayanın boyutlarının dalga yayılımına etkisi araştırıldığında, yapay kaya boyu (L_a) ve kalınlığı (B_a) arttığında perdeleme oranının etkisinin de arttığı tespit edilmiştir (Şekil 5.33). Diğer bir çalışmada dış yükün frekansının değişmesi durumunda yapay tabankaya boyutu ile ilişkisi incelenmiştir. Frekans değeri büyüdükçe yapay tabankaya boyutlarının da arttırılmasının etkili olacağı belirlenmiştir (Şekil 5.34).

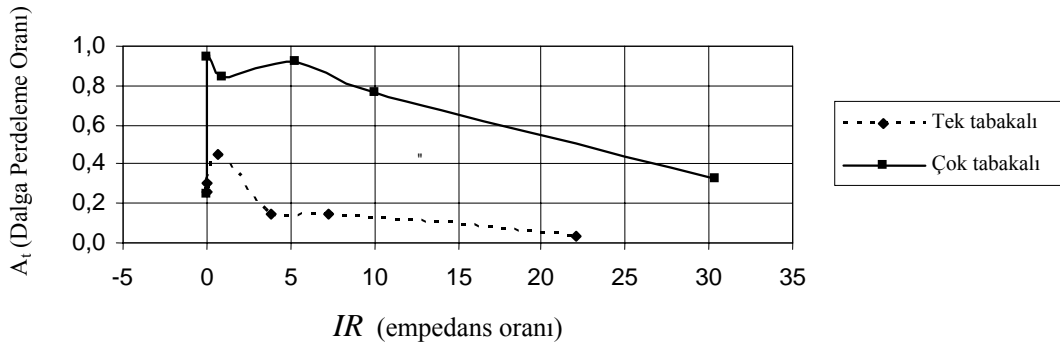


Şekil 5.34 Perdeleme oranının yapay anakayanın kalınlığı B_a 'ya bağlı değişimi

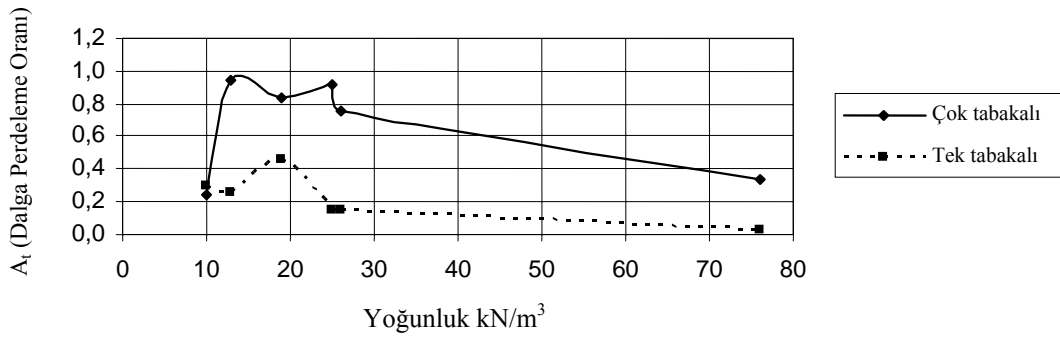


Şekil 5.35 Tek tabakalı zeminde yapay kayanın boyu ve derinliğine bağlı A_t 'nin değişimi

Şekil 5.35'de tek tabakalı zeminde farklı boyutlardaki yapay kayanın derinliğe bağlı etkileri incelenmiştir. Bu aşamada derinlik arttıkça yapay tabankayanın etkisinin azaldığı ve belirli bir derinlikten sonra yapay tabankayanın boyutundan bağımsız olarak yalıtım özelliğini kaybettiği tespit edilmiştir. Bir diğer çalışma olarak tek tabakalı bir zemin formasyonunda yapay anakayanın dalga perdeleme oranı da incelenmiş ve çok tabakalı zemine göre daha etkili olduğu belirlenmiştir (Şekil 5.36). Empedans oranlarında ki değişim incelendiğinde tek tabakalı zemindeki bariyerin yalıtım etkisi, çok tabakalı zemindeki bariyerin perdeleme oranına göre ortalama % 50 daha etkili olduğu tespit edilmiştir.



