



İSKENDERUN TEKNİK
ÜNİVERSİTESİ
LİSANSÜSTÜ EĞİTİM ENSTİTÜSÜ

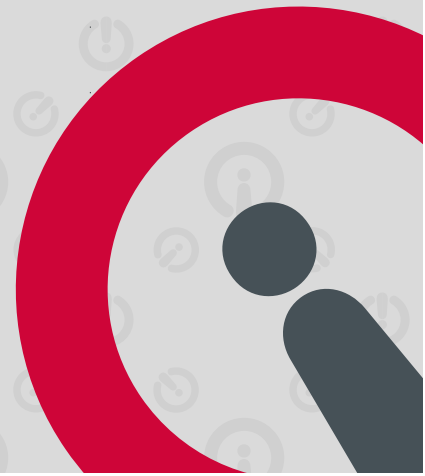
**YÜKSEK
LİSANS
TEZİ**

**BETON KAZIKLAR KULLANILARAK
OLUŞTURULAN SİSMİK
METAMALZEMELERİN
OPTİMİZASYONU İLE DEPREM
GENLİĞİNİN AZALTILMASI**

Şeyda Gülsüm KAYA

**İNŞAAT MÜHENDİSLİĞİ
ANABİLİM DALI**

HAZİRAN 2022





**BETON KAZIKLAR KULLANILARAK OLUŞTURULAN SİSMİK
METAMALZEMELERİN OPTİMİZASYONU İLE DEPREM GENLİĞİNİN
AZALTILMASI**

Şeyda Gülsüm KAYA

**YÜKSEK LİSANS TEZİ
İNŞAAT MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI**

**İSKENDERUN TEKNİK ÜNİVERSİTESİ
LİSANSÜSTÜ EĞİTİM ENSTİTÜSÜ**

Haziran 2022

Şeyda Gülsüm KAYA tarafından hazırlanan “BETON KAZIKLAR KULLANILARAK OLUŞTURULAN SİSMİK METAMALZEMELERİN OPTİMİZASYONU İLE DEPREM GENLİĞİNİN AZALTILMASI” adlı tez çalışması aşağıdaki jüri tarafından OY BİRLİĞİ/OY ÇOKLUĞU ile İskenderun Teknik Üniversitesi İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalında YÜKSEK LİSANS TEZİ olarak kabul edilmiştir.

Danışman: Prof. Dr. Umut Korkut SEVİM

İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı, İskenderun Teknik Üniversitesi

Bu tezin, kapsam ve kalite olarak Yüksek Lisans Tezi olduğunu onaylıyorum/onaylamıyorum.

.....
.....

Başkan: Unvanı Adı SOYADI

Anabilim Dalı, Üniversite Adı (Örnek: Endüstri Mühendisliği Anabilim Dalı, İskenderun Teknik Üniversitesi)

Bu tezin, kapsam ve kalite olarak Yüksek Lisans Tezi olduğunu onaylıyorum/onaylamıyorum.

.....
.....

Üye: Unvanı Adı SOYADI

Anabilim Dalı, Üniversite Adı (Örnek: Endüstri Mühendisliği Anabilim Dalı, İskenderun Teknik Üniversitesi)

Bu tezin, kapsam ve kalite olarak Yüksek Lisans Tezi olduğunu onaylıyorum/onaylamıyorum.

.....
.....

Üye: Unvanı Adı SOYADI

Anabilim Dalı, Üniversite Adı (Örnek: Endüstri Mühendisliği Anabilim Dalı, İskenderun Teknik Üniversitesi)

Bu tezin, kapsam ve kalite olarak Yüksek Lisans Tezi olduğunu onaylıyorum/onaylamıyorum.

.....
.....

Üye: Unvanı Adı SOYADI

Anabilim Dalı, Üniversite Adı (Örnek: Endüstri Mühendisliği Anabilim Dalı, İskenderun Teknik Üniversitesi)

Bu tezin, kapsam ve kalite olarak Yüksek Lisans Tezi olduğunu onaylıyorum/onaylamıyorum.

.....
.....

Tez Savunma Tarihi:/...../....

Jüri tarafından kabul edilen bu tezin Yüksek Lisans Tezi olması için gerekli şartları yerine getirdiğini onaylıyorum.

.....

Doç. Dr. Ersin BAHÇECİ
Lisansüstü Eğitim Enstitüsü Müdürü

ETİK BEYAN

İskenderun Teknik Üniversitesi Lisansüstü Eğitim Enstitüsü Tez Yazım Kurallarına uygun olarak hazırladığım bu tez çalışmada;

- Tez üzerinde Yükseköğretim Kurulu tarafından hiçbir değişiklik yapılamayacağı için tezin bilgisayar ekranında görüntülediğinde asıl nüsha ile aynı olması sorumluluğunun tarafıma ait olduğunu,
 - Tez içinde sunduğum verileri, bilgileri ve dokümanları akademik ve etik kurallar çerçevesinde elde ettiğimi,
 - Tüm bilgi, belge, değerlendirme ve sonuçları bilimsel etik ve ahlak kurallarına uygun olarak sunduğumu,
 - Tez çalışmada yararlandığım eserlerin tümüne uygun atıfta bulunarak kaynak gösterdiğimi,
 - Kullanılan verilerde herhangi bir değişiklik yapmadığımı,
 - Bu tezde sunduğum çalışmanın özgün olduğunu,
- bildirir, aksi bir durumda aleyhime doğabilecek tüm hak kayıplarını kabullendiğimi beyan ederim.

Şeyda Gülsüm KAYA

23/06/2022

BETON KAZIKLAR KULLANILARAK OLUŞTURULAN SİSMİK
METAMALZEMELERİN OPTİMİZASYONU İLE DEPREM GENLİĞİNİN
AZALTILMASI
(Yüksek Lisans Tezi)

Şeyda Gülsüm KAYA

İSKENDERUN TEKNİK ÜNİVERSİTESİ
LİSANSÜSTÜ EĞİTİM ENSTİTÜSÜ

Haziran 2022

ÖZET

Depremlerin yıkıcılığı kaçınılamaz bir gerçektir. Sismik etkiler ile ilgili dünyada kabul gören birçok risk azaltma stratejisi, sismik dalgaların yapıya ulaşmasını engellemek yerine yapıya entegre edilen cihazların kullanımıyla yapının izolasyonunu sağlamayı amaçlamaktadır. Geniş alanlara yayılabilen ve oldukça yıkıcı etkiye sahip olan düşük frekans aralığındaki sismik yüzey dalgalarını sönmölemek önemlidir çünkü bu dalgalar korunmak istenen yapılar ile rezonansa girerse tehlikeli sonuçlar doğurabilir. Bu tez çalışmasında, sismik metamalzemeler kullanılarak yapıların uzaktan sismik izolasyonlarını sağlayabilmek amaçlanmıştır. Beton kazıklar kullanılarak oluşturulmuş sismik metamalzemeler, kare örgü, üçgen örgü, dairesel örgü ve sinüzoidal örgü olmak üzere dört farklı örgü yapısında analiz edilmiştir. Analizler hem sayısal hem de deneysel olarak gerçekleştirilmiştir. Sayısal analiz Sonlu Elemanlar Yöntemi (SEY) tabanlı simölasyon programı ile gerçekleştirilmiştir. Zemin deneyleri sonucunda elde edilen veriler sayısal analizde kullanılmıştır. Öncelikle her bir örgü yapısı için birim hücre yapıları analiz edilerek bant diyagramı çizilmiş daha sonra hem frekans hem de zaman alanında çalışmalar gerçekleştirilmiştir. Deneysel analiz, sayısal analiz ile elde edilen optimum boyutlar kullanılarak birebir ölçekli olarak gerçekleştirilmiştir. Deney alanına yerleştirilen harmonik titreşim cihazı ile yüzey dalgaları oluşturulmuş ve bu dalgalar sahalara uygulanmıştır. Sismik metamalzemelerin uygulanmadığı sahalarda ölçümleri ivme ölçerlerle kaydedildikten sonra her bir örgü yapısında beton kazıklar sahalara uygulanarak yeniden saha ölçümleri gerçekleştirilmiştir. Zaman alanında elde edilen bu veriler frekans alanına dönüştürölmüş ve sismik haritalandırılmaları yapılmıştır. Sismik metamalzemenin uygulanmadığı ve uygulandığı sahalarda birbirleri ile karşılaştırılmış ve sismik yüzey dalgalarının yer değıştirme oranları elde edilmiştir. Sayısal çalışmalar deneysel çalışmalar ile doğrulanmıştır. Sayısal ve deneysel çalışmalar sonucunda her örgü yapısı için iletim kayıpları olduğu, sismik yüzey dalgalarının toplam yer değıştirmelerinin azaldığı ve burumun sonucunda sismik yüzey dalgalarının düşük frekans aralığında sönmölenebileceğı görölmüştür.

Anahtar Kelimeler : Sismik metamalzeme, beton kazık, deprem, yüzey dalgaları

Sayfa Adedi : 83

Danışman : Prof. Dr. Umur Korkut SEVİM

REDUCİNG EARTHQUAKE AMPLİTUDE BY OPTİMİZİNG SEİSMİC
METAMATERIALS CREATED USİNG CONCRETE PİLES
(M. Sc. Thesis)

Şeyda Gülsüm KAYA

ISKENDERUN TECHNICAL UNIVERSITY
INSTITUTE OF GRADUATE STUDIES

June 2022

ABSTRACT

The destructiveness of earthquakes is an unavoidable reality. Many of the world's accepted risk reduction strategies regarding seismic effects aim to isolate the structure by using devices integrated into the structure instead of preventing seismic waves from reaching the structure. It is important to dampen seismic surface waves in the low frequency range, which can spread over large areas and have a very destructive effect, because these waves can have dangerous consequences if they resonate with the structures to be protected. In this thesis, it is aimed to provide remote seismic isolation of structures by using seismic metamaterials. Seismic metamaterials formed using concrete piles were analyzed in four different mesh structures: square mesh, triangular mesh, circular mesh and sinusoidal mesh. Analyzes were carried out both numerically and experimentally. Numerical analysis was carried out with the Finite Element Method (FEM) based simulation program. The data obtained as a result of the soil tests were used in the numerical analysis. First of all, unit cell structures were analyzed for each lattice structure and band diagram was drawn, and then studies were carried out in both frequency and time domains. Experimental analysis was carried out on a one-to-one scale using optimum dimensions obtained by numerical analysis. Surface waves were created with the harmonic vibration device placed in the experimental area and these waves were applied to the fields. After the measurements of the areas where seismic metamaterials were not applied were recorded with accelerometers, field measurements were carried out again by applying concrete piles to the fields in each mesh structure. These data obtained in the time domain have been converted to the frequency domain and their seismic mapping has been made. The areas where seismic metamaterial is not applied and applied are compared with each other and displacement rates of seismic surface waves are obtained. Numerical studies have been confirmed by experimental studies. As a result of numerical and experimental studies, it has been seen that there are transmission losses for each lattice structure, the total displacements of seismic surface waves are reduced, and as a result of torsion, seismic surface waves can be damped in the low frequency range.

Key Words : Seismic metamaterial, concrete pile, earthquake, surface waves
Page Number : 83
Supervisor : Prof. Dr. Umur Korkut SEVİM

TEŞEKKÜR

Yüksek lisans tezimin her aşamasında bütün bilgi birikimi ve tecrübesiyle beni yönlendiren, hiçbir yardımını esirgemeyen çok değerli danışman hocam Sayın Prof. Dr. Umur Korkut Sevim'e sonsuz saygı ve teşekkürlerimi sunarım.

Çalışmalarım boyunca desteklerini esirgemeyen, her türlü soruma cevap vererek bilgi birikimlerini benimle paylaşan saygıdeğer hocalarım Prof. Dr. Muharrem Karaaslan'a ve Dr. Öğretim Üyesi Murat Öztürk'e sonsuz teşekkür ederim.

Tezimin sayısal çalışmalarında yardımcı olan değerli hocalarım Doç. Dr. Zafer Özer'e, Prof. Dr. Murat Örnek'e ve Araştırma Görevlisi Fatih Özkan Alkurt'a teşekkürü borç bilirim.

Ayrıca bugüne kadar hiçbir maddi ve manevi desteğini eksik etmeyen, her zaman bana güvenen ve her konuda yanımda olan kıymetli anneme, babama ve ablalarımın en içten teşekkürlerimi sunarım.

İÇİNDEKİLER

	Sayfa
ÖZET	iv
ABSTRACT.....	v
TEŞEKKÜR.....	vi
İÇİNDEKİLER	vii
ÇİZELGELERİN LİSTESİ.....	ix
ŞEKİLLERİN LİSTESİ.....	x
SİMGELER VE KISALTMALAR.....	xii
1. GİRİŞ.....	1
2. LİTERATÜR ARAŞTIRMASI.....	4
3.ZEMİN ORTAMINDA DALGA YAYILIŞI.....	14
3.1. Cisim Dalgaları	14
3.1.1. P (basınç) dalgası	14
3.1.2. S (kayma) dalgası.....	15
3.2. Yüzey Dalgaları	16
3.2.1. Rayleigh dalgası.....	16
3.2.2. Love dalgası	18
3.3. Yük Kaynakları ve Etkileri	20
4. MATERYAL VE YÖNTEM.....	21
4.1. Materyaller	21
4.1.1. Zemin	21
4.1.2. Beton Kazıklar	24
4.1.3. Harmonik titreşim kaynağı.....	25
4.1.4. İvme ölçerler	26

	Sayfa
4.1.5. Veri toplama ünitesi	26
4.2. Yöntem	27
4.2.1. Kare örgü yapısının birim hücresi	27
4.2.2. Üçgen örgü yapısının birim hücresi	29
4.2.3. Dairesel örgü yapısının birim hücresi	31
4.2.4. Sinüzoidal örgü yapısının birim hücresi	32
4.2.5. Frekans alanında analiz yöntemi ve saha tasarımları	32
4.2.6. Zaman alanında analiz yöntemi ve saha tasarımları	35
4.2.7. Deneysel saha çalışması	39
5. ARAŞTIRMA BULGULARI VE TARTIŞMA	45
5.1. Kare Örgü Analiz Sonuçları	45
5.2. Üçgen Örgü Analiz Sonuçları	51
5.3. Dairesel Örgü Analiz Sonuçları	60
5.4. Sinüzoidal Örgü Analiz Sonuçları	66
5.5. Dört Farklı Örgü Yapısının Karşılaştırılması	72
6.SONUÇ VE ÖNERİLER	75
KAYNAKLAR	79
DİZİN	83

ÇİZELGELERİN LİSTESİ

Çizelge	Sayfa
3.1. Dinamik yük kaynaklarına ait frekans ve genlik aralığı	20
4.1. SPT (N) verileri	22
4.2. SPT deney sonuçları ve zeminin sınıflandırılması.....	22
4.3. Sismik dalga hızları ve tabaka kalınlıkları.....	23
4.4. S-dalgası V_{s30} :355m/sn	24
4.5. Zeminin dinamik özellikleri.....	24
4.6. Harmonik titreşim kaynağının özellikleri	25
5.1. Kare örgü iletim kayıpları.....	46
5.2. Kare örgü için deneysel ölçüm verileri	49
5.3. Üçgen örgü iletim kayıpları	52
5.4. Üçgen örgü için deneysel ölçüm verileri	56
5.5. Dairesel örgü iletim kayıpları	60
5.6. Dairesel örgü için deneysel ölçüm verileri	63
5.7. Sinüzoidal örgü iletim kayıpları.....	67
5.8. Sinüzoidal örgü için deneysel ölçüm verileri.....	69

ŞEKİLLERİN LİSTESİ

Şekil	Sayfa
Şekil 3.1. P dalgası yayılma prensibi (Ercan, 2001)	14
Şekil 3.2. S dalgası yayılma prensibi (Ercan, 2001)	15
Şekil 3.3. Rayleigh dalgası yayılma prensibi.....	17
Şekil 3.4. Rayleigh dalgasının poisson oranı ve derinliğe bağlı olarak hareketi (Kramer,2003).....	18
Şekil 3.5. Love dalgası yayılma prensibi	19
Şekil 3.6. Love yüzey dalgalarının oluşabileceği en basit şartlar (Kramer, 2003).	19
Şekil 3.7. Love dalgalarının derinlik değişimine göre tanecik yer değiştirme genliği (Kramer, 2003).....	19
Şekil 3.8. Yük çeşitleri ve oluşma nedenleri.....	20
Şekil 4.1. Test sahasının lokasyonu (a) ve sahanın uydu görüntüsü (b)	21
Şekil 4.2. Harmonik titreşim cihazı	25
Şekil 4.3. Tek eksenli (a) ve 3 eksenli (b) ivme ölçerler	26
Şekil 4.4. Veri toplama ünitesi ve bilgisayar yardımıyla veri kaydı ve TESTLAB ara yüzü.....	27
Şekil 4.5. Kare örgü yapısı (a), Brillouin bölgesinin en yüksek simetri noktaları (b) ve birim hücrenin 3 boyutlu görüntüsü.....	28
Şekil 4.6. Üçgen örgü yapısı (a), Brillouin bölgesinin en yüksek simetri noktaları (b) ve birim hücrenin 3 boyutlu görüntüsü (c).....	30
Şekil 4.7. Dairesel örgü yapısı	32
Şekil 4.8. Sinüzoidal örgü yapısı	32
Şekil 4.9. Kare örgü ile saha tasarımı (a), üçgen örgü ile saha tasarımı (b), dairesel örgü ile saha tasarımı (c), sinüzoidal örgü ile saha tasarımı (d).	33
Şekil 4.10. Kare örgü için sınır yük ve ölçüm alanları (a), üçgen örgü için sınır yük ve ölçüm alanları (b), dairesel örgü için sınır yük ve ölçüm alanları (c) ve sinüzoidal örgü için sınır yük ve ölçüm alanları (d)	34

Şekil 4.11. Kare örgü, noktasal yük ve ölçüm noktaları (a), üçgen örgü, noktasal yük ve ölçüm noktaları (b).....	35
Şekil 4.12. Dairesel örgü, noktasal yük ve ölçüm noktaları (a), sinüzoidal örgü, noktasal yük ve ölçüm noktaları (b)	36
Şekil 4.13. Sismik yüzey dalgaları (a) uyarma darbeleri (b)	38
Şekil 4.14. Deneysel çalışma sahaları.....	39
Şekil 4.15. İvme ölçerlerin konumları	41
Şekil 4.16. Harmonik titreşim cihazı yeri (a), ivme ölçerlerin yerleştirilmesi (b).....	42
Şekil 4.17. Zaman alanı verilerinin frekans alanına dönüşümü.....	43
Şekil 5.1. Kare örgü bant diyagramı	45
Şekil 5.2. Kare örgü iletim karakteristiği.....	46
Şekil 5.3. Kare örgü yapısı 9 Hz frekansında frekans alanında toplam yer değiştirme.....	47
Şekil 5.4. 9 Hz frekansında zaman alanında toplam yer değiştirme simülasyon ortalarında (a) ve simülasyon sonlarında (b)	48
Şekil 5.5. Deneysel çalışmada 9 Hz frekansında sismik metalmalzemersiz alanda yer değiştirme (a) ve sismik metalmalzeme uygulanan alanda yer değiştirme (b).....	50
Şekil 5.6. Üçgen örgü bant diyagramı	51
Şekil 5.7. Üçgen örgü iletim karakteristiği	52
Şekil 5.8. 7 Hz frekansında frekans alanına toplam yer değiştirme (a) ve 9 Hz frekansında frekans alanında toplam yer değiştirme (b).....	53
Şekil 5.9. 7 Hz frekansında zaman alanında toplam yer değiştirme simülasyon ortalarında ve simülasyon sonlarında (a) , 9 Hz frekansında zaman alanında toplam yer değiştirme simülasyon ortalarında ve simülasyon sonlarında (b)	54
Şekil 5.10. Deneysel çalışmada 7 Hz frekansında sismik metalmalzemersiz alanda yer değiştirme (a) ve sismik metalmalzeme uygulanan alanda yer değiştirme (b).....	58
Şekil 5.11. Deneysel çalışmada 9 Hz frekansında sismik metalmalzemersiz alanda yer değiştirme (a) ve sismik metalmalzeme uygulanan alanda yer	

değiştirme (b)	59
----------------------	----

Sayfa

şekil 5.12. Dairesel örgü iletim karakteriştiği	60
şekil 5.13. 8,5 Hz frekansında frekans alanına toplam yer değiştirme.....	61
şekil 5.14. 8,5 Hz frekansında zaman alanında toplam yer değiştirme simülasyon ortalarında (a) ve simülasyon sonlarında (b)	62
şekil 5.15. Deneysel çalışmada 8,5 Hz frekansında sismik metamalzemesiz alanda yer değiştirme (a) ve sismik metamalzeme uygulanan alanda yer değiştirme (b)	65
şekil 5.16. Sinüzoidal örgü iletim karakteriştiği	66
şekil 5.17. 9 Hz frekansında frekans alanına toplam yer değiştirme.....	67
şekil 5.18. 9 Hz frekansında zaman alanında toplam yer değiştirme simülasyon ortalarında (a) ve simülasyon sonlarında (b)	68
şekil 5.19. Deneysel çalışmada 9 Hz frekansında sismik metamalzemesiz alanda yer değiştirme (a) ve sismik metamalzeme uygulanan alanda yer değiştirme (b)	71

SİMGELER VE KISALTMALAR

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

Simgeler

cm

Santimetre

cm²

Santimetrekaire

cm³

Santimetreküp

g

Gram

Hz

Hertz

kg

Kilogram

mm

Milimetre

m

Metre

m²

Metrekare

m³

Metreküp

MPa

Megapaskal

N

Newton

Pa

Paskal

s

Saniye

Kısaltmalar

Açıklamalar

HFD

Hızlı Fourier Dönüşümü

SEY

Sonlu Elemanlar Yöntemi

1. GİRİŞ

Dünya üzerinde can ve mal kaybının yaşandığı en büyük doğal afetlerden biri depremlerdir. Türkiye jeolojik konumu olarak aktif fay hatlarının bulunduğu bir bölgede yer almaktadır. Bu bölge içerisinde bulunan fayların kırılması sonucu faylarda biriken enerji boşalarak sismik dalgalar halinde yayılır. Yayılan bu sismik dalgalar alt ve üst yapılara zarar verir. Deprem dalgaları sadece yapıları değil etki ettiği bölgelere göre (hastaneler, nükleer santraller, okullar vb.) sivil hayatı da etkiler. Deprem dalgalarının yıkıcı etkilerinden korunmak için yapının statığı, dinamiği, taşıyıcı sistemi ve zemini ile ilgili önlemler tercih edilir. Bu önlemlerin mevcut yapılarda uygulanması çok zordur. Depremlerin engellenmesi pek mümkün olmasa da sismik dalgalarının yaratmış olduğu sosyoekonomik zararları azaltmak için hem yeni sistemler hem de yeni malzemeler bulmak önemli bir çalışma konusu olmuştur. Metamalzemelerin sismik dalgaların engellenmesi üzerine etkisi bu çalışma konularından biridir. Metamalzemeler, doğada hazır halde bulunmayan, istenilen özelliklere göre özel kompozit malzemelerdir. Metamalzemeler negatif kırılma indisine ve açısına sahip olup uygun geometrik ve yapısal şartlarda dalga genliğini azaltır. Elektromanyetik, termal, akustik, elastik vb. dalga türlerini zayıflatan sismik metamalzemeler, son yıllarda sismik yüzey dalgalarının etkilerini izole etme konusunda da ön plana çıkmıştır (Brule ve diğerleri, 2014). İzolasyon, zemin içerisinde yayılan sismik yüzey dalgalarının korunması istenen bölgeye ulaşmadan engellenmesi olarak açıklanabilir. Bir zemin ortamındaki izolasyon, sismik metamalzemeler kullanılarak sismik yüzey dalgalarının zemin içerisindeki ilerleyişinde bir süreksizlik yaratılarak oluşturulabilir. Elastik bir davranışa sahip olan dalgalar, sismik metamalzemelerin uygulandığı zemin ortamı içerisinde kırılabilir fakat %100 izolasyon sağlamak mümkün değildir. Bu yüzden, sismik yüzey dalgalarının etkileri zayıflatılarak en aza indirgenebilir. İzolasyon, aktif izolasyon ve pasif izolasyon olarak iki grupta incelenebilir. Aktif izolasyon, sismik metamalzemenin dalga kaynağının önüne yerleştirilmesi, pasif izolasyon ise sismik metamalzemenin korunması istenen alanın veya yapının önüne konulması olarak açıklanabilir (Balkan, 2007). Sismik metamalzemenin, derinliği, eni ve boyu (geometrik özellikleri), içinin boş imal edilmesi veya yoğunluğu farklı malzemeler ile doldurulması (sondaj delikleri, kauçuk dolgulu kazıklar, çelik kazıklar, PVC dolgulu kazıklar vb.), sahadaki dizilim şekli gibi birçok parametrenin izolasyon açısından önemli olabileceği düşünülmektedir.

Sismik dalgalar, cisim dalgaları ve yüzey dalgaları olarak iki ana gruba ayrılır. Cisim dalgaları yani P (birincil ya da basınç) ve S (ikincil ya da kesme) dalgaları, yüksek frekanslara sahiptir ancak güçlü depremler haricinde yıkıcı değildirler. Love ve Rayleigh dalgalarını kapsayan yüzey dalgaları ise daha düşük frekansa sahiptir ve depremlere bağlı oluşan hasarların büyük bir kısmından sorumludurlar. Sismik yüzey dalgalarının yapılara ulaşmasını engellemek için bir savunma kalkanı oluşturmak özellikle 1-10 Hz arasındaki düşük frekansa sahip dalgalar için oldukça önemlidir. Çünkü bu frekans aralığı yapıların mevcut rezonans frekansına denk gelmektedir(Chopra, 2017). Yüzey dalgalarının bu frekansı yapıların doğal titreşimi ile rezonansa girerse, jeolojik ortama bağlı olarak çok tehlikeli olabilir.

Bu tez çalışmasında, beton kazıklar kullanılarak oluşturulmuş sismik metamalzemelerin zemine uygulanması ile deprem dalgalarının genliğinin azaltılması amaçlanmıştır. Literatürde bir dizi sondaj deliğinin sismik metamalzeme olarak kullanılması önerilse de, toprak stabilitesi ve yer altı su seviyesinin yüksek olması gibi nedenlerden dolayı uygulanması sınırlıdır (Huang ve Shi, 2013). Beton kazıklar, hem zemin yük taşıma kapasitesini arttırdığı için hem de yeraltı su seviyesinin yüksek olması durumunda uygulanabilir olduğu için sismik yüzey dalgalarını engellemede sismik metamalzeme olarak kullanılabilir. Tez çalışmasında kare, üçgen, sinüzoidal ve dairesel dizilime sahip dört farklı saha tasarlanmış ve her bir saha için hem teorik hem de deneysel çalışmalar yapılarak yüzey dalgalarının ilerleyişi analiz edilmiştir. Çalışma, oldukça yıkıcı etkiye sahip olan düşük frekans alanında yapılmıştır. Saha çalışmasının gerçekleştirileceği zeminin mühendislik özellikleri çeşitli deneyler ile belirlenmiştir. Teorik çalışmalar, sonlu elemanlar yöntemi (SEY) tabanlı ticari yazılım programı kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Öncelikle birim hücre yapıları analiz edilerek bant diyagramları oluşturulmuştur ve böylece önerilen saha tasarımlarının etkinliği ile ilgili ön görüş sağlanmıştır. Daha sonra her bir dizilim için sismik metamalzemenin uygulanmadığı ve sismik malzemenin uygulandığı iki farklı saha tasarlanmış, bu sahalar frekans alanında simüle edilmiş, dalga ilerleyişleri gözlemlenmiş ve iletim kayıpları elde edilmiştir. Sayısal analizde son olarak sismik yüzey dalgalarının yer değiştirmelerinin test süresi boyunca görülebilmesi için zaman alanında bir çalışma gerçekleştirilmiştir. Bütün dizilim şekilleri için saha tasarımları yapılmış ve her saha için zaman alanında simülasyonlar gerçekleştirilmiştir. Teorik çalışmada sismik metamalzeme boyutları ve malzeme özellikleri deneme yanılma yolu ile optimum olarak elde edilmiş ve bu boyutlar deney sahasında bire bir ölçekli olarak uygulanmıştır. 0.15 m çapında ve 2 m

derinliğinde sondaj delikleri açılmış, açılan bu delikler C30/37 beton ile doldurulmuştur. Tam ölçekli olarak gerçekleştirilen deneysel çalışmada, sismik yüzey dalgaları elde edebilmek amacıyla düşük frekans aralığında yüzey dalgaları oluşturabilen bir harmonik titreşim kaynağı kullanılmıştır. Her bir frekans için 120 sn'lik titreşim uygulanmıştır. Sismik metamalzemenin etkinliğini görebilmek amacıyla öncelikle metamalzemeler yerleştirilmeden önce orijinal sahanın ölçümleri yapılmış daha sonra her bir dizilim şekli için oluşturulan sahalarda ölçümler yapılmıştır. Ölçümler, sismik metamalzemelerin aralarına ve sahaların arkalarına yerleştirilen ivme ölçerler ile kaydedilmiştir. Zaman alanında elde edilen veriler hızlı Fouirer dönüşümü (HFD) kullanılarak Matlab programında frekans alanına dönüştürülmüş, dönüştürülen bu veriler jeostatiksel enterpolasyon yöntemi kullanılarak haritalandırılmıştır. Boş sahalarda ve sismik metamalzemenin uygulandığı sahalarda birbirleri ile karşılaştırılmıştır. Deneysel analizden elde edilen veriler ile teorik analizde elde edilen verilerin birbiriyle olan uyumu incelenmiştir.

2. LİTERATÜR ARAŞTIRMASI

Geng, Zhu ve Chong (2018) çalışmalarında iki farklı malzemeden oluşan tek boyutlu sismik metamalzemelerin sismik dalgaların zayıflatılması üzerine etkisini araştırmışlardır. Sismik metamalzemelerin sahip oldukları bant aralıklarındaki değişimleri, farklı özelliklere sahip malzemelerin birleşimi ile analitik olarak incelemişlerdir. Analiz sonuçlarına göre boşluk genişliği göz önüne alındığında iki malzeme arasındaki yoğunluk farklarının daha yüksek olmasının sismik dalgaların zayıflatılmasında daha etkili olduğunu gözlemlemişlerdir. Ayrıca sismik metamalzeme olarak yumuşak ve daha düşük yoğunluklu hafif malzemelerin daha düşük oranlarda kullanılmasının dalga zayıflatma konusunda daha faydalı olacağını belirtmişlerdir.

Miniaci, Krushynska, Bosia ve Pugno (2016) çalışmalarında, kılavuzlu ve yüzeysel dalgaların sayısal analizini, topraktaki yayılım etkilerini ve büyük ölçekli metamalzemeler ile pasif izolasyonun uygulanabilirliğini sonlu elemanlar yöntemi (SEY) ve 3D dağılım analizi kullanarak araştırmışlardır. Çalışmalarında 3-8 Hz frekans aralığındaki dalgaların etkili olabileceği yapılara odaklanıp uygun metamalzeme yapılandırarak optimum tasarım parametrelerini belirlemişlerdir. Sonuçlar incelendiğinde, yüzeysel ve kılavuzlu sismik dalgaların büyük ölçüde azaltılabileceğini ve yapıların sismik dalgaların etkisine karşı uygun hale getirilebileceğini belirtmişlerdir.

Kim ve Das (2013) çalışmalarında, akustik metamalzemelerden sismik bir gölge zonu oluşturmak için yeni bir yöntem geliştirmişlerdir. Etrafında birkaç delik bulunan büyük boş kutuların korumak istenen alanın etrafına gömülmesiyle sismik dalgaların hayali hale geleceğini belirtmişlerdir. Birçok kutudan oluşan bu sismik metamalzemelerin enerjiyi ses ve ısıya dönüştürecek bir sistem olduğunu belirtmişlerdir. Bunun yanı sıra gölge zonu yönteminin en önemli özelliğinin sismik metamalzemelerin arkasında kalan tüm yapıları koruması olduğunu belirtmişlerdir.

Lim ve Reddy (2019) önemli yapıları deprem etkilerinden koruyabilmek amacıyla tek katmanlı homojen bir zemine ve altı katmanlı bir zemine iki tip çelik kesit uygulamışlardır. Önerdikleri yapıları düşük frekanslarda sayısal olarak analiz etmişlerdir. Her iki zemin tipine uygulanan çelik kesitler için bant yapılarını elde etmişler ve bu bant yapılarında bant boşlukları gözlemlemişlerdir. Alt katmanın malzeme özelliğine (zemin profiline), çelik

malzemelerden oluşan rezonatörün geometrik şekli ve yüksekliğine bağlı olarak bant boşluklarının yerinin ve genişliğinin değiştiğini belirtmişlerdir. Tabakalı zemin ortamına uygulanan iki çelik kesit uygulamasında da 1.5'ten daha büyük kısmi bant boşlukları elde etmişlerdir. Elde ettikleri nispeten geniş bant boşluklarının çok düşük frekans aralığında olduğunu göstermişlerdir. Frekans alanı ve zaman alanı çalışmaları ile bu bant boşluklarının yerlerini ve genişliklerini doğrulamışlardır. Sonuç olarak yüzey dalgasının genliğinde %50'den fazla azalma tespit etmişlerdir.

