



T.C.
KONYA TEKNİK ÜNİVERSİTESİ
LİSANSÜSTÜ EĞİTİM ENSTİTÜSÜ



KİL ZEMİNLER ÜZERİNE OTURAN
MAKİNE TEMELLERİNİN ZEMİNİN
DİNAMİK DAVRANIŞI ÜZERİNDEKİ ETKİSİ

Tuba Özge NAKİPOĞLU

DOKTORA TEZİ

İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı

Ocak-2024
KONYA
Her Hakkı Saklıdır

TEZ KABUL VE ONAYI

Tuba Özge NAKİPOĞLU tarafından hazırlanan “Kil Zeminler Üzerine Oturan Makine Temellerinin Zeminin Dinamik Davranışı Üzerindeki Etkisi” adlı tez çalışması 25/01/2024 tarihinde aşağıdaki jüri tarafından oy birliği ile Konya Teknik Üniversitesi Lisansüstü Eğitim Enstitüsü İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı’nda DOKTORA TEZİ olarak kabul edilmiştir.

Jüri Üyeleri

İmza

Başkan

Prof. Dr. Atilla ÖZÜTOK
(KTO Karatay Üniversitesi)

.....

Danışman

Prof. Dr. Mustafa YILDIZ
(Konya Teknik Üniversitesi)

.....

Üye

Prof. Dr. Murat OLGUN
(Konya Teknik Üniversitesi)

.....

Üye

Doç. Dr. Bekir Kamil AFACAN
(Eskişehir Osmangazi Üniversitesi)

.....

Üye

Dr. Öğr. Üyesi İbrahim Hakkı ERKAN
(Konya Teknik Üniversitesi)

.....

Yukarıdaki sonucu onaylarım.

Prof. Dr. Mevlüt UYAN
Enstitü Müdürü

Bu tez çalışması Konya Teknik Üniversitesi Öğretim Üyesi Yetiştirme Programı tarafından 2017-ÖYP-046 nolu proje ile desteklenmiştir.

TEZ BİLDİRİMİ

Bu tezdeki bütün bilgilerin etik davranış ve akademik kurallar çerçevesinde elde edildiğini ve tez yazım kurallarına uygun olarak hazırlanan bu çalışmada bana ait olmayan her türlü ifade ve bilginin kaynağına eksiksiz atıf yapıldığını bildiririm.

DECLARATION PAGE

I hereby declare that all information in this document has been obtained and presented in accordance with academic rules and ethical conduct. I also declare that, as required by these rules and conduct, I have fully cited and referenced all material and results that are not original to this work.

Tuba Özge NAKİPOĞLU

Tarih:

ÖZET

DOKTORA TEZİ

KİL ZEMİNLER ÜZERİNE OTURAN MAKİNE TEMELLERİNİN ZEMİNİN DİNAMİK DAVRANIŞI ÜZERİNDEKİ ETKİSİ

Tuba Özge NAKİPOĞLU

**Konya Teknik Üniversitesi
Lisansüstü Eğitim Enstitüsü
İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı**

Danışman: Prof. Dr. Mustafa YILDIZ

2024, 322 Sayfa

Jüri

**Prof. Dr. Mustafa YILDIZ
Prof. Dr. Murat OLGUN
Prof. Dr. Atilla ÖZÜTOK
Doç. Dr. Bekir Kamil AFACAN
Dr. Öğr. Üyesi İbrahim Hakkı ERKAN**

Deprem etkisi dışındaki dinamik yüklerin en fazla etkili olduğu yapılar sanayi yapılarıdır. Makinelerin ürettiği dinamik yükler, makinenin ve oturduğu temelin statik yükleri ile temel zeminine iletilmekte olup, mevcut yapıyı ve çevre zemini ile üzerindeki yapıları etkilemektedir. Bu nedenle makine-temel-zemin sisteminin davranışı analiz edilirken, temel zemini ve çevre zeminin dinamik özelliklerinin iyi araştırılması gerekmektedir.

Bu tez çalışmasında, farklı sertlikte kil zeminler üzerine oturan harmonik yük üreten ve darbe etkili makine temellerinin, dinamik zemin parametrelerine bağlı olarak temel altında ve çevre zeminde oluşturduğu etkiler araştırılmıştır. Bu amaçla, zemin profili farklı sertlikte kil zemin tabakalarından oluşan üç sahada arazi ve laboratuvar deneyleri yapılmıştır. Konya 2. Organize Sanayi Bölgesi'nde iki saha (KOSB) ve Selçuk Üniversitesi Kan Merkezi bina sahası çalışma alanları olarak belirlenmiştir. Zemin tabakalarının dinamik zemin parametreleri yapılan rezonant kolon deneyleri ve arazi deney sonuçları kullanılarak korelasyonlarla elde edilmiş ve karşılaştırılmıştır. Ayrıca rezonant kolon deneyinden elde edilen normalize kayma modülü ve sönüm oranı eğrileri literatür eğrileri ile karşılaştırılmış ve bölge zeminini temsil eden eğriler belirlenmiştir. Arazi deneylerinin değerlendirilmesi ile bölge zeminlerinin yerel zemin sınıfları, zemin hâkim periyotları ve büyütme faktörleri belirlenmiştir.

Darbe etkili makinelerin zemin davranışına etkisini araştırmak için, dinamik plaka deney seti kullanılarak oluşturulan darbe etkisi ile çevre zeminde oluşan pik parçacık hızı, pik ivme ve pik deplasman değerlerini belirlemek için Instanetel Minimate Plus cihazı ile ölçümler alınmıştır. Böylece, farklı zemin

profillerinde, darbe yükü ile oluşan titreşimlerin, zemin tabakalarının sertliğine bağlı olarak çevre zemine etkisi belirlenmiştir.

Harmonik yük üreten makinelerin zemin davranışı üzerindeki etkisini araştırmak için PLAXIS 2D sonlu elemanlar programı ile Konya 2. Organize Sanayi Bölgesi'nde FMC fabrika sahası ve KOS Atıksu Arıtma Tesisi sahası için makine-temel-zemin sistemi modellenmiştir. Zemin tabakaları Hardening Soil Model bünye modeli ile oluşturulmuştur. Yapılan analizler ile zemin tabakalarının rijitliğinin, tabakalanma durumunun ve makine çalışma frekansı ile genliğinin temel altında ve çevre zeminde meydana gelen deplasman, boşluk suyu basınçları ve ivmeler üzerindeki etkisi belirlenmiştir.

Yapılan çalışmada, zemin rijitliğinin dalga yayılımı üzerinde önemli bir etkiye sahip olduğu belirlenmiştir. Özellikle, zemin profilinde yumuşak kil zemin tabakalarının bulunması durumunda temel altında ve zemin içerisinde oluşan deplasman ile ivme değerlerinin ciddi oranda arttığı belirlenmiştir. Zemin içerisinde oluşan dalga genliklerinin zemin sönümünden kaynaklı olarak etki noktasından uzaklaştıkça küçüldüğü ancak, zeminin sertliğine ve etkinin büyüklüğüne bağlı olarak uzun mesafelere yayılabildiği belirlenmiştir. Buna bağlı olarak, makine temelinin bulunduğu yapı, çevre zemini ve çevre yapılar bu dinamik etkilere maruz kalabileceği ve etki büyüklüğüne bağlı olarak hasar görebileceği belirlenmiştir.

Sonuç olarak, zeminin tabakalanma durumunun, tabakalar arasındaki rijitlik farkının zemin davranışı üzerinde önemli bir etkiye sahip olduğu belirlenmiştir.

Anahtar Kelimeler: Dalga yayılımı, Hardening Soil Model, Kil zemin, Makine temeli, Plaxis 2D, Rezonant kolon deneyi, Zemin Büyütmesi, Zemin Rijitliği

ABSTRACT

PhD THESIS

THE EFFECT OF MACHINE FOUNDATIONS ON CLAYEY SOILS ON DYNAMIC BEHAVIOR OF THE SOIL

Tuba Özge NAKİPOĞLU

**Konya Technical University
Institute of Graduate Studies
Department of Civil Engineering**

Advisor: Prof. Dr. Mustafa YILDIZ

2024, 322 Pages

Jury

**Prof. Dr. Mustafa YILDIZ
Prof. Dr. Murat OLGUN
Prof. Dr. Atilla ÖZÜTOK
Assoc. Prof. Dr. Bekir Kamil AFACAN
Asst. Prof. Dr. İbrahim Hakkı ERKAN**

The structures where dynamic loads other than earthquake effects are most effective are industrial buildings. These structures are exposed to dynamic loads continuously and repeatedly. The dynamic loads due to operation of the machines are transmitted to the subsoil by the static loads of the machine and the supporting foundation, affecting the existing structure and the surrounding ground and the structures above it. Therefore, when analyzing the behavior of the machine-foundation-subsoil system, the dynamic properties of the subsoil and the surrounding soil should be thoroughly investigated.

In this thesis, the effects of the foundations under machines with vertical harmonic excitation and pulse effect resting on clay soils of different stiffness on the subsoil and surrounding soil depending on dynamic soil parameters were investigated. For this purpose, field and laboratory tests were conducted at three sites with soil profile consisting of clay layers of different stiffness. Two sites in Konya 2nd Organized Industrial Zone (KOSB) and Selcuk University Blood Center building site were determined as study areas. Dynamic soil parameters of the soil layers were obtained from the resonant column tests and correlations using field test results and these values were compared. In addition, the normalized shear modulus and damping ratio curves obtained from the resonant column tests were compared with the literature curves. Thus, the curves representing the soil of the regions were determined. Local soil classifications, dominant periods and local amplification of the regions were determined by evaluating the field tests.

In order to investigate the effect of pulse effect machines on subsoil's behavior, measurements were taken with the Instantel Minimate Plus device to determine the peak particle velocity, peak acceleration and peak displacement values formed on the surrounding soil with the impact effect created

using the dynamic plate test set. Thus, the effect of vibrations generated by impact load on the surrounding soils which have different soil profiles was determined depending on the stiffness of the soil layers.

To investigate the effect of vertical harmonic excitation due to operation of the machines on subsoil behavior, the machine-foundation-subsoil system was modeled with PLAXIS 2D finite element program for FMC factory site and KOS Wastewater Treatment Plant site in Konya 2nd Organized Industrial Zone. Soil layers were created with Hardening Soil Model constitutive model. The effects of the stiffness and stratification of the soil layers and machine operating frequency and amplitude on the displacement, pore water pressures and accelerations occurring under the foundation and in the surrounding soil were determined.

In the study, it was determined that soil stiffness has a significant effect on wave propagation. In particular, it was determined that, the displacement and acceleration values under the foundation and in the surrounding soil increase significantly if there are soft clay soil layers in the soil profile. It was determined that the wave amplitudes generated within the soil become smaller as they move away from the impact point due to the soil damping, but they can spread over long distances depending on the stiffness of the soil layers and the magnitude of the impact. Accordingly, the structure where the machine foundation is located, the surrounding ground and the surrounding structures may be exposed to these dynamic effects and may be damaged depending on the magnitude of the impact.

As a result, it was determined that the stratification of soil profile and the stiffness difference between the soil layers have a significant effect on the soil behavior.

Keywords: Wave propagation, Hardening Soil Model, Clay soil, Machine foundation, Plaxis 2D, Resonant column test, Local amplification, Soil stiffness

ÖNSÖZ

Lisansüstü eğitimim boyunca değerli bilgi ve deneyimlerini benden esirgemeyen, akademik çalışmalarında beni teşvik eden, her konuda bilgi ve desteğini almaktan çekinmediğim tez danışmanım Sn. Prof. Dr. Mustafa Yıldız'a teşekkürlerimi sunarım.

Tezin tamamlanması sürecine çalışmaya yön veren, bana yardım eden ve ilgilerini esirgemeyen hocalarım Sn. Prof. Dr. Murat OLGUN, Sn. Prof. Dr. Atilla ÖZÜTOK, Sn. Doç. Dr. Bekir Kamil AFACAN ve Sn. Dr. Öğr. Üyesi İbrahim Hakkı ERKAN'a teşekkürü bir borç bilirim. Laboratuvar çalışmalarında bana yardım eden hocalarım Sn. Öğr. Gör. Dr. Ersin GÜLER, Sn. Öğr. Gör. Alican Şenkaya ve Sn. Arş. Gör. E. Burak Toka'ya teşekkür ederim. Ayrıca her konuda bilgi ve görüşlerini benden esirgemeyen ve bana fikir veren Sn. Dr. Öğr. Üyesi Atilla DEMİRÖZ ve Sn. Arş. Gör. Muhittin BABAOĞLU'na teşekkür ederim.

Her türlü derdimi dinleyen, benimle değerli fikirlerini paylaşan ve benim yanımda olan hocalarım Sn. Prof. Dr. Meral BÜYÜKYILDIZ, Sn. Prof. Dr. Ülkü Sultan KESKİN, Sn. Doç. Dr. Arife Akın, Sn. Doç. Dr. Günnur YAVUZ ve Sn. Dr. Öğr. Üyesi Gamze DOĞAN'a teşekkürü bir borç bilirim.

Tüm doktora sürecinde benden maddi ve manevi her türlü desteğini ve yardımlarını esirgemeyen, en zor anlarımda bana moral veren ve çalışmaya yönlendiren, eşim Sn. Arş. Gör. Abdulhamit NAKİPOĞLU'na teşekkür ederim.

Lisansüstü eğitimim süresince ne zaman ihtiyacım olsa bana yardım eden biricik kardeşim Ramazan DEMİRAL'a ve bugüne kadar bana gösterdiği sonsuz sevgi ve hoşgörü ile vermiş olduğu maddi ve manevi desteklerinden dolayı annem Serap DEMİRAL'a teşekkür ederim. Ayrıca her zaman yanımda olan ve bana destek olan sevgili aileme teşekkürü bir borç bilirim.

Tez çalışmamı, ilk göz ağrım, hayatımın anlamı ve mutluluk kaynağım oğlum Enes NAKİPOĞLU'na armağan ediyorum. İyi ki varsın...

Tuba Özge NAKİPOĞLU
KONYA-2024

İÇİNDEKİLER

ÖZET	iv
ABSTRACT.....	vi
ÖNSÖZ	viii
İÇİNDEKİLER	ix
SİMGELER VE KISALTMALAR	xii
ŞEKİLLER LİSTESİ	xvi
TABLolar LİSTESİ	xxvi
1. GİRİŞ	1
2. DİNAMİK ETKİLERE MARUZ ZEMİN DAVRANIŞI.....	7
2.1. Zemine Etkiyen Dinamik Yükler	7
2.2. Zeminlerde Dalga Yayılımı.....	11
2.2.1. Elastik bir çubukta dalga yayılımı	12
2.2.2. Elastik sonsuz bir ortamda dalga yayılımı	15
2.2.3. Elastik yarı-sonsuz bir ortamda dalga yayılımı	22
2.3. Dinamik Zemin Parametreleri.....	24
2.3.1. Kayma modülü.....	26
2.3.2. Sönüm oranı	29
2.4. Dinamik Zemin Parametrelerinin Belirlenmesi	30
2.4.1. Laboratuvar Deneyleri	30
2.4.2. Arazi deneyleri.....	39
2.5. Makine Temelleri	48
2.5.1. Blok makine temellerinin tasarımı.....	53
2.6. Basit Titreşim Sistemlerinin İncelenmesi	58
2.6.1. Tek serbestlik dereceli kütle-yay sisteminin serbest titreşimi	60
2.6.2. Tek serbestlik dereceli kütle-yay-sönüm sisteminin serbest titreşimi	62
2.6.3. Tek serbestlik dereceli kütle-yay sisteminin zorlanmış titreşimi.....	68
2.6.4. Tek serbestlik dereceli kütle-yay-sönüm sisteminin zorlanmış titreşimi..	69
2.6.5. Tek serbestlik dereceli kütle-yay-sönüm sisteminin darbe yüküne bağlı zorlanmış titreşimi	73
2.7. Sonlu Elemanlar Yöntemi ile Modellemede Kullanılan Zemin Bünye Modelleri.....	74
2.7.1. Mohr-Coulomb modeli	75
2.7.2. Cam-Clay modeli	76
2.7.3. Modifiye Cam-Clay model	79
2.7.4. Yumuşak zemin modeli (Soft soil model)	80
2.7.5. Yumuşak zemin krip modeli (Soft-Soil Creep model)	82
2.7.6. Hardening soil model.....	82
3. KAYNAK ARAŞTIRMASI	85

4. MATERYAL VE YÖNTEM.....	101
4.1. Arazi Deneyleri	103
4.1.1. Sondaj Çalışmaları ve Standart Penetrasyon Deneyleri	103
4.1.2. Çok Kanallı Yüzey Dalgası Spektrumu Analizi (MASW) Deneyi	109
4.1.3. Mikrotremör Deneyi	114
4.1.4. Instantel Minimate Plus Ölçümleri	114
4.2. Laboratuvar deneyleri	121
4.2.1. Doğal su içeriği tayini.....	121
4.2.2. Yıkamalı elek analizi ve hidrometre deneyleri	122
4.2.3. Özgül ağırlık tayini	126
4.2.4. Kıvam (Atterberg) limiti deneyleri	126
4.2.5. Rezonant kolon deneyi.....	128
4.3. Sonlu Elemanlar Programı (PLAXIS 2D) ile zemin modellemesi	136
4.3.1. FMC fabrika sahasının modellenmesi	138
4.3.2. KOS Atıksu Arıtma Tesisi sahasının modellenmesi.....	142
4.3.3. Literatür verileri ile oluşturulan zemin profilinin modellenmesi.....	143
5. ARAŞTIRMA SONUÇLARI VE TARTIŞMA.....	146
5.1. Zemin Tabakalarının Fiziksel Özellikleri ve Sınıflandırılması.....	146
5.1.1. Konya 2. Organize Sanayi Bölgesi, FMC fabrika sahası	146
5.1.2. KOS Atıksu Arıtma tesisi sahası	156
5.1.3. Selçuk Üniversitesi Kan Merkezi binası alanı	159
5.2. Rezonant Kolon Deneyleri ile Elde Edilen Dinamik Zemin Parametrelerinin Değerlendirilmesi.....	160
5.2.1. FMC fabrika sahası	161
5.2.2. KOS Atıksu Arıtma Tesisi sahası	207
5.3. Arazi Deney Sonuçlarının Değerlendirilmesi	217
5.3.1. Standart Penetrasyon Deneyi	217
5.3.2. MASW deneyi	227
5.3.3. Mikrotremör deneyi	233
5.3.4. Instantel Minimate Plus ölçüm sonuçlarının değerlendirilmesi	234
5.4. Sonlu Elemanlar Programı (PLAXIS 2D) ile Elde Edilen Sonuçların Değerlendirilmesi.....	250
5.4.1. FMC fabrika sahasının modellenmesi ile elde edilen sonuçların değerlendirilmesi	251
5.4.2. KOS Atıksu Arıtma Tesisi sahasının modellenmesi ile edilen sonuçlar	268
5.4.3. Literatür verileri oluşturulmuş zemin modellerinin değerlendirilmesi... ..	273
6. SONUÇLAR VE ÖNERİLER	286
6.1. Sonuçlar.....	288
6.2. Öneriler	298
KAYNAKLAR	300
EKLER	303
EK-1. Dane Çapı Dağılım Eğrileri	303

EK-2. Konsolidasyon Deney Sonuçları	310
EK-3. Rezonant Kolon Deneyi Sonuçları	312
EK-4. PLAXIS 2D Modelleme Sonuçları	318



SİMGELER VE KISALTMALAR

Simgeler

M: Magnitüd
M_L: Yerel büyüklük ölçeği
M_S: Yüzey dalgası büyüklük ölçeği
M_b: Cisim dalgası büyüklük ölçeği
M_w: Moment büyüklük ölçeği
M_d: Süreye bağlı büyüklük ölçeği
A: Standart bir Wood-Anderson sismografinin kaydettiği maksimum iz genliği (mm)
A': Maksimum yer değiştirme (μm)
Δ: Sismografa derece olarak dış merkez uzaklığı
M₀: Sismik moment (Nm)
η: Fay düzlemi boyunca materyalin kayma modülü (N/m²)
A_f: Kaymaya uğrayan fay düzlemi alanı (m²)
D: Yırtılan fayın ortalama yer değiştirmesi (m)
A: Kesit alanı
ρ: Yoğunluk
t: Zaman
u, v, w: x-y-z doğrultularındaki deplasmanlar
V_r: Boyuna dalga yayılım hızı
V_p: P-dalga hızı
V_s: Kayma dalgası hızı (S-dalga hızı)
V_R: Rayleigh dalga hızı
E: Elastisite modülü
G: Kayma modülü
K: Bulk modülü
M_c: Hacimsel sıkışma modülü
ν: Poisson oranı
T: Burulma momenti
θ: Burulma açısı
I: Kütle atalet momenti
σ: Normal gerilme
τ: Kayma gerilmesi
σ_v': Efektif jeolojik basınç
ε: Eksenel birim deformasyon
ε^p: Plastik eksenel deformasyon
γ: Kayma birim deformasyonu
γ^p: Plastik kayma birim deformasyonu
ε̄: Hacimsel birim deformasyon
λ ve μ: Lamé katsayıları
∇²: Laplacian operatörü
z, ż ve ž: Sırasıyla deplasman, hız ve ivme
m: Kütle
k: Yay rijitlik katsayısı
c: Sönüm katsayısı
c_{kritik}: Kritik sönüm katsayısı
ω_n: Doğal dairesel frekans
ω_d: Sönümlü doğal dairesel frekans

ω_r : Rezonans frekansı
 ϕ : Faz açısı
 D : Sönüm oranı
 D_{kritik} : Kritik sönüm oranı
 δ : Logaritmik azalım
 r : Frekans oranı
 G_{tan} : Tanjant kayma modülü
 G_{sek} : Sekant kayma modülü
 G_{maks} : Küçük birim deformasyon kayma modülü
 D_{min} : Küçük birim deformasyon sönüm oranı
 N_{30} : Arazide kaydedilen darbe sayısı
 N_{60} : Düzeltme uygulanmış SPT darbe sayısı
 $N_{1,60}$: Derinlik düzeltmesi uygulanmış SPT darbe sayısı
 C_N : Derinlik düzeltme faktörü
 C_E : Enerji düzeltme faktörü
 C_R : Tij uzunluğu düzeltme faktörü
 C_B : Sondaj çapı düzeltme faktörü
 C_S : Numune alıcı kılıf düzeltme faktörü
 C_A : Çakma başlığı düzeltme faktörü
 C_{BF} : Tokmak düşürme sıklığı (hızı)
 C_C : Tokmak yastığı düzeltme faktörü
 q_u : Serbest basınç dayanımı
 B : Kütle oranı
 r_0 : Eşdeğer yarıçap
 p' : Ortalama efektif gerilme
 p_m' : Akma yüzeyinin boyutunu temsil eden gerilme
 p_0' : Ön konsolidasyon basıncı
 q' : Deviatör gerilme
 q_f : Nihai deviatör gerilme
 q_a : Kayma dayanımı asimptot değeri
 c : Kohezyon
 ϕ : İçsel sürtünme açısı
 ψ : Dilatancy açısı
 λ : Özgül hacim- $\ln p'$ eksen takımında sıkışma indisi
 κ : Özgül hacim- $\ln p'$ eksen takımında şişme indisi
 λ^* : Hacimsel deformasyon- $\ln p'$ eksen takımındaki modifiye sıkışma indisi
 κ^* : Hacimsel deformasyon- $\ln p'$ eksen takımındaki modifiye şişme indisi
 μ^* : Modifiye krip indisi
 v_{ur} : Boşaltma-tekrar yükleme poisson oranı
 ω ve ω_d : Dönme hızı ile ilgili parametreler
 M : Kritik durum hattı eğimi
 a : Başlangıç akma yüzeyi eğimi
 C_c : Sıkışma indisi
 C_s : Şişme indisi
 E_0 : Başlangıç elastisite modülü
 E_{50} : Deviatör gerilmenin %50'sine karşılık gelen elastisite modülü
 E_{50}^{ref} : Referans gerilmenin %50'sine karşılık gelen elastisite modülü
 E_{ur} : Boşaltma-tekrar yükleme elastisite modülü
 E_{ur}^{ref} : Referans gerilme için boşaltma-tekrar yükleme elastisite modülü
 γ_r : Referans birim deformasyon

p^{ref} : Referans gerilme
 R_f : Göçme oranı



Kısaltmalar

AFAD: Afet ve Acil Durum Yönetimi Başkanlığı
SASW: Yüzey Dalgalarının Spektral Analizi
MASW: Çok Kanallı Yüzey Dalgası Spektral Analiz Yöntemi
SPT: Standart Penetrasyon Deneyi
CPT: Koni Penetrasyon Deneyi
PMT: Presiyometre Deneyi
DMT: Dilatometre Deneyi
AKO: Aşırı Konsolidasyon Oranı
CSL: Kritik Durum Hattı
NCS: Normal Konsolidasyon Yüzeyi
CSS: Mevcut Gerilme Yüzeyi
FFT: Fast Fourier Transform
KOSB: Konya Organize Sanayi Bölgesi
KOS: Konya Organize Sanayi
RC: Rezonant Kolon Deneyi
YGBG: Yarım Güç Bant Genişliği
LA: Logaritmik Azalım

ŞEKİLLER LİSTESİ

Şekil 2.1. Dünya deprem kuşakları.....	8
Şekil 2.2. Yatay ve düşey sismograflar	9
Şekil 2.3. Türkiye deprem tehlike haritası (AFAD, 2018)	11
Şekil 2.4. Elastik çubukta normal gerilme (Das & Ramana, 2011).....	12
Şekil 2.5. Elastik çubukta burulma momenti (Das & Ramana, 2011).....	14
Şekil 2.6. Elastik dikdörtgen prizması (Das & Ramana, 2011).....	15
Şekil 2.7. P-dalgası yayılma ve parçacık hareketi doğrultusu (Encyclopedia Britannica Company, 2018).....	19
Şekil 2.8. S-dalgası yayılma ve parçacık hareketi doğrultusu (Encyclopedia Britannica Company, 2018).....	20
Şekil 2.9. P ve S dalgaları arasındaki ilişki (Das & Ramana, 2011)	21
Şekil 2.10. Rayleigh dalgası yayılma ve parçacık hareketi doğrultusu (Encyclopedia Britannica Company, 2018).....	22
Şekil 2.11. Rayleigh dalgasının eliptik dane hareketi ve derinlikle değişimi (Das & Ramana, 2011)	23
Şekil 2.12. Love dalgası yayılma ve parçacık hareketi doğrultusu (Encyclopedia Britannica Company, 2018).....	24
Şekil 2.13. Tekrarlı yükleme sonucu gerilme-birim deformasyon ilişkisi (Vucetic & Dobry, 1991).....	25
Şekil 2.14. Histeresis döngüsünde tanjant ve sekant kayma modülleri (Holtz vd., 2011)	26
Şekil 2.15. Maksimum kayma modülü ve sekant kayma modülü (Okur & Ansal, 2009)	27
Şekil 2.16. Farklı birim deformasyon genlikleri için elde edilen histerezis döngüleri ve kayma modülü sönüm oranının değişimi (Yoshida, 2014).....	27
Şekil 2.17. Kayma modülünün birim deformasyon seviyesi ile değişimi	28
Şekil 2.18. Tipik mormalleştirilmiş modül azalma eğrisi (Darendeli, 2001)	29
Şekil 2.19. Tekrarlı yükleme esnasında sönüm oranı ve kayma modülünün tahmini	29
Şekil 2.20. Nonliner malzeme sönüm oranı eğrisi (Darendeli, 2001)	30
Şekil 2.21. Dinamik laboratuvar testlerinin deformasyon aralığı (RIVAS, 2011)	31
Şekil 2.22. Ultrasonik Darbe Deneyi (Whitman, 1970)	33
Şekil 2.23. Ultrasonik darbe deneyinde burulma momenti (Özkan, 2018)	33
Şekil 2.24. Rezonant kolon deney seti ve zemin numunesinin üstüne yerleştirilen elektromanyetik uyarıcı	35
Şekil 2.25. Dinamik üç eksenli deneyi (Ishihara, 1996).....	36
Şekil 2.26. Dinamik basit kesme deneyi (Özkan, 2017)	37
Şekil 2.27. Dinamik burulmalı kesme deneyi (Ishihara, 1996).....	38
Şekil 2.28. Karşıt kuyu yöntemi (ConeTec, 2023)	40
Şekil 2.29. Alt kuyu yöntemi (ConeTec, 2023).....	41
Şekil 2.30. Kuyu içi yöntemi (In-Situ Engineering, 2018).....	41
Şekil 2.31. MASW yöntemi ve temel işlem adımları (Mutlu vd., 2015)	44
Şekil 2.32. Makine temel tipleri (İşkodra, 2008).....	51
Şekil 2.33. Değişik titreşim frekansları için limit deplasman genlikleri (İşkodra, 2008)	52
Şekil 2.34. Düşey hareket modunun kütle-yay sistemi olarak modellenmesi (Özkan, 2017).....	53
Şekil 2.35. Yatay hareket için kütle-yay-sönüm elemanı modeli (Özkan, 2017).....	54
Şekil 2.36. Burulma hareketi için kütle-yay-sönüm elemanı modeli (Özkan, 2017)	54

Şekil 2.37. Sallanma hareketi altındaki bir makine-temel zemin sisteminin basit titreşim sistemi olarak modeli (Özkan, 2017)	55
Şekil 2.38. a) Burulma ve b) Sallanma modu	56
Şekil 2.39. Basit kütle-yay-sönüm elemanı sistemi (Özkan, 2017).....	59
Şekil 2.40. Kütle-yay sisteminin serbest cisim diyagramı (Özkan, 2017)	60
Şekil 2.41 . Kütle-yay-sönüm elemanından oluşan titreşim sisteminin serbest cisim diyagramı (Özkan, 2017)	63
Şekil 2.42. a) Kritik üstü sönümlü ve b) Kritik sönümlü hareketin şekli (Özkan, 2017)	65
Şekil 2.43. Kritik altı sönüm halinde hareketin şekli (Özkan, 2017)	67
Şekil 2.44. Zorlanmış titreşime maruz kalan sönümlü titreşim sistemi (Özkan, 2017) .	70
Şekil 2.45. Büyütme faktörü değerleri (Özkan, 2017)	72
Şekil 2.46. Frekans oranı ve faz açısı arasındaki ilişki (Özkan, 2017).....	73
Şekil 2.47. Elastisite modülleri.....	75
Şekil 2.48. Mohr-Coulomb Akma Yüzeyi (Abbo vd., 2011).....	76
Şekil 2.49. Cam-Clay akma yüzeyi eğrisi (Uysal, 2011)	77
Şekil 2.50. Kritik Durum (Uysal, 2011)	77
Şekil 2.51. Kritik durum hattı (Uysal, 2011).....	78
Şekil 2.52. İzotropik yüklemeye maruz zemin davranışı (Uysal, 2011)	79
Şekil 2.53. p' , q düzleminde Modifiye Cam-Clay modelinin akma yüzeyi (Uysal, 2011)	80
Şekil 2.54. p' , q düzleminde Soft Soil modelinin akma yüzeyi (Uysal, 2011)	81
Şekil 2.55. İzotropik gerilme koşullarında hacimsel deformasyon-ortalama efektif gerilme ilişkisi (Uysal, 2011).....	81
Şekil 2.56. Yumuşak zemin krip modeli: üç boyutlu gerilme uzayında CSS, mevcut gerilme yüzeyi ve NCS, normal konsolidasyon yüzeyi (Leoni vd., 2008).....	82
Şekil 2.57. Standart Üç Eksenli Basınç Deneyinde Gözlenen Gerilme-Deformasyon İlişkisi (Laman vd., 2007).....	84
Şekil 3.1. Hiperbolik gerilme-birim deformasyon ilişkisi (Hardin & Drnevich, 1972a)	87
Şekil 3.2. a) Çalışmada önerilen normalleştirilmiş kayma modülü ve b) Sönüm eğrileri (Sun ve ark., 1988).....	89
Şekil 3.3. Çalışmada önerilen a) Normalleştirilmiş kayma modülü ve b) Sönüm eğrileri (Vucetic & Dobry, 1991)	90
Şekil 3.4. Ölçülen ve tahmin edilen küçük birim deformasyon modülü (Kagawa, 1992)	91
Şekil 3.5. Çalışmada önerilen a) Normalleştirilmiş kayma modülü ve b) Sönüm eğrileri	92
Şekil 3.6. Arazi ve laboratuvar dinamik kayma modülünün değişimi (Okur ve Ansal, 2009).....	94
Şekil 3.7. İlk yükleme çevrimi için bu çalışmadan hesaplanan ve farklı deneysel çalışmalardan elde edilen sonuçların karşılaştırması (Subramaniam & Banerjee, 2013)	95
Şekil 4.1. Sondaj alanları harita görüntüsü	102
Şekil 4.2. Selçuk Üniversitesi Kan Merkezi harita görüntüsü.....	102
Şekil 4.3. FMC fabrika sahasında a) Sondaj kulesinin kurulması ve b) Yapılan sondaj çalışmasına ait görseller.....	104
Şekil 4.4. a) Shelby tüpünün kuyuya indirilmesi, b) Zemin numunesi alınmış Shelby tüpü ve c) Shelby tüpünün parafinlenmesi	105
Şekil 4.5. a) SPT numune alıcısının sondaj kuyusuna indirilmesi ve b) Tij üzerinde 45 cm mesafenin işaretlenmesi	105

Şekil 4.6. a) SPT numune alıcısı, b) Numune alıcısı içerisindeki zemin numunesi ve c) Örselenmiş zemin numunesinin muhafaza edilmesi	106
Şekil 4.7. KOS Atık Su Arıtma Tesisi sondaj çalışması	108
Şekil 4.8. a) FMC ve b) KOS Atıksu Arıtma tesisleri bahçelerinde yapılan MASW deneyi harita görünüşleri	110
Şekil 4.9. MASW deneyi a) Jeofon yerleşimi ve b) Darbe uygulama noktası	111
Şekil 4.10. Deney kayıt cihazı ve bilgisayar sistemi	111
Şekil 4.11. FMC fabrika sahasında yapılan MASW deneyinde balyoz ile uyarımın gerçekleştirilmesi	112
Şekil 4.12. KOS Atıksu Arıtma Tesisi MASW1 ham verisi	112
Şekil 4.13. KOS Atıksu Arıtma Tesisi MASW1 a) Dispersiyon eğrisi ve b) Kayma dalgası hızı-derinlik eğrisi	113
Şekil 4.14. Mikrotremör deneyi ekipmanları	114
Şekil 4.15. Jeofon içerisindeki titreşim algılayıcılar ve hareket yönleri (Yıldızlar, 2009)	115
Şekil 4.16. Instantel Minimate Plus titreşim kayıt cihazı ve ekipmanları	115
Şekil 4.17. Etki noktası ve jeofonların konumu	116
Şekil 4.18. Titreşim kayıtlarını algılayan jeofon	116
Şekil 4.19. Faaliyet raporunda yer alan parçacık hızı-zaman grafiği örneği	117
Şekil 4.20. Örnek bir faaliyet raporu sonucu	117
Şekil 4.21. Örnek FFT raporunda yer alan genlik-frekans grafikleri	118
Şekil 4.22. KOS Atıksu Arıtma Tesisi sahasında yapılan Instantel Minimate Plus ölçüm doğrultuları	119
Şekil 4.23. Selçuk Üniversitesi Kan Merkezi binası bölgesinde yapılan Instantel Minimate Plus ölçüm doğrultuları	119
Şekil 4.24. a) KOS Atıksu Arıtma Tesisi sahasında ve b) Selçuk Üniversitesi Kan Merkezi binası bölgesinde yapılan dinamik plaka yükleme deneyi ile dinamik etkinin oluşturulması ve Instantel Minimate Plus cihazları ile ölçümlerin alınması	120
Şekil 4.25. Doğal su muhtevası tayini	122
Şekil 4.26. Yıkamalı elek analizi için ıslatılmış zemin numuneleri	122
Şekil 4.27. Yıkamalı elek analizi ile ince ve iri daneli zeminin ayrıştırılması ve etüvde kurutulması	123
Şekil 4.28. Yıkamalı elek analizi sonrası kurutulmuş No.200 altı ve üstü zemin numuneleri	123
Şekil 4.29. Elek analizi deney ekipmanları	124
Şekil 4.30. Elek analizi sonrası eleklerde kalan zemin daneleri	124
Şekil 4.31. No.200 altı zemin numunesinin öğütülüp hidrometre deneyine hazırlanması	125
Şekil 4.32. Damıtık su ile dağıtıcı madde karışımının hazırlanması	125
Şekil 4.33. Hidrometre deney aşamaları	126
Şekil 4.34. Piknometre deneyi aşamaları	126
Şekil 4.35. Plastisite kartı	127
Şekil 4.36. Casagrande deneyi	128
Şekil 4.37. Rezonant kolon deney seti düzeneği	129
Şekil 4.38. Deneylerde kullanılan rezonant kolon deneyi aletinin ve basınç panelinin boy kesiti (Güler, 2021)	129
Şekil 4.39. Shelby tüplerinde örselenmemiş zemin numunesi alınması	130
Şekil 4.40. Rezonant kolon deney numunelerinin hazırlanma aşamaları	130
Şekil 4.41. Numunenin membran içerisine yerleştirilmesi	131
Şekil 4.42. Üst başlık ve hücrenin yerleştirilme aşamaları	131

Şekil 4.43. Yükleme kademesi sonrası ölçüm sonuçlarının program özeti.....	132
Şekil 4.44. Rezonant Kolon Deneyi için Kelvin-Voigt modeli (Bratosin & Sireteanu, 2002)	133
Şekil 4.45. a) İdealize edilmiş sabit-serbest rezonant kolon numunesi, b) Diferansiyel zemin numunesi	133
Şekil 4.46. Zemin numunesinin kayma birim deformasyonu genliği.....	134
Şekil 4.47. Deney sonucunda elde edilen logaritmik azalım eğrisi.....	135
Şekil 4.48. Yarım güç bant genişliği yöntemi	136
Şekil 4.49. PLAXIS 2D- 1.Model Zemin Profili.....	139
Şekil 4.50. Analiz hesap aşamaları	140
Şekil 4.51. SPT verileri ile oluşturulmuş zemin profili	141
Şekil 4.52. MASW verileri ile oluşturulmuş zemin profili	141
Şekil 4.53. Statik parametreler ile oluşturulan zemin modeli.....	142
Şekil 4.54. Rezonant kolon deneyi ile elde edilen parametreler ile oluşturulan zemin modeli	143
Şekil 4.55. Tek tabaka olarak zemin modellemesi	144
Şekil 4.56. Tabakalı zemin modellemesi.....	145
Şekil 5.1. SK1-3 m'ye ait granülometri eğrisi.....	147
Şekil 5.2. SK1 ve SK2 için derinliğe bağlı olarak zemin sınıfı, %çakıl ve %silt-kil miktarları ve su muhtevası değişimleri	149
Şekil 5.3. Zemin numunelerinin plastisite kartında gösterimi.....	150
Şekil 5.4. SK1 ve SK2 için derinlikle özgül ağırlık, boşlu oranı ve doğal birim hacim ağırlık değişimi	151
Şekil 5.5. SK2-3 m için üç eksenli basınç deneyi ile elde edilen a) Eksenel birim deformasyon-deviatör gerilme ve b) Kayma gerilmesi-normal gerilme grafikleri	152
Şekil 5.6. SK2-6 m için üç eksenli basınç deneyi ile elde edilen a) Eksenel birim deformasyon-deviatör gerilme ve b) Kayma gerilmesi-normal gerilme grafikleri	153
Şekil 5.7. SK2-9 m için üç eksenli basınç deneyi ile elde edilen a) Eksenel birim deformasyon-deviatör gerilme ve b) Kayma gerilmesi-normal gerilme grafikleri	154
Şekil 5.8. SK2-21 m için üç eksenli basınç deneyi ile elde edilen a) Eksenel birim deformasyon-deviatör gerilme ve b) Kayma gerilmesi-normal gerilme grafikleri	155
Şekil 5.9. SK2-3 m için boşluk oranı, e-log σ_v ' grafiği	156
Şekil 5.10. 5 sondaj kuyusu için a) 40 m derinlik için zemin sınıfının değişimi, b) 12 m derinlik için su muhtevasının derinlikle değişimi ve c) Ortalama doğal su muhtevası likit limit ve plastik limit değerlerinin derinlikle değişimi	157
Şekil 5.11. Zemin numunelerinin plastisite kartında gösterimi.....	158
Şekil 5.12. 3 sondaj kuyusu için derinlikle zemin sınıfı ve doğal su muhtevasının değişimi.....	160
Şekil 5.13. SK1-3 m rezonant kolon deney numunesi	161
Şekil 5.14. SK1-3 m için histerezis eğrisi	162
Şekil 5.15. SK1-3 m için rezonant kolon deneyi ile elde edilen birim deformasyon genliğine bağlı olarak kayma modülü değerleri	162
Şekil 5.16. SK1-3 m için ORIGINPRO 2023 programı ile elde edilen kayma modülü eğrisi.....	163
Şekil 5.17. SK1-3 m için elde edilen normalize modül azalım eğrisi	163
Şekil 5.18. SK1-3 m için deney verileri ile elde edilen frekans-kayma birim deformasyonu genliği grafiği.....	164
Şekil 5.19. SK1-3 m için yarım güç bant genişliği ile elde edilen sönüm oranı değerleri	164

Şekil 5.20. SK1-3 m içim yarım güç bant genişliği yöntemi ile elde edilen a) Kayma birim deformasyonu-sönüm oranı ve b) Kayma birim deformasyonu-normalize sönüm oranı eğrileri.....	165
Şekil 5.21. SK1-3 m için deney verileri ile elde edilen frekans-kayma birim deformasyonu genliği grafiği.....	166
Şekil 5.22. SK1-3 m için logaritmik azalım yöntemi ile elde edilen sönüm oranı değerleri	166
Şekil 5.23. SK1-3 m içim logaritmik azalım yöntemi ile elde edilen a) Kayma birim deformasyonu-sönüm oranı ve b) Kayma birim deformasyonu-normalize sönüm oranı eğrileri.....	167
Şekil 5.24. SK1-3 m için birim deformasyon genliğine bağlı olarak a) Kayma modülü ve yarım güç bant genişliği yöntemi ile belirlenmiş sönüm oranı eğrileri, b) Normalize kayma modülü ve yarım güç bant genişliği yöntemi ile belirlenmiş normalize sönüm oranı eğrileri.....	168
Şekil 5.25. SK1-3 m için birim deformasyon genliğine bağlı olarak a) Kayma modülü ve logaritmik azalım yöntemi ile belirlenmiş sönüm oranı eğrileri ve b) Normalize kayma modülü ve logaritmik azalım yöntemi ile belirlenmiş normalize sönüm oranı eğrileri.....	169
Şekil 5.26. SK1-3 m için elde edilen normalize kayma modülü değerlerinin literatür eğrileri ile karşılaştırılması	170
Şekil 5.27. SK1-3 m için elde edilen sönüm oranı değerlerinin literatür eğrileri ile karşılaştırılması.....	171
Şekil 5.28. SK1-6 m rezonant kolon deney numunesi	171
Şekil 5.29. SK1-6 m için rezonant kolon deneyi ile elde edilen birim deformasyon genliğine bağlı olarak kayma modülü değerleri	172
Şekil 5.30. SK1-6 m için programı ile elde edilen kayma modülü eğrisi.....	172
Şekil 5.31. SK1-6 m için yarım güç bant genişliği ile elde edilen sönüm oranı değerleri	173
Şekil 5.32. SK1-6 m içim yarım güç bant genişliği yöntemi ile elde edilen kayma birim deformasyonu-sönüm oranı eğrisi	173
Şekil 5.33. SK1-6 m için logaritmik azalım yöntemi ile elde edilen sönüm oranı değerleri	174
Şekil 5.34. SK1-6 m içim logaritmik azalım yöntemi ile elde edilen kayma birim deformasyonu-sönüm oranı eğrisi	174
Şekil 5.35. SK1-6 m için birim deformasyon genliğine bağlı olarak a) Kayma modülü ve yarım güç bant genişliği yöntemi ile belirlenmiş sönüm oranı eğrileri, b) Normalize kayma modülü ve yarım güç bant genişliği yöntemi ile belirlenmiş normalize sönüm oranı eğrileri.....	175
Şekil 5.36. SK1-6 m için birim deformasyon genliğine bağlı olarak a) Kayma modülü ve logaritmik azalım yöntemi ile belirlenmiş sönüm oranı eğrileri ve b) Normalize kayma modülü ve logaritmik azalım yöntemi ile belirlenmiş normalize sönüm oranı eğrileri.....	176
Şekil 5.37. SK1-6 m için elde edilen değerlerin literatür eğrileri ile karşılaştırılması	177
Şekil 5.38. SK1-6 m için elde edilen sönüm oranı değerlerinin literatür eğrileri ile karşılaştırılması.....	177
Şekil 5.39. SK1-9 m rezonant kolon deney numunesi	178
Şekil 5.40. SK1-9 m için rezonant kolon deneyi ile elde edilen birim deformasyon genliğine bağlı olarak kayma modülü değerleri	178
Şekil 5.41. SK1-9 m için elde edilen kayma modülü eğrisi	179

Şekil 5.42. SK1-9 m için yarım güç bant genişliği ile elde edilen sönüm oranı değerleri	179
Şekil 5.43. SK1-9 m için yarım güç bant genişliği yöntemi ile elde edilen kayma birim deformasyonu-sönüm oranı eğrisi	180
Şekil 5.44. SK1-9 m için logaritmik azalım yöntemi ile elde edilen sönüm oranı değerleri	180
Şekil 5.45. SK1-9 m için logaritmik azalım yöntemi ile elde edilen kayma birim deformasyonu-sönüm oranı eğrisi	181
Şekil 5.46. SK1-9 m için birim deformasyon genliğine bağlı olarak a) Kayma modülü ve yarım güç bant genişliği yöntemi ile belirlenmiş sönüm oranı eğrileri, b) Normalize kayma modülü ve yarım güç bant genişliği yöntemi ile belirlenmiş normalize sönüm oranı eğrileri.....	182
Şekil 5.47. SK1-9 m için birim deformasyon genliğine bağlı olarak a) Kayma modülü ve logaritmik azalım yöntemi ile belirlenmiş sönüm oranı eğrileri ve b) Normalize kayma modülü ve logaritmik azalım yöntemi ile belirlenmiş normalize sönüm oranı eğrileri.....	183
Şekil 5.48. SK1-9 m için elde edilen değerlerin literatür eğrileri ile karşılaştırılması .	184
Şekil 5.49. SK1-9 m için elde edilen sönüm oranı değerlerinin literatür eğrileri ile karşılaştırılması.....	184
Şekil 5.50. a) SK1-12 m ve b) SK2-12 m tüpten çıkarılan zemin numunesi	185
Şekil 5.51. SK2-12 m rezonant kolon deney numunesi	185
Şekil 5.52. SK2-12 m için rezonant kolon deneyi ile elde edilen birim deformasyon genliğine bağlı olarak kayma modülü değerleri	186
Şekil 5.53. SK2-12 m için ORIGINPRO 2023 programı ile elde edilen kayma modülü eğrisi.....	186
Şekil 5.54. SK2-12 m için yarım güç bant genişliği ile elde edilen sönüm oranı değerleri	187
Şekil 5.55. SK2-12 m için yarım güç bant genişliği yöntemi ile elde edilen kayma birim deformasyonu-sönüm oranı eğrisi.....	187
Şekil 5.56. SK2-12 m için logaritmik azalım yöntemi ile elde edilen sönüm oranı değerleri	188
Şekil 5.57. SK2-12 m için logaritmik azalım yöntemi ile elde edilen a) Kayma birim deformasyonu-sönüm oranı ve b) Kayma birim deformasyonu-normalize sönüm oranı eğrileri.....	188
Şekil 5.58. SK2-12 m için birim deformasyon genliğine bağlı olarak a) Kayma modülü ve yarım güç bant genişliği yöntemi ile belirlenmiş sönüm oranı eğrileri, b) Normalize kayma modülü ve yarım güç bant genişliği yöntemi ile belirlenmiş normalize sönüm oranı eğrileri.....	189
Şekil 5.59. SK2-12 m için birim deformasyon genliğine bağlı olarak a) Kayma modülü ve logaritmik azalım yöntemi ile belirlenmiş sönüm oranı eğrileri ve b) Normalize kayma modülü ve logaritmik azalım yöntemi ile belirlenmiş normalize sönüm oranı eğrileri.....	190
Şekil 5.60. SK2-12 m için elde edilen değerlerin literatür eğrileri ile karşılaştırılması	191
Şekil 5.61. SK2-12 m için elde edilen sönüm oranı değerlerinin literatür eğrileri ile karşılaştırılması.....	191
Şekil 5.62. SK1-15 m için a) Deney numunesi ve b) Yükleme başlığı altında numunenin göçmesi	192
Şekil 5.63. SK2-18 m numune alıcıdan çıkarılan ve deney için boyutları ayarlanan rezonant kolon deney numunesi	193

Şekil 5.64. SK2-18 m için rezonant kolon deneyi ile elde edilen birim deformasyon genliğine bağlı olarak kayma modülü değerleri	193
Şekil 5.65. SK2-18 m için ORIGIN LAB programı ile elde edilen kayma modülü eğrisi	194
Şekil 5.66. SK2-18 m için yarım güç bant genişliği ile elde edilen sönüm oranı değerleri	194
Şekil 5.67. SK2-18 m için yarım güç bant genişliği yöntemi ile elde edilen kayma birim deformasyonu-sönüm oranı eğrisi.....	195
Şekil 5.68. SK2-18 m için logaritmik azalım yöntemi ile elde edilen sönüm oranı değerleri	195
Şekil 5.69. SK2-18 m için logaritmik azalım yöntemi ile elde edilen kayma birim deformasyonu-sönüm oranı eğrisi	196
Şekil 5.70. SK2-18 m için birim deformasyon genliğine bağlı olarak a) Kayma modülü ve yarım güç bant genişliği yöntemi ile belirlenmiş sönüm oranı eğrileri, b) Normalize kayma modülü ve yarım güç bant genişliği yöntemi ile belirlenmiş normalize sönüm oranı eğrileri.....	197
Şekil 5.71. SK2-18 m için birim deformasyon genliğine bağlı olarak a) Kayma modülü ve logaritmik azalım yöntemi ile belirlenmiş sönüm oranı eğrileri ve b) Normalize kayma modülü ve logaritmik azalım yöntemi ile belirlenmiş normalize sönüm oranı eğrileri.....	198
Şekil 5.72. SK2-18 m için elde edilen değerlerin literatür eğrileri ile karşılaştırılması	199
Şekil 5.73. SK2-18 m için elde edilen sönüm oranı değerlerinin literatür eğrileri ile karşılaştırılması.....	199
Şekil 5.74. SK1-21 m tüpten çıkarılan ve deney için hazırlanan rezonant kolon deney numunesi.....	200
Şekil 5.75. SK1-21 m için rezonant kolon deneyi ile elde edilen birim deformasyon genliğine bağlı olarak kayma modülü değerleri	200
Şekil 5.76. SK1-21 m için ORIGIN LAB programı ile elde edilen kayma modülü eğrisi	201
Şekil 5.77. SK1-21 m için yarım güç bant genişliği ile elde edilen sönüm oranı değerleri	201
Şekil 5.78. SK1-21 m için yarım güç bant genişliği yöntemi ile elde edilen kayma birim deformasyonu-sönüm oranı eğrisi.....	202
Şekil 5.79. SK1-21 m için logaritmik azalım yöntemi ile elde edilen sönüm oranı değerleri	202
Şekil 5.80. SK1-21 m için logaritmik azalım yöntemi ile elde edilen kayma birim deformasyonu-sönüm oranı eğrisi	203
Şekil 5.81. SK1-21 m için birim deformasyon genliğine bağlı olarak a) Kayma modülü ve yarım güç bant genişliği yöntemi ile belirlenmiş sönüm oranı eğrileri, b) Normalize kayma modülü ve yarım güç bant genişliği yöntemi ile belirlenmiş normalize sönüm oranı eğrileri.....	204
Şekil 5.82. SK1-21 m için birim deformasyon genliğine bağlı olarak a) Kayma modülü ve logaritmik azalım yöntemi ile belirlenmiş sönüm oranı eğrileri ve b) Normalize kayma modülü ve logaritmik azalım yöntemi ile belirlenmiş normalize sönüm oranı eğrileri.....	205
Şekil 5.83. SK1-21 m için elde edilen değerlerin literatür eğrileri ile karşılaştırılması	206
Şekil 5.84. SK1-21 m için elde edilen sönüm oranı değerlerinin literatür eğrileri ile karşılaştırılması.....	206
Şekil 5.85. SK3-2 m için kayma birim deformasyon genliği kayma modülü grafiği...	207

Şekil 5.86. SK3-2 için kayma birim deformasyonu genliğine bağlı olarak a) Kayma modülü eğrisi ve b) Normalize kayma modülü eğrisi	208
Şekil 5.87. SK3-2 m için elde edilen normalize kayma modülü değerlerinin literatür eğrileri ile karşılaştırılması	209
Şekil 5.88. SK3-4 m için kayma birim deformasyon genliği kayma modülü grafiği...	209
Şekil 5.89. SK3-4 için kayma birim deformasyonu genliğine bağlı olarak a) Kayma modülü eğrisi ve b) Normalize kayma modülü eğrisi	210
Şekil 5.90. SK3-4 m için elde edilen normalize kayma modülü değerlerinin literatür eğrileri ile karşılaştırılması	211
Şekil 5.91. SK3-6 m için kayma birim deformasyon genliği kayma modülü grafiği...	211
Şekil 5.92. SK3-6 için kayma birim deformasyonu genliğine bağlı olarak a) Kayma modülü eğrisi ve b) Normalize kayma modülü eğrisi	212
Şekil 5.93. SK3-6 m için elde edilen normalize kayma modülü değerlerinin literatür eğrileri ile karşılaştırılması	213
Şekil 5.94. SK3-8 m için kayma birim deformasyon genliği kayma modülü grafiği...	213
Şekil 5.95. SK3-8 için kayma birim deformasyonu genliğine bağlı olarak a) Kayma modülü eğrisi ve b) Normalize kayma modülü eğrisi	214
Şekil 5.96. SK3-8 m için elde edilen normalize kayma modülü değerlerinin literatür eğrileri ile karşılaştırılması	215
Şekil 5.97. SK4-9 m için kayma birim deformasyon genliği kayma modülü grafiği...	215
Şekil 5.98. SK4-9 için kayma birim deformasyonu genliğine bağlı olarak a) Kayma modülü eğrisi ve b) Normalize kayma modülü eğrisi	216
Şekil 5.99. SK4-9 m için elde edilen normalize kayma modülü değerlerinin literatür eğrileri ile karşılaştırılması	217
Şekil 5.100. SPT sayılarının derinlikle değişimi	220
Şekil 5.101. SPT korelasyonları ile elde edilen kayma modülü değerlerinin rezonant kolon deney sonuçları ile karşılaştırılması.....	222
Şekil 5.102. SPT sayılarının derinlikle değişimi	224
Şekil 5.103. SPT korelasyonları ile elde edilen kayma modülü değerlerinin rezonant kolon deney sonuçları ile karşılaştırılması.....	226
Şekil 5.104. 1. Serim için kayma dalgası hızı-derinlik grafiği	227
Şekil 5.105. 2. Serim için kayma dalgası hızı-derinlik grafiği	228
Şekil 5.106. SPT deney sonuçları ile elde edilen kayma dalgası hızlarının, MASW deney sonuçları ile karşılaştırılması.....	229
Şekil 5.107. Rezonant kolon deney sonuçlarının arazi deney sonuçları ile karşılaştırılması.....	230
Şekil 5.108. 1. Serim için kayma dalgası hızı-derinlik grafiği	231
Şekil 5.109. 2. Serim için kayma dalgası hızı-derinlik grafiği	231
Şekil 5.110. SPT deney sonuçları ile elde edilen kayma dalgası hızlarının, MASW deney sonuçları ile karşılaştırılması.....	232
Şekil 5.111. Rezonant kolon deney sonuçlarının arazi deney sonuçları ile karşılaştırılması.....	233
Şekil 5.112. 1. Doğrultu ve 2. Doğrultu için etki noktasından yatay uzaklığa bağlı olarak pik parçacık hızı ölçümleri	238
Şekil 5.113. 1. Doğrultu ve 2. Doğrultu için etki noktasından yatay uzaklığa bağlı olarak pik ivme ölçümleri	239
Şekil 5.114. 3. Doğrultu ve 4. Doğrultu için etki noktasından yatay uzaklığa bağlı olarak pik parçacık hızı ölçümleri	243
Şekil 5.115. 3. Doğrultu ve 4. Doğrultu için etki noktasından yatay uzaklığa bağlı olarak pik ivme ölçümleri	244

Şekil 5.116. 3. Doğrultu ve 4. Doğrultu için etki noktasından yatay uzaklığa bağlı olarak pik parçacık hızı ölçümleri	248
Şekil 5.117. 3. Doğrultu ve 4. Doğrultu için etki noktasından yatay uzaklığa bağlı olarak pik ivme ölçümleri	248
Şekil 5.118. KOS Atıksu Arıtma Tesisi ve Kan Merkezi bölgelerinde elde edilen pik parçacık hızı ölçümlerinin karşılaştırması	249
Şekil 5.119. KOS Atıksu Arıtma Tesisi ve Kan Merkezi bölgelerinde elde edilen pik ivme ölçümlerinin karşılaştırması.....	249
Şekil 5.120. KOS Atıksu Arıtma Tesisi ve Kan Merkezi bölgelerinde elde edilen pik deplasman ölçümlerinin karşılaştırması.....	249
Şekil 5.121. B=6 m, d=0,5 m temel boyutları ve 5 Hz. makine çalışma frekansı için gömme derinliğine bağlı olarak temel orta noktası deplasmanları	254
Şekil 5.122. 5 Hz. makine çalışma frekansı için temel kalınlığına bağlı olarak temel orta noktası deplasmanları	254
Şekil 5.123. 5 Hz. makine çalışma frekansı için temel genişliğine bağlı olarak temel deplasmanları	258
Şekil 5.124. Temel gömme derinliği ve temel kalınlığına bağlı olarak temel orta noktası deplasmanları	258
Şekil 5.125. Temel genişlikleri için temel gömme derinliği ve temel kalınlığı etkisi..	259
Şekil 5.126. Deplasmanla üzerindeki frekans ve genlik etkisi	259
Şekil 5.127. 5 Hz. makine çalışma frekansı için zemin yüzünde oluşan deplasmanlar	261
Şekil 5.128. 5 Hz. makine çalışma frekansı için zemin yüzünde oluşan ivmeler	261
Şekil 5.129. Makine çalışma frekansına bağlı olarak temel orta noktası altında meydana gelen aşırı boşluk suyu basınçlarının değişimi	262
Şekil 5.130. Makine çalışma genliğine bağlı olarak temel orta noktası altında meydana gelen aşırı boşluk suyu basınçlarının değişimi	263
Şekil 5.131. 5 Hz. makine çalışma frekansı için temel orta noktasında oluşan deplasmanlar	265
Şekil 5.132. 5 Hz. makine çalışma frekansı için temel köşe noktası hizasında zemin yüzünde oluşan ivmeler	266
Şekil 5.133. Model türüne bağlı olarak temel orta noktası altında meydana gelen aşırı boşluk suyu basınçları.....	266
Şekil 5.134. Temel köşe noktası için farklı zemin parametreleri kullanılarak oluşturulan zemin modellerinin program çıktısı olan ivme-zaman grafiklerinin karşılaştırması	267
Şekil 5.135. Farklı zemin parametreleri kullanılarak oluşturulan zemin modellerinden elde edilen ivme-temel köşe noktasına uzaklık grafiği.....	268
Şekil 5.136. Temel köşe noktasından 27 m uzakta farklı zemin parametreleri kullanılarak oluşturulan zemin modellerinin program çıktısı olan ivme-zaman grafiklerinin karşılaştırması	268
Şekil 5.137. Makine çalışma genliğine bağlı olarak zemin yüzünde oluşan deplasmanlar	270
Şekil 5.138. Makine çalışma genliğine bağlı olarak zemin yüzünde oluşan ivmeler...	270
Şekil 5.139. Makine çalışma genliğine bağlı olarak temel orta noktasında meydana gelen aşırı boşluk suyu basınçları	271
Şekil 5.140. Makine çalışma genliğine bağlı olarak temel köşe noktası hizasında düşey doğrultuda oluşan ivmeler	272
Şekil 5.141. Tek tabakalı zemin profili için 5 Hz. makine çalışma frekansı için temel orta noktasında meydana gelen deplasmanlar	274
Şekil 5.142. Tek tabakalı zemin profili için 5 Hz. makine çalışma frekansı için temel orta noktasında meydana gelen ivmeler.....	275

Şekil 5.143. Zemin rijitliğine bağlı olarak temel orta noktası altında meydana gelen aşırı boşluk suyu basınçları.....	275
Şekil 5.144. Zemin profiline bağlı olarak, 5Hz/100kPa yükleme durumu için temel köşe noktasına uzaklıkla zemin yüzeyinde oluşan a) Deplasmanlar ve b) İvmeler	276
Şekil 5.145. Farklı zemin profilleri için temel orta noktasında meydana gelen a) Deplasmanlar ve b) İvmeler	278
Şekil 5.146. Yumuşak kil zemin kombinasyonları için elde edilen a) Deplasmanlar ve b) İvmeler	279
Şekil 5.147. Orta katı kil zemin kombinasyonları için elde edilen a) Deplasmanlar ve b) İvmeler	280
Şekil 5.148. Katı kil zemin kombinasyonları için elde edilen a) Deplasmanlar ve b) İvmeler	281
Şekil 5.149. Yumuşak-orta sert-sert zemin profili için düşey doğrultuda elde edilen ivmeler	282
Şekil 5.150. Yumuşak-sert-orta sert zemin profili için düşey doğrultuda elde edilen ivmeler	282
Şekil 5.151. Yumuşak zemin modeli için süre etkisi	284
Şekil 5.152. Orta sert zemin modeli için süre etkisi	284
Şekil 5.153. Sert zemin modeli için süre etkisi	285

TABLolar LİSTESİ

Tablo 2.1. Dinamik yükler ve oluşturduğu kayma deformasyonları (Kramer, 1996).....	8
Tablo 2.2. Büyüklük türleri ve özellikleri (Özçep, 2006)	10
Tablo 2.3. Zeminlere göre P-dalga hızları (Das & Ramana, 2011)	19
Tablo 2.4. Zeminlere göre S-dalga hızları (Das & Ramana, 2011)	21
Tablo 2.5. Zemin Poisson oranına bağlı olarak V_R/V_S değerleri (Das & Ramana, 2011)	23
Tablo 2.6. Zeminler için dinamik yüklerin oluşturduğu deformasyonların sınıflandırılması (Özçep, 2006)	25
Tablo 2.7. Laboratuvar deneylerinin birim deformasyon aralığı ve uygulama alanları (Özçep, 2006).....	31
Tablo 2.8. Dinamik parametrelerin belirlenmesinde kullanılan deney sistemleri	32
Tablo 2.9. SPT-N değerleri ile V_s arasındaki ilişkiler (Sivrikaya & Toğrol, 2009)	46
Tablo 2.10. SPT-N değerleri ile G_0 arasındaki ilişkiler (Sivrikaya & Toğrol, 2009)	47
Tablo 2.11. SPT-N değerleri ile Young Modülü arasındaki ilişkiler (Sivrikaya & Toğrol, 2009)	47
Tablo 2.12. SPT-N değerleri ile serbest basınç mukavemeti arasındaki ilişkiler	48
Tablo 2.13. SPT-N değerleri ile kıvam ve serbest basınç mukavemeti arasındaki ilişkiler	48
Tablo 2.14. İzin verilen titreşim genlikleri (Barkan, 1962)	52
Tablo 2.15. Hareket moduna bağlı olarak hareket denklemi parametreleri (Gazetas, 1983)	55
Tablo 2.16. Temel gömme derinliği ile hareket moduna bağlı olarak hareket denklemi parametreleri (Gazetas, 1983).....	57
Tablo 2.17. Gömme derinliği hareket denklemi parametreleri sabitleri (Gazetas, 1983)	58
Tablo 3.1. Sönüm oranı ve kayma modülünü etkileyen parametreler ve önem dereceleri (Hardin & Drnevich, 1972a).....	86
Tablo 3.2. Modül ve sönüm hesabı için a ve b değerleri	88
Tablo 4.1. SPT deneyi darbe sayıları ve SPT-N ₃₀ değerleri	107
Tablo 4.2. 5 sondaj kuyusunda yapılan SPT deneyi darbe sayıları ve SPT-N ₃₀ değerleri	109
Tablo 5.1. Doğal su muhtevası, w (%), değerleri.....	146
Tablo 5.2. SK1 sınıflandırma deneyleri toplu sonuçları	148
Tablo 5.3. SK2 sınıflandırma deneyleri toplu sonuçları	148
Tablo 5.4. Zemin numunelerinin doğal birim hacim ağırlık, γ (kN/m ³), değerleri.....	150
Tablo 5.5. Zemin numunelerin piknometre deneyi ile belirlenen özgül ağırlık, G_s , değerleri	150
Tablo 5.6. Zemin numunelerinin faz ilişkileri ile belirlenen doğal boşluk oranları, e.	151
Tablo 5.7. Konsolidasyon deneyi toplu sonuçları	156
Tablo 5.8. Sondaj kuyularında doğal su muhtevasının, w (%), derinlikle değişimi	157
Tablo 5.9. Zemin numunelerin doğal birim hacim ağırlık, özgül ağırlık ve boşluk oranı değerleri	158
Tablo 5.10. Zemin numunelerin kayma dayanımı parametreleri	159
Tablo 5.11. SPT deneyi darbe sayıları	218
Tablo 5.12. SK1 için düzeltilmiş SPT-N sayıları.....	219
Tablo 5.13. SK2 için düzeltilmiş SPT-N sayıları.....	219
Tablo 5.14. Literatür korelasyonları ile elde edilen kayma modülü değerleri	221
Tablo 5.15. Literatür korelasyonları ile elde edilen kayma modülü değerleri	221

Tablo 5.16. SK1 için SPT sayılarına bağlı olarak farklı korelasyonlarla elde edilen kayma dalgası hızı değerleri	222
Tablo 5.17 SK2 için SPT sayılarına bağlı olarak farklı korelasyonlarla elde edilen kayma dalgası hızı değerleri	223
Tablo 5.18. SPT Deneyi Darbe Sayıları.....	224
Tablo 5.19. Hesaplamalarda kullanılan ortalama SPT sayıları	225
Tablo 5.20. Literatür korelasyonları ile elde edilen kayma modülü değerleri	225
Tablo 5.21 SPT sayılarına bağlı olarak farklı korelasyonlarla elde edilen kayma dalgası hızı değerleri	226
Tablo 5.22. MASW ile elde edilen kayma modülü, G (MPa), değerleri	229
Tablo 5.23. MASW ile elde edilen kayma modülü, G (MPa), değerleri	232
Tablo 5.24. 1. Doğrultu 10 kg yük etkisi ile alınan ölçüm sonuçları	235
Tablo 5.25. 1. Doğrultu 15 kg yük etkisi ile alınan ölçüm sonuçları	236
Tablo 5.26. 2. Doğrultu 10 kg yük etkisi ile alınan ölçüm sonuçları	237
Tablo 5.27. 2. Doğrultu 15 kg yük etkisi ile alınan ölçüm sonuçları	238
Tablo 5.28. 3. Doğrultu 10 kg yük etkisi ile alınan ölçüm sonuçları	240
Tablo 5.29. 3. Doğrultu 15 kg yük etkisi ile alınan ölçüm sonuçları	241
Tablo 5.30. 3. Doğrultu 10 kg yük etkisi ile alınan ölçüm sonuçları	242
Tablo 5.31. 3. Doğrultu 15 kg yük etkisi ile alınan ölçüm sonuçları	243
Tablo 5.32. 1. Doğrultu 10 ve 15 kg yük etkisi ile alınan ölçüm sonuçları	245
Tablo 5.33. 2. Doğrultu 10 kg yük etkisi ile alınan ölçüm sonuçları	246
Tablo 5.34. 2. Doğrultu 15 kg yük etkisi ile alınan ölçüm sonuçları	247
Tablo 5.35. B=6 m, d=0,5 m ve temel zemin yüzeyinde durumu için temel deplasmanları	251
Tablo 5.36. B=6 m, d=0,5 m için gömme derinliğine bağlı olarak temel deplasmanları	253
Tablo 5.37. B=6 m, D _f =2 m için temel kalınlığına bağlı olarak temel deplasmanları	255
Tablo 5.38. B=6 m, D _f =2 m d=1 m için temel/makine ağırlığına bağlı olarak temel deplasmanları	256
Tablo 5.39. D _f =2 ve 3 m d=1 ve 2 m için makine ağırlığı değiştirilmeden elde edilen temel deplasmanları	257
Tablo 5.40. Makinenin çalışması ve durması aşamalarında zeminin yüzünde meydana gelen deplasmanlar	260
Tablo 5.41. Farklı deneyler ile elde edilen zemin parametreleri ile oluşturulmuş modellerin analizlerinden elde edilen deplasmanlar.....	264
Tablo 5.42. KOS Atıksu Arıtma Tesisi bölge zemini ile oluşturulan zemin modelleri ile makine çalışma genliğine bağlı olarak elde edilen analiz sonuçları	269
Tablo 5.43. KOS Atıksu Arıtma Tesisi bölge zemini ile oluşturulan zemin modelleri ile makine çalışma genliğine bağlı olarak düşey doğrultuda elde edilen ivme değerleri ..	272
Tablo 5.44. Tek tabaka zemin profili için elde edilen deplasmanlar	273
Tablo 5.45. Değişken tabakalanma durumları için elde edilen deplasmanlar.....	277
Tablo 5.46. Süre etkisine bağlı olarak elde edilen deplasmanlar	283
Tablo 6.1. FMC fabrika sahası için rezonant kolon deneyi sonuçları.....	289
Tablo 6.2. KOS Atıksu Arıtma Tesisi sahası için rezonant kolon deneyi sonuçları	290

1. GİRİŞ

Zeminler, çok geniş aralıkta değişen dane boyutuna sahip olan doğal malzemeler olup, hem yapı malzemesi olarak kullanılmakta hem de yapıların üzerine oturduğu temeller için temel yükü taşıyıcı ortam olmaktadır. Yapı temelleri altındaki ya da civarındaki zeminler hem statik hem de dinamik yüklere maruz kalabilir. Farklı statik ve dinamik yüklere maruz kalan zeminlerin davranışları ve performansları zemin özelliklerine bağlı olarak bir zeminden diğerine önemli ölçüde değişim gösterebilmektedir. Geoteknik mühendisleri, seçilen bir inşaa bölgesinde bulunan zemin ortamını inceleyerek, zeminleri sınıflandırmaya, dış yükler etkisi altındaki davranışlarını ve gerilme-birim deformasyon özelliklerini belirlemeye çalışırlar.

Zemin Mekaniği ve Geoteknik Mühendisliği, genel olarak zeminlerin statik yükler altındaki taşıma gücü ve oturma davranışlarını inceleyen bir bilim dalıdır. Hem oturma hem de taşıma gücü (göçme) problemlerinde, kolaylıkla ölçülebilir seviyelerdeki birim deformasyona (%5-10) maruz zeminlerin davranışları ele alınmaktadır. Bu nedenle klasik zemin mekaniğinde, küçük birim deformasyonlara maruz zeminlerin davranışı dikkate alınmamaktadır. Ancak dinamik etkiler hem zemini hem de üzerindeki yapıyı en çok etkileyen unsurlardandır. Zamana bağlı olarak değişim gösteren dinamik yükler nedeniyle, zeminler 10^{-6} kadar küçük birim deformasyon seviyelerinden, daha büyük birim deformasyon seviyelerine maruz kalabilirler. Bu nedenle yirminci yüzyılda Zemin Dinamiği ve Geoteknik Deprem Mühendisliği bilim dalları ortaya çıkmıştır.

Zemin dinamiği ve geoteknik deprem mühendisliğinde başlıca aşağıdaki konular ele alınmaktadır (Kramer, 1996; Özkan, 2017).

- Zemin tabakalarında dalga yayılımı,
- Deprem esnasında oluşan yer hareketi tahmini,
- Tekrarlı yükler altında zeminin gerilme-birim deformasyon ve dayanım özelliklerinin belirlenmesi,
- Dinamik yükler altında zemin kitlelerinin davranışı,
- Zemin tabakalarının yer hareketinin özelliklerine etkisi,
- Zemin tabakalarının sıvılaşma riskinin belirlenmesi,
- Sismik etkiler esnasında şev stabilitesinin araştırılması,
- Sismik etkiler altında dayanma yapılarına gelen ek kuvvetler,

- Dinamik etkiler altındaki temellerin davranışı ve en uygun temel tipinin belirlenmesi,
- Barajlar ve toprak dolgu yapıların sismik etkiler altındaki davranışı,
- Beklenen deprem etkilerini azaltmak için zemin iyileştirme tekniklerinin belirlenmesi ve geliştirilmesi,

Zemin dinamiğindeki gelişmeler, 1964 yılında meydana gelen Niigata (Japonya) depremine dayanmaktadır. Bu depremden sonra daha güvenli yapı-zemin tasarımı için zeminlerin dinamik yükler altındaki davranışı belirlenmeye çalışılmıştır. Deprem gibi tekrarlı yüklere maruz kalan zemin tabakalarının davranışının önceden tahmin edilmesi ve bu davranış göz önünde bulundurularak ihtiyaç halinde gerekli önlemlerin alınması, zemin tabakalarında ve bu tabakalar üzerindeki yapılarda oluşabilecek hasarların azaltılabilmesini sağlayacaktır.

Zemine etkiyen başlıca dinamik yükler depremler, açık deniz dalgaları, makinelerin yol açtığı titreşimler, trafik yükü, vb. sayılabilir. Depremler zemin dinamiği alanında en çok çalışılan dinamik yüklerdir. Bunun dışından dinamik yüklerin en fazla etkili olduğu yapılar sanayi yapılarıdır. Sanayideki gelişmelere paralel olarak, özellikle sanayi bölgelerinde, büyük ve ağır makineler kullanılmakta ve çok hassas üretim yapılmaktadır. Makineler tarafından üretilen dinamik yükler, makinenin ve oturduğu temelin statik yükleri ile temel zeminine iletilmekte, makine-temel-zemin sisteminin davranışı yapılacak tasarımda göz önüne alınması gereken hususların başında gelmektedir. Ayrıca dinamik etkiler esnasında oluşan titreşimler sadece makine temeli altındaki zemini etkilememekte, zemin tabakaları içinde frekans içeriği, genlik ve süre olarak değişikliğe uğrayarak yayılıp yakınındaki zemin tabakalarını ve bunlar üzerindeki yapıları da etkilemektedir. Bu nedenle makine temelleri altında ve civarındaki zeminlere ait dinamik parametrelerin doğru şekilde belirlenmesi gerekmektedir. Bu problemlerin çözümüne yönelik laboratuvar ve arazi deneyleri yapılmaktadır. Ayrıca literatürde dinamik zemin parametrelerinin belirlenmesi için zemin tipi ve fiziksel özelliklerine bağlı olarak çeşitli ampirik formülasyonlar geliştirilmiştir.

Yapı-zemin etkileşimi problemlerinin çözümünde, dinamik zemin parametreleri belirlendikten sonra çeşitli sonlu elemanlar programları ile yapı-zemin sisteminin modellenmesi yapıp sistem davranışı belirlenmektedir. Modellemede kullanılan sonlu elemanlar programlarında zemin ortamını tanımlamak için çeşitli bünye modelleri kullanılmaktadır. Zemin yük geçmişi, mevcut yük durumu, yükleme ve drenaj durumları göz önünde bulundurularak en uygun malzeme bünye modeli seçilmelidir.

Bu tez çalışmasında, kil zeminler üzerine oturan makine temellerinin dinamik zemin parametrelerine bağlı olarak oluşturduğu etkiler araştırılmıştır. Zemin dinamiği ile ilgili literatürde yer alan çalışmalar, genel olarak, deprem kaynaklı zeminin dinamik davranışı ve yapı-zemin etkileşimi ile ilgilidir. Makinelerin oluşturduğu titreşimler ve bunların dinamik etkilerinden kaynaklı, makinelerin bulunduğu ortamda ve çevresinde oluşturduğu etkiler yeterince incelenmemiştir. Bu çalışmada, farklı sertlikteki kil zeminler üzerine oturan harmonik yük üreten ve darbe etkili makine temellerinin, zeminin dinamik parametrelerine bağlı olarak temel altında ve çevre zemininde oluşturduğu etkiler araştırılmış ve makine-temel-zemin sistemi modellenmiştir.

Konya 2. Organize Sanayi Bölgesi (KOSB), çalışma alanı olarak belirlenmiştir. Çünkü bu bölge ve çevresi Konya sanayisinin önemli bir bölümünü oluşturmaktadır. 2. Organize Sanayi Bölgesi ve çevresi, göl ortası çökellerinden oluşmaktadır. Bölge zemin, geniş bir alana yayılan jips içerikli konsolide olmamış yumuşak kil zemin tabakalarından meydana gelmiştir ve çok sıkışabilir yapıdadır. Bölge, morfolojik olarak düz bir topografyaya sahip olmakla birlikte, 120–130 m derinliğe uzanan killi-silt ve siltli kil çökellerden oluşmaktadır. Bu derinliğin altında ise alt miyosen-üst pliyosen yaşlı göl sel kireç taşlarının yüzeylendiği bilinmektedir (Yıldız vd., 2012).

Tez çalışmasında, zeminin dinamik parametrelerini belirlemek amacıyla Konya 2. Organize Sanayi Bölgesi'nde, FMC fabrika sahası ve KOS Atıksu Arıtma Tesisi sahası olmak üzere 2 alanda, her bir alanda 2 sondaj olmak üzere toplamda 4 adet sondaj yapılmıştır. Ayrıca çalışma kapsamında, makinelerin oluşturduğu dinamik etkilerin, daha sert kil zemin tabakalarındaki etkisini araştırmak amacıyla Selçuk Üniversitesi Kan Merkezi sahasında deneysel çalışmalar yapılmıştır.

FMC fabrika sahasında yapılan sondajlar ile alınan zemin numuneleri üzerinde zeminin fiziksel özellikleri ve dinamik zemin parametrelerinin belirlenmesi için laboratuvar deneyleri yapılmıştır. Dinamik zemin parametrelerinin belirlenmesi için rezonant kolon test cihazı kullanılmıştır. KOS Atıksu Arıtma Tesisi sahasında yapılan sondajlar ile alınan zemin numuneleri üzerinde sadece rezonant kolon deneyleri yapılmıştır. Zemin tabakalarının fiziksel özellikleri, daha önce bu saha için yapılan, mevcut zemin etüt raporlarından elde edilmiştir.

Yapılan rezonant kolon deney sonuçları ile zemin tabakalarının kayma modülü ve sönüm oranı eğrileri belirlenmiştir. Elde edilen bu eğriler literatür eğrileri ile karşılaştırılmış ve bölge zeminini en iyi yansıtan eğriler belirlenmiştir.

Çalışma kapsamında FMC fabrika sahasında aynı zamanda Standart Penetrasyon Deneyi ile Çok Kanallı Yüzey Dalgası Analiz Yöntemi (MASW) deneyleri yapılmıştır. KOS Atıksu Arıtma Tesisi sahasında ise MASW ve mikrotremör arazi deneyleri yapılmıştır. Bu deneyler yardımı ile literatürdeki korelasyonlar kullanılarak zemin tabakalarının dinamik parametreleri ve zemin büyütmesi değerleri elde edilmiştir. Hem arazi deneyleri hem de laboratuvar deneyleri ile elde edilen dinamik parametreler karşılaştırılmıştır.

Çalışma kapsamında darbe etkili makine temellerinin farklı sertlikte kil zemin tabakalarında oluşturdukları dinamik etkileri belirlemek amacıyla, KOS Atıksu Arıtma Tesisi ve Selçuk Üniversitesi Kan Merkezi sahalarında, dinamik plaka deney sistemi ile dinamik etki oluşturulmuş ve Instantel Minimate Plus cihazları ile kayıtlar alınmıştır. KOS Atıksu Arıtma Tesisi saha zemin profili yumuşak kil zeminden oluşurken ve Selçuk Üniversitesi Kan Merkezi binasının bulunduğu bölge zemini sert kil zemin profiline sahiptir. Instantel Minimate Plus cihazları ile bu iki bölgede alınan kayıtların incelenmesi ile pik parçacık hızı, pik ivme ve pik deplasman değerleri karşılaştırılmıştır. Böylece darbe etkili makinelerin oluşturduğu etkilerin farklı zemin profillerindeki etkisi belirlenmiştir.

PLAXIS 2D sonlu elemanlar programında hem laboratuvar hem de arazi deneyleri ile elde edilen dinamik zemin parametreleri kullanılarak makine-temel-zemin sistemi ayrı ayrı modellenmiştir. Zemin tabakalarının davranışını temsil etmek için zemin modeli olarak Hardening Soil Model seçilmiştir. Modelleme aşamasında dinamik etkiyi oluşturmak için harmonik yük üreten dönel makine seçilmiştir. Zemin modeli üzerine harmonik yük oluşturan makineleri temsil eden yayılı yük uygulanmıştır. Temel ağırlığı/makine ağırlığı literatüre göre 2,1 olarak alınmıştır. Makinenin çalışma süresi 1 sn olarak seçilmiştir. Harmonik yük üreten makinenin çalışma frekansı ve genliği değiştirilerek, farklı zemin profillerinde makine çalışma genliği ve frekansının makine-temel-zemin sisteminin davranışı üzerindeki etkisi araştırılmış ve karşılaştırılmıştır. Analizler sonucunda temel deplasmanları göz önünde bulundurularak, en uygun temel boyutları (genişlik ve kalınlık) belirlenmiştir. Ayrıca makine temellerinin tasarımında etkili parametrelerden biri olan temel gömme derinliğidir. Aynı makine çalışma genliği ve frekans değerleri için gömme derinliği değiştirilerek, en uygun gömme derinliği belirlenmiştir. En uygun temel boyutları ve temel gömme derinliği için yapılan analizlerde temel deplasmanları, boşluk suyu basınçları ve ivmeler belirlenmiştir.

İlave olarak, makinenin çalışmasıyla oluşan dinamik etkilerin çevre zeminde oluşturduğu etkileri değerlendirmek için, temel köşe noktasından belirli uzaklıklarda zemin yüzeyinde oluşan deplasmanlar ve ivmeler belirlenmiş ve karşılaştırılmıştır. Bu modellemelerde ana zemin olarak FMC fabrika bölge zemini ele alınmıştır. Bu bölge zemini için belirlenen temel boyutları ve temel gömme derinliği, KOS Atıksu Arıtma Tesisi saha zemini ile oluşturulan makine-temel-zemin sistemi modellemesinde kullanılmıştır. Temel tabanında oluşan deplasmanlar, boşluk suyu basınçları ve ivme değerleri ile zemin yüzeyinde oluşan deplasmanlar, ivmeler belirlenmiş ve karşılaştırılmıştır.

Modelleme aşamasında bölge zeminlerine ek olarak, literatür verilerinin göz önünde bulundurulduğu yumuşak, orta sert ve sert zemin tabakalarından oluşan farklı kombinasyonlarda zemin profilleri oluşturulmuştur. FMC fabrika saha zemini modellemeleri ile belirlenen temel boyutları ve gömme derinliği ile en olumsuz yükleme koşulu olan 5 Hz. makine çalışma frekansında makine-temel-zemin sisteminin analizleri yapılmış, temel tabanında ve zemin yüzeyinde meydana gelen deplasman ve ivme değerleri karşılaştırılmıştır. Bu model üzerinde makine çalışma süresinin temel deplasmanları üzerindeki etkisini değerlendirmek için makine çalışma süresi 1 sn, 5 sn, 15 sn ve 60 sn olarak analizler gerçekleştirilmiş ve sonuçlar karşılaştırılmıştır.

Bu tez çalışması 6 bölümden oluşmaktadır. 1. Bölümde tez çalışma konusu ile kısa bir bilgi verilmiştir. 2. Bölümde dinamik yükler, dinamik etki ile zeminde oluşan dalgalar ve dalga yayılımı, dinamik zemin parametreleri ve bu parametrelerin laboratuvar ve arazi deneyleri ile nasıl belirlendiği ve zemin davranışının belirlenmesi için kullanılan bünye modelleri ile ilgili bilgi verilmiştir. 3. Bölümde, tez çalışmasında faydalanılan literatür çalışmaları hakkında kısa bilgiler verilmiştir. Ayrıca tez çalışmasında elde edilen kayma modülü ve sönüm oranı eğrilerinin karşılaştırılmasında kullanılan literatür çalışmalarındaki eğrilere de bu bölümde yer verilmiştir. 4. Bölümde, tez çalışması kapsamında, üç bölgede gerçekleştirilen laboratuvar ve arazi deneylerine detaylı olarak yer verilmiştir. Yapılan deneyler ile belirlenen zemin parametreleri ve kullanılan korelasyonlar yer almaktadır. Ayrıca tez çalışması kapsamında PLAXIS 2D sonlu elemanlar programı ile gerçekleştirilen makine-temel-zemin sistemi modellemelerine değinilmiştir. 5. Bölümde, her bölgede yapılan laboratuvar ve arazi deneylerinin sonuçları ayrı ayrı sunulmuştur. Ayrıca sonlu elemanlar programı ile yapılan analiz sonuçları detaylı olarak sunulmuştur. 6. Bölümde ise tüm çalışmalardan elde edilen veriler değerlendirilmiş ve çalışmanın genel sonuçları sunulmuştur. Ayrıca çalışma sonuçları göz

önünde bulundurularak, ileride yapılacak çalışmalara da yön verebilecek öneriler bu bölümde yer almaktadır.



2. DİNAMİK ETKİLERE MARUZ ZEMİN DAVRANIŞI

Zeminler başlıca iki tip yüklemeye maruz kalırlar. Bunlar, statik ve dinamik yüklerdir. Statik yükler zamanla değişmeyen yüklerken, dinamik yükler zamanla değişen yükler olup zamanla değişen deformasyonlara neden olurlar. Zemine etkiyen başlıca dinamik yükler, depremler, açık deniz dalgaları, makinelerin yol açtığı titreşimler, trafik yükü, patlatmalar, kazık çakımı, kompaksiyon faaliyetleri ve rüzgâr yükleri olarak sayılabilir. Bu dinamik yükler dört ana başlık altında toplanabilir. Bunlar; harmonik hareketler, periyodik hareketler, gelişigüzel titreşimler, geçici titreşimlerdir (Özaydın, 2016). Makinelerin oluşturduğu titreşimler zeminde genellikle harmonik ve periyodik bir titreşim oluştururken, patlatmalar, ağırlık düşüren ya da darbe oluşturan makineler (kazık çakımı ve dinamik kompaksiyon, vb.) zeminde geçici titreşimlere yol açmaktadır. Bunun dışında depremler, dalgalar, rüzgârlar gibi doğa olayları ise zeminde gelişigüzel titreşimler oluşturmaktadır.

2.1. Zemine Etkiyen Dinamik Yükler

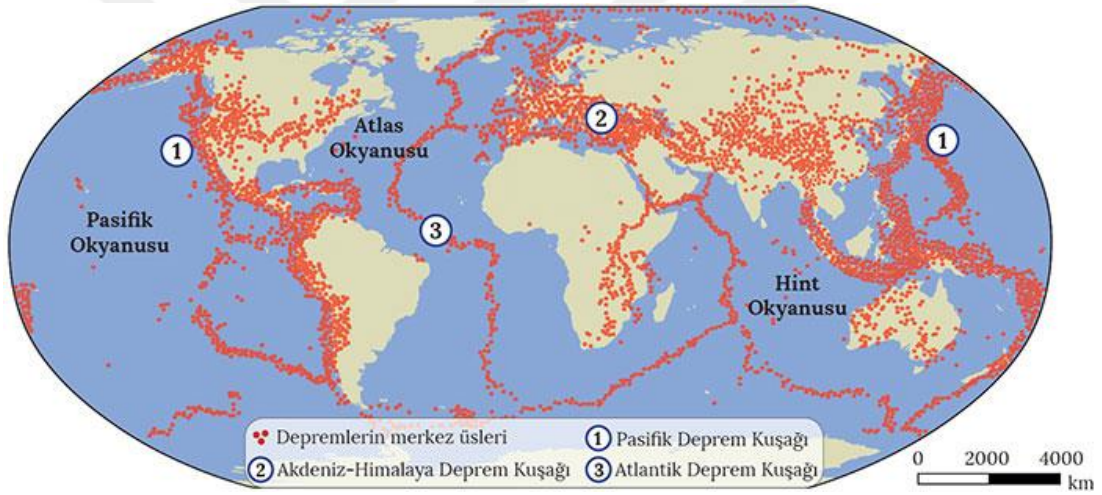
Dinamik yükler, farklı şiddet, frekans ve sürelerle sahiptir. Örneğin makine yükleri belirli bir frekans ve fonksiyona sahip harmonik bir fonksiyonla tanımlanabilirken, trafik, rüzgâr, dalga ve deprem yükleri ise önceden belirlenebilen bir fonksiyona sahip değildir. Ayrıca deprem yükü yüksek genlik ve kısa süreli iken, dalga, trafik veya makine temel titreşimi kısa genlikli ve uzun sürelidir.

Bunun dışında dinamik yükler, özelliklerine ve büyüklüklerine göre zeminde farklı birim deformasyonlara yol açmaktadır (Tablo 2.1). Makine titreşimleri, trafik yükünden kaynaklı oluşan titreşimler, rüzgâr titreşimleri gibi küçük genlikli titreşimler küçük birim deformasyonlara neden olup zeminin elastik davranmasına sebep olurken; depremler, nükleer patlamalar, heyelanlar gibi büyük birim deformasyonlara yol açan dinamik etkiler ise zeminde plastik deformasyonlar meydana getirmektedir. Bu nedenle zemine etki eden tekrarlı yükün ve bu yükler altında zeminin gerilme-birim deformasyon davranışının doğru modellenmesi ve zemin özelliklerine etki eden faktörlerin ve kayma mukavemetinde meydana gelen değişimlerin iyi değerlendirilmesi gerekmektedir.

Tablo 2.1. Dinamik yükler ve oluşturduğu kayma deformasyonları (Kramer, 1996)

Kayma Birim Deformasyonu, $\gamma(\%)$	10^{-6}	10^{-5}	10^{-4}	10^{-3}	10^{-2}	10^{-1}	10^0	10^1
Olay		Dalgalar Makine titreşimleri	Depremler Oturmalar		Heyelanlar Sıvılaşma		Nükleer patlamalar	
Zeminin Dinamik Özelliği		Elastik	Elasto-Plastik		Plastik		Göçme	
Kayma Gerilmesi Türü		Çok küçük	Küçük		Büyük		Çok büyük	

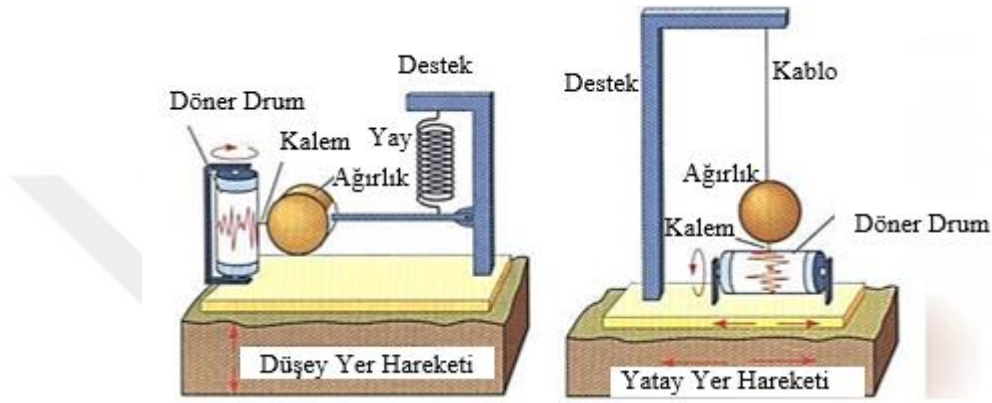
Zemine etkiyen en önemli dinamik yükler depremler nedeniyle oluşmaktadır. Deprem, yeryüzünde hissedilen ve doğal kaynaklı yer sarsıntılarıdır. Bu yer sarsıntıları, katı-rijit litosfer bloklarının kırılmaları ve kaymaları sonucu açığa çıkan elastik deformasyon enerjisinin deprem dalgaları şeklindeki titreşim hareketleridir. Dünyada meydana gelen depremler, özellikle iki kuşak üzerinde toplanmaktadır (Şekil 2.1).

**Şekil 2.1.** Dünya deprem kuşakları

Bu kuşaklardan birisi ve en belirgin olanı Pasifik Okyanusunu çevreleyen Pasifik Kuşağı, diğeri Cebeli Tarık'tan Endonezya adalarına kadar uzanan ve Türkiye ile yakın komşularını içine alan Alp-Himalaya deprem kuşağıdır. Alp-Himalaya kuşağı üzerinde yer alan ülkemizin yüz ölçümünün % 42'si birinci derece deprem kuşağı üzerindedir.

Bir deprem meydana geldiğinde, ana kayada oluşan cisim dalgaları zemin yüzeyine doğru yayılırken yer sarsıntısı meydana gelmektedir. Zemin içerisinde hareket eden cisim dalgaları P ve S dalgalarıdır. Yüzeye ulaşan cisim dalgalarının yüzeyle etkileşimi sonucunda, yüzey dalgaları meydana gelmektedir. En önemli yüzey dalgaları ise Rayleigh ve Love dalgalarıdır.

Depremler ilk olarak *şiddet* kavramına göre sınıflandırılmıştır. Şiddet sınıflandırması gelişen teknoloji ile önemini yitirip, yerini sismografların geliştirilmesi ile kullanılan *büyüklik (magnitüd)* kavramına bırakmıştır. *Sismograf*, depremler dalgalarının neden olduğu yeryüzü hareketini, zamanın bir fonksiyonu olarak kaydeden alettir (Şekil 2.2). Sismograflar tarafından kaydedilen yer sarsıntısına *sismogram* denilmektedir. Deprem anında meydana gelen yer hareketini ivme ile orantılı olarak kaydeden aletlere ise *akselerograf* adı verilmektedir.



Şekil 2.2. Yatay ve düşey sismograflar

Magnitüd, depremde açığa çıkan enerjinin bir göstergesidir. Deprem merkezinden 100 km uzakta bulunan standart bir Wood-Anderson sismografı tarafından kaydedilen yatay yer hareketine ait en büyük genliğin logaritmasıdır. Her depremin tek bir magnitüd değeri vardır. Deprem merkezinden olan uzaklığa göre bir sismografa gelen deprem dalgalarının türleri farklı olabilir. Bu nedenle sismologlar tarafından kullanılan birçok deprem büyüklük ölçekleri vardır. Bunlardan bazıları aşağıda yer almaktadır. Tablo 2.2’de deprem büyüklük türleri ve kullanım yerleri yer almaktadır.

Yerel Büyüklük Ölçeği (Richter Ölçeği- M_L), 1935 yılında Richter tarafından depremleri ölçmek için önerilen ilk yöntemdir. Deprem merkezinden uzaklaştıkça yüzey dalgalarının genliklerinin küçülmesi nedeniyle cisim dalgalarından hesaplanan magnitüd, M_L , değeridir. Sığ ve lokal depremler ($M < 6.0$ ve uzaklık < 700 km) için kullanılır. En çok kullanılan ölçektir. Bağntı (2.1) kullanılarak hesaplanır. Bu bağntıda A, standart bir Wood-Anderson sismografının kaydettiği maksimum iz genliği (mm) ve $A_0 = 0.001$ mm'dir.

$$M_L = \log A - \log A_0 \quad (2.1)$$

Tablo 2.2. Büyüklük türleri ve özellikleri (Özçep, 2006)

Tür	Özellik	Kullanım Yeri
M _L (Yerel Büyüklük)	Episantırdan 600 km uzaklığa kadar olan bölgede olmuş depremler için	Türkiye Depremleri
M _S (Yüzey Dalgaları)	2000 km'den daha uzak mesafelerde ölçülen ve <100 km sığ derinliklerde oluşan dünya depremlerinin büyüklüğünü hesaplamada	Dünya Depremleri
M _b (Cisim Dalgaları)	1600 km'den daha uzak mesafelerde ölçülen 7.0'den büyük dünya çapında depremler için	Dünya Depremleri
M _w (Moment Büyüklüğü)	>7.5 olan ve diğer ölçeklerin kestiremediği büyük depremlerin büyüklüğünü kestirmede	Dünya Depremleri

Yüzey Dalgası Büyüklük Ölçeği (M_S), yaklaşık 20 saniyelik bir periyoda sahip yüzey dalgalarının genliğine göre belirlenir. Bağntı (2.2) ile tanımlanır. Bu bağntıda A', maksimum yer değiştirme (μm) ve Δ, sismografa derece olarak dış merkez uzaklığıdır.

$$M_S = \log A' + 1.66 \log \Delta + 2.0 \quad (2.2)$$

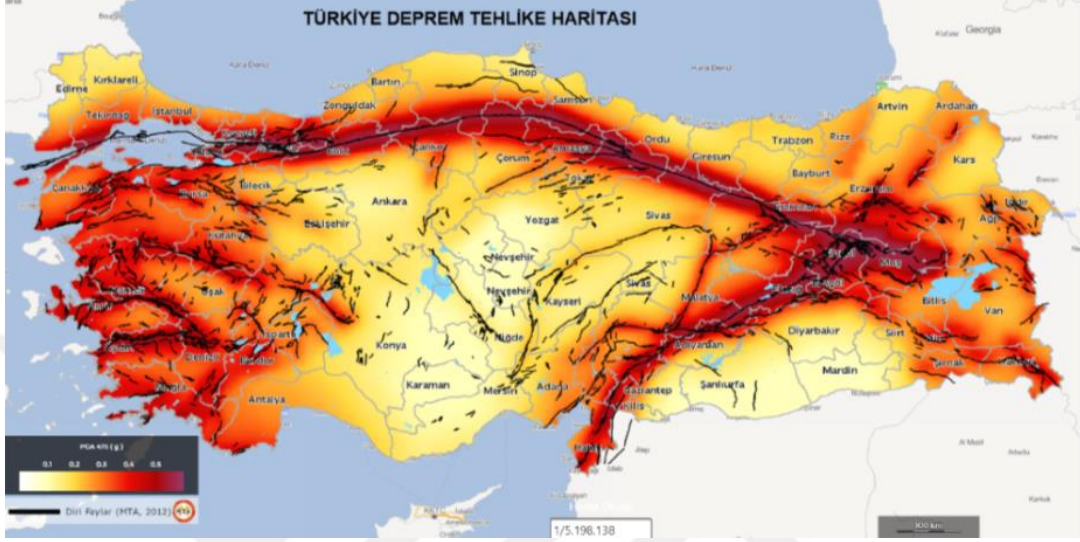
Cisim Dalgası Büyüklüğü Ölçeği (M_b), yüzeyden yayılan dalgalar yerine derinliklerde ilerleyen dalgalar kullanılmaktadır. *Moment Büyüklük Ölçeği (M_w)*, depremde hareket eden faydaki atımdan hesaplanan moment büyüklüğüdür. Bu büyüklüğü hesaplamak için ilk olarak sismik moment belirlenmektedir. *Sismik moment* Bağntı (2.3) kullanılarak hesaplanmaktadır. Bu bağntıda, M₀, sismik moment (Nm), η, fay düzlemi boyunca materyalin kayma modülü (N/m²), A_f, kaymaya uğrayan fay düzlemi alanı (m²) ve D, yırtılan fayın ortalama yer değiştirmesi (m)'dir. Sismik moment belirlendikten sonra depremin moment büyüklüğü Bağntı (2.4) ile hesaplanır.

$$M_0 = \eta * A_f * D \quad (2.3)$$

$$M_w = -6.0 + 0.67 \log M_0 \quad (2.4)$$

Depremler gerçekleşme derinliklerine göre ise odak derinliği 60 km'ye kadar olan depremlere *sığ depremler*, 60 ila 300 km arasında olanlara *orta derinlikte depremler*, 300 ila 700 km arasında olanlara da *derin depremler* olarak sınıflandırılır.

Bir bölgede meydana gelen depremlerin şiddeti ve tekrarlanma sayısı, o bölgenin depremselliğini belirler. Depremselliğe bakılarak deprem bölgesi haritaları yapılmaktadır. AFAD tarafından yayımlanan 2018 yılı Türkiye deprem tehlike haritası Şekil 2.3'te yer almaktadır.



Şekil 2.3. Türkiye deprem tehlike haritası (AFAD, 2018)

2.2. Zeminlerde Dalga Yayılımı

Zemine etkiyen dinamik yüklerden en önemlisi, zeminin farklı derinliklerinde meydana gelen doğa olayı olan depremlerdir. Depremler, trafik yükü ve makine titreşimleri nedeniyle oluşan dalgalar zemin tabakaları içerisinde yayılırlar. Bu dalgaların yayılması esnasında geçtikleri ortamda gerilmeler meydana gelir. Bu nedenle bu dalgalar gerilme dalgaları olarak da adlandırılmaktadır. Zemin dinamiğinde dalga yayılımı esnasında oluşan bu gerilmeler incelenerek kayma modülü, sönüm oranı ve elastisite modülü gibi zemin parametreleri elde edilmektedir.

Doğal zemin tabakaları içerisinde dalga yayılımının incelenmesi oldukça karmaşıktır. Bu nedenle zeminlerde dalga yayılımının incelenmesi için ilk olarak elastik bir ortamda dalganın yayılımı incelenmelidir (Özaydın, 2016). Bu amaçla aşağıda elastik bir çubukta dalga yayılımı, elastik sonsuz bir ortamda dalga yayılımı ve elastik yarı sonsuz ortamda dalga yayılımı ele alınacaktır. Kuvvet dengeleri ve yer değiştirmelerin uyumluluğu gibi ana gereklilikler ve birim deformasyon-yer değiştirme ve gerilme-birim deformasyon ilişkileri kullanılarak bir boyutlu dalga yayılımı denklemleri çözülmektedir.

2.2.1. Elastik bir çubukta dalga yayılımı

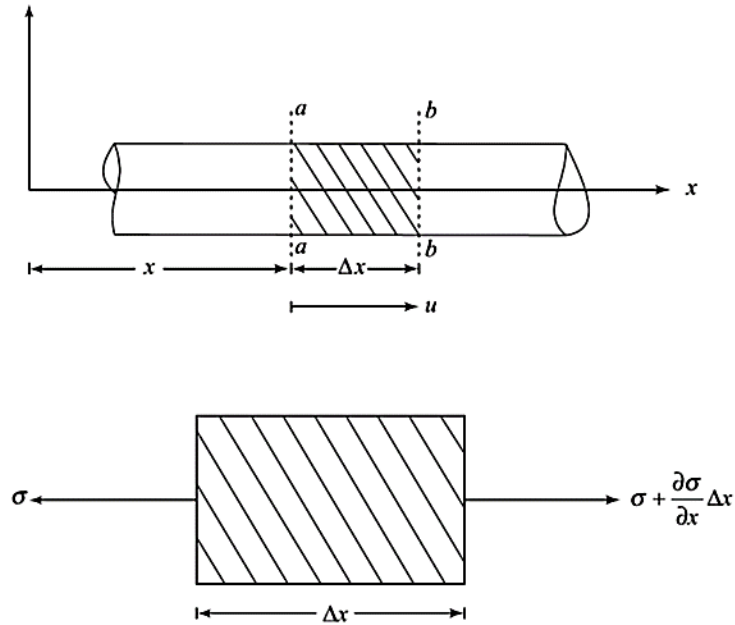
Bir çubukta üç farklı tür titreşim meydana gelebilir. Bunlar;

- Yanal yer değiştirme olmaksızın, çubuk ekseninin uzaması veya kısalması esnasında oluşan boyuna titreşim,
- Eksenin yanal yer değiştirmesi olmaksızın, eksen etrafında çubuğun dönmesi ile oluşan burulma titreşimi,
- Eksenin yanal olarak hareketi ile eğilme titreşimi.

Bu üç durumdan eğilme titreşiminin zemin dinamiğinde uygulaması az olduğundan ilk iki durum ele alınacaktır.

Titreşim hareketi esnasında ortaya çıkan enerji elastik bir çubuk içerisinde yayılırken sahip olduğu enerjiyi bir daneden diğerine aktarır. Bu aktarma yoluyla elastik çubuk içerisinde dalga yayılımı gerçekleşir (Das & Ramana, 2011).

Eğer sonsuz uzunlukta elastik bir çubuk radyal birim deformasyona karşı sınırlandırılrsa, boyuna dalgalardan dolayı oluşan parçacık yer değiştirmeleri çubuk eksenine paralel olur. En kesit düzlemleri düzlem olarak kalır ve gerilmeler üniform olarak dağılır.



Şekil 2.4. Elastik çubukta normal gerilme (Das & Ramana, 2011)

Şekil 2.4'te yer alan çubuk üzerindeki bir kesitte x ve $x + \Delta x$ mesafesindeki gerilmeler gösterilmektedir. Kesit uçlarına etkiyen dengelenmemiş dış kuvvetler, kesit

kütlesinin ivmesinden kaynaklı iç kuvvetlere eşit olmalıdır. Bu durumda, Newton'un ikinci yasası gereği dx uzunluğundaki parçanın hareketi Bağntı (2.5) ile ifade edilir. Bu bağntıda A çubuğun kesit alanı, t zaman, ρ çubuğun yoğunluğu ve u çubuğun deplasmanıdır. Bağntı (2.5) sadeleştirildiğinde Bağntı (2.6) elde edilir.

$$A \left(\frac{\partial \sigma}{\partial x} \Delta x + \sigma \right) - A\sigma = A(\Delta x)\rho \left(\frac{\partial^2 u}{\partial t^2} \right) \quad (2.5)$$

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

Elastik bir çubukta deformasyon modülü elastisite modülü ile gösterilirse, gerilme-birim deformasyon ilişkisi Bağntı (2.7)'deki gibi elde edilir.

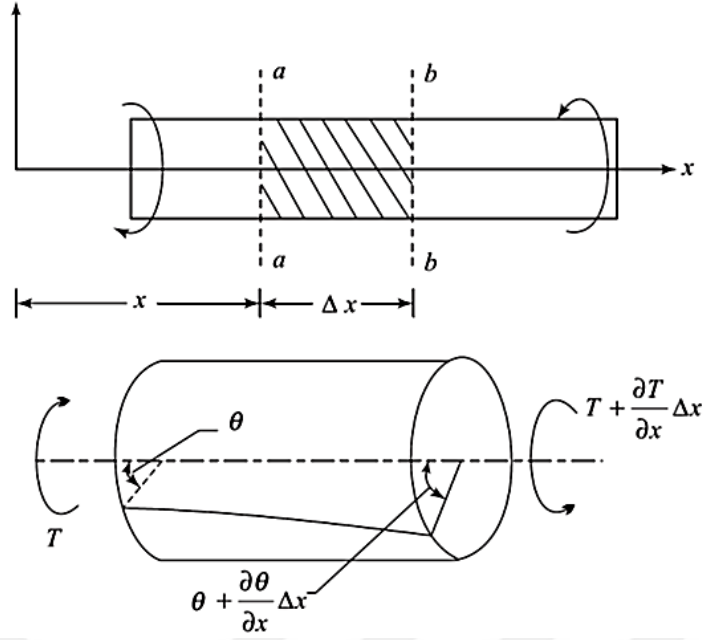
$$\sigma = E \left(\frac{\partial u}{\partial x} \right) \quad (2.7)$$

Bağntı (2.7), Bağntı (2.6)'te yerine yazılırsa Bağntı (2.8) elde edilir. Burada V_r terimi çubukta boyuna dalga yayılma hızıdır. Böylece dalga yayılma hızı elastisite modülü, E , ve çubuğun yoğunluğuna, ρ , bağlı olarak Bağntı (2.9)'daki gibi ifade edilir. Buradan dalga yayılma hızının sadece çubuğun malzeme özelliklerine bağlı olduğu, dalga genliğinden bağımsız olduğu görülmektedir.

$$\left(\frac{\partial^2 u}{\partial t^2} \right) = \frac{E}{\rho} \left(\frac{\partial^2 u}{\partial x^2} \right) = V_r^2 \left(\frac{\partial^2 u}{\partial x^2} \right) \quad (2.8)$$

$$V_r = \sqrt{\frac{E}{\rho}} \quad (2.9)$$

Eğer çubuğun kendi eksenini etrafında burulma hareketi yaptığı ve x mesafesi için θ kadar döndüğü kabul edilirse, x mesafesindeki ve $x + \Delta x$ mesafesindeki burulma momentleri Şekil 2.5'te gösterildiği gibi olur.



Şekil 2.5. Elastik çubukta burulma momenti (Das & Ramana, 2011)

Şekil 2.5'teki çubuğun hareket denklemi Bağntı (2.10) ve sadeleştirilmiş hali ile (2.11) ile ifade edilir. Bu bağntıda θ burulma açısı ve I çubuk eksenini etrafındaki kütle atalet momentidir.

$$T + \frac{\partial T}{\partial x} \Delta x - T = \rho I \Delta x \frac{\partial^2 \theta}{\partial t^2} \quad (2.10)$$

$$\frac{\partial T}{\partial x} = \rho I \left(\frac{\partial^2 \theta}{\partial t^2} \right) \quad (2.11)$$

Burulma momenti, T , ise Bağntı (2.12) ile ifade edildiğinde ve Bağntı (2.11)'de yerine yazıldığında, Bağntı (2.13) elde edilmektedir. Bu bağntıda G , elastik kayma modülü ve V_s kayma dalgası hızıdır. Boyuna dalga hareketinde danelerin titreşim hareketi dalganın yayılma doğrultusuna paralel iken, burulma hareketinde danelerin titreşim hareketi dalganın yayılma doğrultusuna diktir. Bu nedenle oluşan deplasmanlar doğrusal değil açısal ifade edilmektedir.

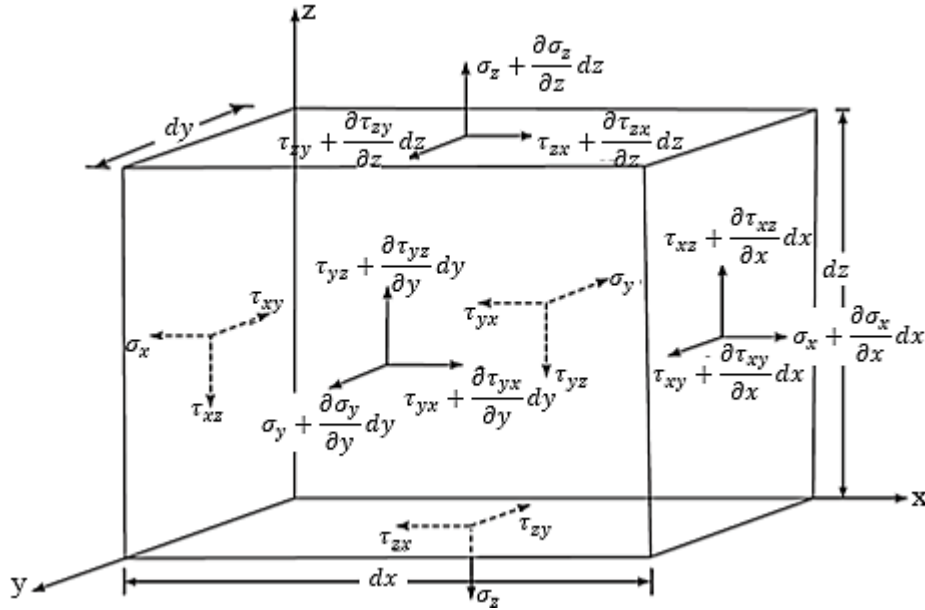
$$T = GI \left(\frac{\partial \theta}{\partial x} \right) \quad (2.12)$$

$$\left(\frac{\partial^2 \theta}{\partial t^2} \right) = \frac{G}{\rho} \left(\frac{\partial^2 \theta}{\partial x^2} \right) = V_s^2 \left(\frac{\partial^2 \theta}{\partial x^2} \right) \quad (2.13)$$

2.2.2. Elastik sonsuz bir ortamda dalga yayılımı

Zemin ortamındaki sismik dalgaların yayılımını tanımlamak için sonsuz elastik çubuk modeli oldukça zor uygulanabilir bir modeldir. Çünkü hem zemin ortamı hem de sismik enerji kaynağı üç boyutludur. Bu nedenle sismik dalgalar üç boyutlu dalga yayılımı ile tanımlanmalıdır.

Elastik sonsuz bir ortamda dalga yayılmasının incelenmesi için Şekil 2.6'da yer alan x-y-z Kartezyen koordinat sistemindeki sonsuz küçüklükte (dx , dy , dz) bir dikkörtgen prizması ele alınabilir. Ele alınan küpün her bir yüzüne etkiyen ortalama gerilmeler, yüzün merkezinde gösterilen gerilmeler ile temsil edilir ve x-y-z eksenleri doğrultularında etkiyen bileşke kuvvetler değerlendirilir. x-ekseni doğrultusunda dengelenmemiş dış kuvvetler, bu doğrultudaki iç kuvvetler tarafından dengelenmelidir. Bu durum değerlendirildiğinde Bağntı (2.14) elde edilir. Burada t , zaman, ρ , prizma yoğunluğu, u , x-ekseni boyunca prizmanın deplasmanıdır. Bağntı (2.14) sadeleştirildiğinde Bağntı (2.15) elde edilir.



Şekil 2.6. Elastik dikkörtgen prizması (Das & Ramana, 2011)

$$\left[\left(\sigma_x + \frac{\partial \sigma_x}{\partial x} dx \right) - \sigma_x \right] dy dz + \left[\left(\tau_{zx} + \frac{\partial \tau_{zx}}{\partial z} dz \right) - \tau_{zx} \right] dx dy + \left[\left(\tau_{yx} + \frac{\partial \tau_{yx}}{\partial y} dy \right) - \tau_{yx} \right] dx dz = \rho dx dy dz \frac{\partial^2 u}{\partial t^2} \quad (2.14)$$

$$\frac{\partial \sigma_x}{\partial x} + \frac{\partial \tau_{yx}}{\partial y} + \frac{\partial \tau_{zx}}{\partial z} = \rho \frac{\partial^2 u}{\partial t^2} \quad (2.15)$$

x-ekseni için yapılan bu işlemler y- ve z- eksenleri için tekrarlandığında, sırasıyla Bağıntı (2.16) ve Bağıntı (2.17) elde edilir. Bu bağıntılarda v ve w sırasıyla y- ve z- eksenleri boyunca prizmanın deplasmanlarıdır.

$$\frac{\partial \sigma_y}{\partial y} + \frac{\partial \tau_{xy}}{\partial x} + \frac{\partial \tau_{zy}}{\partial z} = \rho \frac{\partial^2 v}{\partial t^2} \quad (2.16)$$

$$\frac{\partial \sigma_z}{\partial z} + \frac{\partial \tau_{xz}}{\partial x} + \frac{\partial \tau_{yz}}{\partial y} = \rho \frac{\partial^2 w}{\partial t^2} \quad (2.17)$$

Bağıntı (2.15), (2.16) ve (2.17) elastik bir cisimde üç boyutlu hareket denklemleridir. Yer değiştirmeler cinsinden bu hareket denklemlerini ifade etmek için gerilme-birim deformasyon ve birim deformasyon-yer değiştirme ilişkileri kullanılmalıdır. Lineer elastik bir cisimde Hooke yasası kullanılarak gerilme-birim deformasyon ilişkileri Bağıntı (2.18)-(2.23) ile ifade edilmektedir. Bu bağıntılarda E, elastisite modülü, G, kayma modülü, ν , poisson oranı ve ϵ_x , ϵ_y , ϵ_z normal birim deformasyonlar ve γ_{xy} , γ_{yz} , γ_{zx} kayma birim deformasyonlarıdır.

$$\epsilon_x = \frac{1}{E} [\sigma_x - \nu(\sigma_y + \sigma_z)] = \frac{\partial u}{\partial x} \quad (2.18)$$

$$\epsilon_y = \frac{1}{E} [\sigma_y - \nu(\sigma_x + \sigma_z)] = \frac{\partial v}{\partial y} \quad (2.19)$$

$$\epsilon_z = \frac{1}{E} [\sigma_z - \nu(\sigma_x + \sigma_y)] = \frac{\partial w}{\partial z} \quad (2.20)$$

$$\gamma_{xy} = \frac{\tau_{xy}}{G} = \frac{\partial u}{\partial y} + \frac{\partial v}{\partial x} \quad (2.21)$$

$$\gamma_{xz} = \frac{\tau_{xz}}{G} = \frac{\partial u}{\partial z} + \frac{\partial w}{\partial x} \quad (2.22)$$

$$\gamma_{yz} = \frac{\tau_{yz}}{G} = \frac{\partial v}{\partial z} + \frac{\partial w}{\partial y} \quad (2.23)$$

Buna ek olarak cismin rijit dönme-yer değiştirme ilişkileri ise Bağntı (2.24), (2.25) ve (2.26) ile ifade edilmektedir.

$$2\bar{\omega}_x = \frac{\partial w}{\partial y} - \frac{\partial v}{\partial z} \quad (2.24)$$

$$2\bar{\omega}_y = \frac{\partial u}{\partial z} - \frac{\partial w}{\partial x} \quad (2.25)$$

$$2\bar{\omega}_z = \frac{\partial v}{\partial x} - \frac{\partial u}{\partial y} \quad (2.26)$$

İzotropik, lineer elastik malzeme için Hooke kanunu ele alındığında gerilmelerin ve birim deformasyonların bütün bileşenleri λ ve μ Lamé katsayıları cinsinden Bağntı (2.27)-(2.32) ifade edilebilir. Bu bağıntılarda $\bar{\epsilon}$ hacimsel birim deformasyon olup $\bar{\epsilon} = \epsilon_x + \epsilon_y + \epsilon_z$ olarak ifade edilir.

$$\sigma_x = \lambda \bar{\epsilon} + 2\mu \epsilon_x \quad (2.27)$$

$$\sigma_y = \lambda \bar{\epsilon} + 2\mu \epsilon_y \quad (2.28)$$

$$\sigma_z = \lambda \bar{\epsilon} + 2\mu \epsilon_z \quad (2.29)$$

$$\sigma_{xy} = \mu \epsilon_{xy} \quad (2.30)$$

$$\sigma_{yz} = \mu \epsilon_{yz} \quad (2.31)$$

$$\sigma_{zx} = \mu \epsilon_{zx} \quad (2.32)$$

İzotropik, lineer elastik malzemenin gerilme-birim deformasyon davranışını tarif etmek için kullanılan birkaç parametre Lamé katsayıları cinsinden Bağntı (2.33)-(2.36)'de yer almaktadır. Bu bağıntılarda E, elastisite modülü, K, bulk modülü (cismin hacim değişimine karşı direnci, sıkışma modülü), G, kayma modülü ve ν , poisson oranıdır.

$$E = \frac{\mu(3\lambda + 2\mu)}{\lambda + \mu} \quad (2.33)$$

$$K = \lambda + \frac{2\mu}{3} \quad (2.34)$$

$$G = \mu \quad (2.35)$$

$$\nu = \frac{\lambda}{2(\lambda + \mu)} \quad (2.36)$$

Böylece x-ekseni boyunca birim deformasyonlar cinsinden hareket denklemi Bağintı (2.37) olarak elde edilir. Birim deformasyon- yer değiştirme ilişkileri bu bağintıda yerine yazıldığında Bağintı (2.38) elde edilir. Bu bağintıda yer alan ∇^2 ifadesi Laplacian Operatörüdür ve Bağintı (2.39) ile ifade edilir.

$$\rho \frac{\partial^2 u}{\partial t^2} = \frac{\partial}{\partial x}(\lambda \bar{\epsilon} + 2\mu \epsilon_x) + \frac{\partial}{\partial y}(\mu \epsilon_{xy}) + \frac{\partial}{\partial z}(\epsilon_{xz}) \quad (2.37)$$

$$\rho \frac{\partial^2 u}{\partial t^2} = (\lambda + \mu) \frac{\partial \bar{\epsilon}}{\partial x} + \mu \nabla^2 u \quad (2.38)$$

$$\nabla^2 = \frac{\partial^2}{\partial x^2} + \frac{\partial^2}{\partial y^2} + \frac{\partial^2}{\partial z^2} \quad (2.39)$$

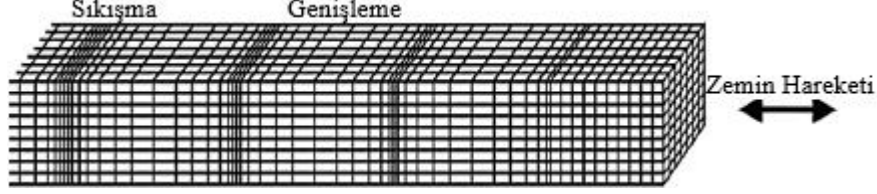
Bu işlemler y- ve z-eksenleri için tekrarlandığında Bağintı (2.40) ve (2.41) elde edilir.

$$\rho \frac{\partial^2 v}{\partial t^2} = (\lambda + \mu) \frac{\partial \bar{\epsilon}}{\partial y} + \mu \nabla^2 v \quad (2.40)$$

$$\rho \frac{\partial^2 w}{\partial t^2} = (\lambda + \mu) \frac{\partial \bar{\epsilon}}{\partial z} + \mu \nabla^2 w \quad (2.41)$$

Sonsuz elastik homojen bir ortamdan sadece iki tür dalga yayılabilir. Bu dalgalara *cisim dalgaları* denir. Cisim dalgaları P ve S dalgalarıdır. P Dalgaları hızları en fazla olan cisim dalgalarıdır. Bu nedenle kayıt merkezlerine ilk gelen ve sismograflar tarafından ilk kaydedilen (primer, birincil) dalgalardır. Şekil 2.7’de görüldüğü gibi titreşim hareketi, yayılma doğrultusuna paralel olduğundan dolayı *boyuna dalgalar*, aynı zamanda

içerisinden geçtikleri cisimlere basınç kuvveti uyguladığından *basınç (gerilme) dalgası* olarak da adlandırılmaktadır. Titreşim hareketi esnasında danelerini birbirine yaklaştırır veya uzaklaştırırlar, bu nedenle *sıkışma veya genişleme dalgaları* da denir.



Şekil 2.7. P-dalgası yayılma ve parçacık hareketi doğrultusu (Encyclopedia Britannica Company, 2018)

Lineer elastik, izotropik bir ortamdaki üç boyutlu hareket denklemi ele alındığında dalga denklemi Bağntı (2.42) olarak elde edilir. Böylece P-dalga hızı Bağntı (2.43) olarak ifade edilebilir.

$$\rho \frac{\partial^2 \bar{\epsilon}}{\partial t^2} = \left(\frac{\lambda + 2\mu}{\rho} \right) \nabla^2 \bar{\epsilon} = V_p^2 \nabla^2 \bar{\epsilon} \quad (2.42)$$

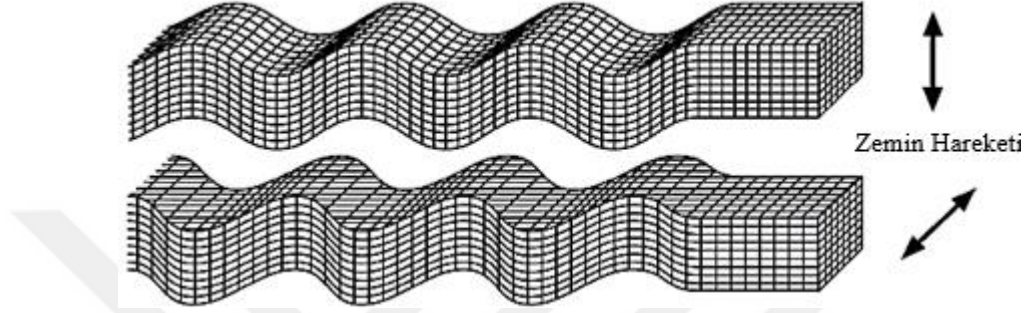
$$V_p = \sqrt{\frac{\lambda + 2\mu}{\rho}} = \sqrt{\frac{K + \frac{4}{3}G}{\rho}} = \sqrt{\frac{G(2 - 2\nu)}{\rho(1 - 2\nu)}} \quad (2.43)$$

Bağntı (2.43)'te görüldüğü gibi P-dalga hızı, dalganın yayıldığı ortamın elastik özelliğine, rijitliğine (kayma modülü) ve yoğunluğuna bağlıdır. P-dalgaları sıvı ve gaz gibi maddelerin içinden geçebilir. Zemin ve kayalar nispeten sıkışma-genişlemeye karşı dirençli olduğundan yer yüzeyi hareketleri üzerinde en az etkiye sahiptir. Tablo 2.3'te zemin tipine göre P dalga hızları yer almaktadır.

Tablo 2.3. Zeminlere göre P-dalga hızları (Das & Ramana, 2011)

Zemin Cinsi	P-Dalga Hızı (m/s)
Sıkı Kum	300
Gevşek Kum	460
Çakıl	762
Islak Kil	1220-1370
Granit	3960-5490
Kumtaşı	1370-3960

S dalgaları, hızları P dalgalarına kıyasla daha az olan ve bu nedenle kayıt merkezindeki sismograflara ikinci olarak gelen (sekonder, ikincil) dalgalardır. Şekil 2.8’de görüldüğü gibi titreşim hareketi yayılma doğrultusuna dik doğrultudadır, bu nedenle *enine dalgalar* veya *kayma dalgaları* olarak adlandırılır. S dalgası, zemin yüzeyinde önemli büyüklükte bir yatay hareket oluşturduğundan, sismik hasarın en önemli sebebi olarak kabul edilmektedir.



Şekil 2.8. S-dalgası yayılma ve parçacık hareketi doğrultusu (Encyclopedia Britannica Company, 2018)

Üç boyutlu hareket denklemi ele alındığında dalga denklemi Bağıntı (2.44) olarak elde edilir. Rijit dönme bağıntıları (2.44)’te yerine yazıldığında Bağıntı (2.45) elde edilir. Böylece S-dalga hızı Bağıntı (2.46) olarak ifade edilir.

$$\rho \frac{\partial}{\partial t^2} \left(\frac{\partial w}{\partial y} - \frac{\partial v}{\partial z} \right) = \mu \nabla^2 \left(\frac{\partial w}{\partial y} - \frac{\partial v}{\partial z} \right) \quad (2.44)$$

$$\frac{\partial^2 \bar{\omega}_x}{\partial t^2} = \frac{\mu}{\rho} \nabla^2 \bar{\omega}_x = V_s^2 \nabla^2 \bar{\omega}_x \quad (2.45)$$

$$V_s = \sqrt{\frac{\mu}{\rho}} = \sqrt{\frac{G}{\rho}} \quad (2.46)$$

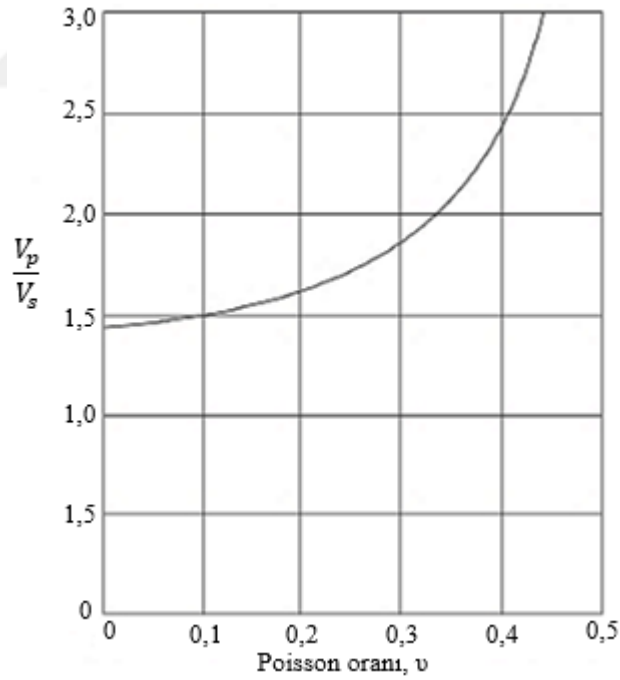
Bağıntı (2.46)’da görüldüğü gibi S-dalgaları, cismin elastik şekil değiştirmeye karşı gösterdiği dirençten ileri gelirler ve dolayısıyla cismin rijitliğine bağlıdır. Bu nedenle sıvı maddelerde S-dalgası oluşmayacaktır. Tablo 2.4’te zemin tipine bağlı olarak S-dalga hızları yer almaktadır. Tipik V_s değerleri, çok yumuşak zeminler için yaklaşık olarak 100 m/s, sert zeminler için 300 m/s ve sert örselenmemiş kayalar için 3.000 m/s’dir.

Tablo 2.4. Zeminlere göre S-dalga hızları (Das & Ramana, 2011)

Zemin Cinsi	S-Dalga Hızı (m/s)
Sıkı Kum	90-150
Gevşek Kum	230
Çakıl	180-215
Islak Kil	150
Granit	2130-3350
Kumtaşı	610-2130

P ve S dalga hızları arasındaki ilişki Şekil 2.9 ve Bağntı (2.47)’de yer almaktadır. Şekil 2.9’da tüm poisson oranı değerlerinde V_p/V_s değerinin 1’den büyük olduğu görülmektedir. Bu durum cisimlerde her zaman basınç dalgası hızlarının kayma dalgası hızlarından büyük olduğunu göstermektedir.

$$\frac{V_p}{V_s} = \sqrt{\frac{2 - 2\nu}{1 - 2\nu}} \quad (2.47)$$

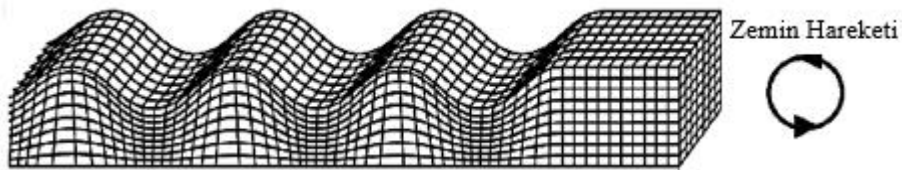
**Şekil 2.9.** P ve S dalgaları arasındaki ilişki (Das & Ramana, 2011)

2.2.3. Elastik yarı-sonsuz bir ortamda dalga yayılımı

Zemin ortamı gerçekte sonsuz bir ortam değil, zemin gerilmelerinin mevcut olmadığı dış yüzeyleri ile çok büyük bir küredir. Bu nedenle zemin ortamı genellikle yarı-sonsuz bir ortam olarak modellenmekte ve idealize edilmektedir. Serbest yüzeyden kaynaklı oluşturulan sınır koşullar elde edilen hareket denklemlerinin ek çözümlerine olanak sağlamaktadır. Bu çözümler ile serbest yüzeye yakın sığ bir zonda yoğunlaşan yüzey dalgalarının hareketi tanımlanır.

