



T.C.

BARTIN ÜNİVERSİTESİ

LİSANSÜSTÜ EĞİTİM ENSTİTÜSÜ

İNŞAAT MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI

YÜKSEK LİSANS TEZİ

**ALÜVYON ZEMİN ORTAMINDAKİ DALGA SOĞURULMASININ TREN
GEÇİŞLERİ İÇİN DENEYSEL VE ANALİTİK OLARAK DEĞERLENDİRİLMESİ**

HAZIRLAYAN

MURAT ŞAHİN

DANIŞMAN

DR. ÖĞR. ÜYESİ FATİH GÖKTEPE

BARTIN-2020



T.C.

**BARTIN ÜNİVERSİTESİ
LİSANSÜSTÜ EĞİTİM ENSTİTÜSÜ
İNŞAAT MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI**

**ALÜVYON ZEMİN ORTAMINDAKİ DALGA SOĞURULMASININ TREN
GEÇİŞLERİ İÇİN DENEYSEL VE ANALİTİK OLARAK DEĞERLENDİRİLMESİ**

YÜKSEK LİSANS TEZİ

HAZIRLAYAN

Murat ŞAHİN

JÜRİ ÜYELERİ

Danışman	: Dr. Öğr. Üyesi Fatih GÖKTEPE	- Bartın Üniversitesi
Üye	: Dr. Öğr. Üyesi Emin HÖKELEKLİ	- Bartın Üniversitesi
Üye	: Prof. Dr. Seyhan FIRAT	- Gazi Üniversitesi
Üye	: Prof. Dr. Erkan ÇELEBİ	- Sakarya Üniversitesi
Üye	: Dr. Öğr. Üyesi Ermedin TOTİÇ	- Bartın Üniversitesi

BARTIN-2020

BEYANNAME

Bartın Üniversitesi Lisansüstü Eğitim Enstitüsü tez yazım kılavuzuna göre Dr. Öğr. Üyesi Fatih GÖKTEPE danışmanlığında hazırlamış olduğum “ALÜVYON ZEMİN ORTAMINDAKİ DALGA SOĞURULMASININ TREN GEÇİŞLERİ İÇİN DENEYSEL VE ANALİTİK OLARAK DEĞERLENDİRİLMESİ” başlıklı yüksek lisans tezimin bilimsel etik değerlere ve kurallara uygun, özgün bir çalışma olduğunu, aksinin tespit edilmesi halinde her türlü yasal yaptırımını kabul edeceğimi beyan ederim.

27.08.2020

Murat ŞAHİN

ÖNSÖZ

Yüksek lisans döneminde her türlü konuda beni yalnız bırakmayarak danışmanlığımı üstlenen, araştırma konusunun seçiminden sonuçlandırılmasına kadar katkı ve emeklerini hiçbir zaman esirgemeyen danışman hocam Dr. Öğr. Üyesi Fatih GÖKTEPE'ye ve tezimin ikinci danışmanlığını yürüten hocam Prof. Dr. Erkan ÇELEBİ'ye saygıyla, içtenlikle teşekkürlerimi sunarım.

Bilimsel anlamda bilgi, görüş ve tecrübelerini benimle paylaşan değerli hocalarım Dr. Öğr. Üyesi Abdullah Can ZÜLFİKAR ve Dr. Öğr. Üyesi Osman KIRTEL'e teşekkürlerimi sunarım.

Bu tez çalışmamda, yüksek lisans bursiyeri olarak görev aldığım 217M427 proje nolu TÜBİTAK 1001 projesinin sağladığı maddi destekten dolayı TÜBİTAK'a teşekkürlerimi sunarım.

Hayatımın her safhasında olduğu gibi tez çalışmam süresince de verdikleri moral ve destek ile beni hiçbir zaman yalnız bırakmayan başta annem, babam, kardeşim olmak üzere tüm aileme teşekkürlerimi sunarım.

Murat ŞAHİN

Bartın, 2020

ÖZET

Yüksek Lisans Tezi

ALÜVYON ZEMİN ORTAMINDAKİ DALGA SOĞURULMASININ TREN GEÇİŞLERİ İÇİN DENEYSEL VE ANALİTİK OLARAK DEĞERLENDİRİLMESİ

Murat ŞAHİN

Bartın Üniversitesi

Lisansüstü Eğitim Enstitüsü

İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı

Tez Danışmanı: Dr. Öğr. Üyesi Fatih GÖKTEPE

İkinci Danışman: Prof. Dr. Erkan ÇELEBİ

Bartın-2020, sayfa: 78

Farklı frekans içeriklerine sahip yüksek hızlı tren (YHT) ile yük ve banliyö trenlerinin tekrarlı geçişleri sırasında meydana getirdiği titreşim etkilerinin özellikle kayma dalgası hızı düşük alüvyon zemin koşullarında dalga yayılım açısından irdelenmesi gerekliliği ülkemiz için güncelliğini korumaktadır. Hareketli yüke ait kritik hızın Rayleigh tipi yüzey dalgalarının yayılış hızına özdeş olduğu durumlarda, özellikle yumuşak zemin koşullarında meydana gelebilecek rezonans fenomeni ile demiryolu platformu çevresinde kuvvetli yer hareketleri ve bunun sonucunda hasar yapıcı titreşimlerin oluşması muhtemeldir. Yapılan bu çalışma, yolcu ve yük taşımacılığında kullanılan farklı hızlardaki tren geçişlerinin alüvyon zemin ortamında sebep olduğu titreşim oluşum mekanizmasının ve dalga yayılım özelliklerinin belirlenmesine odaklanmıştır. Titreşim enerjisinin zemin ortamında soğurulmasını dalga türüne ve geometrik sönüme bağlı tanımlayan analitik çözümler ile ardışık gözlem noktalarındaki deneysel ölçüm sonuçlarının karşılaştırılması için İzmit-Arifiye arasında bulunan Kırkpınar bölgesi seçilmiştir. Analitik çözümlerle elde edilen titreşim azalım ilişkisi mesafeye bağlı olarak orantılı bir şekilde azalmışken, deneysel ölçümlerdeki titreşim soğurulması orantılı bir azalım göstermemiştir. Ayrıca, hendekli serbest zeminde ölçülen ve analitik olarak hesaplanan ivme genliklerinde, serbest zemindeki

genlik değerlerine oranla daha fazla azalım ilişkisi elde edilmiştir. Yapılan deneysel ölçümlerin güvenilirliğinin daha yüksek olması amacıyla deneysel veriler değerlendirilerek, serbest zemin ve hendekli serbest zemin için ivme genliklerinin azalım eğrilerine ait fonksiyonlar regresyon analizi ile elde edilmiştir. YHT geçişlerinin oluşturduğu titreşimlere ait ivme genliklerinin mesafeye bağlı azalım eğrisi formülasyonlarının oldukça yüksek korelasyonlu olması, belirli noktalardaki ivme genlikleri azalımının hesaplanabilmesi için analitik çözüm yönteminin geçerliliğini göstermiştir. Alüvyon zeminler ve beton kilit taşı ile kaplanmış zemin koşullarındaki dalga yayılımı, yapılan bu tez çalışmasıyla deneysel ve analitik olarak incelenmiştir. Sonuç olarak, beton kilit taşı kaplanmış zemin koşullarında hem deneysel olarak ölçülen hemde analitik olarak hesaplanan ivme genliklerinde bir miktar daha azalmanın olduğu anlaşılmıştır.

Anahtar Kelimeler: Enerji soğurma performansı, yerinde zemin titreşim ölçümleri, Rayleigh yüzey dalgası, yüksek hızlı trenleri ile yük ve banliyö tren geçişleri

Bilim Alanı Kodu: 911.1.050

ABSTRACT

M. Sc. Thesis

EXPERIMENTAL AND ANALYTICAL EVALUATION OF WAVE DISSIPATION IN ALLUVIAL SOIL CONDITIONS FOR TRAIN PASSAGES

Murat ŞAHİN

Bartın University

Graduate School

Department of Civil Engineering

Thesis Advisor: Assist. Prof. Dr. Fatih GÖKTEPE

Second Advisor: Prof. Dr. Erkan ÇELEBİ

Bartın-2020, pp: 78

The necessity of investigating the vibration effect induced by the repetitive passage of the high-speed train, freight and suburban train with different frequency contents remains up to date in terms of wave propagation, especially in soft soils with low shear wave velocity for our country. The resonance phenomenon that occurs when the critical velocity of the moving load is equal to the velocity of Rayleigh waves can create strong ground motion on the surrounding railway and are likely to result in damaging vibrations. This study focuses on the determination of vibration formation mechanism and wave propagation characteristics caused by trains at different speeds in alluvial soil conditions used in passenger and freight transportation. To compare the experimental measurement at consecutive observation points and the analytical solutions defining the absorption of vibration energy in the soil medium depending on wave type and geometric damping, Kırkpınar region between İzmit and Arifiye was selected. The absorption of vibration in the experimental measurements did not show a proportional decrease while the reduction in vibrational behavior obtained from analytical solutions decreased proportionally depending on the distance. In addition, more reduction relationship was obtained in the acceleration amplitudes measured in the trench free ground and analytically calculated compared to the amplitude values in the free ground.

In order to increase the reliability of the experimental measurements, the experimental data were evaluated and the functions of the attenuation curves of the acceleration amplitudes for free ground and trench free ground were obtained by regression analysis. The fact that the acceleration amplitudes of the vibrations generated by the YHT transitions are highly correlated with the distance-dependent attenuation curve formulations showed the validity of the analytical solution method to calculate the decrease in the acceleration amplitudes at certain points. The wave propagation in alluvial soils and the ground conditions covered with concrete keystone was investigated experimentally and analytically with this thesis study. As a result, it has been understood that there is some decrease in acceleration amplitudes both experimentally and analytically calculated in concrete keystone covered ground conditions.

Keywords: Energy dissipation performance, in situ measurement, Rayleigh surface waves, passage of the high-speed trains, freight and suburban train

Scientific Field Code: 911.1.050

İÇİNDEKİLER

	<u>Sayfa</u>
BEYANNAME.....	iii
ÖNSÖZ.....	iv
ÖZET	v
ABSTRACT	vii
İÇİNDEKİLER.....	ix
ŞEKİLLER DİZİNİ.....	xii
TABLolar DİZİNİ.....	xviii
SİMGELER DİZİNİ.....	xix
KISALTMALAR DİZİNİ	xxi
BÖLÜM 1.....	1
GİRİŞ.....	1
1.1 Problemin Tanımlanması.....	1
1.2 Literatür Özeti.....	2
1.3 Çalışmanın Amaç ve Kapsamı.....	11
BÖLÜM 2.....	13
ZEMİN ORTAMINDA DALGA YAYILIŞI VE DİNAMİK ZEMİN ÖZELLİKLERİ	13
2.1 Cisim Dalgaları	14
2.1.1 P Dalgası	14
2.1.2 S Dalgası	15
2.2 Yüzey Dalgaları	16
2.2.1 Love Dalgası	17
2.2.2 Rayleigh Dalgası	17
2.3 Sismik Dalgaların Yayılışı.....	19
2.3.1 Yansıma	20
2.3.2 Kırılma (İletim)	20
2.3.3 Saçılma (Difraksiyon)	21
2.3.4 Soğurma (Absorbisyon)	21
2.4 Dalga Yayılım Problemi için Geliştirilen Çözüm Yöntemi	22
2.4.1 Bornitz Çözüm Yöntemi	22

2.5 Dinamik Zemin Parametrelerinin Belirlenmesi	25
2.6 Dinamik Yük Kaynakları ve Etkileri	27
BÖLÜM 3	28
MATERYAL VE METOT	28
3.1 Ölçüm Yapılan Sahaya ait Bilgiler	28
3.2 Pilot Bölgedeki Zemin Yapısının Jeofizik Arazi Deneyleriyle Belirlenmesi	29
3.2.1 Arazi Sismik Deneyleri	29
3.2.1.1 Yüzey Dalgası Analizi (MASW) Yöntemi	31
3.2.2 Sismik Hızlar ve Zemin Elastik Parametreleri	33
3.3 Sahada Serbest Zemin Titreşimlerinin İvmeölçerlerle Kayıt Altına Alınması	35
3.3.1 Üç Eksenli İvmeölçerlerin Sahadaki Yerleşimi	36
3.3.2 İvmeölçerle Alınan Ham Kayıtların İşlenmesi	38
BÖLÜM 4	40
DALGA SOĞURULMASININ DENEYSEL VE ANALİTİK ANALİZİ	40
4.1 Banliyö Treni Geçişlerinin Deneysel ve Analitik olarak Değerlendirilmesi	40
4.1.1 Serbest Zemin için Deneysel ve Analitik Değerlendirme	40
4.1.2 Hendekli Serbest Zemin için Deneysel ve Analitik Değerlendirme	43
4.2 Yük Treni Geçişlerinin Deneysel ve Analitik olarak Değerlendirilmesi	46
4.2.1 Serbest Zemin için Deneysel ve Analitik Değerlendirme	46
4.2.2 Hendekli Serbest Zemin için Deneysel ve Analitik Değerlendirme	49
4.3 Ankara Yönü YHT Geçişlerinin Deneysel ve Analitik olarak Değerlendirilmesi ...	53
4.3.1 Serbest Zemin için Deneysel ve Analitik Değerlendirme	53
4.3.2 Hendekli Serbest Zemin için Deneysel ve Analitik Değerlendirme	56
4.4 İstanbul Yönü YHT Geçişlerinin Deneysel ve Analitik olarak Değerlendirilmesi ..	59
4.4.1 Serbest Zemin için Deneysel ve Analitik Değerlendirme	59
4.4.2 Hendekli Serbest Zemin için Deneysel ve Analitik Değerlendirme	63
4.5 Tüm YHT Geçişlerinin Deneysel ve Analitik olarak Değerlendirilmesi	65
4.5.1 Serbest Zemin için Deneysel ve Analitik Değerlendirme	66
4.5.2 Hendekli Serbest Zemin için Deneysel ve Analitik Değerlendirme	67
4.6 Alüvyon-Beton Parke Kaplama Zemin Deneysel ve Analitik Değerlendirilmesi	69

BÖLÜM 5.....	71
SONUÇ VE ÖNERİLER	71
KAYNAKLAR.....	73



ŞEKİLLER DİZİNİ

Şekil	Sayfa
No	No
1.1:	Tren geçişi sırasında oluşan dinamik yüklerin demiryolu üstyapısında, zemin ortamında ve çevre yapılarda oluşturduğu titreşim etkileri(Buonsanti vd., 2009)..... 1
2.1:	Dalga için kullanılan terimler (Yıldırar, 2000) 13
2.2:	Cisim dalgaları (P, S) ve yüzey dalgalarının (Love, Rayleigh) yer içerisinde seyahat yolları (URL-1, 2020) 14
2.3:	P-dalgaları ilerlediği yönde parçacıkları sıkıştırır ve genişletir (Kramer, 1996) 15
2.4:	S-dalgaları ilerleme yönü yer değiştirme doğrultusuna diktir (Kramer, 1996)..... 15
2.5:	SH-dalgası ve SV-dalgası yayılma özellikleri (Kramer, 1996) 16
2.6:	Love dalgası ilerleme yönü yer değiştirme doğrultusuna diktir (Kramer, 1996)..... 17
2.7:	Rayleigh dalgası ilerleme yönü ve yer değiştirme doğrultusu (Kramer, 1996)..... 18
2.8:	Rayleigh dalgası bileşenlerinin derinlikle değişimi (Richart vd., 1970)..... 18
2.9:	V_P , V_R ve V_S dalgalarının poisson oranının arasındaki ilişki(Richart vd., 1970)..... 19
2.10:	Dalga ışını yayılma yolları (Gürel, 2008) 20
2.11:	Yayılan sismik sinyalin genliğine etki eden faktörler (Reynolds, 1998) 21
3.1:	İncelenecek saha a) Konumu b) Kuş bakışı görünüşü c-d) Hızlı tren geçişi. 28
3.2:	Sismik Kırılma, MASW arazi deneyleri yapılışı (Anon., 2019)..... 29
3.3:	Sismik Kırılma, MASW arazi deneyleri (Anon., 2011)..... 30
3.4:	Tren yoluna dik MASW profili (Anon., 2019) 32
3.5:	Tren yoluna paralel MASW profili (Anon., 2019) 32
3.6:	Sismik kırılma yöntemi ile oluşturulmuş model (Anon., 2019) 33
3.7:	a) 1-2.Çalışmalar alüvyon zemin b) 3.Çalışma beton kilit parke taşı kaplanmış zemin. 35
3.8:	a) İvmeölçer cihazları yerleşim şeması b) Seçilen çalışma sahasının genel görünüm..... 36
3.9:	1-2. Çalışmalar titreşim ölçümleri için kullanılan ivmeölçer sensörlerin dizilimi..... 37
3.10:	3. Çalışma titreşim ölçümleri için kullanılan ivmeölçer sensörlerin dizilimi. 38
3.11:	Veri kaydedici ivmeölçer ve teknik özellikleri (Şahin vd., 2019) 39
4.1:	1.Saha çalışması Ankara yönü Banlıyö Treni serbest zemin hatta dik doğrultuda (N-S) 1.Deney ile analitik çözüm PGA azalım eğrileri karşılaştırma grafiği. 41

ŞEKİLLER DİZİNİ

4.2:	1.Saha çalışması Ankara yönü Banliyö Treni serbest zemin hatta paralel doğrultuda (E-W) 1.Deney ile analitik çözüm PGA azalım eğrileri karşılaştırma grafiği.	41
4.3:	1.Saha çalışması Ankara yönü Banliyö Treni serbest zemin hatta dik doğrultuda (N-S) 2.Deney ile analitik çözüm PGA azalım eğrileri karşılaştırma grafiği	41
4.4:	1.Saha çalışması Ankara yönü Banliyö Treni serbest zemin hatta paralel doğrultuda (E-W) 2.Deney ile analitik çözüm PGA azalım eğrileri karşılaştırma grafiği	42
4.5:	1.Saha çalışması İstanbul yönü Banliyö Treni serbest zemin hatta dik doğrultuda (N-S) 3.Deney ile analitik çözüm PGA azalım eğrileri karşılaştırma grafiği	42
4.6:	1.Saha çalışması İstanbul yönü Banliyö Treni serbest zemin hatta paralel doğrultuda (E-W) 3.Deney ile analitik çözüm PGA azalım eğrileri karşılaştırma grafiği	42
4.7:	1.Saha çalışması Ankara yönü Banliyö Treni hendekli serbest zemin hatta dik doğrultuda (N-S) 1.Deney ile analitik çözüm PGA azalım eğrileri karşılaştırma grafiği	43
4.8:	1.Saha çalışması Ankara yönü Banliyö Treni hendekli serbest zemin hatta paralel doğrultuda (E-W) 1.Deney ile analitik çözüm PGA azalım eğrileri karşılaştırma grafiği	44
4.9:	1.Saha çalışması Ankara yönü Banliyö Treni hendekli serbest zemin hatta dik doğrultuda (N-S) 2.Deney ile analitik çözüm PGA azalım eğrileri karşılaştırma grafiği.	44
4.10:	1.Saha çalışması Ankara yönü Banliyö Treni hendekli serbest zemin hatta paralel doğrultuda (E-W) 2.Deney ile analitik çözüm PGA azalım eğrileri karşılaştırma grafiği.	44
4.11:	1.Saha çalışması İstanbul yönü Banliyö Treni hendekli serbest zemin hatta dik doğrultuda (N-S) 3.Deney ile analitik çözüm PGA azalım eğrileri karşılaştırma grafiği.	45
4.12:	1.Saha çalışması İstanbul yönü Banliyö Treni hendekli serbest zemin hatta paralel doğrultuda (E-W) 3.Deney ile analitik çözüm PGA azalım eğrileri karşılaştırma grafiği.	45

ŞEKİLLER DİZİNİ

4.13: 1.Saha çalışması Ankara yönü Yük Treni serbest zemin hatta dik doğrultuda (N-S) 1.Deney ile analitik çözüm PGA azalım eğrileri karşılaştırma grafiği	46
4.14: 1.Saha çalışması Ankara yönü Yük Treni serbest zemin hatta paralel doğrultuda (E-W) 1.Deney ile analitik çözüm PGA azalım eğrileri karşılaştırma grafiği.....	47
4.15: 1.Saha çalışması İstanbul yönü Yük Treni serbest zemin hatta dik doğrultuda (N-S) 2.Deney ile analitik çözüm PGA azalım eğrileri karşılaştırma grafiği.	47
4.16: 1.Saha çalışması İstanbul yönü Yük Treni serbest zemin hatta paralel doğrultuda (E-W) 2.Deney ile analitik çözüm PGA azalım eğrileri karşılaştırma grafiği.	47
4.17: 1.Saha çalışması İstanbul yönü Yük Treni serbest zemin hatta dik doğrultuda (N-S) 3.Deney ile analitik çözüm PGA azalım eğrileri karşılaştırma grafiği.	48
4.18: 1.Saha çalışması İstanbul yönü Yük Treni serbest zemin hatta paralel doğrultuda (E-W) 3.Deney ile analitik çözüm PGA azalım eğrileri karşılaştırma grafiği	48
4.19: 1.Saha çalışması İstanbul yönü Yük Treni serbest zemin hatta dik doğrultuda (N-S) 4.Deney ile analitik çözüm PGA azalım eğrileri karşılaştırma grafiği	48
4.20: 1.Saha çalışması İstanbul yönü Yük Treni serbest zemin hatta paralel doğrultuda (E-W) 4.Deney ile analitik çözüm PGA azalım eğrileri karşılaştırma grafiği	49
4.21: 1.Saha çalışması Ankara yönü Yük Treni hendekli serbest zemin hatta dik doğrultuda (N-S) 1.Deney ile analitik çözüm PGA azalım eğrileri karşılaştırma grafiği	50
4.22: 1.Saha çalışması Ankara yönü Yük Treni hendekli serbest zemin hatta paralel doğrultuda (E-W) 1.Deney ile analitik çözüm PGA azalım eğrileri karşılaştırma grafiği	50
4.23: 1.Saha çalışması İstanbul yönü Yük Treni hendekli serbest zemin hatta dik doğrultuda (N-S) 2.Deney ile analitik çözüm PGA azalım eğrileri karşılaştırma grafiği	50
4.24: 1.Saha çalışması İstanbul yönü Yük Treni hendekli serbest zemin hatta paralel doğrultuda (E-W) 2.Deney ile analitik çözüm PGA azalım eğrileri karşılaştırma grafiği	51
4.25: 1.Saha çalışması İstanbul yönü Yük Treni hendekli serbest zemin hatta dik doğrultuda (N-S) 3.Deney ile analitik çözüm PGA azalım eğrileri karşılaştırma grafiği	51

ŞEKİLLER DİZİNİ

4.26: 1.Saha çalışması İstanbul yönü Yük Treni hendekli serbest zemin hatta paralel doğrultuda (E-W) 3.Deney ile analitik çözüm PGA azalım eğrileri karşılaştırma grafiği	51
4.27: 1.Saha çalışması İstanbul yönü Yük Treni hendekli serbest zemin hatta dik doğrultuda (N-S) 4.Deney ile analitik çözüm PGA azalım eğrileri karşılaştırma grafiği.....	52
4.28: 1.Saha çalışması İstanbul yönü Yük Treni hendekli serbest zemin hatta paralel doğrultuda (E-W) 4.Deney ile analitik çözüm PGA azalım eğrileri karşılaştırma grafiği	52
4.29: 1.Saha çalışması Ankara yönü YHT serbest zemin hatta dik doğrultuda (N-S) 1.Deney ile analitik çözüm PGA azalım eğrileri karşılaştırma grafiği	53
4.30: 1.Saha çalışması Ankara yönü YHT serbest zemin hatta paralel doğrultuda (E-W) 1.Deney ile analitik çözüm PGA azalım eğrileri karşılaştırma grafiği	54
4.31: 1.Saha çalışması Ankara yönü YHT serbest zemin hatta dik doğrultuda (N-S) 2.Deney ile analitik çözüm PGA azalım eğrileri karşılaştırma grafiği	54
4.32: 1.Saha çalışması Ankara yönü YHT serbest zemin hatta paralel doğrultuda (E-W) 2.Deney ile analitik çözüm PGA azalım eğrileri karşılaştırma grafiği	54
4.33: 2.Saha çalışması Ankara yönü YHT serbest zemin hatta dik doğrultuda (N-S) 1.Deney ile analitik çözüm PGA azalım eğrileri karşılaştırma grafiği	55
4.34: 2.Saha çalışması Ankara yönü YHT serbest zemin hatta paralel doğrultuda (E-W) 1.Deney ile analitik çözüm PGA azalım eğrileri karşılaştırma grafiği	55
4.35: 2.Saha çalışması Ankara yönü YHT serbest zemin hatta dik doğrultuda (N-S) 2.Deney ile analitik çözüm PGA azalım eğrileri karşılaştırma grafiği	55
4.36: 2.Saha çalışması Ankara yönü YHT serbest zemin hatta paralel doğrultuda (E-W) 2.Deney ile analitik çözüm PGA azalım eğrileri karşılaştırma grafiği	56
4.37: 1.Saha çalışması Ankara yönü YHT hendekli serbest zemin hatta dik doğrultuda (N-S) 1.Deney ile analitik çözüm PGA azalım eğrileri karşılaştırma grafiği	57
4.38: 1.Saha çalışması Ankara yönü YHT hendekli serbest zemin hatta paralel doğrultuda (E-W) 1.Deney ile analitik çözüm PGA azalım eğrileri karşılaştırma grafiği	57

ŞEKİLLER DİZİNİ

4.39: 2.Saha çalışması Ankara yönü YHT hendekli serbest zemin hatta dik doğrultuda (N-S) 1.Deney ile analitik çözüm PGA azalım eğrileri karşılaştırma grafiği.....	57
4.40: 2.Saha çalışması Ankara yönü YHT hendekli serbest zemin hatta paralel doğrultuda (E-W) 1.Deney ile analitik çözüm PGA azalım eğrileri karşılaştırma grafiği	58
4.41: 3.Saha çalışması Ankara yönü YHT hendekli serbest zemin hatta dik doğrultuda (N-S) 1.Deney ile analitik çözüm PGA azalım eğrileri karşılaştırma grafiği	58
4.42: 3.Saha çalışması Ankara yönü YHT hendekli serbest zemin hatta paralel doğrultuda (E-W) 1.Deney ile analitik çözüm PGA azalım eğrileri karşılaştırma grafiği	58
4.43: 1.Saha çalışması İstanbul yönü YHT serbest zemin hatta dik doğrultuda (N-S) 1.Deney ile analitik çözüm PGA azalım eğrileri karşılaştırma grafiği	60
4.44: 1.Saha çalışması İstanbul yönü YHT serbest zemin hatta paralel doğrultuda (E-W) 1.Deney ile analitik çözüm PGA azalım eğrileri karşılaştırma grafiği	60
4.45: 1.Saha çalışması İstanbul yönü YHT serbest zemin hatta dik doğrultuda (N-S) 2.Deney ile analitik çözüm PGA azalım eğrileri karşılaştırma grafiği	60
4.46: 1.Saha çalışması İstanbul yönü YHT serbest zemin hatta paralel doğrultuda (E-W) 2.Deney ile analitik çözüm PGA azalım eğrileri karşılaştırma grafiği	61
4.47: 2.Saha çalışması İstanbul yönü YHT serbest zemin hatta dik doğrultuda (N-S) 1.Deney ile analitik çözüm PGA azalım eğrileri karşılaştırma grafiği	61
4.48: 2.Saha çalışması İstanbul yönü YHT serbest zemin hatta paralel doğrultuda (E-W) 1.Deney ile analitik çözüm PGA azalım eğrileri karşılaştırma grafiği	61
4.49: 2.Saha çalışması İstanbul yönü YHT serbest zemin hatta dik doğrultuda (N-S) 2.Deney ile analitik çözüm PGA azalım eğrileri karşılaştırma grafiği	62
4.50: 2.Saha çalışması İstanbul yönü YHT serbest zemin hatta paralel doğrultuda (E-W) 2.Deney ile analitik çözüm PGA azalım eğrileri karşılaştırma grafiği	62
4.51: 1.Saha çalışması İstanbul yönü YHT hendekli serbest zemin hatta dik doğrultuda (N-S) 1.Deney ile analitik çözüm PGA azalım eğrileri karşılaştırma grafiği	63
4.52: 1.Saha çalışması İstanbul yönü YHT hendekli serbest zemin hatta paralel doğrultuda (E-W) 1.Deney ile analitik çözüm PGA azalım eğrileri karşılaştırma grafiği	63

ŞEKİLLER DİZİNİ

4.53: 2.Saha çalışması İstanbul yönü YHT hendekli serbest zemin hatta dik doğrultuda (N-S) 1.Deney ile analitik çözüm PGA azalım eğrileri karşılaştırma grafiği	64
4.54: 2.Saha çalışması İstanbul yönü YHT hendekli serbest zemin hatta paralel doğrultuda (E-W) 1.Deney ile analitik çözüm PGA azalım eğrileri karşılaştırma grafiği	64
4.55: 3.Saha çalışması İstanbul yönü YHT hendekli serbest zemin hatta dik doğrultuda (N-S) 1.Deney ile analitik çözüm PGA azalım eğrileri karşılaştırma grafiği	64
4.56: 3.Saha çalışması İstanbul yönü YHT hendekli serbest zemin hatta paralel doğrultuda (E-W) 1.Deney ile analitik çözüm PGA azalım eğrileri karşılaştırma grafiği	65
4.57: YHT serbest zemin hatta dik doğrultuda (N-S) 1-2.Saha deneyi sonuçları PGA (pik ivme genlik) azalımı Regresyon eğrisi	66
4.58: YHT serbest zemin hatta paralel doğrultuda (E-W) 1-2.Saha deneyi sonuçları PGA (pik ivme genlik) azalımı Regresyon eğrisi	67
4.59: YHT hendekli serbest zemin hatta dik doğrultuda (N-S) 1-2.Saha deneyi sonuçları PGA (pik ivme genlik) azalımı Regresyon eğrisi.....	68
4.60: YHT hendekli serbest zemin hatta paralel doğrultuda (E-W) 1-2.Saha deneyi sonuçları PGA (pik ivme genlik) azalımı Regresyon eğrisi.....	68
4.61: YHT hendekli serbest zemin hatta dik doğrultuda (N-S) 3.Saha deneyi sonuçları PGA (pik ivme genlik) azalımı Regresyon eğrisi	68
4.62: YHT hendekli serbest zemin hatta paralel doğrultuda (E-W) 3.Saha deneyi sonuçları PGA (pik ivme genlik) azalımı Regresyon eğrisi.....	69
4.63: YHT hatta dik doğrultuda (N-S) 1-2. ve 3. Saha deneyi sonuçları PGA (pik ivme genlik) azalımı Regresyon eğrileri ile Analitik çözüm(Bornitz) karşılaştırmaları.....	70
4.64: YHT hatta paralel doğrultuda (E-W) 1-2. ve 3. Saha deneyi sonuçları PGA (pik ivme genlik) azalımı Regresyon eğrileri ile Analitik çözüm (Bornitz) karşılaştırmaları.....	70

TABLÖLAR DİZİNİ

Tablo	Sayfa
<u>No</u>	<u>No</u>
2.1: Çeşitli kaynaklar için geometrik sönümleme katsayıları (Athanasopoulos vd., 2000)	23
2.2: Zemin tipine göre Geometrik Sönüm Katsayıları(n) (Amick ve Gendreau, 2000)	23
2.3: Çeşitli zemin tipleri için frekanstan bağımsız α_0 değerleri (Athanasopoulos vd., 2000).....	24
2.4: Zemin tipine göre Malzeme Sönüm Katsayıları(α) (Amick ve Gendreau, 2000).....	25
2.5: Zeminin dinamik parametrelerinin ölçülmesi (Kramer, 1996)	26
3.1: Deneylere ait serim boyu, jeofon aralığı, örnekleme aralığı ve kayıt süreleri.	29
3.2: Hesaplanan Zemin Elastik Parametreleri (Anon., 2019).....	35

SİMGELER DİZİNİ

a	: Dalga genliği
B	: Zeminin gelen dalgaları büyütme miktarı
d	: Dalga ışını mesafesi
D	: Sönüm oranı
e	: Euler sayısı
E	: Elastisite modülü
f	: Frekans
g	: Yerçekimi ivmesi
G	: Kayma modülü
G_i	: Gravitasyon çekimi
G_{maks}	: Maksimum kayma modülü
H	: Zemin tabakası kalınlığı
K	: Bulk modülü
M	: Sıkışma modülü
n	: Geometrik sönüm katsayısı
r_1, r_2	: Dinamik yük kaynağına olan uzaklık
R^2	: Belirtme katsayısı
R_i	: Dalga yansıma katsayısı
Δt	: Zaman adım aralığı
t_p, t_s	: Dalga ışını varış süresi
T	: Periyot
T_i	: Dalga iletim katsayısı
V_P	: Basınç dalgası hızı
V_S	: Kayma dalgası hızı
V_R	: Rayleigh dalgasının yayılma hızı
V_{S30}	: Yüzeyden ilk otuz metre tabaka kalınlığında ortalama kayma dalgası hızı
Z	: Akustik empedans
γ	: Birim hacim ağırlık
γ_0	: Referans birim hacim ağırlığı
ρ	: Birim hacim kütlesi (Yoğunluk)
ρ_i	: Zemin tabakasının öz direnci

SİMGELER DİZİNİ

μ_i	: Süseptibilite katsayısı (manyetiklik miktarı)
w_2 / w_1	: Dalga genliği azalım oranı
ν	: Poisson oranı
α	: Malzeme sönüm katsayısı
α_0	: Frekanstan bağımsız malzeme sönüm katsayısı
α_i	: Zemin tabakasının eğimi
λ	: Dalga boyu
π	: Pi sayısı



KISALTMALAR DİZİNİ

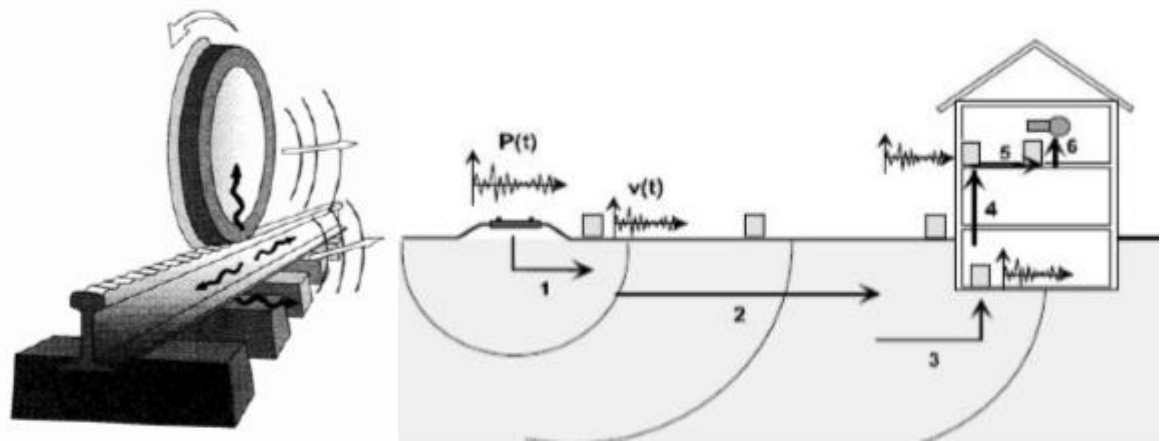
ABD	: Amerika Birleşik Devletleri
BS-6472	: İngiliz titreşim kriterleri standardı
DIN-4150	: Alman titreşim kriterleri standardı
Eurocode-8	: Avrupa inşaat mühendisliği standartları
FTA	: Amerikan titreşim kriterleri standardı
GB10070-88	: Çin titreşim kriterleri standardı
MASW	: Çok kanallı yüzey dalgası analizi
MYO	: Meslek Yüksek Okulu
PGA	: Pik ivme genlik (Maksimum yer ivmesi)
SUBÜ	: Sakarya Uygulamalı Bilimler Üniversitesi
TCDD	: Türkiye Cumhuriyeti Devlet Demiryolları
UBC	: Kanada teknik şartnamesi
YHT	: Yüksek Hızlı Tren
N	: Kuzey
S	: Güney
E	: Doğu
W	: Batı
cm	: Santimetre
dB	: Desibel
gal	: Santimetre/Saniye ²
Hz	: Hertz
kg	: Kilogram
km	: Kilometre
kN	: Kilonewton
m	: Metre
m ²	: Metrekare
m ³	: Metreküp
sa	: Saat
sn	: Saniye

BÖLÜM 1

GİRİŞ

1.1 Problemin Tanımlanması

Çağdaş dünyadaki modern sanayinin hızlı ilerlemesi ile ticaret merkezlerinin gelişimi sonucunda kentlerin sürekli genişlemelerine bağlı ulaşım sistemlerinin oluşturduğu titreşim etkileri insanların günlük yaşam ve çalışma ortamları üzerinde rahatsız edici boyutlara ulaşmıştır. Özellikle son yıllarda, insanların hayat standartlarının ekonomik gelişmeye bağlı yükselmesi sonucu modern kent topluluklarının yoğun yerleşim bölgelerinde, daha kaliteli, güvenli yaşam isteği ve çevresel etkenlerin ürettiği titreşim problemlerine karşı gösterdikleri duyarlılıklar hızla artmaktadır (Şekil 1.1).



Şekil 1.1: Tren geçişi sırasında oluşan dinamik yüklerin demiryolu üstyapısında, zemin ortamında ve çevre yapılarında oluşturduğu titreşim etkileri (Buonsanti vd., 2009)

Bu problem büyük şehir yöneticilerinin, ulaşım sistemi planlayıcılarının, trafik sistemi tasarımcılarının ve dünyanın her yerindeki mühendis araştırmacıların ilgisini çekmiştir. Deprem yer hareketi dışındaki insan yapısı üretilen yüksek frekanslı titreşim kaynaklarının (ağır makine temelleri, yoğun ve hızlı trafik akış yükleri, masif inşaat aktiviteleri, patlamalar vb.) oluşturduğu kuvvetli dalgaların yumuşak zemin ortamında yayılışının incelenmesi, çevresel titreşim problemlerinin mühendislik çözümlerinin üretilmesi açısından önem kazanmıştır. Yeni ulaşım sistemlerinin tasarımı ve planlanması aşamasında titreşim etkilerini kapsayan çevresel değerlendirmeler gerekli programlardan biri haline gelmiştir.

Özellikle Yüksek Hızlı Trenler'in oluşturduğu çevresel titreşim problemine yönelik yapılan bu tez çalışmasında, YHT, yük ve banliyö trenlerinin geçişleri esnasında yumuşak zemin ortamında oluşan titreşimlerin mesafeye bağlı azalımının analitik olarak hesaplanabilirliğini sağlayan Bornitz (1931) çözüm yöntemi araştırılmış olup hem sahadan alınan deneysel sonuçlarla karşılaştırması yapılmış hem de deneysel sonuçlardan yararlanarak çözüm yönteminin geliştirilmesine olanak sağlayan formüller serbest zemin ve hendekli serbest zemin için elde edilmiştir. Ayrıca serbest zemin ve hendekli serbest zemin için analitik çözüm yöntemine ait ivme-genlik azalım eğrileri karşılaştırılmış, hendekli serbest zeminde hesaplanan ivme genliklerinin, serbest zemindeki hesaplanan ivme genliklerine göre hendeğe yakın kısmında daha çok azalma olduğu görülmüştür. Yapılan ilk iki saha çalışmalarında alüvyon yumuşak zeminde deneysel olarak trenlerin geçişi ile oluşan titreşim pik ivme genlikleri ölçülmüştür. Üçüncü saha çalışmasında ise, deneysel ölçümler yaptığımız hendekli serbest zemin bölgesinde döşenen 10 cm kalınlığında beton kilit parke taşı, 5cm harç ve 5 cm kum dolgu uygulama malzemeleri ile birlikte 20 cm kalınlığında bir tabaka oluşturmuştur. Bu tabakanın etkileride hem ölçüm sonuçlarındaki hemde regresyon analizinden elde edilen ivme genlik azalım eğrilerindeki karşılaştırmalar, yumuşak zemin ve beton kilit parke taşı kaplanmış zemin arasında önemli derecede fark olduğunu göstermiştir.