Kaçın ve arkadaşları (2021a), kare şeklinde konumlandırılmış sismik metamalzemeler kullanarak sayısal ve deneysel çalışmalar gerçekleştirmişlerdir. Deprem dalgalarını engelleyebilecek fononik kristaller belirlemiş ve prototipler yapmışlardır. Sayısal çalışmaları için sonlu elemanlar yöntemi (SEY) tabanlı program ile gerçekleştirmişler ve deneysel alanda kullanacakları optimum boyutları belirlemişlerdir. Sismik metamalzeme olarak periyodik olarak dizilmiş silindirik sondaj deliklerini kullanmışlardır. Sayısal çalışmaları sonucunda 8,2 Hz, 13 Hz, 27 Hz ve 32,4 Hz frekanslarında bant boşlukları elde etmişlerdir. Deneysel analizlerini, kullandıkları titreşim cihazının yüksek frekanslara çıkamaması nedeniyle düşük frekanslarda gerçekleştirmişlerdir. Analiz sonuçlarında 8,44 Hz frekansında %11.11 oranında yüzey dalgalarının sönümlendiği görülmüştür.

Zeng ve diğerleri (2019) çalışmalarında, üretilmesi kolay çelik ve kauçuktan oluşan yeni bir sismik metamalzeme önermişlerdir. Önerdikleri sismik metamalzemenin sismik dalgalar üzerine etkisini incelemek için sayısal simülasyon yöntemi kullanmışlardır. Geliştirdikleri yeni sismik metamalzemenin bant aralığı özelliklerini incelemişlerdir. Simülasyon sonuçları incelendiğinde, yeni sismik metamalzemenin 3.5-10 Hz aralığında geniş bant boşluğu verdiğini gözlemlemiş böylelikle düşük frekanslı sismik dalgaları zayıflattığını belirtmişlerdir.

Wu ve diğerleri (2021) teorik olarak gerçekleştirdikleri çalışmalarında, zemin yüzeyindeki sütunlar ve zemin içerisine gömülen çekirdek-kabuk bölümlerinden oluşan iki farklı malzemenin birleşiminden meydana gelen yeni bir sismik metamalzeme üzerine çalışmışlardır. Çalışmalarını Rayleigh dalgaları üzerinde 4-20 Hz aralığında yapmışlardır. Bu sismik metamalzemenin kendini oluşturan diğer iki parça ile karşılaştırılmasında daha düşük frekanslarda daha geniş bant aralığı oluşturduğunu gözlemlemişlerdir. Sonuç olarak, sismik metamalzemenin dalga genliğini -10 dB'den fazla zayıflattığını gözlemlemişlerdir.

Zeng ve diğeri (2021) çalışmalarında, 6,7-17,2 Hz aralığında sütun benzeri ters T şeklinde yeni bir sismik metamalzeme üzerine çalışmışlardır. Önerilen bu malzemenin geometrik ve malzeme özelliklerinin ultra geniş bant boşluğu üzerine etkisini incelemişlerdir. T şeklindeki sismik metamalzemenin ultra geniş bant boşluğunun merkez frekansını ve bant genişliğini arttırdığını ve yüzey dalgalarının etkilerinin azaldığını gözlemlemişlerdir.

Zhang, Luo, Hong ve Deng (2021) çalışmalarında, zemin içerisinde periyodik olarak yerleştirilmiş çapraz ve kare çelik kesitlerin birleşiminden oluşan 4 farklı sismik metamalzemenin lamb dalgalarının yayılımı üzerine etkisini araştırmışlardır. Bant boşluğunu, titreşim modlarını ve sismik metamalzemelerin özelliklerinin etkilerini araştırmak için sonlu elemanlar yöntemini kullanmışlardır. Deney sonuçları incelendiğinde, 20 Hz'nin altında 3 bant boşluğuna sahip sismik metamalzemelerin düşük frekanslı dalgaların kontrolü için ilgi çekici olduğunu belirtmişlerdir. Kare çelik kesitlerden oluşan sismik metamalzemelerin, çapraz kesitli sismik metamalzemelerden daha geniş bant aralığı oluşturduklarını gözlemlemişlerdir.

Huang ve diğeri (2021) çalışmalarında, hendek tipi dalga bariyerlerinin betonarme ve poliüretan katmanlardan oluşan sismik metamalzemeler ile doldurulmasının dalga izolasyonu üzerine etkisini araştırmışlardır. Deney kapsamında boş hendek, uzun bariyer, kısa bariyer ve iki kısa bariyerden oluşan periyodik sistemlerin etkilerini büyük ölçekli saha deneyleri ile incelemişlerdir. Deney sonuçları incelendiğinde, en iyi performansı boş hendeğin vermesi gerektiğini düşünmelerine rağmen bazı frekans aralıklarında uzun dolu bariyerlerin boş hendeğe göre daha iyi sonuç verdiğini ve uzun bariyerin kısa mesafelerde kısa bariyere göre daha iyi performans gösterdiğini gözlemlemişlerdir. Bariyer sayısının etkisini ise aynı uzunluktaki bir kısa bariyer ve iki kısa bariyerin kullanılması ile kıyaslamışlardır. Sonuçta iki kısa bariyerin her zaman tek kısa bariyerden daha verimli olduğunu tespit etmişlerdir.

Colombi, Roux, Guenneau, Gueguen ve Craster (2016), doğal rezonansa sahip metamalzemeler olarak ormanların Rayleigh dalgalarını zayıflatma kabiliyetini araştırmak için bir çalışma yapmıştır. 150 Hz'den daha düşük frekansa sahip olan Rayleigh dalgalarının yumuşak tortul bir zeminde yayılmasını sağlamış ve deneylerini küçük bir orman alanında gerçekleştirmişlerdir. Ağaçların etkisi ile iki ayrı frekansta geniş bant boşluğu oluşmuş ve bu bant boşlukları sayesinde güçlü bir zayıflamanın gerçekleştiğini anlamışlardır.

Chen, Qian, Scarpa, Zuo ve Zhuang (2019), çok katmanlı bir zeminde kara taşımacılığında kaynaklanan 10Hz'den düşük frekanslardaki yüzey dalgalarını sismik metamalzemelerle zayıflatmak için bir çalışma yapmıştır. Sismik metamalzeme olarak, çok katmanlı zemine periyodik olarak uygulanmış beton kazıkları kullanmışlar ve laboratuvar ölçeğinde deneysel bir analiz yapmışlardır. Daha sonra, katmanlı zeminin yüzey dalgalarını zayıflatmadaki etkisini görmek için sayısal simülasyonlar yapmışlardır. Deney sonuçları incelendiğinde çok katmanlı zeminlere uygulanan derin sismik metamalzemelerin 7.2 Hz'e kadar geniş bir bant boşluğu oluşturduğunu ve buna bağlı olarak yüzey dalgalarının zayıflatabildiğini gözlemlemişlerdir. Bu sistemin nükleer santraller, petrol tankı, hastaneler ve sivil hayatı etkileyebilecek yapıların korunması için kullanılabilirliğini belirtmişlerdir.

Jiang, Yin, Liao ve Xie (2021) doğal olarak dar bir bant aralığına sahip olan lokal rezonanslı metamalzemeler yerine düşük frekanslı titreşimleri azaltmak için hem lokal rezonans hem de Bragg saçılma bant boşlukları oluşturabilen üç boyutlu ve tek fazlı elastik metamalzemeleri önermişlerdir. Kübik bir yapının merkezine küresel bir kütle koyarak gerçekleştirdikleri birim hücrenin fazla yer kaplamaması için kenarları ve içi boşaltılmış ve küresel kütle çubuklarla kübik çevreye tutturulmuştur. Çalışma sayısal olarak gerçekleştirilmiş simülasyonlara ve teorik modellere dayanılarak analiz edilmiştir. Bragg saçılma bant aralığı ile lokal rezonans bant aralığının üst üste getirilmesiyle geniş bir bant boşluğu elde edilebileceğini görmüşler ve ürettikleri bir numune ile deneysel çalışmalar yaparak çalışmalarını doğrulamışlardır.

Silva ve Cabezas (2013) çalışmalarında, lineer elastisite teorisi denklemleri ve klasik Maxwell denklemi arasındaki benzerliği incelemişler ve akustik metamalzemeler kullanarak sismik dalgaların genliğini azaltacak yeni bir yöntem önermişlerdir. Silindirik kabuk tipi dalga bariyeri oluşturulup korunmak istenen yapının çevresine yerleştirilmesiyle sismik dalgaların belli frekans aralığında yapıyı etkilemeyen dalgaya dönüştürülebileceğini belirtmişlerdir.

Zeng ve diğerleri (2020) çalışmalarında, matruşkaya benzer yeni bir sismik metamalzemenin sismik dalgalara karşı etkisini incelemişlerdir. Dağılım eğrileri ve iletimi simüle edebilmek için sonlu elemanlar yöntemini ve dağılım eğrilerini kullanmışlardır. Deney sonuçları incelendiğinde, matruşkanın sahip olduğu katman sayısı arttıkça rezonans modları, bant aralığı ve genişliğinin de arttığını gözlemlemişlerdir. Bununla birlikte matruşka benzeri

sismik metamalzemenin 0,1-13,1 Hz aralığındaki yüzey dalgalarını azalttığını da belirtmişlerdir.

Du, Zeng, Huang ve Yang (2017) kılavuzlu Lamb dalgalarına ve yüzey dalgalarına sismik bir kalkan oluşturabilmek amacıyla beton dolu çelik kazıkların zemine kare örgü yapısı ile periyodik olarak uygulanmasıyla oluşturulan iki boyutlu elastik bir metamalzeme önermişlerdir. Sayısal analizlerini sonlu elemanlar yöntemi kullanarak gerçekleştirmişlerdir. Kılavuzlu Lamb dalgaları için analiz yapılırken ilk olarak silindirik kazıklar kullanılarak bir bant aralığı elde edilmiştir. Daha sonra kazık şekli kare olarak değiştirilmiş ve analiz gerçekleştirilmiştir. İki kazık şekli karşılaştırıldığında kare kazık şeklinin kullanılmasıyla elde edilen bant diyagramında daha geniş bir bant boşluğu oluşmuştur ve ayrıca kare kazık şekli ile istenilen daha düşük frekans aralıklarına ulaşılabilmiştir. Yüzey dalgaları için yapılan analizde de düşük frekans aralığında tam bir bant boşluğu elde etmişlerdir.

Palermo, Krödel, Marzaň ve Daraio (2016) Rayleigh dalgalarından yapıyı koruyabilmek amacıyla zemine gömülü metabariyer yapısını önermişlerdir. Metabariyer yapıları, yaylar tarafından asılı olarak tutulan silindirik yapılardır. Rayleigh dalgaları ile etkileşime giren rezonatörlerin hareketli kütleleri zayıflamalara neden olmuştur. 4-7 Hz frekanslarında bir bant boşluğu oluşturarak yüzey dalgalarının yaklaşık %60 sönümlenmesini sağlamışlardır. Teorik olarak buldukları sonuçları değerlendirmek için küçük ölçekli bir deney gerçekleştirmişler ve sayısal olarak yaptıkları tahmini doğrulamışlardır.

Witarto ve diğerleri (2018) sismik izolasyonun sağlanabilmesi amacıyla mikrometre ve nanometre ölçekli sismik metamalzemelerin kendilerinden oldukça büyük ölçekli meta yapılara uyarlanmasını incelemişlerdir. Bu periyodik temel uygulamasını özellikle küçük modüler reaktörlerin korunması için uygulanmasını araştırmışlardır. Gerçekleştirdikleri bu çalışmada 1D periyodik temel tasarlamışlardır ve frekanslar için bant boşlukları elde etmişlerdir. Önerdikleri bu periyodik temel yapısı ile üst yapının izole edilebileceğini ve izole edilmeyen yapıya iletim hızının %90 azaltılarak daha küçük yer değiştirmenin sağlanabileceğini göstermişlerdir.

Pu, Meng ve Shi (2020) çalışmalarında, zemin özelliklerini değiştiren dalga bariyerleri kullanarak yüzey dalgalarının teorik ve deneysel olarak yayılımını incelemişlerdir. Yüzey dalgalarının zayıfladığını göstermek için dağılım analizi yapmışlardır. Deney sonuçları

incelendiğinde, yüzey dalgalarının zayıfladığı bölgenin yalnız bant aralığını değil geçici yüzey modlarını da içerdiğini gözlemlemişlerdir. Ayrıca deney sonuçlarının kazık ve hendek bariyerleri ile elde edilen sonuçlarla da uyumlu olduğunu belirtmişlerdir.

Yan ve diğerleri (2014), tasarladıkları periyodik yapıyı üst yapının temeli olarak kullanarak periyodik temel oluşturmuşlardır. 2 boyutlu bu periyodik temelleri öncelikle teorik olarak analiz etmiş daha sonra ölçekli deneysel çalışmalarını gerçekleştirmişlerdir. Teorik çalışmalarının sonucuna göre periyodik temelde oluşan bant boşluklarına düşen S ve P dalgalarının sönmülenebileceğini görmüşlerdir. Deneysel çalışmalarında periyodik temelli ve periyodik temelsiz yapılar üzerindeki ivmeleri kaydetmişler ve karşılaştırmışlardır. Sonuçta titreşimlerin yalıtılması için 2 boyutlu periyodik temellerin kullanılabilirliğini deneysel olarak göstermişlerdir.

Lim, Li ve Zhao (2020), çalışmalarında hafif mimarili kafes metamalzemesinin titreşim azaltma kapasitesini incelemişlerdir. Kafes metamalzemesinin özelliklerini hem teorik hem de deneysel olarak incelemişlerdir. Sinüzoidal şekilli kafes metamalzemesinin Bragg bant aralığı oluşturduğunu belirtmişlerdir. Deneysel ve teorik sonuçların mükemmel bir uyum içinde olduğunu ve önerilen kafes metamalzemenin dalgaların yayılımını kontrol etmek için uygulanabilir olduğunu belirtmişlerdir.

Kaçın ve diğerleri (2021b), üçgen dizilimde silindirik delikler kullanarak düşük frekanstaki sismik dalgaları engellemek için bir çalışma gerçekleştirmişlerdir. Çalışmalarını hem sayısal hem de deneysel olarak yürütmüşler ve sayısal çalışmalarını sonlu elemanlar yöntemi kullanarak gerçekleştirmişlerdir. Simülasyon çalışmalarını 50 Hz frekansına kadar geniş bir frekans aralığında yapmışlardır. Bant diyagramında 25 Hz ve 36 Hz frekanslarında iki bant boşluğu olduğu görülmüş buna bağlı olarak bu frekanslarda sismik dalganın tamamen durdurulabileceğini görmüşlerdir. Deneysel analizlerini daha düşük frekanslarda gerçekleştirmişler ve sismik dalgaların 8 Hz frekansında oldukça zayıfladığını tespit etmişlerdir. Deneysel ölçüm sonuçlarına göre sismik metamalzemeler ile zemin arasındaki empedans uyumuna bağlı olarak güçlü bir zayıflama gerçekleşmiş ve sonuçta sismik dalgaların yaklaşık üçte ikisi oluşturdukları yapının arkasına geçebilmiştir.

Çelebi ve diğerleri (2009), çalışmalarında içi boş ve içi doldurulmuş hendek bariyerlerinin hem aktif hem de pasif izolasyon durumunda zemin titreşimlerinin yayılımı üzerine etkisini

araştırmışlardır. Hendek bariyerlerin içini su, beton ve bentonit malzemeleri ile doldurmuşlardır. Deneysel sonuçları incelendiğinde, hendek bariyerinin topraktan daha yumuşak malzemeler ile doldurulmasının pasif izolasyon için daha etkili olduğunu belirtmişlerdir. Ayrıca içi boş veya doldurulmuş hendek bariyerlerinin titreşim izolasyonunda etkili olduğunu belirtmişlerdir.

Barkan (1962), ilk yüzey dalgası engelleme yöntemi olan açık hendek çalışmasını ilk kez gerçekleştirmiştir. Palplanış duvarlara sahip açık hendekleri kullanarak trafikten kaynaklanan titreşimlerin engellenmesiyle bir yapının korunmasını hedeflemiştir. Oluşturduğu dalga bariyerinin kullanılabilirliğini analiz etmek için saha çalışmaları yapmıştır. Fakat titreşimleri engelleyememiş ve sistemin etkisiz olduğunu söylemiştir. Yaptığı bu çalışma sonucunda kullandığı çelik saçların ebatlarının büyütülmesi gerektiğini belirtmiştir.

Haupt (1981) titreşimleri engellemek amacıyla bir dizi dalga bariyeri oluşturmuş ve bu bariyerlerin etkinliğini incelemek amacıyla küçük ölçekli deneysel bir analiz gerçekleştirmiştir. Kum zemin üzerine uyguladığı dalga bariyerleri ile laboratuvar testlerini yapmış ve bu sonuçlara göre titreşimlerin genliğinin önerdiği yapı sayesinde %50 oranında azaldığını belirtmiştir.

Ülgen ve Toygar (2015) titreşim izolasyonunu sağlayabilmek için açık ve dolu hendekleri dalga bariyeri olarak kullanmışlardır. Su dolu, geofam dolu ve boş hendekleri kullanarak tam ölçekli deneysel bir saha çalışması gerçekleştirmişlerdir. Çalışma sonucunda açık ve geofam dolu hendeklerin su dolu hendeklere göre daha verimli bir dalga bariyeri olduğunu tespit etmişlerdir. Ayrıca tüm hendeklerde sismik kalkan olma etkisinin hendekten uzaklaştıkça azalmakta olduğunu gözlemlemişlerdir. Açık ve geofam dolgulu hendeklerin verimliliklerinin birbirine oldukça yakın olduğunu ve iki hendek yapısının da zemin titreşimlerinden kaynaklanan dalga genliklerini %67'den daha fazla azaltabildiğini tespit etmişlerdir. Ancak açık hendeklerin stabilizasyon sorunlarını göz önüne alarak geofam dolgulu bariyerlerin kullanılmasını önermişlerdir.

Muhammad, Lim ve Reddy (2019) yaptıkları teorik çalışma ile yapıları depremlere karşı korumayı hedeflemişlerdir. Çalışmalarında iki farklı geometrik özelliğe sahip çelik kesitleri kullanmışlardır. Periyodik olarak düzenlenmiş yapılar hem frekans hem de zaman alanında

test edilmiştir. Önerdikleri yapılar ile bant aralıklarının oluşabileceğini fakat malzeme özelliklerinin ve toprak tipinin değişmesiyle bu aralığın değişebileceğini göstermişlerdir. Oluşturdukları bant boşluklarıyla titreşim genliklerinin azaltabileceğini göstermişler ve zaman alanında yaptıkları çalışma ile bu sonucu doğrulamışlardır.

Ahmad ve Al-Hussaini (1991) homojen bir zeminde boş ve beton dolgulu dikdörtgen şeklindeki hendekleri kullanarak sismik izolasyon sağlamayı amaçlamışlardır. Ayrıca hendek boyutları, poisson oranı ve yoğunluk gibi çeşitli parametrelerin etkisini incelemişlerdir. Yaptıkları analizler sonucunda boş hendeklerin derinliklerinin titreşimleri azaltmada büyük bir etkisi varken doldurulmuş hendeklerin hem genişliklerinin hem de derinliklerinin aynı derecede etkili olduğunu, Poisson oranının etkisinin ihmal edilebileceğini ve doldurulmuş hendeklerde yoğunluğun ve kesme modülünün dikkate alınması gerektiğini açıklamışlardır.

Kaçın ve diğerleri (2021c) deprem dalgalarının etkilerini azaltmak amacıyla silindirik yapıdaki çelik metamalzemeler kullanarak teorik bir çalışma gerçekleştirmişlerdir. Çalışmalarını sonlu elemanlar yöntemi (SEY) tabanlı yazılım programı kullanarak gerçekleştirmişler ve çelik metamalzemelerin dört farklı dizilim şekli için incelemeler yapmışlardır. Bütün dizilim şekilleri için kullandıkları sismik metamalzeme boyutlarını ve özelliklerini sabit tutarak frekans alanında simülasyonlar gerçekleştirmişlerdir. Çalışma sonucunda 5,8 Hz frekansında ve 8,5 Hz frekansında tüm dizilim şekillerinde yüzey titreşimlerinin silindirik çelik metamalzemeler tarafından sönmülenebileceğini gözlemlemişlerdir. Silindirik çelik metamalzemelerin yüzey titreşimlerini en iyi oranda sönmüleyebilmesi için ise diğer dizilim şekilleri arasından üçgen dizilim şeklinin kullanılmasının en uygun olduğunu tespit etmişlerdir.

Pu ve diğerleri (2018) çalışmalarında tabakalı toprak zeminlerde periyodik kazık sıralı kullanarak oluşturulan izolasyon sistemlerinde yüzey dalgaları için zayıflama bölgelerini analiz etmişlerdir. Sonlu elemanlar yöntemi (SEY) kullanarak gerçekleştirdikleri sayısal analizde bir birim hücre yapısı oluşturmuşlar ve çalışmalarında kullandıkları kazıkların tasarımının optimize edilebileceğini belirtmişlerdir. Gerçekleştirdikleri çalışma sonuçlarına göre kazıklar arasındaki mesafenin zayıflama bölgesini önemli derecede etkilediğini, kazıklar arası mesafenin artması ile daha düşük frekans aralıklarında kazık sisteminin daha etkili olduğunu ancak zayıflama bölgesinin genişliğinin de azalacağını belirtmişlerdir. Kazık

yarıçapının ise yine zayıflama bölgesinde oldukça etkili olduğunu ve yarıçapın artması ile zayıflama bölgesinin genişleyeceğini tespit etmişlerdir. Ayrıca kazık boyunun fazla artırılmasının yani sismik metamalzemelerin daha derinlere gömülmesinin dalga izolasyonunu önemli derecede etkilemeyeceğini göstermişlerdir.

Alzawi ve El Naggar (2011), yüzey dalgaları şeklinde yayılan ve hasara neden olabilen dalgaları engellemek için geofam dolgulu bariyerlerin kullanılabilirliğini araştırmıştır. Deneysel olarak gerçekleştirdikleri çalışmada 3 m derinliğinde bir hendek oluşturmuşlar ve hendeğin içine geofam doldurarak saha deneyleri gerçekleştirmişlerdir. Deneysel 40-60 Hz frekans aralığında olan dikey harmonik yüklerin sahaya uygulanması ile gerçekleştirilmiştir. Sahadan alınan sonuçlar, sonlu eleman paketi ABAQUS kullanılarak oluşturulan bir sayısal model ile karşılaştırılmış ve iyi bir uyumda oldukları belirlenmiştir. Çalışma sonucunda, geofam dolgulu bariyerlerin sismik etkilerden en az %68 koruduğu belirtilmiştir.

Abreu, Peter ve Thomas (2022), yaptıkları çalışmada rüzgâr türbinlerinin oluşturdukları gürültülerin sismik olayların kaydedildiği sismolojik istasyonları etkileyebilecek kadar uzun mesafeler aşabildiklerini tespit etmişlerdir. Bu gürültülerin engellenebilmesi amacıyla rüzgâr türbini ve sismolojik istasyonlar arasında dalganın ilerlediği zeminde yapısal değişimler uygulamışlardır. Rüzgâr türbininin temeli etrafında bir dizi açık ve doldurulmuş dairesel boşluklar sayısal olarak analiz edilmiştir. Rüzgâr türbinine yaklaşık 10 m uzaklıkta oluşturulan hendekler sayesinde sismik gürültüyü önemli ölçüde azaltabildiklerini göstermişlerdir. Ayrıca topografik yükseltelerin sismik gürültülerin yayılmasındaki etkileri incelemişler ve topografik yükselmelerin rüzgâr türbini kaynaklı sismik gürültülerin azalmasında etkili olduğunu tespit etmişlerdir.

Hegde ve Venkateswarlu (2022) titreşim izolasyonunu sağlayabilmek amacıyla geosentetik dalga bariyerlerini kullanmışlardır. Yaptıkları deneysel çalışmada, 3,6 x 3,6 x3,6 boyutlarında bir çukur oluşturulmuş ve güçlendirilmemiş, geocell ile güçlendirilmiş ve geogrid ile güçlendirilmiş dalga bariyerleri için analiz gerçekleştirmişlerdir. Betona sabitlenmiş mekanik bir osilatör kullanarak dinamik yükler oluşturmuşlar ve önerdikleri yapıyı değerlendirmişlerdir. Çalışma sonuçlarına göre geosentetik katılarak güçlendirilmiş dalga bariyerlerinin izolasyonu olumlu yönde etkilediğini göstermişlerdir. En iyi izolasyon verimliliğinin geocell bariyerlerde elde edildiğini tespit etmişler ve güçlendirilmemiş dalga bariyerine kıyasla %52 daha fazla izolasyon sağladığını gözlemlemişlerdir. Ek olarak

geocell bariyerlerin daha yüksek sürtünme açısına sahip olan geometaryaller ile doldurulmasyla izolasyon verimliliğinin oldukça iyiletirilebildiğini göstermişlerdir.



3. ZEMİN ORTAMINDA DALGA YAYILIŞI

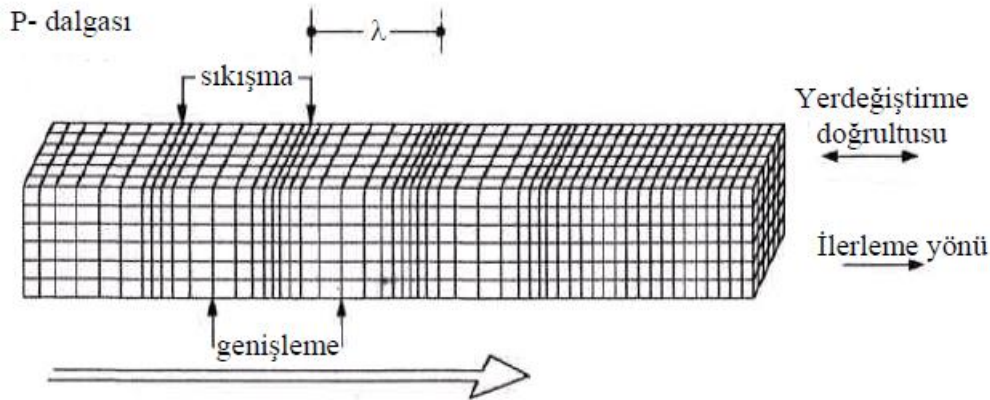
Deprem esnasında ortaya çıkan yüksek miktarda enerjinin bir kısmı ortam özelliklerine bağlı olarak zemin içerisinde dalgalar halinde yayılır. Yayılan bu sismik dalgalar depremi meydana getiren kırılma ve faylanmaya bağlı olarak her yöne farklı türlerde yayılırlar. Yayılan bu dalgalar sonucu cisim ve yüzey dalgaları olmak üzere iki farklı dalga türü oluşur.

3.1. Cisim Dalgaları

Tektonik levha hareketleri sonucu ortaya çıkan enerji odaktan yüzeye doğru iki tür dalga halinde ilerlemeye başlar. Cisim dalgaları meydana gelen tüm sismik dalgaların kaynağıdır (Kramer, 2003). İki ana cisim dalgası vardır. Bunlar zemin içerisinde farklı hızlarda yayılan P (basınç) ve S (kayma) dalgalarıdır.

3.1.1. P (basınç) dalgası

Yer kabuğu içerisinde en hızlı yayılan ve sismograflara ulaşan ilk dalgalardır. Birincil, basınç veya boyuna dalgalar olarak da adlandırılırlar. Bunun nedeni, hareket ettikleri doğrultu boyunca zemini sıkışma ve genişlemeye maruz bırakmalarıdır. P dalgaları katı, sıvı ve gazlar içerisinde yayılabilirler. Şekil 3.1’de P dalgalarının yayıldıkları doğrultu boyunca sıkışma ve genişleme bölgeleri görülmektedir. P dalgalarının hızı Eş.3.1’e göre hesaplanmaktadır.



Şekil 3.1. P dalgası yayılma prensibi (Ercan, 2001)

$$c_p^2 = \frac{(1-\nu)E}{(1-2\nu)(1-\nu)\rho} \quad (3.1)$$

Denklemdede;

c_p : P dalgası hızı,

ν : Zeminin Poisson oranı,

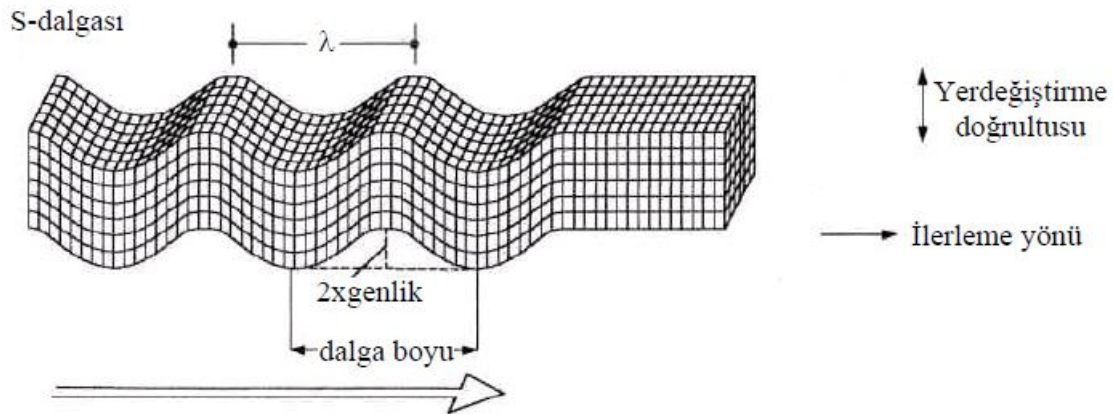
ρ : Zeminin yoğunluğu,

E : Zeminin Elastisite modülüdür.

3.1.2. S (kayma) dalgası

P dalgasından sonra sismograflara ulaşan ikinci dalgalardır. İkincil, kayma veya enine dalgalar olarak da adlandırılırlar. S dalgalarının hareketi sonucu zemin içerisindeki tanecikler dalganın yayılma doğrultusuna dik olacak şekilde aşağı-yukarı veya sağa-sola titreşirler.

(https://acikders.ankara.edu.tr/pluginfile.php/119309/mod_resource/content/0/Ders_04_Sismik_Dalgalar_%28Cisim_Dalgalari_1%29.pdf). S dalgaları sadece katı ortamlarda yayılırlar. Şekil 3.2’de S dalgalarının yayılım şekli görülmektedir. S dalgalarının hızı Eş.3.2’ye göre hesaplanmaktadır.



Şekil 3.2. S dalgası yayılma prensibi (Ercan, 2001)

$$c_s^2 = \frac{E}{(1+\nu)\rho} \quad (3.2)$$

Denkleimde;

c_s : S dalgası hızını,

ν : Poisson oranını,

E : Elastisite modülünü,

ρ : Kütle yoğunluğunu, ifade etmektedir.

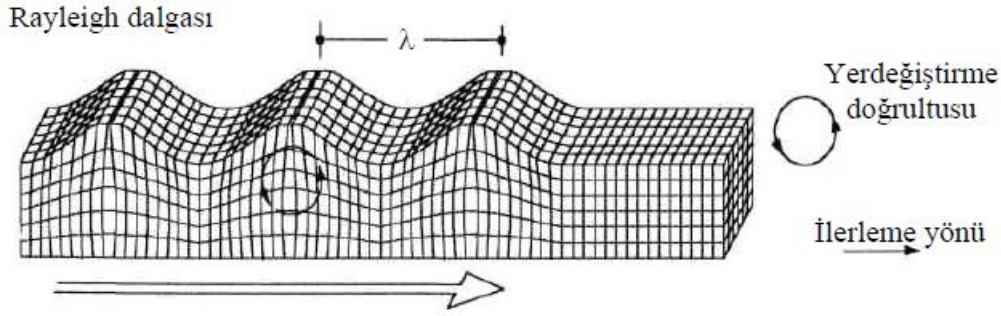
3.2. Yüzey Dalgaları

Yer yüzeyindeki katmanlar ile cisim dalgalarının etkileşimi sonucu oluşan dalgalara yüzey dalgaları denir. Yüzey dalgalarının ilerleyişi, genlikleri derinliğe göre üssel olarak azalan şekildedir. Ortaya çıkma karakterlerinden dolayı yüzey dalgaları depremin kaynağından çok uzak mesafelerde daha baskındır. En yüksek yer hareketinin oluşmasında yüzey dalgaları önemli rol oynamaktadır. Mühendislik açısından yüzey dalgaları en önemli dalgalardır(Kramer, 2003). En önemli yüzey dalgaları ise Rayleigh ve Love dalgalarıdır.