Yüzey dalgaları, cisim dalgaları ile yüzey arasındaki etkileşim sonucunda oluşurlar. Yüzey dalgaları, cisim dalgalarına kıyasla hızları daha az, periyotları daha büyük ve boyları daha uzun olan dalgalardır. Kayıt merkezine en son gelirler fakat sismograflar üzerinde en şiddetli hareketleri yansıtırlar. Bunlar, yeryüzünün üst kısımlarında ya serbest yeryüzü süreksizliği nedeniyle ya da yeryüzüne yakın derinliklerdeki tabakalanmadan ötürü meydana gelirler ve yeryüzünde yayılırlar. Bu dalgalar, yapıları en çok etkileyen dalgalardır. En önemli yüzey dalgaları Rayleigh ve Love dalgalarıdır.

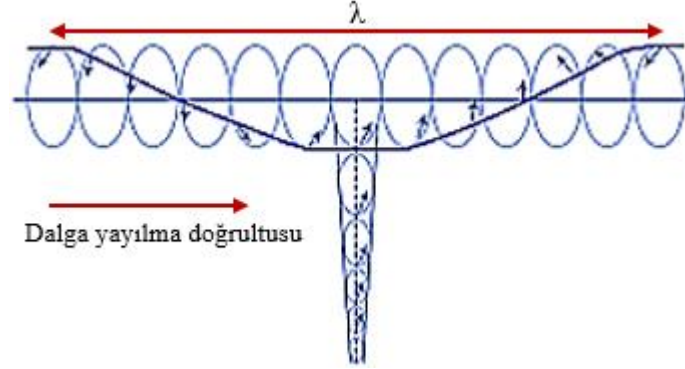
İlk defa 1885 yılında Rayleigh tarafından araştırılan ve serbest yüzey ile sınırlandırılmış homojen elastik yarı-sonsuz bir ortamda oluşan dalgalar *Rayleigh dalgaları* olarak bilinmektedir. P ve SV dalgalarının zemin yüzeyi ile etkileşimi sonucunda oluşan dalgalardır. Rayleigh dalgalarının yayılması esnasında daneler eliptik bir yörünge etrafında yuvarlanma hareketine zorlanmaktadır (Şekil 2.10). Bu nedenle bu dalgalar, *yer yuvarlanması* olarak da adlandırılmaktadır.



Şekil 2.10. Rayleigh dalgası yayılma ve parçacık hareketi doğrultusu (Encyclopedia Britannica Company, 2018)

Rayleigh dalgalarını tanımlamak için y-ekseni doğrultusunda parçacık hareketi sıfır "0" olan ve x-ekseni doğrultusunda hareket eden düzlem dalgaları ele alınabilir. Böylece Şekil 2.11'de görüldüğü gibi z-ekseni doğrultusunda azalarak yayılan be bütün parçacık hareketlerinin x-z düzleminde olduğu bir dalga hareketi ele alınmaktadır. Rayleigh dalga hızı, zeminin kayma dalgası hızı ve Poisson oranına bağlı olarak Bağintı

(2.48) ile hesaplanmaktadır (Das & Ramana, 2011). Tablo 2.5'te farklı zeminler için Rayleigh dalga hızının kayma dalgası hızına oranı değerleri verilmiştir.



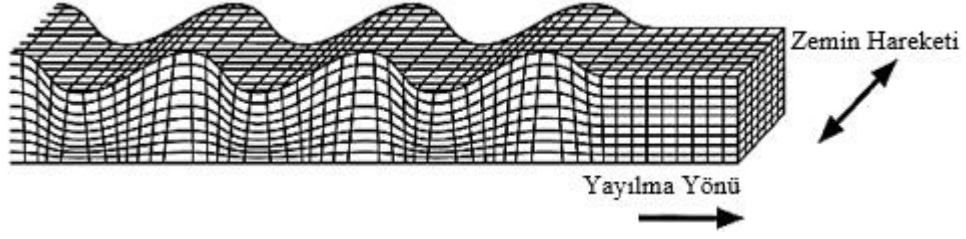
Şekil 2.11. Rayleigh dalgasının eliptik dane hareketi ve derinlikle değişimi (Das & Ramana, 2011)

$$V_R \approx \frac{0.87 + 1.12\nu}{1 + \nu} V_S \quad (2.48)$$

Tablo 2.5. Zemin Poisson oranına bağlı olarak V_R/V_S değerleri (Das & Ramana, 2011)

ν	V_R/V_S
0.25	0.919
0.29	0.926
0.33	0.933
0.4	0.943
0.5	0.955

Eğer elastik yarı-sonsuz bir ortam, daha düşük cisim dalgası hızına sahip bir malzemeni altında yer alıyorsa, bu durumda *Love dalgaları* meydana gelir. Love dalgaları, serbest yüzey ve yerkürenin kabuğu arasında tekrarlı olarak yansıyan SH tipi dalgaların girişimi ile oluşurlar. Bu nedenle, yüzeyde yayılma doğrultusuna dik yönde kesme şekil değiştirmeleri meydana getirirler, düşey bileşeni yoktur. Rayleigh dalgalarından daha hızlıdır.



Şekil 2.12. Love dalgası yayılma ve parçacık hareketi doğrultusu (Encyclopedia Britannica Company, 2018)

2.3. Dinamik Zemin Parametreleri

Tekrarlı yükler altında zemin davranışının gerçeğe uygun olarak incelenmesi ve modellenmesi için dinamik zemin parametrelerinin belirlenmesi gerekmektedir. Tekrarlı yükler altında zemin davranışının incelenmesindeki önemli konulardan biri zeminlerin dinamik mukavemetidir. Dinamik yükleme maruz zeminlerde, boşluk suyu basıncında ani artış meydana gelir. Boşluk suyu basıncında meydana gelen bu artış, efektif gerilmenin düşmesine yol açar. Bu da zeminlerin drenajsız kayma mukavemeti ve rijitliğinin azalmasına neden olur. Bu nedenle tekrarlı yüklemeler, zemin tipine bağlı olarak, kohezyonsuz zeminlerde sıvılaşmaya, kohezyonlu zeminlerde ise aşırı deformasyon ve göçmelere neden olabilir. Kil zeminlerin tekrarlı yükleme sonrası drenajsız kayma mukavemetindeki değişim, kilin normal konsolide ya da aşırı konsolide olmasına ve tekrarlı yükleme çevrimleri arasında geçen sürede drenaja izin verilip verilmemesine bağlıdır. İki tekrarlı yükleme arasında drenaja izin verilmesi aşırı boşluk suyu basıncının sönmülmesini sağlar. Bu durumda normal konsolide killerde drenajsız kayma mukavemetinde artış olduğu gözlenmiştir (Kayalı, 2008; Yıldız & Demiröz, 2002).

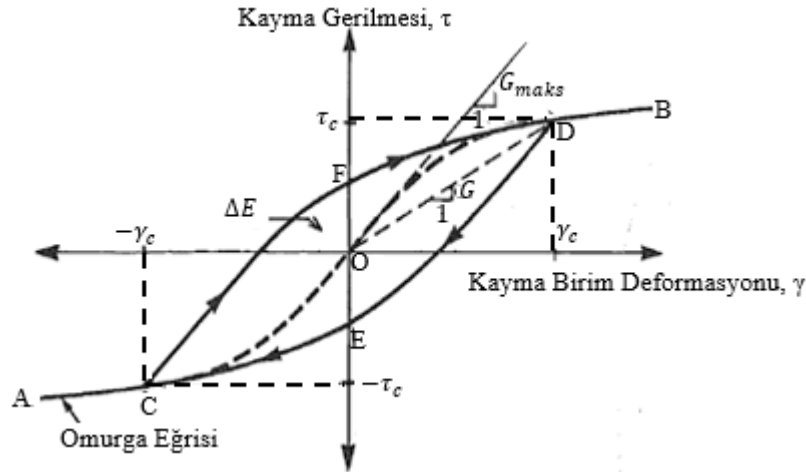
Tekrarlı yükleme maruz zeminlerin davranışı, kayma gerilmesi-kayma birim deformasyonu ilişkisine bağlıdır ve bu ilişki son derece önemlidir. Tablo 2.6'da birim deformasyon seviyesine bağlı olarak zemin davranışı yer almaktadır. 10^{-2} 'den büyük birim deformasyonlarda, kayma gerilmesinde fazla bir artış olmaksızın, birim deformasyonlar oldukça büyük olma eğilimindedir ve zeminde kaymaya bağlı göçme meydana gelmektedir. Bu duruma örnek şev kaymaları ve sıvılaşması verilebilir. 10^{-4} ve 10^{-2} arasındaki birim deformasyonlarda, zeminlerin davranışı elasto-plastiktir ve kalıcı deformasyonlar meydana gelir. Zemin yapılarında çatlakların veya farklı oturmaların oluşması, bu birim deformasyon aralığında zeminlerin elasto-plastik özellikleri ile

ilişkilidir. 10^{-5} seviyesinin altındaki birim deformasyonlarda, çoğu zemin tarafından sergilenen deformasyonlar tamamen elastiktir. Bu tür küçük birim deformasyonlarla ilişkili olaylar, zemin içinde titreşim veya dalga yayılımıdır (Ishihara, 1996).

Tablo 2.6. Zeminler için dinamik yüklerin oluşturduğu deformasyonların sınıflandırılması (Özçep, 2006)

Deformasyon Oranı	Zemin Davranışı	Deformasyon Sınırı
$10^{-5} - 10^{-4}$	Lineer Elastik	Küçük
$10^{-4} - 10^{-3}$	Yarı Elastik	
$10^{-3} - 10^{-2}$	Elastik-Plastik	Orta
$10^{-2} - 10^{-1}$	Akma ve kırılma	Büyük
$10^{-1} - 10^0$		

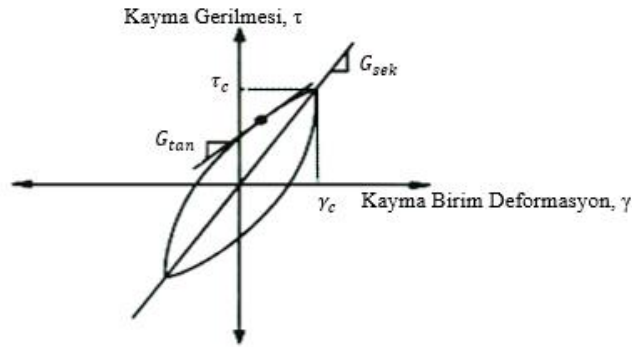
Zemine tekrarlı harmonik bir yük uygulandığında, kayma gerilmesi-kayma birim deformasyonu ilişkisinde, yüklemenin tam bir devri neticesinde bir *histerezis döngüsü* elde edilmektedir. Şekil 2.13'te yer alan histerezis eğrisinde görüldüğü gibi, yüklemenin boşaltma fazında izlenen yol yükleme fazında izlenen yoldan farklıdır. Bu durum zemindeki enerji yayılımını temsil eder. Histerezis döngüsü bir eğime sahiptir ve bu eğim zeminin rijitliğine yani modülüne bağlıdır. Her yükleme-boşaltma fazları sonunda elde edilen histerezis döngülerinin uç noktalarının birleştirilmesiyle elde edilen eğri *omurga eğrisi* olarak adlandırılmaktadır. Gerilme-birim deformasyon ilişkisinden elde edilen en önemli parametreler kayma modülü ve sönüm oranıdır.



Şekil 2.13. Tekrarlı yükleme sonucu gerilme-birim deformasyon ilişkisi (Vucetic & Dobry, 1991)

2.3.1. Kayma modülü

Kayma modülü, G , zeminin kayma rijitliğini temsil eder. Kayma modülü, kayma gerilmesi (τ)- kayma birim deformasyonu (γ) arasındaki ilişkinin eğimidir. Tekrarlı yükler altında zeminlerin kayma modülü, gerilme-birim deformasyon eğrisinin doğrusal olmayan yapısı nedeniyle, Şekil 2.13'te gösterildiği gibi deformasyon genliği ile değişmektedir. Histerezis döngüsünde herhangi bir noktadaki tanjant değeri, Şekil 2.14'te gösterildiği gibi tanjant kayma modülü, G_{tan} , olarak tanımlanır (Darendeli, 2001; Okur & Ansal, 2009)

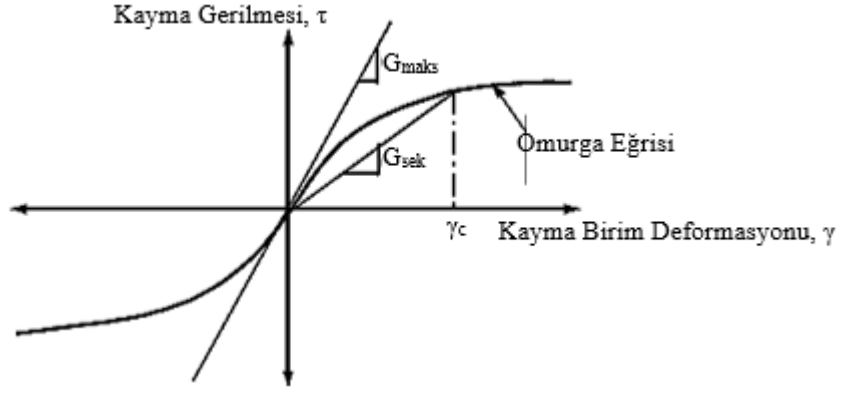


Şekil 2.14. Histerezis döngüsünde tanjant ve sekant kayma modülleri (Holtz vd., 2011)

Sekant kayma modülü ise, tüm histerezis döngüsünün ortalama eğimi olup, bir birim deformasyon genliğindeki yükleme çevriminde elde edilen histerezis döngüsünün bitiş noktalarını birbirine bağlayan doğrunun eğimidir. Zeminin ortalama kayma rijitliğini temsil eder ve Bağıntı (2.49) ile hesaplanabilir.

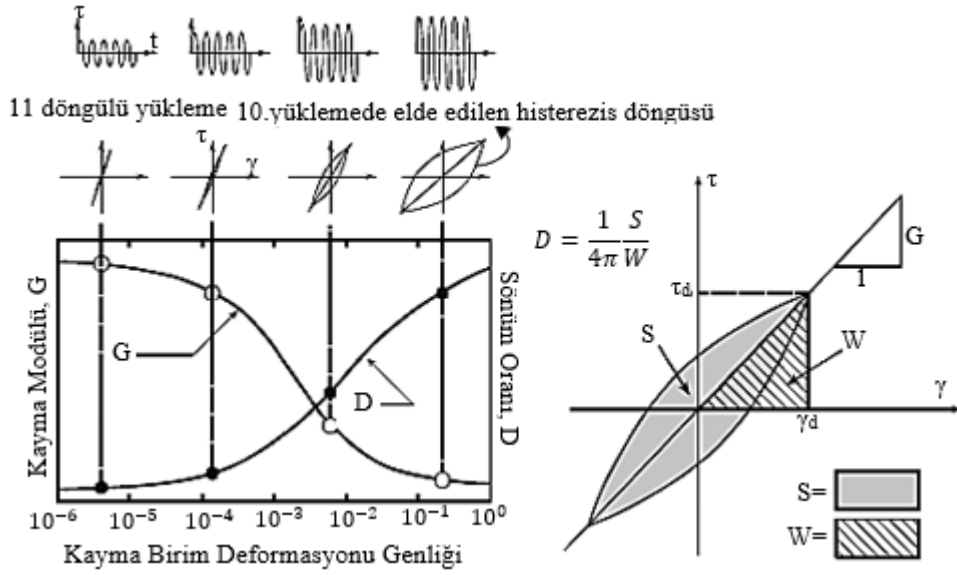
$$G_{sek} = \frac{\tau_c}{\gamma_c} \quad (2.49)$$

Sekant kayma modülü, Şekil 2.15'te gösterildiği gibi birim deformasyon genliğinin artması ile azalmaktadır. Zeminin lineer davranış sergilediği küçük birim deformasyonlardaki kayma modülü, *küçük birim deformasyon kayma modülü*, G_{maks} olarak adlandırılmakta olup, omurga eğrisine orijinden teğet olarak geçen doğrunun eğimi ile belirlenir. Küçük birim deformasyonlarda zemin maksimum rijitliğindedir.



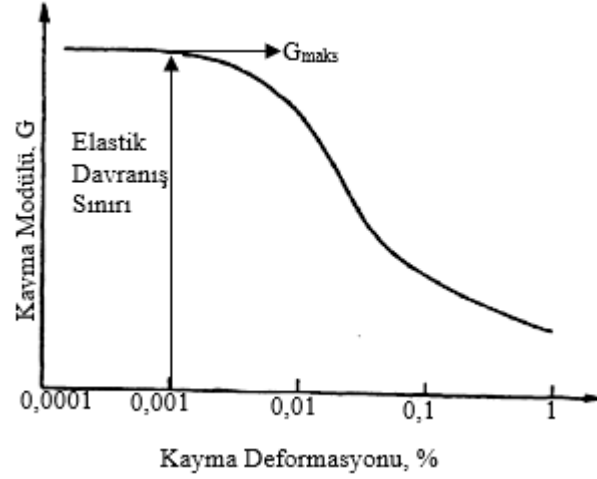
Şekil 2.15. Maksimum kayma modülü ve sekant kayma modülü (Okur & Ansal, 2009)

Birim deformasyon seviyesi arttıkça zeminin kayma modülünde bir azalma meydana gelir. Kayma modülündeki bu değişim nedeniyle gerilme-birim deformasyon ilişkisinde giderek büyüyen histerezis döngüleri elde edilir (Şekil 2.16).



Şekil 2.16. Farklı birim deformasyon genlikleri için elde edilen histerezis döngüleri ve kayma modülü sönüm oranının değişimi (Yoshida, 2014)

Küçük birim deformasyon kayma modülü, Şekil 2.17'de görüldüğü gibi, 10^{-3} birim deformasyon seviyesi altındaki kayma modülü olup elastik davranış sınırını göstermektedir. Bu değer hem laboratuvar hem de arazide titreşim testleri ile ya da arazide sismik yöntemlerle doğrudan belirlenebilir.



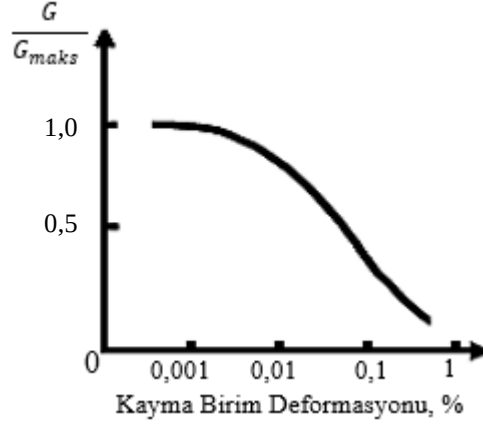
Şekil 2.17. Kayma modülünün birim deformasyon seviyesi ile değişimi

Sismik arazi deneyleri ile kayma dalgası hızından maksimum kayma modülü Bağıntı (2.50) kullanılarak hesaplanır. Bu bağıntıda ρ , zeminin yoğunluğu ve V_s ise kayma dalgası hızıdır.

$$G_{maks} = \rho \times V_s^2 \quad (2.50)$$

Küçük birim deformasyon kayma modülünün belirlenmesi için, $0,25 \times 10^{-4}$ 'ten daha küçük birim deformasyon genlikleri için ölçüm yapılabildiğinden dolayı titreşim testleri daha uygundur. 10×10^{-4} birim deformasyon genliğindeki modül $G_{maks}/3$ kadar küçük olabilir (Hardin & Drnevich, 1972b)

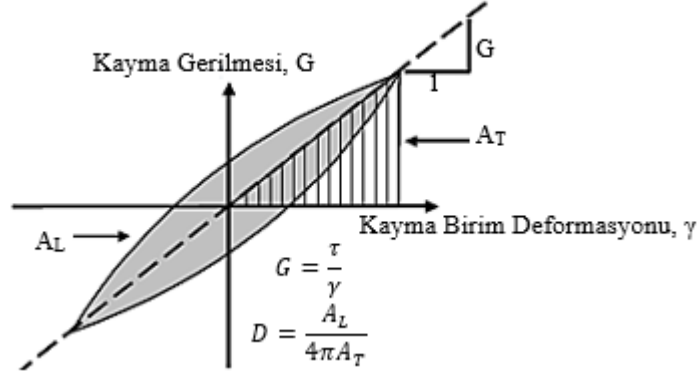
Kayma modülü-kayma birim deformasyon genliği arasındaki ilişki tipik olarak *normalleştirilmiş modül azaltma eğrisi* ile karakterize edilir (Darendeli, 2001). Normalleştirilmiş modül azaltma eğrisi, herhangi bir yükleme anındaki kayma modülünün, maksimum kayma modülüne bölünmesi ile elde edilir. Şekil 2.18'de tipik bir normalleştirilmiş modül azalma eğrisi yer almaktadır.



Şekil 2.18. Tipik mormalleştirilmiş modül azalma eğrisi (Darendeli, 2001)

2.3.2. Sönüm oranı

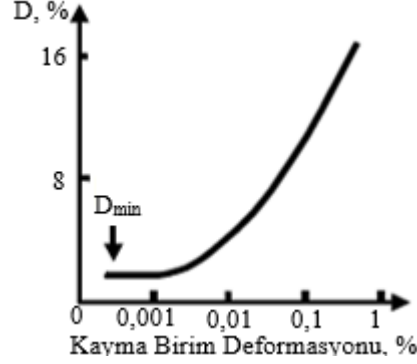
Malzeme sönüm oranı D , Şekil 2.19’da gösterildiği gibi bir birim deformasyon genliğindeki çevrim süresince sönümlenen enerjinin, maksimum tutulan deformasyon enerjisine oranının bir ölçüsüdür. Bir yükleme döngüsünde enerji sönümü, histerezis döngüsü (A_L) içindeki gri alanla temsil edilir ve maksimum tutulan deformasyon enerjisi, pik kayma gerilmesi ve pik kayma deformasyonu kullanılarak hesaplanan üçgen alan (A_T) ile temsil edilir.



Şekil 2.19. Tekrarlı yükleme esnasında sönüm oranı ve kayma modülünün tahmini

Malzeme sönüm oranı, zemin parçacıkları arasındaki sürtünme, deformasyon hızı etkileri ve zeminlerdeki gerilme-deformasyon ilişkisinin doğrusal olmayışının bir sonucudur. Gerilme-birim deformasyon ilişkisindeki doğrusal olmayan davranış, enerji sönümünde bir artışa neden olur ve bu nedenle, Şekil 2.20’de gösterildiği gibi, birim deformasyon genliğinin artması ile malzeme sönüm oranında bir artış meydana gelir.

Küçük birim deformasyonlardaki malzeme sönüm oranı, *küçük birim deformasyon malzeme sönüm oranı*, D_{min} , olarak ifade edilir (Darendeli, 2001).



Şekil 2.20. Nonliner malzeme sönüm oranı eğrisi (Darendeli, 2001)

2.4. Dinamik Zemin Parametrelerinin Belirlenmesi

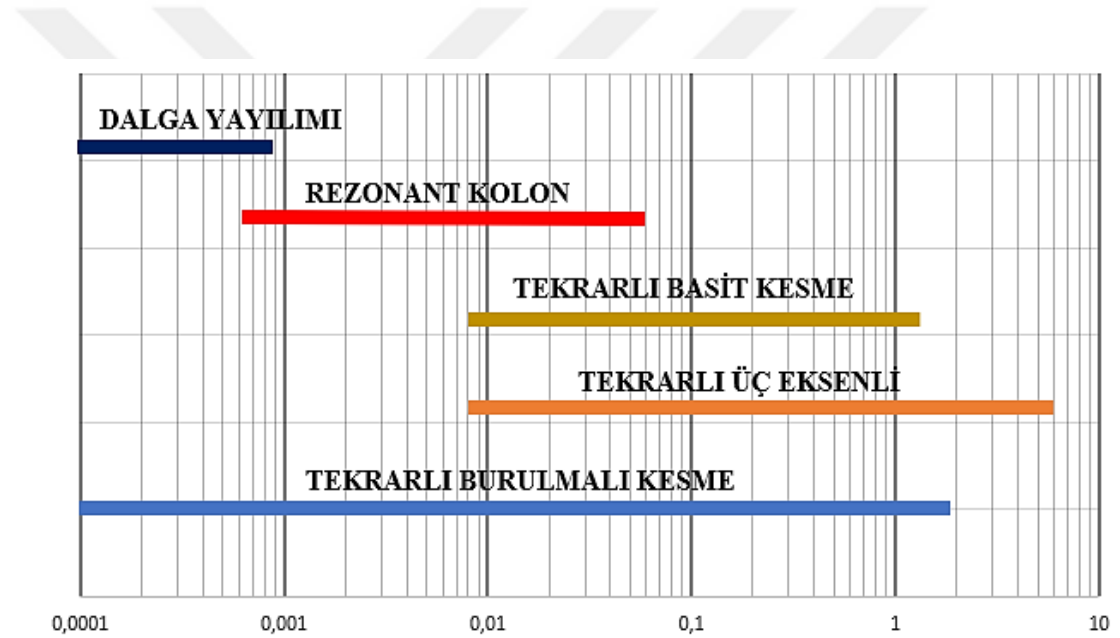
Dinamik etkiye maruz kalan zemin davranışının belirlenip yorumlanabilmesi için dinamik zemin özelliklerinin belirlenmesi gerekmektedir. Dinamik analizlerde zemin davranışının modellenmesi için dinamik kayma modülü (G), sönüm oranı (D), kayma dalgası hızı (V_s) ve poisson oranı (ν) gibi parametreler kullanılmaktadır. Bu parametrelerin belirlenmesinde zemine etki edecek olan dinamik yüklerin belirlenmesi ve uygun deney sisteminin seçilmesi gerekmektedir. Dinamik zemin parametrelerinin belirlenebilmesi için çeşitli arazi ve laboratuvar deneyleri mevcuttur. Dinamik yük tipine bağlı olarak zeminlerde küçük birim deformasyonlar ve büyük birim deformasyonlar meydana gelebilir. Buna bağlı olarak uygun deney tipinin seçilmesi zemin parametrelerinin gerçeğe uygun olarak belirlenebilmesi için önemlidir.

Deneyisel yöntemler dışında, zeminlerin dinamik kayma modülü ve sönüm değerlerinin belirlenmesi için laboratuvar ve arazi deneylerinden elde edilmiş çok sayıda verinin toplanarak değerlendirilmesi neticesinde birçok araştırmacı tarafından önerilmiş bazı ampirik formüller ve eğriler de yer almaktadır.

2.4.1. Laboratuvar Deneyleri

Kayma modülü ve sönüm oranını belirlemek için en çok kullanılan laboratuvar deneyleri rezonant kolon deneyi, bender eleman deneyi, tekrarlı basit kesme deneyi, burulmalı kesme deneyi ve tekrarlı üç eksenli deneyidir. Laboratuvar deneyleri arazi

deneylerine göre bazı avantajlara sahiptir. Laboratuvar deneyleri yüksek doğrulukla özelliklerin ölçülmesini sağlar, boşluk suyunun drenaj durumunun kontrol edilmesine izin verir, arazi koşullarındaki çevre basıncından farklı basınçlarda özelliklerin ölçülmesine olanak sağlar, örselenmiş ya da örselenmemiş numuneler üzerinde yapılabilir. Bu numunelere hem düşük hem de yüksek birim deformasyonlar uygulanabilir. Rezonant kolon deneyleri ve bender eleman deneyleri küçük birim deformasyon laboratuvar deneyleridir. Yüksek birim deformasyon deneyleri ise tekrarlı üç eksenli, tekrarlı basit kesme, tekrarlı burulmalı kesmedir. Farklı dinamik laboratuvar testleri arasındaki en önemli fark, Şekil 2.21’de görüldüğü gibi, zeminde ulaşılan deformasyon seviyeleridir. Tablo 2.7’de birim deformasyon seviyesine bağlı olarak kullanılan laboratuvar deneyleri ve uygulama alanları verilmiştir.



Şekil 2.21. Dinamik laboratuvar testlerinin deformasyon aralığı (RIVAS, 2011)

Tablo 2.7. Laboratuvar deneylerinin birim deformasyon aralığı ve uygulama alanları (Özçep, 2006)

Deney türü	Birim Deformasyon Aralığı (%)	Uygulanma Alanları
Rezonant Kolonu Deneyi (İçi Dolu Numune)	10^{-4} - 5×10^{-3}	Makine Temelleri Küçük ve Orta Şiddetli Depremler
Rezonant Kolonu Deneyi (İçi Boş Numune)	10^{-3} - 5×10^{-3}	Küçük ve Orta Şiddetli Depremler
Laboratuvar P ve S Dalga Hızlarının Ölçümü	10^{-4} - 5×10^{-4}	Makine Temelleri Küçük ve Orta Şiddetli Depremler
Tekrarlı Üç Eksenli		
Tekrarlı Basit Kayma	10^{-2} - 1	Şiddetli Depremler
Tekrarlı Burulmalı Kayma		Nükleer Patlatmalar
Serbest Salınım Deneyleri		

Tablo 2.8’de dinamik zemin parametrelerin bulunmasında kullanılan deney sistemleri karşılaştırılmıştır (Das & Ramana, 2011)

Tablo 2.8. Dinamik parametrelerin belirlenmesinde kullanılan deney sistemleri

Deney Sistemi	Kayma Modülü	Young Modülü	Malzeme Sönümü	Çevrim Sayısı Etkisi
Rezonant Kolon Deneyi	İyi	İyi	İyi	İyi
Ultrasonik Darbe Deneyi	Orta	Orta	-	-
Dinamik Üç Eksenli	-	İyi	İyi	İyi
Dinamik Basit Kesme Deneyi	İyi	-	İyi	İyi
Dinamik Burulmalı Kesme Deneyi	İyi	-	İyi	İyi

2.4.1.1. Ultrasonik Darbe Deneyi (Bender Eleman Deneyi)

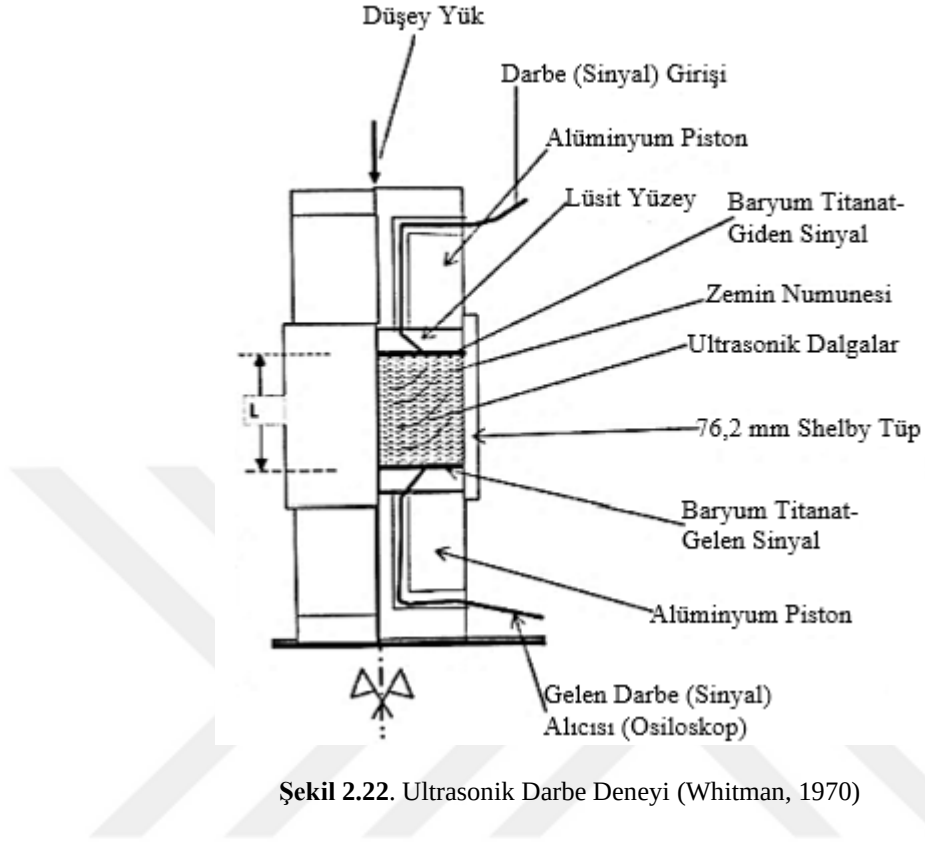
Ultrasonik darbe deneyinde numunenin iki ucuna piezoelektrik kristalden yapılan alıcı ve vericiler yerleştirilmektedir (Şekil 2.22). Vericiye gönderilen yüksek frekansta elektrik akımı kristal kalınlığının aninden değişmesine yol açar. Bunun sonucunda mekanik bir darbe meydana gelir. Oluşan dalga numunenin içinde ilerler ve alıcı tarafından algılanır. Bu durum yine kristalde değişikliğe sebep olur ve kristal tarafından yeni bir elektrik sinyali oluşturulur. Böylece zemin numunesinin bir ucundan uygulanan darbenin diğer uca erişmesi için geçen süre ve numune boyu ölçülerek zemine ait Young modülü ve kayma modülü elde edilir (Das & Ramana, 2011). Ultrasonik darbe deneyi, çok yumuşak zeminlerde, gevşek kum ve silt zeminlerde, numune shelby tüpünden çıkarılmadan deney yapılabildiği için oldukça avantajlıdır.

Elastik bir çubukta dalga yayılımı ile silindirik bir numunenin eksenine dik doğrultuda uygulanan darbe ile basınç dalgası hızı Bağntı (2.51) ile hesaplanmaktadır. Ultrasonik darbe deneyinde, L uzunluğundaki bir çubuktan t sürede geçen dalga yayılımı hızı Bağntı (2.52) ile elde edilir. Bu durumda Elastisite (Young) modülü Bağntı (2.53) ile hesaplanmaktadır.

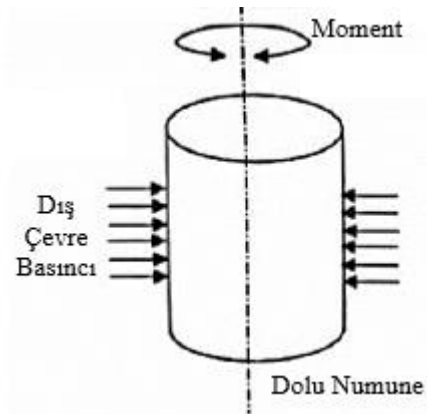
$$V_r = \sqrt{\frac{E}{\rho}} \quad (2.51)$$

$$V_r = \frac{L}{t} \quad (2.52)$$

$$E = \rho V_r^2 = \rho \frac{L^2}{t^2} \quad (2.53)$$



Eğer zemin numunesine Şekil 2.23'teki gibi yanal çevre basıncı uygulanmışsa bu durumda zeminde oluşacak moment ve buna karşılık gelen elastik kayma modülü Bağıntı (2.54) ile elde edilir. Bu bağıntıda V_s kayma dalgası hızıdır (Das & Ramana, 2011).



$$G = \rho V_s^2 = \rho \frac{L^2}{t^2} \quad (2.54)$$

2.4.1.2. Rezonant Kolon Deneyi

Rezonant kolon deneyi, çok küçük kayma birim deformasyonlarında, maksimum kayma modülü (G_{maks}), kayma modülü (G) ve sönüm oranını (D) belirlemek için kullanılmaktadır. Rezonant kolon deneyi ile, bir zemin kolonunun rezonans frekansından modül, rezonanstaki titreşim genliğinden veya serbest titreşimin azalmasının gözlenmesi ile sönüm belirlenebilir (Hardin & Black, 1968).

Bu deney (ASTM-D4015(92), 2000) standardına göre yapılmaktadır. Bu deneyle zeminin kayma modülü ve sönüm oranı, çevre basıncı ve kayma birim deformasyon genliğinin bir fonksiyonu olarak belirlenebilir. Eğer deney boyuna titreşim ile yapılırsa boyuna dalga hızı ve Young modülü, burulma titreşimi ile yapılırsa kayma dalgası hızı ve kayma modülü elde edilir (Özçep, 2006).

Rezonant kolon deneyi, zeminin dinamik parametrelerinin belirlenmesi için 1930'ların sonlarında düşük birim deformasyon genliklerinde kullanılsa da günümüzde düşük birim deformasyonlardan ($\%10^{-5}$) yüksek birim deformasyonlara kadar ($\%1$) dinamik deneyler yapılabilmekte ve zeminin kayma modülü ve sönüm oranı belirlenebilmektedir. Şekil 2.24'te rezonant kolon deney sistemi ve zemin numunesi ile numunenin aktif ucunda yer alan ve zemin numunesine titreşim uygulayan cihaz yer almaktadır. Zemin numunesinin diğer ucunda pasif uç plakası yer almaktadır. Titreşim, ya numuneye ekseni doğrultusunda basınç dalgası oluşturarak ya da burulma momenti ile numunede kayma dalgası oluşturarak uygulanabilir. Günümüzde iki titreşimin birleşiminden oluşan rezonant kolon sistemleri de kullanılmaktadır.



Şekil 2.24. Rezonant kolon deney seti ve zemin numunesinin üstüne yerleştirilen elektromanyetik uyarıcı

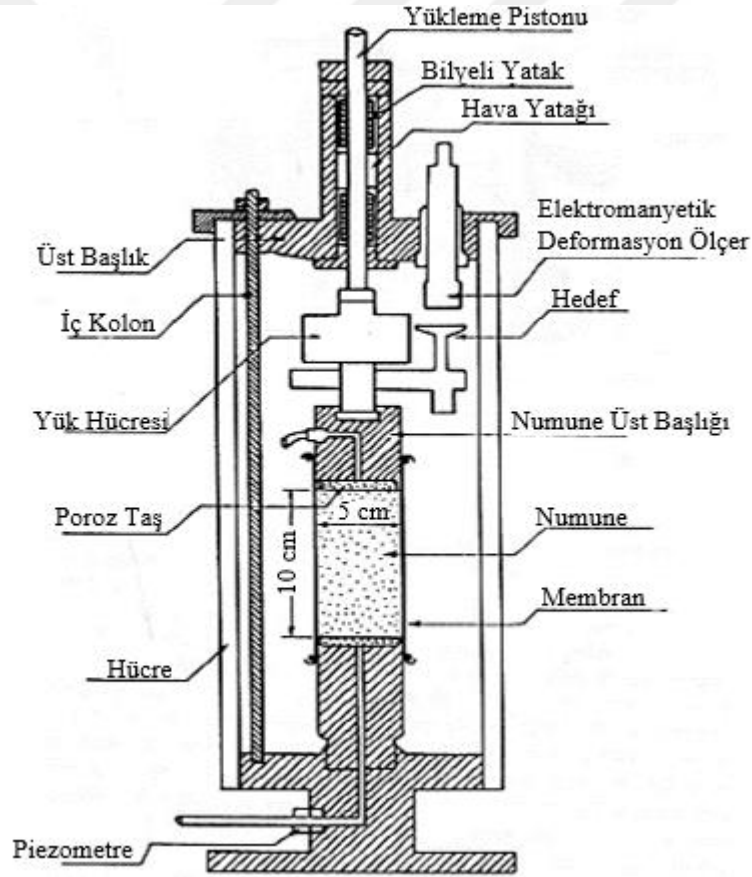
Deney numunesi klasik üç eksenli basınç deneyinde olduğu gibi bir membran ile sarılır ve konsolide edilir. Daha sonra numune, deney tipine bağlı olarak burulma veya boyuna gerilme (veya deformasyon) titreşimine tabi tutulur. Kayma modülünü belirlemek için numune aktif uçta yer alan uyarıcı yardımı ile burulmaya maruz bırakılır. Burulma momenti ve buna bağlı olarak yükleme frekansı kademeli olarak artırılır. Kayma birim deformasyon genliğinin maksimum olduğu andaki frekans, rezonans frekansı olarak tanımlanır. Numunenin rezonansa geçtiği frekans değeri ile dalga hızı ve modül elde edilir. Bu kademede ölçümler alınıp tamamlandıktan sonra sistem durdurulur. Böylece numune serbest titreşime maruz bırakılmış olur. Bu aşamadaki veriler kaydedilir. Serbest titreşim verileri ile zeminin sönüm oranı belirlenir.

Bu deney verileri ile sönüm, ya yarım güç bant genişliği yöntemi olan rezonans tepe noktasının bant genişliğini değerlendirilmesi ile frekans tepki fonksiyonundan ya da logaritmik azaltma yöntemiyle serbest titreşimin azalmasından belirlenebilir. Deney tork yani frekans arttırılarak devam ettirilir. Frekans arttıkça numunedeki birim deformasyonlar artar ve numune yumuşamaya başlar. Bunun neticesinde rezonans olayı daha düşük frekanslarda meydana gelir (Das & Ramana, 2011).

2.4.1.3. Dinamik (Tekrarlı) Üç Eksenli

Dinamik üç eksenli deney, zeminlerin elastisite modülü ve sönüm oranının belirlenmesi için en çok kullanılan deneylerden biridir (Şekil 2.25). Deney standartları (ASTM-D3999(91), 1996) ve (ASTM-D5311, 2011)'dir.

Dinamik üç eksenli deneyi, statik üç eksenli deney düzeneğine benzemektedir. Numune membran ile sarılır ve numune suya doygun hale getirilir. Numune istenen başlangıç efektif gerilme koşullarında konsolide edilir. Daha sonra numuneye belirli frekanslarda tekrarlı gerilmeler uygulanır ve numunede meydana gelen deformasyonlar ve boşluk suyu basınçları kaydedilir. Deney gerilme ve deformasyon kontrollü olarak yapılabilir.



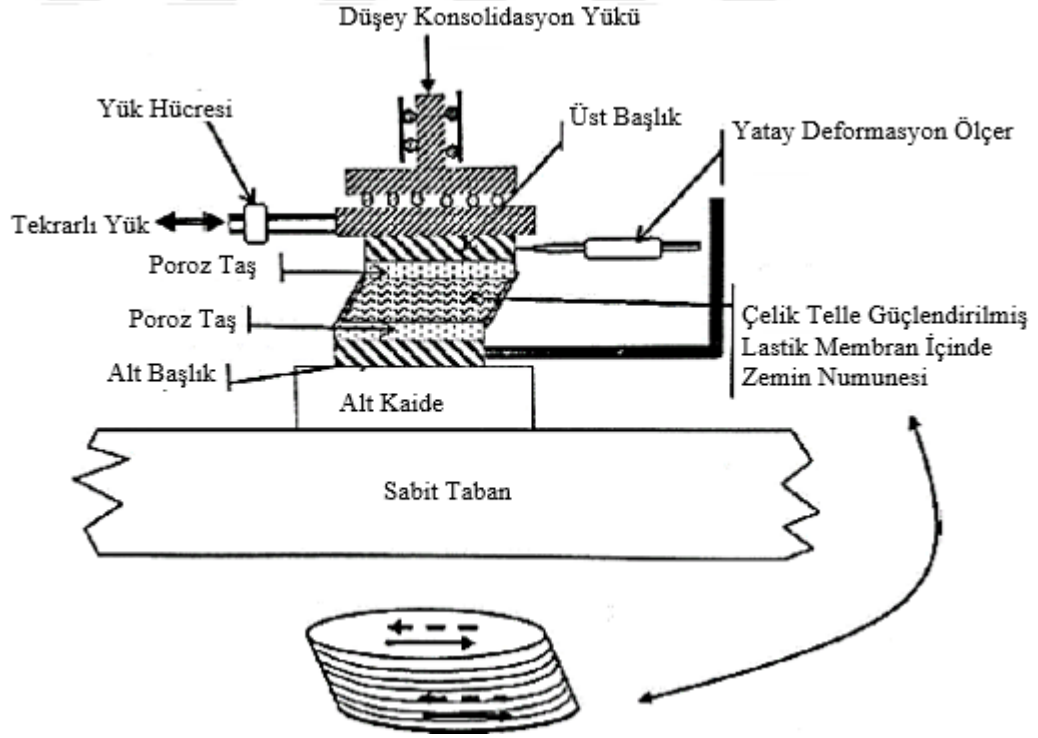
Şekil 2.25. Dinamik üç eksenli deneyi (Ishihara, 1996)

Yük kontrollü deneyde, genellikle numuneye sinüzoidal bir tekrarlı yük uygulanır ve numunede meydana gelen deformasyonlar kaydedilir. Deprem gibi gerçek saha koşullarını elde edebilmek için numune, drenajsız koşullarda dinamik yüke maruz bırakılır. Eğer sıvılaşma potansiyeli belirlemek için bu deney yapılacak ise, numuneye

çevre basıncından daha az sinüzoidal bir deviatör yük uygulanır. Yük kontrollü yapılan deney esnasında eksenel deformasyon veya boşluk suyu basıncı analizi yapılır. Eksenel deformasyon kontrollü deneyde, deformasyon önceden belirlenen bir şekilde değişir. Her çevrimde istenen deformasyonun oluşması için gerekli olan yük veya gerilme kaydedilir.

2.4.1.4. Dinamik basit kesme deneyi

Dinamik basit kesme deneyi ile deprem koşulları daha gerçekçi olarak modellenebilmektedir. Bununla birlikte sıvılaşma potansiyelini belirlemek için en sık kullanılan yöntemlerdendir. Silindirik numune rijit sınır plakaları veya üst üste yığılmış çelik halkalar ile sınırlandırılarak tekrarlı yatay kayma gerilmelerine maruz bırakılır (Şekil 2.26).



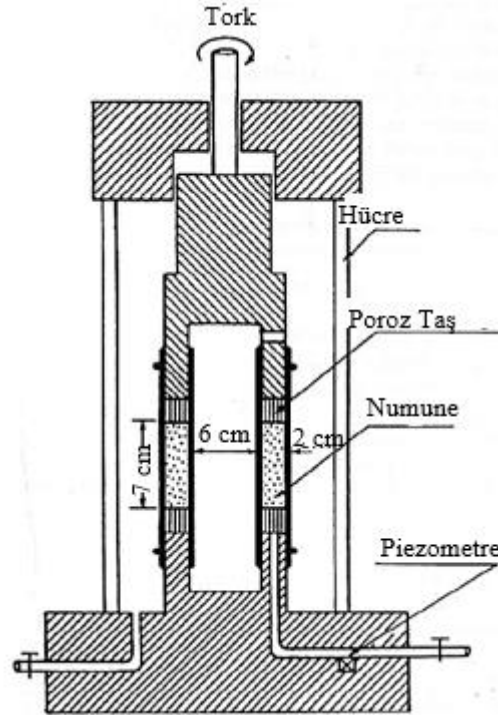
Şekil 2.26. Dinamik basit kesme deneyi (Özkan, 2017)

Bu deney genellikle, drenajsız koşullarda gerilme veya deformasyon kontrollü yapılır. Ancak deney sırasında numunenin yatay yönde maruz kaldığı gerilme, üst ve alt başlık tarafından sönümlenir. Bu durum, numunede oluşan şekil değiştirmelerin uniform olmamasına yol açar. Ayrıca deneyde kayma gerilmelerinin yalnızca taban ve üst yüzeye uygulanması da aynı şekilde üniform olmayan gerilmelere neden olur. Ancak üniform olmayan gerilme etkileri, numunenin çap/yükseklik oranı artırılarak azaltılabilir.

Uniform olmayan gerilmeye ve şekil değiştirmeye maruz kalan numunelerde dayanım kaybı daha hızlı gerçekleşir ve numunenin daha hızlı göçmesine neden olur. Bu nedenle dinamik basit kesme deneyi kullanılarak elde edilen parametreler arazi koşullarını tam olarak yansıtmamaktadır. Bunun yanında dinamik basit kesme deneyinde (10^{-2} - 5%) rezonant kolon deneyinden daha geniş bir birim deformasyon aralığında çalışılabilmektedir. Ayrıca dinamik basit kesme deneyinde numunenin sınır koşullarında boşluk suyu basıncı ölçümleri yapılabilmektedir (Das & Ramana, 2011).

2.4.1.5. Tekrarlı burulmalı kesme deneyi

Bu deney sistemi dinamik basit kesme ve dinamik üç eksenli deney sistemlerinin birleştirilmesiyle oluşturulmuştur. Tekrarlı burulmalı kesme deneyinde, silindirik zemin numunesi hücre içerisine yerleştirilir ve numuneye üst başlıktan belirli frekanslarda bir tork uygulanır. Uygulanan tork numunede kayma gerilmelerinin oluşmasına yol açar (Şekil 2.27). Bu deneyde drenajsız koşullarda gerçekleştirilen deneylerde, boşluk suyu basınçları ve dinamik parametreler hesaplanmaktadır. Bu deney, 0,125 ve 5 Hz. frekans aralığında çalışılabilir. Numuneye uygulanan gerilmeler, dinamik üç eksenli ve dinamik basit kesme deneylerine göre daha üniormdur.



Şekil 2.27. Dinamik burulmalı kesme deneyi (Ishihara, 1996)

2.4.2. Arazi deneyleri

Zemin numuneleri üzerinde laboratuvarda yapılan deney sonuçları, örselenme ve arazi koşullarının oluşturulması zorluklarından etkilenmektedir. Buna ek olarak laboratuvar deneylerinin yapıldığı numuneler alındıkları tabakanın küçük bir kısmını temsil etmektedir. Bu nedenle zemin profilinde bulunan tabakaların mühendislik özelliklerinin arazi deneyleri kullanılarak belirlenmesi, laboratuvar deneylerine kıyasla daha güvenilir sonuçlar elde edilmesini sağlamaktadır.

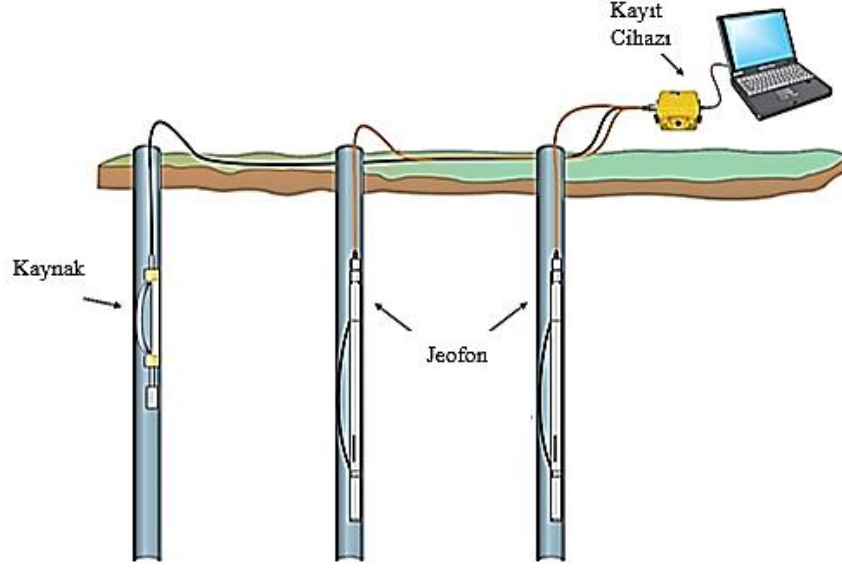
Arazi deneyleri de aynı laboratuvar deneyleri gibi hem düşük hem de yüksek birim deformasyon deneyleri olarak sınıflandırılabilir. Düşük birim deformasyon deneyleri sismik yansıma, sismik kırılma, yüzey dalgalarının spektral analizi, karşıt kuyu sismik, kuyu içi sismik ve sismik koni deneyi olarak sayılabilir. Yüksek birim deformasyon deneyleri ise SPT, CPT, PMT ve DMT deneyleridir.

2.4.2.1. Sismik yöntemler

Sismik yöntemler, bir noktada oluşturulan dalgaların, bu noktadan belirli uzaklıklara yerleştirilen alıcılar yardımı ile bu noktalardan kayıt alma esasına dayanmaktadır. Bu amaçla zeminin farklı derinliklerinde dalga hızları hesaplanır. Sismik yöntemle basınç dalgası hızı ölçmek nispeten kolaydır. Basınç dalgası hızından kayma dalgası hızına geçmek için poisson oranının çok hassas bir şekilde bilinmesi gerekmektedir. Poisson oranının bu kadar hassas olarak bilinmesi oldukça zordur. Bu nedenle günümüzde kayma dalgası hızının doğrudan ölçülmesi için kullanılan sismik yöntemler geliştirilmektedir.

Sismik dalga hızlarının arazide ölçümü için kullanılan kuyu içi yöntemler, kaynak ve alıcının konumuna göre değişmektedir. Bu yöntemler, karşıt kuyu, alt kuyu, üst kuyu, kuyu içi ve kuyu dibi yöntemleridir.

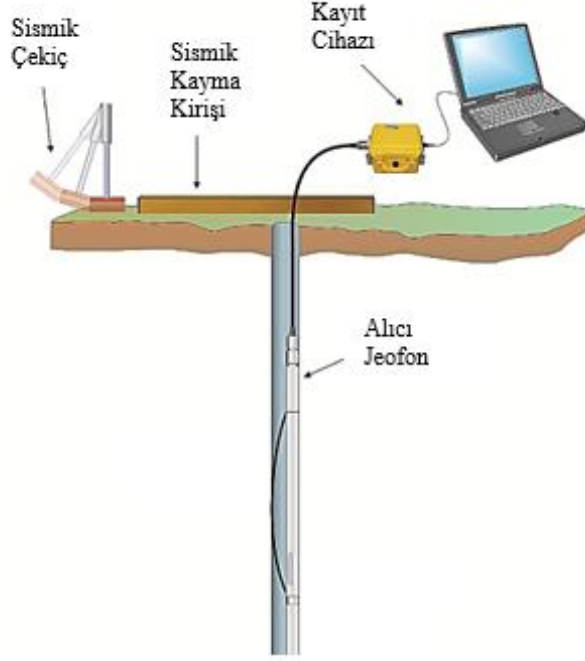
Karşıt kuyu yöntemi, açılan iki kuyudan birinin dip tarafında oluşturulan dalganın yatay doğrultuda diğer kuyuda aynı seviyede bulunan bir veya daha fazla alıcıya ulaşma süresinin belirlenmesi esasına dayanır. Şekil 2.28’de görüldüğü gibi kuyuda bir çubuğa düşey darbe uygulanarak, yatay yönde yayılan kayma dalgaları oluşturulur. Diğer kuyu ya da kuyulara yerleştirilen jeofon aracılığı ile kayıt alınır. İki kuyu arasındaki mesafe ve dalganın bir kuyudan diğer kuyuya gelmesi için geçen zaman ile dalga hızı hesaplanır. Kayma dalgası hızı kullanılarak kayma modülü hesaplanır.



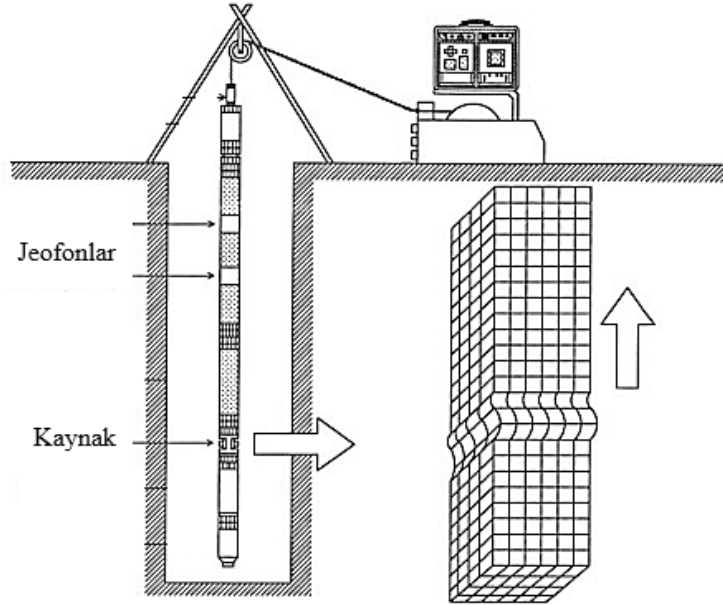
Şekil 2.28. Karşıt kuyu yöntemi (ConeTec, 2023)

Alt kuyu yönteminde kuyuya yakın bir zemin yüzeyinde yer alan bir kaynak ile bir darbe uygulanarak sismik titreşimler oluşturulur. Kuyu içinde belirli derinliklerde yer alan alıcı ya da alıcılara dalganın dikeye yakın olarak varış süresi kaydedilir (Şekil 2.29). Darbenin vuruş anı ile alıcıya varış zamanı arasındaki fark ile alıcının derinliği kullanılarak dalga hızı bulunur. Zemin yüzeyinde P dalgası üretmek için zemin yüzeyine dik olacak tarzda bir darbe uygulanırken S-dalgası üretmek için zemin yüzeyinin hemen altına yerleştirilen özel ahşap latalar ve kesme dalgası üretecek çekiçler kullanılır. *Üst kuyu yöntemi* ise alt kuyu yönteminin tam tersidir.

Kuyu içi yöntemde hem kaynak hem de alıcı aynı kuyu içinde yer almaktadır (Şekil 2.30). Oluşturulan dalganın düşey olarak kuyu duvarında yer alan alıcıya ulaşması için geçen süre ölçülür. Kuyu dibi yönteminde bir ya da daha fazla alıcı ile kaynaktan oluşan bir prob önceden açılan bir kuyu tabanından doğal zemin içine itilmektedir. Oluşan cisim dalgalarının kaynaktan düşey doğrultuda alıcı/alıcılara ulaşma süreleri kaydedilir.



Şekil 2.29. Alt kuyu yöntemi (ConeTec, 2023)



Şekil 2.30. Kuyu içi yöntemi (In-Situ Engineering, 2018)

Yüzey sismik yöntemlerinde ise hem kaynak hem de alıcı zemin yüzeyinde yer almaktadır. Bu yöntemler yüzey kırılma, yüzey yansıma, harmonik Rayleigh ve yüzey dalgalarının spektral analizi yöntemleridir.

Yüzey kırılma yöntemi, yüzeyde yer alan bir kaynak tarafından oluşturulan cisim dalgalarının doğrusal olarak yerleştirilen alıcılara ulaşma zamanını ölçme esasına dayanmaktadır. Oluşturulan dalganın en kısa yolu, daha alt tabakalardaki yayılma hızına

göre değişmektedir. P dalgası oluşturmak için patlayıcı tipte kaynaklar kullanılırken, S dalgası üretmek için mekanik kaynak kullanılmaktadır. S dalgası, P dalgasından daha hızlı sönümlendiği için etki derinliği sınırlıdır. Ayrıca zemin içine büyük kayma enerjisi vermek zordur. Uygulama için oldukça geniş alana ihtiyaç vardır.

Yüzey yansıma yönteminde alıcılar kaynağa yakın olmaktadır. Bu yöntemde P dalgası ölçümü yapıldığından dinamik analizlerde kullanılmamaktadır.

Harmonik dalga yöntemi, bir vibratör ile oluşturulan ve sinüzoidal olarak değişen Rayleigh dalgasının farklı frekanslardaki dalga boylarının ölçülmesidir. Farklı frekanslarda yapılan deneyler sonucunda dispersiyon eğrisi olarak adlandırılan hız-frekans veya hız-dalga boyu eğrileri çizilir. Rayleigh dalgası hızından kayma dalgası hızı belirlenmektedir.

Yüzey dalgalarının spektral analizi (SASW), dispersiyon Rayleigh olarak da bilinmektedir. Bu yöntemde kullanılan kaynak geniş genlikli bir düşey darbedir. Bu yöntemde genellikle, iki alıcı kullanılmakta olup, alıcılar ile alıcı ve kaynak arasındaki mesafeler, araştırma derinliğini kapsayacak şekilde birçok kez değiştirilmektedir. Alıcılar, bir orta noktadan itibaren lineer olarak bir önceki mesafenin iki katı mesafede yerleştirilir. Darbe etkisi nedeniyle oluşan yüzey dalga alanı geniş frekanslar içerir. Rayleigh dalgasının dispersiyon özelliği nedeniyle her frekans farklı hızda yayılır ve alıcıların kaydettiği yüzey dalgası kayıtları ile faz farkları yardımıyla frekans-hız grafiği elde edilir. Grafiği elde etmek için zaman kayıtları hızlı Fourier dönüşümleri (FFT) kullanılarak frekansa bağlı kayıtlara dönüştürülür ve her frekans için iki kayıt arasındaki faz farkından zaman aralıkları ve hız bulunarak dispersiyon eğrileri elde edilir. Başlangıç değerleri olarak seçilen zemin özellikleri ve tabaka kalınlıkları ile bir model oluşturulup teorik dispersiyon eğrisi elde edilir. Bu eğri ile arazi ölçümleri sonucunda elde edilen eğri çakışmaya kadar zemin özelliği ve tabaka kalınlıkları değiştirilir. 15 m derinliğe kadar hızlı ve güvenilir sonuçlar elde edilebilir.

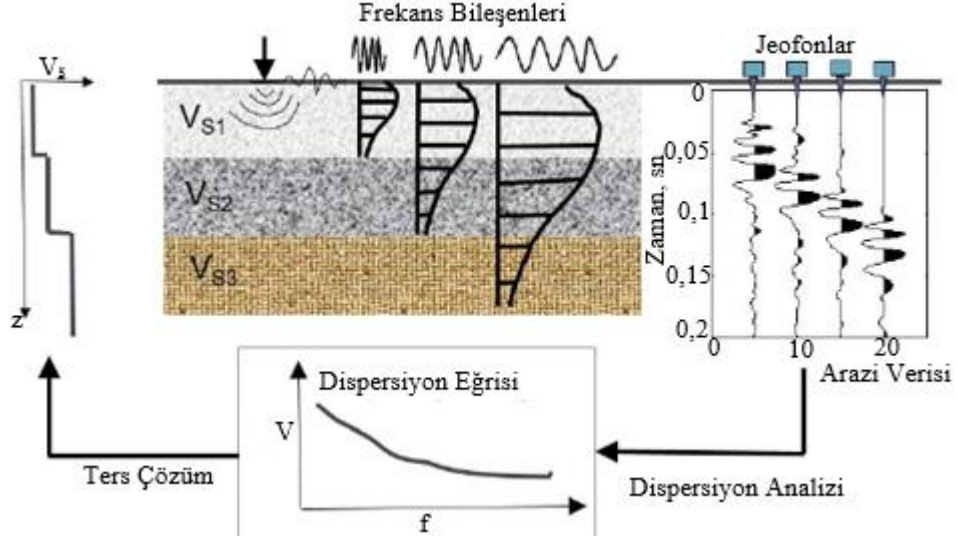
Çok kanallı yüzey dalgalarının spektral analizi (MASW), Rayleigh dalgalarının dispersiyonuna dayalı olan diğer bir yüzey dalgası yöntemidir. Bu yöntem aktif ve pasif kaynaklı olmak üzere iki ana gruba ayrılır. Aktif MASW yönteminde balyoz, ağırlık azalması gibi aktif kaynaklar kullanılmaktadır. Frekans bandı genel olarak 2 Hz. üzerindedir. Pasif MASW yönteminde ise araç trafiği, deprem, tren trafiği, endüstriyel titreşimler gibi ortam faaliyetleri kaynak olarak kullanılmaktadır. Bu nedenle daha geniş bir frekans spektrumunda çalışılmaktadır. Bir nokta kaynağa oluşturulan dalgalar belirli sayıda jeofon tarafından kaydedilir ve kayıtlardan yüzey dalgalarının seçilmesi ile

dispersiyon özellikleri belirlenir. Uygulamada genel olarak çok kanallı sismograflı düşük frekanslı (1-10 Hz.) çok sayıda düşey bileşen jeofonlar kullanılmaktadır. Jeofonlar eşit aralıklarla yerleştirilmektedir. MASW yöntemi, kayma dalgası hızı değişiminin belirlenmesi için hızlı bir yöntemidir. Çünkü bu yöntemde jeofon aralıkları değiştirilmeden tüm araştırma derinliği için sonuçlar elde edilmektedir. Yöntem, hızlı veri toplama, verilerin hızlı işlenmesi ve düşük hız problemini çözmesi gibi üstünlüklere sahiptir. MASW yöntemi ile, formasyon derinlikleri, tabaka kalınlıkları, eğim, kırık, fay, süreksizlik zonu, tabaka hızları ve bu bilgiler yardımıyla zeminin dinamik ve elastik parametrelerini bulmak mümkündür.

Yüzey dalgaları, cisim dalgalarında olmayan yayılım özelliğine sahiptir. Bu özellik, farklı dalga boylarına sahip dalgaların farklı penetrasyon derinliklerine sahip olması ve buna bağlı olarak farklı hızlarda yayılması ile ilişkilidir. Kısa dalga boyu sığ penetrasyona, daha uzun dalga boyu ise daha derin penetrasyona sahiptir. Bu yöntemlerde kullanılan faz hızı her bir dalga boyu için yayılma hızıdır. Bu hız, penetrasyon derinliği boyunca ortamın kayma dalgası hızına bağlıdır. Aynı zamanda ortamın P-dalgası hızı, yoğunluğu ve Poisson oranından çok az etkilenir. Bu nedenle, yüzey dalgası hızı, kayma dalgası hızını iyi bir göstergesidir. Kayma dalgası hızı elde edildikten sonra kayma modülü elde edilebilir. Şekil 2.31’de MASW yöntemi ve temel işlem adımları yer almaktadır. Temel işlem adımları 3 aşamadır. Bunlar; veri toplama, dispersiyon eğrilerini elde etme ve dispersiyon eğrilerinin ters çözümü ile derinlik-hız grafiğini oluşturmaktır.

MASW yönteminde maksimum inceleme derinliği 30 m’dir. Bu derinlik zemin ve kaynak özelliklerine göre değişmektedir. Kullanılan kaynak maksimum dalga boyunu belirlemektedir. Araştırma derinliği dalga boyuna bağlı olarak Bağıntı (2.55) ile hesaplanır.

$$Z_{maks} \cong 0,5 \times \lambda_{maks} \quad (2.55)$$



Şekil 2.31. MASW yöntemi ve temel işlem adımları (Mutlu vd., 2015)

Serim uzunluğu, araştırma derinliğine eşit veya büyüktür ve Bağntı (2.56) ile hesaplanır. Jeofonlar arası mesafe minimum dalga uzunluğu ile orantılıdır. Bu da Bağntı (2.57) yer alan uygulanabilecek minimum tabaka kalınlığını verir. Bu bağıntıda dx minimum dalga uzunluğudur.

$$S = m \times Z_{maks} \quad 1 \leq m \leq 3 \quad (2.56)$$

$$Z_{min} = k \times dx \quad 0,3 \leq k \leq 1,0 \quad (2.57)$$

Dispersiyon eğrisi, frekans ve faz hızından oluşan bir veri grafiğidir. Kayma dalgası hızı değişimi bu dispersiyon eğrisine göre belirlenir. Bu nedenle dispersiyon eğrisinin doğru belirlenmesi en kritik aşamadır. Ölçülen verilerin değerlendirilmesi ile parametrelerin elde edilmesi ters çözüm aşamasıdır.

2.4.2.2. Statik Tekrarlı Plaka Yükleme Deneyleri

Yükleme deneyleri, eşdeğer kütle-yay sisteminin yay sabitini bulma yöntemidir ve yatak katsayısı kavramına dayanır. Deney plakası, deney derinliğine yerleştirilir, gerçek temel yükleri ile uyumlu olacak şekilde, önce statik yük uygulanır, sonra tekrarlı dinamik yük uygulanır. Dinamik yük, konsolidasyona izin vermeyecek şekilde, kısa

zaman aralıkları ile uygulanır. Bu yöntemin en büyük zorluğu, yükleme plakası için elde edilen yay katsayısından, temelde kullanılacak yay katsayısının belirlenmesidir.

2.4.2.3. Yüksek birim deformasyon deneyleri

Standart penetrasyon deneyi (SPT) ve koni penetrasyon deneyi (CPT) gibi arazi deney sonuçları, literatürde yer alan korelasyonlar kullanılarak, dinamik zemin parametreleri ve kayma dalgası hızını belirlemek için kullanılabilir.

Standart Penetrasyon deneyi sondaj esnasında yapılan dinamik sondalama deneyidir. (ASTM-D1586, 2022) standardına göre yapılmaktadır. Sondaj esnasında belirli aralıklarla sondaj takımı kuyu dışına çıkarılır ve SPT deneyi numune alıcısı sondaj kuyusuna indirilir. Deneyin başında, tij üzerine 3 adet 15 cm, toplamda 45 cm, mesafe işaretlenir. Bu deneyde, boyuna doğrultuda ikiye ayrılabilir standart bir numune alıcı, 63,5 kg ağırlığındaki tokmağın 76,2 cm yükseklikten serbest düşürülmesi ile sondaj çukuru içerisinde istenilen derinlikte zemine çakılmaktadır. Numune alıcının her 15 cm mesafeyi batması için gerekli darbe sayısı deney esnasında kaydedilir. Bu darbe sayılarından son iki 15 cm için kaydedilen darbe sayıları toplanır ve SPT- N_{30} değeri olarak elde edilir. Deney sonunda numune alıcı kuyu dışına çıkarılır ve ikiye ayrılır. İçerisindeki zemin numunesi hava almayacak şekilde muhafaza edilerek laboratuvara getirilir. Laboratuvarda elek analizi, kıvam limitleri gibi zeminin fiziksel özelliklerinin belirlenmesi deneylerinde kullanılır.

Bu deney, genellikle her 1,5-2 m’de bir yapılmaktadır. SPT deneyi yumuşak-sert killer ile gevşek-sıkı kumlarda uygulanabilmektedir. SPT deney sonuçları zemin tabakalarının kıvamı, sıklığı, içsel sürtünme açısı, drenajsız kayma mukavemeti, dinamik kayma modülü, elastisite modülü, sıvılaşma potansiyeli gibi birçok parametrenin tahmininde kullanılmaktadır.

Deney esnasında kaydedilen SPT- N_{30} değeri birçok faktörden etkilenmektedir. Bu nedenle deney esnasında elde edilen bu değer düzeltilmesi gerekmektedir. SPT- N_{30} değerine uygulanacak düzeltmelerden bazıları, Bağıntı (2.58) ve Bağıntı (2.59)’da yer alan, tokmak enerjisi, jeolojik basınç, yeraltı suyu, sondaj çapı, tij uzunluğu, kılıf, çakma başlığı düzeltmeleridir. Bu düzeltmeler uygulanarak SPT- N_{30} değerleri N_{60} ve $N_{1,60}$ şeklinde normalize edilmektedir.

$$N_{60}=N_{30}*C_E* C_R* C_B* C_S* C_A* C_{BF}* C_C \quad (2.58)$$

$$N_{1,60}=N_{60}*C_N \quad (2.59)$$

Bu bağıntılarda N_{30} arazide kaydedilen darbe sayısı, C_N , derinlik düzeltme faktörü, C_E , enerji düzeltme faktörü, C_R , tij uzunluğu düzeltme faktörü, C_B , sondaj çapı düzeltme faktörü, C_S , numune alıcı kılıf düzeltme faktörü, C_A , çakma başlığı düzeltme faktörü, C_{BF} , tokmak düşürme sıklığı (hızı) ve C_C , tokmak yastığı düzeltme faktörüdür. Ancak çoğunlukla bu düzeltmelerden sadece enerji düzeltmesi ve efektif jeolojik basınç düzeltmeleri yapılmaktadır.

Standart penetrasyon deney sonuçları kullanılarak, zeminlerin dinamik parametrelerinin belirlenmesinde kullanılan kayma dalgası hızını zemin tipine bağlı olarak tahmin etmek için kullanılan bazı korelasyonlar Tablo 2.9'da yer almaktadır.

Tablo 2.9. SPT-N değerleri ile V_s arasındaki ilişkiler (Sivrikaya & Toğrol, 2009)

Çalışma	Zemin Cinsi	V_s (m/sn)
İmai ve Yoshimura (1970)	Tüm	$76N^{0,33}$
İmai vd. (1976)	Tüm	$89,8(N)^{0,341}$
İmai (1977)	Halosen (H) Kil	$102 (N)^{0,29}$
	Halosen (H) Kum	$81 (N)^{0,33}$
	Pleistosen (P) Kil	$114 (N)^{0,29}$
	Pleistosen (P) Kum	$97 (N)^{0,32}$
Ohta ve Goto (1978)		$69 (N)^{0,17} D^{0,2} E F$
	Kil	$F=1,00, E= 1 (H) \text{ veya } 1,3 (P)$
	İnce Kum	$F=1,09, E= 1 (H) \text{ veya } 1,3 (P)$
	Orta Kum	$F=1,07, E= 1 (H) \text{ veya } 1,3 (P)$
	Kaba Kum	$F=1,14, E= 1 (H) \text{ veya } 1,3 (P)$
	Çakıllı Kum	$F=1,15, E= 1 (H) \text{ veya } 1,3 (P)$
İmai ve Tonouchi (1982)	Çakıl	$F=1,45, E= 1 (H) \text{ veya } 1,3 (P)$
	Tüm	$97(N)^{0,314}$
Okamoto vd. (1989)	Pleistosen (P) Kum	$125(N)^{0,3}$
İyisan (1996)	Tüm	$51,5(N)^{0,516}$
	Tüm	$61(N)^{0,267} (10\sigma_{v0}')^{0,283}$
	Kil (CL)	$47,3(N)^{0,324} (10\sigma_{v0}')^{0,27}$
	Kum (SM)	$54(N)^{0,332} (10\sigma_{v0}')^{0,221}$
	Çakıl (GP, GM)	$205,7(N)^{0,74} (10\sigma_{v0}')^{0,177}$

Burada D, derinlik, m; σ_{v0}' , düşey efektif gerilme kPa, N düzeltilmemiş SPT sayısıdır.

Standart penetrasyon deneyi ile küçük birim deformasyon kayma modülünün tahmini için kullanılan bazı ampirik formülasyonlar Tablo 2.10'da verilmiştir. Bu tabloda yer alan N değerleri enerji düzeltmesi uygulanmamış SPT sayılarıdır.

Tablo 2.10. SPT-N değerleri ile G_0 arasındaki ilişkiler (Sivrikaya & Toğrol, 2009)

Çalışma	Zemin Cinsi	G_0 (kPa)
NAVFAC (1982)	Tüm	$12000(N_{60}^*)^{0,8}$
İmai ve Tonouchi (1982)	Tüm	$14000(N)^{0,68}$
İmai ve Yokota (1982)	Kil (PS log)	$31800 (N)^{0,37}$
	Kum (PS log)	$16800 (N)^{0,51}$
	Kil (Rezonans Kolon)	$21900 (N)^{0,28}$
	Kum (Rezonans Kolon)	$16700 (N)^{0,38}$

Standart penetrasyon deneyi ile Young modülü arasındaki korelasyonlardan bazıları Tablo 2.11'de yer almaktadır.

Tablo 2.11. SPT-N değerleri ile Young Modülü arasındaki ilişkiler (Sivrikaya & Toğrol, 2009)

Zemin Cinsi	Gerilme-deformasyon modülü, E_s , kPa
	$E_s = 500(N_{60}^* + 15)$
NC kum	$E_s = (15000 \sim 22000) \ln N_{60}^*$
	$E_s = 18000 + 750N_{60}^*$
OC kum	$E_{s,OC} = E_{s,NC} * (AKO)^{0,5}$
	$E_s = 600(N_{60}^* + 6) \quad N_{60}^* < 15$
Çakıllı kum ve Çakıl	$E_s = 600(N_{60}^* + 6) + 2000 \quad N_{60}^* > 15$
Killi kum	$E_s = 320(N_{60}^* + 15)$
Siltli kum	$E_s = 300(N_{60}^* + 6)$

(Stroud, 1974), SPT-N değeri ile hacimsel sıkışma katsayısı arasındaki ilişki için Bağıntı (2.60)'yi önermiştir. Bu bağıntı, plastisite indisine bağlı olarak kil zeminler için belirlenmiştir. Bağıntıda yer alan f_2 katsayısı plastisite indisine bağlı olarak 0,42 ile 0,72 aralığındadır. N_{60}^* ise enerji düzeltmesi uygulanmış SPT sayısıdır. Hacimsel sıkışma modülü ise Bağıntı (2.61) ile hesaplanmaktadır.

$$m_v = \frac{1}{f_2 * N_{60}^*} \quad \text{Birimi } 1/MPa \quad (2.60)$$

$$M_c = \frac{1}{m_v} \quad (2.61)$$

SPT-N değerleri, zeminin serbest basınç mukavemetinin tahmini için de kullanılabilir. Aynı zamanda zeminin kıvamı ile ilgili de fikir elde edilebilir. Çeşitli araştırmacıların zemin tipine bağlı olarak önerdiği SPT-N sayısına bağlı olarak serbest basınç mukavemeti değerleri Tablo 2.12’de verilmiştir. Buna ek olarak (Terzaghi & Peck, 1967) ve (Bowles, 1997) tarafından önerilen SPT-N değeri ile zemin kıvamı ve serbest basınç mukavemeti arasındaki ilişki Tablo 2.13’te verilmiştir.

Tablo 2.12. SPT-N değerleri ile serbest basınç mukavemeti arasındaki ilişkiler

Çalışma	Zemin Cinsi	q_u (kPa)
Sanglerat (1972) ve Tomlinson (1986)	Kil	25N
	Sitli Kil	20N
Sowers (1979)	CH	25N
	Orta plastisiteli kil	15N
	CL	7,5N
Nixon (1982)	Kil	24N
Kulhawy ve Mayne (1990)	Killi Zemin	58N ^{0,72}

N düzeltilmemiş SPT sayısıdır.

Tablo 2.13. SPT-N değerleri ile kıvam ve serbest basınç mukavemeti arasındaki ilişkiler

Zemin Kıvamı	Terzaghi-Peck		Bowles	
	SPTN* ₆₀	q_u , kPa	SPTN* ₆₀	q_u , kPa
Çok yumuşak	<2	<25	<2	0-25
Yumuşak	2-4	25-50	2-4	25-50
Orta Katı	4-8	50-100	4-8	50-100
Katı	8-15	100-200	8-16	100-200
Çok Katı	16-30	200-400	16-32	200-400
Sert	>30	>400	>32	>400

2.5. Makine Temelleri

Dinamik yüklerin en fazla etkili olduğu yapılardan biri sanayi yapılarıdır. Sanayideki gelişmeler, makinelerin gelişmesine ve buna paralel olarak bu makinelerin temellerinin projelendirilmesi ve uygulanmasını doğurur. Makinenin verimli bir şekilde

çalışması için, uygun makine temelini seçimi ve projelendirmesi önceliklidir. Bu nedenle, makineyi taşıyacak temel-zemin sisteminin tasarımında daha ciddi çevresel, ekonomik, teknik şartlar ve sınırlandırmaların göz önüne alınması gerekmektedir. Makine temellerine etkiyen dinamik yükler makine tipine bağlı olarak hareketli, periyodik ve/veya darbe yükleridir. Makine-temel-zemin sisteminin tasarımında, makine ve temelin statik yükleri beraber temel zeminine iletilmekte olup, makine-temel-zemin sisteminin davranışı yapılacak tasarımda göz önüne alınması gereken hususların başında gelmektedir. Ayrıca projelendirmede makinenin güvenli bir şekilde çalışması ve oluşan dinamik yüklerin çevreye, insanlara ve tesis yapısı ve çevre yapıları da zararlı etkiler oluşturmaması gerekmektedir. Örneğin, makine temellerindeki titreşim, farklı oturmalar ve deformasyonlara neden olup makinenin çalışmasını etkileyebilir ve makine temelleri etrafında hassas aletlerin bulunması durumunda, bu aletlerin hassasiyeti makine titreşimlerinden etkilenebilir. Bu durumlar göz önünde bulundurularak tasarım yapılmalıdır.

Makine-temel sisteminin tasarımına geçilmeden önce aşağıdaki genel kriterlerin sağlandığının belirlenmesi gerekmektedir:

- Temel, üzerindeki yükleri göçmeden güvenle taşınmalıdır (Taşıma gücü kriteri).
- Temelin oturması, izin verilebilir limitler içinde kalmalıdır (Oturma kriteri).
- Makine ve temelin ağırlık merkezi, temelin taban alanının merkezinden geçen düşey eksene mümkün olduğunca yakın olmalıdır. (Eksantrisite kriteri).
- Rezonans durumu kontrol edilmelidir. Temel-zemin sisteminin özel frekansı makine frekansından uzak olmalıdır.
- Makinenin çalışması esnasında oluşan genlikler, makineyi üreticisi tarafından verilen şartname sınırları içinde olmalıdır.

Makineler tarafından oluşturulan dinamik yükler, makine tipine bağlı olarak büyüklükleri, şekilleri ve hızları zamana bağlı olarak değişen dış tesirlerdir. Buna bağlı olarak makine-temel sisteminin deformasyonları zamana bağlı olarak değişmekte ve sistem kütlelerinin ivmeli hareket yapmasına neden olmaktadır. Bu ivmeli hareket, sistemde dış kuvvetlere ilave atalet kuvvetlerinin oluşmasına sebep olmaktadır. Bu nedenle sistem deformasyonları ve zorlanmaları belirtilirken dış kuvvetler ve atalet kuvvetleri beraber değerlendirilmelidir.

Makinelerin ürettiği dinamik yükler çoğunlukla makine ve makine temelini ağırlığından daha küçüktür. Makine temellerine gelen yükler, uzun süreler devam eden tekrarlı yükler olduğu ve büyüklükleri küçük olduğu için, zeminlerin bu yükler altındaki

davranışının elastik sınırlar içinde kaldığı kabul edilebilir. Ancak makinenin meydana getirdiği dinamik etkiler sürekli olduğu için zemin davranışının belirlenmesi büyük bir önem taşımaktadır.

Temel tasarımında en önemli faktör, makine hareketinin periyodu ile makine-temel-zemin sisteminin doğal periyodudur. Burada tasarım yapılırken, makine-temel-zemin sisteminin doğal periyodunun rezonansı engelleyecek şekilde düzenlenmesi gerekir.

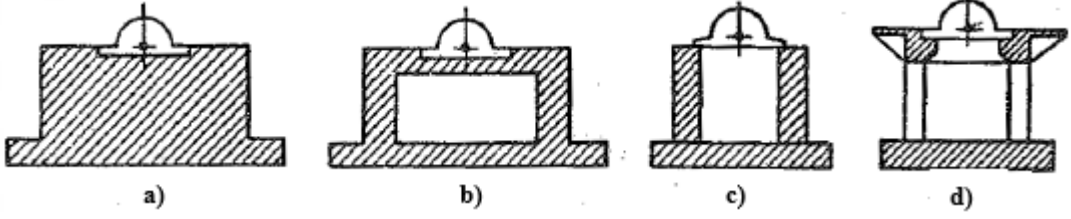
Makineler aşağıdaki gibi sınıflandırılır.

- *Pistonlu makineler:* Periyodik kuvvet oluşturan makinelerdir. Kompresörler örnek olarak verilebilir. İşletme hızları 600 dev/dk'dan küçüktür. Düşük hızlı makinelerdir.
- *Darbeli makineler:* İmpakt kuvveti oluşturan makinelerdir. Şahmerdanlar, presler örnek olarak verilebilir. Şahmerdanlar, genel olarak dakikada 60-150 vuruş yapan darbeli makinelerdir.
- *Döner makineler:* Yüksek hızlı makinelerdir. Türbinler ve döner kompresörler örnek olarak verilebilir. İşletme hızları 3000-10000 dev/dk arasında olabilir.
- *Diğer makineler:* Pompalar, hadde makineleri, kırıcılarıdır.

Makine temeli, makine tipi, büyüklüğü, önemi ve üzerine inşa edilecek zemin profiline bağlıdır. Düşük frekanslı makineler ve darbe yüklü makineler genellikle blok temeller üzerine oturtulurken, yüksek hızlı ve döner makineler çerçeve temeller üzerine oturtulur. Yapısal özelliklerine göre makina temelleri aşağıdaki şekilde sınıflandırılırlar (Şekil 2.32):

- *Blok veya masif temeller:* Makinenin oturduğu büyük beton kütlesi seklindedir. Kompresörler ve pistonlu makineler için kullanılır. Bu temellerde kütle oldukça büyüktür ancak frekans nispeten küçüktür. Aynı zamanda darbeli makinelerde de blok tipi temel kullanılabilir (Şekil 2.32 (a)).
- *Kutu-sandık veya keson temeller:* Bu temeller blok temellerin bir çeşididir. Makine içi boş beton blok üzerine oturtulur. Bu temelde doğal frekans yükselir (Şekil 2.32 (b)).
- *Duvar temeller:* Birbirine paralel iki duvardan oluşturulur ve makine üzerine oturtulur (Şekil 2.32 (c)).
- *Çerçeve temeller:* Düşeyde kolonlardan ve bu kolonları yatayda birbirine bağlayan kirişlerden oluşur ve makine üzerine oturtulur. Buhar türbinlerinin

oturduğu temellerdir. Blok temellere kıyasla daha esnek olup, kolon, kiriş ve döşeme gibi elemanlardan oluşur (Şekil 2.32 (d)).



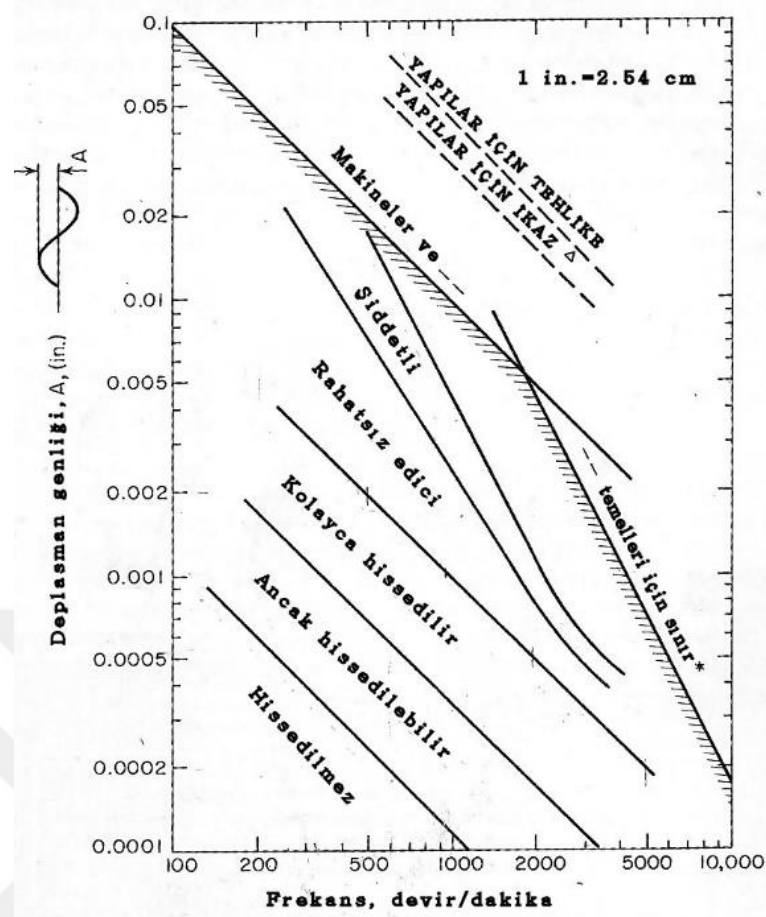
Şekil 2.32. Makine temel tipleri (İşkodra, 2008)

Makinelerin bütün özellikleri göz önünde bulundurularak en uygun temel tasarımı yapılmalıdır. Makine temellerinde makine frekansı önemlidir. Devir sayısı 500 devir/dk'nın altında olan makineler için geniş taban alanlı blok tipi temeller seçilmelidir. Böylece makine frekansı temel frekansından küçük olur. Devir sayısı 500-1000 devir/dk arasında olan makineler için, sönümleyiciler üzerine oturan blok temeller uygundur. Böylece temel frekansı makine frekansının oldukça altına düşer. Devir sayısı 1000 devir/dk üzerinde olan makineler için ise blok temel seçilmesi durumunda taban alanı küçük seçilip uygun sönümleyici sistemler ile temel frekansı düşürülür.

Yüksek hızlı makinelerde (makine frekansının >1000 devir/dk) temel sisteminin frekansının makinenin frekansının çok altında olması durumunda makinenin çalışması ve durması sürecinde rezonans oluşabilir. Bu nedenle literatürde tehlikeli frekans aralığı 200-500 devir/dk olarak belirtilmektedir. Ancak bu durum, makinenin yavaşlamaya veya hızlanmaya başlama aşamalarında çok kısa bir an için geçerli olacaktır ve geçicidir. Bu nedenle etkisi ihmal edilebilir. Değişken hızlı makinelerde bu durum irdelenmeli ve projelendirilmesi yapılmalıdır.

Düşük hızlı makinelerin çalışması frekansları da düşük olduğundan dolayı temel sisteminin rezonans frekansına yakındır. Bunun neticesinde de rezonans meydana gelebilir ve büyük titreşimler oluşabilir. Bu da çevre yapılara ve insanlara zarar verebilir.

Ön projelendirme aşamasında makine temellerinin limit deplasmanları için Şekil 2.33'te yer alan limit değerleri önerilmiştir. Bu şekilde insan konforu açısından beş bölge yer almaktadır. "Makine ve temeller için sınır" çizgisi, makinenin çalışması ile ilgili bir sınır olmayıp, bir "emniyet sınırı" olarak önerilmektedir.



Şekil 2.33. Değişik titreşim frekansları için limit deplasman genlikleri (İşkodra, 2008)

Bunun dışında, makinelerin ürettiği dinamik yükler nedeniyle temellerde meydana gelen yatay ve düşey titreşimler için sınır titreşim genlikleri önerilmiştir. (Barkan, 1962) tarafından önerilen makine tipine göre sınır titreşim genlikleri Tablo 2.14'te verilmiştir.

Tablo 2.14. İzin verilen titreşim genlikleri (Barkan, 1962)

Makine Tipi	İzin Verilen Genlikler (cm)
Düşük Hızlı Makineler (500 dev/dk)	0,02-0,025
Şahmerdan Temelleri	0,1-0,12
Yüksek Hızlı Makineler	
a) 3000 dev/dk	
i) Düşey Titreşimler	0,002-0,003
ii) Yatay Titreşimler	0,004-0,005
b) 1500 dev/dk	
i) Düşey Titreşimler	0,004-0,006
ii) Yatay Titreşimler	0,007-0,009

2.5.1. Blok makine temellerinin tasarımı

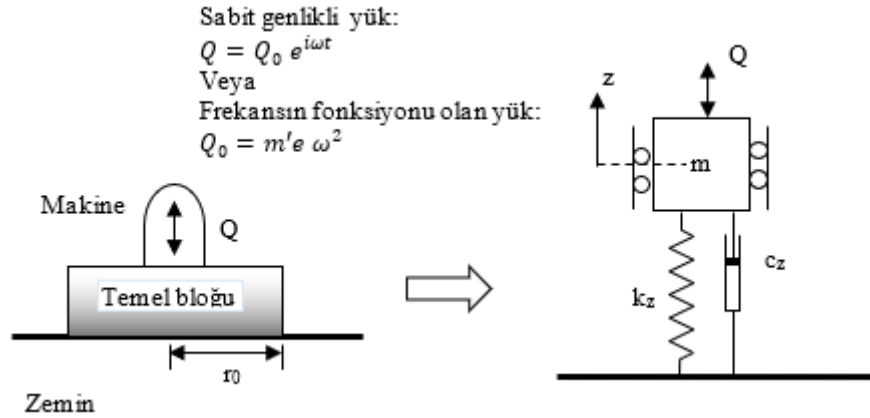
Blok makine temellerinin altı serbestlik derecesi bulunmaktadır. Bunlar, x, y ve z eksenleri doğrultusundaki deplasmanlar ve bu eksenler etrafındaki dönmelerdir. Sanayide kullanılan makineler genellikle harmonik yükler oluşturmaktadır.

(Barkan, 1962)'e göre sönümün makine-temel-zemin sisteminin özel frekansı üzerinde etkisi azdır. Bu nedenle sönüm etkisi ihmal edilebilir.

Elastik yarı uzay teorisine göre, makinenin zemin yüzeyine oturması durumunda dairesel temel sistemleri ele alınmıştır. Bu teoride, geometrik sönümle nedeniyle ortam boyunca enerjinin yayılımı ele alınır. Rezonans frekansında sonlu titreşim frekansı hesaplanır. Bu yöntemde hareket moduna bağlı olarak sistemin kütle-yay-sönüm sabitleri hesaplanır.

Düşey hareket altında yer alan bir blok temel kütle-yay-sönüm elemanından oluşan basit titreşim sistemi olarak modellenmesi Şekil 2.34'te yer almaktadır. Buna göre sistemin hareket denklemi Bağıntı (2.62)'de yer almaktadır.

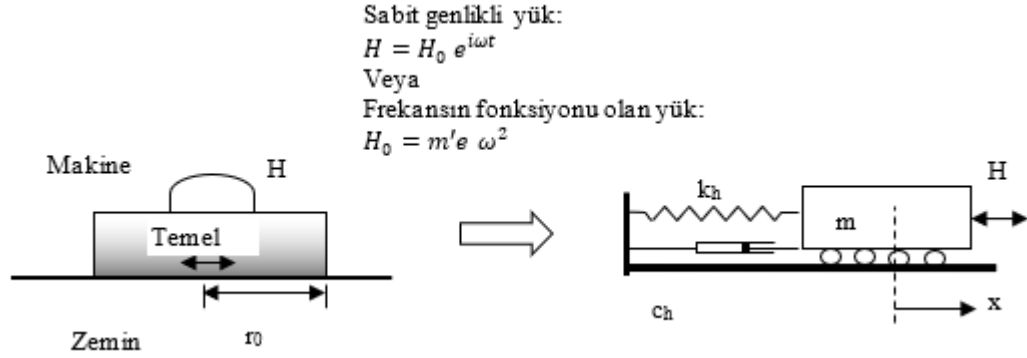
$$m\ddot{z} + c_z\dot{z} + k_z z = Q_0 e^{i\omega t} \quad (2.62)$$



Şekil 2.34. Düşey hareket modunun kütle-yay sistemi olarak modellenmesi (Özkan, 2017)

Yatay yük altındaki bir makine-temel-zemin sisteminin kütle-yay-sönüm elemanından oluşan basit titreşim sistemi olarak modellenmesi Şekil 2.35'da yer almaktadır. Buna göre sistemin hareket denklemi Bağıntı (2.63)'te yer almaktadır.

$$m\ddot{x} + c_h\dot{x} + k_h x = H_0 e^{i\omega t} \quad (2.63)$$

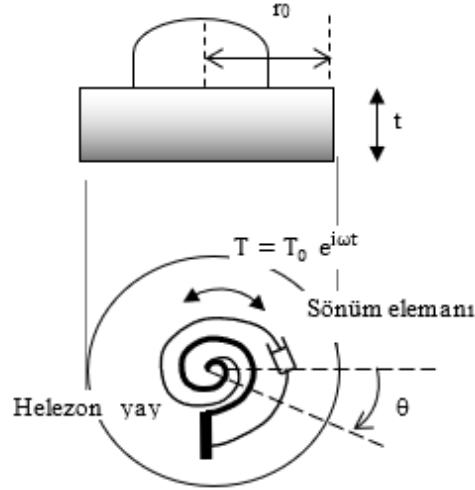


Şekil 2.35. Yatay hareket için kütle-yay-sönüm elemanı modeli (Özkan, 2017)

Burulma hareketi altındaki bir makine-temel-zemin sisteminin kütle-yay-sönüm elemanı modeli Şekil 2.36’da yer almaktadır. Hareket denklemi Bağıntı (2.64)’te yer almaktadır.

$$I_\theta \ddot{\theta} + c_\theta \dot{\theta} + k_\theta \theta = T_0 e^{i\omega t} \quad (2.64)$$

$$I_\theta = \frac{1}{2} m r_0^2 \quad (2.65)$$

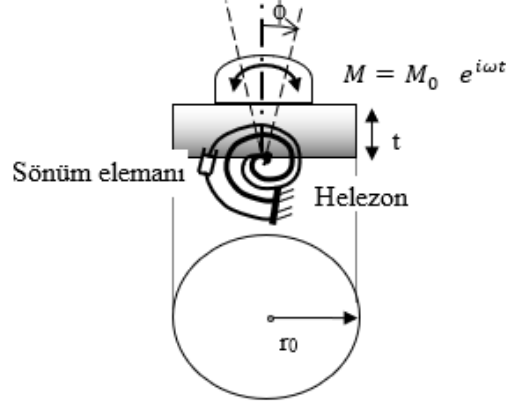


Şekil 2.36. Burulma hareketi için kütle-yay-sönüm elemanı modeli (Özkan, 2017)

Sallanma hareketi altındaki bir makine-temel-zemin sisteminin kütle-yay-sönüm elemanı modeli Şekil 2.37’de yer almaktadır. Hareket denklemi Bağıntı(2.66)’da yer almaktadır.

$$I_\phi \ddot{\phi} + c_\phi \dot{\phi} + k_\phi \phi = M_0 e^{i\omega t} \quad (2.66)$$

$$I_\phi = \frac{mr_0^2}{4} + \frac{mL^2}{3} \quad (2.67)$$



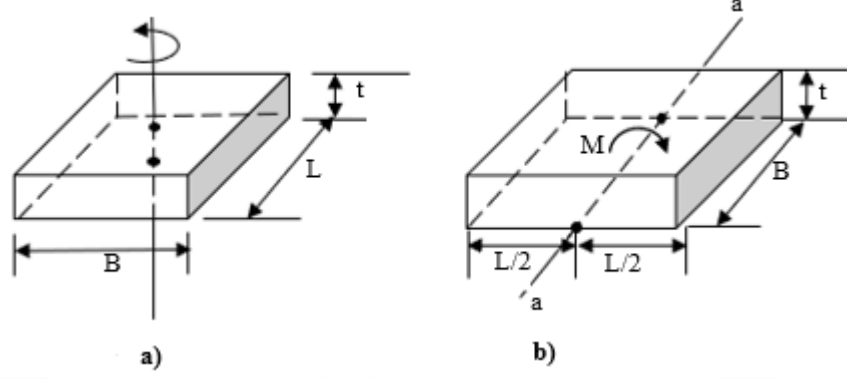
Şekil 2.37. Sallanma hareketi altındaki bir makine-temel zemin sisteminin basit titreşim sistemi olarak modeli (Özkan, 2017)

Bu hareket modları için elastik yarı uzay teorisi ile elde edilen kütle-yay-sönüm sabitleri Tablo 2.15’te yer almaktadır.

Tablo 2.15. Hareket moduna bağlı olarak hareket denklemi parametreleri (Gazetas, 1983)

Hareket Modu	Düşey	Yatay	Sallanma	Burulma
Rijitlik katsayısı	$k_z = \frac{4Gr_0}{1-\nu}$	$k_x = \frac{32(1-\nu)Gr_0}{7-8\nu}$	$k_\phi = \frac{8G(r_0)^3}{3(1-\nu)}$	$k_\theta = \frac{16G(r_0)^3}{3}$
Sönüm katsayısı	$c_z = \frac{3.4(r_0)^2}{(1-\nu)}\sqrt{G\rho}$	$c_x = \frac{18.4(1-\nu)}{(7-8\nu)}(r_0)^2\sqrt{\rho G}$	$c_\phi = \frac{0.8(r_0)^4}{(1-\nu)(1+B_\phi)}\sqrt{G\rho}$	$c_\theta = \frac{1.6r_0^4}{1+B_\theta}\sqrt{G\rho}$
Sönüm oranı	$D_z = \frac{0.425}{\sqrt{B_z}}$	$D_x = \frac{0.288}{\sqrt{B_x}}$	$D_\phi = \frac{0.15}{(1+B_\phi)\sqrt{B_\phi}}$	$D_\theta = \frac{0.5}{1+2B_\theta}$
Kütle oranı	$B_z = \frac{1-\nu}{4} \frac{m}{\rho(r_0)^3}$	$B_x = \frac{7-8\nu}{32(1-\nu)} \frac{m}{\rho(r_0)^3}$	$B_\phi = \frac{3(1-\nu)I_\phi}{8\rho r_0^5}$	$B_\theta = \frac{I_\theta}{\rho r_0^5}$
Sistemin Doğal frekans (rad/sn)	$\omega_{nz} = \sqrt{\frac{k_z}{m}}$	$\omega_{nx} = \sqrt{\frac{k_x}{m}}$	$\omega_{n\phi} = \sqrt{\frac{k_\phi}{I_\phi}}$	$\omega_{n\theta} = \sqrt{\frac{k_\theta}{I_\theta}}$
Titreşimin doğal frekansı (Hz)	$f_{nz} = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{k_z}{m}}$	$f_{nx} = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{k_x}{m}}$		
Titreşimin Genliği	$\frac{Q_0}{k_z \sqrt{\left[1 - \left(\frac{\omega}{\omega_{nz}}\right)^2\right]^2 + \left(2D_z \frac{\omega}{\omega_{nz}}\right)^2}}$	$\frac{H_0}{k_x \sqrt{\left[1 - \left(\frac{\omega}{\omega_{nx}}\right)^2\right]^2 + \left(2D_x \frac{\omega}{\omega_{nx}}\right)^2}}$	$\frac{M_0}{k_\phi \sqrt{\left[1 - \left(\frac{\omega}{\omega_{n\phi}}\right)^2\right]^2 + \left(2D_\phi \frac{\omega}{\omega_{n\phi}}\right)^2}}$	$\frac{T_0}{k_\psi \sqrt{\left[1 - \left(\frac{\omega}{\omega_{n\psi}}\right)^2\right]^2 + \left(2D_\psi \frac{\omega}{\omega_{n\psi}}\right)^2}}$

Blok temeller genellikle dikdörtgen temel olarak tasarlandığı için dairesel temeller için elde edilen bu parametreler farklı titreşim modlarındaki dikdörtgen bir temeller için *eşdeğer yarıçap* hesaplanarak elde edilmektedir (Şekil 2.38).



Şekil 2.38. a) Burulma ve b) Sallanma modu

Düsey ve yanal hareket modları için eşdeğer yarıçap:

$$r_0 = \sqrt{\frac{B L}{\pi}} \quad (2.68)$$

Burulma modu için eşdeğer yarıçap:

$$r_0 = \left(\sqrt{B L \frac{B^2 + L^2}{6\pi}} \right)^{1/2} \quad (2.69)$$

$$I_\theta = \frac{1}{12} m (L^2 + B^2) \quad (2.70)$$

Sallanma modu eşdeğer yarıçap:

$$r_0 = \left(\sqrt{B \frac{L^3}{3\pi}} \right)^{1/2} \quad (2.71)$$

$$I_\theta = \frac{1}{12} m (L^2 + 4t^2) \quad (2.72)$$

Makine temelleri değerlendirildiğinde, genellikle tüm makine temelleri kısmen zemine gömülüdür. Temelin gömülmesi, zemin ile temel yüzleri arasındaki teması artırır. Bu nedenle zeminin sunduğu genel rijitlik artar. Aynı zamanda artık hem temel

tabanından hem de yan yüzeylerden daha fazla enerji taşınır. Bu, geometrik sönümde bir artışa neden olur. Temel derinliğinin artması genel olarak dinamik genliklerin azalmasına yol açmaktadır. Bu nedenle hareket denklemi parametreleri gömme derinliği ile ilişkili olarak hesaplanmaktadır (Tablo 2.16 ve Tablo 2.17). Bu bağıntılarda temel tabanı altındaki zemin özellikleri kayma modülü, poisson oranı ve yoğunluk ile tanımlanırken, yan yüzlerle temas halindeki zemin özellikleri kayma modülü, kayma dalgası hızı ve yoğunluk ile tanımlanmıştır. Bağıntılarda yer alan sabitlerin geçerlilik aralığı için boyutsal frekans oranı tanımlanmıştır. Boyutsal frekans oranı Bağıntı (2.73) ile hesaplanmaktadır.

$$a_0 = \frac{\omega r_0}{v_s} \quad (2.73)$$

Tablo 2.16. Temel gömme derinliği ile hareket moduna bağlı olarak hareket denklemi parametreleri (Gazetas, 1983)

Hareket Modu	Düşey	Yatay	Sallanma	Burulma
Rijitlik katsayısı	$Gr_0 \left[\bar{C}_1 + \frac{G_{yan}}{G_{taban}} \frac{h}{r_0} \bar{S}_1 \right]$	$Gr_0 \left[\bar{C}_{x1} + \frac{G_{yan}}{G_{taban}} \frac{h}{r_0} \bar{S}_{x1} \right]$	$Gr_0^3 \left[\bar{C}_{\phi 1} + \frac{G_{yan}}{G_{taban}} \frac{h}{r_0} \left(\bar{S}_{\phi 1} + \frac{h^2}{3r_0^2} \bar{S}_{x1} \right) \right]$	$Gr_0^3 \left[\bar{C}_{\theta 1} + \frac{G_{yan}}{G_{taban}} \frac{h}{r_0} \bar{S}_{\theta 1} \right]$
Sönüm katsayısı	$(r_0)^2 \sqrt{G\rho} \left[\bar{C}_2 + \frac{h}{r_0} \bar{S}_2 \sqrt{\frac{G_{yan}}{G_{taban}} \frac{\rho_{yan}}{\rho_{taban}}} \right]$	$(r_0)^2 \sqrt{G\rho} \left[\bar{C}_{x2} + \frac{h}{r_0} \bar{S}_{x2} \sqrt{\frac{G_{yan}}{G_{taban}} \frac{\rho_{yan}}{\rho_{taban}}} \right]$	$(r_0)^4 \sqrt{G\rho} \left[\bar{C}_{\phi 2} + \frac{G_{yan}}{G_{taban}} \frac{h}{r_0} \left(\bar{S}_{\phi 2} + \frac{h^2}{3r_0^2} \bar{S}_{x1} \right) \right]$	$(r_0)^4 \sqrt{G\rho} \left[\bar{C}_{\theta 2} + \frac{h}{r_0} \bar{S}_{\theta 2} \sqrt{\frac{G_{yan}}{G_{taban}} \frac{\rho_{yan}}{\rho_{taban}}} \right]$
Sönüm oranı	$\frac{C_x}{2m\omega_{nz}}$	$\frac{C_x}{2m\omega_{nx}}$	$\frac{C_\phi}{2m\omega_{n\phi} I_\phi}$	$\frac{C_\phi}{2m\omega_{n\theta} I_\theta}$

Tablo 2.17. Gömme derinliği hareket denklemi parametreleri sabitleri (Gazetas, 1983)

Hareket Modu	Poisson Oranı	Elastik Yarı Uzay		Kenar Tabaka	
		C Sabit Parametresi	Geçerlilik Aralığı	S Sabit Parametresi	Geçerlilik Aralığı
Düşey	0	$\bar{C}_1 = 3,9$ $\bar{C}_2 = 3,5$	Tüm poisson oranı değerleri için $0 \leq a_0 \leq 1,5$	Tüm poisson oranı değerleri için $\bar{S}_1 = 2,7$ $\bar{S}_2 = 6,5$	Tüm poisson oranı değerleri için $0 \leq a_0 \leq 1,5$
	0,25	$\bar{C}_1 = 5,2$ $\bar{C}_2 = 5,0$			
	0,5	$\bar{C}_1 = 7,5$ $\bar{C}_2 = 6,8$			
Düşey	0	$\bar{C}_{x1} = 4,3$ $\bar{C}_{x2} = 2,7$	$0 \leq a_0 \leq 2,0$	$\bar{S}_{x1} = 3,6$ $\bar{S}_{x2} = 8,2$	$0 \leq a_0 \leq 1,5$
	0,25			$\bar{S}_{x1} = 4,0$ $\bar{S}_{x2} = 9,1$	$0 \leq a_0 \leq 2,0$ $0 \leq a_0 \leq 1,5$
	0,4		$0 \leq a_0 \leq 2,0$	$\bar{S}_{x1} = 4,1$ $\bar{S}_{x2} = 10,6$	$0 \leq a_0 \leq 2,0$ $0 \leq a_0 \leq 1,5$
	0,5	$\bar{C}_{x1} = 5,1$ $\bar{C}_{x2} = 0,43$			
	0	$\bar{C}_{\phi 1} = 2,5$ $\bar{C}_{\phi 2} = 0,43$	$0 \leq a_0 \leq 1,0$	$\bar{S}_{\phi 1} = 2,5$ $\bar{S}_{\phi 2} = 1,8$	$0 \leq a_0 \leq 1,5$
Düşey	Herhangi bir değer	$\bar{C}_{\theta 1} = 4,3$	$0 \leq a_0 \leq 2,0$	$\bar{S}_{\theta 1} = 12,4$ $\bar{S}_{\theta 2} = 10,2$	$0 \leq a_0 \leq 2,0$ $0,2 \leq a_0 \leq 2,0$
		$\bar{C}_{\theta 2} = 0,7$		$\bar{S}_{\theta 1} = 2,0$ $\bar{S}_{\theta 2} = 5,4$	$0 \leq a_0 \leq 2,0$ $0,2 \leq a_0 \leq 2,0$

2.6. Basit Titreşim Sistemlerinin İncelenmesi

Mühendislik sistemlerinin titreşim analizlerinin yapılabilmesi için sistem ile uyumlu bir matematik modele ihtiyaç duyulur. Bunun için sistemin serbest cisim diyagramının çizilmesi ve serbestlik derecesi ile etkiyen kuvvetlerin belirlenmesi gerekmektedir. Bu kısımda, titreşim sistemleri ve ana elemanlarının tanımlanması ve serbest cisim diyagramlarının çizilmesi ele alınacaktır. Titreşim problemleri üç ana başlık altında toplanabilir. Bunlar aşağıda açıklanmıştır.

Sönümsüz ve sönümlü titreşimler: Eğer sistemde sürtünme vb. dirençler sebebi ile enerji kaybı ve buna bağlı olarak sönümüne sebep olacak bir etki yok ise titreşim sistemi sönümsüz olarak adlandırılır. Eğer sistemde sönüm mevcut ise sistem sönümlü olarak adlandırılır.

Serbest ve zorlanmış titreşimler: Eğer sistem mesnet hareketi veya dış etkiler olmadan sadece başlangıç koşulları neticesinde titreşiyor ise ($t > 0$ için sisteme etki eden bir dış kuvvet yok) sistem titreşimlerine serbest titreşim adı verilir. Bunun aksine sistem dış zorlama etkisi ile titreşiyor ise oluşan titreşimlere zorlanmış titreşim adı verilir. Dış etkilerin bir süre sonra sistemden kaldırılırsa, sistemde yine serbest titreşim meydana gelir.

Lineer ve lineer olmayan (nonlinear) titreşimler: Eğer titreşim yapan sistemin tüm bileşenleri doğrusal (lineer) davranışa sahip ise oluşan titreşimlere lineer titreşim adı verilir. Eğer sistem elemanlarından herhangi biri doğrusal olmayan davranışa sahip ise oluşan titreşimlere lineer olmayan (nonlinear) titreşim adı verilir. Bu tip sistemlerin hareketini ifade eden diferansiyel denklemler lineer olmayan formdadır. Birçok titreşim sistemi, büyük titreşim genlikleri için lineer olmayan davranışa sahiptir.

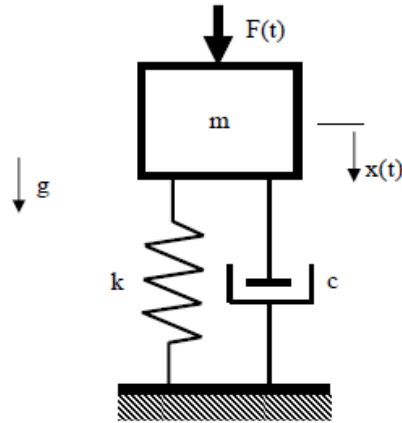
Bu titreşim sistemlerini matematiksel olarak ifade etmek için kütle-yay-sönüm elemanları kullanılmaktadır. Bunlar aşağıda açıklanmıştır.

Yay: Sistemdeki kütleleri birbirine bağlamaya yarayan ve kütlelerin bağlı hareketini sağlayan elemanlardır. Yaylar lineer ya da nonlinear karakteristiğe sahip olabilirler. Lineer yaylar Hooke Yasasına uygundur ve yayda oluşan elastik kuvvet yaydaki şekil değişimi ile orantılıdır.

Kütle: Sistemin dinamik özellikleri kütlenin büyüklüğüne bağlıdır. Kütlenin sisteme uyguladığı kuvvet, sistemin ivmesi ile orantılıdır.

Sönüm: Enerji kaybını sağlayan elemanlardır. Sönüm, sistemin içinde bulunduğu ortamın ve sistemde bulunan mesnet ve/veya mafsallardaki sürtünmenin neticesinde oluşmaktadır. Sönümün büyüklüğü çeşitli etkenlere bağlıdır ve bu etkenlerden en önemlisi sistemin içerdiği izafi hızlardır. Sönüm kuvvetinin doğrudan izafi hızla orantılı olduğu duruma *viskoz sönüm* adı verilir.

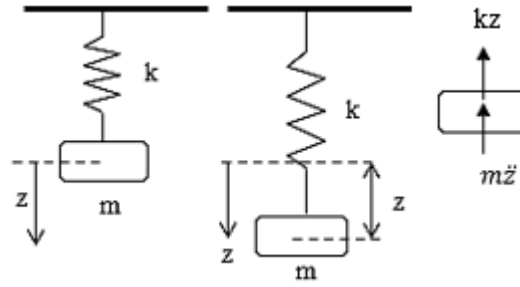
Mekanik titreşim problemleri temel olarak Şekil 2.39’da görüldüğü gibi kütle-yay-sönüm elemanından oluşmaktadır. Bu sistemler Newton’un 2. Yasası, Dinamik Denge Yöntemi (D’Alembert Prensipli), enerji yöntemi ve Lagrange yöntemi gibi farklı yöntemler ile çözülmektedir.



Şekil 2.39. Basit kütle-yay-sönüm elemanı sistemi (Özkan, 2017)

2.6.1. Tek serbestlik dereceli kütle-yay sisteminin serbest titreşimi

Şekil 2.40’da tek serbestlik dereceli bir kütle-yay sisteminin serbest cisim diyagramı yer almaktadır. Sistemde herhangi bir dış zorlama yer almamaktadır. Kütle statik denge konumunda iken, "z" kadar çekilip bırakıldığında kütle titreşim yapmaya başlar. Kütlenin bir uçtan diğerine gidip gelirken yaptığı en büyük deplasman *çift genlik* olarak ifade edilir. Sistemde bu hareketi sönmüleyecek bir eleman yer almadığından yay titreşimi sonsuza kadar devam eder. Bu sisteme etkiyen kuvvetler ve hareket denklemi Bağıntı (2.74) ve (2.75) yer almaktadır.



Şekil 2.40. Kütle-yay sisteminin serbest cisim diyagramı (Özkan, 2017)

$$-kz = m\ddot{z} \quad (2.74)$$

$$m\ddot{z} + kz = 0 \quad (2.75)$$

Bağıntı (2.75) kütleye bölüldüğünde, Bağıntı (2.76)’de yer alan hareket denklemi elde edilir. Bu bağıntılarda, m kütle, k yay rijitlik katsayısı, z deplasman ve $\ddot{z}$ ivmedir.

$$\ddot{z} + \frac{k}{m}z = 0 \quad (2.76)$$

Sistemin hareket denklemi ikinci dereceden adi diferansiyel denklemdir. Bu denklemin çözümü için Bağıntı (2.77)’de yer alan kabuller yapılır. Böylece hareket denklemi Bağıntı (2.78) olarak elde edilir.

$$\begin{aligned} z(t) &= a * e^{st} \\ \dot{z}(t) &= a * s * e^{st} \end{aligned} \quad (2.77)$$

$$\ddot{z}(t) = a * s^2 * e^{st}$$

$$[ms^2 + k]a * e^{st} = 0 \quad (2.78)$$

Bağıntı (2.78)'in çözümü için parantez içindeki kısım 0 (sıfır)'a eşit olmalıdır. Bu denklemin kökleri olan s değerleri sistemin özdeğerleridir ve Bağıntı (2.79)'da görüldüğü gibi iki değer olarak belirlenir. Böylece hareket denklemi a_1 ve a_2 kompleks sabitleri cinsinden Bağıntı (2.81) olarak elde edilir.

$$ms^2 + k = 0 \Rightarrow s_{1,2} = \pm \sqrt{-\frac{k}{m}} = \pm \sqrt{\frac{k}{m}} i = \pm i\omega_n \quad (2.79)$$

$$z(t) = a_1 * e^{i\omega_n t} \quad veya \quad z(t) = a_2 * e^{-i\omega_n t} \quad (2.80)$$

$$z(t) = a_1 * e^{i\omega_n t} + a_2 * e^{-i\omega_n t} \quad (2.81)$$

Bağıntı (2.82) ve (2.83)'te yer alan Euler ilişkileri kullanılarak elde edilen ve Bağıntı (2.84)'te yer alan hareket denkleminin çözümü Bağıntı (2.85) olarak elde edilir.

$$e^{i\omega_n t} = \cos \omega_n t + i \sin \omega_n t \quad (2.82)$$

$$e^{-i\omega_n t} = \cos \omega_n t - i \sin \omega_n t \quad (2.83)$$

$$\begin{aligned} z(t) &= a_1 * (\cos \omega_n t + i \sin \omega_n t) + a_2 * (\cos \omega_n t - i \sin \omega_n t) \\ &= \cos \omega_n t (a_1 + a_2) + i \sin \omega_n t (a_1 - a_2) \end{aligned} \quad (2.84)$$

$a_1 + a_2 = A_1$ ve $(a_1 - a_2)i = A_2$ olarak ifade edildiğinde hareket denklemi Bağıntı (2.85) olarak elde edilir.

$$z(t) = A_1 \cos \omega_n t + A_2 \sin \omega_n t \quad (2.85)$$

A_1 ve A_2 katsayıları başlangıç koşulları göz önünde bulundurularak elde edilen gerçek sabitlerdir. Ayrıca hareket denklemi, Bağıntı (2.86)-(2.88) kullanılarak, Bağıntı

(2.89)'da olduğu gibi ifade edilebilir. Burada φ , faz açısıdır ve Bağıntı (2.90) ile hesaplanır.

$$A = \sqrt{a_1^2 + a_2^2} \quad (2.86)$$

$$a_1 = \frac{A_1 - A_2 i}{2} \quad (2.87)$$

$$a_2 = \frac{A_1 + A_2 i}{2} \quad (2.88)$$

$$z(t) = A \sin(\omega_n t + \varphi) \quad (2.89)$$

$$\varphi = \tan^{-1} \frac{a_1}{a_2} \quad (2.90)$$

Bu bağıntılarda yer alan ω_n , sistemin *dairesel doğal frekansı* olarak tanımlanır ve Bağıntı (2.91) ile ifade edilmektedir. Birimi rad/sn'dir. t ise zamandır. Titreşim hareketinin doğal periyodu (tekrarlanma zamanı) Bağıntı (2.92) ve doğal frekansı (belirli bir zamandaki tekrarlanma sayısı) ise Bağıntı (2.93) ile hesaplanır.

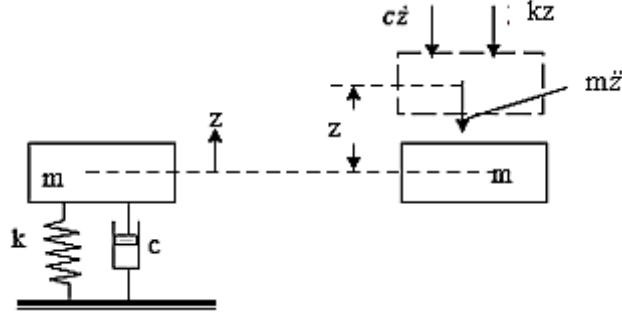
$$\omega_n = \sqrt{\frac{k}{m}} \quad (2.91)$$

$$T = \frac{2\pi}{\omega_n} = 2\pi \sqrt{\frac{m}{k}} \quad (2.92)$$

$$f = \frac{1}{T} = \frac{\omega_n}{2\pi} = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{k}{m}} \quad (2.93)$$

2.6.2. Tek serbestlik dereceli kütle-yay-sönüm sisteminin serbest titreşimi

Tek serbestlik dereceli kütle-yay sistemine Şekil 2.41'deki gibi bir sönüm elemanı eklendiğinde, kütlenin hareketi sönüm elemanının özelliklerine bağlı olarak bir süre sonra sonlanacaktır. Sönüm elemanı, sistemde titreşen kütleyle kütlenin hareketin tersi yönde bir kuvvet uygulamaktadır.



Şekil 2.41 . Kütle-yay-sönüm elemanından oluşan titreşim sisteminin serbest cisim diyagramı (Özkan, 2017)

Şekil 2.41’de yer alan serbest cisim diyagramı ele alındığında sistemin hareket denklemi Bağntı (2.94) ile ifade edilir.

$$m\ddot{z} + c\dot{z} + kz = 0 \quad (2.94)$$

Bu hareket denkleminin çözümü için Bağntı (2.77)’de yer alan kabuller kullanılırsa, hareket denklemi Bağntı (2.95) olarak elde edilir. Bu denklemin çözümü için parantez içindeki kısmın 0 (sıfır) olması gerekmektedir. Böylece Bağntı (2.96)’da yer alan sistemin özdeğerleri elde edilir.

$$[ms^2 + cs + k]a * e^{st} = 0 \quad (2.95)$$

$$ms^2 + cs + k = 0 \Rightarrow s_{1,2} = -\frac{c}{2m} \pm \frac{1}{2m}\sqrt{c^2 - 4km} \quad (2.96)$$

Bu denklemin kökleri incelendiğinde 3 durum söz konusudur.

- $c^2 - 4km > 0$ ise kökler, birbirinden farklı gerçak sayılardır.
- $c^2 - 4km < 0$ ise kökler, negatif reel kısmı kompleks sayılardır.
- $c^2 - 4km = 0$ ise kökler, aynı ve negatif gerçak sayılardır. Bu durumda elde edilen sönüm katsayısı *kritik sönüm* olarak ifade edilir. Kritik sönüm Bağntı (2.97) ile hesaplanır.

$$c_{kritic} = 2\sqrt{km} = 2mw_n \quad (2.97)$$

Sönüm oranı ise, sistemin mevcut sönüm katsayısının kritik sönüm katsayısına oranıdır ve Bağntı (2.98) ile hesaplanır.

$$D = \frac{c}{c_{kritik}} = \frac{c}{2mw_n} = \frac{c}{2\sqrt{km}} \quad (2.98)$$

Böylece, Bağntı (2.96) sönüm oranı cinsinden tekrar yazıldığında, sistemin özdeğerleri olan kökler, Bağntı (2.99) olarak belirlenir.

$$s_{1,2} = -Dw_n \pm w_n\sqrt{D^2 - 1} \quad (2.99)$$

2.6.2.1. Kritik sönüm üstü durum: $D>1$

Kritik sönüm üstü durumda, Bağntı (2.99)'da yer alan sönüm oranı değeri kritik sönüm değerinden daha büyüktür. Bu durumda sistemin iki farklı reel kökü vardır ve bu kökler Bağntı (2.100) ve (2.101)'de yer almaktadır. Böylece sistemin hareket denklemi Bağntı (2.102) olarak elde edilmektedir. Başlangıç koşulları göz önünde bulundurularak a_1 ve a_2 katsayıları Bağntı (2.103) ve Bağntı (2.104) olarak elde edilir.

$$s_1 = -Dw_n + w_n\sqrt{D^2 - 1} \quad (2.100)$$

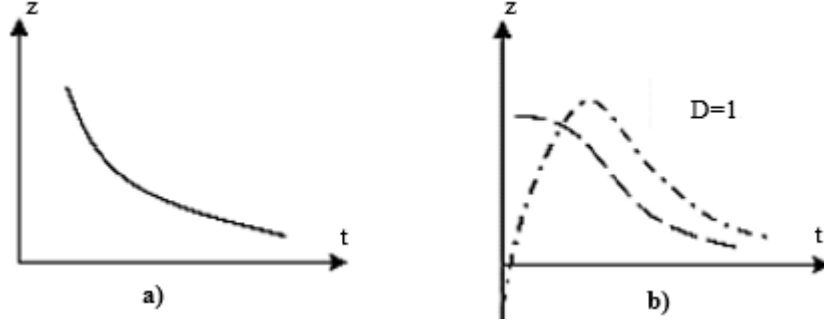
$$s_2 = -Dw_n - w_n\sqrt{D^2 - 1} \quad (2.101)$$

$$z(t) = e^{-Dw_nt}(a_1 e^{-w_nt(\sqrt{D^2-1})} + a_2 e^{w_nt(\sqrt{D^2-1})}) \quad (2.102)$$

$$a_1 = \frac{-\dot{z}_0 + (-D + \sqrt{D^2 - 1})w_n z_0}{2w_n\sqrt{D^2 - 1}} \quad (2.103)$$

$$a_2 = \frac{-\dot{z}_0 + (D + \sqrt{D^2 - 1})w_n z_0}{2w_n\sqrt{D^2 - 1}} \quad (2.104)$$

Zaman değeri büyüdükçe Bağntı (2.102)'de parantez içerisinde yer alan değer $e^{(-\omega_n t)}$ değeri ile çarpıldığında sonuç sıfıra yaklaşacaktır (Şekil 2.42 (a)). Kritik sönüm üstü sistemler, denge konumu etrafında salınım yapmaksızın başlangıç konumlarına geri dönerler.



Şekil 2.42. a) Kritik üstü sönümlü ve b) Kritik sönümlü hareketin şekli (Özkan, 2017)

2.6.2.2. Kritik Sönümlü Durum: $D = D_{kritik} = 1$

Sönüm oranının 1 olması durumunda, sönüm oranına *kritik sönüm oranı* denir. Bu durumda Bağntı (2.99)'da yer alan kökler, Bağntı (2.105)'te görüldüğü gibi birbirine eşittir. Bu durum değerlendirildiğinde sistemin hareket denklemi Bağntı (2.106) olarak elde edilir. Başlangıç koşulları göz önünde bulundurulduğunda a_1 ve a_2 katsayıları Bağntı (2.107) ve Bağntı (2.108) olarak belirlenir. Bu hareket, Şekil 2.42 (b)'de yer alan eğriler ile temsil edilebilir.

$$s_1 = s_2 = w_n \quad (2.105)$$

$$z(t) = e^{-w_n t}(a_1 + a_2 t) \quad (2.106)$$

$$a_1 = z_0 \quad (2.107)$$

$$a_2 = \dot{z}_0 + w_n z_0 \quad (2.108)$$

2.6.2.3. Kritik sönüm altı durum: $D < 1$

Sönüm değerinin 1'den küçük olması durumunda sönüm oranı değeri kritik sönüm değerinden küçük olacaktır. Bu durumda Bağntı (2.99)'da yer alan denklemin kökleri kompleks çift olacaktır. Bu kökler, Bağntı (2.109) ve Bağntı (2.110)'da yer almaktadır ve hareket denklemi Bağntı (2.111) olarak elde edilir. Bu hareket denklemi, Bağntı (2.112) yer alan sistemin *sönümlü doğal frekansı* cinsinden yazıldığında, sistemin hareket denklemi Bağntı (2.113) olarak elde edilir.

$$s_1 = -Dw_n + w_n i \sqrt{1 - D^2} \quad (2.109)$$

$$s_2 = -Dw_n - w_n i \sqrt{1 - D^2} \quad (2.110)$$

$$z(t) = e^{(-\omega_n Dt)} (a_1 e^{i\omega_n t(\sqrt{1-D^2})} + a_2 e^{i\omega_n t(-\sqrt{1-D^2})}) \quad (2.111)$$

$$\omega_d = \omega_n \sqrt{1 - D^2} \quad (2.112)$$

$$\begin{aligned} z(t) &= e^{(-\omega_n Dt)} (a_1 e^{i\omega_d t} + a_2 e^{-i\omega_d t}) \\ &= e^{(-\omega_n Dt)} [(a_1 + a_2) \cos \omega_d t + i(a_1 - a_2) \sin \omega_d t] \end{aligned} \quad (2.113)$$

$a_1 + a_2 = A_1$ ve $(a_1 - a_2)i = A_2$ olarak ifade edildiğinde hareket denklemi Bağıntı (2.114) olarak elde edilir. Bağıntı (2.115) ve Bağıntı (2.116)'da yer alan tanımlamaların kullanılması durumunda hareket denkleminin son hali Bağıntı (2.117)'deki gibi olur.

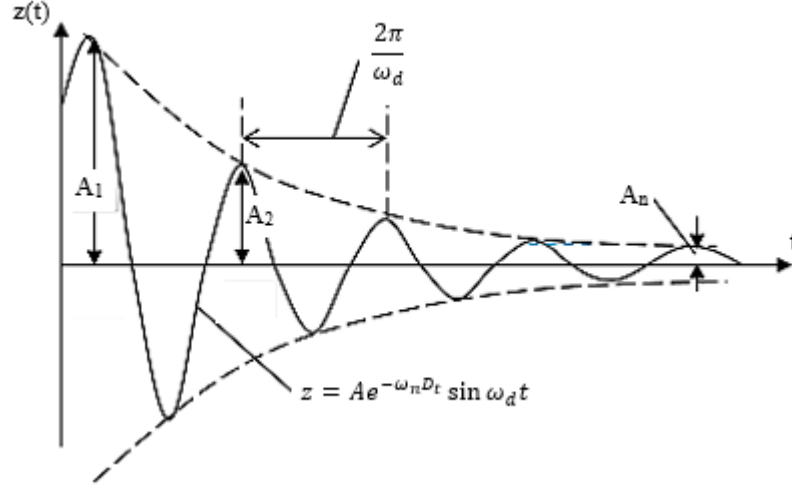
$$z(t) = e^{-Dw_n t} (A_1 \cos \omega_d t + A_2 \sin \omega_d t) \quad (2.114)$$

$$A = \sqrt{A_1^2 + A_2^2} \quad (2.115)$$

$$\varphi = \tan^{-1} \frac{A_1}{A_2}, A_1 = A \sin \varphi, A_2 = A \cos \varphi \quad (2.116)$$

$$z(t) = A * e^{-\omega_n Dt} \sin(\omega_d t \pm \varphi) \quad (2.117)$$

Şekil 2.43'te kritik sönüm altı harekete ait deplasman-zaman ilişkisi yer almaktadır. Bu şekilde, hareketin genliğinin zaman içinde azaldığı görülmektedir. Tek serbestlik dereceli sönümlü bir sisteminin, serbest titreşimi esnasında sönüm oranı, Şekil 2.43'teki gibi elde edilen deplasman-zaman grafiğinde arka arkaya gelen iki deplasman genliği ölçülerek belirlenmektedir.