1.2 Literatür Özeti

Yüksek hızlı demiryolu taşımacılığı ile yük ve banliyö trenlerine sahip birçok Avrupa ülkesinde olduğu gibi ülkemizde de deprem yer hareketi dışındaki farklı frekans içeriklerine sahip insan yapısı titreşim kaynaklarının oluşturduğu titreşimlerin oluşum mekanizmasının ve bunların yumuşak zemin koşullarında yayılma özelliklerinin incelenmesi önemli araştırma konuları olmuştur (Bata, 1971; Massarsch, 1993, 2004; Xia vd., 2007). Yüksek hızlı demiryolu taşımacılığının kent içinde ürettiği çevresel titreşimlerin etkileri, trafik akış yoğunluklarına, tren seti yüklerine, etkime sürelerine, seyahat hızlarına bağlı incelenmiş ve dalga yayılımı probleminin anlaşılabilmesiyle ilgili birçok saha deneyleri gerçekleştirilmiş, elde edilen önemli sonuçlar yayınlanmıştır.

Auersch (1989) Almanya'da faaliyet gösteren ICE tipi yüksek hızlı yolcu trenlerinin 100-300 km/sa arasında değişen hızlarda elde ettiği ölçüm sonuçları ile titreşim kaynağı olarak

hızlı trenlerin çevresel etkilerini araştırmış ve raylı sistem planlayıcılarına tasarımlarında bu etkileri azaltıcı önlemler için katkı sağlayacak rapor yayınlamıştır.

Branderhorst (1997) Hollanda'nın Amsterdam-Utrecht şehirleri arasında 40-160 km/sa hızlarında seyahat eden yüksek hızlı yolcu trenlerinin meydana getirdiği çevresel titreşimleri sahada ölçmüş ve elde ettiği veriler daha sonra sayısal modellerin doğrulanmasında kullanılmıştır.

Adolfsson vd. (1999) İsveç'in batı sahil hattında Göteborg-Malmö arasında kullanılan X2000 tipi trenlerin 200 km/sa aşan hızda oluşturduğu çevresel titreşimleri kayıt altına almış, titreşim etkilerini kapsayan çevresel değerlendirme sonuçlarını yeni ulaşım sistemlerinin tasarımı ve planlanması aşamasında kullanılmak üzere yayınlamıştır.

Crispino ve D'apuzzo (2001) İtalya'nın Napoli bölgesinde bulunan kültürel miras koruması altındaki tarihi yapılarda karayolu trafiğinin meydana getirdiği titreşim etkilerini ölçmüşler ve İngiliz standardında BS 6472 (2008) belirtilen kriterlere göre tespit ettikleri maksimum partikül hızını karşılaştırmışlardır. Sonuç olarak standartlara göre titreşim algılama eşik değerinin aşıldığı ve hassas tarihi binalar için olumsuz sonuçları olabileceğini değerlendirmişlerdir.

Hasheminezhad (2014) çalışmasında kentsel alanlardan geçen trenlerin oluşturduğu titreşimleri azaltmak amacıyla hendek bariyer sistemini yapı ve yük kaynağı arasında olacak şekilde sayısal olarak modellemiştir. Modelinde çelik boruları, beton boruları içi kum, kil dolgu halinde ve boş durumlarda hendek içerisinde tasarlamış analiz sonuçlarında beton boruların, kum ve kil varlığının önemsenecek bir etkisi olmadığını içi boş hendek sistemi ve çelik boruların oldukça makul düzeyde titreşim etkilerini azalttığını göstermiştir.

Titreşim enerjisinin zemin ortamında soğurulmasını dalga türüne ve geometrik sönüme bağlı tanımlayan analitik çözümler Bornitz (1931) ile ardışık gözlem noktalarındaki deneysel ölçüm sonuçlarının karşılaştırılması, zemin türüne göre en uygun malzeme sönüm katsayısının belirlenebilmesi ve titreşim kaynağına belirli mesafelerde iki nokta arasında dalga enerjisindeki değişimin bağlı olduğu etkenlerin araştırılması ile ilgili olarak literatürde yapılan birçok çalışma mevcuttur.

Yang (1981) otomobil, tren vb. araç trafiği, makine veya kazık çakma uygulamalarının zeminde oluşturduğu titreşimlerin sebep olduğu yüzey ve cisim dalgalarının çeşitli zemin türlerinde mesafeye bağlı azalımının geometrik sönümleme ve malzeme sönümleme katsayılarının kullanıldığı Bornitz formülasyonu ile tahmin edilebilirliğini doğrulamak ve uygun katsayıları belirlemek için sismik ölçümlerle elde ettiği titreşim dalgası ivme genlik değerlerini analitik hesaplamalarla bulduğu ivme genlik değerleriyle karşılaştırmış, pratik kullanılabilir katsayılar elde etmiştir. Titreşim kaynağından belirli mesafelerdeki noktalarda elde edilen ölçüm sonuçlarının genelde analitik çözümle uyduğu, ivme genlik değerlerinde çok büyük farkların olmamasından, yüzey dalgaları kadar olmasada cisim dalgalarında önemli derecede sonuçları etkilediğinden, Bornitz formülünün tahmin gerektiren durumlarda kullanılabileceğinden ve esas alınması gereken değerlerin saha ölçümleri olduğundan söz etmiştir.

Amick ve Gendreau (2000) genel olarak inşaat uygulamalarının oluşturduğu titreşim etkilerini DIN-4150 standardına uygunluğunu ve literatürde yapılmış olan araştırmalardan (Wiss, 1967; Amick ve Ungar, 1987; Richart, 1962; Woods, 1967, Barkan, 1962) örnekleri incelemişler ve titreşime duyarlı tesisler (hassas ölçümlerin ve çalışmaların gerektiği biyoteknoloji laboratuvarları, ABD’ deki Silikon Vadisi, ASYA’ daki Bilim Parkları, yüksek enerjili fizik uygulamaları, üniversite araştırma kampüsleri, Tekno Parklar) üzerindeki etkisinin sahaya özgü değerlendirmesinin yapılması için bir yaklaşım sunmuşlardır. Bu sebeple analitik bir çözüm yolu olan Bornitz bağıntısı için yapılmış çalışmalardan farklı zemin tipleri ve farklı titreşim kaynakları için geometrik sönüm katsayısı ile malzeme sönüm katsayısı içeren tablolar derlemişlerdir. Çeşitli frekanslarda çalışan inşaat araçlarına ait titreşimlerin 15m aralıklı mesafelerde ölçülen pik partikül hızlarını analitik çözüm yolları ile karşılaştırmışlar ve analitik çözüm sonuçlarının, ölçüm sonuçlarını makul düzeyde temsil ettiğinden bahsetmişlerdir.

Athanasopoulos vd. (2000) Yunanistan’ın Girit’ te bulunan Hanya şehrinde onbeş noktada, Selanik şehrinin banliyö bölgesinde iki noktada olmak üzere toplam onyedii noktada yaptıkları çalışmada 0-100 Hz aralığında farklı frekanslarda, zemin yüzeyine ağırlık düşürerek darbeli titreşimler üretmişler, yaptıkları ölçümlerle geometrik sönümleme katsayıları ve malzeme sönümleme katsayıları elde etmişlerdir. Bornitz bağıntısı ile ilgili

yaptıkları çalışmada çeşitli titreşim kaynaklarına ve dalga türüne bağlı geometrik sönümleme katsayılarını, zemin türüne bağlı malzeme sönümleme katsayılarını, frekanstan bağımsız ve zemin tipine bağlı formülasyonda kullanılarak hesaplanabilen sönümleme katsayılarını tablolar halinde sunmuşlardır. Malzeme sönüm katsayısını titreşim frekansı, sönüm oranı ve Rayleigh kayma dalga hızlarına bağlı bir formülasyon kullanarak hesaplamışlardır. Ölçümlerde elde ettikleri parçacık hız değerleri ile Bornitz formülasyonundaki farklı yaklaşımlarla hesap ederek buldukları değerleri karşılaştırmış, literatürdeki çalışmalara göre değerlendirdiklerinde makul bir uyum olduğunu göstermişlerdir.

Hiller ve Crabb (2000) çalışmanın yapıldığı zamanda mevcut bulunan, yapılara etkileyen titreşim etkilerinin dikkate alındığı yönetmelikler incelenmiş ve inşaat yapım yöntemlerindeki teknolojik gelişmelerle zemin iyileştirme yöntemlerinde (kazıklı temel, vibrasyonlu sıkıştırma, kompaksiyon vb.), kazı yapımında, tünel açılmasında, zemin sıkılığını artırmak gibi faaliyetlerin oluşturduğu titreşimlerin dikkate alınmadığı görülmüştür. Bu sebeple titreşim yönetmeliklerini geliştirmek ve titreşim seviyelerinin belirlenmesinde kullanılacak yöntemlere katkıda bulunmak amacıyla birçok inşaat aktivitesine ait titreşimleri oldukça geniş bir zemin çeşitliliğinde incelemişler konuyla ilgili rapor oluşturmuşlardır. Raporda titreşim genliklerinin hesaplanmasında iki nokta arasındaki enerji azalımını dikkate alan Bornitz analitik çözüm yönteminin yeterince uygun sonuçlar verdiği belirtilmiştir.

Kim ve Lee (2000) titreşimle ilgili sorunları etkili bir şekilde değerlendirmek için, güvenilir bir titreşim izleme sisteminin (Bornitz bağıntısı) geliştirilmesi ve çeşitli titreşimlerin zayıflama özelliklerinin doğru değerlendirilmesi esasıyla tren yükü, patlatma, sürtünme, kazık çakma ve hidrolik kırıcı sıkıştırılmalarının neden olduğu çeşitli zemin titreşimleri, sondaj çukurunda ve zemin yüzeyinde üç eksenli ivmeölçer kullanarak ölçmüşler çeşitli titreşimlerin yayılma ve mesafeye bağlı zayıflama özelliklerini inceleyerek parçacık hızlarını analiz etmişlerdir. Çeşitli titreşimlerin geometrik modellenmesi için çeşitli kaynak türleri ve titreşim dalgaları karakterize edilmiş ve geometrik sönümleme katsayıları belirlenmiştir. Ölçülen titreşim enerjisinin mesafeye bağlı zayıflama verileri, önerilen geometrik sönümleme katsayısı kullanıldığında hesap edilen verilerle iyi eşleşmiş ve tahmini zemin sönümleme oranları, alanın zemin türü ve gerilme seviyesinide dikkate alarak oldukça

makul olmuştur. Malzeme sönüm katsayısını ise kaynak frekansına ve dalga yayılma hızına bağlı bir formülasyon ile belirlemişlerdir.

Degrande ve Schillemans (2001) Brüksel-Paris arasında test sürüşü yapan bir lokomotif ve 7 vagon dan oluşan Thalys HST tipi yüksek hızlı yolcu treninin 223-314 km/sa arasındaki geçiş hızlarında demiryolu ve yakın çevrede (4-72 m arasında 14 farklı gözlem noktası) oluşturdukları serbest zemin titreşimlerini incelemişler mesafeye bağlı titreşim azalımının Bornitz bağıntısı ile ifade edilebildiğini göstermişlerdir.

Xia vd. (2005) Çin'in Kuzey-Doğu bölgesindeki Shenyang-Harbin demiryolu hattında faaliyet gösteren yük ve yolcu trenlerinin 20-80 km/sa arasında değişen geçiş hızlarında ürettikleri titreşimleri, ana istasyona 12 m uzaklıktaki 2-3 katlı betonarme binalarda, seçilmiş bir köprü ayağı (Daqinghe köprüsü) üzerinde ve yakın çevresindeki serbest zemin bölgesinde (köprüden 20 m aralıklarla 3 ölçüm noktası) incelemişlerdir. Tren hızının ve yükünün artmasıyla bina katlarında titreşim seviyesinin arttığı, demiryolundan uzaklaştıkça serbest zeminde etkisinin hızlı bir şekilde azaldığı tespit edilmiştir.

Ju ve Ni (2007) zeminlerin titreşim dalgalarını sönümlemesi, Rayleigh sönüm katsayıları gibi parametrelerin özellikle hastaneler, yüksek teknolojik binalar ve endüstriyel yapıların (makinelere kaynaklanan, yapıya yakın yerden geçen trafik ve demiryolu hatlarından kaynaklanan mikro titreşimlerin dikkate alınmasına özellikle gereksinimi olan binalar) dinamik davranışını modellemek için önemli analiz parametreleri olduğunu belirtmişlerdir. Çalışmalarında, analitik çözüm için serbest zemin yüzeyinde dalga genliklerinin Bornitz denklemiyle hesaplanmasını sağlayan malzeme sönüm katsayısı, geometrik sönüm katsayılarını hassas bir şekilde belirlemek amacıyla istatistiksel bir yöntem olan en küçük kareler yöntemini kullanmışlardır. Bu yöntemin doğruluğunu kanıtlayabilmek için Bornitz analitik çözüm sonuçlarıyla hem üç boyutlu sonlu eleman analizleri hem de saha çalışmalarında yaptıkları deneylerin (zemine beton bir blokla sabitlenmiş makine titreşimlerini belirli mesafelerde ölçmek) sonuçları arasında karşılaştırma yaparak en küçük kareler yönteminin doğruluğunun kabul edilebilir olduğunu göstermişlerdir.

Teknolojinin gelişmesi, kentlerin büyümesiyle enerji santrallerinin yerleşim yerlerindeki yapılara yakın hale gelmesi ve santralde bulunan makinelerin temellerinde oluşan

titreşimlerden santral binalarıda dahil çevre yapıların etkilenmesi söz konusu olmaktadır. Sreekala vd. (2008) tarafından santral binaları ve çevresinde yapılan çalışmada, dizel santral yapısının kuzey, güney, doğu ve batı olmak üzere dört yönde düz bir alanda serbest zemin ortamındaki titreşimlerin 10m aralıklarla yerdeğiştirme genlikleri ölçülmüş dikey yöndeki genliklerin yataya göre daha uzak mesafelere ulaştığı görülmüştür. Santralin yoğun çalıştığı durumlarda pistonlu makinelerin ürettiği titreşim etkilerinin zemin yapısına bağlı olarak yüksek değerlere ulaştığından hendek izolasyonunun yeterli olmadığı görülmüş ve ekstra yalıtım önlemleri alınması gerektiğini bildirmişlerdir. Ayrıca Bornitz formülasyonundaki sönümleme katsayısı için literatürdeki farklı çalışmaları incelemişler ve hesapladıkları titreşim genliklerini ölçüm sonuçları ile karşılaştırmışlardır. Sonuç olarak Bornitz formülasyonunun ölçüm sonuçlarını önemli ölçüde temsil ettiğini kanıtlamışlardır.

Yerleşim alanlarına yakın veya bazı durumlarda yapıların bitişik nizamda olması nedeniyle şantiye alanlarında ağır inşaat işlerinden, özellikle kazı ve temel yapımında kullanılan iş makinelerinden kaynaklanarak zemine yayılan titreşim dalgaları yakınındaki zemin tabakalarını ve dolayısıyla yapıları olumsuz etkileme potansiyeline sahiptir. Bununla birlikte bilimsel çalışmaların yapıldığı hassas laboratuvar binaları, titreşime karşı geleneksel ticari veya konut binalarından daha fazla önem arz etmektedir. Burgemeister vd. (2011) tarafından gerçekleştirilen çalışmada, iş makinesinden kaynaklanan titreşimleri 100m yakınındaki bölgede hem deneysel hemde Bornitz formülasyonu ile analitik olarak incelemişler ve analitik çözümün deneysel verilerle büyük ölçüde uyum içinde olduğunu belirtmişlerdir. Aynı zamanda yapılara zarar verebileceği ve özel yapılarda hassas işlerin engellenebileceği titreşim seviyelerine ulaşılan durumların ortaya çıktığını gözlemlemişler ve özel yalıtımın gerekliliğini savunmuşlardır.

Ma vd. (2011) Çin'in Chengdu şehrinin merkezinde bulunan halk parkında yaklaşık 30m yüksekliğindeki tarihi anıt niteliğindeki kulenin yakınındaki çevrede trafik ve tünel içerisindeki metro hattının sebep olduğu titreşimlerden etkilenme seviyelerini belirlemek için yaptıkları çalışmada, üç boyutlu sonlu elemanlar programı kullanarak sistemi modellemişler ve sahada yaptıkları sismik ölçümlerle modelin doğruluğunu kalibre etmişlerdir. Metro treninin 72km/sa, 65km/sa ve 58km/sa geçiş hızlarında tarihi anıt yapısının zemininde oluşan titreşim genliklerini karşılaştırdıklarında 72km/sa hızında uzun vadede sürekli geçişler nedeniyle gevşek zeminlerde temelde oturmalar ve sıvada çatlaklar

olabileceği 65-58km/sa hızlarında titreşim sınırlarının oldukça aşağı düştüğünü, 58km/sa hızda ise karayolu sebepli trafik titreşimlerinde dahil izin verilen sınırların altında kaldığını hesaplamışlardır. Bununla birlikte uzun vadede sürekli geçişler sebebiyle titreşim etkileri, malzeme yorgunluğuda göz önünde bulundurulursa tarihi sanat yapılarında düşük hızlarda bile sıva çatlakları gibi hasarlara neden olabileceğinden izolasyonun önemine dikkat çekilmiştir.

Çin’de bulunan 4 Bodrum katına sahip 9 katlı çelik yapı olan Chengdu Müzesinin 18m kadar yakınından 90 km/sa hızla trenlerin geçtiği metro tüneli bulunmaktadır. Yoğun metro geçişlerinin yaşandığı tünel, titreşimlere maruz kalmakta olup zemin ortamında oluşan titreşim etkileri müze binasını etkilemektedir. Hem müze içerisinde sergilenen önemli tarihi eserlerin titreşim etkilerinden zarar görmemesi hemde insanların konforu düşünülerek müze yapısı boşluk izolasyonu ve kauçuk membran ile yalıtılmıştır. Zhang vd. (2011) tarafından yapılan çalışmada titreşim kriterlerine göre izolasyonun yeterliliğini kontrol etmek için tünel duvarı ile yapı temeli arasındaki transfer fonksiyonu, yapı temeli ile döşeme arasındaki transfer fonksiyonu ve bazı katlar arasında transfer fonksiyonları hesaplanmıştır. Deneysel çalışmalarda yüksekte ağırlık düşürülerek oluşturulan titreşimlerin zeminde yayılma hızları ölçülmüştür. Yapı, metro tüneli ve ayrıklaştırılmış zemin bölgesi sayısal analiz için sonlu elemanlar programı kullanılarak modellenmiştir. Yapılan analizler ve ölçümler sonucunda titreşimlerin GB10070-88 Çin özel yerleşim alanı kriterinde belirlenen 64 dB’lik değerin altında kaldığı ve yanıl metro titreşimlerin oldukça düşük değerlerde olduğu anlaşılmıştır.

Truong (2012) depremlerin sebep olduğu titreşim etkilerini farklı zemin tiplerindeki (kaya, ayrışmış kayaç, granit, kil ve kum tabakaları gibi) dinamik büyütme oranını dikkate alarak, dalga yayılma teorilerine göre analiz etmiştir. Dinamik büyütme oranı için çeşitli sayısal hesap yöntemleri üzerinde durmuş kayma dalga hızına bağlı dinamik büyütme oranı değerleri için bir grafik oluşturarak mevcut olan diğer yöntemlerle karşılaştırmıştır. Yapılan çalışma ile, Bornitz formülasyonunu kullanarak farklı kaya ve toprak tabakaları için dinamik zayıflama ve büyütme oranları önermiştir.

Jayawardhana vd. (2014) inşaat faaliyetlerinde kullanılan silindirle sıkıştırma araçları, makine temelleri ve yüksek hızlı trenler gibi farklı dinamik titreşim kaynaklarının neden olduğu titreşimleri azaltmak için zemin bariyerlerinin önemini araştırmışlardır. Literatürdeki

daha önceden yapılmış çalışmalarda, zemin bariyerleri kullanılmasının titreşimi azaltmada etkili olduğunu zemin bariyerleri ile izolasyonun dalga enerjisinin yansması, saçılması ve kırınımına dayandığını kanıtlamıştır. Pratik olmasından dolayı kullanılan açık hendeklerin, özellikle muson döneminde yoğun yağmurun olduğu Srilanka gibi ülkelerde yeterli derinlikte yapılması ve uygulanması genellikle zordur. Bu nedenle, içi doldurulmuş hendek ve ayrıca doldurulan malzemenin özelliğide, titreşim izolasyonunun etkinliği için önemli bir faktördür. Jayawardhana vd. (2014) tarafından yapılan araştırmada zeminin silindirik sıkıştırılmasının neden olduğu titreşimler, dinamik yük kaynağından 2m mesafede 0.40 m x 0.60 m x 0.90 m boyutlarında hendek kazılmış ve yerel olarak mevcut sönümleme malzemeleriyle (tuğla tozu, pirinç kabuğu gibi) doldurulmuştur. Dinamik yük kaynağından 4m, 6m, 8m, 10m mesafelerde pik partikül hız genlik ölçümleri yapılmış olup hendeğin yerel dolgu malzemeleriyle doldurulmasının titreşimleri azaltmada etkili olduğu anlaşılmıştır.

Macijauskas ve Van Baars (2014) çalışmalarında makine tipi titreşim kaynaklarının serbest zemin yüzeyinde oluşturduğu ivme vb. genlik değerlerini hesaplama yöntemlerinin güvenilirliğini kontrol etmek amacıyla, Hollanda'nın kuzey batısındaki suyu setlerle bertaraf ederek kazanılmış arazilerin (polder) bir bölümünde titreşim deneyleri yapmışlardır. Polder arazi zemin üst kısmında oldukça homojen, kalın ve yumuşak bir turba tabakasına sahip olduğu için seçilmiştir. Sarsıntı oluşturmak amacıyla oldukça küçük bir titreşim kaynağı tarafından serbest zemin yüzeyinde yeterli harmonik titreşimler üretilen bir makine tasarlamışlar ve kullanmışlardır. Bu makine dikey olarak salınan bir kuvvet üretmek için iki adet dönen elektrikli vibratörden (döner eksantrik kütleli) oluşmaktadır. Titreşim kayıtları için, zemin yüzeyine altı adet iki eksenli jeofon ve sarsma makinesinin üstüne bir adet iki eksenli jeofon yerleştirilmiştir. Dikey salınımlı sarsma makinesinin zemin yüzeyindeki ölçülen titreşimlerin yerdeğiştirme genlikleri ile Bornitz bağıntısıyla ve Sonlu Elemanlar modellemesinden analitik olarak hesaplanan parametrik değerler karşılaştırılmış, sonuçların uyumlu olduğu değerlendirilmiştir.

Czech (2016) Kuzeydoğu Polonya'da bulunan sekiz farklı yerdeki, otomobil, transit taşıma, yolcu taşımacılığında kullanılan araçların çevre zeminlerde ve yapılarda oluşturduğu etkilerini değerlendirmek için yol kenarlarında oluşan titreşimleri kayıt altına alarak analizler yapmıştır. Taşıt geçişlerinin sürekliliği titreşimlerin yol yapısından zemin aracılığı ile yapıya aktarılması ve yapı malzemesinin uzun zamanlarda yorulmasından kaynaklanan

estetik çatlaklara sebep olabileceğinden söz etmiştir. Özellikle sanat yapıları, tarihi yapılar gibi değerli yapılarda önemli sorunlar oluşturacağı için yalıtım önlemleri alınmasından ayrıca malzeme olarak beton yolların asfalt yollara göre daha az titreşim ilettiğinden söz etmiştir.

İstanbul ili, Eminönü ilçesi, Sirkeci-Halkalı arasındaki tren hattından banliyö trenleri, anahat trenleri ve yük trenlerinin tekrarlı geçişlerinde, hatta 5-10m kadar yakınlıkta tarihi Küçük Ayasofya Camisi'ne bitişik olan duvar maruz kaldığı tren titreşimlerinden zeminde oturmalar ve üstyapıda çatlaklara sebep olduğu gerekçesiyle 2003 yılında camiden ayrılarak yalıtılmıştır. Erkal (2017) çalışmasında kagir olan ve halen kullanılan Küçük Ayasofya Camisi'nin tren titreşimlerinden etkilenme seviyelerini belirlemek amacıyla heterojen bir zemin yapısına sahip olan serbest zemin bölgesindeki titreşimleri ve yapı içerisindeki titreşimleri hızölçer yardımıyla ölçmüştür. Ölçülen deneysel verilerle analitik çözüm Bornitz formülasyonu ile hesapladığı pik parçacık hız genliklerini karşılaştırmış ve büyük ölçüde değerlerin örtüştüğünü, bununla birlikte banliyö, yolcu ve yük treni titreşimlerinin geniş bir frekans aralığına sahip olduğunu belirtmiştir. Tren titreşimlerinin sebep olduğu yapısal hasar oluşma durumu ve yapı konforu bakımından değerlendirdiğinde zemin büyütmesinin gözlemlendiğini, titreşim seviyelerinin minare yapısında aşıldığını, bu gibi tarihi binalara zarar verecek seviyelere ulaştığından bahsetmiştir. Yapılan çalışmada, böyle kritik durumların oluşmaması için titreşimlere maruz kalan tarihi öneme sahip binaların analitik çözüm yollarının yanında deneysel metotlarında uygulanarak incelemelerinin yapılması ve önlemler alınmasının öneminden bahsetmiştir.

Göktepe vd. (2017) Adapazarı şehir merkezinde yolcu taşımacılığında kullanılan banliyö tipi yolcu trenlerinin farklı geçiş hızlarında meydana getirdiği titreşim etkilerini serbest zemin yüzeyinde ve su deposu yapısında ivmeölçerler kullanarak kayıt altına almışlardır. Yapılan çalışma ile hız genliklerinde tren hattından daha uzak mesafelerde deneysel olarak ölçülen azalım ilişkileri ile Bornitz analitik çözüm sonuçlarının, yolcu trenlerinin 50 km/sa ve 70 km/sa geçiş hızları için büyük oranda örtüştüğü belirlenmiştir. Bununla birlikte, titreşim ölçümlerinin deneysel olarak yapıldığı pilot bölgede bulunan su deposunda farklı hızlardaki tren geçişlerinin sebep olduğu yapısal titreşimler ölçülerek, Alman yönetmeliği (DIN4150) ve Amerikan standardında (FTA, 2005) belirlenen kriterlere göre karşılaştırılmıştır. Çalışma sonucunda, su deposunun tepe noktasında yolcu trenlerine bağlı

oluşan titreşim seviyeleri DIN4150'e göre normal iken FTA 2005'e göre müsaade edilebilir sınır değerlerini aştığı anlaşılmıştır.

Ni vd. (2017) Kaohsiung hızlı treninin Luzhu bölgesinden geçerken Güney Tayvan Bilim Üssünde oluşturduğu titreşimleri değerlendirmek ve hassas endüstriyel bölgelerdeki tesislerin etkilenme derecelerini belirlemek amacıyla, bölgedeki alüvyon gevşek toprak birikintisinin bulunduğu alanda 2mx2mx2m ebatlarındaki beton blok üzerine yüksekte ağırlık düşürerek oluşturdukları düzenele farklı frekans aralıklarına sahip tren titreşimlerini simule ederek 500 metreye kadar belirli mesafelerde ölçmüşlerdir. Yapılan çalışmada, zeminin sönümleme oranını belirlemek amacıyla Bornitz formülasyonundaki malzeme sönümleme ve geometrik sönümleme katsayılarını en uygun olacak şekilde seçmek için deneysel verilerden faydalanmışlardır. Çalışmalarının sonucunda kaynağa dik mesafedeki dalga genliklerinin daha yüksek değerlerde olduğunu bildirmişler ve titreşimlerin hassas yapılar üzerindeki etkilerinin önemlenecek derecede olduğundan bahsetmişlerdir.

Ren vd. (2019) çalışmalarında Çin-Şanghay şehrinde yumuşak zemin bölgesinden geçen yüksek hızlı trenlerin oluşturduğu titreşimleri serbest zemin yüzeyinde ve temel yapısında ölçmüşler, titreşim etkilerinin yayılma ve azalma özelliklerini araştırmışlardır. Bu deneysel ölçümlerden elde edilen değerleri analitik çözüm yolu olan Bornitz formülasyonunu doğrulamak için kullanmışlardır. Homojen serbest zemin ortamındaki iki nokta arasında titreşim enerjisinin azalmasını malzeme sönüm katsayısı ve geometrik sönüm katsayısı parametreleriyle tanımlayan Bornitz formülasyonu ile deneysel sonuçların büyük oranda örtüşme sağladığı anlaşılmıştır. Çalışmada ayrıca, yüksek hızlı tren kaynaklı titreşimlerin tünel gibi yeraltı yapıları üzerindeki etkisini yapı-zemin etkileşimi açısından araştırmak için alternatif bir yöntem sunulmuştur. Sonuç olarak, çalışmalarında yerleşim yerlerine yakın geçen yüksek hızlı trenlerin serbest zeminlerde oluşturduğu titreşimler sebebiyle yapıların temellerini önemli derecede etkilediğini vurgulayarak titreşim genliklerinin belirlenmesinin önemli olduğunu çalışmalarında belirtmişlerdir.

1.3 Çalışmanın Amaç ve Kapsamı

Ülkemizde demiryolu ulaşım sistemlerini ilgilendiren konularda gerçekleştirilen az sayıdaki saha araştırma çalışmaları kent içi hafif raylı sistem titreşimlerinin yolcu konforu ve

güvenliği üzerindeki etkilerinin incelenmesiyle, seyahat kalitesinin ve çevresel akustik sorunların iyileştirilmesiyle sınırlı kalmıştır. Ulusal literatürde yapılan yerel bir çalışmada, İstanbul Aksaray-Havalimanı şehir içi raylı ulaşım trafiğinde kullanılan ve maksimum seyahat hızları 50km/sa hızı aşmayan hafif metro araçlarının geçişleri sırasında demiryolu hattında ve yakınındaki idari bir binada oluşturduğu titreşim etkilerinin ölçülerek konfor analizi yapılmıştır (Güçlü vd., 2010). Çalışma kapsamında gerçekleştirilen ölçümler ve simülasyon çalışmaları, taşıt tekerleği-ray etkileşimi sonucu çevreye yayılan konfor bozucu titreşimleri ve gürültüyü azaltmak için araç gövdesinde ve demiryolu alt yapısında alınabilecek izolasyon yöntemlerine odaklanmıştır.

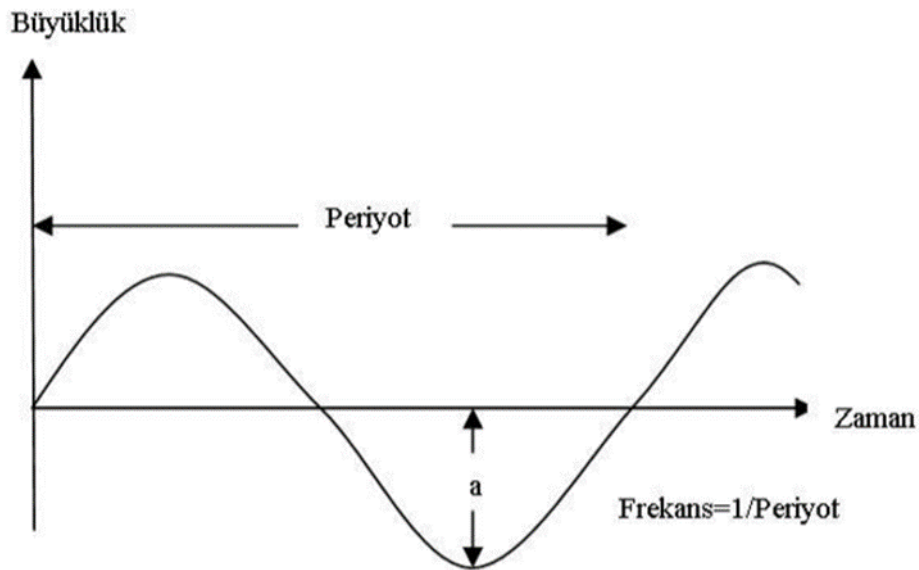
Yapılan bu çalışmada, YHT ile yük ve banliyö trenlerinin geçişleri esnasında demiryolu üstyapısının yakın çevresinde meydana gelen titreşim etkilerinin yerinde incelenebilmesi için trafik akış hızının yüksek değere ulaştığı alüvyon zemin koşullarındaki (zemin kayma dalga hızı < 200 m/sn) serbest zemin titreşimleri ölçülmüştür. İzmit-Arifiye arasındaki Kırkpınar bölgesinde belirlenen pilot bölgede kayıt altına alınan deneysel ölçüm sonuçları ile titreşim enerjisinin zemin ortamında soğurulmasını dalga türüne ve geometrik sönüme bağlı tanımlayan analitik çözüm sonuçları karşılaştırılmıştır. Özellikle YHT geçişlerinin oluşturduğu titreşimlere ait ivme vb. parametrelerin hesaplanabilmesini sağlayan analitik çözüm yollarının geliştirilmesi amaçlanmıştır. YHT, yük ve banliyö trenlerinin geçişleri esnasında yumuşak zemin ortamında oluşan titreşimlerin mesafeye bağlı azalımının analitik olarak hesaplanabilirliğini sağlayan Bornitz (1931) çözüm yöntemi araştırılmış, deneysel sonuçlardan yararlanarak çözüm yönteminin geliştirilmesine olanak sağlayan formüller serbest zemin ve hendekli serbest zemin için elde edilmeye çalışılmıştır. Ayrıca serbest zemin ve hendekli serbest zemin için analitik çözüm yöntemine ait ivme-genlik azalım eğrileri karşılaştırılmış, hendekli serbest zeminde hesaplanan ivme genlikleri ile serbest zemindeki hesaplanan ivme genlikleri arasındaki farkın ne ölçüde gerçekleştiği saptanmaya çalışılmıştır. Yapılan ilk iki saha çalışmasında alüvyon yumuşak zeminde deneysel olarak trenlerin geçişi ile oluşan titreşim genlikleri ölçülmüş ve üçüncü saha çalışmasında ise, hendekli serbest zemin bölgesinde beton kilit parke taşı üzerinde yapılan ölçümlerle karşılaştırılarak farklı zemin tabakalarının etkileri araştırılmıştır. Bu farklı tabakalardaki titreşimlerin ivme genlik ölçümleri regresyon analiziyle idealleştirilmeye çalışılmış olup analitik çözümden elde edilen ivme genlik azalım eğrileriyle karşılaştırılarak, yumuşak zemin ve kilit parke taşı kaplanmış zemin koşulları arasındaki farklılıklar belirlenmiştir.

BÖLÜM 2

ZEMİN ORTAMINDA DALGA YAYILIŞI VE DİNAMİK ZEMİN ÖZELLİKLERİ

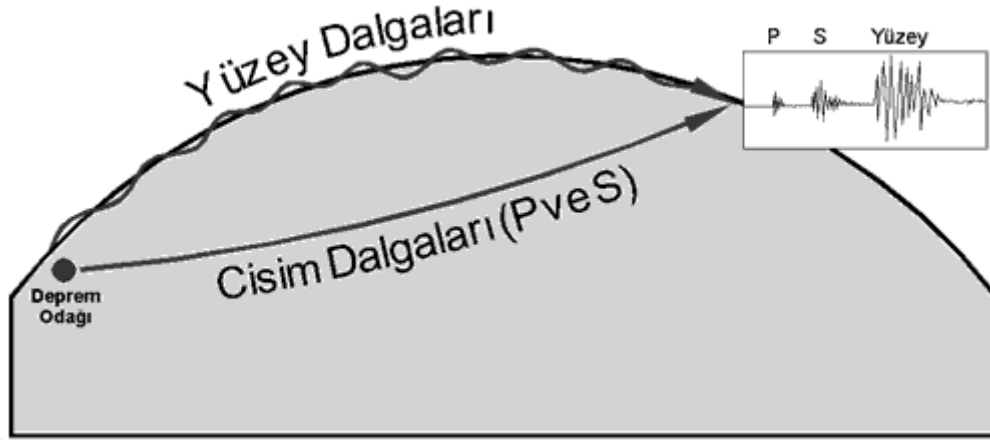
Zemin ortamında herhangi bir noktada doğal (deprem, tektonik faaliyetler vb.) veya insan kaynaklı (inşaat aktiviteleri, patlama, yüksek hızlı tren, makine vb.) kuvvet uygulanmasıyla oluşan titreşim enerjisi, zemin ortamında başka bir noktaya sismik dalgalarla taşınır. Bu dalgalar yer ortamında her yönde yayılır ve vardıkları noktalarda çeşitli periyotlarda salınım ve titreşimlere neden olurlar. Yayılırken enerjilerinin bir bölümünü periyotlarına bağlı olarak kaybederler ve bu nedenle sismik kaynağa yakın olan noktalarda zemin daha fazla sarsılırken, uzak olan noktalarda daha az sarsılır. Düşük periyotlu (yüksek frekanslı) sismik dalgalar, enerjilerini uzun periyotlu (düşük frekanslı) sismik dalgalara kıyasla daha hızlı kaybederler. Sismik enerjinin soğurulması uzaklık, dalganın periyodu ve yayıldığı ortamın fiziksel yapısıyla ilişkilidir (Eyidoğan, 2012).

Dalganın fiziksel özelliklerini sayısal olarak ifade etmek için periyot (T), frekans (f) ve genlik (a) terimleri kullanılmaktadır. Periyot, dalganın bir tam hareketi için geçen süreye, frekans, dalganın bir saniyedeki tekrar sayısına, genlik ise dalganın tepe ve çukur yüksekliklerinin denge konumuna olan mesafesine verilen değerdir (Şekil 2.1).



Şekil 2.1: Dalga için kullanılan terimler (Yıldırar, 2000).

Sismik dalgalar zeminin derinliklerinde ilerleyen cisim dalgaları ve zeminin yüzeyinde ilerleyen yüzey dalgaları olarak Şekil 2.2'deki gibi adlandırılırlar.



Şekil 2.2: Cisim dalgaları (P, S) ve yüzey dalgalarının (Love, Rayleigh) yer içerisinde seyahat yolları (URL-1, 2020).

2.1 Cisim Dalgaları

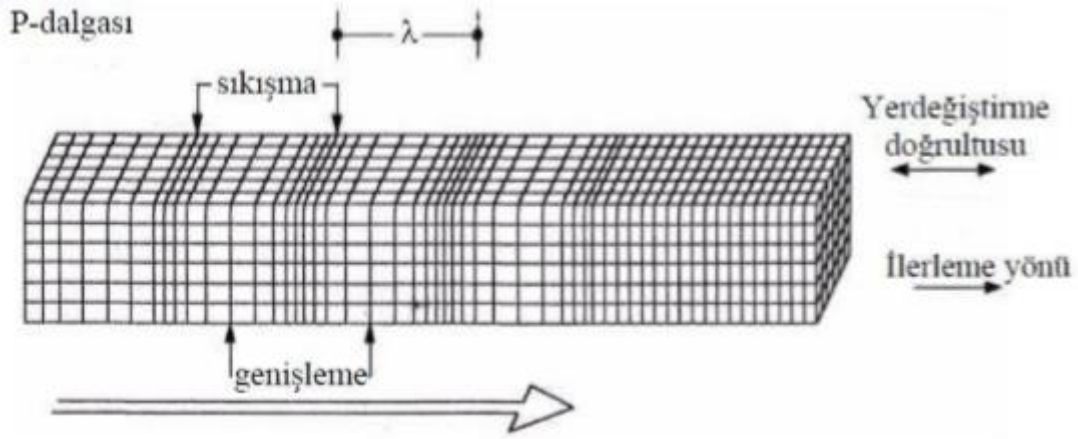
Cisim dalgaları yerin içerisinde en derin bölgelerde dahil her bölgeye parçacık hareketi ile yayılabilirler ve yayılma hızları yüksek olduğu için ölçüm yapılan noktaya en erken ulaşan dalgalardır. Cisim dalgaları, P dalgası (basınç dalgası, birincil dalga, boyuna dalga) ve S dalgası (kayma dalgası, ikincil dalga, transvers dalga) olarak adlandırılırlar (İyisan, 1994).