3.2.1. Rayleigh dalgası

G Rayleigh dalgası, yarı sonsuz ortam içerisinde serbest yüzeye yakın yerlerde cisim dalgalarının etkileşimi sonucu oluşurlar. Bu dalganın oluşabilmesi için, P dalgasının yanı sıra serbest yüzeye SV (S dalgasının düşey bileşeni) dalgasının kritik bir açı ile gelmesi ve yüzey boyunca eş zamanlı olarak oluşması gerekmektedir (URL:<https://acikders.ankara.edu.tr>). Rayleigh dalgası yarı sonsuz ortamda S dalgalarından daha yavaş hareket ederler. Zemin tanecikleri ters elips şeklinde yatay ve düşey tanecik hareketi oluştururlar. Rayleigh dalgalarının önemli ölçüde hareket oluşturduğu derinlik ile dalga frekansı ters orantılıdır (Kramer, 2003). Şekil 3.3'te Rayleigh dalgasının yayılım prensibi görülmektedir. Rayleigh dalga hızı ise Eş.3.3'e göre hesaplanır.

Dispersiyon, frekans veya periyoda bağlı olarak dalga hızının değişmesidir. Periyodun arttıkça hız artıyorsa normal, azalıyorsa ters dispersiyon oluşur (URL:<https://acikders.ankara.edu.tr>).Rayleigh dalgaları normal dispersiyon özelliği gösterirler. Periyodu büyük bileşenlerin yayılma hızı daha yüksektir. Buna bağlı olarak dalganın başlangıcından sonuna doğru periyotlarda küçülme görülür(Balkan, 2007).



Şekil 3.3. Rayleigh dalgasının yayılma prensibi (Ercan, 2001)

$$c_r = 0,92c_s$$

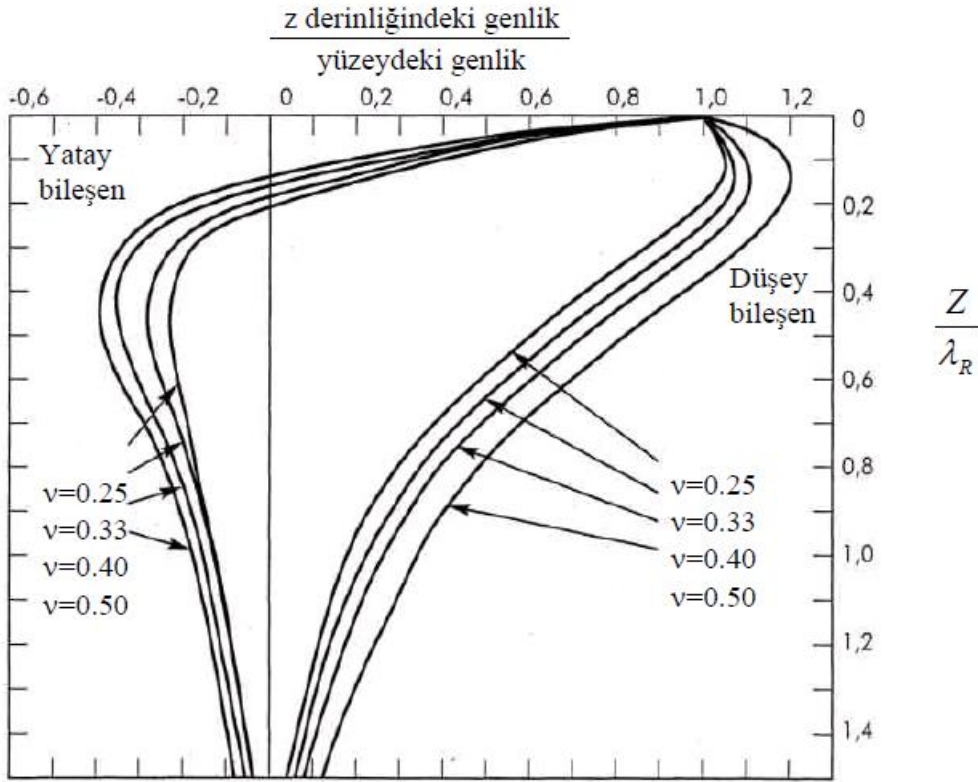
(3.3)

Denklemdede;

c_r : Rayleigh dalgasının yayılma hızını,

c_s : Aynı ortamdaki S-dalgası hızını ifade etmektedir.

Rayleigh dalgalarını diğer dalgalardan ayıran en önemli özelliği derinliğin artmasıyla dalga genliğinin azalmasıdır. Bu dalgalar, yarı sonsuz ortamların sığ bölgeleri boyunca yüzeye paralel olarak yayılırlar. Rayleigh dalgalarının hareket genlikleri poisson oranına bağlı olarak farklı derinliklerde farklılık gösterirler. Yüzey dalgalarının etkisi, deprem kaynağına olan uzaklık oluşan dalga boyunun iki katını aştığı zaman önem kazanmaktadır. Deprem esnasında yapılarda oluşan hasarın büyük bir kısmına sebep olan Rayleigh dalga hızı mühendislik açısından önem kazanmıştır. Dalga yayılım doğrultusu soldan sağa doğru olduğu zaman tanecik hareketi saat yönünün tersi yönünde oluşur. Dalga yörüngesi düşey elips şeklinde olduğundan Rayleigh dalgası cisim dalgalarının (P ve S) bileşkesi olarak tanımlanabilir (Balkan, 2007). Şekil 3.4'te Rayleigh dalgasının poisson oranı ve derinliğe bağlı olarak hareketi görülmektedir.



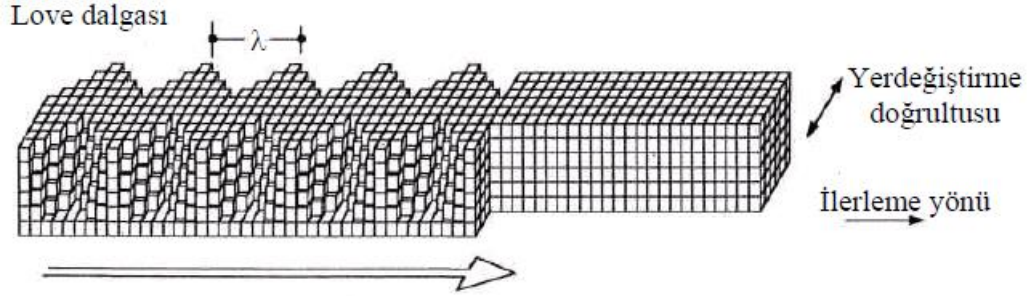
Şekil 3.4. Rayleigh dalgasının poisson oranı ve derinliğe bağlı olarak hareketi (Kramer, 2003)

Şekil 3.4 incelendiğinde düşey yöndeki yer değiştirme max veya min değere ulaştığı zaman yatay yöndeki yer değiştirmenin sıfır olduğu görülmektedir. Poisson oranı 0.25 ve $Z/\lambda R=1$ olduğu derinlikte serbest yüzeydeki düşey yer değiştirme genliği %20 değerine ulaşmaktadır. Buradan yola çıkılarak $Z/\lambda R=2$ olduğu derinlikte düşey yönde bir dalga meydana gelmeyeceği söylenebilir. Derinlik arttıkça düşey yer değiştirme sürekli azalırken yatay yer değiştirme değeri $Z/\lambda R=0.2$ değerinde sıfır olmaktadır (Balkan, 2007).

3.2.2. Love dalgası

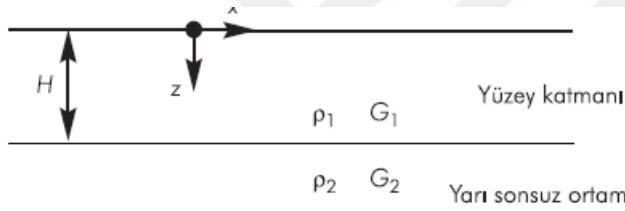
Love dalgaları, yarı sonsuz bir ortamın üzerinde bulunan düşük hızlı bir zemin tabakası içerisinde ortaya çıkan bir yüzey dalgası türüdür. Partikül hareketi yatay yönde olup, dalga yayılma doğrultusuna diktir. Bu dalgalar, yüzey katmanları aracılığıyla kaplanmış tekrarlı yansımaya yapan SH(S dalgasının yatay bileşeni) dalgalarından oluşurlar(Kramer, 2003). Tabakalı zemin ortamlarında oluşan Love dalgaları sürekli dispersiyon gösterirler (Kadıoğlu, 2004). Love dalgalarının yayılma hızı dalga boyuna bağlıdır. Love dalgasının yayılma hızı değeri, oluştuğu üst ve alt tabakadaki ortamın S dalga hızları arasındadır.

Derinliğin artmasına bağlı olarak titreşim genliği azalır. Şekil 3.5'te Love dalgasının yayılma prensibi görülmektedir.

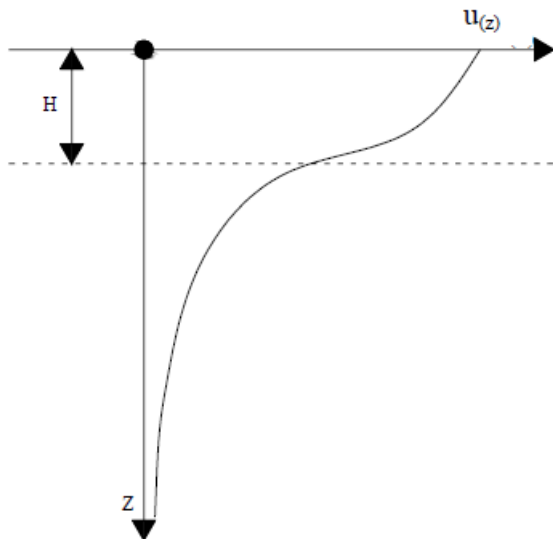


Şekil 3.5. Love dalgası yayılma prensibi (Ercan, 2001)

Şekil 3.6' Love yüzey dalgalarının oluşabileceği en basit şartlar görülmektedir. Şekil 3.7'de Love dalgalarının derinlik değişimine göre tanecik yer değiştirme genliği görülmektedir.



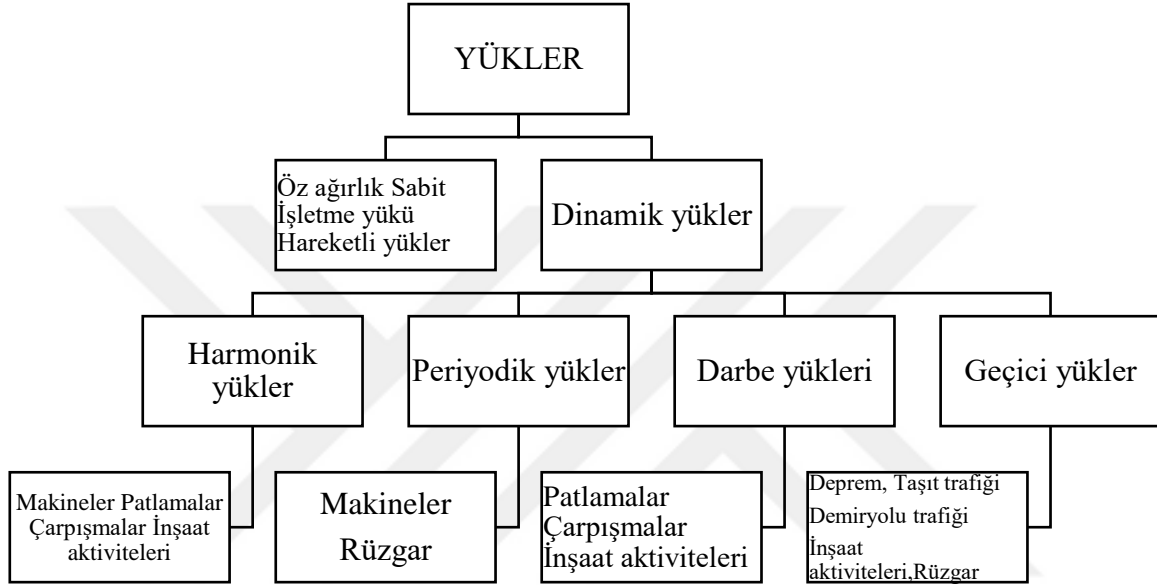
Şekil 3.6. Love yüzey dalgalarının oluşabileceği en basit şartlar (Kramer, 2003)



Şekil 3.7. Love dalgalarının derinlik değişimine göre tanecik yer değiştirme genliği (Kramer, 2003)

3.3. Yük Kaynakları ve Etkileri

Dünya üzerinde şekil ve etki yönünden birbirinden farklı şekillerde yük kaynakları bulunur. Bu yükler içerisinde canlıların etkisiyle, sismik olayların etkisiyle ve doğa olayları etkisiyle oluşan birçok farklı yük etkileri bulunur. Şekil 3.8’ de yük çeşitleri ve oluşma nedenleri görülmektedir.



Şekil 3.8. Yük çeşitleri ve oluşma nedenleri

İnsan etkisiyle oluşan titreşim kaynakları ve sismik olayların etkisiyle oluşan sarsıntılar birbirlerinden farklı özelliklere sahip olduklarından ölçüm aletleri tarafından farklı şekillerde algılanırlar. Çizelge 3.1’ de Dinamik yük kaynaklarına ait frekans ve genlik aralığı görülmektedir.

Çizelge 3.1. Dinamik yük kaynaklarına ait frekans ve genlik aralığı

Dinamik Yük Durumları	Frekans Aralığı [Hz]	Genlik Aralığı [μm]
Trafik yükleri	1-80	1-200
Patlamalar	1-300	100-2500
Makine titreşimleri	1-300	100-500
Rüzgâr etkileri	0.1-10	10-10000
Deprem etkileri	0.001-5	10-10000

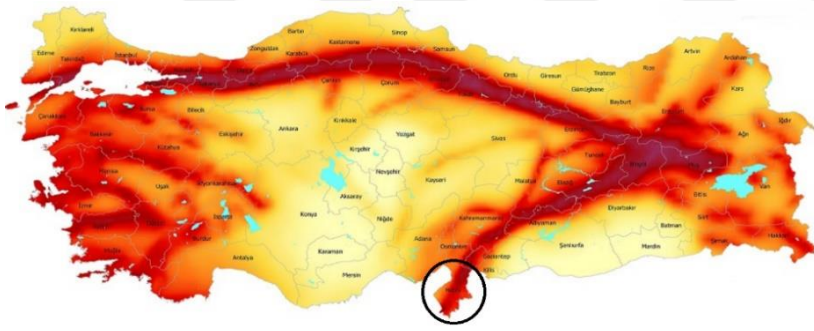
4. MATERYAL VE YÖNTEM

4.1. Materyaller

4.1.1. Zemin

Tez çalışması kapsamında saha deneyleri Hatay ili, İskenderun ilçesi sınırları içerisinde İskenderun Teknik Üniversitesi Yerleşke 'sinde bulunan trafik, inşaat vb. faaliyetlerden uzak boş bir alanda gerçekleştirilmiştir. Saha deneyleri yapılmadan önce zeminin dinamik özelliklerinin belirlenmesi için bir dizi deney yapılmıştır. Şekil 3.8' de test sahasının lokasyonu (a) ve sahanın uydu görüntüsü (b) görülmektedir.

(a)



(b)



Şekil 4.1. Test sahasının lokasyonu (a) ve sahanın uydu görüntüsü (b)

Dinamik zemin özellikleri, dinamik yüklere maruz kalan zeminlerin davranışını belirler. Zemin içerisindeki problemlerin çözülmesi için zeminin dinamik özelliklerinin ölçülmesi önemli bir yer tutmaktadır. Bu amaçla tez çalışması kapsamında zemin özelliklerinin belirlenmesi için deney sahasında zemin etüdü yapılmıştır. Zemin etüdü kapsamında 100 m derinliğe kadar farklı derinliklerde 29 adet SPT deneyi, örselenmiş ve örselenmemiş zemin numuneleri alınarak endeks ve mukavemet deneyleri yapılmıştır. Çizelge 4.1’de SPT veri aralıkları verilmiştir. Buna bağlı olarak zemin sınıflandırılması yapılmıştır. Çizelge 4.2’de SPT deney sonuçları ve zemin sınıflandırılması verilmiştir.

Çizelge 4.1. SPT (N) verileri

SPT (N)	Tanımlama
0 – 4	Yumuşak
5 – 8	Orta katı
9 – 15	Katı
16 – 30	Çok katı
>30	Sert

Çizelge 4.2. SPT deney sonuçları ve zeminin sınıflandırılması

SPT No	Derinlik (m)	SPT (N)	Sınıflandırma
1	1,50-1,95	16	Çok katı
2	3,00-3,45	12	Katı
3	4,50-4,95	R	Sert
4	9,00-9,45	15	Katı
5	10,50-10,95	43	Sert
6	12,00-12,45	19	Çok katı
7	13,50-13,95	14	Katı
8	15,00-15,45	15	Katı
9	16,50-16,95	16	Çok katı
10	18,00-18,45	13	Katı
11	19,50-19,95	15	Katı

Çizelge 4.2. (Devam) SPT deney sonuçları ve zeminin sınıflandırılması

12	21,00-21,45	R	Sert
13	22,50-22,95	R	Sert
14	25,00-25,45	R	Sert
15	28,00-28,45	7	Orta katı
16	31,00-31,45	13	Katı
17	34,00-34,45	16	Çok katı
18	37,00-37,45	14	Katı
19	40,00-40,45	17	Çok katı
20	43,00-43,45	34	Sert
21	46,00-46,45	43	Sert
22	49,00-49,45	36	Sert
23	55,00-55,45	42	Sert
24	61,00-61,45	39	Sert
25	67,00-67,45	28	Çok katı
26	73,00-73,45	26	Çok katı
27	79,00-79,45	20	Çok katı
28	85,00-85,45	18	Çok katı
29	90,00-90,45	R	Sert

Zemin profillerini elde edebilmek amacıyla jeofizik deneyleri gerçekleştirilmiştir. Gerçekleştirilen sismik deneyler (sismik kırılma ve REMI) ile dalga hızları ve tabaka kalınlıkları elde edilmiştir. Çizelge 4.3'te sismik dalga hızları ve tabakaların kalınlıkları Çizelge 4.4'te ise S dalgasının hızı verilmiştir.

Çizelge 4.3. Sismik dalga hızları ve tabaka kalınlıkları

Parametre	Birim	1. Tabaka	2. Tabaka
P- dalgası (V_p)	m/s	425	1600
S- dalgası (V_s)	m/s	203	333
Tabaka kalınlığı	m	3,09	-

Çizelge 4.4. S-dalgası Vs30:355m/sn

Derinlik (m)	Vs (m/sn)
0.00 – 1,90	295
1.90 – 4,90	318
4.90 – 13,10	443
13.10 – 22,70	330
22.70 – 30,00	348

Gerçekleştirilen zemin etütleri sonucunda zemin tabakaları için elde edilen zemin dinamik parametreleri Çizelge 4.5'te verilmiştir. Zemin çalışması ile elde edilen veriler bu tez çalışmasındaki sayısal analizlerde kullanılmıştır.

Çizelge 4.5. Zeminin dinamik özellikleri

Parametre	Birim	1. Tabaka	2. Tabaka
S-dalgası – Vs(30)	m/s	312	
Yoğunluk (ρ)	gr/cm ³	1,41	1,96
Maksimum kayma modülü (Gmax)	kg/cm ²	579,1	2170,8
Elastisite modülü E	kg/cm ²	1566,2	6414,0
Poisson oranı (ν)	-	0,35	0,48
Bulk modülü (K)	kg/cm ²	1766,3	47220,5
Titreşim periyodu (T_0)	s	0,6	
Serbest basınç mukavemeti (q_u)	kg/cm ²	2,55	7,81
Zemin büyütme değeri	-	2,2	
SPT (N) – SPT (30)	-	20	R

4.1.2. Beton Kazıklar

Sismik metamalzeme olarak kullanılan beton kazıkların üretiminde, elastisite modülü 32000 Mpa, poisson oranı 0.2 olan C30/37 beton kullanılmıştır. Her bir beton kazığın çapı ve derinliği sırasıyla 0.15 m ve 2 m'dir. Bütün örgü yapılarında aynı boyutlardaki beton kazıklar kullanılmıştır. Kare örgü yapısı için 27, üçgen örgü yapısı için 37, dairesel örgü yapısı için 35 ve sinüzoidal örgü yapısı için 33 adet olmak üzere toplamda 132 adet beton kazık kullanılmıştır.

4.1.3. Harmonik titreşim kaynağı

Saha deneyleri sırasında Seismotec Gmbh ve BMR Ferra Automation Gmbh firması tarafından üretilen harmonik titreşim jeneratörü kullanılmıştır. Harmonik titreşim cihazı, döner bir motora bağlı, her biri kolu 660 g ağırlıkla yüklenebilen iki koldan oluşur. Kütlelerle yüklü bu iki kol birbirine zıt yönlerde dönerek harmonik bir dalga oluştururlar. Harmonik titreşim cihazının dakikadaki devir sayısı bir kontrol ünitesi ile ayarlanabilir ve 0,5-15 Hz frekans aralığında titreşim üretebilir. Cihaz boyutları, genişliği 50 cm, uzunluğu 80 cm ve yüksekliği 55 cm'dir. Harmonik cihazın ürettiği titreşimi zemine aktarmak için, cihaz beton bir temele rijit bağlantılar ile bağlanmıştır. Şekil 4.2' de harmonik titreşim cihazı, Çizelge 4.6' da harmonik titreşim kaynağının özellikleri görülmektedir.



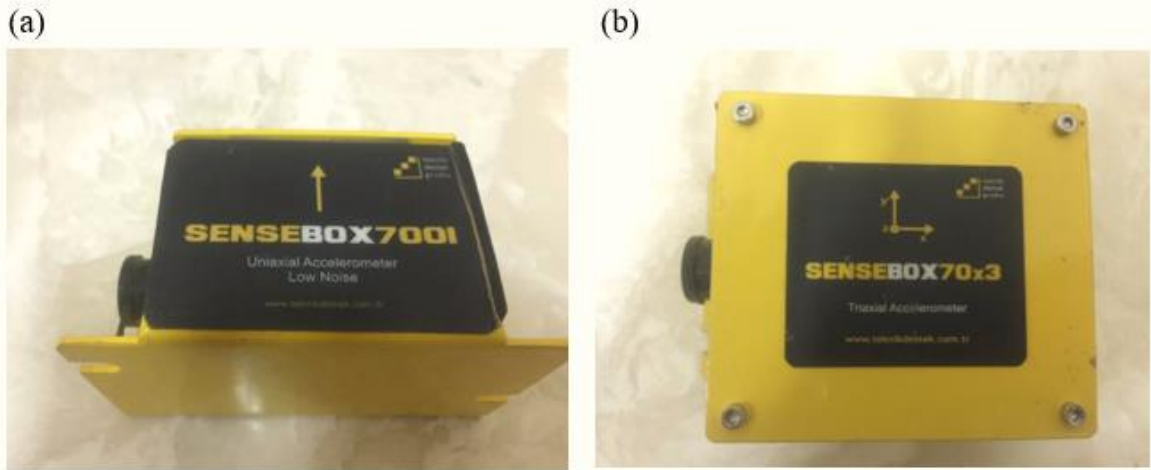
Şekil 4.2. Harmonik titreşim cihazı

Çizelge 4.6. Harmonik titreşim kaynağının özellikleri

	Kolun ağırlığı (g)	Kol yarıçapı (mm)	Max. İzin verilen frekans
Kütlesiz	1200	145	15
Bir set kütle ile	1860	175	14
İki set kütle ile	2520	205	13

4.1.4. İvmeölçerler

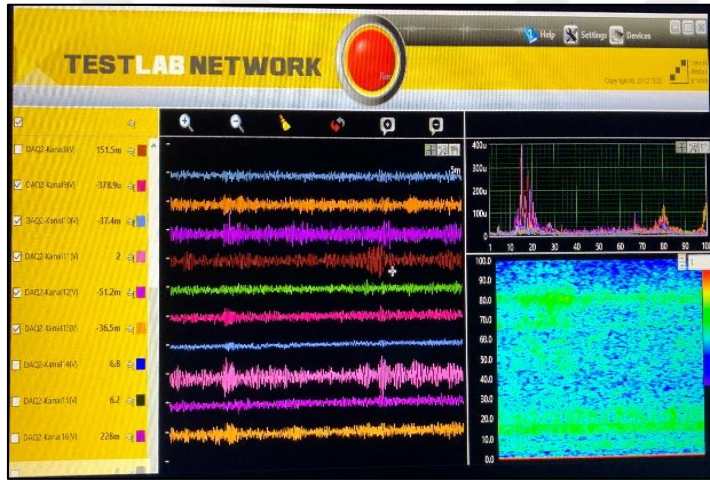
Saha deneyleri esnasında üretilen harmonik titreşimler, Sensörler Teknik Destek Grubu firması tarafından üretilen nitrojen sönümlü, hassasiyeti $5 \mu\text{g}$ olan 3 ve 1 eksen doğrultusunda ölçüm yapma özelliğine sahip frekans aralığı 0-400 Hz olan yüksek hassasiyete sahip SENSEBOX 70x3 ve SENSEBOX 7001 ivmeölçerler kullanılarak ölçülmüştür. 3 eksen doğrultusunda ölçüm yapabilen ivmeölçerin ivme ölçüm aralığı $\pm 3\text{g}$, 1 eksen doğrultusunda ölçüm yapabilen ivme ölçerin ivme ölçme aralığı $\pm 2\text{g}$ 'dir. Tüm ivmeölçerler saha tipi TESTBOX2010 veri toplama ünitesi ile uyumludur. Şekil 4.3' de tek eksenli (a) ve 3 eksenli (b) ivmeölçerler görülmektedir.



Şekil 4.3. Tek eksenli (a) ve 3 eksenli (b) ivmeölçerler

4.1.5. Veri toplama ünitesi

İvmeölçerler tarafından kaydedilen veriler saha tipi 24 bit 16 kanallı veri toplama ünitesi ile sayısallaştırıldı. Veri toplama ünitesi 1 Hz ila 2 kHz frekans aralığında eşzamanlı örnekleme sağlar. Bilgisayar yardımıyla veriler TESTLAB Network yazılımı ile deney süresince takip edilerek kaydedilmiştir. Şekil 4.4' te veri toplama ünitesi ve bilgisayar yardımıyla veri kaydı ve TESTLAB yazılımı ara yüzü görülmektedir.

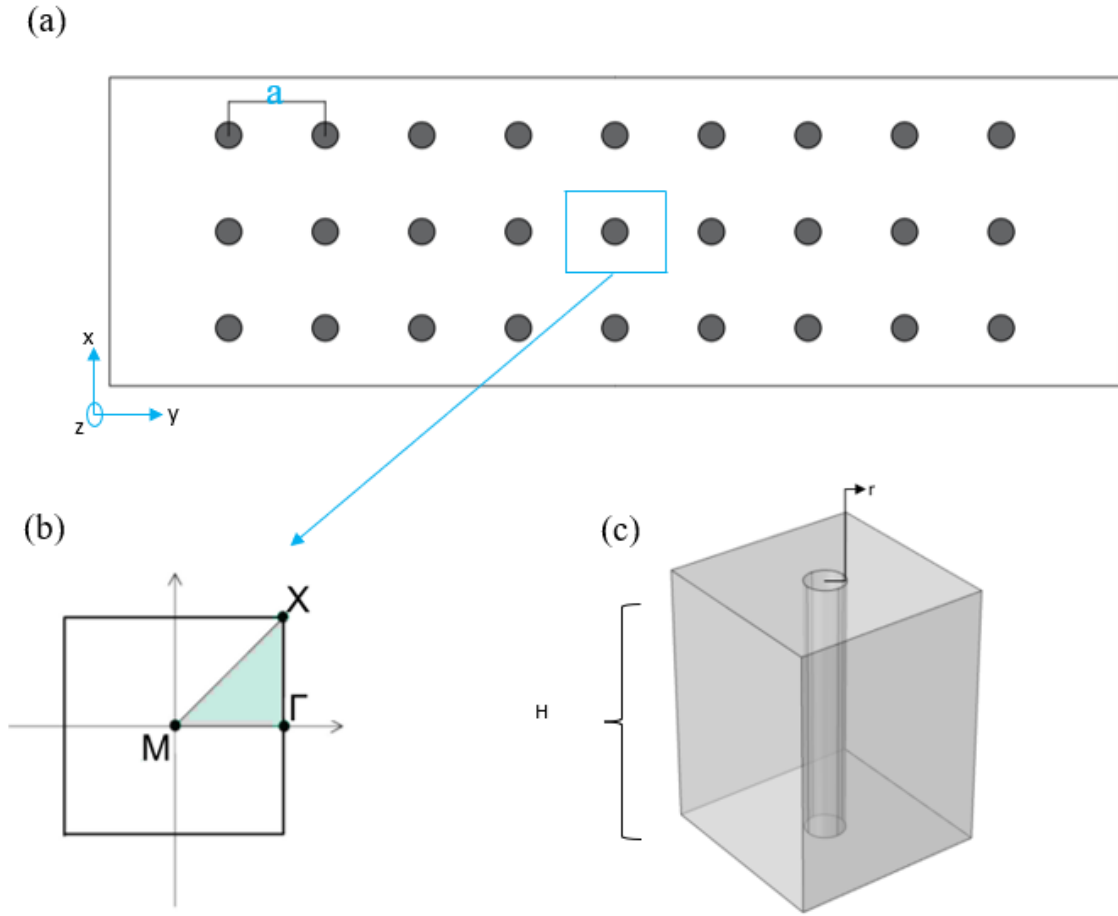


Şekil 4.4. Veri toplama ünitesi ve bilgisayar yardımıyla veri kaydı ve TESTLAB ara yüzü

4.2. Yöntem

4.2.1. Kare örgü yapısının birim hücresi

Bu tez çalışmasında birim hücre yapısı, sonlu elemanlar yöntemi (SEY) kullanılarak elde edilmiştir. Öncelikle kare örgü dizilimine sahip periyodik yapı, toprak zeminde dairesel beton kazıklar olarak tanımlanır. Daha sonra yapı için bir birim hücre oluşturularak analiz edilir. Kare örgü yapısı için dairesel kazıkların çapları sahada kullanılacak olan sondaj makinesinin delme kabiliyeti göz önüne alarak sınırlandırılmış ve deneme yanılma yolu ile optimum sonuç verecek şekilde seçilmiştir. Şekil 4.5'te dairesel beton kazıkların kare örgüsü (a), Brillouin bölgesinin en yüksek simetri noktaları (b) ve birim hücrenin 3 boyutlu yapısı (c) görülmektedir.