Şekil 2.43. Kritik altı sönüm halinde hareketin şekli (Özkan, 2017)

Bunun için Bağıntı (2.117)’de yer alan hareket denkleminde herhangi bir t_n ve t_{n+1} zamanlarındaki deplasman genlikleri belirlenmelidir. Ardışık zaman dilimleri arasındaki fark Bağıntı (2.118) ile belirlemektedir. Bu bağıntıda yer alan $2\pi/\omega_d$, hareketin *sönümlü doğal periyodu*dur. Ardışık genlikler oranı Bağıntı (2.119) ile ifade edilir. Bağıntı (2.120)’de yer alan ilişki değerlendirildiğinde, *logaritmik azalım* Bağıntı (2.121) ile hesaplanmaktadır.

$$t_{n+1} = t_n + \frac{2\pi}{\omega_d} \quad (2.118)$$

$$\frac{A_n}{A_{n+1}} = \frac{A e^{(-\omega_n D t_n)} \sin(\omega_d t_n + \varphi)}{A e^{(-\omega_n D t_{n+1})} \sin(\omega_d t_{n+1} + \varphi)} \quad (2.119)$$

$$\sin(\omega_d t_n + \varphi) = \sin(\omega_d t_{n+1} + \varphi) \quad (2.120)$$

$$\delta = \ln \frac{A_n}{A_{n+1}} = \frac{2\pi D}{\sqrt{1 - D^2}} \quad (2.121)$$

Sönüm oranı ise Bağıntı (2.122) ile hesaplanmaktadır. Bu bağıntı sönüm oranının deneysel olarak elde edilmesi aşamasında kullanılmaktadır. sönüm oranı malzeme sabitleri kullanılarak elde edilmeyip, sistemin yer değiştirmelerine bağlı olarak elde edilir.

$$D = \frac{\delta}{\sqrt{\delta^2 + 4\pi^2}} = \frac{1}{\sqrt{1 + \left(\frac{2\pi m}{\ln \frac{A_n}{A_{n+m}}} \right)^2}} \quad (2.122)$$

2.6.3. Tek serbestlik dereceli kütle-yay sisteminin zorlanmış titreşimi

Tek serbestlik dereceli bir kütle-yay sistemine dışardan bir Q kuvveti etkir ise, bu durumda sistemin hareket denklemi Bağntı (2.123) ile ifade edilir. Eğer uygulanan dış kuvvet, harmonik bir kuvvet ise, bu kuvvet Bağntı (2.124) ile ifade edilebilir ve hareket denkleminin her iki tarafı kütleyle bölündüğünde Bağntı (2.125) elde edilir.

$$m\ddot{z} + kz - Q = 0 \quad (2.123)$$

$$Q = Q_0 \sin wt \quad (2.124)$$

$$\ddot{z} + \omega_n^2 z = \frac{Q_0}{m} \sin wt \quad (2.125)$$

Sistemin hareket denkleminin çözümü, Bağntı (2.126)'daki homojen ve özel çözüm kısımlarından oluşmaktadır. Hareket denkleminin homojen çözüm kısmı, serbest titreşimde elde edilen hareket denklemi ile aynıdır. Ancak özel çözümün elde edilebilmesi için hareket denklemini sağlayan bir fonksiyon ele alınmalıdır. Bağntı (2.127)'de yer alan kabuller kullanılarak, özel çözüme ait hareket denklemi Bağntı (2.128) olarak elde edilir.

$$z(t) = z_h(t) + z_ö(t) \quad (2.126)$$

$$\begin{aligned} z_ö(t) &= Z \sin wt \\ \dot{z}_ö(t) &= Zw \cos wt \\ \ddot{z}_ö(t) &= -Zw^2 \sin wt \end{aligned} \quad (2.127)$$

$$-Zw^2 \sin wt + Z\omega_n^2 \sin wt = \frac{Q_0}{m} \sin wt \quad (2.128)$$

Kuvvetin frekansının, sistemin doğal frekansına oranı, *frekans oranı* olarak ifade edilir ve Bağntı (2.129) ile hesaplanmaktadır. Gerekli sadeleştirmeler yapıldığında, frekans oranına bağlı olarak, özel çözümün hareket denklemi Bağntı (2.133) ile ifade edilir.

$$r = \frac{w}{w_n} \quad (2.129)$$

$$-Zw^2 + Zw_n^2 = \frac{Q_0}{m} \quad (2.130)$$

$$Z \frac{[-w^2 + w_n^2]}{w_n^2} = \frac{Q_0}{m} \frac{m}{k} \quad (2.131)$$

$$Z(1 - r^2) = \frac{Q_0}{m} \frac{m}{k} \quad (2.132)$$

$$Z = \frac{\frac{Q_0}{k}}{(1 - r^2)} \quad (2.133)$$

Homojen ve özel çözümlere ait hareket denklemlerinin elde edilmesi neticesinde, tek serbestlik dereceli sistemin hareket denklemi Bağntı (2.134) olarak elde edilir.

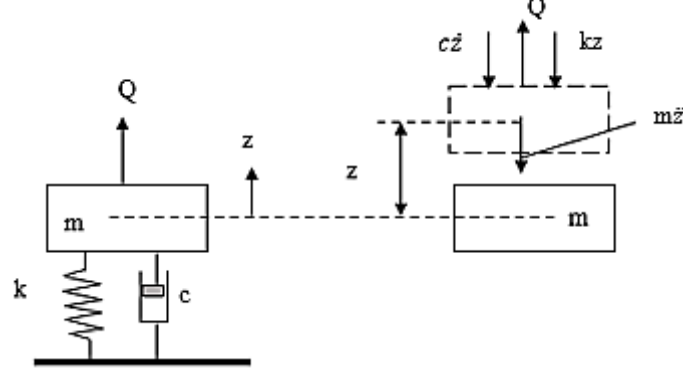
$$z(t) = A_1 \cos \omega_n t + A_2 \sin \omega_n t + \frac{\frac{Q_0}{k}}{(1-r^2)} \sin wt \quad (2.134)$$

2.6.4. Tek serbestlik dereceli kütle-yay-sönüm sisteminin zorlanmış titreşimi

Şekil 2.44'te yer alan tek serbestlik dereceli sistemde kütle üzerine etkiyen dış kuvvet, Bağntı (2.124)'deki harmonik bir kuvvet ile ifade edildiğinde, hareket denklemi Bağntı (2.135) olarak elde edilir. Hareket denkleminin çözümü, homojen ve özel çözüm kısımlarından oluşmaktadır. Homojen çözüme ait başlangıç koşullarına bağlı iken özel çözüm dış kuvvete bağlı olarak oluşur. Başlangıç koşullarına bağlı olan çözüm sönümlü durumda zamanla sıfırlanır. Bu nedenle dış kuvvete bağlı olarak elde edilen özel çözüme *düzgün rejim cevabı* denir. Hareket denklemini bulmak için denge denklemini sağlayan Bağntı (2.136)'da yer alan fonksiyonlar kullanılmalıdır.

$$m\ddot{z} + c\dot{z} + kz = Q_0 \sin \omega t \quad (2.135)$$

$$\begin{aligned}
z_0(t) &= Z \sin(\omega t - \varphi) \\
\dot{z}_0(t) &= Z\omega \cos(\omega t - \varphi) \\
\ddot{z}_0(t) &= -Z\omega^2 \sin(\omega t - \varphi)
\end{aligned}
\tag{2.136}$$



Şekil 2.44. Zorlanmış titreşime maruz kalan sönümlü titreşim sistemi (Özkan, 2017)

Bağıntı (2.136)'da yer alan kabuller hareket denkleminde yerine yazıldığında hareket denklemini Bağıntı (2.137) olarak elde edilir.

$$\begin{aligned}
-m\omega^2 Z \sin(\omega t - \varphi) \\
+ c\omega Z \cos(\omega t - \varphi) + kZ \sin(\omega t - \varphi) - Q_0 \sin \omega t = 0
\end{aligned}
\tag{2.137}$$

Bağıntı (2.138) ve Bağıntı (2.139) trigonometrik açılımları kullanıldığında hareket denklemini, Bağıntı (2.140) olarak elde edilir.

$$\sin(\omega t - \varphi) = \sin(\omega t) \cos \varphi - \sin \varphi \cos(\omega t)
\tag{2.138}$$

$$\cos(\omega t - \varphi) = \cos(\omega t) \cos \varphi + \sin(\omega t) \sin \varphi
\tag{2.139}$$

$$\begin{aligned}
Z \sin(\omega t) [-m\omega^2 \cos \varphi + c\omega \sin \varphi + k \cos \varphi] \\
+ Z \cos(\omega t) [m\omega^2 \sin \varphi + c\omega \cos \varphi - k \sin \varphi] \\
= Q_0 \sin \omega t
\end{aligned}
\tag{2.140}$$

Bu denklemin çözümü için Bağıntı (2.141) ve Bağıntı (2.142) koşullarının sağlanması gerekmektedir.

$$Z \sin(\omega t) [-m\omega^2 \cos \varphi + c\omega \sin \varphi + k \cos \varphi] = Q_0 \sin \omega t
\tag{2.141}$$

$$Z \cos(\omega t) [m\omega^2 \sin \varphi + c\omega \cos \varphi - k \sin \varphi] = 0
\tag{2.142}$$

$$D = \frac{c}{2m\omega_n} \quad (2.143)$$

$$Z[-m\omega^2 \cos \varphi + c\omega \sin \varphi + k \cos \varphi] = Q_0 \quad (2.144)$$

$$Z[-m\omega^2 \cos \varphi + 2Dm\omega_n\omega \sin \varphi + \omega_n^2 m \cos \varphi] = Q_0 \quad (2.145)$$

$$\begin{aligned} Z[-\omega^2 \cos \varphi + 2D\omega_n\omega \sin \varphi + \omega_n^2 \cos \varphi] \\ = Z[(-\omega^2 + \omega_n^2)\cos \varphi + 2D\omega_n\omega \sin \varphi] \\ = Z\left[\frac{(-\omega^2 + \omega_n^2)}{\omega_n^2} \cos \varphi + 2D \frac{\omega_n\omega}{\omega_n^2} \sin \varphi\right] = \frac{Q_0}{k} \end{aligned} \quad (2.146)$$

$$\begin{aligned} Z[m\omega^2 \sin \varphi + 2Dm\omega_n\omega \cos \varphi - \omega_n^2 m \sin \varphi] \\ = Z[\omega^2 \sin \varphi + 2D\omega_n\omega \cos \varphi - \omega_n^2 \sin \varphi] \\ = Z[(\omega^2 - \omega_n^2) \sin \varphi + 2D\omega_n\omega \cos \varphi] \\ = \left[\frac{(\omega^2 - \omega_n^2)}{\omega_n^2} \sin \varphi + 2D \frac{\omega_n\omega}{\omega_n^2} \cos \varphi\right] = 0 \end{aligned} \quad (2.147)$$

Böylece faz açısını elde etmemizi sağlayan, $\tan \varphi$ değeri Bağntı (2.148) olarak elde edilir.

$$\left[\frac{(\omega_n^2 - \omega^2)}{\omega_n^2} \sin \varphi = 2D \frac{\omega_n\omega}{\omega_n^2} \cos \varphi\right] \rightarrow \tan \varphi = \frac{2D\omega/\omega_n}{(1 - \frac{\omega^2}{\omega_n^2})} = \frac{2Dr}{1 - r^2} \quad (2.148)$$

$$\begin{aligned} \sin \varphi &= \frac{2Dr}{\sqrt{(2Dr)^2 + (1 - r^2)^2}} \\ \cos \varphi &= \frac{1 - r^2}{\sqrt{(2Dr)^2 + (1 - r^2)^2}} \end{aligned} \quad (2.149)$$

$$\begin{aligned} Z\left[\frac{(-\omega^2 + \omega_n^2)}{\omega_n^2} \cos \varphi + 2D \frac{\omega_n\omega}{\omega_n^2} \sin \varphi\right] \\ = Z\left[(1 - r^2) \frac{1 - r^2}{\sqrt{(2Dr)^2 + (1 - r^2)^2}} \right. \\ \left. + 2Dr \frac{2Dr}{\sqrt{(2Dr)^2 + (1 - r^2)^2}}\right] = \frac{Q_0}{k} \end{aligned} \quad (2.150)$$

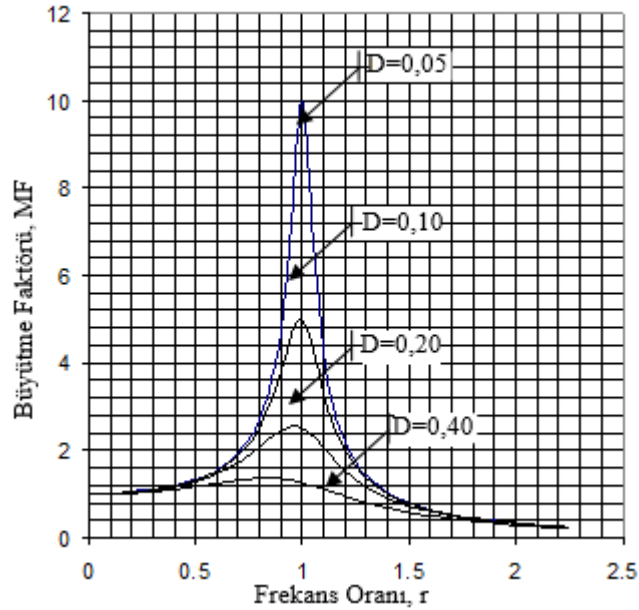
$$\frac{Z}{\frac{Q_0}{k}} = \frac{\sqrt{(2Dr)^2 + (1 - r^2)^2}}{2Dr^2 + (1 - r^2)^2} \quad (2.151)$$

Sonuç olarak hareket denkleminin genel çözümü Bağntı (2.152) olarak elde edilir.

$$z(t) = e^{-D\omega_n t} (A_1 \cos \omega_d t + A_2 \sin \omega_d t) + \frac{Q_0/k}{\sqrt{(1-r^2)^2 + (2Dr)^2}} \sin(\omega t - \varphi) \quad (2.152)$$

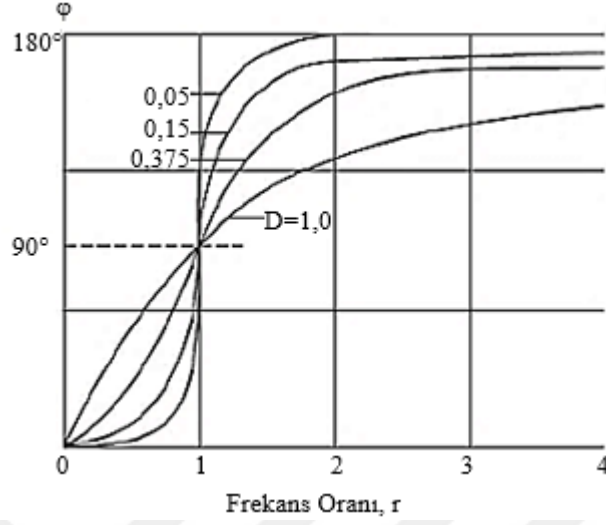
Bağıntı (2.152)'deki ilk kısım homojen çözümünden elde edilen sistemin sönümlü frekansı ve başlangıç koşullarından bulunacak A_1 ve A_2 sabitlerini içerir ve zamanla sönümlenip küçülür. Bu nedenle, ilk terim *süreksiz hareketi (geçici titreşimi)* ifade eder. İkinci terim ise kuvvet frekansını içerir ve uygulanan kuvvetin genliği küçülmedikçe devam eder. Bu nedenle, ikinci terim *sürekli hareketi (kalıcı titreşimi)* veya *kararlı hareketi* ifade eder. Kararlı hareketi temsil eden çözümün genliğini, Q_0/k terimine bölerek *dinamik büyütme faktörü, MF*, elde edilir. Dinamik büyütme faktörü, kütlenin yaptığı hareket genliğinin bir referans değeri olan statik deplasmana (Q_0/k değerine) bölünmesi ile bulunan boyutsuz bir sayıdır ve Bağıntı (2.153) ile hesaplanır. Dinamik büyütme faktörünün sönüm oranı ve frekans oranı bağlı olarak değişim eğrileri Şekil 2.45'te verilmiştir. Bu şekilde görüldüğü gibi sönüm oranı küçüldükçe frekans oranının 1 olması durumunda yer değiştirmeler büyük değerler almaktadır.

$$MF = \frac{Z}{Q_0/k} = \frac{1}{\sqrt{(1-r^2)^2 + (2Dr)^2}} \quad (2.153)$$



Şekil 2.45. Büyütme faktörü değerleri (Özkan, 2017)

Sönüm oranına bağlı olarak faz açısı ile frekans oranı arasındaki ilişki Şekil 2.46’da verilmiştir.



Şekil 2.46. Frekans oranı ve faz açısı arasındaki ilişki (Özkan, 2017)

Rezonans durumu incelenecek olursa, bu durumda genlik en büyük olacaktır ve Bağıntı (2.154)’teki gibi genlik eğrisinin türevi sıfıra eşit olacaktır.

$$\frac{d(\frac{Z}{Q_0/k})}{dr} = 0 \Rightarrow r^2 + 2D^2 - 1 = 0 \Rightarrow r = \frac{\omega}{\omega_n} = \sqrt{1 - 2D^2} \quad (2.154)$$

Böylece rezonans frekansı, Bağıntı (2.155) olarak ifade edilebilir. Rezonans durumundaki genlik ise Bağıntı (2.156) olarak elde edilir.

$$w_r = w_n \sqrt{1 - 2D^2} \quad (2.155)$$

$$Z = \frac{Q_0}{k} \quad (2.156)$$

2.6.5. Tek serbestlik dereceli kütle-yay-sönüm sisteminin darbe yüküne bağlı zorlanmış titreşimi

Darbe yükü sisteme çok kısa sürede etkiyen yüklerdir. Bu nedenle, sistemde yer değiştirmeler ve hızlar ihmal edilebilecek derecede küçük olacaktır. Buna bağlı olarak

hareket denklemi yazılırken yay ve sönüm parametreleri ihmal edilebilir. Böylece hareket denklemi Bağıntı (2.157) olarak elde edilir. Darbe şiddeti, J , ise kuvvet-zaman grafiğinin alanından Bağıntı (2.158) ile hesaplanmaktadır.

$$m\ddot{z} = Q(t) \Rightarrow Q(t) = m \frac{d^2 z}{dt^2} \quad (2.157)$$

$$J = \int_0^{t_1} Q(t)dt = m[\dot{z}(t_1) - \dot{z}(0)] \quad (2.158)$$

Hareketin durağan durumdan başladığı kabul edilirse, bu durumda darbeden hemen sonra yer değiştirme için $z(0)=0$ ve hız için $\dot{z}(t_1) = J/m$ olarak alınabilir. Yükün etkime süresi çok kısa olduğundan $t_1 \cong 0$ olarak alınabilir. Bu durumda, yükün uygulama süresi içinde yer değiştirmedeki değişimler önemsiz olacaktır. Bunun neticesinde ise, hareket sadece başlangıç koşullarına bağlı olan bir sönümlü serbest titreşime dönüşecektir. Darbe şiddetine bağlı olarak hareket denklemi, Bağıntı (2.159) ile hesaplanır. Darbe yükünden kaynaklı oluşan yer değiştirmenin maksimum değeri ise Bağıntı (2.160) ile elde edilir.

$$z(t) = \frac{J}{m\omega_D} e^{-D\omega t} \sin \omega_D t \quad (2.159)$$

$$z(t)_{maks} = \frac{J}{m\omega} e^{\left[-\frac{D}{\sqrt{1-D^2}} \arctan \frac{\sqrt{1-D^2}}{D}\right]} \quad (2.160)$$

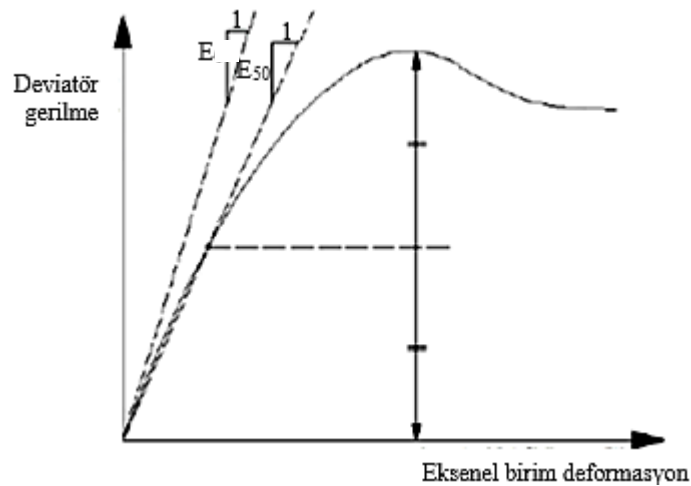
2.7. Sonlu Elemanlar Yöntemi ile Modellemede Kullanılan Zemin Bünye Modelleri

Zemin ortamı ele alındığında hava, su ve danelerde oluşan bir sistem düşünülmelidir. Bu nedenle zeminler katı, sıvı ve gaz fazından oluşan karmaşık bir sistemdir. Genel olarak zeminler, heterojen, anizotropik ve süreksiz malzemeler olup, yük altındaki davranışları elasto-plastiktir. Bunun dışında zeminin yük geçmişi, yeraltı suyu durumu, yükleme durumu ve drenaj koşulları zamana bağlı olarak değişebilmektedir. Bilgisayar programlarının gelişmesi ile zemin davranışının modellenmesi için sonlu elemanlar programlarında da kullanılacak birçok malzeme bünye modeli önerilmiş ve geliştirilmiştir. En çok kullanılan sonlu elemanlar programları PLAXIS, FLAC, MIDAS GTS NX, ABAQUS, Rocscience: RS2, GEOSLOPE: SIGMA/W olarak sayılabilir.

Sonlu elemanlar yöntemiyle bir geoteknik problemin çözümünde ilk olarak zemin profilinin idealize geometrisinin oluşturulması gerekir. Zemin malzemesini tanımlamak için zemin bünye modeline karar vermeli ve zemin parametreler belirlenmelidir. Zemin malzemesi için geliştirilmiş bünye modellerinden bazıları, Mohr-Coulomb modeli, hiperbolik zemin modeller, Koedner, Duncan-Chan, hardening soil model, cam-clay modelleri, soft-soil modeli, vd.dir. Bu modellerde genel olarak zeminin elasto-plastik davranışı dikkate alınmakta olup, gerekli zemin parametreleri deneysel olarak belirlenmelidir. Yapılacak deneylerde arazi koşulları göz önüne alınmalıdır. Özellikle yumuşak kil zeminlerin oturma potansiyelinin yüksek olması ve yük etkisi ile oluşacak deformasyonların zamana bağlı olması nedeniyle modellenmesi oldukça zor ve karmaşıktır.

2.7.1. Mohr-Coulomb modeli

Mohr-Coulomb modeli, genel olarak zemin davranışını modelleme aşamasında kullanılan bir modeldir. Bu modelde zeminin elastik davranışını modellemek için elastisite modülü ve poisson oranı kullanılmaktadır. Model parametreleri, üç eksenli basınç deneyinden elde edilen gerilme-birim deformasyon eğrisinin başlangıç eğimi olan başlangıç elastisite modülü ve deviatör gerilmenin %50'sine karşılık gelen sekant elastisite modülüdür (Şekil 2.47).



Şekil 2.47. Elastisite modülleri

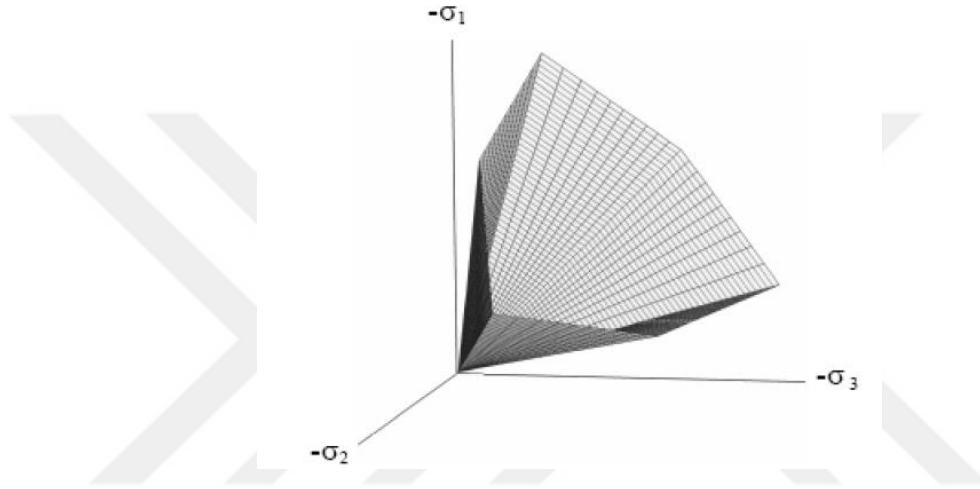
Ayrıca bu modelde poisson oranı, kohezyon, içsel sürtünme açısı ve dilatasyon açısı ve geostatik durum yanal zemin basınç katsayısı kullanılmaktadır. Mohr-Coulomb

akma yüzeyleri için Bağntı (2.161), Bağntı (2.162) ve Bağntı (2.163)'te yer alan üç akma fonksiyonu tanımlanmış olup, akma yüzeyleri Şekil 2.48'de verilmiştir.

$$f_1 = \frac{1}{2}|\sigma'_1 - \sigma'_2| + \frac{1}{2}|\sigma'_1 + \sigma'_2| \sin \phi' - c' \cos \phi' \geq 0 \quad (2.161)$$

$$f_1 = \frac{1}{2}|\sigma'_2 - \sigma'_3| + \frac{1}{2}|\sigma'_2 + \sigma'_3| \sin \phi' - c' \cos \phi' \geq 0 \quad (2.162)$$

$$f_1 = \frac{1}{2}|\sigma'_3 - \sigma'_1| + \frac{1}{2}|\sigma'_3 + \sigma'_1| \sin \phi' - c' \cos \phi' \geq 0 \quad (2.163)$$

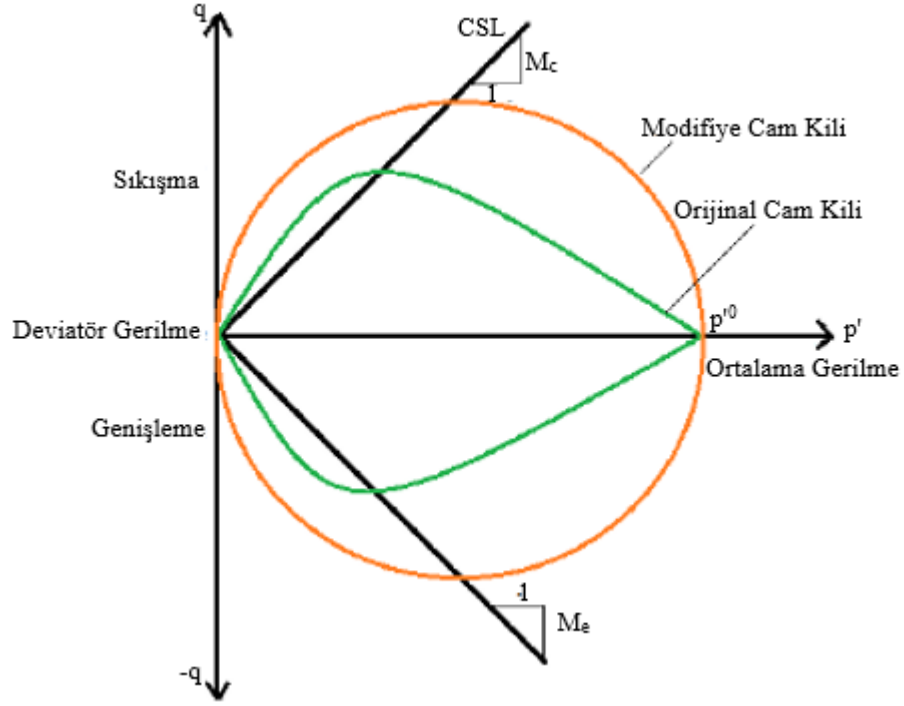


Şekil 2.48. Mohr-Coulomb Akma Yüzeyi (Abbo vd., 2011)

Bu modelde zemin tabakalarının rijitliklerinin derinlikle değişmediği kabul edilmekte olup, ortalama bir rijitlik parametresi kullanılmaktadır. Bu nedenle deformasyon değerleri gerçekçi olmamaktadır. Ancak analiz süresi kısalmaktadır

2.7.2. Cam-Clay modeli

Normal konsolide kil zemin ve hafif aşırı konsolide kil zeminler için geliştirilmiştir. Cam-Clay model, elasto-plastik davranışı temel alan izotropik modeldir. Akma yüzeyinin şekli bir mermiyi andırır. Bu nedenle *Cambridge mermi modeli* olarak da anılmaktadır (Şekil 2.49). Cam-Clay Modeli kritik durum teorisine dayanan ilk modeldir ve modelde üç parametre kullanılır. Bunlar kritik durum hattı eğimi, M , özgül hacim- $\ln p'$ eksen takımında normal sıkışma eğrisi eğimi olan λ ve şişme eğrisi eğimi olan κ parametreleridir. Bunlar üç eksenli basınç ve ödometre deneyleri ile elde edilebilir.



Şekil 2.49. Cam-Clay akma yüzeyi eğrisi (Uysal, 2011)

Kritik durum teorisi, zeminin kayma dayanımı ve boşluk oranı arasındaki ilişkiyi ele alan ve tüm zeminler için uygulanabilir bir model olarak açıklamaya çalışan bir teoridir. Eğer zemin drenajlı koşullarda yüklenirse, boşluk oranı değişmeye başlar. Eğer zemin numuneleri farklı sıkılıklarda ise, göçme anında aynı boşluk oranına sahip olurlar (Şekil 2.50). Bu koşul, kritik durum teorisi olarak adlandırılır.



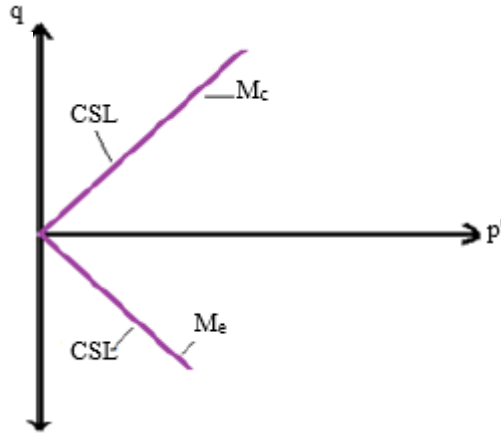
Şekil 2.50. Kritik Durum (Uysal, 2011)

Kritik durum teorisi, ortalama efektif gerilme, p' , deviator gerilme, q' , ve özgül hacim ile karakterize edilmektedir. Bu parametreler Bağıntı (2.164) ve Bağıntı (2.165)'te verilmiştir.

$$p' = \frac{\sigma'_1 + \sigma'_2 + \sigma'_3}{3} \quad (2.164)$$

$$q' = \frac{1}{\sqrt{2}} \sqrt{(\sigma'_1 - \sigma'_2)^2 + (\sigma'_2 - \sigma'_3)^2 + (\sigma'_3 - \sigma'_1)^2} \quad (2.165)$$

Kritik duruma ulaşan zemin numunesi için kayma gerilmesi ve özgül hacim sabittir ve başlangıç koşullarından bağımsızdır. Ancak kayma deformasyonları artmaya devam eder. Şekil 2.51'de görüldüğü gibi kritik durum hattı p' - q eksen takımında bir doğru ile ifade edilir ve bu doğru göçme durumunu tanımlar.



Şekil 2.51. Kritik durum hattı (Uysal, 2011)

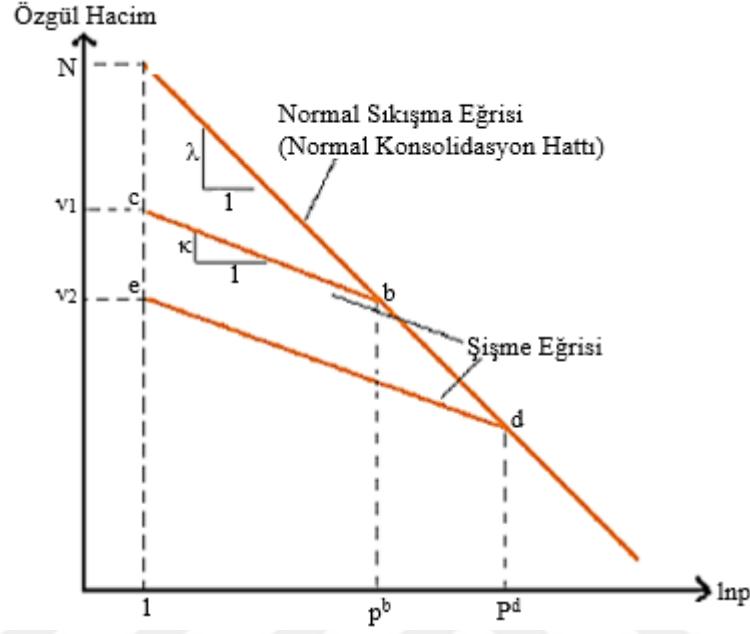
Orijinal Cam-Clay Modeli için akma yüzeyi Bağıntı (2.166) ile ifade edilir

$$\frac{q}{p'} + M \ln p' = M \ln P'_0 \quad (2.166)$$

Şekil 2.52'te yer alan izotropik yükleme maruz zeminde yükleme-boşaltma davranışı ile sıkışma ve şişme eğrileri elde edilir. Bu eğrilerin eğimi ile model parametreleri Bağıntı (2.167) ve Bağıntı (2.168) ile elde edilir.

$$\lambda = \frac{c_c}{\ln 10} \quad (2.167)$$

$$\kappa = \frac{c_s}{\ln 10} \quad (2.168)$$



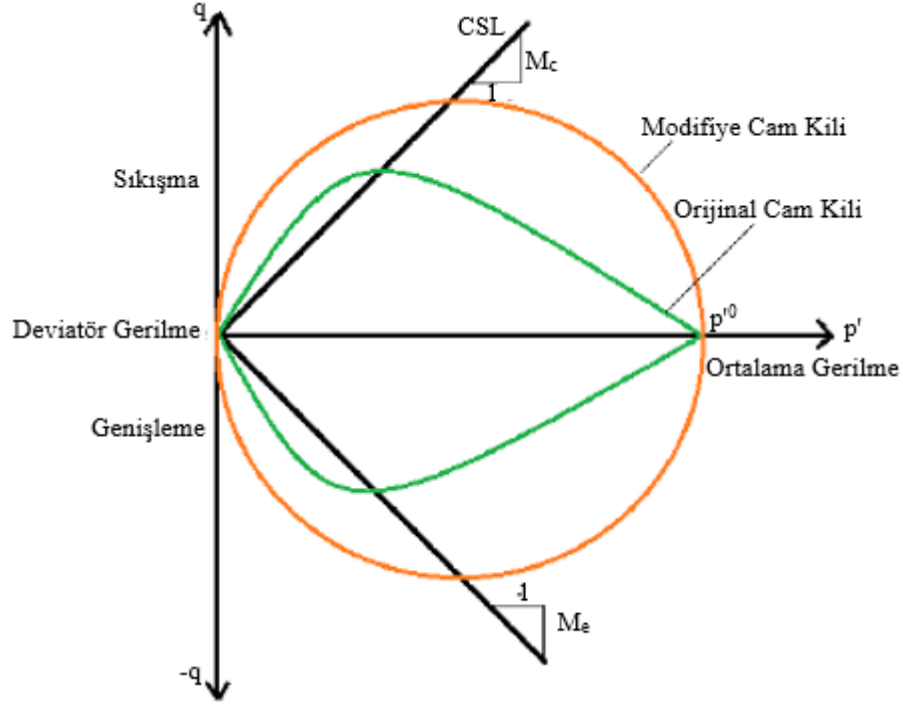
Şekil 2.52. İzotropik yüklemeye maruz zemin davranışı (Uysal, 2011)

2.7.3. Modifiye Cam-Clay model

Bu model yumuşak zeminlerin davranışını modellemek için kritik durum teorisine dayanarak geliştirilmiştir. Modifiye Cam Clay modeli, izotropik, elasto-plastik şekil değiştirme pekleşmeli bir modeldir. Herhangi bir düzlemdeki akma fonksiyonu izotropik gerilmelere göre elips formundadır (Şekil 2.53). Bu model ile izotropik gerilme koşullarında, özgül hacim- $\ln p'$ eksen takımından elde edilen sıkışma eğrisi kullanılarak hacimsel deformasyonlar ve kayma deformasyonları hesaplanır.

Modifiye Cam-Clay modeli için akma yüzeyi eğrisi denklemi Bağıntı (2.169)'da yer almaktadır. Modeli tanımlamak için kullanılan zemin parametreleri, göçme parametreleri olan kohezyon, c' , içsel sürtünme açısı, Φ' , dilatancy açısı, ψ ve, kritik durum hattı eğimi, M parametresi ve modifiye izotropik sıkışma indisi λ^* , modifiye şişme indisi κ^* parametreleridir.

$$\frac{q^2}{p'^2} + M^2 \left(1 - \frac{p'_0}{p'} \right) = 0 \quad (2.169)$$



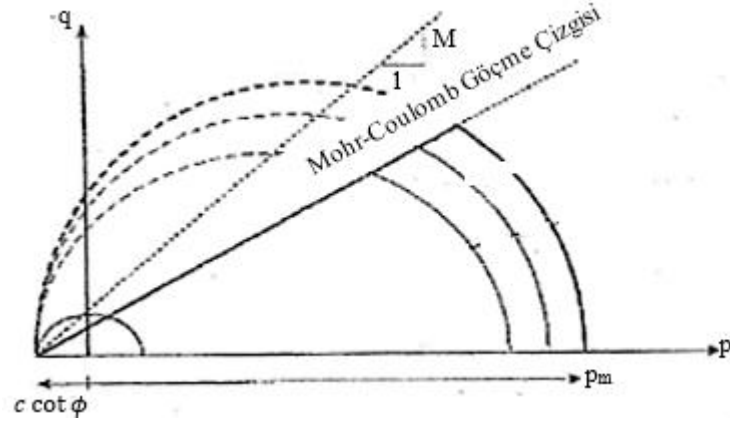
Şekil 2.53. p' , q düzleminde Modifiye Cam-Clay modelinin akma yüzeyi (Uysal, 2011)

2.7.4. Yumuşak zemin modeli (Soft soil model)

Yumuşak zemin modeli, modifiye Cam-Clay modelinin bir başka versiyonudur. Bu modelin en önemli farkı, akma yüzeyi için kritik durum yerine Mohr-Coulomb göçme kriteri kullanılmaktadır. Akma yüzeyi denklemi Bağıntı (2.170)'te yer almaktadır.

$$f = q^2 - M^{*2}(p'_m - p')(p + \cot \phi') = 0 \quad (2.170)$$

Bu bağıntıda yer alan p'_m parametresi p' ekseninde akma yüzeyinin büyüklüğünü temsil eder. Şekil 2.54'te görüldüğü gibi kritik durum hattı akma yüzeyini temsil eden eğrinin tepe noktasından geçmektedir. Ancak bu hat soft-soil modeli ile ilişkili değildir. Bunun yerine Mohr-Coulomb göçme kriteri kullanılır. Mohr-Coulomb kriteri, pik gerilme durumunda zeminin kohezyon ve içsel sürtünme açısı parametrelerinin bir fonksiyonudur.

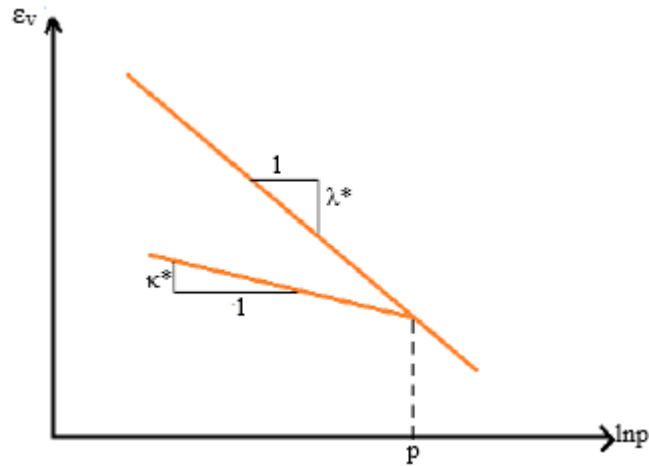


Şekil 2.54. p' , q düzleminde Soft Soil modelinin akma yüzeyi (Uysal, 2011)

Bu modelde, izotropik gerilme koşulları altında özgül hacim yerine hacimsel deformasyon kullanılmaktadır. Bu nedenle kohezyon, içsel sürtünme açısı ve dilatancy açısına ek olarak modifiye izotropik sıkışma indisi λ^* , modifiye şişme indisi κ^* parametreleri kullanılmaktadır. Modifiye parametreler Şekil 2.55'te yer almakta olup Bağintı (2.171) ve Bağintı (2.172) ile hesaplanmaktadır.

$$\lambda^* = \frac{\lambda}{1+e} = \frac{C_c}{2,3(1+e)} \quad (2.171)$$

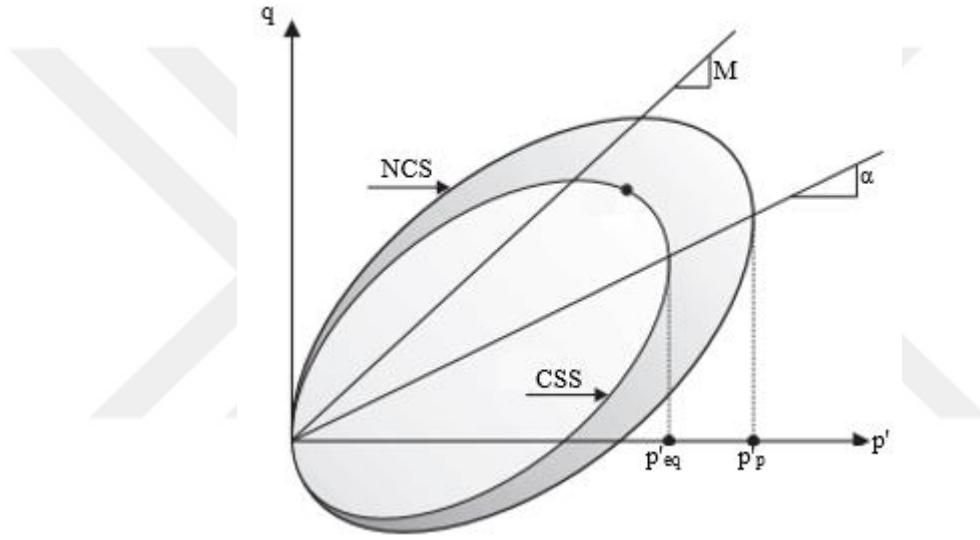
$$\kappa^* = \frac{\kappa}{1+e} \approx \frac{2C_s}{2,3(1+e)} \quad (2.172)$$



Şekil 2.55. İzotropik gerilme koşullarında hacimsel deformasyon-ortalama efektif gerilme ilişkisi (Uysal, 2011)

2.7.5. Yumuşak zemin krip modeli (Soft-Soil Creep model)

Bu model başlangıç anizotropisini ve plastik deformasyonlara bağlı anizotropideki değişimleri göz önünde bulunduran S-CLAY1 modelini esas alınarak geliştirilmiştir. Bu modelin asıl amacı normal ve az aşırı konsolide kil zeminlerin zamana bağlı davranışının modellenmesidir (Leoni vd., 2008). Şekil 2.56'da yer alan NCS yüzeyi normal konsolidasyon yüzeyini temsil eder. İzotropik ön konsolidasyon basıncından çekilen düşey NCS elips yüzeyine teğet olur. Yumuşak zemin krip modeli ile gösterilen yüzey, mevcut gerilme yüzeyini temsil eder.



Şekil 2.56. Yumuşak zemin krip modeli: üç boyutlu gerilme uzayında CSS, mevcut gerilme yüzeyi ve NCS, normal konsolidasyon yüzeyi (Leoni vd., 2008)

Model parametreleri modifiye sıkışma indisi, λ^* , modifiye şişme indisi, κ^* , modifiye krip indisi, μ^* , poisson oranı, ν (0,15-0,25), dönme hızı ile ilgili parametreler, ω ve ω_d , kritik durum içsel sürtünme açısı, ϕ ve başlangıç akma yüzeyi eğimi, a' 'dir.

2.7.6. Hardening soil model

Hardening soil modeli plastisite teorisine göre oluşturulan gelişmiş bir zemin modelidir. Bu modelde gerilmeye bağlı rijitlikler dikkate alınmaktadır. Bu nedenle artan basınçla birlikte tüm rijitlikler de artmaktadır. Bu model Mohr-Coulomb parametrelerini kullanır. Üç eksenli gerilme uzayında, Bağıntı (2.173) ve Bağıntı (2.174)'te yer alan,

iki akma fonksiyonu tanımlanmaktadır. Bu bağıntılarda yer alan γ^p , plastik kayma birim deformasyonu değeridir ve Bağıntı (2.175) ile hesaplanmaktadır.

$$f_{12} = \frac{q_a}{E_{50}} \frac{(\sigma_1 - \sigma_2)}{q_a - (\sigma_1 - \sigma_2)} - \frac{2(\sigma_1 - \sigma_2)}{E_{ur}} - \gamma^p \quad (2.173)$$

$$f_{13} = \frac{q_a}{E_{50}} \frac{(\sigma_1 - \sigma_3)}{q_a - (\sigma_1 - \sigma_3)} - \frac{2(\sigma_1 - \sigma_3)}{E_{ur}} - \gamma^p \quad (2.174)$$

$$\gamma^p = \varepsilon_1^p - \varepsilon_2^p - \varepsilon_3^p = 2\varepsilon_1^p - \varepsilon_v^p = 2\varepsilon_1^p \quad (2.175)$$

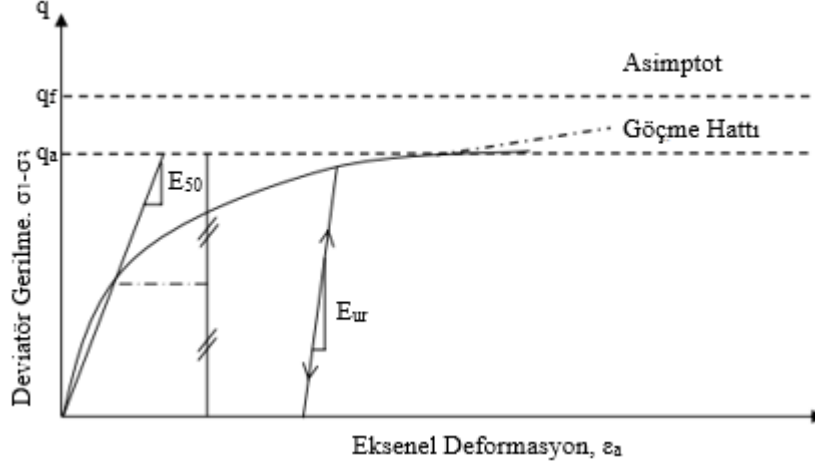
Bu model hem kohezyonlu hem de kohezyonsuz zeminler için kullanılmaktadır. Gerilme geçmişi göz önüne alındığı için aşırı konsolide killeri için de kullanılabilir. Modelde iki temel pekleşme ayrımı yapılmıştır. Bunlardan ilki kayma pekleşmesidir. Kayma pekleşmesi deviator gerilmeye bağlı olarak plastik birim deformasyonları modellemek için tanımlanmıştır. İkincisi ise basınç pekleşmesidir. Basınç pekleşmesi ise ödometre ve izotropik yükleme koşullarında basınca bağlı olarak plastik birim deformasyonları modellemek için tanımlanmıştır.

Hardening soil modelin temel bağıntılarının çıkarılmasındaki ana düşünce, üç eksenli yükleme koşullarında düşey birim deformasyon ile deviator gerilme arasındaki hiperbolik ilişkidir. Nihai deviator gerilme Bağıntı (2.176) ile hesaplanır. Kayma dayanımının asimptot değeri olan q_a ise Bağıntı (2.177) ile hesaplanmaktadır. Bu bağıntıda yer alan R_f göçme oranıdır ve genellikle 0,9 olarak alınmaktadır.

$$q_f = \frac{6 \sin \phi}{3 - \sin \phi} (p + c \cot \phi) \quad (2.176)$$

$$q_a = \frac{q_f}{R_f} \quad (2.177)$$

Standart bir üç eksenli basınç deneyinde ilk yüklemede gerilme-birim deformasyon ilişkisi nonlineerdir. İlk yüklemede gerilmeye bağlı elastisite modülü E_{50} olarak tanımlanmaktadır. Bu değer küçük birim deformasyonlar için başlangıç elastisite modülü yerine kullanılır. Bu değer Bağıntı (2.178) ile hesaplanır. Bu bağıntıda yer alan E_{50}^{ref} değeri, referans gerilme, p^{ref} , değerinin %50'sine karşılık gelen referans rijitliktir (Şekil 2.57).



Şekil 2.57. Standart Üç Eksenli Basınç Deneyinde Gözlenen Gerilme-Deformasyon İlişkisi (Laman vd., 2007)

$$E_{50} = E_{50}^{ref} \left(\frac{\sigma_3 + c \cot \phi}{\sigma^{ref} + c \cot \phi} \right)^m \quad (2.178)$$

Yükleme ve boşaltma aşaması için başka bir elastisite modülü tanımlanmıştır. Bu değer Bağıntı (2.179) ile ifade edilmektedir. Bu bağıntıda yer alan E_{ur}^{ref} değeri, referans gerilmeye karşılık gelen yüklem ve boşaltma elastisite modülüdür.

$$E_{ur} = E_{ur}^{ref} \left(\frac{\sigma_3 + c \cot \phi}{\sigma^{ref} + c \cot \phi} \right)^m \quad (2.179)$$

Yüklem ve boşaltma poisson oranı, ν_{ur} ile tanımlanmıştır ve bu değer 0,2 civarındadır. Buradan kayma modülü, Bağıntı (2.180) ile hesaplanabilir.

$$G_{ur} = \frac{1}{2(1 + \nu_{ur})} E_{ur} \quad (2.180)$$

3. KAYNAK ARAŞTIRMASI

Tez çalışması kapsamında kohezyonlu zeminlerin dinamik kayma modülü ve sönüm değerleri kapsamlı bir şekilde incelenmiştir. Literatürde bu parametreleri belirlemek için deneysel çalışmalardan elde edilmiş ampirik formülasyonlar ve grafikler mevcuttur. Kaynak araştırması bölümünde ele alınan literatür çalışmaları 3 kısımda toplanmıştır.

1. Kısımda kil zeminlerin dinamik zemin parametrelerinin laboratuvar deneyleri ile belirlenmesi ile ilgili literatür çalışmaları yer almaktadır. 2. Kısımda tez çalışmasında arazide yapılan arazi deneyleri ile kayma modülü, kayma dalgası hızı ve zemin büyütmesi gibi parametrelerin belirlendiği literatür çalışmaları yer almaktadır. 3. Kısımda ise makine-temel zemin sisteminin sonlu elemanlar programları kullanılarak modellenmesi ile ilgili yapılan çalışmalar yer almaktadır.

Kil zeminlerin dinamik kayma modülü ve sönüm oranının belirlenmesi ile ilgili yapılan çalışmalar, bu çalışmalardan elde edilen korelasyonlar ve eğriler aşağıda kronolojik olarak verilmiştir.

(Hardin & Black, 1968) tarafından yapılan çalışmada, kayma modülünün birden fazla parametreye bağlı bir fonksiyon ile tanımlamışlardır. Araştırmacılarca yürütülen çalışmada normal konsolide killerin kayma modülünü etkileyen parametrelerin belirlemesi amaçlanmıştır. Çalışmada, titreşimin frekansı (F), 200 Hz. ile 300 Hz. arasında değiştirilmiştir. Rezonant kolon deney sonuçları yapılan çalışmanın sonucunda, küçük yük artışları için kayma modülü Bağntı (3.1), büyük yük artışları için kayma modülü Bağntı (3.2) ile kuartz kumu ve normal konsolide killer için küçük birim deformasyon kayma modülü Bağntı (3.3) ile ifade edilmiştir. Bu bağntılarda e , boşluk oranı ve $\bar{\sigma}_0$, efektif gerilmedir.

$$G = 1630 * \frac{(2.973 - e)^2}{1 + e} * \sqrt{\bar{\sigma}_0} \quad (3.1)$$

$$G = 1340 * \frac{(2.973 - e)^2}{1 + e} * \sqrt{\bar{\sigma}_0} \quad (3.2)$$

$$G = 1230 * \frac{(2.973 - e)^2}{1 + e} * \sqrt{\bar{\sigma}_0} \quad (3.3)$$

(Hardin & Drnevich, 1972a) tarafından yapılan çalışmada, zeminlerin gerilme-birim deformasyon ilişkisini, kontrol edilebilen parametrelerin nasıl etkilediğini belirlemek amaçlanmıştır. Bunun için başka araştırmacılar tarafından sunulan raporlar ve bu çalışma kapsamında yapılan deneyler değerlendirilmiş ve kayma modülü ve sönüm oranı için eğriler sunulmuştur.

Yazarlar bu çalışmada 3 farklı deney cihazı kullanmıştır. Bunlardan birincisi, içi boş silindirik numunelerin test edildiği ve 1/12 Hz. frekansta, 0.25×10^{-4} inç kadar küçük kayma birim deformasyonları için sönüm ve kayma modülünün doğru ölçümünü yapmak için tasarlanan deney aletidir. Diğer iki deney cihazı ise rezonant kolon deney cihazıdır. Kayma modülü ve sönüm oranını birçok parametre etkilediği için, (Hardin & Drnevich, 1972a) çalışmalarında bu parametreleri Tablo 3.1'deki gibi çok önemli, az önemli ve göreceli önemsiz olarak üç gruba ayırmışlardır. Bütün zeminlerde kayma modülü ve sönüm oranı için birim deformasyon genliği, efektif asal gerilme ve boşluk oranı çok önemli kategoride yer almaktadır. Aşırı konsolidasyon oranı kohezyonlu zeminler için az önemliyken, temiz kumlarda önemsizdir.

Tablo 3.1. Sönüm oranı ve kayma modülünü etkileyen parametreler ve önem dereceleri (Hardin & Drnevich, 1972a)

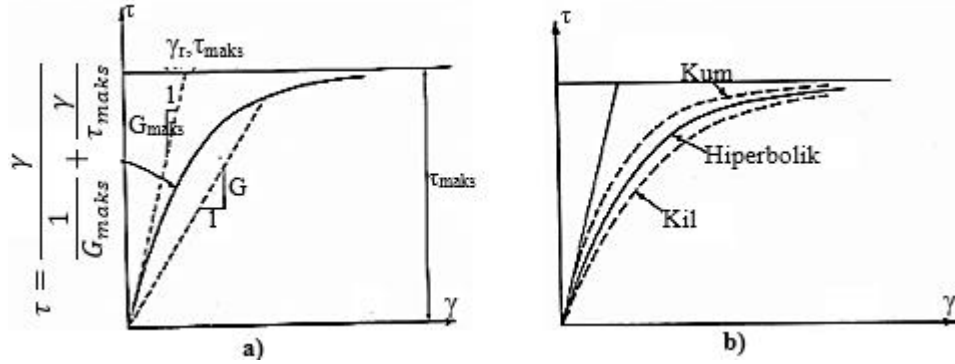
Parametre	Önem derecesi			
	Modül		Sönüm	
	Temiz Kumlar	Kohezyonlu zeminler	Temiz Kumlar	Kohezyonlu zeminler
Birim deformasyon genliği	Ç	Ç	Ç	Ç
Efektif ortalama asal gerilme	Ç	Ç	Ç	Ç
Boşluk oranı	Ç	Ç	Ç	Ç
Yük çevrim sayısı	G ^b	G	Ç	Ç
Doygunluk derecesi	G	Ç	A	A
Aşırı konsolidasyon oranı	G	A	G	A
Efektif dayanım envelope	A	A	A	A
Oktahedral kayma gerilmesi	A	A	A	A
Yük frekansı	G	G	G	A
Diğer zaman etkileri	G	A	G	A
Dane karakteristikleri, boyut, şekil, dağılım, mineraloji	G	G	G	G
Zemin yapısı	G	G	G	G
Kayma birim deformasyonundan dolayı hacim değişimi	BD	G	BD	G

Ç: Çok önemli, G: Göreceli önemsiz, A: Az önemli, b: yük çevriminin az önemli olduğu doygun temiz kumlar hariç

Zeminlerin nonlinear gerilme-birim deformasyon ilişkileri, Ramberg-Osgood ve hiperbolik modeller kullanılarak kapsamlı bir şekilde modellenmiştir. Ramberg-Osgood modeli omurga eğrisi Bağıntı (3.4) ile ifade edilmektedir. Bu bağıntıda γ , kayma birim deformasyon genliği, γ_r , referans birim deformasyon, τ , kayma gerilmesi, τ_{maks} , kayma dayanımı, α , C_1 ve R =model parametreleridir.

$$\frac{\gamma}{\gamma_r} = \frac{\tau}{\tau_{maks}} \left(1 + \alpha \left| \frac{\tau}{C_1 * \tau_{maks}} \right|^{R-1} \right) \quad (3.4)$$

(Hardin & Drnevich, 1972a) çalışmasının devamı niteliğinde olan (Hardin & Drnevich, 1972b) çalışmada kayma modülü ve sönüm oranını etkileyen parametreler kullanılarak tasarım denklemleri ve eğriler sunulmuştur. Çalışmalarında ilk olarak Şekil 3.1'de yer alan hiperbolik gerilme-birim deformasyon ilişkisini tanımlanmıştır. Bu çalışmada referans birim deformasyon kullanılarak modifiye hiperbolik ilişki sunulmuştur. Referans birim deformasyona bağlı olarak normalleştirilmiş kayma modülü ve normalleştirilmiş sönüm oranı sırasıyla Bağıntı (3.5) ve Bağıntı (3.6) ile hesaplanmaktadır.



Şekil 3.1. Hiperbolik gerilme-birim deformasyon ilişkisi (Hardin & Drnevich, 1972a)

$$\frac{G}{G_{max}} = \frac{1}{1 + \frac{\gamma}{\gamma_r}} \quad (3.5)$$

$$\frac{D}{D_{max}} = \frac{\frac{\gamma}{\gamma_r}}{1 + \frac{\gamma}{\gamma_r}} \quad (3.6)$$

Çalışmada, referans birim deformasyona bağlı olarak elde edilen gerilme-birim deformasyon ilişkisini gerçek zemin davranışına yaklaştırmak için hiperbolik birim

deformasyonla modifiye etmişlerdir. Hiperbolik birim deformasyon, Bağntı (3.7) ile ifade edilmektedir. Bu bağntıda yer alan a ve b değerleri zemin katsayıları olup, bu parametrelere ait bilgiler Tablo 3.2’de yer almaktadır. Modifiye edilmiş denklemler Bağntı (3.8) ve Bağntı (3.9) ile ifade edilmektedir. Çalışmada deney sonuçlarından türetilen hiperbolik denklemlerin, deneysel verilerle çok uyumlu olduğu belirlenmiştir.

Tablo 3.2. Modül ve sönüm hesabı için a ve b değerleri

Zemin Tipi	Modül veya Sönüm	a değeri	b değeri
Temiz kuru kumlar	Modül	-0.5	0.16
	Sönüm	$0.6 (N^{-1/6}) - 1$	$1 - N^{-1/12}$
Temiz doymuş kumlar	Modül	$-0.2 \log N$	0.16
	Sönüm	$0.54 (N^{-1/6}) - 0.9$	$0.65 - 0.65 N^{-1/12}$
Doymuş kohezyonlu zeminler	Modül	$1 + 0.25 \log N$	1.3
	Sönüm	$1 + 0.2 f^{1/2}$	$0.2 f (e_{xp}^{-\sigma'_0}) + 2.25 \sigma'_0 + 0.3 \log N$

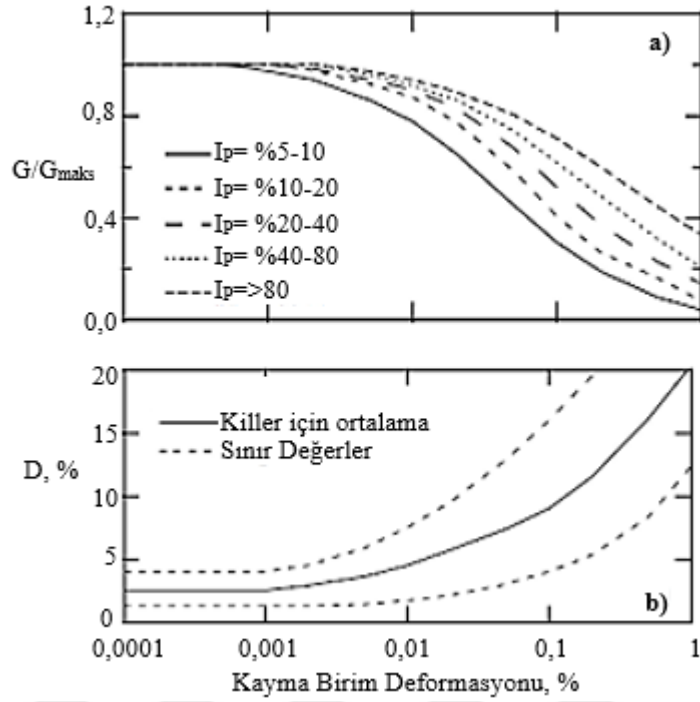
f=saniyedeki devir sayısı, σ'_0 birimi kg/cm² ve kum için sönüm ve modül değerleri 50,000 den daha az yük çevrimleri içindir.

$$\gamma_h = \frac{\gamma}{\gamma_r} \left[1 + a(e_{xp})^{-b\left(\frac{\gamma}{\gamma_r}\right)} \right] \quad (3.7)$$

$$\frac{G}{G_{max}} = \frac{1}{1 + \gamma_h} \quad (3.8)$$

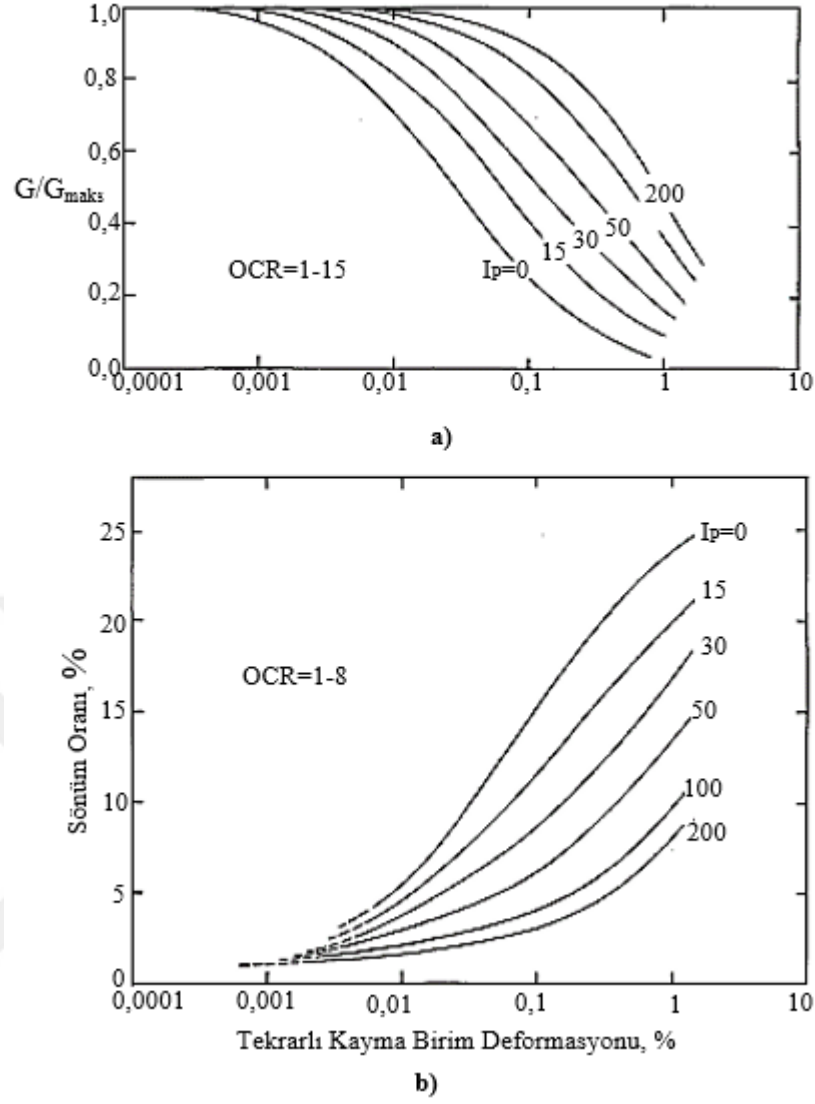
$$\frac{D}{D_{max}} = \frac{\gamma_h}{1 + \gamma_h} \quad (3.9)$$

(Sun vd., 1988) tarafından yapılan çalışmada, kohezyonlu zeminler için normalleştirilmiş modül azaltma ve sönüm eğrileri sunulmuştur. Değerlendirilen veriler, yaklaşık 0.25 atm ila 4 atm arasında değişen hücre basınçlarında gerçekleştirilen deney sonuçlarından oluşmaktadır. Önerilen normalleştirilmiş modül azaltma eğrileri plastisitenin doğrusal olmayan zemin davranışı üzerindeki etkisini açıklarken, malzeme sönüm eğrileri ise genelleştirilmiş bir aralık ve bir ortalama eğri cinsinden verilmiştir (Şekil 3.2).



Şekil 3.2. a) Çalışmada önerilen normalize edilmiş kayma modülü ve **b)** Sönüm eğrileri (Sun ve ark., 1988)

(Vucetic & Dobry, 1991) tarafından yapılan çalışmada, plastisite indisinin, saha tepki değerlendirmeleri ve sismik mikro bölgeleme için gerekli olan suya doymun zeminlerin tekrarlı gerilme-birim deformasyon parametreleri üzerindeki etkisi üzerine bir çalışma sunulmuştur. Bu çalışmada, normalize edilmiş modül azaltma eğrileri ve sönüm oranı eğrileri üzerinde plastisite indisinin etkisini gösteren eğriler Şekil 3.3'te sunulmuştur.



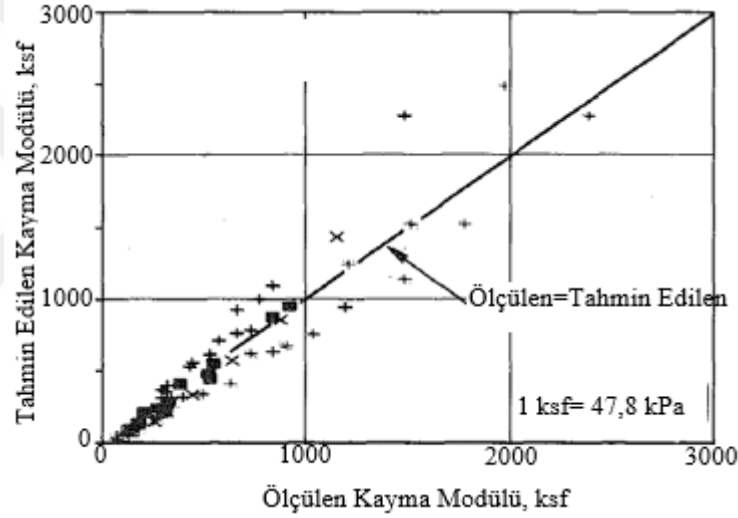
Şekil 3.3. Çalışmada önerilen **a)** Normalleştirilmiş kayma modülü ve **b)** Sönüm eğrileri (Vucetic & Dobry, 1991)

(Kagawa, 1992) tarafından yapılan çalışmada, yumuşak deniz killерinin kayma modülü ve sönümleme faktörleri üzerinde rezonant kolon ve çevrimsel basit kesme testi sonuçları derlenmiştir. Çalışmada, fırtına dalgaları ve depremler tarafından üretilen döngüsel ve dinamik yüklemeye karşı pahalı offshore yapıların tasarımı için deniz killерinin modülleri ve sönümleme faktörleri hakkında kapsamlı bir inceleme yapılması gerekliliği olarak belirtilmiştir. Araştırmacılar plastisite indisinin yumuşak deniz killерinin küçük birim deformasyon kayma modülleri üzerindeki etkisini incelemişlerdir. Bu çalışmada küçük birim deformasyon kayma modülü, Bağntı (3.10) ile ifade edilmiştir. Bu bağntıda G_p , birincil konsolidasyondan sonraki küçük birim deformasyon kayma modülüdür. $g(I_p)$ ise ikincil konsolidasyondan dolayı kayma modülünün zamana bağlı artışıdır. a , kayma modülünün konsolidasyon basıncına bağlılığını belirleyen

parametredir. Çalışmanın sonucu olarak kil zeminlerin kayma modülünü belirlemek için Bağntı (3.11) önerilmiştir. Bu bağntının geçerliliğini doğrulamak için yazarlar deney sonuçlarından elde edilen veriler ile bu bağntıdan elde edilen değerleri karşılaştırmıştır (Şekil 3.4). Karşılaştırma sonucunda killer için birincil konsolidasyon sonunda küçük birim deformasyon kayma modülleri için Bağntı 51'in güvenilir tahminler sağladığını belirlenmiştir.

$$G_{maks} = G_P * g(I_g) \quad (3.10)$$

$$G_P = \frac{358 - 3.8I_P}{0.4 + 0.7e} (\bar{\sigma}_c) \quad (3.11)$$



Şekil 3.4. Ölçülen ve tahmin edilen küçük birim deformasyon modülü (Kagawa, 1992)

(Ishibashi & Zhang, 1993) hücre basıncı, σ'_0 , ve zemin plastisite indisi, I_P , ile değişen normalleştirilmiş modül azaltma ve malzeme sönüm eğrilerini oluşturan bir dizi bağntı önermiştir. Bu çalışmada 10 atm'den küçük çevre basınçları kullanılmıştır. Normalleştirilmiş modül azaltma eğrisi ile ilişkili bağntılar Bağntı (3.12) ile Bağntı (3.15) aralığında verilmiştir.

$$\frac{G}{G_{max}} = K(\gamma, I_P) \bar{\sigma}_0^{m(\gamma, I_P) - m_0} \quad (3.12)$$

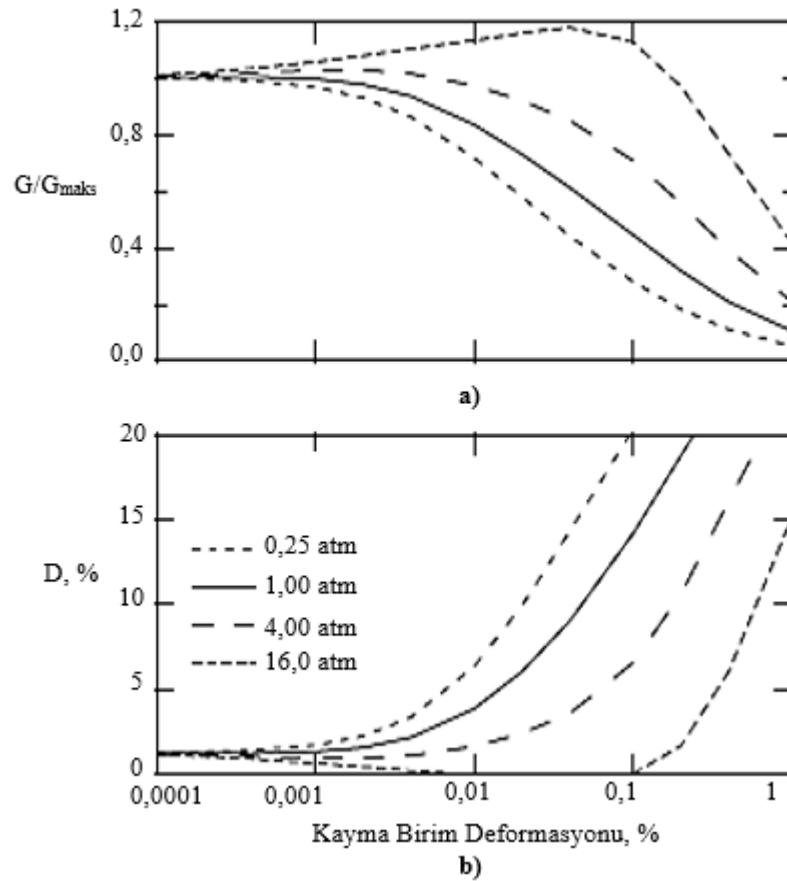
$$m(\gamma, I_P) - m_0 = 0.272 \left[1 - \tanh \left\{ \ln \left(\frac{0.000556}{\gamma} \right)^{0.4} \right\} \right] e^{-0.0145 I_P^{1.3}} \quad (3.13)$$

$$K(\gamma, I_p) = 0.5 \left[1 + \tanh \left\{ \ln \left(\frac{0.000102 + n(I_p)^{0.492}}{\gamma} \right) \right\} \right] \quad (3.14)$$

$$n(I_p) = \begin{cases} 0.0 & I_p = 0 \\ 3.37 * 10^{-6} I_p^{1.404} & 0 < I_p \leq 15 \\ 7.0 * 10^{-7} I_p^{1.976} & 15 < I_p \leq 70 \\ 2.7 * 10^{-5} I_p^{1.115} & I_p > 70 \end{cases} \quad (3.15)$$

Malzeme sönüm oranı ile normalleştirilmiş modül azaltma eğrisi arasındaki ilişki ise Bağntı (3.16) olarak önerilmiştir. Bu çalışmada önerilen eğriler, Şekil 3.5'te yer almaktadır.

$$D = \frac{0.333(1 + e^{-0.0145I_p^{1.3}})}{2} \left\{ 0.586 \left(\frac{G}{G_{max}} \right)^2 - 1.547 \left(\frac{G}{G_{max}} \right) + 1 \right\} \quad (3.16)$$



Şekil 3.5. Çalışmada önerilen **a)** Normalleştirilmiş kayma modülü ve **b)** Sönüm eğrileri (Ishibashi & Zhang, 1993)

(Darendeli, 2001) yaptığı tez çalışmasında, normalleştirilmiş modül azaltma ve malzeme sönümleme eğrilerini karakterize etmek için kullanılabilecek, hücre basıncı

etkisi, plastisite indisi, aşırı konsolidasyon oranı, yükleme frekansı ve çevrim sayısını göz önüne alarak dört parametrelili bir model önermiştir. Bu çalışmada, 20 geoteknik bölgeden alınan toplam 110 adet örselenmemiş zemin numunesinin dinamik zemin özelliklerini değerlendirmek için birleşik rezonant kolon-burulmalı kayma (RCTS) cihazı kullanılmıştır. Çalışmada önerilen model, (Hardin & Drnevich, 1972b) tarafından geliştirilen hiperbolik zemin modeline dayanan modele dayanmaktadır. Gerilme-birim deformasyon arasındaki temel hiperbolik ilişkinin, laboratuvarında ölçülen modül indirgeme eğrileriyle daha iyi uyum sağlaması için Bağıntı (3.17) ve Bağıntı (3.18)'de görüldüğü gibi bir eğrilik katsayısı, a , tanımlanmıştır. Bu eğrilik katsayısı, normalleştirilmiş modül azaltma eğrisinin eğriliği üzerinde bir etkiye sahiptir. Referans birim deformasyon değeri, maksimum kayma modülünün yarısına düştüğü kayma modülüne karşılık gelen birim deformasyon genliğidir. Çalışmada a değeri 0.9190 olarak belirlenmiştir.

$$\frac{G}{G_{maks}} = \frac{1}{1 + \left(\frac{\gamma}{\gamma_r}\right)^a} \quad (3.17)$$

$$\tau = \frac{\gamma}{1 + \left(\frac{\gamma}{\gamma_r}\right)^a} G_{maks} \quad (3.18)$$

Çalışmada önerilen malzeme sönüm eğrisinin denklemi ise Masing kuralına dayanmaktadır ve Bağıntı (3.19) ifade edilmiştir.

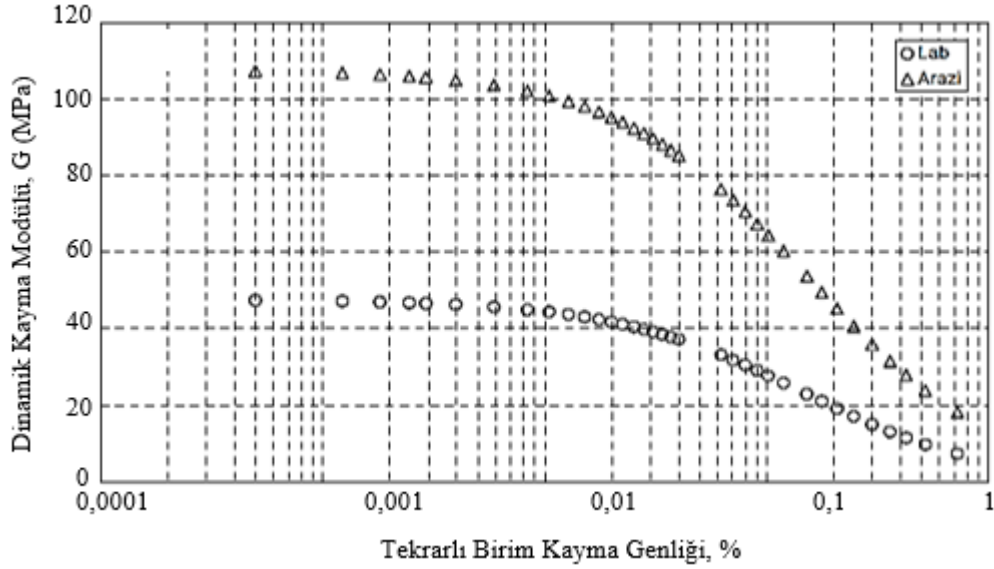
$$D_{masing,a} = \frac{4}{\pi} \times \left[\frac{\int \frac{\gamma}{1 + \left(\frac{\gamma}{\gamma_r}\right)^a} d\gamma - \frac{1}{2} \frac{\gamma^2}{1 + \left(\frac{\gamma}{\gamma_r}\right)^a}}{\frac{\gamma^2}{1 + \left(\frac{\gamma}{\gamma_r}\right)^a}} \right] \quad (3.19)$$

(Okur & Ansal, 2009) yaptıkları çalışmada, tekrarlı yükleme altındaki zemin davranışını incelemek için, dinamik üç eksenli deney aleti kullanılarak, gerilme kontrollü ve 10^{-4} birim kayma genliğini geçmeyecek şekilde, numunelere sinüzoidal tekrarlı gerilmeler uygulanarak deneyler yapılmıştır. Deney sırasında yük, deformasyon, boşluk suyu basıncı ve hacim değişimi ölçümleri yapılmıştır. Yapılan deneylerde boşluk oranı, çevre basıncı, plastisite indisi, likidite indisi ve kaba dane oranının maksimum dinamik

kayma modülü üzerindeki etkileri araştırılmış ve kayma modülü için Bağntı (3.20) önerilmiştir. Yine aynı çalışmada, laboratuvarda elde edilen maksimum kayma modülü değerleri ile arazide elde edilen maksimum kayma modülü değerleri arasındaki ilişki Bağntı (3.21) ile ifade edilmiştir. Şekil 3.6’da, arazi ve laboratuvar deneylerinden elde edilen maksimum kayma modülü değerleri yer almaktadır.

$$G_{maks} = 2.35 \frac{(20 - e)^2}{(1 + e)} (\sigma'_c)^{0.87} \quad (3.20)$$

$$(G_{maks})_{arazi} = 2.67(G_{maks})_{lab}^{0.95} \quad (3.21)$$



Şekil 3.6. Arazi ve laboratuvar dinamik kayma modülünün değişimi (Okur ve Ansal, 2009)

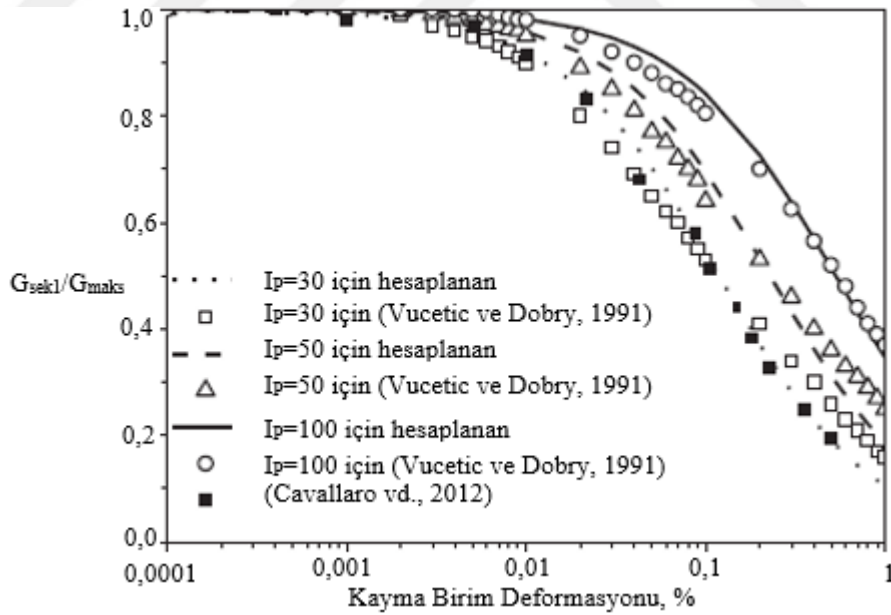
(Subramaniam & Banerjee, 2013) tarafından yapılan çalışmada, deneysel sonuçlara dayanarak yükleme çevrimleri, plastisite indisi, çevrimsel kayma gerilmesi, aşırı konsolidasyon oranı, yükleme frekansının bir fonksiyonu olarak kayma modülündeki değişimi belirlemeye yönelik basit bir ampirik modelin geliştirilmesi amaçlanmıştır. Önerilen model histerezis gerilme-birim deformasyon davranışı ile hiperbolik omurga eğrisini kapsamaktadır. Boşaltma ve yeniden yükleme için histerezis gerilme-birim deformasyon davranışı, Masing kuralı kullanılarak modellenmiştir. Çalışmada deniz kilinin doğrusal olmayan çevrimsel tepkisi için temel omurga eğrisi Bağntı (3.22)'deki hiperbolik ilişki kullanılarak temsil edilmiştir. Bu bağntıda, q deviyör gerilme, q_f kayma anındaki deviyör gerilme, ϵ_s kayma birim deformasyonu ve R , Bağntı (3.23) ile ifade edilen modül oranıdır.

$$q = q_f - \frac{G_{maks}}{R + R^2 * \varepsilon_s} \quad (3.22)$$

$$R = \frac{G_{maks}}{q_f} \quad (3.23)$$

Maksimum kayma modülü, ortalama efektif çevre basıncı ve aşırı konsolidasyon oranının (OCR) bir fonksiyonu olarak Bağıntı (3.24) ile temsil edilmiştir. Bu bağıntı literatürde yer alan çalışmalardan elde edilen sonuçlarla karşılaştırılmış ve Şekil 3.7’de görüldüğü gibi modül indirgeme eğrilerinin literatür eğrileri ile makul bir şekilde eşleştiği görülmüştür.

$$\frac{G}{G_{maks}} = \frac{1}{1 + \left[\frac{(5246e^{-0.041I_p})(P')^{(0.1259(\ln I_p)+0.3746)}(OCR)^{(0.0019I_p+0.1788)}}{\left(\frac{4.884 - 1.404 \log I_p}{2.186 - 0.234 \log I_p} \right) P'} \cdot \frac{2^{\left(\frac{0.023864+0.00366I_p}{0.02+0.0045I_p} \right)}}{\varepsilon_r} \right]} \quad (3.24)$$



Şekil 3.7. İlk yükleme çevrimi için bu çalışmadan hesaplanan ve farklı deneysel çalışmalardan elde edilen sonuçların karşılaştırması (Subramaniam & Banerjee, 2013)

(Görgün, 2018) tarafından yapılan tez çalışmasında, dinamik yükler altındaki kil zeminlerin davranışı incelenmiştir. Bu amaçla tez çalışmasında farklı silt yüzdesi içeriğine sahip kil zemin numuneleri üzerinde rezonant kolon ve burulmalı kesme

deneyleri yapılmıştır. Sonuç olarak çevre basıncı arttıkça kayma modülünün arttığı ve aksine sönüm oranının azaldığı belirlenmiştir. Silt yüzdesinin artmasının kayma modülü ve sönüm oranını arttırdığı ve boşluk suyu basınlarının arttığı belirlenmiştir.

(Güler & Afacan, 2020) kum zeminlerin tekrarlı yüklere maruz kalması durumunda göstereceği davranışı belirlemek ve oluşabilecek hasarları en aza indirmek için, Toyoura kumu ile araziden alınan örselenmiş killi kum numuneler üzerinde rezonant kolon deneyleri gerçekleştirmişlerdir. Yapılan deneysel çalışma sonucunda zemin numunelerine ait kayma modülü ve sönüm oranı eğrileri elde edilmiştir ve bu eğriler literatür eğrileri ile karşılaştırılmıştır. Elde edilen eğrilerin literatür eğrileri karşılaştırılması neticesinde eğrilerin güvenli tarafta kaldığı belirlenmiştir.

(Güler, 2021) tarafından yapılan tez çalışmasında Sakarya ilinde 4 adet sondaj çalışması ve arazi deneyleri yapılmıştır. Araziden alınan örselenmemiş numuneler üzerinde rezonant kolon ve dinamik üç eksenli deneyleri gerçekleştirilmiştir. Bölge zemininin kayma modülü ve sönüm oranı eğrileri elde edilmiştir. Elde edilen bu eğriler literatür eğrileri karşılaştırılmış ve farklı derinlik ve deneyler için farklı çalışmalarda eğrilerin uyumlu olduğu belirlenmiştir. Bölge zemininin depremselliğini yansıtan 11 adet deprem-ivme kaydı kullanılarak Deepsoil programı ile zemin büyütme analizleri yapılmıştır. Başlangıç spektral ivme ve pik spektral ivme değerleri belirlenmiştir.

Kaynak araştırmasının ikinci kısmında tez çalışması ile ilgili arazide yapılan SPT, MASW, mikrotremör ve Instantel Minimate Plus arazi deneyleri ile zeminlerin dinamik parametrelerini belirlemeye yönelik literatür çalışmaları verilmiştir. Bu çalışmalar kronolojik olarak aşağıda yer almaktadır.

(Yıldızlar, 2009) tarafından yapılan tez çalışmasında İstanbul ilinde bulunan taş ocaklarında yapılan patlatma faaliyetleri neticesinde titreşim ölçümleri gerçekleştirilmiştir. Bu amaçla 16 farklı taş ocağının bulunduğu alanda farklı bölgelerde Instantel Minimate Plus cihazı ile ölçümler alınmıştır. Ölçüm alınan noktalar, patlatma sahasına yakın olan okul, fabrika ve konutlar olarak seçilmiştir. Seçilen yapılar SAP2000 sonlu elemanlar programında modellenmiş ve patlatma etkisi sonucunda alınan ölçüm verileri modellemede kullanılmıştır. Yapılan analizler neticesinde yapının kesit tesirleri ve yer değiştirme değerleri belirlenmiştir.

(Kayacı vd., 2018), deprem kaynaklı hasarları ve can kayıplarını en aza indirmek amacıyla, zemin özelliklerini belirlemek için MASW tekniği ile kayma dalgası ölçümleri yapılmıştır. Bu amaçla 37 noktada MASW deneyi gerçekleştirilmiş ve derinlik-kayma dalgası hızı grafikleri elde edilmiştir. Bu veriler değerlendirilerek 30 m derinlik için

ortalama kayma dalgası hızı haritaları belirlenmiştir. Bu veriler kullanılarak zemin sınıfı ve sıvılaşma potansiyeli belirlenmiştir.

(Özyankı vd., 2020), Kuzey Kıbrıs'ın 15 farklı noktasında killi ve siltli zeminlerde MASW yöntemi ile elde edilen kayma dalgası hızlarını belirlemişlerdir. Çalışmada aynı bölgelerde 45 sondaj kuyusunda SPT deneyleri gerçekleştirilmiştir. Deney sonuçları ve örselenmiş zemin numuneleri üzerinde yapılan laboratuvar deneylerinden elde edilen plastisite indisi değerleri ile ilişkilendirilmiş kayma dalgası hızı tahmini için denklemler geliştirilmiştir. Yapılan değerlendirmeler sonucunda, kayma dalgası hızları ile plastisite indisi ve SPT-N değerleri arasında bir anlamlı bir ilişki gözlenmiş olup, plastisite indisi ile kayma dalgası hızları arasında ters orantı, SPT-N değerleri arasında doğru orantı olduğu belirlenmiştir. Çalışma neticesinde kayma dalgası hızı için plastisite indisi ve düzeltilmemiş SPT- N değerine bağlı olarak Bağntı (3.25) ve Bağntı (3.26) önerilmiştir. Çalışmada killi zeminlerin plastisite indisi azaldıkça kayma dalgası hızının artması düşük plastisite indisine sahip zeminlerin yüksek silt içeriğine ve killi zeminlerin enerji emme kapasitelerinin yüksek olmasına bağlanmıştır.

$$V_s = 8559.2I_p^{-1.163} \quad (3.25)$$

$$V_s = 60.97N^{0.432} \quad (3.26)$$

(Ghiloufi, 2020) tarafından yapılan çalışmada, farklı saha koşullarını modellemek amacıyla kum ve kil zeminler ile laboratuvar ölçekli altı ana zemin modeli tasarlanmıştır. Zemin modelleri bir tank içerisinde oluşturulmuş ve yapay titreşim dalgaları oluşturmak için bir bilye bırakma düzeneği kullanılmıştır. Yük etkisi altında parçacık hızını ölçmek için 2 adet İntantel Minimate Plus kayıt cihazı ve jeofonu kullanılmıştır. Yapılan titreşim ölçümleri sonucunda titreşim kaynağından uzaklaştıkça, hem kuru hem de suya doymun gevşek kumda sönümlemenin ve gevşek kilde büyütmenin parçacık hızı üzerindeki etkisini belirlenmiştir. Ayrıca sıkıştırmanın, doymunluk derecesinin ve titreşim kaynağı derinliğinin arttırılmasının, kumda parçacık hızının azalmasına sebep olduğu belirlenmiştir. Ek olarak kum zemin içerisine yerleştirilen kil tabakaların sayısının, konumunun, kalınlığının ve yönünün oluşan parçacık hızı üzerindeki etkileri ile ilgili sonuçlar sunulmuştur.

Üçüncü kısımda ise makine temelleri ve makine-temel-zemin sisteminin sonlu elemanlar programı ile modellenmesi ile ilgili literatürde yapılan çalışmalar incelenmiş aşağıda özetlenmiştir.

(Yıldız vd., 2006) yaptıkları çalışmada, anizotropi ve kil zeminlerdeki yapısal bağ bozulumunun yumuşak kil zeminler üzerine yapılan deneme dolgusunun davranışı üzerindeki etkisini araştırmıştır. Bu amaçla 1997 yılında Finlandiya’da inşa edilen dolgunun davranışı 5 yıl süre ile gözlemlenmiştir. Deneme dolgusu PLAXIS programı ile modellenmiş ve analiz edilmiştir. Analizlerde üç farklı zemin modeli kullanılmıştır. İzotropik Modifiye Cam Clay modeli esas alınarak anizotropiyi ele alan S-CLAY1 modeli geliştirilmiştir. Buna ek olarak, kil zeminlerin yük etkisine bağlı olarak yapısal bağ bozulumunu ele alarak geliştirilen S-CLAY1S zemin modeli kullanılmıştır. Analiz sonuçları saha ölçümleri ile karşılaştırılmış ve anizotropinin ve bağ bozulumlarının sonuçlar üzerinde önemli etkiye sahip olduğu belirlenmiştir.

(Laman vd., 2007), kum zeminler üzerine oturan dairesel temellerin taşıma güçlerini, laboratuvar ortamındaki küçük ölçekli model deneyler ve sayısal analiz yöntemleriyle araştırmıştır. PLAXIS V.8.2 sonlu elemanlar programı ile yapılan analizlerde lineer elastik, Mohr-Coulomb ve hardening soil modelleri kullanılmış ve analiz sonuçları model deney sonuçları ile karşılaştırılmıştır. Çalışmanın sonucunda hardening soil modelinin, kum zeminler üzerine oturan dairesel temellerin taşıma gücü hesabında kullanılmasının daha uygun olacağı belirtilmiştir.

(Kengil, 2008) yapılan tez çalışmasında, laboratuvarda hazırlanan örselenmiş ve araziden alınan örselenmemiş zemin numunelerinin gerilme-birim deformasyon eğrileri deneysel belirlenmiştir. Bu sonuçlar ile PLAXIS sonlu elemanlar programı kullanılarak modellenen deney sonuçları ile karşılaştırılmıştır. Bu amaçla üç eksenli basınç deneyleri ve ödometre deneyleri yapılmıştır. Bünye modeli olarak Mohr-Coulomb ve hardening soil model kullanılmıştır. Yapılan analizler sonucunda, Mohr-Coulomb modelin malzeme davranışını iyi modelleyemediği, hardening soil modelin deney sonuçları ile paralellik gösterdiği belirlenmiştir.

(Ti ve ark.,2009) tarafından yapılan çalışmada, Mohr-Coulomb, Duncan-Chang, Plaxis Pekleşen Zemin, hiperelastik, hipolastik, viskoelastik ve viskoplastik model gibi çeşitli modeller ele alınmıştır. Çalışmada bu modellerin sonlu elemanlar modellenmesinde seçiminin önemine değinilmiştir. Bunun dışında geoteknik mühendislerinin, genellikle sayısal modellemelerinde uygulanabilir en uygun zemin modelini seçmekte zorluklarla karşılaştığı ve modellenen her problem için kavramların, avantajların, sınırlamalar ve her

modelin çıktısının derinlemesine incelenmesinin önemi vurgulanmıştır. Mühendislere seçilen modelin laboratuvar deneylerinde elde edilen verilerle uyum içinde olmasına dikkat etmeleri tavsiye edilmiştir. Aynı zamanda modellerde gerçekçilik derecesini belirlemek için tam ölçekli deneylerle birlikte çeşitli hesaplama ölçüm karşılaştırmaları yapmanın ve bunları her farklı modelleme uygulamasına göre ayarlamının ve incelemenin önemine değinilmiştir.

(Uysal, 2011) tarafından yapılan tez çalışmasında, Modifiye Cam-Clay, Soft-Soil model, S-Clay1 ve S-Clay1S modelleri ve Soft-Soil Creep modelleri ile Çukurova bölgesindeki iki farklı bölgede yer alan yumuşak kil zeminlerin modellenmesi yapılmıştır. Model parametreleri üç eksenli basınç deneyi ve ödometre deneyleri ile belirlenmiş ve laboratuvar deneyleri modellenerek modellerin geçerliliği araştırılmıştır. Bunun dışında, bir dolgu problemi sonlu elemanlar yöntemi ile modellenmiştir. Karşılaştırma yapmak için PLAXIS sonlu elemanlar programında Modifiye Cam Kili Clay, S-Clay1 ve S-Clay1S modelleri kullanılmıştır. Analiz sonuçları anizotropiyi ve yapısal bağ bozulumlarını dikkate alan modellerin gerçek yapı ile daha uyumlu olduğu belirlenmiştir.

(Vivek & Priyanka, 2012) çalışmada makine titreşimine maruz iki yakın gömülü şerit temelin dinamik etkileşimini araştırılmıştır. Temellerden biri, aktif temel olarak adlandırılmıştır ve üzerine yerleştirilen bir titreşim kaynağı ile uyarılmıştır. Diğer temel ise pasif temel olarak adlandırılmıştır. Çalışmanın amacı aktif temelin uyarılmasının, pasif temel üzerindeki etkisini incelemektir. Analizler için PLAXIS 2D sonlu elemanlar programı kullanılmıştır ve zemin tabakası Mohr-Coulomb modeline göre tanımlanmıştır. Temel genişliği B olarak tanımlanmıştır. Analizler sabit ve değişen genliğe sahip sinüzoidal dinamik yükleme koşulları altında yapılmıştır ve temeller arası mesafeler değiştirilerek temellerin oturma davranışı incelenmiştir. Pasif temelin tepkisinin, aktif temelden 2B mesafeye kadar anlamlı olduğu belirlenmiştir.

(Bhandari & Sengupta, 2014) yaptıkları çalışmada makine temel tipleri, tasarım kriterleri ve özellikle gömülü makine temellerinin analiz metotlarına değinmiştir. Çalışmada, araştırmacılar tarafından elastik yarı uzay metodu ve gömme katsayıları kullanılarak pistonlu bir makine temelinin zemin yüzeyine oturması ve farklı derinliklerde zemine gömülmesi durumları ele alınmıştır. Farklı titreşim modlarında, temelin gömülmesinin temel performansı üzerindeki etkilerini araştırmak için, frekans ve genliklerin değerleri karşılaştırılmıştır. Çalışmada, mevcut temel boyutları için sığ derinlikte rezonans meydana gelirken, derinlik arttıkça toplam dikey ve yatay titreşim

tepkisinin azaldığı belirlenmiştir. Aynı zamanda temelin gömülme derinliği arttıkça, temelin doğal frekansının arttığı görülmüştür. Dolayısıyla gömme derinliğinin artmasının, yay sabitlerinin veya doğal frekansların değerlerinde artışa neden olduğu ve makine temeli için faydalı olan titreşim genliklerini azalttığı belirlenmiştir.

(Al-Helo, 2015), çalışmasında PLAXIS 2D sonlu elemanlar programı ile farklı sıklıktaki iki tabakalı suya doymuş kum zemin üzerine oturan şerit makine temelini dinamik analizini yapmış ve sıvılaşma potansiyeli araştırmıştır. Bu amaçla 5 Hz. frekansında ve 25 kPa genlik değerine sahip düşey harmonik yük uygulanmıştır. Zemin tabakaları Mohr-Coulomb akma kriterine göre modellenmiştir. Zemin tabakalarının elastisite modülünün makine temeli üzerindeki etkisini belirlemek için üst tabakanın elastisite modülü alt tabakanın 2-10 katı olarak değiştirilmiştir. Elastisite modülünün 2 katından 4 katına arttığında yer değiştirmenin önemli ölçüde azaldığı, daha sonra etkinin azaldığı belirlenmiştir. Elastisite modülü 5 katına çıkarıldığında ise boşluk suyu basıncı önemli ölçüde arttığı ve daha azaldığı belirlenmiştir. Sıvılaşmanın, zeminin sığ derinliklerinde ilk olarak yüklemenin olduğu bölgede yüzeye yakın bir yerde olduğu ve tüm frekanslarda birkaç metreye kadar uzandığı belirlenmiştir.

4. MATERYAL VE YÖNTEM

Tez çalışması kapsamında Konya 2. Organize Sanayi Bölgesi (KOSB)'nde FMC fabrika sahası ve KOS Atıksu Arıtma Tesisi sahasından alınan zemin numuneleri ile laboratuvar deneyleri yapılarak dinamik zemin parametreleri belirlenmiştir. Ayrıca FMC fabrika sahası, KOS Atıksu Arıtma Tesisi sahası ve Selçuk Üniversitesi Kan Merkezi binası bölgesinde arazi deneyleri yapılmıştır. Yapılan bu arazi deneyleri ve laboratuvar deneyleri ile harmonik yük ve darbe yükü oluşturan makine temellerinin farklı zemin profillerindeki davranışı araştırılmıştır. Harmonik yük oluşturan makine temellerinin farklı zemin profillerindeki davranışını araştırmak için PLAXIS 2D sonlu elemanlar programı kullanılmıştır. Darbe yükü oluşturan makine temellerinin davranışını belirlemek için ise arazi deneyleri yapılmıştır.

Öncelikli çalışma alanı olarak Konya 2. Organize Sanayi Bölgesi (KOSB)'nde makine ve preslerin çalışmasından kaynaklı, fabrika binası ve çevresinde önemli titreşimlerin olduğu FMC Hidrolik Sistemleri San. ve Tic. A.Ş.'nin bulunduğu alan seçilmiştir. Ancak bu alandaki çalışma, fabrika çevresindeki inşaat faaliyetlerinden tamamlanamamıştır. Tez çalışmasını tamamlamak için, aynı bölgede benzer zemin özelliklerine sahip, Konya Organize Sanayi (KOS) Atıksu Arıtma Tesisi sahası ikinci alan olarak belirlenmiştir. Ayrıca makine titreşimlerinin farklı zemin profillerinde oluşturduğu dinamik etkileri belirlemek için, diğer bir çalışma alanı olarak, Selçuk Üniversite Kan Merkezi binasının bulunduğu bölge seçilmiştir.

KOSB'nde deneysel çalışmaların yapıldığı alanlar Şekil 4.1'de yer almaktadır. Bu alanlardan FMC fabrika sahasında 2 adet sondaj yapılmıştır. Bu sondajlar 21 m derinliğindedir. Sondaj esnasında her 3 m'de bir standart penetrasyon deneyi yapılmış ve Shelby tüpleri ile örselenmemiş zemin örnekleri alınmıştır. Ayrıca aynı sahada 2 adet MASW deneyi yapılmıştır.

KOS Atıksu Arıtma Tesisi sahasında ise 2 adet 10 m'lik sondaj yapılmıştır. Sondaj esnasında farklı derinliklerden Shelby tüpleri ile örselenmemiş zemin örnekleri alınmıştır. Aynı sahada 2 adet MASW ve 1 adet mikrotremör deneyi yapılmıştır. Yine aynı sahada dinamik plaka deneyi ile darbe yükü oluşturularak, 4 doğrultuda Instantel Minimate Plus cihazı ile kayıtlar alınmıştır.



Şekil 4.1. Sondaj alanları harita görüntüsü

Selçuk Üniversite Kan Merkezi binası bölgesinde dinamik plaka deneyi ile darbe yükü oluşturularak 2 doğrultuda Instantel Minimate Plus ölçümleri yapılmıştır. Bölgenin harita görüntüsü Şekil 4.2’de yer almaktadır.



Şekil 4.2. Selçuk Üniversitesi Kan Merkezi harita görüntüsü

FMC fabrika sahası ve KOS Atıksu Arıtma Tesisi sahalarında yapılan laboratuvar ve arazi deneyleri ile belirlenen dinamik zemin parametreleri kullanılarak, PLAXIS 2D sonlu elemanlar programında, farklı zemin profillerinde harmonik yük üreten makinelerin oluşturduğu dinamik etki nedeniyle oluşan deplasmanlar ve ivmeler analiz sonuçlarında belirlenmiş ve karşılaştırılmıştır. Buna ek olarak tabakalanma durumunun değişiminin

etkisini araştırmak için literatür verileri kullanılarak oluşturulmuş tek tabakalı ve 3 tabakalı zemin profilleri kullanılarak, harmonik yük üreten makinelerin oluşturduğu dinamik etki nedeniyle oluşan deplasmanlar ve ivmeler belirlenmiş ve karşılaştırılmıştır.

4.1. Arazi Deneyleri

4.1.1. Sondaj alışmaları ve Standart Penetrasyon Deneyleri

Tez alışması kapsamında FMC fabrika sahasında Arıcı Mühendislik Jeoloji ve Sondaj Hizmetleri tarafından 2 adet sondaj ile 2 adet SPT deneyi ve KOS Atıksu Arıtma Tesisi sahasında Konya Zemin Bilişim Nak. Müh. Son. İnç. San. Ve Tic. Ltd. şti. tarafından 2 adet sondaj yapılmıştır.

Sondaj alışmaları ile zemin profilinin düşey tabakalanma değişimleri incelenmiştir. Ayrıca yeraltı suyu seviyesi belirlenmiştir. Ek olarak belirli derinliklerden alınan zemin numuneleri ile zemin tabakalarının fiziksel özelliklerini, kayma dayanımı ve oturma parametreleri ile dinamik zemin parametrelerini belirlenmiştir.

4.1.1.1. FMC fabrika sahasında yapılan sondaj ve SPT deneyi

Tez alışması kapsamında, FMC fabrika sahasında 2 adet 21 m derinlikli sondaj yapılmıştır (şekil 4.3). Bu sondajlarda her 3 m’de bir Shelby tüpleri ile zemin numunesi alınmıştır. Alınan numunelerin doğal su muhtevasını koruması için tüplerin altı ve üstü parafinlenmiştir (şekil 4.4). Her tüpün üzerine sondaj adı ve alındığı derinlik yazılmıştır.

Shelby tüpü ile örnek alındıktan sonra SPT deney ekipmanı sondaj kuyusuna indirilerek SPT deneyi yapılmıştır. SPT deneyinde, numune alıcı istenen derinliğe indirildikten sonra şekil 4.5’te görüldüğü gibi tij üzerinde 15 cm aralıklı olarak 45 cm işaretlenmiştir. Her 15 cm’in batması için oluşturulan darbe sayıları kaydedilmiştir. Kaydedilen bu değerlerden son iki 15 cm için kaydedilen darbe sayılarının toplamı SPT-N₃₀ değeridir.

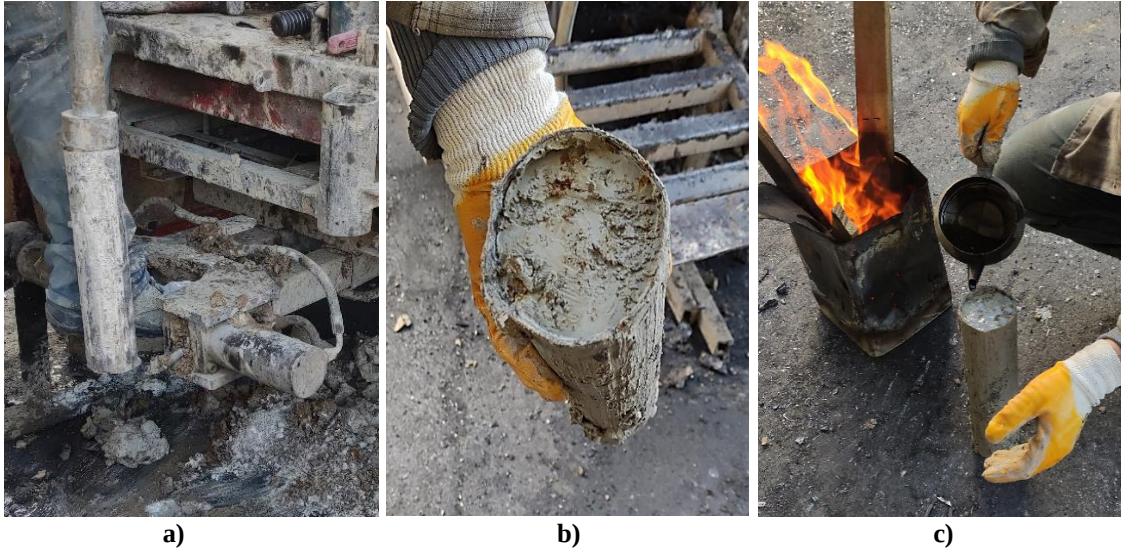


a)



b)

Şekil 4.3. FMC fabrika sahasında **a)** Sondaj kulesinin kurulması ve **b)** Yapılan sondaj çalışmasına ait görseller



Şekil 4.4. a) Shelby tüpünün kuyuya indirilmesi, **b)** Zemin numunesi alınmış Shelby tüpü ve **c)** Shelby tüpünün parafinlenmesi



Şekil 4.5. a) SPT numune alıcısının sondaj kuyusuna indirilmesi ve **b)** Tij üzerinde 45 cm mesafenin işaretlenmesi

Numune alıcının 45 cm batması tamamlandıktan sonra Şekil 4.6’da görüldüğü gibi SPT numune alıcısı dışarı çıkarılarak ikiye ayrılmıştır. Numune alıcının içerisinde yer alan örselenmiş zemin numunesi su içeriğinin kaybetmemesi için bir poşete konularak, alındığı derinlik ve sondaj adı üzerine yazılmıştır. Hem Shelby tüpleri hem de SPT numune alıcısı ile alınan zemin numuneleri laboratuvara getirilmiştir.



a)



b)



c)

Şekil 4.6. a) SPT numune alıcısı, b) Numune alıcısı içerisindeki zemin numunesi ve c) Örselenmiş zemin numunesinin muhafaza edilmesi

FMC fabrika sahasında yapılan SPT deneyinde her derinlik için kaydedilen darbe sayıları ve bunlara bağlı olarak hesaplanan $SPT-N_{30}$ sayıları Tablo 4.1’de verilmiştir. $SPT-N_{30}$ sayılarının anlamlı hale getirilmesi ve literatürde yer alan korelasyonlarda kullanılabilir olması için gerekli düzeltmeler yapılmıştır. SPT deneyinin yapılması için açılan sondaj kuyusu 120 mm çapında olup, sondaj esnasında yeraltı suyu seviyesinin 11

m’de olduğu belirlenmiştir. SPT deney ekipmanı halka tipidir ve çakma başlığı 2 kg’dır. Deney esnasında tokmak yastığı kullanılmamıştır. Numune alıcı ise kılıfsızdır.

Tablo 4.1. SPT deneyi darbe sayıları ve SPT-N₃₀ değerleri

Derinlik, m	SK1			SPT- N30	SK2			SPT - N30
3	4	6	6	12	3	4	7	11
6	1	1	4	5	2	1	3	4
9	2	3	4	7	1	1	1	2
12	12	10	14	24	22	7	5	12
15	6	9	6	15	2	4	4	8
18	6	8	9	17	5	4	4	8
21	11	9	6	15	4	7	8	15

4.1.1.2. KOS Atıksu Arıtma Tesisi sahasında yapılan sondaj

KOS Atıksu Arıtma Tesisi sahasında 2 adet 10 m derinlikle sondaj yapılmıştır (Şekil 4.7). Yapılan sondajlardan birinden 2, 4, 6, 8 m’lerde, diğerinden ise 3, 5, 7 ve 9 m’lerde Shelby tüpleri ile zemin numunesi alınmıştır. Shelby tüplerinin altı ve üstü parafinlenerek muhafaza edilip laboratuvara getirilmiştir. Bu numuneler ile rezonant kolon deneyleri yapılmıştır.

Bu sahadan fiziksel özellikleri belirlemek için yeterli numune alınamamıştır ve SPT deneyi yapılmamıştır. Zeminin fiziksel özelliklerinin belirlenmesi için daha önce aynı sahada yapılmış sondaj çalışmaları ile alınan zemin numuneleri kullanılarak hazırlanmış mevcut zemin etüt raporu kullanılmıştır. Aynı zamanda rezonant kolon deneyi ile elde edilen dinamik zemin parametrelerinin arazi deneyleri ile karşılaştırılması için aynı zemin etüt raporunda yer alan SPT deney sonuçları kullanılmıştır. İlgili alan için daha önce hazırlanan zemin etüt raporu için 5 sondaj kuyusunda yapılan SPT deney sonuçları Tablo 4.2’de yer almaktadır.



Şekil 4.7. KOS Atık Su Arıtma Tesisi sondaj çalışması

Tablo 4.2. 5 sondaj kuyusunda yapılan SPT deneyi darbe sayıları ve SPT-N₃₀ değerleri

Derinlik, m	SK1			SPT N30	SK2			SPT N30	SK3			SPT N30	SK4			SPT N30	SK5			SPT N30
3	2	2	4	6	4	4	6	10	1	2	2	4	3	3	5	8	2	3	3	6
4,5	5	6	6	12	2	3	2	5	6	4	4	8	6	7	8	15	2	2	4	6
6	6	6	7	13	4	4	4	8	4	4	5	9	4	5	6	11	3	3	5	8
7,5	4	6	7	13	6	7	9	16	12	11	12	23	10	10	13	23	8	7	9	16
9	5	5	5	10	3	6	7	13	3	3	4	7	2	1	1	2	2	2	3	5
10,5	4	4	6	10	8	9	8	17	8	6	4	12	1	2	3	5	6	6	9	15

4.1.2. Çok Kanallı Yüzey Dalgası Spektrumu Analizi (MASW) Deneyi

Tez çalışmasında, jeofizik yöntemler ile zeminin tabakalanma durumunu belirlemek ve kayma dalgası hızını ölçmek için FMC fabrika sahası ve KOS Atıksu Arıtma Tesisi sahasında her birinde 2'şer adet olmak üzere toplamda 4 adet MASW ölçümü yapılmıştır (Şekil 4.8). MASW yöntemi, tabakalı bir zemin profilinde, 30 m derinliğe kadar, bir boyutlu S dalga hızını elde etmede kullanılmaktadır. Bu yöntem, bir darbe kaynağı ile oluşturulan elastik dalgaların, zemin tabakaları içinde kırılarak ya da yansyarak yayılma sürelerinin ölçümü esasına dayanmaktadır. Üretilen sismik dalgalar jeofonlar ile saptanmaktadır. Elde edilen zaman-mesafe kayıtları, uygun yöntemlerle işlenerek, tabakalı zemin ortamının kalınlıklarını ve sismik dalga hızlarını belirleyen zemin altı modelleri oluşturulur. MASW yöntemi başlıca üç aşamadan oluşmaktadır. Bunlar, verileri toplama, dispersiyon eğrisini elde etme ve ters çözüm aşamalarıdır.

İki sahada yapılan tüm MASW ölçümlerinde 33 m serim + 12 m ofset olmak üzere toplam 45 m açılımlı olarak deneyler gerçekleştirilmiştir (Şekil 4.9). Ölçümlerde MASW ofset uzaklığı 12 m olup bu noktadan bir balyoz ile vurulmuştur. Jeofon aralıkları ise 3 metre olarak kullanılmıştır. Her deney ile 30 m derinlik için kayma dalgası hızlarının derinlikle değişim grafiği elde edilmiştir.

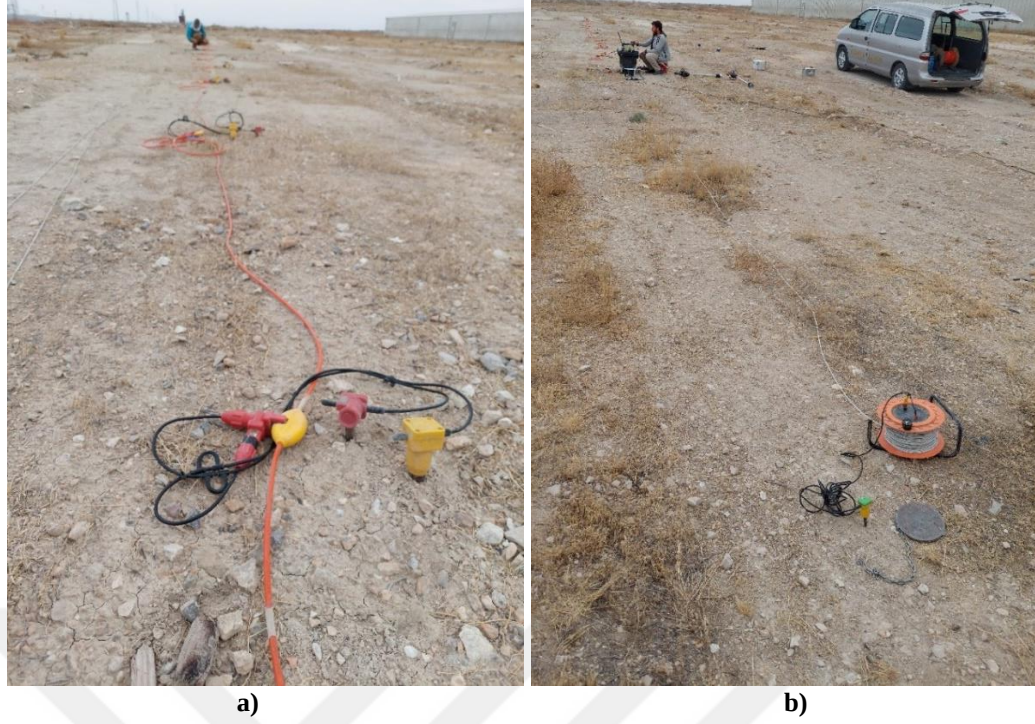


a)



b)

Şekil 4.8. a) FMC ve b) KOS Atıksu Arıtma tesisleri bahçelerinde yapılan MASW deneyi harita görünüşleri



Şekil 4.9. MASW deneyi **a)** Jeofon yerleşimi ve **b)** Darbe uygulama noktası

MASW deneylerinde, 12 kanallı Doremi Sara sismik kayıt cihazı kullanılmıştır. Deney sistemi, kayıtları almaya yarayan bir dizüstü bilgisayar, sismik izleri algılamaya yarayan sensör, bir triggerli balyoz, 12 adet yatay jeofon, 12 adet düşey jeofon ve özel bağlantı ünitelerinden oluşmaktadır (Şekil 4.10).



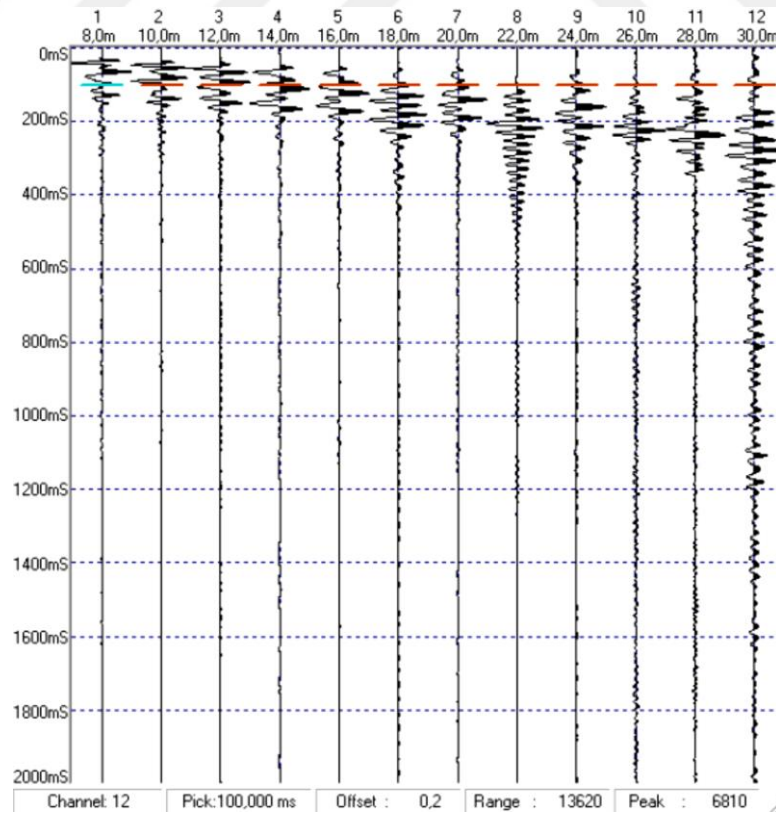
Şekil 4.10. Deney kayıt cihazı ve bilgisayar sistemi

Sismik dalga kaynağı olarak, Şekil 4.11’de görülen 8 kg ağırlığındaki balyoz ile çelik plaka üzerine vuruş yaptırılmıştır.



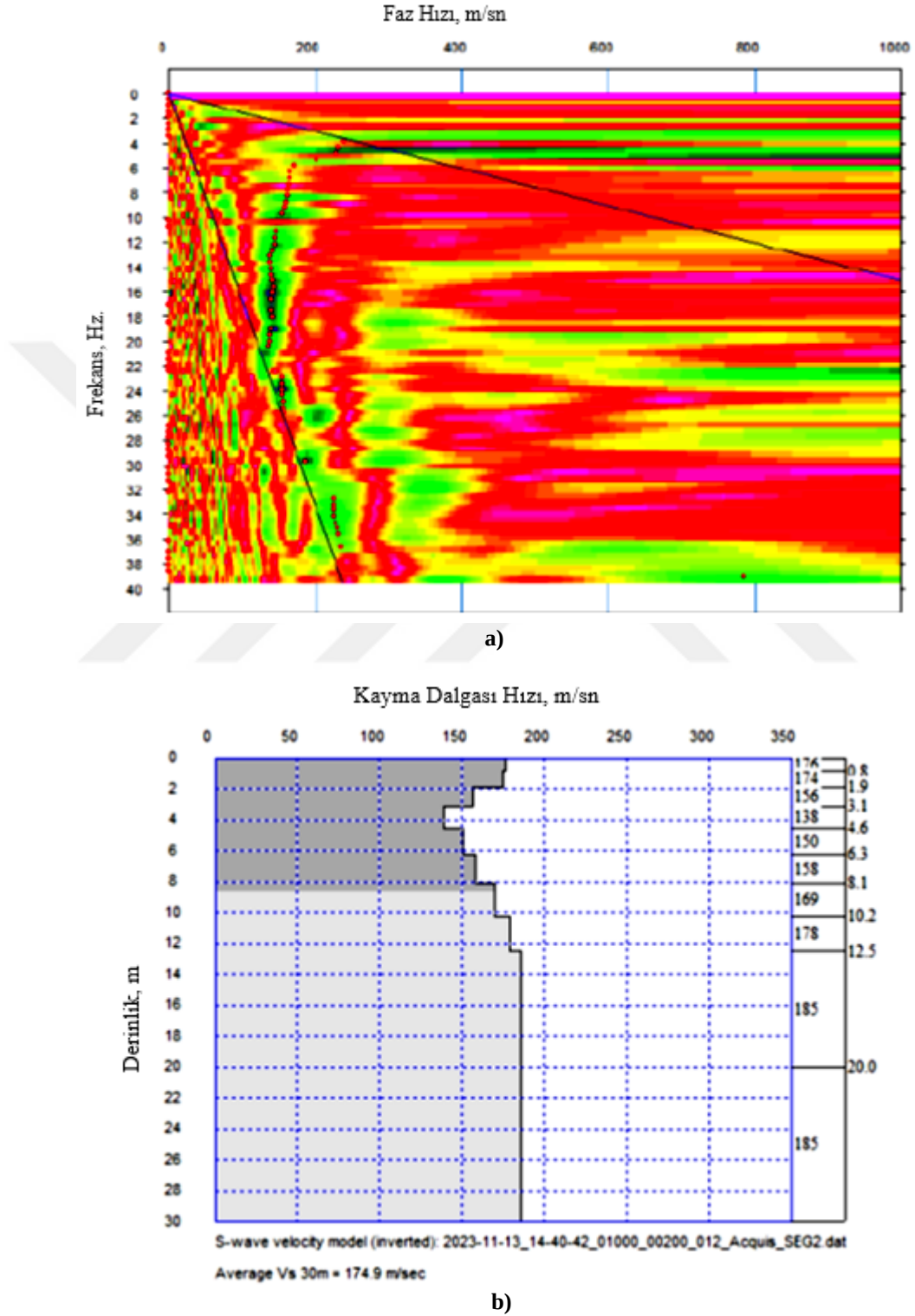
Şekil 4.11. FMC fabrika sahasında yapılan MASW deneyinde balyoz ile uyarımın gerçekleştirilmesi

Yapılan uyarım neticesinde Şekil 4.12'deki gibi ham veriler elde edilmektedir. Bu veriler yardımıyla Şekil 4.13'te yer alan dispersiyon eğrileri elde edilmektedir.



Şekil 4.12. KOS Atıksu Arıtma Tesisi MASW1 ham verisi

Dispersiyon eğrileri üzerine işaretlemeler yapılarak ters çözüm aşaması gerçekleştirilmektedir (Şekil 4.13(a)). Bu işlem ile ortama ait derinlik-kayma dalgası hızı elde edilmektedir (Şekil 4.13(b)).



Şekil 4.13. KOS Atıksu Arıtma Tesisi MASW1 a) Dispersiyon eğrisi ve b) Kayma dalgası hızı-derinlik eğrisi

4.1.3. Mikrotremör Deneyi

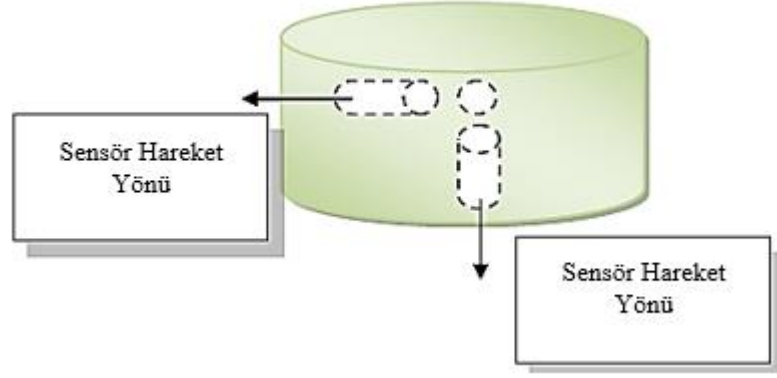
KOS Atıksu Arıtma Tesisi sahasında bölge zemininin büyütme faktörünü belirlemek için 1 adet mikrotremör ölçümü yapılmıştır (Şekil 4.14). Mikrotremör çalışması belirlenen noktada 30 dakika kayıt uzunluğunda uygulanmıştır. Deney gündüz gürültüsüz, yağışsız ve rüzgârsız bir anda yapılmıştır. Deney esnasında alınan ölçümler *Geopsy* programıyla değerlendirilmiştir. Bu değerlendirmeler sonucunda zemin hâkim titreşim periyodu ve zemin büyütme değeri elde edilmiştir.



Şekil 4.14. Mikrotremör deneyi ekipmanları

4.1.4. InstanTEL Minimate Plus Ölçümleri

Arazi ortamında uygulanan darbe yüklerinin zemin içerisinde yayılımını belirlemek için InstanTEL firmasına ait InstanTEL Minimate Plus cihazı kullanılmıştır. Bu cihaz ekipmanları içinde yer alan jeofonlar yardımıyla boyuna, enine ve düşey olmak üzere üç doğrultuda titreşim kaydı yapabilmektedir. Üç doğrultuda kayıt yapabilmesi, jeofonun içerisinde bulunan üç adet birbirine dik doğrultuda yerleştirilen algılayıcılar sayesinde. Şekil 4.15’de cihaz içinde bulunan algılayıcıların konumu ve hareket yönleri gösterilmektedir.



Şekil 4.15. Jeofon içindeki titreşim algılayıcılar ve hareket yönleri (Yıldızlar, 2009)

Cihaz ekipmanı olarak jeofon dışında mikrofon, jeofon ve mikrofonu zemine sabitleme ayakları, şarj, kontrol, hafıza ve bilgisayar bağlantı sistemi yer almaktadır. Kayıt cihazı, etki sonrası jeofonun yerleştirildiği noktadaki genlik, frekans, ivme ve parçacık hızı bileşenlerini kaydetmektedir. Kaydedilen bu veriler bilgisayar ortamına aktarılmaktadır. Cihaz ile tek bir olay ya da sürekli bir olay için kayıt yapılabilir. Şekil 4.16’da tez çalışmasında kullanılan Instantel Minimate Plus cihazı yer almaktadır.



Şekil 4.16. Instantel Minimate Plus titreşim kayıt cihazı ve ekipmanları

Jeofonlar zemin ortamına yerleştirilirken zemin yüzeyinin kazılıp düzeltilmesine ve yumuşak zemin kısımlarında ayaklarının takılıp zemine sabitlenmesine dikkat edilmiştir. Şekil 4.17’de arazide yük düşürme işleminin yapıldığı etki noktası ve

jeofonların konumu gösterilmiştir. Etki noktasından itibaren her 2 ya da 2,5 m’de bir etki uygulamasından sonra jeofonlar ile kayıtlar alınmıştır.



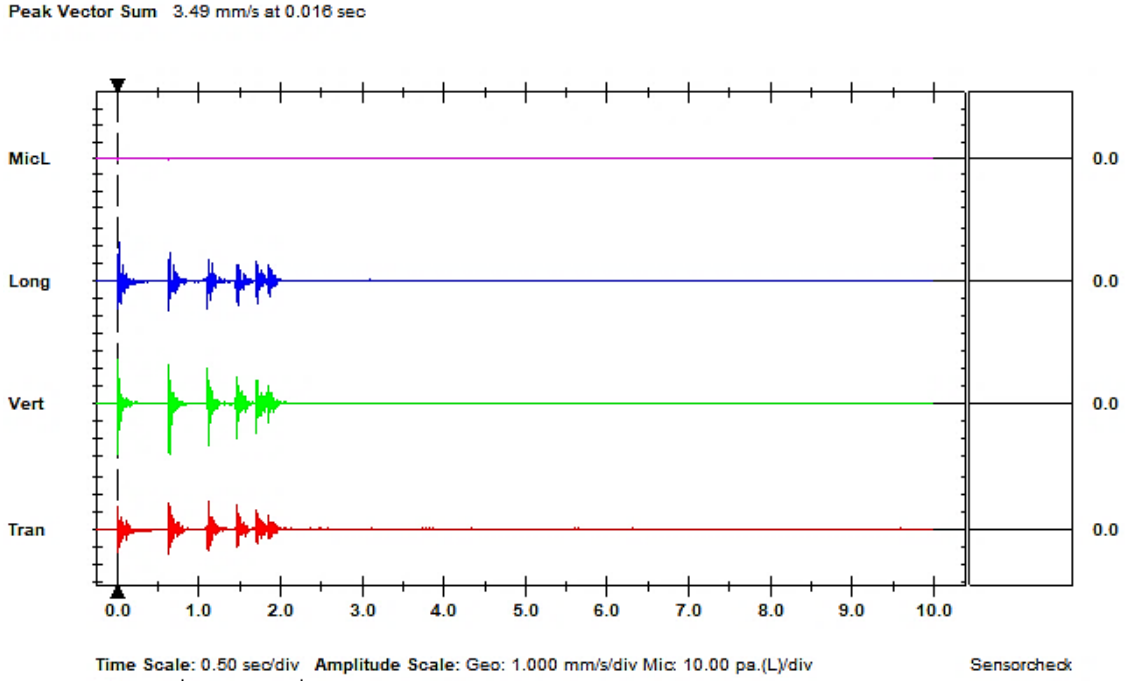
Şekil 4.17. Etki noktası ve jeofonların konumu

Ayrıca jeofonların yerleştirilmesi aşamasında Şekil 4.18’de gösterilen jeofon üzerinde yer alan ok işaretinin etki yönüne bakması gerekliliğine dikkat edilmiştir.