2.1.1 P Dalgası

Bir ortam içerisinde yayılan dalganın yönü ile parçacık hareketi (yerdeğiştirme) yönü aynı ise bu dalga tipine P dalgası adı verilmektedir. Bu dalgalar katı, sıvı ve gaz ortamlarda çekme ve basınç olarak yayılırken hacim değişikliğine sebep olmaktadır (Şekil 2.3). Dalga genlikleri en düşük fakat dalga hızları en yüksek olan bu dalga türü ölçüm yapılan noktaya en erken ulaşan dalgadır ve aşağıdaki formülasyonla sayısal olarak hesaplanabilir.

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

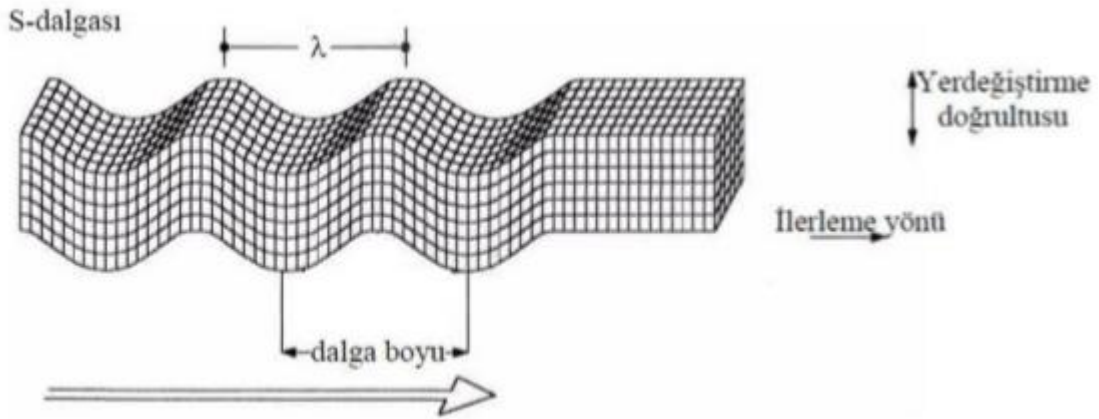
V_p : Boyuna dalga hızı, E : Elastisite modülü, ρ : Birim hacim kütlesi, ν : Poisson oranı.



Şekil 2.3: P-dalgaları ilerlediği yönde parçacıkları sıkıştırır ve genişletir (Kramer, 1996).

2.1.2 S Dalgası

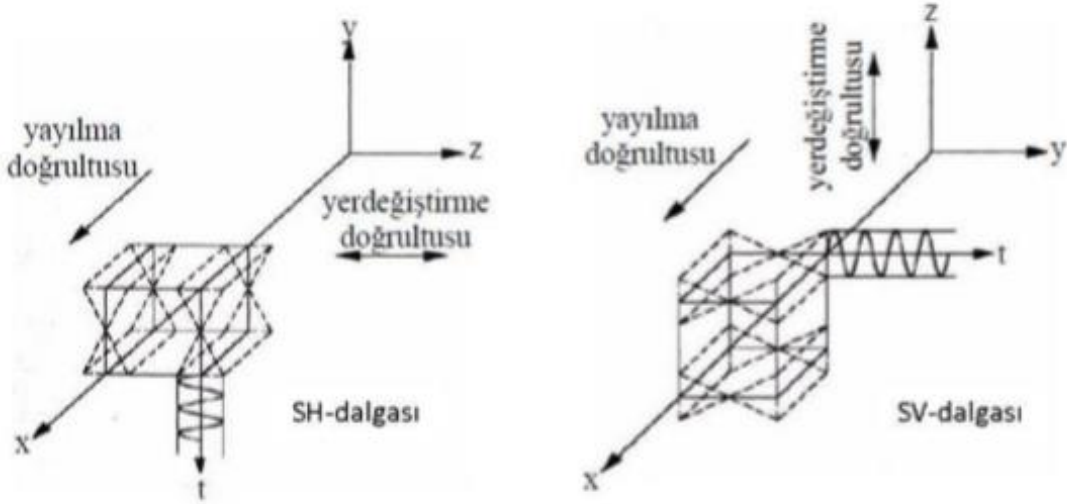
S dalgaları zemin ortamında yayılırken cisimde şekil değişikliği (açıların değişimi) gözlenir, fakat hacim değişimi gözlenmez. Bunun nedeni parçacık titreşim doğrultusunun dalga yayılım doğrultusuna dik olmasıdır (Şekil 2.4). Bu şekilde yayılan S dalgaları (Kayma dalgaları) ortamın hacim değişikliğine uğramadan makaslama kuvvetlerinin etkisinde kalmasına sebep olurlar. Bu dalgalar katı ortamlarda ilerler, çünkü gaz ve sıvı ortamların şekil değişikliğine karşı dirençsiz olması yani kayma modülünün sıfır olduğu ortamlarda S dalgaları sönümlenme eğilimindedir.



Şekil 2.4: S-dalgaları ilerleme yönü yer değiştirme doğrultusuna diktir (Kramer, 1996).

Kayma dalgası parçacık hareketleri yayılma doğrultusuna dik olarak gerçekleşirken

yerdeřiftirmeler yatayda gerçekleřecek řekilde bir tabaka ile çevrilirse yatay polarize olmuř kayma dalgası (SH), yerdeřiftirmeler dūřeyde gerçekleřecek řekilde bir tabaka ile çevrilirse dūřey polarize olmuř kayma dalgası (SV) adını almaktadır (řekil 2.5).



şekil 2.5: SH-dalgası ve SV-dalgası yayılma zellikleri (Kramer, 1996).

Kayma modūlū (G) ve S dalgası yayılma hızı (V_s) ařağıdaki formūlasyonlarla hesaplanabilmektedir.

$$G = \frac{E}{2(1+\nu)} \quad (2.2)$$

$$V_s = \sqrt{\frac{E}{2\rho(1+\nu)}} \quad (2.3)$$

V_s : Enine dalga hızı, E : Elastisite modūlū, ρ : Birim hacim kūtleři, ν : Poisson oranı.

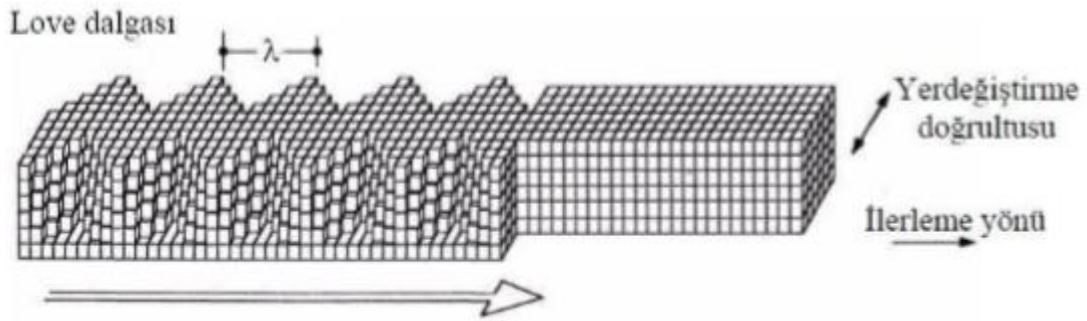
2.2 Yūzey Dalgaları

Cisim dalgaları yer yūzeyine yakın yerlerdeki katmanlara etkiyerek yūzey dalgalarını oluřtururlar. Yūzey dalgaları, cisim dalgaları'na göre daha yavař yayılırlar, ancak genlikleri daha būyūktūr. Sismik dalgaların ikinci tūrū olan yūzey dalgaları, en yavař ilerleyen sismik dalgalar olmakla birlikte, genelde cisim dalgalarından daha fazla hasara neden olurlar.

Çünkü bu dalgalar daha fazla yer hareketi yaratır, daha yavaş hareket ettiği için de etkisi daha uzun sürer. Yüzey dalgaları, cisim dalgalarından daha düşük frekans yüksek periyot içeriğine sahiptir. Düşük frekansa ve büyük genliklere sahip olmalarından dolayı yüzey dalgaları birçok yer hareketinde yapılara zarar veren dalga türüdür. Hızı daha fazla olan Love ve genliği daha büyük olan Rayleigh dalgaları olarak ikiye ayrılırlar (Eyidoğan, 2012).

2.2.1 Love Dalgası

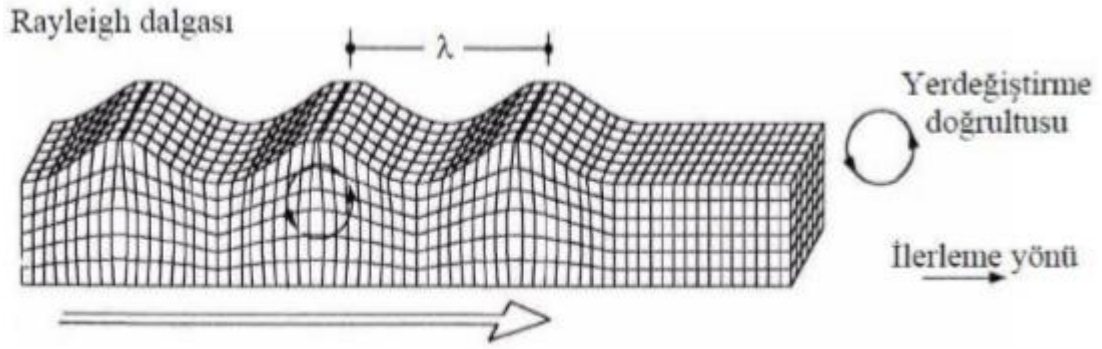
Love dalgaları elastik yarı sonsuz sağlam zemin bölgelerinin üzerinde bulunan alüvyon tabaka gibi yüzeye yakın yumuşak zemin tabakalarında parçacık hareketinin etkisiyle ortaya çıkmaktadır. Kayma dalgasının yatay yöndeki bileşeni olan SH dalgalarının zemin katmanları arasındaki sürtünmeleri yayılma yönüne dik hareketler oluşturarak yüzeydeki zemin katmanını yatay yönde hareket ettirir (Şekil 2.6). Love dalgası yayılma hızı dalga boyuna bağlı olmakla birlikte yüzeydeki yumuşak tabakanın düşük kayma dalgası hızına eşittir (Love, 1911).



Şekil 2.6: Love dalgası ilerleme yönü yer değiştirme doğrultusuna diktir (Kramer, 1996).

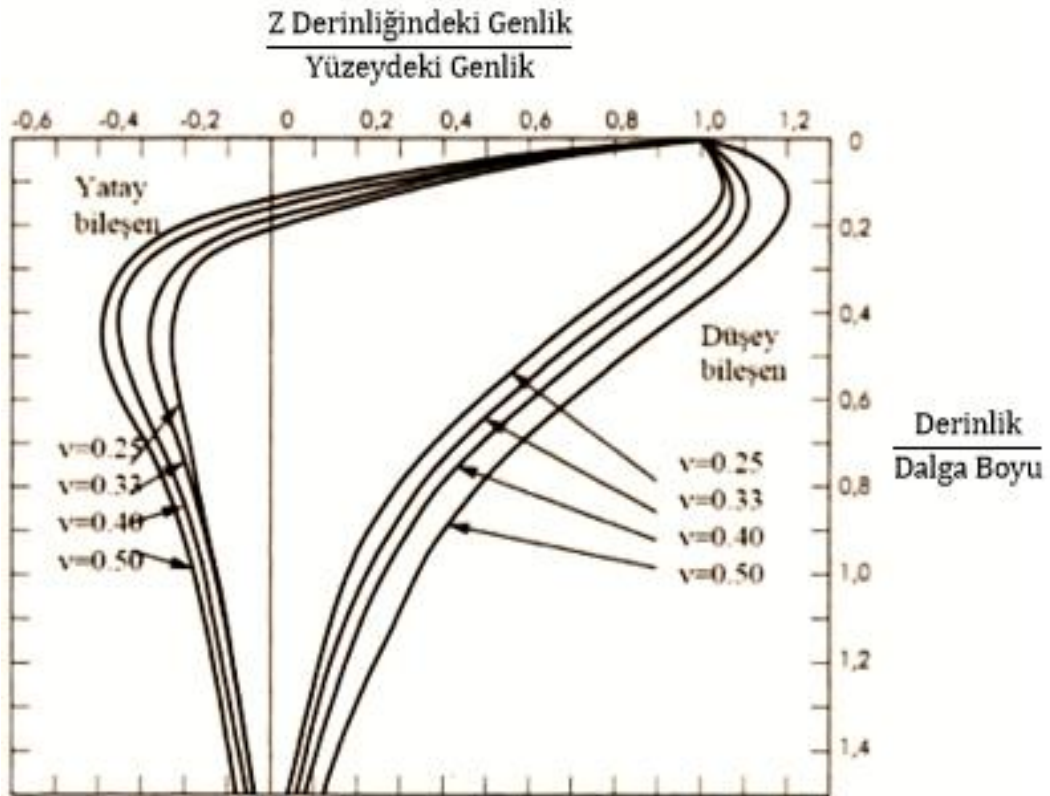
2.2.2 Rayleigh Dalgası

P dalgaları ve SV dalgalarının yüzeydeki zemin tabakalarıyla etkileşimi sonucu oluşan Rayleigh dalgaları elips şeklinde saat yönünün tersine su dalgası gibi hareket ederler. Rayleigh tarafından 1885'te tanımlanan bu tür dalgaların yüzeyden derinliklere inildikçe etkisi zayıflar, yüzeydeki etkisi fazla ve genlikleri büyük olduğu için yapılarda en çok hasarı oluştururlar. P dalgalarının oluşturduğu parçacıklardaki sıkışma ve genleşme ile birlikte SV dalgalarının parçacıkları düşeyde yerdeğiştirmeye zorlaması bileşke olarak yüzeyde parçacıkların eliptik hareketine sebep olurlar (Şekil 2.7).



Şekil 2.7: Rayleigh dalgası ilerleme yönü ve yer değiştirme doğrultusu(Kramer, 1996).

Rayleigh dalgası genliği bileşenlerinin (yatay ve düşey) derinlikle değişimi Poisson oranına bağlı olarak Şekil 2.8’de verilmiştir. Rayleigh dalgası genliği, dalga boyunun 1,5 katı derinlikte yaklaşık olarak yüzeydeki genliğin 0,10 katına kadar azalmakta ve Poisson oranına bağlı olarak değişiklik göstermektedir.

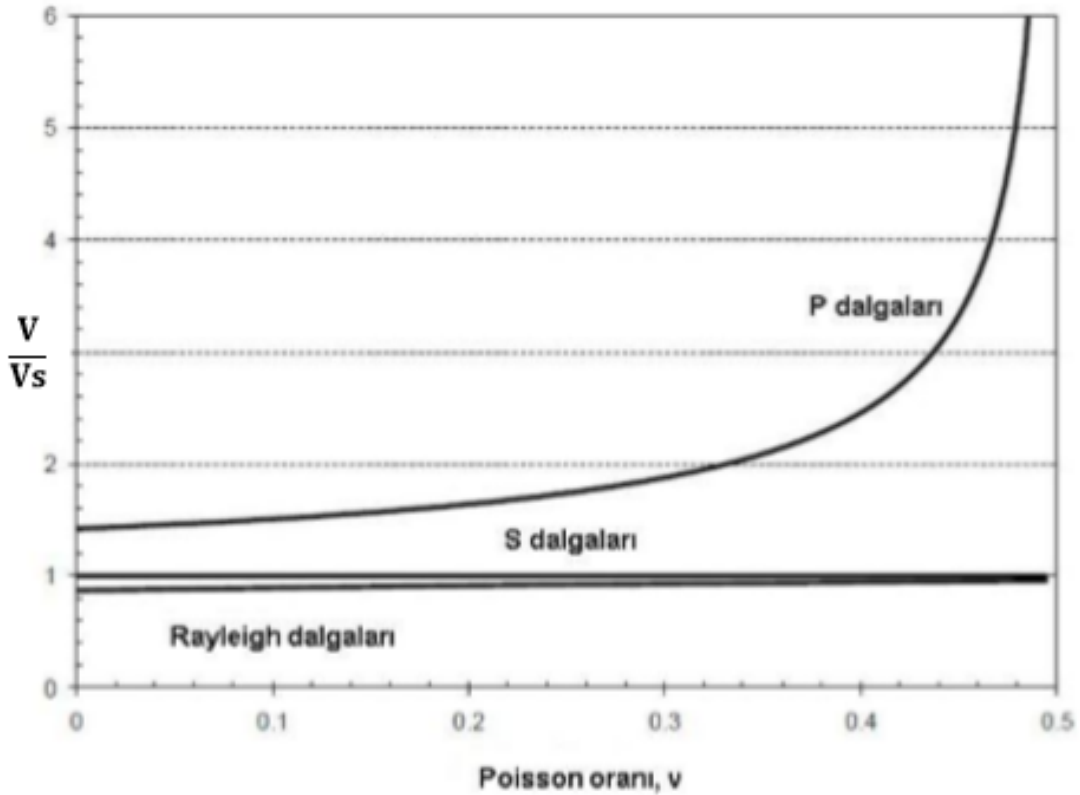


Şekil 2.8: Rayleigh dalgası bileşenlerinin derinlikle değişimi (Richart vd., 1970).

Rayleigh dalga hızının yaklaşık olarak hesaplanmasında Poisson oranı (ν) ve Kayma dalga hızına (V_s) bağlı olan aşağıdaki formülasyon kullanılabilir (Yiğiter, 2008).

$$V_R = V_S \frac{0,86+1,14\nu}{1+\nu} \quad (2.4)$$

Rayleigh dalga hızı, Poisson oranı $\nu=0\sim0,5$ aralığında olan zemin ortamlarında yaklaşık olarak kayma dalga hızının 0,88~0.96 katı aralığında değişmektedir (Roesset vd., 1990). Şekil 2.9 dalga yayılma hızları (V_P , V_S ve V_R) arasındaki ilişkiyi sürekli yarı-sonsuz zemin ortamında Poisson oranının bir fonksiyonu olarak göstermektedir.

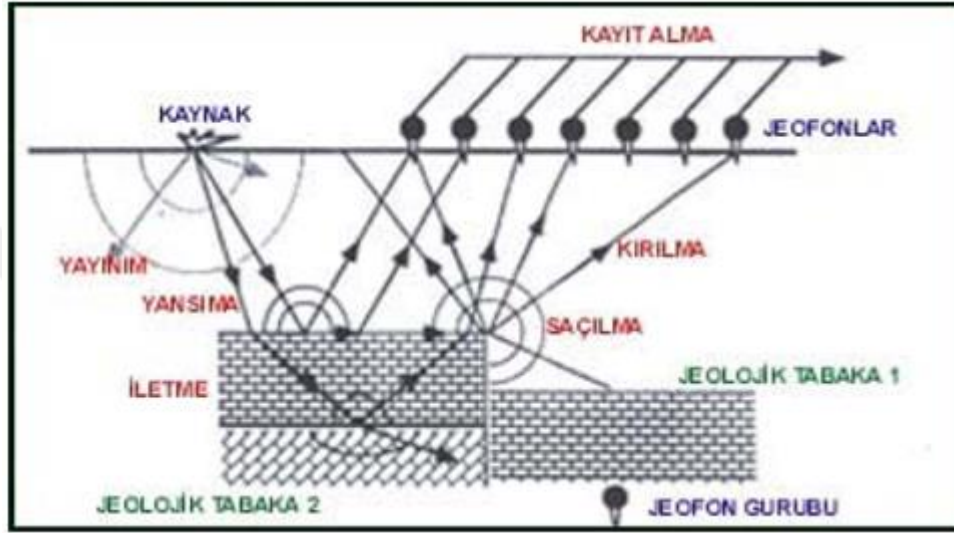


Şekil 2.9: V_P , V_R ve V_S dalgalarının poisson oranının arasındaki ilişki (Richart vd., 1970).

2.3 Sismik Dalgaların Yayılışı

Geoteknik mühendislikte genel olarak yeryüzünde ve yüzeyin alt tabakalarında zemin ve kayadan oluşan ortam elastik yarı sonsuz olarak tanımlanır. Bu ortamlarda herhangi bir kaynağın yüzeyde veya derinde oluşturduğu dalgalar kaynaktan uzaklaşırken daha geniş bölgelere yayıldıklarından dalgaların enerji yoğunluklarında meydana gelen değişim, genliklerinde azalmaya sebep olmaktadır ve bu olaya geometrik sönüm (radyasyon sönümü)

adı verilmektedir. Dalga ortam içerisinde yayılırken ortamın özelliklerine bağlı olarak sürtünme kuvvetlerinden ve malzeme yoğunluğundan oluşan enerji kayıpları yine dalga genliklerinde azalmaya sebep olmakta ve bu olayada malzeme sönümü denilmektedir (İyisan, 1994). Ayrıca zemin gibi heterojen ortamlarda dalgaların farklı tabakalara geçişi esnasında ara yüzeylerde yansıma, kırılma, saçılma ve soğurulma gibi olaylar gerçekleşmektedir (Şekil 2.10).



Şekil 2.10: Dalga ışını yayılma yolları (Gürel, 2008).

2.3.1 Yansıma

Zemin ortamı içerisinde yayılan dalga ışınının daha yoğun bir tabakaya ulaşarak normal düzlemle yaptığı aynı açı ile simetrik olarak veya farklı açıyla asimetrik olarak aynı ortam içerisinde yayılmaya devam etmesi durumudur. Yansıma olayında dalga enerjisinde değişimin olmadığı varsayılmakta yada çok küçük olmaktadır.

2.3.2 Kırılma (İletim)

Zemin ortamı içerisinde yayılan dalga ışınının farklı bir tabakaya ulaşarak normal düzlemle yaptığı açıdan farklı bir açı ile ulaştığı ortam içerisinde yayılmaya devam etmesi durumudur. Kırılma olayında dalga enerjisinde değişimin olmadığı varsayılmakta yada çok küçük olmaktadır. Yansıma ve kırılmanın olduğu bir ortamın özellikleri sismik parametreler cinsinden ifade edilebilir. Sismik dalga hızıyla ortamın yoğunluğunun çarpımına eşit olan

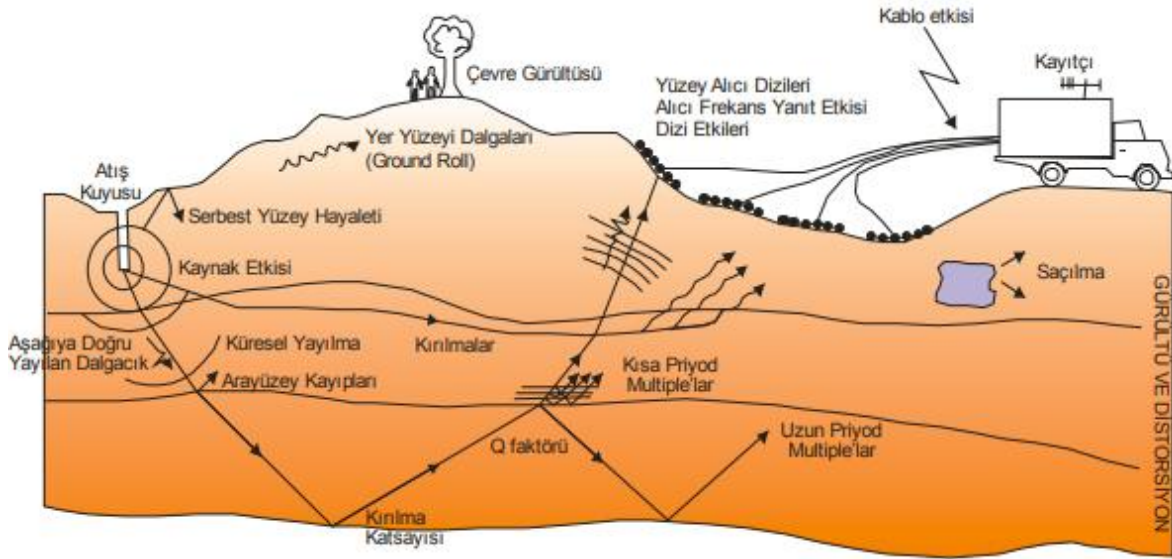
akustik empedans, denklem (2.5)'te verilmiştir.

$$Z = V \cdot \rho \quad (2.5)$$

Denklemden; V sismik dalga hızını ve ρ ise ortamın yoğunluğunu göstermektedir. Yansıma ve kırılmanın oluşabilmesi için ortamlar arasında akustik empedans farkının olması gerekir (Gürel, 2008).

2.3.3 Saçılma (Difraksiyon)

Sismik dalgalar, eğrilikte ani bir değişimin olduğu örneğin bir nokta veya köşe gibi, bir yüzey boyunca bir düzensizliğe çarptığında düzensiz yapı, bütün doğrultularda dalga yayılımı için bir nokta kaynak gibi hareket eder. Böyle bir yayılım Saçılma (Difraksiyon) olarak isimlendirilir. Bu durum bir dalga her ne zaman dalga boyu kadar veya daha küçük eğrilik yarıçaplı bir yüzey ile karşılaştığında meydana gelir (Şekil 2.11).



Şekil 2.11: Yayılan sismik sinyalin genliğine etki eden faktörler (Reynolds, 1998).

2.3.4 Soğurma (Absorbisyon)

Zemin ortamı, anizotropik, elastik ve elastik olmayan yapılardan meydana gelmiş olması nedeni ile sismik dalganın yayılımı esnasında bir enerji yutucu olarak davranır. Bu

özelliklere sahip bir ortamda, dalga enerjisinin bir kısmı ortamın titreşen tanecikleri arasında meydana gelen sürtünmeden dolayı ısıya dönüşerek yitirilir. Bu olay iyi çimentolanmış jeolojik bir formasyonda, zayıf olarak ayrılmış ve sıkışmamış olan bir formasyondan daha az bir enerji kaybı olacağını gösterebilir dinamik empedans fonksiyonu yoğun formasyon sebebi ile daha fazla enerji kayıpları gözlenebilmektedir (Aydın, 2006).

2.4 Dalga Yayılım Problemi için Geliştirilen Çözüm Yöntemi

Zemin ortamında, iki nokta arasındaki titreşimlerin dalga genliklerindeki azalımı geometrik ve malzeme sönümüne bağlayan Bornitz (1931) çözüm yöntemi, titreşim dalgası enerjisinin kaynak konumundan uzaklaştıkça, yayıldığı mesafeye ve bulunduğu ortama göre değiştiğinden bahsetmektedir. Geometrik sönüm, titreşim enerjisinin daha geniş bir alana yayılıp azalmasından dolayı oluşurken; malzeme sönümü, dalga yayılımı sırasında, zeminin tamamen elastik olmamasından dolayı parçacıkların içsel sürtünmeler sebebiyle kaybedilen enerjisinden kaynaklanmaktadır. Zemin türü, nem oranı, zemin sıcaklığı ve benzeri faktörler malzeme sönümünü etkilemektedir.

2.4.1 Bornitz Çözüm Yöntemi

Zemin dinamiği problemlerinde dalga tipleri genel olarak cisim ve yüzey dalgaları olarak tanımlanmaktadır. Jeolojik zemin katmanının yüzeyinde yayılan Love ve Rayleigh dalgaları hem serbest zemin titreşimlerinde hem de mühendislik yapılarında P ve S cisim dalgalarına göre daha fazla deformasyonlara sebep olmaktadır. Titreşim dalgasının enerjisi ve genlikleri dinamik yük kaynağından uzaklaştıkça mesafeye bağlı olarak azalmaktadır. Bu azalım oranı (w_2 / w_1), Bornitz' in aşağıdaki denklemiyle de açıklanabilen, geometrik (radyasyon) sönümleme ($(r_1 / r_2)^n$) ve malzeme sönümlemesi ($e^{-\alpha(r_1 - r_2)}$) olmak üzere iki bileşene bağlıdır (Bornitz, 1931).

$$\text{Bornitz bağıntısı} \rightarrow \frac{w_2}{w_1} = \left(\frac{r_1}{r_2}\right)^n e^{-\alpha(r_1 - r_2)} \quad (2.6)$$

Bornitz yaklaşımındaki diğer parametreler sırasıyla; r_1 ve r_2 , ölçüm noktalarının titreşim kaynağına olan uzaklığı, n geometrik sönümleme katsayısı, α ise bir malzeme sönümleme

katsayısı şeklinde özetlenebilir. Geometrik sönümleme mekanizması, farklı frekans içeriklerine bağlı olarak oluşan enerji yoğunluğunun dinamik yük kaynağından uzaklaştıkça azalması biçiminde mesafeye bağlı oluşmaktadır (Kim ve Lee, 2000). Geometrik sönümleme katsayısı (n), Tablo 2.1'de gösterildiği gibi yayılan dalganın tipi, kaynak tipi ve konumu değerlendirilerek analitik olarak belirlenebilir.

Tablo 2.1: Çeşitli kaynaklar için geometrik sönümleme katsayıları (Athanasopoulos vd., 2000).

Kaynak Tipi	Dalga Tipi	Kaynak Konumu	n
Noktasal	Cisim dalgaları	Yüzey	2.0
Noktasal	Yüzey dalgaları	Yüzey	0.5
Noktasal	Cisim dalgaları	Derin	1.0
Çizgisel	Cisim dalgaları	Yüzey	1.0
Çizgisel	Yüzey dalgaları	Yüzey	0
Çizgisel	Cisim dalgaları	Derin	0.5

Literatürde yapılan birçok çalışmada (Amick ve Gendreau, 2000; Athanasopoulos vd. 2000; Kim ve Lee, 2000) Bornitz çözüm yaklaşımında kullanılan n geometrik sönümleme katsayısı ve α malzeme sönümleme katsayısı değerlerinin; farklı frekans içeriklerine bağlı dinamik yük kaynaklarının farklı kombinasyonları ile alttaki jeolojik zemin ortamına bağlı olarak özenle seçilmesi gerektiği belirtilmiştir. Tablo 2.1’de farklı dinamik yük kaynaklarına göre Geometrik sönümleme katsayısı (n) seçilebilirken, bu katsayı farklı tipteki zemin sınıfları için de Tablo 2.2’de verildiği biçimde de tanımlanabilmektedir.

Tablo 2.2:Zemin tipine göre Geometrik Sönüm Katsayıları(n) (Amick ve Gendreau, 2000).

Zemin Tipleri	Geometrik Sönüm Katsayısı (n)
Kumlu zemin	1.0
Az kumlu zemin	1.5
Yumuşak killi ve kum dolgu	0.8 – 1.0
Çakıllı, kumlu sağlam zemin	1.0
Sağlam ve kayalık zemin	1.4 – 1.7
Siltli zemin	0.8
Killi zemin	1.4 – 1.5

Malzeme sönümleme katsayısı α değeri hesaplanırken titreşim kaynağının frekansına ve zemin tipine bağlı olarak denklem (2.7) kullanılabilir. Bu tez çalışmasında analitik çözüm yöntemi için α değeri hesaplanırken denklem (2.7) kullanılmıştır.

$$\alpha = \alpha_0 f \quad \text{veya} \quad \alpha = \frac{2 \pi f D}{V_R} \quad (2.7)$$

Bu denklemde V_R Rayleigh dalgalarının yayılma hızı, D sönüm oranı, f titreşim kaynağının baskın frekans değeri, α_0 ise zemin tipine göre Tablo 2.3'ten elde edilen değerdir. V_R değeri yüzeye yakın noktadaki ölçülen kayma dalgası hızı V_S değerine eşit alınabilmekte olup genellikle yumuşak kil ve gevşek kum zeminler için $V_S=80\sim 220\text{m/sn}$ aralığında değişmektedir (Athanasopoulos vd., 2000). D sönüm oranı ise taşıma gücü zayıf turba tipi olarak tanımlanan zemin katmanları için %1'e kadar düşük değerde alınabilmektedir (Macijauskas ve Van Baars, 2014). Bu etkili sönüm oranının değeri titreşim frekansı yüksek sağlam zeminlerde ($D>\%30$) olabilir, titreşim frekansı düşük zayıf zeminlerde $D\leq\%30$ alınabilir (Athanasopoulos vd., 2000).

Tablo 2.3: Çeşitli zemin tipleri için frekanstan bağımsız α_0 değerleri (Athanasopoulos vd., 2000).

Zemin Tipleri	α_0 değerleri (sn/m)
Kaya	$(0.385\sim 0.485)\times 10^{-3}$
Kumtaşı	$(0.580\sim 0.775)\times 10^{-3}$
Sert plastik killer	$(0.385\sim 0.525)\times 10^{-3}$
Orta yoğunluktaki kırma taşlar	$(0.850\sim 1.100)\times 10^{-3}$
Plastik killer, iri kumlar ve orta yoğunluklu çakıllar	$(0.965\sim 1.200)\times 10^{-3}$
Yumuşak plastik killer, Siltler, Hafif yoğun, Orta veya iri kumlar	$(1.255\sim 1.450)\times 10^{-3}$
Siltli killer, Siltler ve doymuş ince kumlar	$(1.200\sim 1.300)\times 10^{-3}$
Alüvyon killer ve doymamış gevşek kumlar	$(1.800\sim 2.050)\times 10^{-3}$

Dinamik yük kaynağı olarak düşünülen YHT geçişlerinin demiryolu platformuna yakın bölgelerde meydana getirdiği ortalama titreşim frekansı, yapılan sayısal ölçümlere ait ham verilerin işlenmesi sonucu elde edilen Fourier genlik spektrumlarına göre 80-90Hz civarında yüksek frekanslı bileşenler olarak hesaplanmıştır. Bu değer demiryolu hattından uzaklaştıkça ortalama 20-45Hz aralığına kadar düşmektedir. Yük treninde 20-80Hz arasında daha yayılı olan baskın frekanslar banliyö treninde ise 30-40Hz aralığında hesaplanmıştır.

Dinamik yük kaynaklarının meydana getirdiği titreşim etkilerinin jeolojik zemin ortamında soğurulmasını ifade eden malzeme sönümü mekanizması zemin ortamının tipi, su muhtevası ve sıcaklık değişimi gibi parametrelerin değişiminden kaynaklanmaktadır. Genellikle malzeme sönümlemesinin, zemin partiküllerinin yüzeylerinde birbirine sürtünmesi ve kayma davranışına bağlı olarak gelişen histeresiz enerji kaybına sebep olduğu

düşünülmektedir. Zemin tipi bakımından değerlendirildiğinde ise sağlam zeminlerin titreşim enerjisini soğurduğu ve kohezyon sebebiyle killi zeminlerin, kumlu zeminlere göre daha fazla sönümleme gösterme eğiliminde olduğu anlaşılmıştır. Bununla birlikte, su muhtevası bakımından değerlendirildiğinde ise nemli kumların, kuru kumlara göre titreşim dalgalarının enerjisini daha az sönümlediği belirtilmiştir (Amick ve Gendreau, 2000). Bunun sebebi olarak, kum partiküllerinin arasındaki gözeneklerde bulunan suyun tanecikler arasında sürtünmeyi azalttığı ve sıkıştırma enerjisinin önemli bir bölümünü ilettiği şeklinde yorumlanmıştır. Sıcaklık bakımından değerlendirildiğinde ise zemin içinde bulunan suyun donması, tanecikleri arasındaki sürtünmeyi azalttığından titreşim dalgalarının enerjisini daha az sönümlediği anlaşılmıştır. Malzeme sönümlemesinin belirlenmesinde farklı zemin tipleri için α değerleri Tablo 2.4’ te verilmiştir.

Tablo 2.4: Zemin tipine göre Malzeme Sönüm Katsayıları(α) (Amick ve Gendreau, 2000).

Zemin Tipleri	Malzeme Sönüm Katsayısı α (m⁻¹)
Siltli çakıllı kum	0.13
Granül dolgu üzerine demirsiz beton	0.20
Siltli ince kum	0.26
Suya doymuş ince taneli kum	0.10
Suya doymuş ve donmuş ince taneli kum	0.06
Balçık tabaka ve organik siltli suya doymuş kum	0.04
Suya doymamış killi gevşek kum	0.04
Kireçli ince kum	0.10
Killi ve ince kumlu balçık	0.10
Kum ve siltli suya doymuş kil	0.0-0.12
Kum ve siltler	0.026-0.36
Kıyılarda çamur katmanı üzeri kum dolgusu	0.05-0.2
Kıyılarda kuru kum dolgusu	0.026-0.065
Yumuşak Bangkok kili	0.026-0.44

2.5 Dinamik Zemin Parametrelerinin Belirlenmesi

Dinamik yüklere maruz kalan zemin tabakaları yüzeyden ya da derinden gelen titreşim etkilerini üzerinde bulunan yapılara aktarmakta ve yapılarda hasar verici, konfor bozucu istenmeyen durumların ortaya çıkmasına sebep olmaktadır. Bu gibi problemleri tasarım aşamasında ya da daha sonrasında çözmek amacıyla zeminin geoteknik özelliklerinin, deneyler yapılarak bulunması ve dinamik zemin parametrelerinin belirlenmesi gerekmektedir. Zemin türlerinin değişmesi, dinamik yük kaynaklarının değişmesi ve daha

bir çok faktörün etkisiyle tekrarlı yüklere maruz kalan zemin tabakalarının oldukça farklı dinamik davranış ve gerilme-şekil değiştirme özellikleri göstermesine sebep olmaktadır. Zemin tabakalarının tekrarlı yüklere karşı gösterdikleri tepkileri anlamak, davranış analizini yapmak ve gerekirse geoteknik problemlerin çözümünde kullanılması için laboratuvar veya arazi ortamında dinamik zemin parametrelerinin belirlenmesini sağlayan deney yöntemleri Tablo 2.5’te detaylandırılmıştır.

Tablo 2.5: Zeminin dinamik parametrelerinin ölçülmesi (Kramer, 1996).

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

Tekrarlı yük etkisi altında zemin taşıma kapasitesi ya da deformasyonların hesaplanmasına yönelik temel bir yöntem geliştirilebilmiş değildir. Bunun bir nedeni de, tekrarlı yük özellikleri (yükleme frekansı ve süresi, yükleme yönü), zemin özellikleri (gerilme geçmişi, çimentolanma, çevre basıncı, zemin yapısı vb), yer altı suyu gibi birçok faktörün davranışa etki ediyor olmasıdır. Zeminlerin önemli dinamik özelliklerini belirleyen parametreleri (Kayma Modülü, Kayma Dalgası Hızı, Sönüm oranı...) duruma en uygun olan laboratuvar ve arazi deney yöntem veya yöntemlerinden seçilerek belirlenmelidir. Ayrıca deneysel verilerden elde edilen parametrelerle kullanılabilen korelasyonlar sayesinde hesaplanarak belirlenebilen zemin özellikleri olduğuda göz önünde bulundurulmalıdır.

2.6 Dinamik Yük Kaynakları ve Etkileri

Zaman tanım alanında herhangi bir süre içerisinde zeminlere ve dolayısıyla yapılara etki eden tekrarlı ve değişken yüklere dinamik yükler, bu durumu oluşturan sebeplerde dinamik yük kaynakları diyebiliriz. Dinamik yük kaynaklarının zemin tabakalarını etkilemesi kaynak çeşitliliği göz önüne alınırsa titreşimlerin yayılma doğrultularına göre bulunduğu noktadan her yöne dağılan kaynak tipi (deprem, patlama...vb.) noktasal, bulunduğu noktadan daha çok yayılma doğrultusunda bir çizgi oluşturarak ilerleyen kaynak tipi (tren geçişleri, trafik akışı...vb.) çizgisel olarak adlandırılmaktadır. Dinamik yük kaynağının konumuna ve etki alanına göre ise yüzeysel ya da derin yük kaynağı olarak ifade edilmektedir. Burada dinamik yük kaynaklarının bu şekilde adlandırılmasındaki maksat geometrik sönümleme katsayısını belirlerken yük kaynağı tipini tanımlamaktır.