Şekil 4.5. Kare örgü yapısı (a), Brillouin bölgesinin en yüksek simetri noktaları (b) ve birim hücrenin 3 boyutlu görüntüsü (c)

Sayısal analizin gerçekleştirilebilmesi için sonlu elemanlar yöntemi tabanlı yazılım programına deneysel saha çalışmaları sonucunda elde edilen zeminin mekanik özellikleri tanımlanmıştır. Zemin sayısal analiz için lineer elastik izotropik bir madde olarak tanımlanmıştır. Sondaj cihazının oluşturabileceği delik çapı 0,1143-0,3048 m ve oluşturabileceği maksimum derinlik 100 m olduğu için sayısal modelleme bu sınırlar içerisinde gerçekleştirilmiş ve uygulanabilir optimum kazık çapı ve derinliği belirlenmiştir. Buna göre, istenilen frekans aralığında bant boşluğu oluşturabilen ve dalga sönümlemesi yapabilen aynı zamanda fizibilite için en uygun olan beton kazık boyutları, yarı çap (r) için 0,075 m ve derinlik için 2 m seçilmiştir. Kare örgü yapısına sahip beton kazıkların kafes sabit a ise 1,5 m olarak belirlenmiştir. Tasarlanan yapı, Brillouin bölgesinin en yüksek simetrisinin M - Γ - X yönleri boyunca değerlendirilmiştir. Birim hücre analizi ile bir bant diyagramı çizdirebilmek için M - Γ - X - M yönlerinde değişen k parametresinin 0-3 arasında değişimi, 1/10 adımlarla parametrik bir tarama ile gerçekleştirilmiştir. k değişkeni Brillouin

bölgesinde 0 (M noktası) – 1 (Γ noktası) aralığında değişirken $k_x=(1-k) \cdot \pi/a$ ve $k_y=(1-k) \cdot \pi/a$ 1(Γ noktası) – 2 (X noktası) aralığında değişirken $k_x=(1-k) \cdot \pi/a$ ve $k_y=0$, 2 (X noktası) – 3 (M noktası) aralığında değişirken $k_x= \pi/a$ ve $k_y= (2-k) \cdot \pi/a$ olarak tanımlanmıştır ve bu aralıkta sismik dalgaların yayılma frekansları elde edilmiştir. Bu denklemler için yüksek simetri noktaları;

$$M=0,0$$

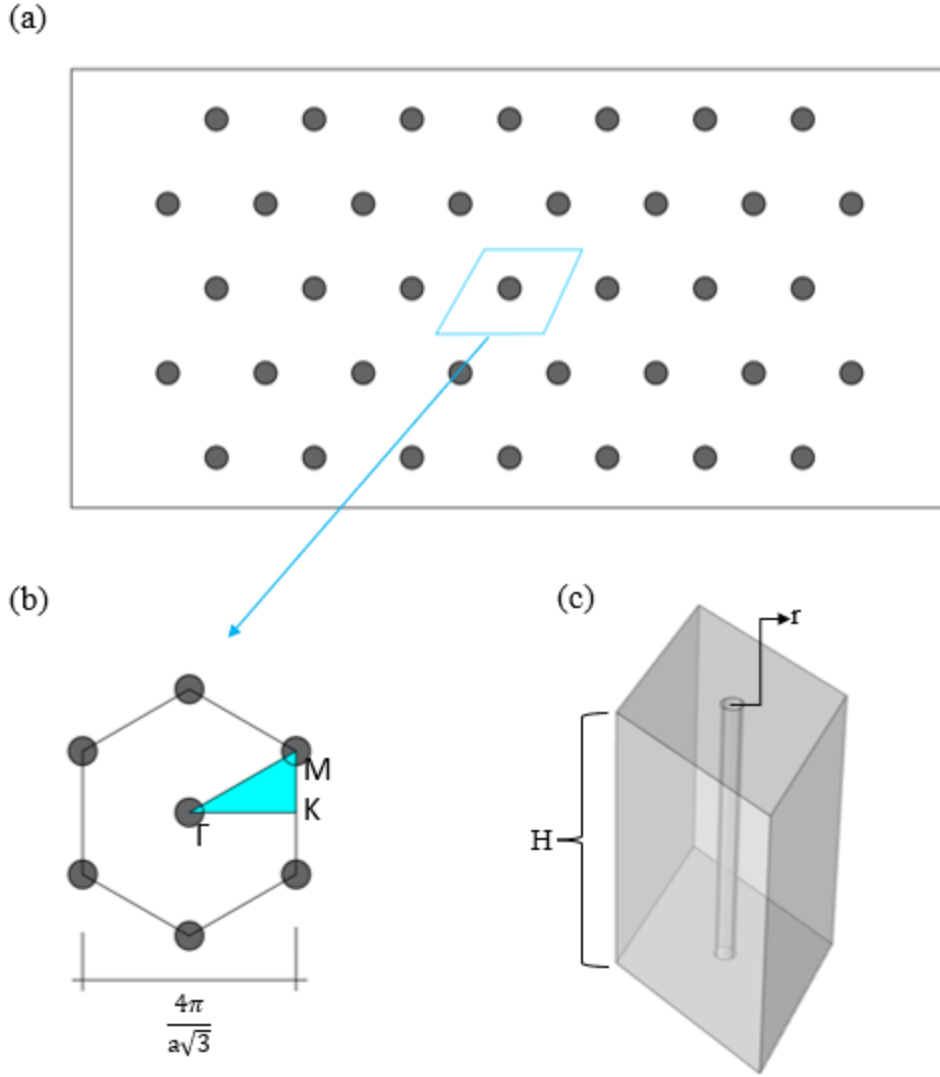
$$\Gamma = \frac{\pi}{a}, 0$$

$$X = \frac{\pi}{a}, \frac{\pi}{a}$$

olarak tanımlanmıştır. Bu denklemler kullanılarak birim hücre analizi gerçekleştirilmiş ve analiz sonucunda bir bant diyagramı elde edilerek bant boşlukları gösterilmiştir.

4.2.2. Üçgen örgü yapısının birim hücresi

Silindirik beton kazıkların üçgen örgü ile konumlanmasıyla oluşturulan yapının analizi için sonlu elemanlar yöntemi (SEY) tabanlı ticari yazılım programı kullanılmıştır. Önerilen sismik metamatzenin davranışını öngörebilmek amacıyla bir birim hücre analizi gerçekleştirilmiştir. Deneme yanılma yöntemi ile optimum sonuçlar verebilen ve saha uygulaması için mümkün olan boyutlar belirlenmiştir. Bu boyutlara göre üçgen örgü yapısı oluşturulmuş ve ortasında dairesel beton kazık bulunan eşkenar dörtgen şeklinde bir birim hücre tasarlanarak analiz edilmiştir. Şekil 4.6'da üçgen örgü dizilimi (a), Brillouin bölgesinin en yüksek simetri noktaları (b) ve oluşturulan üç boyutlu birim hücre yapısı (c) gösterilmiştir.



Şekil 4.6. Üçgen örgü yapısı (a), Brillouin bölgesinin en yüksek simetri noktaları (b), birim hücrenin 3D görüntüsü (c)

Birim hücrenin sayısal analizinin gerçekleştirilebilmesi için öncelikle deneysel analizlerle elde edilen zemin parametreleri sonlu elemanlar yöntemi (SEY) tabanlı simülasyon programına tanımlanmıştır. Deneme yanılma yöntemi ile elde edilen düşük frekans aralığında bir bant boşluğu oluşturabildiğimiz optimum kazık boyutları için yarıçap (r) 0,075m ve derinlik (H) 2 m olarak seçilmiştir. Aynı zamanda kafes sabiti vektörleri a_1 ve a_2 olan, karşılıklı kafes vektörleri b_1 ve b_2 olan üçgen örgü için kafes sabiti (a) 1,5 m olarak belirlenmiştir. Birim hücre analizi ile 10 bantlı bir bant diyagramını çizdirebilmek amacıyla M- Γ -K-M yönlerinde değişim gösteren 1/10 adımlarla ilerleyen 0-3 arasında değişen bir k parametresi tanımlanmış ve parametrik taraması gerçekleştirilmiştir. k parametresinin Brillouin bölgesinin M- Γ yönleri arasındaki değişimi için $k_x = (1-k) \cdot 2\pi / (\sqrt{3} \cdot a)$ ve $k_y = (1-k) \cdot 2\pi / (3a)$, Γ -K yönleri için $k_x = (k-1) \cdot 2\pi / (\sqrt{3} \cdot a)$ ve $k_y = 0$, K-M yönleri arasındaki değişim

için $k_x = 2\pi/(\sqrt{3}.a)$ ve $k_y = (k-2).2\pi/(3.a)$ şeklindedir. Böylece her k değerini hesaplayarak dalga yayılma frekansları elde edilmiştir. Kafes sabitinin temel vektörleri a_1 ve a_2 'nin denklemleri Eş.4.1'de, karşılıklı kafes vektörleri b_1 ve b_2 'nin denklemleri ise Eş.4.2'de verilmiştir.

$$a_1 = a \frac{\sqrt{3}}{2} \vec{x} + \frac{a}{2} \vec{y} \quad (4.1)$$

$$a_2 = a \vec{y}$$

$$b_1 = \frac{2\pi}{a} \left(\frac{2}{\sqrt{3}} \vec{x} \right) \quad (4.2)$$

$$b_2 = \frac{2\pi}{a} \left(-\frac{1}{2} \vec{x} + \frac{\sqrt{3}}{2} \vec{y} \right)$$

Bu gösterimde karşılıklı simetri noktaları,

$$\Gamma = 0,0$$

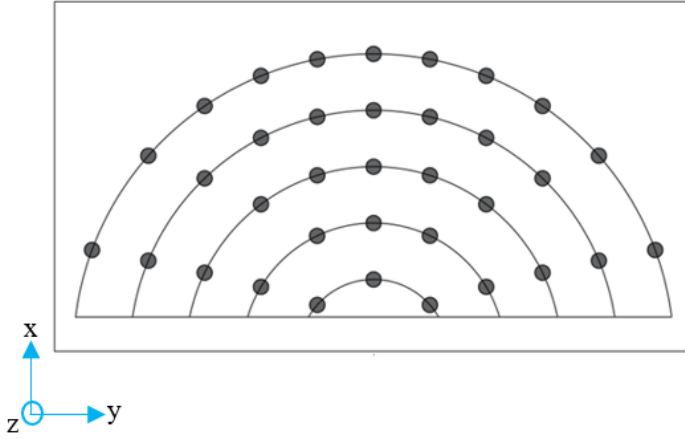
$$K = \frac{2\pi}{\sqrt{3}a}, 0$$

$$M = \frac{2\pi}{\sqrt{3}a}, \frac{2\pi}{3a}$$

olarak tanımlanmıştır. Denklemler kullanılarak tasarlanan birim hücre hücre yapısının analizi gerçekleştirilmiş ve analiz sonucunda bir bant diyagramı oluşturulmuştur.

4.2.3. Dairesel örgü yapısının birim hücresi

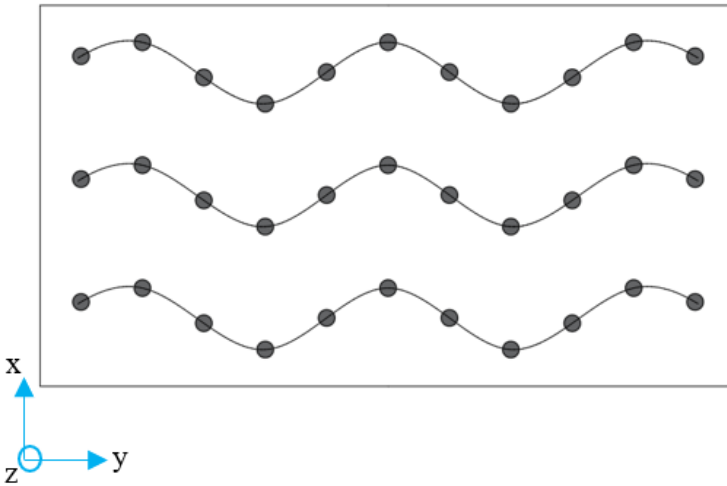
Dairesel örgü ile konumlandırılmış dairesel beton kazıklar Γ , X ve M yönlerinde periyodik olmayan davranışlar sergiler. Bu dizilim şekli periyodik olmadığı için bir birim hücre yapısı oluşturulamamış ve buna bağlı olarak bir bant diyagramı çizilememiş ve bant boşlukları elde edilememiştir. Şekil 4.7.'de dairesel örgünün tasarımının sahaya uygulanacak yerleşim şekli verilmiştir.



Şekil 4.7. Dairesel örgü yapısı

4.2.4. Sinüzoidal örgü yapısının birim hücresi

Sinüzoidal örgü yapısındaki dairesel beton kazıklar Γ , X ve M yönlerinde periyodik olmayan davranışlar sergiler. Bu örgü yapısının periyodik olmaması nedeniyle birim hücre analizi gerçekleştirilememiş ve bant diyagramı oluşturulamamıştır. Şekil 4.8'de sinüzoidal örgü yapısının sahaya uygulanacağı tasarım şekli verilmiştir.

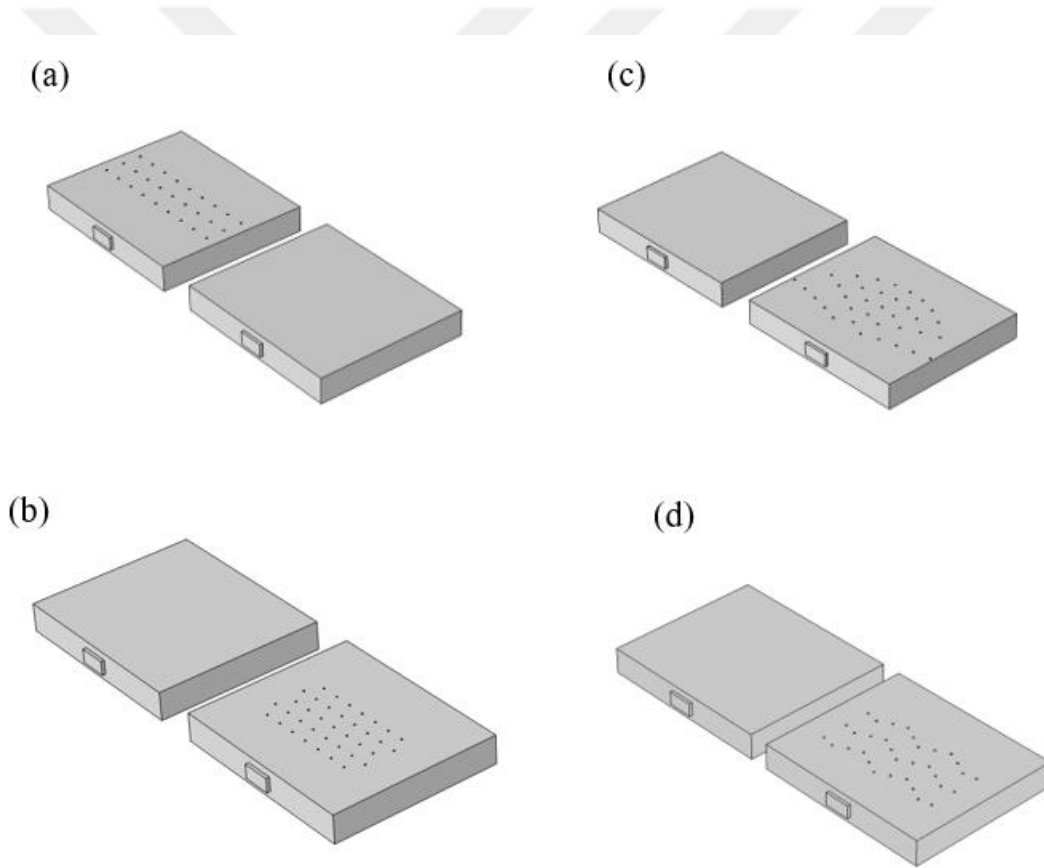


Şekil 4.8. Sinüzoidal örgü

4.2.5. Frekans alanında analiz yöntemi ve saha tasarımları

Tasarlanan yapıların hem birim hücre analizlerinin doğruluğunu test edebilmek için hem istenilen frekans aralığındaki iletim kaybı karakteristiğini çizdirerek iletim kaybı değerlerini belirleyebilmek için hem de beton kazıklardan oluşturulan sismik metamatemenin

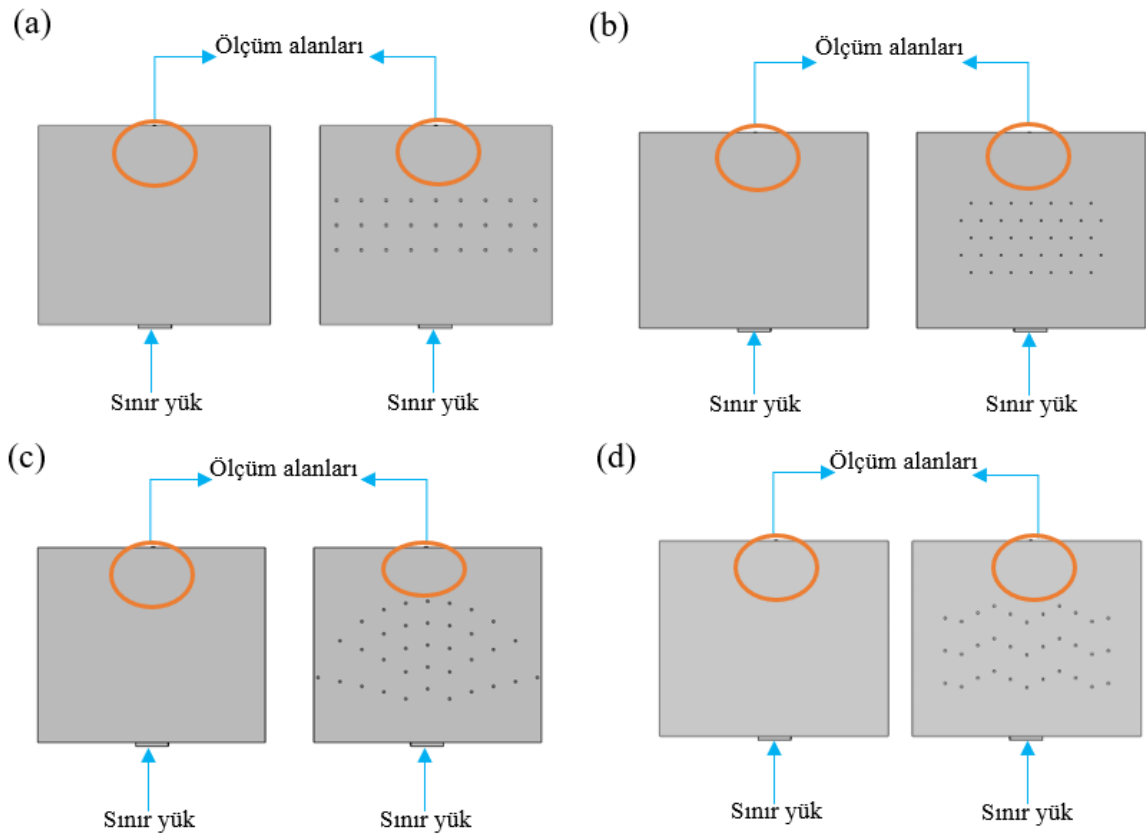
uygulandığı ve uygulanmadığı alanda sismik dalga yayılışının karşılaştırmasını yapabilmek için sonlu elemanlar yöntemi (SEY) tabanlı ticari yazılım programı ile frekans alanında bir çalışma gerçekleştirilmiştir. Çalışma sismik dalgaların en zararlı olan düşük frekans aralığında gerçekleştirilmiştir. Bu çalışma için her bir dizilim şekli için iki ayrı saha tasarımı gerçekleştirilmiştir. İlk sahalar sismik metamalzemenin kullanılmadığı orijinal sahalar iken ikinci sahalar sismik metamalzemenin uygulandığı sahalarlardır. Bu sayede sismik yüzey dalgalarına sismik metamalzemelerin etkileri kolayca gözlemlenebilmiş ve tasarlanan saha ile orijinal saha her örgü yapısı için karşılaştırılabilmiştir. Frekans alanında analiz gerçekleştirebilmek amacıyla tasarlanan saha yapıları Şekil 4.9’da kare örgü (a), üçgen örgü (b), dairesel örgü (c) ve sinüzoidal örgü (d) olarak gösterilmiştir.



Şekil 4.9. Kare örgü ile saha tasarımı (a), üçgen örgü ile saha tasarımı (b), dairesel örgü ile saha tasarımı (c), sinüzoidal örgü ile saha tasarımı

Şekil 4.9’da verilen kare örgü tasarımı (a) için 27 adet, üçgen örgü tasarımı (b) için 37 adet, dairesel örgü (c) için 35 adet ve sinüzoidal örgü için 33 adet beton kazık kullanılmıştır. Sismik yüzey dalgalarının sahaların arkasına nasıl ulaştığını görebilmek ve yüzey dalgalarının sismik metamalzemeler ile karşılaştıktan sonra ne kadar bir kayıp yaşadığını

anlayabilmek amacıyla Şekil 4.10'de görüldüğü gibi sahanın arka kısımlarına ölçüm noktaları yerleştirilmiştir. Her bir sahaya yüzey dalgalarını uygulayabilmek amacıyla Şekil 4.10'da belirtilen noktalardan sınır yük atanmıştır. Tasarlanan sahalara 1 N test darbesi uygulanmış ve yıkıcı etkisi oldukça yüksek olan 0-10 Hz düşük frekans aralığında çalışma gerçekleştirilmiştir. Yük kaynağına uygulanan kuvvet sayesinde yük kaynağı x yönü boyunca sismik yüzey dalgaları üretmiştir. Ayrıca toprak zemin lineer ve elastik olan homojen bir malzeme olarak tanımlanmıştır. Frekans alanındaki simülasyon x yönünde 0,1 Hz'lik adımlarla ve 1×10^{-3} m'lik öngörülen yer değiştirmeler ile gerçekleştirilmiştir. Her bir dizilim şekli için tasarlanan ikişer sahaya uygulanan sınır yük noktaları ve ölçüm noktaları Şekil 4.10'da sırasıyla kare örgü için (a), üçgen örgü için (b), dairesel örgü için (c) ve son olarak sinüzoidal örgü için (d) gösterilmiştir.



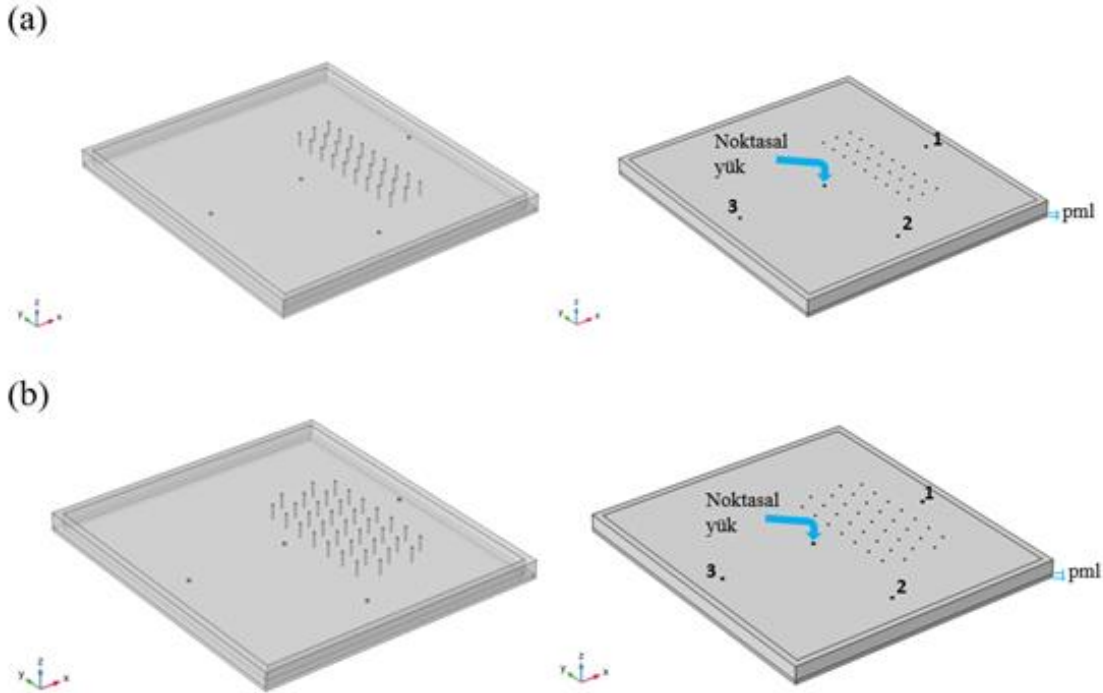
Şekil 4.10. Kare örgü için sınır yük ve ölçüm alanları (a), üçgen örgü için sınır yük ve ölçüm alanları (b), dairesel örgü için sınır yük ve ölçüm alanları (c) ve sinüzoidal örgü için sınır yük ve ölçüm alanları (d)

SEY tabanlı ticari yazılım programı ile gerçekleştirilen simülasyon sonucunda dalgaların sahalarda ilerleyişleri elde edilmiştir. Aynı zamanda bu ilerleyiş sırasında sismik

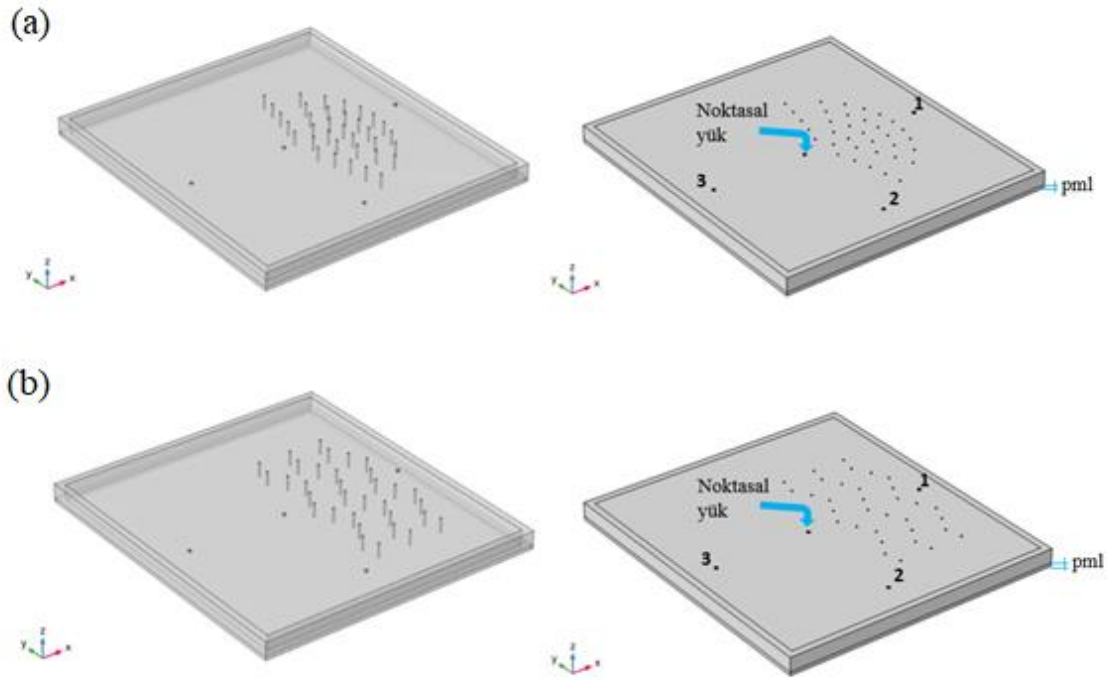
metamalzemelerle karşılaşan sismik yüzey dalgalarının yaşadıkları kayıp değerlerinin elde edilebilmesi için iletim karakteristikleri grafikleri çizdirilmiştir. Böylece bant boşluklarının oluştuğu frekans değerlerindeki iletim kayıplarının değerleri ölçülmüş ve bant diyagramının doğruluğu test edilmiştir.

4.2.6. Zaman alanında analiz yöntemi ve saha tasarımları

Tasarlanan dört saha modelinin sismik yüzey dalgaları karşısındaki davranışını görebilmek ve durdurma kabiliyetini inceleyebilmek amacıyla zaman alanında bir çalışma gerçekleştirilmiştir. Çalışma, sonlu elemanlar yöntemi (SEY) tabanlı ticari yazılım programında simülasyonlar oluşturularak gerçekleştirilmiştir. Şekil 4.11’de görüldüğü üzere kare örgü (a), üçgen örgü (b), dairesel örgü (c) ve sinüzoidal örgü (d) yapıları için saha tasarımları gerçekleştirilmiştir. Her bir sahaya sismik yüzey dalgalarının uygulanabilmesi için noktasal yükler uygulanmıştır ve bu dalgaların yer değiştirmeleri Şekil 4.11’de ve Şekil 4.12’de gösterilen 1,2 ve 3 ile gösterilen ölçüm noktaları ile kaydedilmiştir.



Şekil 4.11. Kare örgü için noktasal yük ve ölçüm noktaları (a), üçgen örgü, noktasal yük ve ölçüm alanları (b)

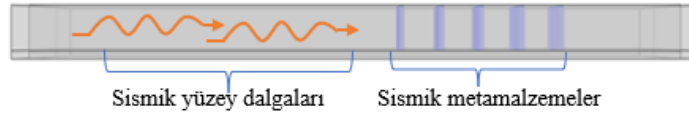


Şekil.4.12. Dairesel örgü için noktasal yük ve ölçüm noktaları (a), sinüzoidal örgü, noktasal yük ve ölçüm alanları (b)

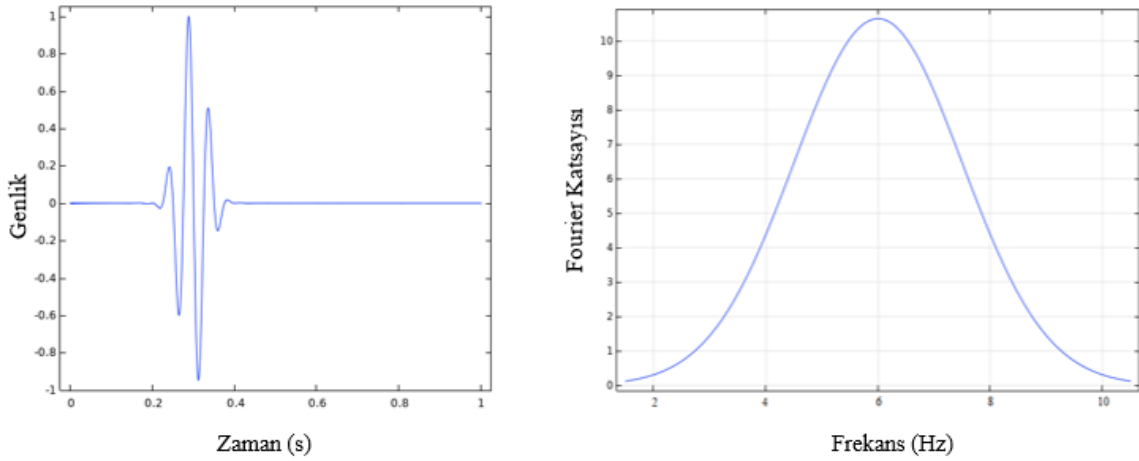
Periyodik olarak dizilmiş silindirik beton kazıklardan oluşturulan sismik metamalzemelerin uygulandığı toprak zemin lineer elastik ve homojen olarak tanımlanmıştır. Her bir saha için homojen toprak zeminin genişliği 33 m, uzunluğu 30 m ve derinliği 2 m olarak tanımlanmıştır. Oluşturulan yapılarda sismik dalgaların yansımalarını engelleyebilmek, periyodikliği sağlayabilmek ve sismik dalgaların absorbesini sağlayabilmek için mükemmel eşlenenmiş katman (PML) ve simetri sınır koşulları her sahaya uygulanmıştır. Simetri sınır koşulları, geometrilerin simetri içerdiği durumlarda sayısal analizin minimizasyonu için önemlidir çünkü boyutu küçültmek için kullanılabilir ve büyük alanların çözümünün sağlanabilmesi için etkili bir yöntemdir. Homojen blokların sonlu modellerinde mükemmel eşlenen katman (PML) boyutları, bloğun alt tarafında 0.375 m ve kenarlarında 1.5 m olarak uygulanmıştır. Simetri koşulları ise y eksenine ve bloğun dikey kenarlarına uygulanmıştır. Sayısal analizin gerçekleştirilebilmesi için saha deneylerinden edilen toprak zeminin kayma hızı $V_s = 450$ m/s ve zeminin yoğunluğu $\rho_g = 1150$ kg/m³ değerleri simülasyon programına tanımlanmıştır. Sismik yüzey dalgalarının yayılma hızı, toprak zeminin poisson oranı ile aynı kayma hızı değeriyle tanımlanır. Buradaki poisson oranı enine büzülmenin boyuna uzamaya oranıdır. 0-10 Hz düşük frekans aralıklarında sinüzoidal dalgalar oluşturabilen bir

noktasal darbe kaynağı her bir sahanın orta noktasına konulmuştur. Her bir sahaya 1 Pa basınç kuvveti uygulanarak sismik yüzey dalgalarının oluşması sağlanmıştır. Uygulanan noktasal yük x yönü boyunca sismik yüzey dalgaları üretmiştir. Sismik yüzey dalgaları, dairesel beton kazıklara dik şekilde xy düzlemi boyunca yayılmaktadır ve durdurulabilmeleri oldukça zordur. Sismik yüzey dalgaları, sismik dalgalar arasında en yıkıcı etkiye sahip olduğu için bu dalgaların xy eksenini boyunca yayılımı zaman alanında analiz edilmiştir.

(a)



(b)



Şekil 4.13. Sismik yüzey dalgaları (a) uyarma darbeleri (b)

Şekil 4.13'te saha üzerinde sismik yüzey dalgalarının ilerleyiş yönü (a) ve zaman alanı analizi için gereken uyarma darbeleri (b) verilmiştir. Sahaların merkezlerine uygulanan noktasal yükün sonucunda sismik dalgaların yer değiştirmelerinin şiddetinin ölçülebilmesi için Şekil 4.11 ve Şekil 4.12'de görüldüğü gibi her bir sahaya 1, 2 ve 3 olarak numaralandırılmış yerlere ölçüm noktaları atanmıştır. 2 noktası ile sahanın kenarında sismik metamalzemeye henüz ulaşamayan dalgaların yer değiştirmelerini ölçülmüştür. 1 ve 3 ölçüm noktaları aynı zamanda korunmak istenilen alanların bulunduğu noktalardır. 1 ile 3

noktalarının noktasal yük merkezine olan uzaklıkları eşit olarak seçilmiştir. Böylece aynı mesafede sismik metamalzemenin uygulandığı ve uygulanmadığı bölgelerde sismik yüzey dalgalarının yer değiştirme karşılaştırılması yapılabilmektedir. Her bir dairesel kazık sabit çapa sahip doğal rezonatörler olarak kabul edilmiş ve zaman alanında analiz gerçekleştirilmiştir. Zaman alanında analiz ile sismik yüzey dalgalarının sismik metamalzeme ile karşılaştığındaki davranışları elde edilmiş ve bu dalgaların yer değişimleri simüle edilmiştir.