Şekil 4.18. Titreşim kayıtlarını algılayan jeofon

Bilgisayar ortamına verilerin aktarılması için Blastware 8.12 programı kullanılmıştır. Bu program yardımıyla her jeofon okuması için iki adet rapor sunulmaktadır. Raporlardan ilki, faaliyet raporudur. Bu raporda kaydın alındığı tarih ve saat bilgileri, parçacık hızı-zaman grafikleri ve şartname kriterlerine göre parçacık hızı-frekans değerlerinin işaretlendiği bir kısım yer almaktadır. Ayrıca bu raporda üç doğrultuda parçacık hızı, frekans, algılanma süresi, pik ivme ve pik deplasman değerlerine ait bir rapor yer almaktadır (Şekil 4.19 ve Şekil 4.20)



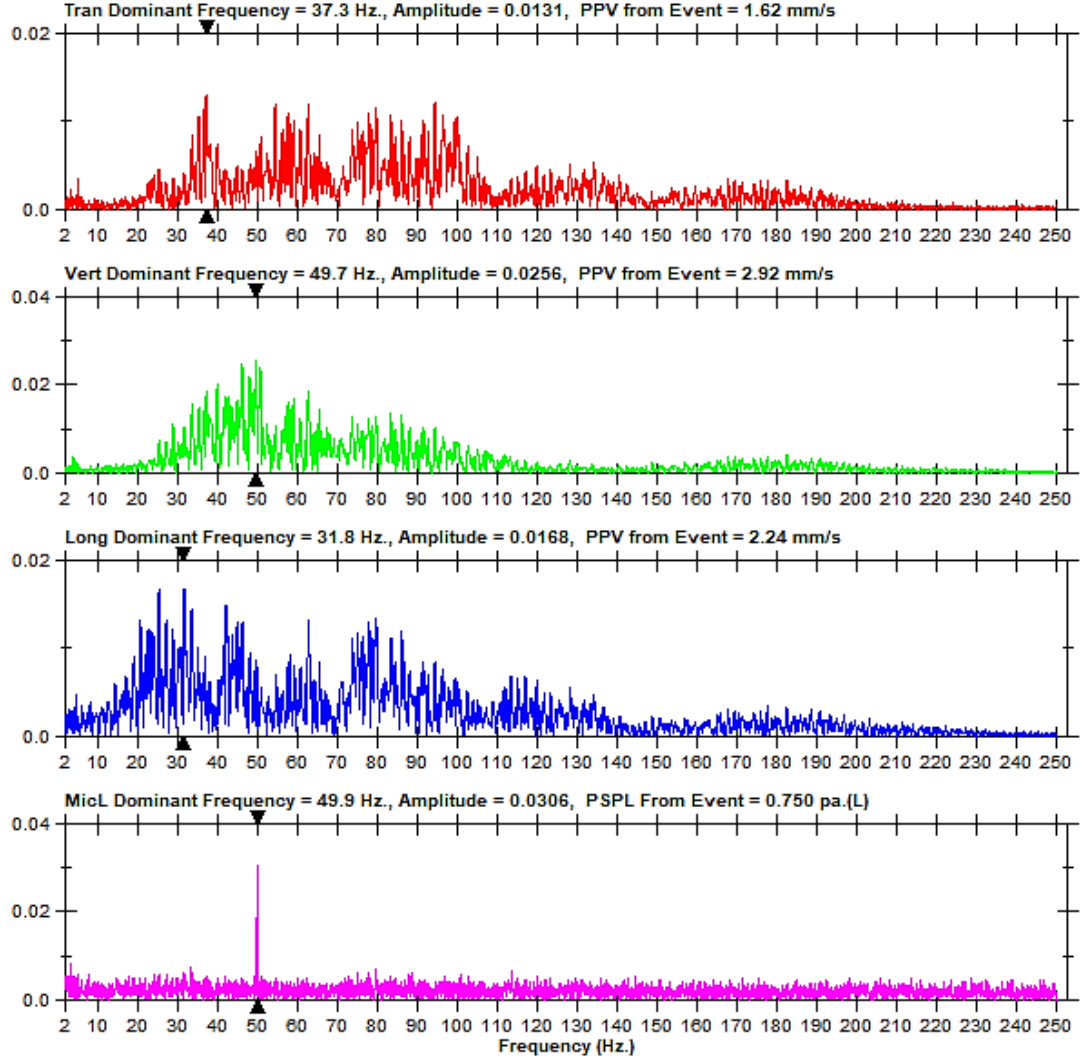
Şekil 4.19. Faaliyet raporunda yer alan parçacık hızı-zaman grafiği örneği

	Tran	Vert	Long	
PPV	1.62	2.92	2.24	mm/s
ZC Freq	85	51	37	Hz
Time (Rel. to Trig)	1.116	0.641	0.024	sec
Peak Acceleration	0.113	0.126	0.0911	g
Peak Displacement	0.00298	0.00757	0.00883	mm
Sensorcheck	Disabled	Disabled	Disabled	
Frequency	***	***	***	Hz
Overswing Ratio	***	***	***	

Şekil 4.20. Örnek bir faaliyet raporu sonucu

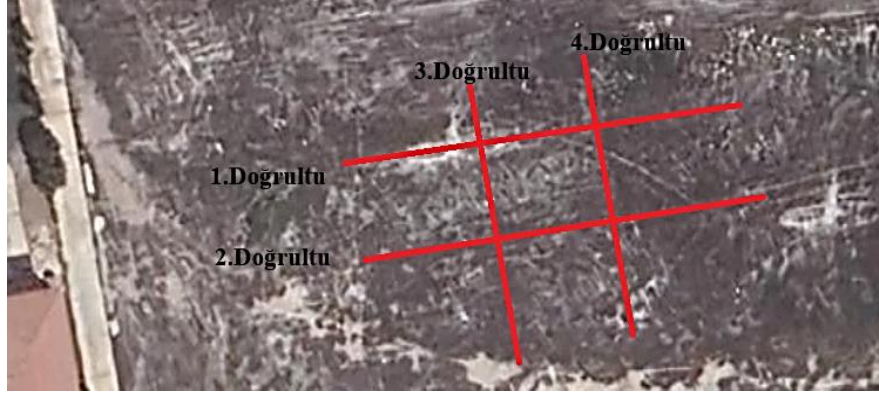
Program tarafından sunulan bir diğer rapor, Fast-Fourier Transform (FFT) raporudur. Bu raporda ise, üç doğrultuda kaydedilen maksimum parçacık hızlarına karşılık gelen titreşim dalgası genlik, frekans seviyelerinin işaretli olduğu genlik-frekans

grafikleri yer almaktadır. Şekil 4.21’de aynı faaliyet raporu olayına ait FFT raporunda yer alan genlik-frekans grafikleri yer almaktadır.



Şekil 4.21. Örnek FFT raporunda yer alan genlik-frekans grafikleri

Tez çalışmasında KOS Atıksu Arıtma Tesisi sahasında 4 doğrultuda her 2 m’de bir ve Selçuk Üniversitesi Kan Merkezi bölgesinde 2 doğrultuda her 2,5 m’de bir Instanetel Minimate Plus kayıt cihazı ile ölçümler alınmıştır (Şekil 4.22 ve Şekil 4.23).



Şekil 4.22. KOS Atıksu Arıtma Tesisi sahasında yapılan Instantel Minimate Plus ölçüm doğrultuları



Şekil 4.23. Selçuk Üniversitesi Kan Merkezi binası bölgesinde yapılan Instantel Minimate Plus ölçüm doğrultuları

Bu çalışmada dinamik plaka deney sistemi etki faktörü olarak kullanılmıştır. Bu deney aleti vasıtasıyla 10 ve 15 kg'lık yükler belirli bir yükseklikten düşürülerek dinamik etki oluşturulmuştur (Şekil 4.24(a)). Her ölçüm noktası için hem 10 hem de 15 kg'lık yük için 3'er adet etki oluşturulup kayıt alınmıştır. Arazide Instantel Minimate Plus cihazı ile yapılan ölçümler için uygulama aşamaları Şekil 4.24'te verilmiştir.



a)



b)

Şekil 4.24. a) KOS Atıksu Arıtma Tesisi sahasında ve b) Selçuk Üniversitesi Kan Merkezi binası bölgesinde yapılan dinamik plaka yükleme deneyi ile dinamik etkinin oluşturulması ve Instantel Minimate Plus cihazları ile ölçümlerin alınması

4.2. Laboratuvar deneyleri

FMC fabrika sahasında yapılan sondajlar esnasında Shelby tüpleri ve SPT deneyi numune alıcısı ile alınan zemin numuneleri laboratuvara getirilmiştir. SPT numune alıcısı ile alınan örselenmiş zemin numuneleri ile zemin tabakalarının zemin sınıfları ve fiziksel özelliklerinin belirlenmesi için doğal su muhtevası tayini, elek analizi, hidrometre, özgül ağırlık ve kıvam limiti deneyleri gerçekleştirilmiştir.

Shelby tüplerinden alınan örselenmemiş zemin numuneleri ile doğal birim hacim ağırlıklar belirlenmiş ve rezonant kolon, üç eksenli basınç (UU), kesme kutusu ve konsolidasyon deneyleri gerçekleştirilmiştir. Tüm laboratuvar deney sonuçlarının ortak değerlendirilmesi ile her saha için zeminin tabakalanma durumu, tabaka kalınlıkları, zemin sınıfları, fiziksel özellikleri, dayanım ve oturma parametreleri ile dinamik zemin parametreleri belirlenmiştir.

KOS Atıksu Arıtma Tesisi sahasından alınan zemin numuneleri ile sadece rezonant kolon deneyleri yapılmıştır. Zeminin tabakalanma durumu, zemin sınıfları, zemin tabakalarının fiziksel özellikleri ile dayanım ve oturma parametreleri, bölge zemininde daha önce yapılmış zemin etüt raporları ile belirlenmiştir.

Selçuk Üniversitesi Kan Merkezi binasının olduğu sahada sondaj çalışması yapılmamıştır. Zemin tabakalanma durumu, zemin sınıfları ve fiziksel özellikleri ilgili saha için daha önce hazırlanan mevcut zemin etüt raporundan elde edilmiştir.

4.2.1. Doğal su içeriği tayini

SPT numune alıcısı ile alınan örselenmiş zemin numuneleri poşetlenip, hava almayacak şekilde muhafaza edilerek laboratuvara getirilmiştir. Zemin numuneleri etüvde kurutulmuş ve su muhtevaları belirlenmiştir (Şekil 4.25).



Şekil 4.25. Doğal su muhtevası tayini

4.2.2. Yıkamalı elek analizi ve hidrometre deneyleri

Zeminlerin dane boyutlarının belirlenmesi, zeminlerin sınıflandırılması, derecelenme durumunun belirlenmesi için elek analizi ve hidrometre deneyleri yapılmıştır. Elek ve hidrometre analizlerinin beraber değerlendirilmesi ile dane çapı dağılım eğrisi çizilmiştir. Bu deneyler, (ASTM-D422 (63), 2002), (ASTM-D7928 (16), 2017) ve (ASTM-D2487 (06), 2008) standartları kullanılarak yapılmıştır.

Yıkamalı elek analizi için zemin numuneleri bir gün önceden ıslatılmıştır (Şekil 4.26).



Şekil 4.26. Yıkamalı elek analizi için ıslatılmış zemin numuneleri

Yıkamalı elek analizi için No.200 (0,075 mm) elek kullanılarak yıkama işlemi yapılmıştır. Yıkamalı elek analizi esnasında zemin kaybı olmamasına dikkat edilmiştir. Yıkama sonunda No.200 altındaki ince daneli zeminler bir kaptaki, No.200 üstündeki iri daneli zeminler ise başka bir kaptaki etüve atılıp kurutulmuştur (Şekil 4.27).

Yıkamalı elek analizi yapılan zemin numuneleri kurutulduktan sonra No.200 üstünde kalan kısım ile elek analizi, No.200 altında kalan kısım ile hidrometre deneyi yapılmıştır (Şekil 4.28).



Şekil 4.27. Yıkamalı elek analizi ile ince ve iri daneli zeminin ayrıştırılması ve etüvde kurutulması



Şekil 4.28. Yıkamalı elek analizi sonrası kurutulmuş No.200 altı ve üstü zemin numuneleri

Elek analizinde kullanılan elekler; 20 mm, 6 mm, 4.75 mm (No.4), 2 mm (No.10), 1,18 mm (No.16), 0,425 (No.40), 0,150 (No.100) ve 0,075 (No.200)'dir. Elekler 20 mm elekten başlanıp, No.200 eleğe kadar sıralanmıştır ve zemin numunesi elek takımının üzerine dökülüp, elekler yaklaşık 15 dk sarsılmıştır (Şekil 4.29).



Şekil 4.29. Elek analizi deney ekipmanları

Şekil 4.30'da görüldüğü gibi sarma işlemi sonunda tüm eleklerde kalan zemin miktarları ve yüzde geçenleri belirlenmiştir.



Şekil 4.30. Elek analizi sonrası eleklerde kalan zemin daneleri

No.200 altındaki kurutulmuş zemin numunesi öğütüldükten sonra, No.200 elekten elenmiş ve sonra elek altında kalan zemin numunesi ile hidrometre analizi yapılmıştır (Şekil 4.31).



Şekil 4.31. No.200 altı zemin numunesinin öğütülüp hidrometre deneyine hazırlanması

Hidrometre analizi için, öncelikle 1000 ml saf su ile 40 gr. dağıtıcı madde (sodyumhegzametafosfat) karıştırılmıştır (Şekil 4.32). Daha sonra 50 gr. kuru zemin numunesi 125 ml saf su-dağıtıcı madde karışımı ile ıslatılıp 24 saat bekletilmiştir.



Şekil 4.32. Damıtık su ile dağıtıcı madde karışımının hazırlanması

24 saat sonunda karışım 1 dk karıştırıldıktan sonra, mezüre boşaltılıp 1000 ml çizgisine kadar saf su doldurulmuştur. Mezürün ağzı tıpa ile kapatılıp, ters-düz edilerek 1 dk çalkalanmıştır. Çalkalama tamamlandıktan sonra mezür düz zemine yerleştirip kronometre başlatılmıştır ve hidrometre içerisine bırakılmıştır. 15 sn, 30 sn, 1 dk, 2 dk, 4 dk, 8 dk, 15 dk, 30 dk, 1 s, 2 s, 4 s ve 24 s hidrometre okumaları alınmıştır ve sıcaklık ölçümleri yapılmıştır (Şekil 4.33). Hidrometre okumalarına, menisküs düzeltmesi, sıcaklık düzeltmesi ve dağıtıcı madde düzeltmeleri yapılmıştır.



Şekil 4.33. Hidrometre deney aşamaları

4.2.3. Özgül ağırlık tayini

Dane özgül ağırlığı, piknometre deneyi ile belirlenmiştir. Bu deney (ASTM-D854 (02), 2002) standardına uygun olarak yapılmıştır. Deney için 100 ml'lik piknometre kullanılmıştır. Deney için No.4 altı hava kurusu zemin numunesinden çeyrekleme yöntemi ile 20 gr. zemin numunesi alınmıştır. Deney numunelerine higroskopik nem düzeltmesi uygulanmıştır. Deney anında 20°C özgül ağırlık değerinin belirlenmesi için suyun sıcaklığı ölçülmüştür, özgül ağırlık değeri düzeltilmiştir. Deney aşamaları Şekil 4.34'te verilmiştir.

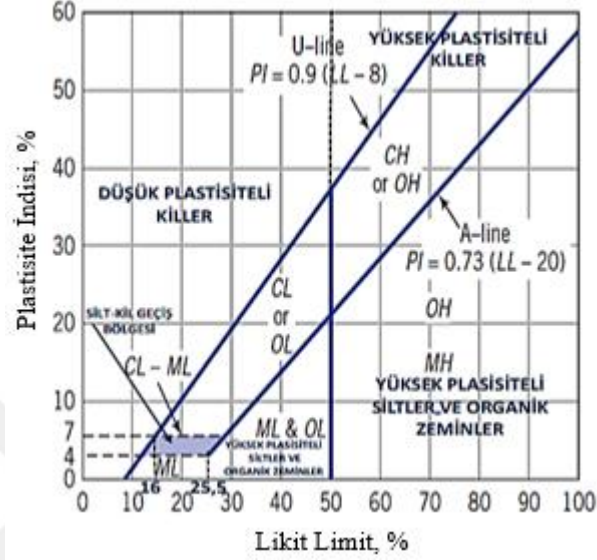


Şekil 4.34. Piknometre deneyi aşamaları

4.2.4. Kıvam (Atterberg) limiti deneyleri

Kıvam limiti deneyleri (ASTM-D4318 (10), 2010) standardına göre yapılmıştır. Araziden alınan örselenmiş zemin numunesi etüvde kurutulduktan sonra tokmakla

ufalanmış ve No.40 (0,425 mm) elekten elenmiştir. Likit limit ve plastik limit deneyleri bu numuneler ile yapılmıştır. Likit limit ve plastik limit deney sonuçları zemin tabakalarının zemin sınıflarının belirlenmesinde kullanılmıştır. Şekil 4.35'te zemin sınıflandırmasında kullanılan *plastisite kartı* yer almaktadır.



Şekil 4.35. Plastisite kartı

4.2.4.1. Likit limit deneyi

Likit limit tayini için Casagrande yöntemi kullanılmıştır. No.40 elekten elenmiş zemin numunesi, zemine kuru kütlenin belirli yüzdesi kadar su eklenerek yaklaşık 10 dk karıştırılmıştır. Daha sonra bu numune desikatörde bir gün bekletilmiştir. Ertesi gün numune iyice karıştırılıp deneylere başlanmıştır.

Şekil 4.36'da deney aşamaları verilmiştir. Deney sonunda su içeriği tayini için tasın içinden zemin numunesi alınmış ve etüve konulmuştur. Deney su miktarı artırılarak en az 3 defa tekrarlanmıştır. Belirlenen su içerikleri ve darbe sayıları yarı logaritmik grafiğe aktarılmıştır. Deney sonuçlarını gösteren üç veya daha fazla noktayı temsil edecek en uygun doğru çizilip, bu doğru üzerinde 25 darbeye karşılık gelen su içeriği değeri ile likit limit olarak belirlenmiştir.



Şekil 4.36. Casagrande deneyi

4.2.4.2. Plastik limit deneyi

Elle yuvarlama yöntemi ile plastik limit tayini için yaklaşık 20 gr. zemin numunesi 3 parçaya ayrılmıştır ve 3 adet plastik limit deneyi yapılmıştır. Alınan zemin numunesi cam plaka üzerinde elimizin ayası ile yaklaşık 3 mm'ye kadar inceltirilmiştir. Zemin numunesinin plastik limit değeri her numune için yapılan üç deneyin ortalaması alınarak belirlenmiştir.

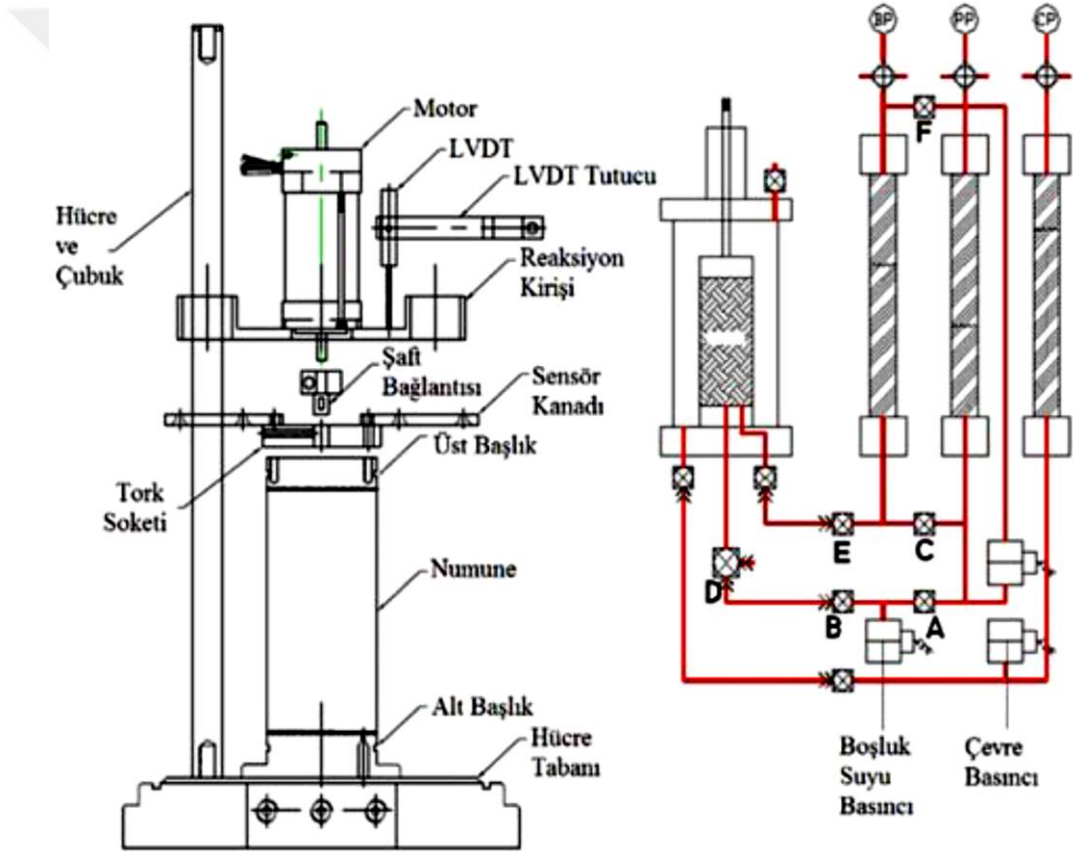
4.2.5. Rezonant kolon deneyi

Rezonant kolon deneyi, dinamik zemin parametreleri olan kayma modülü ve sönüm oranının laboratuvarında belirlenmesi için yapılan deneylerden biridir. Rezonant kolon deneyi ile, 10^{-4} ile 10^{-1} birim kayma deformasyon genliği aralığında zeminlerin dinamik özellikleri belirlenebilir. Bu deney sistemi, çubuklarda dalga yayılımı teorisine dayalı olarak çalışmaktadır. Deney esnasında numuneye boyuna titreşim ya da burulmalı titreşim uygulanarak, basınç dalga hızı, V_p , ve kayma dalga hızı, V_s , belirlenmektedir. Deney (ASTM-D4015(92), 2000) standardına göre yapılmaktadır.

Tez çalışmasında kullanılan ve Eskişehir Osmangazi Üniversitesi, İnşaat Mühendisliği Bölümü, Geoteknik Laboratuvarı'nda bulunan rezonant kolon deney seti ve basınç sisteminin şematik gösterimi sırasıyla Şekil 4.37 ve Şekil 4.38'de yer almaktadır. Deney setinde bulunan yükleme mekanizmasında alt başlık sabit ve üst başlık serbesttir.



Şekil 4.37. Rezonant kolon deney seti düzeneği



Şekil 4.38. Deneylerde kullanılan rezonant kolon deneyi aletinin ve basınç panelinin boy kesiti (Güler, 2021)

Rezonant kolon deney numunelerini hazırlamak için Shelby tüpleri ile araziden alınan zemin numuneleri laboratuvara getirildikten sonra, bu tüplerden 50/100 mm ya da 50/250 mm boyutlarındaki silindirik tüpler ile örselenmemiş zemin numuneleri alınmıştır. Numune alınma işlemi öncesinde tüplerin içi gres yağı ile yağlanmıştır. Tüp ağırlıkları belirlenmiştir. Numune alım işleminden sonra tüpler tekrar tartılmış ve doğal

yoğunluklar belirlenmiştir. Daha sonra tüpler streç film ile iyice sarılmıştır (Şekil 4.39). Bu tüplerden alınan 50/100 mm numuneler üzerinde rezonant kolon deneyleri yapılmıştır.



Şekil 4.39. Shelby tüplerinde örselenmemiş zemin numunesi alınması

Rezonant kolon deneyin yapılış aşamaları aşağıdaki sıralanmıştır.

- Deney numunesinin hazırlanması

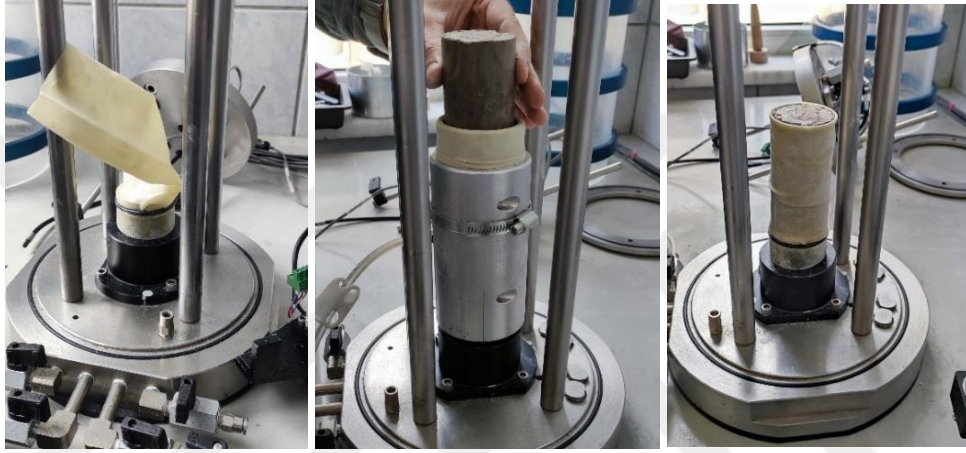
Shelby tüplerinden 50/250 mm boyutlarındaki tüpler ile alınan zemin numuneleri, numune çıkarıcı yardımı ile tüplerden çıkarılmıştır. Daha sonra zemin numuneleri 50/100 mm boyutlarında kesilip düzeltilmiştir (Şekil 4.40).



Şekil 4.40. Rezonant kolon deney numunelerinin hazırlanma aşamaları

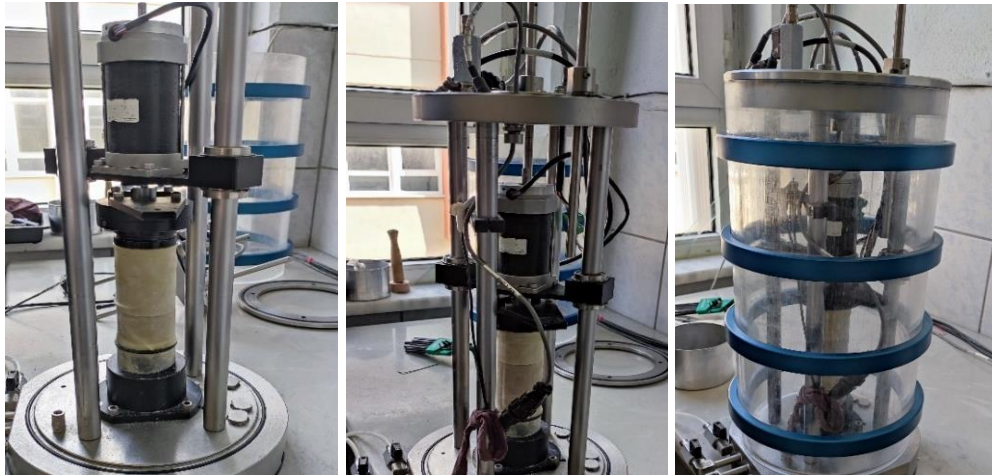
- Numunenin deney hücresine yerleştirilmesi

50/100 mm boyutlarındaki zemin numunesi aynı klasik üç eksenli basınç deneyinde olduğu gibi lastik membran içerisine yerleştirilmiştir. Bunun için, deney düzeneğinin alt başlığına membran takılıp oring yardımı ile sabitlenmiş ve sızdırmazlık sağlanmıştır. Daha sonra membran numune yerleştiriciye geçirilmiş ve vakum uygulanarak numune membran içerisine yerleştirilmiştir ve numune yerleştirici çıkarılmıştır (Şekil 4.41).



Şekil 4.41. Numunenin membran içerisine yerleştirilmesi

Numunenin üzerine üst başlık yerleştirilip, motor kısmı bağlantısı yapıp proximetre takıldıktan sonra hücre yerleştirilip bilgisayar bağlantıları yapılmıştır (Şekil 4.42).

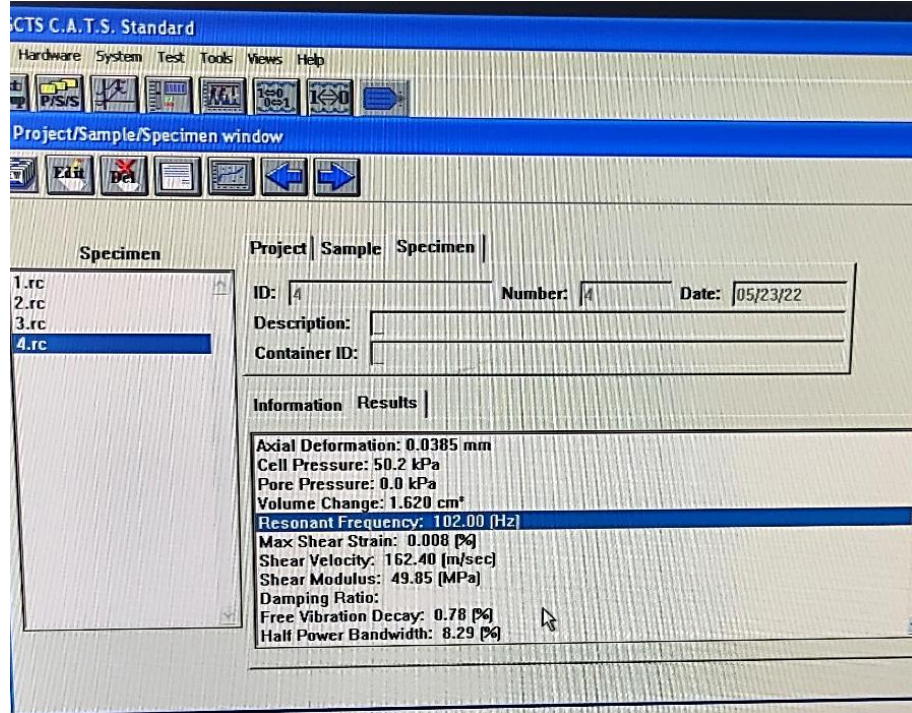


Şekil 4.42. Üst başlık ve hücrenin yerleştirilme aşamaları

- Numunenin Konsolide Edilmesi ve Numuneye Kuvvet Uygulanması

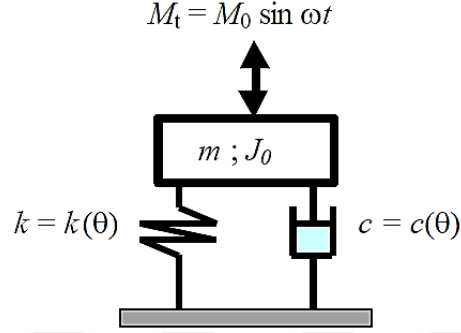
Sistemde numuneye yük üst başlıktan uygulanmaktadır. Zemin numunesi ilk olarak arazi koşullarındaki çevre basıncına maruz bırakılarak konsolide edilmiştir. Çevre basıncı uygulamak için sisteme hava verilmiştir. Daha sonra üst başlıktaki dinamik yükleme sistemi aracılığıyla elastik olarak belirli bir dönme açısı ile döndürülerek burulmaya maruz bırakılmıştır ve numune tekrar ilk haline geri gelmiştir.

Deney başında maksimum kayma modülünün belirlenmesi için gerekli olan minimum kayma birim deformasyonu değeri, 10^{-3} elde edilene kadar frekans ve tork değiştirilerek deney çalışma frekansı aralığı belirlenmiştir. Bu kayma birim deformasyonu genliği elde edildikten sonra rezonans frekansının çalışma frekansı aralığında olup olmadığı kontrol edilmiştir. Eğer rezonans frekansı bu aralıkta ise tork kademeli olarak artırılıp, maksimum birim kayma deformasyon genliği, 10^{-1} elde edilene kadar deney tekrar ettirilmiştir. Her kademedede uyarı kapatıldıktan sonra zemin kolonu, serbest titreşime maruz bırakılmıştır. Böylece zeminin kayma modülü ve sönüm oranı, çevre basıncı ve kayma birim deformasyon genliğinin bir fonksiyonu olarak belirlenmiştir. Şekil 4.43'te bir numune için yükleme kademesi sonunda ölçüm sonuçlarının yer aldığı ekran görüntüsü yer almaktadır.



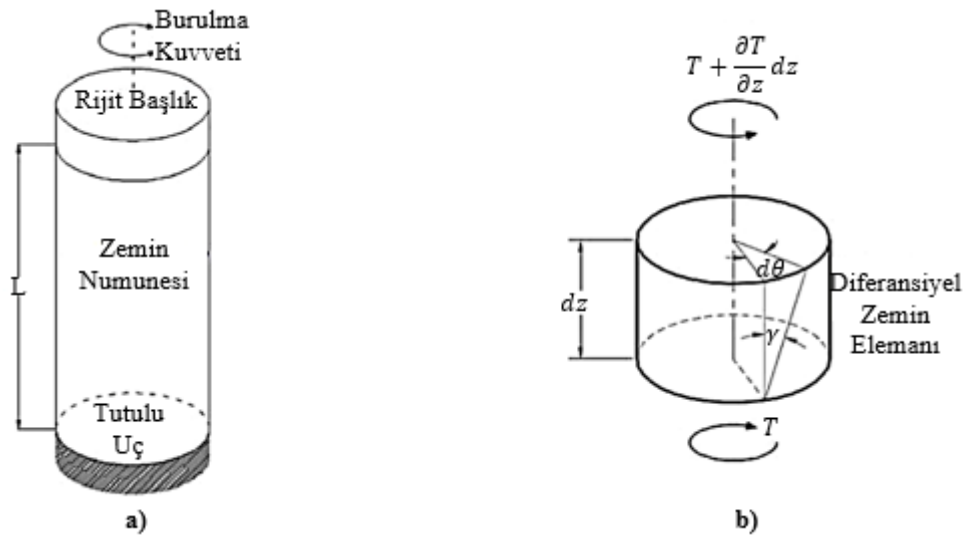
Şekil 4.43. Yükleme kademesi sonrası ölçüm sonuçlarının program özeti

Rezonant kolon deney sistemi, bir yay ve bir sönüm elemanı ile temsil edilen zemin numunesi ile desteklenen tek bir kütle ile temsil edilen titreşim cihazından oluşan tek serbestlik dereceli bir sistem olarak düşünülebilir. Rezonant kolon deney sisteminde, birbirine paralel olarak bağlanmış bir yay ve bir sönüm elemanından oluşan Kelvin-Voigt modeli kullanılmaktadır (Şekil 4.44) ve burulma harmonik titreşimleri için hareket denklemleri elde edilmektedir.



Şekil 4.44. Rezonant Kolon Deneyi için Kelvin-Voigt modeli (Bratosin & Sireteanu, 2002)

Şekil 4.45(a)'da Kelvin-Voigt modeli ile hazırlanmış bir ucu sabit diğer ucu serbest zemin numunesi, Şekil 4.45(b)'de ise her iki ucuna tork uygulanmış diferansiyel zemin numunesi yer almaktadır. Buradan, hareket denklemi Bağıntı (4.1)'deki gibi yazılabilir. Bu bağıntıda T , numuneye uygulanan tork, G , numunenin kayma modülünü ve J ise kesit alanın polar atalet momentidir.



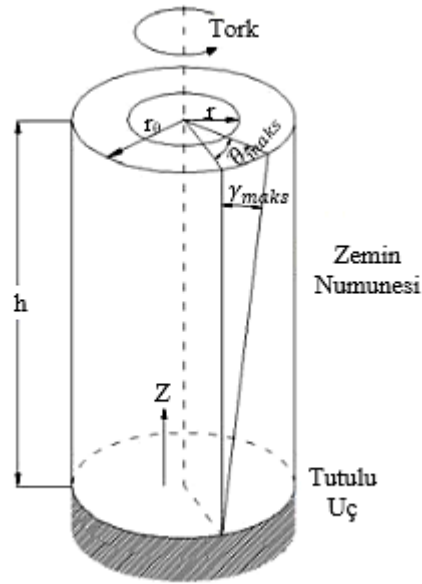
Şekil 4.45. a) İdealize edilmiş sabit-serbest rezonant kolon numunesi, b) Diferansiyel zemin numunesi

$$T = GJ \frac{d\theta}{dz} \quad (4.1)$$

Hareket denklemi yardımıyla, burulma momenti etkisiyle oluşturulan kayma dalgasının, zemin numunesi boyunca ilerlemesi ile kayma dalgası hızı elde edilir. Bağıntı (4.2)'de yer alan kayma dalgası hızı ile kayma modülü arasındaki ilişki yardımıyla kayma modülü belirlenir.

$$G = \rho * V_s^2 \quad (4.2)$$

Burulma etkisine maruz içi dolu silindirik rezonant kolon zemin numunesinin kayma birim deformasyonu genliği, zemin numunesinin merkezinde sıfır ya da minimum, zemin numunesinin dış yüzeyinde ise maksimumdur (Şekil 4.46). Kayma birim deformasyonu genliği, Bağıntı (4.3) ile hesaplanmaktadır. Bu bağıntıda, r , zemin numunesinin merkez ekseninden olan mesafe, θ_{maks} , maksimum dönme açısı ve h , numune yüksekliğidir.

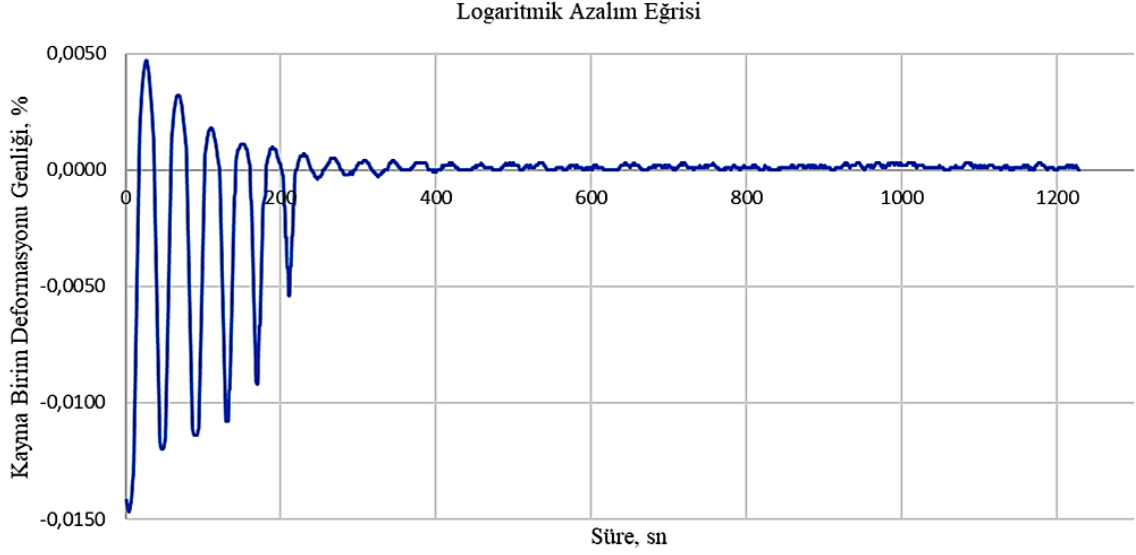


Şekil 4.46. Zemin numunesinin kayma birim deformasyonu genliği

$$\gamma = \frac{r\theta_{maks}}{h} \quad (4.3)$$

Rezonant kolon deneyi ile sönüm oranı, rezonans tepe noktasının bant genişliğinin değerlendirilmesi yöntemi olan yarım güç bant genişliği yöntemi ya da logaritmik azalım

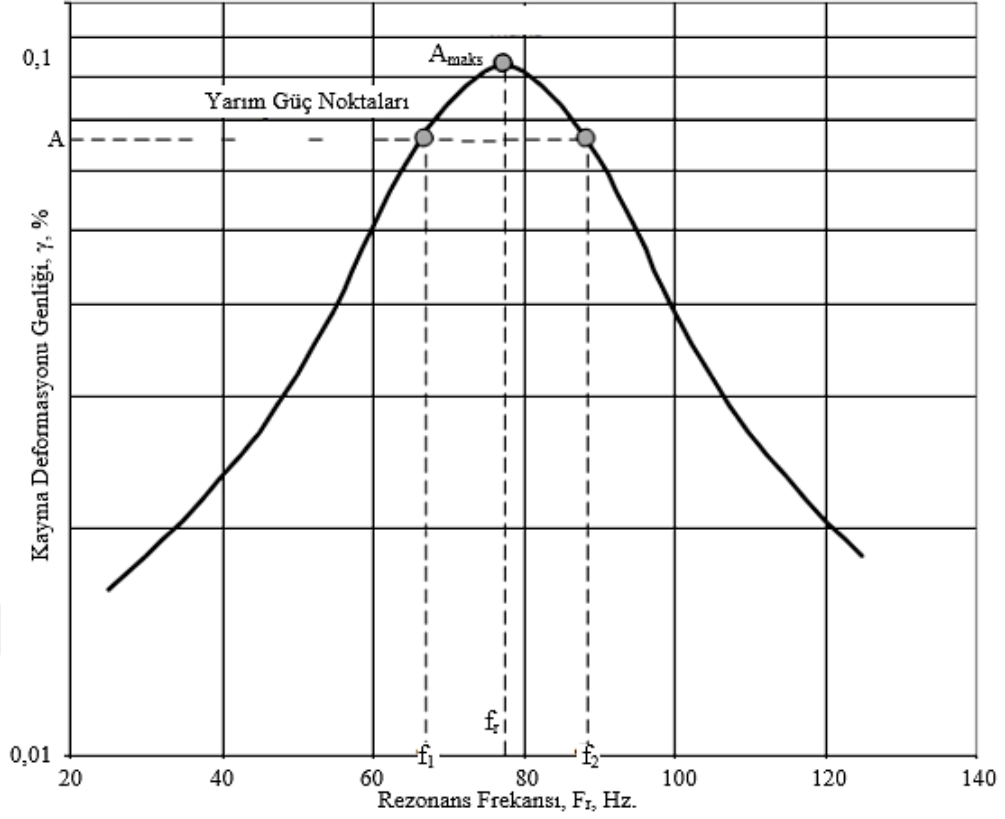
yöntemi ile belirlenebilir. Şekil 4.47’de rezonant kolon deneyinde, tork uygulanıp sonlandırılma aşamasından sonra, numunenin serbest titreşimi aşamasından elde edilen örnek bir logaritmik azalım eğrisi yer almaktadır. Bu eğri yardımıyla, birim deformasyon genlikleri kullanılarak sönüm oranı belirlenebilir.



Şekil 4.47. Deney sonucunda elde edilen logaritmik azalım eğrisi

Sönüm oranının belirlenmesi için kullanılan bir diğer yöntem ise yarım güç bant genişliği yöntemidir. Bu yöntem ile sönüm oranının belirlenmesi için frekans-kayma birim deformasyon genliği grafiği elde edilir (Şekil 4.48). Bu grafikte, rezonans frekansına (f_r) karşılık gelen kayma birim deformasyon genliğinin $1/\sqrt{2}$ katına karşılık gelen frekans değerleri (f_1 ve f_2) belirlenir. Malzeme sönüm oranı, D , ise yaklaşık olarak Bağlantı (4.4) ile hesaplanmaktadır.

$$D = \frac{f_2 - f_1}{f_r} \quad (4.4)$$



Şekil 4.48. Yarım güç bant genişliği yöntemi

Rezonant kolon deney sonuçları değerlendirilerek, kayma modülü, sönüm oranı değerleri elde edilmiştir. Bu değerler kullanılarak, birim deformasyon genliğine bağlı olarak kayma modülü, sönüm oranı ve normalize edilmiş kayma modülü eğrileri elde edilmiştir. Bu eğrilerin elde edilmesi için eğri uydurma aşamaları ORIGINPRO 2023 programı ile yapılmıştır. Elde edilen bu eğriler, literatürde yer alan eğriler ile karşılaştırılmış ve uyumu/uyumsuzluğu belirlenmiştir.

4.3. Sonlu Elemanlar Programı (PLAXIS 2D) ile zemin modellemesi

Tez çalışmasında, yapılan arazi deneyleri ve laboratuvar deneyleri ile zemin tabakalarının kalınlıkları, sınıfları ve fiziksel özellikleri ile dinamik zemin parametreleri belirlenmiştir. Elde edilen bu parametreler kullanılarak FMC fabrika sahası ve KOS Atıksu Arıtma Tesisi sahaları PLAXIS 2D sonlu elemanlar programı yardımıyla modellenmiştir.

Zemin tabakalarının modellenmesi aşamalarında hem arazi ve hem de laboratuvar deneyleri ile elde edilen dinamik zemin parametreleri kullanılmıştır. Arazi deneyleri ile

elde edilen kayma modülü değerleri, laboratuvar deneyleri ile elde edilen değerlerden oldukça farklıdır. Dinamik kayma modülünün değişmesi, zeminin rijitliğini değiştirmekte ve bu durum dinamik etkiler nedeniyle oluşan dalgaların zemin içerisinde yayılması etkilemektedir. Bu durum göz önünde bulundurularak arazi ve laboratuvar deneyleri ile elde edilen dinamik zemin parametreleri kullanılarak, PLAXIS 2D sonlu elemanlar programında ayrı ayrı makine-temel-zemin sistemi modellenmiştir.

Makine-temel-zemin sisteminin modellenmesindeki amaç, harmonik yük oluşturan makinelerin çalışma frekansı ve genliğine ve zeminin tabakalanma durumuna bağlı olarak FMC ve KOS saha zeminleri için en uygun temel tasarımının yapılması ve makinenin çalışma/durma aşamaları ile meydana gelen temel deplasmanları ve temelden belirli uzaklıklarda zemin yüzeyinde oluşan deplasman ve ivmelerin belirlenmesidir.

Makine tipi olarak harmonik yük üreten makineler seçilmiştir. Literatüre göre makine çalışma frekansı 5-50 Hz. arasında ve genliği 25-100 kPa arasında değiştirilmiştir. Temel ağırlığı/makine ağırlığı literatürden 2,1 olarak seçilmiştir (Al-Helo, 2015). Makinenin çalışma süresi 1 sn olarak seçilmiştir.

Modelleme aşaması 3 farklı model oluşturulmuştur. Farklı modellerin oluşturulma amacı zemin sınıfının, tabakalanma durumunun ve zemin parametrelerinin değişimine bağlı olarak temel deplasmanları ile zemin yüzeyinde oluşan deplasman ve ivmelerin belirlenmesidir.

1. Model: FMC fabrika sahası zemin profilinin, rezonant kolon deney sonuçlarının değerlendirilmesi ile oluşturulduğu modeldir. Bu model, ana modeldir. Bu modelde makine çalışma genliği ve frekansı değiştirilerek en uygun temel boyutları ve gömme derinliği belirlenmiş olup diğer modellerde bu değerler kullanılmıştır.

FMC fabrika sahası zemin profili ayrıca, SPT ve MASW deneyleri ile elde edilen zemin parametreleri kullanılarak ayrı ayrı modellenmiştir. Böylece zemin tabakalarının rijitlik farkının, temel deplasmanları ve zemin yüzeyinde oluşan deplasman ve ivmeler üzerindeki etkisi belirlenmiştir.

2. Model: KOS Atıksu Arıtma Tesisi sahası zemin profilinin, rezonant kolon deney sonuçlarının değerlendirilmesi ile oluşturulduğu modeldir. Bu model ayrıca SPT ve MASW sonuçları değerlendirilerek modellenmemiştir.

3. Model: Zemin profilinin literatür verileri kullanılarak yumuşak, orta sert ve sert kil zemin tabaka kombinasyonları ile oluşturulduğu modeldir. Bu modeldeki asıl amaç, zemin tabakalanma durumu ve tabaka rijitliklerinin temel deplasmanları ve zemin yüzeyinde oluşan deplasman ve ivmeler üzerindeki etkisini belirlemektir.

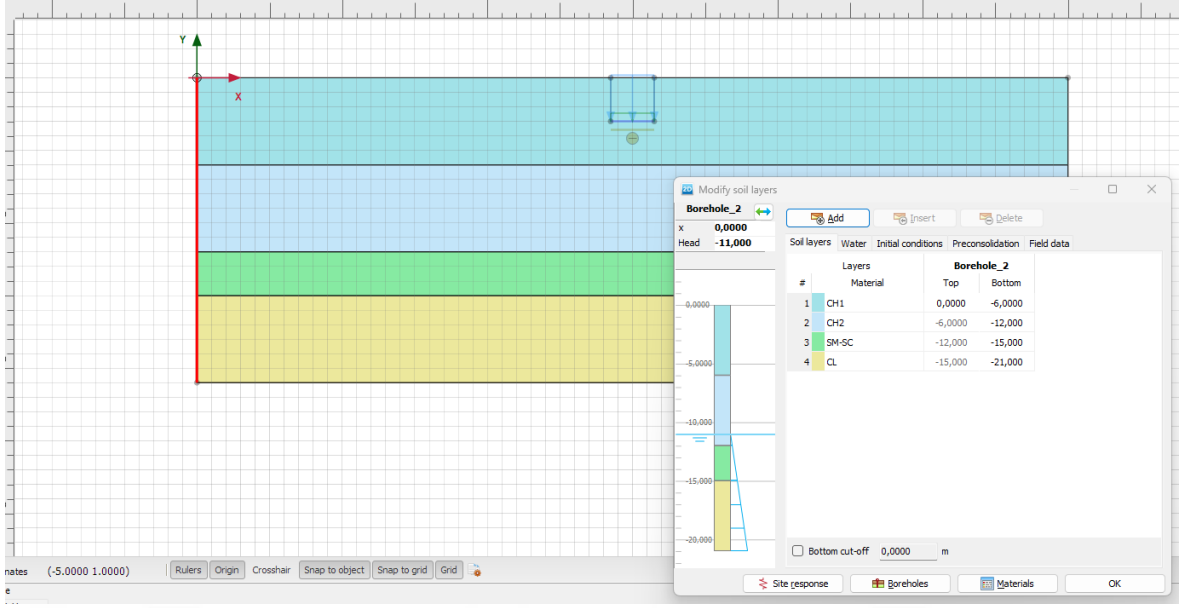
Ayrıca bu modelde, zemin rijitliğine bağlı olarak, makinenin çalışma süresinin temel deplasmanları üzerindeki etkisini belirlemek için, makine çalışma süresi 1 sn, 5 sn, 15 sn ve 60 sn olarak değiştirilerek analizler yapılmıştır.

Modelleme aşamasında, tüm makine-temel zemin sistemi modelleri, makine-temel-zemin sisteminin 3 boyutlu etkisinden dolayı plain-strain, 15-Noded olarak modellenmiştir. Dalga yayılımını incelemek için zemin ortamı, 60 m genişliğinde ve 30 m derinliğinde oluşturulmuştur.

4.3.1. FMC fabrika sahasının modellenmesi

1. Model’de ilk olarak, FMC fabrika sahasından alınan zemin numuneleri üzerinde yapılan rezonant kolon deney sonuçları göz önünde bulundurulmuştur. Zemin tabakalarının elastisite modülleri, deneyler ile belirlenen kayma modülü değerleri kullanılarak belirlenmiştir. Zemin numunelerinin yükleme-boşaltma poisson oranları 0,2 olarak alınmıştır. Analizler sönümlü olarak yapılmıştır ve sönüm oranı değerleri rezonant kolon deney sonuçlarından elde edilmiştir. Zemin tabakaları Hardening Soil Model bünye modeli ile modellenmiştir. Zemin profili, yapılan laboratuvar deneylerinin değerlendirilmesi sonucunda 4 tabaka olarak oluşturulmuştur (Şekil 4.49).

Bu modelde 0-6 m arası yüksek plastisiteli orta sert kil, 6-12 m arası farklı parametrelere sahip yüksek plastisiteli orta sert kil, 12-15 m arası kumlu kil ve 15-21 m arası düşük plastisiteli yumuşak kil zemin olarak modellenmiştir.



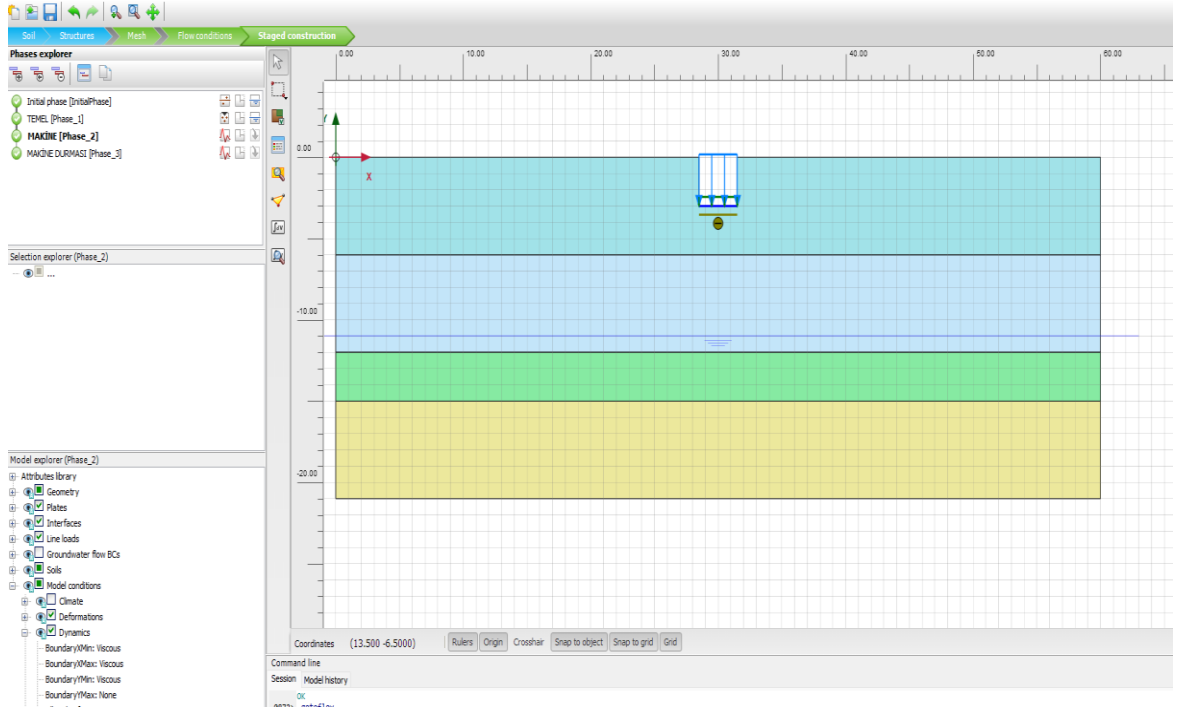
Şekil 4.49. PLAXIS 2D- 1.Model Zemin Profili

Zemin profili oluşturulduktan sonra, zemin yapısı üzerine makine temeli yerleştirilmiştir. Temel, elastik olarak modellenmiştir. Elastisite modülü 2×10^7 kN/m², poisson oranı 0,15 ve birim hacim ağırlığı 24 kN/m³ olarak alınmıştır. Yapı-zemin etkileşimi için temel tabanında interface oluşturulmuştur. Makine temel kalınlığı 0,5 m ve temel genişliği 6 m olarak tasarıma başlanmıştır. Modellemede temel boyutlarına ek olarak gömme derinliğinin bir parametre olarak ele alınmıştır. Çünkü makine temellerinin tasarımında en önemli parametrelerden biri temel gömme derinliğidir. Temel gömme derinliği değiştirilerek temel deplasmanları azaltılabilmektedir. Bu amaçla analizlerde gömme derinliği değiştirilmiştir. Temel kalınlığı, genişliği ve gömme derinliği değiştirilerek yapılan analizler sonucunda, en uygun temel kalınlığı, genişliği ve gömme derinliği belirlenmiştir (Şekil 4.49).

Makine ağırlığı, temel ağırlığı belirlendikten sonra 2,1 oranı kullanılarak elde edilmiştir. Elde edilen bu ağırlık, temel genişliği boyunca yayılı yük olarak etkiltilmiştir. Makinenin çalışmasından kaynaklı olarak oluşan dinamik etkileri belirlemek için, makine çalışma genliği ve frekansı yayılı yükün dinamik bileşenine tanımlanmıştır.

Makine-temel-zemin sistemi analizleri için mesh işlemi orta sıklıkta gerçekleştirilmiştir. Analizin hesap aşamaları tanımlanmıştır. Bu aşamalardan ilki zemin ortamının geostatik durumunu gösteren başlangıç fazıdır. 2. Aşama, temelin inşa aşaması olup, temelin ve makinenin statik yükleri tanımlanmıştır. 3. Aşama, makinenin çalışması temsil eden aşamadır. Bu aşamada, makine yayılı yükünün dinamik bileşeni etkinleştirilmiş ve dinamik analiz yapılmıştır. Dinamik analiz süresi 1 sn olarak

gerçekleştirilmiştir. 4. Aşama ise, makinenin durması durumunu temsil eden aşamadır. Bu aşamada yükün dinamik bileşeni etkisizleştirilmiş ve dinamik analiz yapılmıştır. Analiz süresi 1 sn olarak seçilmiştir. Dinamik analiz aşamalarında, dinamik etki nedeniyle oluşan dalgaların, zemin ortamı sınırlarından yansıyıp geri dönmesini engellemek için X_{min} , X_{max} ve Y_{min} sınır şartları viskoz olarak düzenlenmiştir (Şekil 4.50).

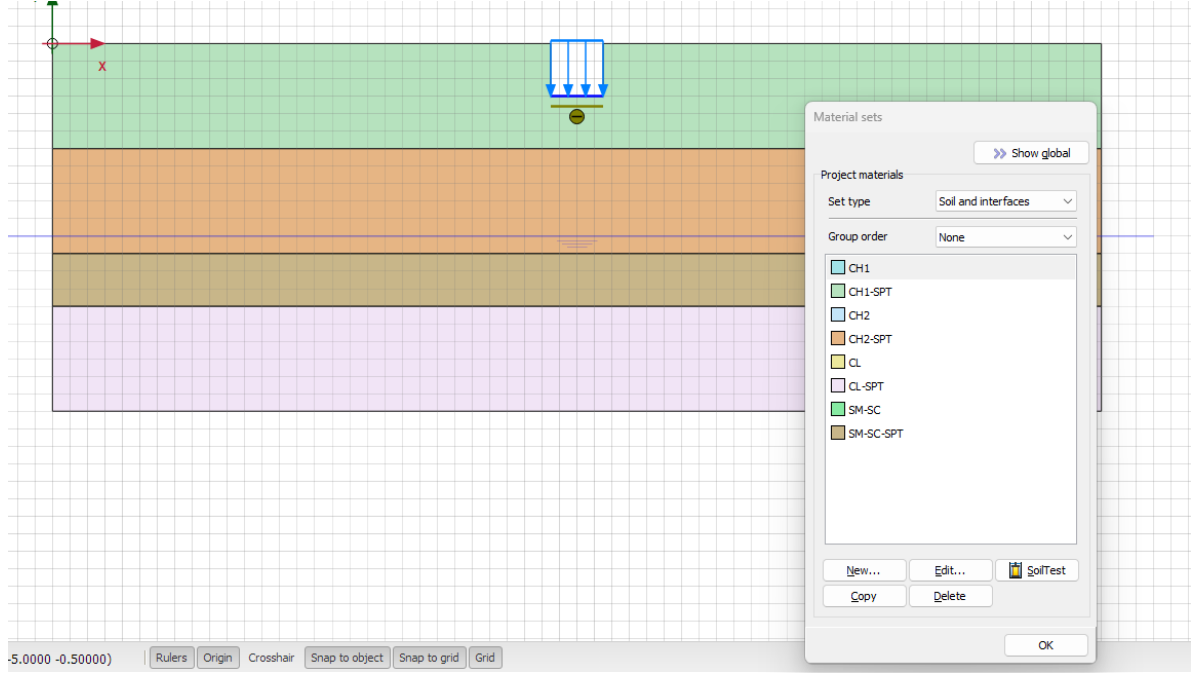


Şekil 4.50. Analiz hesap aşamaları

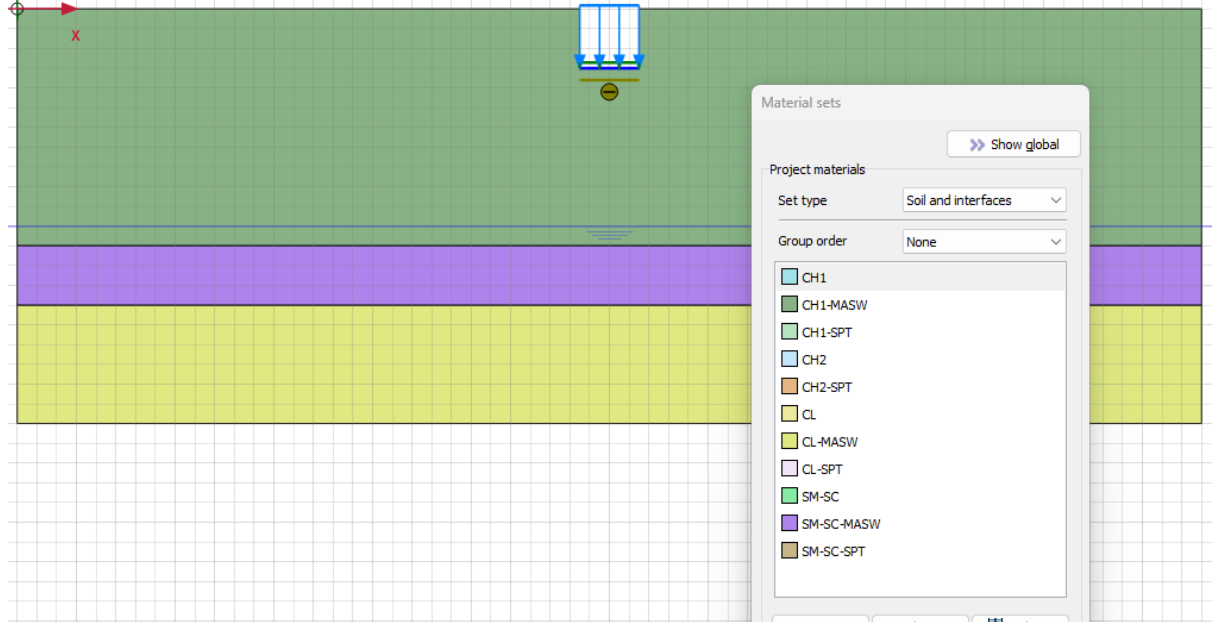
Yapılan analizler sonucunda temel deformasyonları, zemin yüzeyinde temelden belirli uzaklıklarda meydana gelen deformasyonlar ve ivmeler değerlendirilmiştir. Temel boyutları ve gömme derinliğine karar verilmiştir. Ayrıca deformasyonların en fazla olduğu, makine çalışma frekansı ve genliği en olumsuz yükleme koşulu olarak belirlenmiştir. Diğer modellemelerde, bu modelde belirlenen parametreler esas alınarak modellemeler yapılmıştır.

1. Model daha sonra, zemin tabakalarının rijitlik değişiminin deplasman ve ivmeler üzerindeki etkisini belirlemek için, ayrı ayrı SPT ve MASW deneylerinden elde edilen dinamik zemin parametreleri kullanılarak modellenmiştir. SPT deney sonuçlarının değerlendirilmesi ile zemin profili 4 tabaka olarak ve MASW deney sonuçlarının değerlendirilmesi ile zemin profili 3 tabaka olarak Hardening Soil Model ile modellenmiştir (Şekil 4.51, Şekil 4.52). Bu analizlerde makine yükleri ve temel boyutları ve analizin çözüm aşamaları ilk model ile aynı olacak şekilde modellenmiştir. Böylece

zemin parametrelerinin değişiminin temel deformasyonları, zemin yüzeyinde meydana gelen deformasyon ve ivmeler ile boşluk suyu basıncı üzerindeki etkisi araştırılmıştır.



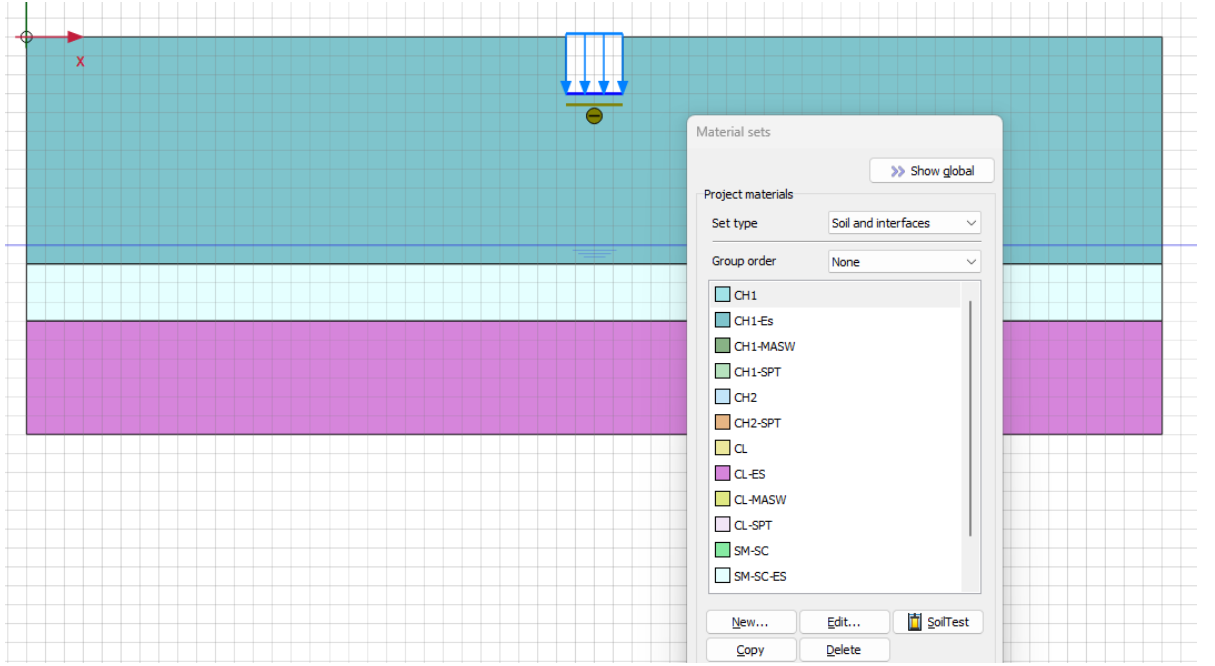
Şekil 4.51. SPT verileri ile oluşturulmuş zemin profili



Şekil 4.52. MASW verileri ile oluşturulmuş zemin profili

Son olarak 1. Model, literatürde yer alan statik elastisite modülü değerleri kullanılarak modellenmiştir. Zemin profili 4 tabaka olarak modellenmiştir. Rezonant kolon ve arazi deney sonuçları kullanılarak oluşturulan modellerde, dinamik kayma

modülünden elastisite modülü belirlenmiş olup bu parametreler kullanılmıştır. Kayma modülü ile elde edilen elastisite modülleri statik elastisite modüllerinden daha büyüktür. Statik parametreler kullanılarak zemin rijitlikleri azaltılmış ve dinamik etki altında temel deformasyonları, zemin yüzeyinde oluşan deplasman ve ivme değişimleri irdelenmiştir (Şekil 4.53).



Şekil 4.53. Statik parametreler ile oluşturulan zemin modeli

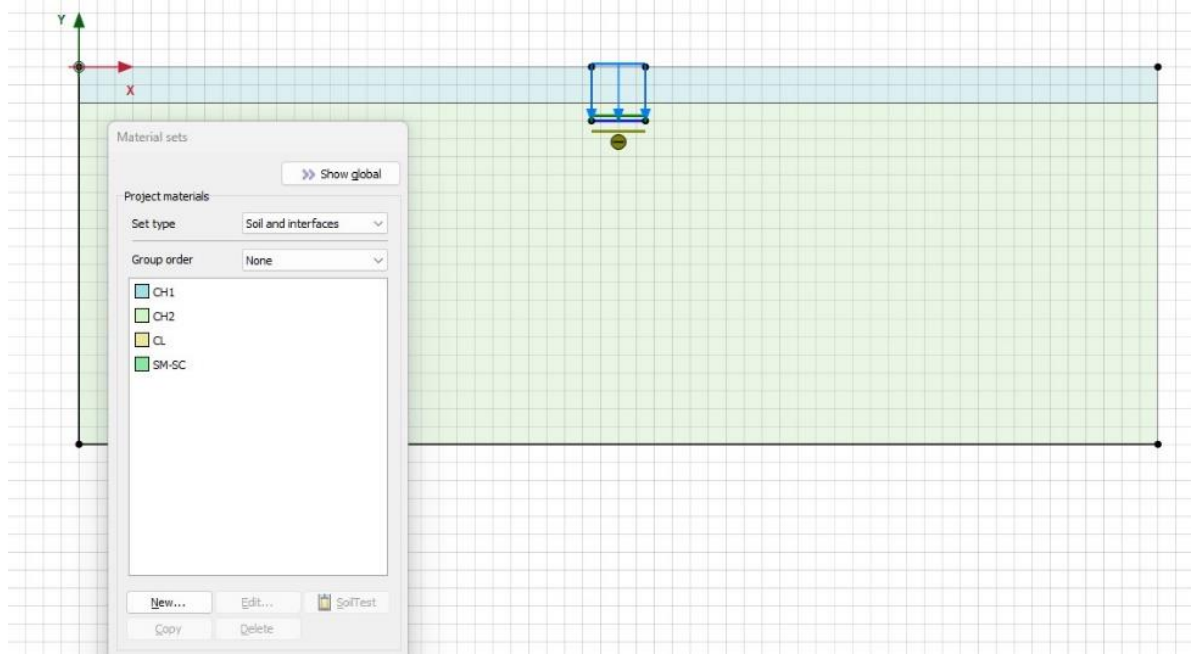
4.3.2. KOS Atıksu Arıtma Tesisi sahasının modellenmesi

KOS Atıksu Arıtma Tesisi bölgesinin mevcut zemin etüt raporlarının incelenmesi neticesinde yumuşak kil zemin tabakalarından oluşan bir zemin profiline sahip olduğu belirlenmiştir. Yumuşak kil zeminlerde, makinelerin çalışması ile oluşan dinamik etkilerin makine temeli ve çevre zemine etkisini incelemek için bu saha tez kapsamına dahil edilmiştir. 2. Modelde KOS Atıksu Arıtma Tesisi sahası zemin profili, rezonant kolon deney sonuçlarının zemin etüt raporu sonuçlarıyla beraber değerlendirilmesi neticesinde, 2 tabakalı olarak modellenmiştir. Zemin profili, 0-2 m arasında yumuşak kil zemin ve 2-21 m arasında dayanım parametreleri farklı yumuşak kil zeminden oluşmaktadır. Zemin tabakalarının modellenmesi elastisite modülleri, rezonant kolon deney sonuçları ile elde edilen kayma modülü kullanılarak hesaplanmıştır.

Temel boyutları ve gömme derinliği, FMC fabrika sahası modellemesinde belirlenen en uygun boyutlara göre oluşturulmuştur. Makine çalışma frekansı, en büyük

deplasmanların meydana geldiği, en olumsuz koşul olan 5 Hz. olarak seçilmiştir. Bu frekans değeri için makine çalışma genlikleri değiştirilmiştir. Analizler neticesinde, makine çalışma genliğine bağlı olarak, temel deformasyonlarının, zemin yüzeyinde oluşan deformasyon ve ivmelerin değişimi belirlenmiştir.

Bu saha zemini için, SPT ve MASW deney sonuçları kullanılarak modelleme yapılmamıştır.



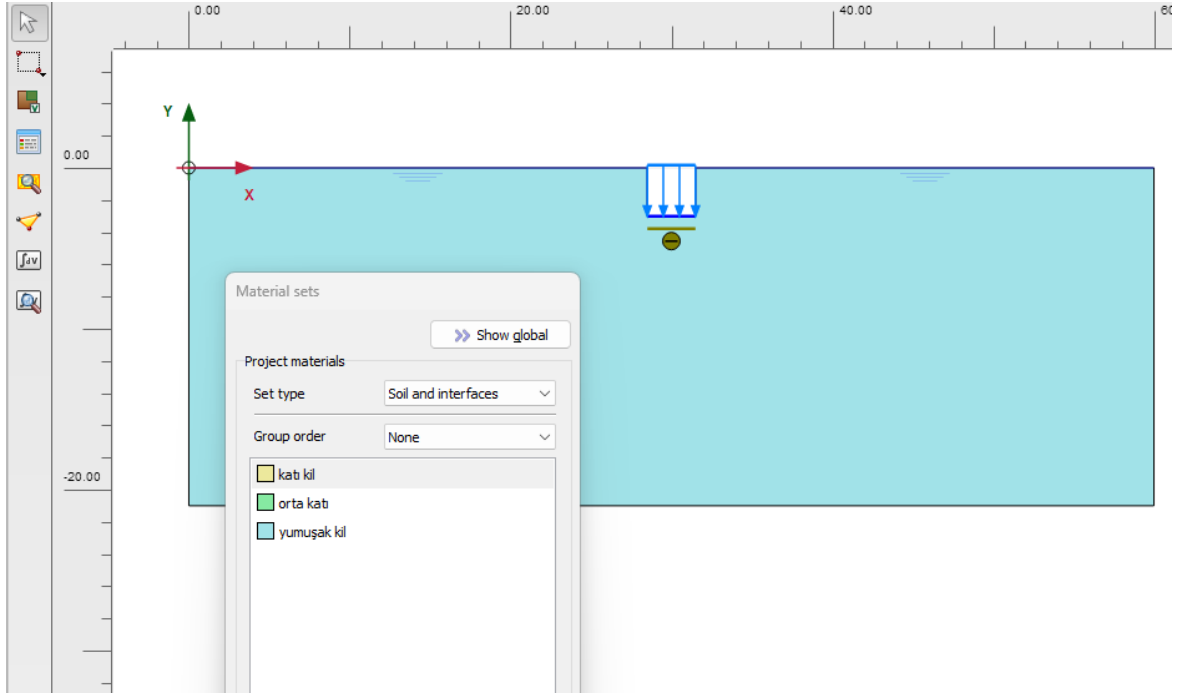
Şekil 4.54. Rezonant kolon deneyi ile elde edilen parametreler ile oluşturulan zemin modeli

4.3.3. Literatür verileri ile oluşturulan zemin profilinin modellenmesi

Zemin ortamında dalga yayılımını etkileyen en önemli faktör zemin tabakalarının rijitliğidir. Zeminin tabakalarının rijitliğine ve tabakalanma durumunun farklılığına bağlı olarak, makine çalışma frekansı ve genliğine bağlı olarak, makine temellerinin ve çevre zeminin nasıl etkilediğini belirlemek için bu modeller yapılmıştır. Böylece, tabakalanma durumuna bağlı olarak makine temel deplasmanları ve temelden belirli uzaklıkta zemin yüzeyinde meydana gelen deplasman ve ivmelerin değişimleri belirlenmiştir.

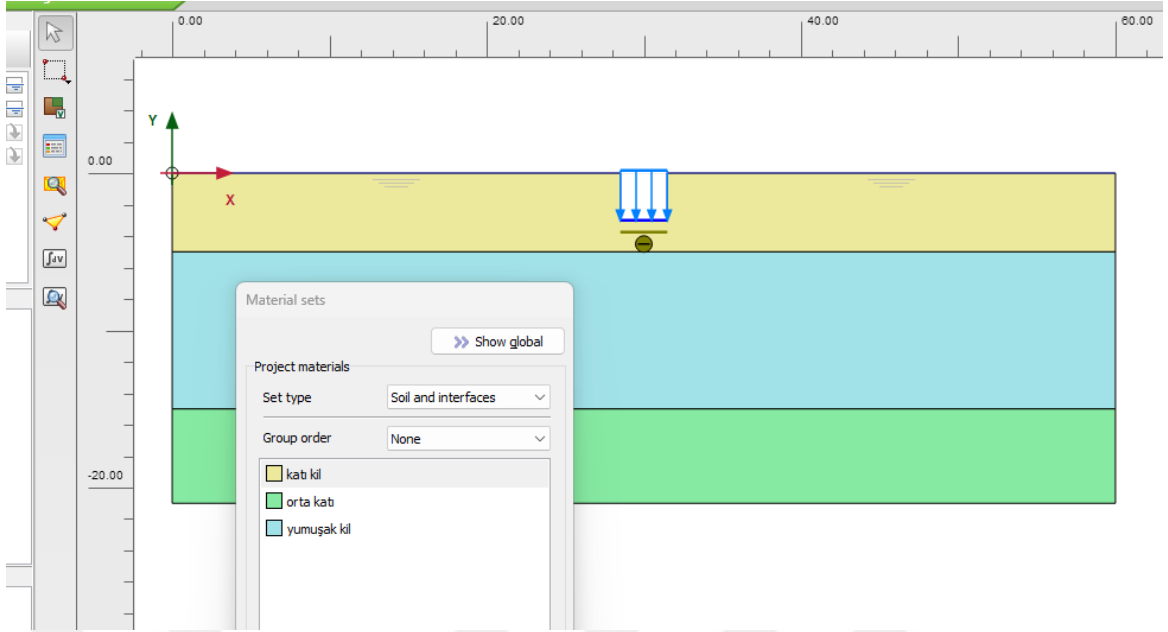
3. Modelde, ilk olarak zemin profili tek tabaka olarak yumuşak, orta sert ve sert kil zemin olarak modellenmiştir. Zemin tabakaları, kil zeminin sertliğine bağlı olarak literatürde bulunan elastisite modelleri kullanılarak Hardening Soil Model zemin bünye modeli ile modellenmiştir. Yumuşak zemin için elastisite modülü 15 MPa, orta sert zemin

için 35 MPa ve sert zemin için 75 MPa olarak alınmıştır. Zemin tabakalarının birim hacim ağırlığı 19 kN/m^3 'tür. Drenajsız kayma mukavemeti değerleri yumuşak zemin için 40 kPa, orta sert zemin için 75 kPa ve sert zemin için 200 kPa olarak alınmıştır. FMC fabrika sahası modeli ile belirlenen temel boyutları ve gömme derinliği ile en olumsuz makine çalışma frekansı makine-temel-zemin sisteminin modellenmesinde kullanılmıştır. Hesap aşamaları tüm modeller ile aynı oluşturularak analiz yapılmıştır (Şekil 4.55). Analizle neticesinde, zemin rijitliğine bağlı olarak, temel deformasyonları ile zemin yüzeyinde meydana gelen deplasman ve ivmeler belirlenmiştir.



Şekil 4.55. Tek tabaka olarak zemin modellemesi

3. Model, zeminin tabakalanma durumunun etkisini araştırmak için, zemin profili tabakaları değiştirilerek farklı kombinasyonlarda modellenmiştir (Şekil 4.56). Böylece zeminin tabakalanma durumuna ve tabakalar arasındaki rijitlik farklılığına bağlı olarak, temel deformasyonları ile zemin yüzeyinde oluşan deformasyon ve ivmeler belirlenmiştir.



Şekil 4.56. Tabakalı zemin modellemesi

Son olarak 3. Model, tek tabakalı zemin modelleri kullanılarak, zemin rijitliğine bağlı olarak makine çalışma süresinin temel deplasmanlarına etkisini araştırılmıştır. Bu amaçla makinenin çalışma süresi hesap aşamasında dinamik analiz 1 sn, 5 sn, 15 sn ve 60 sn olarak değiştirilmiş ve temel deplasmanları belirlenmiştir.

5. ARAŞTIRMA SONUÇLARI VE TARTIŞMA

Bu bölümde, FMC fabrika sahası, KOS Atıksu Arıtma Tesisi sahası ve Selçuk Üniversitesi Kan Merkezi binası bölgesinde yapılan laboratuvar ve arazi deneyleri sonuçları ile saha zeminlerinin PLAXIS 2D sonlu elemanlar programında modellenmesi ile elde edilen analiz sonuçları verilmiştir.

5.1. Zemin Tabakalarının Fiziksel Özellikleri ve Sınıflandırılması

FMC fabrika sahasındaki sondajlar ile alınan zemin numuneleri üzerinde yapılan laboratuvar deney sonuçları ayrı ayrı değerlendirilmiştir. Bu değerlendirmeler neticesinde zemin sınıfları ve fiziksel özellikleri belirlenmiştir.

KOS Atıksu Arıtma Tesisi sahası için ise mevcut zemin etüt raporunun incelenmesi zemin özellikleri belirlenmiştir.

5.1.1. Konya 2. Organize Sanayi Bölgesi, FMC fabrika sahası

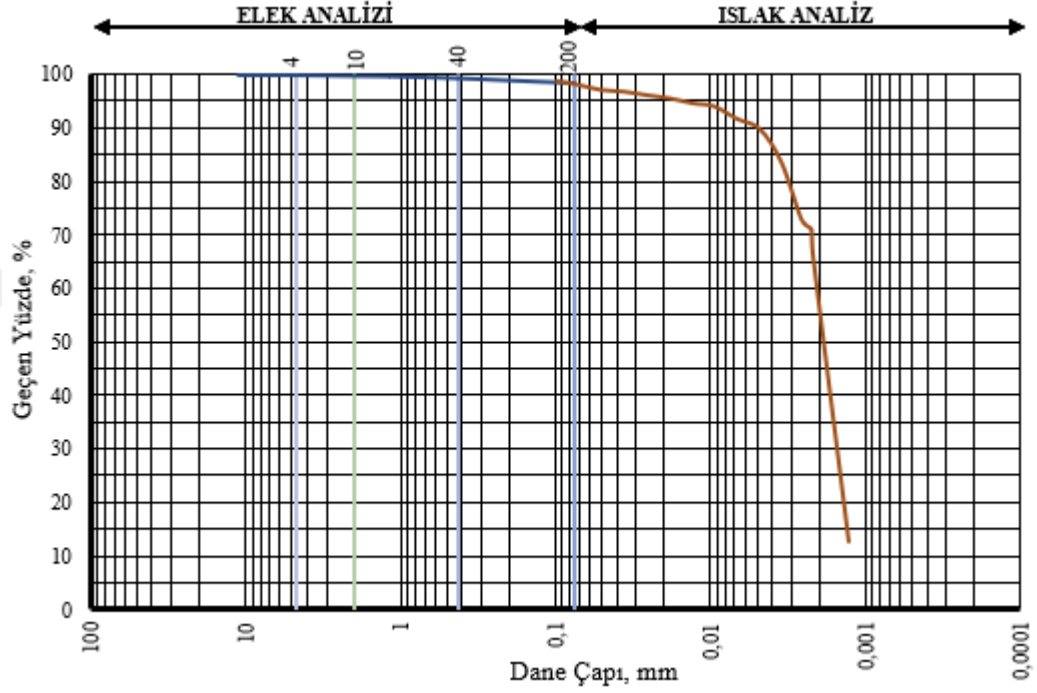
Zemin tabakalarının fiziksel özelliklerinin belirlenmesi amacıyla örselenmiş zemin numuneleri ile doğal su muhtevası tayini yapılmıştır. Deney sonuçları Tablo 5.1 verilmiştir. İki sondaj kuyusundan alınan zemin numunelerin ortak değerlendirilmesi ile 21 m derinlik için doğal su muhtevasının %20 ile %40 arasında değiştiği belirlenmiştir. Yapılan sondajlar esnasında yeraltı suyu seviyesinin zemin yüzeyinde 11 m aşağıda olduğu belirlenmiştir.

Tablo 5.1. Doğal su muhtevası, w (%), değerleri

Derinlik (m)	3	6	9	12	15	18	21
SK1	25,81	38,54	33,81	20,70	30,26	25,51	19,74
SK2	27,50	34,89	39,21	23,44	39,61	26,72	21,43
Ortalama	26,66	36,71	36,51	22,07	34,94	26,12	20,58

Yine örselenmiş numuneleri ile elek analizi, hidrometre analizi ve kıvam limiti deneyleri yapılmıştır. Hidrometre analizi esnasında menisküs değeri 0,6 olarak belirlenmiştir. Dağıtıcı madde düzeltilmesi uygulanmıştır. Deney esnasında su banyosu kullanılmadığı için her hidrometre okumasından sonra sıcaklık ölçümü yapılmıştır ve

hidrometre okumalarına sıcaklık düzeltmesi uygulanmıştır. Elek analizi ve hidrometre analizi sonucunda zemin tabakalarına ait granülometri eğrileri elde edilmiştir. Şekil 5.1’de FMC fabrikası sahasında yapılan SK1 sondajında 3 m derinlikten alınan zemin numunesine ait granülometri eğrisi yer almaktadır. Diğer numuneler için elde edilen granülometri eğrileri EK-1’de toplu olarak verilmiştir.



Şekil 5.1. SK1-3 m’ye ait granülometri eğrisi

Granülometri eğrisinden, %çakıl, %kum, %silt ve %kil içerikleri ile zeminin sınıflandırılması için gerekli olan D_{60} , D_{30} ve D_{10} değerleri elde edilmiştir. Ayrıca, zeminin üniformalık katsayısı, C_u , ve derecelenme katsayısı, C_c , değerleri elde edilmiştir.

Zemin tabakalarının genel olarak ince dane yüzdesi %50’den fazla olduğu için, zemin sınıfının belirlenmesinde kıvam limiti deneyleri yapılmıştır. Her derinlik için likit limit, plastik limit ve plastisite indisi değerleri elde edilmiştir. Deney sonuçları SK1 için Tablo 5.2 ve SK2 için Tablo 5.3’te toplu olarak verilmiştir.

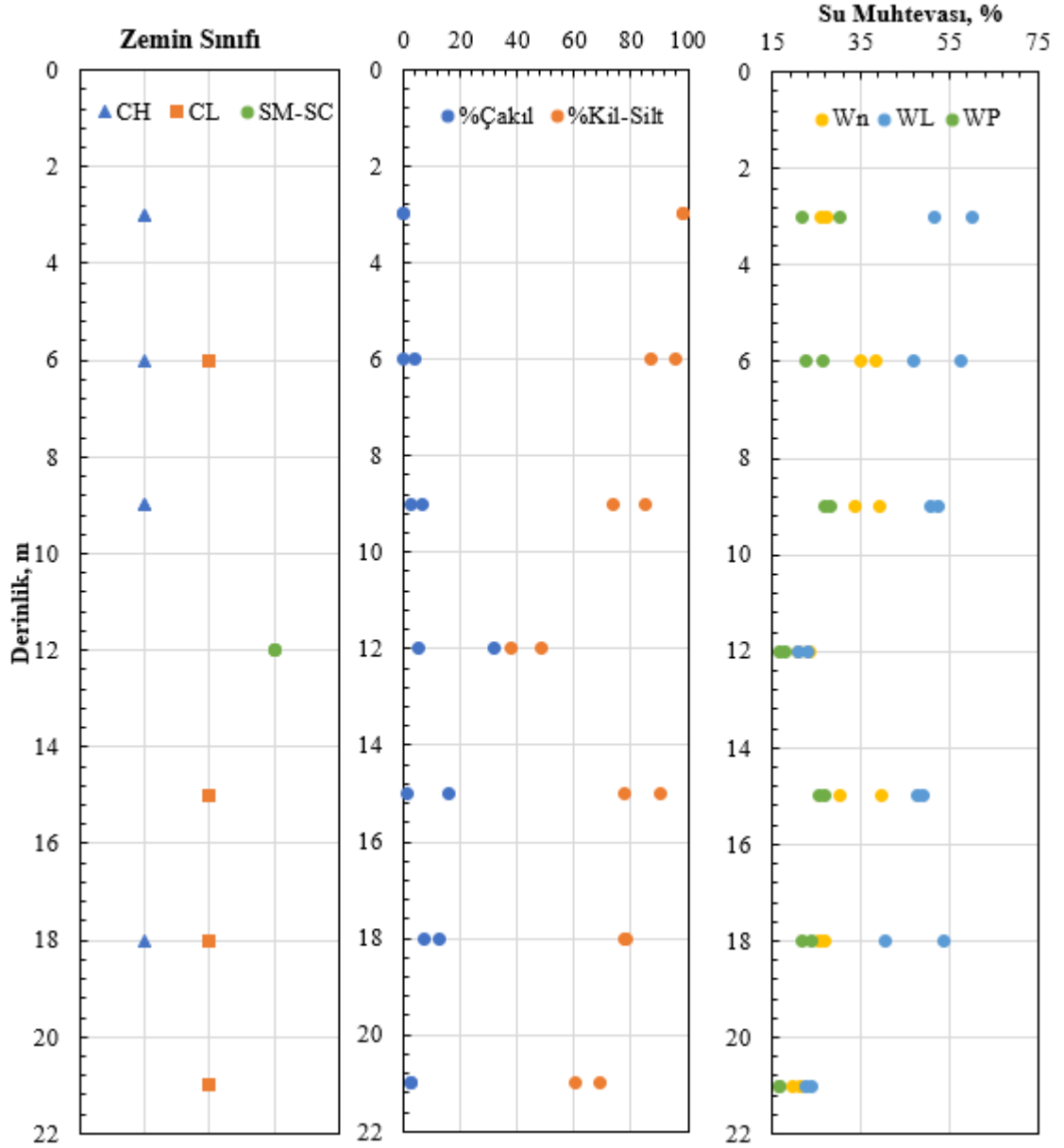
İki sondaj kuyusu için sınıflandırma deneyleri ile derinliği bağlı olarak elde edilen zemin sınıfları, %çakıl ve %silt-kil miktarları ve doğal su muhtevası, likit limit, plastik limit değişimleri Şekil 5.2’de verilmiştir.

Tablo 5.2. SK1 sınıflandırma deneyleri toplu sonuçları

Derinlik (m)	3	6	9	12	15	18	21
%Çakıl	0	0,2	6,3	5,5	15,8	12,7	2,7
%Kum	1,7	0,4	20,2	46,0	6,5	8,8	36,9
%Silt	21,3	45,4	41,5	26,5	44,7	50,5	53,4
%Kil	77,0	50,0	32,0	22,0	33,0	28,0	7,0
D ₆₀ (mm)	0,0016	0,0028	0,005	0,41	0,006	0,0077	0,075
D ₃₀ (mm)	0,0014	0,0012	0,002	0,004	0,0019	0,0021	0,03
D ₁₀ (mm)	0,0012	0,0011	0,0016	0,0018	0,0015	0,0014	0,0052
C _u	1,33	2,54	3,125	410,0	4,0	5,5	14,42
C _c	1,02	0,47	0,5	0,04	0,4	0,41	2,31
w _L (%)	51,58	57,56	52,35	20,76	48,94	40,59	22,67
w _P (%)	21,82	22,79	28,15	16,63	26,90	23,71	16,45
I _p (%)	25,76	34,77	24,2	4,12	22,04	16,88	6,22
Zemin Sınıfı	CH	CH	CH	SM-SC	CL	CL	CL

Tablo 5.3. SK2 sınıflandırma deneyleri toplu sonuçları

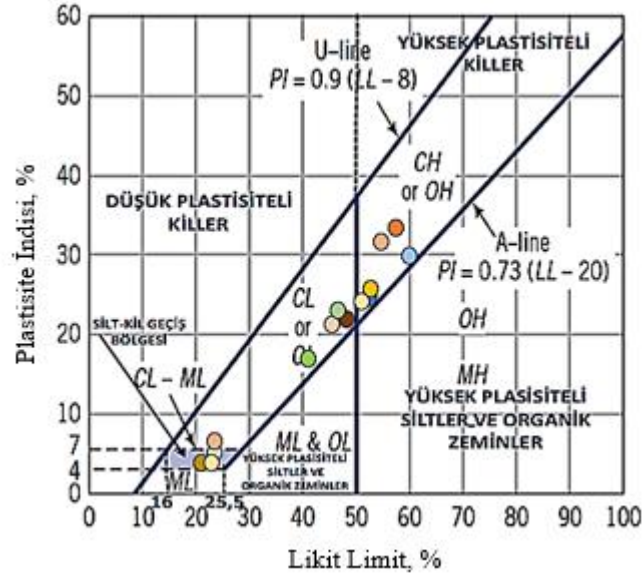
Derinlik (m)	3	6	9	12	15	18	21
%Çakıl	0	4,1	2,6	30,1	0,9	7,3	2,3
%Kum	1,9	8,6	12,1	32,3	8,9	14,7	28,9
%Silt	21,1	43,0	37,2	26,6	54,1	72,0	59,8
%Kil	77,0	44,3	48,0	11,0	36,0	6,0	9,0
D ₆₀ (mm)	0,0022	0,0034	0,0027	3,0	0,0042	0,0077	0,062
D ₃₀ (mm)	0,0016	0,0014	0,0018	0,28	0,0019	0,0021	0,024
D ₁₀ (mm)	0,0014	0,00064	0,0016	0,002	0,0015	0,0014	0,003
C _u	1,57	5,31	1,68	1500,0	2,8	5,5	20,7
C _c	0,83	0,9	0,75	13,07	0,57	0,41	3,1
w _L (%)	59,99	47,13	50,55	22,83	47,86	53,53	24,0
w _P (%)	30,48	26,63	27,06	17,75	25,74	21,55	16,49
I _p (%)	29,52	21,1	23,49	5,08	22,12	31,98	7,5
Zemin Sınıfı	CH	CL	CH	SM-SC	CL	CH	CL



Şekil 5.2. SK1 ve SK2 için derinliğe bağlı olarak zemin sınıfı, %çakıl ve %silt-kil miktarları ve su muhtevası değişimleri

Şekil 5.2’de yer alan zemin sınıfı grafiğinden zemin tabakalarının kil zeminden oluştuğu ve 0-12 m arasının yüksek plastisiteli kil, CH, 12-15 m arasının killi-siltli kum, SM-SC ve 15-21 m aralığının ise düşük plastisiteli kil, CL, olduğu belirlenmiştir. Yine aynı şekilde su muhtevası grafiği incelendiğinde, tüm zemin tabakalarının plastik durumda olduğu ve doğal su muhtevası değerlerinin plastik limite yakın olduğu belirlenmiştir.

Her derinlik için sınıflandırma deney sonuçları Şekil 5.3’te yer alan plastisite kartına işlendiğinde, zemin numunelerinin hepsinin A-hattı üzerinde yer aldığı ve ince daneli tüm tabakaların kil olduğu belirlenmiştir.



Şekil 5.3. Zemin numunelerinin plastisite kartında gösterimi

Rezonant kolon deneyi için Shelby tüplerinden alınan 50/250 mm boyutlarındaki örselenmemiş zemin numuneleri aynı zamanda doğal birim hacim ağırlığının belirlenmesi için kullanılmıştır. Bu numuneler ile belirlenen doğal birim hacim ağırlıklar Tablo 5.4'te yer almaktadır.

Tablo 5.4. Zemin numunelerinin doğal birim hacim ağırlık, γ (kN/m³), değerleri

Derinlik (m)	3	6	9	12	15	18	21
SK1	20,11	19,27	19,42	18,56	19,49	-	18,20
SK2	19,46	19,60	19,60	19,77	-	18,98	19,14

Örselenmiş zemin numuneleri üzerinde yapılan piknometre deneyi ile zemin numunelerinin özgül ağırlık değerleri belirlenmiş olup değerler Tablo 5.5'te verilmiştir. Bu bilgilere ek olarak zemin numunelerinin doğal boşluk oranları faz ilişkileri kullanılarak belirlenmiş olup değerler Tablo 5.6'da verilmiştir.

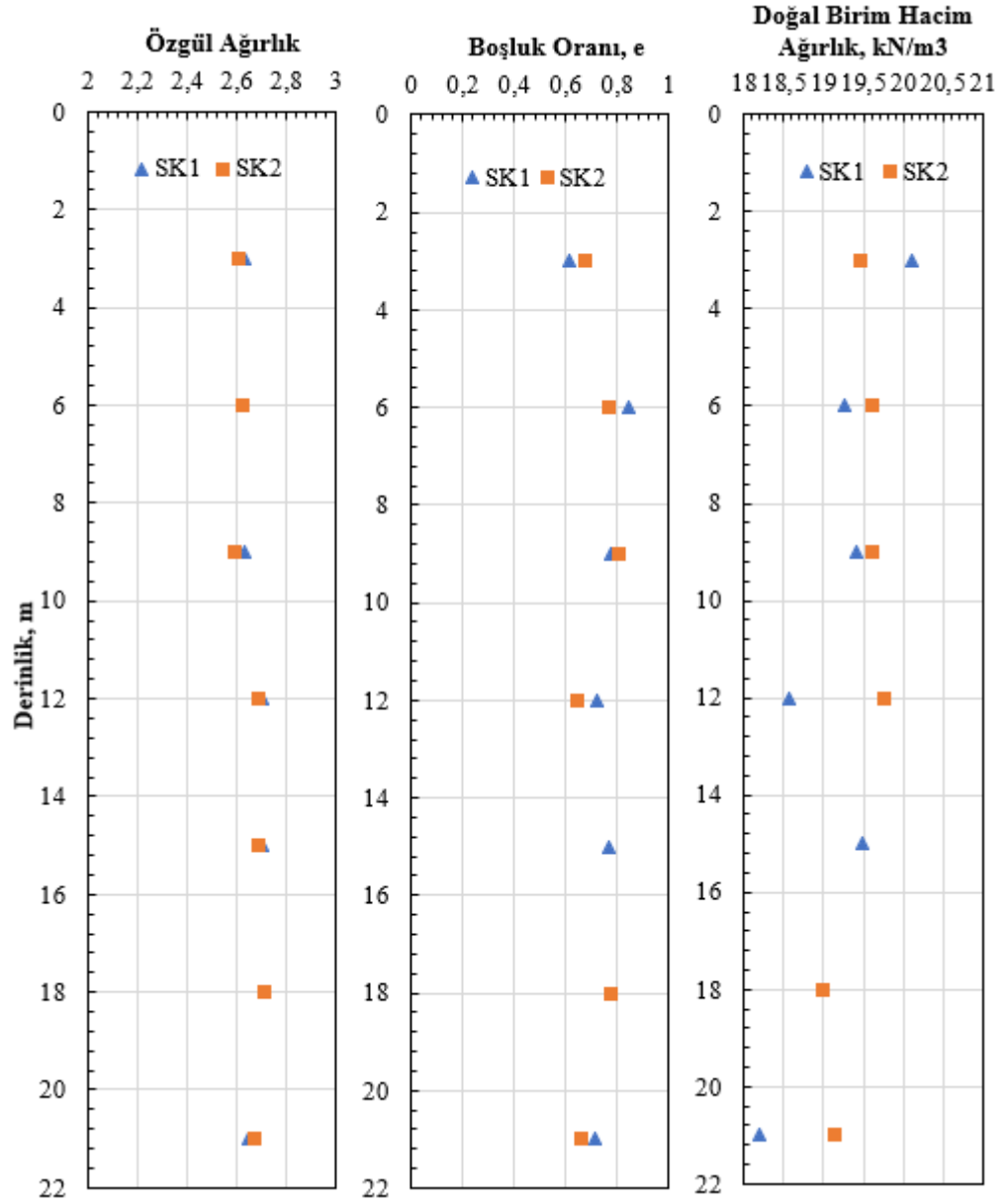
Tablo 5.5. Zemin numunelerin piknometre deneyi ile belirlenen özgül ağırlık, G_s , değerleri

Derinlik (m)	3	6	9	12	15	18	21
SK1	2,63	2,62	2,63	2,70	2,70	2,71	2,65
SK2	2,61	2,62	2,59	2,69	2,69	2,71	2,67

Tablo 5.6. Zemin numunelerinin faz ilişkileri ile belirlenen doğal boşluk oranları, e

Derinlik (m)	3	6	9	12	15	18	21
SK1	0,614	0,847	0,777	0,722	0,770	-	0,711
SK2	0,677	0,769	0,805	0,648	-	0,775	0,662

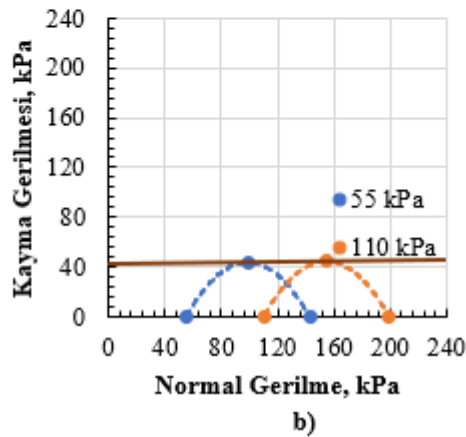
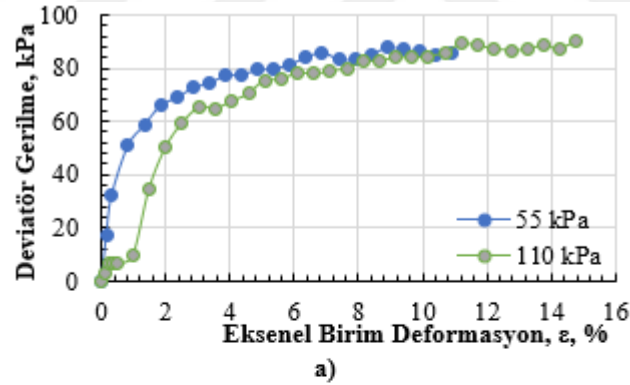
SK1 ve SK2 sondaj kuyularından alınan zemin numunelerinin özgül ağırlık, boşluk oranı ve doğal birim hacim ağırlık değerlerinin derinlikle değişimi Şekil 5.4'te verilmiştir.

**Şekil 5.4.** SK1 ve SK2 için derinlikle özgül ağırlık, boşluk oranı ve doğal birim hacim ağırlık değişimi

Shelby tüplerinden öncelikli olarak rezonant kolon deneyi için zemin numuneleri alınmıştır. Tüplerde numunenin fazla olması halinde kayma dayanımı ve konsolidasyon parametrelerini de belirlemek için üç eksenli basınç ve konsolidasyon deneyleri için zemin numuneleri alınmıştır. Üç eksenli basınç deney numuneleri ile konsolidasyonsuz-drenajsız deneyler yapılmıştır.

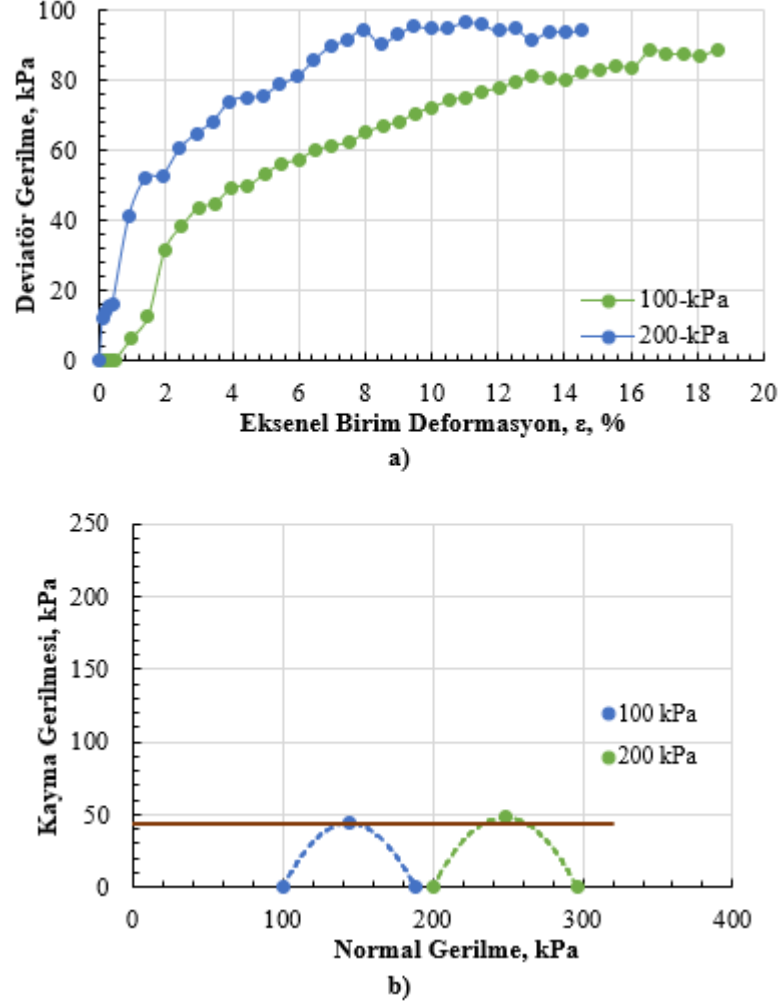
Konsolidasyonsuz-drenajsız (UU) üç eksenli basınç deneyi ile zemin numunelerinin drenajsız kohezyon değeri ile serbest basınç mukavemeti değerleri elde edilmiştir. Bu deney, deney numunesi alınan derinlikler için numune sayısına bağlı olarak 2 ya da 3 tekrarlı yapılmıştır. Deneyler esnasında zemin numunesine uygulanan hücre basıncı zemin numunesinin arazi koşulları göz önünde bulundurularak seçilmiş olup, hücre basıncı iki katına çıkarılarak deneyler tekrarlanmıştır.

SK2-3 m deney numunelerine ayrı ayrı 55 kPa ve 110 kPa hücre basıncı uygulanarak 2 adet UU deneyi yapılmıştır. Şekil 5.5'te yer alan deney sonuçlarının değerlendirilmesi ile drenajsız kayma mukavemeti yaklaşık 90 kPa ve drenajsız kohezyon değeri 45 kPa olarak belirlenmiştir.



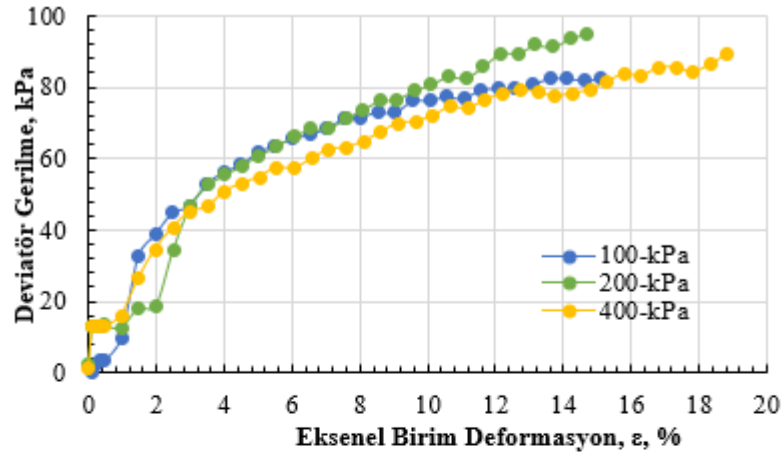
Şekil 5.5. SK2-3 m için üç eksenli basınç deneyi ile elde edilen a) Eksenel birim deformasyon-deviyatör gerilme ve b) Kayma gerilmesi-normal gerilme grafikleri

SK2-6 m deney numuneleri ile ayrı ayrı 100 kPa ve 200 kPa hücre basıncı altında 2 adet UU deneyi yapılmıştır. Şekil 5.6'da verilen deney sonuçlarının değerlendirilmesi ile drenajsız kayma mukavemeti yaklaşık 90 kPa ve drenajsız kohezyon değeri 45 kPa olarak belirlenmiştir.

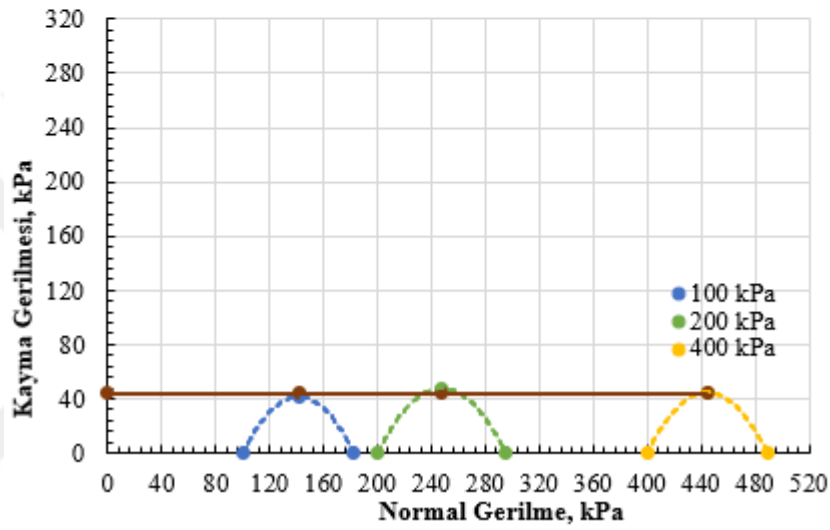


Şekil 5.6. SK2-6 m için üç eksenli basınç deneyi ile elde edilen **a)** Eksenel birim deformasyon-deviyatör gerilme ve **b)** Kayma gerilmesi-normal gerilme grafikleri

SK2-9 m deney numuneleri üzerinde ayrı ayrı 100 kPa, 200 kPa ve 400 kPa hücre basıncı altında 3 adet UU deneyi yapılmıştır. Şekil 5.7'de verilen deney sonuçlarının değerlendirilmesi ile drenajsız kayma mukavemeti yaklaşık 90 kPa ve drenajsız kohezyon değeri 45 kPa olarak belirlenmiştir.



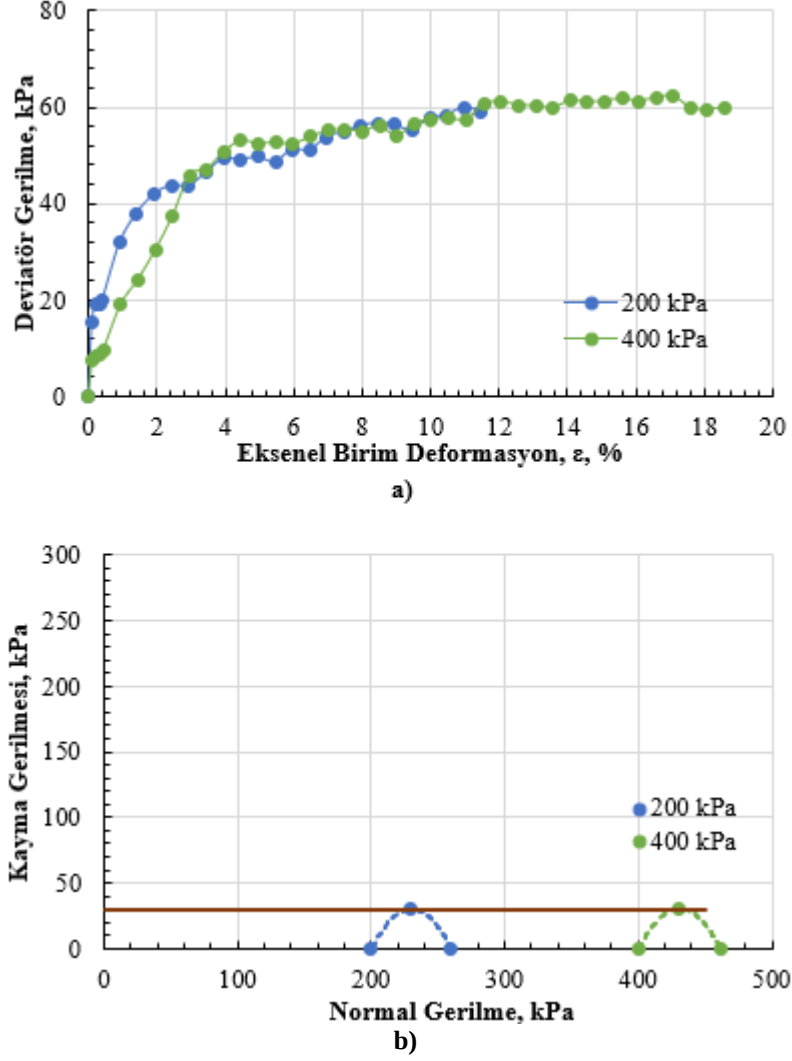
a)



b)

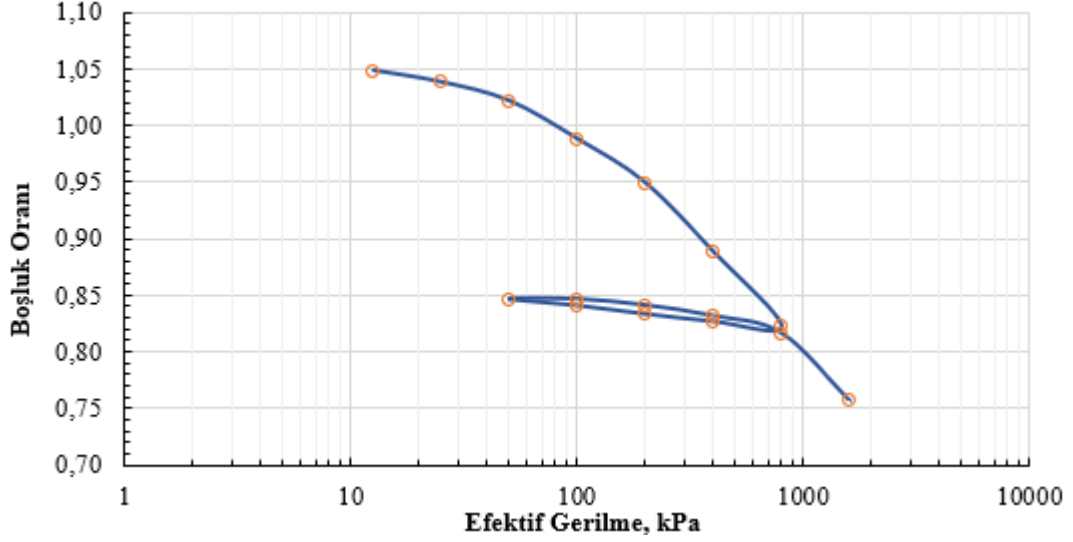
Şekil 5.7. SK2-9 m için üç eksenli basınç deneyi ile elde edilen a) Eksenel birim deformasyon-deviator gerilme ve b) Kayma gerilmesi-normal gerilme grafikleri

SK2-21 m deney numunelerine ayrı ayrı 200 kPa ve 400 kPa hücre basıncı uygulanarak 2 adet UU deneyi yapılmıştır. Şekil 5.8'de yer alan deney sonuçlarının değerlendirilmesi ile drenajsız kayma mukavemeti yaklaşık 60 kPa ve drenajsız kohezyon değeri 30 kPa olarak belirlenmiştir.



Şekil 5.8. SK2-21 m için üç eksenli basınç deneyi ile elde edilen **a)** Eksenel birim deformasyon-deviator gerilme ve **b)** Kayma gerilmesi-normal gerilme grafikleri

Ödometre deneyi için sadece 5 Shelby tüpünden konsolidasyon numunesi alınabilmektedir. Alınan bu numuneler üzerinde konsolidasyon deneyi yapılmış ve sıkışma indisleri ile ön yükleme basınçları elde edilmiştir. Deney sonuçlarının değerlendirilmesi ile boşluk oranı (e)- $\log \sigma_v'$ grafikleri elde edilmiştir. Şekil 5.9'da, SK2-3 m için e - $\log \sigma_v'$ grafiği verilmiştir. Bu grafikten zemin numunesine ait sıkışma indisleri ve ön yükleme basınçları elde edilmiştir. Konsolidasyon deneyi toplu sonuçları Tablo 5.7'de yer almaktadır.



Şekil 5.9. SK2-3 m için boşluk oranı, e-log σ_v' grafiği

Tablo 5.7'de görüldüğü gibi zemin numunelerinin ön yükleme basınçları yaklaşık 100 kPa civarındadır.

Tablo 5.7. Konsolidasyon deneyi toplu sonuçları

Derinlik (m)	3			6			21		
	C_c	C_r	σ_p' (kPa)	C_c	C_r	σ_p' (kPa)	C_c	C_r	σ_p' (kPa)
SK1	-	-	-	0,166	0,0664	92,0	0,166	0,0498	90,0
SK2	0,215	0,0498	110,0	0,199	0,0498	110,0	0,132	0,0664	70,0

5.1.2. KOS Atıksu Arıtma tesisi sahası

Bu saha zeminin, fiziksel özellikleri ve zemin sınıfları, aynı sahada daha önce yapılmış 5 sondaj kuyusundan alınan zemin numuneleri ve SPT deney sonuçları ile hazırlanmış zemin etüt raporundan belirlenmiştir.

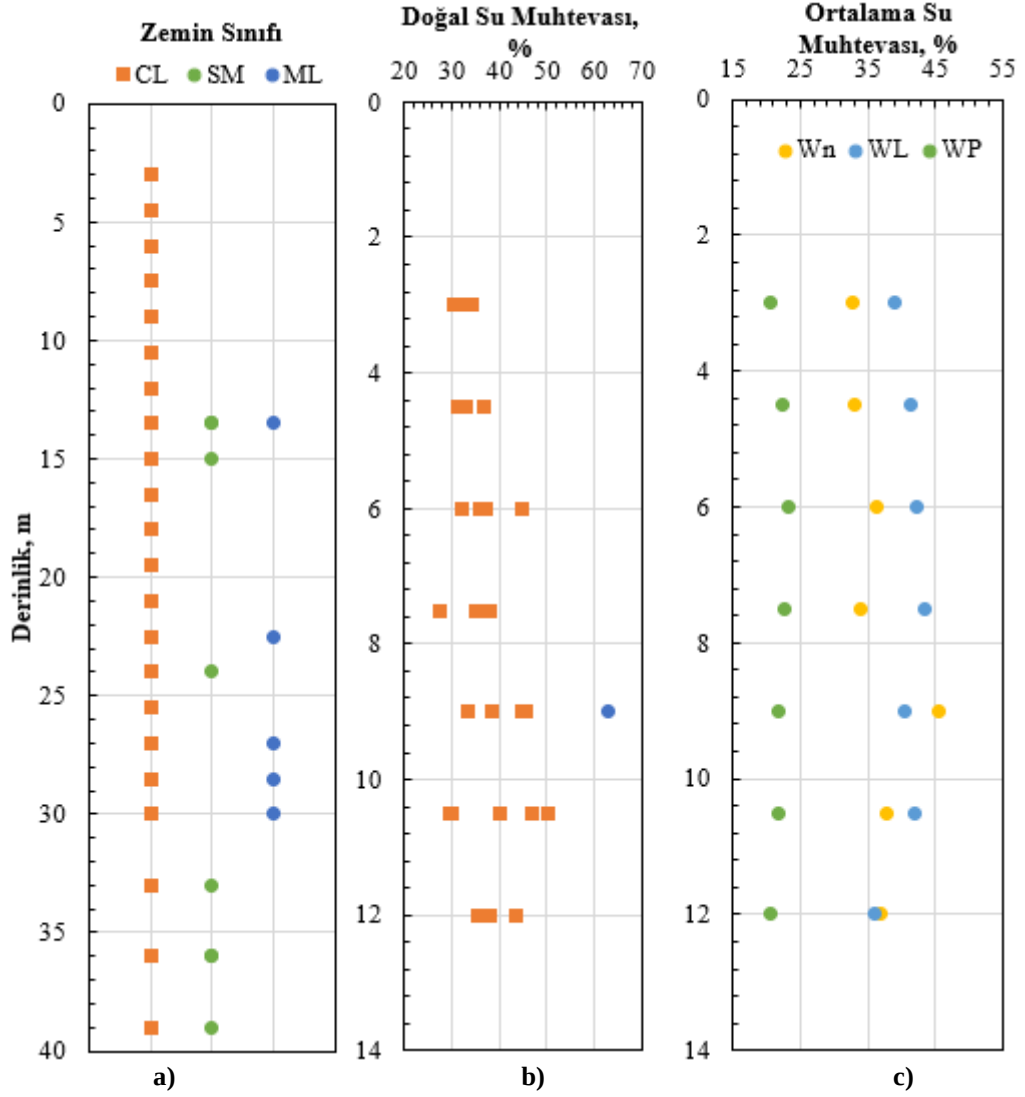
Her biri 40 m olan 5 sondaj kuyusundan alınan numuneler üzerinde yapılan sınıflandırma deneyleri ile tüm zemin profili için hâkim zemin sınıfının düşük plastisiteli kil (CL) olduğu belirlenmiştir. Zemin profili, 0-12 m arasında düşük plastisiteli kil (CL), 12-15 m arasında siltli kum (SM), 12-30 m arasında düşük plastisiteli kil (CL) ve 30-40 m arasında CL-SM zemin tabakalarından oluşmuştur (Şekil 5.10(a)).

Tez çalışması kapsamında bu bölgede ilave olarak 2 adet her biri 10 m'lik sondaj yapılmıştır. Sondajlar esnasında yeraltı suyu seviyesinin zemin yüzeyinden 6 m derinde olduğu belirlenmiştir. Zemin etüt raporunda yer alan verilerin değerlendirilmesi ile 10 m derinlik için zemin tabakalarının doğal su içeriklerinin derinlikle değişimi Tablo 5.8 ve

Şekil 5.10(b)'de verilmiştir. Zemin tabakalarının doğal su muhtevasının %20 ile %70 arasında değiştiği belirlenmiştir.

Tablo 5.8. Sondaj kuyularında doğal su muhtevının, w (%), derinlikle değişimi

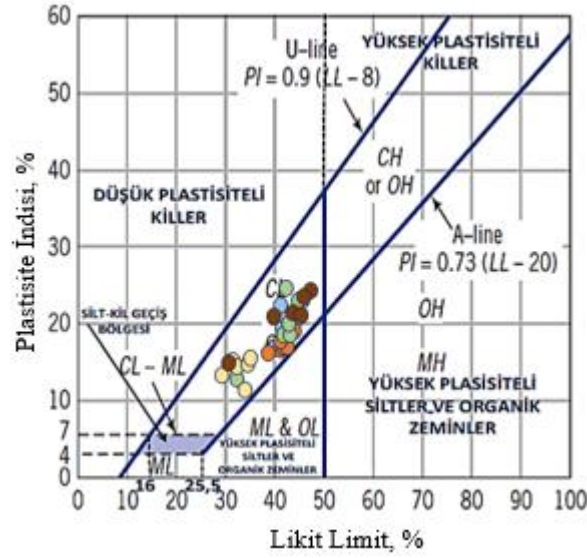
Derinlik (m)	3	4,5	6	7,5	9	10,5	12
SK1	30,59	31,95	44,98	27,55	45,43	50,2	20,4
SK2	34,32	33,1	32,01	35,92	33,22	39,95	35,47
SK3	32,3	31,44	32,12	34,95	44,61	46,71	43,35
SK4	32,25	31,26	37,01	35,45	62,98	29,43	37,98
SK5	34,18	36,87	36,0	38,02	38,51	30,09	43,44
Ortalama	32,73	32,92	36,42	34,78	44,95	39,28	36,13



Şekil 5.10. 5 sondaj kuyusu için **a)** 40 m derinlik için zemin sınıfının değişimi, **b)** 12 m derinlik için su muhtevasının derinlikle değişimi ve **c)** Ortalama doğal su muhtevası likit limit ve plastik limit değerlerinin derinlikle değişimi

Zemin etüt raporunda yer alan 5 sondaj kuyusundan alınan zemin numuneleri ile yapılan kıvam limitleri deney sonuçlarından elde edilen ortalama likit limit ve plastik limit değerleri ile ortalama doğal su muhtevasının derinlikle değişimi Şekil 5.10(c)'de verilmiştir. Buradan zemin tabakalarının kıvam durumunun genel olarak plastik durumda olduğu belirlenmiştir. Aynı zamanda zemin tabakalarının su muhtevasının likit limite daha yakın olduğu belirlenmiştir.

Zemin etüt raporunda yer alan zemin sınıflandırma deneyleri toplu olarak değerlendirildiğinde Şekil 5.11'de görüldüğü gibi 5 sondaj kuyusu için zemin yüzünden 12 m derinliği kadar zemin numunelerinin hepsinin A-hattı üzerinde yer aldığı ve zemin tabakalarının düşük plastisiteli kil, CL, olduğu belirlenmiştir.



Şekil 5.11. Zemin numunelerinin plastisite kartında gösterimi

Zemin etüt raporunda yer alan veriler neticesinde, 5 sondaj için, 0-12 m arası zemin tabakalarının ortalama doğal birim hacim ağırlıkları, özgül ağırlıkları ve boşluk oranları Tablo 5.9'da verilmiştir.

Tablo 5.9. Zemin numunelerin doğal birim hacim ağırlık, özgül ağırlık ve boşluk oranı değerleri

Derinlik (m)	3	4,5	6	7,5	9	10,5	12
γ_n (kN/m ³)	18,07	-	17,58	-	17,58	-	17,95
G_s	2,63	-	2,59	-	2,61	-	2,6
e	0,895	-	0,972	-	1,111	-	0,934

Sondajlar esnasında alınan örselenmemiş zemin numuneleri üzerinde üç eksenli basınç deneyi yapılarak, zemin tabakalarının kayma dayanımı parametreleri belirlenmiştir. Zemin etüt raporunda yer alan verilerin incelenmesi ile 5 sondaj için zemin tabakalarının ortalama kayma dayanımı parametreleri Tablo 5.10’da yer almaktadır.

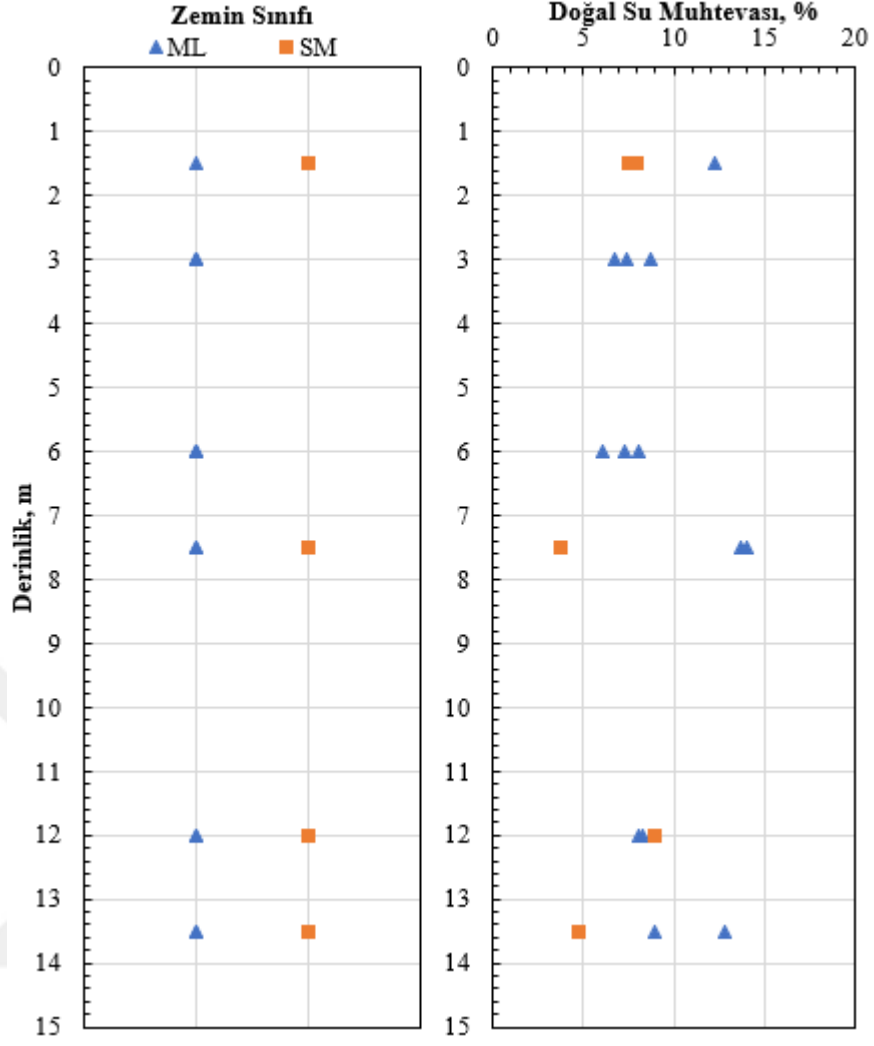
Tablo 5.10. Zemin numunelerin kayma dayanımı parametreleri

Derinlik (m)	3	4,5	6	7,5	9	10,5	12
Kohezyon (kPa)	53,0	-	47,0	-	44,0	-	57,0
ϕ (°)	6,1	-	3,7	-	5,4	-	4,2

5.1.3. Selçuk Üniversitesi Kan Merkezi binası alanı

Makinelerin oluşturduğu dinamik etkilerin farklı sertlikteki zeminlerin davranışı üzerindeki etkisini araştırmak için Selçuk Üniversitesi Kan Merkezi binası sahasında ilave bir çalışma yapılmıştır. Bu alan ile ilgili önceden yapılmış zemin etüt raporu incelenerek zemin özellikleri belirlenmiştir.

Bu alanda daha önceden 3 adet 15 m’lik sondaj yapılmıştır. Zemin etüt raporunda yer alan verilerin değerlendirilmesi ile zemin tabakalarının zemin sınıfının ve doğal su muhtevasının derinlikle değişimi Şekil 5.12’de verilmiştir. Buradan bölge zemini için hâkim zemin sınıfının düşük plastisiteli silt (ML) olduğu belirlenmiştir. Zemin tabakalarının doğal su muhtevası ise %4 ile %20 arasında değiştiği belirlenmiştir.



Şekil 5.12. 3 sondaj kuyusu için derinlikle zemin sınıfı ve doğal su muhtevasının değişimi

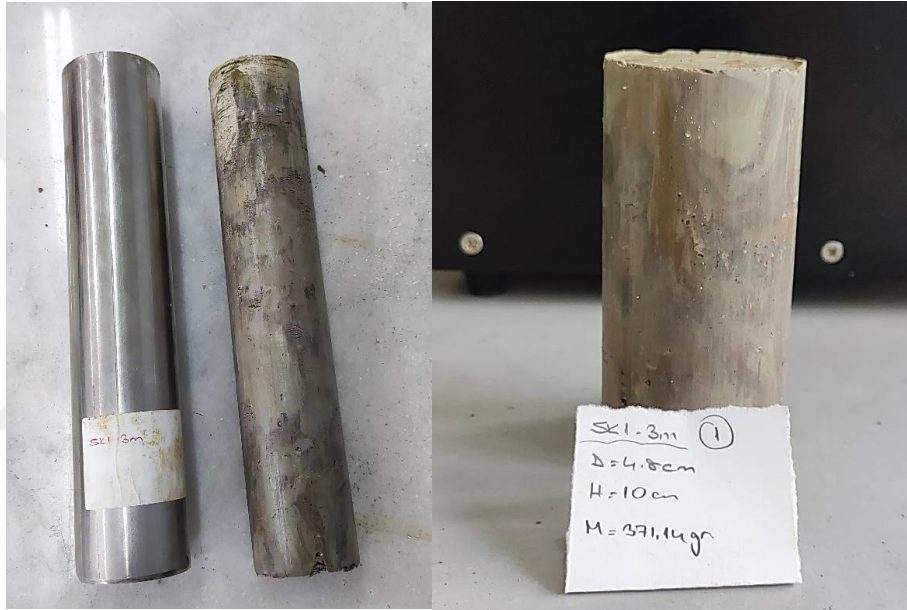
5.2. Rezonant Kolon Deneyleri ile Elde Edilen Dinamik Zemin Parametrelerinin Değerlendirilmesi

Bu bölümde, FMC fabrika sahası ve KOS Atıksu Arıtma Tesisi sahasından alınan zemin numuneleri üzerinde yapılan rezonant kolon deney sonuçları değerlendirilmiştir. Rezonant kolon deneyi, 10^{-4} ile 10^{-1} kayma birim deformasyon genliği arasında yapılmıştır. Bu nedenle zemin numunelerine ait elde edilen dinamik parametreler bu kayma birim deformasyon aralığı içindir. Deney sonuçları kullanılarak, ORIGINPRO 2023 programı ile yapılan eğri uydurma işlemleri neticesinde, zemin numunelerinin kayma modülü, sönüm oranı, normalize kayma modülü ve normalize sönüm oranı eğrileri elde edilmiştir. Elde edilen bu eğriler, literatür eğrileri karşılaştırılmıştır. Böylece daha

geniş kayma birim deformasyon aralığı için bölge zeminini en iyi temsil eden eğriler belirlenmiştir.