Şekil 5.36 Farklı zemin formasyonlarında empedans oranına bağlı A_i 'nin değişimi



Şekil 5.37 Farklı zemin formasyonlarında yoğunluk - A_i değişimi.

Şekil 5.37 de yapay tabankayanın dalga perdeleme oranının tek tabakalı zemin ile çok tabakalı zemin arasındaki değişimi karşılaştırılmıştır. Empedans oranlarında olduğu gibi burada da tek tabakalı zemin formasyonundaki dalga bariyerinin daha etkili olduğu belirlenmiştir. Özellikle yoğunluğu 75 kN/m^3 olan malzeme ile bariyerin imal edildiği tek tabakalı zemin formasyonunda, dalga bariyerinin perdeleme oranı değerleri % 95'lere ulaşmış ve çok iyi bir yalıtım sağladığı belirlenmiştir.

6. SONUÇLAR VE ÖNERİLER

Ddalga yayılma hızı zemin özelliklerine ve dış yükün karakterine bağlı olarak farklılıklar göstermektedir. Bunun sonucu olarak zeminlerdeki bu değişimleri tespit ederek, gerek korunacak yapılarda gerekse yeni inşa edilecek yapılarda bir takım önlemler alınması gerekmektedir.

Bu çalışmada geliştirilen matematik model ile farklı özellikteki zeminler için, farklı derinliklerde sistematik ve ayrıntılı parametrik araştırmalar yürütülerek sayısal sonuçlar elde edilmiş ve dalga yayılımına yapay tabankayanın etkileri araştırılmıştır.

Elde edilen veriler neticesinde yapay tabankayanın kalınlığının dalga yayılımının yalıtımına büyük etkisi olduğu gözlenmiştir. Yapay tabankayanın kalınlığı arttıkça dalga yayılımı azalmaktadır. Ayrıca yapay tabankayanın derinliğe bağlı olarak dalga yayılımına etkisi de incelenmiş ve derinliğin de zeminin fiziksel özelliklerine ve dış yükün frekansına bağlı olarak yalıtım etkisinin değiştiği tespit edilmiştir. Yapay tabankayanın rijitliğine bağlı olarak yapılan çalışmalarda ise zemin tabakasında daha rijit olan yapay tabankayanın dalga yayılımını azalttığı görülmüştür. Yapılan çalışmalarda, aktif yalıtım ile pasif yalıtım arasında etki farkları gözlenmiş olup, pasif yalıtımın aktif yalıtıma oranla daha etkin olduğu tespit edilmiştir.

Yapay tabankayanın inşa edildiği bölgenin tek tabakalı olması durumunda, pasif yalıtım ile aktif yalıtım arasında belirgin bir fark gözlenmemiştir, bu yüzden tek tabakalı zemin formasyonunda aktif veya pasif yalıtım çalışmalarında çevre ve arazi şartlarına göre uygun olan yalıtım modelinin seçilmesi önerilebilir. Ancak tek tabakalı zemin ile çok tabakalı zemin arasında bir değerlendirme yapıldığında tek tabakalı zemin formasyonunda yapay tabankayanın daha etkili olduğu görülmüştür.

Yapay tabankayalı yalıtım modelleri özellikle stratejik öneme haiz yapılarda (Nüler güç santralleri, barajlar, hastaneler, haberleşme merkezleri vb.) zeminlerde oluşan dalgaların perdelenmesinde kullanılabileceği tespit edilmiştir.

Bu tez çalışmasından elde edilen sonuçlar ileri aşamada yapılabilecek çalışmalar içinde yeni araştırma önerileri de ortaya çıkarmıştır.