4.2.7. Deneysel saha çalışması

Sayısal analiz için belirlenen boyutlar tam ölçekli bir saha çalışması yapılabilmesi için birebir ölçekli olarak uygulanmıştır. Teorik olarak elde edilen optimum boyutlarda yani 2 m derinliğinde ve 0.075 m yarı çapında silindirik delikler düzgün tortul bir zemin üzerine sondaj makinesi kullanılarak açılmıştır. Kare ve üçgen örgü için kafes sabiti a sayısal analizde belirlendiği gibi 1,5 m olarak alınmış ve delikler birbirinden 1,5 m mesafe ile açılmıştır. Kare örgü yapısı için 27 adet sondaj deliği, üçgen örgü yapısı için 37 adet sondaj deliği, dairesel örgü için 35 adet sondaj deliği ve sinüzoidal örgü yapısı için 33 adet sondaj deliği açılmış ve sondaj delikleri içerisine beton yerleştirilerek sismik metamalzeme olarak kullanılacak olan beton kazıklar elde edilmiştir. Her bir beton kazığın yerinin belirtilebilmesi için üst kısımlara birer demir parçası yerleştirilmiştir. Sırasıyla kare örgü, üçgen örgü, dairesel örgü ve sinüzoidal örgü olarak oluşturulan sahalar Şekil 4.14'te verilmiş ve beton kazıkların yerleri işaretlenerek gösterilmiştir.



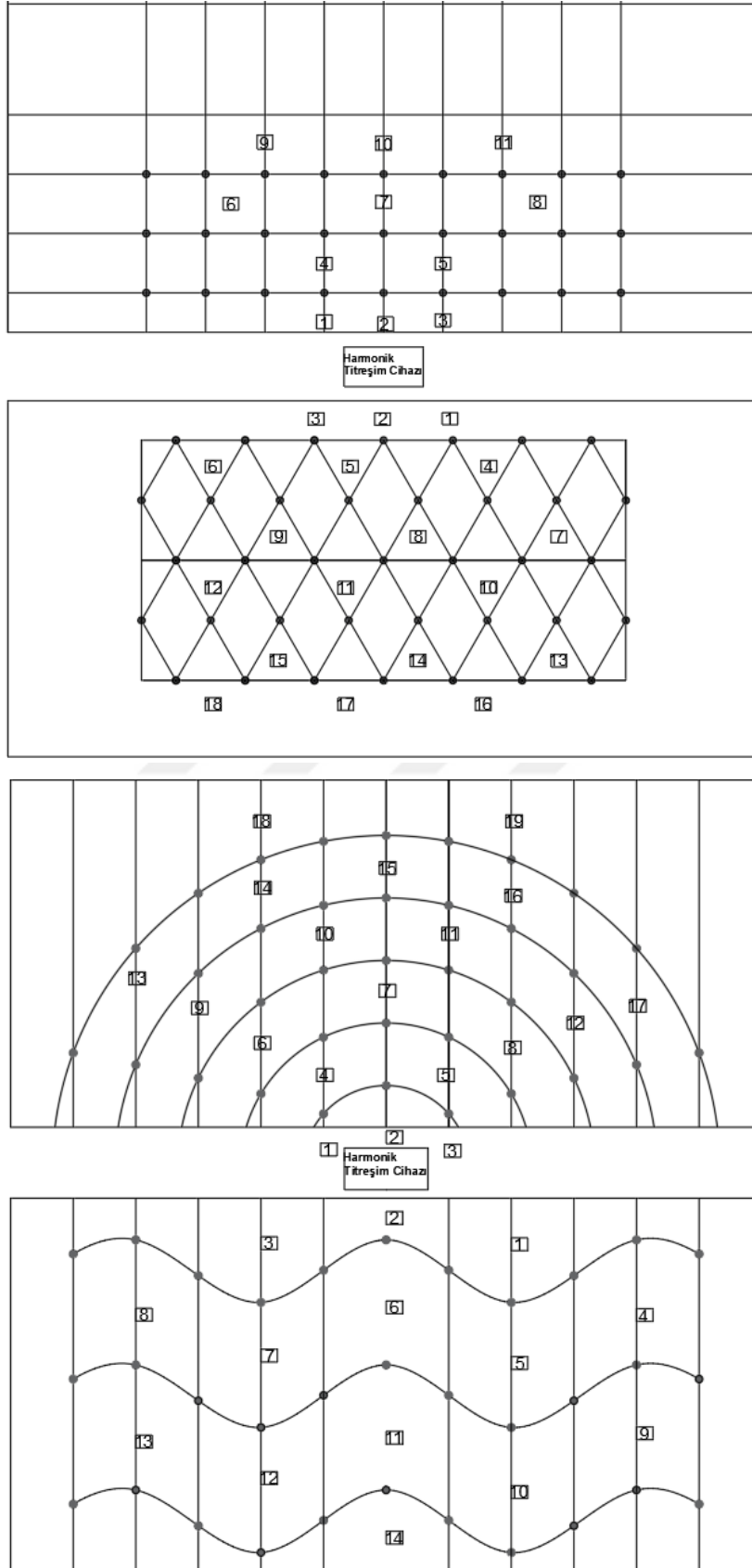
Şekil 4.14. Deneysel çalışma sahaları



Şekil 4.14. (Devam) Deneysel çalışma sahaları

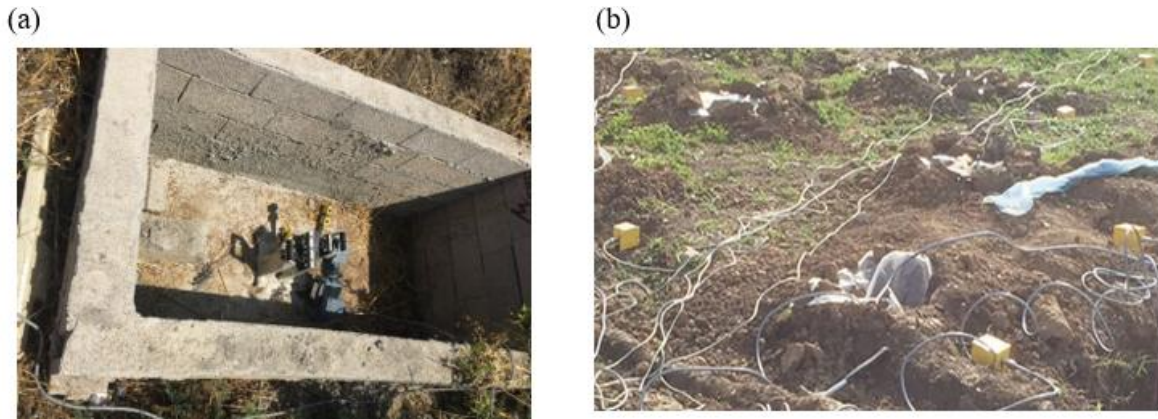
Kare örgü yapısı ve üçgen örgü yapısı karşılıklı olarak, dairesel örgü yapısı ve sinüzoidal örgü yapısı karşılıklı olarak yerleştirilmiş ve karşılıklı örgülerin ortalarına harmonik titreşim

cihazı yerleştirilmiştir. Şekil 4.14'te ivme ölçerler kutucuklar ile gösterilmiş ve numaralar verilmiştir.



Şekil 4.15. İvme ölçerlerin konumları

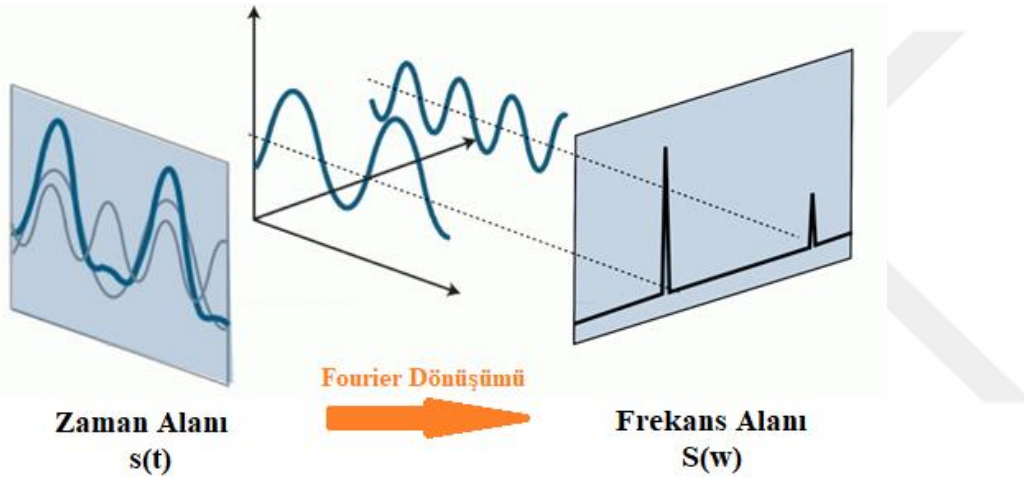
Şekil 4.15'te görüldüğü gibi kare örgü için 11 adet, üçgen örgü için 18 adet, dairesel örgü için 19 adet ve sinüzoidal örgü için 14 adet ivme ölçer kullanılmıştır. Harmonik titreşim cihazı, her örgü yapısı için beton kazıklar üzerine yayılacak olan sismik dalgaların en verimli ulaşabileceği mesafeye yerleştirilmiştir. Cihaz x yönü boyunca ilerleyebilen sismik yüzey dalgaları üretmiştir. Titreşim cihazının oluşturduğu harmonik yükün düzgün bir şekilde zemine aktarılabilmesi için cihaz ve zemin arasında rijit bir bağlantı oluşturulmuştur. Bu bağlantı, 1 m derinliğinde açılan çukura betonarme bir temel oluşturulması ve harmonik titreşim cihazının bu temele sabitlenmesi ile gerçekleştirilmiştir. Bütün saha dizilimlerine ayrı ayrı uygulanan harmonik titreşimler ivme ölçerler ile kaydedilmiştir. Bu ölçüm için tek eksenli ve üç eksenli ivme ölçerler hem beton kazıkların aralarına hem de deney sahalarının arka kısımlarına yerleştirilmiştir. İvme ölçerler yüzey dalgalarının yatay bileşenlerini ölçmek için ve üç eksenli ivme ölçerler Rayleigh dalgasının etkilerini görebilmek için kullanılmıştır. Farklı sensör yerleşimleri sayesinde sismik yüzey dalgalarının nasıl yayıldığı incelenebilmiştir. İvme ölçerler zemin yüzeyinden çok az derinlikte oluşturulan yerlere yerleştirilmiş ve ivme ölçerler yayılan sismik yüzey dalgaları ile aynı doğrultuda yerleştirilmiştir. Şekil 4.16'da harmonik cihazın beton temel içinde yerleşim konumu (a) ve ivme ölçerlerin yerleşim şekilleri (b) verilmiştir.



Şekil 4.16. Harmonik titreşim cihazı yeri (a), ivme ölçerlerin yerleştirilmesi (b)

Her bir deney sahası için ikişer kez ölçüm yapılmıştır. İlk ölçüm sismik metamalzemelerin uygulanmadığı orijinal saha ölçümü, ikinci ölçüm ise sismik metamalzemeler uygulandıktan sonraki saha ölçümüdür. Harmonik titreşim cihazından 0-15 Hz düşük frekans aralığında sismik yüzey dalgaları üretilmiş ve her sahaya uygulanmıştır. Bütün dizilim şekillerinde hem metamalzemesiz alana hem de metamalzemenin uygulandığı alana her frekans değeri için 120 s'lik titreşim dalgaları gönderilmiştir. İvme ölçerler ile alınan veriler bir veri kaydedici

tarafından toplanmış ve kaydedilmiştir. Bu veriler zaman alanında elde edilmişken ölçülen değerler hızlı Fourier dönüşümü (HFD) ile frekans alanına çevrilmiş ve sismik metamatzenin etkilerinin görülebilmesi için belirlenen frekans aralığındaki her frekansta haritalandırmalar yapılmıştır. Hızlı Fourier dönüşümü (HFD), zaman alanındaki dijital bir sinyalin, sinyaldeki farklı frekans bölgelerinin bağıl genliğini frekans alanına dönüştürebilen algoritmalarından biridir. Şekil 4.17’de dalgaların zaman alanından frekans alanına dönüşümü gösterilmiştir. Bu dönüşüm sayısal hesaplama ve programlama dili olan Matlab programının kodları kullanılarak gerçekleştirilmiştir.



Şekil 4.17. Zaman alanı verilerinin frekans alanına dönüşümü

Deney sahası yakınlarında gerçekleştirilen inşaat işlerinin sebep olduğu titreşimler, deney sırasında ivme ölçerler ile kaydedilmiş ve sismik metamatzenin uygulandığı sahalarda beklenmedik piklere neden olmuştur. Çevresel etkilerin sebep olduğu bu titreşimler, harmonik titreşim cihazı tarafından yayılan sismik yüzey dalgalarından farklı bir şekilde yayılmakta olduğu gözlemlenmiştir. İletim karakteristiklerinde değişikliklere neden olabilecek bu dalgalar zaman alanından frekans alanındaki dönüşümlerde Matlab’taki bir program kullanılarak sayısal olarak filtrelenmiştir. Sismik yüzey dalgalarının ilerleyişini oluşturulan saha boyunca analiz edebilmek amacıyla elde edilen veriler kullanılarak kontur haritalar oluşturulmuştur. Frekans alanına dönüştürülmüş olan veriler jeostatistiksel enterpolasyon yöntemi kullanılarak haritalandırılmıştır. Bu yöntemin hedefi, sismik dalgaların yer değişimlerini belirlemek ve eksik olan yerleri doğru tahmin edebilmektir. Bu yöntem diğer yöntemlerden daha etilidir çünkü tahmin yaparken sadece mesafeyi değil aynı

zamanda yönleri de hesaba katmaktadır (Cox, 2001). Bir jeostatistiksel enterpolasyon yöntemi gerçekleştirilirken öncelikle deneysel bir yarı-variogram oluşturulur daha sonra oluşturulan deneysel yarı-variograma bir model tasarlanır, kriging tahmini yapılır ve haritalandırma gerçekleştirilir. Yarı-variogram gözlem noktaları arasındaki uzaklıkların bir fonksiyonu olan $\gamma(h)$ yarı-variogramların bir grafiğidir ve aşağıda verilen denklem ile hesaplanır.

$$\gamma^*(h) = \frac{1}{N(h)} \sum_{i=1}^{N(h)} [z(x_i) - z(x_i + h)]^2 \quad (4.3)$$

Bu denklemde , z belirli bir yerde gözlemlenen değer, h art arda gelen verilerin arasındaki uzaklık ve $N(h)$, h uzaklığındaki eşleştirilmiş verilerin sayıdır.

Her h mesafesi için yarı varyans değerleri hesaplanarak çizilmiş ve deneysel bir yarı-variogram elde edilmiştir. Kriging tahmini yapılmadan önce deneysel variogramın en uygun teorik modelinin belirlendiğinden emin olunması gerekmektedir (Srivasta, 2013). Teorik yarı-variogram , yer değişimleri belirlerken eksik kalmış noktaları tahmin edebilmek amacıyla kullanılabilir (Mert ve Dağ, 2017). Bu tahminlerin en iyi şekilde yapılmasını sağlayan Kriging tahminleridir ve kontur haritaları Kriging tahminleri sonuçlarında oluşturulmuştur. Haritalandırma yapılırken bazı adımlar sırasıyla uygulanmıştır.

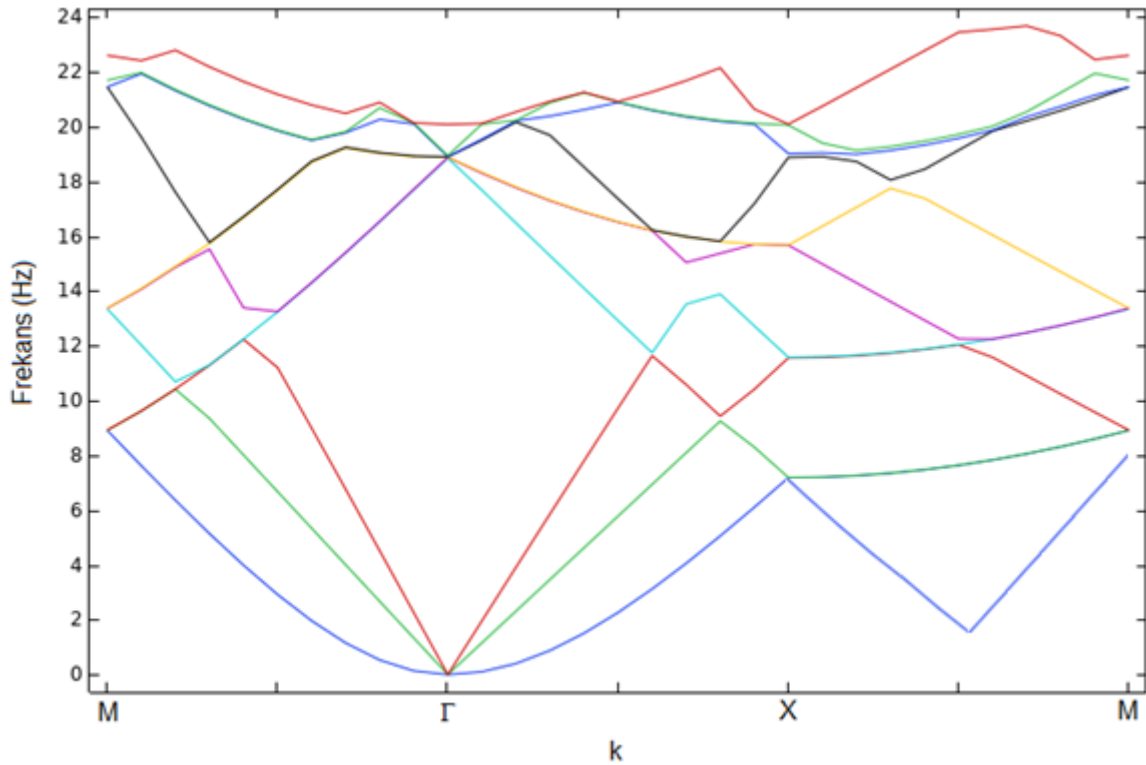
Bunlar;

- İvme ölçerlerin yerleştirildiği konumların koordinatlarının Kartezyen koordinatlara göre düzenlenmesi,
- Elde edilen ölçüm değerlerinin hem mesafe hem de yöne göre sınıflandırılması,
- Her ölçüm arasındaki yarı varyans değerlerinin hesaplanması ve hem teorik hem de deneysel yarı-variogram modellerinin elde edilmesi,
- Enterpolasyonlar kullanılarak Kriging tahmininin yapılması ve haritaların oluşturulması şeklinde sıralanmıştır.

5. ARAŞTIRMA BULGULARI VE TARTIŞMA

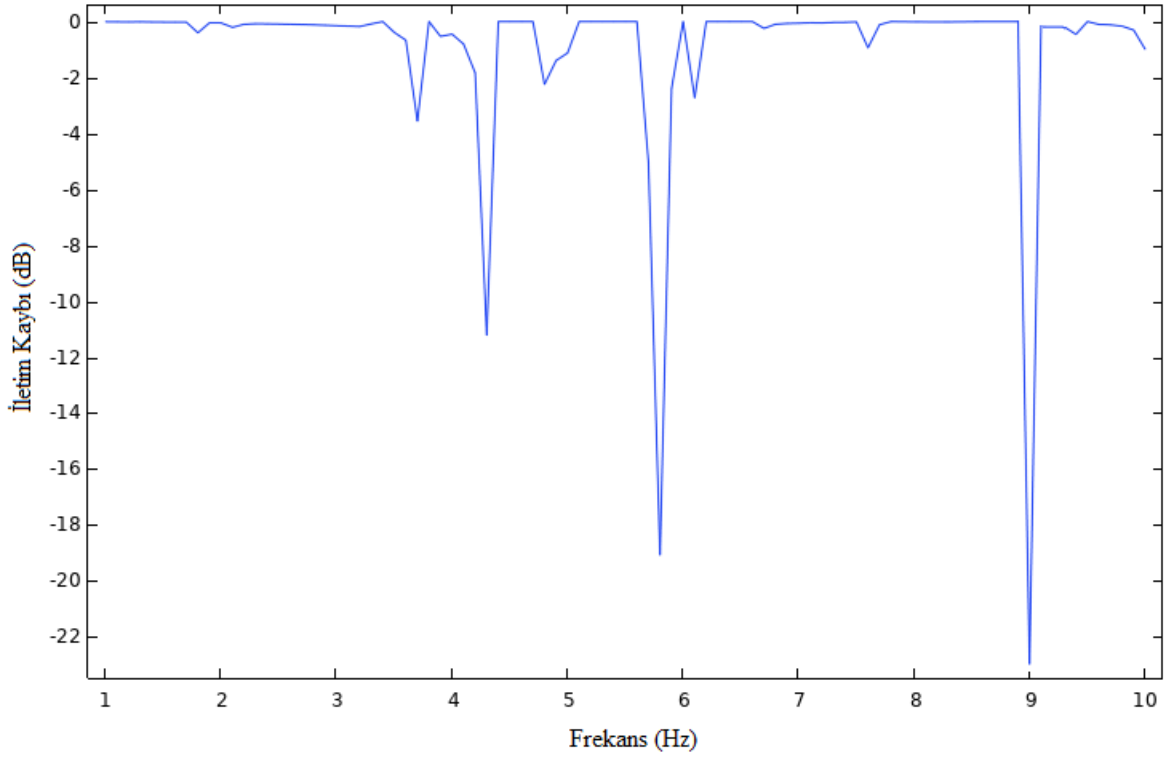
5.1. Kare Örgü Analiz Sonuçları

Kare örgü için ilk olarak bir birim hücre oluşturulmuş ve birim hücre analizi gerçekleştirilmiştir. Birim hücre analizi sonucunda elde edilen bant diyagramı Şekil 5.1’de verilmiştir.



Şekil 5.1. Kare örgü bant diyagramı

Elde edilen bant diyagramı incelendiğinde Şekil 5.1’de görüldüğü gibi bant boşluklarının oluştuğu görülmüştür. 9 Hz ve 18 Hz frekanslarında X-M yönü boyunca bantlar arasında bir kesişme olmamış yani bu alanlarda kısmi bant boşlukları oluşmuştur. Kısmi bant boşlukları, kare örgü yapısında beton kazıklar kullanılarak oluşturulmuş sismik metamalzemelerin sismik dalga sönümleme kabiliyeti hakkında ön görüş sağlamış ve X-M doğrultusunda 9 Hz ve 18 Hz frekanslarında sismik yüzey dalgalarının sönümlenebileceğini göstermiştir. Birim hücre analiz sonuçlarına göre frekans alanında bir analiz gerçekleştirilmiştir. Frekans alanındaki analiz düşük frekans aralığında gerçekleştirilmiş ve analiz sonucu elde edilen iletim karakteristiği grafiği Şekil 5.2’de verilmiştir.



Şekil 5.2. Kare örgü iletim karakteristiği

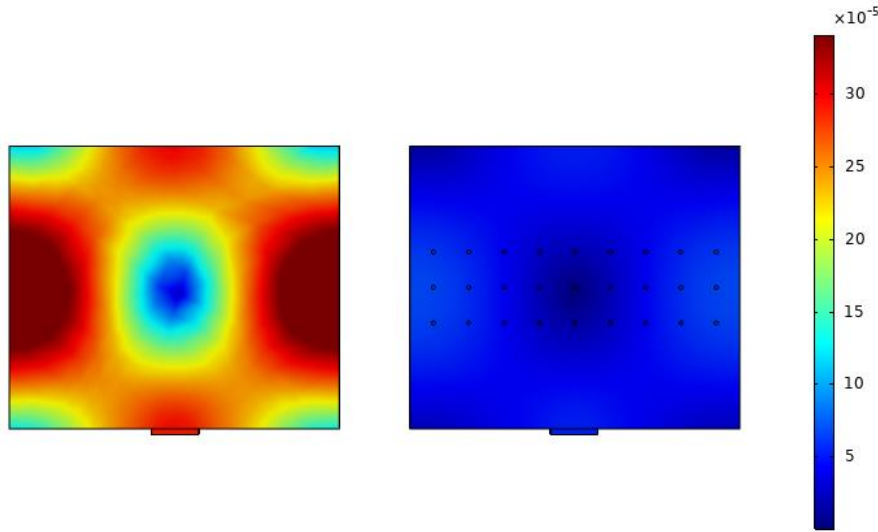
Frekansların iletim kaybı karakteristikleri incelendiğinde birim hücre analizi sonucunda elde edilen bant boşluğundaki düşük frekansta iletim kaybı olduğu görülmüştür. İletim kaybı gerçekleşen frekanslar ve iletim kayıplarının tam değerleri Çizelge 5.1’de verilmiştir.

Çizelge 5.1. Kare örgü iletim kayıpları

Frekans (Hz)	İletim Kaybı (dB)
3,7	-3,60
4,3	-11,20
4,8	-2,20
5,8	-19,07
6,1	-2,72
9	-22,85

0-10 Hz düşük frekans aralığı dikkate alındığında hem bant diyagramında bant boşluğunun olduğu frekansın hem de iletim karakteristiği grafiğinde iletim kaybının yüksek olduğu frekansın 9 Hz frekansı olduğu görülmüştür. Frekans alanında yapılan çalışma ile bir simülasyon gerçekleştirilmiş ve simülasyonlarda toplam yer değiştirmeler gösterilmiştir.

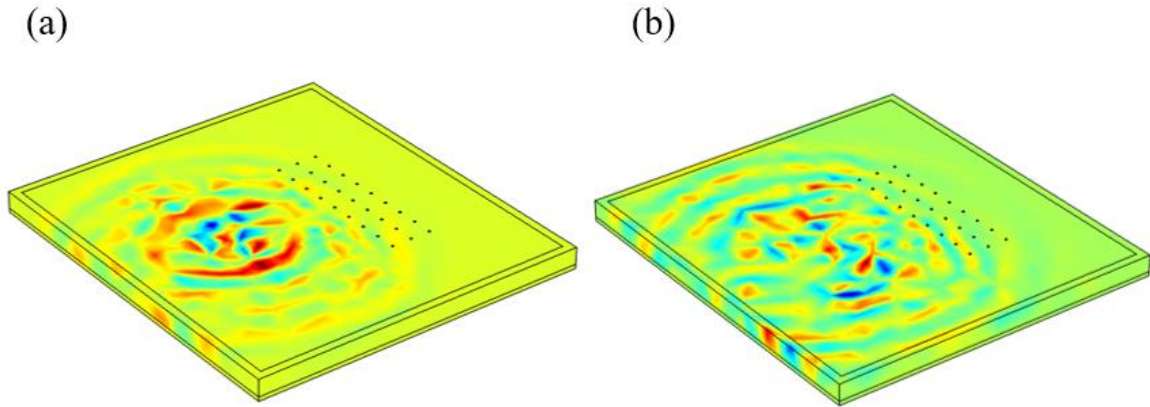
Hem sismik metamalzemenin uygulanmadığı alanda hem de sismik metamalzemenin uygulandığı alanda sismik dalgaların yer değişimi Şekil 5.3'te verilmiştir.



Şekil 5.3. Kare örgü yapısı 9 Hz frekansında frekans alanında toplam yer değıştirme

Şekil 5.3'te verilen toplam yer değıştirmeler için kırmızı ile gösterilen alanlarda maksimum yer değıştirme varken mavi ile gösterilen alanlarda minimum yer değıştirmeler vardır. Frekans alanında yapılan çalışmada alınan simülasyon görüntüsü herhangi bir zamana ait sismik yüzey dalgalarının ilerleyişidir. Bu duruma göre kare örgü yapısında uygulanan beton kazıklar sismik yüzey dalgalarının toplam yer değıştirmelerini en iyi 9 Hz frekansında engelleyebilmiştir.

Zaman alanında gerçekleştirilen çalışma ile 9 Hz frekansında dalgaların sahada nasıl ilerlediği ve ilerleme şiddetleri simüle edilmiştir. Simülasyonun başlangıcından kısa süre sonra alınan bir görüntü (a) ve bitiş anlarına yakın alınan bir görüntü (b) ile zaman alanında elde edilen sismik yüzey dalgalarının yer değışim simülasyonları Şekil 5.4'te verilmiştir.



Şekil 5.4. 9 Hz frekansında zaman alanında toplam yer değiştirme simülasyon ortalarında (a) ve simülasyon sonlarında (b)

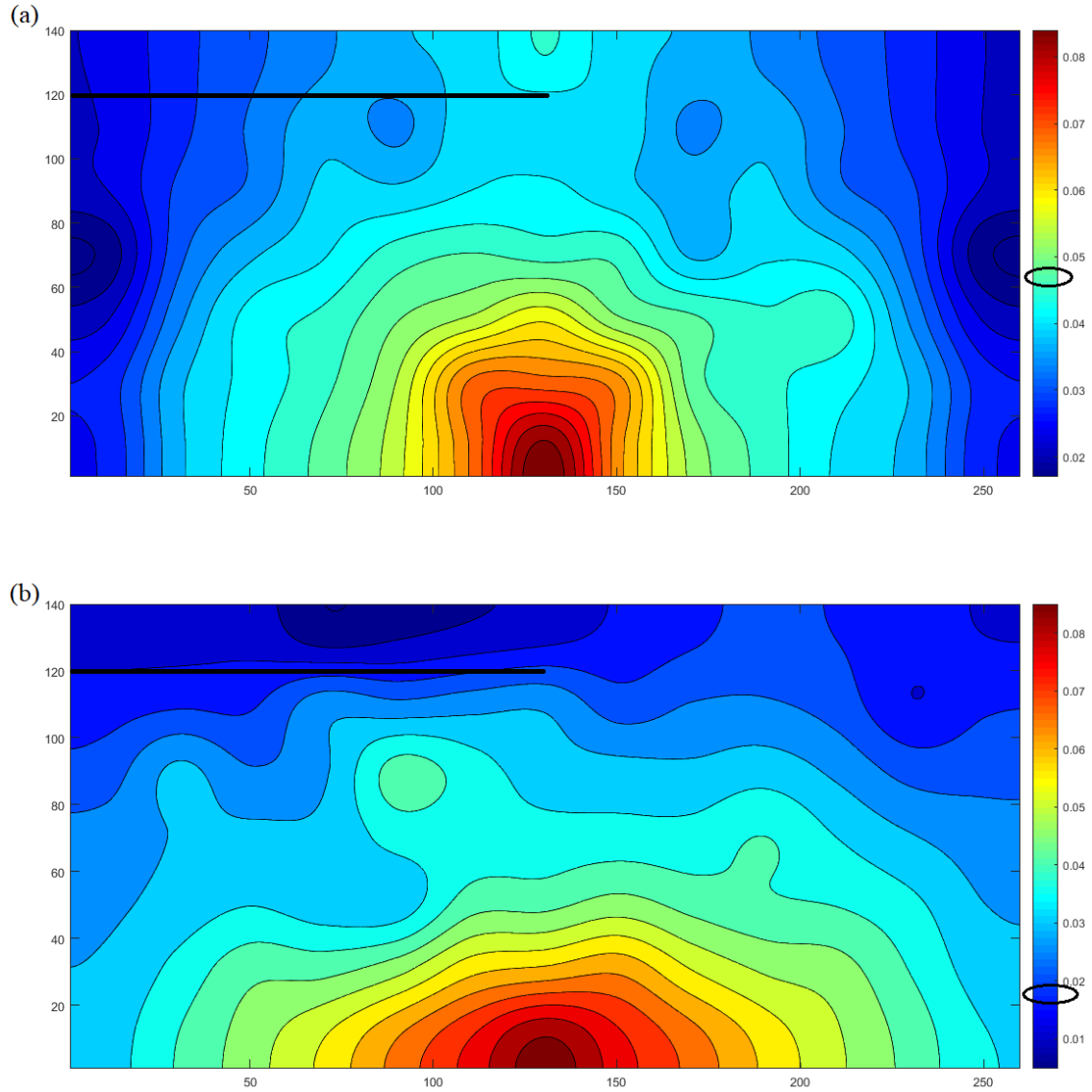
Simülasyon görüntüleri incelendiğinde simülasyon başlangıcından sonuna kadar sismik dalgaların tasarlanan sahanın arkasına tam olarak ulaşamadığı, sönümlenerek ilerlediği ve 9 Hz frekansındaki sismik yüzey dalgalarının kare örgü yapısında beton kazıklar kullanılarak oluşturulmuş sismik metamateryaller ile oldukça zayıflatılabildiği gözlemlenmiştir.