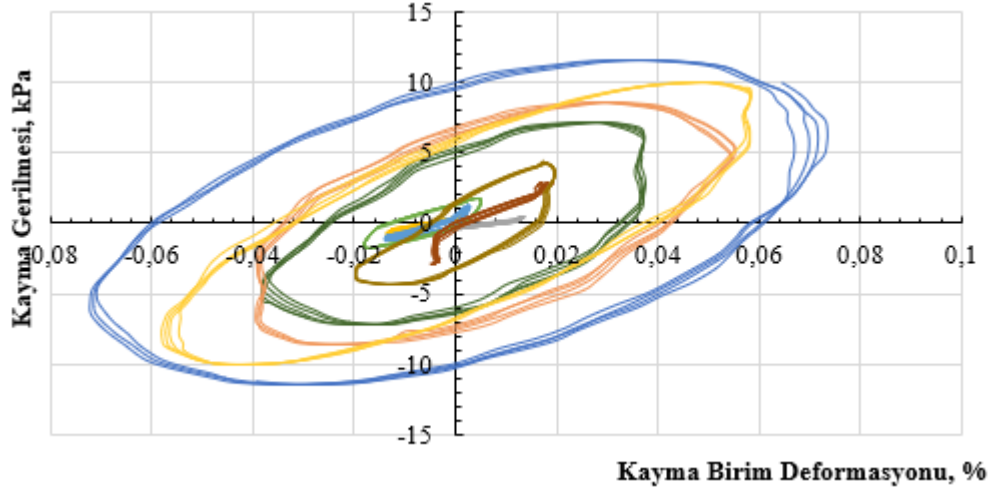
5.2.1. FMC fabrika sahası

FMC fabrika sahasında yapılan 2 sondaj ile her 3 m’de bir Shelby tüpleri zemin numuneleri alınmıştır. Shelby tüplerinden alınan 50/100 mm silindirik zemin numuneleri üzerinde rezonant kolon deneyleri gerçekleştirilmiştir. SK1-3 m için tüpten çıkarılan ve deneye tabi tutulan rezonant kolon deney numunesi Şekil 5.13’te yer almaktadır.



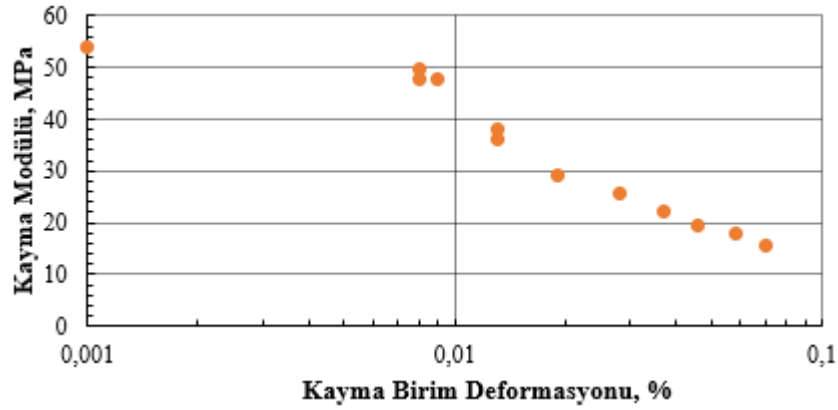
Şekil 5.13. SK1-3 m rezonant kolon deney numunesi

Rezonant kolon deneyi ile zemin numunelerinin kayma birim deformasyon genliğine bağlı olarak dinamik kayma modülü ve sönüm oranı değerleri elde edilmiştir. Bu amaçla, deney esnasında numuneye uygulanan tork artırılarak, kayma birim deformasyon genliği artırılmış ve deney aşamalı olarak 10^{-4} kayma birim deformasyon genliğinden, 10^{-1} kayma birim deformasyon genliğine ulaşana kadar tekrarlanmıştır. SK1-3 m için rezonant kolon deneyi ile her tork seviyesi için uygulanan tekrarlı yükleme neticesinde elde edilen histerezis eğrileri Şekil 5.14’te yer almaktadır.



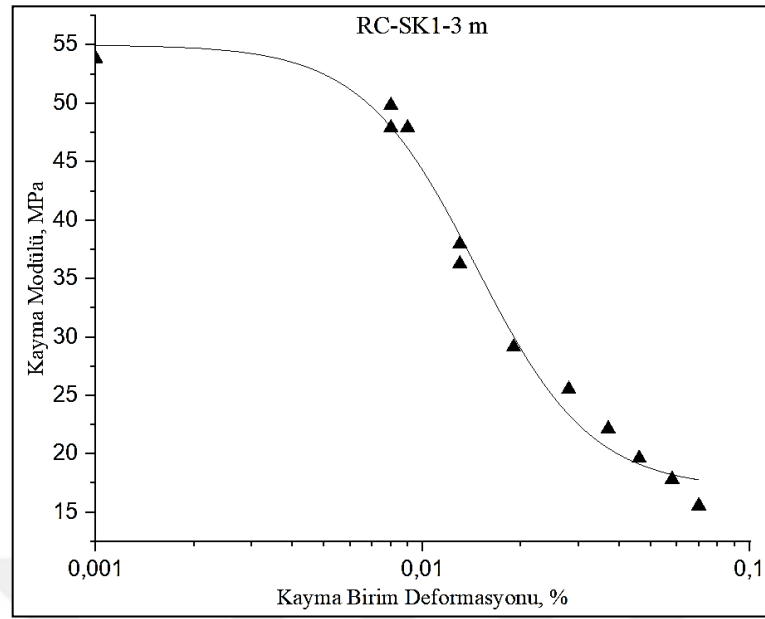
Şekil 5.14. SK1-3 m için histerezis eğrisi

Histerezis eğrileri yardımı ile omurga eğrisi elde edilmektedir. Elde edilen omurga eğrileri kayma birim deformasyon genliğine bağlı olarak kayma modülünün hesaplanmasında kullanılmaktadır. Şekil 5.15'te SK1-3 m için rezonant kolon deneyi ile elde edilen birim deformasyon genliğine bağlı olarak kayma modülü değerleri yer almaktadır. Burada görüldüğü gibi kayma birim deformasyon genliği arttıkça kayma modülü azalmıştır. Kayma modülü-kayma birim deformasyon genliği eğrisinin elde edilebilmesi ORIGINPRO 2023 programı ile eğri uydurma yapılmıştır.



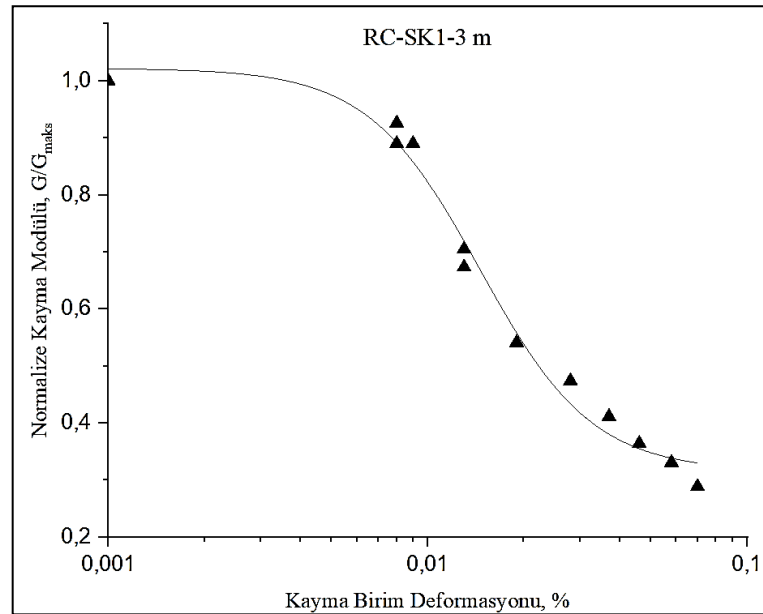
Şekil 5.15. SK1-3 m için rezonant kolon deneyi ile elde edilen birim deformasyon genliğine bağlı olarak kayma modülü değerleri

ORIGINPRO 2023 programı ile Şekil 5.15'te yer alan noktaları en iyi temsil eden eğriler elde edilmiştir. Böylece, kayma birim deformasyon genliğine bağlı olarak bölge zemininin dinamik özelliklerini yansıtan eğriler elde edilmiştir. Şekil 5.16'da SK1-3 m için bu program ile elde edilen kayma modülü eğrisi yer almaktadır. Bu grafikten, bu numunenin maksimum dinamik kayma modülünün 55 MPa olduğu belirlenmiştir.



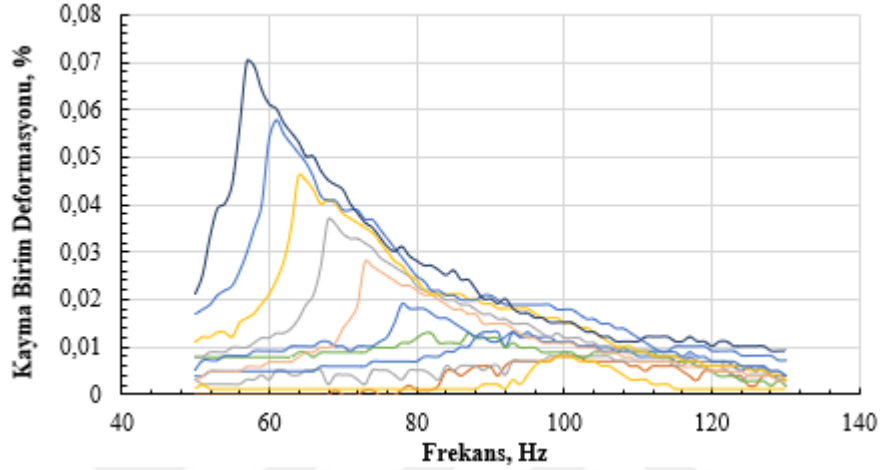
Şekil 5.16. SK1-3 m için ORIGINPRO 2023 programı ile elde edilen kayma modülü eğrisi

Dinamik kayma modülünü değerlerinin maksimum dinamik kayma modülü değerine bölünmesi ile normalize kayma modülü eğrileri elde edilmektedir. Bu eğriler yine ORIGINPRO 2023 programı ile edilmiştir. Şekil 5.17’de SK1-3 m için normalize modül azalım eğrisi yer almaktadır.



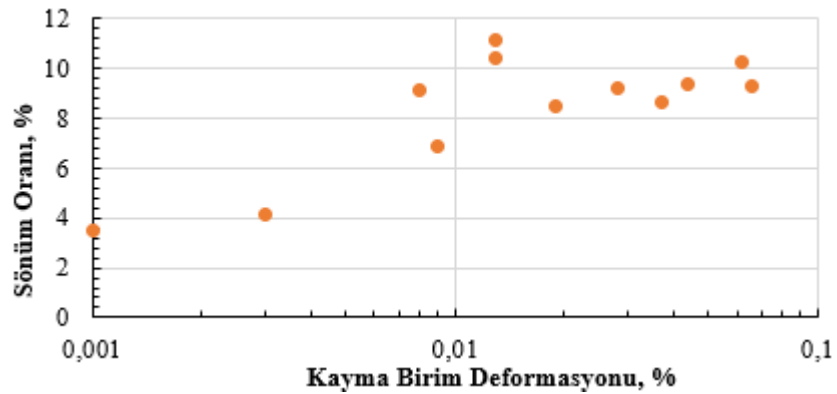
Şekil 5.17. SK1-3 m için elde edilen normalize modül azalım eğrisi

Rezonant kolon deneyi sonuçları ile sönüm oranı iki yöntemle elde edilmektedir. Bunlardan ilki yarım güç bant genişliği yöntemidir. Bu yöntemde kullanılan, her yükleme çevrimi için elde edilen frekans-kayma birim deformasyonu genliği grafiği Şekil 5.18’de yer almaktadır. Birim deformasyon genliğinin arttıkça rezonans frekansı azalmaktadır. Bu da zeminin rijitliğindeki azalmayı göstermektedir.



Şekil 5.18. SK1-3 m için deney verileri ile elde edilen frekans-kayma birim deformasyonu genliği grafiği

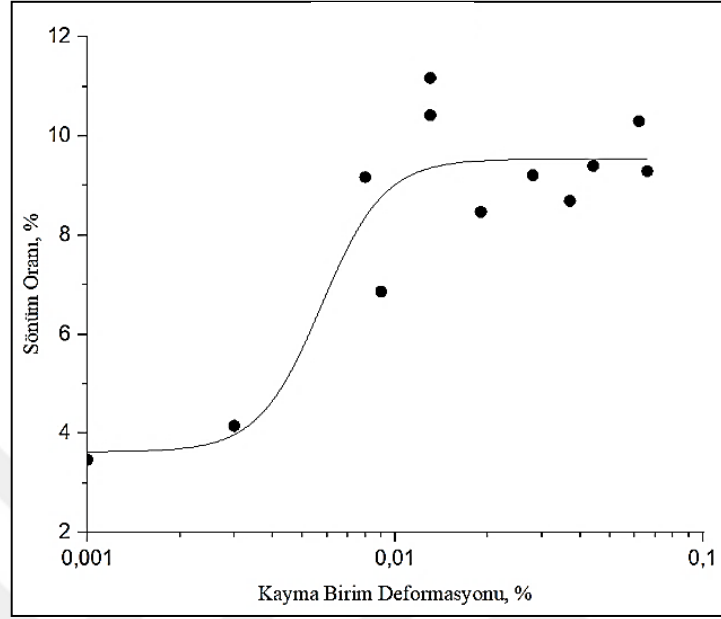
SK1-3 m zemin numunesi için yarım güç bant genişliği yöntemi ile elde edilen sönüm oranı değerleri Şekil 5.19’da yer almaktadır. Bu değerler kullanılarak ORIGINPRO 2023 programında eğri uydurma yapılmıştır.



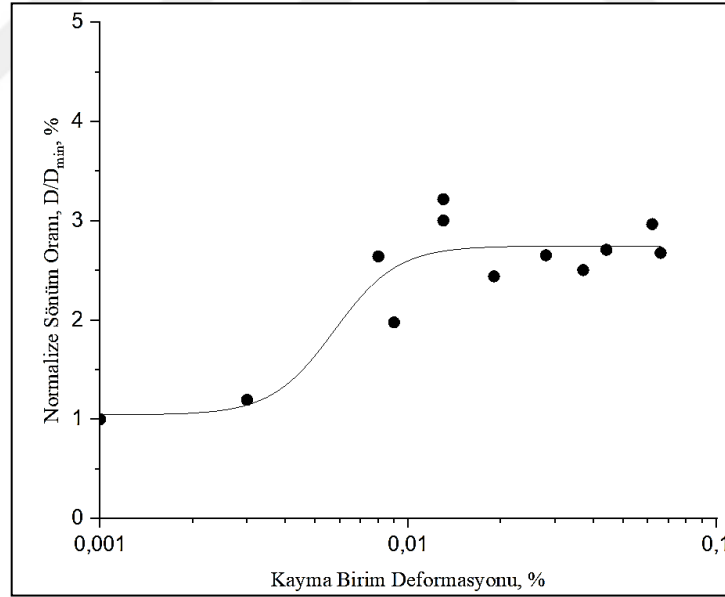
Şekil 5.19. SK1-3 m için yarım güç bant genişliği ile elde edilen sönüm oranı değerleri

Şekil 5.20(a)’da SK1-3 m için eğri uydurma ile elde edilen sönüm oranı eğrisi yer almaktadır. Bu eğriden zemin numunesinin minimum sönüm oranının yaklaşık %3,7 olduğu belirlenmiştir. Elde edilen sönüm oranlarının minimum sönüm oranına bölünmesi

ile normalize sönüm oranı eğrileri ORIGINPRO 2023 programı ile elde edilmiştir. SK1-3 m için normalize sönüm oranı eğrisi Şekil 5.20(b)'de yer almaktadır.



a)

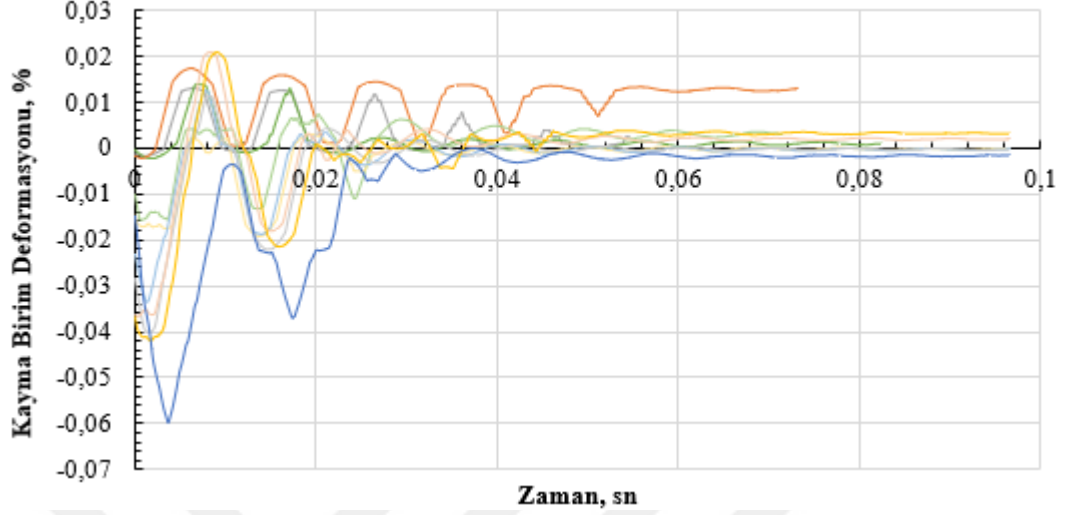


b)

Şekil 5.20. SK1-3 m için yarı güç bant genişliği yöntemi ile elde edilen **a)** Kayma birim deformasyonu-sönüm oranı ve **b)** Kayma birim deformasyonu-normalize sönüm oranı eğrileri

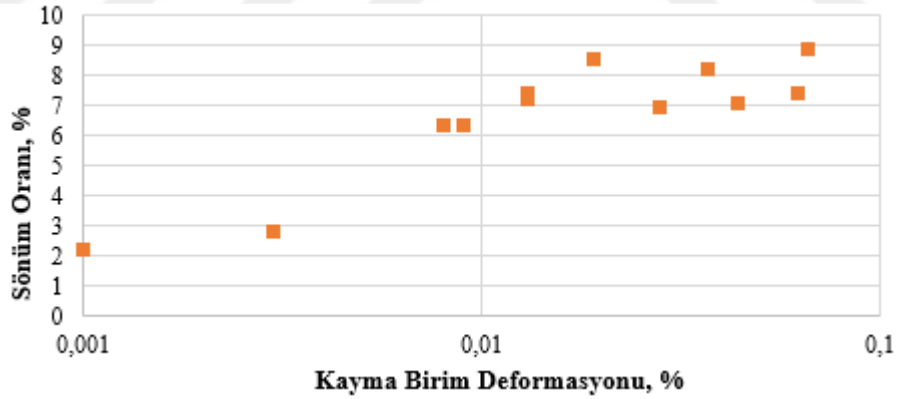
Sönüm oranının belirlenmesinde kullanılan diğer yöntem ise logaritmik azalım yöntemidir ve Şekil 5.21'de SK1-3 m için her yükleme çevrimi sonunda numunenin serbest titreşime maruz bırakılmasıyla elde edilen logaritmik azalım eğrileri yer

almaktadır. Deneyde her zorlanmış titreşim aşamasında tork arttırıldığından dolayı kayma birim deformasyonu artmaktadır. Bu nedenle sönüm oranları artmaktadır.



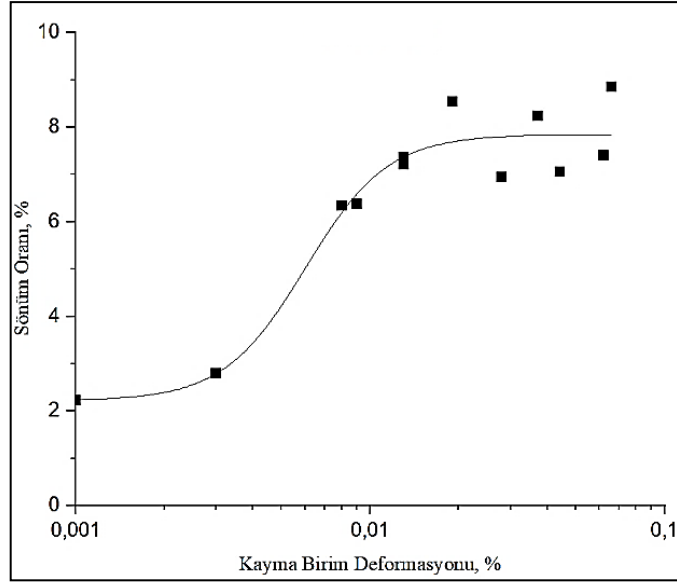
Şekil 5.21. SK1-3 m için deney verileri ile elde edilen frekans-kayma birim deformasyonu genliği grafiği

Logaritmik azalım yöntemi ile elde edilen sönüm oranı değerleri Şekil 5.22’de yer almaktadır.

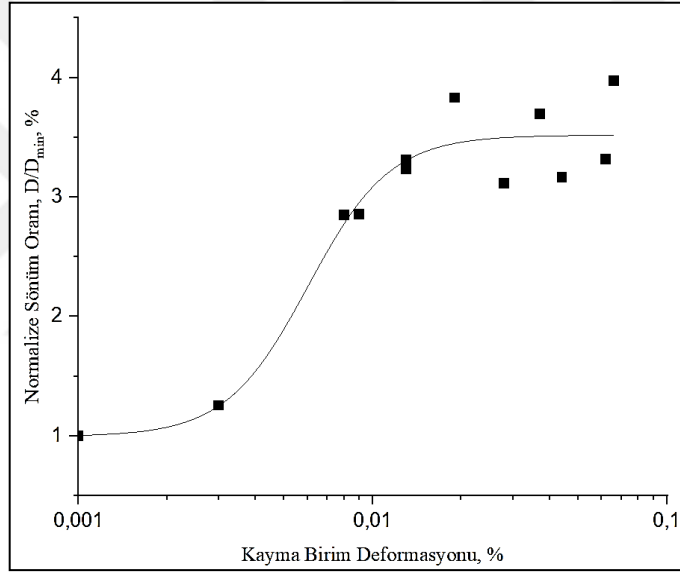


Şekil 5.22. SK1-3 m için logaritmik azalım yöntemi ile elde edilen sönüm oranı değerleri

Şekil 5.23(a)’da SK1-3 m için ORIGINPRO 2023 programı ile yapılan eğri uydurma aşaması neticesinde elde edilen sönüm oranı eğrisi yer almaktadır. Bu eğriden zemin numunesinin minimum sönüm oranının yaklaşık %2,2 olduğu belirlenmiştir. Elde edilen sönüm oranlarının minimum sönüm oranına bölünmesi ile elde edilen değerler kullanılarak, ORIGINPRO 2023 programı ile, normalize sönüm oranı eğrisi elde edilmiştir. SK1-3 m için normalize sönüm oranı eğrisi Şekil 5.23(b)’de yer almaktadır.



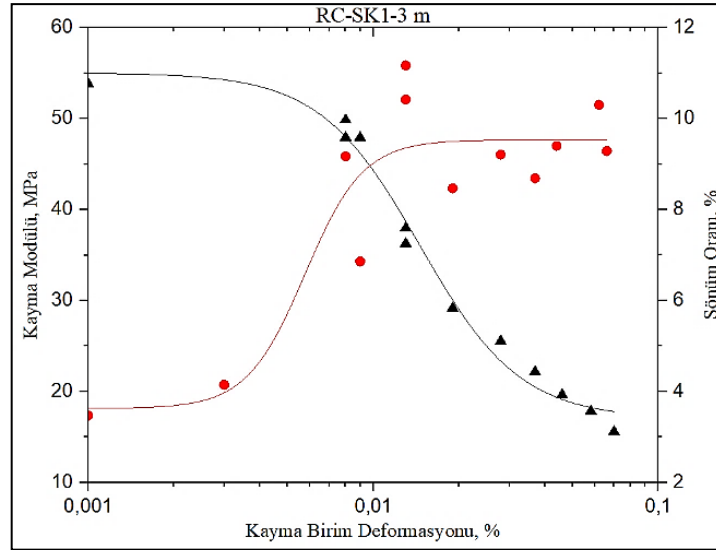
a)



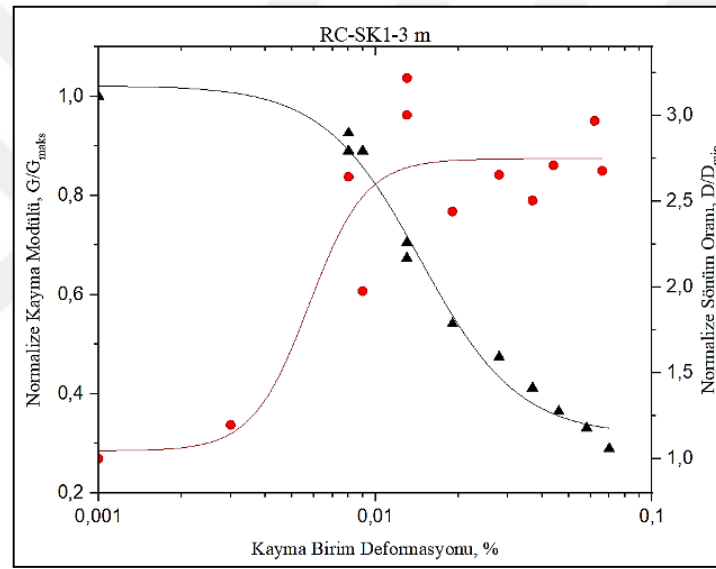
b)

Şekil 5.23. SK1-3 m için logaritmik azalım yöntemi ile elde edilen **a)** Kayma birim deformasyonu-sönüm oranı ve **b)** Kayma birim deformasyonu-normalize sönüm oranı eğrileri

Literatürde yer alan çalışmalarda kayma modülü ve sönüm oranı eğrileri ile normalize kayma modülü ve normalize sönüm oranı eğrileri kayma birim deformasyonuna bağlı olarak aynı grafiklerde sunulmaktadır. Bu nedenle SK1-3 m için bu eğriler ORIGINPRO 2023 programında birleştirilmiş ve sönüm oranının belirlendiği yönteme Şekil 5.24 ve Şekil 5.25'te verilmiştir.

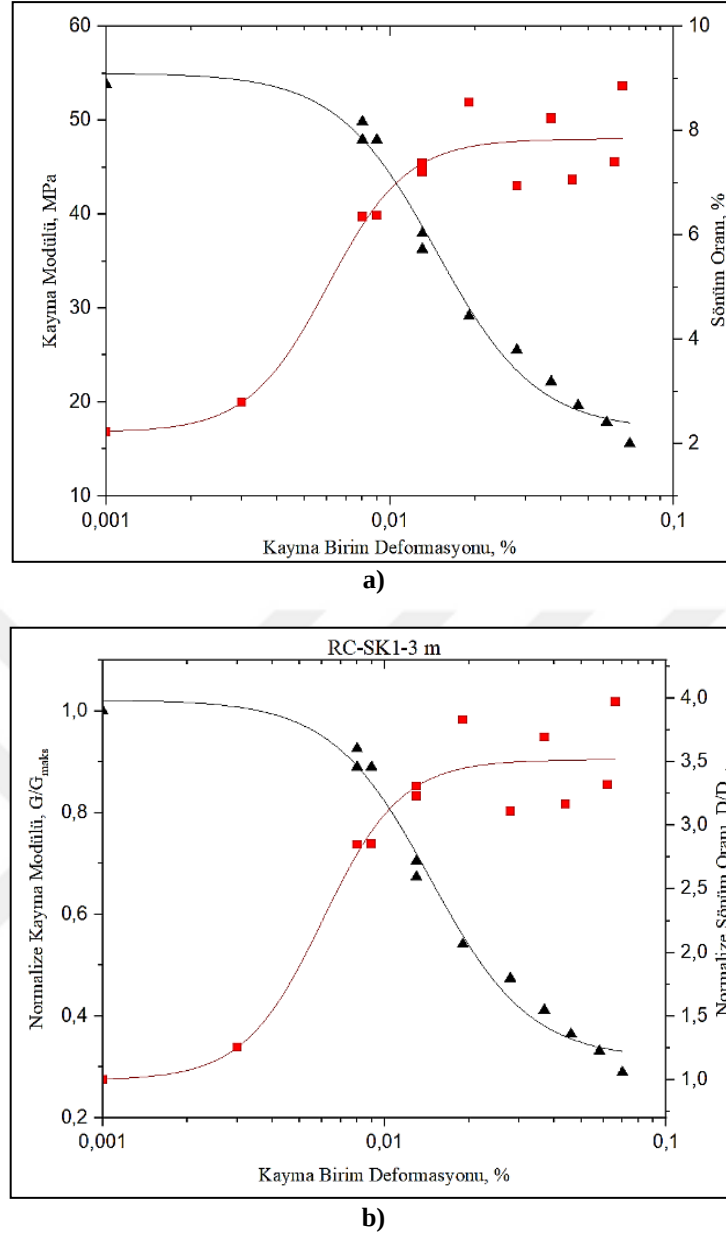


a)



b)

Şekil 5.24. SK1-3 m için birim deformasyon genliğine bağlı olarak **a)** Kayma modülü ve yarım güç bant genişliği yöntemi ile belirlenmiş sönüm oranı eğrileri, **b)** Normalize kayma modülü ve yarım güç bant genişliği yöntemi ile belirlenmiş normalize sönüm oranı eğrileri

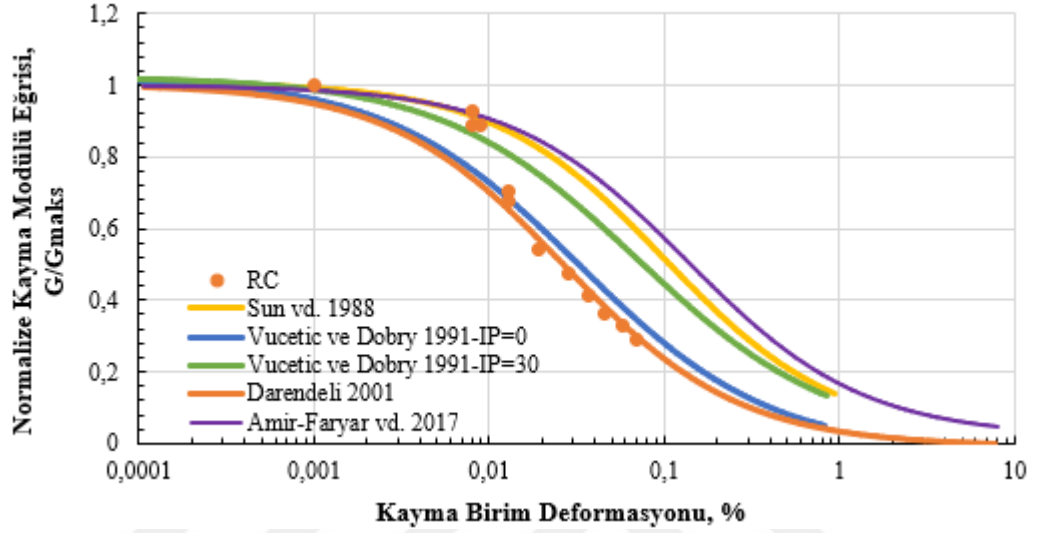


Şekil 5.25. SK1-3 m için birim deformasyon genliğine bağlı olarak **a)** Kayma modülü ve logaritmik azalım yöntemi ile belirlenmiş sönüm oranı eğrileri ve **b)** Normalize kayma modülü ve logaritmik azalım yöntemi ile belirlenmiş normalize sönüm oranı eğrileri

Diğer zemin numuneleri için elde edilen, histerezis eğrileri, yarım güç bant genişliği için frekans-kayma birim deformasyonu eğrileri ve logaritmik azalım eğrileri toplu olarak EK-2’de verilmiştir.

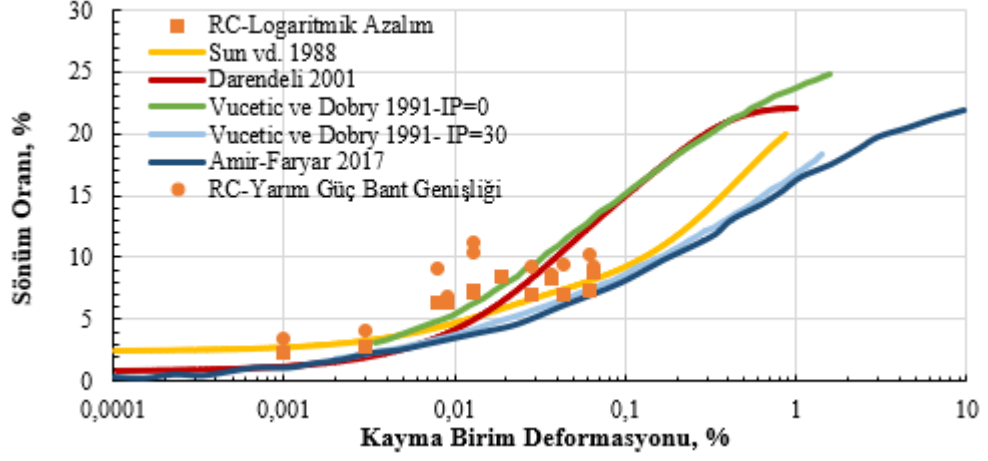
Tez çalışması kapsamında rezonant kolon deneyi elde edilen kayma modülü ve sönüm oranı değerleri 10^{-3} ile 10^{-1} kayma birim deformasyonları aralığındadır. Bu nedenle daha geniş kayma birim deformasyonu aralığı için zemin numunesinin kayma modülünün ve sönüm oranının eğilim trendini belirlemek için deney sonuçları literatür eğrileri ile karşılaştırılmıştır.

SK1-3 m zemin numunesi için, Şekil 5.26’da yer alan literatür eğrileri ile deney sonuçlarının karşılaştırması neticesinde, normalize kayma modülü değerlerinin 10^{-2} kayma birim deformasyon genliğinden itibaren (Darendeli, 2001) eğrisi ile tam uyumlu olduğu belirlenmiştir. 10^{-3} ile 10^{-2} kayma birim deformasyonu aralığında ise (Sun vd., 1988) ve (Amir-Faryar vd., 2017) eğrileri ile uyumlu olduğu belirlenmiştir.



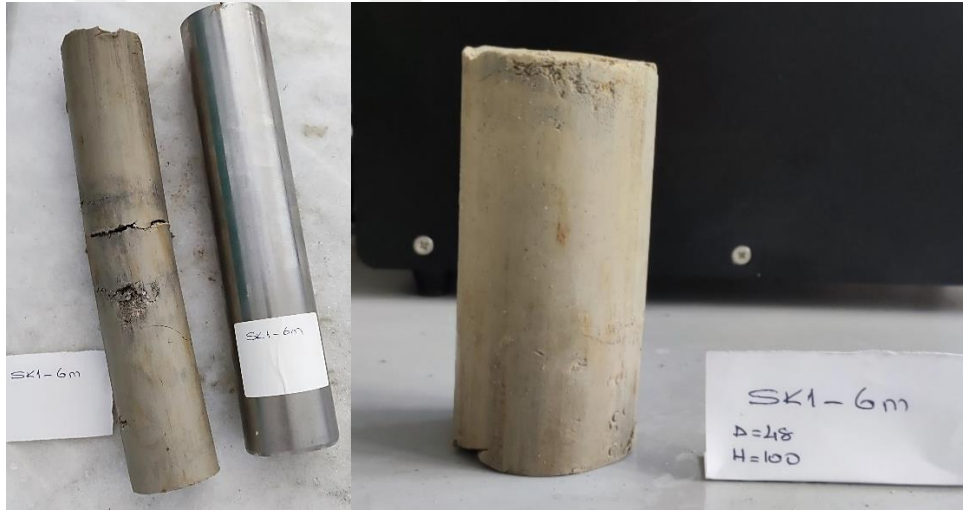
Şekil 5.26. SK1-3 m için elde edilen normalize kayma modülü değerlerinin literatür eğrileri ile karşılaştırılması

Şekil 5.27’de sönüm oranı değerleri literatür eğrileri ile karşılaştırılmıştır. Logaritmik azalım ile belirlenen sönüm oranı değerlerinin (Sun vd., 1988) eğrisi ile tam uyumlu olduğu belirlenmiştir. Yarım güç bant genişliği yöntemi ile belirlenen sönüm oranı değerlerinin ise, 10^{-2} ’den küçük birim deformasyon genliklerinde (Sun vd., 1988) eğrisi ile, 10^{-2} ’den büyük birim deformasyon genliklerinde (Darendeli, 2001) eğrisi ile daha uyumlu olduğu belirlenmiştir.



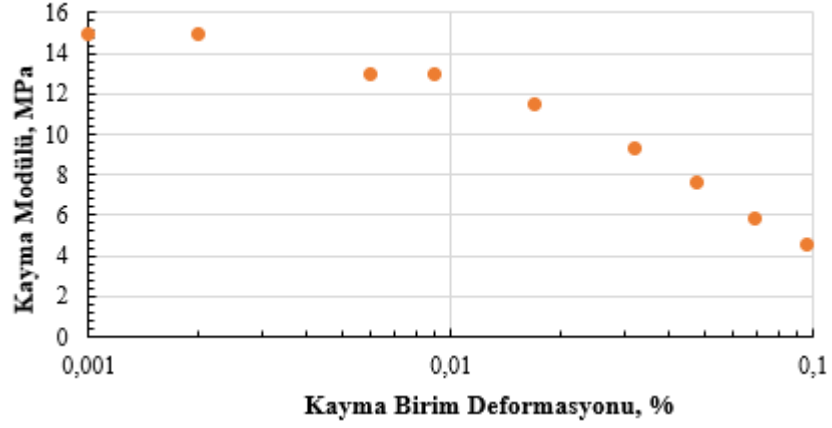
Şekil 5.27. SK1-3 m için elde edilen sönüm oranı değerlerinin literatür eğrileri ile karşılaştırılması

Numune alıcıdan çıkarılan SK1-6 m rezonant kolon deney numunesi Şekil 5.28’de yer almaktadır.



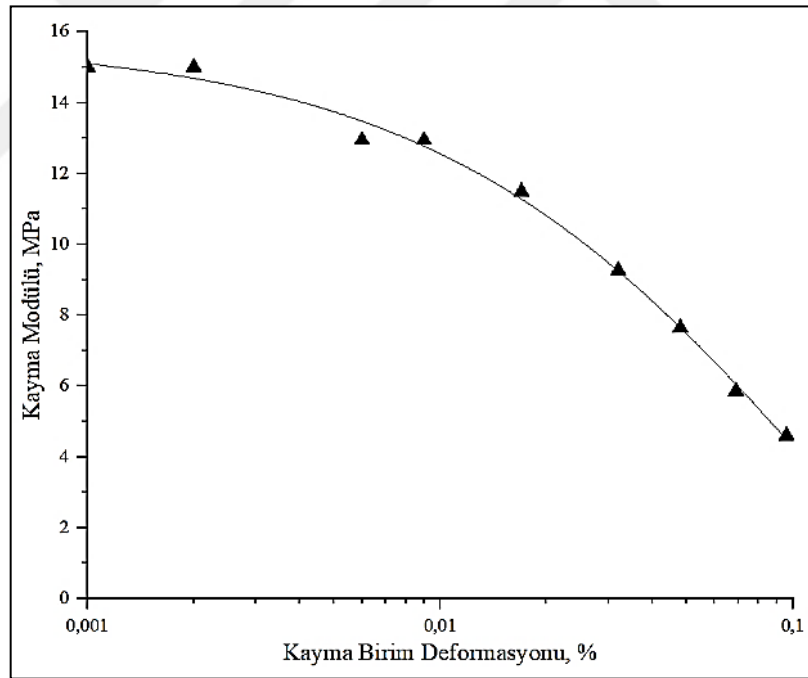
Şekil 5.28. SK1-6 m rezonant kolon deney numunesi

Şekil 5.29’da SK1-6 m için rezonant kolon deneyi ile elde edilen birim deformasyon genliğine bağlı olarak kayma modülü değerleri yer almaktadır.



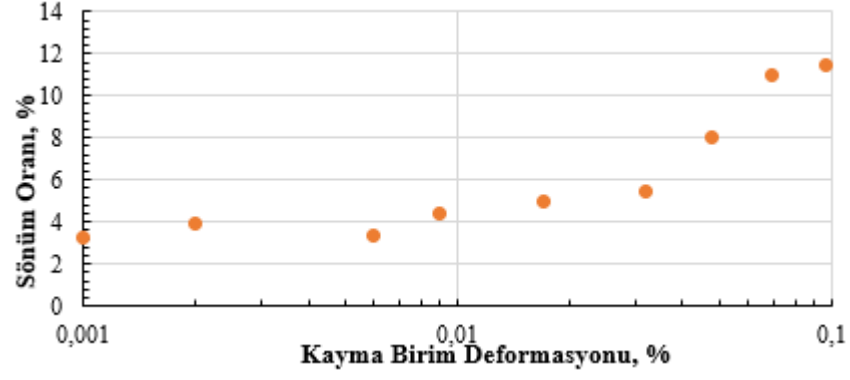
Şekil 5.29. SK1-6 m için rezonant kolon deneyi ile elde edilen birim deformasyon genliğine bağlı olarak kayma modülü değerleri

Şekil 5.30’da ise eğri uydurma neticesinde elde edilen kayma modülü eğrisi yer almaktadır. Kayma modülü-kayma birim deformasyonu eğrisinden, bu numune için maksimum dinamik kayma modülünün 15 MPa olduğu belirlenmiştir.



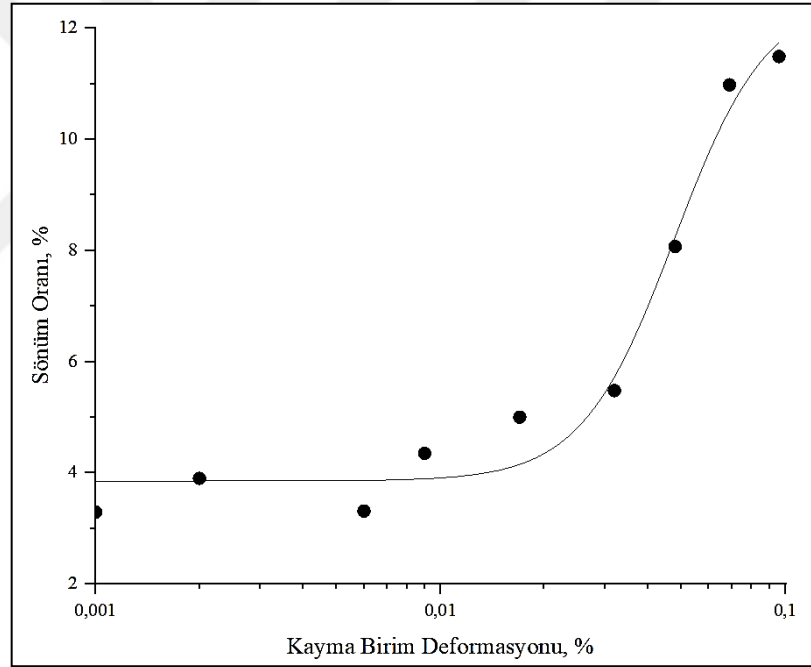
Şekil 5.30. SK1-6 m için programı ile elde edilen kayma modülü eğrisi

SK1-6 m için yarım güç bant genişliği yöntemi ile elde edilen sönüm oranı değerleri Şekil 5.31’de yer almaktadır.



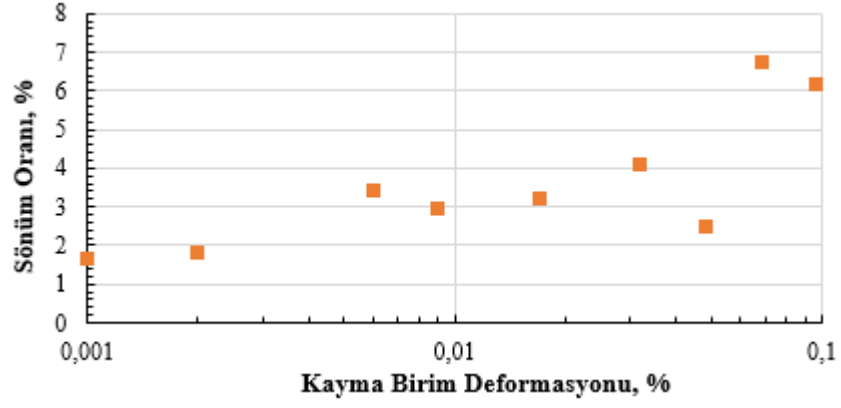
Şekil 5.31. SK1-6 m için yarım güç bant genişliği ile elde edilen sönüm oranı değerleri

Şekil 5.32’de eğri uydurma işlemi ile elde edilen sönüm oranı eğrisi yer almaktadır. SK1-6 m zemin numunesi için yarım güç bant yöntemi ile elde edilen sönüm oranı eğrisinden minimum sönüm oranının yaklaşık %4 olduğu belirlenmiştir.



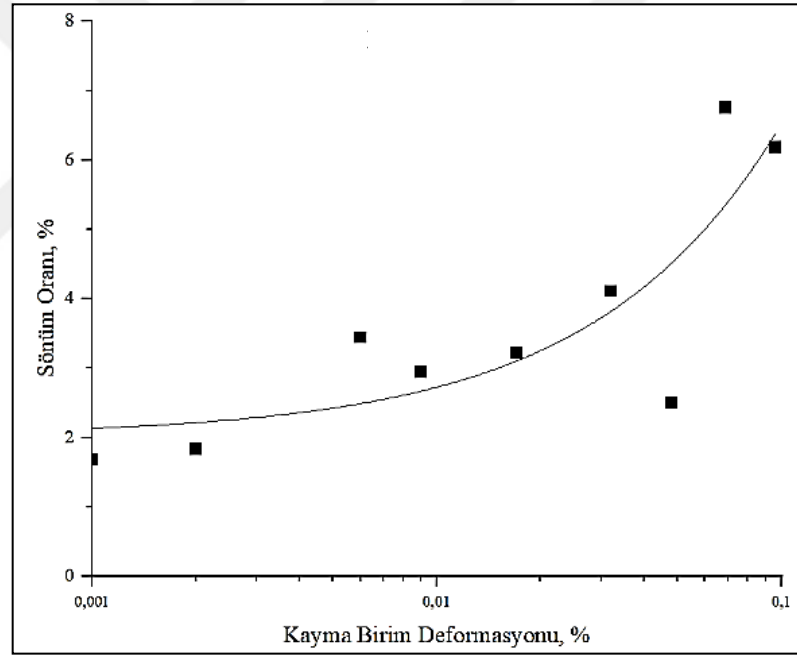
Şekil 5.32. SK1-6 m için yarım güç bant genişliği yöntemi ile elde edilen kayma birim deformasyonu-sönüm oranı eğrisi

SK1-6 m için logaritmik azalım yöntemi ile elde edilen sönüm oranı değerleri Şekil 5.33’te yer almaktadır.



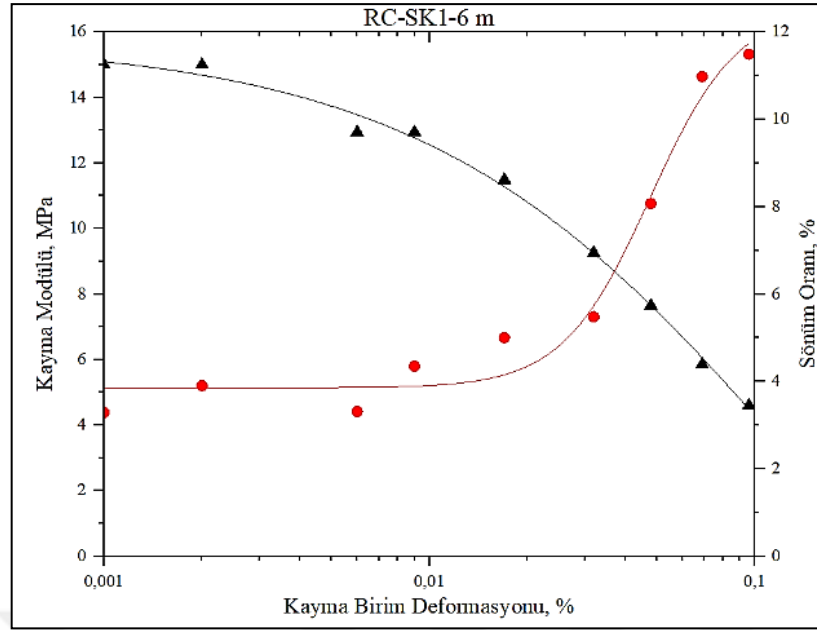
Şekil 5.33. SK1-6 m için logaritmik azalım yöntemi ile elde edilen sönüm oranı değerleri

Şekil 5.34'te eğri uydurma ile elde edilen sönüm oranı eğrisi yer almaktadır. SK1-6 m için logaritmik azalım yöntemi ile elde edilen minimum sönüm oranının yaklaşık %2 olduğu belirlenmiştir.

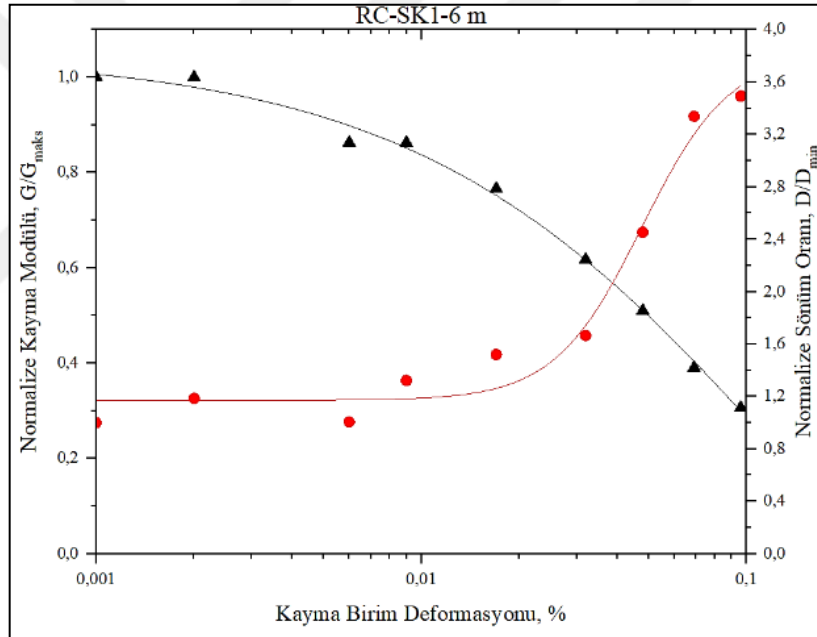


Şekil 5.34. SK1-6 m için logaritmik azalım yöntemi ile elde edilen kayma birim deformasyonu-sönüm oranı eğrisi

SK1-6 m için, sönüm oranının belirlendiği yonteme bağı olarak, kayma modülü ve sönüm oranı eğrileri ile normalize kayma modülü ve normalize sönüm oranı eğrileri Şekil 5.35 ve Şekil 5.36'te verilmiştir.

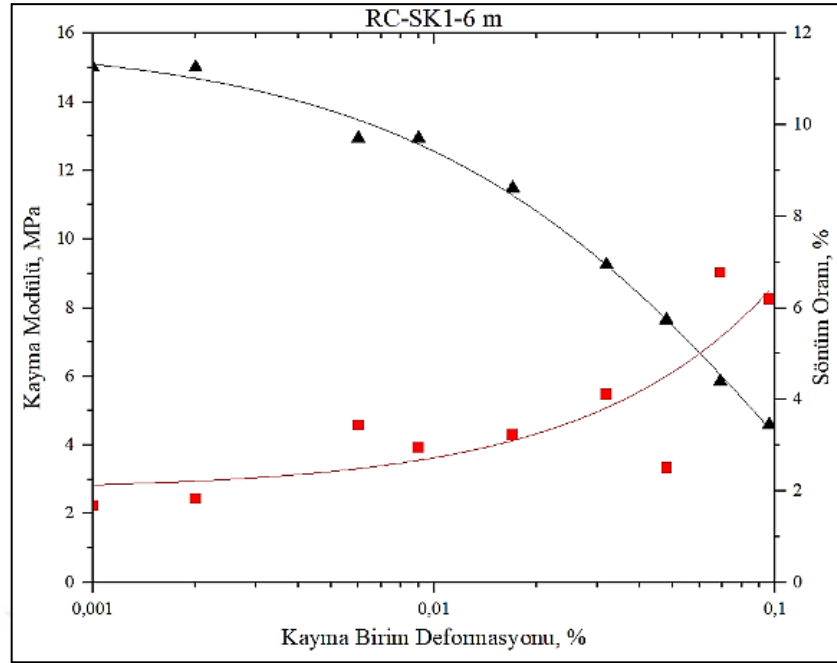


a)

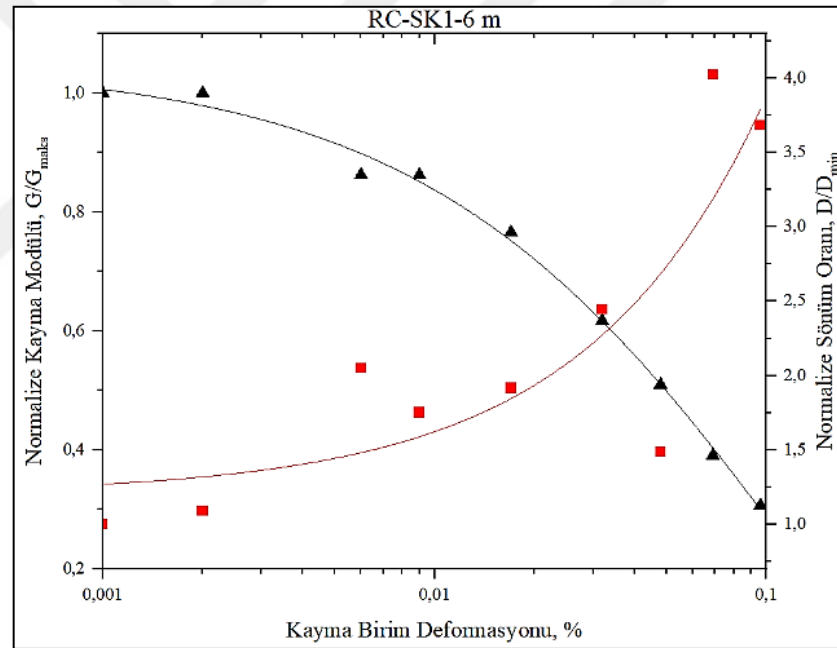


b)

Şekil 5.35. SK1-6 m için birim deformasyon genişliğine bağlı olarak **a)** Kayma modülü ve yarım güç bant genişliği yöntemi ile belirlenmiş sönüm oranı eğrileri, **b)** Normalize kayma modülü ve yarım güç bant genişliği yöntemi ile belirlenmiş normalize sönüm oranı eğrileri



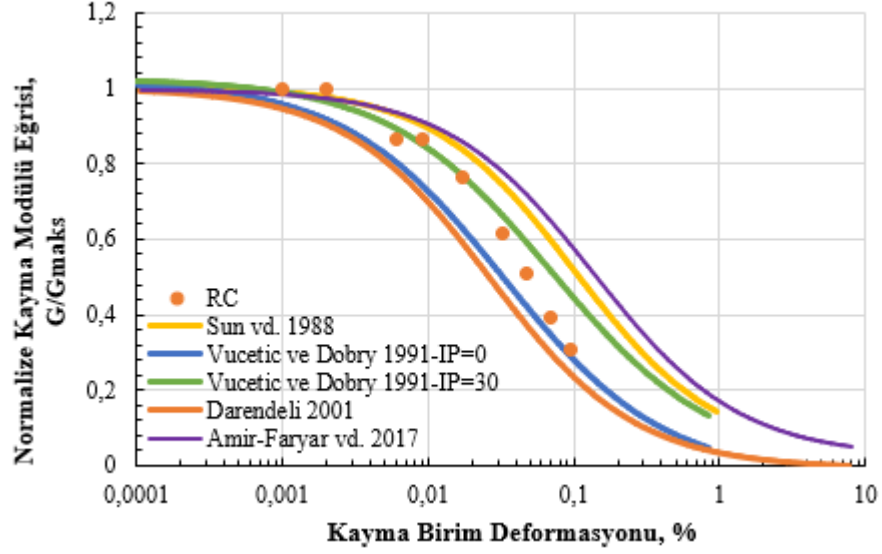
a)



b)

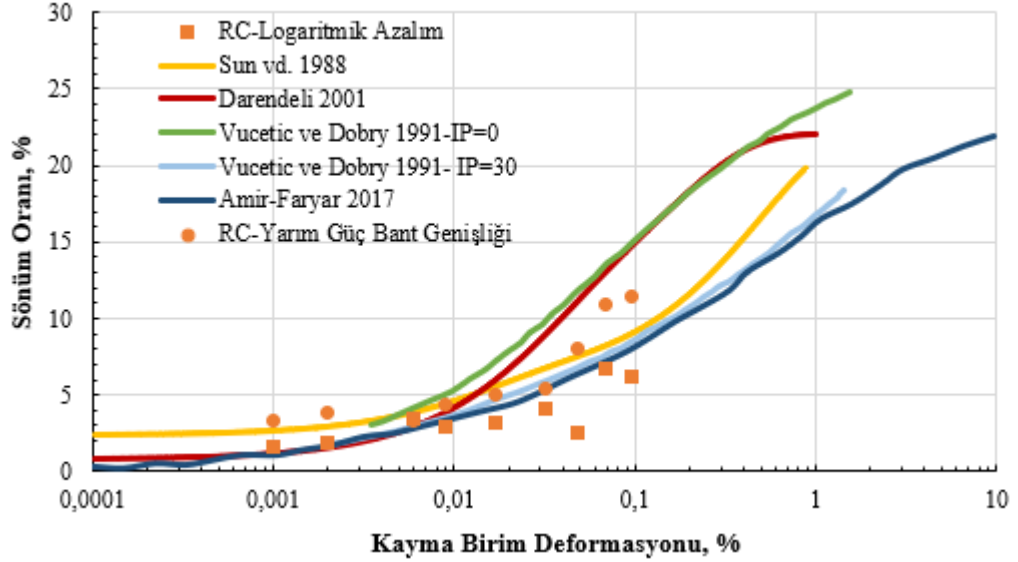
Şekil 5.36. SK1-6 m için birim deformasyon genliğine bağlı olarak **a)** Kayma modülü ve logaritmik azalım yöntemi ile belirlenmiş sönüm oranı eğrileri ve **b)** Normalize kayma modülü ve logaritmik azalım yöntemi ile belirlenmiş normalize sönüm oranı eğrileri

Şekil 5.37’da yer alan literatür eğrileri ile normalize kayma modülü değerlerinin karşılaştırması neticesinde, deney sonuçlarının genel olarak (Vucetic & Dobry, 1991)- $I_p=30$ eğrisi ile uyumlu olduğu belirlenmiştir.



Şekil 5.37. SK1-6 m için elde edilen değerlerin literatür eğrileri ile karşılaştırılması

Şekil 5.38’de yer alan sönüm oranı değerlerinin literatür eğrileri ile karşılaştırılması neticesinde yarım güç bant genişliği yöntemi ile elde edilen değerlerin (Sun vd., 1988) eğrisi ile uyumlu olduğu ve logaritmik azalım yöntemi ile elde edilen değerlerin (Amir-Faryar vd., 2017) eğrisi ile uyumlu olduğu belirlenmiştir.



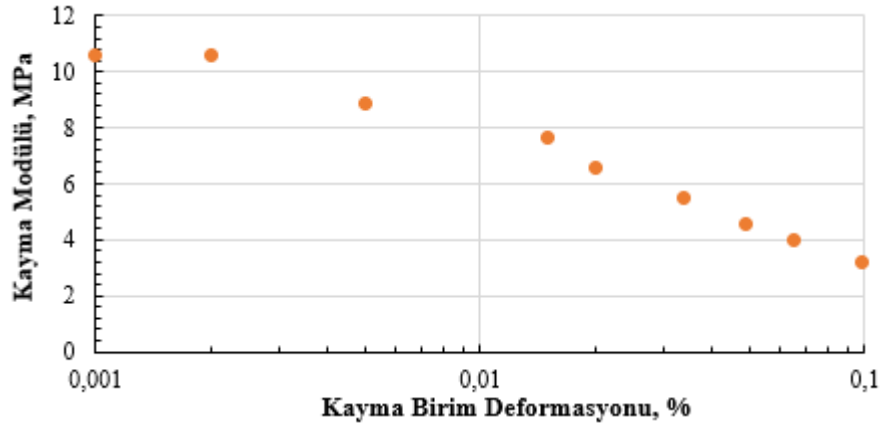
Şekil 5.38. SK1-6 m için elde edilen sönüm oranı değerlerinin literatür eğrileri ile karşılaştırılması

Numune alıcıdan çıkarılan SK1-9 m rezonant kolon deney numunesi Şekil 5.39’da yer almaktadır.



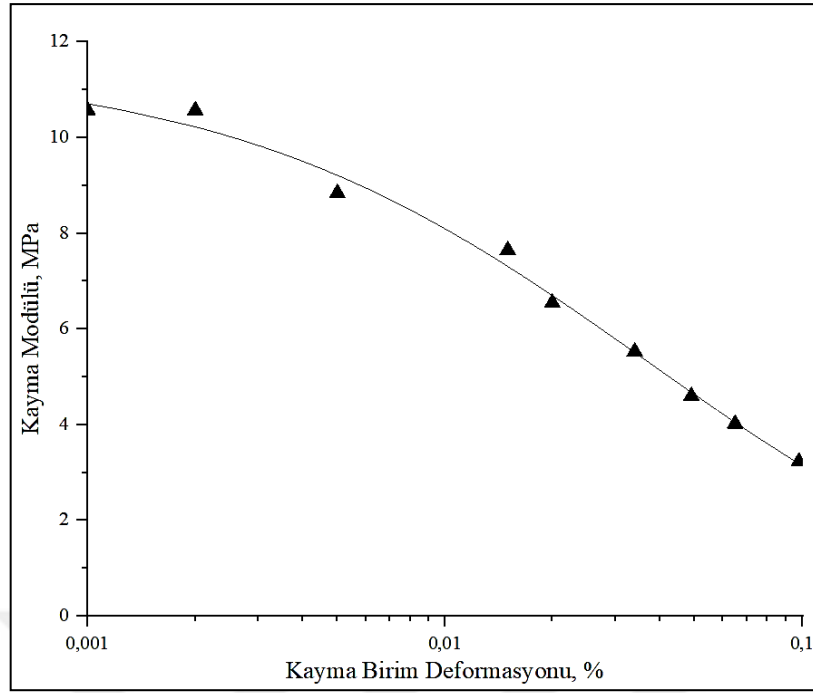
Şekil 5.39. SK1-9 m rezonant kolon deney numunesi

Şekil 5.40'ta SK1-9 m için rezonant kolon deneyi ile elde edilen birim deformasyon genliğine bağlı olarak kayma modülü değerleri yer almaktadır.



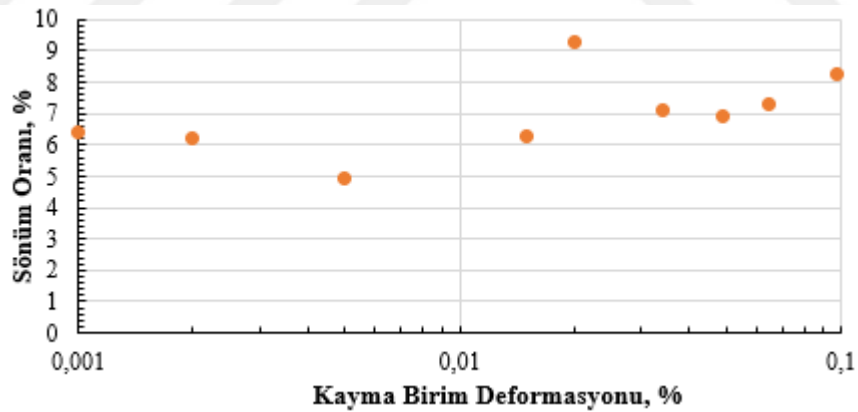
Şekil 5.40. SK1-9 m için rezonant kolon deneyi ile elde edilen birim deformasyon genliğine bağlı olarak kayma modülü değerleri

SK1-9 m için eğri uydurma ile elde edilen kayma modülü eğrisi Şekil 5.41'de yer almaktadır. Kayma modülü-kayma birim deformasyonu eğrisinden, SK1-9 m için maksimum dinamik kayma modülünün yaklaşık 11 MPa olduğu belirlenmiştir.



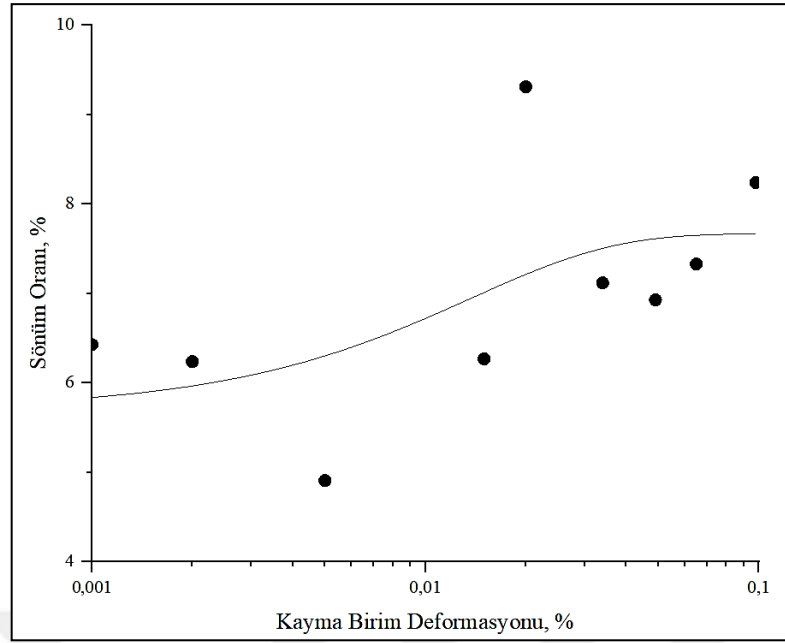
Şekil 5.41. SK1-9 m için elde edilen kayma modülü eğrisi

SK1-9 m için yarım güç bant genişliği yöntemi ile elde edilen sönüm oranı değerleri Şekil 5.42’de yer almaktadır.



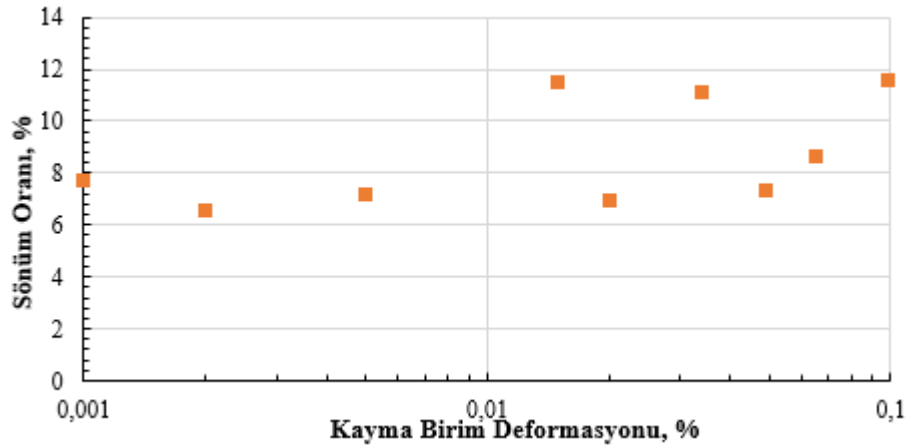
Şekil 5.42. SK1-9 m için yarım güç bant genişliği ile elde edilen sönüm oranı değerleri

SK1-9 m için Şekil 5.43’te yer alan sönüm oranı eğrisinden yarım güç bant genişliği yöntemi ile elde edilen minimum sönüm oranının yaklaşık %6 olduğu belirlenmiştir.



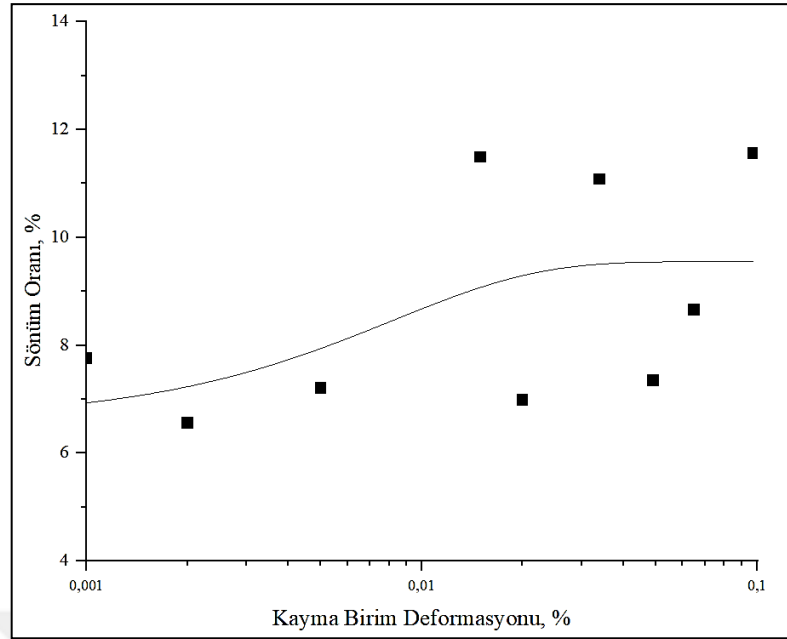
Şekil 5.43. SK1-9 m için yarı güç bant genişliği yöntemi ile elde edilen kayma birim deformasyonu-sönüm oranı eğrisi

SK1-9 m için logaritmik azalım yöntemi ile elde edilen sönüm oranı değerleri Şekil 5.44'te yer almaktadır.



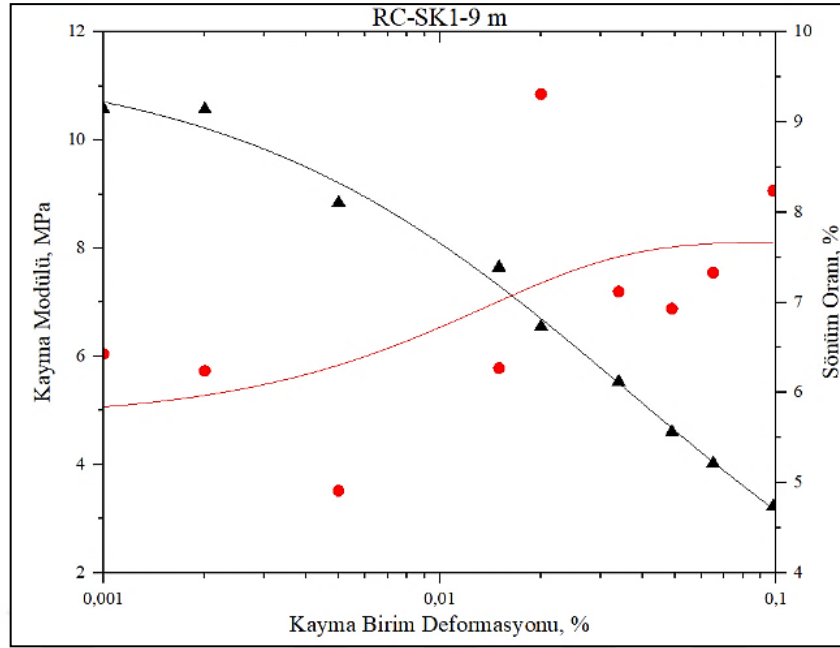
Şekil 5.44. SK1-9 m için logaritmik azalım yöntemi ile elde edilen sönüm oranı değerleri

SK1-9 m için Şekil 5.45'te yer alan sönüm oranı eğrisinden logaritmik azalım yöntemi ile elde edilen minimum sönüm oranının %7 olduğu belirlenmiştir.

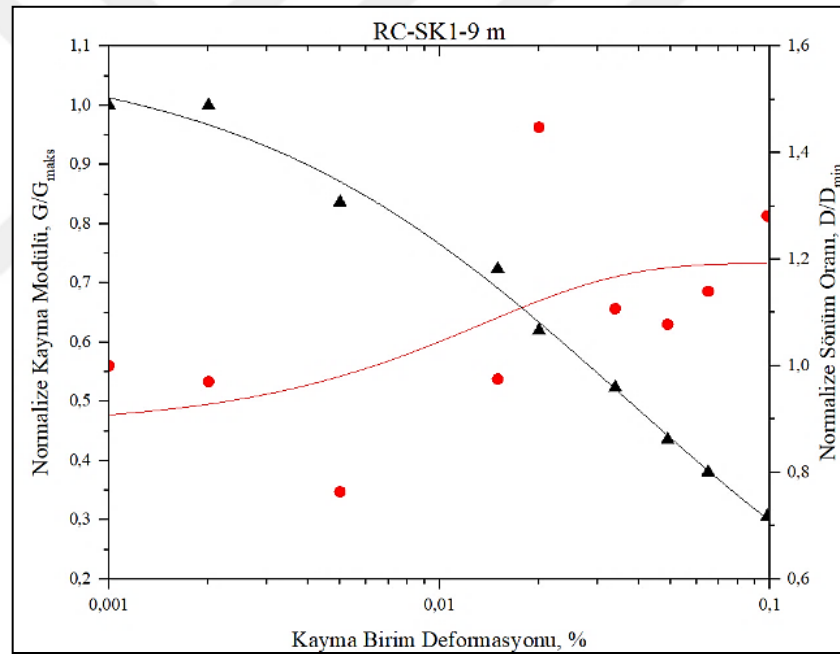


Şekil 5.45. SK1-9 m için logaritmik azalım yöntemi ile elde edilen kayma birim deformasyonu-sönüm oranı eğrisi

SK1-9 m için, sönüm oranının belirlenme yöntemine bağlı olarak elde edilmiş, birleştirilmiş kayma modülü ve sönüm oranı eğrileri ile normalize kayma modülü ve normalize sönüm oranı eğrileri Şekil 5.46 ve Şekil 5.47’de verilmiştir.

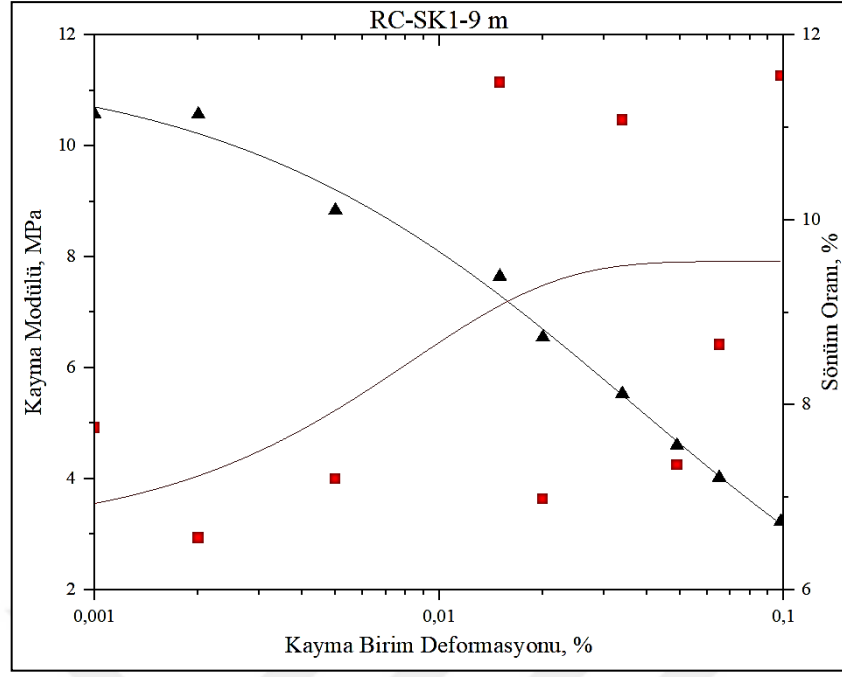


a)

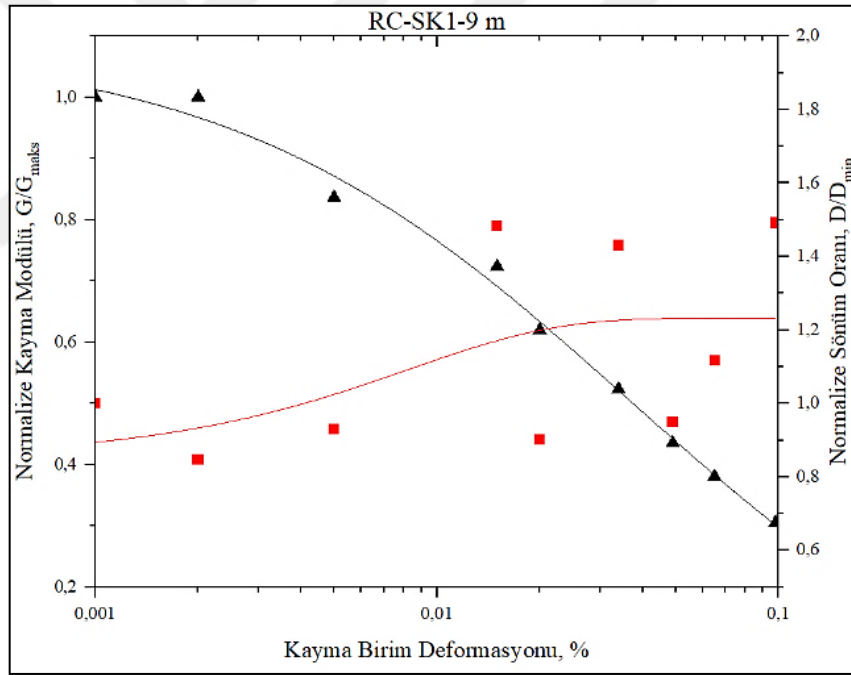


b)

Şekil 5.46. SK1-9 m için birim deformasyon genişliğine bağlı olarak **a)** Kayma modülü ve yarım güç bant genişliği yöntemi ile belirlenmiş sönüm oranı eğrileri, **b)** Normalize kayma modülü ve yarım güç bant genişliği yöntemi ile belirlenmiş normalize sönüm oranı eğrileri



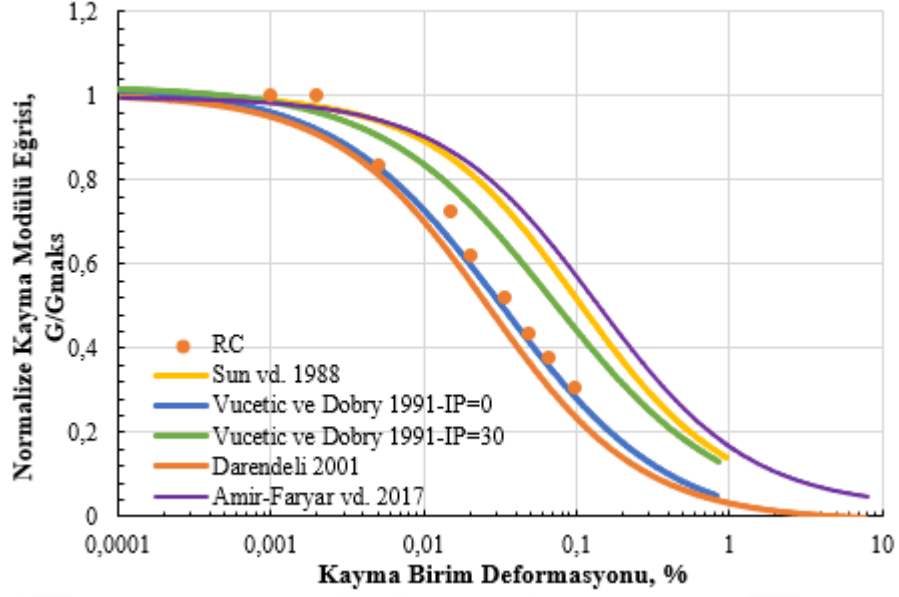
a)



b)

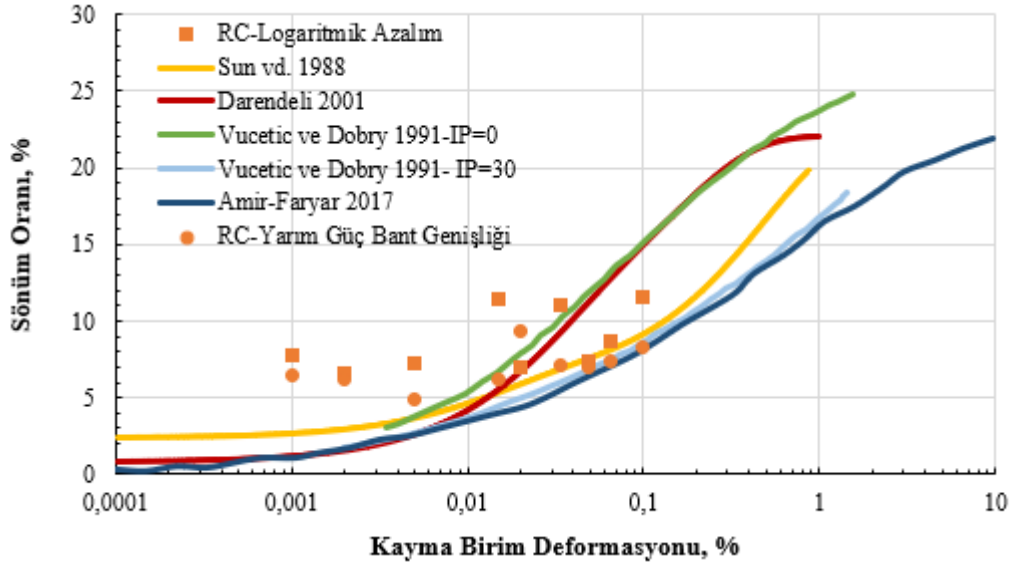
Şekil 5.47. SK1-9 m için birim deformasyon genliğine bağlı olarak **a)** Kayma modülü ve logaritmik azalım yöntemi ile belirlenmiş sönüm oranı eğrileri ve **b)** Normalize kayma modülü ve logaritmik azalım yöntemi ile belirlenmiş normalize sönüm oranı eğrileri

Şekil 5.48’de literatür eğrileri ile normalize kayma modülü değerlerinin karşılaştırılması yer almaktadır. Karşılaştırma neticesinde, deney sonuçlarının genel olarak (Vucetic & Dobry, 1991)- $I_p=0$ eğrisi ile tam uyumlu olduğu belirlenmiştir.



Şekil 5.48. SK1-9 m için elde edilen değerlerin literatür eğrileri ile karşılaştırılması

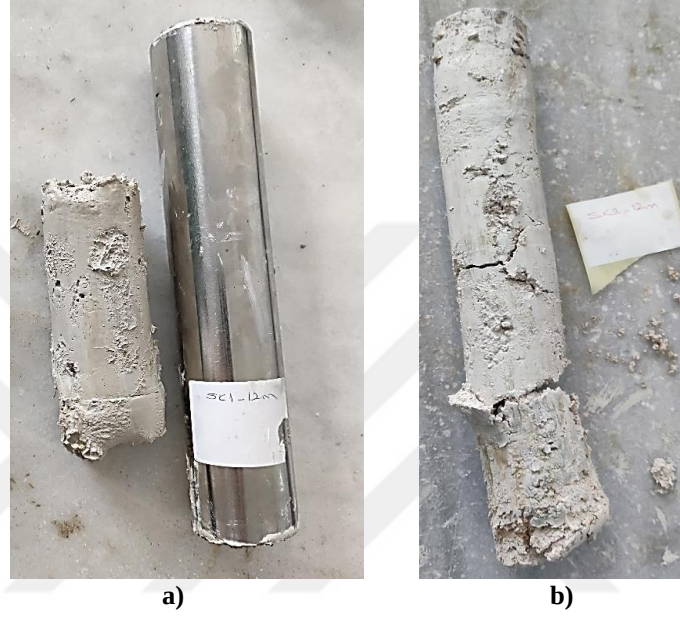
Şekil 5.49’te yer alan sönüm oranı verilerinin literatür eğrileri ile karşılaştırılması neticesinde iki yöntemle elde edilen sönüm oranı değerlerinin 10^{-2} birim deformasyon genliğine kadar literatür eğrilerinden farklı bir dağılımda olduğu belirlenmiştir. 10^{-2} birim deformasyon genliğinden büyük deformasyonlarda elde edilen değerlerin (Vucetic & Dobry, 1991) eğrileri arasında bir dağılım gösterdiği belirlenmiştir.



Şekil 5.49. SK1-9 m için elde edilen sönüm oranı değerlerinin literatür eğrileri ile karşılaştırılması

SK1-12 m’ye ait Shelby tüpünden rezonant kolon deney numunesi alınamamıştır. Sondajlar esnasında yeraltı su seviyesi zemin yüzünden 11 m aşağıda olduğu

belirlenmiştir. Bu nedenle 12 m ve daha sonraki derinliklerden alınan zemin numuneleri çok yumuşak kıvamlı numuneler olup, numunelerin tüplerden çıkarılması ve deney yapılması oldukça güçleşmiştir. SK2-12 m Shelby tüpünden alınan zemin numunesi numune alıcıdan çıkarılmış ve bu numune ile rezonant kolon deneyi gerçekleştirilmiştir. Şekil 5.50’da numune alıcıdan çıkarılan zemin numuneleri ve Şekil 5.51’de rezonant kolon deney numunesi yer almaktadır.

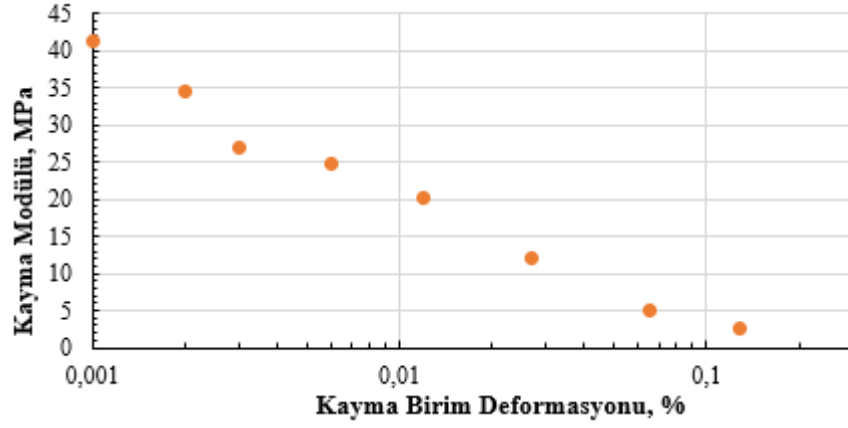


Şekil 5.50. a) SK1-12 m ve b) SK2-12 m tüpten çıkarılan zemin numunesi



Şekil 5.51. SK2-12 m rezonant kolon deney numunesi

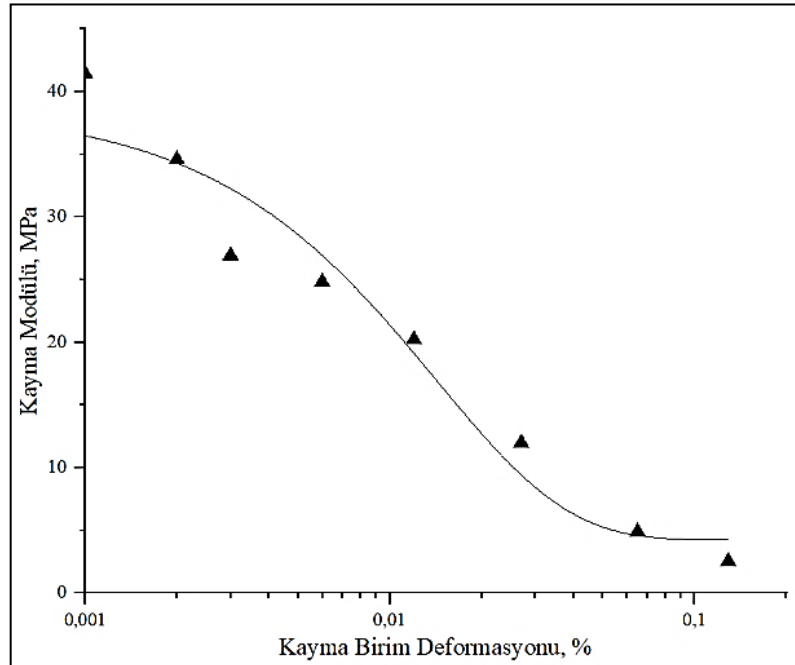
Şekil 5.52’de SK2-12 m için rezonant kolon deneyi ile elde edilen birim deformasyon genliğine bağlı olarak kayma modülü değerleri yer almaktadır.



Şekil 5.52. SK2-12 m için rezonant kolon deneyi ile elde edilen birim deformasyon genliğine bağlı olarak kayma modülü değerleri

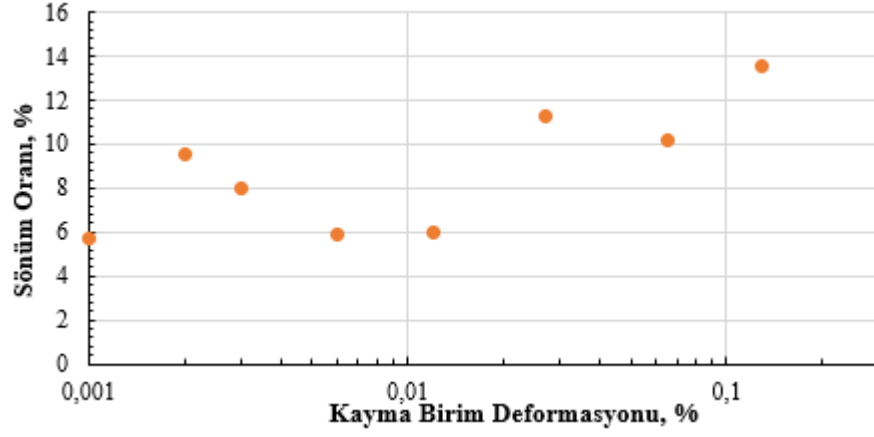
SK2-12 m deney numunesi yumuşak kıvamlı ve yüksek kum ve çakıl içerikli zemin numunesidir. Zemin oldukça yumuşak olmasına rağmen içerisinde bulunan kum çakıllar nedeniyle kayma modülü değerleri yüksek elde edilmiştir.

SK2-12 m için elde edilen kayma modülü eğrisi Şekil 5.53'te yer almaktadır. Kayma modülü-kayma birim deformasyonu grafiğinden, bu numunenin maksimum dinamik kayma modülünün yaklaşık 36 MPa olduğu belirlenmiştir.



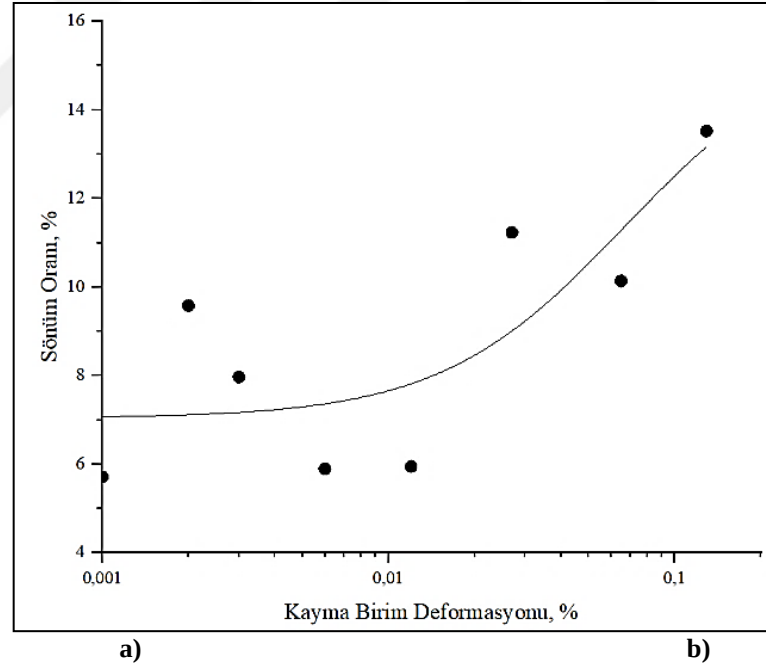
Şekil 5.53. SK2-12 m için ORIGINPRO 2023 programı ile elde edilen kayma modülü eğrisi

SK2-12 m için yarım güç bant genişliği yöntemi ile elde edilen sönüm oranı değerleri Şekil 5.54'te yer almaktadır.



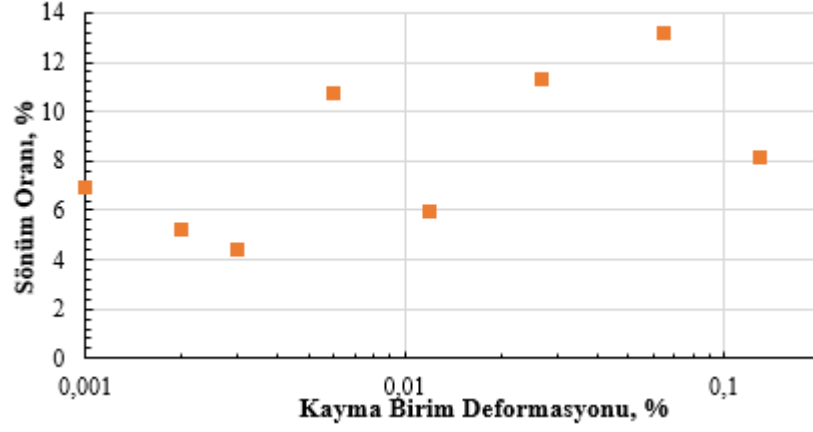
Şekil 5.54. SK2-12 m için yarım güç bant genişliği ile elde edilen sönüm oranı değerleri

Şekil 5.55'te ORIGIN PRO 2023 programında yapılan eğri uydurma ile elde edilen sönüm oranı eğrisi yer almaktadır. Bu eğriden zemin numunesinin minimum sönüm oranının yaklaşık %7 olduğu belirlenmiştir. Sönüm oranının yüksek çıkması zeminin yumuşak kıvamlı olduğunun bir göstergesidir.



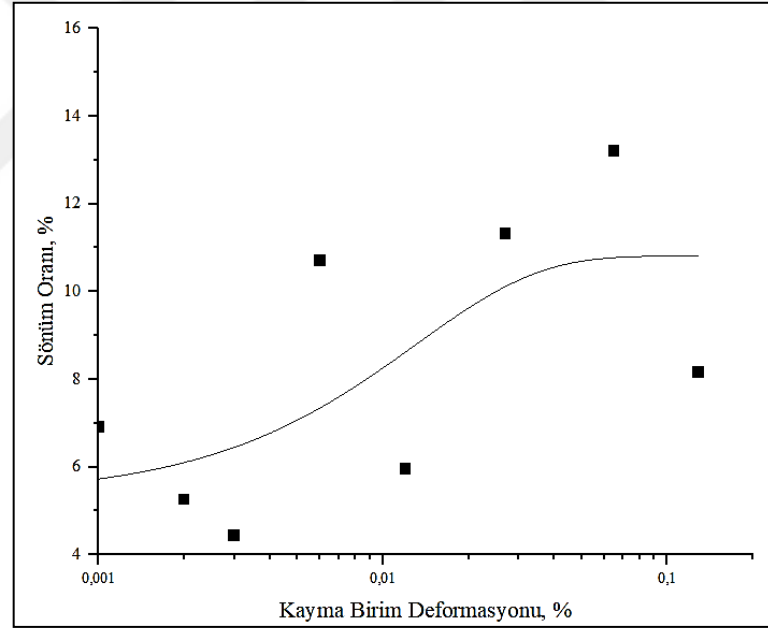
Şekil 5.55. SK2-12 m için yarım güç bant genişliği yöntemi ile elde edilen kayma birim deformasyonu-sönüm oranı eğrisi

SK2-12 m için logaritmik azalım yöntemi ile elde edilen sönüm oranı değerleri Şekil 5.56'da yer almaktadır.



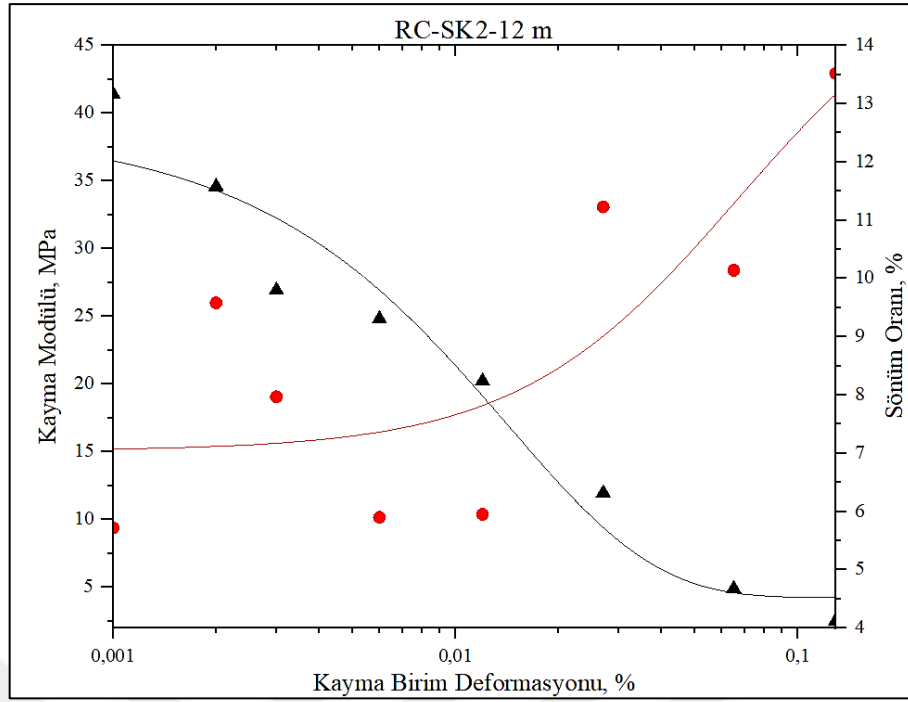
Şekil 5.56. SK2-12 m için logaritmik azalım yöntemi ile elde edilen sönüm oranı değerleri

Şekil 5.57’de ORIGINPRO 2023 programı ile elde edilen sönüm oranı eğrisi yer almaktadır. Bu eğriden zemin numunesinin minimum sönüm oranının yaklaşık %6 olduğu belirlenmiştir.

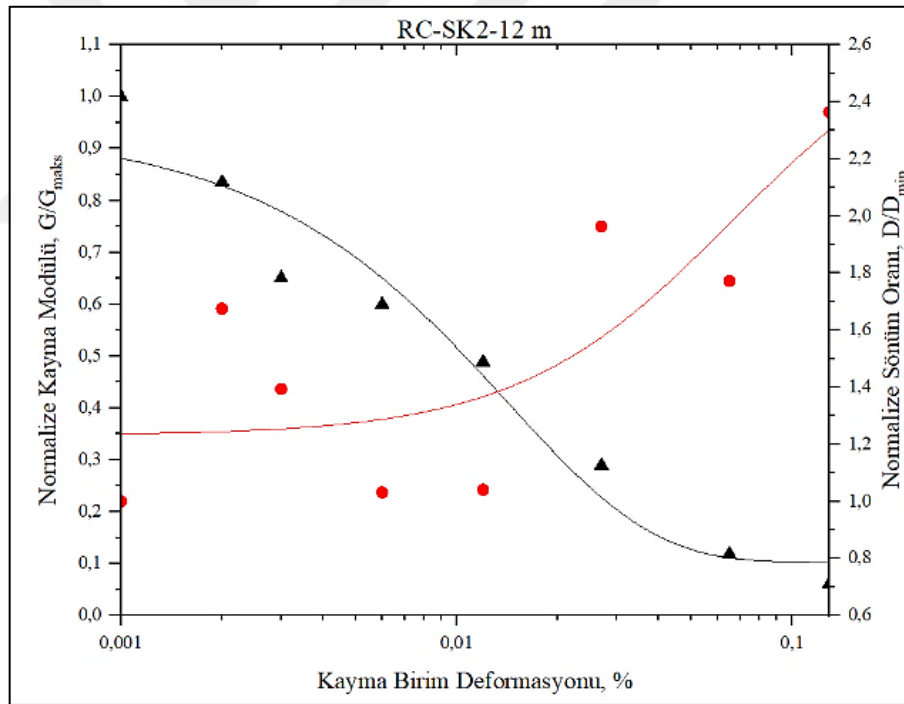


Şekil 5.57. SK2-12 m için logaritmik azalım yöntemi ile elde edilen a) Kayma birim deformasyonu-sönüm oranı ve b) Kayma birim deformasyonu-normalize sönüm oranı eğrileri

SK2-12 m için kayma modülü ve sönüm oranı eğrileri ile normalize kayma modülü ve normalize sönüm oranı eğrileri kayma birim deformasyonuna bağlı olarak Şekil 5.58 ve Şekil 5.59’da verilmiştir.

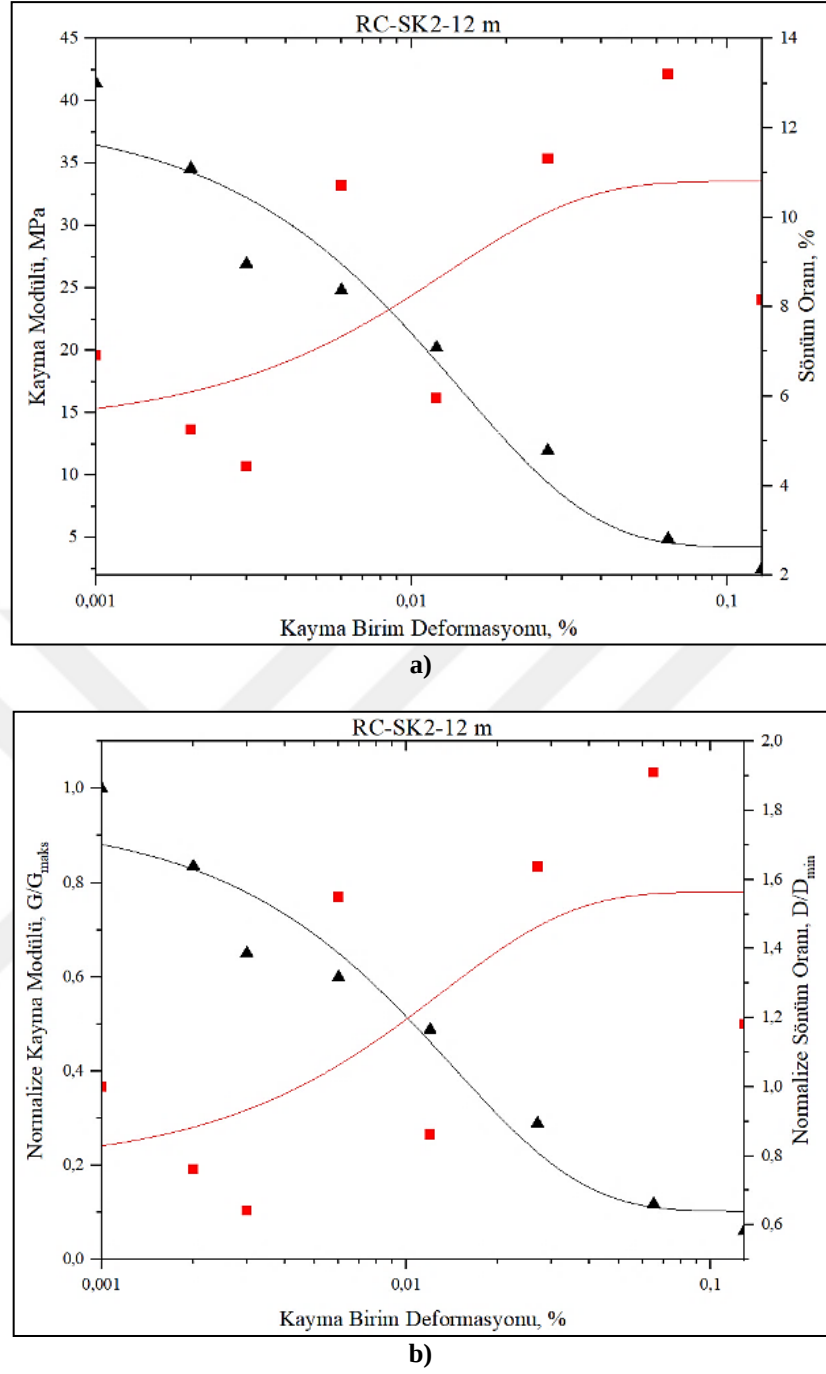


a)



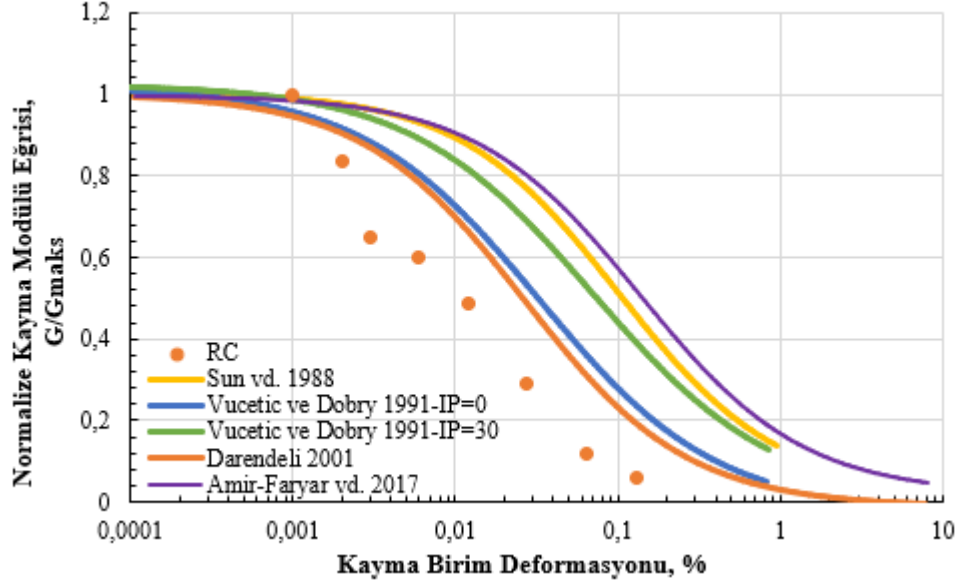
b)

Şekil 5.58. SK2-12 m için birim deformasyon genliğine bağlı olarak **a)** Kayma modülü ve yarı güç bant genişliği yöntemi ile belirlenmiş sönüm oranı eğrileri, **b)** Normalize kayma modülü ve yarı güç bant genişliği yöntemi ile belirlenmiş normalize sönüm oranı eğrileri



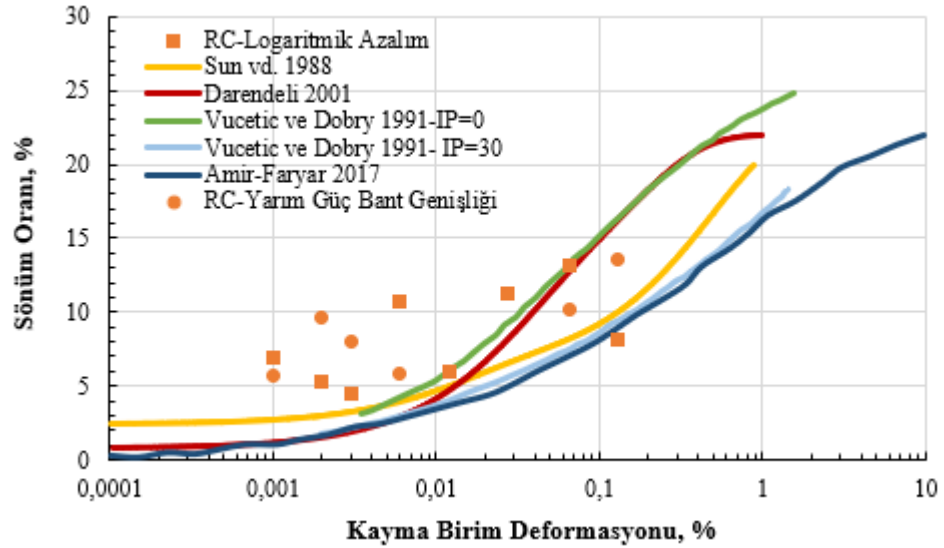
Şekil 5.59. SK2-12 m için birim deformasyon genliğine bağlı olarak **a)** Kayma modülü ve logaritmik azalım yöntemi ile belirlenmiş sönüm oranı eğrileri ve **b)** Normalize kayma modülü ve logaritmik azalım yöntemi ile belirlenmiş normalize sönüm oranı eğrileri

Şekil 5.60'ta literatür eğrileri ile normalize kayma modülü değerleri karşılaştırılmıştır. Karşılaştırması neticesinde, deney sonuçlarının literatür eğrileri dışında bir dağılım gösterdiği belirlenmiştir.



Şekil 5.60. SK2-12 m için elde edilen değerlerin literatür eğrileri ile karşılaştırılması

SK2-12 m için Şekil 5.61’de yer alan sönüm oranı verilerinin literatür eğrileri ile karşılaştırıldığında 10^{-2} birim deformasyon genliğine kadar değerlerin literatür eğrilerinden farklı bir dağılım gösterdiği ve daha büyük birim deformasyon seviyelerinde logaritmik azalım yöntemi ile elde edilen değerlerin (Darendeli, 2001) eğrisi etrafında, yarım güç bant yöntemi ile elde edilen değerlerin (Vucetic & Dobry, 1991) eğrileri arasında bir dağılım gösterdiği belirlenmiştir.



Şekil 5.61. SK2-12 m için elde edilen sönüm oranı değerlerinin literatür eğrileri ile karşılaştırılması

SK1-15 m Shelby tüpünden rezonant kolon deney numunesi alınmıştır. Ancak bu numune, çok yumuşak kıvamlı olduğu için numune deney setine yerleştirilip üst başlık üzerine bağlandıktan sonra numune başlık ağırlığı altında deforme olup göçmüştür (şekil 5.62). SK2-15 m'den Shelby tüpü ile numune alınamamıştır. Bu nedenle, bu derinlik için rezonant kolon deneyi gerçekleştirilememiştir.



a)

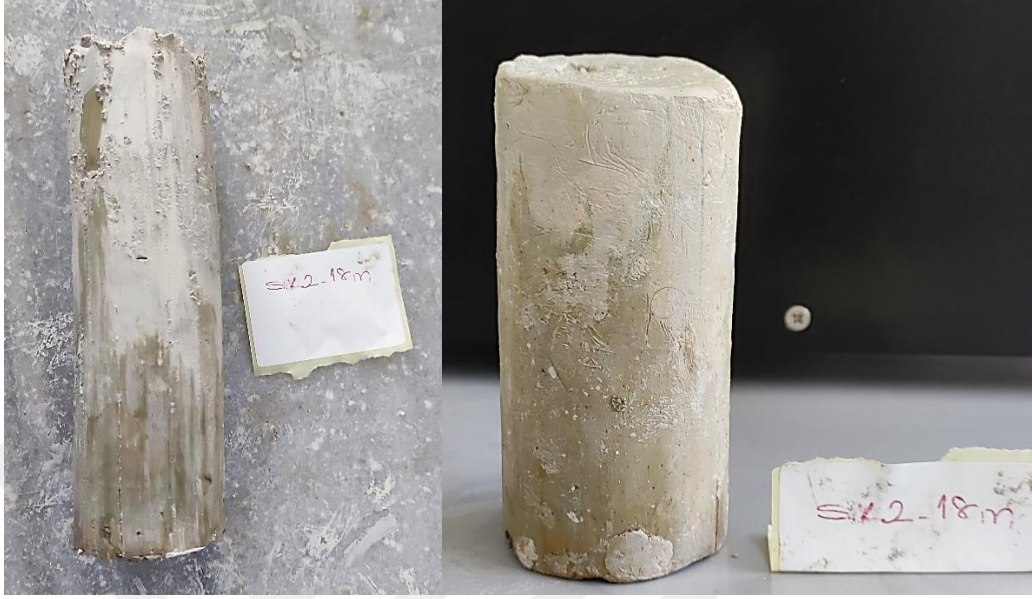


b)

şekil 5.62. SK1-15 m için **a)** Deney numunesi ve **b)** Yükleme başlığı altında numunenin göçmesi

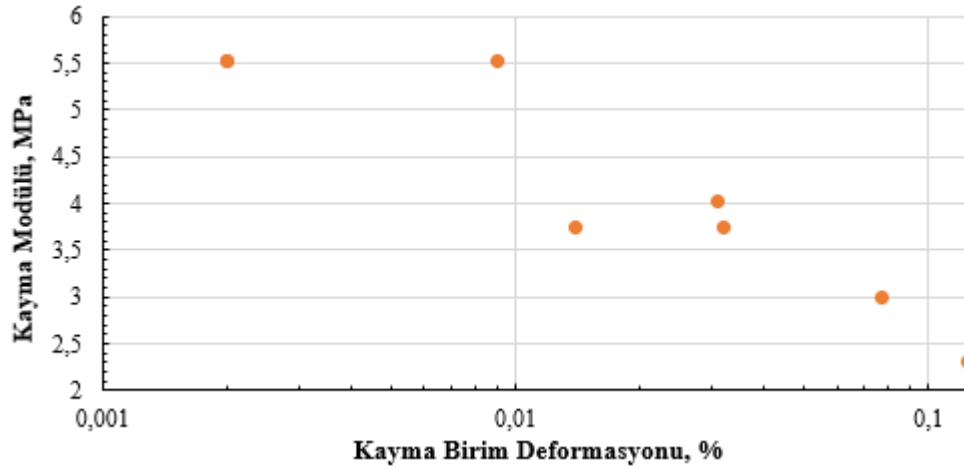
SK1-18 m'ye ait Shelby tüpünde bulunan zemin numunesi deney numunesi almak için yeterli değildi. Bu nedenle SK2-18 m'ye ait Shelby tüpünden deney numunesi

alınmış ve rezonant kolon deneyi gerçekleştirilmiştir. Şekil 5.63’de SK2-18 m için numune alıcıdan çıkarılan rezonant kolon deney numunesi yer almaktadır



Şekil 5.63. SK2-18 m numune alıcıdan çıkarılan ve deney için boyutları ayarlanan rezonant kolon deney numunesi

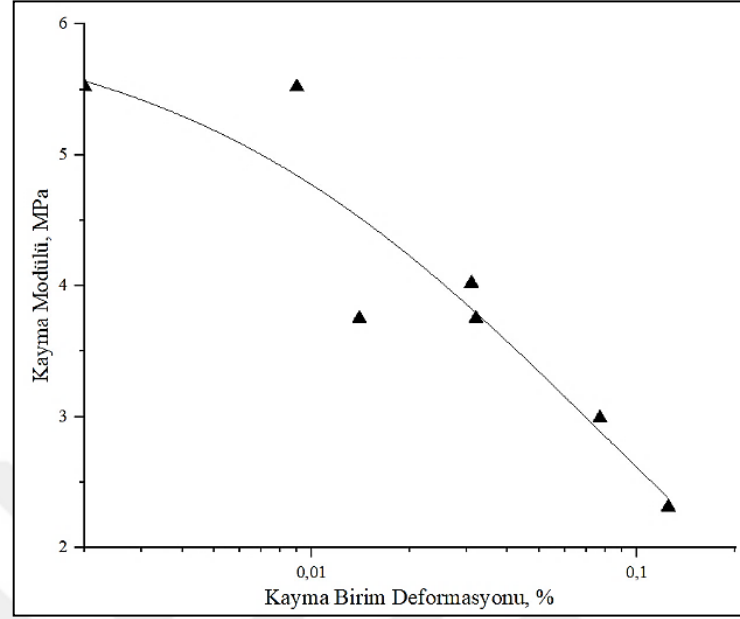
Şekil 5.64’te SK2-18 m için rezonant kolon deneyi ile elde edilen birim deformasyon genliğine bağlı olarak kayma modülü değerleri yer almaktadır.



Şekil 5.64. SK2-18 m için rezonant kolon deneyi ile elde edilen birim deformasyon genliğine bağlı olarak kayma modülü değerleri

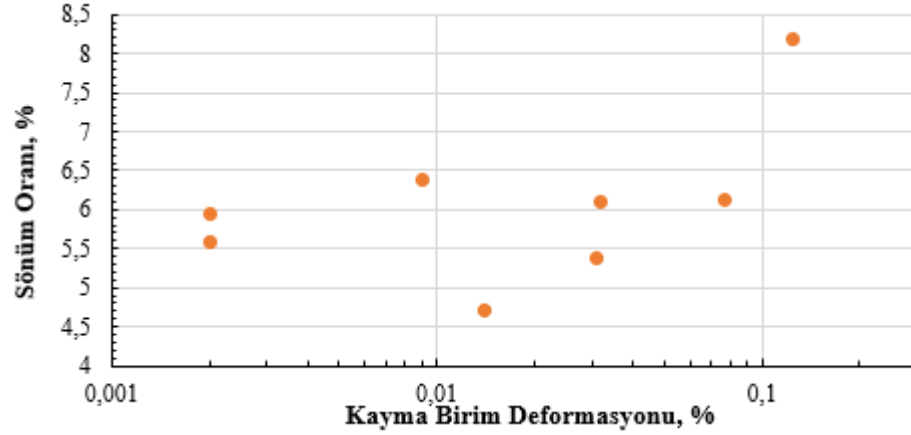
SK2-18 m için ORIGINPRO 2023 programı ile elde edilen kayma modülü eğrisi Şekil 5.65’te yer almaktadır. Kayma modülü-kayma birim deformasyonu eğrisinden,

SK2-18 m zemin numunesi için maksimum dinamik kayma modülünün yaklaşık 5,5 MPa olduğu belirlenmiştir.



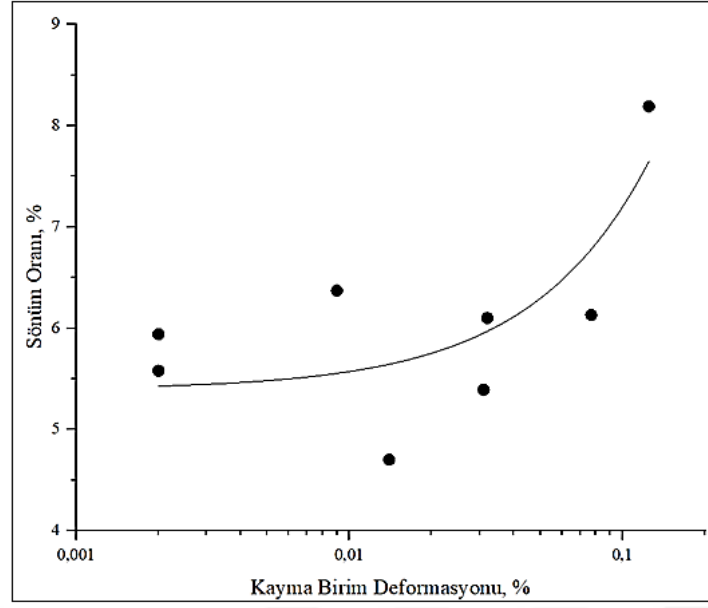
Şekil 5.65. SK2-18 m için ORIGIN LAB programı ile elde edilen kayma modülü eğrisi

SK2-18 m için yarım güç bant genişliği yöntemi ile elde edilen sönüm oranı değerleri Şekil 5.66’te yer almaktadır.



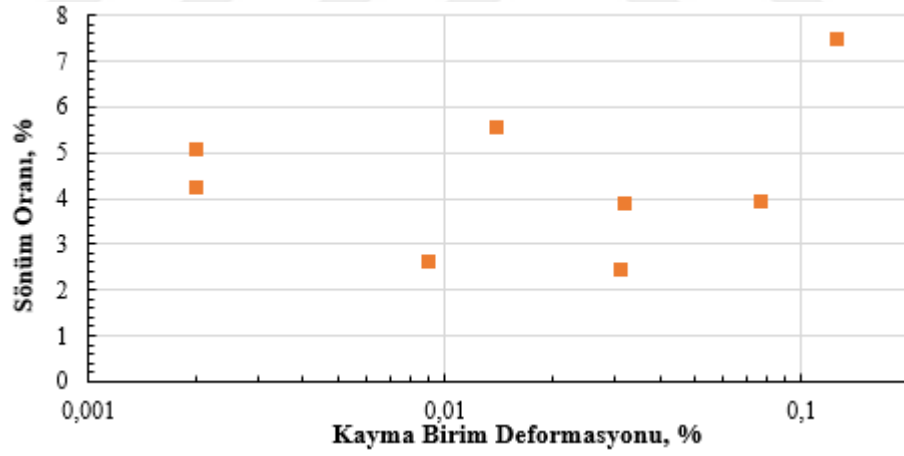
Şekil 5.66. SK2-18 m için yarım güç bant genişliği ile elde edilen sönüm oranı değerleri

Şekil 5.67’de SK2-18 m için eğri uydurma ile elde edilen sönüm oranı eğrisi yer almaktadır. Bu eğriden, zemin numunesinin yarım güç bant genişliği yöntemi ile elde edilen minimum sönüm oranının yaklaşık %5,5 olduğu belirlenmiştir.



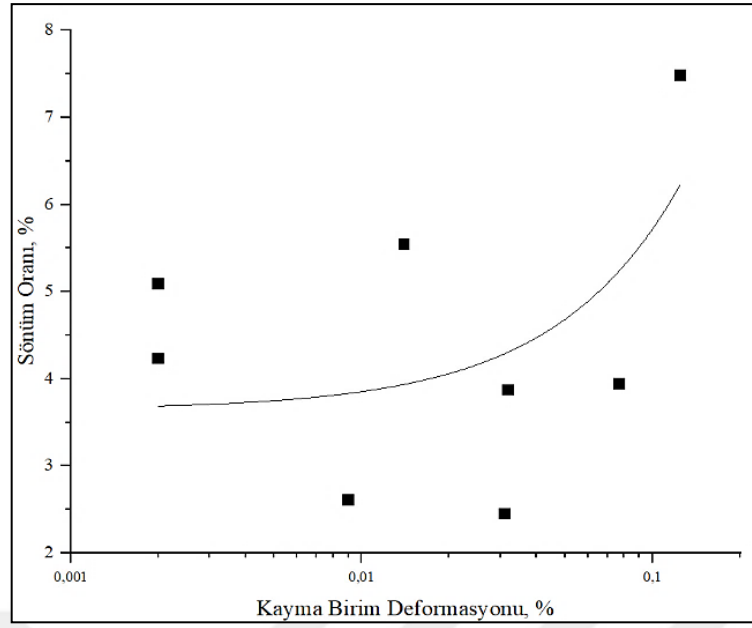
Şekil 5.67. SK2-18 m için yarı güç bant genişliği yöntemi ile elde edilen kayma birim deformasyonu-sönüm oranı eğrisi

SK2-18 m için logaritmik azalım yöntemi ile elde edilen sönüm oranı değerleri Şekil 5.68’de yer almaktadır.



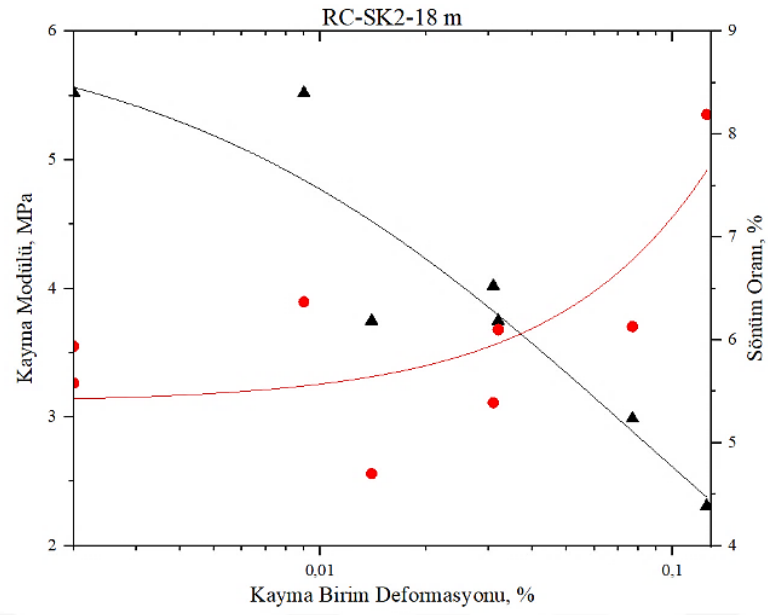
Şekil 5.68. SK2-18 m için logaritmik azalım yöntemi ile elde edilen sönüm oranı değerleri

Şekil 5.69’da ORIGIN PRO 2023 programı ile elde edilen sönüm oranı eğrisi yer almaktadır. Bu eğriden, zemin numunesinin logaritmik azalım yöntemi ile elde edilen minimum sönüm oranının yaklaşık %4 olduğu belirlenmiştir.

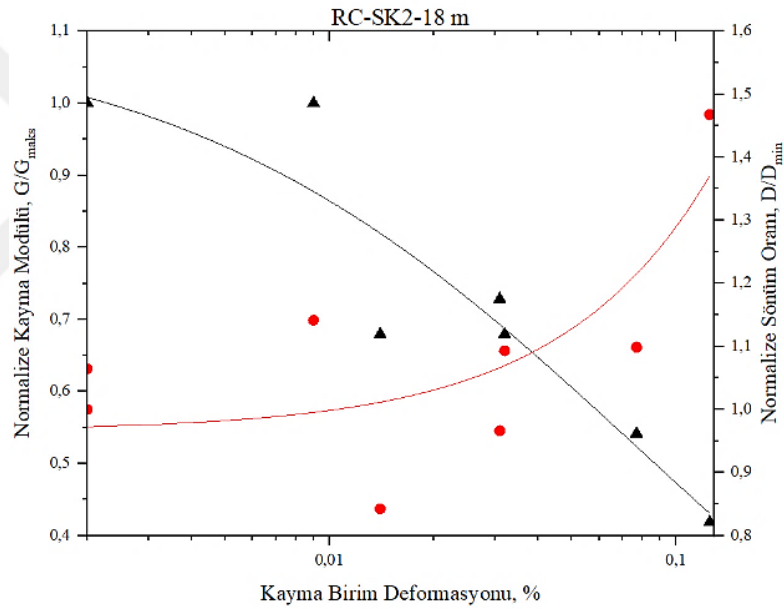


Şekil 5.69. SK2-18 m için logaritmik azalım yöntemi ile elde edilen kayma birim deformasyonu-sönüm oranı eğrisi

SK2-18 m için kayma modülü ve sönüm oranı eğrileri ile normalize kayma modülü ve normalize sönüm oranı eğrileri kayma birim deformasyonuna bağlı olarak Şekil 5.70 ve Şekil 5.71’de verilmiştir.