Dinamik yük kaynaklarının başlıcalarını; depremler, patlamalar, tren geçişleri, trafik akışı, makine titreşimleri, masif inşaat aktiviteleri olarak sayabiliriz. Çeşitli dinamik yüklerin etkilerine karşı, zemin tabakalarının davranışlarıda çok farklı olacaktır. Davranışsal olarak deprem gibi büyük deformasyonların oluşabildiği dinamik etkilere maruz kalan zemin tabakalarında daha çok elastoplastik ve plastik deformasyonlar oluşurken, tren geçişleri gibi daha küçük dinamik etkilere maruz kalan zemin tabakalarında elastik ve elastoplastik deformasyonlar oluşmaktadır (Göktepe, 2013). Dinamik yükün şiddeti, etkime süresi, etkime alanı, etkime noktası gibi birçok faktörün yanında zemin yapısının çeşitliliğide davranış üzerinde etkili olmaktadır.

BÖLÜM 3

MATERYAL VE METOT

3.1 Ölçüm Yapılan Sahaya ait Bilgiler

Yüksek hızlı demiryolu hattına yakın seçilmiş ölçüm sahası, Sakarya'nın Sapanca ilçesinde bulunan SUBÜ Kırkpınar turizm MYO uygulama oteli ve sosyal tesislerinin bulunduğu yerleşkedir (Şekil 3.1). Çalışma kapsamında, İstanbul-Ankara arasında toplam uzunluğu 533 km olan, taşıma gücü zayıf alüvyon zemin ortamlarından ve yoğun yerleşim bölgelerinden geçen İzmit-Arifiye arasındaki YHT ile yük ve banliyö trenlerinin tekrarlı geçişleri dikkate alınmıştır.



Şekil 3.1: İncelenecek saha a) Konumu b) Kuş bakışı görünüşü c-d) Hızlı tren geçişi.

3.2 Pilot Bölgedeki Zemin Yapısının Jeofizik Arazi Deneyleriyle Belirlenmesi

Saha çalışmalarının yapıldığı alanın dinamik zemin özelliklerini belirlemek amacıyla Sismik Refraksiyon (Kırılma), Doğu-Batı ve Kuzey-Güney doğrultuda iki yönde olmak üzere MASW (Çok Kanallı Yüzey dalgası) arazi deneyleri yapılmıştır (Şekil 3.2).



Şekil 3.2: Sismik Kırılma, MASW arazi deneyleri yapılışı (Anon., 2019).

Yapılan çalışmalara ait serim boyu, jeofon aralığı, örnekleme aralığı ve kayıt süreleri Tablo 3.1’de verilmiştir. Zeminin dinamik özellikleri, sismik hızlar ve zemin elastik parametreleri ilerideki konularda değinilecek olan ilgili formülasyonlar kullanılarak elde edilmiştir.

Tablo 3.1: Deneylere ait serim boyu, jeofon aralığı, örnekleme aralığı ve kayıt süreleri.

Yöntem	Serim Boyu	Jeofon Aralığı	Örnekleme Aralığı	Kayıt Süresi
Kırılma	60 m	5 m	0,2 m.sn	0,5 sn
MASW1	60 m	5 m	1,0 m.sn	2,0 sn
MASW2	36 m	3 m	1,0 m.sn	2,0 sn

3.2.1 Arazi Sismik Deneyleri

Yer kabuğu elastik hız, yoğunluk gibi fiziksel özellikleri farklı kayalardan oluşan tabakalardan meydana gelmiştir. Bu durumdan yararlanarak Sismik Kırılma deneyi uygulamasından, yeryüzünde veya yüzeye yakın noktalarda üretilen elastik dalgaların

yeraltındaki tabakaların ara yüzeylerinde kırılmaları yine yeryüzünde gözlenerek bu tabakaların derinlikleri, ara yüzeyin topografyası, tabakaların sismik hızları gibi yararlı bilgiler elde edilir (Şekil 3.3).



Şekil 3.3: Sismik Kırılma, MASW arazi deneyleri (Anon., 2011).

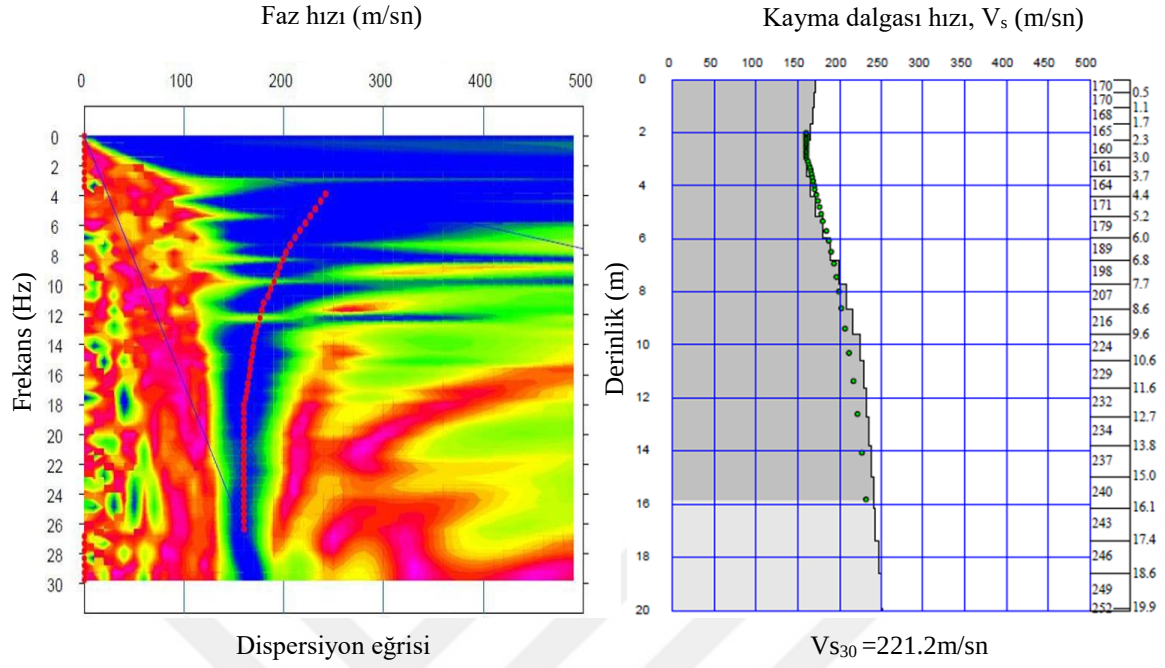
Sismik Kırılma deneyini; zeminde çeşitli enerji kaynaklarıyla yapay bir şekilde oluşturulan sarsıntıların (elastik dalgaların) yer içerisinde yayılırken kırılarak veya yansiyarak geçtikleri ortamların fiziksel (mekanik) özelliklerini barındıran sismik dalgalar halinde yeryüzüne gelişlerinin sismografla ölçülmesi olarak kısaca özetleyebiliriz.

Bu çalışmada yapılan Sismik Kırılma ve MASW deneylerinde 12 kanallı sismik kayıt cihazı kullanılmış ve yere konulan demir levha üzerine 8 kg. ağırlığında balyoz düşey vurularak sismik dalgalar oluşturulmuştur. Cihazın çalışma aşamalarından bahsedecek olursak; yeryüzeyine belirli aralıklarla serilmiş jeofonlarla algılanan sismik dalgalar, sismik sinyaller olarak dijital sismografa iletilmiş ve bilgisayar programı vasıtasıyla kayıt altına alınmıştır. Sismik ölçümler yer içinde yayılan boyuna veya sıkışma (V_p) ve enine veya kayma (V_s) dalgası türlerinin her ikisinin ölçülmesi şeklinde yapılmıştır. V_p sismik dalga hızı, yeraltı yapısal konumları düşey ve yanal olarak daha derinden tespit etmek için, V_s sismik dalga hızı ise zeminin elastik özelliklerini tanıma amacıyla ölçülmüştür. Boyuna dalga kayıtları Sismik Kırılma ölçümlerinden, Enine dalga kayıtları MASW ölçümleri alınarak elde edilmiştir (Anon., 2019).

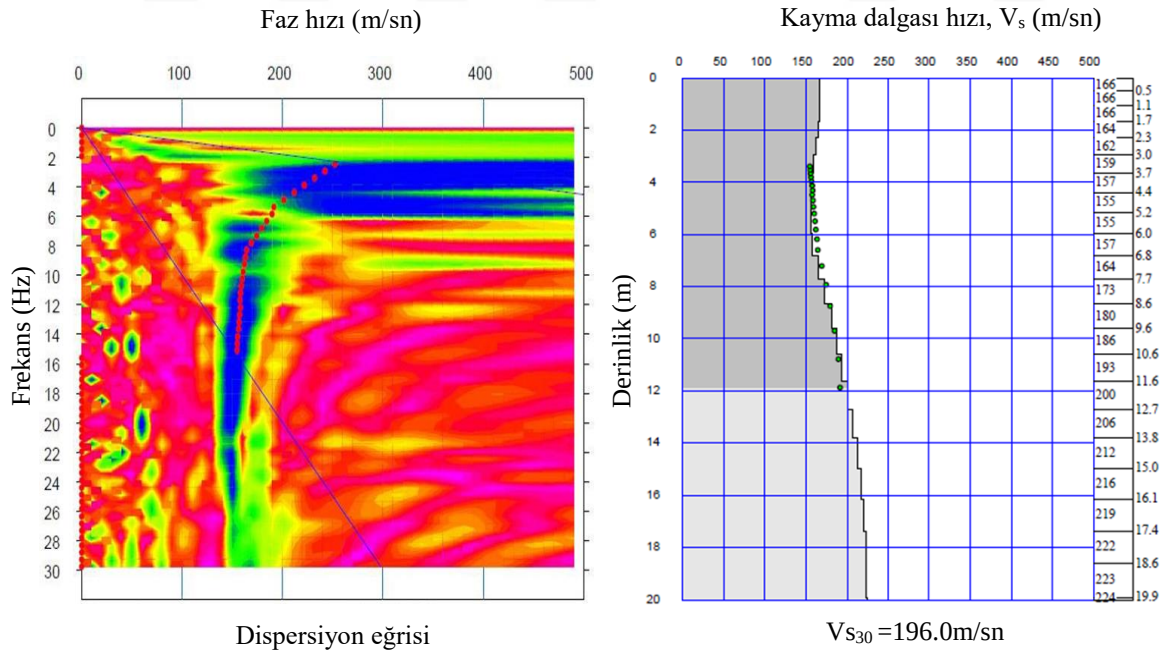
3.2.1.1 Yüzey Dalgası Analizi (MASW) Yöntemi

Yeraltı tabakalarının fiziksel özellikleri (makaslama modülü, elastisite modülü, sıkışmazlık modülü, doğal salınım periyodu, sismik büyütmesi, poisson oranı v.b.) makaslama (S) dalga hızı ile doğrudan ilişkilidir. Bu nedenle, yeraltı tabakalarının S-hızı değişimlerinin belirlenmesi geoteknik mühendisliği açısından oldukça önemlidir. Yüzey dalgalarının çok kanallı analizi (MASW) yöntemi S-hızı değişimlerinin belirlenmesinde sismik kırılma yöntemi yanında yaygın olarak kullanılmaktadır. Özellikle sismik kırılma yönteminin uygulanmadığı durumlarda MASW yöntemi tek alternatif yöntem olarak görülmektedir. Sismik kırılma yöntemi ile ölçü alınırken kullanılan dizilim geometrisi korunarak MASW kayıtları toplanabilmekte ve daha büyük araştırma derinliği elde edilebilmektedir. Yöntemin diğer üstünlükleri arasında hızlı veri toplama, kolay veri-işleme ve düşük hız problemini çözmesi gösterilebilir. Yüzey dalgası analiz yöntemlerinden MASW tekniği ile V_{S30} değeri sağlıklı bir şekilde hesaplanabilmektedir. V_{S30} değeri; UBC ve Eurocode-8 uluslararası standartlarında kullanılan temel parametrelerin başında gelmektedir. Yüzey dalgası analiz yöntemlerinde, yer altındaki tabakalı yapıların kesme dalgası hızının (V_s) hızının derinlikle değişiminin hesaplanması amacıyla Rayleigh dalgasının dispersif özelliğinden faydalanır. MASW tekniği özellikle V_{S30} çalışmalarında ilk 30 metrenin önemi ve ince tabakaların tespitinde oldukça sağlıklı sonuçlar vermesi nedeniyle etkin kullanıma sahiptir. Bu sayede V_{S30} , zemin grubu, zemin sınıfı, zemin büyütmesi ve zemin hakim periyodu da yüksek doğrulukla hesaplanabilmektedir. Ayrıca doğal zemine gerek duyulmaksızın asfalt, beton, kaldırım, taş zemin v.b. ortamlarda da jeofonların satıhla iyi bir bağlantısı sağlanarak ölçüm alınabilmektedir (Anon., 2019).

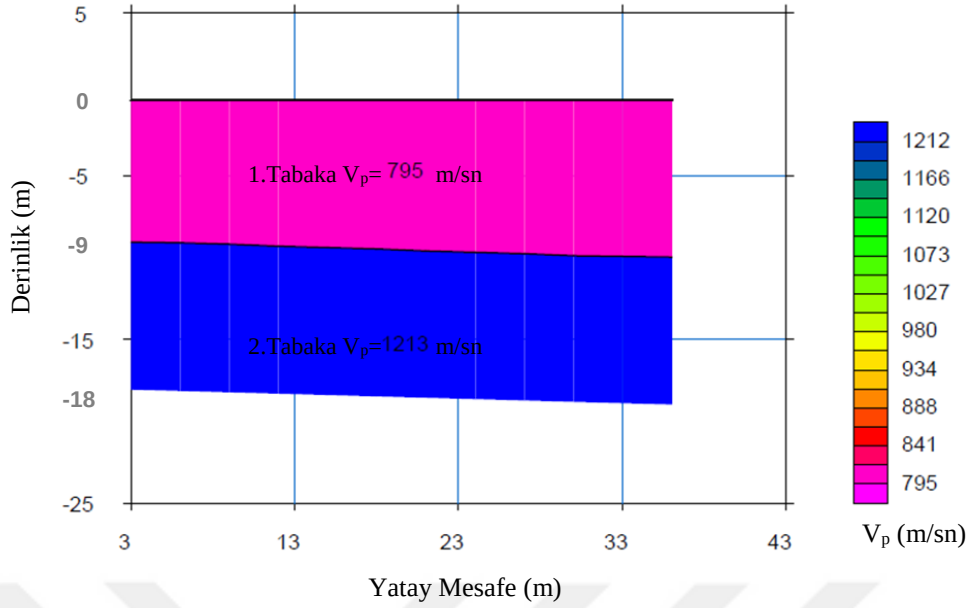
Deneyisel çalışmanın bu aşamasında ise tren yoluna dik MASW profili, tren yoluna paralel MASW profili, sismik kırılma yöntemi ile oluşturulmuş model elde edilmiş ve analiz sonuçları verilmiştir. Faz hızının frekansla değiştiği Rayleigh dalgası dispersiyon eğrisi ve ters çözümüne göre derinlikle değişen kayma dalgası hızları Şekil 3.4 ve Şekil 3.5’ te gösterilmiştir. Yüzeyden derine doğru S dalgası hızı 3m kalınlıkta birinci örtü tabakası için $V_s=166-170$ m/sn, 3m’den sonra ikinci tabaka için $V_s > 240$ m/sn olarak hesaplanmıştır. P dalgası hızı ise yüzeyden derine doğru 9m kalınlıkta birinci örtü tabakası için $V_p=795$ m/sn, 9m’den sonra ikinci tabaka için $V_p=1213$ m/sn olarak bulunmuş ve Şekil 3.6’ da gösterilmiştir (Çelebi vd., 2019).



Şekil 3.4: Tren yoluna dik MASW profili (Anon., 2019).



Şekil 3.5: Tren yoluna paralel MASW profili (Anon., 2019).



Şekil 3.6: Sismik kırılma yöntemi ile oluşturulmuş model (Anon., 2019).

3.2.2 Sismik Hızlar ve Zemin Elastik Parametreleri

Zeminler dış yükler altında kayma deformasyonunun 10^{-3} veya daha küçük genliklerinde elastik davranış göstermektedirler. Arazi sismik yöntemlerinin kullanımları sırasında zeminde oluşturdukları deformasyon seviyeleri bu sınırın altında kalmakta ve bu tür ölçümlere düşük deformasyon genlikli ölçümler denilmektedir. P-dalgasının yeraltı suyundan etkilenmesi ve kayma modülünün dinamik analizdeki önemi yüzünden S-dalga hızı (V_s) ölçümleri mühendislik uygulamalarında ön plana çıkmaktadır. Genellikle arazide yapılan bu tür ölçümler başlangıç modüllerini (G_{maks}) belirlemede kullanılmaktadır. Kayma dalgası hızının belirlenmesi ile elastisite teorisinde homojen izotrop ortamlar için belirlenen bağıntılar yardımı ile kayma modülü, sıkışma modülü, poisson oranı, elastisite modülü, bulk modülü ve zemin hakim periyodu gibi dinamik zemin özellikleri hesaplanabilmektedir (Yıldız, 2008).

Kayma dalgası hızı veya Basınç dalgası hızı, yapay olarak bir kaynaktan açığa çıkarılan titreşim enerjisi ile zemin içinde oluşturulan dalgaların kaynaktan bilinen mesafelerde bulunan bir veya daha fazla alıcı noktasında gözlenerek, Kayma dalgası veya Basınç dalgasının hareket ettiği bu mesafenin varış zamanına bölünmesiyle elde edilen önemli dinamik zemin parametreleridir.

$$\text{Basınç dalgası hızı; } V_p = d / t_p \text{ (m/sn)} \quad (3.1)$$

$$\text{Kayma dalgası hızı; } V_s = d / t_s \text{ (m/sn)} \quad (3.2)$$

Kayma dalgası hızı; kayma modülü, sıkışma modülü, poisson oranı, elastisite modülü, bulk modülü ve zemin hakim periyodu gibi zemin özelliklerinin ve ayrıca bir dinamik davranış özelliği olan deprem yükleri sırasında zemin tabakalarının meydana getireceği büyütme hesaplanmasında kullanılan en önemli zemin parametrelerinden biridir (Yıldız, 2008).

$$\text{Birim hacim ağırlığı; } \gamma = \gamma_0 + (0,002 \times V_p) \quad (3.3)$$

$$\text{Kayma Modülü; } G = (\gamma/g) V_s^2 \quad (3.4)$$

$$\text{Sıkışma Modülü; } M = (\gamma/g) V_p^2 \quad (3.5)$$

$$\text{Poisson Oranı; } \nu = [0.5(V_p/V_s)^2 - 1] / [(V_p/V_s)^2 - 1] \quad (3.6)$$

$$\text{Elastisite Modülü; } E = 2(\gamma/g) V_s^2 (1 + \nu) \quad (3.7)$$

$$\text{Bulk Modülü; } K = (\gamma/g) [V_p^2 - (4/3)V_s^2] \quad (3.8)$$

$$\text{Zemin Hakim Periyodu; } T = 4H/V_s \quad (3.9)$$

g : Yerçekimi ivmesi, H : Tabaka kalınlığı, γ_0 : Referans birim hacim ağırlığı 15 kN/m^3 'tür.

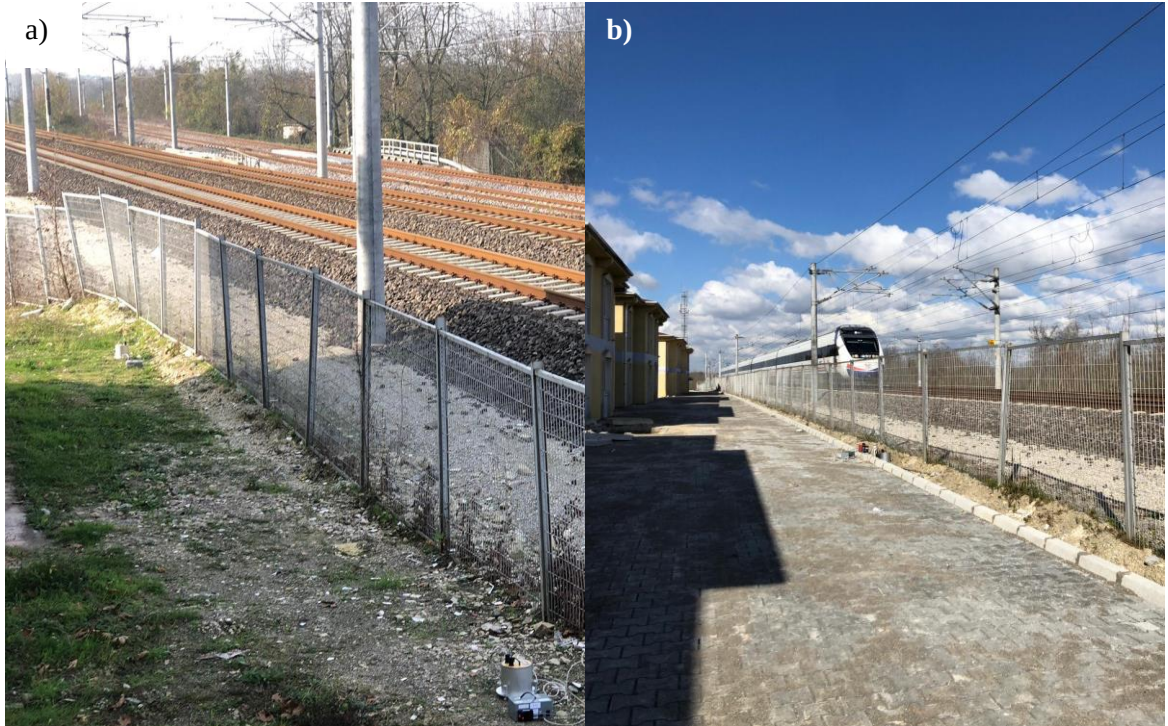
Kayma dalgası hızı, zeminlerin rijitliği hakkında doğrudan bilgi verdiği için zemin davranışının belirlenmesinde yapılan büyütme analizlerinde kullanılır. Bu yüzden yerel zemin koşullarının büyütme üzerindeki değişiminin incelenmesinde ve zemin dinamik özellikleri hakkında bilgi edinilmesinde kayma dalgası hızının belirlenmesi temel bir amaçtır. Sismik Kırılma ve MASW deneylerinden elde edilen sismik hızlar ve genel formülasyonlar kullanılarak zemin elastik parametreleri hesaplanmış ve Tablo 3.2' de gösterilmiştir.

Tablo 3.2: Hesaplanan Zemin Elastik Parametreleri (Anon., 2019).

Parametreler	Sembol	1.Tabaka	2.Tabaka	Birim
Tabaka kalınlığı	(H)	9,00	9,00	m
Birim hacim ağırlığı	(γ)	16,59	17,43	kN/m ³
Kayma modülü	(G)	46679	103362	kN/m ²
Sıkışma modülü	(M)	1020872	2640342	kN/m ²
Poisson oranı	(ν)	0,48	0,48	-
Elastisite modülü	(E)	137685	305771	kN/m ²
Bulk modülü	(K)	958011	2501970	kN/m ²
Zemin hakim periyodu	(T)	0,52	0,52	sn

3.3 Sahada Serbest Zemin Titreşimlerinin İvmeölçerlerle Kayıt Altına Alınması

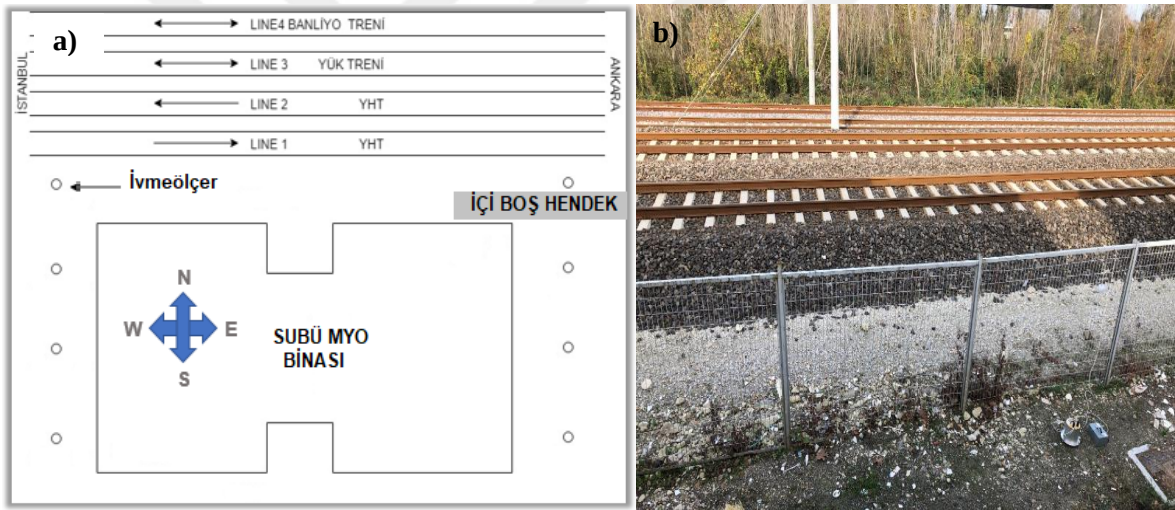
Sahada üç kez çalışma yapılmış; ilk iki çalışmada alüvyon zemin koşullarında, üçüncü çalışmada beton kilit parke taşı kaplanmış zeminde deneysel olarak üç eksenli ivmeölçerlerle ölçüm yapılmıştır (Şekil 3.7).



Şekil 3.7:a) 1-2.Çalışmalar alüvyon zemin b) 3.Çalışma beton kilit parke taşı kaplanmış zemin

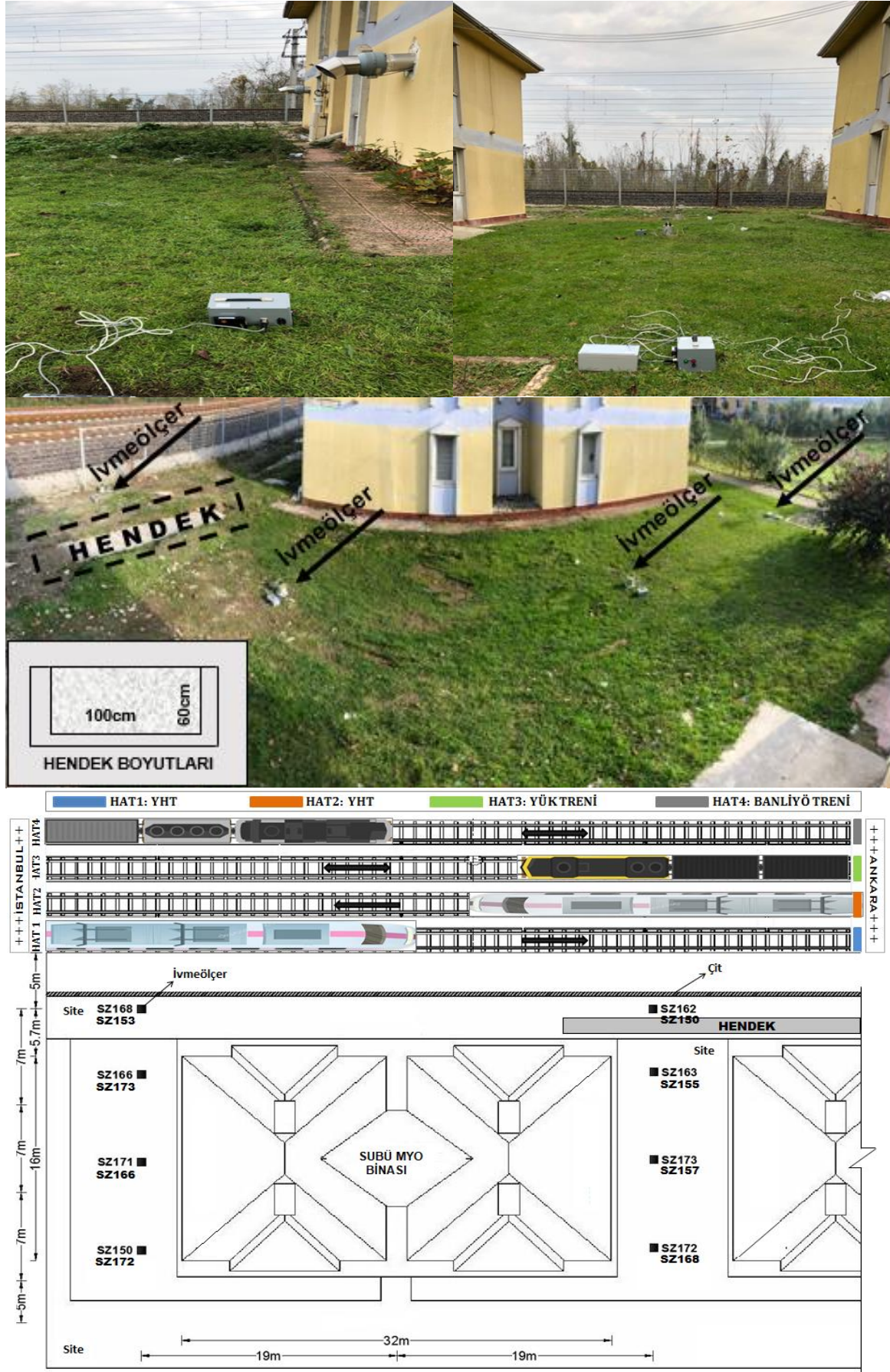
3.3.1 Üç Eksenli İvmeölçerlerin Sahadaki Yerleşimi

Yerel zemin koşullarını dikkate alarak 200-250 km/sa hız aralığındaki YHT ile 50-70 km/sa hız aralığında yük treni ve 70-90 km/sa hız aralığında banliyö trenlerinin çift yönlü tekrarlı geçişlerinin ürettiği serbest yüzey yer hareketini dalga oluşum mekanizmasına bağlı incelemek ve zemin formasyonunun dalga iletimi üzerindeki etkisini değerlendirmek için belirli aralıklarla güzergâha sistematik olarak dik ve paralel dizilmiş ivmeölçerler ile titreşim kaydı alınmıştır (Şekil 3.8a). Seçilen pilot bölgede gerçekleştirilen titreşim ölçümleri için sahanın genel görünümü Şekil 3.8b’de şematik olarak verilmiştir. Çalışma sahasında 4 ayrı tren hattı bulunmakta olup, seçilen örnek binaya yakın mesafede bulunan ilk iki hattan YHT geçişi olmaktadır. Üçüncü hattan yük treni geçmekte iken, dördüncü hattan ise banliyö treni geçmektedir.

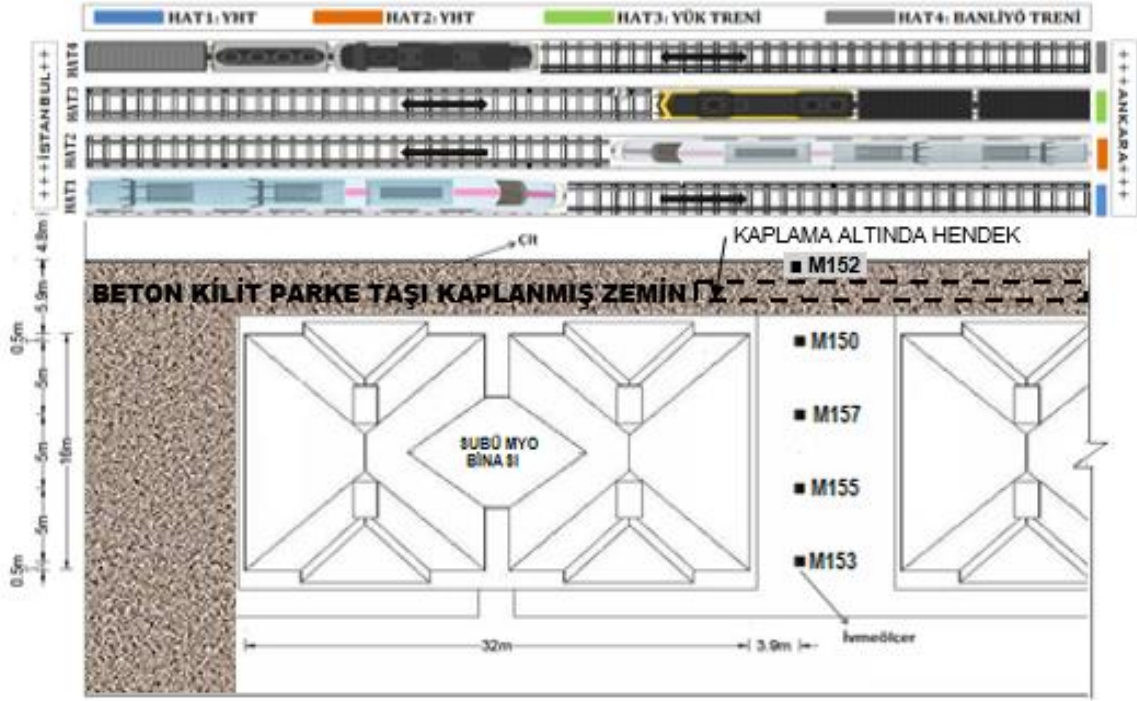


Şekil 3.8:a) İvmeölçer cihazları yerleşim şeması b) Seçilen çalışma sahasının genel görünümü

İvmeölçerler arası mesafe birinci, ikinci çalışmalarda 7 m ve aynı hizada olacak biçimde konumlandırılmıştır. Üçüncü çalışmada beton kilit parke taşı kaplanmasından dolayı hatta yakın olan ilk iki ivmeölçerin yeri değiştirilmemiş daha sonraki ivmeölçerler 5 m mesafeyle toplam ölçülen uzaklık aynı kalacak şekilde konumlandırılmıştır. Üçüncü ivme ölçüm çalışmalarında beton kilit parke taşı hendek üzerinde de kaplanmış olup hem hendek hem de beton kilit parke taşı kaplanmış tabaka etkileri ölçüm sonuçlarında gözlenmeye çalışılmıştır. Serbest zemin hareketini gözlemlemek üzere kullanılan ivmeölçerler birinci ve ikinci saha çalışmalarında Şekil 3.9’da görüldüğü gibi yerleştirilmiş, üçüncü saha çalışmasında ise Şekil 3.10’da görüldüğü gibi yerleştirilmiştir.



Şekil 3.9: 1-2. Çalışmalar titreşim ölçümleri için kullanılan ivmeölçer sensörlerin dizilimi.



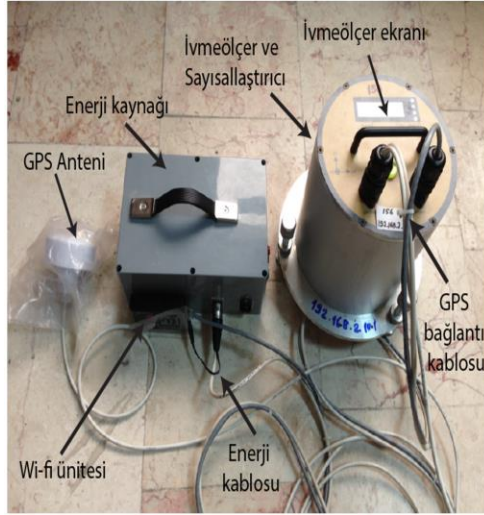
Şekil 3.10: 3. Çalışma titreşim ölçümleri için kullanılan ivmeölçer sensörlerin dizilimi.

İlk iki çalışmada 3 kez banliyö, 4 kez yük treni ve 16 kez YHT geçişi esnasında kayıt alınmış ve üçüncü çalışmada 4 kez YHT geçişi esnasında kayıt alınmıştır. Serbest zemin ortamında toplam olarak; 3 kez banliyö, 4 kez yük treni ve 20 kez YHT geçişi esnasında kayıt alınmıştır.

3.3.2 İvmeölçerle Alınan Ham Kayıtların İşlenmesi

Çalışma kapsamında kullanılan ivmeölçerler çok düşük gürültü seviyelerine sahip, üç eksenli Capacitive Force Micro-machined sensörler ile zayıf titreşim hareketlerini ölçebilen, DAC-3HDG tipi 32 bit yüksek çözünürlüklü ivmeölçerlerdir. Saha ölçümlerinde kullanılan

cihazlar: GPS anteni, enerji kaynağı ve ivmeölçer ana kutusu olmak üzere üç temel parçadan oluşmaktadır (Şekil 3.11). Bunlara ait teknik özellikler Şekil 3.11’de ayrıntılı verilmiştir. GPS anteni ve enerji kabloları ivmeölçere iki kablo yardımı ile bağlanırlar. Ana kutunun içinde üç tane MEMS sensörü, ADC sayısallaştırıcı ve ivmelerin kayıt altına alındığı bellek vardır.



Donanım	Özellikleri
İvmeölçer	3 Eksen a-) Capacitive Force Micromachined Sensor b-) 300ng/√Hz. noise c-) ±2g Full calibration d-) ±5 V Differential output e-) Resolution over 200 Hz. bandwidth f-) Self test input (Kendi kendini test edebilme girişi)
Güç Kaynağı	12 VDC
Çalışma Sıcaklığı	-20 +80
Haberleşme Portu	1 Ethernet / TCP-IP
GPS	50 Kanal Super Sense Dahili
Çalışma Frekansı	50/100/200 Hz. (5mS)
Hafıza Kartı	2 Gb Dahili (140 saat kayıt alabilme yeteneği)
ADC	32 Bit yüksek çözünürlük.
Filtre	2 Kanal FIR/Antialiasing

Şekil 3.11: Veri kaydedici ivmeölçer ve teknik özellikleri (Şahin vd., 2019).

Dinamik yük kaynağından belirli mesafelerde demiryolu hattına dik doğrultuda serbest zemin yüzeyine yerleştirilen ivmeölçerler vasıtasıyla alınan veriler filtreleme programları kullanılarak ivme genlik değerleri elde edilmiştir. Tüm ivmeölçerlerden alınan kayıtlar için geçiş sürelerine uygun zaman aralıkları belirlenmiş ve ölçüm değerleri senkronize olacak şekilde ham kayıtlar kısaltılarak kesilme işlemi gerçekleştirilmiştir. Deneysel çalışmalara ait veri analizleri zaman ve frekans tanım alanında saniyede 200 data kaydedilebilecek şekilde ayarlanmıştır ($\Delta t = 1/200 = 0.005$). Tren geçişlerinin seçilmiş ölçüm noktalarında kaydedilen ivme-zaman verilerinden integrasyon işlemi için 4.dereceden Butterworth Band geçişli filtreleme fonksiyonu kullanılmıştır.

BÖLÜM 4

DALGA SOĞURULMASININ DENEYSEL VE ANALİTİK ANALİZİ

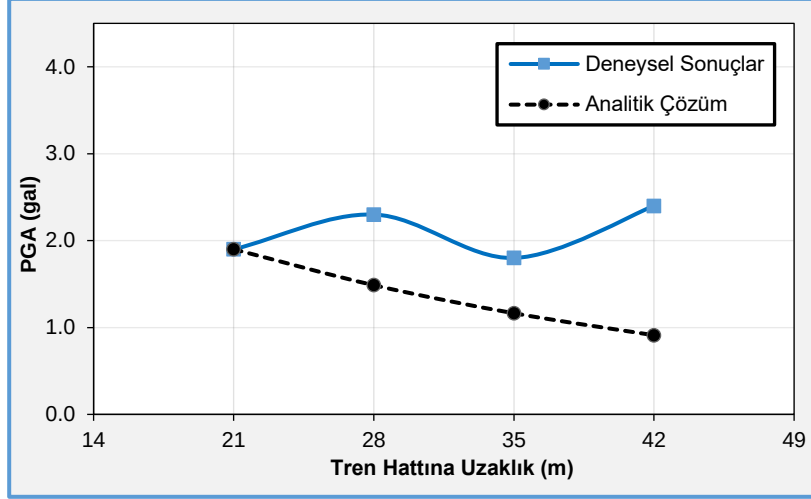
Çalışma sahası ivmeölçer yerleşim planlarında gösterilmiş olan belirli mesafelerdeki noktalarda; YHT, Yük trenleri ve Banliyö trenlerinin geçişleri sırasında deneysel olarak ivmeölçerler vasıtasıyla ölçülen ve daha sonrasında işlenen pik ivme genlik değerleri ile iki nokta arasındaki titreşim enerjisinin soğurulmasını geometrik sönüm ve malzeme sönümüne bağlı tanımlayan Bornitz çözüm yöntemi kullanılarak hesaplanan pik ivme genlik değerleri; bu bölümde grafikler halinde sunulmuş ve mesafeye bağlı azalım ilişkileri değerlendirilmiştir.