Kare örgü yapısını test etmek amacıyla gerçekleştirilen deneysel analizde uygulanan titreşimler ivme ölçerler ile ölçülerek DAQ kartına aktarılmıştır. Daha sonra DAQ kartındaki bu veriler HFD algoritması uygulanması ile frekans alanına dönüştürülmüştür. Sismik yüzey dalgalarının ilerleyişini gözlemlemek amacıyla her bir sensörden alınan veriler kullanılarak sismik haritalandırmalar yapılmıştır. Deneysel sahasından alınan bu veriler Çizelge 5.2’de gösterilmiştir.

Çizelge 5.2. Kare örgü için deneysel ölçüm verileri

Frekans (Hz)	DAQ1-Kanal1(V)	DAQ1-Kanal2(V)	DAQ1-Kanal3(V)	DAQ1-Kanal4(V)	DAQ1-Kanal5(V)	DAQ1-Kanal6(V)	DAQ1-Kanal7(V)	DAQ1-Kanal8(V)	DAQ1-Kanal9(V)	DAQ1-Kanal10(V)	DAQ1-Kanal11(V)
1	0,1169750	0,1204789	0,1819944	0,0684426	0,0940154	0,0139034	0,1959899	0,0857902	0,0711957	0,0280004	0,0554061
2	0,1165534	0,1200083	0,1848934	0,0693784	0,0903010	0,0129354	0,1954299	0,0900529	0,0705125	0,0290531	0,0543836
3	0,1172380	0,1217003	0,1800500	0,0694419	0,0912116	0,0131189	0,1962057	0,0873901	0,0700838	0,0296834	0,0544824
4	0,1173654	0,1356249	0,1806119	0,0719100	0,0939001	0,0116476	0,1975911	0,0875913	0,0687566	0,0310344	0,0545070
5	0,1184493	0,1241743	0,1807643	0,0696947	0,0914290	0,0124451	0,1950140	0,0894888	0,0693960	0,0301060	0,0534944
6	0,1189892	0,1186817	0,1799409	0,0696352	0,0926702	0,0135225	0,1919163	0,0915707	0,0683366	0,0290492	0,0535898
7	0,1191618	0,1458558	0,1832850	0,0710020	0,0928381	0,0139886	0,1931171	0,0953291	0,0660416	0,0347216	0,0534974
8	0,1194544	0,0992223	0,1815492	0,0695717	0,0919714	0,0155709	0,1948124	0,0904772	0,0688940	0,0267612	0,0523568
9	0,1191516	0,1101492	0,1782014	0,0641932	0,0911067	0,0136395	0,1932587	0,0916988	0,0671360	0,0255210	0,0510964
10	0,1197573	0,1272403	0,1789746	0,0689035	0,0956479	0,0118506	0,1893584	0,0923519	0,0718668	0,0271106	0,0528263

Teorik analizde sismik yüzey dalgalarının durdurulabildiği gözlemlenen 9 Hz frekansı için deneysel analiz sonucunda sismik ölçümler haritalandırılmıştır. Haritalandırmalar ivme ölçerlerden elde edilen ve Çizelge 5.2’de verilen verilerin Matlab programı kullanılarak işlenmesiyle elde edilmiştir. 9 Hz frekansında sismik metamalzemenin kullanılmadığı alandaki sismik yüzey dalgalarının yer değiştirme şiddeti (a) ve sismik metamalzelerin kullanıldığı alandaki sismik yüzey dalgalarının yer değiştirme şiddeti (b) Şekil 5.5’te verilmiştir.



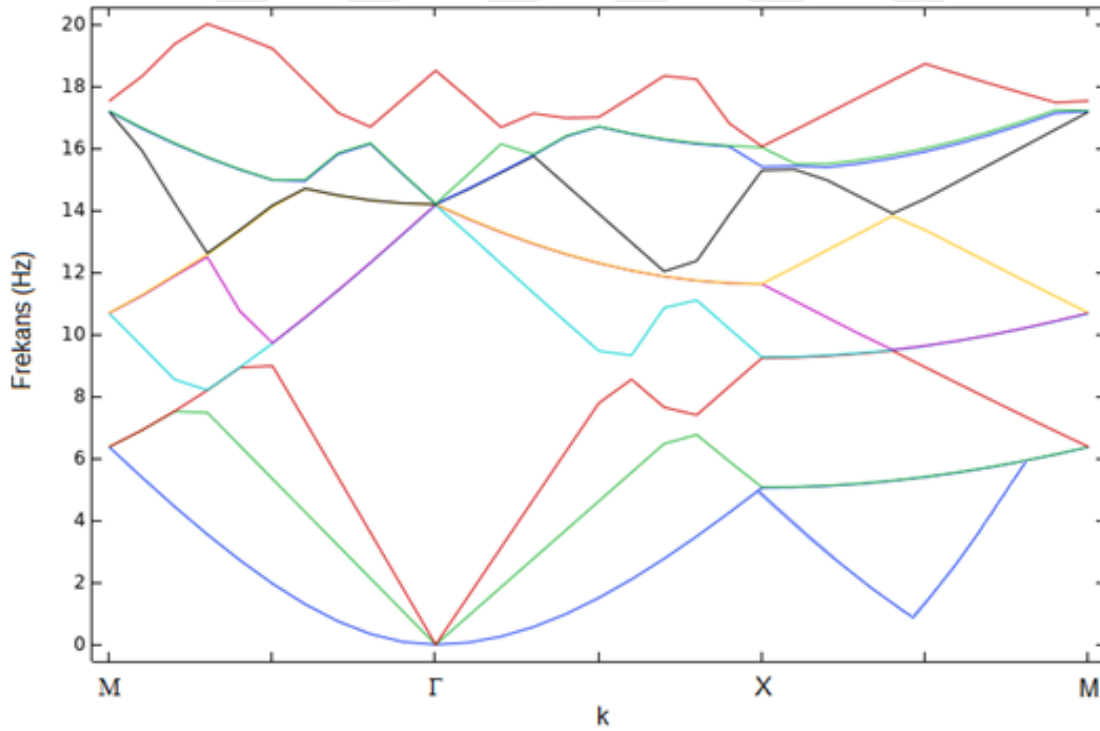
Şekil 5.5. Deneysel çalışmada 9 Hz frekansında sismik metamalzemesiz alanda yer değiştirme (a) ve sismik metamalzeme uygulanan alanda yer değiştirme (b)

Şekil 5.5’te verilen haritaların analiz edilebilmesi için ölçüm sahalarının arka tarafından aynı mesafelerden birer çizgi çizilmiş ve mesafelere denk gelen alanlardaki şiddetler okunmuştur.

Buna göre 9 Hz frekansında sismik metamalzemesiz alanda ölçülen büyüklük 0.047'dir. Kare örgü yapısındaki sismik metamalzemenin uygulandığı alanda ise bu büyüklük 0.017'dir. Bu iki deney sonucu karşılaştırıldığında 9 Hz frekansında sismik yüzey dalgalarının yaklaşık % 64 oranında engellenebildiği sonucuna varılmıştır. Bu zayıflamanın sebebi, zeminde yayılan sismik yüzey dalgalarının yatay bileşeninin beton kazıklar ile rezonansa girmesidir. Rezonansta zemine uygulanan ve geri yansıyan sismik dalgalar arasında π -radyan faz farkı oluşmuştur ve bu da sismik dalgaların zayıflamasını sağlamıştır. Bu sonuca göre teorik analiz sonuçları deneysel olarak doğrulanmıştır ve kare örgü ile konumlandırılmış beton kazıklardan oluşturulan sismik metamalzemelerin sismik yüzey dalgalarını engelleme kabiliyetine sahip olduğu görülmüştür.

5.2. Üçgen Örgü Analiz Sonuçları

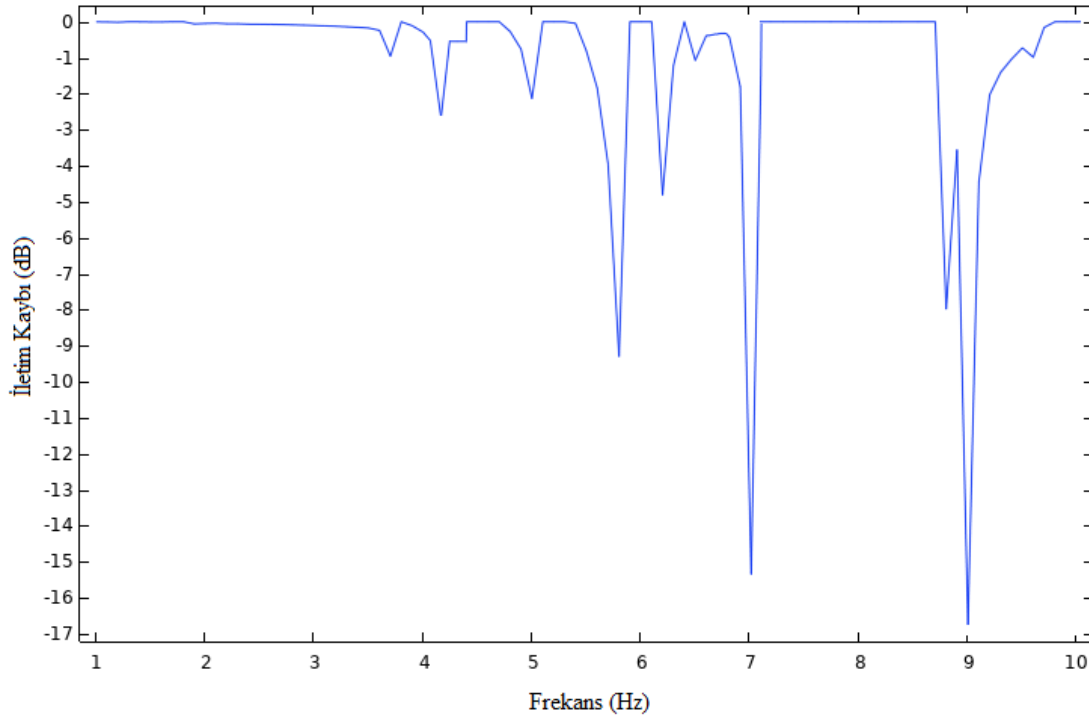
Üçgen örgü yapısı hakkında öngörü sağlamak amacıyla gerçekleştirilen birim hücre çalışması sonucunda elde edilen bant diyagramı Şekil 5.6'da verilmiştir.



Şekil 5.6. Üçgen örgü bant diyagramı

Analiz sonucunda oluşturulan bant diyagramını incelendiğinde iki kısmi bant boşluğunun iki farklı frekansta oluştuğu görülmüştür. 7 Hz frekansında X-M yönü boyunca kısmi bir bant,

9 Hz frekansında Γ -X yönü boyunca kısmi bir bant boşluğu oluşmuştur. Elde edilen bu bant boşlukları üçgen örgü yapısındaki sismik metalmazemelerin bu frekanslarda sismik yüzey dalgalarını zayıflatılabileceğini göstermiştir. Birim hücre analizi sonrasında oluşturulan saha yapısı için gerçekleştirilen frekans alanındaki çalışma sonucunda elde edilen iletim karakteristiği grafiği Şekil 5.7’de verilmiştir.



Şekil 5.7. Üçgen örgü iletim karakteristiği

İletim karakteristikleri grafiği ile birim hücre analizi sonuçları karşılaştırıldığında sonuçların uyumluluğu olduğu ve kısmi bant boşluğu oluşturulan 7 Hz ve 9 Hz frekanslarında daha yüksek iletim kayıpları olduğu görülmüştür. Üçgen örgü yapısındaki beton kazıkların sebep olduğu tüm iletim kayıpları ve bu iletim kayıplarının gerçekleştiği frekanslar Çizelge 5.2’de verilmiştir.

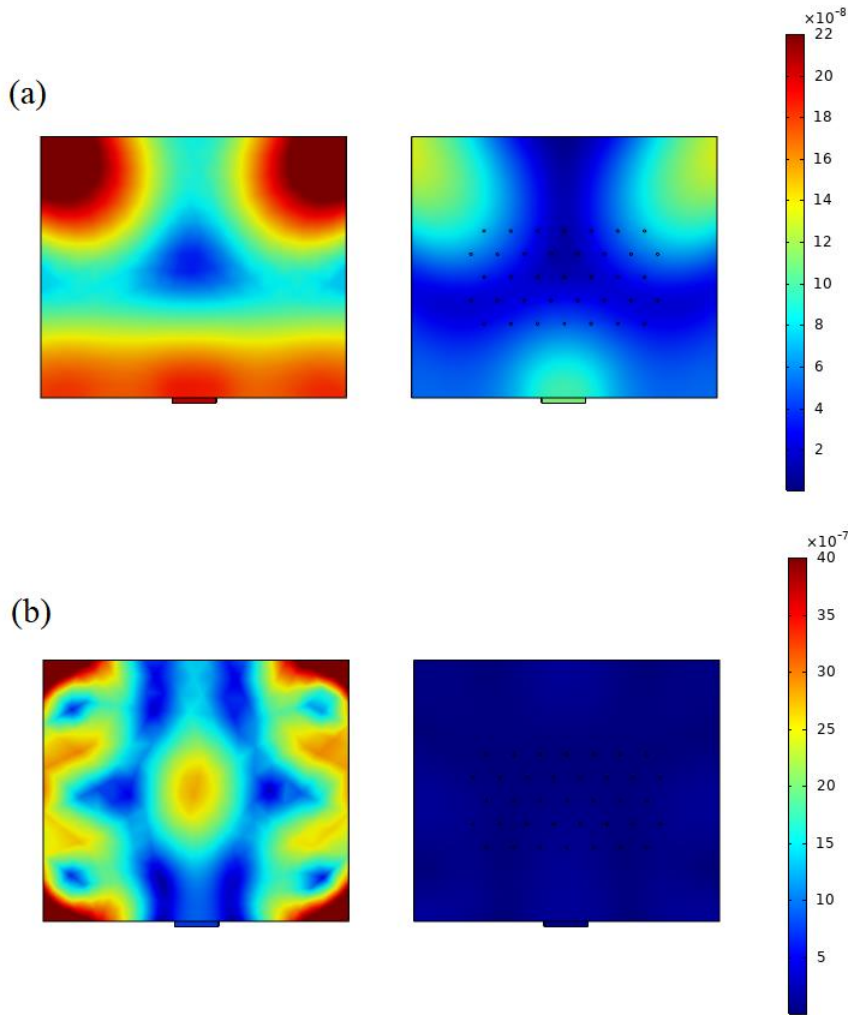
Çizelge 5.3. Üçgen örgü iletim kayıpları

Frekans (Hz)	İletim Kaybı (dB)
4,3	-2,66
5	-2,15
5,8	-9,30
6,2	-4,81

Çizelge 5.3. (Devam) üçgen örgü iletim kayıpları

Frekans (Hz)	İletim Kaybı (dB)
7	-15,56
8,8	-8,00
9	-16,96

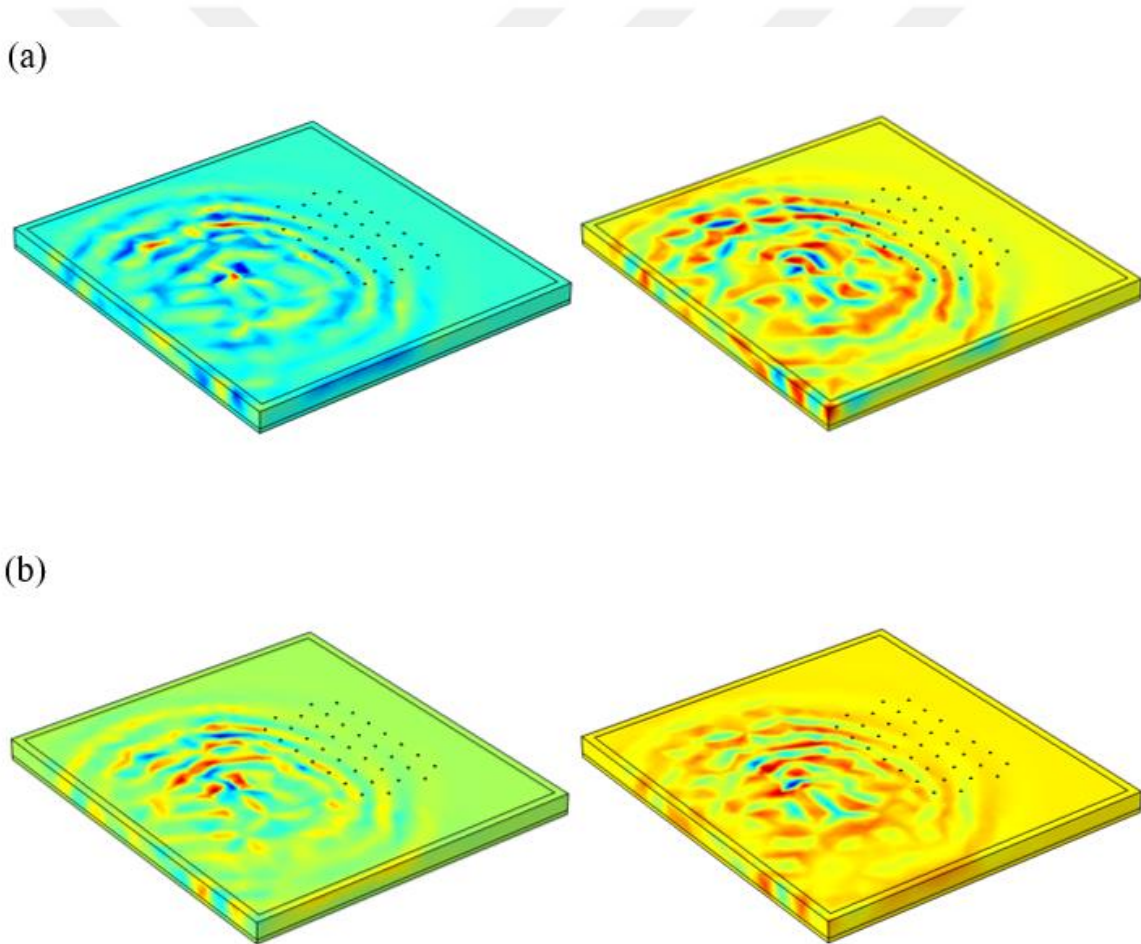
Frekans alanında yapılan bu çalışmada iletim kaybının olduğu frekanslarda bir simülasyon gerçekleştirilmiş ve hem metemalzemenin uygulanmadığı sahada hem de metemalzemenin uygulandığı sahada toplam yer değişimleri simüle edilmiştir. 7 Hz frekansı (a) için ve 9 Hz frekansı için (b) herhangi bir zamanda alınan toplam yer değişimlerinin görüntüleri Şekil 5.8'de verilmiştir.



Şekil 5.8. 7 Hz frekansında frekans alanına toplam yer değiştirme (a) ve 9 Hz frekansında frekans alanında toplam yer değiştirme (b)

Simülasyonlarda kırmızı olan yerlerde yer değıştirme miktarı en fazla mavi olan yerlerde ise yer değıştirme miktarı en azdır. Bu duruma göre 7 Hz frekansında ve 9 Hz frekansında toplam yer değıştirmelerin üçgen örgü yapısındaki beton kazıklar sayesinde büyük bir oranda azaltılabildiği Şekil 5.8'den anlaşılmaktadır.

Frekans alanı çalışmasından sonra zaman alanında gerçekleştirilen bir çalışma ile sismik yüzey dalgalarının sismik metamatzemenin uygulandığı alanda zamanla ilerleyişı simüle edilmiştir. 7 Hz frekansında sırasıyla simülasyon ortalarından ve sonlarından birer görüntü (a) ve 9 Hz frekansında sırasıyla simülasyon ortalarından ve sonlarından birer görüntü (b) Şekil 5.9'da verilmiştir.



Şekil 5.9. 7 Hz frekansında zaman alanında toplam yer değıştirme simülasyon ortalarında ve simülasyon sonlarında (a) , 9 Hz frekansında zaman alanında toplam yer değıştirme simülasyon ortalarında ve simülasyon sonlarında (b)

Simülasyon sonuçlarına bakıldığında hem 7 Hz frekansı hem de 9 Hz frekansında sismik yüzey dalgalarının hiçbir zaman tam olarak üçgen örgü yapısındaki sismik metamalzemelerin arka tarafına geçemediği görülmüştür. Sismik yüzey dalgalarının sismik metamalzeme ile karşılaşmadığı alanlarda daha şiddetli ilerlerken sismik metamalzemeli alanlarda sönmülenererek ilerlediği gözlemlenmiştir. Bant aralığındaki güçlü zayıflama sayesinde, sismik dalgalar periyodik sismik metamalzeme yapısının arkasına geçememiştir. Sismik dalgalar geliş açısına bağlı olarak sismik metamalzeme ile karşılaştıktan sonra diğer taraflara yayılabilir, Snell yasası ile açıklanabilen bu durumda sismik yüzey dalgaları kayma dalgalarına dönüşebilir. Sismik dalgalardaki bu zayıflama, beton kazık dizisi ile sismik yüzey dalgalarının bileşenleri arasındaki etkileşim ile rezonans oluşmasıdır. Sismik yüzey dalgalarının engellenebilmesi uygulanan dalgalar ile yansıyan dalgaların birbirlerini sönmülmesi ile gerçekleşir.

Teorik çalışmalar sonucunda elde edilen sonuçları test etmek amacıyla sayısal analizlerle birebir ölçekli deneysel bir analiz gerçekleştirilmiştir. Harmonik titreşim cihazı ile zemine uygulanan düşük frekans aralığındaki yüzey dalgaları ivme ölçerler ölçülmüş ve elde edilen bu veriler bir bilgisayara DAQ kartı ile kaydedilmiştir. Kaydedilen veriler Çizelge 5.4'te gösterilmiştir.

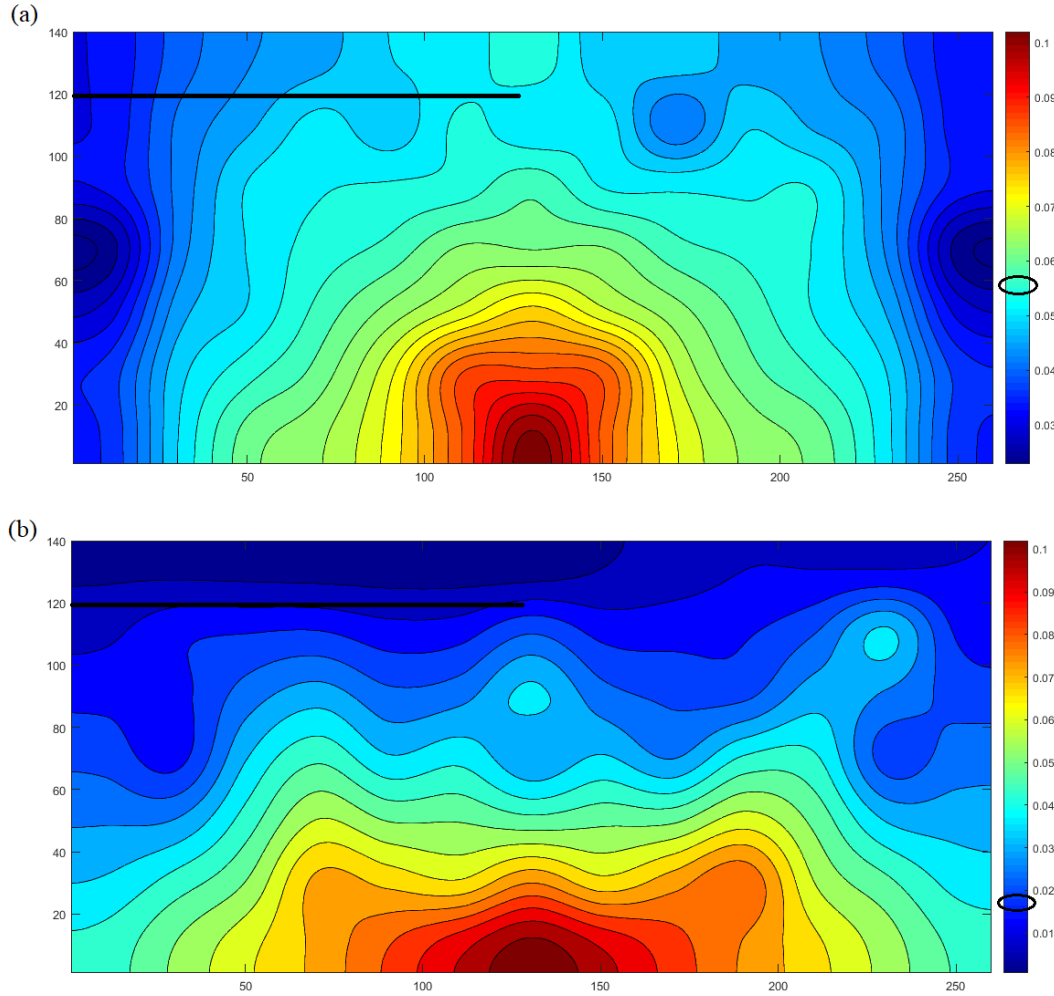
Çizelge 5.4. Üçgen örgü için deneysel ölçüm verileri

Frekans (Hz)	DAQ1-Kanal1(V)	DAQ1-Kanal2(V)	DAQ1-Kanal3(V)	DAQ1-Kanal4(V)	DAQ1-Kanal5(V)	DAQ1-Kanal6(V)	DAQ1-Kanal7(V)	DAQ1-Kanal8(V)	DAQ1-Kanal9(V)
1	0.0348897	0.2466222	0.1856570	0.0718927	0.1830421	0.0109663	0.0829741	0.0488239	0.1888750
2	0.0382638	0.2470358	0.1867637	0.0730686	0.1847150	0.0115476	0.0820523	0.0489711	0.1882960
3	0.0392784	0.2462729	0.1861986	0.0730962	0.1848808	0.0112660	0.0816253	0.0490428	0.1899545
4	0.0403987	0.2464586	0.1873230	0.0717182	0.1858525	0.0109626	0.0839434	0.0491267	0.1878255
5	0.0410244	0.2479004	0.1850053	0.0715747	0.1836570	0.0114910	0.0824457	0.0475581	0.1906160
6	0.0412829	0.2442047	0.1829178	0.0720048	0.1852010	0.0081665	0.0809686	0.0478104	0.1964487
7	0.0418904	0.2449041	0.1811438	0.0719497	0.1823458	0.0078148	0.0807408	0.0467126	0.1894535
8	0.0423955	0.2395162	0.1911878	0.0747588	0.1913406	0.0112952	0.0802638	0.0465861	0.1939412
9	0.0403437	0.2221910	0.1909762	0.0726362	0.1908279	0.0107631	0.0756351	0.0443421	0.1783450
10	0.0436442	0.2460953	0.1877134	0.0789356	0.1918089	0.0236918	0.0812961	0.0472281	0.1831603

Çizelge 5.4. (Devam) Üçgen örgü için deneysel ölçüm verileri

Frekans (Hz)	DAQ1- Kanal10(V)	DAQ1- Kanal11(V)	DAQ1- Kanal12(V)	DAQ1- Kanal13(V)	DAQ1- Kanal14(V)	DAQ1- Kanal15(V)	DAQ1- Kanal16(V)	DAQ1- Kanal17(V)	DAQ1- Kanal18(V)
1	0.0580698	0.0824606	0.2633364	0.0089373	0.0578991	0.0788965	0.0677041	0.0296848	0.0301252
2	0.0624185	0.0826792	0.2641990	0.0092001	0.0580590	0.0789562	0.0677417	0.0288419	0.0311342
3	0.0571044	0.0836719	0.2633830	0.0085440	0.0569560	0.0781275	0.0686341	0.0292975	0.0318954
4	0.0573630	0.0826079	0.2627114	0.0089040	0.0568864	0.0791013	0.0669741	0.0303344	0.0303251
5	0.0590779	0.0841853	0.2634097	0.0102625	0.0574806	0.0789648	0.0692501	0.0295464	0.0312546
6	0.0554223	0.0838658	0.2648688	0.0116842	0.0577405	0.0810246	0.0684808	0.0305951	0.0316205
7	0.0523312	0.0822191	0.2634452	0.0098775	0.0548048	0.0782010	0.0632868	0.0290095	0.0300213
8	0.0504003	0.0850529	0.2643937	0.0094392	0.0552267	0.0821657	0.0679901	0.0309528	0.0325121
9	0.0502189	0.0830572	0.2567204	0.0092388	0.0507585	0.0798653	0.0642929	0.0287927	0.0301020
10	0.0461043	0.0827670	0.2566089	0.0117514	0.0548751	0.0829123	0.0684295	0.0329925	0.3275232

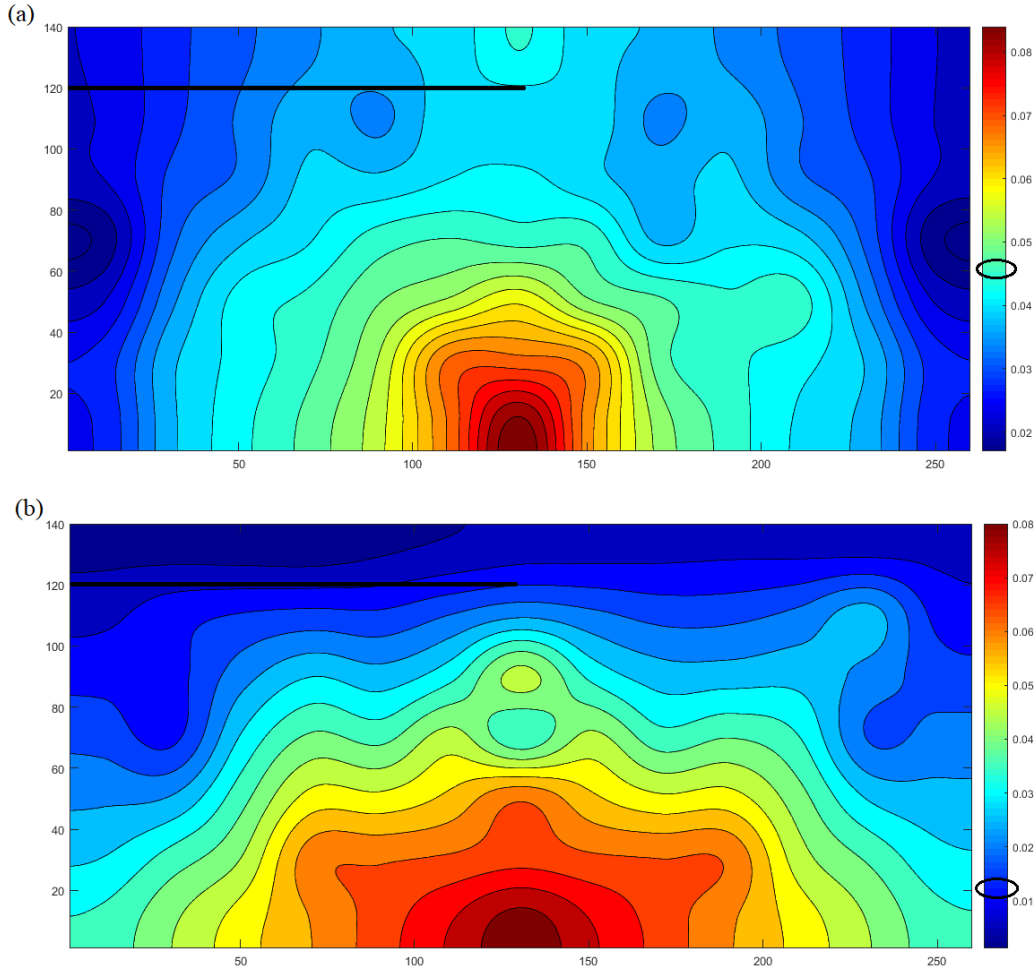
Teorik çalışmalara uygun olarak düzenlenen deneysel çalışma sonucunda elde edilen sismik ölçümler işlenerek 7 Hz ve 9 Hz frekansları için haritalandırılmıştır. Haritalandırmalar hem sismik metamalzemesiz alanlar hem sismik metamalzemeli alanlarda yapılmıştır. Şekil 5.10'da 7 Hz frekansı için sismik metamalzemesiz alanda (a) ve sismik metamalzemeli alanda (b) sismik yüzey dalgalarının yer değiştirmeleri verilmiştir.



Şekil 5.10. Deneysel çalışmada 7 Hz frekansında sismik metamalzemesiz alanda yer değiştirme (a) ve sismik metamalzeme uygulanan alanda yer değiştirme (b)

Aynı uzaklıktan çekilen doğrusal çizgiler ile bu doğrusal çizgiye karşılık gelen sismik yüzey dalgalarının yer değiştirme miktarları tespit edilmiştir. Buna göre, sismik metamalzemenin uygulanmadığı alandaki dalgaların yer değiştirmelerinin birim büyüklüğü 0.056 iken sismik malzemelerin uygulandığı alandaki dalgaların yer değiştirmelerinin birim büyüklüğü 0.017'dir. İki sahanın ölçüm sonuçları değerlendirildiğinde yaklaşık % 69,4 oranında sismik yüzey dalgalarının yer değişiminin azaltılabileceği gösterilmiştir.