Yapılan bu çalışmadan sonra daha sonraki araştırmalarda, kurulan modelin arazi koşullarında birebir uygulanması ile elde edilen sonuçlar nümerik sonuçlar ile karşılaştırılarak, arazi koşulları ile nümerik çalışma arasında bir uyum olması durumu incelenebilir. Bu araştırmaya bağlı olarak sadece nümerik çalışmalar yapılarak arazi deneylerine gerek duymadan, nümerik analiz ile yapay anakayanın yalıtım etkisi farklı koşullar için incelenerek, arazi şartlarına özel çözümler sunulabilir.

KAYNAKLAR

- [1] CANITEZ N., Jeofizikte modelleme,1997, İstanbul.
- [2] AYDINOĞLU M.N., Yapı Analizi ve Tasarımı süresince Statik ve Dinamik Yapı-Zemin Etkileşimi, Zemin Mekaniği ve Temel Mühendisliği 5. Ulusal Kongresi, ODTÜ, Ankara, 1994.
- [3] CELEBI, E.,GÜNDÜZ, N., An Efficient Seismic Analysis Procedure for Torsionally Coupled Multistorey Building Including Soil-Structure Interaction, Journal of Engineering and Environmental Sciences , Volume 29, Issue 3, 143-157, 2005.
- [4] KLEIN, R., ANTEST, H., HONEDECT, D.L., Efficient 3D modeling of vibration isolation by open trenches, Computers and Structures, 809-817, 1997.
- [5] CHOUW, N., PFLANZ, G., Reduction of structural vibrations due to moving load, Wave 2000, 251-268, Chouw&Schmid, Balkema, Rotterdam.
- [6] AL-HUSSAINI, T., M. Vibration isolation by wave barriers, Ph. D. Dissertation, State University of New York at Buffalo, 1992, USA.
- [7] LEUNG, K. L., BESKOS, D. E., AND VARDOULAKIS, I. G., Vibration isolation using open or filled trenches, Part 3: 2-D non-homogeneous soil, Computational Mechanics, 1990, 7, pp. 137-148.
- [8] ADAM M., ESTORFF O.V., Reduction of train-induced building vibrations by using open and filled trenches, Computers and Structures, 83, 11-24, 2005.
- [9] BAKER, J., M., An experimental study on vibration screening by in-filled trench barriers, M. S. Thesis, State University of New York at Buffalo, 1994,USA.
- [10] SCHMID, G., CHOUW, N., Soil vibration reduction due to local soil modification, the 10th earthquake engineering symposium, 1998, volume 3 pp. 2647-2651.
- [11] KÜYÜK, H. S. VE ÇELEBİ, E., Titreşim azaltıcı dalga bariyerlerinin sonlu elemanlar yöntemi ile simülasyonu, Kocaeli Deprem Sempozyumu, 23-25 Mart 2005, Kocaeli, 1061-1066.