4.1 Banliyö Treni Geçişlerinin Deneysel ve Analitik olarak Değerlendirilmesi

TCDD genel taşımacılık kriterlerine göre çift yönlü olarak geçen Banliyö ve Anahat yolcu trenlerinin hızları 70-90 km/sa aralığındadır. Banliyö treni dingil ağırlığı 14-16 ton aralığında, anahat treni dingil ağırlığı ise 10-12 ton aralığındadır. Bu özelliklere sahip banliyö trenlerinin geçişi sırasında oluşan titreşimlerin, hatta yakın yerleştirilen ilk ivmeölçer noktasında alınan kayıtlar daha sonra işlenmiş ve elde edilen Fourier genlik spektrumlarına göre baskın frekanslar 30-40Hz aralığında hesaplanmıştır. Birinci saha çalışmasında (Alüvyon gevşek zemin ortamında); Banliyö treni geçişinde oluşan titreşimlerin pik ivme genlik değerleri; iki defa Ankara yönlü, bir defa İstanbul yönlü olmak üzere, serbest zemin ve hendekli serbest zemin için deneysel ve analitik olarak elde edilmiş ve mesafeye bağlı azalım ilişkisi bu bölümde incelenmiştir.

4.1.1 Serbest Zemin için Deneysel ve Analitik Değerlendirme

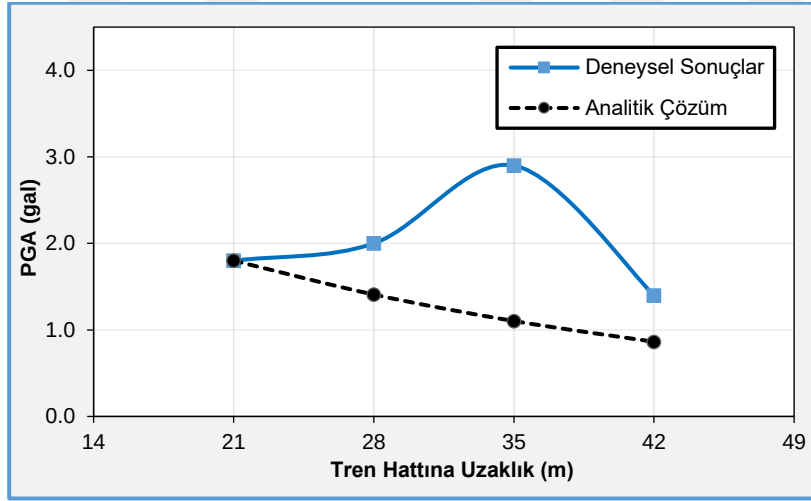
Birinci saha çalışmasında; serbest zemin ortamında iki yönlü olarak dördüncü hattan geçen Banliyö tren geçişleri için elde edilen deneysel ölçüm noktalarındaki pik ivme genlik değerlerinin hatta dik (Kuzey-Güney) ve hatta paralel (Doğu-Batı) doğrultudaki bileşenleri ile Bornitz'in analitik çözüm yönteminden elde edilen pik ivme genlik değerlerinin mesafeye bağlı azalımını grafikler halinde Şekil 4.1-6' da gösterilmiştir.



Tren Hattına Uzaklık(m)	Kayıt Cihazı No
21	SZ168
28	SZ166
35	SZ171
42	SZ150

Tren Hattına Uzaklık(m)	Deneysel Sonuçlar PGA(gal)	Analitik Çözüm PGA(gal)
21	1.90	1.90
28	2.30	1.49
35	1.80	1.16
42	2.40	0.91

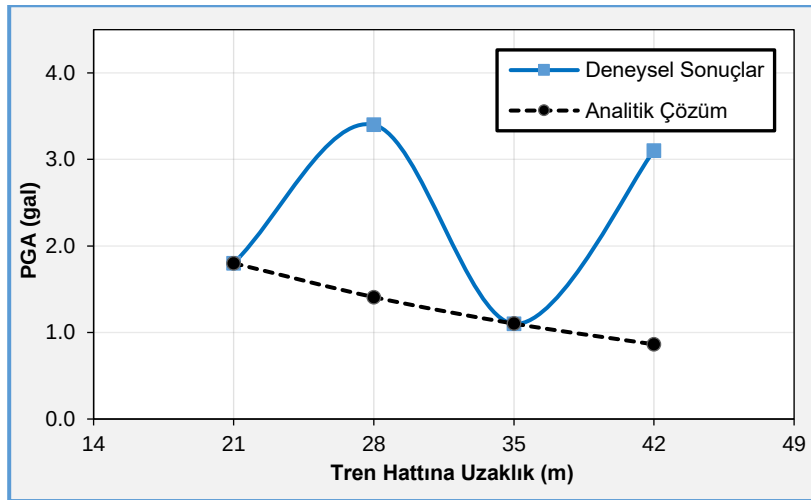
Şekil 4.1: 1.Saha çalışması Ankara yönü **Banliyö Treni** serbest zemin hatta dik doğrultuda (N-S) 1.Deney ile analitik çözüm PGA azalım eğrileri karşılaştırma grafiği.



Tren Hattına Uzaklık(m)	Kayıt Cihazı No
21	SZ168
28	SZ166
35	SZ171
42	SZ150

Tren Hattına Uzaklık(m)	Deneysel Sonuçlar PGA(gal)	Analitik Çözüm PGA(gal)
21	1.80	1.80
28	2.00	1.41
35	2.90	1.10
42	1.40	0.86

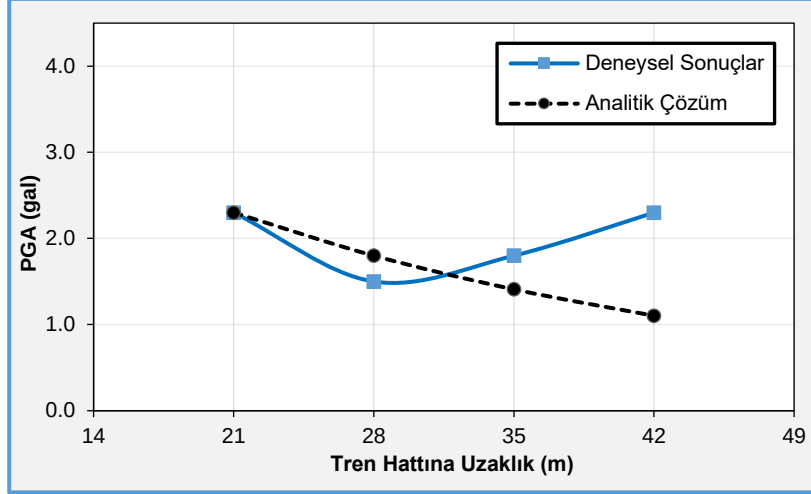
Şekil 4.2: 1.Saha çalışması Ankara yönü **Banliyö Treni** serbest zemin hatta paralel doğrultuda (E-W) 1.Deney ile analitik çözüm PGA azalım eğrileri karşılaştırma grafiği.



Tren Hattına Uzaklık(m)	Kayıt Cihazı No
21	SZ168
28	SZ166
35	SZ171
42	SZ150

Tren Hattına Uzaklık(m)	Deneysel Sonuçlar PGA(gal)	Analitik Çözüm PGA(gal)
21	1.80	1.80
28	3.40	1.41
35	1.10	1.10
42	3.10	0.86

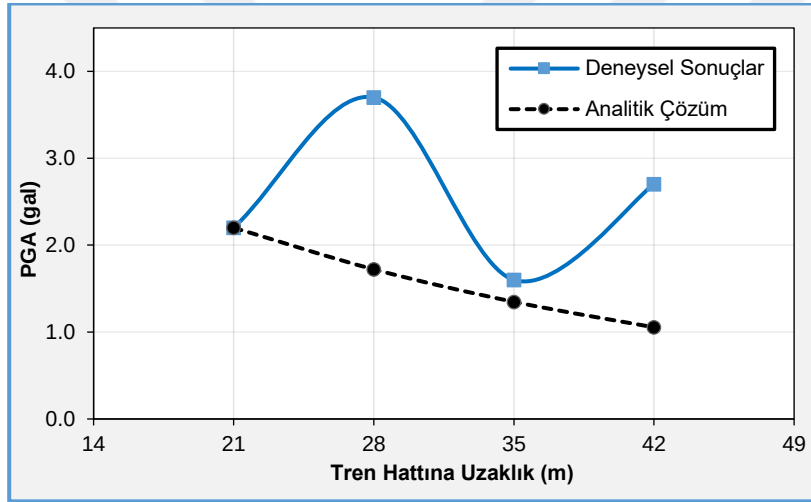
Şekil 4.3: 1.Saha çalışması Ankara yönü **Banliyö Treni** serbest zemin hatta dik doğrultuda (N-S) 2.Deney ile analitik çözüm PGA azalım eğrileri karşılaştırma grafiği.



Tren Hattına Uzaklık(m)	Kayıt Cihazı No
21	SZ168
28	SZ166
35	SZ171
42	SZ150

Tren Hattına Uzaklık(m)	Deneyisel Sonuçlar PGA(gal)	Analitik Çözüm PGA(gal)
21	2.30	2.30
28	1.50	1.80
35	1.80	1.41
42	2.30	1.10

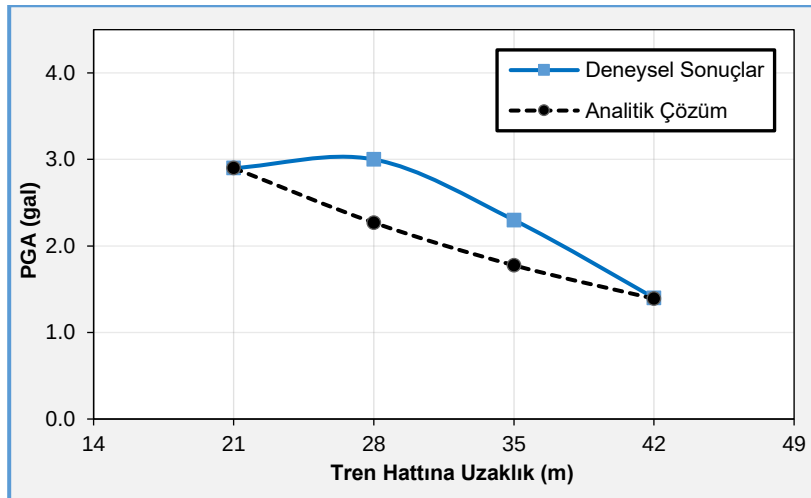
Şekil 4.4: 1.Saha çalışması Ankara yönü **Banliyö Treni** serbest zemin hatta paralel doğrultuda (E-W) 2.Deney ile analitik çözüm PGA azalım eğrileri karşılaştırma grafiği.



Tren Hattına Uzaklık(m)	Kayıt Cihazı No
21	SZ168
28	SZ166
35	SZ171
42	SZ150

Tren Hattına Uzaklık(m)	Deneyisel Sonuçlar PGA(gal)	Analitik Çözüm PGA(gal)
21	2.20	2.20
28	3.70	1.72
35	1.60	1.35
42	2.70	1.05

Şekil 4.5: 1.Saha çalışması İstanbul yönü **Banliyö Treni** serbest zemin hatta dik doğrultuda (N-S) 3.Deney ile analitik çözüm PGA azalım eğrileri karşılaştırma grafiği.



Tren Hattına Uzaklık(m)	Kayıt Cihazı No
21	SZ168
28	SZ166
35	SZ171
42	SZ150

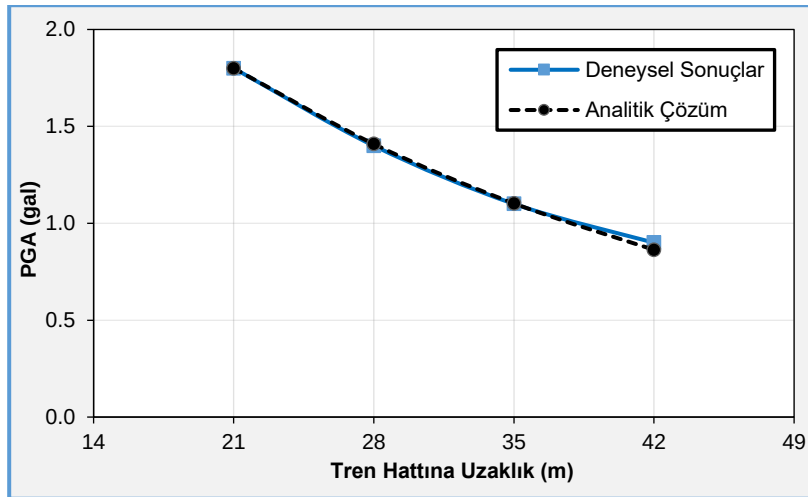
Tren Hattına Uzaklık(m)	Deneyisel Sonuçlar PGA(gal)	Analitik Çözüm PGA(gal)
21	2.90	2.90
28	3.00	2.27
35	2.30	1.78
42	1.40	1.39

Şekil 4.6: 1.Saha çalışması İstanbul yönü **Banliyö Treni** serbest zemin hatta paralel doğrultuda (E-W) 3.Deney ile analitik çözüm PGA azalım eğrileri karşılaştırma grafiği.

Serbest zemin ortamında Banliyö tren geçişlerinden elde edilen hatta dik ya da paralel doğrultudaki analitik çözüm sonuçları mesafeye göre orantılı bir azalma göstermişken, deneysel sonuçlar orantılı bir azalım ilişkisi göstermemiştir. Analitik çözüm homojen bir zemin ortamında ideal koşullarda doğrusal bir azalım ilişkisi olduğunu düşündürsede doğal arazi koşullarında bu durum pek mümkün olmamaktadır. Deneysel sonuçlardaki bu farklılıklar doğal zemin koşullarındaki tabakalı zemin ortamında yansıyan, kırılan, saçılan ve soğurulan dalgaların varlığını düşündürmüştür. Ayrıca deneysel olarak elde edilen pik ivme değerleri genel olarak birkaç istisna dışında analitik çözümle hesaplanan pik ivme değerlerinden daha fazla çıkmıştır.

4.1.2 Hendekli Serbest Zemin için Deneysel ve Analitik Değerlendirme

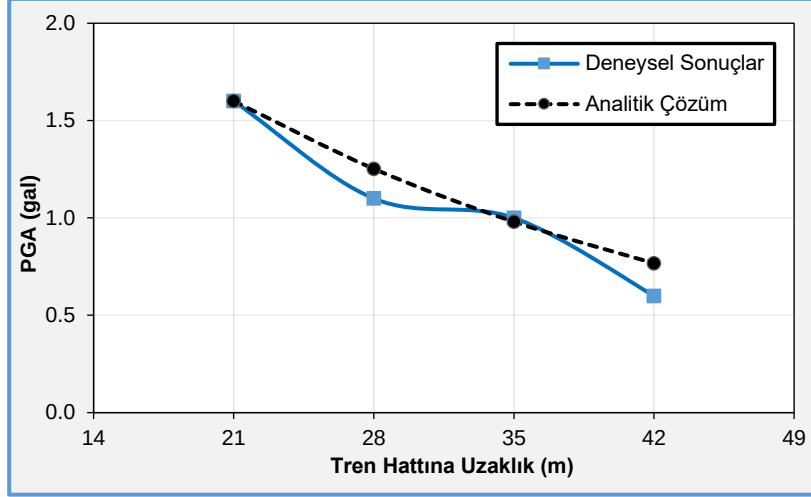
Birinci saha çalışmasında; hendekli serbest zemin ortamında iki yönlü olarak dördüncü hattan geçen Banliyö tren geçişleri için elde edilen deneysel ölçüm noktalarındaki pik ivme genlik değerlerinin hatta dik (Kuzey-Güney) ve hatta paralel (Doğu-Batı) doğrultudaki bileşenleri ile Bornitz'in analitik çözüm yönteminden elde edilen pik ivme genlik değerlerinin mesafeye bağlı azalımını grafikler halinde Şekil 4.7-12' de gösterilmiştir. Eni 1,00 m, yüksekliği 0,60 m ebatlarında, içi boş durumdaki hendeğin konumu dördüncü hattan 21m uzaklıktaki ilk nokta ile 28m' deki ikinci nokta arasında bulunmaktadır.



Tren Hattına Uzaklık(m)	Kayıt Cihazı No
21	SZ162
28	SZ163
35	SZ173
42	SZ172

Tren Hattına Uzaklık(m)	Deneysel Sonuçlar PGA(gal)	Analitik Çözüm PGA(gal)
21	1.80	1.80
28	1.40	1.41
35	1.10	1.10
42	0.90	0.86

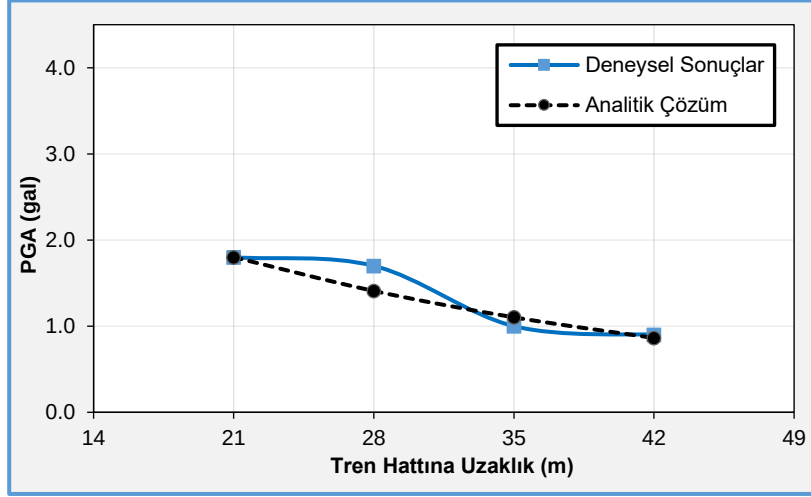
Şekil 4.7: 1.Saha çalışması Ankara yönü **Banliyö Treni** hendekli serbest zemin hatta dik doğrultuda (N-S) 1.Deney ile analitik çözüm PGA azalım eğrileri karşılaştırma grafiği.



Tren Hattına Uzaklık(m)	Kayıt Cihazı No
21	SZ162
28	SZ163
35	SZ173
42	SZ172

Tren Hattına Uzaklık(m)	Deneysel Sonuçlar PGA(gal)	Analitik Çözüm PGA(gal)
21	1.60	1.60
28	1.10	1.25
35	1.00	0.98
42	0.60	0.77

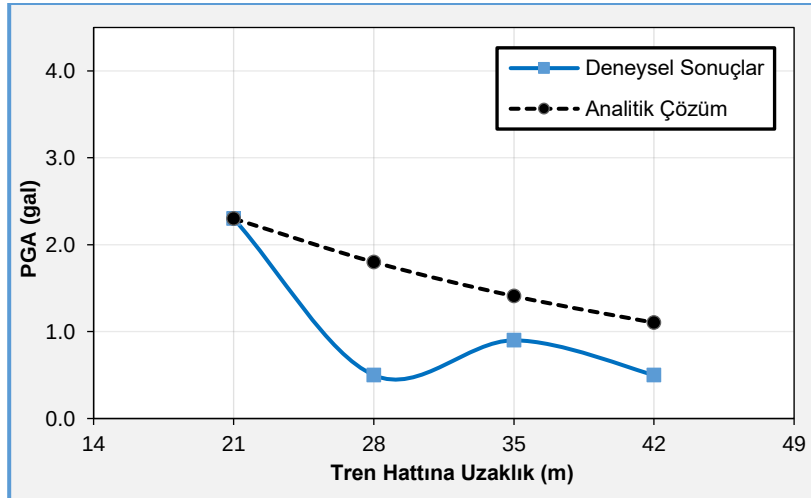
Şekil 4.8: 1.Saha çalışması Ankara yönü **Banliyö Treni** hendekli serbest zemin hatta paralel doğrultuda (E-W) 1.Deney ile analitik çözüm PGA azalım eğrileri karşılaştırma grafiği.



Tren Hattına Uzaklık(m)	Kayıt Cihazı No
21	SZ162
28	SZ163
35	SZ173
42	SZ172

Tren Hattına Uzaklık(m)	Deneysel Sonuçlar PGA(gal)	Analitik Çözüm PGA(gal)
21	1.80	1.80
28	1.70	1.41
35	1.00	1.10
42	0.90	0.86

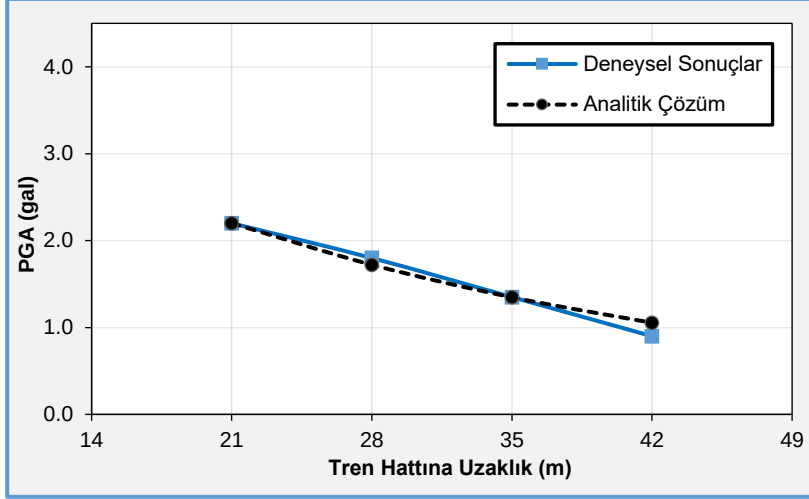
Şekil 4.9: 1.Saha çalışması Ankara yönü **Banliyö Treni** hendekli serbest zemin hatta dik doğrultuda (N-S) 2.Deney ile analitik çözüm PGA azalım eğrileri karşılaştırma grafiği.



Tren Hattına Uzaklık(m)	Kayıt Cihazı No
21	SZ162
28	SZ163
35	SZ173
42	SZ172

Tren Hattına Uzaklık(m)	Deneysel Sonuçlar PGA(gal)	Analitik Çözüm PGA(gal)
21	2.30	2.30
28	0.50	1.80
35	0.90	1.41
42	0.50	1.10

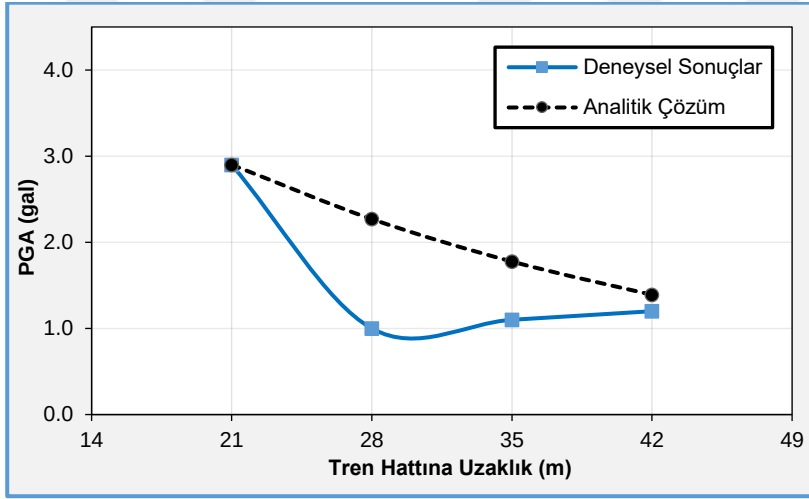
Şekil 4.10: 1.Saha çalışması Ankara yönü **Banliyö Treni** hendekli serbest zemin hatta paralel doğrultuda (E-W) 2.Deney ile analitik çözüm PGA azalım eğrileri karşılaştırma grafiği.



Tren Hattına Uzaklık(m)	Kayıt Cihazı No
21	SZ162
28	SZ163
35	SZ173
42	SZ172

Tren Hattına Uzaklık(m)	DeneySEL Sonuçlar PGA(gal)	Analitik Çözüm PGA(gal)
21	2.20	2.20
28	1.80	1.72
35	1.35	1.35
42	0.90	1.05

Şekil 4.11: 1.Saha çalışması İstanbul yönü **Banliyö Treni** hendecli serbest zemin hatta dik doğrultuda (N-S) 3.Deney ile analitik çözüm PGA azalım eğrileri karşılaştırma grafiği.



Tren Hattına Uzaklık(m)	Kayıt Cihazı No
21	SZ162
28	SZ163
35	SZ173
42	SZ172

Tren Hattına Uzaklık(m)	DeneySEL Sonuçlar PGA(gal)	Analitik Çözüm PGA(gal)
21	2.90	2.90
28	1.00	2.27
35	1.10	1.78
42	1.20	1.39

Şekil 4.12: 1.Saha çalışması İstanbul yönü **Banliyö Treni** hendecli serbest zemin hatta paralel doğrultuda (E-W) 3.Deney ile analitik çözüm PGA azalım eğrileri karşılaştırma grafiği.

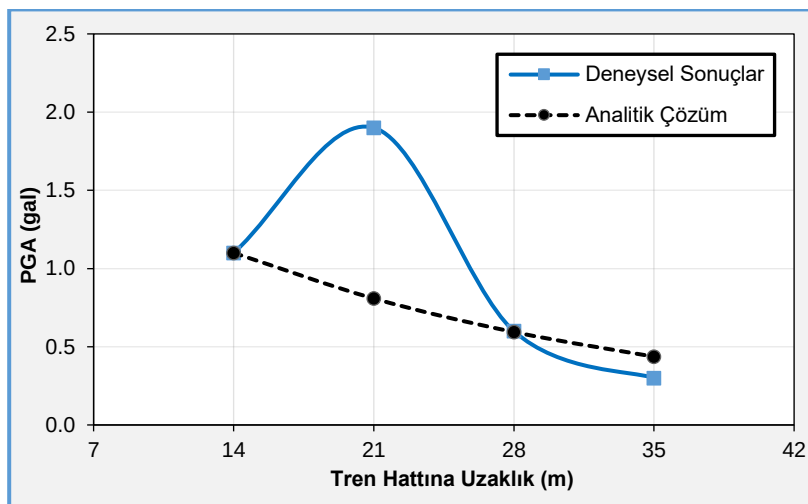
Hendecli serbest zemin ortamında Banliyö tren geçişlerinden elde edilen hatta dik ya da paralel doğrultudaki analitik çözüm sonuçları mesafeye göre orantılı bir azalma göstermişken, deneysel sonuçlar hatta dik doğrultudaki birinci ve üçüncü deney haricinde orantılı bir azalım ilişkisi göstermemiştir. Analitik çözüm yönteminde zemin ortamındaki hendeğin varlığı hesaba dahil edilmemesine rağmen özellikle hatta dik doğrultuda deneysel sonuçlarla örtüştüğü görülmüştür. Hatta paralel deneysel sonuçlara bakıldığında hendek bulunan 21-28m aralığında pik ivme genliklerindeki azalmanın daha fazla olduğu anlaşılmaktadır. Genel olarak içi boş hendek bariyerin varlığı; deneysel olarak elde edilen pik ivme genlik değerlerinin hendezsiz durumun tam tersine analitik çözüm sonuçlarına göre hatta paralel doğrultuda daha düşük değerlerde ya da hatta dik doğrultuda çok yakın olduğunu göstermiştir.

4.2 Yük Treni Geçişlerinin Deneyssel ve Analitik olarak Değerlendirilmesi

TCDD genel taşımacılık kriterlerine göre çift yönlü geçen Yük trenlerinin hızları maksimum 70 km/sa, dingil ağırlığı ise maksimum 20 ton olarak belirlenmiştir. Bu özelliklere sahip Yük trenlerinin geçişi sırasında oluşan titreşimlerin, hatta yakın yerleştirilen ilk ivmeölçer noktasında alınan kayıtlar daha sonra işlenmiş ve elde edilen Fourier genlik spektrumlarına göre baskın frekanslar 20-80Hz arasında Banliyö trenlerine göre daha yayılı olarak hesaplanmıştır. Birinci saha çalışmasında (Alüvyon gevşek zemin ortamında); Yük treni geçişinde oluşan titreşimlerin pik ivme genlik değerleri; bir defa Ankara yönlü, üç defa İstanbul yönlü olmak üzere, serbest zemin ve hendekli serbest zemin için deneyssel ve analitik olarak elde edilmiş ve mesafeye bağlı azalım ilişkisi bu bölümde incelenmiştir.

4.2.1 Serbest Zemin için Deneyssel ve Analitik Değerlendirme

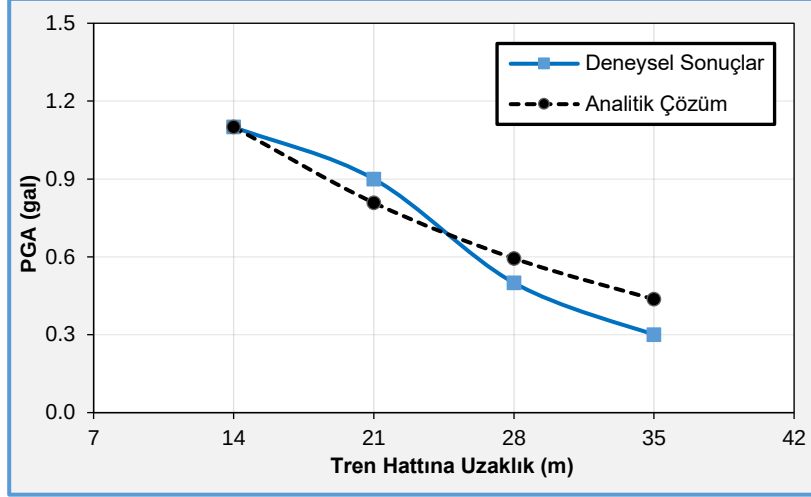
Birinci saha çalışmasında; serbest zemin ortamında iki yönlü olarak üçüncü hattan geçen Yük treni geçişleri için elde edilen deneyssel ölçüm noktalarındaki pik ivme genlik değerlerinin hatta dik (Kuzey-Güney) ve hatta paralel (Doğu-Batı) doğrultudaki bileşenleri ile Bornitz'in analitik çözüm yönteminden elde edilen pik ivme genlik değerlerinin mesafeye bağlı azalımını grafikler halinde Şekil 4.13-20' de gösterilmiştir.



Tren Hattına Uzaklık(m)	Kayıt Cihazı No
14	SZ168
21	SZ166
28	SZ171
35	SZ150

Tren Hattına Uzaklık(m)	Deneyssel Sonuçlar PGA(gal)	Analitik zm PGA(gal)
14	1.10	1.10
21	1.90	0.81
28	0.60	0.59
35	0.30	0.44

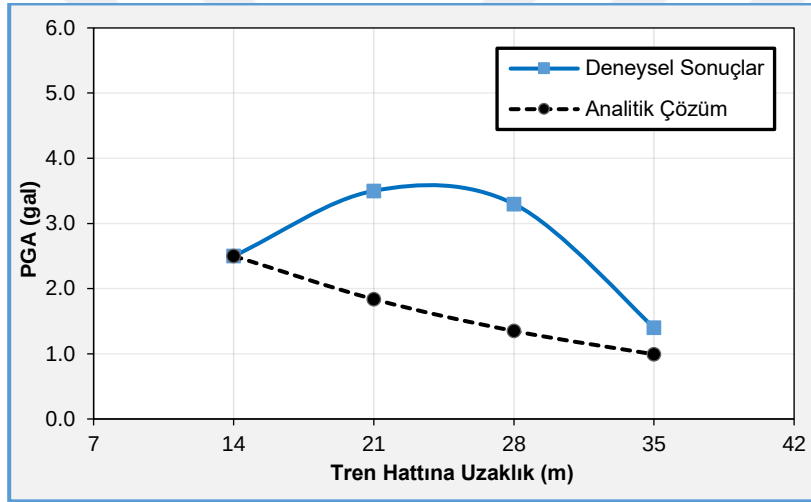
Şekil 4.13: 1.Saha alışması Ankara yönü **Yük Treni** serbest zemin hatta dik doğrultuda (N-S) 1.Deney ile analitik zm PGA azalım eğrileri karşılaştırma grafiği.



Tren Hattına Uzaklık(m)	Kayıt Cihazı No
14	SZ168
21	SZ166
28	SZ171
35	SZ150

Tren Hattına Uzaklık(m)	Deneysel Sonuçlar PGA(gal)	Analitik Çözüm PGA(gal)
14	1.10	1.10
21	0.90	0.81
28	0.50	0.59
35	0.30	0.44

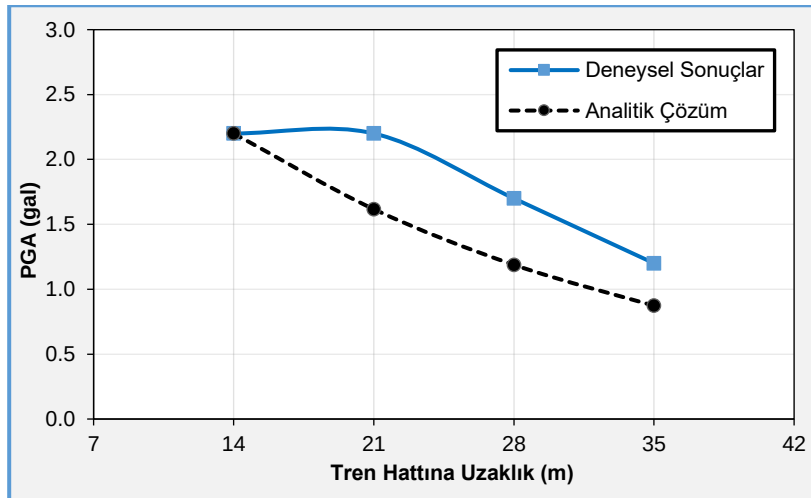
Şekil 4.14: 1.Saha çalışması Ankara yönü **Yük Treni** serbest zemin hatta paralel doğrultuda (E-W) 1.Deney ile analitik çözüm PGA azalım eğrileri karşılaştırma grafiği.



Tren Hattına Uzaklık(m)	Kayıt Cihazı No
14	SZ168
21	SZ166
28	SZ171
35	SZ150

Tren Hattına Uzaklık(m)	Deneysel Sonuçlar PGA(gal)	Analitik Çözüm PGA(gal)
14	2.50	2.50
21	3.50	1.84
28	3.30	1.35
35	1.40	0.99

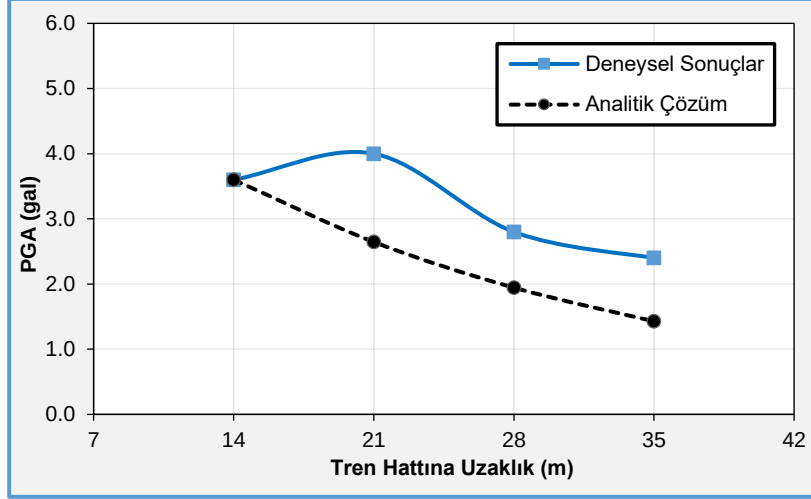
Şekil 4.15: 1.Saha çalışması İstanbul yönü **Yük Treni** serbest zemin hatta dik doğrultuda (N-S) 2.Deney ile analitik çözüm PGA azalım eğrileri karşılaştırma grafiği.



Tren Hattına Uzaklık(m)	Kayıt Cihazı No
14	SZ168
21	SZ166
28	SZ171
35	SZ150

Tren Hattına Uzaklık(m)	Deneysel Sonuçlar PGA(gal)	Analitik Çözüm PGA(gal)
14	2.20	2.20
21	2.20	1.62
28	1.70	1.19
35	1.20	0.87

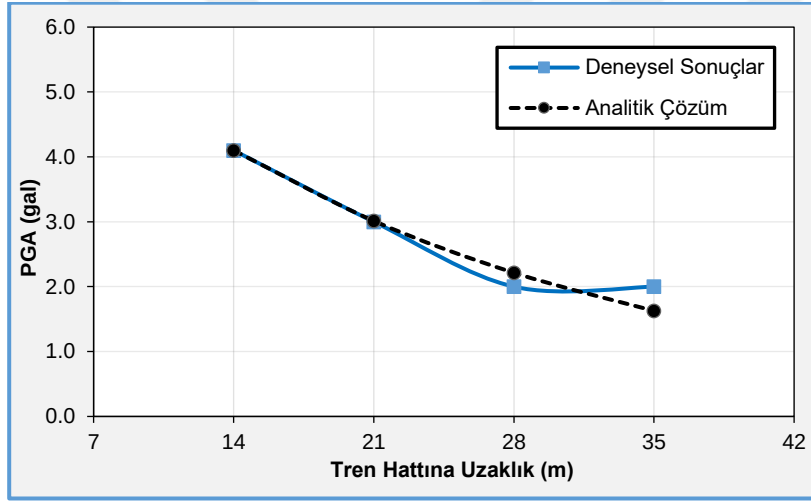
Şekil 4.16: 1.Saha çalışması İstanbul yönü **Yük Treni** serbest zemin hatta paralel doğrultuda (E-W) 2.Deney ile analitik çözüm PGA azalım eğrileri karşılaştırma grafiği.



Tren Hattına Uzaklık(m)	Kayıt Cihazı No
14	SZ168
21	SZ166
28	SZ171
35	SZ150

Tren Hattına Uzaklık(m)	Deneysel Sonuçlar PGA(gal)	Analitik Çözüm PGA(gal)
14	3.60	3.60
21	4.00	2.65
28	2.80	1.94
35	2.40	1.43

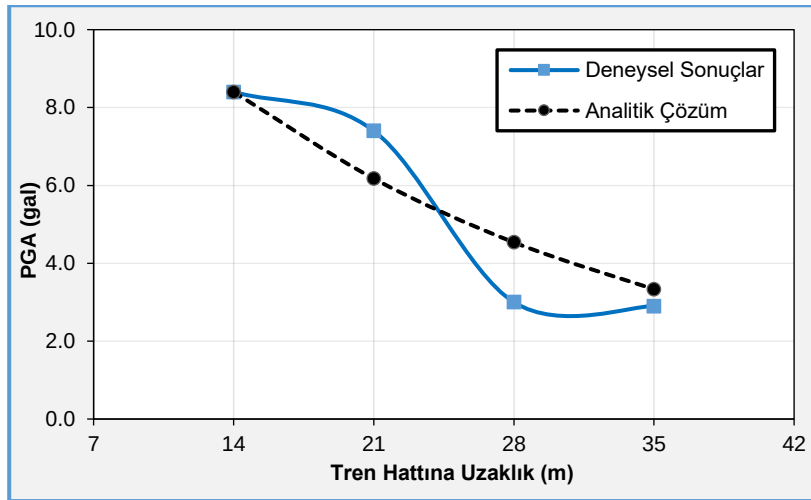
Şekil 4.17: 1.Saha çalışması İstanbul yönü **Yük Treni** serbest zemin hatta dik doğrultuda (N-S) 3.Deney ile analitik çözüm PGA azalım eğrileri karşılaştırma grafiği.