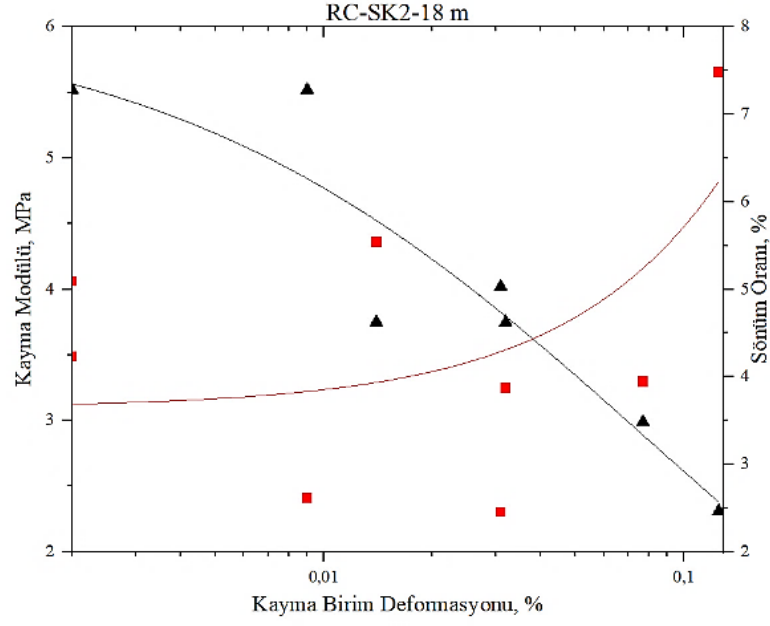


a)

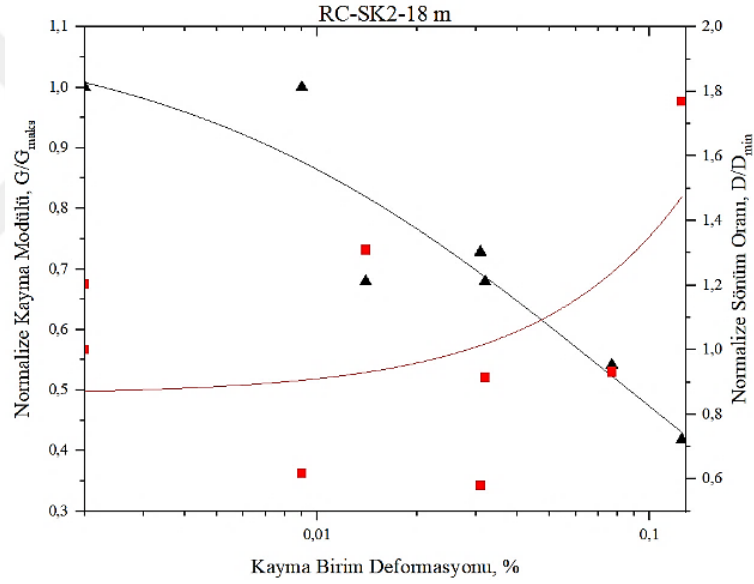


b)

Şekil 5.70. SK2-18 m için birim deformasyon genliğine bağlı olarak **a)** Kayma modülü ve yarım güç bant genişliği yöntemi ile belirlenmiş sönüm oranı eğrileri, **b)** Normalize kayma modülü ve yarım güç bant genişliği yöntemi ile belirlenmiş normalize sönüm oranı eğrileri



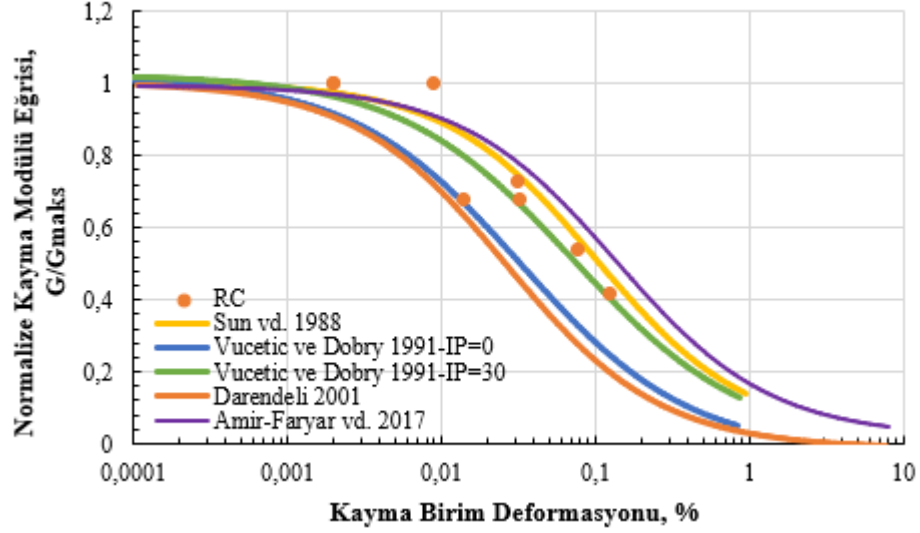
a)



b)

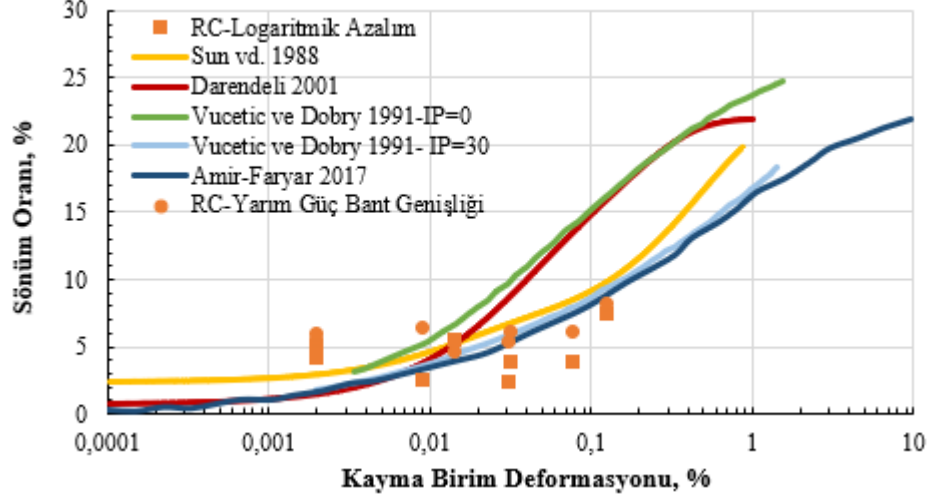
Şekil 5.71. SK2-18 m için birim deformasyon genliğine bağlı olarak **a)** Kayma modülü ve logaritmik azalım yöntemi ile belirlenmiş sönüm oranı eğrileri ve **b)** Normalize kayma modülü ve logaritmik azalım yöntemi ile belirlenmiş normalize sönüm oranı eğrileri

Şekil 5.72’de normalize kayma modülü değerlerinin literatür eğrileri ile karşılaştırılması yer almaktadır. Karşılaştırması neticesinde, deney sonuçlarının (Sun vd., 1988) eğrisi ile uyumlu olduğu belirlenmiştir.



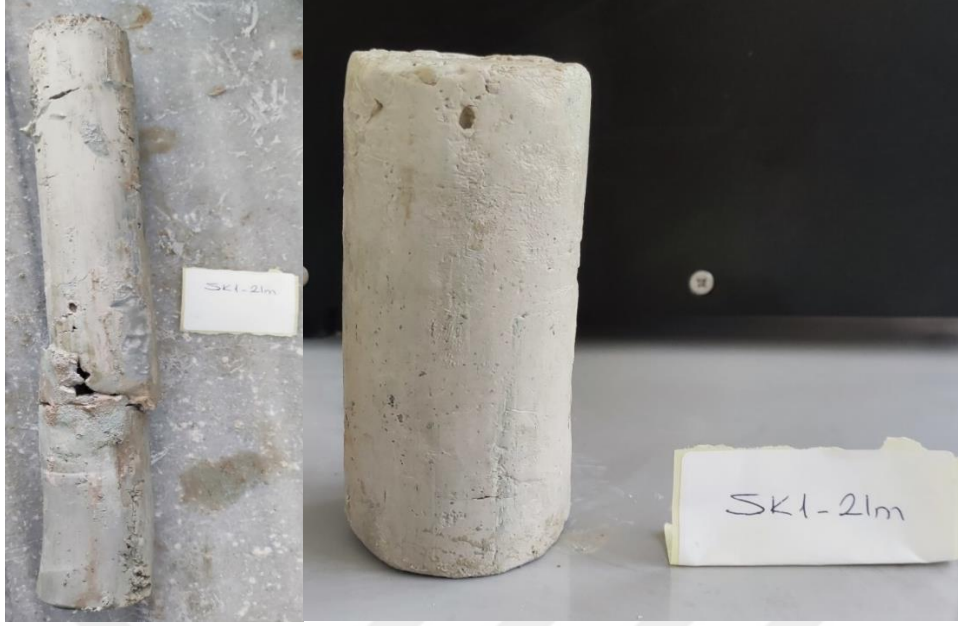
Şekil 5.72. SK2-18 m için elde edilen değerlerin literatür eğrileri ile karşılaştırılması

Şekil 5.73'te yer alan sönüm oranı verilerinin literatür eğrileri ile karşılaştırıldığında hem logaritmik azalım hem de yarım güç bant genişliği yöntemi ile elde edilen değerlerin (Amir-Faryar vd., 2017) eğrisi etrafında dağılım gösterdiği belirlenmiştir.



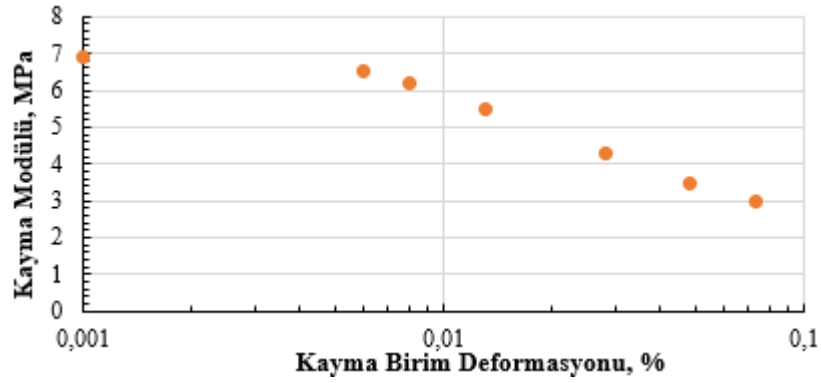
Şekil 5.73. SK2-18 m için elde edilen sönüm oranı değerlerinin literatür eğrileri ile karşılaştırılması

SK1-21 m için numune alıcıdan çıkarılan rezonant kolon deney numunesi Şekil 5.74'te yer almaktadır



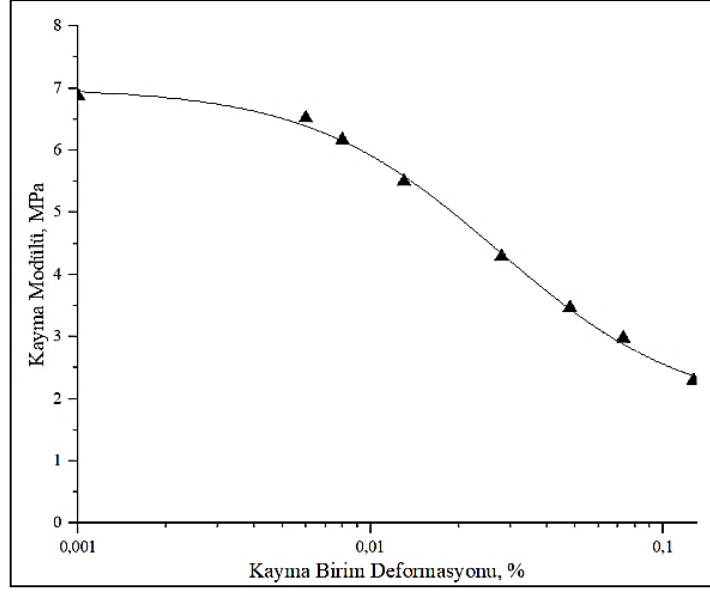
Şekil 5.74. SK1-21 m tüpten çıkarılan ve deney için hazırlanan rezonant kolon deney numunesi

Şekil 5.75'te rezonant kolon deneyi ile elde edilen birim deformasyon genliğine bağlı olarak kayma modülü değerleri yer almaktadır.



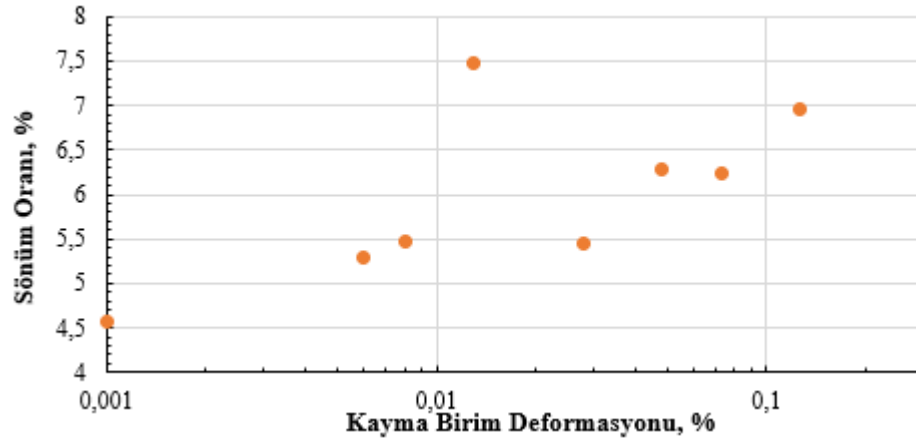
Şekil 5.75. SK1-21 m için rezonant kolon deneyi ile elde edilen birim deformasyon genliğine bağlı olarak kayma modülü değerleri

SK1-21 m için elde edilen kayma modülü eğrisi Şekil 5.76'da yer almaktadır. Kayma modülü-kayma birim deformasyonu eğrisinden, bu numunenin maksimum dinamik kayma modülünün yaklaşık 7 MPa olduğu belirlenmiştir.



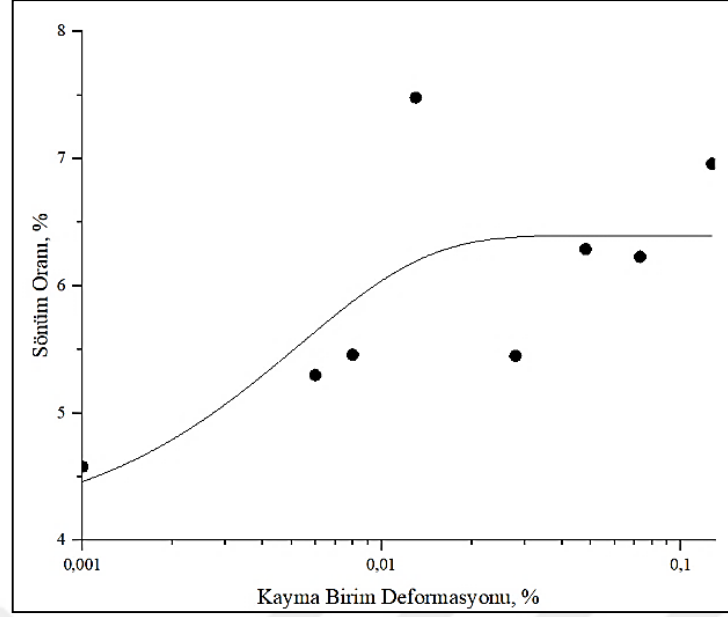
Şekil 5.76. SK1-21 m için ORIGIN LAB programı ile elde edilen kayma modülü eğrisi

SK1-21 m için yarım güç bant genişliği yöntemi ile elde edilen sönüm oranı değerleri Şekil 5.77'da yer almaktadır.



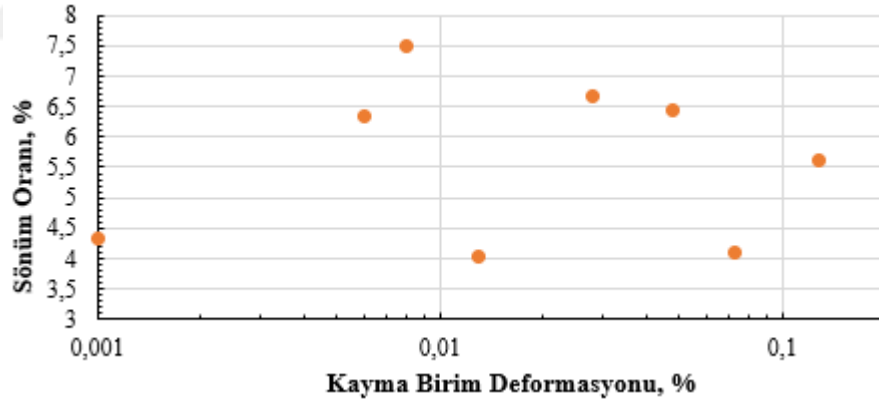
Şekil 5.77. SK1-21 m için yarım güç bant genişliği ile elde edilen sönüm oranı değerleri

Şekil 5.78'de ORIGINPRO 2023 programında eğri uydurma işlemi ile elde edilen sönüm oranı eğrisi yer almaktadır. Yarım güç bant genişliği ile elde edilen sönüm oranı eğrisinden, zemin numunesinin minimum sönüm oranının yaklaşık %4,5 olduğu belirlenmiştir.



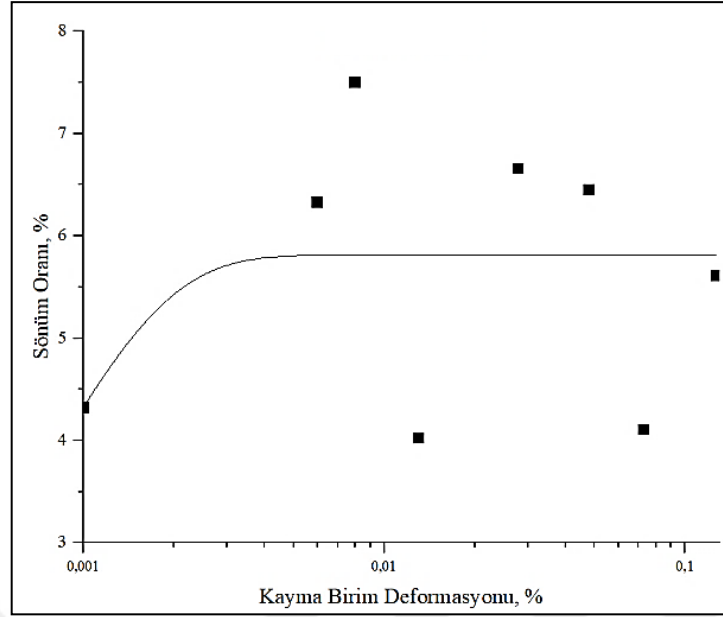
Şekil 5.78. SK1-21 m için yarı güç bant genişliği yöntemi ile elde edilen kayma birim deformasyonu-sönüm oranı eğrisi

SK1-21 m için logaritmik azalım yöntemi ile elde edilen sönüm oranı değerleri Şekil 5.79’da yer almaktadır.



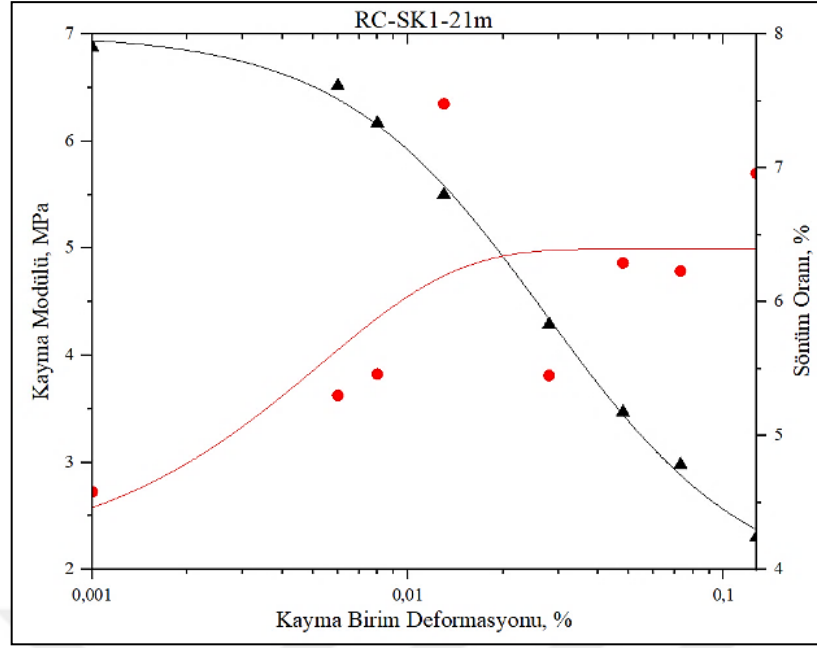
Şekil 5.79. SK1-21 m için logaritmik azalım yöntemi ile elde edilen sönüm oranı değerleri

Şekil 5.80(a) ve Şekil 5.80(b)’de sırasıyla SK1-21 m için elde edilen sönüm oranı eğrisi ve normalize sönüm oranı eğrisi yer almaktadır. Logaritmik azalım yöntemi ile elde edilen sönüm oranı eğrisinden, zemin numunesinin minimum sönüm oranının yaklaşık %4,5 olduğu belirlenmiştir.

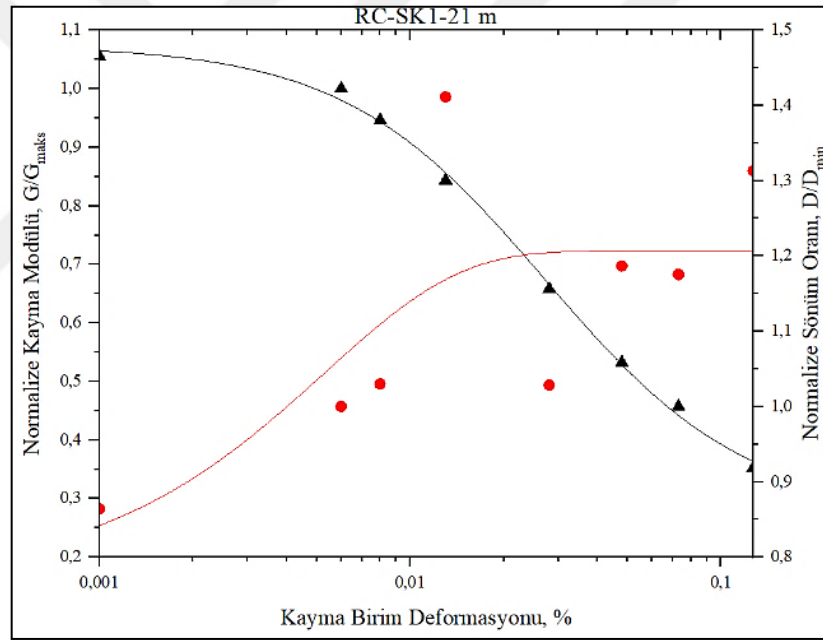


Şekil 5.80. SK1-21 m için logaritmik azalım yöntemi ile elde edilen kayma birim deformasyonu-sönüm oranı eğrisi

SK1-21 m için kayma modülü ve sönüm oranı eğrileri ile normalize kayma modülü ve normalize sönüm oranı eğrileri kayma birim deformasyonuna bağlı olarak Şekil 5.81 ve Şekil 5.82’de verilmiştir.

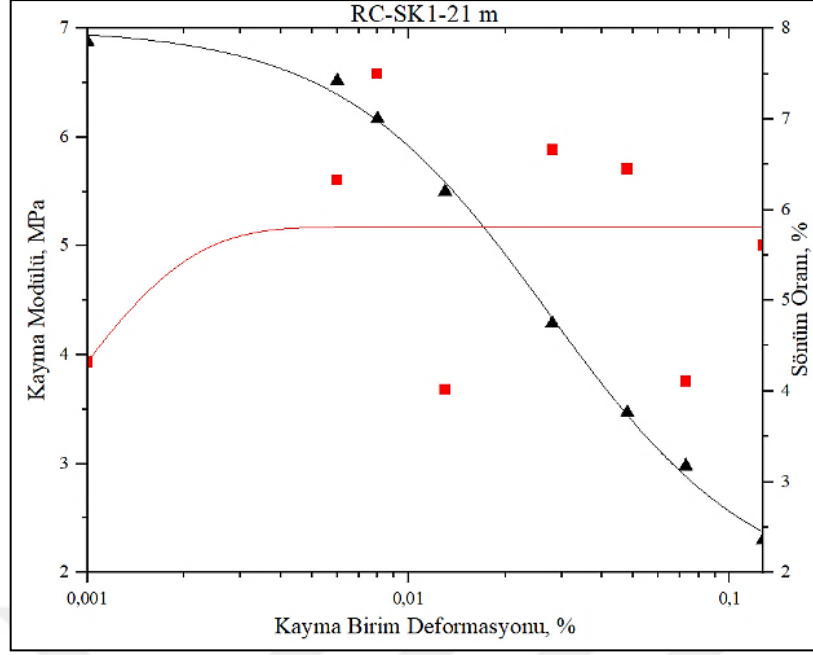


a)

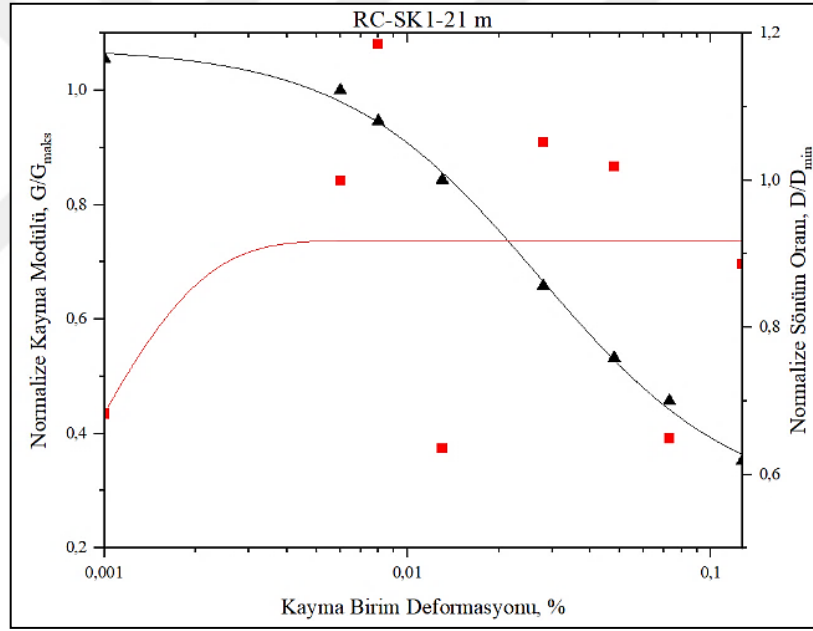


b)

Şekil 5.81. SK1-21 m için birim deformasyon genliğine bağlı olarak **a)** Kayma modülü ve yarım güç bant genişliği yöntemi ile belirlenmiş sönüm oranı eğrileri, **b)** Normalize kayma modülü ve yarım güç bant genişliği yöntemi ile belirlenmiş normalize sönüm oranı eğrileri



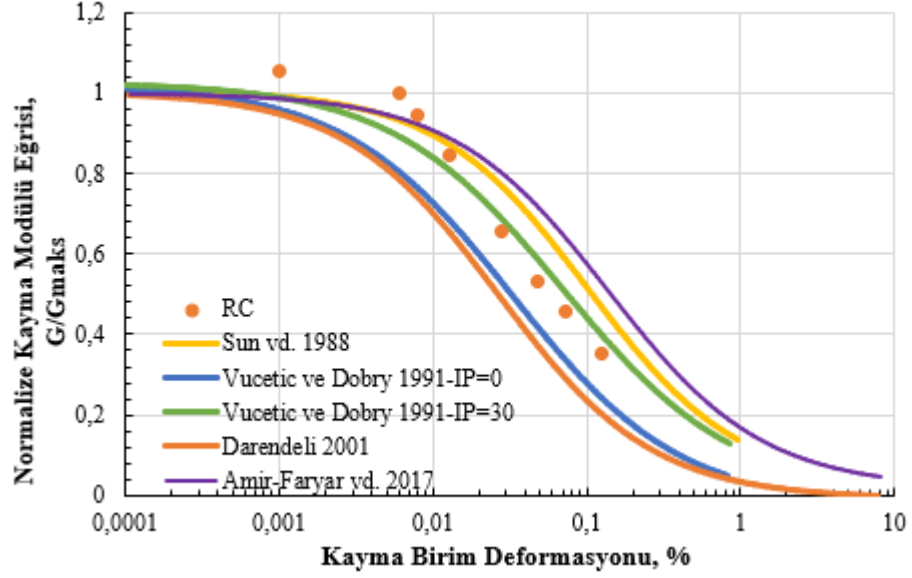
a)



b)

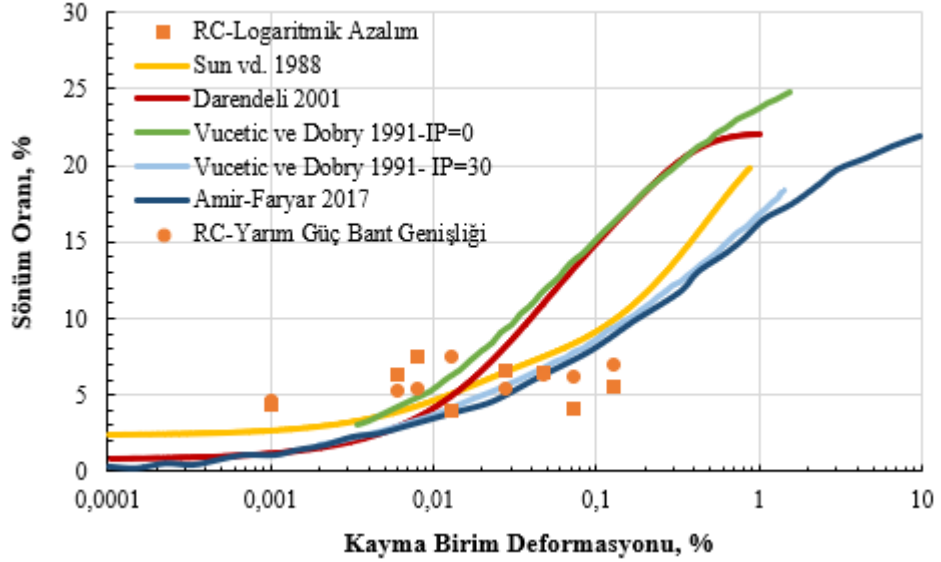
Şekil 5.82. SK1-21 m için birim deformasyon genliğine bağlı olarak **a)** Kayma modülü ve logaritmik azalım yöntemi ile belirlenmiş sönüm oranı eğrileri ve **b)** Normalize kayma modülü ve logaritmik azalım yöntemi ile belirlenmiş normalize sönüm oranı eğrileri

Şekil 5.83'te yer alan normalize kayma modülü değerleri ile literatür eğrileri karşılaştırması neticesinde, 10^{-2} birim deformasyon seviyesine kadar deney sonuçlarının (Sun vd., 1988) eğrisi ile, daha büyük deformasyon seviyelerinde ise (Vucetic & Dobry, 1991)- $I_p=30$ eğrisi ile uyumlu olduğu belirlenmiştir.



Şekil 5.83. SK1-21 m için elde edilen değerlerin literatür eğrileri ile karşılaştırılması

Şekil 5.84'te yer alan sönüm oranı verilerinin literatür eğrileri ile karşılaştırıldığında, aynı kayma modülü gibi sönüm oranı değerlerinin de 10^{-2} birim deformasyon seviyesine kadar deney sonuçlarının (Sun vd., 1988), daha büyük birim deformasyon seviyelerinde ise (Amir-Faryar vd., 2017) eğrisi etrafında dağılım gösterdiği belirlenmiştir.

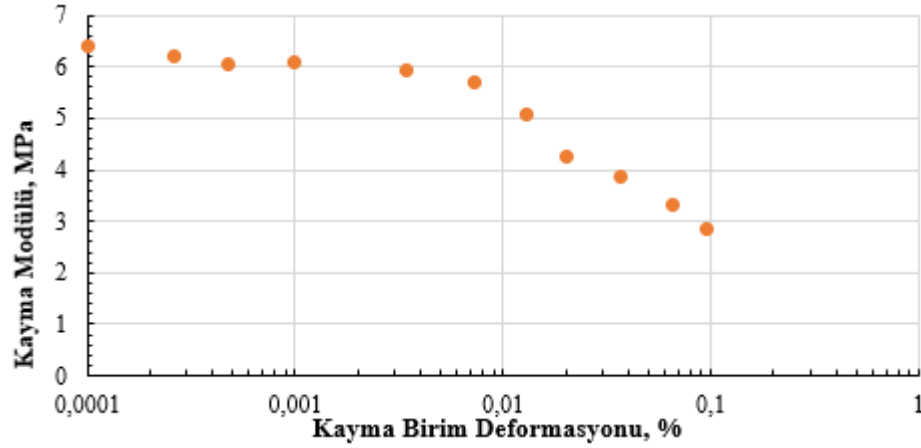


Şekil 5.84. SK1-21 m için elde edilen sönüm oranı değerlerinin literatür eğrileri ile karşılaştırılması

5.2.2. KOS Atıksu Arıtma Tesisi sahası

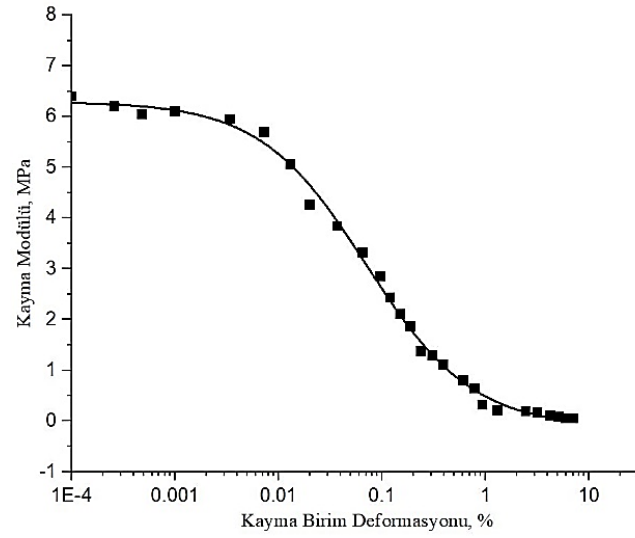
KOS Atıksu Arıtma Tesisi sahasında 2 adet sondaj yapılmıştır. Bu sahada açılan sondaj kuyuları, FMC sahasında yapılan sondajlar ile karıştırılmaması için SK3 ve SK4 olarak adlandırılmıştır. SK3 kuyusunda 2, 4, 6 ve 8 m'den, SK4 kuyusunda ise 3, 5, 7 ve 9 m'den Shelby tüpleri ile numune alınmıştır. Shelby tüpleri laboratuvara getirilmiş ve bu tüplerden 50/100 mm silindirik zemin numuneleri alınmış ve rezonant kolon deneyleri gerçekleştirilmiştir.

SK3-2 m numunesi ile gerçekleştirilen rezonant kolon deney sonuçlarından elde edilen kayma modülü değerleri Şekil 5.85'te yer almaktadır. ORIGINPRO 2023 programı ile elde edilen kayma modülü ve normalize kayma modülü eğrileri ise Şekil 5.86'da yer almaktadır.

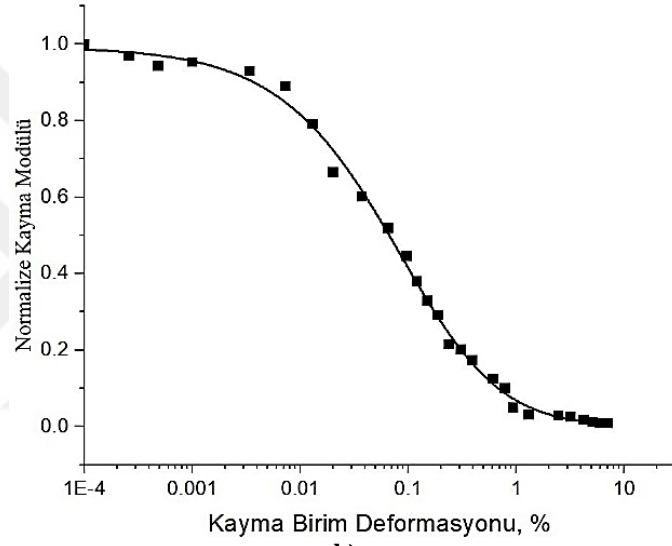


Şekil 5.85. SK3-2 m için kayma birim deformasyon genliği kayma modülü grafiği

SK3-2 m için maksimum kayma modülünün yaklaşık 6,2 MPa olarak belirlenmiştir. Normalize kayma modülü değerlerinin literatür eğrileri ile karşılaştırılması ise Şekil 5.87'de verilmiştir. Karşılaştırma sonucunda elde edilen değerlerinin (Vucetic & Dobry, 1991)- $I_p=30$ eğrisi ile tam uyumlu olduğu belirlenmiştir.

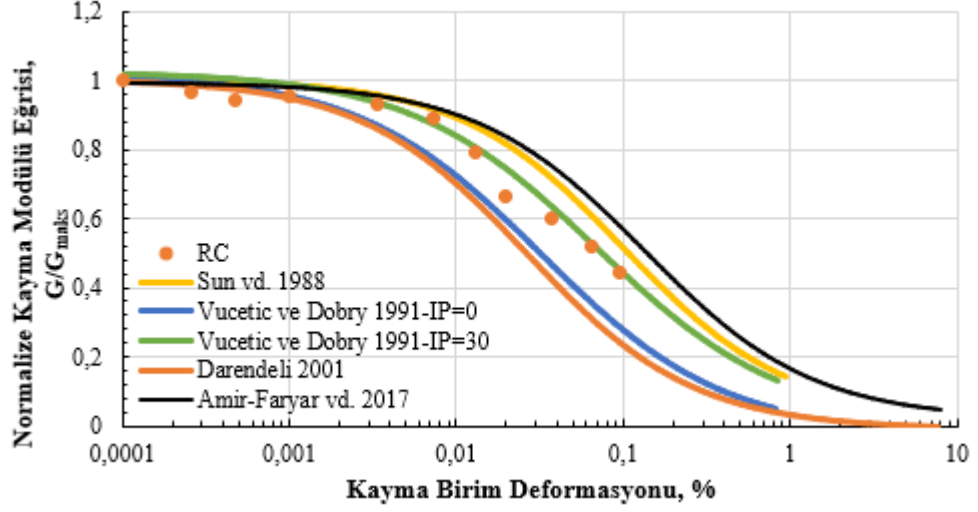


a)



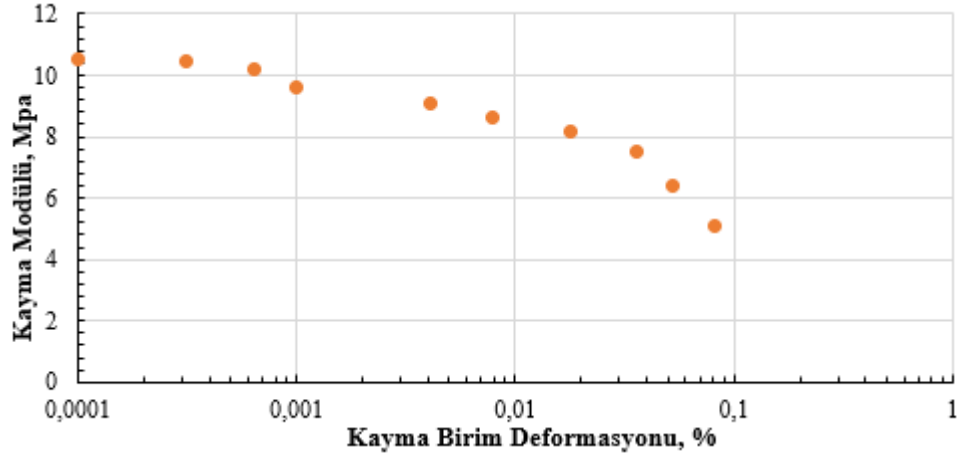
b)

Şekil 5.86. SK3-2 için kayma birim deformasyonu genliğine bağlı olarak **a)** Kayma modülü eğrisi ve **b)** Normalize kayma modülü eğrisi

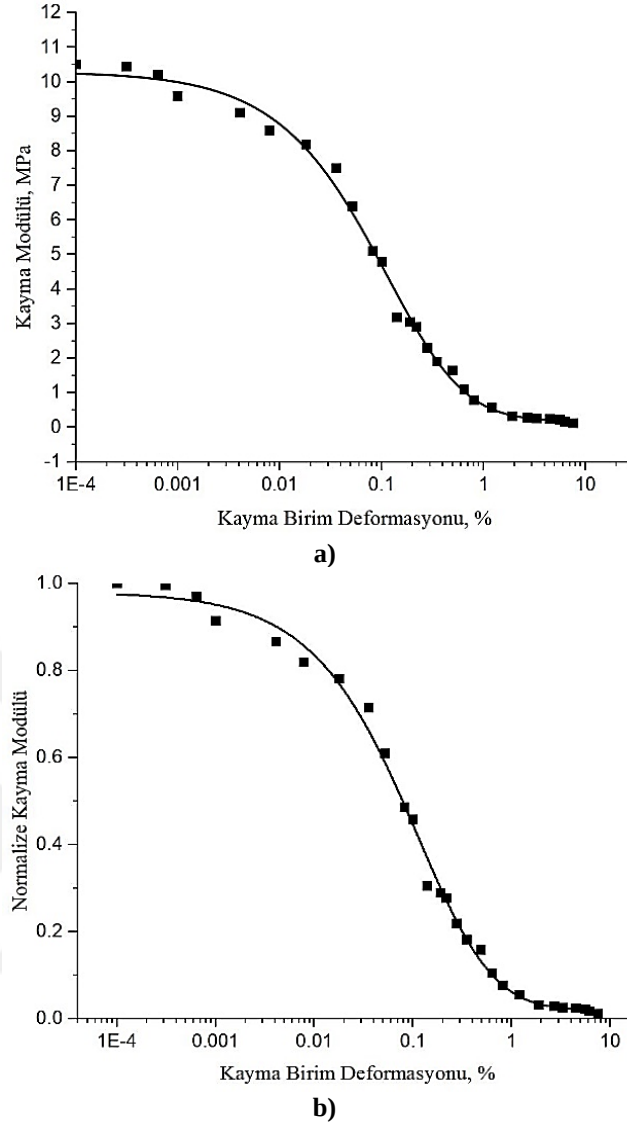


Şekil 5.87. SK3-2 m için elde edilen normalize kayma modülü değerlerinin literatür eğrileri ile karşılaştırılması

SK3-4 m için rezonant kolon deneyi kayma birim deformasyonu genliğine bağlı olarak elde edilen kayma modülü değerleri Şekil 5.88’de verilmiştir. ORIGINPRO 2023 programı kayma birim deformasyon genliğine bağlı olarak elde edilen kayma modülü ve normalize kayma modülü eğrileri Şekil 5.89’da verilmiştir. Kayma modülü eğrisinden SK3-4 m numunesinin maksimum kayma modülü 10,2 MPa olarak belirlenmiştir.

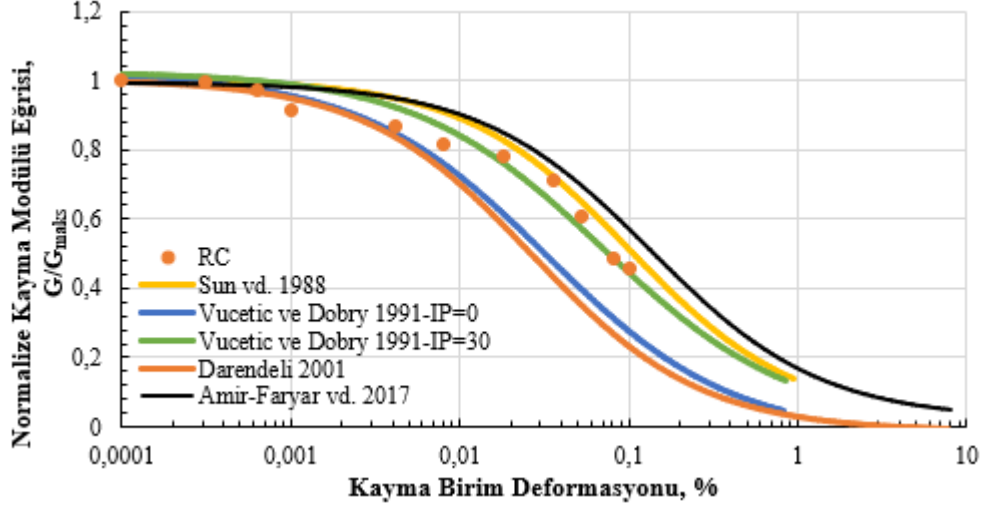


Şekil 5.88. SK3-4 m için kayma birim deformasyon genliği kayma modülü grafiği



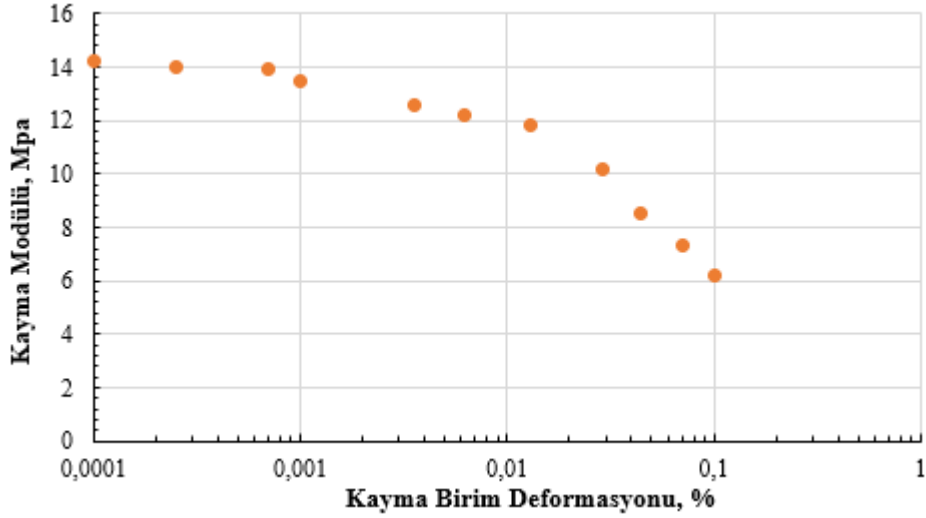
Şekil 5.89. SK3-4 için kayma birim deformasyonu genliğine bağlı olarak **a)** Kayma modülü eğrisi ve **b)** Normalize kayma modülü eğrisi

Normalize kayma modülü değerlerinin literatür eğrileri ile karşılaştırılması Şekil 5.90'da verilmiştir. Karşılaştırma sonucunda değerlerin (Vucetic & Dobry, 1991)-IP=30 eğrisi ile daha uyumlu olduğu belirlenmiştir.



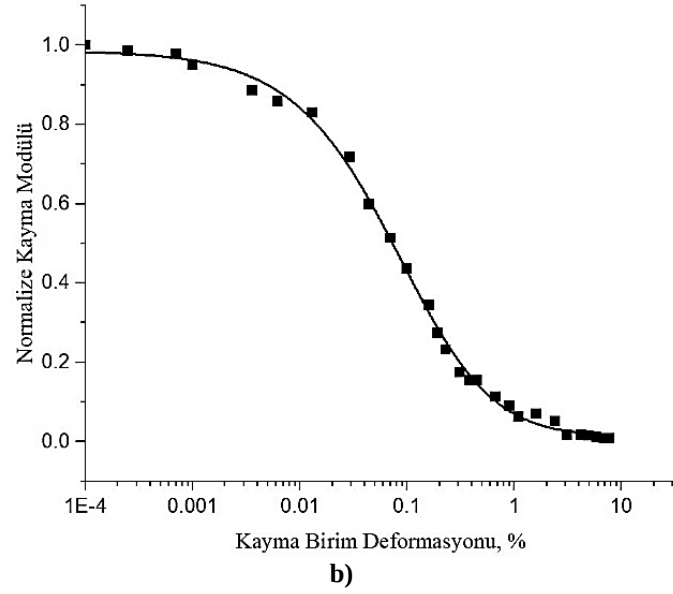
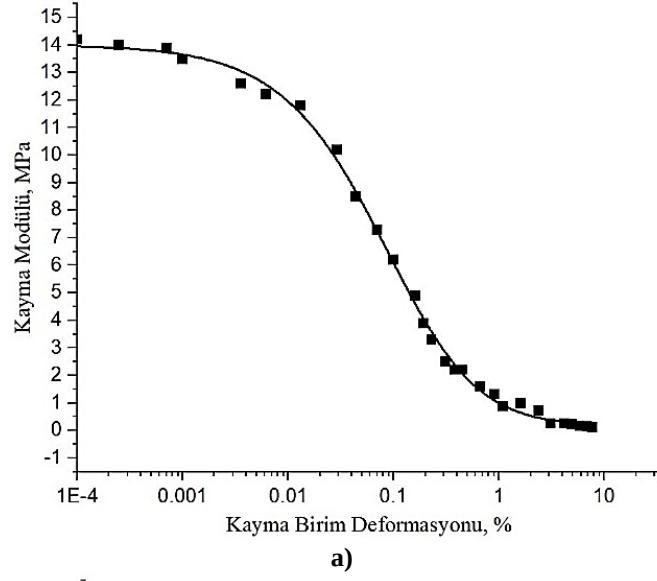
Şekil 5.90. SK3-4 m için elde edilen normalize kayma modülü değerlerinin literatür eğrileri ile karşılaştırılması

SK3-6 m deney numunesi ile yapılan rezonant kolon deneyinden elde edilen kayma birim deformasyon genliği-kayma modülü grafiği Şekil 5.91’de verilmiştir.



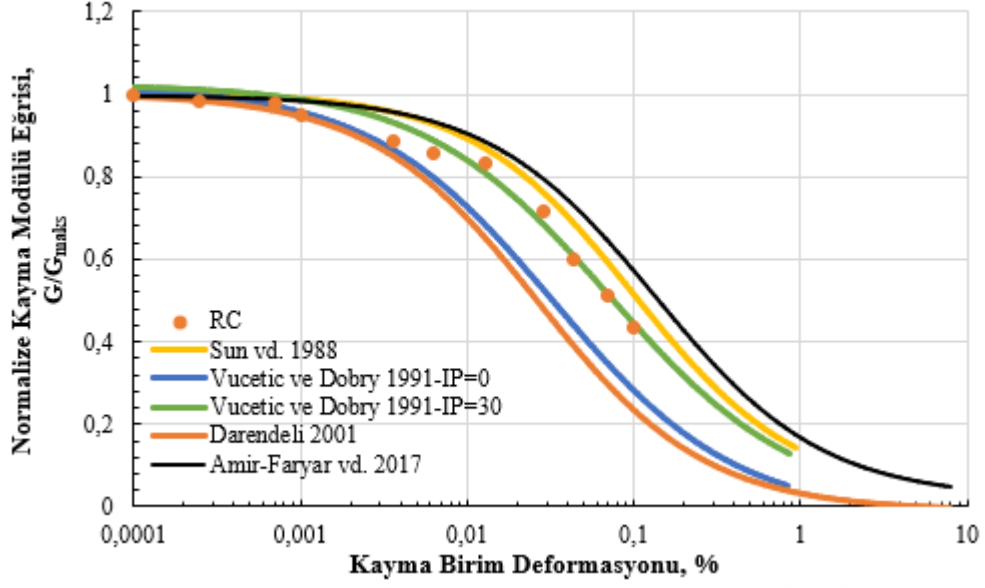
Şekil 5.91. SK3-6 m için kayma birim deformasyon genliği kayma modülü grafiği

Kayma birim deformasyon genliğine bağlı olarak elde edilen kayma modülü ve normalize kayma modülü eğrileri Şekil 5.92’de verilmiştir. Kayma modülü eğrisinden SK3-6 m için maksimum kayma modülü 14 MPa olarak belirlenmiştir.



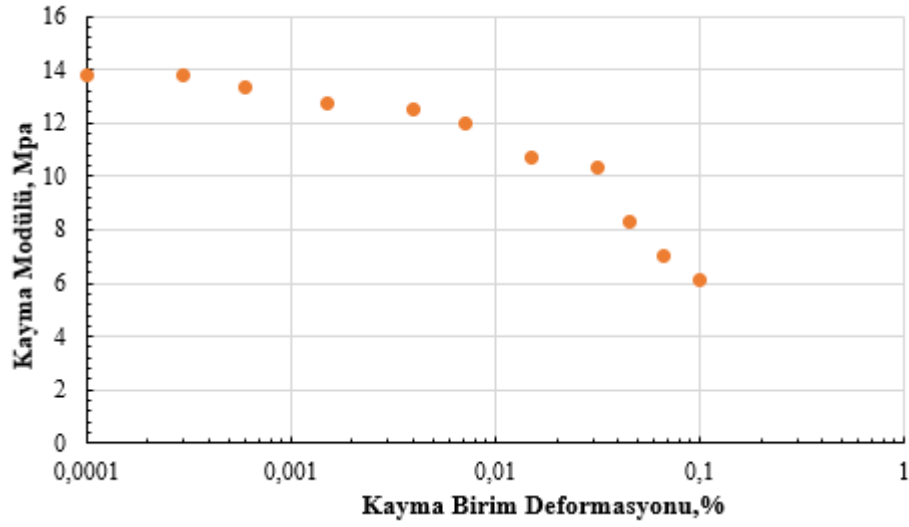
Şekil 5.92. SK3-6 için kayma birim deformasyonu genliğine bağlı olarak a) Kayma modülü eğrisi ve b) Normalize kayma modülü eğrisi

Şekil 5.93'te yer alan normalize kayma modülü değerlerinin literatür eğrileri ile karşılaştırılması neticesinde deney sonuçlarının (Vucetic & Dobry, 1991)- $I_p=30$ eğrisi ile uyumlu olduğu belirlenmiştir.



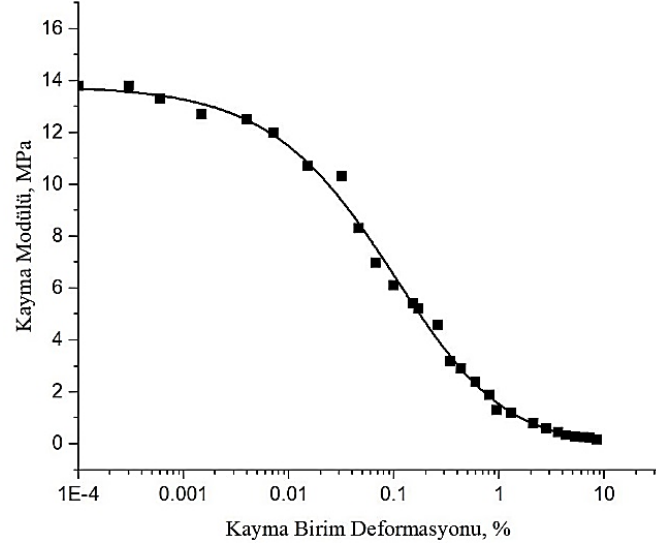
Şekil 5.93. SK3-6 m için elde edilen normalize kayma modülü değerlerinin literatür eğrileri ile karşılaştırılması

SK3-8 m numunesi ile yapılan rezonant kolon deneyi ile elde edilen kayma modülü değerleri Şekil 5.94'te verilmiştir.

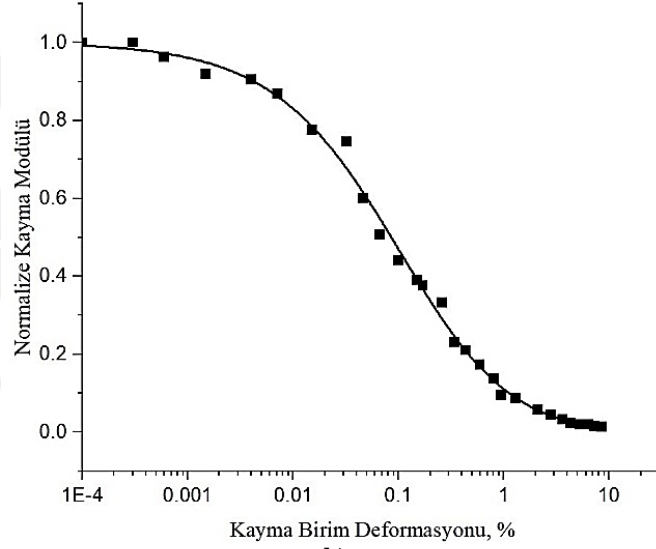


Şekil 5.94. SK3-8 m için kayma birim deformasyon genliği kayma modülü grafiği

Kayma birim deformasyon genliğine bağlı olarak kayma modülü ve normalize kayma modülü eğrileri Şekil 5.95'te verilmiştir. Kayma modülü grafiğinden SK3-8 m için maksimum kayma modülü 13,8 MPa olarak belirlenmiştir.



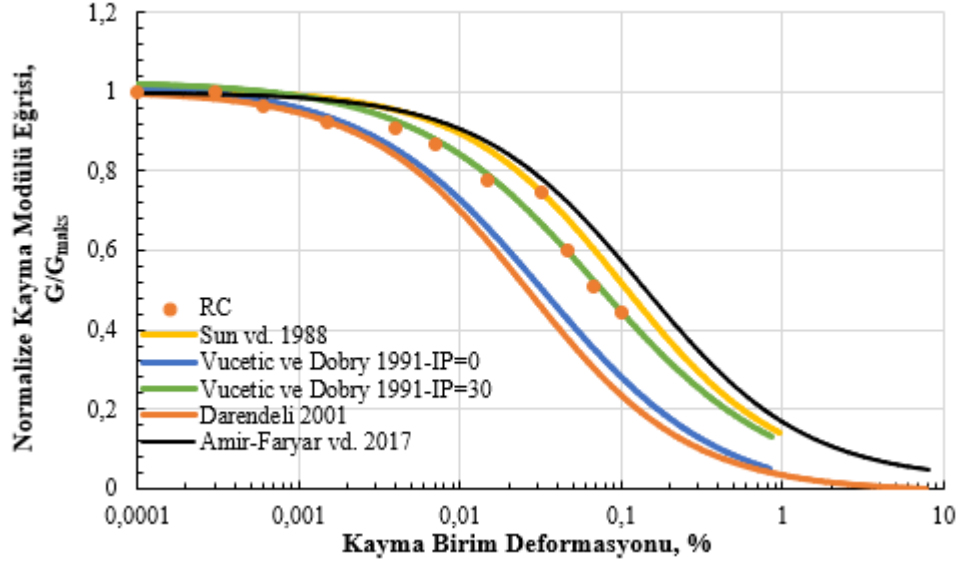
a)



b)

Şekil 5.95. SK3-8 için kayma birim deformasyonu genliğine bağlı olarak **a)** Kayma modülü eğrisi ve **b)** Normalize kayma modülü eğrisi

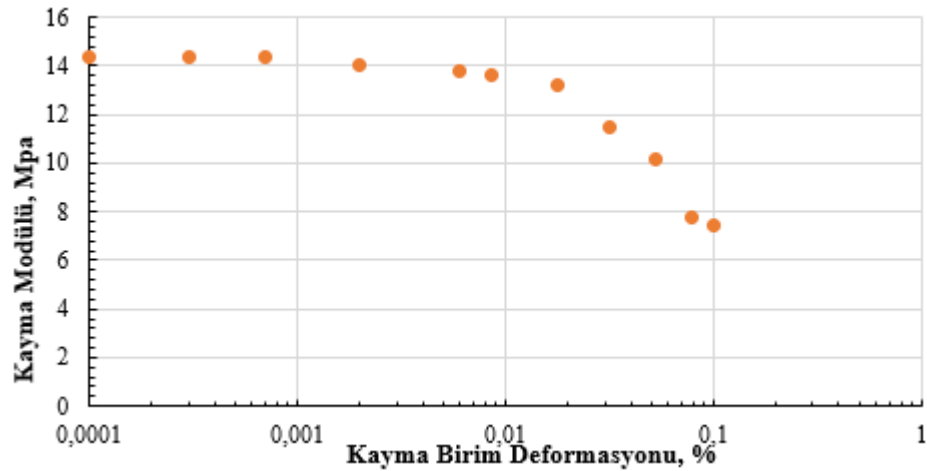
Şekil 5.96'da SK3-8 m için elde edilen normalize kayma modülü değerlerinin literatür eğrileri ile karşılaştırılması yer almaktadır. Bu grafikte görüldüğü gibi deney sonuçlarının (Vucetic & Dobry, 1991)- $I_p=30$ eğrisi ile tam uyumlu olduğu belirlenmiştir.



Şekil 5.96. SK3-8 m için elde edilen normalize kayma modülü değerlerinin literatür eğrileri ile karşılaştırılması

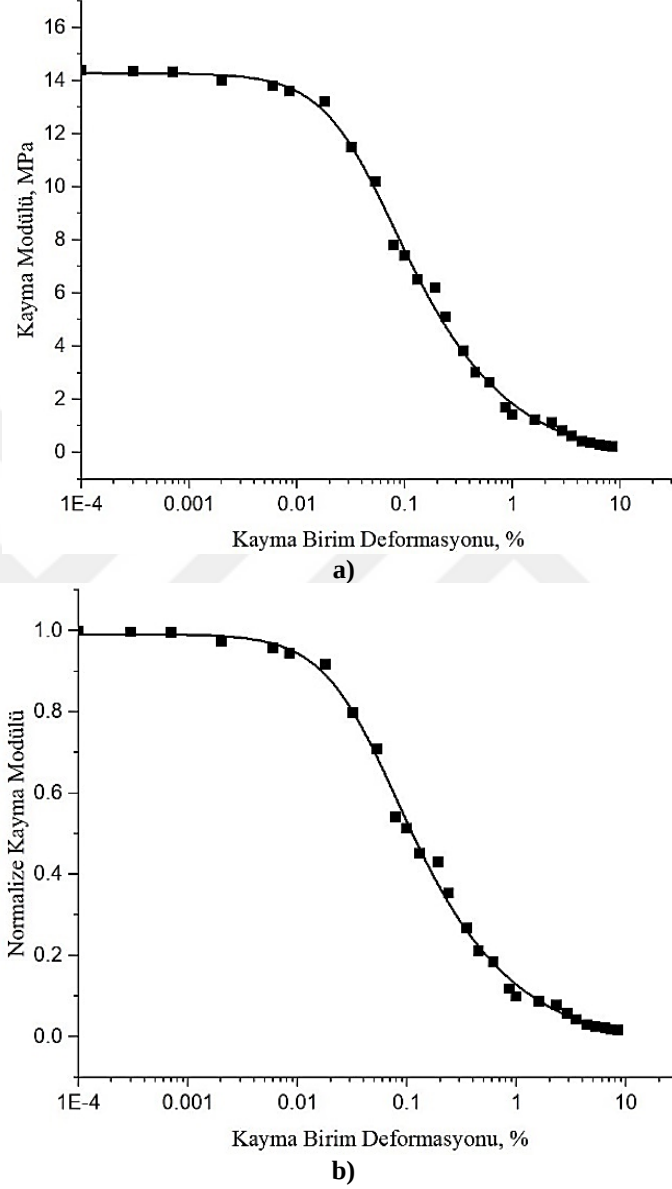
SK4 kuyusu için 3 m, 5 m ve 7 m’den alınan Shelby tüplerinden rezonant kolon deney numunesi alınamamıştır. 3 m derinlikteki zemin numunesinde iri jipsler mevcuttu ve bu nedenle numune alıcılarla yeterli numune alınamamıştır. 5 ve 7 m için ise yeraltı suyu seviyesi nedeniyle Shelby tüplerinde zemin numunesi çok az olmakla birlikte tüpte çok fazla sıkışmış su bulunmaktaydı. Bu nedenle bu derinliklerden de yeterli numune alınamamıştır.

SK4-9 m için alınan zemin numunesi üzerinde yapılan rezonant kolon deneyi neticesinde kayma birim deformasyon genliğine bağlı olarak elde edilen kayma modülü değerleri Şekil 5.97’de yer almaktadır.



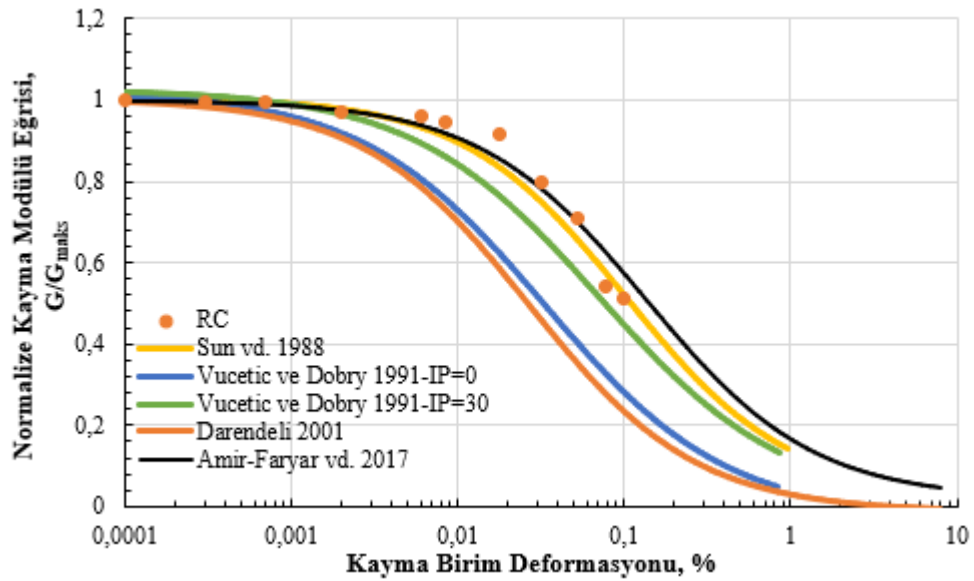
Şekil 5.97. SK4-9 m için kayma birim deformasyon genliği kayma modülü grafiği

SK4-9 m için kayma birim deformasyon genliğine bağlı olarak elde edilen kayma modülü ve normalize kayma modülü eğrileri Şekil 5.98’de verilmiştir. Kayma modülü eğrisinden maksimum kayma modülünün 14,3 olduğu belirlenmiştir.



Şekil 5.98. SK4-9 için kayma birim deformasyonu genliğine bağlı olarak **a)** Kayma modülü eğrisi ve **b)** Normalize kayma modülü eğrisi

Şekil 5.99’den normalize kayma modülünün literatür eğrileri karşılaştırılması ile deney sonucunda elde edilen değerlerinin 10^{-1} kayma birim deformasyonu değerine kadar (Amir-Faryar vd., 2017) eğrisi ile, daha büyük birim deformasyon genliklerinde ise (Sun vd., 1988) eğrisi ile uyumlu olduğu belirlenmiştir.



Şekil 5.99. SK4-9 m için elde edilen normalize kayma modülü değerlerinin literatür eğrileri ile karşılaştırılması

5.3. Arazi Deney Sonuçlarının Değerlendirilmesi

Bu bölümde FMC fabrika sahası, KOS Atıksu Arıtma Tesisi sahası ve Selçuk Üniversitesi Kan Merkezi binası sahasında yapılan arazi deneyleri ile edilen deney sonuçları değerlendirilmiştir.

Yapılan arazi deneyleri, her saha için ayrı ayrı değerlendirilmiştir. SPT ve MASW arazi deney sonuçları değerlendirilerek zemin tabakalarının dinamik kayma modülü ve kayma dalgası hızları belirlenmiştir. Ayrıca, MASW ve mikrotremör deneyleri ile saha zemininin yerel zemin sınıfı ve zemin büyütme faktörü belirlenmiştir.

Ek olarak yapılan Instantel Minimate plus ölçümleri ile, darbe etkili makinelerin oluşturduğu dinamik etkinin, zemin tabakalarının sertliğine bağlı olarak değişimi değerlendirilmiştir.

5.3.1. Standart Penetrasyon Deneyi

Standart penetrasyon deneyi, FMC fabrika sahasında açılan 2 sondaj kuyusunda yapılmıştır. Deney sonuçları kullanılarak, kayma modülü ve kayma dalgası hızı literatürde yer alan korelasyonlarla belirlenmiştir.

KOS Atıksu Arıtma Tesisi için, SPT deneyi ile kayma modülü ve kayma dalgası hızının belirlenmesi için, daha önce bölge zemini için hazırlanmış zemin etüt raporu verileri kullanılmıştır.

5.3.1.1. FMC fabrika bölgesi

Tez kapsamında FMC fabrika sahasında yapılan 2 sondaj kuyusunda SPT deneyi yapılmıştır. SPT deneyinin yapıldığı tüm derinliklerde, numune alıcının her 15 cm mesafenin zemine batması için elde edilen darbe sayıları Tablo 5.11’de yer almaktadır. Son iki 15 cm mesafenin zemine batması için elde edilen darbe sayılarının toplamı SPT-N₃₀ olarak ifade edilmektedir. Deney sonuçları ile belirlenen SPT-N₃₀ sayıları da Tablo 5.11’de verilmiştir.

Tablo 5.11. SPT deneyi darbe sayıları

Derinlik, m	SK1			SPT-N N30	SK2			SPT -N N30
3	4	6	6	12	3	4	7	11
6	1	1	4	5	2	1	3	4
9	2	3	4	7	1	1	1	2
12	12	10	14	24	22	7	5	12
15	6	9	6	15	2	4	4	8
18	6	8	9	17	5	4	4	8
21	11	9	6	15	4	7	8	15

SPT-N₃₀ sayıları, deney ekipmanı özellikleri ve deney esnasında belirlenen bilgiler göz önünde bulundurularak düzeltilmiştir. Düzeltmeler için kullanılan bilgiler şöyledir:

- Sondaj kuyusu 120 mm çapındadır.
- Yeraltı su seviyesi zemin yüzeyinden 11 m aşağıdadır.
- SPT deney ekipmanı halka tipidir.
- Çakma başlığı 2 kg’dır.
- Tokmak yastığı kullanılmamıştır.
- Numune alıcı kılıfsızdır.

Dinamik zemin parametrelerinin belirlenmesi için literatürde önerilen korelasyonların kullanılabilmesi için gerekli düzeltmelerin yapıldığı SPT sayıları, 2 kuyu için ayrı ayrı, Tablo 5.12 ve Tablo 5.13’te yer almaktadır.

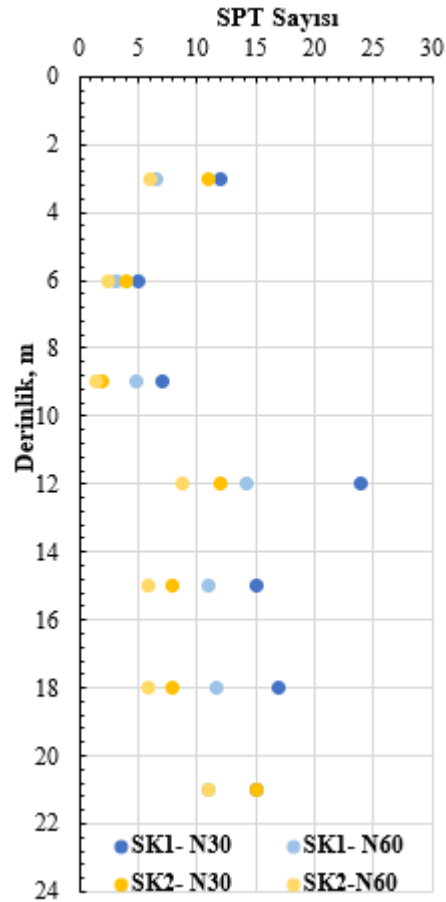
Tablo 5.12. SK1 için düzeltilmiş SPT-N sayıları

Derinlik m	SK1			SPT-N		Tüm Düzeltmeler Yapılmış değerler								C _N		C _E	
				N ₃₀	N' ₃₀	C _R	C _B	C _S	C _A	C _C	C _{BF}	C _N	C _E	N _{1,60}	N ₆₀	N _{1,60}	N ₆₀
3	4	6	6	12	12	0,75	1,01	1,2	0,85	1	0,95	1	0,75	7	7	9	9
6	1	1	4	5	5	0,85	1,01	1,2	0,85	1	0,95	0,914	0,75	3	3	3	4
9	2	3	4	7	7	0,95	1,01	1,2	0,85	1	0,95	0,747	0,75	4	5	4	5
12	12	10	14	24	19,5	1	1,01	1,2	0,85	1	0,95	0,665	0,75	10	14	10	15
15	6	9	6	15	15	1	1,01	1,2	0,85	1	0,95	0,626	0,75	7	11	7	11
18	6	8	9	17	16	1	1,01	1,2	0,85	1	0,95	0,594	0,75	7	12	7	12
21	11	9	6	15	15	1	1,01	1,2	0,85	1	0,95	0,569	0,75	6	11	6	11

Tablo 5.13. SK2 için düzeltilmiş SPT-N sayıları

Derinlik m	SK2			SPT -N		Düzeltmeler								C _N		C _E	
				N ₃₀	N' ₃₀	C _R	C _B	C _S	C _A	C _C	C _{BF}	C _N	C _E	N _{1,60}	N ₆₀	N _{1,60}	N ₆₀
3	3	4	7	11	11	0,75	1,01	1,2	0,85	1	0,95	1	0,75	6	6	8	8
6	2	1	3	4	4	0,85	1,01	1,2	0,85	1	0,95	0,914	0,75	2	2	3	3
9	1	1	1	2	2	0,95	1,01	1,2	0,85	1	0,95	0,746	0,75	1	1	1	2
12	22	7	5	12	12	1	1,01	1,2	0,85	1	0,95	0,659	0,75	6	9	6	9
15	2	4	4	8	8	1	1,01	1,2	0,85	1	0,95	0,621	0,75	4	6	4	6
18	5	4	4	8	8	1	1,01	1,2	0,85	1	0,95	0,59	0,75	3	6	4	6
21	4	7	8	15	15	1	1,01	1,2	0,85	1	0,95	0,562	0,75	6	11	6	11

Standart penetrasyon darbe sayıları ile düzeltilmiş SPT sayılarının derinlikle değişimi Şekil 5.100'de verilmiştir. Standart penetrasyon deney sonuçlarının değerlendirilmesi ile zemin tabakalarının 0-6 m arasında katı, 6-12 m arasının orta katı, 12-15 m arasında çok katı ve 15-21 m arasında katı kıvamlı olduğu belirlenmiştir.



Şekil 5.100. SPT sayılarının derinlikle değişimi

Standart penetrasyon deney sonuçları kullanılarak zeminin dinamik kayma modülünün belirlenmesi için literatürde yer alan korelasyonlar araştırılmıştır. Bu korelasyonlar kullanılarak SK1 ve SK2 kuyuları için elde edilen darbe sayıları kullanılarak kayma modülü değerleri hesaplanmıştır. Elde edilen değerler Tablo 5.14 ve Tablo 5.15'te verilmiştir.

Tablo 5.14. Literatür korelasyonları ile elde edilen kayma modülü değerleri

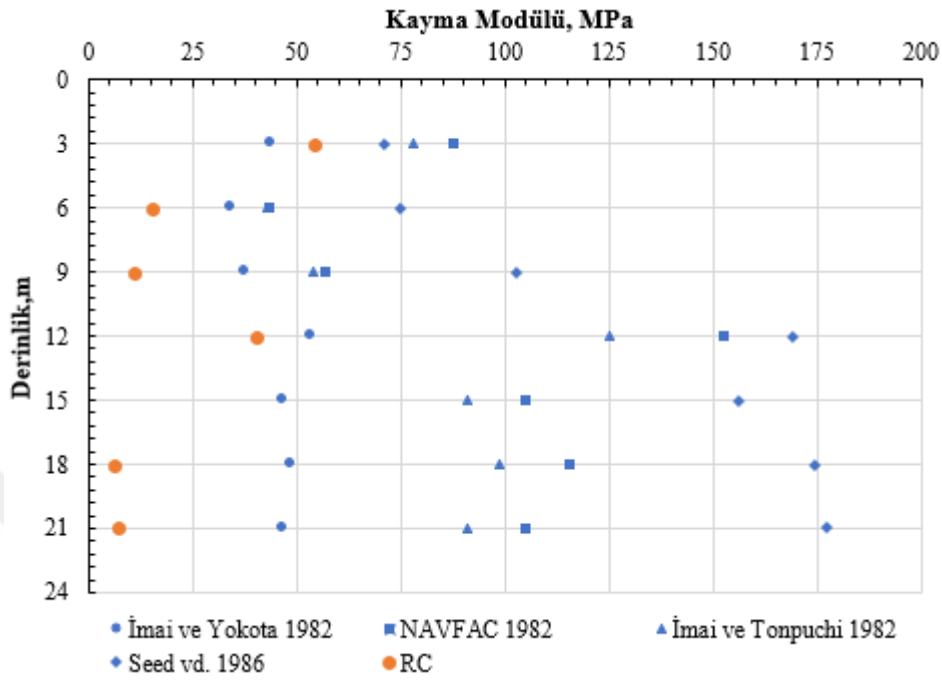
SK1		3m	6m	9m	12m	15m	18m	21m
Yapılan Çalışma	Zemin Cinsi	G ₀ (kPa)	G ₀ (kPa)	G ₀ (kPa)	G ₀ (kPa)	G ₀ (kPa)	G ₀ (kPa)	G ₀ (kPa)
NAVFAC (1982)	Tüm	69595	34547	45218	102626	83196	87604	83196
İmai ve Tonouchi (1982)	Tüm	78020	43019	54079	108539	90804	94878	90804
	Kil (PS Log)	79749	57683	65330	95442	86613	88706	86613
	Kum (PS Log)	59661	38175	45322	76424	66852	69089	66852
İmai ve Yokota (1982)	Kil (Rezonans Kolon)	43915	34368	37763	50310	46747	47599	46747
	Kum (Rezonans Kolon)	42934	30784	34983	51633	46734	47894	46734
Seed vd. (1986)	Tüm	71403	72224	92394	140427	134112	141844	142872

Tablo 5.15. Literatür korelasyonları ile elde edilen kayma modülü değerleri

SK2		3m	6m	9m	12m	15m	18m	21m
Yapılan Çalışma	Zemin Cinsi	G ₀ (kPa)	G ₀ (kPa)	G ₀ (kPa)	G ₀ (kPa)	G ₀ (kPa)	G ₀ (kPa)	G ₀ (kPa)
NAVFAC (1982)	Tüm	64915	28899	16598	69595	50316	50316	83196
İmai ve Tonouchi (1982)	Tüm	73538	36963	23071	78020	59219	59219	90804
	Kil (PS Log)	77222	53112	41097	79749	68639	68639	86613
	Kum (PS Log)	57071	34069	23924	59661	48516	48516	66852
İmai ve Yokota (1982)	Kil (Rezonans Kolon)	42858	32286	26591	43915	39202	39202	46747
	Kum (Rezonans Kolon)	41538	28281	21732	42934	36804	36804	46734
Seed vd. (1986)	Tüm	68236	66996	60888	120155	109332	113134	143972

Şekil 5.101’de rezonant kolon deneyi ile elde edilen kayma modülü değerlerinin, SPT deney sonuçları kullanılarak korelasyonlarla elde edilen kayma modülü değerleri ile karşılaştırılması yer almaktadır. Buradan korelasyonlarla elde edilen kayma modülü değerlerinin, rezonant kolon deneyi ile elde edilen değerlerden oldukça büyük olduğu belirlenmiştir. Bunun nedeni, özellikle yumuşak kıvamlı zemin numuneleri için,

numunenin alınması ve deneye hazırlanması aşamalarında numunenin örselenmesi ve deneyde numuneye uygulanan sınır şartları olarak açıklanabilir (Okur & Ansal, 2009).



Şekil 5.101. SPT korelasyonları ile elde edilen kayma modülü değerlerinin rezonant kolon deney sonuçları ile karşılaştırılması

Ayrıca standart penetrasyon deneyi, zemin tabakalarının kayma dalgası hızını belirlemek için de kullanılmaktadır. Bu amaçla literatürde korelasyonlar yer almaktadır. Bu korelasyonlar kullanılarak hesaplanan kayma dalgası hızı değerleri 2 kuyu için ayrı ayrı Tablo 5.16 ve Tablo 5.17’de verilmiştir.

Tablo 5.16. SK1 için SPT sayılarına bağlı olarak farklı korelasyonlarla elde edilen kayma dalgası hızı değerleri

SK1	(Özyankı vd., 2020)	İmai ve Yoshimura (1970)	İmai vd. (1976)	Ohta ve Goto (1978)	İmai ve Tonouchi (1982)	(İyisan, 1996)
Derinlik, m	Vs (m/sn)					
3	178	173	210	131	212	186
6	122	129	155	130	161	118
9	141	144	174	149	179	141
12	220	217	265	212	263	265
15	196	186	226	188	227	208
18	202	194	236	199	236	222
21	196	186	226	201	227	208

Tablo 5.17 SK2 için SPT sayılarına bağlı olarak farklı korelasyonlarla elde edilen kayma dalgası hızı değerleri

SK1	(Özyankı vd., 2020)	İmai ve Yoshimura (1970)	İmai vd. (1976)	Ohta ve Goto (1978)	İmai ve Tonouchi (1982)	(İyisan, 1996)
Derinlik, m	Vs (m/sn)					
3	172	168	203	129	206	177
6	111	120	144	125	150	105
9	82	96	114	120	121	74
12	178	173	210	189	212	186
15	150	151	182	169	186	151
18	150	151	182	175	186	151
21	196	186	226	201	227	208

Standart penetrasyon deneyi (TBDY, 2018)'de yerel zemin sınıfının belirlenmesinde kullanılmaktadır. 2 sondaj kuyusunda yapılan SPT deney sonuçlarından 30 m derinlik için elde edilen N_{60} değerlerinin ortalaması, $((N_{60})_{30})$, 8 olarak belirlenmiştir. Klasik üç eksenli basınç deneyinden 30 m derinlik için elde edilen drenajsız kohezyon değerlerinin ortalaması, $((c_u)_{30})$, yaklaşık 40 kPa olarak belirlenmiştir. SPT deney sonuçları kullanılarak elde edilen kayma dalgası hızı değerlerinin 30 m derinlik için ortalaması, $((V_s)_{30})$, yaklaşık 200 m/sn olarak belirlenmiştir. Tüm değerler incelendiğinde yerel zemin sınıfı ZE olarak belirlenmiştir.

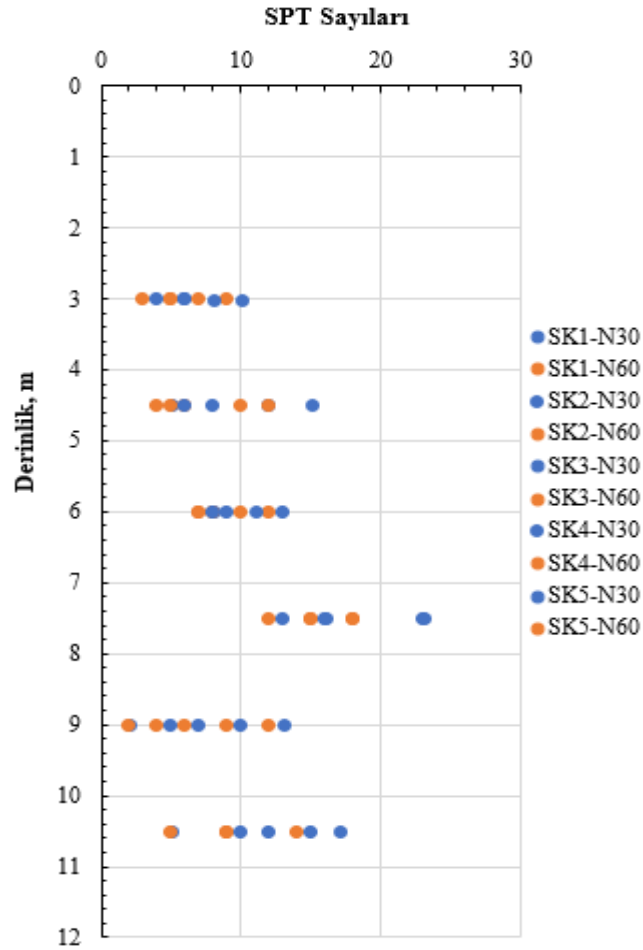
5.3.1.2. KOS Atıksu Arıtma Tesisi bölgesi

Tez kapsamında KOS Atıksu Arıtma Tesisi sahası için SPT deney sonuçları, bölge zemini için daha önce yapılmış zemin etüt raporunun incelenmesi neticesinde elde edilmiştir. Sahada yapılan 5 SPT deneyi ile elde edilen SPT- N_{30} ve SPT- N_{60} sayıları Tablo 5.18'de verilmiştir.

Tablo 5.18. SPT Deneyi Darbe Sayıları

Derinlik, m	SK1		SK2		SK3		SK4		SK5	
	SPT N ₃₀	SPT N ₆₀	SPT N ₃₀	SPT N ₆₀	SPT N ₃₀	SPT N ₆₀	SPT N ₃₀	SPT N ₆₀	SPT N ₃₀	SPT N ₆₀
3	6	5	10	9	4	3	8	7	6	5
4,5	12	10	5	4	8	6	15	12	6	5
6	13	12	8	7	9	8	11	10	8	7
7,5	13	12	16	15	23	18	23	18	16	15
9	10	9	13	12	7	6	2	2	5	4
10,5	10	9	17	16	12	9	5	5	15	14

Standart penetrasyon deney sonuçlarının değerlendirilmesi ile bölge zemin tabakalarının, 0-4,5 m arasında orta katı, 4,5-9 m arasında katı, 9-10,5 m arasında çok katı ve 10,5-13,5 m arasında orta katı kıvramlı olduğu belirlenmiştir. Standart penetrasyon darbe sayıları ile düzeltilmiş SPT sayılarının derinlikle değişimi ise Şekil 5.102’de verilmiştir.

**Şekil 5.102.** SPT sayılarının derinlikle değişimi

Bu sahada, standart penetrasyon deney sonuçları ile kayma modülünün ve kayma dalgası hızının belirlenmesi için, 5 sondaj kuyusunda elde edilen SPT sayılarının ortalaması alınmış ve korelasyonlarda Tablo 5.19’da yer alan bu değerler kullanılmıştır.

Tablo 5.19. Hesaplamalarda kullanılan ortalama SPT sayıları

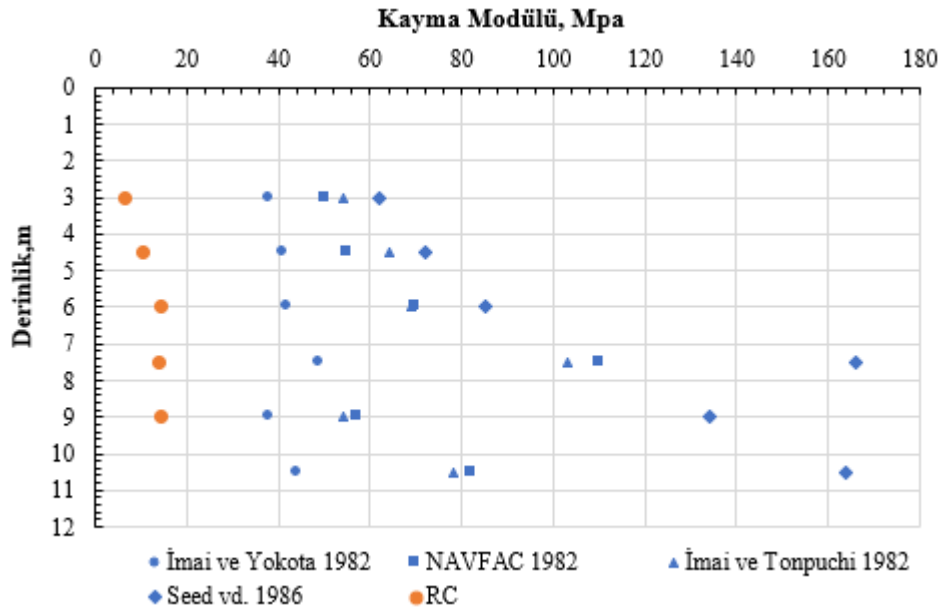
Derinlik, m	Ort. SPT-N₃₀	Ort. SPT-N₆₀
3	7	6
4,5	9	7
6	10	9
7,5	18	16
9	7	7
10,5	12	11

Ortalama standart penetrasyon sayıları kullanılarak, literatürde yer alan korelasyonlar ile elde edilen zeminin dinamik kayma modülü değerleri Tablo 5.20’de verilmiştir.

Tablo 5.20. Literatür korelasyonları ile elde edilen kayma modülü değerleri

		3 m	4,5 m	6 m	7,5 m	9 m	10,5 m
Yapılan Çalışma	Zemin Cinsi	G₀ (kPa)	G₀ (kPa)	G₀ (kPa)	G₀ (kPa)	G₀ (kPa)	G₀ (kPa)
NAVFAC (1982)	Tüm	50316	55287	69595	110275	56919	81714
İmai ve Tonouchi (1982)	Tüm	54079	64157	68923	102789	54079	78020
	Kil (PS Log)	65330	71696	74546	92657	65330	79749
	Kum (PS Log)	45322	51520	54364	73367	45322	59661
İmai ve Yokota (1982)	Kil (Rezonans Kolon)	37763	40517	41730	49195	37763	43915
	Kum (Rezonans Kolon)	34983	38488	40061	50086	34983	42934
Seed vd. (1986)	Tüm	62376	72224	79985	165775	133842	163916

Standart penetrasyon deney verileri kullanılarak literatürde verilen korelasyonlarla elde edilen kayma modülü değerleri rezonant kolon deneyi ile elde edilen maksimum kayma modülü değerlerinden en az 10 kat büyük olduğu belirlenmiştir (Şekil 5.103).



Şekil 5.103. SPT korelasyonları ile elde edilen kayma modülü değerlerinin rezonant kolon deney sonuçları ile karşılaştırılması

Standart penetrasyon deney sonuçları ile elde edilen kayma dalgası hızı değerleri Tablo 5.21’de yer almaktadır.

Tablo 5.21 SPT sayılarına bağlı olarak farklı korelasyonlarla elde edilen kayma dalgası hızı değerleri

	(Özyankı vd., 2020)	İmai ve Yoshimura (1970)	İmai vd. (1976)	Ohta ve Goto (1978)	İmai ve Tonouchi (1982)	(İyisan, 1996)
Derinlik, m	Vs (m/sn)					
3	172	168	203	129	206	177
4,5	111	120	144	125	150	105
6	82	96	114	120	121	74
7,5	178	173	210	189	212	186
9	150	151	182	169	186	151
10,5	150	151	182	175	186	151

5 sondaj kuyusunda yapılmış olan standart penetrasyon deneyi sonuçlarından elde edilen $((N_{60})_{30})$ değeri 16 olarak belirlenmiştir. Klasik üç eksenli basınç deneyinden 30 m derinlik için elde edilen $((c_u)_{30})$ yaklaşık 42 kPa olarak belirlenmiştir. SPT deney sonuçları kullanılarak elde edilen $((V_s)_{30})$ yaklaşık 178 m/sn olarak belirlenmiştir. Tüm değerler incelendiğinde (TBDY, 2018) ile yerel zemin sınıfı ZE olarak belirlenmiştir.

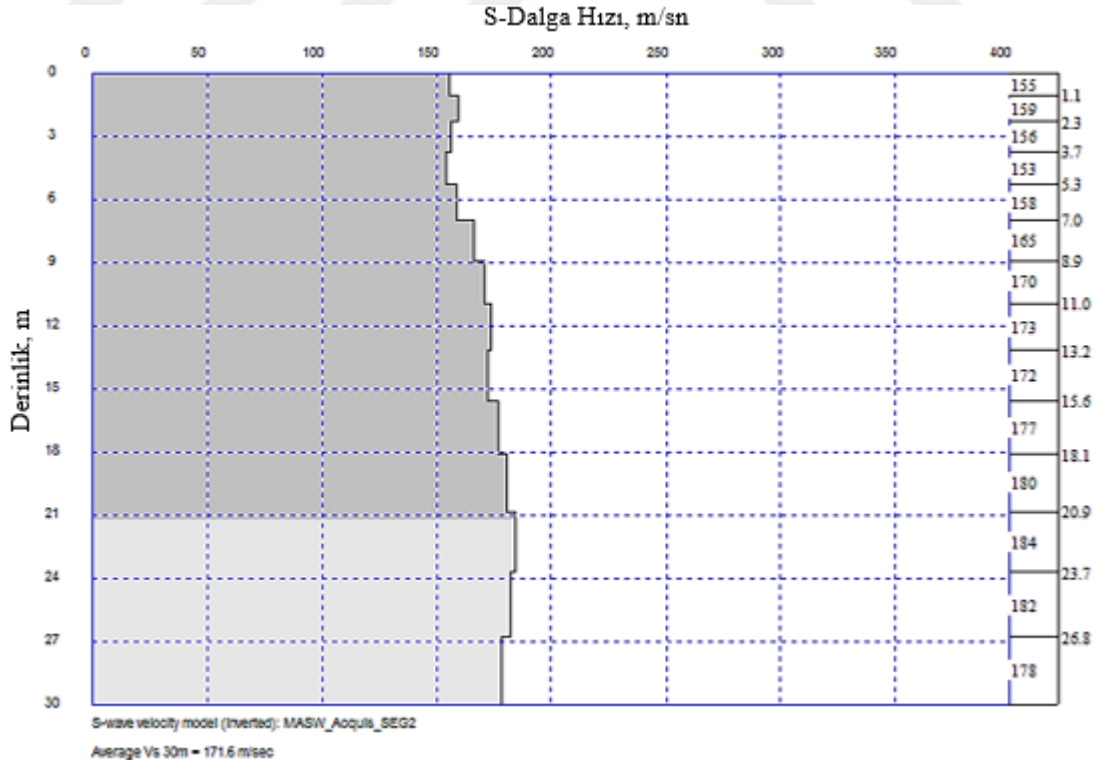
5.3.2. MASW deneyi

Bölge zemininin kayma dalgası hızlarını belirlemek ve 30 m derinlik için elde edilen ortalama kayma dalgası hızı ile yerel zemin sınıfı, hâkim titreşim periyodu ve zemin büyütme katsayısını belirlemek için MASW deneyi yapılmıştır.

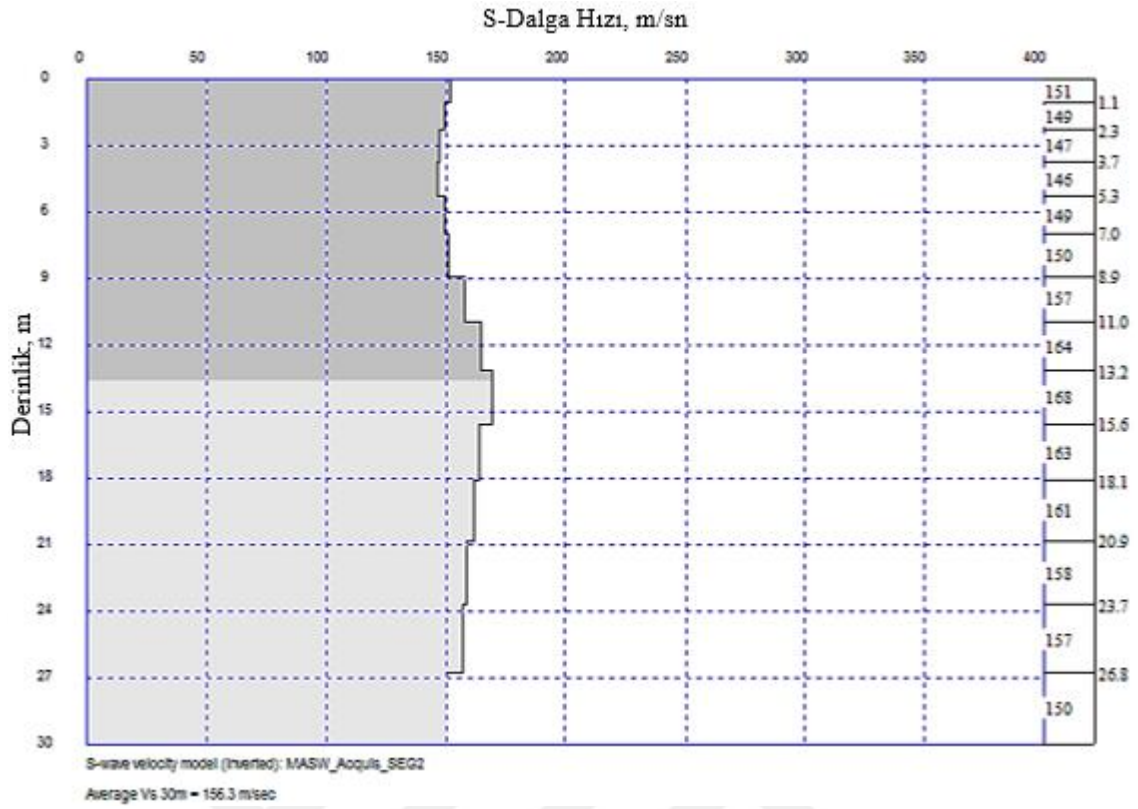
FMC fabrika sahasında birbirine paralel doğrultuda 2 adet ve KOS Atıksu Arıtma Tesisi sahasında birbirine dik doğrultuda 2 adet MASW deneyi yapılmıştır.

5.3.2.1. FMC fabrika sahası

FMC fabrika sahasında 2 adet çok kanallı yüzey dalgası spektrumu analizi (MASW) deneyi yapılmıştır. 1. Serim ve 2. Serim için elde edilen kayma dalgası hızı-derinlik grafikleri sırasıyla Şekil 5.104 ve Şekil 5.105'te yer almaktadır. 1. Serim ölçüm sonuçlarından kayma dalgası hızı, 0-7 m için ortalama 156 m/sn ve 7-16 m için ortalama 170 m/sn ve 16-30 m için ortalama 180 m/sn olarak belirlenmiştir. 2. Serim ölçüm sonuçlarından ise ortalama kayma dalgası hızı, 0-9 m için 149 m/sn, 9-16 m için 170 m/sn ve 16-30 m için 180 m/sn olarak belirlenmiştir.

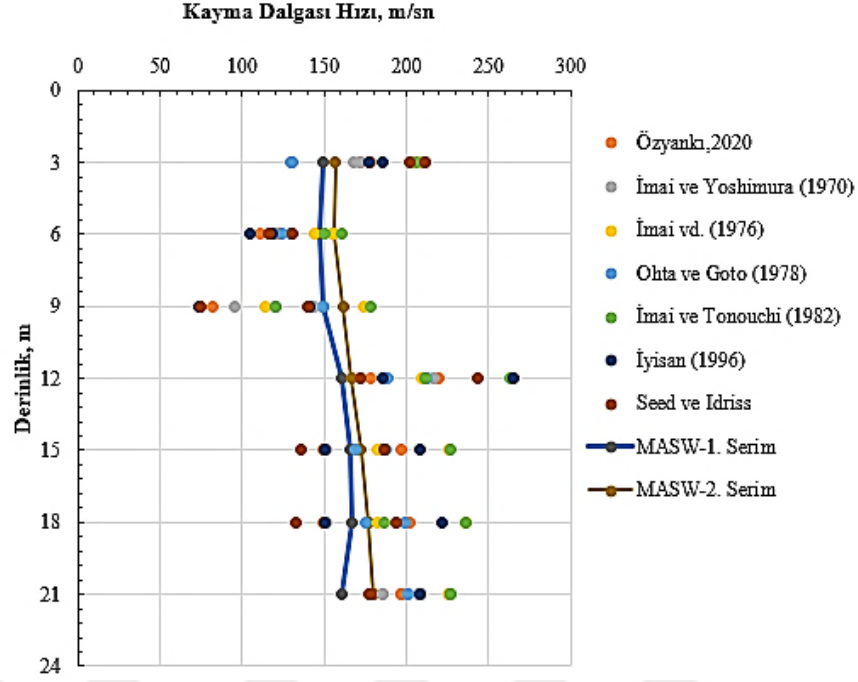


Şekil 5.104. 1. Serim için kayma dalgası hızı-derinlik grafiği



Şekil 5.105. 2. Serim için kayma dalgası hızı-derinlik grafiği

Şekil 5.106'da SPT deney sonuçları kullanılarak korelasyonlardan elde edilen kayma dalgası hızı değerlerinin MASW deney sonuçları ile karşılaştırması yer almaktadır. MASW deney sonuçlarının, korelasyonlar ile elde edilen kayma dalgası hızları aralığında olduğu belirlenmiştir.



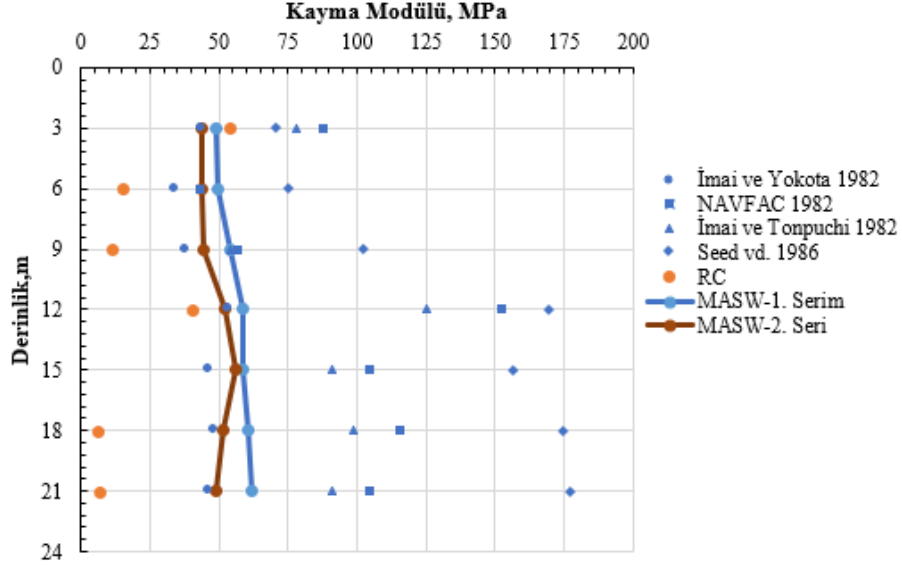
Şekil 5.106. SPT deney sonuçları ile elde edilen kayma dalgası hızlarının, MASW deney sonuçları ile karşılaştırılması

Bağıntı (2.50) yardımıyla, MASW deneyi sonucunda elde edilen kayma dalgası hızı ve zemin yoğunluğu kullanılarak kayma modülü belirlenmiştir. Bu değerler Tablo 5.22’ de verilmiştir.

Tablo 5.22. MASW ile elde edilen kayma modülü, G (MPa), değerleri

Derinlik (m)	3	6	9	12	15	18	21
1. Serim	49	49	54	58	59	61	62
2. Serim	44	44	45	53	56	51	49

Rezonant kolon deneyi ile elde edilen kayma modülü değerleri ile SPT ve MASW arazi deneyleri sonuçları ile elde edilen kayma modülü değerlerinin karşılaştırılması Şekil 5.107’de verilmiştir. Bu grafikten arazi deney sonuçlarını kullanılarak korelasyonlarla elde edilen kayma modülü değerlerinin rezonant kolon değerlerinin çok üzerinde çıktığı belirlenmiştir. En yüksek sonuçların ise SPT verileri ile elde edildiği belirlenmiştir.



Şekil 5.107. Rezonant kolon deney sonuçlarının arazi deney sonuçları ile karşılaştırılması

MASW deneyi sonuçlarından, 30 m derinlik için elde edilen ortalama kayma dalgası hızı, 1. Serim için 171 m/sn ve 2. Serim için 156 m/sn olarak belirlenmiştir. Bu değerler göz önünde bulundurulduğunda (TBDY, 2018)'ne göre yerel zemin sınıfı ZE olarak belirlenmiştir.

Kayma dalgası hızı, aynı zamanda zemin hâkim periyodunun belirlenmesinde kullanılmaktadır. Zemin hâkim periyodu Bağntı (5.1) ile elde edilmektedir. MASW deney sonuçları ile zemin hâkim periyodu 1. Serim için 0,499 sn ve 2. Serim için 0,535 sn olarak belirlenmiştir. Zemin büyütme katsayısı ise Bağntı (5.2) kullanılarak, 1. Serim için 3,14 ve 2. Serim için 3,27 olarak hesaplanmıştır.

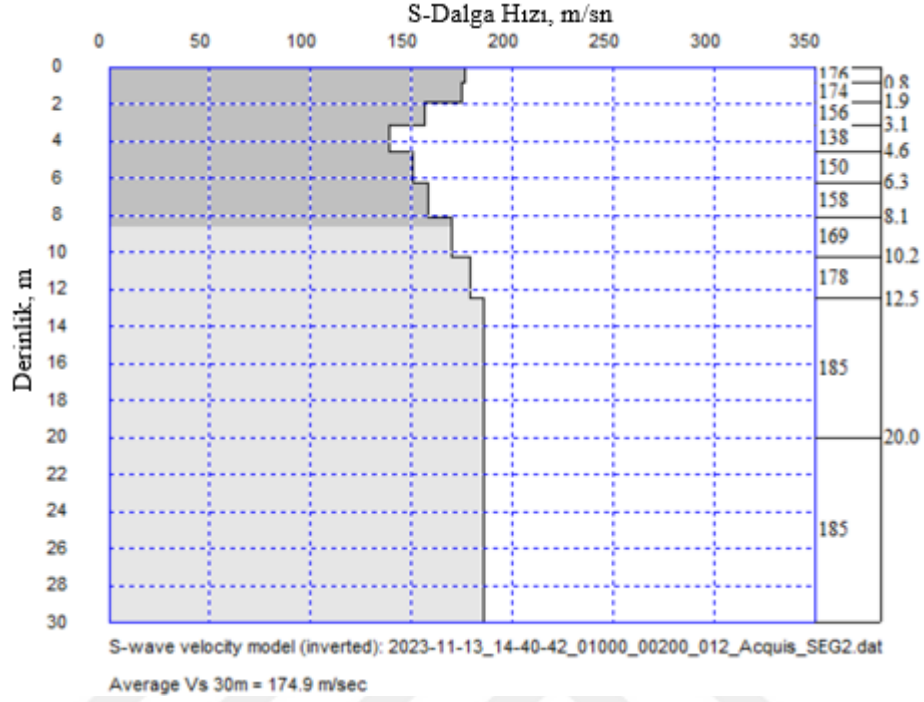
$$T_0 = \sum 4H/V_s \quad (5.1)$$

$$A = 68V_s^{-0,61} \text{ (Korkmaz, 2012)} \quad (5.2)$$

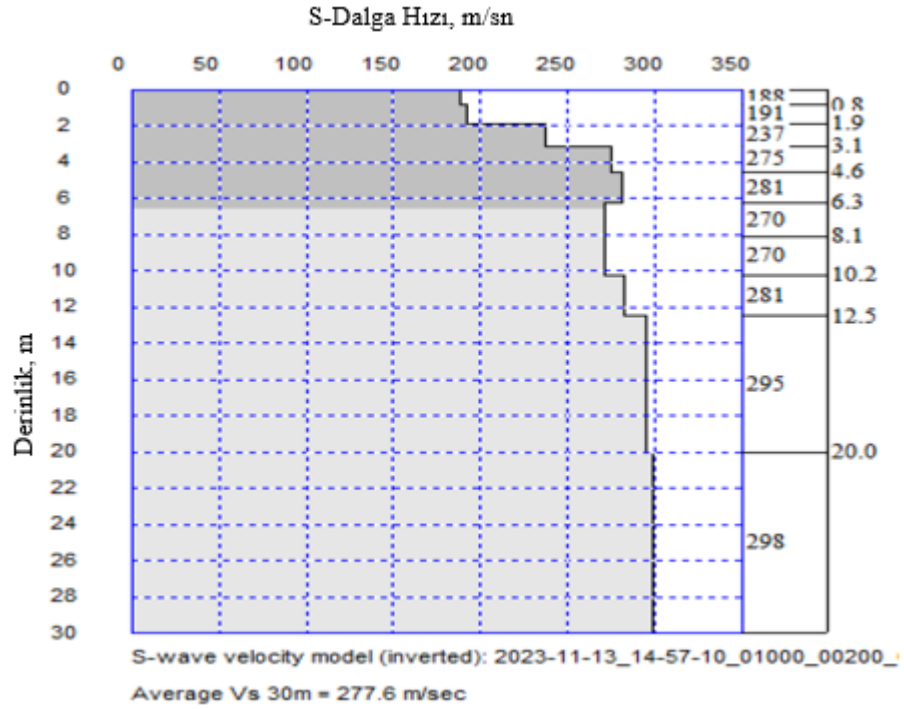
5.3.2.2. KOS Atıksu Arıtma Tesisi sahası

Bu sahada 2 adet (MASW) deneyi yapılmıştır. 1. Serim ve 2. Serim için elde edilen kayma dalgası hızı-derinlik grafikleri sırasıyla Şekil 5.108 ve Şekil 5.109'da yer almaktadır. 1. Serim ölçüm sonuçlarından kayma dalgası hızı, 0-12 m için ortalama 162 m/sn ve 12-30 m için sabit ve 185 m/sn olarak belirlenmiştir. 2. Serim ölçüm

sonuçlarından ise ortalama kayma dalgası hızı, 0-2 m için 190 m/sn, 2-12 m için 269 m/sn ve 12-30 m için 296 m/sn olarak belirlenmiştir.

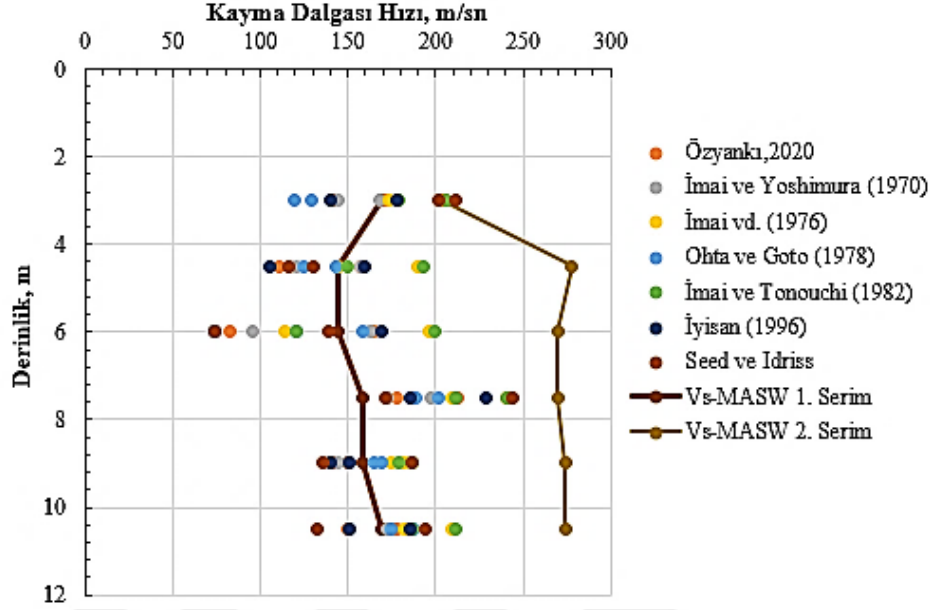


Şekil 5.108. 1. Serim için kayma dalgası hızı-derinlik grafiği



Şekil 5.109. 2. Serim için kayma dalgası hızı-derinlik grafiği

Şekil 5.110'da SPT deney sonuçları ile korelasyonlardan elde edilen kayma dalgası hızı değerlerinin MASW deney sonuçları ile karşılaştırması yer almaktadır.



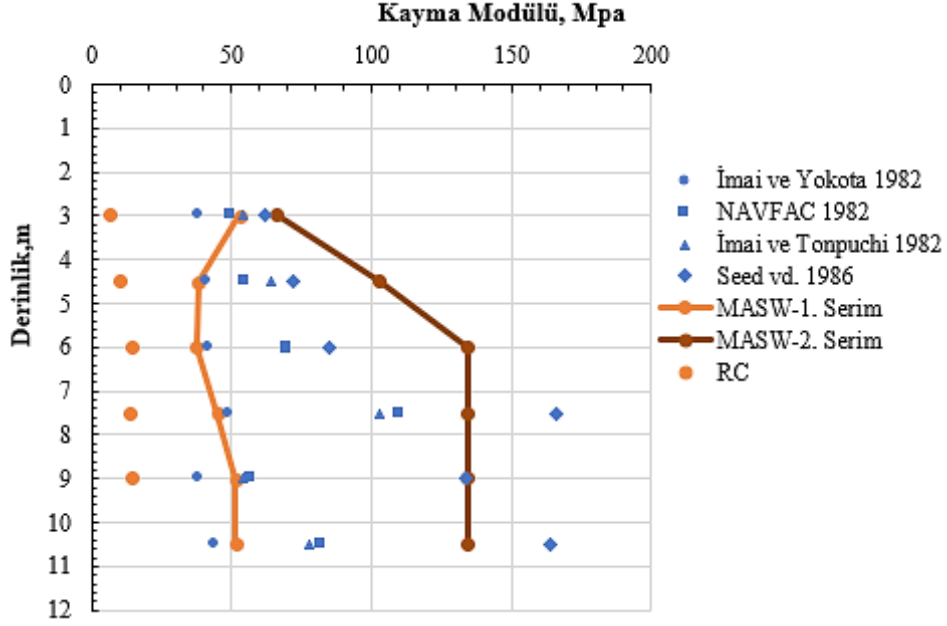
Şekil 5.110. SPT deney sonuçları ile elde edilen kayma dalgası hızlarının, MASW deney sonuçları ile karşılaştırılması

Bağıntı (2.50) yardımıyla, MASW deneyi sonucunda elde edilen kayma dalgası hızı ve zemin yoğunluğu kullanılarak kayma modülleri belirlenmiştir. Bu değerler, Tablo 5.23'te verilmiştir.

Tablo 5.23. MASW ile elde edilen kayma modülü, G (MPa), değerleri

Derinlik (m)	3	4,5	6	7,5	9	10,5
1. Serim	52	38	37	45	51	51
2. Serim	66	103	135	135	135	135

Rezonant kolon deneyi ile elde edilen kayma modülü değerlerinin, SPT ve MASW arazi deneyleri sonuçları ile elde edilen kayma modülü değerleri ile karşılaştırılması Şekil 5.111'de verilmiştir. Bu grafikten arazi deney sonuçlarını kullanarak korelasyonlarla elde edilen kayma modülü değerlerinin rezonant kolon değerlerinin çok üzerinde çıktığı belirlenmiştir. En yüksek sonuçların ise MASW 2. Serim deneyi ile elde edildiği belirlenmiştir.



Şekil 5.111. Rezonant kolon deney sonuçlarının arazi deney sonuçları ile karşılaştırılması

MASW deney sonuçlarından 30 m derinlik için elde edilen ortalama kayma dalgası hızı, 1. Serim için 174,9 m/sn ve 2. Serim için 277,6 m/sn olarak belirlenmiştir. Bu değerler göz önünde bulundurulduğunda (TBDY, 2018)'ne göre yerel zemin sınıfı 1. Serim için ZE ve 2. Serim için ZD olarak belirlenmiştir.

MASW deney sonuçları ile zemin hâkim periyodu 1. Serim için 0,686 sn ve 2. Serim için 0,432 sn olarak belirlenmiştir. Bu durum yumuşak zeminlerde zemin hâkim periyodunun büyüdüğünü göstermektedir. Zemin büyütme katsayısı ise 1. Serim için 3,07 ve 2. Serim için 2,32 olarak hesaplanmıştır. Bu değerler kayma dalgası hızı küçüldükçe büyütme katsayısının büyüdüğünü göstermektedir. Bu da yumuşak zeminlerin büyütme katsayısının daha büyük olduğunu ifade eder.

5.3.3. Mikrotremör deneyi

Bu deney sadece KOS Atıksu Arıtma Tesisi sahasında yapılmıştır. 30 dk süre ile yapılan mikrotremör ölçümü ile zemin hâkim periyodu 0,385 olarak belirlenmiştir. Bu değer (TBDY, 2018)'de yerel zemin sınıfının ZD olduğunu göstermektedir. Bu durumda zemin büyütme katsayısı 1,99 ile 3,01 arasında değişmektedir. Diğer bir şekilde zemin hâkim periyodu 0,385 için, 30 m için ortalama kayma dalgası hızı 312 m/sn olarak elde edilmiştir. Buradan zemin büyütme katsayısı 2,17 olarak belirlenmiştir.

5.3.4. InstanTEL Minimate Plus ölçüm sonuçlarının değerlendirilmesi

InstanTEL Minimate Plus cihazı ile ölçüm alınması, darbeleri makinelerin oluşturduğu dinamik etkilerin, zemin sertliğine bağlı olarak zemin davranışını belirlemek için yapılmıştır. Bu amaçla, farklı sertlikte zemin profillerinden oluşan, KOS Atıksu Arıtma Tesisi sahası ve Selçuk Üniversitesi Kan Merkezi binası bölgesinde ölçümler alınmıştır. Sahada darbe etkisini oluşturmak için, dinamik plaka deney seti kullanılmıştır. Her ölçüm için, dinamik plaka deney setinde yer alan, hem 10 kg hem de 15 kg yük, 3'er defa düşürülmüştür. Oluşturulan her etki sonrası alınan kayıtlar ile pik ivme, pik parçacık hızı ve pik deplasmanlar belirlenmiştir.

5.3.4.1. KOS Atıksu Arıtma Tesisi bölgesi

KOS Atıksu Arıtma Tesisi sahasında 4 doğrultuda her 2 m'de bir kayıtlar alınmıştır. Alınan kayıtlar BLASTWARE 12 programı ile bilgisayar ortamına aktarılmıştır. Bir ölçüm noktası için, aynı yük ile oluşturulan 3 dinamik etki sonucunda 3 okuma alınmıştır. 1. Doğrultu için 10 kg ve 15 kg dinamik etkiler neticesinde elde edilen pik parçacık hızı, pik ivme ve pik deplasman sonuçları sırasıyla Tablo 5.24 ve Tablo 5.25'te verilmiştir. Bu doğrultu için 10 kg ve 15 kg yük için 18 m'den sonra cihaz tarafından okuma yapılamamış, kayıt alınamamıştır.

Her ölçüm noktası için, 10 ve 15 kg yük ile oluşturulan dinamik etkiler neticesinde elde edilen en yüksek hız, ivme ve deplasman değerleri belirlenmiştir. Bu değerler, etki noktasından uzaklığa bağlı olarak hız, ivme ve deplasman grafikleri çizilmesi için kullanılmış ve sonuçlar karşılaştırılmıştır.

Tablo 5.24 ve Tablo 5.25 incelendiğinde, her iki etki yükü için etki noktasına olan uzaklık arttıkça pik parçacık hızı değerlerinin azaldığı belirlenmiştir. Aynı ölçüm noktası için 15 kg etki yükü için daha büyük parçacık hızı değerleri elde edilmekle birlikte en büyük fark etki noktasına yakın noktalarda belirlenmiştir. Etki noktasından 8 m uzaklığa kadar artış %40 civarında iken etki noktasından 8 m'den uzak mesafeler için hız değerleri oldukça küçülmekle birlikte yük artışına bağlı olarak artış oranı %20 civarındadır.

Tablo 5.24. 1. doğrultu 10 kg yük etkisi ile alınan ölçüm sonuçları

Uzaklık (m)	Yük (kg)	Deney No	Tran. PPV	Ver. PPV	Long. PPV	Tran. İvme	Ver. İvme	Long. İvme	Tran. Depl.	Ver. Depl.	Long. Depl.
			mm/sn			g			mm		
2	10	1	1,62	2,92	2,24	0,113	0,126	0,0911	0,003	0,0076	0,0088
		2	1,54	3,62	1,86	0,118	0,131	0,101	0,0037	0,0095	0,0099
		3	1,54	3,71	1,81	0,116	0,136	0,101	0,0037	0,0098	0,0079
4	10	1	0,667	1,03	1,27	0,0481	0,0696	0,053	0,002	0,003	0,0068
		2	0,714	1,06	1,29	0,0514	0,0746	0,0563	0,0021	0,0029	0,0072
		3	0,746	1,03	1,33	0,053	0,0746	0,0563	0,0022	0,003	0,0073
6	10	1	0,333	0,556	0,889	0,0116	0,0348	0,0365	0,0015	0,0013	0,0028
		2	0,381	0,46	0,937	0,0133	0,0298	0,0365	0,0011	0,0011	0,0026
		3	0,381	0,429	0,937	0,0116	0,0348	0,0365	0,0012	0,0011	0,0027
8	10	1	0,206	0,397	0,476	0,0149	0,0249	0,0182	0,0009	0,0013	0,0021
		2	0,238	0,397	0,508	0,0166	0,0265	0,0182	0,0008	0,0013	0,0021
		3	0,222	0,381	0,508	0,0166	0,0265	0,0182	0,0008	0,0012	0,0021
10	10	1	0,127	0,508	0,46	0,005	0,0149	0,0116	0,0007	0,0019	0,0016
		2	0,159	0,508	0,444	0,005	0,0149	0,0133	0,0011	0,0018	0,0015
		3	0,143	0,508	0,476	0,005	0,0166	0,0116	0,0007	0,0018	0,0016
12	10	1	0,19	0,159	0,508	0,0083	0,0099	0,0149	0,0007	0,0012	0,0021
		2	0,19	0,159	0,54	0,0083	0,0083	0,0133	0,001	0,0013	0,0022
		3	0,19	0,175	0,508	0,0066	0,0083	0,0133	0,0007	0,0011	0,002
14	10	1	0,206	0,222	0,333	0,0083	0,0099	0,0083	0,002	0,0017	0,0013
		1	0,143	0,286	0,381	0,0066	0,0099	0,0099	0,0006	0,0009	0,0014
		2	0,159	0,254	0,349	0,0066	0,0099	0,0099	0,0004	0,0008	0,0013
16	10	3	0,143	0,254	0,381	0,0066	0,0099	0,0099	0,0012	0,0016	0,0015
		4	0,143	0,27	0,365	0,0083	0,0099	0,0116	0,0006	0,0009	0,0013
		1	0,159	0,175	0,349	0,0083	0,0066	0,0116	0,0005	0,0013	0,0012
18	10	2	0,159	0,159	0,381	0,0083	0,0066	0,0116	0,0004	0,0004	0,0014
		3	0,175	0,159	0,365	0,0066	0,0066	0,0116	0,0005	0,0004	0,0013

Aynı tablolarda, 10 kg ve 15 kg etki için etki noktasından yatay uzaklığa bağlı olarak pik ivme değerlerinin değişimi verilmiştir. Pik parçacık hızı ölçümlerinde olduğu gibi 15 kg etki için daha büyük ivme değerleri elde edilmekle birlikte uzaklık arttıkça aradaki farkın azaldığı belirlenmiştir. Etki noktasından 8 m uzaklığa kadar ivme değerlerindeki artış %40 civarında iken uzaklaştıkça ivme değerleri çok küçülmekle beraber bu oran %20'ye azalmıştır.

Tablo 5.25. 1. doğrultu 15 kg yük etkisi ile alınan ölçüm sonuçları

Uzaklık (m)	Yük kg	Deney No	Tran. PPV	Ver. PPV	Long. PPV	Tran. İvme	Ver. İvme	Long. İvme	Tran. Depl.	Ver. Depl.	Long. Depl.
		1	2,03	5,02	2,67	0,134	0,166	0,139	0,00435	0,014	0,014
2	15	2	1,84	5	2,64	0,136	0,159	0,133	0,0042	0,0142	0,0134
		3	1,98	5	2,56	0,139	0,156	0,144	0,00443	0,0142	0,0128
		1	0,984	1,37	1,78	0,0663	0,0961	0,0729	0,00233	0,00393	0,0104
4	15	2	0,952	1,38	1,81	0,0679	0,0994	0,0746	0,00247	0,00388	0,0104
		3	0,952	1,37	1,79	0,0679	0,101	0,0762	0,00248	0,00377	0,0105
		1	0,524	0,683	1,32	0,0166	0,0447	0,0497	0,00168	0,00166	0,00362
6	15	2	0,508	0,587	1,32	0,0182	0,0497	0,0514	0,00158	0,00162	0,00366
		3	0,524	0,571	1,33	0,0182	0,0481	0,0497	0,00163	0,00157	0,00376
		1	0,317	0,46	0,667	0,0232	0,0315	0,0215	0,00088	0,00167	0,00274
8	15	2	0,317	0,476	0,698	0,0215	0,0381	0,0232	0,00099	0,0017	0,00273
		3	0,302	0,492	0,683	0,0215	0,0365	0,0249	0,00102	0,00171	0,00272
		1	0,175	0,683	0,571	0,00663	0,0215	0,0149	0,00091	0,00253	0,00221
10	15	2	0,175	0,698	0,587	0,00497	0,0182	0,0133	0,00129	0,00255	0,00225
		3	0,222	0,683	0,587	0,00663	0,0215	0,0149	0,00114	0,0024	0,00219
		1	0,206	0,19	0,683	0,00994	0,0116	0,0199	0,00086	0,0015	0,00281
12	15	2	0,238	0,206	0,683	0,00829	0,00994	0,0199	0,00084	0,00154	0,0028
		3	0,222	0,222	0,698	0,00994	0,00994	0,0182	0,00084	0,0015	0,00285
		1	0,143	0,238	0,397	0,00663	0,00829	0,00994	0,00086	0,00102	0,00153
14	15	2	0,127	0,254	0,381	0,00663	0,00829	0,00994	0,00131	0,00104	0,00151
		3	0,127	0,206	0,397	0,00663	0,00829	0,00994	0,00046	0,00089	0,00162
		1	0,238	0,286	0,413	0,00829	0,0133	0,0133	0,00076	0,00115	0,00149
16	15	2	0,238	0,286	0,476	0,00829	0,0133	0,0116	0,00066	0,00161	0,00171
		3	0,254	0,302	0,444	0,00994	0,0149	0,0133	0,00075	0,00258	0,00167
		1	0,206	0,206	0,46	0,00829	0,00829	0,0149	0,00064	0,00082	0,00155
18	15	2	0,206	0,175	0,46	0,00829	0,00994	0,0133	0,00058	0,00058	0,00168
		3	0,175	0,19	0,508	0,00663	0,00829	0,0133	0,00057	0,00064	0,00181

2. doğrultuda, 10 ve 15 kg etki yükleri ile elde edilen pik parçacık hızı, pik ivme ve pik deplasman değerleri Tablo 5.26 ve Tablo 5.27’de verilmiştir. Bu doğrultuda 10 kg ve 15 kg yük için 18 m’den sonra ölçüm alınamamıştır.

Tablo 5.26. 2. doğrultu 10 kg yük etkisi ile alınan ölçüm sonuçları

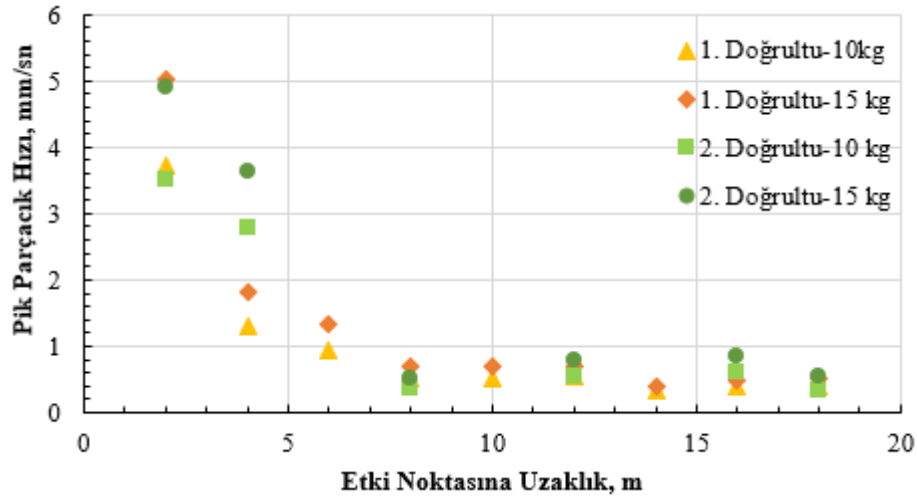
Uzaklık (m)	Yük kg	Deney No	Tran. PPV	Ver. PPV	Long. PPV	Tran. İvme	Ver. İvme	Long. İvme	Tran. Depl.	Ver. Depl.	Long. Depl.
2	10	1	1,51	3,25	2,22	0,108	0,182	0,00474	0,00191	0,00639	0,00474
		2	1,3	3,44	2,37	0,0945	0,192	0,119	0,00309	0,00703	0,00522
		3	1,24	3,52	2,41	0,0928	0,199	0,119	0,00176	0,00708	0,00536
4	10	1	0,46	0,0746	2,56	0,0265	0,0613	0,0762	0,00095	0,00245	0,00977
		2	0,429	0,794	2,68	0,0249	0,0613	0,0779	0,001	0,00271	0,01
		3	0,444	0,841	2,78	0,0232	0,0613	0,0812	0,00105	0,00285	0,01
8	10	1	0,175	0,317	0,365	0,00829	0,0133	0,0116	0,0006	0,00135	0,00232
		2	0,175	0,333	0,365	0,00663	0,0133	0,00994	0,00063	0,00129	0,00224
		3	0,159	0,317	0,365	0,00829	0,0149	0,0116	0,00071	0,00135	0,00221
12	10	1	0,238	0,19	0,492	0,00994	0,00829	0,0166	0,00074	0,00093	0,00236
		2	0,27	0,175	0,556	0,0116	0,00829	0,0199	0,00082	0,00095	0,00212
		3	0,254	0,206	0,556	0,0116	0,00829	0,0166	0,00073	0,00107	0,0021
16	10	1	0,206	0,444	0,619	0,00994	0,0215	0,0182	0,0006	0,00153	0,00317
		2	0,222	0,444	0,619	0,00994	0,0199	0,0182	0,00065	0,00154	0,00312
		3	0,206	0,476	0,619	0,00994	0,0182	0,0182	0,00068	0,00157	0,00305
18	10	1	0,222	0,333	0,286	0,00994	0,0116	0,0116	0,00064	0,00147	0,00149
		2	0,206	0,333	0,27	0,00994	0,0116	0,00994	0,00067	0,00143	0,00204
		3	0,206	0,333	0,286	0,00829	0,0116	0,0116	0,00059	0,00154	0,00143

Tablo 5.26 ve Tablo 5.27 incelendiğinde, tüm noktalar için pik parçacık hızı, her ölçüm noktası için, etki 10 kg'dan 15 kg'a çıkarıldığında %40 civarında artmıştır. Hız değerleri etki noktasından uzaklaştıkça küçülmekle birlikte artış oranı yaklaşık sabit kalmıştır. Pik ivme değerlerinin ise her ölçüm noktası için etkinin 10 kg'da 15 kg'a çıkarılması durumunda %15-20 civarında arttığı belirlenmiştir.

Şekil 5.112'de 1. ve 2. doğrultu için etki noktasından uzaklığa bağlı olarak pik parçacık hızı değerleri toplu olarak verilmiştir. Bu grafikte alınan değerler her ölçüm noktasındaki en büyük pik parçacık hızı değerleridir. Bu doğrultular birbirine paralel doğrultulardır. Elde edilen pik parçacık hızı değerleri 2 doğrultu için tutarlıdır.

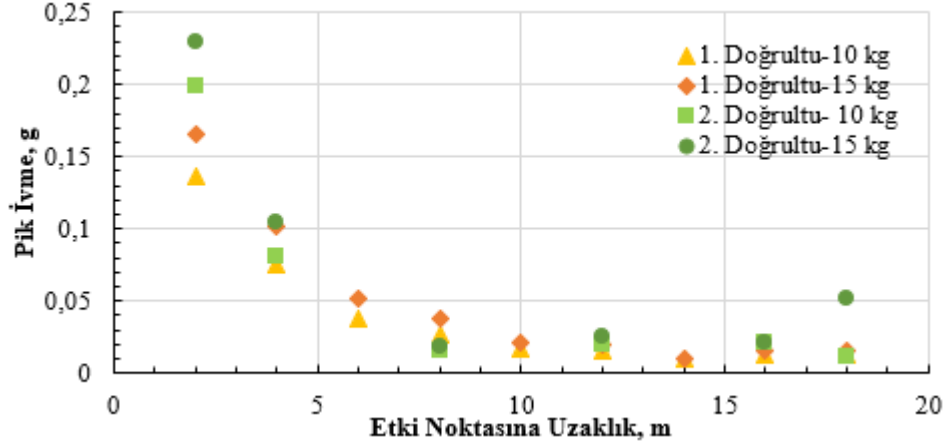
Tablo 5.27. 2. doğrultu 15 kg yük etkisi ile alınan ölçüm sonuçları

Uzaklık (m)	Yük kg	Deney No	Tran. PPV	Ver. PPV	Long. PPV	Tran. İvme	Ver. İvme	Long. İvme	Tran. Depl.	Ver. Depl.	Long. Depl.
2	15	1	1,25	4,49	3,13	0,0862	0,22	0,134	0,00187	0,009	0,0153
		2	1,3	4,73	3,27	0,0911	0,229	0,144	0,00198	0,00926	0,00728
		3	1,27	4,91	3,33	0,0878	0,23	0,152	0,00362	0,00949	0,00741
4	15	1	0,413	1,06	3,6	0,0232	0,0762	0,103	0,00123	0,0037	0,014
		2	0,413	1,06	3,6	0,0199	0,0762	0,104	0,00126	0,00379	0,0142
		3	0,429	1,06	3,62	0,0215	0,0862	0,104	0,0012	0,00382	0,0143
8	15	1	0,206	0,413	0,508	0,00829	0,0182	0,0182	0,00081	0,00171	0,00294
		2	0,222	0,444	0,492	0,00829	0,0166	0,0166	0,00087	0,00188	0,00301
		3	0,206	0,444	0,492	0,00829	0,0149	0,0166	0,00092	0,00184	0,00288
12	15	1	0,333	0,222	0,762	0,0116	0,0116	0,0232	0,00099	0,00122	0,00288
		2	0,365	0,222	0,794	0,0149	0,0116	0,0249	0,00115	0,00124	0,00296
		3	0,349	0,27	0,762	0,0116	0,0116	0,0249	0,00103	0,00129	0,00297
16	15	1	0,254	0,54	0,841	0,0133	0,0215	0,0215	0,00091	0,00196	0,0046
		2	0,27	0,571	0,825	0,0116	0,0215	0,0215	0,00091	0,00215	0,00429
		3	0,254	0,571	0,825	0,0116	0,0215	0,0215	0,00081	0,00207	0,00437
18	15	1	0,222	0,19	0,365	0,0116	0,00829	0,0166	0,00138	0,00057	0,00109
		2	0,46	0,317	0,524	0,0249	0,0166	0,0298	0,00347	0,00191	0,00371
		3	0,317	0,286	0,556	0,0298	0,0265	0,0514	0,00081	0,00055	0,00129

**Şekil 5.112.** 1. doğrultu ve 2. doğrultu için etki noktasından yatay uzaklığa bağlı olarak pik parçacık hızı ölçümleri

Şekil 5.113'te ise 1. ve 2. doğrultu için elde edilen pik ivme değerlerinin etki noktasına uzaklığa bağlı olarak değişimi yer almaktadır. Aynı etki yüküne karşılık iki

doğrultudaki ivme değerlerinde bir tutarsızlık belirlenmiştir. Genel olarak ivme değerleri 8 m'den sonra %80-90 oranında azalarak 0,05g'nin altına düştüğü belirlenmiştir.