Şekil 5.11’de 9 Hz frekansı için sismik metalmalzesiz alanda (a) ve sismik metalmalzemeli alanda (b) sismik yüzey dalgalarının yer değıştirmeleri verilmiştir.

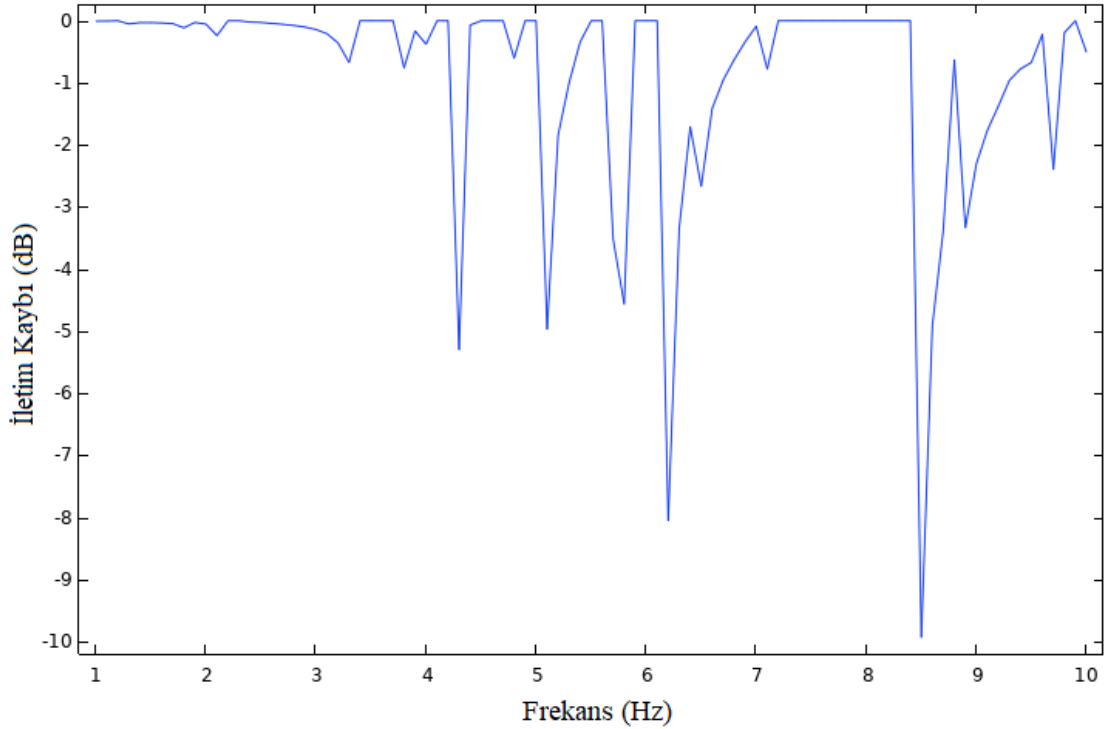


Şekil 5.11. Deneysel çalışmada 9 Hz frekansında sismik metalmalzesiz alanda yer değıştirme (a) ve sismik metalmalzeme uygulanan alanda yer değıştirme (b)

9 Hz frekansı için sismik yüzey dalgalarının sismik metalmalzesiz alanda yer değıştirme miktarı 0.047 birim büyüklüğünde iken sismik metalmalzeme uygulanan alanda yer değıştirme miktarı 0.012 birim büyüklüğündedir. İki sahanın birim büyüklük oranlarına bakıldığında yaklaşık %74,4 olduğu görülmüştür. Teorik ve deneysel analizler sonucunda elde edilen bulgular birbirlerini destekler niteliktedir. Yani üçgen örgü yapısında uygulanan beton kazıklar sismik dalgaların ilerleyişini 9 Hz frekansında %74,4 engelleyebilmiştir.

5.3. Dairesel Örgü Analiz Sonuçları

Dairesel şekilde konumlandırılmış beton kazıklar periyodik bir yapıda olmadığı için Γ , X ve M yönlerinde periyodik olmayan davranışlar sergiler. Bu nedenle bu örgü yapısı için bir birim hücre analizi gerçekleştirilememiştir. Dairesel örgü yapısı için gerçekleştirilen frekans alanındaki çalışmada elde edilen iletim karakteristiği grafiği Şekil 5.12’de verilmiştir.



Şekil 5.12. Dairesel örgü iletim karakteristiği

Şekil 5.12’de verilen grafikte düşük frekans aralığındaki birden fazla frekansta iletim kayıpları olmuştur. İletim kaybının yaşandığı frekanslarda sismik yüzey dalgalarının iletim değerlerinin düştüğü yani sismik dalgaların sönmülenebileceği görülmüştür. Dairesel örgü ile konumlandırılmış beton kazıkların iletim kaybı yarattığı tüm frekanslar ve iletim kaybı değerleri Çizelge 5.5’te verilmiştir.

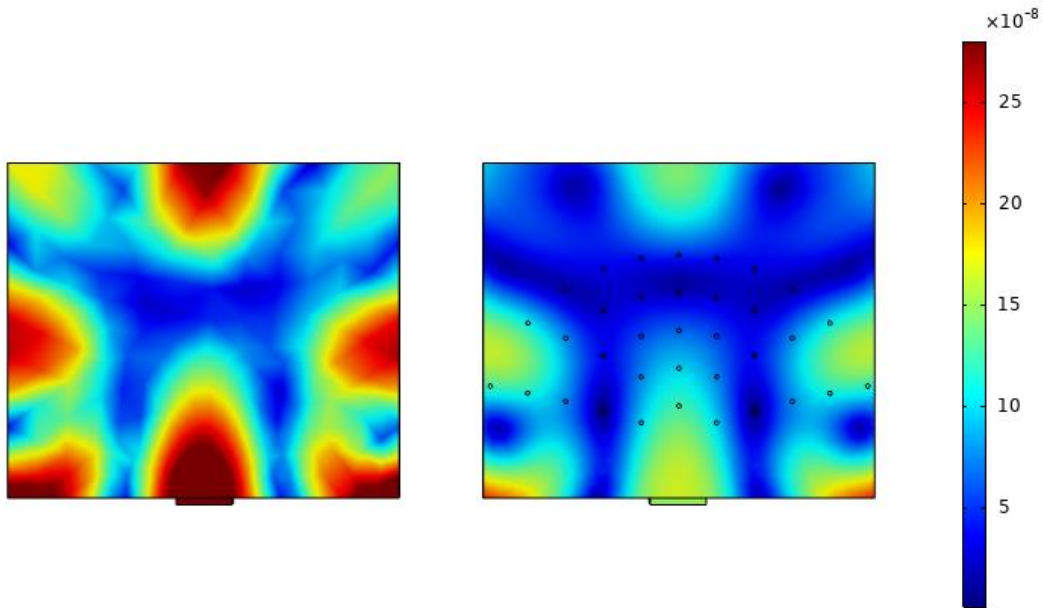
Çizelge 5.5. Dairesel örgü iletim kayıpları

Frekans (Hz)	İletim Kaybı (dB)
4,3	-5,66
5,1	-4,99
5,8	-4,78

Çizelge 5.5. (Devam) Dairesel örgü iletim kayıpları

Frekans (Hz)	İletim Kaybı (dB)
6,2	-8,25
8,5	-9,68
8,9	-3,62
9,7	-2,81

İletim kaybı değerlerine bakıldığında en yüksek kaybın 8,5 Hz’de daha sonra ise 6,2 Hz’de olduğu görülmüştür. Bu sonuca göre 8,5 Hz ve 6,2 Hz frekanslarında sismik yüzey dalgaları diğer frekanslara göre daha fazla sönümlenmiştir. Bu sönümlenmenin görülebilmesi için frekans alanında gerçekleştirilen simülasyon 8,5 Hz için gerçekleştirilmiştir. Bunun sebebi deneysel analizde titreşim cihazı ile ara değerlerde ölçümün gerçekleştirilememesi ve karşılaştırma yapılamayacak olmasıdır. 8,5 Hz frekansı için sismik yüzey dalgalarının yer değiştirmelerini temsil eden simülasyon görüntüleri sırasıyla sismik metamalzemesiz alan ve sismik metamalzemeli alan için Şekil 5.13’te verilmiştir.

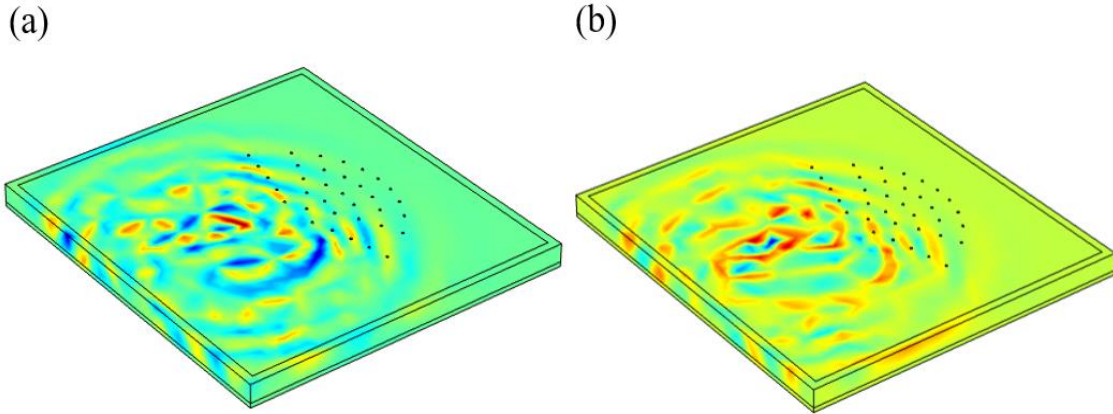


Şekil 5.13. 8,5 Hz frekansında frekans alanına toplam yer değiştirme

Mavi ile gösterilen alanlarda minimum yer değiştirme, kırmızı ile gösterilen alanlarda ise maksimum yer değiştirme temsil edilmektedir. Bu durumda sismik metamalzemesiz alanda sismik yüzey dalgalarının daha şiddetli yer değiştirdiği fakat sismik metamalzemeler

sayesinde yüzey dalgalarının sönmülenebileceği ve yer değiştirmelerinin azaltılabileceği görülmüştür.

Zaman alanında yapılan çalışma ile sismik yüzey dalgalarının zamanla nasıl ilerlediği simüle edilmiştir. Bu simülasyon zamanına ait iki görüntü simülasyon ortalarında (a) ve simülasyon sonlarında (b) olarak Şekil 5.14'te verilmiştir.



Şekil 5.14. 8,5 Hz frekansında zaman alanında toplam yer değiştirme simülasyon ortalarında (a) ve simülasyon sonlarında (b)

Simülasyonlar incelendiğinde sahanın kenarlarına doğru sismik yüzey dalgaları hızla yayılırken dairesel örgü yapısındaki sismik metamalzemeler ile karşılaşan dalgaların ilerleyişi yavaşlatılmış, dalga boyları sönmülmüş ve saha arkasına geçmesi önlenmiştir. Seçilen silindirik kazıkların boyutları dalga boyuna göre oldukça düşükken, yüzey dalgaları ile beton kazıklar arasında oluşan rezonans sayesinde güçlü bir zayıflama elde edilmiştir. Böylece 8,5 Hz frekansındaki sismik yüzey dalgaların dairesel dizilimdeki beton kazıklar sayesinde sönmülenebileceği teorik olarak gösterilmiştir.

Deneysel analizde uygulanan düşük frekans aralığındaki titreşimlerin ivme ölçerler ile alınması ve bir bilgisayara DAQ kartı ile kaydedilmesi sonucunda elde edilen saha ölçüm verileri Çizelge 5.6'da verilmiştir.

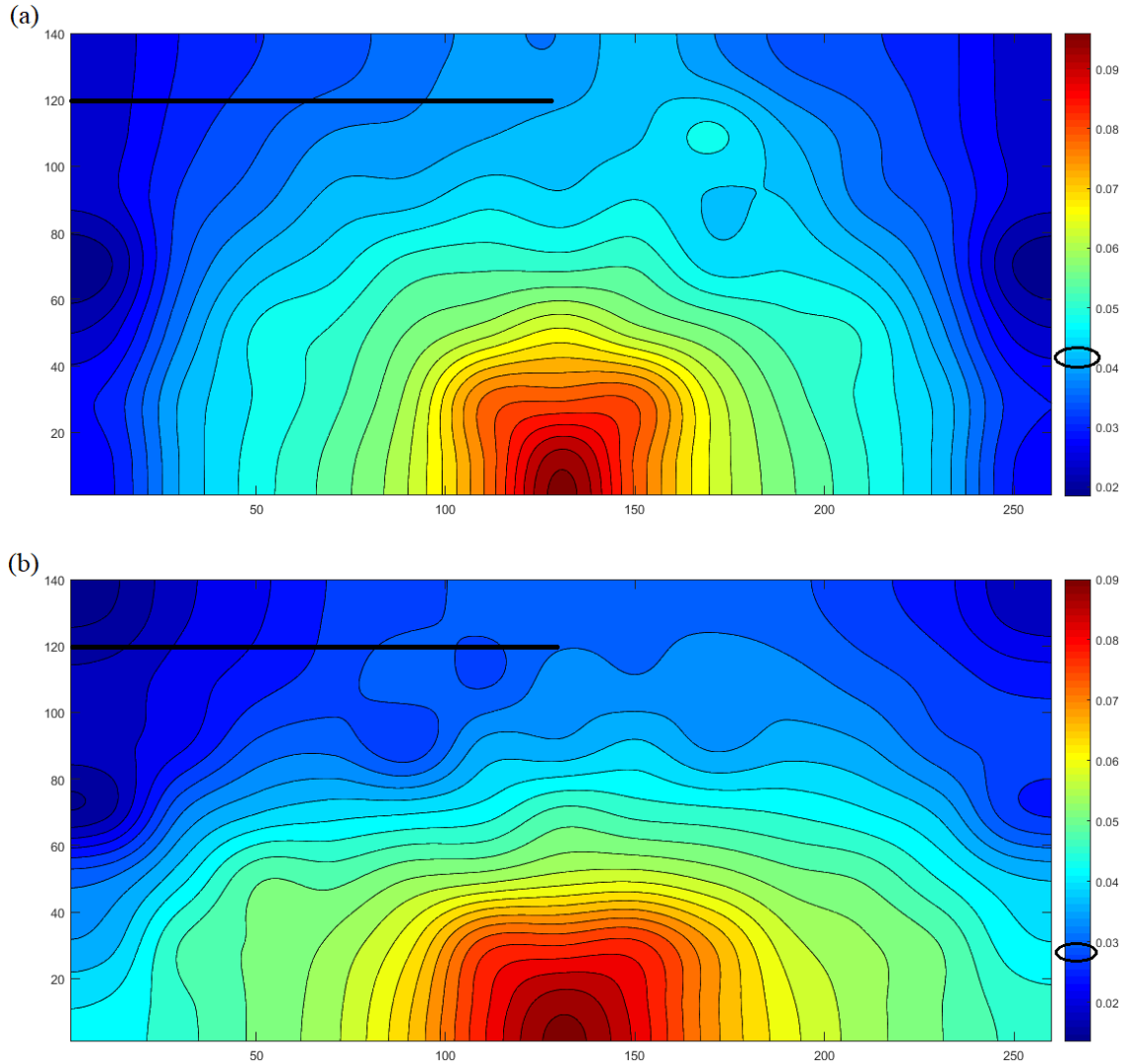
Çizelge 5.6. Dairesel örgü için deneysel ölçüm verileri

Frekans (Hz)	DAQ1- Kanal1(V)	DAQ1- Kanal2(V)	DAQ1- Kanal3(V)	DAQ1- Kanal4(V)	DAQ1- Kanal5(V)	DAQ1- Kanal6(V)	DAQ1- Kanal7(V)	DAQ1- Kanal8(V)	DAQ1- Kanal9(V)	DAQ1- Kanal10(V)
1	0,1748098	0,0430990	0,2318140	0,0862647	0,0314504	0,1298776	0,0139124	0,0293885	0,0440305	0,1541658
2	0,1747663	0,0380952	0,2271546	0,0856631	0,0307221	0,1291393	0,0139574	0,0292897	0,0437559	0,1538764
3	0,1752738	0,0406327	0,22965820	0,0858782	0,0308761	0,1298117	0,0140868	0,0297295	0,0437472	0,1538735
4	0,1757754	0,0392490	0,2301442	0,0855702	0,0308717	0,1295918	0,0165655	0,0302845	0,0431079	0,1536740
5	0,1762968	0,0415394	0,2308319	0,0863763	0,0299479	0,1293713	0,0136146	0,0295757	0,0436322	0,1535289
6	0,1773843	0,0400438	0,2309736	0,0837655	0,0315281	0,1300823	0,0134207	0,0296308	0,0438995	0,1546488
7	0,1776677	0,0420430	0,2320507	0,0858171	0,0306582	0,1298119	0,01353240	0,0297242	0,0434472	0,1538273
8	0,1766131	0,0396913	0,2275287	0,0870677	0,0327840	0,1285242	0,0147231	0,0291287	0,0434351	0,1528881
8.5	0,1753422	0,0384512	0,2262314	0,0836523	0,0300236	0,0128511	0,0133254	0,0290655	0,0431023	0,1522654
9	0,1779710	0,0433612	0,2315039	0,0847797	0,0301066	0,1291088	0,0140867	0,0294637	0,0440547	0,1533722
10	0,1784716	0,0454149	0,2363064	0,0829452	0,0300024	0,1304251	0,0143801	0,0293077	0,0451547	0,1545871

Çizelge 5.6. (Devam) Dairesel örgü için deneysel ölçüm verileri

Frekans (Hz)	DAQ1- Kanal11(V)	DAQ1- Kanal12(V)	DAQ1- Kanal13(V)	DAQ1- Kanal14(V)	DAQ1- Kanal15(V)	DAQ1- Kanal16(V)	DAQ1- Kanal17(V)	DAQ1- Kanal18(V)	DAQ1- Kanal19(V)
1	0,0703559	0,1233175	0,1374713	1,2602230	0,1496539	0,0654233	0,0260108	0,0713419	0,0519398
2	0,0700819	0,1240264	0,1371718	1,2308930	0,1576137	0,0618547	0,0230823	0,0744339	0,0493810
3	0,0709030	0,1233899	0,1379976	1,1656822	0,1346671	0,0662933	0,0265683	0,0724318	0,0469023
4	0,0700019	0,1242034	0,1373605	1,1674095	0,1256945	0,0627228	0,0267479	0,0736474	0,0484583
5	0,0705324	0,1239622	0,1383491	1,1855076	0,1567854	0,0617361	0,0285595	0,0741627	0,0522711
6	0,0696579	0,1243127	0,1364491	1,2049535	0,1451698	0,0693319	0,0265130	0,0731393	0,0538418
7	0,0697824	0,1239742	0,1384055	1,2078438	0,1437152	0,0642405	0,0257999	0,0765623	0,0547981
8	0,0711680	0,1237589	0,1377987	1,2020456	0,1245063	0,065389	0,0262306	0,0726954	0,0553369
8.5	0,0696698	0,0123158	0,1361245	1,2001365	0,1211274	0,0610145	0,0252348	0,0725464	0,0468521
9	0,0714782	0,1240194	0,1369902	1,1907155	0,1531290	0,0620835	0,0199798	0,0764125	0,0554924
10	0,0708015	0,1235741	0,1369828	1,1826700	0,1572107	0,0671494	0,0193059	0,0771669	0,0556043

Deneysel çalışma ile sismik yüzey dalgalarının dairesel dizilimdeki beton kazıklar arasında nasıl ilerlediğini görebilmek amacıyla saha ölçüm sonuçlarından elde edilen veriler kullanılarak haritalandırmalar yapılmıştır. 8,5 Hz frekansındaki sismik yüzey dalgalarının deney sahasındaki yer değişimleri sismik metamalzemenin uygulanmadığı sahada (a) ve sismik metamalzemenin uygulandığı sahada (b) Şekil 5.15'te gösterilmiştir.



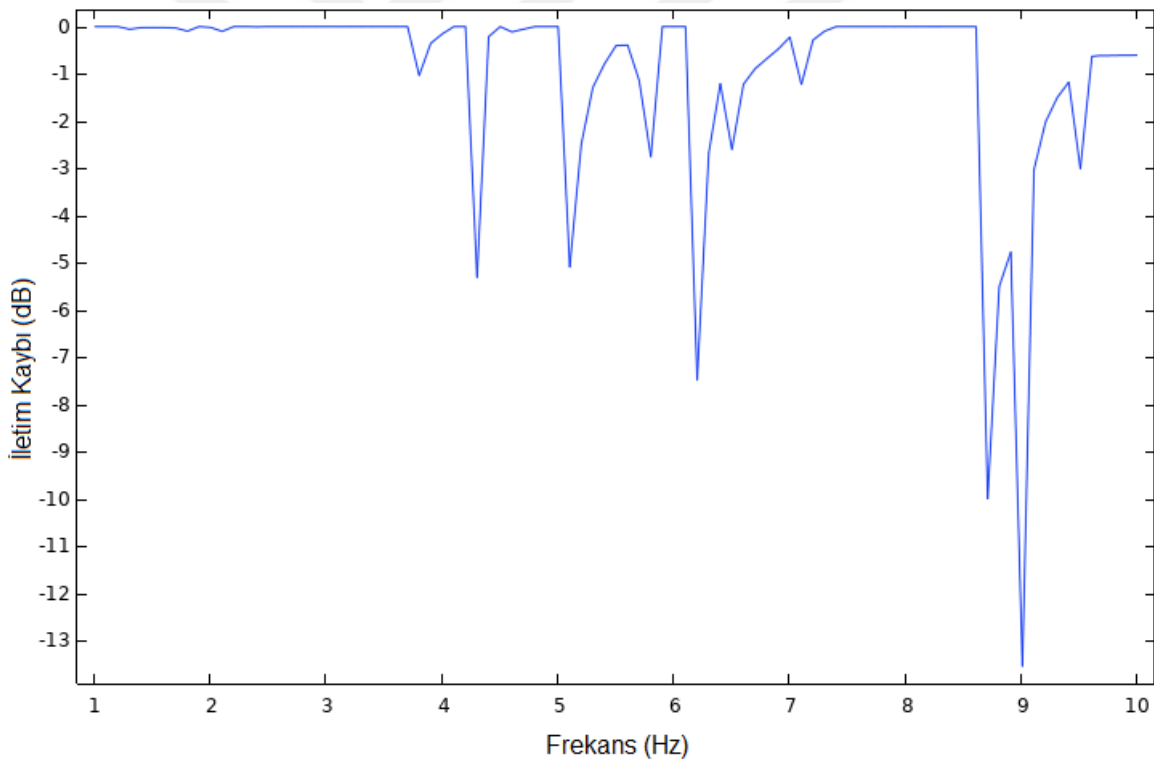
Şekil 5.15. Deneysel çalışmada 8,5 Hz frekansında sismik metamalzemesiz alanda yer değiştirme (a) ve sismik metamalzeme uygulanan alanda yer değiştirme (b)

Yer değişim haritalarında sahaların arkasındaki bir noktadan aynı mesafeden birer çizgi çekilerek yer değiştirmelerin denk geldiği değerler okunmuştur. Sismik metamalzemenin uygulanmadığı alanda yer değiştirme 0.043 birim büyüklüğünde iken sismik metamalzemenin uygulandığı sahadaki yer değiştirmenin birim büyüklüğü 0.027'dir. Bu iki

değer karşılaştırıldığında yer değiştirmeler yaklaşık olarak %37,21 oranında azalmıştır. Deneysel analizden elde edilen sonuçlar teorik sonuçlarla benzer sonuçlar vermiş ve dairesel örgünü yapısındaki sismik metalmazemelerin sismik yüzey dalgalarının sönümlenmesinde kullanılabileceği deneysel olarak da gösterilmiştir.

5.4. Sinüzoidal Örgü Analiz Sonuçları

Sinüzoidal şekilde konumlandırılmış beton kazıklar periyodik bir yapıda olmadığı için Γ , X ve M yönlerinde periyodik olmayan davranışlar sergiler. Bu nedenle bu örgü yapısı için bir birim hücre analizi gerçekleştirilememiştir. Sinüzoidal örgü için gerçekleştirilen frekans alanındaki çalışma sonucunda elde edilen frekans iletim karakteristiği grafiği Şekil 5.16'da verilmiştir.



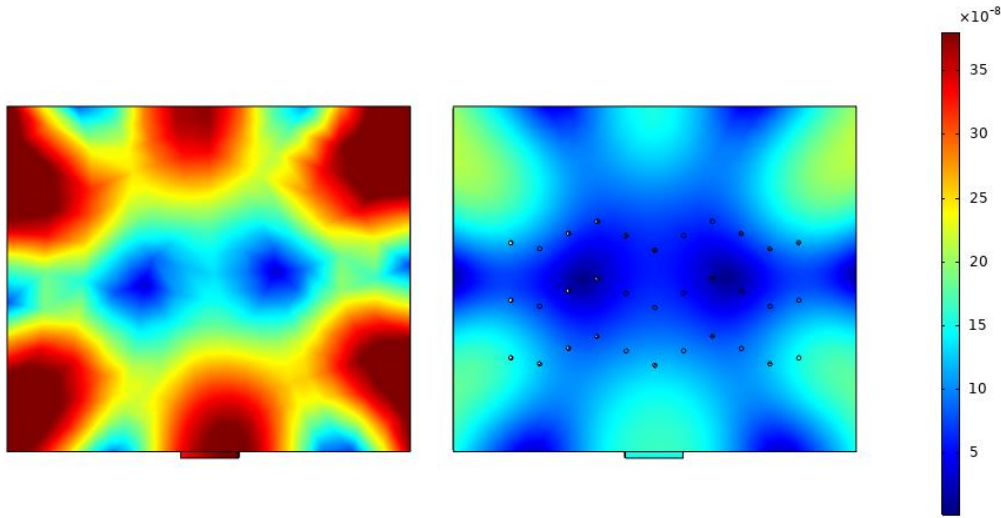
Şekil 5.16. Sinüzoidal örgü iletim karakteristiği

1-10 Hz düşük frekans aralığında gerçekleştirilen analiz sonuçlarına göre sismik yüzey dalgaları yayılırken sinüzoidal örgü yapısındaki sismik metalmazemelerle karşılaştığında iletim kayıplarına uğramışlardır. Sinüzoidal örgü yapısındaki sismik metalmazemelerin neden olduğu iletim kayıpları değerleri Çizelge 5.7'de verilmiştir.

Çizelge 5.7. Sinüzoidal örgü iletim kayıpları

Frekans (Hz)	İletim Kaybı (dB)
3,8	-1,00
4,3	-5,35
5,1	-5,02
5,8	-2,75
6,2	-7,40
8,6	-9,96
9	-13,71

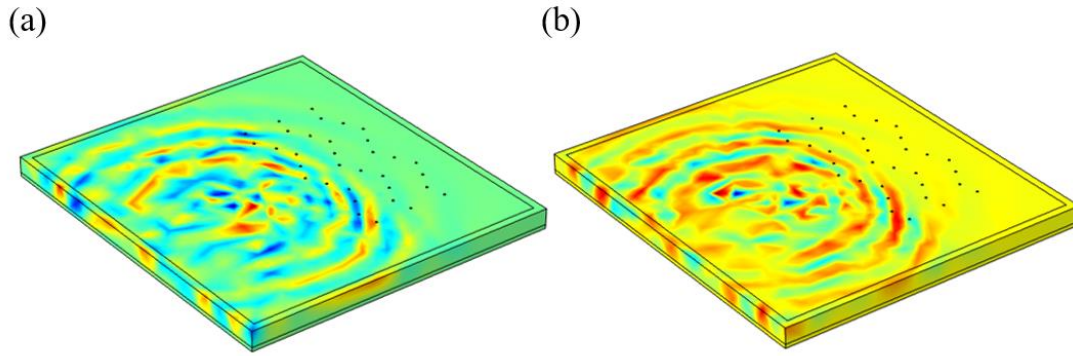
İletim kaybı değerlerine göre en yüksek iletim kaybı 9 Hz frekansında yaşanmıştır. Yani sinüzoidal örgü yapısı en iyi 9 Hz frekansındaki sismik yüzey dalgalarının ilerleyişine engel olabilmektedir. Sismik yüzey dalgalarının bu yer değişimini görebilmek amacıyla gerçekleştirilen 9 Hz frekansı için gerçekleştirilen frekans alanındaki simülasyon Şekil 5.17'de verilmiştir.



Şekil 5.17. 9 Hz frekansında frekans alanına toplam yer değiştirme

Sismik metalmalzesiz ve sismik metalmalzemeli alanlardaki yer değiştirmeler incelendiğinde metalmalzesiz alanda kırmızı rengin daha yoğun olduğu yani sismik yüzey dalgalarının daha şiddetli yer değiştirdiği, metalmalzemeli alanda ise mavi rengin daha yoğun olduğu yer değiştirmelerin daha az olduğu görülmüştür. Bu durumda sismik metalmalzemelerin 9 Hz frekansında dalgaları sönmleme kabiliyetinde olduğu görülmüştür.

Zaman alanında yapılan çalışma ile sismik yüzey dalgalarının titreşim süresi boyunca nasıl ilerlediğini görmek amacıyla oluşturulan simülasyon görüntüleri simülasyon ortalarında (a) ve simülasyon sonlarında (b) olmak üzere Şekil 5.18’de verilmiştir.



Şekil 5.18. 9 Hz frekansında zaman alanında toplam yer değiştirme simülasyon ortalarında (a) ve simülasyon sonlarında (b)

Zaman alanı simülasyonları incelendiğinde metamalzemelerin olmadığı alanda sismik dalgalar kolayca yayılmış fakat metamalzeme ile karşılaşan sismik yüzey dalgaları sönmülenerak ilerleyebilmiştir. 9 Hz frekansındaki sismik yüzey dalgaları titreşim süresi boyunca sinüzoidal dizilimdeki sismik metamalzemelerin arkasına geçememiştir. Kullanılan beton kazıkların sismik metamalzeme özelliği göstermesinden dolayı sismik dalgalar güçlü bir sönmülemeye uğramıştır. Teorik analiz sonucunda sinüzoidal örgü yapısındaki sismik metamalzemelerin yüzey dalgalarını sönmülemede kullanılabileceği görülmüştür. Sayısal çalışmaların sonucunu test etmek amaçlı gerçekleştirilen deneysel çalışmalarda harmonik titreşim cihazıyla uygulanan sismik yüzey dalgalarının verileri ivme ölçerler ile kaydedilmiş ve bilgisayara DAQ kartı kullanılarak aktarılmıştır. Deneysel ölçümlerle elde edilen bu veriler Çizelge 5.8’de verilmiştir.