Tren Hattına Uzaklık(m)	Kayıt Cihazı No
14	SZ168
21	SZ166
28	SZ171
35	SZ150

Tren Hattına Uzaklık(m)	Deneysel Sonuçlar PGA(gal)	Analitik Çözüm PGA(gal)
14	4.10	4.10
21	3.00	3.01
28	2.00	2.21
35	2.00	1.63

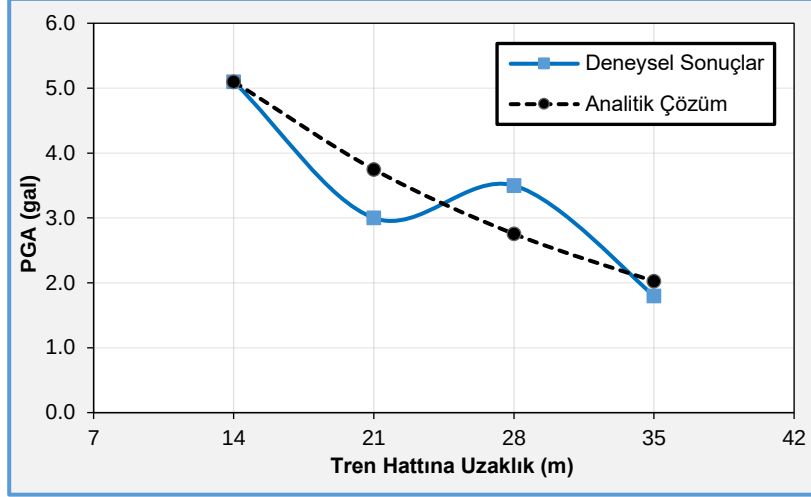
Şekil 4.18: 1.Saha çalışması İstanbul yönü **Yük Treni** serbest zemin hatta paralel doğrultuda (E-W) 3.Deney ile analitik çözüm PGA azalım eğrileri karşılaştırma grafiği.



Tren Hattına Uzaklık(m)	Kayıt Cihazı No
14	SZ168
21	SZ166
28	SZ171
35	SZ150

Tren Hattına Uzaklık(m)	Deneysel Sonuçlar PGA(gal)	Analitik Çözüm PGA(gal)
14	8.40	8.40
21	7.40	6.17
28	3.00	4.54
35	2.90	3.33

Şekil 4.19: 1.Saha çalışması İstanbul yönü **Yük Treni** serbest zemin hatta dik doğrultuda (N-S) 4.Deney ile analitik çözüm PGA azalım eğrileri karşılaştırma grafiği.



Tren Hattına Uzaklık(m)	Kayıt Cihazı No
14	SZ168
21	SZ166
28	SZ171
35	SZ150

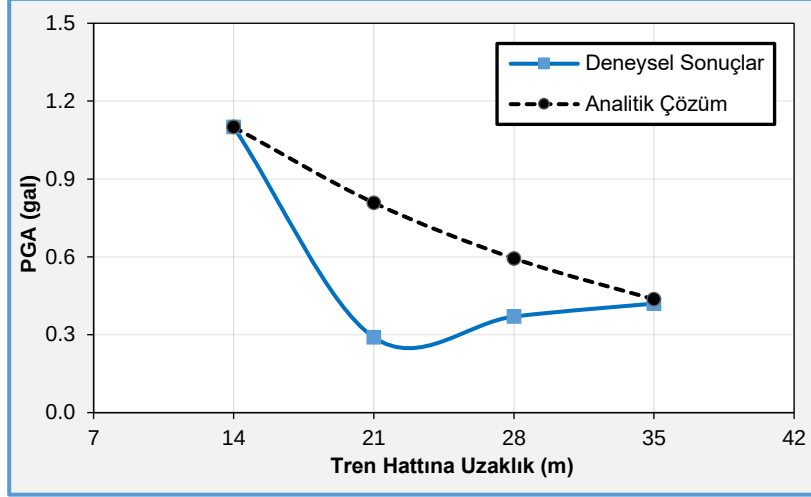
Tren Hattına Uzaklık(m)	Deneysel Sonuçlar PGA(gal)	Analitik Çözüm PGA(gal)
14	5.10	5.10
21	3.00	3.75
28	3.50	2.75
35	1.80	2.02

Şekil 4.20: 1.Saha çalışması İstanbul yönü **Yük Treni** serbest zemin hatta paralel doğrultuda (E-W) 4.Deney ile analitik çözüm PGA azalım eğrileri karşılaştırma grafiği.

Serbest zemin ortamında Banliyö treni geçişleri için yapılan yorumlar Yük treni geçişleri için elde edilen grafiklerde de aynen geçerli olmuştur. Bu durum deneysel sonuçlardaki farklılıkların doğal zemin koşullarındaki tabaka geçişlerinin olduğu ya da lokal ceplerin bulunduğu zemin ortamında yansıyan, kırılan, saçılan ve soğurulan dalgaların varlığını düşündürmesi yargısını güçlendirmiştir. Banliyö treni geçişi ile Yük treni geçişinde oluşan titreşim etkileri karşılaştırıldığında çok büyük davranışsal farklılıklar görülmemekle birlikte baskın frekanslar değişiklik göstermiştir. Ayrıca Yük treni pik ivme genlik değerleri hem deneysel hem de analitik sonuçlar dikkate alındığında Banliyö trenine göre daha fazla çıkmıştır.

4.2.2 Hendekli Serbest Zemin için Deneysel ve Analitik Değerlendirme

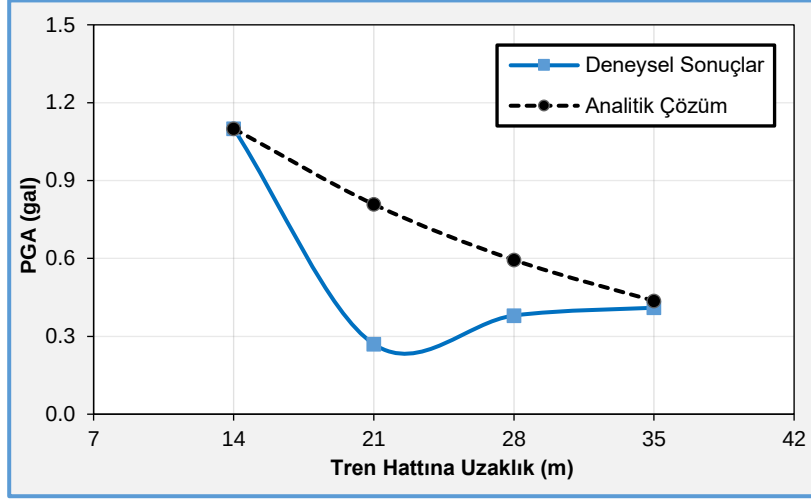
Birinci saha çalışmasında; hendekli serbest zemin ortamında iki yönlü olarak üçüncü hattan geçen Yük treni geçişleri için elde edilen deneysel ölçüm noktalarındaki pik ivme genlik değerlerinin hatta dik (Kuzey-Güney) ve hatta paralel (Doğu-Batı) doğrultudaki bileşenleri ile Bornitz'in analitik çözüm yönteminden elde edilen pik ivme genlik değerlerinin mesafeye bağlı azalımı grafikler halinde Şekil 4.21-28' de gösterilmiştir. Eni 1,00 m, yüksekliği 0,60m ebatlarında, içi boş durumdaki hendeğin konumu üçüncü hattan 14m uzaklıktaki ilk nokta ile 21m' deki ikinci nokta arasında bulunmaktadır.



Tren Hattına Uzaklık(m)	Kayıt Cihazı No
14	SZ162
21	SZ163
28	SZ173
35	SZ172

Tren Hattına Uzaklık(m)	Deneysel Sonuçlar PGA(gal)	Analitik Çözüm PGA(gal)
14	1.10	1.10
21	0.29	0.81
28	0.37	0.59
35	0.42	0.44

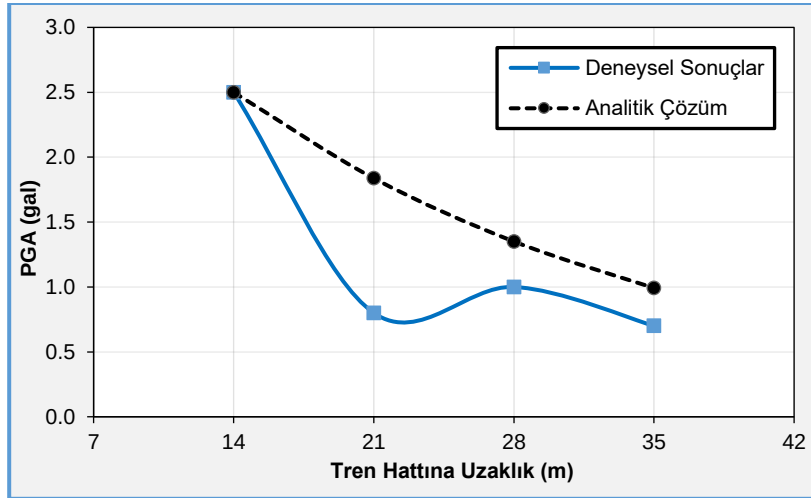
Şekil 4.21: 1.Saha çalışması Ankara yönü **Yük Treni** hendekli serbest zemin hatta dik doğrultuda (N-S) 1.Deney ile analitik çözüm PGA azalım eğrileri karşılaştırma grafiği.



Tren Hattına Uzaklık(m)	Kayıt Cihazı No
14	SZ162
21	SZ163
28	SZ173
35	SZ172

Tren Hattına Uzaklık(m)	Deneysel Sonuçlar PGA(gal)	Analitik Çözüm PGA(gal)
14	1.10	1.10
21	0.27	0.81
28	0.38	0.59
35	0.41	0.44

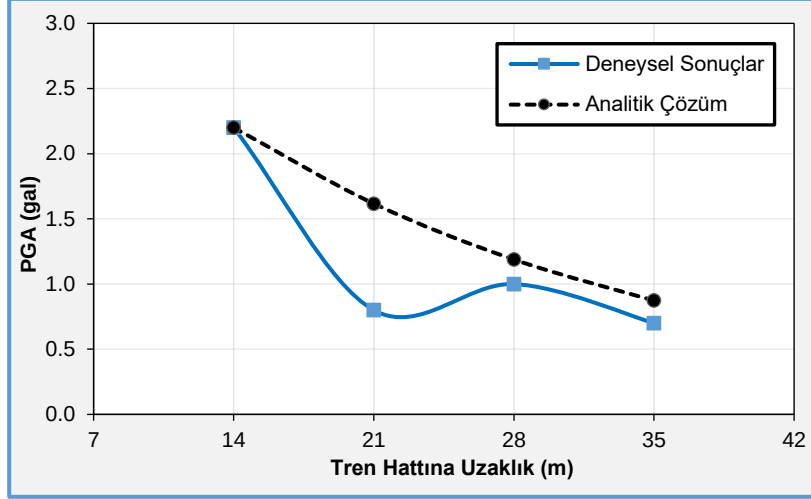
Şekil 4.22: 1.Saha çalışması Ankara yönü **Yük Treni** hendekli serbest zemin hatta paralel doğrultuda (E-W) 1.Deney ile analitik çözüm PGA azalım eğrileri karşılaştırma grafiği.



Tren Hattına Uzaklık(m)	Kayıt Cihazı No
14	SZ162
21	SZ163
28	SZ173
35	SZ172

Tren Hattına Uzaklık(m)	Deneysel Sonuçlar PGA(gal)	Analitik Çözüm PGA(gal)
14	2.50	2.50
21	0.80	1.84
28	1.00	1.35
35	0.70	0.99

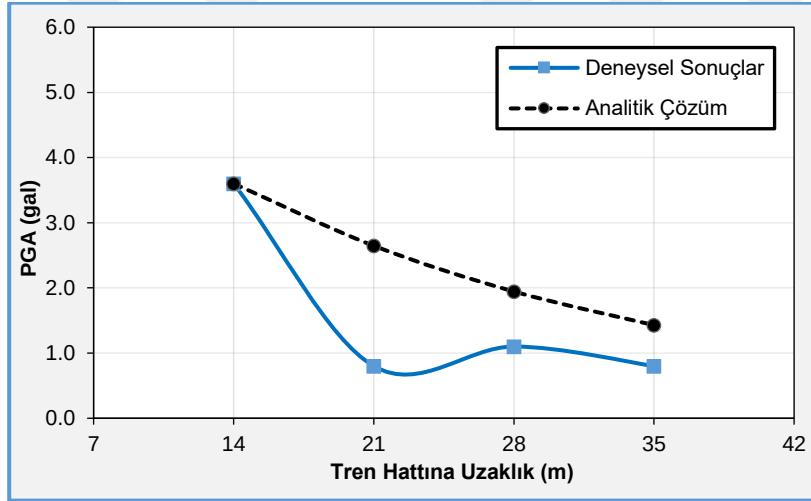
Şekil 4.23: 1.Saha çalışması İstanbul yönü **Yük Treni** hendekli serbest zemin hatta dik doğrultuda (N-S) 2.Deney ile analitik çözüm PGA azalım eğrileri karşılaştırma grafiği.



Tren Hattına Uzaklık(m)	Kayıt Cihazı No
14	SZ162
21	SZ163
28	SZ173
35	SZ172

Tren Hattına Uzaklık(m)	Deneysel Sonuçlar PGA(gal)	Analitik Çözüm PGA(gal)
14	2.20	2.20
21	0.80	1.62
28	1.00	1.19
35	0.70	0.87

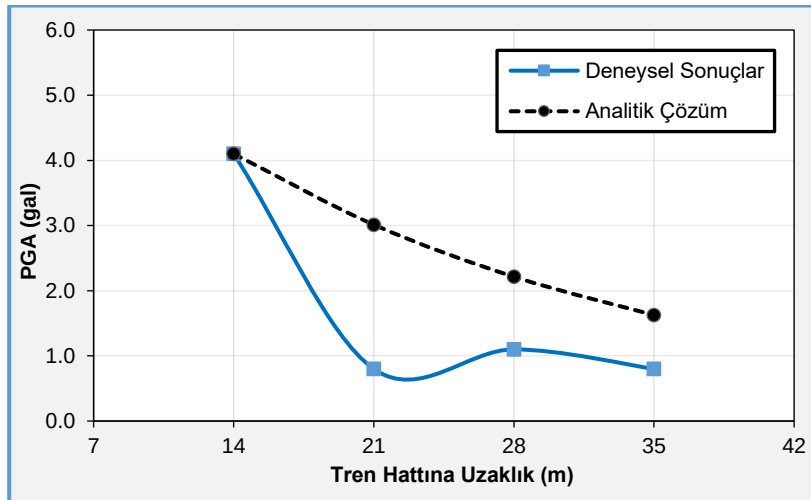
Şekil 4.24: 1.Saha çalışması İstanbul yönü **Yük Treni** hendecli serbest zemin hatta paralel doğrultuda (E-W) 2.Deney ile analitik çözüm PGA azalım eğrileri karşılaştırma grafiği.



Tren Hattına Uzaklık(m)	Kayıt Cihazı No
14	SZ162
21	SZ163
28	SZ173
35	SZ172

Tren Hattına Uzaklık(m)	Deneysel Sonuçlar PGA(gal)	Analitik Çözüm PGA(gal)
14	3.60	3.60
21	0.80	2.65
28	1.10	1.94
35	0.80	1.43

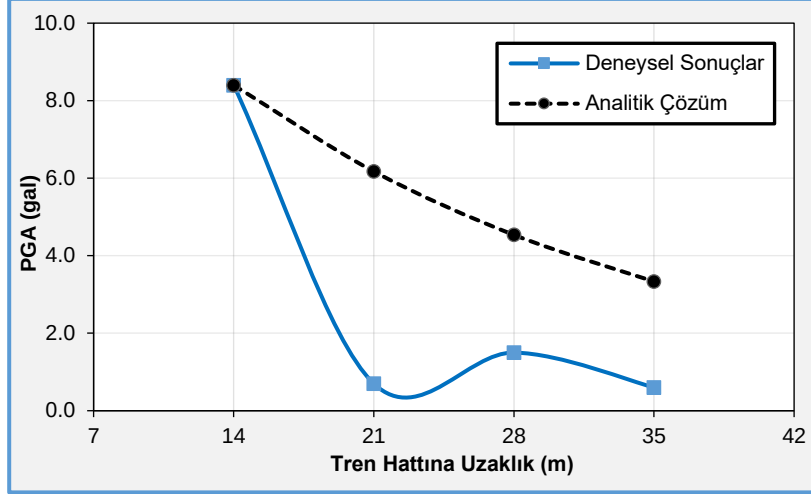
Şekil 4.25: 1.Saha çalışması İstanbul yönü **Yük Treni** hendecli serbest zemin hatta dik doğrultuda (N-S) 3.Deney ile analitik çözüm PGA azalım eğrileri karşılaştırma grafiği.



Tren Hattına Uzaklık(m)	Kayıt Cihazı No
14	SZ162
21	SZ163
28	SZ173
35	SZ172

Tren Hattına Uzaklık(m)	Deneysel Sonuçlar PGA(gal)	Analitik Çözüm PGA(gal)
14	4.10	4.10
21	0.80	3.01
28	1.10	2.21
35	0.80	1.63

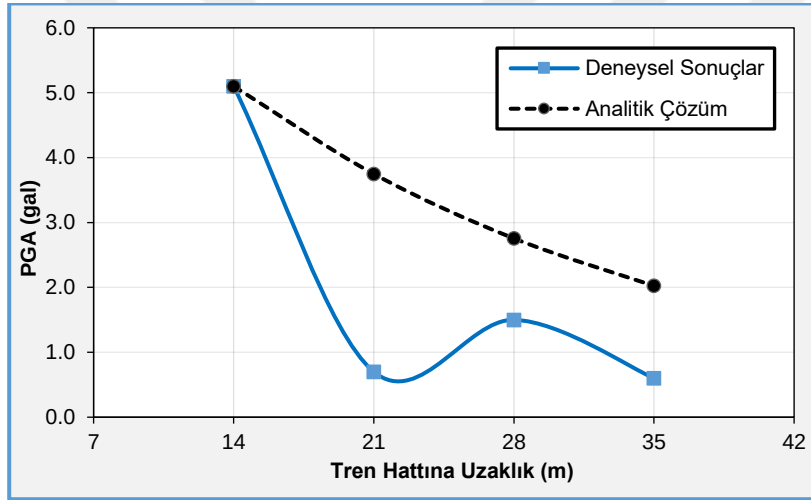
Şekil 4.26: 1.Saha çalışması İstanbul yönü **Yük Treni** hendecli serbest zemin hatta paralel doğrultuda (E-W) 3.Deney ile analitik çözüm PGA azalım eğrileri karşılaştırma grafiği.



Tren Hattına Uzaklık(m)	Kayıt Cihazı No
14	SZ162
21	SZ163
28	SZ173
35	SZ172

Tren Hattına Uzaklık(m)	DeneySEL Sonuçlar PGA(gal)	Analitik Çözüm PGA(gal)
14	8.40	8.40
21	0.70	6.17
28	1.50	4.54
35	0.60	3.33

Şekil 4.27: 1.Saha çalışması İstanbul yönü **Yük Treni** hendecli serbest zemin hatta dik doğrultuda (N-S) 4.Deney ile analitik çözüm PGA azalım eğrileri karşılaştırma grafiği.



Tren Hattına Uzaklık(m)	Kayıt Cihazı No
14	SZ162
21	SZ163
28	SZ173
35	SZ172

Tren Hattına Uzaklık(m)	DeneySEL Sonuçlar PGA(gal)	Analitik Çözüm PGA(gal)
14	5.10	5.10
21	0.70	3.75
28	1.50	2.75
35	0.60	2.02

Şekil 4.28: 1.Saha çalışması İstanbul yönü **Yük Treni** hendecli serbest zemin hatta paralel doğrultuda (E-W) 4.Deney ile analitik çözüm PGA azalım eğrileri karşılaştırma grafiği.

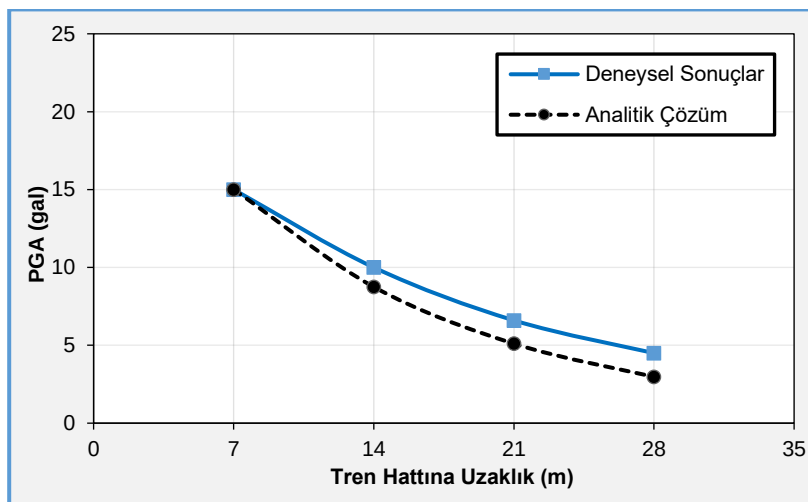
Hendecli serbest zemin ortamında Yük treni geçişlerinden elde edilen hatta dik ya da paralel doğrultudaki analitik çözüm sonuçları mesafeye göre orantılı bir azalma göstermişken, deneysel sonuçlar orantılı bir azalım ilişkisi göstermemiştir. Titreşim enerjisiindeki zayıflamayı geometrik sönüm ve malzeme sönümüyle açıklayan analitik çözüm yönteminde zemin ortamındaki hendeğin varlığı hesaba dahil edilememektedir. Deneysel sonuçlara bakıldığında hendeğin bulunan 14-21m aralığında pik ivme genliklerindeki azalmanın daha fazla olduğu anlaşılmaktadır. Genel olarak içi boş hendeğin bariyerin varlığı; deneysel olarak elde edilen pik ivme genlik değerlerini hendeksiz duruma göre daha çok azalttığı görülmektedir. Bununla birlikte hendeksiz durumda deneysel pik ivme değerleri genellikle analitik çözümden daha fazla olmasına rağmen hendecli durumda tam tersi gerçekleşmiştir.

4.3 Ankara Yönü YHT Geçişlerinin Deneysel ve Analitik olarak Değerlendirilmesi

TCDD genel taşımacılık kriterlerine göre İstanbul-Ankara arası YHT hızları maksimum 250 km/sa, dingil ağırlığı ise maksimum 22,5 ton olarak belirlenmiştir. Bu özelliklere sahip YHT geçişi sırasında oluşan titreşimlerin, hatta yakın yerleştirilen ilk ivmeölçer noktasında alınan kayıtlar daha sonra işlenmiş ve elde edilen Fourier genlik spektrumlarına göre baskın frekanslar 80-90Hz arasında, Banliyö ve Yük trenlerine göre daha yüksek frekanslı olarak hesaplanmıştır. Birinci ve ikinci saha çalışmasında alüvyon gevşek zemin ortamında, üçüncü saha çalışmasında beton kilit parke taşı kaplanmış zeminin etkilerini görebilmek için Ankara yönlü YHT geçişlerinde oluşan titreşimlerin pik ivme genlik değerleri; serbest zemin ve hendekli serbest zemin için deneysel ve analitik olarak elde edilmiş ve mesafeye bağlı azalış ilişkisi bu bölümde incelenmiştir.

4.3.1 Serbest Zemin için Deneysel ve Analitik Değerlendirme

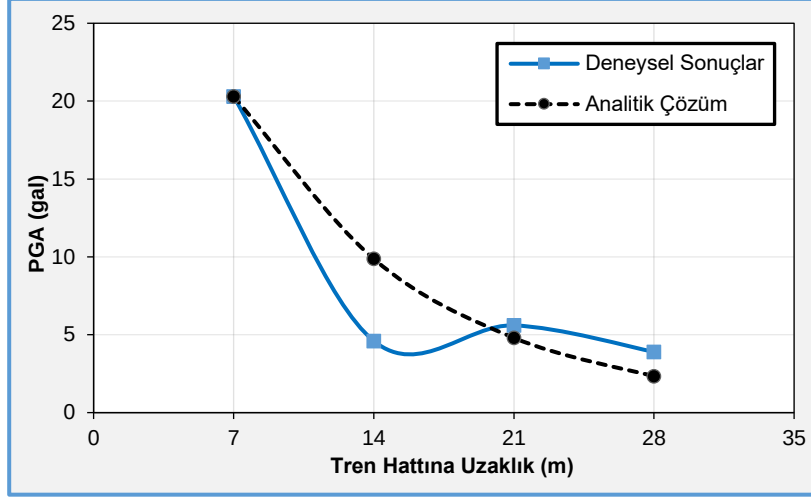
Saha çalışmalarında; serbest zemin ortamında Ankara yönlü birinci hattan geçen YHT geçişleri için elde edilen deneysel ölçüm noktalarındaki pik ivme genlik değerlerinin hatta dik (Kuzey-Güney) ve hatta paralel (Doğu-Batı) doğrultudaki bileşenleri ile Bornitz'in analitik çözüm yönteminden elde edilen pik ivme genlik değerlerinin mesafeye bağlı azalışını grafikler halinde Şekil 4.29-36' te gösterilmiştir.



Tren Hattına Uzaklık(m)	Kayıt Cihazı No
7	SZ168
14	SZ166
21	SZ171
28	SZ150

Tren Hattına Uzaklık(m)	Deneysel Sonuçlar PGA(gal)	Analitik Çözüm PGA(gal)
7	15.00	15.00
14	10.00	8.75
21	6.60	5.10
28	4.50	2.98

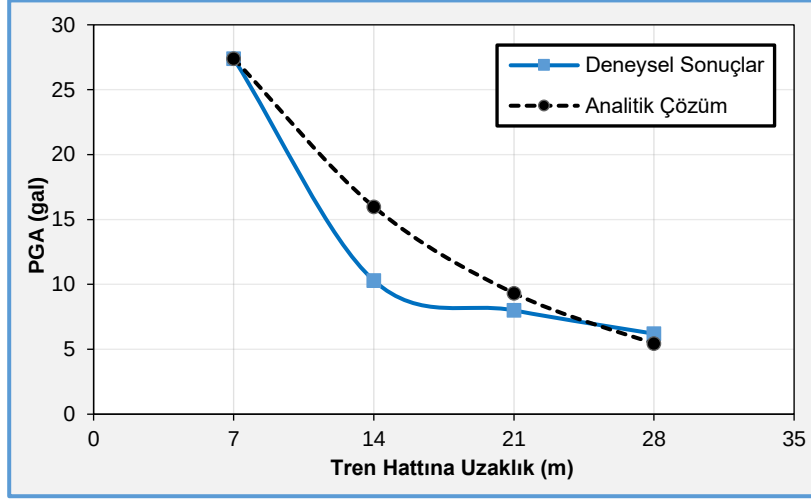
Şekil 4.29: 1.Saha çalışması Ankara yönü YHT serbest zemin hatta dik doğrultuda (N-S) 1.Deney ile analitik çözüm PGA azalış eğrileri karşılaştırma grafiği.



Tren Hattına Uzaklık(m)	Kayıt Cihazı No
7	SZ168
14	SZ166
21	SZ171
28	SZ150

Tren Hattına Uzaklık(m)	Deneyisel Sonuçlar PGA(gal)	Analitik Çözüm PGA(gal)
7	20.30	20.30
14	4.60	9.87
21	5.60	4.80
28	3.90	2.33

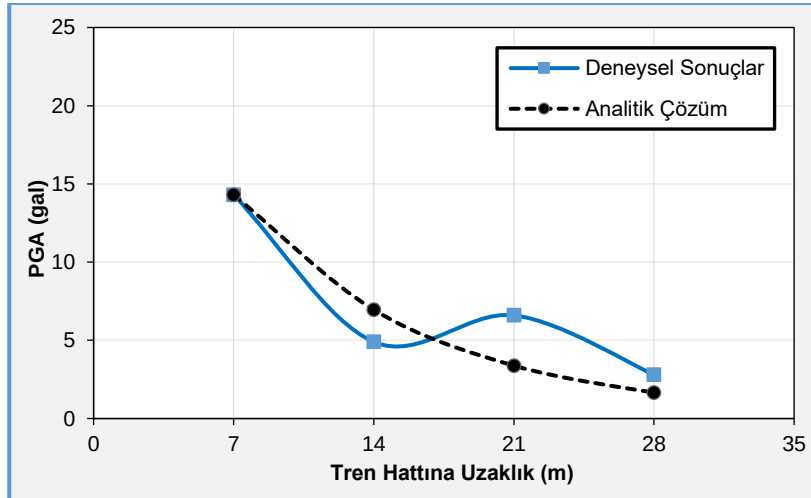
Şekil 4.30: 1.Saha çalışması Ankara yönü **YHT** serbest zemin hatta paralel doğrultuda (E-W) 1.Deney ile analitik çözüm PGA azalım eğrileri karşılaştırma grafiği.



Tren Hattına Uzaklık(m)	Kayıt Cihazı No
7	SZ168
14	SZ166
21	SZ171
28	SZ150

Tren Hattına Uzaklık(m)	Deneyisel Sonuçlar PGA(gal)	Analitik Çözüm PGA(gal)
7	27.40	27.40
14	10.30	15.98
21	8.00	9.32
28	6.20	5.44

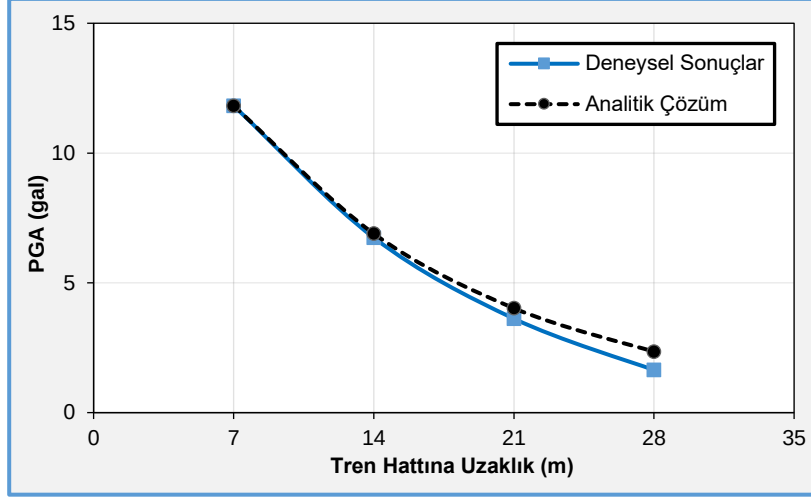
Şekil 4.31: 1.Saha çalışması Ankara yönü **YHT** serbest zemin hatta dik doğrultuda (N-S) 2.Deney ile analitik çözüm PGA azalım eğrileri karşılaştırma grafiği.



Tren Hattına Uzaklık(m)	Kayıt Cihazı No
7	SZ168
14	SZ166
21	SZ171
28	SZ150

Tren Hattına Uzaklık(m)	Deneyisel Sonuçlar PGA(gal)	Analitik Çözüm PGA(gal)
7	14.30	14.30
14	4.90	6.95
21	6.60	3.38
28	2.80	1.64

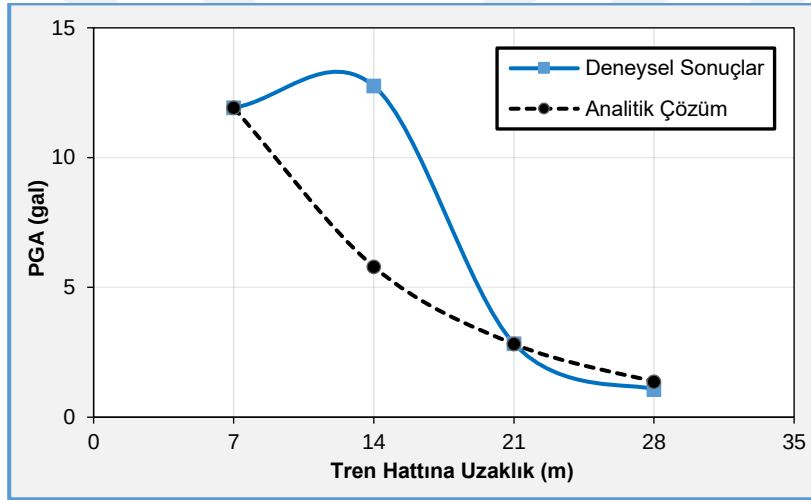
Şekil 4.32: 1.Saha çalışması Ankara yönü **YHT** serbest zemin hatta paralel doğrultuda (E-W) 2.Deney ile analitik çözüm PGA azalım eğrileri karşılaştırma grafiği.



Tren Hattına Uzaklık(m)	Kayıt Cihazı No
7	SZ153
14	SZ173
21	SZ166
28	SZ172

Tren Hattına Uzaklık(m)	Deneysel Sonuçlar PGA(gal)	Analitik Çözüm PGA(gal)
7	11.82	11.82
14	6.74	6.89
21	3.62	4.02
28	1.64	2.35

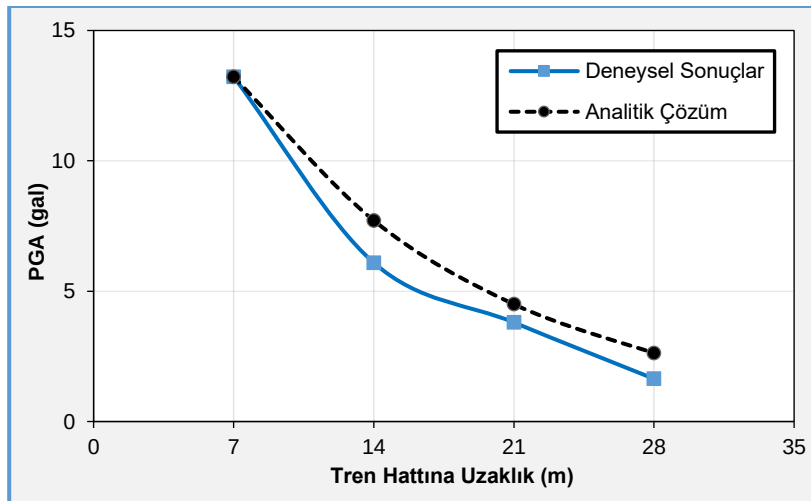
Şekil 4.33: 2.Saha çalışması Ankara yönü **YHT** serbest zemin hatta dik doğrultuda (N-S) 1.Deney ile analitik çözüm PGA azalım eğrileri karşılaştırma grafiği.



Tren Hattına Uzaklık(m)	Kayıt Cihazı No
7	SZ153
14	SZ173
21	SZ166
28	SZ172

Tren Hattına Uzaklık(m)	Deneysel Sonuçlar PGA(gal)	Analitik Çözüm PGA(gal)
7	11.92	11.92
14	12.76	5.80
21	2.84	2.82
28	1.07	1.37

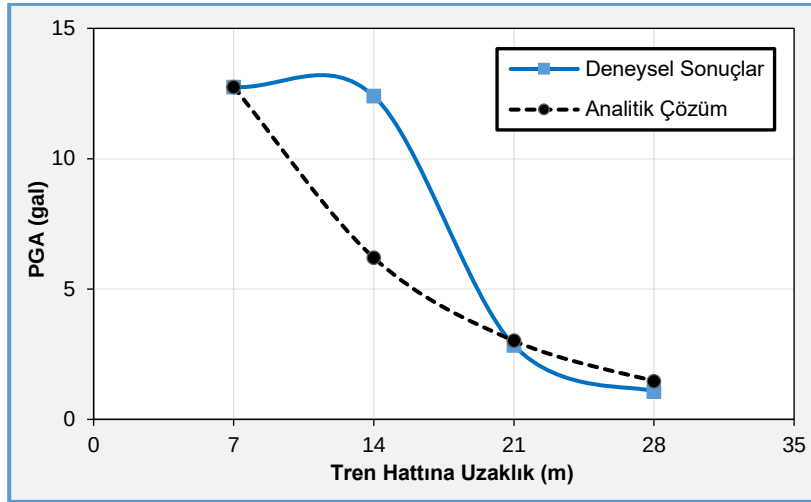
Şekil 4.34: 2.Saha çalışması Ankara yönü **YHT** serbest zemin hatta paralel doğrultuda (E-W) 1.Deney ile analitik çözüm PGA azalım eğrileri karşılaştırma grafiği.



Tren Hattına Uzaklık(m)	Kayıt Cihazı No
7	SZ153
14	SZ173
21	SZ166
28	SZ172

Tren Hattına Uzaklık(m)	Deneysel Sonuçlar PGA(gal)	Analitik Çözüm PGA(gal)
7	13.22	13.22
14	6.09	7.71
21	3.80	4.50
28	1.64	2.62

Şekil 4.35: 2.Saha çalışması Ankara yönü **YHT** serbest zemin hatta dik doğrultuda (N-S) 2.Deney ile analitik çözüm PGA azalım eğrileri karşılaştırma grafiği.



Tren Hattına Uzaklık(m)	Kayıt Cihazı No
7	SZ153
14	SZ173
21	SZ166
28	SZ172

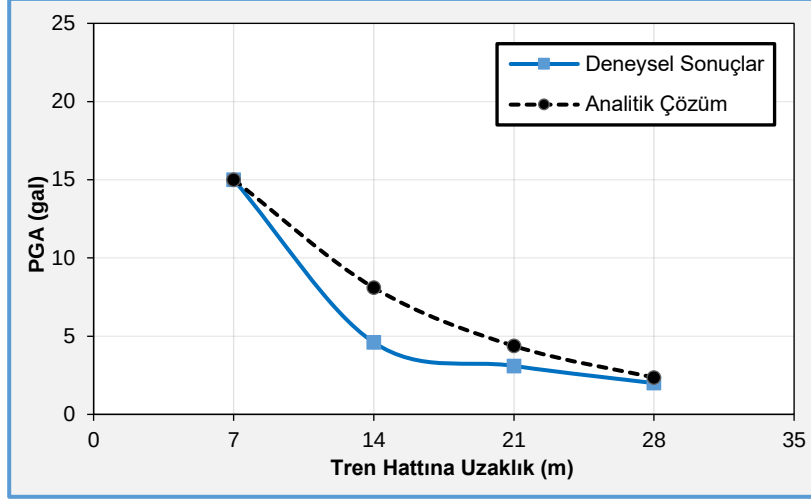
Tren Hattına Uzaklık(m)	Deneysel Sonuçlar PGA(gal)	Analitik Çözüm PGA(gal)
7	12.75	12.75
14	12.40	6.20
21	2.84	3.01
28	1.07	1.47

Şekil 4.36: 2.Saha çalışması Ankara yönü **YHT** serbest zemin hatta paralel doğrultuda (E-W) 2.Deney ile analitik çözüm PGA azalım eğrileri karşılaştırma grafiği.

Serbest zemin ortamında Banliyö treni ve Yük treni geçişleri için yapılan yorumlar YHT geçişleri için elde edilen grafiklerde de aynen geçerli olmuştur. Bu durum deneysel sonuçlardaki farklılıkların doğal zemin koşullarındaki tabaka geçişlerinin olduğu ya da lokal ceplerin bulunduğu zemin ortamında yansıyan, kırılan, saçılan ve soğurulan dalgaların varlığını düşündürmesi yargısını tekrar güçlendirmiştir. Ayrıca hatta yakın ikinci noktada pik ivmelerin artışı ve daha sonraki noktalardaki azalışı yapı varlığının etkileri olduğunu düşündürmektedir. Diğer tren geçişlerinde oluşan titreşim etkileri karşılaştırıldığında çok büyük davranışsal farklılıklar görülmemekle birlikte baskın frekanslar değişiklik göstermiştir. Ayrıca YHT geçişlerinden elde edilen pik ivme genlik değerleri hem deneysel hem de analitik sonuçlar dikkate alındığında diğer trenlere göre daha fazla çıkmıştır.