Şekil 5.113. 1. doğrultu ve 2. doğrultu için etki noktasından yatay uzaklığa bağlı olarak pik ivme ölçümleri

3. doğrultuda 10 ve 15 kg etki yükleri ile elde edilen pik parçacık hızı, pik ivme ve pik deplasman değerleri Tablo 5.28 ve Tablo 5.29'da verilmiştir. Bu doğrultuda 10 kg yük için 12 m ve 15 kg yük için 18 m'den sonra ölçüm alınamamıştır.

Tablo 5.28 ve Tablo 5.29'da yer alan pik parçacık hızı ve pik ivme değerleri incelendiğinde, etki yükünün artması durumunda, her ölçüm noktası için pik parçacık hızı değerlerinin %25-40 oranında arttığı belirlenmiştir. Pik ivme değerlerinin ise her nokta için %15-40 oranında arttığı belirlenmiştir.

Tablo 5.28. 3. doğrultu 10 kg yük etkisi ile alınan ölçüm sonuçları

Uzaklık (m)	Yük kg	Deney No	Tran. PPV	Ver. PPV	Long. PPV	Tran. İvme	Ver. İvme	Long. İvme	Tran. Depl.	Ver. Depl.	Long. Depl.
2	10	1	2,25	4,86	3	0,104	0,204	0,141	0,00668	0,0102	0,0153
		2	2,38	4,89	3,1	0,108	0,202	0,152	0,00694	0,0101	0,0157
		3	2,44	4,87	3,14	0,109	0,205	0,152	0,00736	0,00979	0,0155
4	10	1	0,889	2,24	1,83	0,0298	0,047	0,028	0,00311	0,0103	0,0237
		2	0,968	2,62	2,11	0,0315	0,0547	0,0447	0,00364	0,0119	0,0101
6	10	1	0,381	1,24	0,889	0,0166	0,0398	0,0265	0,00163	0,00399	0,00429
		2	0,381	1,29	0,857	0,0149	0,0431	0,0282	0,00167	0,00411	0,00485
		3	0,413	1,33	0,857	0,0149	0,0414	0,0282	0,00184	0,00426	0,00457
8	10	1	0,175	0,46	0,651	0,0116	0,0199	0,0182	0,00063	0,00167	0,00327
		2	0,175	0,46	0,683	0,00994	0,0199	0,0149	0,0006	0,00165	0,0036
		3	0,175	0,444	0,683	0,0116	0,0199	0,0149	0,00064	0,0016	0,00346
10	10	1	0,159	0,381	0,349	0,00497	0,0133	0,00994	0,00064	0,00136	0,00159
		2	0,143	0,397	0,349	0,00497	0,0133	0,00994	0,00067	0,00132	0,00163
		3	0,159	0,38	0,365	0,00663	0,0116	0,00994	0,00066	0,00136	0,00164
12	10	1	0,175	0,397	0,238	0,00829	0,00994	0,00829	0,00054	0,00181	0,0014
		2	0,19	0,397	0,238	0,00829	0,0116	0,00663	0,00058	0,00181	0,00266
		3	0,222	0,444	0,238	0,00829	0,0116	0,00829	0,00078	0,00209	0,0013

Tablo 5.29. 3. doğrultu 15 kg yük etkisi ile alınan ölçüm sonuçları

Uzaklık (m)	Yük kg	Deney No	Tran. PPV	Ver. PPV	Long. PPV	Tran. İvme	Ver. İvme	Long. İvme	Tran. Depl.	Ver. Depl.	Long. Depl.
2	15	1	3,08	5,97	4,16	0,124	0,23	0,177	0,00871	0,0132	0,0212
		2	3,25	6,05	4,24	0,131	0,235	0,177	0,00908	0,0134	0,0223
		3	3,29	6,13	4,18	0,134	0,232	0,181	0,00936	0,0132	0,0219
4	15	1	1,3	3,57	2,83	0,0381	0,0696	0,0613	0,00525	0,0168	0,014
		2	1,3	3,68	2,92	0,0414	0,0713	0,0663	0,00536	0,0173	0,0143
		3	1,33	3,76	2,94	0,0431	0,0679	0,0663	0,0055	0,0175	0,0144
6	15	1	0,444	1,68	1,16	0,0249	0,053	0,0348	0,002	0,00553	0,00672
		2	0,46	1,75	1,16	0,0232	0,0563	0,0348	0,00189	0,00568	0,00675
		3	0,508	1,76	1,17	0,0249	0,058	0,0348	0,00198	0,00579	0,00669
8	15	1	0,238	0,635	0,937	0,0166	0,0249	0,0166	0,0008	0,00216	0,00489
		2	0,238	0,603	0,921	0,0133	0,0249	0,0182	0,00084	0,00224	0,00479
		3	0,254	0,651	0,921	0,0149	0,0232	0,0166	0,00082	0,00226	0,00474
10	15	1	0,206	0,492	0,492	0,00663	0,0149	0,0116	0,00106	0,00187	0,00233
		2	0,222	0,508	0,492	0,00663	0,0149	0,0116	0,00097	0,00174	0,00236
		3	0,206	0,524	0,508	0,00663	0,0149	0,0133	0,0009	0,00181	0,0024
12	15	1	0,238	0,556	0,317	0,00829	0,0149	0,00994	0,00072	0,00252	0,00166
		2	0,254	0,571	0,286	0,00994	0,0166	0,00829	0,00074	0,00267	0,00129
		3	0,238	0,587	0,317	0,00829	0,0149	0,00994	0,00074	0,00271	0,00152
14	15	1	0,286	0,302	0,397	0,00829	0,00994	0,0116	0,00105	0,00106	0,0025
		2	0,238	0,302	0,397	0,00829	0,00994	0,0116	0,00103	0,00106	0,00183
		3	0,238	0,317	0,365	0,00994	0,00994	0,0116	0,00109	0,00111	0,00199
16	15	1	0,0794	0,238	0,397	0,00497	0,00829	0,00994	0,00037	0,00094	0,00155
		2	0,0794	0,238	0,365	0,00497	0,00829	0,0116	0,00036	0,0009	0,00159
		3	0,0794	0,238	0,381	0,00497	0,00829	0,00994	0,00031	0,00095	0,0015
18	15	1	0,159	0,254	0,365	0,00663	0,00829	0,00994	0,00086	0,00098	0,00298
		2	0,159	0,286	0,349	0,00663	0,0116	0,00994	0,0009	0,00116	0,00165
		3	0,175	0,27	0,333	0,00497	0,00994	0,0133	0,00083	0,00113	0,00207

4. doğrultuda 10 ve 15 kg etki yükleri ile elde edilen pik parçacık hızı, pik ivme ve pik deplasman değerleri Tablo 5.30 ve Tablo 5.31’de verilmiştir. Bu doğrultu için 10 kg yük için 12 m ve 15 kg yük için 14 m’den sonra ölçüm alınamamıştır.

Tablo 5.30. 4. doğrultu 10 kg yük etkisi ile alınan ölçüm sonuçları

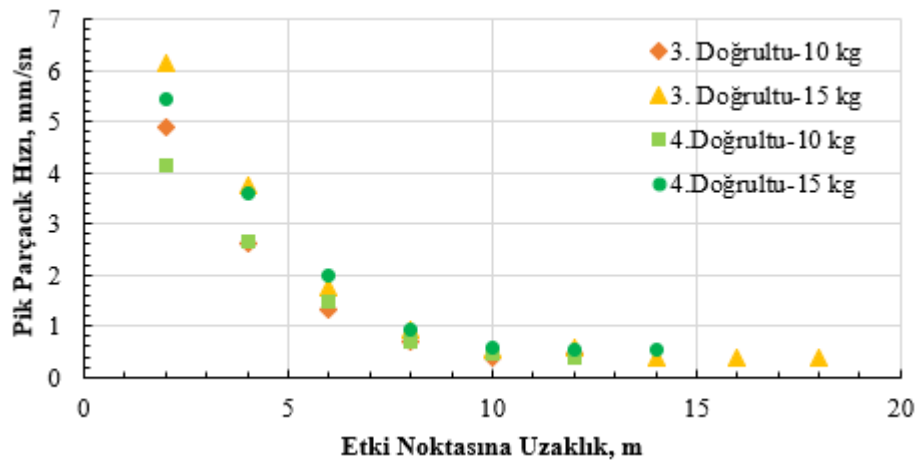
Uzaklık (m)	Yük kg	Deney No	Tran. PPV	Ver. PPV	Long. PPV	Tran. İvme	Ver. İvme	Long. İvme	Tran. Depl.	Ver. Depl.	Long. Depl.
2	10	1	1,41	3,32	3,56	0,0679	0,169	0,146	0,00406	0,0102	0,0141
		2	1,37	3,86	3,86	0,0812	0,167	0,151	0,00395	0,0101	0,0134
		3	1,38	4,13	4,06	0,0878	0,159	0,147	0,00424	0,0103	0,0134
4	10	1	1,16	0,81	2,41	0,053	0,0431	0,0729	0,00255	0,00185	0,00815
		2	1,16	1,1	2,54	0,0613	0,0547	0,0663	0,0026	0,00223	0,00768
		3	1,21	1,17	2,64	0,0646	0,058	0,0713	0,0025	0,0022	0,00781
6	10	1	0,349	0,667	1,38	0,0133	0,0249	0,0365	0,00126	0,00184	0,00543
		2	0,349	0,698	1,46	0,0149	0,0265	0,0365	0,00127	0,00196	0,00579
		3	0,349	0,683	1,49	0,0149	0,0249	0,0365	0,00136	0,00188	0,0057
8	10	1	0,444	0,429	0,683	0,0133	0,0199	0,0282	0,00168	0,00143	0,0036
		2	0,429	0,444	0,651	0,0133	0,0215	0,0298	0,0016	0,00156	0,00357
		3	0,413	0,429	0,651	0,0133	0,0249	0,0298	0,00184	0,00155	0,00357
10	10	1	0,175	0,302	0,476	0,00994	0,0116	0,0116	0,00042	0,00091	0,00203
		2	0,19	0,27	0,476	0,00829	0,0116	0,0149	0,00053	0,00107	0,00187
		3	0,206	0,27	0,46	0,00994	0,0116	0,0116	0,00047	0,00107	0,00223
12	10	1	0,19	0,365	0,349	0,00663	0,0133	0,00994	0,00107	0,0012	0,00173
		2	0,19	0,381	0,397	0,00663	0,0116	0,0116	0,00091	0,00137	0,00156
		3	0,19	0,365	0,381	0,00829	0,0116	0,0116	0,00074	0,00126	0,00146

Tablo 5.30 ve Tablo 5.31’de yer alan değerler incelendiğinde, pik parçacık hızı değerleri yük artışına bağlı olarak her noktada %30-40 oranında artış göstermiştir. Pik ivme değerleri ise yük artışı ile %20-40 oranında artmıştır.

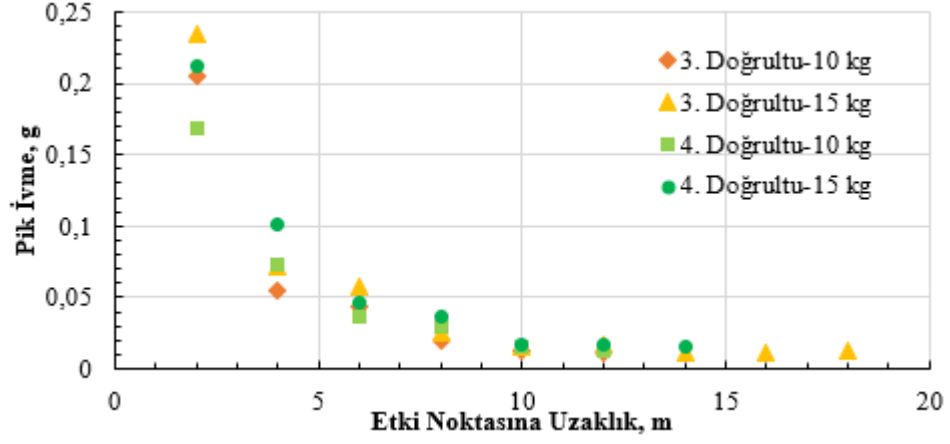
3. doğrultu ve 4. doğrultu birbirine paralel doğrultular olup iki doğrultu için elde edilen pik parçacık hızı ve pik ivme değerlerinin etki noktasına uzaklığa bağlı olarak değişimi sırasıyla Şekil 5.114 ve Şekil 5.115’te verilmiştir.

Tablo 5.31. 4. doğrultu 15 kg yük etkisi ile alınan ölçüm sonuçları

Uzaklık (m)	Yük kg	Deney No	Tran. PPV	Ver. PPV	Long. PPV	Tran. İvme	Ver. İvme	Long. İvme	Tran. Depl.	Ver. Depl.	Long. Depl.
2	10	1	1,84	5,62	5,4	0,106	0,205	0,192	0,00472	0,0139	0,018
		2	1,84	5,78	5,43	0,106	0,212	0,199	0,00491	0,0144	0,0185
4	10	1	1,56	1,4	3,48	0,0696	0,0729	0,0928	0,00349	0,00308	0,0108
		2	1,56	1,46	3,56	0,0762	0,0779	0,0945	0,00344	0,00319	0,0109
		3	1,62	1,54	3,59	0,0762	0,0779	0,101	0,00338	0,00315	0,0113
6	10	1	0,444	0,825	1,94	0,0182	0,0365	0,0464	0,00178	0,00262	0,00781
		2	0,444	0,81	1,98	0,0166	0,0348	0,0464	0,00181	0,00245	0,00815
		3	0,413	0,825	1,97	0,0182	0,0381	0,0464	0,00219	0,00254	0,00802
8	10	1	0,556	0,492	0,889	0,0182	0,0282	0,0331	0,0022	0,00187	0,00468
		2	0,571	0,492	0,937	0,0166	0,0265	0,0365	0,00226	0,00204	0,00508
		3	0,556	0,508	0,937	0,0166	0,0249	0,0331	0,00235	0,00197	0,00477
10	10	1	0,238	0,349	0,587	0,0116	0,0166	0,0149	0,00054	0,00137	0,0043
		1	0,238	0,381	0,524	0,00994	0,0133	0,0166	0,00078	0,00149	0,00185
12	10	2	0,175	0,397	0,524	0,00663	0,0116	0,0166	0,0007	0,00141	0,00217
		3	0,206	0,492	0,524	0,00829	0,0166	0,0133	0,00115	0,00172	0,00209
		1	0,206	0,508	0,492	0,0116	0,0149	0,0149	0,00119	0,00171	0,0021
14	10	2	0,222	0,524	0,492	0,00994	0,0149	0,0149	0,00129	0,00178	0,00209
		3	0,222	0,381	0,492	0,00663	0,0133	0,0149	0,00105	0,00152	0,00229

**Şekil 5.114.** 3. doğrultu ve 4. doğrultu için etki noktasından yatay uzaklığa bağlı olarak pik parçacık hızı ölçümleri

Şekil 5.114'te görüldüğü gibi pik parçacık hızı değerleri, 4 m ve sonraki uzaklıklarda uyumluluk mevcuttur. Şekil 5.115'te yer alan pik ivme değerleri, 6 m ve sonrası için tutarlı olmakla birlikte ivme değerleri 6 m'den itibaren %70-80 oranında azalarak 0,05g'nin altına düşmüştür.



Şekil 5.115. 3. doğrultu ve 4. doğrultu için etki noktasından yatay uzaklığa bağlı olarak pik ivme ölçümleri

5.3.4.2. Kan merkezi binası sahası

Selçuk Üniversitesi Kan Merkezi sahasında 2 doğrultuda 2,5 m aralıklarla ölçümler alınmıştır. Her ölçüm noktası için 10 kg ve 15 kg etki yükleri kullanılmıştır.

1. doğrultuda 10 ve 15 kg etki yükleri ile elde edilen pik parçacık hızı, pik ivme ve pik deplasman değerleri Tablo 5.32’de verilmiştir. Yük artışına bağlı olarak her noktadaki pik parçacık hızı %30-40 oranında artmıştır. İvme değerleri ise %20-40 oranında artmıştır. Bu doğrultuda 10 kg yük için 10 m ve 15 kg yük için 15 m’den sonra ölçüm alınamamıştır.

Tablo 5.32. 1. doğrultu 10 ve 15 kg yük etkisi ile alınan ölçüm sonuçları

Uzaklık (m)	Yük kg	Deney No	Tran. PPV	Ver. PPV	Long. PPV	Tran. İvme	Ver. İvme	Long. İvme	Tran. Depl.	Ver. Depl.	Long. Depl.
2,5	10	1	0,873	2,29	3,02	0,0265	0,0829	0,104	0,00261	0,00533	0,00808
		2	0,889	2,41	3,11	0,0282	0,0862	0,111	0,00269	0,00521	0,00808
		3	0,905	2,4	3,03	0,0315	0,0862	0,109	0,0026	0,00537	0,00812
5	10	1	0,556	0,603	1,54	0,0265	0,0249	0,0497	0,00154	0,00138	0,00459
		2	0,587	0,635	1,57	0,0249	0,0282	0,0547	0,00143	0,00143	0,00468
		3	0,603	0,603	1,6	0,0282	0,0265	0,0547	0,00146	0,00142	0,00457
7,5	10	1	0,476	0,429	1,03	0,0166	0,0133	0,0331	0,00127	0,0013	0,00325
		2	0,508	0,429	1,1	0,0182	0,0166	0,0365	0,00133	0,0106	0,00336
		3	0,492	0,429	1,1	0,0199	0,0149	0,0365	0,00135	0,00309	0,00329
10	10	1	0,175	0,683	0,365	0,00663	0,0182	0,0116	0,00053	0,00229	0,00127
		2	0,206	0,714	0,413	0,00663	0,0215	0,0116	0,00059	0,00243	0,00143
		3	0,206	0,73	0,397	0,00663	0,0199	0,0116	0,00057	0,0025	0,00145
2,5	15	1	1,11	3,43	3,95	0,0348	0,151	0,147	0,00305	0,00688	0,00995
		2	1,17	3,46	3,94	0,0365	0,151	0,144	0,00324	0,00656	0,0096
		3	1,16	3,46	3,83	0,0381	0,146	0,146	0,00326	0,00684	0,00967
5	15	1	0,794	0,905	2,17	0,0365	0,0431	0,0729	0,00184	0,00187	0,00624
		2	0,81	0,873	2,14	0,0365	0,0414	0,0729	0,00184	0,00194	0,00608
		3	0,825	0,905	2,16	0,0381	0,0414	0,0729	0,00178	0,00194	0,00598
7,5	15	1	0,619	0,587	1,44	0,0249	0,0182	0,0414	0,00153	0,00865	0,00445
		2	0,683	0,603	1,51	0,0249	0,0199	0,0447	0,00155	0,00774	0,0046
		3	0,683	0,603	1,52	0,0249	0,0215	0,0447	0,00157	0,00626	0,00476
10	15	1	0,286	0,952	0,54	0,00829	0,0265	0,0133	0,00073	0,00326	0,00184
		2	0,27	0,937	0,54	0,00829	0,0265	0,0166	0,00071	0,00736	0,00193
		3	0,254	0,937	0,556	0,00994	0,0282	0,0182	0,00067	0,00311	0,00185
12,5	15	1	0,175	0,238	0,381	0,00829	0,00829	0,0116	0,00049	0,00091	0,00136
		2	0,175	0,238	0,365	0,00829	0,00994	0,0116	0,00057	0,00308	0,00122
		3	0,206	0,254	0,365	0,00829	0,00829	0,0116	0,00063	0,00574	0,00121
15	15	1	0,143	0,286	0,333	0,00663	0,00994	0,00994	0,0005	0,00082	0,00117
		2	0,111	0,286	0,365	0,00663	0,00829	0,00994	0,00039	0,00077	0,00122
		3	0,143	0,302	0,333	0,00663	0,00829	0,0116	0,00048	0,012	0,00107

2. doğrultuda 10 ve 15 kg etki yükleri ile elde edilen pik parçacık hızı, pik ivme ve pik deplasman değerleri Tablo 5.33 ve Tablo 5.34’te verilmiştir.

Tablo 5.33. 2. doğrultu 10 kg yük etkisi ile alınan ölçüm sonuçları

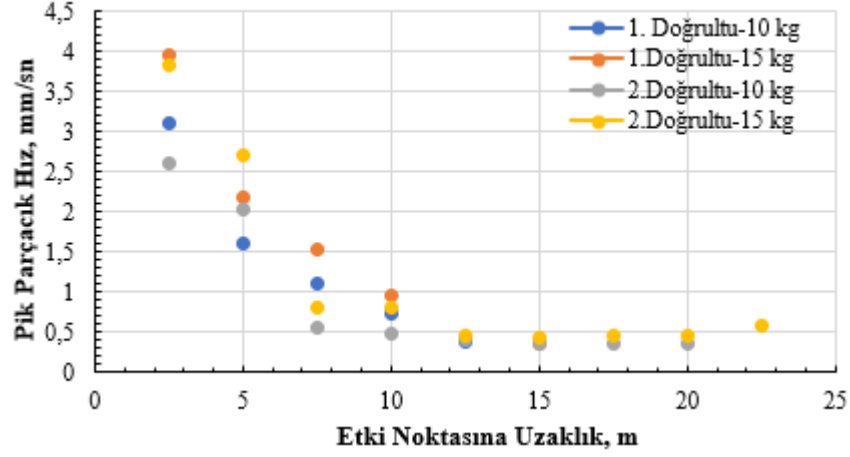
Uzaklık (m)	Yük kg	Deney No	Tran. PPV	Ver. PPV	Long. PPV	Tran. İvme	Ver. İvme	Long. İvme	Tran. Depl.	Ver. Depl.	Long. Depl.
2,5	10	1	0,857	1,84	2,52	0,0348	0,0729	0,108	0,00231	0,00584	0,00653
		2	0,889	1,9	2,52	0,0348	0,0812	0,108	0,00234	0,00586	0,00626
		3	0,889	1,86	2,6	0,0365	0,0795	0,109	0,00224	0,00612	0,00635
5	10	1	0,492	0,603	2	0,0166	0,0265	0,0646	0,00162	0,00268	0,00636
		2	0,587	0,714	2,02	0,0199	0,0265	0,0646	0,00185	0,00496	0,00671
		3	0,587	0,698	2,03	0,0199	0,0265	0,0663	0,00172	0,00265	0,00657
7,5	10	1	0,254	0,444	0,556	0,0116	0,0149	0,0215	0,00091	0,00124	0,00244
		2	0,27	0,46	0,556	0,0133	0,0149	0,0199	0,00095	0,00512	0,00243
		3	0,27	0,46	0,556	0,0133	0,0166	0,0199	0,00099	0,00492	0,00243
10	10	1	0,302	0,302	0,476	0,00994	0,0116	0,0182	0,00119	0,00126	0,0013
		2	0,27	0,317	0,492	0,00994	0,0149	0,0199	0,00124	0,00282	0,00126
		3	0,27	0,333	0,492	0,00994	0,0149	0,0199	0,0012	0,00635	0,0013
12,5	10	1	0,206	0,286	0,397	0,00829	0,0133	0,0116	0,00059	0,001	0,00147
		2	0,222	0,317	0,349	0,00829	0,0116	0,0133	0,00057	0,00304	0,00137
		3	0,222	0,317	0,381	0,00994	0,00994	0,0133	0,00067	0,001	0,00146
15	10	1	0,175	0,254	0,365	0,00829	0,00829	0,0116	0,00067	0,00103	0,00136
		2	0,206	0,254	0,365	0,00829	0,00663	0,00994	0,00062	0,00148	0,00136
		3	0,19	0,254	0,349	0,00829	0,00994	0,00994	0,00067	0,00112	0,00129
17,5	10	1	0,206	0,19	0,349	0,00663	0,00663	0,00994	0,00075	0,00088	0,00151
		2	0,222	0,222	0,333	0,00829	0,00829	0,00994	0,0008	0,00095	0,0015
		3	0,206	0,238	0,333	0,00663	0,00829	0,00829	0,00079	0,00319	0,00147
20	10	1	0,27	0,175	0,349	0,00829	0,00663	0,0116	0,00116	0,00076	0,00126
		2	0,302	0,175	0,365	0,00829	0,00829	0,0133	0,00108	0,00082	0,00132
		3	0,286	0,19	0,349	0,00829	0,00829	0,0116	0,00105	0,0088	0,00127

2. doğrultu için, yük artışına bağlı olarak her noktadaki pik parçacık hızı %30-40 oranında artmıştır. İvme değerleri ise %20-40 oranında artmıştır. Bu doğrultuda 10 kg yük için 10 m ve 15 kg yük için 15 m'den sonra ölçüm alınamamıştır. Yük artışına bağlı olarak pik parçacık hızı farklı ölçüm noktalarında %20-60 oranında artmıştır. Pik ivme değerleri ise farklı ölçüm noktalarında %30-60 oranında artmıştır.

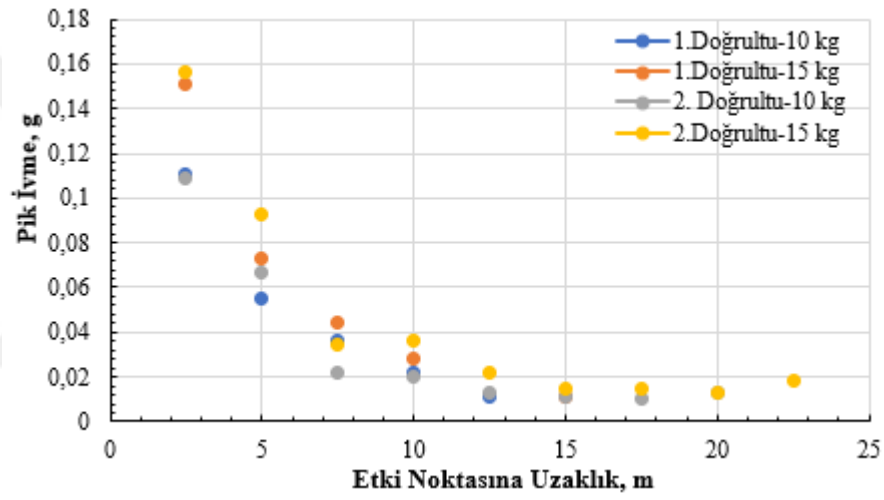
Tablo 5.34. 2. doğrultu 15 kg yük etkisi ile alınan ölçüm sonuçları

Uzaklık (m)	Yük kg	Deney No	Tran. PPV	Ver. PPV	Long. PPV	Tran. İvme	Ver. İvme	Long. İvme	Tran. Depl.	Ver. Depl.	Long. Depl.
2,5	15	1	1,24	2,38	3,79	0,0613	0,134	0,152	0,00306	0,00811	0,0083
		2	1,25	2,37	3,83	0,0597	0,136	0,156	0,0031	0,00996	0,00889
		3	1,22	2,4	3,76	0,0563	0,129	0,152	0,00311	0,00823	0,00831
5	15	1	0,825	1,06	2,71	0,0265	0,0497	0,0928	0,00239	0,00233	0,00839
		2	0,825	1,08	2,64	0,0265	0,0464	0,0878	0,00237	0,00222	0,0083
		3	0,873	1,16	2,65	0,0282	0,0481	0,0862	0,00247	0,00636	0,00795
7,5	15	1	0,365	0,667	0,81	0,0182	0,0232	0,0331	0,00126	0,00514	0,00313
		2	0,381	0,683	0,794	0,0182	0,0199	0,0348	0,00126	0,0065	0,00311
		3	0,349	0,667	0,794	0,0199	0,0215	0,0331	0,00135	0,0132	0,00309
10	15	1	0,365	0,476	0,762	0,0133	0,0249	0,0331	0,0015	0,0019	0,00175
		2	0,349	0,444	0,778	0,0116	0,0265	0,0365	0,00148	0,00204	0,00177
		3	0,397	0,508	0,794	0,0133	0,0249	0,0365	0,0015	0,00178	0,00183
12,5	15	1	0,333	0,444	0,46	0,0166	0,0215	0,0149	0,00074	0,00124	0,00183
		2	0,302	0,444	0,46	0,0133	0,0199	0,0149	0,00074	0,00142	0,00175
		3	0,317	0,444	0,46	0,0133	0,0199	0,0149	0,00071	0,00136	0,00181
15	15	1	0,238	0,317	0,429	0,00994	0,0149	0,0116	0,00087	0,00124	0,00169
		2	0,254	0,349	0,429	0,00994	0,0133	0,0116	0,00095	0,00146	0,00164
		3	0,238	0,333	0,429	0,00994	0,0133	0,0166	0,00093	0,00123	0,00163
17,5	15	1	0,254	0,349	0,429	0,00829	0,0133	0,0116	0,00112	0,00084	0,00173
		2	0,27	0,349	0,429	0,00994	0,0149	0,0116	0,00102	0,00137	0,00169
		3	0,254	0,333	0,444	0,00829	0,0133	0,0133	0,00098	0,00129	0,0018
20	15	1	0,27	0,159	0,46	0,00829	0,00663	0,0133	0,00088	0,0012	0,00257
		2	0,254	0,159	0,46	0,00829	0,00663	0,0133	0,00078	0,00062	0,00187
		1	0,302	0,19	0,556	0,00994	0,00829	0,0166	0,00108	0,00282	0,00243
22,5	15	2	0,27	0,19	0,54	0,00829	0,00663	0,0166	0,00095	0,00149	0,00236
		3	0,286	0,206	0,571	0,00994	0,00829	0,0182	0,001	0,00087	0,00229

Şekil 5.116 ve Şekil 5.117’de sırasıyla iki doğrultuda ölçülen pik parçacık hızı ve pik ivmenin etki noktasına uzaklığa bağlı olarak değişim grafikleri verilmiştir. Şekil 5.117’de yer alan ivme grafiğinde görüldüğü gibi, ivme değerleri 7,5 m’den sonra yaklaşık %80 oranında azalmış ve 0,05g’nin altına düşmüştür.



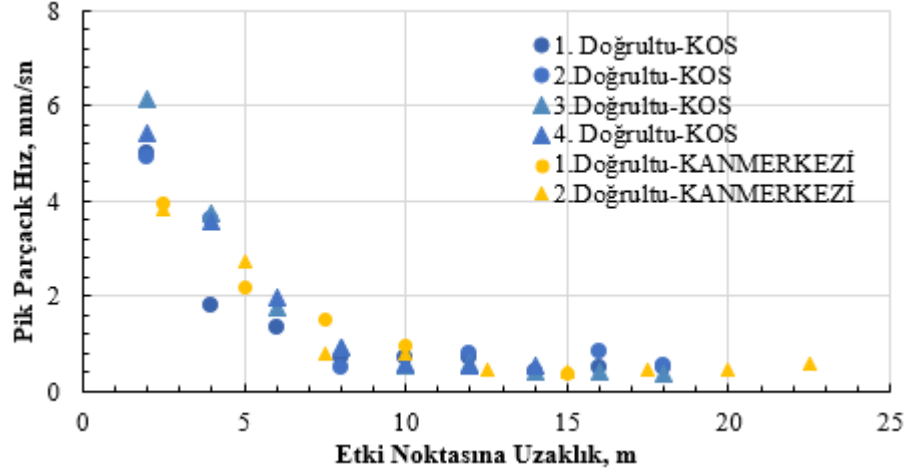
Şekil 5.116. 1. doğrultu ve 2. doğrultu için etki noktasından yatay uzaklığa bağlı olarak pik parçacık hızı ölçümleri



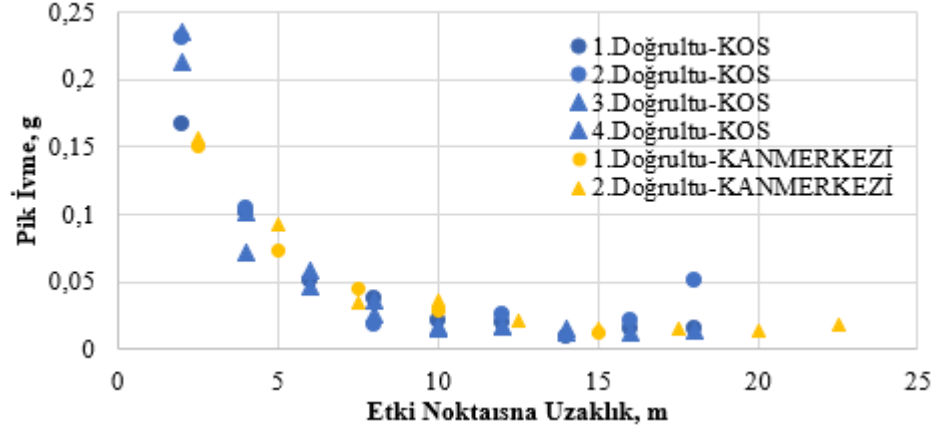
Şekil 5.117. 1. doğrultu ve 2. doğrultu için etki noktasından yatay uzaklığa bağlı olarak pik ivme ölçümleri

KOS Atıksu Arıtma Tesisi sahası ve Selçuk Üniversitesi Kan Merkezi binası bölgesinde yapılan Instantel Minimate Plus ölçümleri toplu olarak Şekil 5.118 ve Şekil 5.119’da verilmiştir. Zemin profili olarak ele alındığında KOS Atıksu Arıtma Tesisinin saha zemini, Selçuk Üniversitesi Kan Merkezi binası saha zemininden oldukça yumuşak zemin tabakalarından oluşmaktadır.

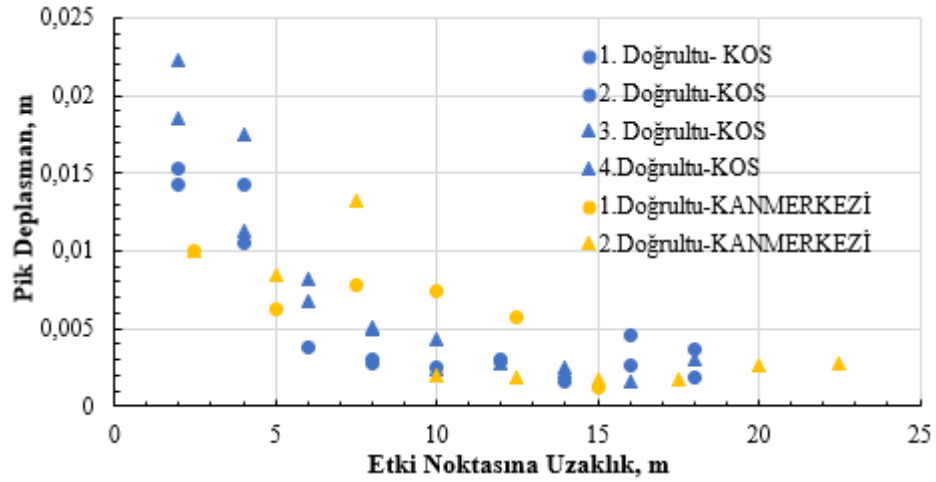
Şekil 5.118, Şekil 5.119 ve Şekil 5.120’de görüldüğü gibi, yumuşak zeminde daha büyük hız, ivme ve deplasman değerleri meydana gelmekle birlikte, bu etkiler daha kısa bir yatay mesafede sönümlenmiştir. Ancak sert zemin içerisinde oluşan hız, ivme ve deplasmanların daha küçük olmasına rağmen daha uzak mesafelere yayılarak sönümlenmiştir.



Şekil 5.118. KOS Atıksu Arıtma Tesisi ve Kan Merkezi bölgelerinde elde edilen pik parçacık hızı ölçümlerinin karşılaştırması



Şekil 5.119. KOS Atıksu Arıtma Tesisi ve Kan Merkezi bölgelerinde elde edilen pik ivme ölçümlerinin karşılaştırması



Şekil 5.120. KOS Atıksu Arıtma Tesisi ve Kan Merkezi bölgelerinde elde edilen pik deplasman ölçümlerinin karşılaştırması

Buna göre, yumuşak kil zemin profiline sahip bir bölgede çalışan darbe etkili makinenin, zemin içerisinde oluşturduğu etkinin büyük olduğu, ancak bu etkinin etki noktasından daha kısa bir mesafede sönümleneceği, aksine sert kıvamlı zeminde oluşan etkinin daha küçük olduğu, ancak bu etkinin daha uzun mesafede sönümleneceği belirlenmiştir.

5.4. Sonlu Elemanlar Programı (PLAXIS 2D) ile Elde Edilen Sonuçların Değerlendirilmesi

PLAXIS 2D sonlu elemanlar programı, harmonik yük oluşturan makinelerin zeminin sertliğine bağlı olarak zemin davranışını belirlemek için kullanılmıştır. Bu amaçla FMC fabrika saha zemin profili ve KOS Atıksu Arıtma Tesisi saha zemin profili, bu saha zeminlerinde yapılan arazi ve laboratuvar deneylerinden elde edilen dinamik zemin parametreleri kullanılarak Hardening Soil Model zemin bünye modeli ile ayrı ayrı modellenmiştir. Zemin tabakalarının elastisite modülleri, laboratuvar ve arazi deneyleri ile belirlenen kayma modülleri göz önünde bulundurularak belirlenmiştir. FMC fabrika sahası için, analizlerde harmonik yük üreten makinenin frekans ve genliği değiştirilerek, makine temelinin deplasmanları göz önünde bulundurularak en uygun temel boyutları ve gömme derinliği belirlenmiştir. En uygun temel boyutları ve temel gömme derinliği kullanılarak oluşturulan makine-temel-zemin sistemi için makine çalışma frekansı ve genliğinin değişimi ile oluşan dinamik etkinin, zemin davranışına etkisi araştırılmıştır.

FMC fabrika sahası için belirlenen temel boyutları ve temel gömme derinliği diğer modeller için aynı bırakılmıştır. Böylece zemin profilinin değişimine bağlı olarak, makinenin oluşturduğu dinamik etkinin, zemin özelliklerine bağlı olarak zemin içerisindeki etkisi araştırılmıştır.

Zemin tabaka rijitliklerinin ve tabakalanma durumunun etkisini daha detaylı araştırmak için, yumuşak, orta sert ve sert kil zemin tabakaları ile farklı kombinasyonlarda zemin profilleri oluşturulmuştur. Makinenin oluşturduğu dinamik etkinin, zemin profiline bağlı olarak zemin davranışına etkisi araştırılmıştır.

5.4.1. FMC fabrika sahasının modellenmesi ile elde edilen sonuçların değerlendirilmesi

FMC fabrika sahası için makine-temel-zemin sisteminin modellenmesinde, ilk olarak rezonant kolon deney sonuçlarından elde edilen kayma modülü ile hesaplanan elastisite modülü değerleri kullanılarak Hardening Soil Model bünye modeli ile zemin modeli oluşturulmuştur.

Zemin profili dört tabaka olarak oluşturulmuştur. 0-6 m arası katı kil tabakası olarak, 6-12 m arası yumuşak tabakası olarak, 12-15 m arası kumlu zemin tabakası ve 15-21 m arası çok yumuşak kil tabakası olarak modellenmiştir.

Öncelikli olarak harmonik yük üreten makineler için önerilen geniş taban alanlı blok temel ile modellemeye başlanılmıştır. Temel genişliği 6 m, kalınlığı 0,5 m seçilmiştir. Temel ağırlığı ile makine ağırlığı arasındaki oran literatüre göre 2,1 olarak seçilmiştir. Makine çalışma frekansı 5, 10, 20, 30, 40 ve 50 Hz., çalışma genliği ise 25, 45, 65, 85 ve 100 kPa olarak değiştirilmiştir. Öncelikli olarak temel gömme derinliği 0 olarak seçilmiş ve temel zemin yüzeyine yerleştirilmiştir.

Bu temel boyutları kullanılarak yapılan analizler ile elde edilen temel deplasmanları Tablo 5.35'te verilmiştir. Burada görüldüğü gibi, makine çalışma frekansı ve genliği büyüdükçe temel deplasmanları artmış ve temel boyutlarının ve gömme derinliğinin yetersiz olduğu belirlenmiştir.

Tablo 5.35. B=6 m, d=0,5 m ve temel zemin yüzeyinde durumu için temel deplasmanları

$W_{\text{temel}}/W_{\text{makine}}=2,1$					Deplasman (m)	
B (m)	Df (m)	d (m)	f (Hz)	A (kPa)	Temel Orta Noktası	Temel Köşe Noktası
6	0	0,50	5	25	0,00096720	0,00085020
6	0	0,50	5	45	0,00180200	0,00157100
6	0	0,50	5	65	0,00268900	0,00235000
6	0	0,50	5	85	0,00364700	0,00320600
6	0	0,50	5	100	0,00441300	0,00389700
6	0	0,50	10	25	0,00096830	0,00084520
6	0	0,50	20	25	1,37300000	1,01300000

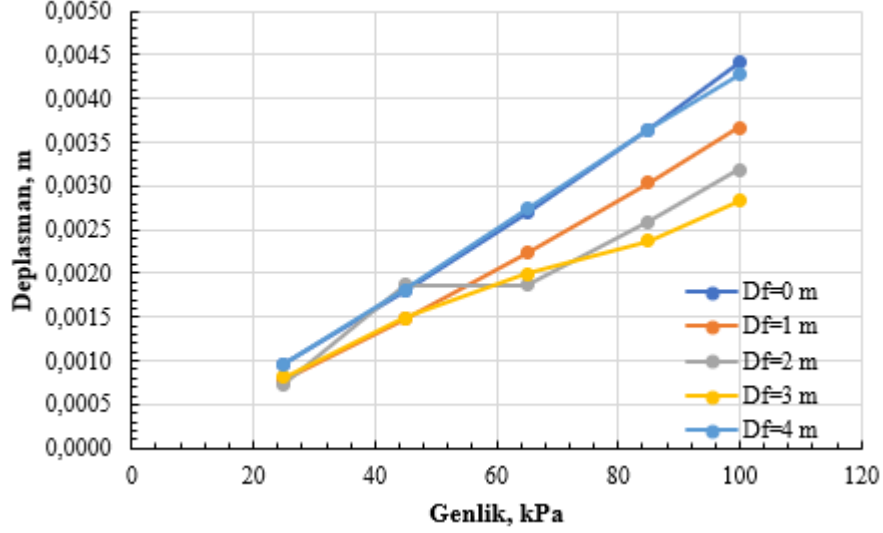
Sonraki aşamada, temel boyutları değiştirilmeden, temel gömme derinliği 1 m seçilerek analizler gerçekleştirilmiş ve analiz sonucunda elde edilen deplasmanlar Tablo

5.36’te verilmiştir. Tablo değerleri incelendiğinde en büyük deplasmanların 5 Hz. makine çalışma frekansında meydana geldiği belirlenmiştir. 5 Hz. çalışma frekansı için ise en büyük deplasman 100 kPa çalışma genliğinde meydana gelmiştir. Bunun nedeni, makine-temel-zemin sisteminin hâkim frekansının 5 Hz.e daha yakın olmasına bağlanabilir.

Şekil 5.121’de en büyük deplasmanların meydana geldiği 5 Hz. makine çalışma frekansı için gömme derinliğine bağlı olarak temel orta noktasında meydana gelen deplasmanlar verilmiştir. Bu şekilde görüldüğü gibi 5 Hz. makine çalışma frekansı için en küçük temel orta noktası deplasmanları, 3 m gömme derinliği için elde edilmiştir. Diğer makine çalışma frekansı ve genliği için yapılan analizlerde, 2 m gömme derinliği için deplasmanlar en küçüktür. Gömme derinliğinin 3 m’yi aşması durumunda, makine temeli, zemin profilinde yer alan yumuşak zemin tabakasına yaklaşmakta ve etkili gerilme derinliği bu tabaka içerisine daha fazla girmektedir. Bu nedenle, makine temeli deplasmanları artmıştır. Analizler sonucunda, 6 m temel genişliği ve 0,5 m temel kalınlığı için en uygun temel gömme derinliği 2 m olarak belirlenmiştir. Diğer makine çalışma frekansları için gömme derinliğine bağlı olarak temel orta noktası deplasmanları grafikleri EK-3’te verilmiştir.

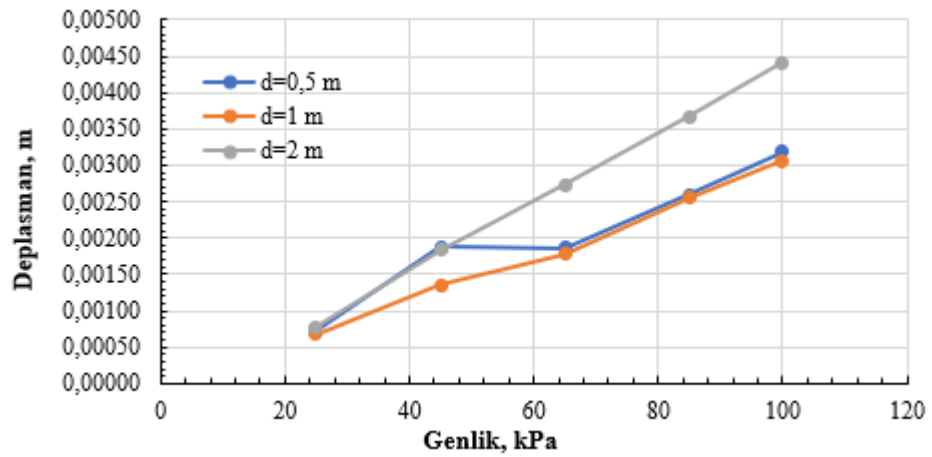
Tablo 5.36. B=6 m, d=0,5 m için gömme derinliğine bağlı olarak temel deplasmanları

W _{temel} /W _{makine} =2,1				Deplasman (m)			Deplasman (m)			Deplasman (m)			Deplasman (m)	
B (m)	Df (m)	f (Hz)	A (kPa)	Temel Orta Noktası	Temel Köşe Noktası	Df (m)	Temel Orta Noktası	Temel Köşe Noktası	Df (m)	Temel Orta Noktası	Temel Köşe Noktası	Df (m)	Temel Orta Noktası	Temel Köşe Noktası
6	1	5	25	0,00078	0,00071	2	0,00073	0,00061	3	0,00081	0,00060	4	0,00096	0,00063
6	1	5	45	0,00148	0,00133	2	0,00187	0,00110	3	0,00149	0,00109	4	0,00181	0,00113
6	1	5	65	0,00223	0,00199	2	0,00187	0,00172	3	0,00199	0,00162	4	0,00274	0,00164
6	1	5	85	0,00303	0,00268	2	0,00259	0,00239	3	0,00237	0,00223	4	0,00364	0,00217
6	1	5	100	0,00366	0,00322	2	0,00319	0,00290	3	0,00282	0,00271	4	0,00428	0,00260
6	1	10	25	0,00044	0,00039	2	0,00049	0,00037	3	0,00056	0,00038	4	0,00070	0,00043
6	1	10	45	0,00083	0,00075	2	0,00080	0,00065	3	0,00102	0,00069	4	0,00130	0,00083
6	1	10	65	0,00126	0,00112	2	0,00106	0,00097	3	0,00148	0,00102	4	0,00204	0,00129
6	1	10	85	0,00170	0,00150	2	0,00145	0,00131	3	0,00185	0,00136	4	0,00290	0,00181
6	1	10	100	0,00204	0,00178	2	0,00176	0,00157	3	0,00207	0,00162	4	0,00364	0,00224
6	1	20	25	0,00022	0,00017	2	0,00025	0,00018	3	0,00032	0,00021	4	0,00055	0,00042
6	1	20	45	0,00041	0,00034	2	0,00043	0,00032	3	0,00059	0,00038	4	0,00108	0,00082
6	1	20	65	0,00062	0,00051	2	0,00056	0,00047	3	0,00086	0,00056	4	0,00157	0,00114
6	1	20	85	0,00084	0,00068	2	0,00069	0,00063	3	0,00115	0,00075	4	0,00208	0,00145
6	1	20	100	0,00102	0,00081	2	0,00083	0,00074	3	0,00137	0,00091	4	0,00246	0,00167
6	1	30	25	0,00014	0,00012	2	0,00015	0,00011	3	0,00020	0,00013	4	0,00029	0,00018
6	1	30	45	0,00028	0,00023	2	0,00027	0,00020	3	0,00036	0,00023	4	0,00052	0,00032
6	1	30	65	0,00042	0,00035	2	0,00037	0,00029	3	0,00054	0,00033	4	0,00079	0,00048
6	1	30	85	0,00060	0,00045	2	0,00045	0,00037	3	0,00070	0,00044	4	0,00107	0,00066
6	1	30	100	0,00186	0,00142	2	0,00051	0,00044	3	0,00086	0,00052	4	0,00130	0,00081
6	1	40	25	0,00010	0,00008	2	0,00012	0,00007	3	0,00013	0,00009	4	0,00018	0,00012
6	1	40	45	0,00020	0,00015	2	0,00021	0,00013	3	0,00024	0,00016	4	0,00031	0,00021
6	1	40	65	0,00049	0,00401	2	0,00029	0,00018	3	0,00034	0,00023	4	0,00044	0,00030
6	1	40	85	0,00864	0,00750	2	0,00037	0,00032	3	0,00045	0,00030	4	0,00058	0,00040
6	1	40	100	0,00750	0,00797	2	0,00042	0,00029	3	0,00053	0,00035	4	0,00069	0,00047
6	1	50	25	0,00008	0,00006	2	0,00008	0,00006	3	0,00009	0,00007	4	0,00013	0,00010
6	1	50	45	0,00015	0,00010	2	0,00015	0,00011	3	0,00017	0,00012	4	0,00022	0,00015
6	1	50	65	0,00238	0,00243	2	0,00021	0,00015	3	0,00024	0,00017	4	0,00031	0,00021
6	1	50	85	0,00378	0,00374	2	0,00027	0,00020	3	0,00031	0,00022	4	0,00041	0,00028
6	1	50	100	0,00446	0,00531	2	0,00030	0,00023	3	0,00037	0,00027	4	0,00048	0,00033



Şekil 5.121. B=6 m, d=0,5 m temel boyutları ve 5 Hz. makine çalışma frekansı için gömme derinliğine bağlı olarak temel orta noktası deplasmanları

Temel kalınlığının etkisini araştırmak için öncelikli olarak, 6 m temel genişliği için makine ağırlığı değiştirilmeden temel kalınlığı değiştirilerek analizler yapılmıştır. Tablo 5.37’de analiz sonuçları toplu olarak verilmiş olup, tüm temel kalınlıkları için en büyük deplasmanlar 5 Hz. makine çalışma frekansında meydana gelmiştir. Şekil 5.122’de 5 Hz. makine çalışma frekansı için temel kalınlığına bağlı olarak temel deplasmanlarının değişimi verilmiştir. Burada görüldüğü gibi, en küçük deplasmanların meydana geldiği 1 m temel kalınlığı, en uygun temel kalınlığı olarak belirlenmiştir. Diğer makine çalışma frekansları için elde edilen grafikler EK-3’te verilmiştir.



Şekil 5.122. 5 Hz. makine çalışma frekansı için temel kalınlığına bağlı olarak temel orta noktası deplasmanları

Tablo 5.37. B=6 m, D_f=2 m için temel kalınlığına bağlı olarak temel deplasmanları

B (m)	D _f (m)	d (m)	f (Hz)	A (kPa)	Temel Orta Noktası	Temel Köşe Noktası	d (m)	Temel Orta Noktası	Temel Köşe Noktası	d (m)	Temel Orta Noktası	Temel Köşe Noktası
W _{makine} =5,71 kPa					Deplasman (m)		Deplasman (m)		Deplasman (m)		Deplasman (m)	
6	2	0,5	5	25	0,00073	0,00061	1	0,00067	0,00065	2	0,00078	0,00065
6	2	0,5	5	45	0,00187	0,00110	1	0,00135	0,00128	2	0,00184	0,00168
6	2	0,5	5	65	0,00187	0,00172	1	0,00178	0,00195	2	0,00273	0,00246
6	2	0,5	5	85	0,00259	0,00239	1	0,00255	0,00263	2	0,00367	0,00334
6	2	0,5	5	100	0,00319	0,00290	1	0,00307	0,00315	2	0,00441	0,00385
6	2	0,5	10	25	0,00049	0,00037	1	0,00038	0,00037			
6	2	0,5	10	45	0,00080	0,00065	1	0,00073	0,00070			
6	2	0,5	10	65	0,00106	0,00097	1	0,00110	0,00105			
6	2	0,5	10	85	0,00145	0,00131	1	0,00150	0,00141			
6	2	0,5	10	100	0,00176	0,00157	1	0,00180	0,00167			
6	2	0,5	20	25	0,00025	0,00018	1	0,00017	0,00017	2	0,00024	0,00025
6	2	0,5	20	45	0,00043	0,00032	1	0,00033	0,00033		0,00045	0,00042
6	2	0,5	20	65	0,00056	0,00047	1	0,00049	0,00049	2	0,00066	0,00064
6	2	0,5	20	85	0,00069	0,00063	1	0,00065	0,00064		0,00087	0,00083
6	2	0,5	20	100	0,00083	0,00074	1	0,00078	0,00075	2	0,00104	0,00096
6	2	0,5	30	25	0,00015	0,00011	1	0,00011	0,00012			
6	2	0,5	30	45	0,00027	0,00020	1	0,00020	0,00021			
6	2	0,5	30	65	0,00037	0,00029	1	0,00030	0,00031			
6	2	0,5	30	85	0,00045	0,00037	1	0,00041	0,00042			
6	2	0,5	30	100	0,00051	0,00044	1	0,00049	0,00050			
6	2	0,5	40	25	0,00012	0,00007	1	0,00008	0,00007			
6	2	0,5	40	45	0,00021	0,00013	1	0,00014	0,00012			
6	2	0,5	40	65	0,00029	0,00018	1	0,00020	0,00018			
6	2	0,5	40	85	0,00037	0,00032	1	0,00028	0,00025			
6	2	0,5	40	100	0,00042	0,00029	1	0,00034	0,00029			
6	2	0,5	50	25	0,00008	0,00006	1	0,00006	0,00006	2	0,00008	0,00009
6	2	0,5	50	45	0,00015	0,00011	1	0,00011	0,00011		0,00015	0,00014
6	2	0,5	50	65	0,00021	0,00015	1	0,00015	0,00017	2	0,00022	0,00023
6	2	0,5	50	85	0,00027	0,00020	1	0,00021	0,00023		0,00029	0,00028
6	2	0,5	50	100	0,00030	0,00023	1	0,00026	0,00027	2	0,00035	0,00033

Temel ağırlığı ile makine ağırlığı arasındaki oranı korumak için 1 m temel kalınlığı için, temel ağırlığı/makine ağırlığı 2,1 alınarak analizler yapılmıştır. Analiz sonuçları Tablo 5.38’de verilmiştir. Makine ağırlığındaki artışa bağlı olarak temel deplasmanlarında bir miktar artış meydana gelmiştir.

Tablo 5.38. B=6 m, D_f=2 m d=1 m için temel/makine ağırlığına bağlı olarak temel deplasmanları

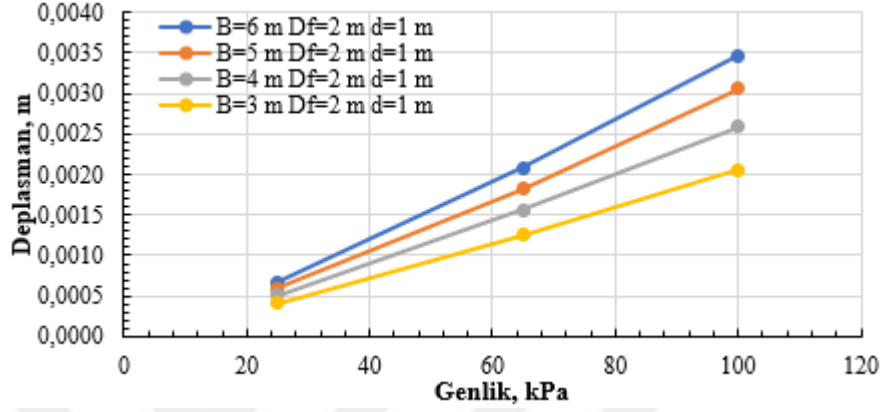
B (m)	D _f (m)	d (m)	f (Hz)	A (kPa)	Temel Orta Noktası	Temel Köşe Noktası	d (m)	Temel Orta Noktası	Temel Köşe Noktası
w _{makine} =5,71 kPa				Deplasman (m)		w _{makine} =11,43 kPa		Deplasman (m)	
6	2	1	5	25	0,00067	0,00065	1	0,00077	0,00074
6	2	1	5	45	0,00135	0,00128	1	0,00148	0,00140
6	2	1	5	65	0,00178	0,00195	1	0,00223	0,00207
6	2	1	5	85	0,00255	0,00263	1	0,00302	0,00279
6	2	1	5	100	0,00307	0,00315	1	0,00365	0,00334
6	2	1	10	25	0,00038	0,00037	1	0,00042	0,00042
6	2	1	10	45	0,00073	0,00070	1	0,00078	0,00081
6	2	1	10	65	0,00110	0,00105	1	0,00117	0,00119
6	2	1	10	85	0,00150	0,00141	1	0,00157	0,00157
6	2	1	10	100	0,00180	0,00167	1	0,00189	0,00188
6	2	1	20	25	0,00017	0,00017	1	0,00018	0,00019
6	2	1	20	45	0,00033	0,00033	1	0,00034	0,00037
6	2	1	20	65	0,00049	0,00049	1	0,00052	0,00054
6	2	1	20	85	0,00065	0,00064	1	0,00072	0,00071
6	2	1	20	100	0,00078	0,00075	1	0,00087	0,00084
6	2	1	30	25	0,00011	0,00012	1	0,00011	0,00013
6	2	1	30	45	0,00020	0,00021	1	0,00022	0,00025
6	2	1	30	65	0,00030	0,00031	1	0,00034	0,00038
6	2	1	30	85	0,00041	0,00042	1	0,00046	0,00052
6	2	1	30	100	0,00049	0,00050	1	0,00056	0,00061
6	2	1	40	25	0,00008	0,00007	1	0,00008	0,00007
6	2	1	40	45	0,00014	0,00012	1	0,00016	0,00014
6	2	1	40	65	0,00020	0,00018	1	0,00024	0,00022
6	2	1	40	85	0,00028	0,00025	1	0,00033	0,00030
6	2	1	40	100	0,00034	0,00029	1	0,00039	0,00036
6	2	1	50	25	0,00006	0,00006	1	0,00006	0,00007
6	2	1	50	45	0,00011	0,00011	1	0,00012	0,00013
6	2	1	50	65	0,00015	0,00017	1	0,00018	0,00019
6	2	1	50	85	0,00021	0,00023	1	0,00025	0,00026
6	2	1	50	100	0,00026	0,00027	1	0,00030	0,00031

Harmonik yük üreten makineler için, temel genişliğinin etkisini belirlemek için temel genişliği değiştirilerek analizler yapılmıştır. Bu aşamada temel ağırlığı/makine ağırlığı oranı 2,1 olarak alınmıştır. Ayrıca analiz süreleri çok uzun olduğu için tüm frekans ve genlik değerleri analizlerde kullanılmamıştır. Tablo 5.39’da analiz sonuçları toplu olarak sunulmuştur.

Tablo 5.39. $D_f=2$ ve 3 m $d=1$ ve 2 m için makine ağırlığı değiştirilmeden elde edilen temel deplasmanları

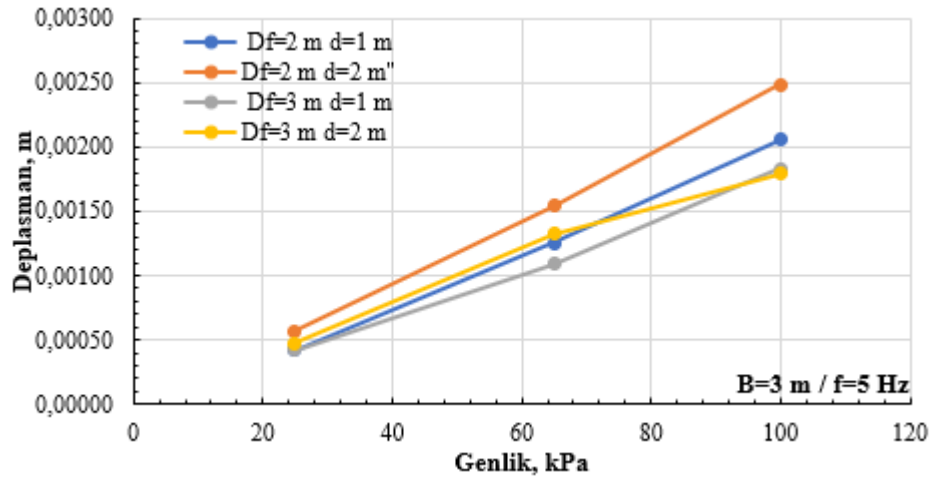
B m	Df m	d m	f Hz	A kPa	Temel Orta Noktası	Temel Köşe Noktası	d m	Temel Orta Noktası	Temel Köşe Noktası	Df m	d m	Temel Orta Noktası	Temel Köşe Noktası	d m	Temel Orta Noktası	Temel Köşe Noktası
6	2	1	5	25	0,00067	0,00065	2	0,00078	0,00065	3	1	0,00074	0,00061	2	0,00076	0,00077
6	2	1	5	65	0,00208	0,00195	2	0,00273	0,00246	3	1	0,00183	0,00182	2	0,00218	0,00224
6	2	1	5	100	0,00347	0,00315	2	0,00441	0,00385	3	1	0,00312	0,00299	2	0,00357	0,00352
6	2	1	20	25	0,00017	0,00017	2	0,00024	0,00025	3	1	0,00022	0,00021	2	0,00017	0,00025
6	2	1	20	65	0,00049	0,00049	2	0,00066	0,00064	3	1	0,00057	0,00056	2	0,00045	0,00073
6	2	1	20	100	0,00078	0,00075	2	0,00104	0,00096	3	1	0,00077	0,00093	2	0,00074	0,00113
6	2	1	50	25	0,00006	0,00006	2	0,00008	0,00009	3	1	0,00007	0,00008	2	0,00005	0,00007
6	2	1	50	65	0,00015	0,00017	2	0,00022	0,00023	3	1	0,00019	0,00019	2	0,00014	0,00020
6	2	1	50	100	0,00026	0,00027	2	0,00035	0,00033	3	1	0,00029	0,00030	2	0,00024	0,00033
5	2	1	5	25	0,00060	0,00058	2	0,00087	0,00083	3	1	0,00066	0,00055	2	0,00065	0,00055
5	2	1	5	65	0,00182	0,00176	2	0,00239	0,00221	3	1	0,00155	0,00157	2	0,00154	0,00157
5	2	1	5	100	0,00306	0,00285	2	0,00385	0,00345	3	1	0,00264	0,00263	2	0,00263	0,00263
5	2	1	20	25	0,00016	0,00016	2	0,00023	0,00024	3	1	0,00022	0,00020	2	0,00022	0,00020
5	2	1	20	65	0,00031	0,00030	2	0,00063	0,00063	3	1	0,00060	0,00051	2	0,00058	0,00051
5	2	1	20	100	0,00074	0,00072	2	0,00100	0,00096	3	1	0,00086	0,00081	2	0,00085	0,00079
5	2	1	50	25	0,00006	0,00006	2	0,00008	0,00009	3	1	0,00008	0,00007	2	0,00008	0,00007
5	2	1	50	65	0,00015	0,00016	2	0,00021	0,00022	3	1	0,00021	0,00018	2	0,00021	0,00019
5	2	1	50	100	0,00025	0,00026	2	0,00034	0,00032	3	1	0,00032	0,00029	2	0,00033	0,00028
4	2	1	5	25	0,00052	0,00050	2	0,00073	0,00071	3	1	0,00055	0,00048	2	0,00059	0,00061
4	2	1	5	65	0,00156	0,00151	2	0,00199	0,00189	3	1	0,00134	0,00136	2	0,00166	0,00174
4	2	1	5	100	0,00259	0,00247	2	0,00321	0,00296	3	1	0,00226	0,00228	2	0,00271	0,00277
4	2	1	20	25	0,00015	0,00015	2	0,00022	0,00023	3	1	0,00020	0,00017	2	0,00015	0,00022
4	2	1	20	65	0,00042	0,00043	2	0,00058	0,00061	3	1	0,00052	0,00045	2	0,00040	0,00062
4	2	1	20	100	0,00068	0,00069	2	0,00093	0,00094	3	1	0,00073	0,00070	2	0,00064	0,00099
4	2	1	50	25	0,00006	0,00005	2	0,00008	0,00008	3	1	0,00008	0,00007	2	0,00005	0,00007
4	2	1	50	65	0,00014	0,00015	2	0,00020	0,00021	3	1	0,00022	0,00017	2	0,00013	0,00021
4	2	1	50	100	0,00023	0,00027	2	0,00032	0,00031	3	1	0,00035	0,00028	2	0,00021	0,00034
3	2	1	5	25	0,00042	0,00041	2	0,00057	0,00057	3	1	0,00042	0,00039	2	0,00047	0,00051
3	2	1	5	65	0,00125	0,00122	2	0,00154	0,00152	3	1	0,00109	0,00111	2	0,00133	0,00142
3	2	1	5	100	0,00206	0,00199	2	0,00248	0,00239	3	1	0,00183	0,00186	2	0,00179	0,00206
3	2	1	20	25	0,00012	0,00013	2	0,00019	0,00021	3	1	0,00016	0,00014	2	0,00013	0,00018
3	2	1	20	65	0,00036	0,00039	2	0,00051	0,00056	3	1	0,00041	0,00036	2	0,00035	0,00052
3	2	1	20	100	0,00059	0,00063	2	0,00081	0,00086	3	1	0,00056	0,00058	2	0,00056	0,00083
3	2	1	50	25	0,00006	0,00004	2	0,00007	0,00007	3	1	0,00008	0,00006	2	0,00005	0,00008
3	2	1	50	65	0,00013	0,00014	2	0,00019	0,00020	3	1	0,00023	0,00017	2	0,00012	0,00021
3	2	1	50	100	0,00021	0,00026	2	0,00030	0,00030	3	1	0,00037	0,00028	2	0,00019	0,00034

Analiz sonuçlarının daha anlaşılır olması açısından, Tablo 5.39’da verilen sonuçlardan, 5 Hz. makine çalışma frekansı elde edilen sonuçlar grafik olarak Şekil 5.123’te verilmiştir. Bu şekilde görüldüğü gibi en düşük temel deplasmanları 3 m temel genişliği için elde edilmiştir. Böylece en uygun temel genişliği 3 m olarak belirlenmiştir. Diğer frekans değerleri için grafikler EK-3’te verilmiştir.



Şekil 5.123. 5 Hz. makine çalışma frekansı için temel genişliğine bağlı olarak temel deplasmanları

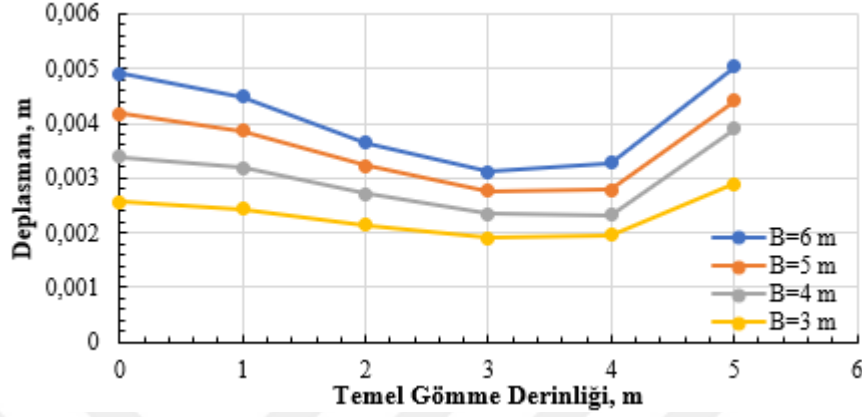
Şekil 5.124’te 3 m temel genişliği ve 5 Hz. makine çalışma frekansı için gömme derinliği ve temel kalınlığına bağlı olarak temel orta noktası deplasmanları verilmiştir. Bu şekilde görüldüğü gibi 3 m temel genişliği için en uygun temel gömme derinliği 3 m ve temel kalınlığı 1 m olarak belirlenmiştir



Şekil 5.124. Temel gömme derinliği ve temel kalınlığına bağlı olarak temel orta noktası deplasmanları

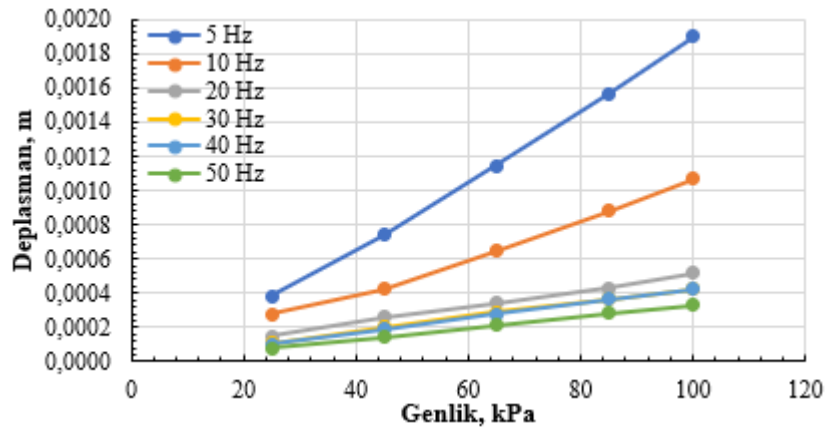
Analizleri yapılan tüm temel genişlikleri için temel gömme derinliğine bağlı olarak temel orta noktası deplasmanları Şekil 5.125’te verilmiştir. Bu grafik en olumsuz

yükleme koşulu olan makine çalışma frekansı 5 Hz. ve çalışma genliği 100 kPa için yapılmıştır. Buradan da anlaşılabacağı gibi, seçilen harmonik makine için en uygun temel tasarımı, temel genişliği 3 m, gömme derinliği 3 m ve temel kalınlığı 1 m olarak belirlenmiştir. Bu tasarım için tüm analizler gerçekleştirilmiştir.



Şekil 5.125. Temel genişlikleri için temel gömme derinliği ve temel kalınlığı etkisi

En uygun temel boyutları ve gömme derinliği için tüm makine çalışma frekansı ve makine çalışma genlikleri için analizler yapılmıştır. Bu analizler ile hem temel orta ve köşe noktasında, hem de temel köşe noktası hizasında ($x=0$ m) ve 2, 9 ve 16 m uzaklıklarda zemin yüzeylerinde meydana gelen deplasmanlar belirlenmiştir. Bu analizlerde temel/makine ağırlığı 2,1 olarak alınmıştır. Analiz sonuçları toplu olarak Tablo 5.40'ta verilmiştir. Temel orta noktasında meydana gelen en büyük deplasman makine çalışma frekansının 5Hz. ve makine çalışma genliğinin 100 kPa olması durumunda olduğu belirlenmiştir (Şekil 5.126).



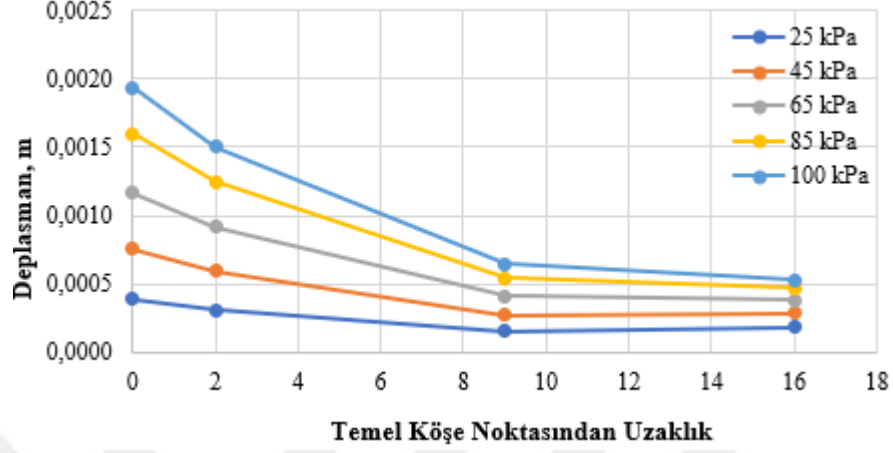
Şekil 5.126. Deplasmanla üzerindeki frekans ve genlik etkisi

Tablo 5.40. Makinenin çalışması ve durması aşamalarında zeminin yüzünde meydana gelen deplasmanlar

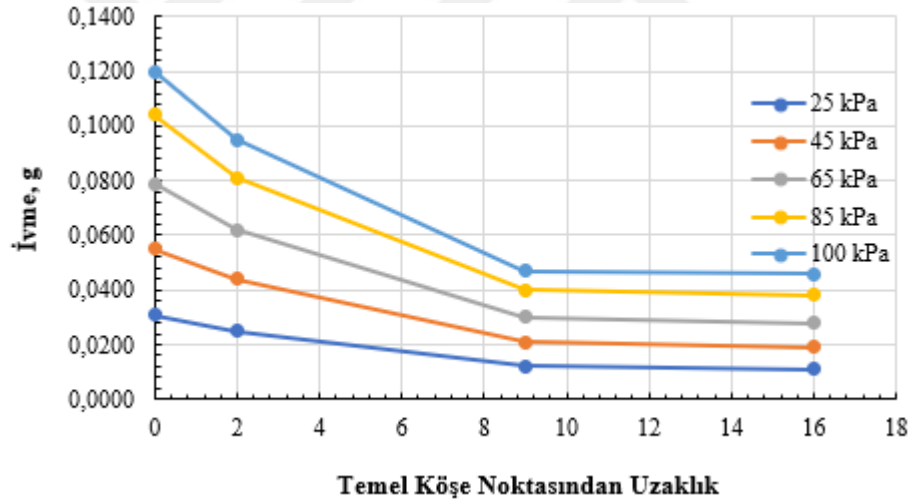
B m	Df m	d m	f Hz	A kPa	Temel Orta Noktası	Temel Köşe Noktası	x=0 m	x=2 m	x=9 m	x=16 m
3	3	1	5	25	0,00038	0,00037	0,00039	0,00031	0,00015	0,00018
3	3	1	5	45	0,00074	0,00072	0,00076	0,00060	0,00027	0,00029
3	3	1	5	65	0,00114	0,00110	0,00116	0,00091	0,00041	0,00038
3	3	1	5	85	0,00156	0,00151	0,00160	0,00125	0,00054	0,00047
3	3	1	5	100	0,00190	0,00183	0,00193	0,00150	0,00064	0,00053
3	3	1	10	25	0,00028	0,00027	0,00026	0,00020	0,00011	0,00014
3	3	1	10	45	0,00043	0,00041	0,00047	0,00036	0,00020	0,00024
3	3	1	10	65	0,00065	0,00063	0,00070	0,00054	0,00029	0,00032
3	3	1	10	85	0,00088	0,00085	0,00094	0,00073	0,00038	0,00040
3	3	1	10	100	0,00107	0,00103	0,00114	0,00090	0,00044	0,00046
3	3	1	20	25	0,00015	0,00014	0,00014	0,00011	0,00006	0,00006
3	3	1	20	45	0,00026	0,00025	0,00025	0,00020	0,00011	0,00011
3	3	1	20	65	0,00034	0,00033	0,00037	0,00030	0,00016	0,00016
3	3	1	20	85	0,00043	0,00041	0,00049	0,00043	0,00022	0,00020
3	3	1	20	100	0,00052	0,00050	0,00062	0,00054	0,00027	0,00024
3	3	1	30	25	0,00011	0,00010	0,00010	0,00009	0,00004	0,00004
3	3	1	30	45	0,00020	0,00019	0,00020	0,00018	0,00009	0,00007
3	3	1	30	65	0,00029	0,00027	0,00031	0,00028	0,00014	0,00010
3	3	1	30	85	0,00037	0,00034	0,00044	0,00039	0,00018	0,00014
3	3	1	30	100	0,00042	0,00039	0,00055	0,00048	0,00022	0,00016
3	3	1	40	25	0,00010	0,00009	0,00007	0,00007	0,00004	0,00003
3	3	1	40	45	0,00019	0,00017	0,00013	0,00014	0,00008	0,00006
3	3	1	40	65	0,00028	0,00026	0,00021	0,00022	0,00012	0,00009
3	3	1	40	85	0,00036	0,00034	0,00029	0,00030	0,00017	0,00012
3	3	1	40	100	0,00042	0,00039	0,00037	0,00037	0,00020	0,00014
3	3	1	50	25	0,00008	0,00007	0,00006	0,00006	0,00003	0,00002
3	3	1	50	45	0,00014	0,00013	0,00011	0,00011	0,00009	0,00004
3	3	1	50	65	0,00021	0,00020	0,00017	0,00016	0,00009	0,00007
3	3	1	50	85	0,00028	0,00026	0,00023	0,00022	0,00012	0,00009
3	3	1	50	100	0,00033	0,00031	0,00029	0,00027	0,00015	0,00011

Tablo 5.40'ta yer alan analiz sonuçlarından 5 Hz. makine çalışma frekansı için elde edilen deplasman değerleri Şekil 5.127'de grafik olarak sunulmuştur. Burada görüldüğü gibi temel köşe noktasından uzaklaştıkça deplasmanlar hızlı bir şekilde düşmekte ve 16 m'de birbirine oldukça yaklaşmaktadır. Bu da dinamik etki ile zemin içinde oluşan dalga genliklerinin zeminin sönümü nedeniyle küçüldüğünü

göstermektedir. Aynı analizlerde elde edilen ivme değerleri Şekil 5.128’te verilmiştir. İvme değerleri de deplasmanlarla uyumlu bir şekilde temel köşe noktasından uzaklaştıkça hızlı bir şekilde azalmakta ve 9 m’den sonra 0,05g’nin altına düşmektedir.



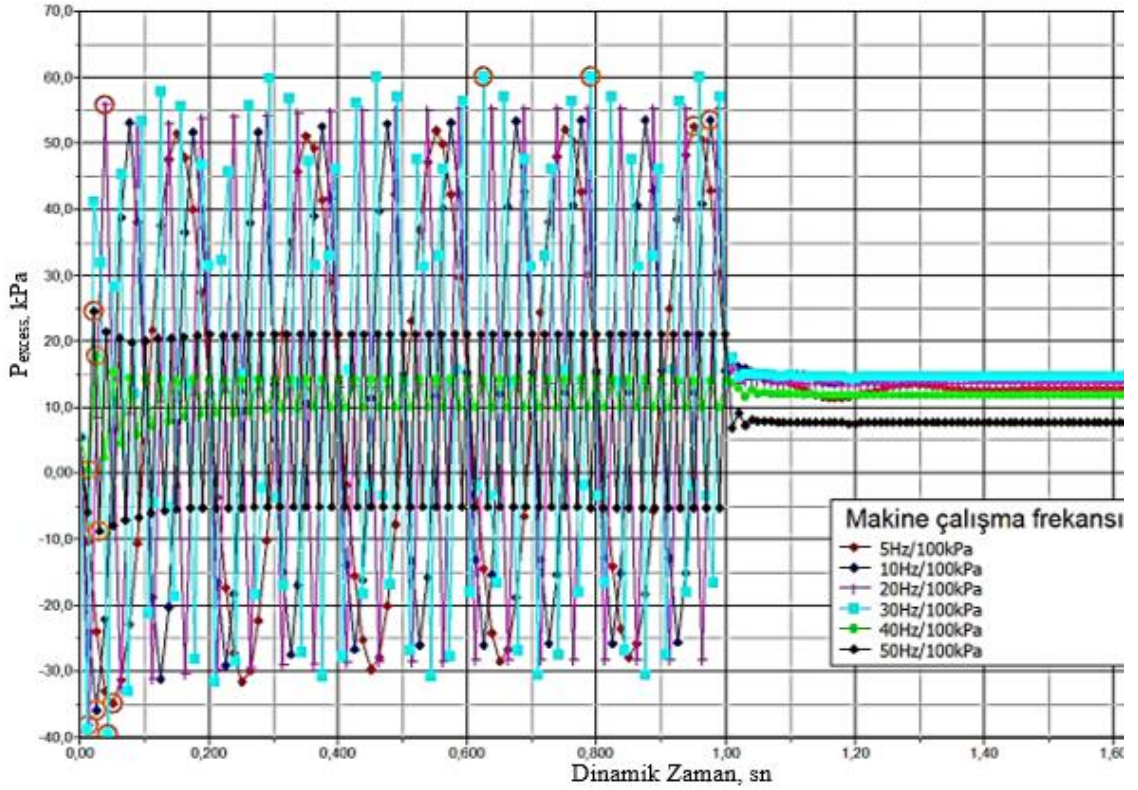
Şekil 5.127. 5 Hz. makine çalışma frekansı için zemin yüzünde oluşan deplasmanlar



Şekil 5.128. 5 Hz. makine çalışma frekansı için zemin yüzünde oluşan ivmeler

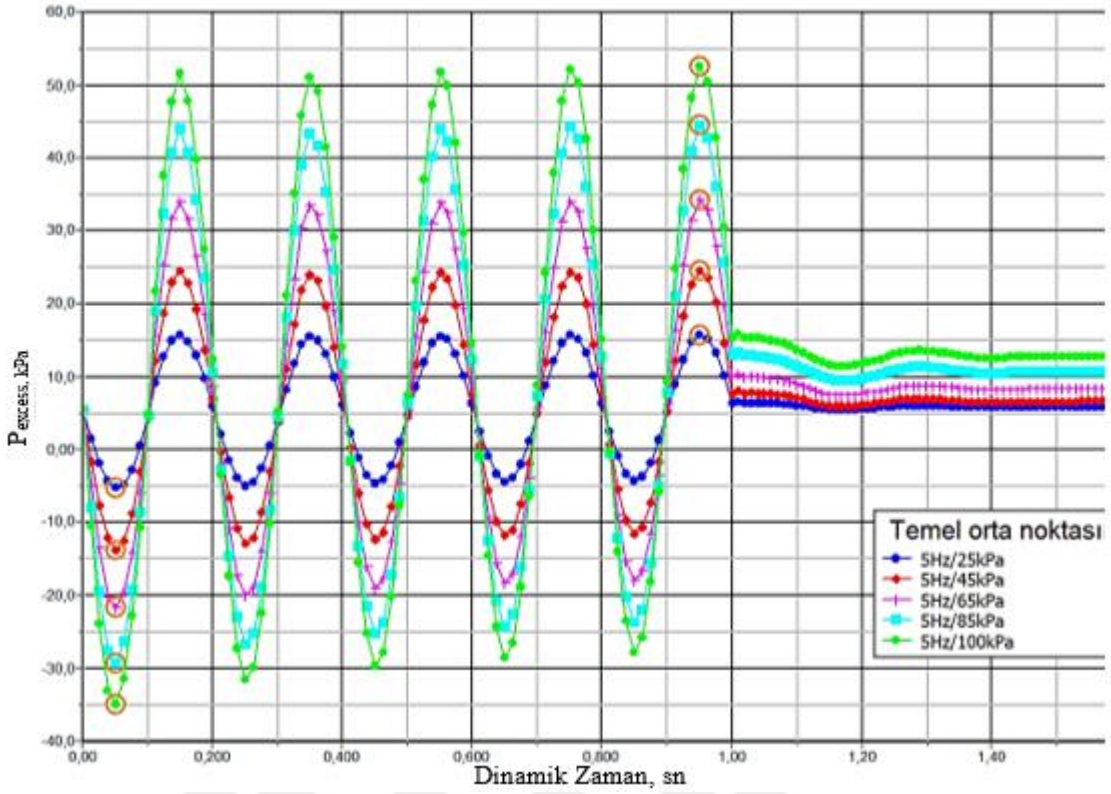
Makine çalışma frekansı ve genliğine bağlı olarak makine temeli orta noktasında meydana gelen aşırı boşluk suyu basınçlarının değişimi Şekil 5.129 ve Şekil 5.130’da verilmiştir. Tüm frekanslar 100 kPa makine çalışma genliğinden en fazla aşırı boşluk suyu basınçları meydana gelmiştir. Bu nedenle, frekans etkisi araştırılırken, 100 kPa makine çalışma genliği için elde edilen sonuçlar verilmiştir. Şekil 5.129’da görüldüğü gibi, 100 kPa makine çalışma genliği için, aşırı boşluk suyu basınçları 5, 10, 20 ve 30 Hz. için yaklaşık eşit olmakla birlikte, 50-60 kPa civarında değişirken, 30 Hz.ten 40 Hz.e geçişte aşırı boşluk suyu basıncı %70 oranında düşmüştür. 40 Hz. için aşırı boşluk suyu

basıncı 17 kPa olarak belirlenmiştir. 50 Hz.te ise aşırı boşluk suyu basıncı 24 kPa olarak belirlenmiş olup yaklaşık %40 artar artmıştır. Bu durum şu şekilde açıklanabilir. Makineler tarafından oluşturulan dinamik etkinin frekansı zemin davranışını etkilemektedir. Çünkü oluşturulan frekansa bağlı olarak etkinin yayıldığı derinlik değişmektedir. Düşük frekanslar daha derin tabakalara yayılırken, yüksek frekanslar yüzeye yakın yayılırlar. Buna bağlı olarak aynı makine çalışma genliği için, elde edilen deplasmanlar ve aşırı boşluk suyu basınçları değişecektir (Balkan, 2007).



Şekil 5.129. Makine çalışma frekansına bağlı olarak temel orta noktası altında meydana gelen aşırı boşluk suyu basınçlarının değişimi

Makine çalışma genliğinin boşluk suyu basınçları üzerindeki etkisini araştırmak için ise 5 Hz. makine çalışma frekansı için elde edilen sonuçlar verilmiştir. Şekil 5.130'da görüldüğü gibi, genlik arttıkça aşırı boşluk suyu basınçları artmıştır. 25 kPa makine çalışma genliği için aşırı boşluk suyu basıncı 15 kPa'dır. Makine çalışma genliğinin 4 kat artması, 100 kPa olması, durumu için analiz yapıldığında, aşırı boşluk suyu basıncı 2,5 kat artmış ve 52 kPa olarak belirlenmiştir.



Şekil 5.130. Makine çalışma genliğine bağlı olarak temel orta noktası altında meydana gelen aşırı boşluk suyu basınçlarının değişimi

Rezonant kolon deneyinden elde edilen kayma modülü değerleri ile oluşturulan makine-temel-zemin sistemi modellemesinde elde edilen en uygun temel boyutları ve temel gömme derinliği ile en olumsuz yükleme koşulu 5 Hz. için diğer modellemeler yapılmıştır.

FMC fabrika sahası, bir de arazi deneyleri olan SPT ve MASW ile elde edilen kayma modülü değerleri kullanılarak ayrı ayrı modellenmiş ve analizler yapılmıştır. Buradaki amaç, kayma modülünün artmasına bağlı olarak, oluşturulan harmonik yüklemenin zemin davranışı üzerindeki etkisini araştırmaktır.

SPT deney sonuçları kullanılarak oluşturulan modelde, FMC fabrika saha zemin profili 4 tabaka olarak oluşturulmuştur. 0-6 m arası katı kil zemin olarak, 6-12 m arası orta-katı kil zemin, 12-15 m arası kumlu zemin ve 15-21 m arası farklı parametrelere sahip katı kil zemin olarak oluşturulmuştur.

MASW sonuçları kullanılarak oluşturulan modelde ise, FMC fabrika saha zemin profili, 0-12 m arası katı kil zemin, 12-15 m arası kumlu zemin ve 15-21 m arası farklı parametrelere sahip katı kil zemin olmak üzere 3 tabaka olarak oluşturulmuştur.

Makinenin çalışması esnasında oluşan deformasyonlar küçük birim deformasyon seviyelerindedir. Bu nedenle laboratuvar ve arazi deneyleri ile elde edilen maksimum

kayma modülleri ile elde edilen elastisite modülleri analizlerde kullanılmıştır. Bu nedenle, analizlerde kullanılan elastisite modülleri statik elastisite modüllerinden yüksek olmaktadır. Karşılaştırma yapmak amacıyla, 5 Hz. makine çalışma frekansı için yapılan analizler, literatürde önerilen statik elastisite modülleri kullanılarak da yapılmıştır.

Böylece son olarak FMC fabrika sahası, literatürde yer alan statik elastisite modülleri kullanılarak modellenmiştir. Modelde oluşturulan zemin profili 3 tabakadan oluşmaktadır. 0-12 m arası orta-katı kil zemin, 12-15 arası kumlu zemin ve 15-21 m arası yumuşak kil zemindir.

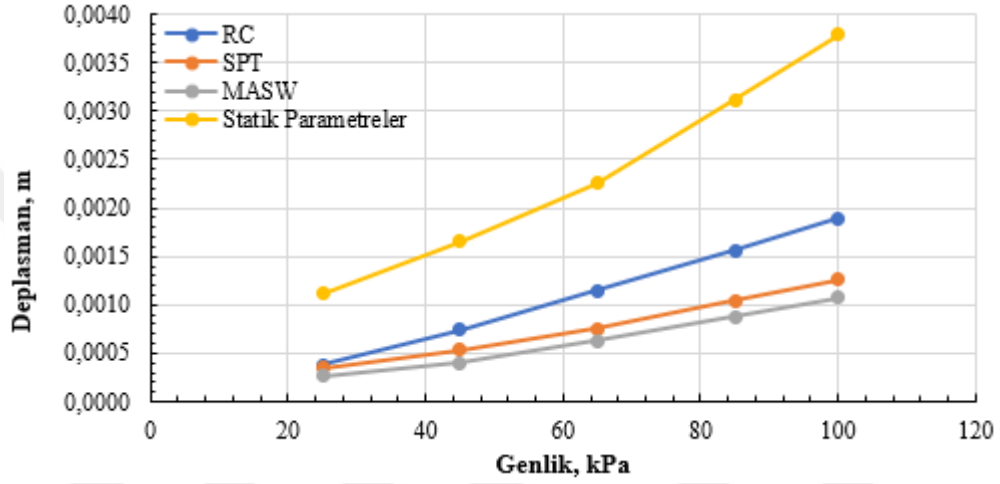
Tüm deney verileri ile yapılan analiz sonuçlarından elde edilen deplasmanlar toplu olarak Tablo 5.41’de verilmiştir.

Tablo 5.41. Farklı deneyler ile elde edilen zemin parametreleri ile oluşturulmuş modellerin analizlerinden elde edilen deplasmanlar

	f Hz	A kPa	Temel Orta Noktası	Temel Köşe Noktası	x=0 m	x=2 m	x=9 m	x=16 m
RC	5	25	0,0004	0,0004	0,0004	0,0003	0,0002	0,0002
	5	45	0,0007	0,0007	0,0008	0,0006	0,0003	0,0003
	5	65	0,0011	0,0011	0,0012	0,0009	0,0004	0,0004
	5	85	0,0016	0,0015	0,0016	0,0012	0,0005	0,0005
	5	100	0,0019	0,0018	0,0019	0,0015	0,0006	0,0005
SPT	5	25	0,0004	0,0003	0,0003	0,0002	0,0001	0,0001
	5	45	0,0005	0,0005	0,0005	0,0004	0,0001	0,0002
	5	65	0,0008	0,0007	0,0008	0,0006	0,0002	0,0002
	5	85	0,0010	0,0010	0,0011	0,0008	0,0002	0,0002
	5	100	0,0013	0,0012	0,0013	0,0010	0,0003	0,0002
MASW	5	25	0,0003	0,0003	0,0002	0,0001	0,0001	0,0001
	5	45	0,0004	0,0004	0,0004	0,0003	0,0001	0,0001
	5	65	0,0006	0,0006	0,0006	0,0005	0,0001	0,0001
	5	85	0,0009	0,0008	0,0009	0,0007	0,0002	0,0002
	5	100	0,0011	0,0010	0,0011	0,0008	0,0002	0,0002
Statik parametreler	5	25	0,0011	0,0011	0,0008	0,0006	0,0004	0,0005
	5	45	0,0017	0,0016	0,0016	0,0012	0,0008	0,0008
	5	65	0,0023	0,0022	0,0025	0,0020	0,0012	0,0011
	5	85	0,0031	0,0030	0,0035	0,0027	0,0016	0,0014
	5	100	0,0038	0,0037	0,0042	0,0034	0,0019	0,0016

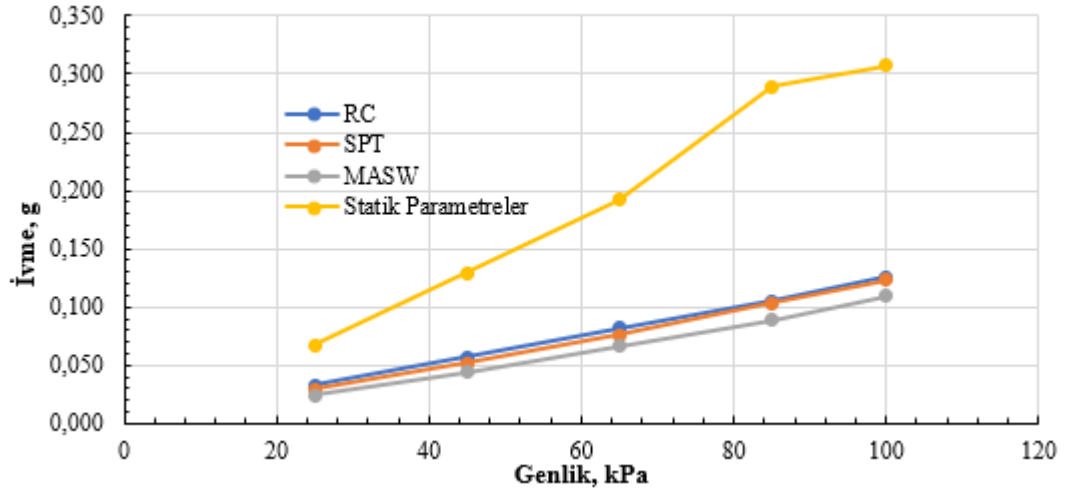
Farklı zemin parametreleri kullanılarak yapılan analiz sonuçlarının karşılaştırılması grafik olarak Şekil 5.131’de verilmiştir. En yüksek deplasmanlar statik

elastisite modülleri kullanılarak yapılan analizlerde elde edilmiştir. Çünkü, bu modelde zemin tabakaları en düşük rijitliğe sahiptir. Ayrıca arazi deney sonuçları kullanılarak korelasyonlarla bulunan zemin parametreleri, rezonant kolon deneyi ile elde edilen değerlerden oldukça yüksektir. Bu nedenle rezonant kolon deneyi ile elde edilen zemin parametreleri kullanılarak yapılan modelde elde edilen deplasmanlar arazi deney sonuçları ile elde edilen zemin parametreleri kullanılarak yapılan modellerde elde edilen deplasmanlardan daha yüksektir.



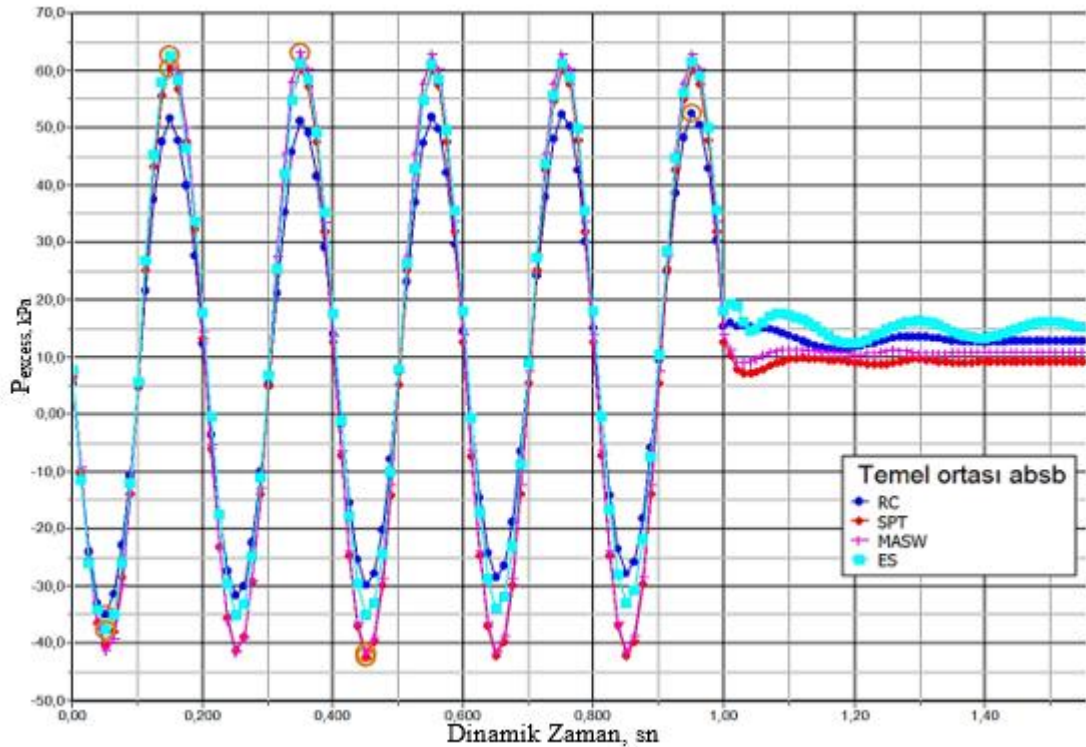
Şekil 5.131. 5 Hz. makine çalışma frekansı için temel orta noktasında oluşan deplasmanlar

Şekil 5.132’de ise, deney türüne bağlı olarak, makine çalışma genliğinin değişimi ile zemin yüzeyinde meydana gelen ivme değerlerinin karşılaştırılması yer almaktadır. Rezonant kolon ve arazi deneyleri ile elde zemin parametreleri kullanılarak oluşturulan modellerde elde edilen ivme değerleri birbirine oldukça yakındır. Statik parametreler kullanılarak oluşturulan modelde ise ivmeler diğerlerine kıyasla oldukça büyüktür. Bu durum yine zemin rijitlikleri arasındaki farkla ilişkilidir. Deney sonuçları ile oluşturulan modellerde, zemin parametreleri oldukça büyüktür. Buna bağlı olarak da, zemin rijitlikleri oldukça artmaktadır. Bu nedenle, dinamik etkiye bağlı olarak, zeminde oluşan ivmeler daha küçüktür. Böylece, statik parametreler kullanılarak oluşturulan model, diğer modellere kıyasla oldukça zayıftır. Bu nedenle statik parametreler ile oluşturulan model diğer modellere kıyasla yumuşak zemin davranışı göstermektedir. İvmeler ve deplasmanlar oldukça büyükmektedir.



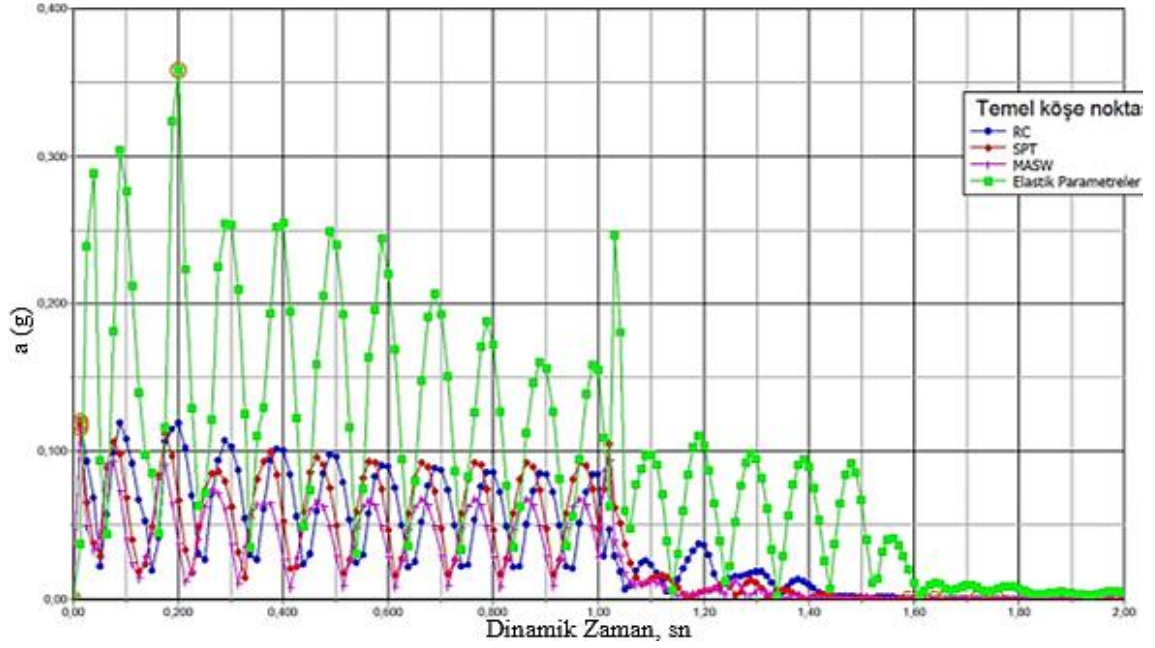
Şekil 5.132. 5 Hz. makine çalışma frekansı için temel köşe noktası hizasında zemin yüzünde oluşan ivmeler

Aşırı boşluk suyu basınçlarının zemin rijitliğine bağlı olarak değişimini incelemek için makine çalışma frekansı/genliği 5Hz/100kPa olan durum ele alınmıştır. Yapılan analizler sonucunda, deney türüne bağlı olarak temel orta noktası altında meydana gelen boşluk suyu basınçlarında bir değişim gözlenmemiştir (Şekil 5.133).



Şekil 5.133. Model türüne bağlı olarak temel orta noktası altında meydana gelen aşırı boşluk suyu basınçları

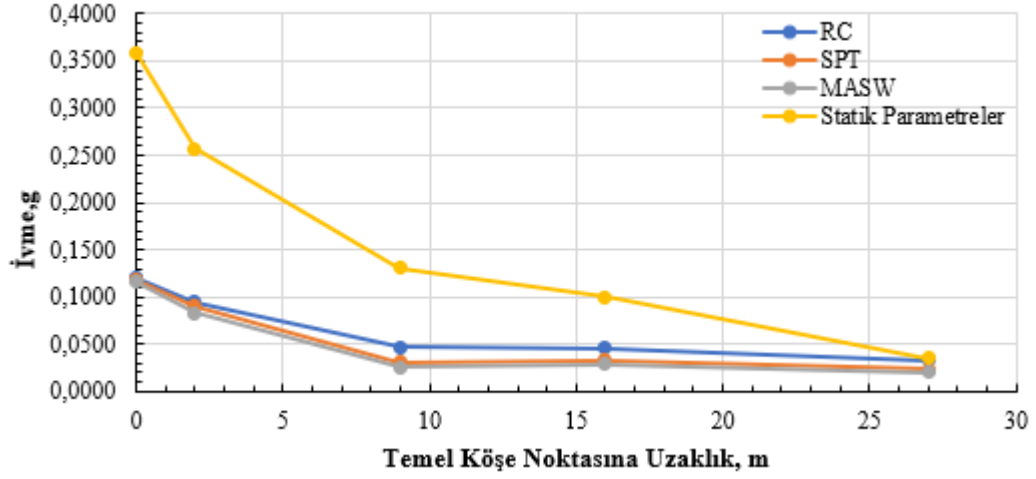
Zemin rijitliğine bağlı olarak, dinamik etkinin sönümlenmesini araştırmak için, ivme-zaman ilişkisi incelenmiştir. 5Hz/100kPa makine çalışma frekansı/genliği durumunda, makinenin 1 sn sonra durmasından sonra, Şekil 5.134'te görüldüğü gibi statik parametreler ile oluşturulan modelde ivmenin sönümlenmesi, diğer modellere göre daha uzun sürmüştür. Bu durum, yumuşak zeminde dalga genliklerinin sert zeminlere kıyasla daha büyük olması ve dalga yayılma hızının daha düşük olmasında kaynaklanmaktadır.



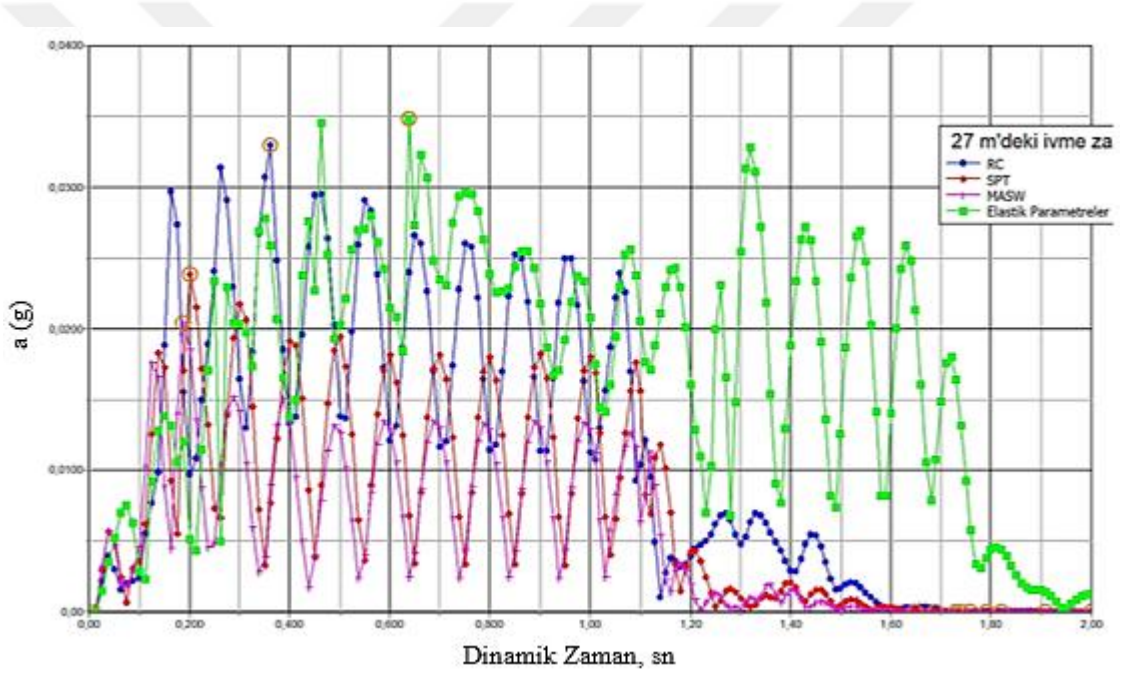
Şekil 5.134. Temel köşe noktası için farklı zemin parametreleri kullanılarak oluşturulan zemin modellerinin program çıktısı olan ivme-zaman grafiklerinin karşılaştırması

Şekil 5.135'te, dinamik etkiye bağlı olarak, zemin yüzeyinde meydana gelen ivmelerin temel köşe noktasına olan uzaklığa bağlı olarak değişimi verilmiştir. Burada da görüldüğü gibi, elastik parametreler kullanılarak oluşturulan modelde her noktada elde edilen ivmeler daha büyüktür.

Şekil 5.136'da ise temel köşe noktasından 27 m elde edilen uzakta farklı deney parametreleri ile oluşturulan zemin modellerinde elde edilen ivme-zaman grafikleri verilmiştir. Temel köşe noktasında elde edilen ivmeler ile 27 m uzakta elde edilen ivme değerleri karşılaştırıldığında, en büyük azalma, %90 azalma ile statik parametreler ile oluşturulan modelde elde edilmiştir. Bu durum ise, yumuşak zeminlerin sönüm oranının yüksek olması ile açıklanabilir. Diğer modellerde ise yaklaşık %80 civarında bir azalma meydana gelmiştir (Şekil 5.135).



Şekil 5.135. Farklı zemin parametreleri kullanılarak oluşturulan zemin modellerinden elde edilen ivme-temel köşe noktasına uzaklık grafiği



Şekil 5.136. Temel köşe noktasından 27 m uzakta farklı zemin parametreleri kullanılarak oluşturulan zemin modellerinin program çıktısı olan ivme-zaman grafiklerinin karşılaştırması

5.4.2. KOS Atıksu Arıtma Tesisi sahasının modellenmesi ile edilen sonuçlar

KOS Atıksu Arıtma saha zemini sadece rezonant kolon deney sonuçları kullanılarak belirlenen elastisite modülü değerleri ile Hardening Soil Model bünye modeli ile modellenmiştir. Zemin profili, rezonant kolon deney sonuçlarının değerlendirilmesi ile, iki tabaka olarak oluşturulmuştur. 0-2 m arası yumuşak kil tabakası olarak ve 2-21 m arası orta katı kil tabakası olarak modellenmiştir. FMC fabrika sahası için yapılan modelleme analizleri ile belirlenmiş olan temel boyutları ve temel gömme derinliği ile en

büyük deplasman ve ivme değerlerinin elde edildiği 5 Hz. makine çalışma frekansı ile bu saha için makine-temel-zemin sistemi modellenmiştir. Makine çalışma genliği değiştirilerek deplasman, ivme ve boşluk suyu basıncı değerleri karşılaştırılmıştır.

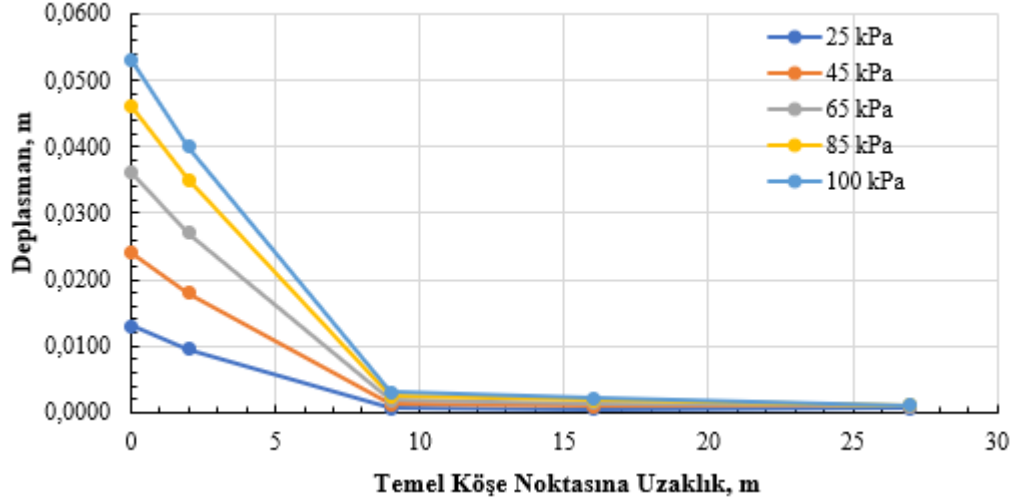
Temel genişliği 3 m, temel kalınlığı 1 ve gömme derinliği 3 m olarak modellenen makine-temel-zemin sistemi için temel ağırlığı/makine ağırlığı 2,1 olarak kullanılmıştır. Analiz sonuçları toplu olarak Tablo 5.42’de verilmiştir. Analiz sonuçlarına göre, makine genliği arttıkça, temel deplasmanları artmıştır ve en büyük deplasman 100 kPa makine çalışma genliğinde elde edilmiştir.

Tablo 5.42. KOS Atıksu Arıtma Tesisi bölge zemini ile oluşturulan zemin modelleri ile makine çalışma genliğine bağlı olarak elde edilen analiz sonuçları

f Hz	A kPa	Temel Orta Noktası	Temel Köşe Noktası	x=0 m	x=2 m	x=9 m	x=16 m	x=27 m
5	25	0,00076	0,00073	0,01300	0,00954	0,00065	0,00052	0,00066
5	45	0,00148	0,00145	0,02400	0,01800	0,00124	0,00093	0,00093
5	65	0,00233	0,00227	0,03600	0,02700	0,00185	0,00136	0,00100
5	85	0,00330	0,00322	0,04600	0,03500	0,00251	0,00180	0,00102
5	100	0,00418	0,00406	0,05300	0,04000	0,00302	0,00213	0,00113

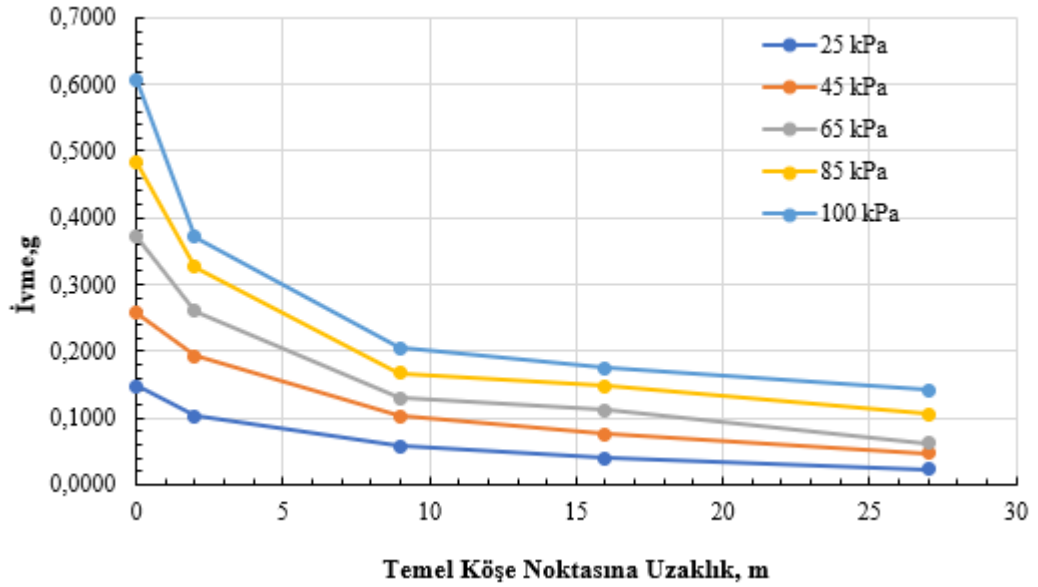
Şekil 5.137’de ise, makine çalışma genliğine bağlı olarak, temel köşe noktası hizasından uzaklığa bağlı olarak zemin yüzeyinde oluşan deplasmanlar verilmiştir. Zemin yüzeyinde oluşan deplasmanlar uzaklık ile hızlı bir şekilde azalmıştır.

Bu saha için elde edilen deplasmanlar, FMC fabrika saha zemini modellemelerinde elde edilen deplasmanlardan çok daha büyüktür. Örneğin temel orta noktası ve köşe noktası için elde edilen deplasmanlar, FMC fabrika saha analizlerinde elde edilen deplasmanların 1,2 katı iken, temel köşe noktası hizasında zemin yüzeyinde elde edilen deplasmanlar 26 katı daha büyüktür.



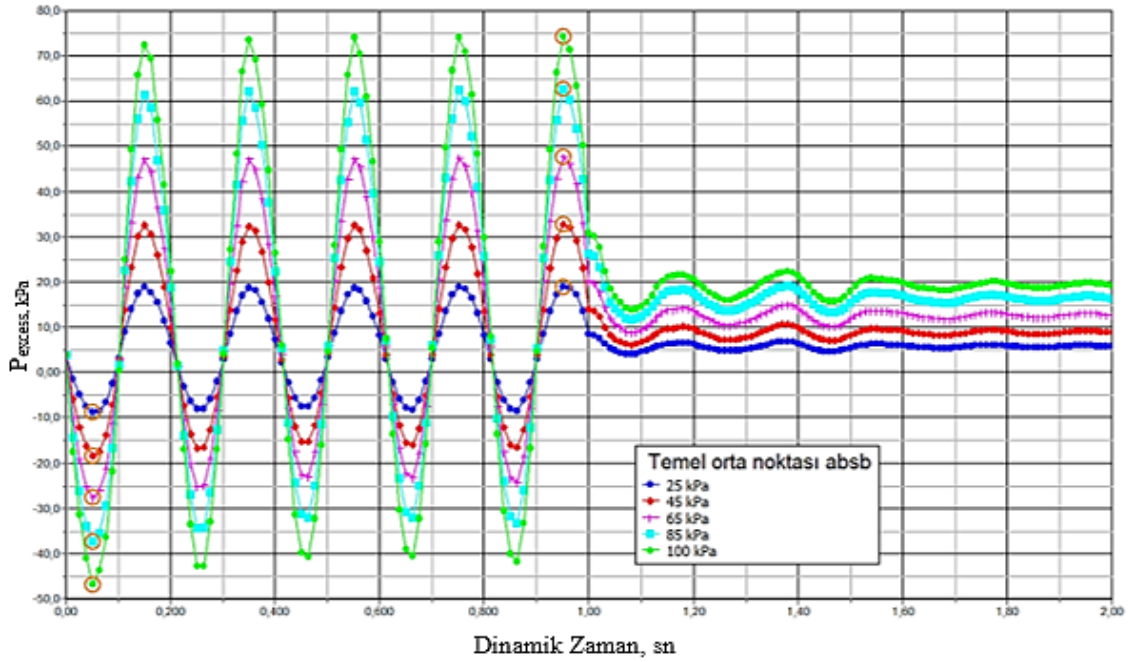
Şekil 5.137. Makine çalışma genliğine bağlı olarak zemin yüzünde oluşan deplasmanlar

Şekil 5.138’de zemin yüzeyinde uzaklığa bağlı olarak meydana gelen ivme değerlerinin değişimi verilmiştir. Temel köşe noktası hizasında zemin yüzünde meydana gelen ivmeler tüm genlikler için 16 m uzakta %70 oranında azalmıştır. Bu saha zemini ile yapılan analizlerde elde edilen ivme değerleri FMC fabrika sahası analizleri ile karşılaştırıldığında temel orta ve köşe noktasında elde edilen ivmeler 3 kat artarken, temel köşe noktası hizasında zemin yüzeyinde oluşan ivme 4 kat artmıştır. Bu durum, yumuşak kil zeminlerde oluşan dinamik etkilerin daha büyük olduğunu göstermektedir.



Şekil 5.138. Makine çalışma genliğine bağlı olarak zemin yüzünde oluşan ivmeler

Şekil 5.139’da makine çalışma genliğine bağlı olarak temel orta noktası altında meydana gelen aşırı boşluk suyu basınçlarının değişimi verilmiştir. Makine çalışma genliği arttıkça, aşırı boşluk suyu basınçları artmıştır. En büyük aşırı boşluk suyu basıncı 100 kPa makine çalışma genliği için elde edilmiş olup, 75 kPa’dır. Bu saha için elde edilen aşırı boşluk suyu basınçları, FMC fabrika saha zemini modellemelerinde elde edilen aşırı boşluk suyu basınçlarından daha büyüktür. Çünkü KOS Atıksu Arıtma Tesisi saha zemini daha yumuşak kıvamlı bir zemin olup, yük etkisi ile oluşan aşırı boşluk suyu basınçları tüm genlikler için daha büyüktür. 100 kPa makine çalışma genliği için iki saha profili ile yapılan modellemelerden elde edilen sonuçlar karşılaştırıldığında, aşırı boşluk suyu basınçları KOS Atıksu Arıtma Tesisi için yapılan analizlerde %42 artmıştır.



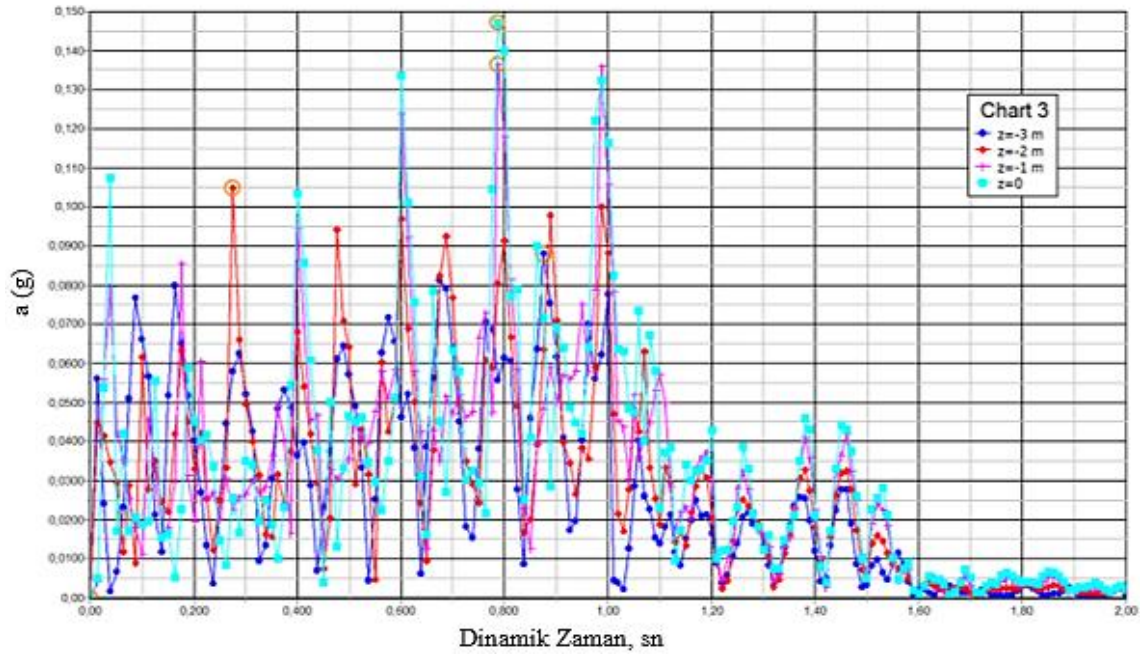
Şekil 5.139. Makine çalışma genliğine bağlı olarak temel orta noktasında meydana gelen aşırı boşluk suyu basınçları

Bu saha zemin profili verileri incelendiğinde, üst tabakanın zemin rijitliği alt tabakadan daha küçük ve temel daha rijit zemin tabakası içerisinde kalmaktadır. Bu nedenle bu bölge zemini için yapılan modellemede, zemin büyütmesini araştırmak için, yatay doğrultuya ek olarak, temel köşe noktası hizasında zemin yüzeyinde, zemin yüzeyinden 2 m aşağıda ve temel köşe noktası olan zemin yüzeyinden 3 m aşağıda olmak üzere düşey doğrultuda ivme değerleri incelenmiştir. Tablo 5.43’te temel köşe noktası hizasında düşey doğrultuda elde edilen ivme değerleri tüm genlik değerleri için verilmiştir.

Tablo 5.43. KOS Atıksu Arıtma Tesisi bölge zemini ile oluşturulan zemin modelleri ile makine çalışma genliğine bağlı olarak düşey doğrultuda elde edilen ivme değerleri

f Hz	A kPa	Temel Köşe Noktası	z=0 x=0 m	z=-1 x=0	z=-2 x=0
5	25	0,088	0,147	0,136	0,105
5	45	0,157	0,258	0,250	0,178
5	65	0,252	0,372	0,338	0,245
5	85	0,381	0,483	0,423	0,343
5	100	0,496	0,521	0,471	0,606

5Hz/25kPa makine çalışma frekansı/genliği için, düşey doğrultuda ivmenin değişimi Şekil 5.140'da verilmiştir. Burada görüldüğü gibi, tüm genlik değerleri için temel taban seviyesinde meydana gelen ivmeler, zemin yüzeyinde oluşan ivmelerden daha küçüktür. En fazla ivme artışı ise %67 artış ile 25 kPa genlik değerinde meydana gelmiştir.



Şekil 5.140. Makine çalışma genliğine bağlı olarak temel köşe noktası hizasında düşey doğrultuda oluşan ivmeler

5.4.3. Literatür verileri oluşturulmuş zemin modellerinin değerlendirilmesi

Zemin tabakalanma durumunun, makine-temel-zemin sistemi modellemesinde harmonik yüklü dinamik etkiye bağlı olarak zemin davranışına etkisine araştırmak için arazi modellemesi dışında modeller oluşturulmuştur. Bu amaçla, literatür verileri kullanılarak yumuşak, orta sert ve sert kil zemin tabakalarından oluşan tek tabakalı ve değişken kombinasyonlu 3 tabakalı zemin modelleri oluşturulmuştur. Tek tabakalı modeller kullanılarak zemin rijitliğinin zemin davranışı üzerindeki etkisi araştırılmıştır. 3 tabakalı zemin modelleri ise, tabaka rijitlikleri farkının zemin davranışına etkisini araştırmak için kullanılmış olup, zemin büyütmesi araştırılmıştır.

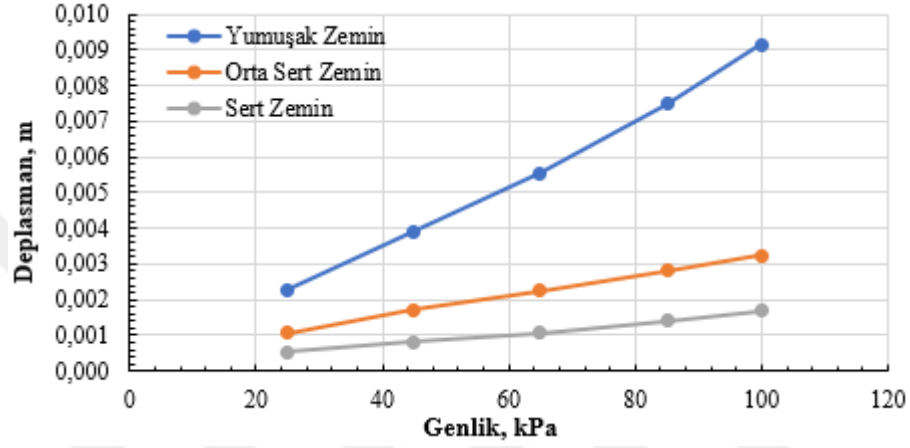
Oluşturulan tüm modellerde, temel genişliği 3 m, temel kalınlığı 1 m ve temel gömme derinliği 3 m olarak alınmıştır. Temel ağırlığı/makine ağırlığı 2,1 olarak kullanılmıştır. Analiz hesap aşamaları olmakla birlikte, makine çalışma frekansı 5 Hz. için analizler yapılmıştır. Dinamik analiz süresi diğer modellerle aynı olup, 1 sn'dir.

Tek tabaka yumuşak, orta sert ve sert kil zemin olarak oluşturulan zemin modelleri ile yapılan analiz sonuçları Tablo 5.44'te verilmiştir.

Tablo 5.44. Tek tabaka zemin profili için elde edilen deplasmanlar

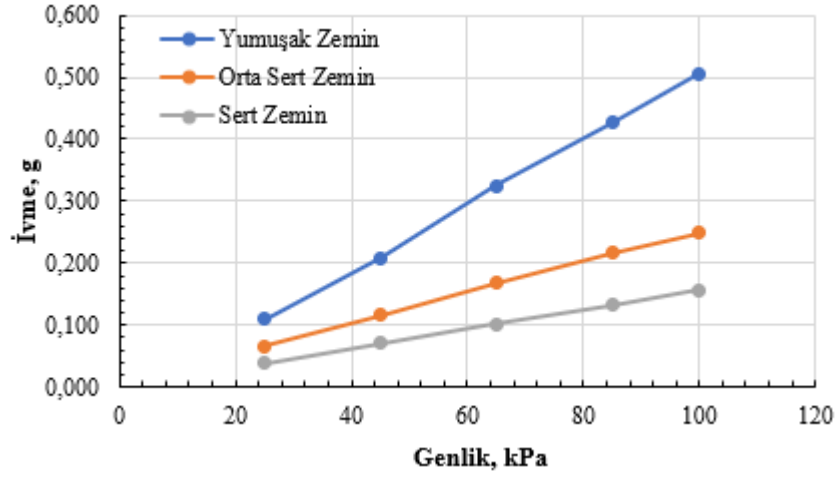
	f Hz	A kPa	Temel Orta Noktası	Temel Köşe Noktası	x=0 m	x=2 m	x=9 m	x=16 m
Yumuşak Zemin	5	25	0,00228	0,00222	0,00159	0,00141	0,00086	0,00082
	5	45	0,00392	0,00381	0,00335	0,00294	0,00162	0,00142
	5	65	0,00555	0,00545	0,00534	0,00464	0,00242	0,00199
	5	85	0,00747	0,00736	0,00750	0,00649	0,00331	0,00258
	5	100	0,00916	0,00906	0,00920	0,00794	0,00403	0,00303
Orta sert Zemin	5	25	0,00108	0,00106	0,00088	0,00061	0,00041	0,00045
	5	45	0,00170	0,00168	0,00134	0,00111	0,00071	0,00072
	5	65	0,00226	0,00224	0,00211	0,00172	0,00099	0,00097
	5	85	0,00281	0,00281	0,00289	0,00235	0,00127	0,00120
	5	100	0,00322	0,00324	0,00349	0,00284	0,00149	0,00137
Sert Zemin	5	25	0,00053	0,00050	0,00048	0,00035	0,00015	0,00019
	5	45	0,00082	0,00077	0,00073	0,00055	0,00025	0,00030
	5	65	0,00107	0,00101	0,00102	0,00076	0,00034	0,00041
	5	85	0,00139	0,00135	0,00141	0,00106	0,00044	0,00050
	5	100	0,00168	0,00163	0,00171	0,00128	0,00051	0,00058

Şekil 5.141’de zemin profiline bağlı olarak temel orta noktası deplasmanlarının makine çalışma genliği ile değişimi verilmiştir. En büyük deplasman değerleri yumuşak kil zemin profilinde meydana gelmiştir. 100 kPa makine çalışma genliği için, yumuşak kil zeminde meydana gelen temel orta noktası deplasmanı, orta sert kil zeminde meydana gelen deplasmanın 1,8 katı artarken, sert kil zeminde meydana gelen deplasmanın 4,5 katı artmıştır. Böylece zemin rijitliğinin değişiminin temel deplasmanlarını önemli ölçüde değiştirdiği belirlenmiştir.