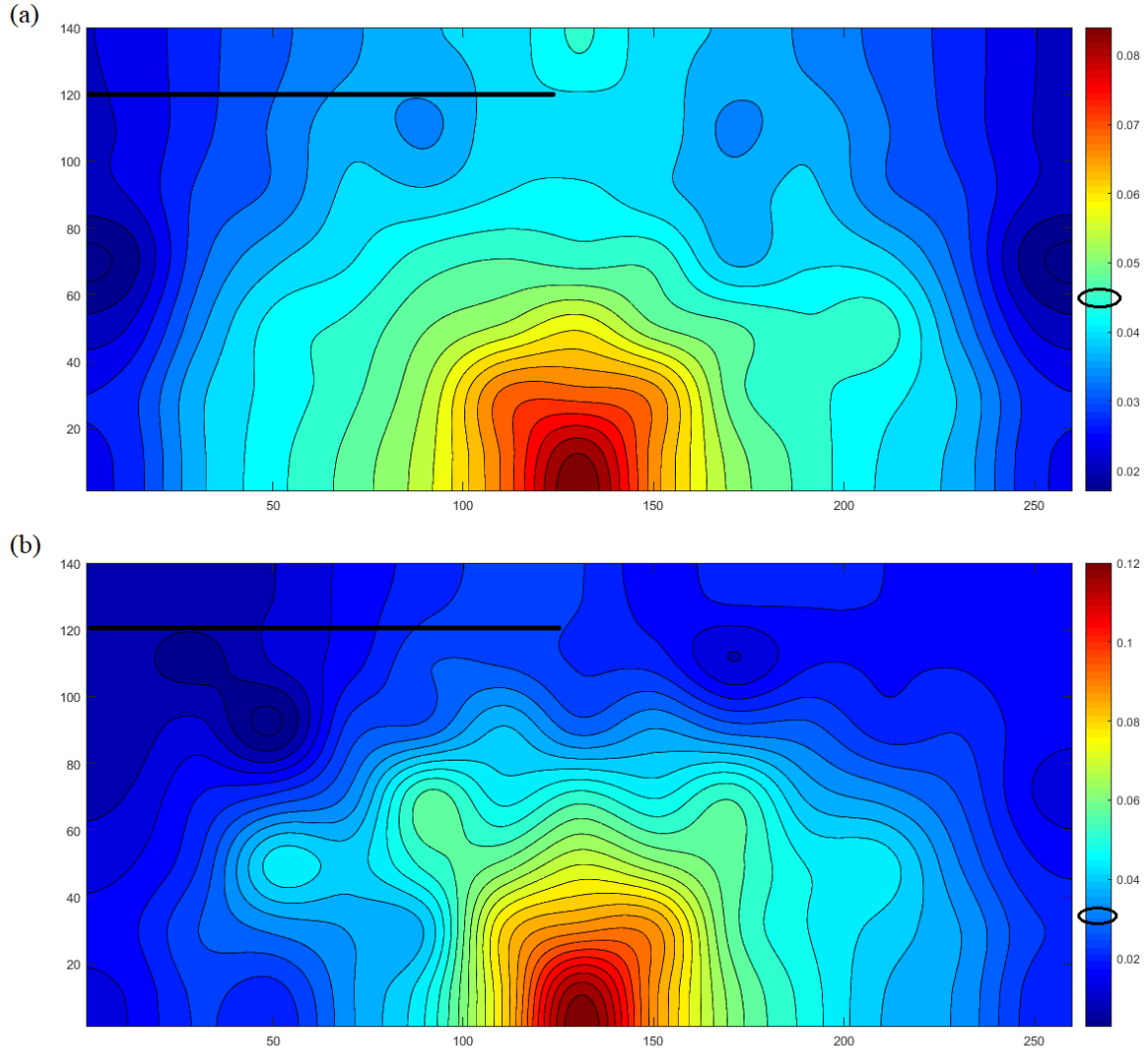
Çizelge 5.8. Sinüzoidal örgü için deneysel ölçüm verileri

Frekans (Hz)	DAQ1- Kanal1(V)	DAQ1- Kanal2(V)	DAQ1- Kanal3(V)	DAQ1- Kanal4(V)	DAQ1- Kanal5(V)	DAQ1- Kanal6(V)	DAQ1- Kanal7(V)
1	0,0794187	0,0529731	0,1313729	0,0123100	0,0615636	0,0159786	0,0978879
2	0,0801203	0,0488019	0,1310019	0,0135690	0,0615482	0,0147901	0,0976168
3	0,0812307	0,0503114	0,1314063	0,0141773	0,0618266	0,0134833	0,0971946
4	0,0814833	0,0510338	0,1311209	0,0137140	0,0615080	0,0138692	0,0974876
5	0,0825804	0,0497761	0,1316277	0,0147827	0,0606296	0,0156877	0,0959536
6	0,0832829	0,0500532	0,1305020	0,0170354	0,0590522	0,0139476	0,0968455
7	0,0840217	0,0637563	0,1313635	0,0157414	0,0591430	0,0172630	0,0965437
8	0,0850978	0,0607645	0,1272360	0,0174993	0,0601645	0,0099516	0,0980999
9	0,0840694	0,0501130	0,1142549	0,0091993	0,0595278	0,0093847	0,0964896
10	0,0863292	0,0625893	0,1394364	0,0146361	0,0633172	0,0243548	0,0960667

Çizelge 5.8. (Devam) Sinüzoidal örgü için deneysel ölçüm verileri

Frekans (Hz)	DAQ1- Kanal8(V)	DAQ1- Kanal9(V)	DAQ1- Kanal10(V)	DAQ1- Kanal11(V)	DAQ1- Kanal12(V)	DAQ1- Kanal13(V)	DAQ1- Kanal14(V)
1	0,0616987	0,0149514	0,0565083	0,0129609	0,1549254	0,0625942	0,0610027
2	0,0607957	0,0155759	0,0565293	0,0100718	0,1550517	0,0622780	0,0609935
3	0,0609240	0,0147298	0,0562326	0,0103420	0,1543652	0,0621492	0,0678431
4	0,0614628	0,0147459	0,0565090	0,0105658	0,1548353	0,0618637	0,0619514
5	0,0631046	0,0122752	0,0555638	0,0101711	0,1568920	0,0623869	0,0635379
6	0,0628015	0,0092043	0,0543305	0,0102684	0,1565661	0,0634756	0,0635451
7	0,0639785	0,0091387	0,0539895	0,0087852	0,1568302	0,0635360	0,0665281
8	0,0648292	0,0106194	0,0532430	0,0105812	0,1590413	0,0650871	0,0693379
9	0,0570083	0,0106055	0,0500742	0,0067653	0,1527557	0,0597002	0,0606962
10	0,0570808	0,0137655	0,0621491	0,0146826	0,1531082	0,0572086	0,0653917

Çizelge 5.8’de verilen ölçüm sonuçları HDF algoritması ile frekans alanına çevrilerek haritalandırılmıştır. Haritalandırmalar ile sismik yüzey dalgalarının deney sahasında nasıl ilerlediği gözlemlenmiştir. Teorik çalışma ile birebir aynı ölçekli gerçekleştirilen deneysel çalışma sonucu oluşturulan sismik haritalandırmalar sismik metamalzemesiz saha (a) ve sismik metamalzemeli saha (b) olarak Şekil 5.19’da gösterilmiştir.



Şekil 5.19. Deneysel çalışmada 9 Hz frekansında sismik metamalzemesiz alanda yer değiştirme (a) ve sismik metamalzeme uygulanan alanda yer değiştirme (b)

Deneysel analizdeki sismik yüzey dalgalarının yer değiştirme miktarını okumak için her iki sahaya da aynı noktadan çizgiler çizilmiş ve bu çizgilere karşılık gelen değerler okunmuştur. Her saha için yüzey dalgalarının yer değişimleri incelendiğinde sismik metamalzemesiz alanda yer değiştirme büyüklüğü 0.047 iken sismik metamalzemeli alanda bu büyüklük 0.033’tür. Yer değiştirme oranlarına bakıldığında sismik yüzey dalgalarının yer değiştirmelerinin % 31.91 azaldığı görülmektedir. Teorik çalışmalar deneysel olarak test

edilmiş ve sonuçlar birbiriyle uyum içinde çıkmıştır. Hem teorik hem de deneysel analiz sonuçlarına göre sinüzoidal olarak konumlandırılmış beton kazıklardan oluşturulan sismik metamatzemeler yüzey dalgalarını sönümleyebilme kabiliyetine sahiptir.

5.5. Dört Farklı Örgü Yapısının Sonuçlarının Karşılaştırılması

Beton kazıklar kullanılarak oluşturulmuş sismik metamatzemelerin en verimli dizilim şeklini tespit edebilmek amacıyla her bir örgü yapısının analizi sonucunda elde edilen bulgular birbiriyle karşılaştırılmıştır.

27 adet beton kazık kullanılarak oluşturulmuş kare örgü yapısının bant diyagramı incelendiğinde 9 Hz ve 18 Hz frekanslarında kısmi bant boşlukları olduğu gözlemlenmiştir. Çalışma kapsamındaki 0-10 Hz frekans aralığında olan 9 Hz frekansının frekans alanı analizi sonucuna göre ise sismik yüzey dalgalarının iletim kaybı -22,85 dB olarak bulunmuştur. Kare örgü yapısının deneysel analiz sonuçlarında ise sismik metamatzemeli sahada ve sismik metamatzemesiz sahada sismik yüzey dalgalarının yer değiştirme miktarları hesaplanmış ve 9 Hz frekansında yaklaşık olarak sismik dalgaların % 64 oranında sönümlendiği tespit edilmiştir.

Üçgen örgü yapısının oluşturulabilmesi için ise 37 adet beton kazık kullanılmış ve sayısal analizi ile çizilen bant diyagramında 7 Hz ve 9 Hz frekanslarında kısmi bant boşluklarının olduğu görülmüştür. Bu örgü yapısının frekans analizi sonucunda bant boşluklarının olduğu görülen 7 Hz frekansında -15,5 dB ve 9 Hz frekansında -16,96 dB kayıp elde edilmiştir. Deneysel saha sonuçlarında ise sismik metamatzemesiz alan ölçümleri ile karşılaştığında üçgen örgü yapısının sismik yüzey dalgalarını 7 Hz frekansında yaklaşık olarak % 69,4 oranında ve 9 Hz frekansında yaklaşık % 74,4 oranında sönümlediği görülmüştür.

35 adet beton kazığın sahaya uygulanması ile oluşturulan dairesel örgü yapısının sayısal analizi sonucu çizilen bant diyagramında 8,5 Hz frekansında kısmi bir bant boşluğu elde edilmiştir. Frekans alanı analizi ile oluşturulan iletim karakteristiği diyagramında 8,5 Hz frekansında -9,88 dB kayıp olduğu görülmüştür. Dairesel örgü yapısının deneysel saha çalışmasının sonucunda sismik metamatzemeli ve sismik metamatzemesiz alanlardaki

sismik yüzey dalgalarının ilerleyişi karşılaştırıldığında sismik yüzey dalgalarının beton kazıklar ile karşılaştırıldığında yaklaşık % 37,21 oranında sönümlendiği gözlemlenmiştir.

Sinüzoidal örgü yapısı oluşturabilmek amacıyla toplam 33 adet beton kazık kullanılmıştır. Sayısal analizi için oluşturulan bant diyagramında 9 Hz frekansında kısmi bir bant boşluğu olduğu görülmüştür. Frakans alanı analizi ile edilen iletim kaybı değerlerinde bant boşluğu oluşan 9 Hz frekansında -13,71 dB kayıp olduğu gözlemlenmiştir. Ayrıca gerçekleştirilen deneysel saha çalışmaları sonucunda sinüzoidal örgü yapısının uygulandığı saha ile sismik metalmalzeme kullanılmamış orijinal saha karşılaştırıldığında sinüzoidal örgü yapısındaki beton kazıkların %31,91 oranında sismik yüzey dalgalarını sönümleyebildiği görülmüştür.

Bu dört saha karşılaştırıldığında;

- Her dört saha içinde sayısal analiz sonuçlarına bakıldığında en fazla iletim kaybı değerinin 9 Hz frekansında kare örgü yapısında olduğu görülmekte ve kare örgü yapısında daha yüksek frekanslara çıkıldıkça bant boşluklarının olduğu görülmektedir. Bu durum kare örgünün diğer örgülere göre tercih edilebilir olduğunu göstermektedir. Fakat kare örgü yapısı, üçgen örgü yapısı ile karşılaştırıldığında üçgen örgü yapısının düşük frekans aralığında 7 Hz ve 9 Hz frekanslarında iki adet bant boşluğuna sahip olduğu görülmektedir. Deprem dalgalarının düşük frekans aralığında olduğu göz önüne alındığında üçgen örgü yapısında oluşan iki adet bant boşluğunun deprem dalgalarını sönümlemede daha verimli olabileceği düşünülmüştür.
- Bütün örgü yapılarında deneysel analiz sonuçlarına göre belirli frekanslarda sismik yüzey dalgaları sönümlendiği gözlemlenmiştir. Her bir örgü yapısının deneysel saha sonuçları karşılaştırıldığında sismik yüzey dalgalarının sönümlenmesinin en iyi üçgen örgü yapısında ve 9 Hz frekansında gerçekleştiği görülmüştür. Üçgen örgü yapısında sismik metalmalzemesiz sahalar karşılaştırıldığında hem 7 Hz frekansında hem de 9 Hz frekansında sönümlemenin diğer örgü yapısındaki sahalarla göre daha fazla olduğu belirlenmiştir. Üçgen örgü yapısından sonra en iyi sönümleme dairesel ve sinüzoidal örgü yapısı ile karşılaştırıldığında kare örgü yapısında 9 Hz frekansında gerçekleşmiştir. Bu sonuçlara göre üçgen örgü yapısı iki

ayrı frekansta yüksek kayıplara neden olduğu için diğer örgü yapılarına göre daha tercih edilebilir olduğu düşünülmektedir.

- Sahalarda kullanılan beton kazık sayıları göz önüne alındığında en az kazık sayısının kare örgü yapısında kullanıldığı görülmektedir. Maliyet açısından düşünüldüğünde kare örgü yapısının diğer örgü yapılarına göre maliyetinin daha düşük olduğu ve ayrıca daha az kazık sayısına rağmen dairesel ve sinüzoidal örgü yapılarına göre daha yüksek oranda sönümlenme yapmasıyla tercih edilebilir olduğu düşünülmektedir. Bunlara ek olarak kare örgü yapısının dizilim şeklinin daha düzenli olması nedeniyle diğer örgü yapıları ile kıyaslandığında sahaya uygulanmasının daha kolay olduğu görülmüş ve uygulama kolaylığı açısından bu örgü yapısının tercih edilebileceği düşünülmüştür.

6. SONUÇ VE ÖNERİLER

Bu tez çalışmasında, beton kazıklar kullanılarak oluşturulmuş sismik metamalzemelerin kare, üçgen, dairesel ve sinüzoidal örgü yapılarında zemine uygulanmasıyla deprem dalgalarının sönümlenip sönümlenemeyeceği araştırılmıştır. Çalışma hem sayısal hem de deneysel olarak gerçekleştirilmiştir. Sayısal çalışmada öncelikle her örgü yapısı için birim hücre analizleri yapılmıştır. Birim hücre analizleri sonucunda bant boşlukları elde edilmiş ve bu sonuçlara göre saha tasarımları yapılmıştır. Sismik metamalzemenin uygulandığı ve uygulanmadığı iki saha tasarlanarak frekans ve zaman alanlarında analizleri gerçekleştirilmiştir. Sayısal çalışma ile çok yönlü iletim kayıpları elde edilmiş ve her saha için sismik yüzey dalgalarının ilerleyişleri simüle edilmiştir. Deneysel saha çalışmaları sayısal çalışma ile birebir ölçekli olarak gerçekleştirilmiştir. Deneysel çalışma sonucunda elde edilen veriler haritalandırılmış ve sismik yer değişimleri elde edilmiştir. Sismik metamalzemenin uygulanmadığı saha ölçümleri ve sismik metamalzemenin uygulandığı saha ölçümleri karşılaştırılmıştır. Analiz sonuçları ve öneriler aşağıda verildiği gibidir.

- Kare örgü yapısı için gerçekleştirilen sayısal çalışmada, birim hücre analizi sonucunda 9 Hz ve 18 Hz frekanslarında iki adet kısmi bant boşluğu elde edilmiştir. Düşük frekanslarda gerçekleştirilen frekans alanındaki çalışmada 9 Hz frekansı için iletim kaybı -22, 85 dB olarak tespit edilmiş ve zaman alanı analizinde ise sismik yüzey dalgalarının sismik metamalzeme yapısı arkasına geçemediği görülmüştür. Deneysel çalışma sonucunda, sismik metamalzemenin uygulanmadığı saha ile sismik metamalzemenin uygulandığı saha karşılaştırıldığında 9 Hz frekansında sismik yüzey dalgalarının yer değiştirmelerini %64 azaldığı görülmüştür.
- Üçgen örgü yapısı için gerçekleştirilen çalışmada, birim hücre analizinde düşük frekans aralığında 7 Hz ve 9 Hz frekanslarında iki adet kısmi bant boşluğu elde edilmiştir. Frekans alanı analizinde 7 Hz frekansında -15,5 dB ve 9 Hz frekansında -16,96 dB iletim kaybı gözlemlenmiş ve zaman alanı analizinde bu frekanslarda dalgaların sönümlenebileceği görülmüştür. Deneysel analiz sonucunda sismik metamalzemeli sahalardaki dalga yayılımı sismik metamalzemesiz sahalara göre 7 Hz frekansında % 69,4 azalırken 9 Hz frekansında % 74,4 azalmıştır.

- Dairesel örgü yapısı analizi sonucunda, birim hücre çalışmasında 8,5 Hz frekansında kısmi bir bant boşluğu olduğu görülmüştür. Frekans alanı analizi sonucunda 8,5 Hz frekansında iletim kaybının -9,88 dB olduğu ve zaman alanı analizinde de sismik yüzey dalgalarının bu frekansta sönmülenerak ilerledikleri gözlemlenmiştir. Deneysel saha analizi sonucunda dairesele örgü yapısındaki kazıkların olduğu sahanın ve kazıkların olmadığı sahanın ölçüm sonuçları oranlandığında % 37,21 oranında sismik yer değışmelerin azaldığı görülmüştür.
- Sinüzoidal örgü yapısı sayısal çalışmasında, birim hücre analizi sonucunda 9 Hz frekansında kısmi bir bant boşluğu oluşmuştur. Frekans alanında yapılan analizde 9 Hz frekansı için iletim kaybının -13,71 dB olduğu belirlenmiş ve zaman alanı analizi ile sismik yüzey dalgaların sismik metamalzemeler ile karşılaştığında sönmüldüğü gözlemlenmiştir. Deneysel saha analizi sonucunda sismik metamalzemeli ve sismik metamalzemesiz alan verileri karşılaştırıldığında sismik yüzey dalgalarının toplam yer değıştirmesinin % 31,91 azaldığı tespit edilmiştir.
- Beton kazıklar kullanılarak oluşturulan sismik metamalzemelerin uygulandığı bütün örgü yapılarında sayısal analiz ve deneysel analiz sonuçlarının birbiri ile uyum içinde olduğu görülmüştür.
- Bütün örgü yapıları üzerine yayılan sismik yüzey dalgalarının yatay bileşenleri beton kazıklar ile rezonansa girmişlerdir. Rezonans durumunda uygulanan dalgalar ile yansıyan dalgalar arasında π -radyan faz farkı oluşmuştur ve bu sayede sismik dalgalar zayıflatılabilmektedir.
- Silindirik yapıda dik olarak tasarlanmış beton kazıklarla Rayleigh dalgalarının dik bileşenleri arasında etkileşim sağlanırken yatay polarizasyona sahip Love dalgaları ile yatay periyodik olarak sıralanmış beton kazıklar ile de bir etkileşim sağlanmıştır. Yani Rayleigh ve Love dalgalarına karşı bant boşluklarının oluşturulabileceği beton kazıkların sismik dalgalar karşısında metamalzeme olarak kullanılabilceği gösterilmiştir.

- Her bir örgü yapısındaki saha için analiz sonuçları yorumlandığında düşük frekans aralığında iki kısmi bant boşluğuna sahip olan ve deneysel saha sonuçlarına göre en fazla sönümlenmenin gerçekleştiği örgü yapısının üçgen örgü yapısı olduğu görülmektedir. Kare örgü yapısında ise oluşan iki kısmi bant boşluğundan biri düşük frekans aralığında iken diğer kısmi bant boşluğu daha yüksek bir frekansta elde edilmiştir. Yıkıcı etkiye sahip sismik yüzey dalgalarının düşük frekans aralıklarında olması nedeniyle deprem dalgalarının yapı üzerindeki etkilerinin önlenmesi için üçgen örgü yapısının daha verimli olduğu düşünülmektedir. Bu tez çalışmasındaki uygulama şekli ile kare örgü yapısının daha yüksek frekanslardaki dalgalarının sönümlenmesinde de kullanılabilmesi düşünülmektedir.
- Beton kazık maliyetleri ve uygulama kolaylığı açısından en az beton kazığın kullanıldığı ve örgü yapısı uygulamasının en kolay olduğu kare örgü yapısı iyi bir sönümleme kabiliyetine sahip olduğu için diğer örgü yapılarına göre tercih edilebilir olduğu düşünülmektedir.
- Bütün örgü yapılarında beton kazıklar kullanılarak sismik yüzey dalgalarının sönümlenebileceği görülmüştür. Başka bir çalışmada periyodik sismik metamalzeme yapısının sönümleme yeteneğini artırabilmek amacıyla dalga boyuna göre daha derin ve daha büyük çaplarda sismik metamalzeme yapıları kullanılarak analizler gerçekleştirilebilir.
- Çalışma düşük frekans aralığı 0-10 Hz frekanslarında gerçekleştirilmiştir fakat daha yüksek frekansta bant boşluğu elde edilebileceği görülmüştür. Deneysel analizde kullanılan harmonik titreşim cihazının daha yüksek frekansta çalıştırılabilmesi sağlanarak ya da daha yüksek frekanslara çıkan tipte bir titreşim cihazı kullanılarak daha yüksek frekanslarda bir saha çalışması planlanabilir.
- Başka bir çalışmada sismik metamalzeme olarak kullanılan kazıkların malzeme özellikleri değiştirilerek, beton yerine farklı malzemeler kullanılarak, ya da farklı özelliklere sahip metamalzeme yapıları bir araya getirilmesiyle oluşturulabilecek iç içe geçmiş sismik metamalzeme yapıları kullanılarak dalga sönümleme performansları saha deneyleri ile belirlenebilir.

- Bu tez çalışmasında kullanılmış olan dairesel kazıklar yerine diğer bir çalışmada kare, üçgen, dikdörtgen gibi farklı geometrilerdeki kazıklar kullanılarak gerçekleştirilecek olan deneysel çalışma ile kazık şeklinin sismik yüzey dalgalarını sönümlemedeki etkisi araştırılabilir.
- Gerçekleştirilecek başka bir çalışmada her bir örgü yapısındaki kazık sayıları arttırılarak veya azaltılarak saha çalışmaları yapılabilir ve kazık sayılarının örgü yapılarındaki sönümleme oranlarını nasıl etkilediğini gösterecek bir çalışma gerçekleştirilmesi planlanabilir.



KAYNAKLAR

- Abreu, R., Peter, D. and Thomas, C. (2022). Reduction of windturbine generated seismic noise with structural measures. *Wind Energy Science Discussions*, 1-17.
- Ahmad, S. and Al-Hussaini, T. M. (1991). Simplified design for vibration screening by open and in-filled trenches. *Journal of geotechnical engineering*, 117(1), 67-88.
- Alzawi, A. and El Naggar, M. H. (2011). Full scale experimental study on vibration scattering using open and in-filled (GeoFoam) wave barriers. *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, 31(3), 306-317.
- Balkan, Ü. (2007). Harmonik cisim dalgalarının zemin ortamında sönümlenmesi, Yayınlanmış Yüksek Lisans Tezi, *Sakarya Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, Sakarya.
- Brûlé, S., Javelaud, E. H., Enoch, S. and Guenneau, S. (2014). Experiments on seismic metamaterials: molding surface waves. *Physical review letters*, 112(13), 133901.
- Barkan, D. D. (1965). Basic problems of the dynamics of bases and foundations (review of the conference on the dynamics of bases and foundations). *Soil Mechanics and Foundation Engineering*, 2(6), 376-378.
- Chen, Y., Qian, F., Scarpa, F., Zuo, L. and Zhuang, X. (2019). Harnessing multi-layered soil to design seismic metamaterials with ultralow frequency band gaps. *Materials & Design*, 175, 107813.
- Chopra, A. K. and McKenna, F. (2017). Modeling viscous damping in nonlinear response history analysis of buildings. In *16th World Conference on Earthquake Engineering*, Santiago, Chile.
- Colombi, A., Roux, P., Guenneau, S., Gueguen, P. and Craster, R. V. (2016). Forests as a natural seismic metamaterial: Rayleigh wave bandgaps induced by local resonances. *Scientific reports*, 6(1), 1-7.
- Cox, N. (2001). Practical Geostatistics 2000. *Biometrics*, 57(2), 655.
- Çelebi, E., Fırat, S., Beyhan, G., Çankaya, İ., Vural, İ. and Kırtel, O. (2009). Field experiments on wave propagation and vibration isolation by using wave barriers. *Soil dynamics and earthquake engineering*, 29(5), 824-833.
- Du, Q., Zeng, Y., Huang, G. and Yang, H. (2017). Elastic metamaterial-based seismic shield for both Lamb and surface waves. *AIP Advances*, 7(7), 075015.
- Ercan, A. (2001). Yer araştırma yöntemleri. *YEM Yayınevi*, İstanbul.
- Geng, Q., Zhu, S. and Chong, K. P. (2018). Issues in design of one-dimensional metamaterials for seismic protection. *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, 107, 264-278.

- Haupt, W. A. (1981). Model tests on screening of surface waves. In *Proceedings of Tenth International Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering*, San Francisco, 1981..
- Hegde, A. and Venkateswarlu, H. (2022). Vibration Isolation of Foundation Systems Using Geosynthetics Barriers. In *Civil Engineering for Disaster Risk Reduction* (pp. 317-328). Springer, Singapore.
- Huang, H. W., Zhang, B., Wang, J., Menq, F. Y., Nakshatrala, K. B., Mo, Y. L. and Stokoe, K. H. (2021). Experimental study on wave isolation performance of periodic barriers. *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, 144, 106602.
- Huang, J. and Shi, Z. (2013). Application of periodic theory to rows of piles for horizontal vibration attenuation. *International Journal of Geomechanics*, 13(2), 132-142.
- İnternet: ankara.edu.tr, URL:
https://acikders.ankara.edu.tr/pluginfile.php/119309/mod_resource/content/0/Ders_04_Sismik_Dalgalar_%28Cisim_Dalgalari_1%29.pdf. Son erişim tarihi: 28.03.2022
- İnternet: ankara.edu.tr, URL:
https://acikders.ankara.edu.tr/pluginfile.php/119315/mod_resource/content/0/Ders_07_Sismik_Dalgalar_%28Yuzey_Dalgalari_1%29.pdf. Son erişim tarihi: 28.03.2022
- Jiang, W., Yin, M., Liao, Q., Xie, L. and Yin, G. (2021). Three-dimensional single-phase elastic metamaterial for low-frequency and broadband vibration mitigation. *International Journal of Mechanical Sciences*, 190, 106023
- Kadioğlu, S., Mühendislik Jeofiziği ve Uygulamaları, Ankara, 2004
- Kaçın, S., Öztürk, M., Sevim, U. K., Karaaslan, M., Özer, Z., Akgöl, O., ... and Ünal, E. (2021a). Experimental verification of phononic crystal based on square arrays of cylindrical holes against seismic vibrations in full-scale systems: Modeling, sensing and signal processing of seismic vibrations. *Archive of Applied Mechanics*, 1-15.
- Kacın, S., Ozturk, M., Sevim, U. K., Mert, B. A., Ozer, Z., Akgol, O., ... and Karaaslan, M. (2021b). Seismic metamaterials for low-frequency mechanical wave attenuation. *Natural Hazards*, 107(1), 213-229.
- Kacın, S., Sevim, U. K., Öztürk, M., Karaaslan, M., Demirci, M., Akgöl, O., ... ve ALKURT, F. Ö. (2021c). Farklı Konfigurasyonlarda Çelik Metamalzemeler Kullanarak Sismik Etkilerin Azaltılması. *Türk Deprem Araştırma Dergisi*, 3(1), 20-32.
- Kim, S. H. and Das, M. P. (2013). Artificial seismic shadow zone by acoustic metamaterials. *Modern Physics Letters B*, 27(20), 1350140.
- Kramer, S. L. (2003). *Geoteknik deprem mühendisliği*. Gazi Kitabevi.
- Lim, C. W. and Reddy, J. N. (2019). Built-up structural steel sections as seismic metamaterials for surface wave attenuation with low frequency wide bandgap in

- layered soil medium. *Engineering Structures*, 188, 440-451.
- Lim, C. W., Li, J. T. and Zhao, Z. (2020). Lightweight architected lattice phononic crystals with broadband and multiband vibration mitigation characteristics. *Extreme Mechanics Letters*, 41, 100994
- Mert, B. A. and Dag, A. (2017). A computer program for practical semivariogram modeling and ordinary kriging: a case study of porosity distribution in an oil field. *Open Geosciences*, 9(1), 663-674.
- Miniaci, M., Krushynska, A., Bosia, F. and Pugno, N. M. (2016). Large scale mechanical metamaterials as seismic shields. *New Journal of Physics*, 18(8), 083041
- Muhammad, C. W. Lim, J. N. Reddy, (2019) Built-up structural steel sections as seismic metamaterials for surface wave attenuation with low frequency wide bandgap in layered soil medium. *Engineering Structures*, 440-451
- Palermo, A., Krödel, S., Marzani, A. and Daraio, C. (2016). Engineered metabarrier as shield from seismic surface waves. *Scientific reports*, 6(1), 1-10.
- Pu, X., Meng, Q. and Shi, Z. (2020). Experimental studies on surface-wave isolation by periodic wave barriers. *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, 130, 106000.
- Srivastava, R. M. (2013). Geostatistics: a toolkit for data analysis, spatial prediction and risk management in the coal industry. *International Journal of Coal Geology*, 112, 2-13.
- Torres-Silva, H. and Cabezas, D. T. (2013). Chiral seismic attenuation with acoustic metamaterials.
- Ulgen, D. and Toygar, O. (2015). Screening effectiveness of open and in-filled wave barriers: a full-scale experimental study. *Construction and Building Materials*, 86, 12-20.
- Yan, Y., Laskar, A., Cheng, Z., Menq, F., Tang, Y., Mo, Y. L. and Shi, Z. (2014). Seismic isolation of two dimensional periodic foundations. *Journal of Applied Physics*, 116(4), 044908.
- Zhang, K., Luo, J., Hong, F. and Deng, Z. (2021). Seismic metamaterials with cross-like and square steel sections for low-frequency wide band gaps. *Engineering Structures*, 232, 111870.
- Zeng, Y., Zhang, S. Y., Zhou, H. T., Wang, Y. F., Cao, L., Zhu, Y., ... and Wang, Y. S. (2021). Broadband inverted T-shaped seismic metamaterial. *Materials & Design*, 109906.
- Zeng, Y., Xu, Y., Deng, K., Peng, P., Yang, H., Muzamil, M. and Du, Q. (2019). A broadband seismic metamaterial plate with simple structure and easy realization. *Journal of Applied Physics*, 125(22), 224901.
- Zeng, Y., Xu, Y., Yang, H., Muzamil, M., Xu, R., Deng, K., ... and Du, Q. (2020). A

Matryoshka-like seismic metamaterial with wide band-gap characteristics. *International Journal of Solids and Structures*, 185, 334-341.

Witarto, W., Wang, S. J., Yang, C. Y., Nie, X., Mo, Y. L., Chang, K. C., ... and Kassawara, R. (2018). Seismic isolation of small modular reactors using metamaterials. *AIP Advances*, 8(4), 045307.

Wu, X., Wen, Z., Jin, Y., Rabczuk, T., Zhuang, X. and Djafari-Rouhani, B. (2021). Broadband Rayleigh wave attenuation by gradient metamaterials. *International Journal of Mechanical Sciences*, 106592.



DİZİN

A

Analiz · viii, 4, 5, 43, 49, 57, 64, 71

B

Beton Kazıklar · vii, 23
birim hücre · iv, 2, 11, 26, 28, 30, 31, 43, 44, 49, 50, 58,
64, 71, 72

D

Dairesel örgü · viii, ix, xi, 30, 58, 72
Deneysel · iv, viii, xi, xii, 3, 5, 9, 37, 38, 48, 56, 57, 63,
64, 69, 71, 72, 73
Deneysel analiz · iv, 71
deprem · iv, 2, 4, 10, 16, 71, 75

F

frekans · iv, ix, xi, xii, 2, 4, 5, 6, 7, 8, 9, 11, 15, 19, 24,
25, 27, 29, 31, 32, 33, 35, 40, 41, 44, 45, 49, 51, 58,
59, 64, 65, 71, 73
Frekans alanında analiz yöntemi · viii, 31

İ

iletim kaybı · ix, 31, 44, 50, 58, 65, 71

K

Kare örgü · viii, ix, x, xi, 23, 26, 27, 32, 33, 34, 37, 38,
43, 44, 48, 71

R

rezonans · 2, 7, 52, 60

S

sayısal analiz · iv, 27, 72
simülasyonlar · 2, 7, 10, 33
Sinüzoidal örgü · viii, ix, xii, 31, 64, 65, 72
Sismik dalga · ix, 22
sismik metamateryale · xi, xii, 2, 4, 5, 6, 36, 37, 48, 52,
56, 57, 63, 66, 69, 71, 72
Sismik yüzey dalgaları · xi, 35, 36
sönümlenme · 43, 65

T

titreşim · iv, vii, ix, x, xi, 3, 5, 6, 8, 9, 10, 11, 18, 19, 24,
38, 40, 41, 59, 66, 73
toplam yer değiştirme · xi, xii, 45, 46, 51, 52, 59, 60, 65,
66

Ü

Üçgen örgü · viii, ix, x, xi, 28, 29, 49, 50, 71

Y

yüzey dalgaları · iv, 1, 2, 11, 13, 15, 32, 33, 35, 40, 52,
59, 60, 64, 66

Z

zaman alanı analizi · 36, 72
Zaman alanında analiz yöntemi · viii, 33



TEKNOVERSİTE



teknoversite **AYRICALIĞINDASINIZ**

İSTE