4.3.2 Hendekli Serbest Zemin için Deneysel ve Analitik Değerlendirme

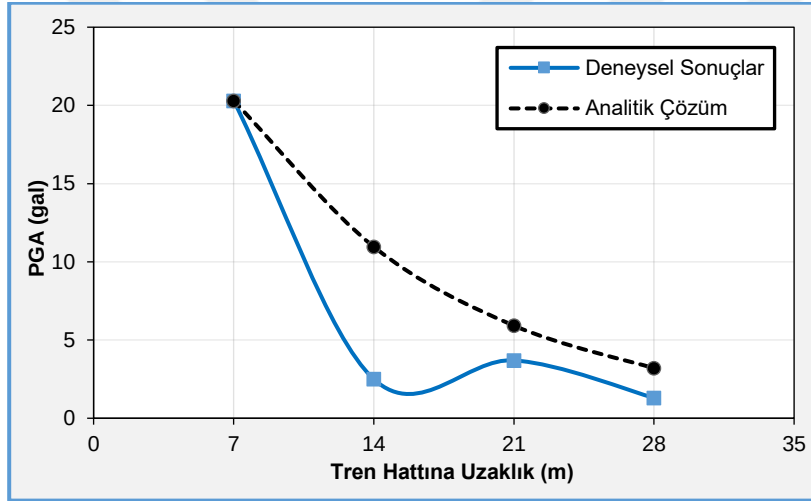
Yapılan üç saha çalışmasında; hendekli serbest zemin ortamında Ankara yönlü olarak birinci hattan geçen YHT geçişleri için elde edilen deneysel ölçüm noktalarındaki pik ivme genlik değerlerinin hatta dik (Kuzey-Güney) ve hatta paralel (Doğu-Batı) doğrultudaki bileşenleri ile Bornitz'in analitik çözüm yönteminden elde edilen pik ivme genlik değerlerinin mesafeye bağlı azalımı grafikler halinde Şekil 4.37-42' de gösterilmiştir. Eni 1,00 m, yüksekliği 0,60m ebatlarında, içi boş durumdaki hendeğin konumu birinci hattan 7m uzaklıktaki ilk nokta ile 14m' deki ikinci nokta arasında bulunmaktadır.



Tren Hattına Uzaklık(m)	Kayıt Cihazı No
7	SZ162
14	SZ163
21	SZ173
28	SZ172

Tren Hattına Uzaklık(m)	DeneySEL Sonuçlar PGA(gal)	Analitik Çözüm PGA(gal)
7	15.00	15.00
14	4.60	8.10
21	3.10	4.38
28	2.00	2.36

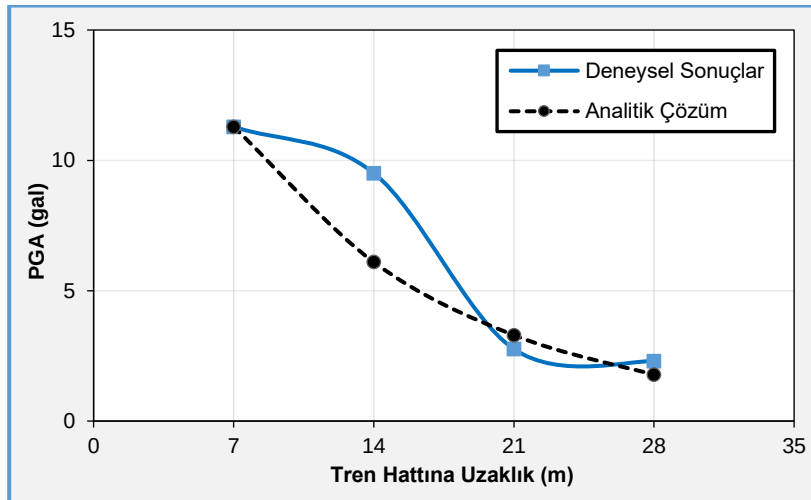
Şekil 4.37: 1.Saha çalışması Ankara yönü **YHT** hendekli serbest zemin hatta dik doğrultuda (N-S) 1.Deney ile analitik çözüm PGA azalım eğrileri karşılaştırma grafiği.



Tren Hattına Uzaklık(m)	Kayıt Cihazı No
7	SZ162
14	SZ163
21	SZ173
28	SZ172

Tren Hattına Uzaklık(m)	DeneySEL Sonuçlar PGA(gal)	Analitik Çözüm PGA(gal)
7	20.30	20.30
14	2.50	10.96
21	3.70	5.92
28	1.30	3.20

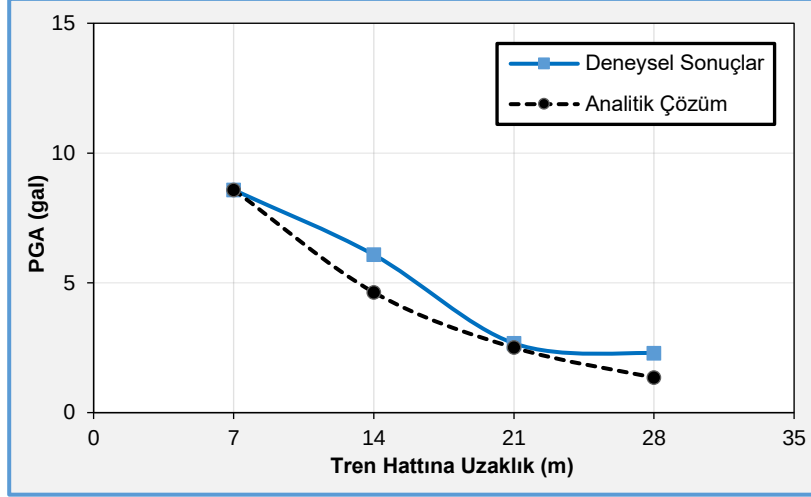
Şekil 4.38: 1.Saha çalışması Ankara yönü **YHT** hendekli serbest zemin hatta paralel doğrultuda (E-W) 1.Deney ile analitik çözüm PGA azalım eğrileri karşılaştırma grafiği.



Tren Hattına Uzaklık(m)	Kayıt Cihazı No
7	SZ150
14	SZ155
21	SZ157
28	SZ168

Tren Hattına Uzaklık(m)	DeneySEL Sonuçlar PGA(gal)	Analitik Çözüm PGA(gal)
7	11.29	11.29
14	9.51	6.10
21	2.76	3.29
28	2.29	1.78

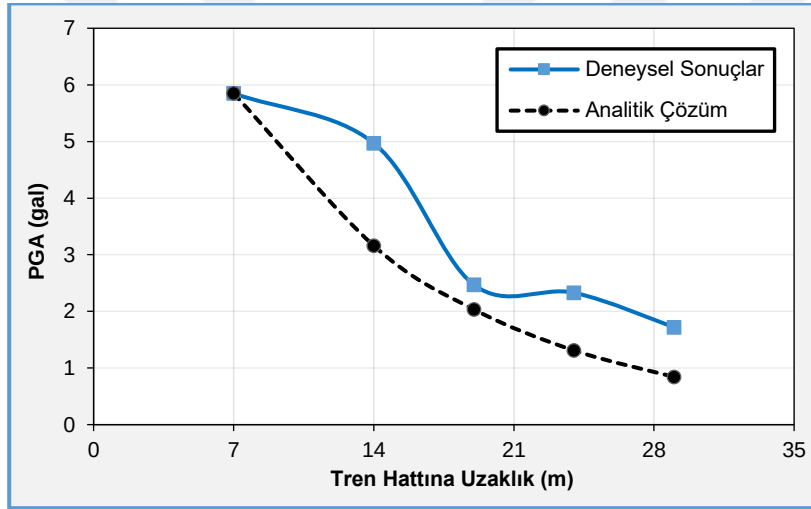
Şekil 4.39: 2.Saha çalışması Ankara yönü **YHT** hendekli serbest zemin hatta dik doğrultuda (N-S) 1.Deney ile analitik çözüm PGA azalım eğrileri karşılaştırma grafiği.



Tren Hattına Uzaklık(m)	Kayıt Cihazı No
7	SZ150
14	SZ155
21	SZ157
28	SZ168

Tren Hattına Uzaklık(m)	Deneysel Sonuçlar PGA(gal)	Analitik Çözüm PGA(gal)
7	8.58	8.58
14	6.08	4.63
21	2.67	2.50
28	2.29	1.35

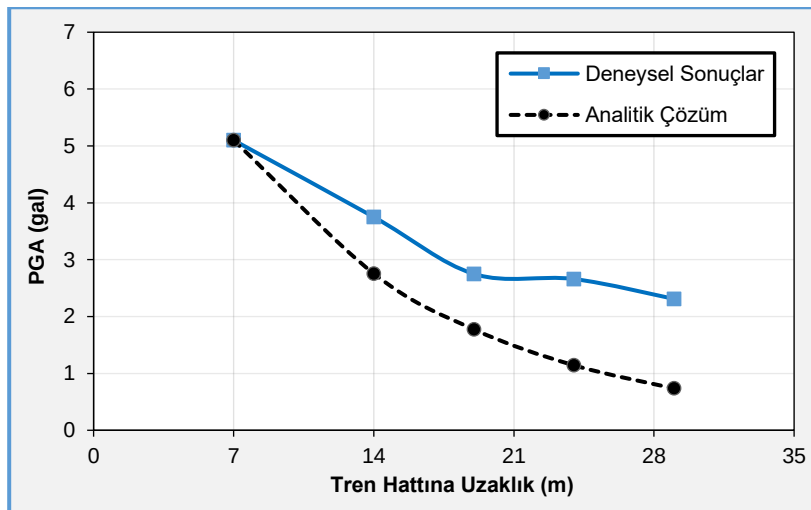
Şekil 4.40: 2.Saha çalışması Ankara yönü **YHT** hendecli serbest zemin hatta paralel doğrultuda (E-W) 1.Deney ile analitik çözüm PGA azalım eğrileri karşılaştırma grafiği.



Tren Hattına Uzaklık(m)	Kayıt Cihazı No
7	M152
14	M150
19	M157
24	M155
29	M153

Tren Hattına Uzaklık(m)	Deneysel Sonuçlar PGA(gal)	Analitik Çözüm PGA(gal)
7	5.85	5.85
14	4.97	3.16
19	2.47	2.03
24	2.33	1.31
29	1.72	0.84

Şekil 4.41: 3.Saha çalışması Ankara yönü **YHT** hendecli serbest zemin hatta dik doğrultuda (N-S) 1.Deney ile analitik çözüm PGA azalım eğrileri karşılaştırma grafiği.



Tren Hattına Uzaklık(m)	Kayıt Cihazı No
7	M152
14	M150
19	M157
24	M155
29	M153

Tren Hattına Uzaklık(m)	Deneysel Sonuçlar PGA(gal)	Analitik Çözüm PGA(gal)
7	5.10	5.10
14	3.75	2.75
19	2.75	1.77
24	2.66	1.14
29	2.31	0.74

Şekil 4.42: 3.Saha çalışması Ankara yönü **YHT** hendecli serbest zemin hatta paralel doğrultuda (E-W) 1.Deney ile analitik çözüm PGA azalım eğrileri karşılaştırma grafiği.

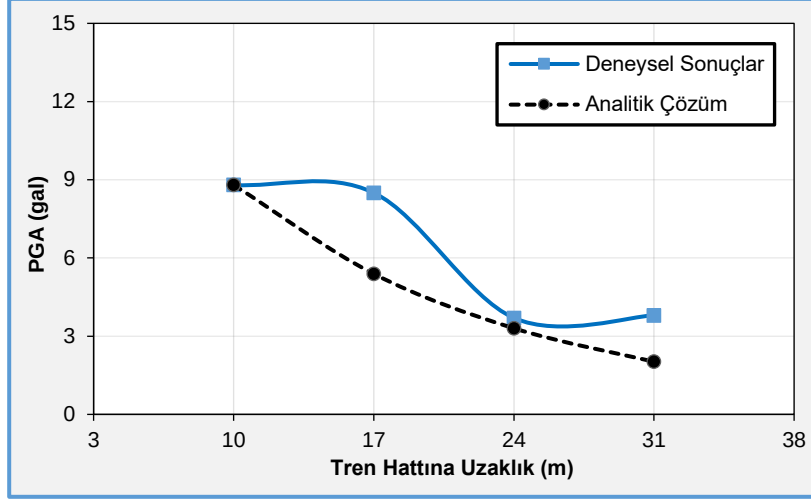
Hendekli serbest zemin ortamında YHT geçişlerinden elde edilen hatta dik ya da paralel doğrultudaki analitik çözüm sonuçları mesafeye göre orantılı bir azalma göstermişken, deneysel sonuçlar orantılı bir azalım ilişkisi göstermemiştir. Deneysel sonuçlara bakıldığında hendek bulunan 7-14m aralığında pik ivme genliklerindeki azalmanın birinci saha çalışmasında daha fazla olduğu anlaşılmaktadır. İkinci saha çalışmasında yakın bölgede konkasör çalışması filitreleme işlemini güçleştirmiş ve hatta yakın ikinci noktada pik ivme artışları gözlenmiştir. Üçüncü saha çalışmasında beton kilit parke taşı kaplanmış zemin ve hendek bariyerin azaltıcı etkileri olmuştur. Genel olarak içi boş hendek bariyer ve beton kilit parke taşı varlığı; deneysel olarak elde edilen pik ivme genlik değerlerini hendezsiz ve alüvyon gevşek zemin duruma göre daha çok azalttığı görülmektedir.

4.4 İstanbul Yönü YHT Geçişlerinin Deneysel ve Analitik olarak Değerlendirilmesi

Birinci ve ikinci saha çalışmasında alüvyon gevşek zemin ortamında, üçüncü saha çalışmasında beton kilit parke taşı kaplanmış zeminin etkilerini görebilmek için İstanbul yönlü YHT geçişlerinde oluşan titreşimlerin pik ivme genlik değerleri; serbest zemin ve hendekli serbest zemin için deneysel ve analitik olarak elde edilmiş ve mesafeye bağlı azalım ilişkisi bu bölümde incelenmiştir.

4.4.1 Serbest Zemin için Deneysel ve Analitik Değerlendirme

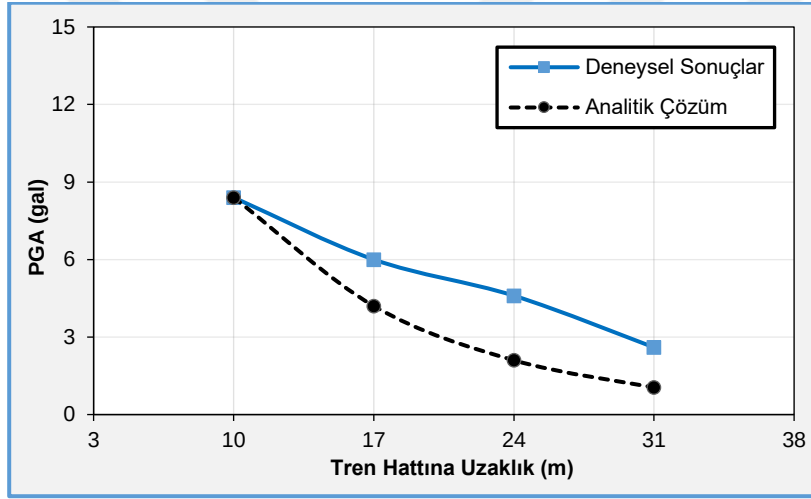
Saha çalışmalarında; serbest zemin ortamında İstanbul yönlü ikinci hattan geçen YHT geçişleri için elde edilen deneysel ölçüm noktalarındaki pik ivme genlik değerlerinin hatta dik (Kuzey-Güney) ve hatta paralel (Doğu-Batı) doğrultudaki bileşenleri ile Bornitz'in analitik çözüm yönteminden elde edilen pik ivme genlik değerlerinin mesafeye bağlı azalım grafikler halinde Şekil 4.43-50' de gösterilmiştir.



Tren Hattına Uzaklık(m)	Kayıt Cihazı No
10	SZ168
17	SZ166
24	SZ171
31	SZ150

Tren Hattına Uzaklık(m)	Deneysel Sonuçlar PGA(gal)	Analitik Çözüm PGA(gal)
10	8.80	8.80
17	8.50	5.39
24	3.70	3.30
31	3.80	2.02

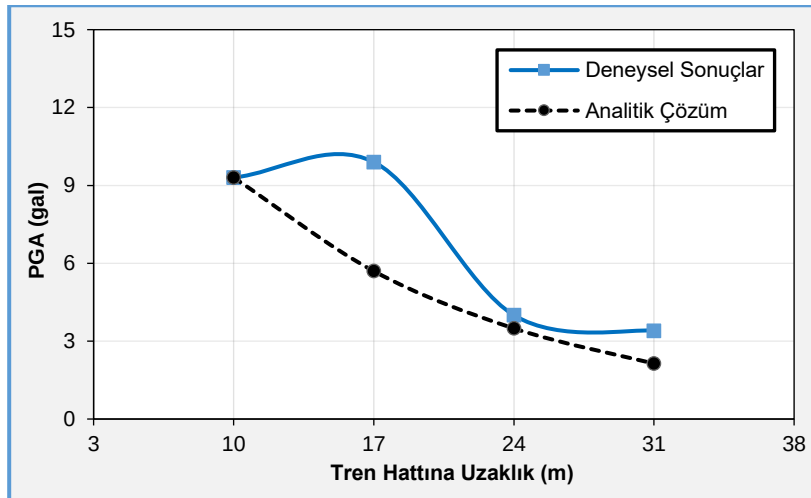
Şekil 4.43: 1.Saha çalışması İstanbul yönü **YHT** serbest zemin hatta dik doğrultuda (N-S) 1.Deney ile analitik çözüm PGA azalım eğrileri karşılaştırma grafiği.



Tren Hattına Uzaklık(m)	Kayıt Cihazı No
10	SZ168
17	SZ166
24	SZ171
31	SZ150

Tren Hattına Uzaklık(m)	Deneysel Sonuçlar PGA(gal)	Analitik Çözüm PGA(gal)
10	8.40	8.40
17	6.00	4.20
24	4.60	2.10
31	2.60	1.05

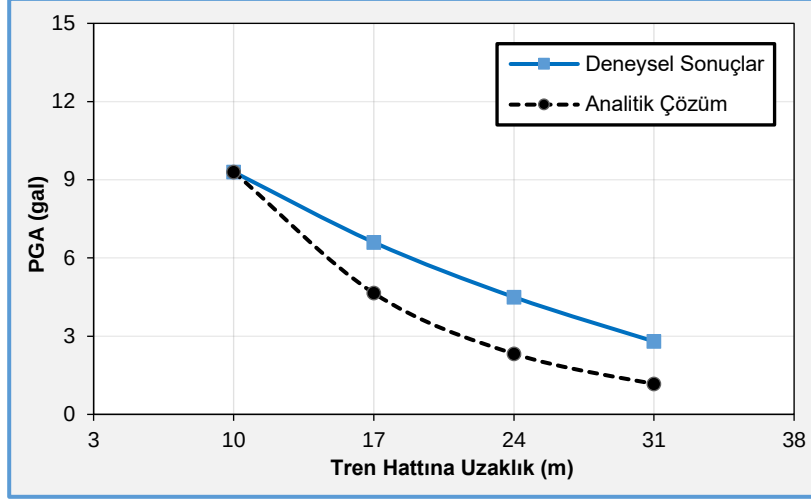
Şekil 4.44: 1.Saha çalışması İstanbul yönü **YHT** serbest zemin hatta paralel doğrultuda (E-W) 1.Deney ile analitik çözüm PGA azalım eğrileri karşılaştırma grafiği.



Tren Hattına Uzaklık(m)	Kayıt Cihazı No
10	SZ168
17	SZ166
24	SZ171
31	SZ150

Tren Hattına Uzaklık(m)	Deneysel Sonuçlar PGA(gal)	Analitik Çözüm PGA(gal)
10	9.30	9.30
17	9.90	5.70
24	4.00	3.49
31	3.40	2.14

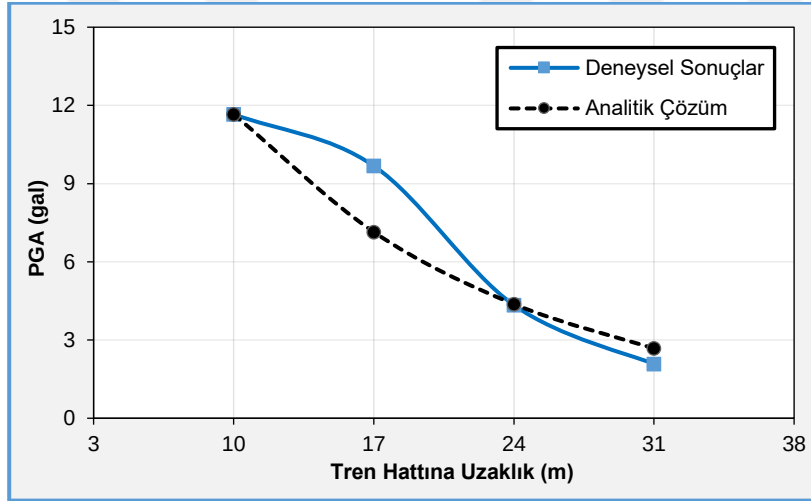
Şekil 4.45: 1.Saha çalışması İstanbul yönü **YHT** serbest zemin hatta dik doğrultuda (N-S) 2.Deney ile analitik çözüm PGA azalım eğrileri karşılaştırma grafiği.



Tren Hattına Uzaklık(m)	Kayıt Cihazı No
10	SZ168
17	SZ166
24	SZ171
31	SZ150

Tren Hattına Uzaklık(m)	Deneysel Sonuçlar PGA(gal)	Analitik Çözüm PGA(gal)
10	9.30	9.30
17	6.60	4.65
24	4.50	2.33
31	2.80	1.16

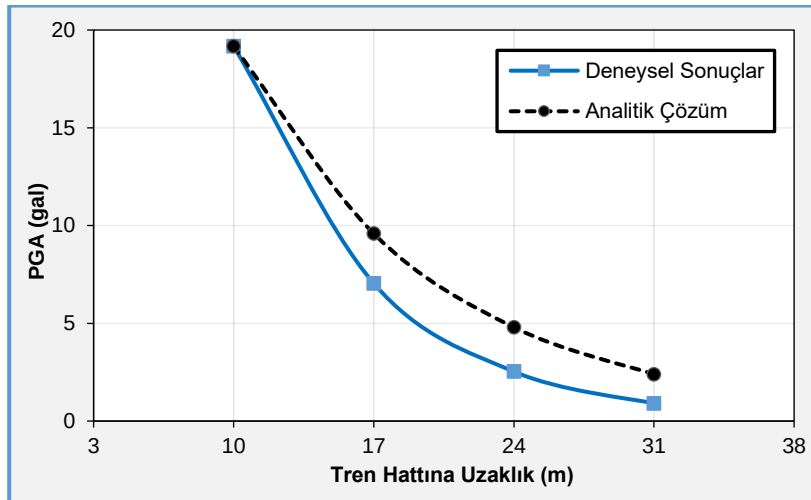
Şekil 4.46: 1.Saha çalışması İstanbul yönü **YHT** serbest zemin hatta paralel doğrultuda (E-W) 2.Deney ile analitik çözüm PGA azalım eğrileri karşılaştırma grafiği.



Tren Hattına Uzaklık(m)	Kayıt Cihazı No
10	SZ153
17	SZ173
24	SZ166
31	SZ172

Tren Hattına Uzaklık(m)	Deneysel Sonuçlar PGA(gal)	Analitik Çözüm PGA(gal)
10	11.66	11.66
17	9.68	7.14
24	4.34	4.38
31	2.08	2.68

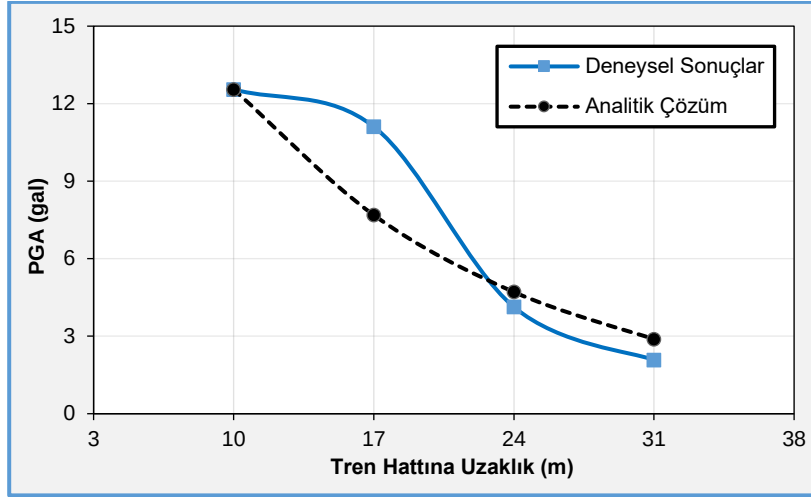
Şekil 4.47: 2.Saha çalışması İstanbul yönü **YHT** serbest zemin hatta dik doğrultuda (N-S) 1.Deney ile analitik çözüm PGA azalım eğrileri karşılaştırma grafiği.



Tren Hattına Uzaklık(m)	Kayıt Cihazı No
10	SZ153
17	SZ173
24	SZ166
31	SZ172

Tren Hattına Uzaklık(m)	Deneysel Sonuçlar PGA(gal)	Analitik Çözüm PGA(gal)
10	19.17	19.17
17	7.04	9.59
24	2.53	4.79
31	0.90	2.40

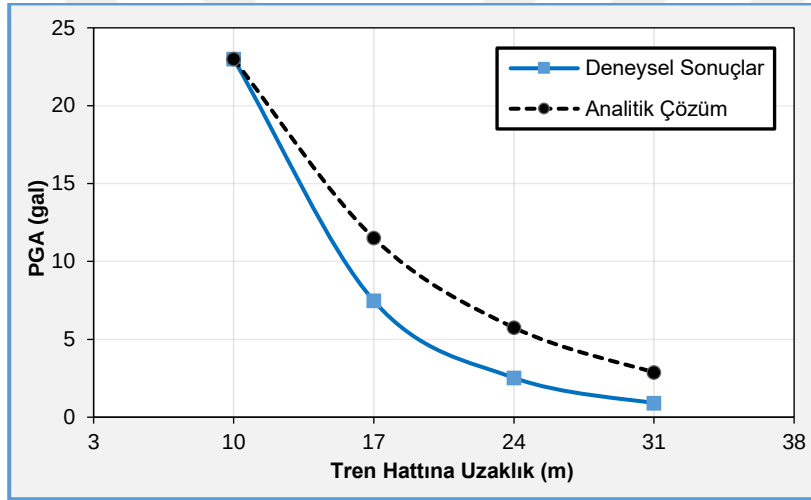
Şekil 4.48: 2.Saha çalışması İstanbul yönü **YHT** serbest zemin hatta paralel doğrultuda (E-W) 1.Deney ile analitik çözüm PGA azalım eğrileri karşılaştırma grafiği.



Tren Hattına Uzaklık(m)	Kayıt Cihazı No
10	SZ153
17	SZ173
24	SZ166
31	SZ172

Tren Hattına Uzaklık(m)	Deneysel Sonuçlar PGA(gal)	Analitik Çözüm PGA(gal)
10	12.55	12.55
17	11.11	7.69
24	4.13	4.71
31	2.08	2.89

Şekil 4.49: 2.Saha çalışması İstanbul yönü **YHT** serbest zemin hatta dik doğrultuda (N-S) 2.Deney ile analitik çözüm PGA azalım eğrileri karşılaştırma grafiği.



Tren Hattına Uzaklık(m)	Kayıt Cihazı No
10	SZ153
17	SZ173
24	SZ166
31	SZ172

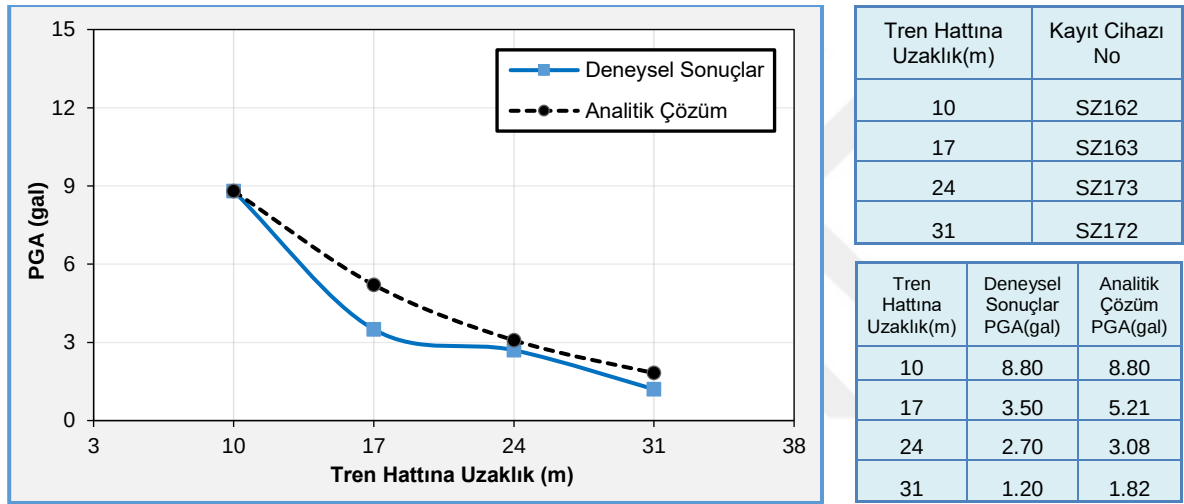
Tren Hattına Uzaklık(m)	Deneysel Sonuçlar PGA(gal)	Analitik Çözüm PGA(gal)
10	22.99	22.99
17	7.47	11.50
24	2.53	5.75
31	0.90	2.88

Şekil 4.50: 2.Saha çalışması İstanbul yönü **YHT** serbest zemin hatta paralel doğrultuda (E-W) 2.Deney ile analitik çözüm PGA azalım eğrileri karşılaştırma grafiği.

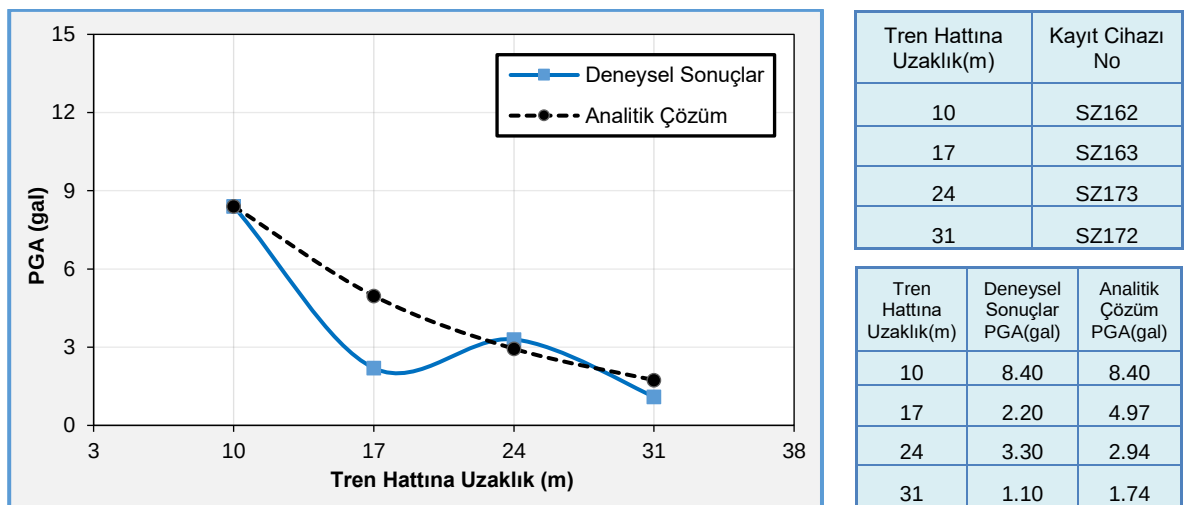
Serbest zemin ortamında Banliyö trenleri, Yük trenleri ve Ankara yönlü YHT geçişleri için yapılan yorumlar geçerliliğini korumuştur. Ankara yönlü tren geçişleri ile İstanbul yönlü YHT tren geçişleri arasında mesafe farkından dolayı ivme genliklerindeki azalma dışında, yön değişikliği bir fark oluşturmamıştır. Ayrıca hatta yakın ikinci noktada pik ivmelerin özellikle hatta dik doğrultuda azalmaması dikkat çekmiştir. Genel olarak yapılan tüm deneysel ölçümlerde; ikinci ölçüm noktasındaki pik ivmelerin çok azalmadığı hatta bazı durumlarda arttığı görülmüştür. Bu durum daha önceki yorumları güçlendirmiş; genel arazi yapısının, zemin tabakalarının Sismik Kırılma ve MASW testi ile belirlenmiş olmasına rağmen ikinci ölçüm noktasında lokal olarak daha gevşek bir zemin yapısı olduğunu düşündürmüştür.

4.4.2 Hendekli Serbest Zemin için DeneySEL ve Analitik Değerlendirme

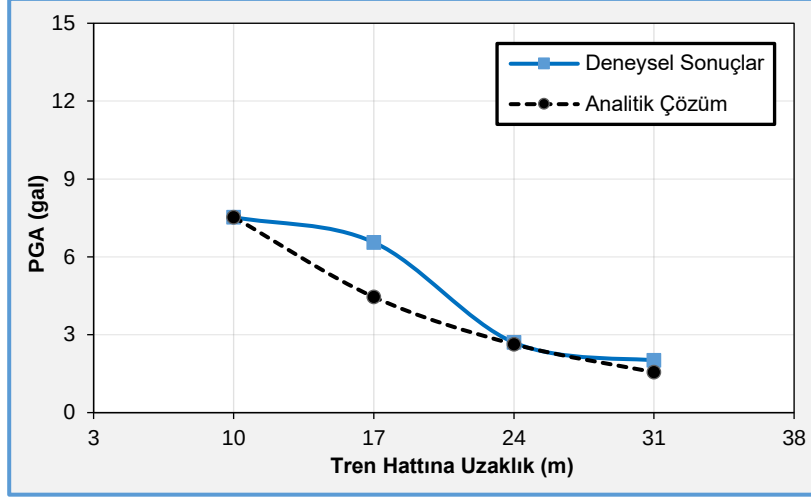
Yapılan üç saha çalışmasında; hendekli serbest zemin ortamında İstanbul yönlü olarak birinci hattan geçen YHT geçişleri için elde edilen deneysel ölçüm noktalarındaki pik ivme genlik değerlerinin hatta dik (Kuzey-Güney) ve hatta paralel (Doğu-Batı) doğrultudaki bileşenleri ile Bornitz'in analitik çözüm yönteminden elde edilen pik ivme genlik değerlerinin mesafeye bağlı azalımı grafikler halinde Şekil 4.51-56' de gösterilmiştir. Eni 1,00 m, yüksekliği 0,60m ebatlarında, içi boş durumdaki hendeğin konumu ikinci hattan 10m uzaklıktaki ilk nokta ile 17m' deki ikinci nokta arasında bulunmaktadır.



Şekil 4.51: 1.Saha çalışması İstanbul yönü **YHT** hendekli serbest zemin hatta dik doğrultuda (N-S) 1.Deney ile analitik çözüm PGA azalım eğrileri karşılaştırma grafiği.



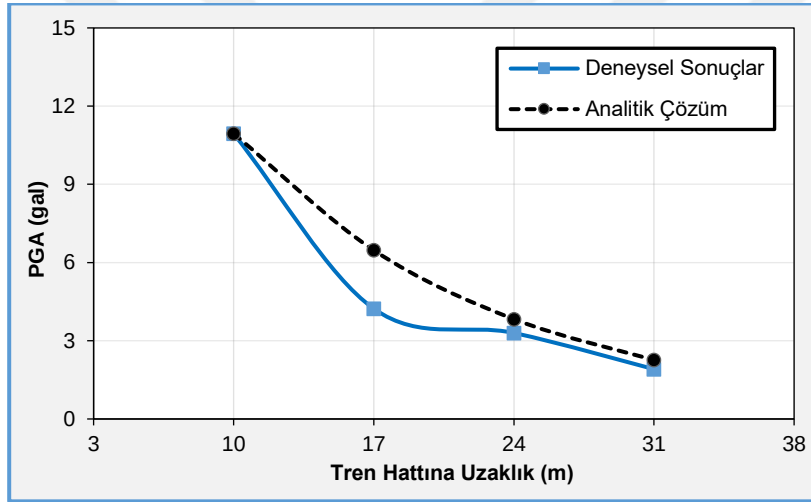
Şekil 4.52: 1.Saha çalışması İstanbul yönü **YHT** hendekli serbest zemin hatta paralel doğrultuda (E-W) 1.Deney ile analitik çözüm PGA azalım eğrileri karşılaştırma grafiği.



Tren Hattına Uzaklık(m)	Kayıt Cihazı No
10	SZ150
17	SZ155
24	SZ157
31	SZ168

Tren Hattına Uzaklık(m)	DeneySEL Sonuçlar PGA(gal)	Analitik Çözüm PGA(gal)
10	7.53	7.53
17	6.56	4.45
24	2.70	2.64
31	2.01	1.56

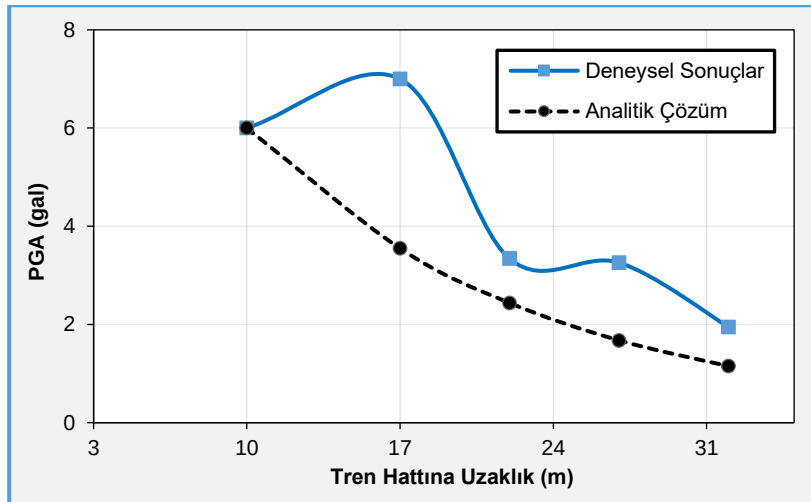
Şekil 4.53: 2.Saha çalışması İstanbul yönü **YHT** hendekli serbest zemin hatta dik doğrultuda (N-S) 1.Deney ile analitik çözüm PGA azalım eğrileri karşılaştırma grafiği.



Tren Hattına Uzaklık(m)	Kayıt Cihazı No
10	SZ150
17	SZ155
24	SZ157
31	SZ168

Tren Hattına Uzaklık(m)	DeneySEL Sonuçlar PGA(gal)	Analitik Çözüm PGA(gal)
10	10.94	10.94
17	4.23	6.47
24	3.30	3.83
31	1.91	2.26

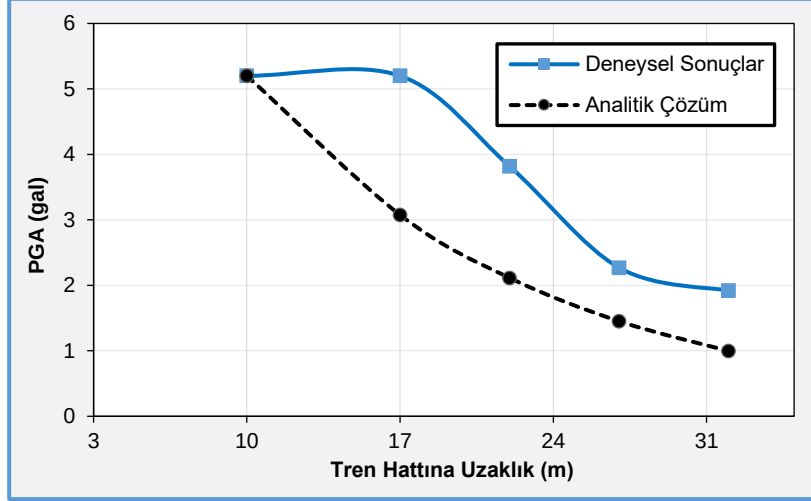
Şekil 4.54: 2.Saha çalışması İstanbul yönü **YHT** hendekli serbest zemin hatta paralel doğrultuda (E-W) 1.Deney ile analitik çözüm PGA azalım eğrileri karşılaştırma grafiği.