- [12] KÜYÜK, S., SÜMER, Y., KIRTEL, O., VURAL, İ., ÇELEBİ E., ve FIRAT S. Sismik bariyer modellerinin tabakalı zemin ortamındaki dalga yayılışına etkileri, İMO Teknik Kongre, Antalya Yöresinin İnşaat Mühendisliği Sorunları Kongresi, 22-24 Eylül 2005, Antalya.
- [13] VURAL, İ., FIRAT, S., ÇELEBİ, E., KIRTEL, O., Dinamik Yükler Etkisi Altında Temel Titreşimlerinin Azaltılması İçin Sonlu Elemanlar Modeli”, Zemin Mekaniği ve Temel Mühendisliği Onbirinci Ulusal Kongresi, 2006, Trabzon, Türkiye.
- [14] VURAL, İ. , S. FIRAT, E. ÇELEBİ VE O. KIRTEL, Elastik Ortamda Yapay Ana Kayanın Dalga Yayılışına Etkileri, Yedinci Uluslar arası İnşaat Mühendisliğinde Gelişmeler Kongresi, 11-13 Ekim, Yıldız Teknik Üniversitesi, 2006, İstanbul, Türkiye.
- [15] KIRTEL, O., ÇELEBİ, E., FIRAT, S., VURAL, İ., Kuvvetli Yer Hareketlerinin Azaltılması İçin Geliştirilen Bir Dalga Bariyeri Modeli, Zemin Mekaniği ve Temel Mühendisliği Onbirinci Ulusal Kongresi, 2006, Trabzon, Türkiye.
- [16] KIRTEL, O., E. ÇELEBİ, S. FIRAT VE İ. , VURAL, Sismik Bariyer Modellerinin Elastik Ortamda Dalga Yayılışına Etkileri, Yedinci Uluslar arası İnşaat Mühendisliğinde Gelişmeler Kongresi, 11-13 Ekim, Yıldız Teknik Üniversitesi, İstanbul, Türkiye, 2006.
- [17] FORCHAP, E., VERBIC, B., Wave propagation and reduction of foundation vibrations, Berg-Verlag GmbH, Bochum, 1994, pp. 165-178.
- [18] 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.
- [19] 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.
- [20] SHEN-HAW JU, HUNG-TA LİN, 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
- [21] HİLDEBRAND, R., Effect of soil stabilization on audible band railway ground vibration, Soil Dynamics and Earthquake Engineering 24, 2004, 411–424.
- [22] HUNAIDI, O., Traffic Vibrations in Buildings, National Research, Council of Canada, June 2000, ISSN 1206-1220.

- [23] M. HESHAM EL NAGGAR AND ABDUL GHAFAR CHEHAB, Vibration barriers for shock-producing equipment, *Can. Geotech. J.* 42: 297–306 (2005).
- [24] GENİŞ, M., GERÇEK, H., Yer altı açıklıklarının dinamik tasarımı, V. Ulusal Kaya Mekaniği Sempozyumu, 2000, Isparta, Türkiye, pp. 66-72.
- [25] CELEP Z., Deprem mühendisliğine giriş ve depreme dayanıklı yapı tasarımı, İstanbul, 2000.
- [26] KRAMER S.L., Geoteknik deprem mühendisliği, 2003.
- [27] ÇELEBİ E., Planda Simetrik Olmayan Yapıların Zeminle Dinamik Etkileşimi, TDV/TR 041-70, İstanbul, Temmuz, 2001.
- [28] 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.
- [29] ÇELEBİ, E., FIRAT S., ÇANKAYA, İ., Dikdörtgen Rijit Temellerin Dinamik Empedans fonksiyonları, İMO Teknik Dergi, Yazı 252, 2006.
- [30] CELEBI, E., GUNDUZ A.N., Dynamic response of multistory buildings including soil-structure interaction in elastic layered media, European Conference on Computational Mechanics, München, Germany, August 31-September 3, 1999.
- [31] ÖNALP, A., Geoteknik Bilgisi, Trabzon, 1982.
- [32] AY, Z., Süleyman Demirel Üniversitesi mühendislik mimarlık fakültesi inşaat mühendisliği bölümü, Isparta, 2002.

ÖZGEÇMİŞ

İsa VURAL, 06.06.1982 de Sakarya' da doğdu. İlk, orta ve lise eğitimini Sakarya' da 1999 yılında tamamladı. 2000 yılında Sakarya Üniversitesi Teknik Eğitim Fakültesi Yapı Öğretmenliği Bölümünü kazandı. Teknik Eğitim Lisans eğitimini 2004 yılında tamamladıktan sonra Sakarya Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Yapı Öğretmenliği Bölümü Yüksek Lisans Programına yerleşti. 2006 yılından beri Sakarya Üniversitesi Teknik Eğitim Fakültesi Yapı Öğretmenliği Bölümünde araştırma görevlisi olarak çalışmalarına devam etmektedir.