Tren Hattına Uzaklık(m)	Kayıt Cihazı No
10	M152
17	M150
22	M157
27	M155
32	M153

Tren Hattına Uzaklık(m)	DeneySEL Sonuçlar PGA(gal)	Analitik Çözüm PGA(gal)
10	6.00	6.00
17	7.00	3.55
22	3.34	2.44
27	3.26	1.68
32	1.95	1.15

Şekil 4.55: 3.Saha çalışması İstanbul yönü **YHT** hendekli serbest zemin hatta dik doğrultuda (N-S) 1.Deney ile analitik çözüm PGA azalım eğrileri karşılaştırma grafiği.



Tren Hattına Uzaklık(m)	Kayıt Cihazı No
10	M152
17	M150
22	M157
27	M155
32	M153

Tren Hattına Uzaklık(m)	Deneysel Sonuçlar PGA(gal)	Analitik Çözüm PGA(gal)
10	5.20	5.20
17	5.20	3.08
22	3.82	2.11
27	2.27	1.45
32	1.92	1.00

Şekil 4.56: 3.Saha çalışması İstanbul yönü **YHT** hendekli serbest zemin hatta paralel doğrultuda (E-W) 1.Deney ile analitik çözüm PGA azalım eğrileri karşılaştırma grafiği.

Hendekli serbest zemin ortamında YHT geçişlerinden elde edilen deneysel sonuçlara bakıldığında hendek bulunan 10-17m aralığında pik ivme genliklerindeki azalmanın birinci saha çalışmasında daha fazla olduğu anlaşılmaktadır. İkinci saha çalışmasında yine hatta yakın ikinci noktada pik ivmelerin çok azalmadığı gözlenmiştir. Üçüncü saha çalışmasında beton kilit parke taşı kaplanmış zemin ve hendek bariyerin azaltıcı etkileri olmuştur. Genel olarak içi boş hendek bariyer ve beton kilit parke taşı varlığı; hatta yakın ikinci nokta haricinde deneysel olarak elde edilen pik ivme genlik değerlerini hendeksiz ve alüvyon gevşek zemin duruma göre daha çok azalttığı görülmektedir.

4.5 Tüm YHT Geçişlerinin Deneysel ve Analitik olarak Değerlendirilmesi

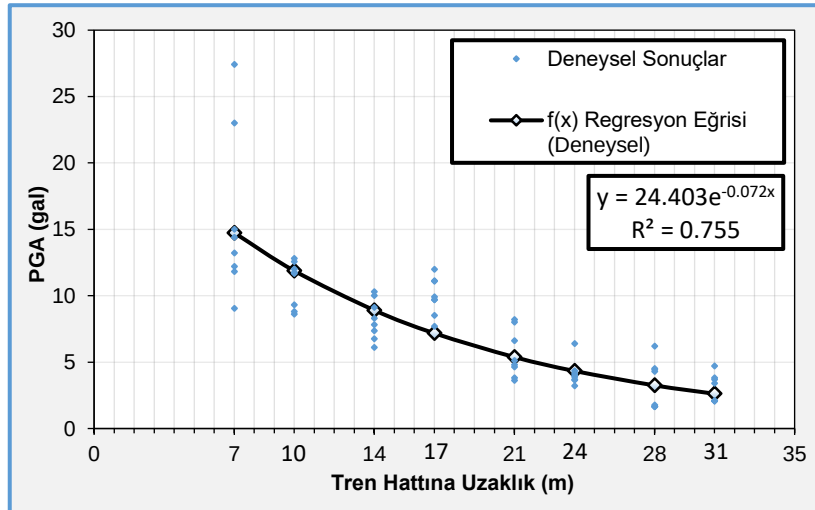
Banliyö trenleri ve Yük trenlerine göre daha yüksek frekans içeriği, pik ivme genlik değerlerine sahip YHT geçişlerinde oluşan titreşimlerin zeminleri ve dolayısıyla çevre yapıları daha fazla etkileyeceği aşikardır. Bu gibi durumlarda titreşim dalgası genliklerinin deneysel veya analitik olarak elde edilmesinde olabildiğince net sonuçlara ulaşılması önem alma, planlama ve değerlendirme açısından önem arz etmektedir.

Yapılan tüm değerlendirmelerde YHT geçişlerinden elde edilen hatta dik ya da paralel doğrultudaki analitik çözüm sonuçları mesafeye göre orantılı bir azalma göstermişken, deneysel sonuçlar orantılı bir azalım ilişkisi göstermemiştir. Bu durum deneysel sonuçlardaki farklılıkların doğal zemin koşullarındaki tabaka geçişlerinin olduğu ya da lokal ceplerin bulunduğu zemin ortamında yansıyan, kırılan, saçılan ve soğurulan dalgaların

varlığını düşündürsede aynı noktalardan farklı ölçüm sonuçları alınabildiği gerçeğini değiştirmez. Bornitz analitik çözümü orantılı bir azalım göstermesine rağmen hendek varlığını hesaba katamaması, zemin ortamındaki farklılıkları sonuçlara yansıtamaması gibi deavantajları sebebiyle geliştirilmesi gerekliliği ortaya çıkmaktadır. Ayrıca Bornitz analitik çözüm yönteminde geometrik sönüm ve malzeme sönüm katsayıları seçiminde ya da hesaplanmasında çok farklı seçenekler olmasıyla birlikte net sonuçlar elde edilmesi için deneysel verilerden yararlanılmadığında oldukça zor ve karmaşıktır. Bu durumlar baz alındığında daha net sonuçlar elde etmek amacıyla deneysel verilerin hata oranlarını düşürerek idealize edilmesine yönelik regresyon analizi yapılmasının doğru olacağı düşünülmüştür.

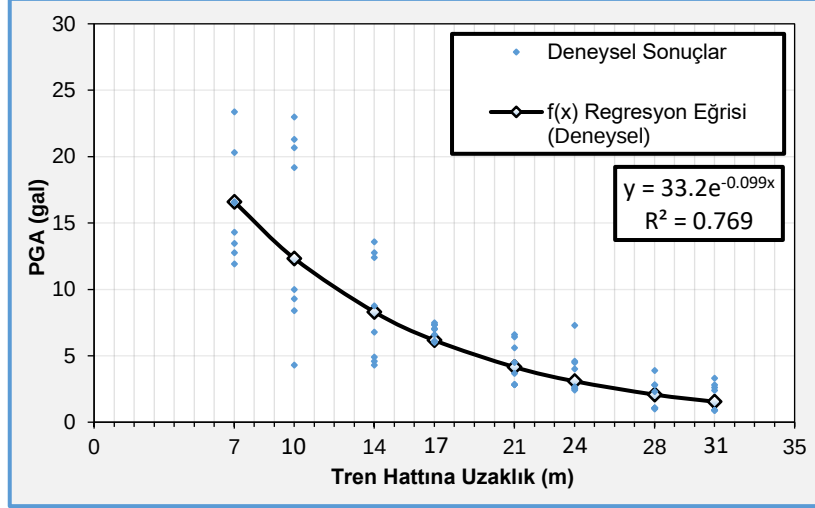
4.5.1 Serbest Zemin için Deneysel ve Analitik Değerlendirme

Birinci ve ikinci saha çalışmaları serbest zeminde (Alüvyon gevşek zemin ortamında) tüm YHT geçişleri için elde edilen deneysel pik ivme genlikleri kullanılarak Excel programı ile Regresyon analizi yapılmıştır. Yapılan Regresyon analizi sonucunda mesafeye bağlı pik ivme genlik değerlerinin azalımına ait eğri için en yüksek korelasyon gözetilmiş ve üstel bir fonksiyon olarak hem hatta dik (N-S) hem de hatta paralel (E-W) doğrultularda Şekil 4.57-58’de verilmiştir.



Şekil 4.57: **YHT** serbest zemin hatta dik doğrultuda (N-S) 1-2.Saha deneyi sonuçları PGA (pik ivme genlik) azalımı Regresyon eğrisi.

Denklemden; x: Dinamik yük kaynağına olan mesafe, y: x'e bağlı pik ivme genlik değeridir.



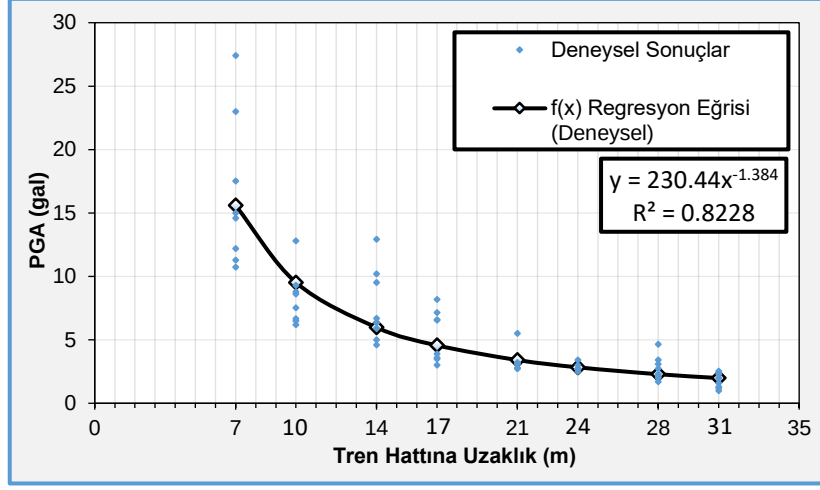
Şekil 4.58: **YHT** serbest zemin hatta paralel doğrultuda (E-W) 1-2.Saha deneyi sonuçları PGA (pik ivme genlik) azalımı Regresyon eğrisi.

Yapılan Regresyon analizi sonucunda hem hatta dik hemde hatta paralel elde edilen analitik fonksiyonların belirtme katsayısı (R^2) değerinin %70'in üzerinde çıkması bağımlı ve bağımsız değişkenler arasında kuvvetli ilişki olduğunu göstermiştir.

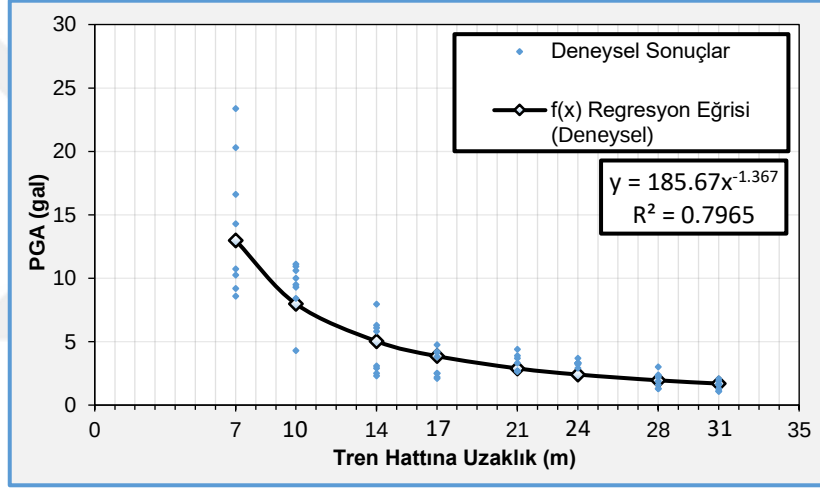
4.5.2 Hendekli Serbest Zemin için Deneysel ve Analitik Değerlendirme

Birinci ve ikinci saha çalışmaları (Alüvyon gevşek zemin ortamında), üçüncü saha çalışması (Beton kilit parke taşı kaplanmış zemin etkileri) hendekli serbest zeminde tüm YHT geçişleri için elde edilen deneysel pik ivme genlikleri kullanılarak Excel programı ile Regresyon analizi yapılmıştır. Yapılan Regresyon analizi sonucunda mesafeye bağlı pik ivme genlik değerlerinin azalımına ait eğri için en yüksek korelasyon gözetilmiş, üçüncü saha çalışması için üstel fonksiyon, birinci ve ikinci saha çalışmaları için kuvvet fonksiyonu olarak hem hatta dik (N-S) hem de hatta paralel (E-W) doğrultularda Şekil 4.59-62'de verilmiştir.

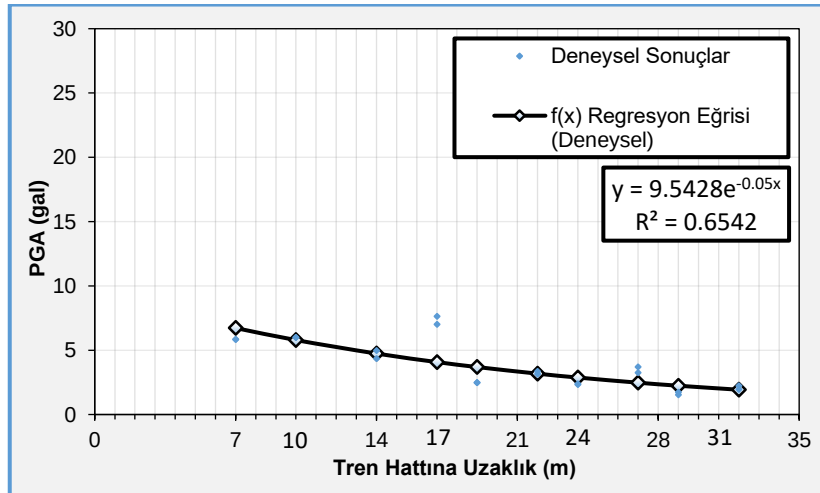
Yapılan Regresyon analizi sonucunda birinci ve ikinci saha çalışmaları için hem hatta dik hemde hatta paralel elde edilen analitik fonksiyonların belirtme katsayısı (R^2) değerinin %70'in üzerinde çıkması bağımlı ve bağımsız değişkenler arasında kuvvetli ilişki olduğunu göstermiştir. Üçüncü saha çalışması için hatta paralel elde edilen analitik fonksiyonun belirtme katsayısı (R^2) değerinin %70'in üzerinde çıkması bağımlı ve bağımsız değişkenler arasında kuvvetli ilişki olduğunu, hatta dik doğrultuda ise elde edilen analitik fonksiyonun belirtme katsayısı (R^2) değerinin %50-70 aralığında çıkması bağımlı ve bağımsız değişkenler arasında orta seviyede ilişki olduğunu göstermiştir.



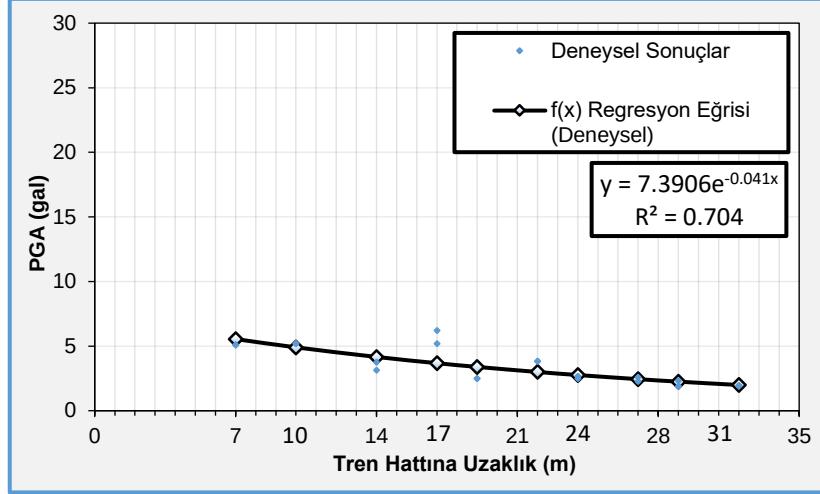
Şekil 4.59: YHT hendekli serbest zemin hatta dik doğrultuda (N-S) 1-2.Saha deneyi sonuçları PGA (pik ivme genlik) azalımı Regresyon eğrisi.



Şekil 4.60: YHT hendekli serbest zemin hatta paralel doğrultuda (E-W) 1-2.Saha deneyi sonuçları PGA (pik ivme genlik) azalımı Regresyon eğrisi.



Şekil 4.61: YHT hendekli serbest zemin hatta dik doğrultuda (N-S) 3.Saha deneyi sonuçları PGA (pik ivme genlik) azalımı Regresyon eğrisi.



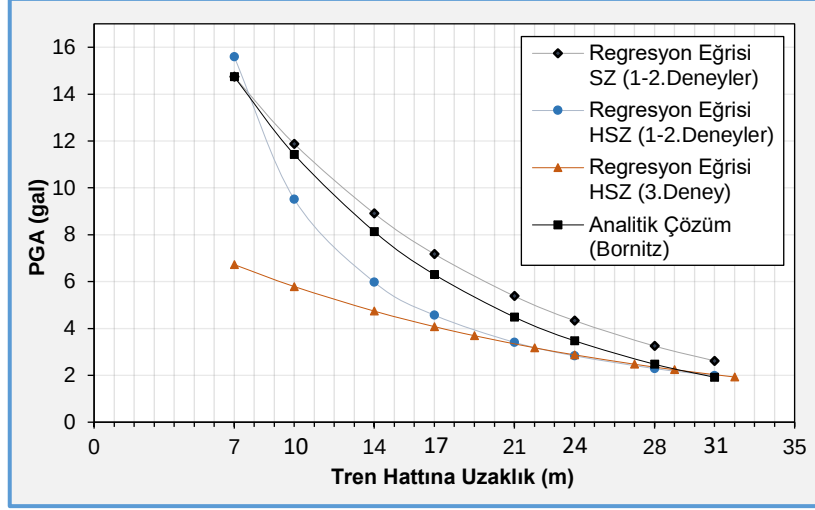
Şekil 4.62: **YHT** hendekli serbest zemin hatta paralel doğrultuda (E-W) 3.Saha deneyi sonuçları PGA (pik ivme genlik) azalımı Regresyon eğrisi.

4.6 Alüvyon-Beton Parke Kaplama Zemin Deneyel ve Analitik Değerlendirilmesi

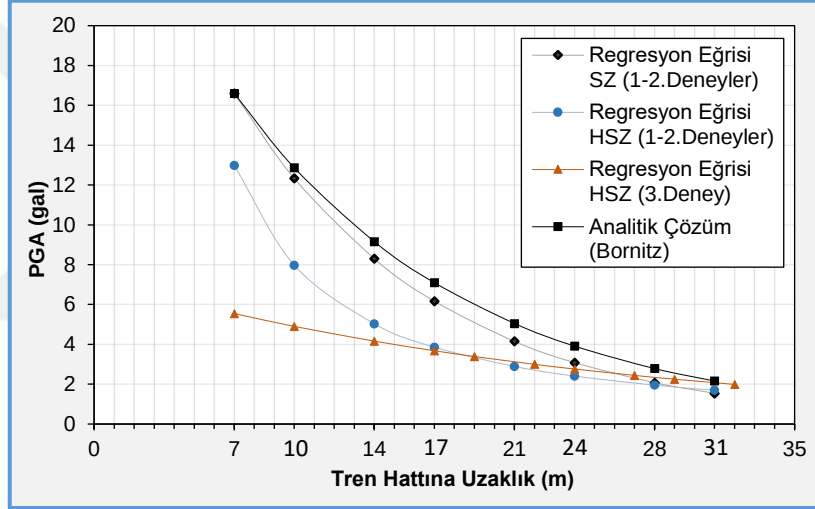
Yapılan ilk iki saha çalışmalarında; alüvyon yumuşak zeminde trenlerin geçişi ile oluşan titreşimlere ait hatta dik doğrultuda (N-S) ve hatta paralel (E-W) doğrultuda deneyel olarak pik ivme genlikleri ölçülmüştür. İlk iki saha çalışması deneyel sonuçlarından elde edilen pik ivme genlikleri kullanılarak serbest zemin ve hendekli serbest zemin için regresyon eğrileri elde edilmiştir.

Üçüncü saha çalışmasında yine deneyel ivme ölçümleri yaptığımız hendekli serbest zemin bölgesinde hatta yakın 1-2. ölçüm noktaları arasına döşenen 10 cm kalınlığında beton kilit parke taşı, 5cm harç ve 5 cm kum dolgu uygulama malzemeleri ile birlikte 20 cm kalınlığında bir tabaka oluşturmıştır. Hatta yakın 1-2. ölçüm noktaları arasında kısmen beton kilit parke taşı uygulanmış hendekli serbest zemin tabakası için deneyel ölçüm sonuçlarından hatta dik doğrultuda (N-S) ve hatta paralel doğrultuda (E-W) regresyon eğrileri elde edilmiştir.

Birinci ile ikinci saha çalışmalarında alüvyon zemin ortamı ve üçüncü saha çalışmasında ise kısmen beton kilit parke taşı uygulanmış zemin ortamı için elde edilen regresyon eğrileri ile Bornitz analitik çözüm yöntemiyle serbest zemin için elde edilen pik ivme genlik azalım eğrisi karşılaştırma grafikleri hatta dik doğrultuda (N-S) ve hatta paralel doğrultuda (E-W) Şekil 4.63-64'te verilmiştir.



Şekil 4.63: YHT hatta dik doğrultuda (N-S) 1-2. ve 3. Saha deneyi sonuçları PGA (pik ivme genlik) azalımı Regresyon eğrileri ile Analitik çözüm (Bornitz) karşılaştırmaları.



Şekil 4.64: YHT hatta paralel doğrultuda (E-W) 1-2. ve 3. Saha deneyi sonuçları PGA (pik ivme genlik) azalımı Regresyon eğrileri ile Analitik çözüm (Bornitz) karşılaştırmaları.

Her iki doğrultudaki Bornitz eğrisi ile 1-2. Deneyler serbest zemin regresyon eğrisi pik ivme genlikleri orantılı azalmıştır. Analitik çözümle elde edilen pik ivme genlikleri, 1-2. Deneyler regresyon sonuçlarına göre hatta dik doğrultuda (N-S) daha düşük değerler gösterirken hatta paralel doğrultuda (E-W) daha yüksek değerler göstermiştir. 1-2. Deneyler hendekli serbest zeminde elde edilen pik ivme genlikleri her iki doğrultuda da serbest zemine göre özellikle 7-14m aralığında daha çok azalma göstermiştir. 3. Deneyde ise beton kilit parke taşı etkisiyle 7-14m aralığındaki pik ivme genlik değerleri diğer tüm deneyler ve analitik çözümden çok daha düşük olmuştur. Her iki grafiğe göre hendek varlığının pik ivme genliklerinde azaltıcı etkileri olmuştur. Beton kilit parke taşı tabakasındaki pik ivme genlikleri, alüvyon gevşek zemin tabakasına göre oldukça düşük çıkarak zemin tabakası farkını göstermiştir.

BÖLÜM 5

SONUÇ VE ÖNERİLER

Yapılan bu tez çalışmasında, TCDD genel taşımacılık hizmetleri için kullanılan Banliyö treni, Yük treni ve özelliklede YHT (Yüksek hızlı tren) geçişlerinin alüvyon zemin ortamında sebep olduğu titreşim oluşum mekanizmasının ve dalga yayılım özelliklerinin belirlenmesine odaklanılmıştır. Ayrıca YHT geçişlerindeki titreşimlerin beton kilit parke taşı ile kaplanmış zemin ortamında oluşturduğu ivmelerin alüvyonal zemin katmanlarına göre ne kadar azaldığı araştırılmıştır. Titreşim enerjisinin zemin ortamında soğurulmasını geometrik sönüme ve malzeme sönümüne bağlı tanımlayan Bornitz analitik çözümü ile ardışık gözlem noktalarındaki deneysel ölçüm sonuçlarının karşılaştırılması için İzmit-Arifiye arasında bulunan Kırkpınar bölgesi çalışma sahası olarak seçilmiştir. Zeminin dinamik özelliklerinden olan kayma dalgası hızı yapılan Sismik Kırılma ve MASW analizi ile $V_s < 200$ m/sn olarak belirlenmiştir.

Genel olarak analitik çözümlerle elde edilen titreşim azalım ilişkisi mesafeye bağlı olarak orantılı bir şekilde azalmışken, deneysel ölçümlerdeki titreşim soğurulması orantılı bir azalım göstermemiştir. Deneysel sonuçlardaki bu farklılıklar doğal zemin koşullarındaki tabakalı zemin ortamında yansıyan, kırılan, saçılan ve soğurulan dalgaların varlığını düşündürmüştür. Bornitz analitik çözümünün orantılı bir azalım göstermesine rağmen hendek varlığını hesaba katamaması, zemin ortamındaki lokal değişiklikleri (kaya parçası, dolgu tabakası gibi) sonuçlara yansıtamaması gibi deavantajları sebebiyle geliştirilmesi gerekliliği ortaya çıkmaktadır. Analitik çözüm sonuçları doğrusal bir azalım ilişkisi olduğunu düşündürse de doğal arazi koşullarındaki lokal değişimler sebebiyle deneysel sonuçlarda bu durum pek mümkün olmamaktadır. Ayrıca Bornitz analitik çözüm yönteminde geometrik sönüm ve malzeme sönüm katsayıları seçiminde ya da hesaplanmasında çok farklı seçenekler olmasıyla birlikte net sonuçlar elde edilmesi için deneysel verilerden yararlanılmadığında oldukça zor ve karmaşıktır. Bu durumlar baz alındığında daha net sonuçlar elde etmek amacıyla deneysel verilerin hata oranlarını düşürerek idealize edilmesine yönelik regresyon analizi yapılmasının daha doğru olacağı düşünülmüştür. Yapılan deneysel ölçümlerin güvenilirliğinin daha yüksek olmasından dolayı deneysel veriler değerlendirilerek, serbest zemin ve hendekli serbest zemin için ivme

genliklerinin azalım eğrilerine ait fonksiyonlar regresyon analizi ile elde edilmiştir. YHT geçişlerinin oluşturduğu titreşimlere ait deneysel sonuçlardan elde edilen regresyon analizi formülasyonlarının oldukça yüksek korelasyonlu olması belirli noktalardaki ivme genlikleri azalımının hesaplanabilmesi için analitik çözüm yönteminin geçerliliğini göstermiştir. Alüvyon zeminler ve beton kilit taşı ile kaplanmış zemin koşullarındaki dalga yayılımı yapılan bu tez çalışmasıyla deneysel ve analitik olarak incelenmiştir. Sonuç olarak, beton kilit taşı kaplanmış zemin koşullarında hem deneysel olarak ölçülen hemde analitik olarak hesaplanan ivme genliklerinde bir miktar daha azalmanın olduğu anlaşılmıştır. Ayrıca hendekli serbest zeminde ölçülen ve analitik olarak hesaplanan ivme genliklerinde, serbest zemindeki genlik değerlerine oranla daha fazla azalım ilişkisi elde edilmiştir.



KAYNAKLAR

- Adolfsson, K., Andréasson, B., Bengtson, P-E., Bodare, A., Madshus, C., Massarch, R., Wallmark, G., Zackrisson, P. (1999). "High speed lines on soft ground. Evaluation and analyses of measurements from the West Coast Line", Technical Report, Banverket, Sweden.
- Anon. (2011). İzmir ili, Çiğli İlçesi, Balatçık Mah., 26K-IVC Pafta, 22134 Ada, 2 Parsel, Blok1 Zemin Etüdü Raporu (27-28.02.2011) İzmir.
- Anon. (2019). SUBÜ Kırkpınar turizm MYO uygulama oteli çalışma sahası MASW, Sismik Kırılma Deney Raporu (24.03.2019) Sakarya.
- Amick, H., and Ungar, E. E. (1987). "Evaluation of Ground and Structural Vibrations from Pile Driving". BBN Report No. 6427, January.
- Amick, H., Gendreau, M. (2000). "Construction vibrations and their impact on vibration sensitive facilities", ASCE Construction Congress VI, Orlando, Florida, U.S.A., 758-767.
- Athanasopoulos G.A. Pelekis P.C. Anagnostopoulos G.A., (2000). Effect of soil stiffness in the attenuation of Rayleigh-wave motions from field measurements, Soil Dyn. Earthq. Eng., 19, 277–288.
- Auersch, L. (1989). Forschungsbericht 155, Bundesanstalt für Materialforschung und-prüfung, Berlin, Zur Entstehung und Ausbreitung von Schienenverkehrserschütterungen-theoretische Untersuchungen und Messungen an Hochgeschwindigkeitszug Intercity Experimental.
- Aydın, U. (2006). "Erzurum Merkezli Doğu Anadolu Bölgesinde Yakın Alan Depremleri için Sismik Dalga Sönüm Oranı Hesaplaması", Yüksek Lisans Tezi, ÇÜ., FBE.
- Barkan, D. D. (1962). Dynamics of Bases and Foundations, translated from the Russian by L. Drashevskaya, edited by G. P. Tschebotarioff, McGraw-Hill.
- Bata, M. (1971). "Effects on buildings of vibrations caused by traffic", Building Science, 6(4), 221-246.
- Bornitz, G. (1931). Über die Ausbreitung der von Groszkolbenmaschinen erzeugten Bodenschwingungen in die tiefe. Springer: Berlin.
- Branderhorst, J. (1997). "Modellen voor het boeggolfprobleem bij hogesnelheidstreinen. Ontwerp en validatie met behulp van de resultaten van de proef Amsterdam–Utrecht", Master's Thesis, University of Twente, Enschede, Netherlands.
- BS-British Standard 6472 Parts 1 and 2 (2008). Guide to evaluation of human exposure to vibration in buildings. UK.

- Buonsanti, M., Cirianni, F., Leonardi, G., Santini, A., Scopelliti, F. (2009). “Mitigation of railway traffic induced vibrations: the influence of barriers in elastic half space”, Hindawi Publishing Corporation, Advances in Acoustics and Vibration, 1-7s.
- Burgemeister, K.; Fisher, K.; Franklin, K. (2011). Measurement and prediction of construction vibration affecting sensitive laboratories. Proc. Acoust. 33, 20–26.
- Crispino, M., D'apuzzo, M. (2001). “Measurement and Prediction of Traffic-Induced Vibrations In A Heritage Building”, Journal of Sound and Vibration, 246 (2), 319-335.
- Czech, KR. (2016). The Impact of the Type and Technical Condition of Road Surface on the Level of Traffic-Generated Vibrations Propagated to the Environment. Procedia Engineering. 143: 1358-67.
- Çelebi, E., Kırtel, O., Göktepe, F., Zülfişkar, A.C., Faizan, A.A., İstegün, B., Şahin, M., Ateş, S., Tekergül, E. (2019). “Saha koşullarında yüksek hız trenlerinin oluşturduğu çevresel titreşimlerin belirlenmesi ve yapısal titreşimlerin azaltılması”, TÜBİTAK 1001 Bilimsel ve Teknolojik Araştırma Projesi, MAG, Proje No: 217M427, 1. Gelişme Raporu.
- Degrade, G., Schillemans, L. (2001). “Free field vibrations during the passage of a Thalys HST at variable speed”, Journal of Sound and Vibration, 247(1), 131-144.
- DIN 4150-2. (1999). Structural vibration - Human exposure to vibration in buildings. Germany.
- DIN 4150-3. (1999). Structural vibration - Effects of vibration on structures. Germany.
- Erkal, A. (2017). Tren geçişlerinin Küçük Ayasofya Cami üzerinde ve yanındaki serbest zemin yüzeyinde oluşturduğu titreşimlerin deneysel olarak incelenmesi. Uludağ Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Dergisi, Cilt 22, Sayı 3.
- Eyidoğan, H. (2012). 50 Soruda Deprem, Bilim ve Gelecek Kitaplığı, Ekim 2012, 2. Baskı, s. 61-65.
- FTA-Federal Transit Administration Report (2005). High-speed Ground Transportation Noise and Vibration Impact Assessment. U.S.A.
- Göktepe, F. (2013). Yüksek Hızlı Trenlerin Çevre Yapılarda Oluşturduğu Titreşimlerin Önlenmesi için Bariyer Sistemlerin Etkinliğinin Parametrik Olarak İncelenmesi, Doktora Tezi, SAÜ., FBE.
- Göktepe, F., Küyük, H. S., Çelebi, E. (2017). In-situ measurement of railway-traffic induced vibrations nearby the liquid-storage tank, Earthquakes and Structures 12 (5), 583-589).
- Güçlü, R., Metin, M., Yazıcı, H., Yalçın, N.S. (2007-2010). “Raylı Sistem Titreşimlerinin Yolcu ve Çevre Üzerindeki Etkilerinin İncelenmesi”, TÜBİTAK 1001 Bilimsel ve Teknolojik Araştırma Projesi, MAG, Proje No: 106M443.

- Gürel, M. (2008). “Sismik Yöntemlerle Gaz Hidratların Aranması”, Yüksek Lisans Tezi, İTÜ., FBE.
- Hasheminezhad, A. (2014). Reduction of Railway-induced Vibration using In-filled Trenches with Pipes. *IJR International Journal of Railway*, Vol. 7, No. 1 / March 2014, pp. 16-23.
- Hiller D. M., Crabb G. I. (2000). Groundborne Vibration caused by Mechanised Construction Works, TRL Limited, Crowthorne, Report 429.
- İyisan, R. (1994). Geoteknik Özelliklerin Belirlenmesinde Sismik ve Penetrasyon Deneylerinin Karşılaştırılması, Doktora Tezi, İTÜ., FBE.
- Jayawardhana, W.A.P.D., Jayawardhana, B.M.B.H., Subashi De Silva, G.H.M.J. and De Silva, G.S.Y. (2014). “Investigation on Characteristics of Vibration Induced by Soil Roller Compaction and Effectiveness of Damping Layer to Reduce the Vibration”, Special Session on Design & Construction, Proceedings of 5th International Conference on Sustainable Built Environment (ICSBE-2014), Kandy, Sri Lanka, December, pp. 129-136.
- Ju, S.-H., Ni, S.-H. (2007). Determining Rayleigh damping parameters of soils for finite element analysis. *Int. J. Numer. Anal. Methods Geomech.* 31, 1239–1255.
- Kim D-S, Lee J-S. (2000). Propagation and attenuation characteristics of various ground vibrations. *Soil Dynam Earthquake Eng* 19:115–126.
- Kramer, S.L. (1996). Geotechnical earthquake engineering, Prentice-Hall Inc, Upper Saddle River, NJ, USA.
- Love, A. E. H., (1911). Some Problems of Geodynamics, Cambridge University Press.
- Ma, M., V. Markine, W.-N. Liu, Y. Yuan, and F. Zhang. (2011). “Metro train-induced vibrations on historic buildings in Chengdu, China,” *Journal of Zhejiang University: Science A*, vol. 12, no. 10, pp. 782–793.
- Macijauskas, D., Van Baars, S. (2014). Propagation of harmonical vibrations in peat. *International Journal of Geomate* 7(14): 1101-1106.
- Massarsch, K. R. (1993). “Man-made Vibrations and Solutions”, State-of the-Art Lecture, Third International Conference on Case Histories in Geotechnical Engineering, St. Louis, Missouri, U.S.A., II, 1393-1405.
- Massarsch, K. R. (2004). “Mitigation of Traffic-induced Ground Vibrations”, Keynote Lecture, 11th International Conference on Soil Dynamics and Earthquake Engineering and 3rd on Earthquake Geotechnical Engineering, University of California, Berkeley, U.S.A.

- Ni, Sheng-Huoo., Kuo, Hsiu-Hsien., Ju, Shen-Haw and Guo, Jing-Lin. (2017). In-Situ measurement of the vibration decay characteristics of alluvial soil deposits, *Journal of GeoEngineering*, Vol. 12, No. 3, pp. 109-118, September.
- Rayleigh, L. (1885). On waves propagated along the plane surface of an elastic solid, *London Mathematical Society Proceedings*, Vol. 17, pp. 4-11.
- Ren, X.W., Wu, J.F., Tang, Y.Q. and Yang, J.C. (2019). "Propagation and attenuation characteristics of the vibration in soft soil foundations induced by high-speed trains", *Soil Dyn. Earthq. Eng.*, 117, 374-383.
- Reynolds, J.M. (1998). An introduction to applied and environmental geophysics. John Wiley and sons, Chichester, UK, 796 pp.
- Richart, F. E. (1962). "Foundation Vibrations," *ASCE Transactions*, v. 127, part I, pp. 863-898.
- Richart, F.E., Hall, J.R., Woods, R.D. (1970). *Vibrations of solids and foundations*, Prentice-Hall.
- Roeset, J.M., K.H. Stokoe, II, D.W. Chang, and M. Aouad, (1990). "Modulus and Thickness of the Pavement Surface Layer from SASW Tests," *Transportation Research Board Annual Meeting*, Washington.
- Sreekala, R., Lakshmanan, N., Muthumani, K., Gopalakrishnan, N., and Sathishkumar, K. (2008). "Potential of Vibration Studies in the Soil Characterization Around Power Plants – A Case Study". *International Conference on Case Histories in Geotechnical Engineering*. 12.
- Şahin, M., Göktepe, F., Çelebi, E., Zülfişkar, A.C., Kırtel, O. (2019). "Farklı Frekans İçeriklerine Sahip Tren Geçişlerinde Oluşan Titreşim Enerjisinin Soğurulmasının Deneysel ve Analitik Olarak Değerlendirilmesi". *8.Uluslararası Geoteknik Sempozyumu 13-15 Kasım 2019, İTÜ Ayazağa Kampüsü, İstanbul*.
- Truong, H.V.P. (2012). "Dynamic Site-Amplification Factors and Dynamic Attenuation Factors by Dynamic Soil Mass". *Proc. 15th World Conference on Earthquake Engineering (15WCEE)*, Lisbon, Portugal 24-28, September.
- URL-1 (2020). <https://player.slideplayer.biz.tr/58/11793479/data/images/img30.png>, Yrd. Doç. Dr Mehmet Alpaslan Köroğlu, Deprem Mühendisliği Esasları, Ders Notu, (05.05.2020).
- Yang, S. J. (1981). "Attenuation of Ground Vibration Induced by Dynamical Machinery". *International Conferences on Recent Advances in Geotechnical Earthquake Engineering and Soil Dynamics*. 18.
- Yıdırar, Y. (2000). Beklenen büyük marmara depremi, *Sınır Ötesi Yayınları*, s. 54-64, Kasım.

- Yıldız, H. (2008). “İstanbul’da Sondaj Kuyularında Ps Logging Yöntemi ile Ölçülen Kayma Dalgası Hızının SPT-N ile değişimi”, Yüksek Lisans Tezi, İTÜ., FBE.
- Yığiter, N. (2008). “İsparta Çünür Bölgesi’nde Yüzey Dalgası Yöntemi ile Zemin Özelliklerinin Araştırılması”, Yüksek Lisans Tezi, SDÜ, FBE.
- Zhang, N., H. Xia, W. Yang and S. Zhao. (2011). Prediction and control of building vibration under metro excitations [A], Proceedings of the 8 th International Conference on Structural Dynamics (EURODYN 2011) Leuven, Belgium, 705-711.
- Wiss, J. F. (1967). “Damage Effects of Pile Driving Vibration,” Highway Research Board Record 155, pp. 14-20.
- Woods, R. D. (1967). “Screening of Elastic Waves by Trenches,” Journal of Soil Mechanics Division, ASCE, v. 94, no. SM4, pp. 951-979.
- Xia, H., Zhang, N., Cao, Y.M. (2005). “Experimental study of train-induced vibrations of environments and buildings”, Journal of Sound and Vibration, 280 (3–5), 1017–1029.
- Xia, H., Cao, Y., De Roeck, G., Degrande, G. (2007). “Environmental problems of vibrations induced by railway traffic”, Frontiers of Architecture and Civil Engineering in China, 1 (2), 142-152.