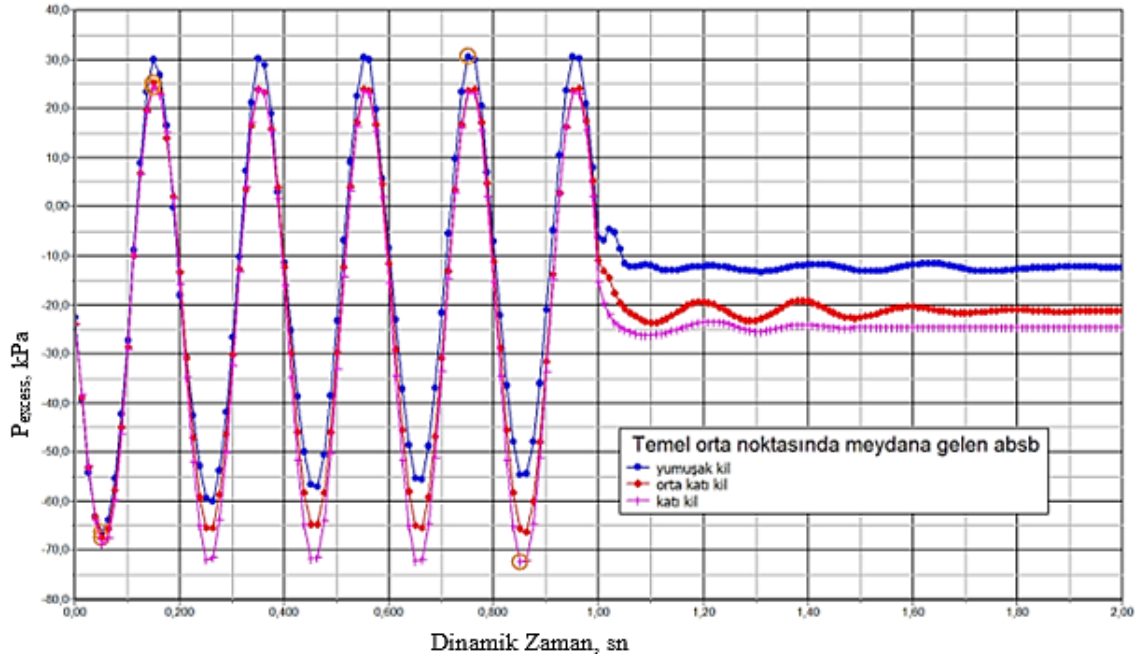
Şekil 5.141. Tek tabakalı zemin profili için 5 Hz. makine çalışma frekansı için temel orta noktasında meydana gelen deplasmanlar

Şekil 5.142’de ise zemin profiline bağlı olarak temel orta noktasında meydana gelen ivmelerin makine çalışma genliği ile değişimi verilmiştir. En büyük ivme değerleri yumuşak kil zemin profilinde meydana gelmiştir. 100 kPa makine çalışma genliği için, yumuşak kil zeminde meydana gelen ivme, orta sert kil zeminde meydana gelen ivmenin yaklaşık 2,0 katı iken, sert kil zeminde meydana gelen ivmenin yaklaşık 3,2 katıdır. Aynı şekilde, zemin rijitliğinin temel tabanında meydana gelen ivmeleri önemli ölçüde değiştirdiği belirlenmiştir.



Şekil 5.142. Tek tabakalı zemin profili için 5 Hz. makine çalışma frekansı için temel orta noktasında meydana gelen ivmeler

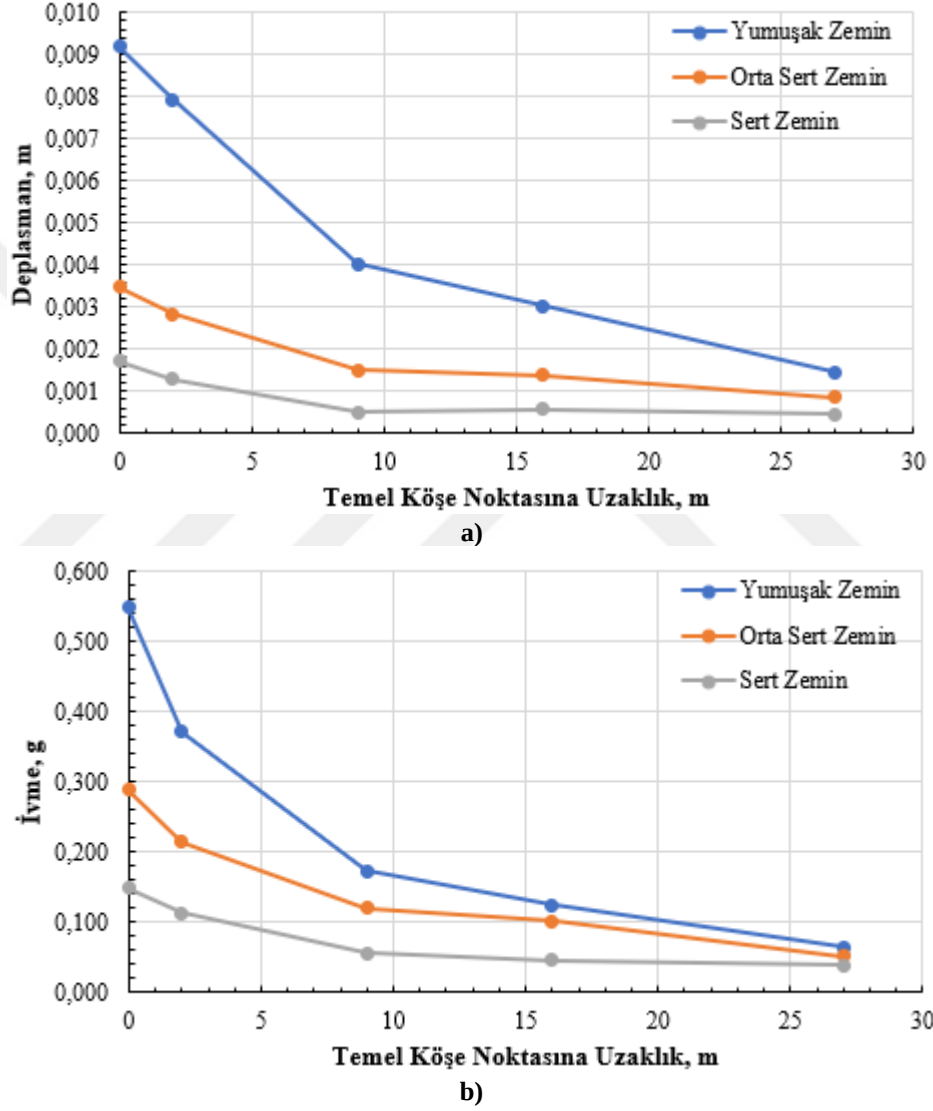
Şekil 5.143'te 5Hz/100kPa yük durumu için, zemin profiline bağlı olarak temel orta noktası altında meydana gelen aşırı boşluk suyu basınçlarının değişimi verilmiştir. Orta sert ve sert kil zemin profilleri için, temel orta noktası altında yaklaşık eşit aşırı boşluk suyu basınçları meydana gelirken, yumuşak kilde aşırı boşluk suyu basınçları artmıştır.



Şekil 5.143. Zemin rijitliğine bağlı olarak temel orta noktası altında meydana gelen aşırı boşluk suyu basınçları

Şekil 5.144'te 5Hz/100kPa yükleme durumu için temel köşe noktasından uzaklığa bağlı olarak zemin yüzeyinde oluşan deplasman ve ivme değerleri verilmiştir. Dinamik

yüke bağlı olarak en büyük deplasman ve ivme değeri yumuşak kil zeminde gelmekle beraber, en büyük sönümleme yine kil zeminde meydana gelmiştir. Temel köşe noktasından 27 m uzakta zemin yüzeyinde oluşan deplasman, yumuşak zeminde %85, orta sert kil zeminde %75 ve sert kil zeminde %74 azalırken, zemin yüzeyinde oluşan ivme yumuşak zeminde %90, orta sert kil zeminde %80 ve sert kil zeminde %75 azalmıştır.



Şekil 5.144. Zemin profiline bağlı olarak, 5Hz/100kPa yükleme durumu için temel köşe noktasına uzaklıkla zemin yüzeyinde oluşan **a)** Deplasmanlar ve **b)** İvmeler

Zemin tabakaları arasındaki rijitlik farkının, zemin davranışı üzerindeki etkisini araştırmak için 3 tabakalı zemin profilleri oluşturulmuş ve 5 Hz. makine çalışma frekansı için analizler yapılmıştır. Tabakalı zemin profili oluşturulurken, tabakalanma durumu 0-6 m, 6-15 m ve 15-21 m arasında tabakalar değiştirilmiştir. Tablo 5.45'te oluşturulan

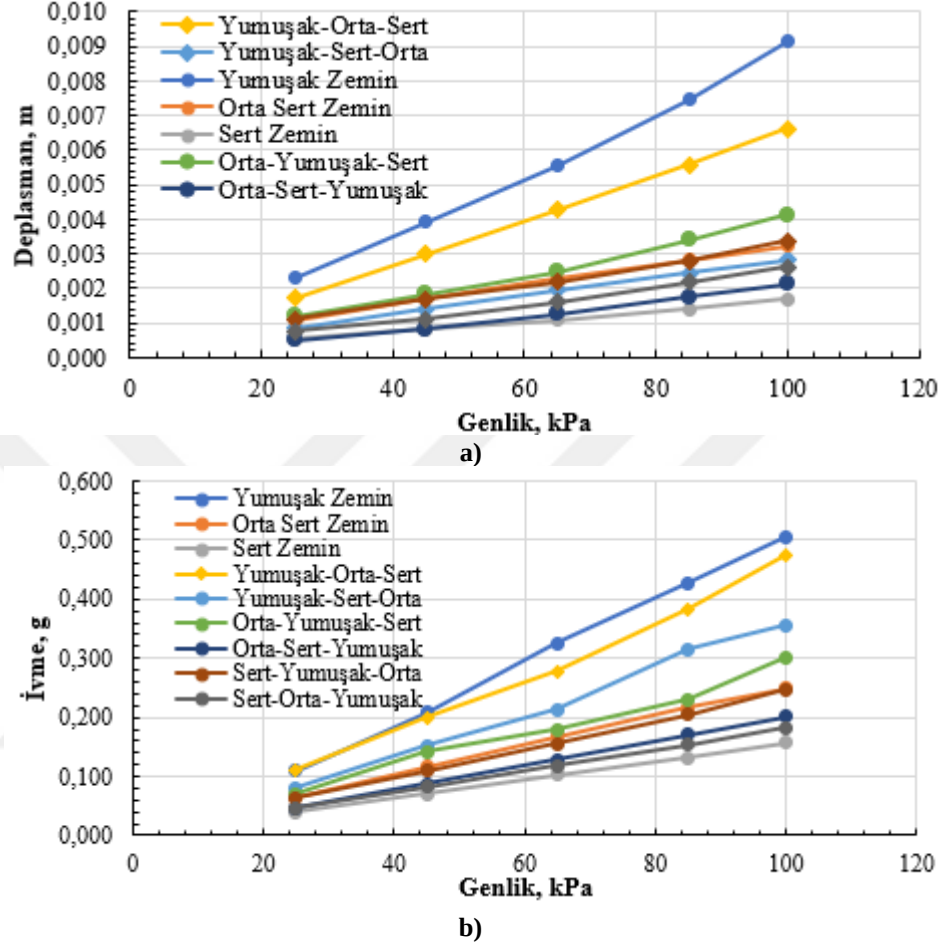
tabakalı zemin profili kombinasyonları için elde edilen deplasman değerleri toplu olarak sunulmuştur.

Tablo 5.45. Değişken tabakalanma durumları için elde edilen deplasmanlar

	f Hz	A kPa	Temel Orta Noktası	Temel Köşe Noktası	x=0 m	x=2 m	x=9 m	x=16 m
Yumuşak Orta Sert Sert	5	25	0,00173	0,00169	0,00135	0,00123	0,00058	0,00051
	5	45	0,00300	0,00294	0,00262	0,00238	0,00111	0,00086
	5	65	0,00427	0,00420	0,00398	0,00360	0,00165	0,00119
	5	85	0,00558	0,00549	0,00535	0,00486	0,00219	0,00151
	5	100	0,00663	0,00654	0,00645	0,00585	0,00262	0,00175
Yumuşak Sert Orta Sert	5	25	0,00083	0,00080	0,00070	0,00063	0,00029	0,00023
	5	45	0,00140	0,00135	0,00138	0,00134	0,00052	0,00040
	5	65	0,00193	0,00185	0,00213	0,00190	0,00076	0,00056
	5	85	0,00242	0,00230	0,00285	0,00257	0,00097	0,00072
	5	100	0,00280	0,00264	0,00343	0,00309	0,00113	0,00083
Orta Sert Yumuşak Sert	5	25	0,00118	0,00115	0,00095	0,00069	0,00047	0,00059
	5	45	0,00183	0,00173	0,00179	0,00137	0,00082	0,00098
	5	65	0,00245	0,00237	0,00272	0,00216	0,00126	0,00133
	5	85	0,00339	0,00295	0,00369	0,00299	0,00171	0,00168
	5	100	0,00414	0,00398	0,00444	0,00362	0,00207	0,00195
Orta Sert Sert Yumuşak	5	25	0,00049	0,00049	0,00043	0,00033	0,00019	0,00016
	5	45	0,00082	0,00080	0,00083	0,00063	0,00035	0,00027
	5	65	0,00126	0,00121	0,00128	0,00097	0,00051	0,00037
	5	85	0,00175	0,00168	0,00175	0,00134	0,00069	0,000473
	5	100	0,00212	0,00205	0,00212	0,00162	0,00078	0,00050
Sert Yumuşak Orta Sert	5	25	0,00110	0,00102	0,00102	0,00080	0,00048	0,00056
	5	45	0,00169	0,00156	0,00154	0,00119	0,00079	0,00092
	5	65	0,00217	0,00196	0,00219	0,00161	0,00106	0,00125
	5	85	0,00279	0,00269	0,00295	0,00218	0,00131	0,00154
	5	100	0,00336	0,00324	0,00353	0,00261	0,00149	0,00176
Sert Orta Sert Yumuşak	5	25	0,00074	0,00073	0,00070	0,00053	0,00028	0,00035
	5	45	0,00111	0,00108	0,00109	0,00083	0,00050	0,00057
	5	65	0,00160	0,00154	0,00163	0,00125	0,00070	0,00075
	5	85	0,00217	0,00209	0,00225	0,00169	0,00090	0,00092
	5	100	0,00261	0,00252	0,00270	0,00202	0,00105	0,00104

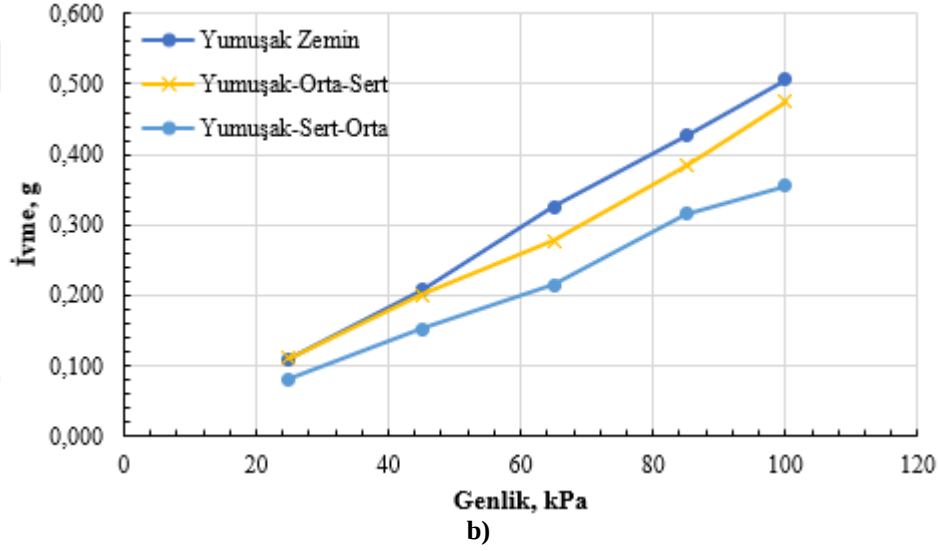
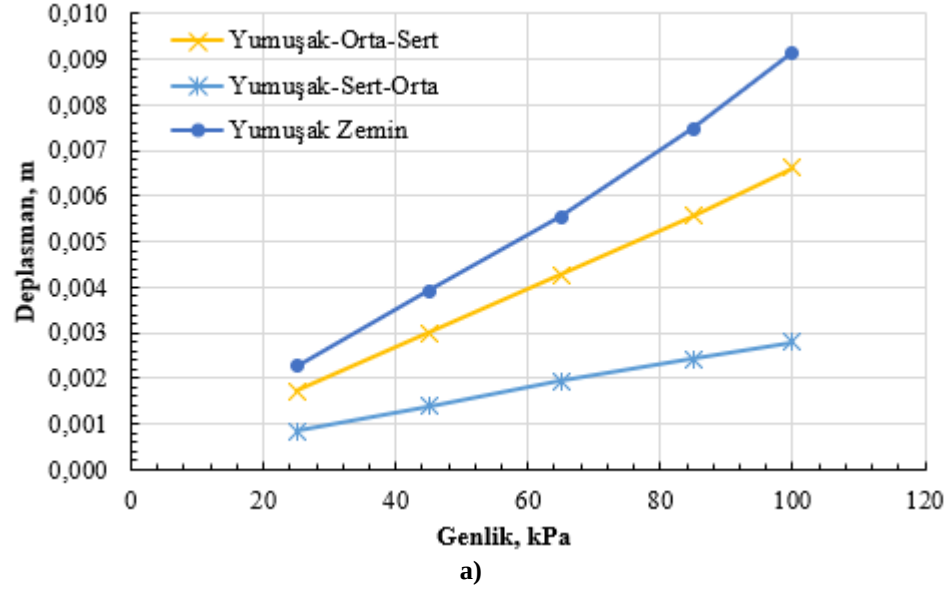
Şekil 5.145'te zemin profiline bağlı olarak elde edilen temel orta noktasında deplasman ve ivme değerlerinin makine çalışma genliğine bağlı olarak değişimi

verilmiştir. Burada görüldüğü gibi en büyük deplasman ve ivme değerleri tek tabakalı yumuşak zemin ve yumuşak-orta katı-katı kil zemin tabakalarından oluşan zemin profilinde meydana geldiği belirlenmiştir.



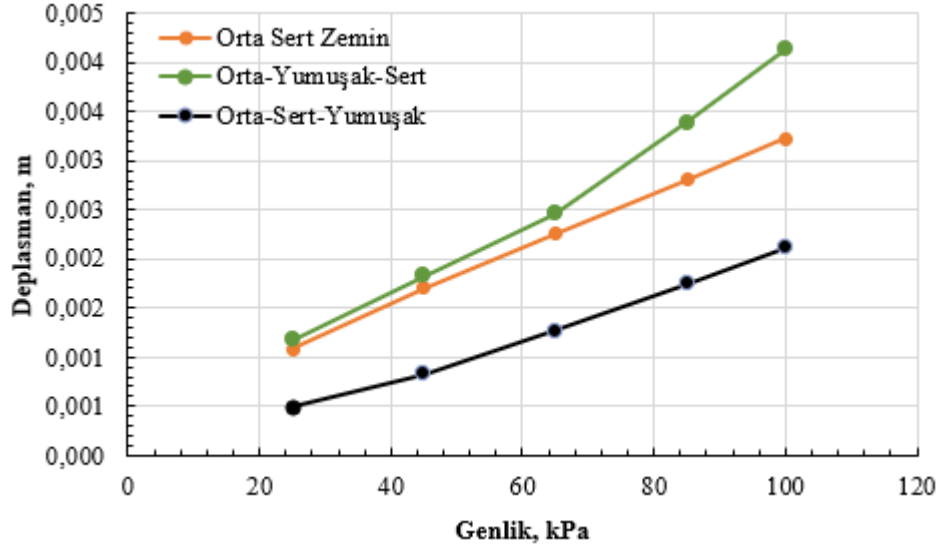
Şekil 5.145. Farklı zemin profilleri için temel orta noktasında meydana gelen **a)** Deplasmanlar ve **b)** İvmeler

Bu analiz sonuçlarını daha detaylı incelemek yumuşak, orta sert ve sert zemin kombinasyonları ayrı ayrı ele alınmıştır. Şekil 5.146'da yumuşak kil zemin kombinasyonlarına ait temel orta noktasında elde edilen deplasman ve ivme değerleri yer almaktadır. En büyük deplasman ve ivmeler, tek tabakalı yumuşak kil zemin profilinde meydana gelmiştir. Tek tabaka yumuşak kil zemin profilinde meydana gelen deplasmanlar, yumuşak kil zemin altında orta sert kil zemin bulunması durumunda %28 ve sert kil zemin tabakası bulunması durumunda %69 azalmıştır. İvme değerleri ise, yumuşak kil zemin altından orta sert kil zemin bulunması durumunda %6 ve sert kil zemin tabakası bulunması durumunda %30 azalmıştır.

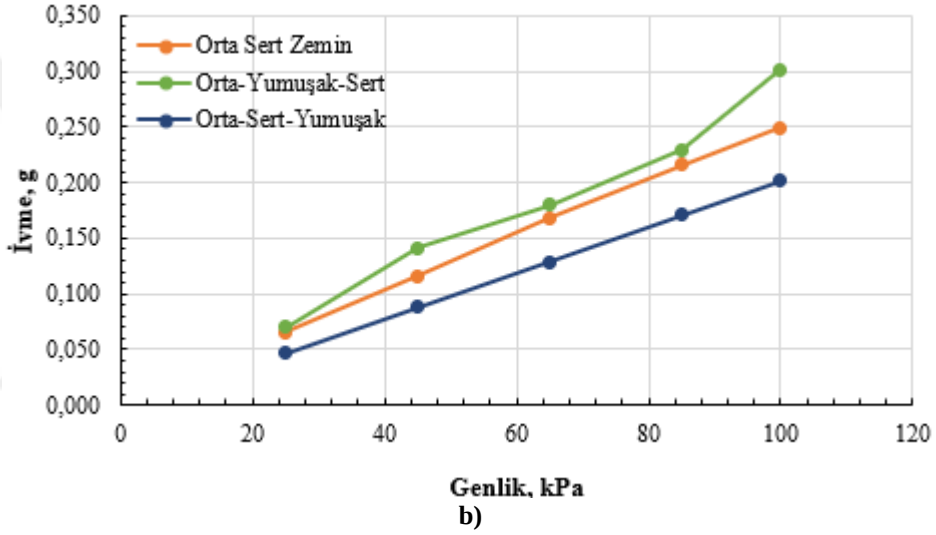


Şekil 5.146. Yumuşak kil zemin kombinasyonları için elde edilen a) Deplasmanlar ve b) İvmeler

Şekil 5.147’de orta sert zemin kombinasyonları yer almaktadır. Burada görüldüğü gibi en büyük deplasman ve ivme değerleri orta sert-yumuşak-sert kil zemin kombinasyonunda meydana gelmiştir. Tek tabaka orta sert kil zemin profilinde meydana gelen deplasmanlar, orta sert kil zemin altında yumuşak kil zemin bulunması durumunda %29 artarken, sert kil zemin tabakası bulunması durumunda %34 azalmıştır. İvme değerleri ise, orta sert kil zemin altında yumuşak kil zemin bulunması durumunda %20 artarken, sert kil zemin tabakası bulunması durumunda %19 azalmıştır. Buradan yumuşak kil zeminlerin dinamik etkiyi büyüttüğü belirlenmiştir.



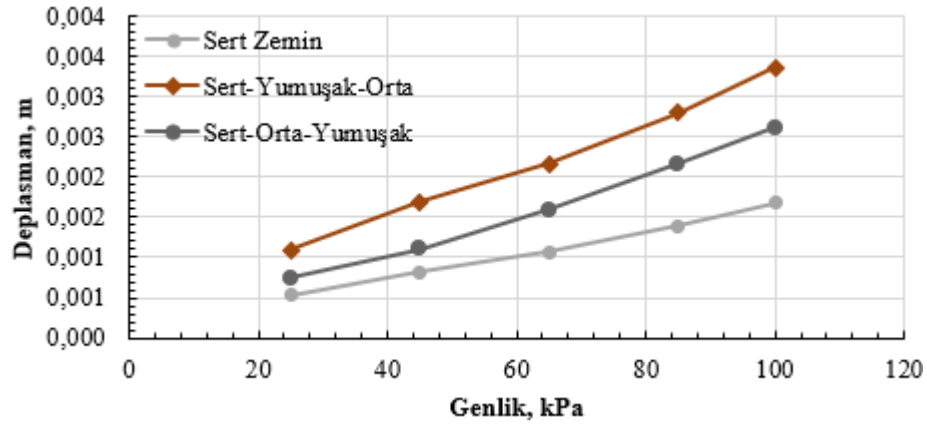
a)



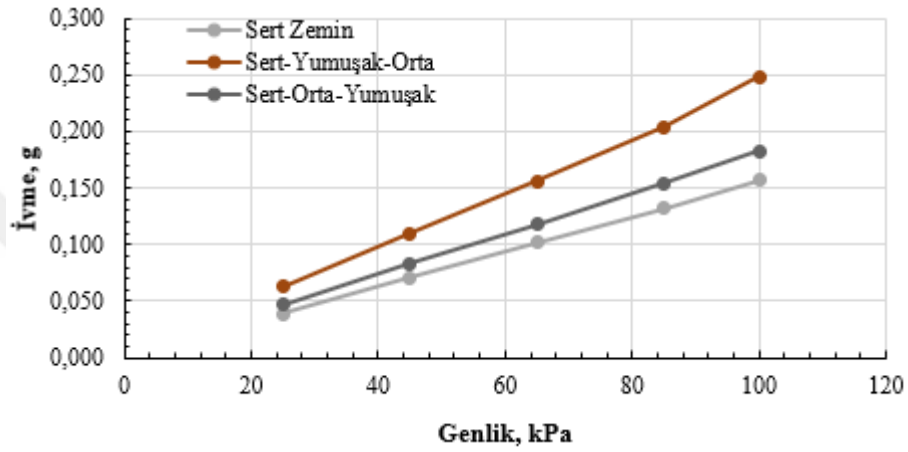
b)

Şekil 5.147. Orta katı kil zemin kombinasyonları için elde edilen a) Deplasmanlar ve b) İvmeler

Şekil 5.148’de ise sert zemin kombinasyonları için temel orta noktasında elde edilen deplasman ve ivme değerleri yer almaktadır. En büyük deplasman ve ivme değerlerinin, yumuşak kil zeminin sert kil zemin tabakasının hemen altında olması durumunda meydana geldiği belirlenmiştir. Tek tabaka sert kil zemin profilinde meydana gelen deplasmanlar, sert kil zemin altında yumuşak kil zemin bulunması durumunda %100 artarken, orta sert kil zemin tabakası bulunması durumunda %55 artmıştır. İvme değerleri ise, sert kil zemin altında yumuşak kil zemin bulunması durumunda %58 artarken, orta sert kil zemin tabakası bulunması durumunda %16 artmıştır. Buradan, zemin tabakaları arasındaki rijitlik farkının büyük olması durumunda, yumuşak kil zeminlerin dinamik etkiyi daha fazla büyüttüğü belirlenmiştir.



a)

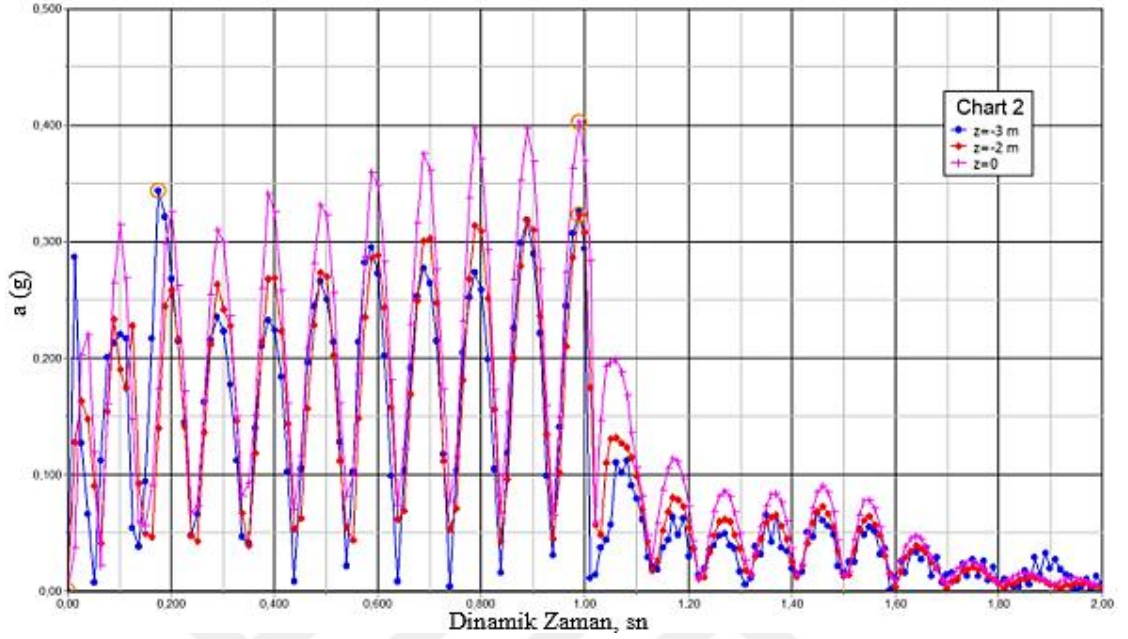


b)

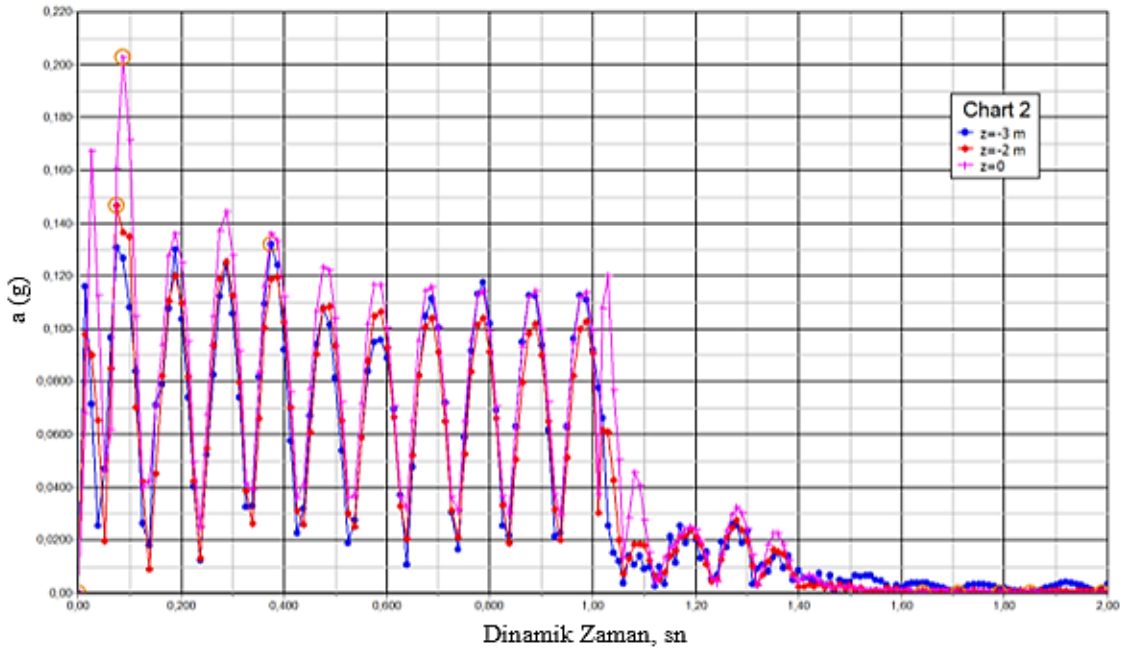
Şekil 5.148. Katı kil zemin kombinasyonları için elde edilen a) Deplasmanlar ve b) İvmeler

Bunlara ek olarak üst tabaka 2 m'lik ince bir yumuşak kil tabakası, alt tabakanın ise orta sert ve sert zemin kombinasyonları ile oluşturulmuş zemin modellerinin analizleri gerçekleştirilmiş ve temel köşe noktası ve üstünde düşey doğrultuda deplasman ve ivme değerlerinin değişimi belirlenmiştir. Bu modellemedeki amaç, daha rijit tabaka içerisinde yer alan makine temeli üzerinde çalışan makinenin oluşturduğu dinamik etkinin düşey doğrultuda yukarı doğru değişimini ve buna bağlı olarak kil zeminlerin büyütme etkisini araştırmaktır. Bu amaçla yumuşak-orta sert ve sert zemin profili ve yumuşak-sert-orta sert zemin profili ile 5Hz/100kPa makine çalışma frekansı/genliği için analizler gerçekleştirilmiştir. Bu analizler sonucunda Şekil 5.149 ve Şekil 5.150'de yer alan ivme-zaman grafikleri elde edilmiştir. Bu grafiklerde görüldüğü gibi üstte yumuşak kil zemin olması durumunda temel tabanında oluşan ivme, temel köşe noktası hizasında zemin yüzeyinde oluşan ivmeden küçüktür. Bu da yumuşak kil zeminlerin büyütme etkisinden kaynaklıdır. Ayrıca zemin tabakaları arasındaki rijitlik farkı arttıkça ivmenin artma oranı artmıştır. Temel köşe noktası altında oluşan ivme değerleri yumuşak-orta sert-sert zemin

profilinde zemin yüzeyinde %17 artarken, yumuşak-sert-orta sert zemin profilinde %54 artmıştır.



Şekil 5.149. Yumuşak-orta sert-sert zemin profili için düşey doğrultuda elde edilen ivmeler



Şekil 5.150. Yumuşak-sert-orta sert zemin profili için düşey doğrultuda elde edilen ivmeler

Son olarak makine çalışma süresinin, zemin sertliğine bağlı olarak temel deplasmanları üzerindeki etkisini araştırmak için tek tabakalı yumuşak, orta sert ve sert zemin profili ile oluşturulan modellerde makine çalışma süresi 1 sn, 5 sn, 15 sn ve 60 sn

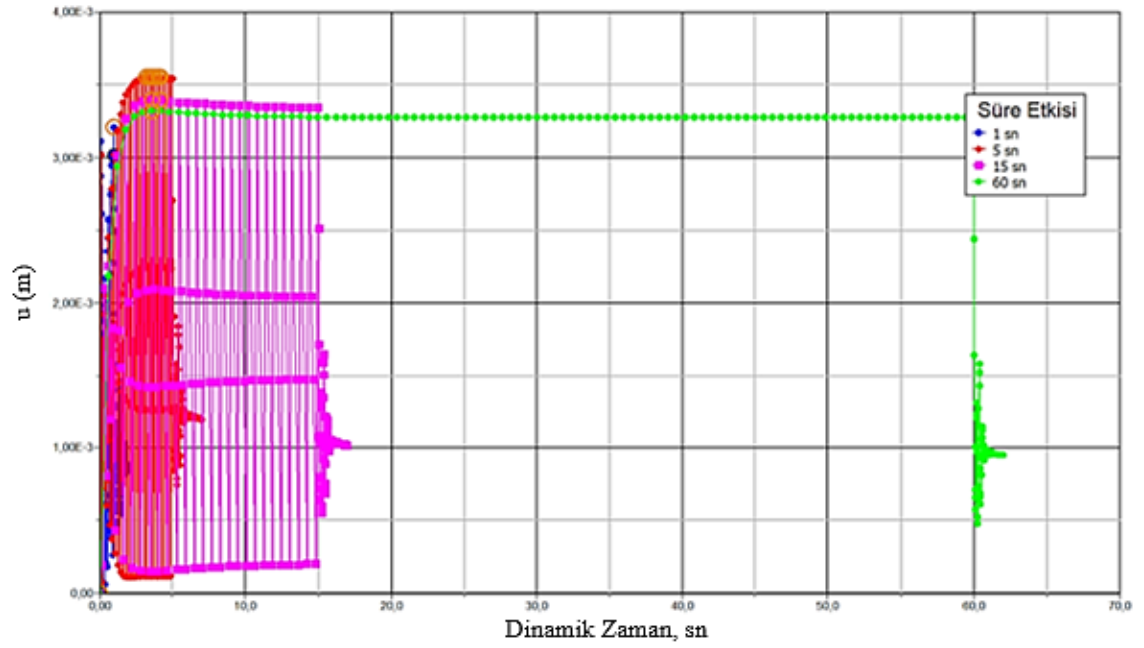
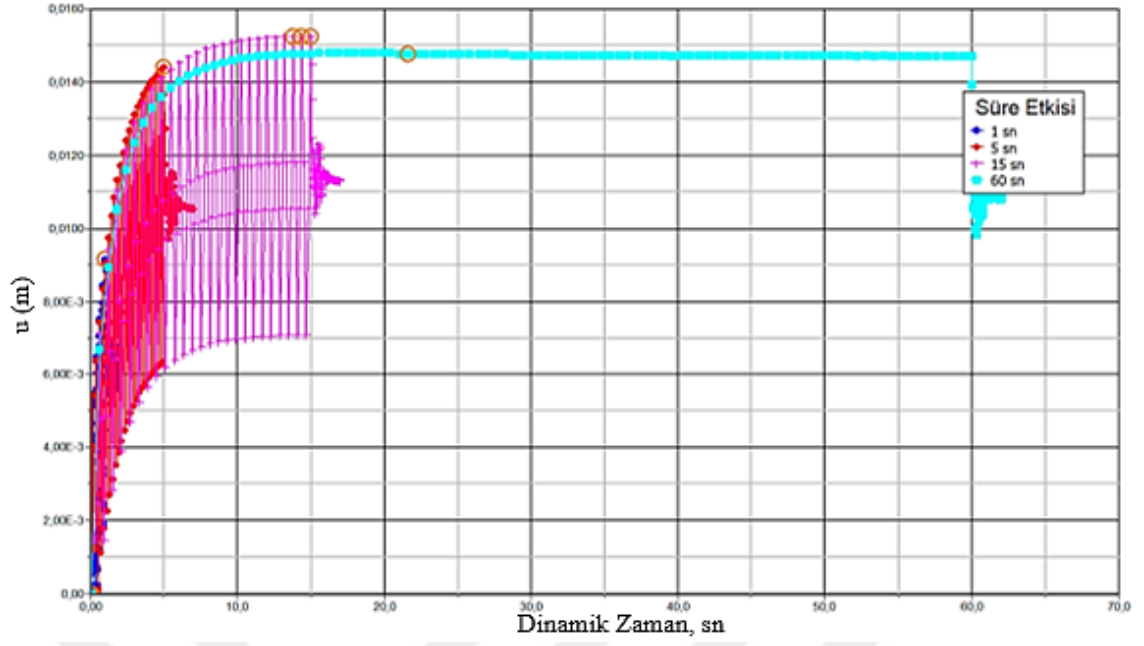
olarak değiştirilerek analizler yapılmıştır. Bu modeller için elde edilen deplasman değerleri Tablo 5.46’da verilmiştir.

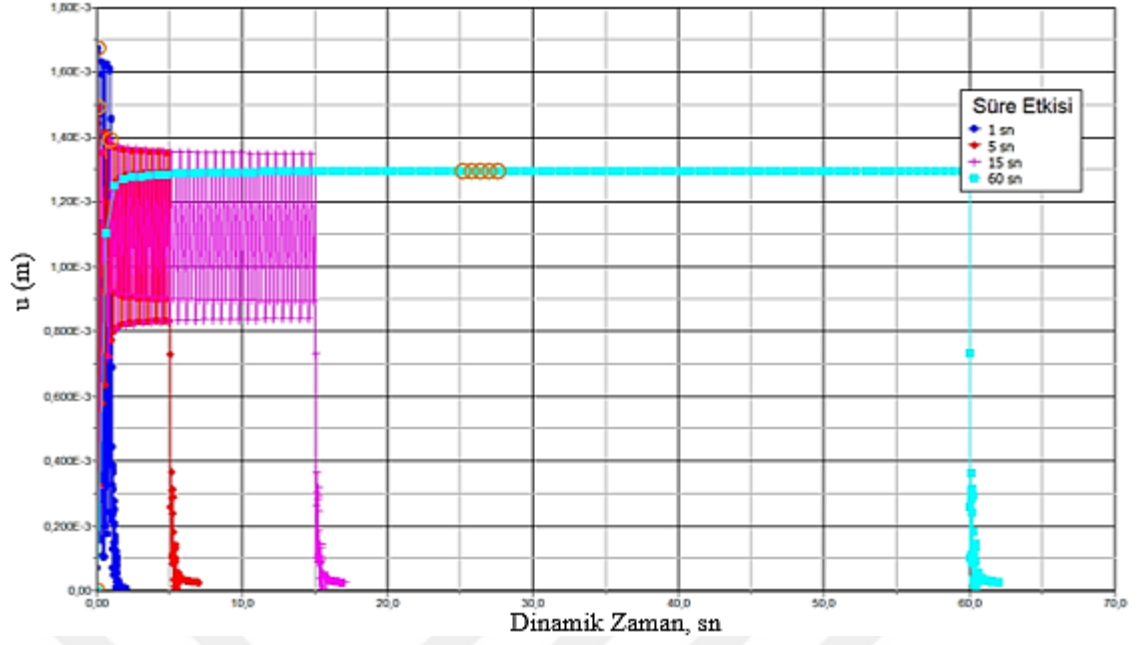
Tablo 5.46. Süre etkisine bağlı olarak elde edilen deplasmanlar

	f Hz	A kPa	Temel Orta Noktası	Temel Köşe Noktası	x=0 m	x=2 m	x=9 m	x=16 m
Yumuşak Zemin-1 sn	5	100	0,00916	0,00906	0,00920	0,00794	0,00403	0,00303
Yumuşak Zemin-5 sn	5	100	0,01400	0,01500	0,01350	0,00120	0,00646	0,00475
Yumuşak Zemin-15 sn	5	100	0,01500	0,01600	0,01400	0,01300	0,00743	0,00554
Yumuşak Zemin-60 sn	5	100	0,01500	0,01500	0,01100	0,01100	0,00731	0,00575
Orta Sert Zemin-1 sn	5	100	0,00322	0,00324	0,00349	0,00284	0,00149	0,00137
Orta Sert Zemin-5 sn	5	100	0,00355	0,00369	0,00338	0,00291	0,00168	0,00158
Orta Sert Zemin-15 sn	5	100	0,00340	0,00352	0,00316	0,00255	0,00162	0,00157
Orta Sert Zemin-60 sn	5	100	0,00332	0,00342	0,00330	0,00231	0,00197	0,00158
Sert Zemin-1 sn	5	100	0,00322	0,00324	0,00349	0,00284	0,00149	0,00137
Sert Zemin-5 sn	5	100	0,00149	0,00145	0,00151	0,00120	0,00042	0,00055
Sert Zemin-15 sn	5	100	0,00139	0,00133	0,01423	0,00116	0,00047	0,00558
Sert Zemin-60 sn	5	100	0,00332	0,00342	0,00330	0,00231	0,00120	0,00194

Şekil 5.151, Şekil 5.152 ve Şekil 5.153’te sırasıyla tek tabaka yumuşak, orta sert ve sert zemin profili ile oluşturulan zemin modellerinde makine çalışma süresinin temel orta noktası deplasmanları üzerindeki etkisi görülmektedir.

Şekil 5.151’de görüldüğü gibi yumuşak zemin profili için en büyük deplasmanların 15 sn süre ile makinenin çalışması durumunda meydana geldiği ve daha uzun sürelerde makinenin çalışmasının bu deplasmanları artırmadığı belirlenmiştir. Şekil 5.152’de orta sert zemin modeli için en büyük deplasmanın 5 sn’de meydana geldiği ve daha büyük çalışma sürelerinde deplasmanların sabit kaldığı belirlenmiştir. Son olarak sert zemin için en büyük deplasman, Şekil 5.153’te görüldüğü gibi makinenin 1 sn çalışması ile yapılan analizlerde elde edilmiştir. Daha uzun çalışma süreleri için deplasmanlar bir miktar azalmış ve sabit kalmıştır. Bu durumda, zemin tabakalarının rijitliğinin artması, makine çalışma süresinin etkisini azalttığı sonucuna varılmıştır. Bu nedenle, saha modelleri bu modellerden daha rijit olarak modellendiği için saha modellerinde süre etkisine bakılmamıştır.





Şekil 5.153. Sert zemin modeli için süre etkisi

6. SONUÇLAR VE ÖNERİLER

Tez çalışması kapsamında, farklı sertlikte kil zeminler üzerine oturan makine temellerinin zeminin dinamik davranışı üzerindeki etkisi araştırılmıştır. Bu amaçla KOSB’nde iki sahada (FMC fabrika sahası ve KOS Atıksu Arıtma Tesisi sahası) ve Selçuk Üniversitesi Kan Merkezi binası sahasında arazi deneyleri yapılmıştır. FMC fabrika sahasında 2 adet sondaj, 2 adet SPT ve 2 adet MASW deneyi yapılmıştır. KOS Atıksu Arıtma Tesisi sahasında 2 adet sondaj, 2 adet MASW ve bir adet mikrotremör deneyi yapılmıştır.

FMC fabrika sahası için sondajlar ile alınan zemin numuneleri ile KOS Atıksu Arıtma Tesisi sahası ve Selçuk Üniversitesi Kan Merkezi binası sahası için mevcut zemin etüt raporlarından zeminin fiziksel özellikleri ve zemin sınıfları belirlenmiştir. Ayrıca FMC fabrika sahası ve KOS Atıksu Arıtma Tesisi sahasında yapılan sondajlar ile alınan zemin numuneleri ile rezonant kolon deneyleri yapılmış ve dinamik zemin parametreleri belirlenmiştir. Rezonant kolon deneyleri ile elde edilen normalize kayma modülü ve sönüm oranı eğrileri literatür eğrileri ile karşılaştırılmış ve bölge zeminini en iyi temsil eden eğriler belirlenmiştir.

FMC fabrika sahası için sondaj esnasında yapılan SPT deney sonuçları ile ve KOS Atıksu Arıtma Tesisi sahası için mevcut zemin etüt raporunda bulunan SPT deneyleri ile literatürde yer alan korelasyonlar kullanılarak zemin tabakalarının dinamik kayma modülü ve kayma dalgası hızı değerleri belirlenmiştir. Kayma modülü değerleri, rezonant kolon deney sonuçları ile karşılaştırılmıştır. SPT deney sonuçları kullanılarak, saha zeminlerinin yerel zemin sınıfları belirlenmiştir.

FMC fabrika sahası ve KOS Atıksu Arıtma Tesisi sahasında yapılan MASW deneyleri ile saha zemininin 30 m derinlik için kayma dalgası hızı değişimi ve ortalama kayma dalgası hızı belirlenmiştir. Zemin tabakalarının yoğunluğu ve kayma dalgası hızı ile kayma modülü değerleri belirlenmiştir. Bu değerler, rezonant kolon ve SPT korelasyonları ile elde edilen değerler ile karşılaştırılmıştır. Ayrıca kayma dalgası hızları ile saha zeminlerinin yerel zemin sınıfları, zemin hâkim periyotları ve büyütme faktörleri belirlenmiştir.

KOS Atıksu Arıtma Tesisi sahasında yapılan mikrotremör deneyi ile saha zemininin zemin hâkim periyodu ve büyütme faktörü belirlenmiştir. Buna bağlı saha zemininin yerel zemin sınıfı belirlenmiştir.

Darbe etkili makinelerin zemin davranışına etkisini araştırmak için KOS Atıksu Arıtma Tesisi sahası ve Selçuk Üniversitesi Kan Merkezi binasının olduğu sahada Instantel Minimate Plus cihazı ile kayıtlar alınmıştır. Bu kayıtlar ile etki noktasından belirli uzaklıklardaki pik parçacık hızı, pik ivme ve pik deplasman değerleri belirlenmiştir. Bu değerler, iki sahanın zemin profili göz önünde bulundurularak karşılaştırılmış ve zemin tabakalarının sertliğine bağlı olarak değişimi belirlenmiştir.

Harmonik yük üreten makinelerin zemin davranışı üzerindeki etkisini araştırmak için PLAXIS 2D sonlu elemanlar programı ile makine-temel-zemin sistemi modellenmiştir. 1. Model olarak FMC fabrika saha zemini, 4 tabakalı olarak Hardening Soil Model bünye modeli ile oluşturulmuştur. Zemin tabakalarının elastisite modülleri rezonant kolon deneyinden elde edilen kayma modülü değerleri ile hesaplanmıştır. Makine çalışma frekansı 5-50 Hz. ve makine çalışma genliği 25-100 kPa arasında değiştirilmiştir. Temel ağırlığı/makine ağırlığı 2,1 ve makinenin çalışması durumunu gösteren hesap aşamasında dinamik analiz süresi 1 sn olarak seçilmiştir. Bu modelde temel gömme derinliği, temel kalınlığı ve temel genişliği değiştirilerek en uygun makine temeli tasarımı yapılmıştır. Ayrıca, belirlenen parametreler ile, makine çalışma frekansı ve genliği değiştirilerek meydana gelen temel deplasmanları ve boşluk suyu basınçları ile zemin yüzeyinde oluşan deplasman ve ivmelerin değişimi belirlenmiştir.

1. Model, belirlenen temel boyutları ve gömme derinliği kullanılarak, en olumsuz yükleme koşulu olan 5 Hz. makine çalışma frekansı için, SPT ve MASW deneyleri ile belirlenen kayma modülü değerlerinden hesaplanan elastisite modülleri ve statik elastisite modülleri ile oluşturulan zemin profilleri ayrı ayrı modellenmiştir. Böylece, saha zeminin rijitliğinin değişmesine bağlı olarak makine dinamik etkisi altında zemin davranışı belirlenmiştir.

2. Model olarak KOS Atıksu Arıtma Tesisi saha zemini 2 tabakalı olarak sadece rezonant kolon deneyinden elde edilen kayma modülü değerleri ile hesaplanan elastisite modülleri kullanılarak modellenmiştir. Temel boyutları, temel gömme derinliği, makine çalışma frekansı ve genliği, temel ağırlığı/makine ağırlığı ve dinamik analiz süresi 1. Model ile aynıdır. Yapılan analizler ile 5 Hz. makine çalışma frekansı için makine çalışma genliğine bağlı olarak meydana gelen temel deplasmanları ve boşluk suyu basınçları ile zemin yüzeyinde oluşan deplasman ve ivmelerin değişimi belirlenmiş ve FMC fabrika sahası analizlerinde elde edilen değerler ile karşılaştırılmıştır.

Son olarak, 3. Modelde harmonik yük oluşturan makineler için oluşturulan makine-temel-zemin sistemi modellemesinde, zemin rijitliklerinin ve tabakalanma

durumunun, zemin davranışına etkisine araştırmak için saha modellemelerine ek olarak yumuşak, orta sert ve sert kil zemin tabakalarından oluşan tek tabakalı ve 3 tabakalı zemin modelleri oluşturulmuştur. Yapılan analizler ile temel deplasmanları ile zemin yüzeyinde oluşan deplasman ve ivmeler belirlenmiş ve karşılaştırılmıştır.

6.1. Sonuçlar

1. Konya Organize Sanayi Bölgesi, FMC fabrika sahasından alınan zemin numuneleri üzerinde yapılan laboratuvar deneyleri ile;
 - 21 m derinlik için doğal su muhtevasının %20 ile %40 arasında değiştiği,
 - Zemin profilinin 0-12 m arasında yüksek plastisiteli kil, CH, 12-15 m arasında killi-siltli kum, SM-SC ve 15-21 m arasında ise düşük plastisiteli kil, CL, zemin tabakalarından oluştuğu,
 - Tüm zemin numuneleri plastik durumdadır ve doğal su muhtevası değerlerinin plastik limite yakın olduğu,
 - 3 m, 6 m ve 9 m derinliklerinden alınan zemin numunelerinin drenajsız kayma mukavemetinin yaklaşık 90 kPa ve drenajsız kohezyon değerinin 45 kPa olduğu ve 21 m derinliğinden alınan zemin numunesinin drenajsız kayma mukavemetinin yaklaşık 60 kPa ve drenajsız kohezyon değerinin 30 kPa olduğu,
 - Kil zeminlerin kıvamının orta sert olduğu belirlenmiştir.
2. Konya Organize Sanayi Bölgesi, KOS Atıksu Arıtma sahasında önceden yapılan sondajlar ile hazırlanan zemin etüt raporundan, saha zemininin;
 - 40 m derinlik için doğal su muhtevasının %20 ile %70 arasında değiştiği,
 - Zemin profilinin, 0-12 m arasında düşük plastisiteli kil (CL), 12-15 m arasında siltli kum (SM), 12-30 m arasında düşük plastisiteli kil (CL) ve 30-40 m arasında CL-SM zemin tabakalarından oluştuğu,
 - Zemin tabakalarının doğal su muhtevasının likit limite daha yakın olduğu belirlenmiştir.
3. Selçuk Üniversitesi Kan Merkezi binası saha zemininin, hâkim zemin sınıfının düşük plastisiteli silt (ML) olduğu ve zemin tabakalarının doğal su muhtevası ise %4 ile %20 arasında değiştiği belirlenmiştir.
4. FMC fabrika sahasından alınan zemin numuneleri ile yapılan rezonant kolon deneylerinden elde edilen kayma modülü ve sönüm oranı değerleri ile normalize

kayma modülü ile sönüm oranı eğrilerinin literatür eğrileri ile karşılaştırılması neticesinde bölge zeminini en iyi yansıtan eğriler Tablo 6.1’de verilmiştir. Bu tabloda görüldüğü gibi kayma modülü artarken, sönüm oranları azalmaktadır. Çünkü sönüm oranı rijitlik ile ilişkilidir ve kayma modülündeki artış zemin rijitliğindeki artışı göstermektedir. Bu nedenle, rijitlikteki artış, sönüm oranında azalmaya neden olmuştur.

- Rezonant kolon deney sonuçlarından bölge zeminin 4 tabakadan oluştuğu belirlenmiştir. Zemin profili en üstte kayma modülü 55 MPa olan bir kil tabakası, onun altında kayma modülü yaklaşık 13 MPa olan bir kil tabakası, hemen altında kayma modülü 36 MPa olan kumlu kil tabakası ve en altta kayma modülü yaklaşık 6 MPa olan kil tabakasından oluşmaktadır.

Tablo 6.1. FMC fabrika sahası için rezonant kolon deneyi sonuçları

Kuyu No - Derinlik, m	G MPa	D % (YGBG)	D % (LA)	G/G _{maks}	D YGBG	D LA
SK1-3	55	3,7	2,2	(Darendeli, 2001), (Sun vd., 1988), (Amir-Faryar vd., 2017)	(Sun vd., 1988), (Darendeli, 2001)	(Sun vd., 1988)
SK1-6	15	4	2	(Vucetic & Dobry, 1991)-I _p =30	(Sun vd., 1988)	(Amir-Faryar vd., 2017)
SK1-9	11	6	7	(Vucetic & Dobry, 1991)-I _p =0	(Vucetic & Dobry, 1991)	(Vucetic & Dobry, 1991)
SK2-12	36	7	6	-	(Vucetic & Dobry, 1991)	(Darendeli, 2001)
SK1-15	-	-	-	-	-	-
SK2-15	-	-	-	-	-	-
SK2-18	5,5	5,5	4	(Sun vd., 1988)	(Amir-Faryar vd., 2017)	(Amir-Faryar vd., 2017)
SK1-21	7	4,5	4,5	(Sun vd., 1988) (Vucetic & Dobry, 1991)-I _p =30	(Sun vd., 1988) (Amir-Faryar vd., 2017)	(Sun vd., 1988) (Amir-Faryar vd., 2017)

- SK2-12 m deney numunesi için yapılan deneyde hem kayma modülü hem de sönüm oranı yüksek elde edilmiştir. Bu zemin numunesi oldukça yumuşak kıvamlı olmasına rağmen içerisinde yüksek miktarda kum ve çakıl

bulunmaktadır. Zemin içerisinde bulunan kum çakıllar nedeniyle kayma modülü değerleri, yumuşak kıvamlı olması nedeniyle sönüm oranı değerleri yüksek elde edilmiştir.

- SK2-15 m rezonant kolon deney numunesi çok yumuşak kıvamlı olduğu için numune deney setine yerleştirilip üst başlık üzerine bağlandıktan sonra numune başlık ağırlığı altında deforme olup göçmüş ve bu derinlik için rezonant kolon deneyi gerçekleştirilememiştir.
 - Literatür eğrileri ile yapılan karşılaştırma neticesinde saha zemin profilinde bulunan kil zemin tabakaları için en uygun eğrilerin (Sun vd., 1988) ve (Vucetic & Dobry, 1991) çalışmalarında elde edilen normalize kayma modülü ve sönüm oranı eğrileri olduğu belirlenmiştir.
5. KOS Atıksu Arıtma Tesisi sahasından alınan zemin numuneleri ile yapılan rezonant kolon deneylerinden elde edilen kayma modülü değerleri ile normalize kayma modülü eğrilerinin literatür eğrileri ile karşılaştırılması neticesinde bölge zeminini en iyi yansıtan eğriler Tablo 6.2’de verilmiştir.

Tablo 6.2. KOS Atıksu Arıtma Tesisi sahası için rezonant kolon deneyi sonuçları

Kuyu No - Derinlik, m	G MPa	G/G _{maks}
SK3-2	6,2	(Vucetic & Dobry, 1991)-I _p =30
SK3-4	10,2	(Vucetic & Dobry, 1991)-I _p =30
SK3-6	14	(Vucetic & Dobry, 1991)-I _p =30
SK3-8	13,8	(Vucetic & Dobry, 1991)-I _p =30
SK4-9	14,3	(Amir-Faryar vd., 2017) (Sun vd., 1988)

- SK4 kuyusu için, 3 m derinlikteki zemin numunesi içerisinde iri jipsler bulunması, 5 ve 7 m derinlikler için ise yeraltı suyu seviyesinin altında olmaları nedeniyle Shelby tüplerinde zemin numunesi çok az olması ve tüp içerisinde çok fazla sıkışmış su bulunması nedeniyle rezonant kolon deney numunesi alınamamıştır. Deney sonuçları değerlendirildiğinde, zemin profilinin 2 tabakalı olduğu ve üst tabakanın kayma modülünün 6 MPa ve alt tabakanın kayma modülünün yaklaşık 13 MPa olduğu belirlenmiştir.
- Bölge zeminini en iyi temsil eden eğrilerin (Vucetic & Dobry, 1991) çalışmasında elde edilen normalize kayma modülü eğrisi olduğu belirlenmiştir.

6. FMC fabrika sahasında yapılan SPT deney sonuçları ile;

- Zemin profilinin 0-6 m arasında katı, 6-12 m arasının orta katı, 12-15 m arasında çok katı ve 15-21 m arasında katı kıvamlı olduğu belirlenmiştir.
- SPT korelasyonları ile elde edilen kayma modülü değerlerinin, rezonant kolon deneyi ile elde edilen değerlerden oldukça büyük olduğu belirlenmiştir. Bu durum (Okur & Ansal, 2009) tarafından yapılan çalışmada belirtildiği gibi, deney numunesi hazırlama aşamasında zemin numunesinin örselenmesine ve deney esnasında numuneye uygulanan sınır şartlarına bağlanmıştır.
- (TBDY, 2018)'e göre SPT deney sonuçları ile saha zeminin yerel zemin sınıfı ZE olarak belirlenmiştir.

7. KOS Atıksu Arıtma Tesisi sahası için hazırlanmış mevcut zemin etüt raporunda yer alan SPT deney sonuçları ile;

- Zemin profilinin, 0-4,5 m arasında orta katı, 4,5-9 m arasında katı, 9-10,5 m arasında çok katı ve 10,5-13,5 m arasında orta katı kıvamlı kil zeminler olduğu belirlenmiştir.
- (TBDY, 2018)'e göre SPT deney sonuçları ile saha zeminin yerel zemin sınıfı ZE olarak belirlenmiştir.

8. FMC fabrika sahasında yapılan MASW deney sonuçları ile;

- 1. Serim için kayma dalgası hızının, 0-7 m arası için ortalama 156 m/sn ve 7-16 m arası için ortalama 170 m/sn ve 16-30 m arası için ortalama 180 m/sn olduğu ve 30 m derinlik için ortalama kayma dalgası hızının 171 m/sn olduğu belirlenmiştir.
- 2. Serim için kayma dalgası hızının, 0-9 m arası için 149 m/sn, 9-16 m arası için 170 m/sn ve 16-30 m arası için 180 m/sn olduğu ve 30 m derinlik için elde edilen ortalama kayma dalgası hızının 156 m/sn olduğu belirlenmiştir.
- (TBDY, 2018)'e göre MASW deneyi ile elde edilen kayma dalgası hızlarından saha zeminin yerel zemin sınıfı ZE olarak belirlenmiştir.
- Zemin hâkim periyodunun 1. Serim için 0,499 sn ve 2. Serim için 0,535 sn olduğu ve zemin büyütme katsayısının 1. Serim için 3,14 ve 2. Serim için 3,27 olduğu belirlenmiştir.
- Rezonant kolon deneyi ile elde edilen kayma modülü değerleri ile SPT ve MASW arazi deneyleri sonuçları ile elde edilen kayma modülü değerlerinin

karşılaştırılması neticesinde, en yüksek kayma modülü değerlerinin SPT korelasyonları ile elde edildiği belirlenmiştir.

9. KOS Atıksu Arıtma Tesisi sahasında yapılan MASW deney sonuçları ile;

- 1. Serim için kayma dalgası hızının, 0-12 m arasında 162 m/sn ve 12-30 m arasında 185 m/sn olduğu ve 30 m derinlik için ortalama kayma dalgası hızının 174,9 m/sn olduğu belirlenmiştir.
- 2. Serim için kayma dalgası hızının, 0-2 m arasında 190 m/sn, 2-12 m arasında 269 m/sn ve 12-30 m arasında 296 m/sn olduğu ve 30 m derinlik için ortalama kayma dalgası hızının 277,6 m/sn olduğu belirlenmiştir.
- (TBDY, 2018)'e göre yerel zemin sınıfının 1. Serim için ZE ve 2. Serim için ZD olduğu belirlenmiştir.
- Zemin hâkim periyodu 1. Serim için 0,686 sn ve 2. Serim için 0,432 sn olarak belirlenmiştir. Bu durum, kayma dalgası hızının daha düşük olduğu yumuşak zeminlerde zemin hâkim periyodunun daha büyük olması ile açıklanabilir.
- Zemin büyütme katsayısı ise 1. Serim için 3,07 ve 2. Serim için 2,32 olarak belirlenmiştir. Yani, kayma dalgası hızı azaldıkça, zemin büyütme katsayısı artmıştır. Bu durum ise, yumuşak zeminlerin büyütme katsayısının daha büyük olduğunu göstermektedir.
- Rezonant kolon deneyi, SPT ve MASW arazi deneyleri ile elde edilen kayma modülü değerleri ile karşılaştırıldığında, en yüksek kayma modülü değerlerinin MASW 2. Serim deneyi ile elde edildiği belirlenmiştir.

10. KOS Atıksu Arıtma Tesisi sahasında yapılan mikrotremör deney sonucu ile;

- Zemin hâkim periyodu 0,385 sn olarak belirlenmiştir.
- (TBDY, 2018)'e göre yerel zemin sınıfı ZD olarak belirlenmiştir.
- Zemin büyütme katsayısı ise 2,17 olarak belirlenmiştir.

11. KOS Atıksu Arıtma Tesisi sahası ve Selçuk Üniversitesi Kan Merkezi binası sahasında yapılan Instantel Mimate Plus ölçümleri ile;

- Etki noktasından uzaklık arttıkça pik parçacık hızı, pik ivme ve pik deplasman değerlerinin azaldığı,
- Dinamik etki yük arttıkça, aynı ölçüm noktası için pik parçacık hızı, pik ivme ve pik deplasman değerlerinin arttığı,
- KOS Atıksu Arıtma Tesisinin bulunduğu saha daha yumuşak kil zemin tabakalarından oluştuğu için daha büyük hız, ivme ve deplasman değerleri

meydana geldiği, ancak oluşan bu hız, ivme ve deplasman değerlerinin etki noktasına daha yakın bir mesafede sönümlendiği belirlenmiştir.

- Deney sonuçlarından, yumuşak kil zemin profili üzerine oturan darbe etkili makinelerinin, zemin içerisinde oluşturduğu etkinin büyük olduğu, ancak bu etkinin etki noktasına daha yakın bir mesafede sönümleneceği, aksine sert kil zeminde oluşan etkinin daha küçük olduğu, ancak bu etkinin daha uzun mesafede sönümleneceği belirlenmiştir.

12. FMC fabrika sahasında oluşturulan makine-temel-zemin sisteminin PLAXIS 2D sonlu elemanlar programında modellenmesi ile;

- Saha zemini için yapılan temel tasarımında, en uygun temel genişliği 3 m, temel gömme derinliği 3 m ve temel kalınlığı 1 m olarak belirlenmiştir.
- Makine çalışma genişliğinin artması ile temel deplasmanlarının arttığı ve tüm frekanslar için, en büyük deplasmanların 100 kPa makine çalışma genişliğinde meydana geldiği belirlenmiştir.
- Ancak makine çalışma frekansının artması ile deplasmanların azaldığı belirlenmiştir. Bu durum, düşük frekanslı dalgaların daha derin zemin tabakalarında yayıldığı, yüksek frekanslı dalgaların ise yüzeye yakın yayıldığı ile açıklanabilir (Balkan, 2007). Bu nedenle düşük frekanslarda daha büyük deplasmanlar meydana gelmiştir. Tüm makine çalışma frekansı ve genişliği için elde edilen temel deplasmanları incelendiğinde en büyük deplasmanları 5 Hz. makine çalışma frekansında meydana geldiği belirlenmiştir.
- Temel köşe noktasından uzaklaştıkça deplasmanların hızlı bir şekilde azaldığı belirlenmiştir. Bu durum, dinamik etki sonucunda zemin içinde oluşan dalga genliklerinin, zeminin sönümü nedeniyle küçüldüğünü göstermektedir. Aynı şekilde ivme değerleri de deplasmanlarla uyumlu bir şekilde temel köşe noktasından uzaklaştıkça hızlı bir şekilde azaldığı ve 9 m'den sonra 0,05g'nin altına düştüğü belirlenmiştir.
- 100 kPa makine çalışma genişliği için elde edilen, aşırı boşluk suyu basınçlarının 5, 10, 20 ve 30 Hz. için 50-60 kPa civarında olduğu, 30 Hz.ten 40 Hz.e geçişte aşırı boşluk suyu basıncı %70 oranında azaldığı belirlenmiştir. Bu durum, yine düşük frekanslı dalgaların daha derin zemin tabakalarında yayılması, yüksek frekanslı dalgaların ise yüzeye yakın yayılması ile açıklanabilir.

- Makine çalışma genliği arttıkça aşırı boşluk suyu basınçları arttığı ve makine çalışma genliğinin 25 kPa'dan 100 kPa'a artması durumunda, aşırı boşluk suyu basıncı 2,5 kat arttığı belirlenmiştir.
- SPT deneyi ve MASW deneyinden elde edilen kayma modülü değerleri ile belirlenen elastisite modülleri ve statik elastisite modülleri kullanılarak oluşturulan modellerle karşılaştırıldığında, en yüksek deplasmanların statik elastisite modülleri kullanılarak yapılan analizlerde elde edildiği belirlenmiştir. Çünkü, bu modelde zemin tabakaları en düşük rijitliğe sahiptir.
- Rezonant kolon ve arazi deneyleri ile elde zemin parametreleri kullanılarak oluşturulan modellerde elde edilen ivme değerlerinin birbirine oldukça yakın olduğu ve statik parametreler kullanılarak oluşturulan modelde ise ivmelerin en büyük olduğu belirlenmiştir. Bu durum yine zemin rijitlikleri arasındaki farkla ilişkilidir. Statik parametreler kullanılarak oluşturulan model, diğer modellere kıyasla oldukça zayıftır. Bu nedenle statik parametreler ile oluşturulan model diğer modellere kıyasla yumuşak zemin davranışı göstermektedir. İvmeler ve deplasmanlar oldukça büyümektedir. Aynı zamanda, temel köşe noktasında elde edilen ivmeler ile 27 m uzakta elde edilen ivme değerleri karşılaştırıldığında, en büyük azalmanın, %90 azalma ile statik parametreler ile oluşturulan modelde olduğu belirlenmiştir. Bu durum ise, yumuşak zeminlerin sönüm oranının yüksek olması ile açıklanabilir.

13. KOS Atıksu Arıtma sahasında oluşturulan makine-temel-zemin sisteminin PLAXIS 2D sonlu elemanlar programında modellenmesi ile;

- KOS Atıksu Arıtma Tesisi saha zemini, FMC fabrika saha zemini ile karşılaştırıldığında, saha zemin profili daha küçük elastisite modülleri kullanılarak modellenmiştir. Bu nedenle KOS Atıksu Arıtma Tesisi saha zemini ile oluşturulan modellerde daha büyük deplasmanların meydana geldiği belirlenmiştir. Temel orta noktası ve köşe noktasında meydana gelen deplasmanların, FMC fabrika saha analizlerinde elde edilen deplasmanların 1,2 katı olduğu, temel köşe noktası hizasında zemin yüzeyinde elde edilen deplasmanların ise 26 kat büyük olduğu belirlenmiştir.
- KOS Atıksu Arıtma Tesisi saha zemini ile yapılan analizlerde elde edilen ivme değerleri, FMC fabrika sahası analizleri ile karşılaştırıldığında temel orta ve köşe noktasında elde edilen ivmelerin 3 kat arttığı ve temel köşe noktası hizasında

zemin yüzeyinde oluşan ivmelerin 4 kat arttığı belirlenmiştir. Bu durum, yumuşak kil zeminlerde oluşan dinamik etkilerin daha büyük olduğunu göstermektedir.

- KOS Atıksu Arıtma Tesisleri saha zemini daha yumuşak kil zemin olduğundan dolayı, yük etkisi ile oluşan aşırı boşluk suyu basınçlarının tüm genlikler için daha büyük olduğu belirlenmiştir. Örneğin 100 kPa makine çalışma genliği için elde edilen aşırı boşluk suyu basınçları FMC fabrika sahası analizleri ile karşılaştırıldığında ile yapılan modellemelerden elde edilen sonuçlar karşılaştırıldığında, aşırı boşluk suyu basınçlarının KOS Atıksu Arıtma Tesisleri için yapılan analizlerde %42 arttığı belirlenmiştir.
 - KOS Atıksu Arıtma Tesisleri saha profili değerlendirildiğinde üst tabakanın alt tabakadan daha düşük rijitlik değerlerine sahip olduğu belirlenmiştir. Bu nedenle saha zemin profili ile oluşturulan analizlerde yatay doğrultuya ek olarak düşey doğrultudaki ivme değişimleri incelenmiştir. Yapılan analizler ile, tüm genlik değerleri için temel taban seviyesinde meydana gelen ivmelerin, zemin yüzeyinde oluşan ivmelerden daha küçük olduğu belirlenmiştir. En fazla ivme artışının ise %67 artış ile 25 kPa genlik değerinde meydana geldiği belirlenmiştir. Bu durum yumuşak kil zeminlerin büyütme etkisinin bir göstergesidir.
- 14. Zemin tabakalanma durumunun, zemin davranışına etkisine araştırmak için zemin kıvamına bağlı olarak literatürde yer alan elastisite modülleri kullanılarak PLAXIS 2D sonlu elemanında oluşturulan modeller ile;**
- Tek tabakalı modeller için zemin rijitliğinin artması ile temel orta noktasında meydana gelen deplasman ve ivme değerlerinin azaldığı belirlenmiştir. En büyük deplasman ve ivme değerlerinin yumuşak kil zemin profilinde meydana geldiği belirlenmiştir.
 - 100 kPa makine çalışma genliği için, yumuşak kil zeminde meydana gelen temel orta noktası deplasmanın, orta sert kil zeminde meydana gelen deplasmanın 2,8 katı olduğu, sert kil zeminde meydana gelen deplasmanın ise 5,5 katı olduğu belirlenmiştir.
 - 100 kPa makine çalışma genliği için, yumuşak kil zeminde temel orta noktasında meydana gelen ivme değerlerinin ise, orta sert kil zeminde meydana gelen ivmenin yaklaşık 2,0 katı ve sert kil zeminde meydana gelen ivmenin yaklaşık 3,2 katı olduğu belirlenmiştir.

- Dinamik yük genliğine bağlı olarak zemin yüzeyinde meydana gelen en büyük deplasman ve ivme değerlerinin yumuşak kil zeminde geldiği ve bu etkilerin sönümlenmesinin yumuşak kil zeminde büyük olduğu belirlenmiştir. Temel köşe noktasından 27 m uzakta zemin yüzeyinde oluşan deplasman, temel köşe noktası hizasında zemin yüzeyinde oluşan deplasman değeri ile karşılaştırıldığında, yumuşak kil zeminde %85, orta sert kil zeminde %75 ve sert kil zeminde %74 azalma meydana geldiği, zemin yüzeyinde oluşan ivme değerlerinin ise yumuşak kil zeminde %90, orta sert kil zeminde %80 ve sert kil zeminde %75 azaldığı belirlenmiştir.
- Zemin tabakaları arasındaki rijitlik farkının, zemin davranışı üzerindeki etkisini araştırmak için 3 tabakalı zemin profilleri oluşturulmuş ve en büyük deplasman ve ivme değerlerinin yumuşak-orta katı-katı kil zemin tabakalarından oluşan zemin profilinde meydana geldiği belirlenmiştir.
- Yumuşak kil zemin tabakası ile oluşturulan zemin profili kombinasyonları incelendiğinde, tek tabaka yumuşak kil zemin profilinde meydana gelen deplasmanların, yumuşak kil zemin altında orta sert kil zemin bulunması durumunda %28 ve sert kil zemin tabakası bulunması durumunda %69 azaldığı, ivme değerlerinin ise, yumuşak kil zemin altından orta sert kil zemin bulunması durumunda %6 ve sert kil zemin tabakası bulunması durumunda %30 azaldığı belirlenmiştir.
- Orta sert kil zemin tabakası ile oluşturulan zemin profili kombinasyonları incelendiğinde, tek tabaka orta sert kil zemin profilinde meydana gelen deplasmanların, orta sert kil zemin altında yumuşak kil zemin bulunması durumunda %29 artarken, sert kil zemin tabakası bulunması durumunda %34 azaldığı, ivme değerlerinin ise, orta sert kil zemin altında yumuşak kil zemin bulunması durumunda %20 artarken, sert kil zemin tabakası bulunması durumunda %19 azaldığı belirlenmiştir. Bu model karşılaştırması ile, yumuşak kil zeminlerin dinamik etkiyi büyüttüğü belirlenmiştir.
- Sert kil zemin tabakası ile oluşturulan zemin profili kombinasyonları incelendiğinde, tek tabaka sert kil zemin profilinde meydana gelen deplasmanların, sert kil zemin altında yumuşak kil zemin bulunması durumunda %100 artarken, orta sert kil zemin tabakası bulunması durumunda %55 arttığı ve ivme değerlerinin ise, sert kil zemin altında yumuşak kil zemin bulunması

durumunda %58 artarken, orta sert kil zemin tabakası bulunması durumunda %16 arttığı belirlenmiştir. Bu model karşılaştırması ile, zemin tabakaları arasındaki rijitlik farkının büyük olması durumunda, yumuşak kil zeminlerin dinamik etkiyi daha fazla büyüttüğü belirlenmiştir.

- Makine çalışma süresinin, zemin sertliğine bağlı olarak temel deplasmanları üzerindeki etkisini araştırmak için tek tabakalı yumuşak, orta sert ve sert zemin profili ile oluşturulan modellerden, zemin rijitliğinin artması ile makine çalışma süresinin etkisinin azaldığı belirlenmiştir. Yumuşak kil zemin profili için en büyük deplasmanların 15 sn makine çalışma süresi analizinde meydana geldiği, orta sert zeminde en büyük deplasmanın 5 sn makine çalışma süresi analizinde meydana geldiği ve son olarak sert zemin için en büyük deplasmanın makinenin 1 sn çalışması ile yapılan analizlerde meydana geldiği belirlenmiştir.

Tez çalışmasında elde edilen sonuçlar genel olarak değerlendirildiğinde, Konya Organize Sanayi Bölgesinde yer alan KOS Atıksu Arıtma Tesisi zemin profilinin, FMC fabrika saha zemin profilinden daha düşük sertlikte olduğu belirlenmiştir. Buna bağlı olarak rezonant kolon deneyi ile elde edilen kayma modülü değerlerinin daha düşük olduğu ve SPT deneyleri sonucunda iki saha zeminin yerel zemin sınıfının ZE olduğu belirlenmiştir. MASW arazi deneyi ile elde edilen sonuçların değerlendirilmesi neticesinde, zemin büyütme katsayılarının iki saha için birbirine yakın olması ile beraber FMC fabrika sahası için elde edilen değerleri bir miktar daha büyük olduğu belirlenmiştir.

PLAXIS 2D sonlu elemanlar programında iki saha zemin profilinin rezonant kolon deneylerinden elde edilen kayma modülü değerleri göz önünde bulundurularak yapılan modellemelerde, KOS Atıksu Arıtma Tesisi sahası modellemelerin daha büyük ivme ve deplasmanların meydana geldiği belirlenmiştir. Bu durum KOS Atıksu Arıtma Tesisi saha zeminin daha yumuşak kil zemin davranışı göstermesinden dolayı, dinamik etkileri büyütmesi ile açıklanabilir.

Yine PLAXIS 2D sonlu elemanlar programı ile farklı sertlikte kil zemin tabakaları ile oluşturulan zemin modelleri ile yapılan analizlerde de, zemin profilinde dinamik etkiye yakın bir derinlikte yumuşak zemin bulunması durumunda dinamik etki neticesinde zemin içerisinde oluşan deplasman ve ivmelerin oldukça büyüdüğü, ancak bu değerlerin zemin sönümünden kaynaklı aynı uzaklıklar için daha fazla azaldığı belirlenmiştir. Bu durum saha analizleri ile tutarlı olup, yumuşak kil zeminlerin zemin büyütmesini açık bir şekilde ortaya koymuştur.

Aynı zemin büyütme etkisi, darbe etkili makineleri temsil etmek amacıyla yapılan InstanTel Minimate Plus ölçümlerinde de görülmektedir. KOS Atıksu Arıtma Tesisi saha zemini, Selçuk Üniversitesi Kan Merkezi binası saha zemini ile karşılaştırıldığında KOS Atıksu Arıtma Tesisi saha zemininin daha yumuşak kıvamlı olduğu belirlenmiştir. Buna bağlı olarak, iki sahada yapılan ölçümlerde, KOS Atıksu Arıtma Tesisi sahasında daha büyük parçacık hızı, ivme ve deplasman değerleri meydana gelirken, ölçüm alınabilen yatay mesafe en fazla 18 m olmuştur. Ancak Selçuk Üniversitesi Kan Merkezi binası bölgesinde yapılan ölçümlerde daha düşük parçacık hızı, ivme ve deplasman değerleri meydana gelirken, ölçüm alınabilen yatay mesafe 22,5 m'yi aşmıştır.

Sonuç olarak, zemin profilinde yumuşak kil zemin tabakalarının bulunması durumunda harmonik yük üreten ve darbe etkili makineler tarafından oluşturulan dinamik etkiler neticesinde, yumuşak kil zeminlerde oluşan dalga boyu genliklerinin büyük olması ve dalga hızının küçük olması nedeniyle, titreşimler daha rahatsız edici ve uzun süreli hissedilmekle beraber, zemin içerisinde oluşan deplasmanlar ve ivmeler ciddi oranda artmaktadır. Zemin içerisinde oluşan bu deplasman ve ivme değerleri etkiden uzaklaştıkça zemin sönümünden kaynaklı küçülmekle beraber, etkinin büyüklüğüne bağlı olarak uzun mesafelere yayılabilmektedir. Buna bağlı olarak, makine temelinin bulunduğu yapı, çevre zemini ve çevre yapılar bu dinamik etkilere maruz kalmakta ve etki büyüklüğüne bağlı olarak hasar görebilmektedir. Bu nedenle makine temellerinin tasarımında zemin profili detaylı olarak araştırılmalı, zemin tabakalarının dinamik zemin parametreleri doğru bir şekilde belirlenmeli ve sonlu elemanlar programları ile analizleri gerçekleştirilmelidir. Böylece dinamik etkiye bağlı olarak temel altında ve zemin içerisinde oluşan deplasman, ivme ve boşluk suyu basınçları doğru olarak belirlenip, olası hasarların önüne geçilebilmesi için gerekli önlemlerin alınması sağlanacaktır.

6.2. Öneriler

Tez çalışması kapsamında yapılan çalışmalar göz önünde bulundurulduğunda yapılabilecek öneriler şöyle sıralanabilir.

- Araştırılan dinamik yük göz önünde bulundurularak zemin tabakalarının dinamik kayma modülü ve sönüm oranı değerleri farklı laboratuvar deneyleri ile belirlenerek, daha geniş kayma birim deformasyon aralığı için elde edilebilir.
- Sahada yapılan sondaj ve arazi deneyleri sayısı ve türü artırılarak zemin profili için daha detaylı bilgiler elde edilebilir.

- Farklı sertlikte kil zeminlerin dinamik etkiler altındaki zemin davranışını belirlemek için daha fazla saha üzerinde deneyler yapıp sonlu elemanlar programları ile modellenmesi sayesinde daha geniş sertlik aralığı için zemin davranışı belirlenebilir.
- Sonlu elemanlar programları ile yapılan modellemelerde farklı bünye modelleri ile analizler yapılarak, kil zeminin farklı davranışları değerlendirilebilir.
- Farklı zemin bünye modelleri için zemin parametreleri laboratuvar ortamında belirlenerek ve sonlu elemanlar programı ile yapılan analiz sonuçları laboratuvar deney sonuçları ile karşılaştırılabilir.
- Dinamik etki sonucunda oluşan dalgaların etkisinin azaltılması için sönümleyiciler ve bariyerler araştırılabilir.



KAYNAKLAR

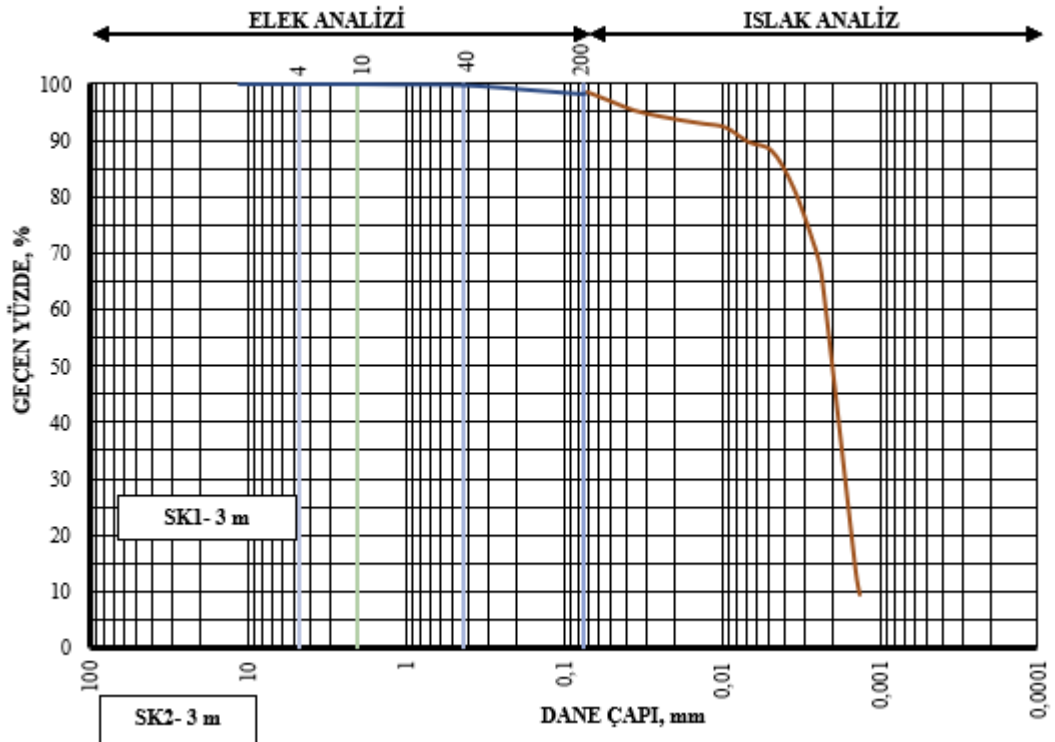
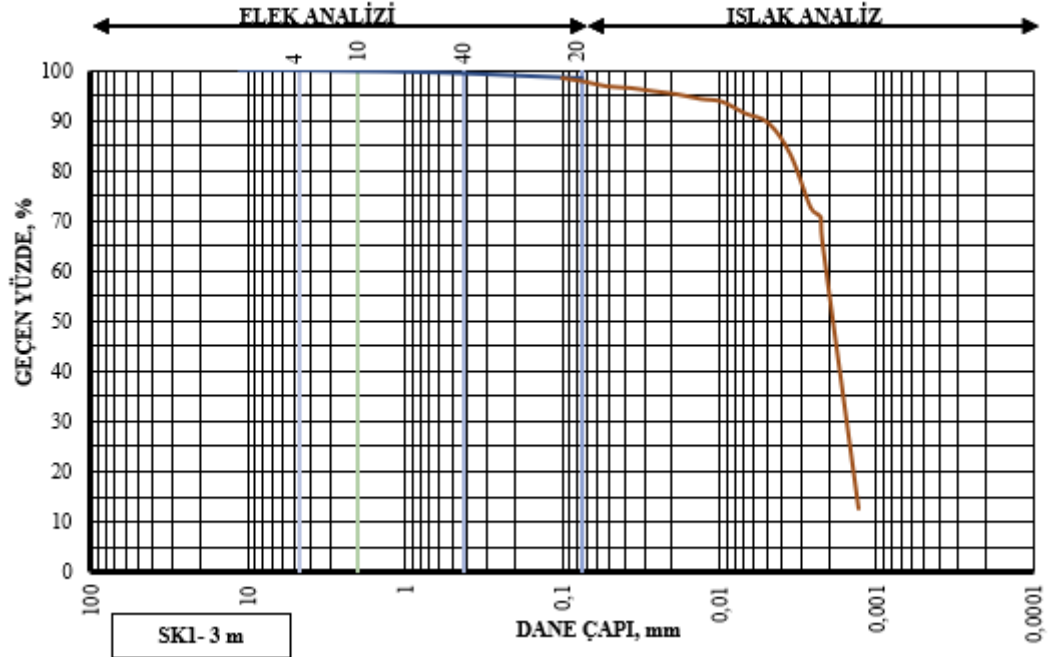
- Abbo, A. J., Lyamin, A. V., Sloan, S. W., & Hambleton, J. P. (2011). A C2 continuous approximation to the Mohr–Coulomb yield surface. *International Journal of Solids and Structures*, 48(21), 3001-3010.
<https://doi.org/10.1016/J.IJSOLSTR.2011.06.021>
- AFAD. (2018). *Türkiye deprem tehlike haritası*. <https://www.afad.gov.tr/turkiye-deprem-tehlike-haritasi>.
- Al-Helo, K. H. I. (2015). Dynamic behaviour of machine foundation on two-layer soil system. *Journal of Engineering and Development*, 19(1).
- Amir-Faryar, B., Aggour, M. S., & McCuen, R. H. (2017). Universal model forms for predicting the shear modulus and material damping of soils. *Geomechanics and Geoengineering*, 12(1), 60-71. <https://doi.org/10.1080/17486025.2016.1162332>
- ASTM-D422 (63). (2002). *Standard test method for particle-size analysis of soils*.
- ASTM-D854 (02). (2002). *Specific gravity of soil solids by water pycnometer*.
- ASTM-D1586. (2022). *Standart test method for Standard Penetration Test (SPT) and split-barrel sampling of soils*.
- ASTM-D2487 (06). (2008). *Standard practice for classification of soils for engineering purposes (Unified Soil Classification System)*. www.astm.org,
- ASTM-D3999(91). (1996). Standard test methods for the determination of the modulus and damping properties of soils using the cyclic triaxial apparatus. *İçinde ASTM International*.
- ASTM-D4015(92). (2000). Standard test methods for modulus and damping of soils by the resonant-column method. *İçinde ASTM International (ASTM-D4015 (92))*.
- ASTM-D4318 (10). (2010). *Standard test methods for liquid limit, plastic limit, and plasticity index of soils*. <https://doi.org/10.1520/D4318-10E01>
- ASTM-D5311. (2011). Standard test method for load controlled cyclic triaxial strength of soil. *İçinde ASTM International*.
- ASTM-D7928 (16). (2017). *Standard test method for particle-size distribution (gradation) of fine-grained soils using the sedimentation (hydrometer) analysis*. <https://doi.org/10.1520/D7928-16E01>
- Balkan, Ü. (2007). *Harmonik cisim dalgalarının zemin ortamında sönümlenmesi* [Yüksek Lisans Tezi]. Sakarya Üniversitesi/ Fen Bilimleri Enstitüsü.
- Barkan, D. D. (1962). *Dynamics of bases and foundation* (McGraw Hill, Ed.).
- Bhandari, P. K., & Sengupta, A. (2014). Dynamic analysis of machine foundation. *International Journal of Innovative Research in Science, Engineering and Technology*, 3.
- Bowles, J. E. (1997). *Foundation analysis and design* (The McGraw Hill Companies, Ed.; 5th Edition).
- Bratosin, D., & Sireteanu, T. (2002). Hysteretic damping modelling by Kelvin-Voigt model. *Publishing of The Romanian Academy*, 3(3).
- ConeTec. (2023). *Sismik Yöntemler*. <https://www.conetec.com/fr/services/essais-g%C3%A9ophysiques/dst-cst>.
- Darendeli, M. B. (2001). *Development of a new family of normalized modulus reduction and material damping curves* [Degree of Doctor of Philosophy]. The University of Texas.
- Das, B. M., & Ramana, G. V. (2011). *Principles of soil dynamics* (Second Edition). Cengage Learning.
- Encyclopedia Britannica Company. (2018). *Seismic Wave*. <https://www.britannica.com/>.

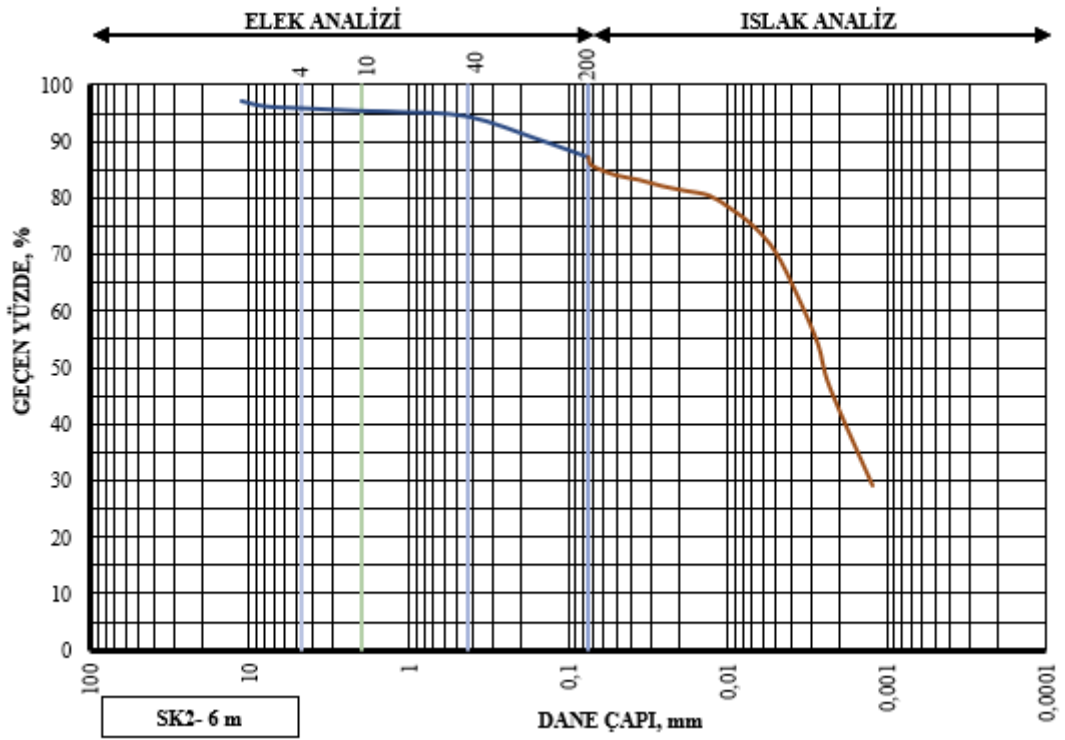
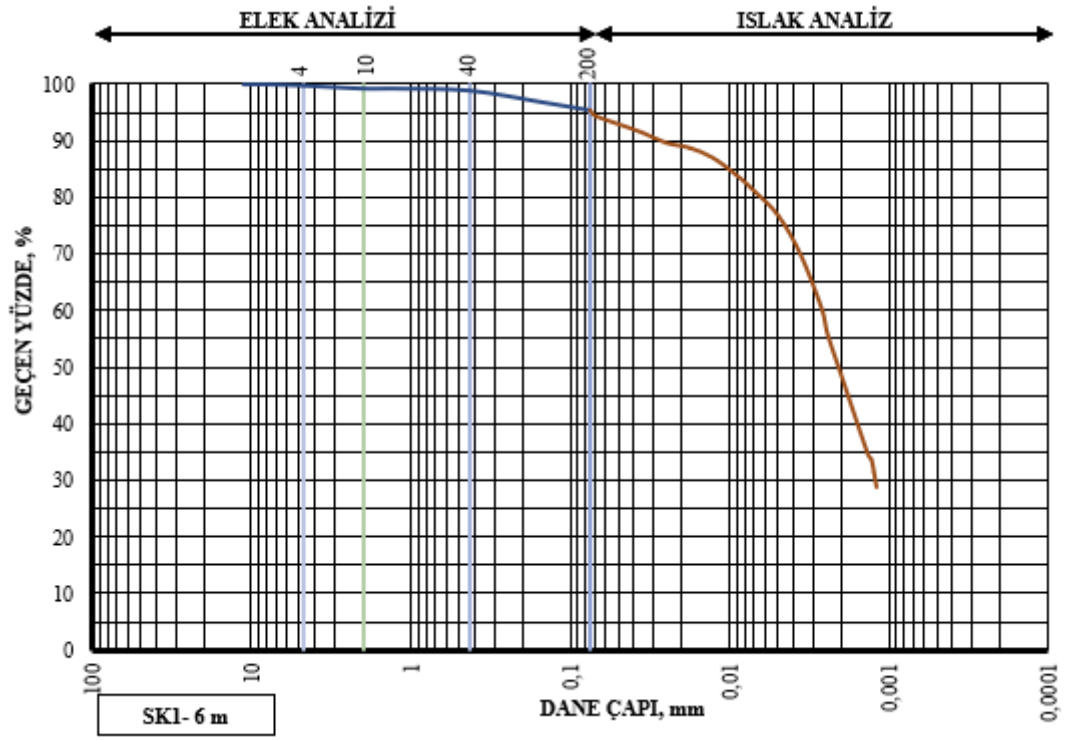
- Gazetas, G. (1983). Analysis of machine foundation vibrations: state of the art. *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, 2(1).
- Ghiloufi, D. (2020). *Faklı zeminlerin yer titreşim dalgalarının yayılım mekanizması üzerindeki etkilerinin incelenmesi* [Yüksek Lisans Tezi]. Konya Teknik Üniversitesi.
- Görgün, B. (2018). *Kil zeminlerin dinamik davranışının belirlenmesi* [Doktora Tezi]. Bilecik Şeyh Edebali Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü.
- Güler, E. (2021). *Zeminlerin dinamik özelliklerinin deneysel olarak belirlenmesi ve zemin büyütme analizlerinin yapılması* [Doktora Tezi]. Eskişehir Osmangazi Üniversitesi.
- Güler, E., & Afacan, K. B. (2020). Evaluation of dynamic properties of sands with low deformation levels determined by resonant column test. *El-Cezeri Journal of Science and Engineering*, 7(2), 572-580. <https://doi.org/10.31202/ecjse.678440>
- Hardin, B. O., & Black, W. L. (1968). Vibration modulus of normally consolidated clay. *Journal of the Soil Mechanics and Foundations Division*, 94(2), 353-369. <https://doi.org/10.1061/JSFEAQ.0001100>
- Hardin, B. O., & Drnevich, V. P. (1972a). Shear modulus and damping in soils: Design equations and curves. *Journal of the Soil Mechanics and Foundations Division*, 98(7), 667-692. <https://doi.org/10.1061/JSFEAQ.0001760>
- Hardin, B. O., & Drnevich, V. P. (1972b). Shear modulus and damping in soils: Measurement and parameter effects. *Journal of the Soil Mechanics and Foundations Division*, 98(6), 603-624. <https://doi.org/10.1061/JSFEAQ.0001756>
- Holtz, R. D., Kovacs, W. D., & Sheahan, T. C. (2011). *An introduction to geotechnical engineering* (3rd bs). Pearson Education.
- Ishibashi, İ., & Zhang, X. (1993). Unified dynamic shear moduli and damping ratios of sand and clay. *Soils and Foundations*, 33(1), 182-191.
- In-Situ Engineering. (2018). *P-S Suspension Logging*. <https://www.insituengineering.com/p-s-suspension-logging>.
- Ishihara, K. (1996). *Soil behaviour in earthquake geotechnics*. Clarendon Press.
- İşkodra, E. (2008). *Dinamik yükler altındaki temellerin tasarımı* [Yüksek Lisans Tezi]. İstanbul Teknik Üniversitesi/Fen Bilimleri Enstitüsü.
- Kagawa, T. (1992). Moduli and damping factors of soft marine clays. *Journal of Geotechnical Engineering*, 118(9), 1360-1375. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)0733-9410\(1992\)118:9\(1360\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)0733-9410(1992)118:9(1360))
- Kayacı, S., Silahtar, A., & Dolmaz, M. N. (2018). Çok kanallı yüzey dalgası analiz yöntemi (MASW) ile zemin özellikleri ve sıvılaşma potansiyelinin belirlenmesi: Arifiye-Sakarya Örneği : *Sakarya Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Dergisi*, 22(2), 450-458.
- Kayalı, S. (2008). *Tekrarlı yükler altında killerin mukavemeti* [Yüksek Lisans Tezi]. İstanbul Teknik Üniversitesi.
- Kengil, O. (2008). *Elasto-plastik zemin davranışı için mekanik parametrelerin laboratuvar deneyleri ile ele edilmesi* [Yüksek Lisans Tezi]. Yıldız Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü.
- Korkmaz, T. (2012). *Zemin iyileştirmesinin hakim titreşim periyodu ve zemin büyütme katsayısına etkisi* [Yüksek Lisans Tezi]. Pamukkale Üniversitesi, Fen bilimleri Enstitüsü.
- Kramer, S. L. (1996). *Geotechnical Earthquake Engineering* (W. J. Hall, Ed.). Prentice-Hall.
- Laman, M., Yıldız, A., Örnek, M., & Demir, A. (2007). Zeminlerin mekanik davranışının modellenmesi. *XV. Ulusal Mekanik Kongresi, Isparta/Türkiye*.

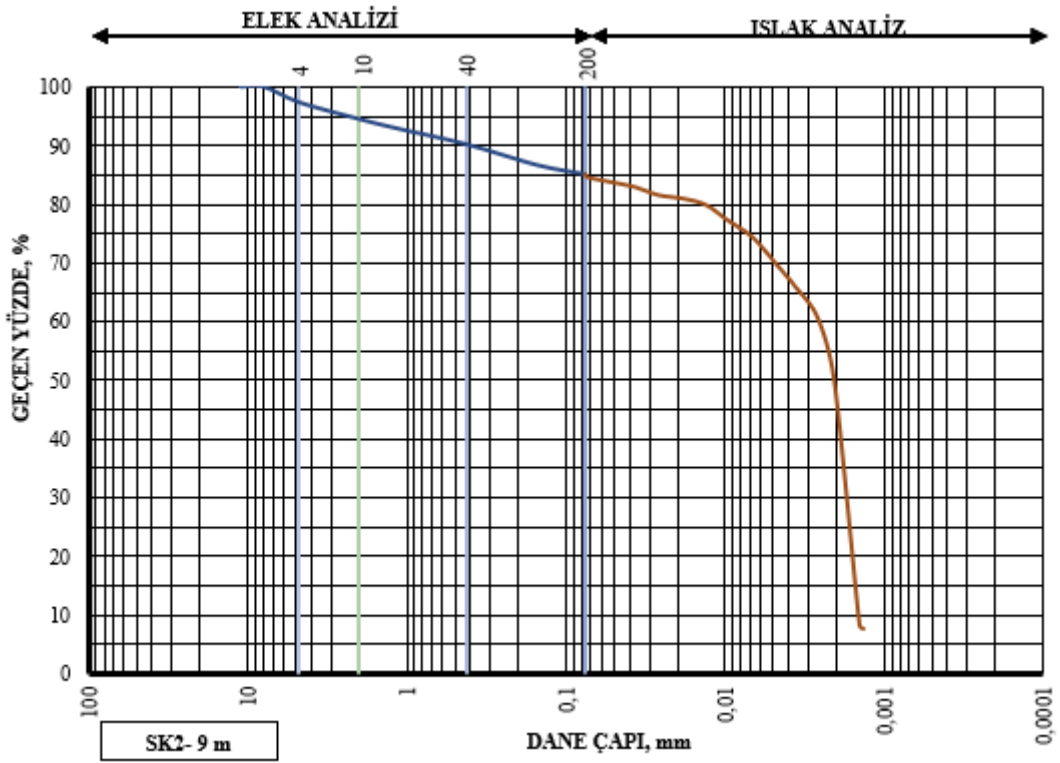
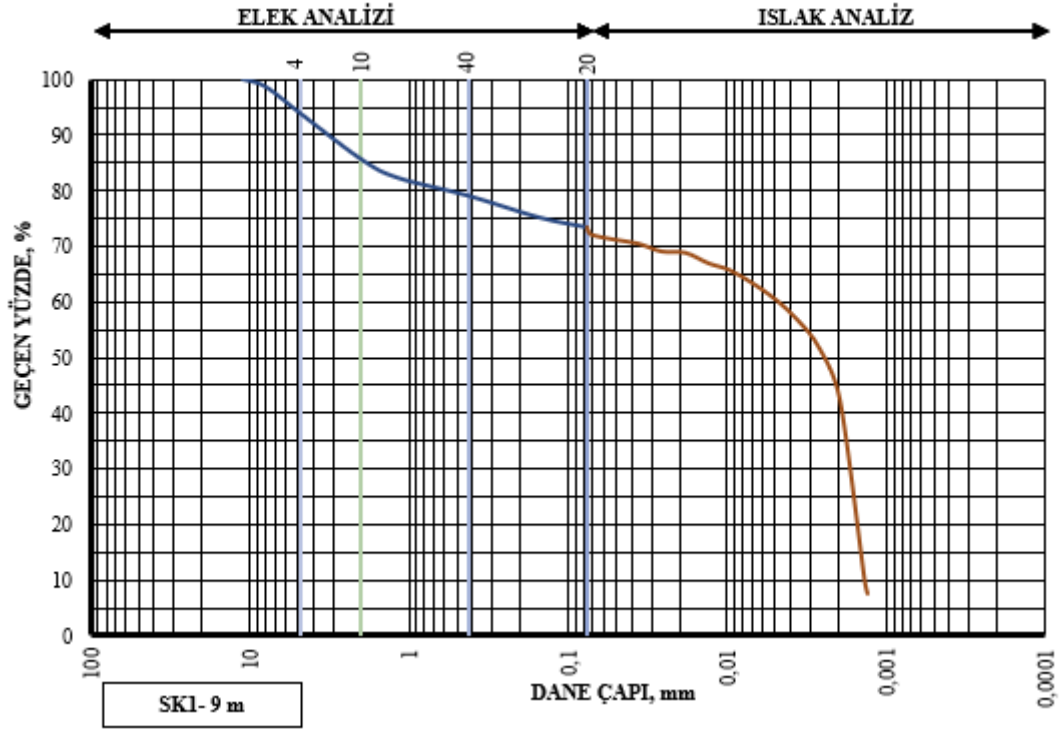
- Leoni, M., Karstunen, M., & Vermeer, P. A. (2008). Anisotropic creep model for soft soils. *Geotechnique*, 58(3), 215-226. <https://doi.org/10.1680/GEOT.2008.58.3.215>
- Mutlu, S., Tün, M., Pekkan, E., Ecevitoglu, B., & Güney, Y. (2015). Aktif-MASW yöntemiyle zeminin sismik hız yapısının belirlenmesi. 3. *Türkiye Deprem Mühendisliği ve Sismoloji Konferansı, İzmir/Türkiye*.
- Okur, V., & Ansal, A. (2009). Tekrarlı yük etkisinde kil zeminlerin lineer olmayan elastik davranışı. *Eskişehir Osmangazi Üniversitesi Mühendislik Mimarlık Fakültesi Dergisi*, XXII(1).
- Özaydın, K. (2016). *Zemin Dinamiği*. Deprem Mühendisliği Türk Milli Komitesi.
- Özçep, F. (2006). *Zeminlerin statik ve dinamik analizi*. TMMOB Jeofizik Mühendisleri Odası, Eğitim Yayınları No.6.
- Özkan, Y. M. (2017). *Zemin Dinamiğine Giriş*. Nobel Akademik Yayıncılık.
- Özyankı, A., Dindar, H., & Ekinci, A. (2020). Killi zeminlerde MASW ile elde edilen kesme dalgası hızı ile plastisite indisi ve standart penetrasyon sayısı korelasyonu. *European Journal of Science and Technology*. <https://doi.org/10.31590/ejosat.794260>
- Sivrikaya, O., & Toğrol, E. (2009). *Örnek problemlerle arazi deneyleri ve geoteknik tasarımı kullanımları* (Birsen Yayınevi, Ed.; 2. Baskı).
- Stroud, M. A. (1974). The standard penetration test in insensitive clays and soft rock. *Proceedings of European Symposium on Penetration Resistance*.
- Subramaniam, P., & Banerjee, S. (2013). Shear modulus degradation model for cohesive soils. *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, 53, 210-216. <https://doi.org/10.1016/j.soildyn.2013.07.003>
- Sun, J. I., Golesorkhi, R., & Seed, B. H. (1988). *Dynamic moduli and damping ratios for cohesive soils*.
- Terzaghi, K., & Peck, R. (1967). *Soil mechanics in engineering practice* (John Wiley, Ed.; 2nd Edition).
- TBDY, (2018).
- Uysal, F. (2011). *Çukurova bölgesindeki yumuşak killerin mühendislik davranışının ileri düzey zemin modelleri ile incelenmesi* [Yüksek Lisans Tezi]. Çukurova Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü .
- Vivek, P., & Priyanka, G. (2012). Dynamic interaction of two nearby machine foundations on homogeneous soil. *GeoCongress 2012 - ASCE 2012*, 21-30.
- Vucetic, M., & Dobry, R. (1991). Effect of soil plasticity on cyclic response. *Geotechnical Engineering*, 117(1).
- Whitman, R. V. (1970). *The response of soils to dynamic loadings*.
- Yıldız, Karstunen, M., & Krenn, H. (2006). Yumuşak zeminler üzerine inşa edilen dolguların davranışına anizotropi ve yapısal bozulmanın etkisi. *Zemin Mekaniği ve Temel mühendisliği 11. Ulusal Kongresi, Trabzon/Türkiye*, 231-240.
- Yıldız, M., & Demiröz, A. (2002). Depreme dayanıklı yapı tasarımında zemin araştırmalarının yeri ve önemi. *İMO Konya Şubesi Dergisi*, 14, 12-18.
- Yıldız, M., Uzer, A. U., & Olgun, M. (2012). Konya II. Organize Sanayi Bölgesinde inşası düşünülen bilim merkezi zemininin geoteknik açıdan değerlendirilmesi. *Zemin Mekaniği ve Temel Mühendisliği Onüçüncü Ulusal Kongresi*.
- Yıldızlar, B. (2009). *Patlatma kaynaklı titreşimlerin yapı davranışı üzerindeki etkilerinin araştırılması* [Doktora Tezi]. İstanbul Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü.
- Yoshida, N. (2014). *Seismic ground response analysis*. Springer. <https://doi.org/10.1007/978-94-017-9460-2>

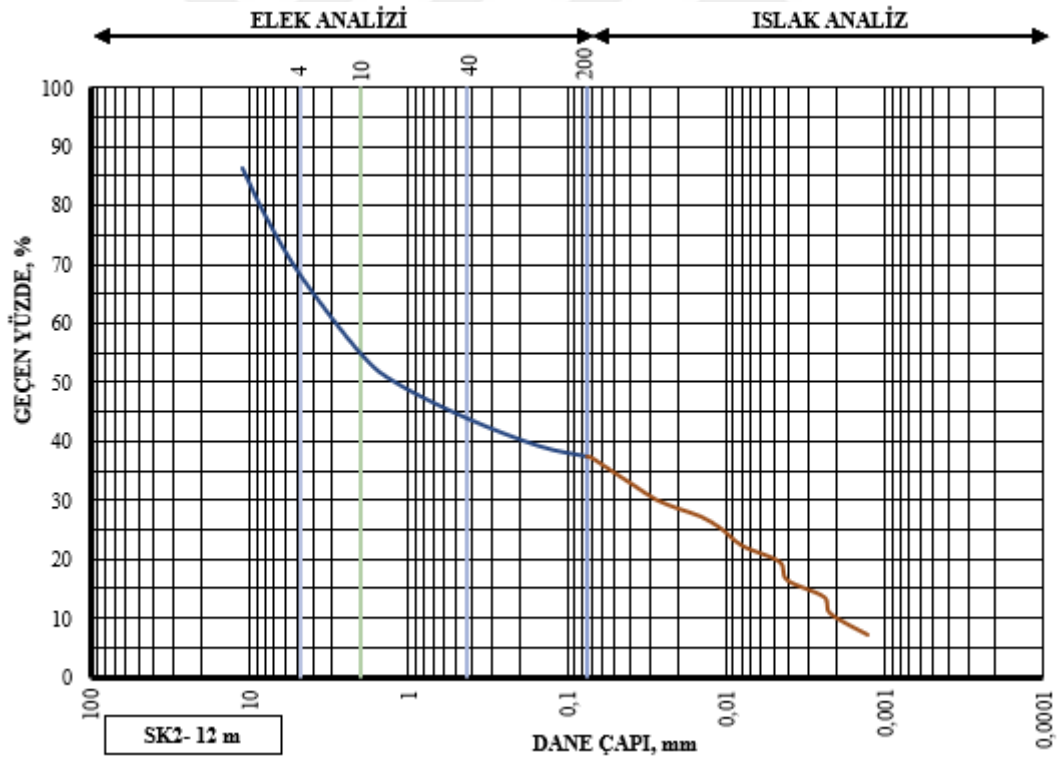
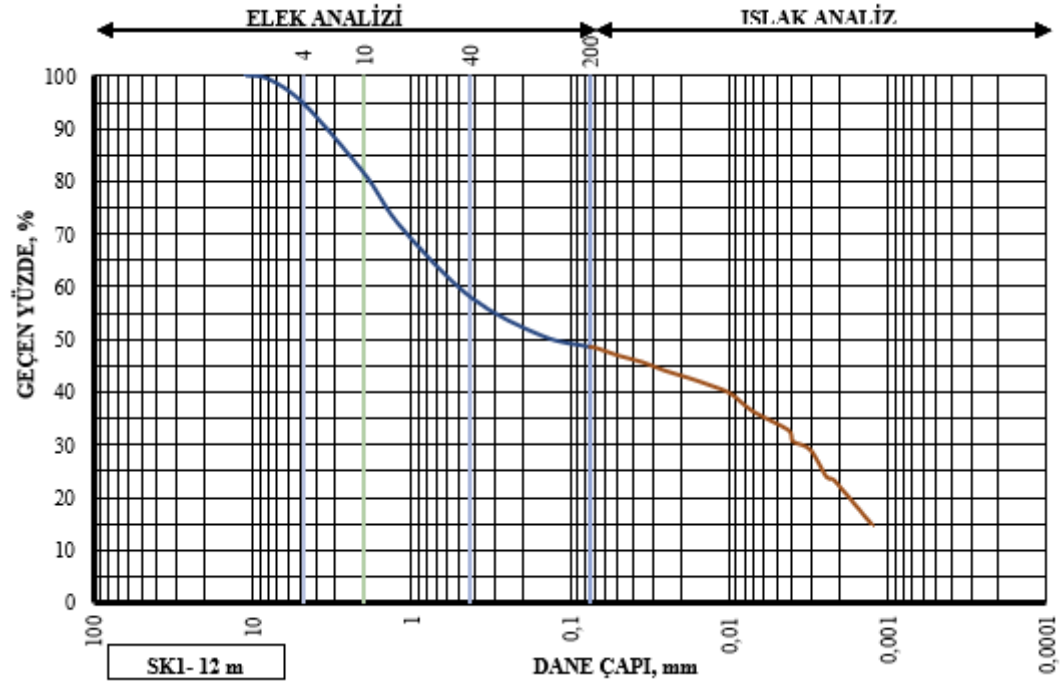
EKLER

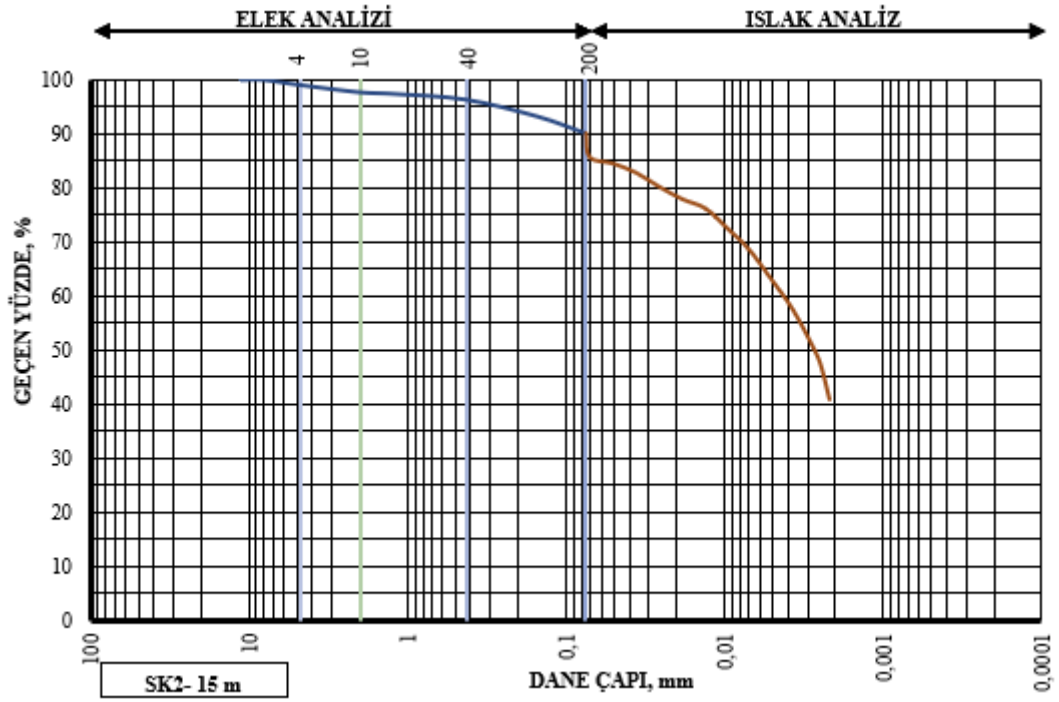
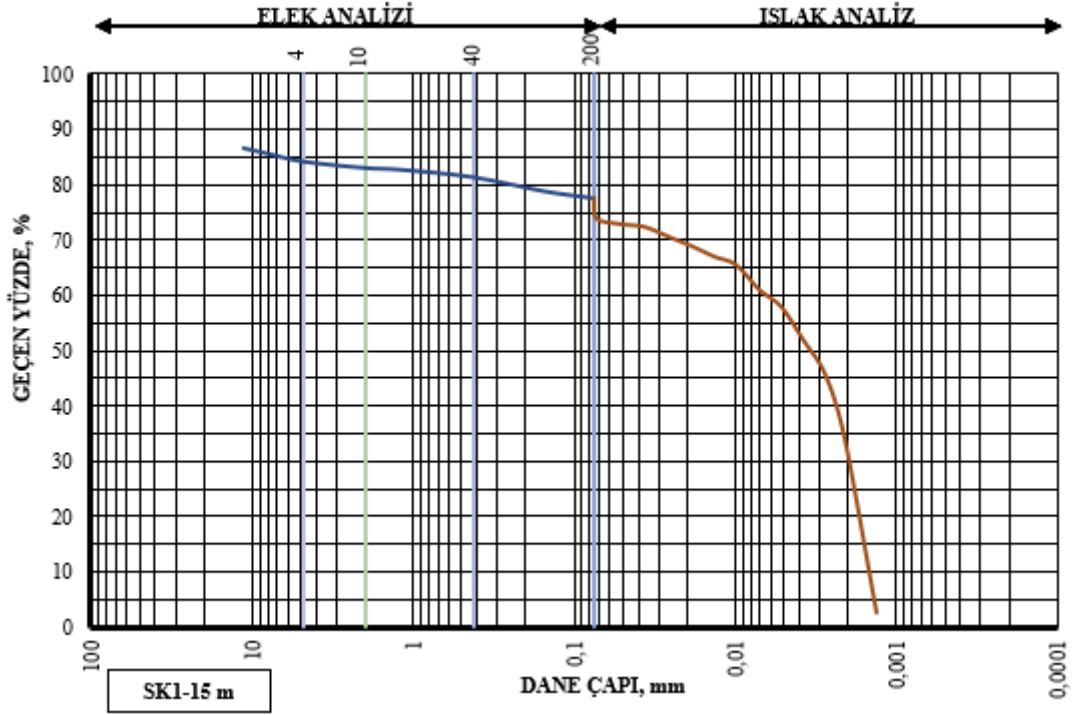
EK-1. Dane Çapı Dağılım Eğrileri

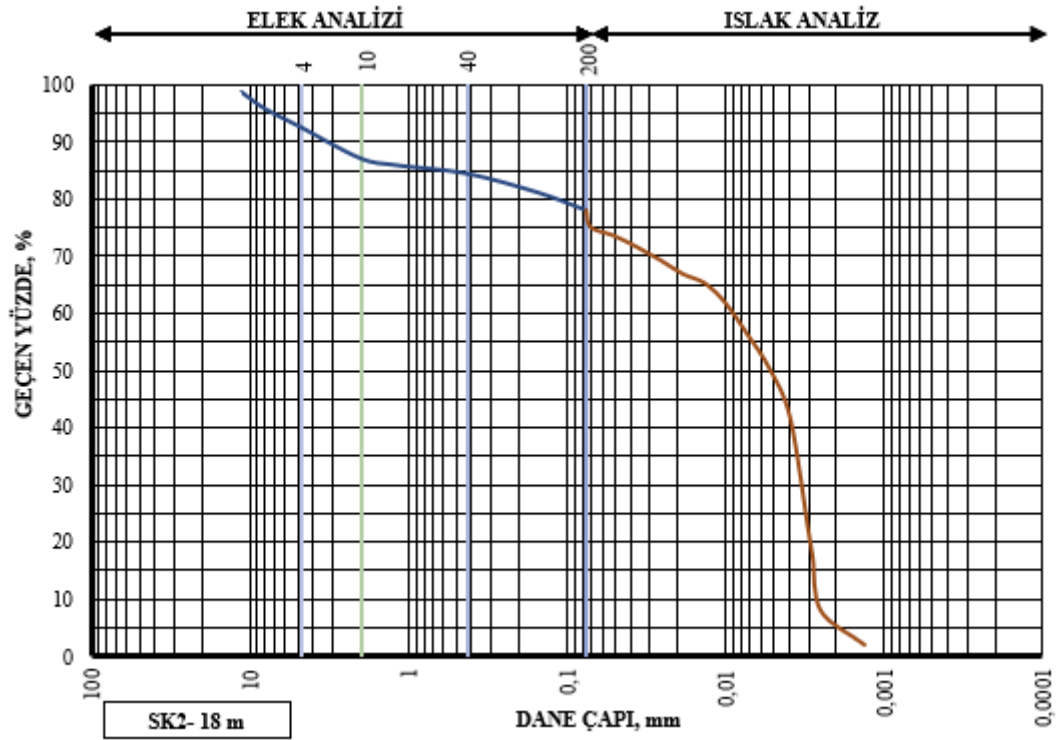
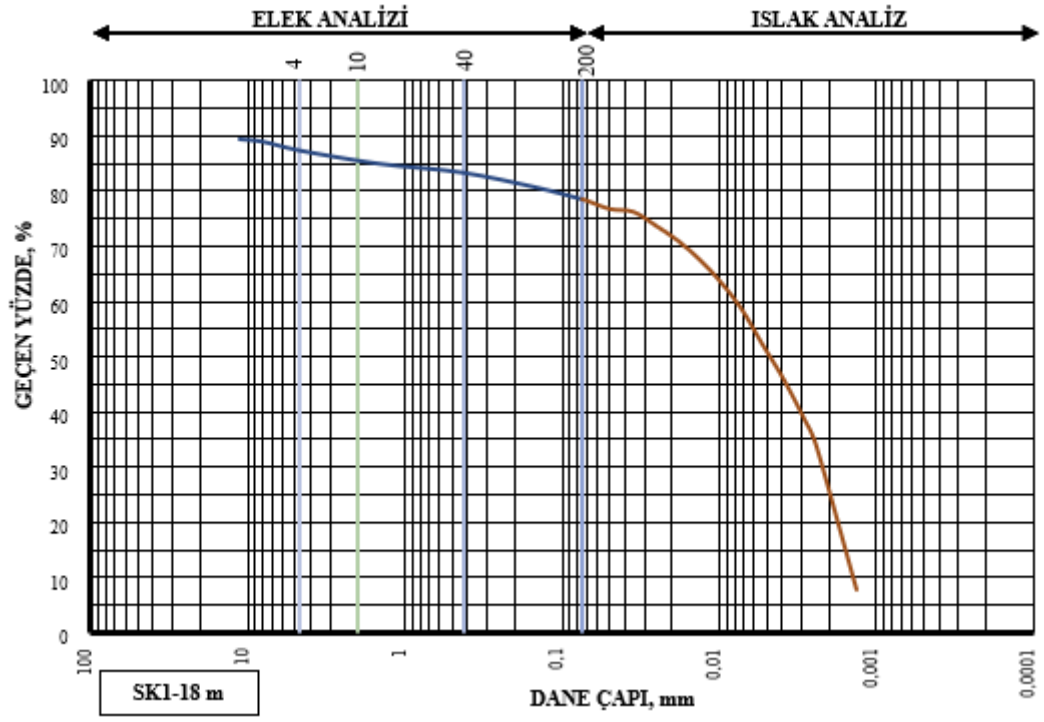






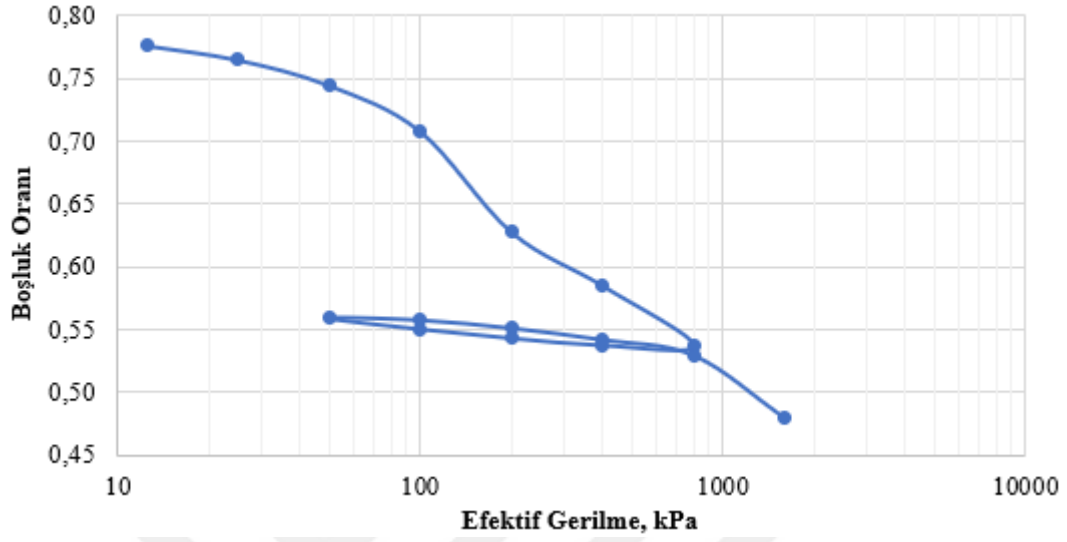




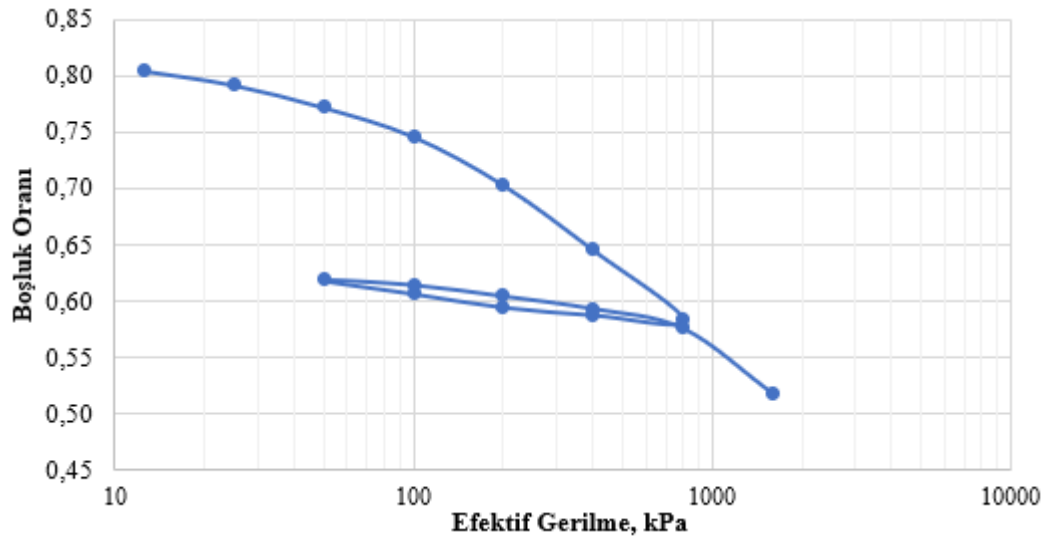


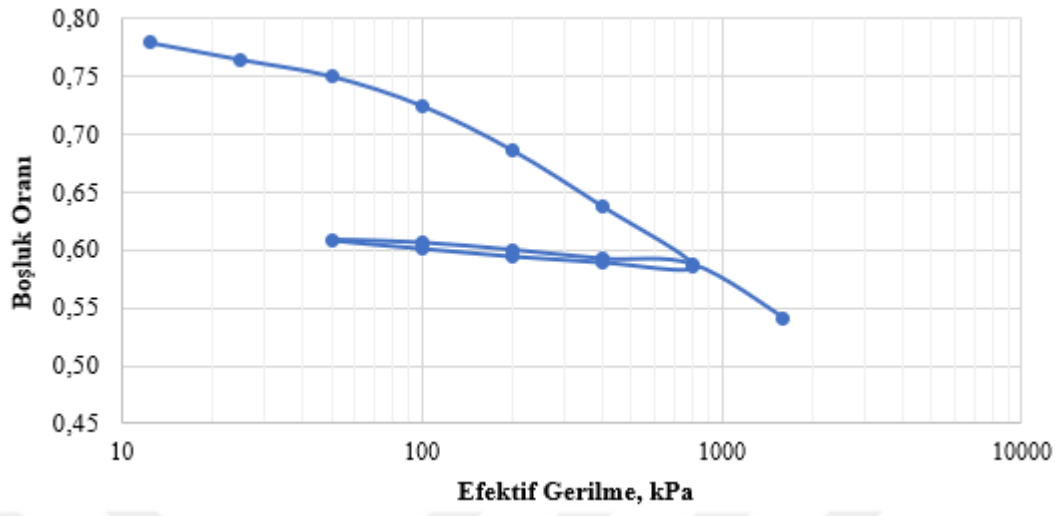
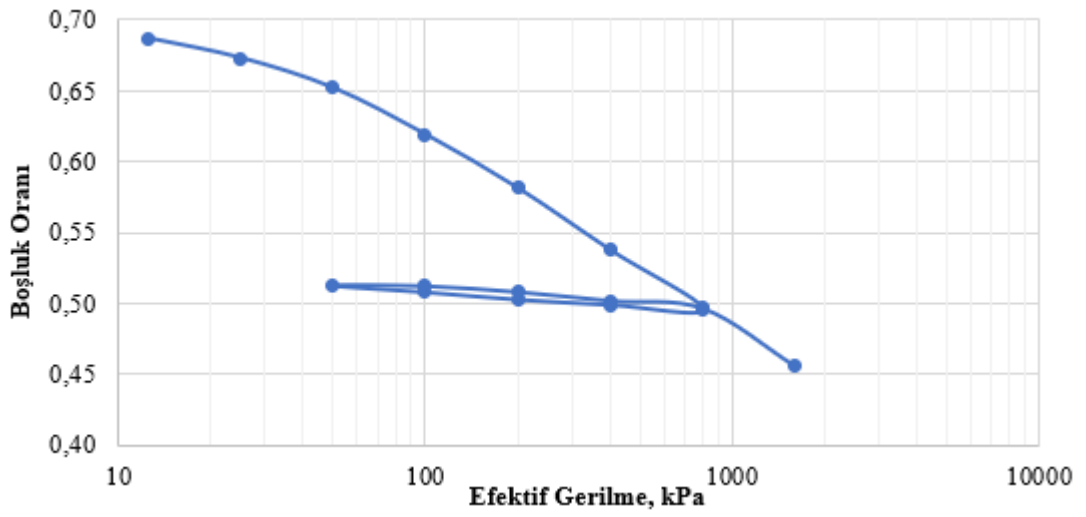
EK-2. Konsolidasyon Deney Sonuçları

SK1-6 m



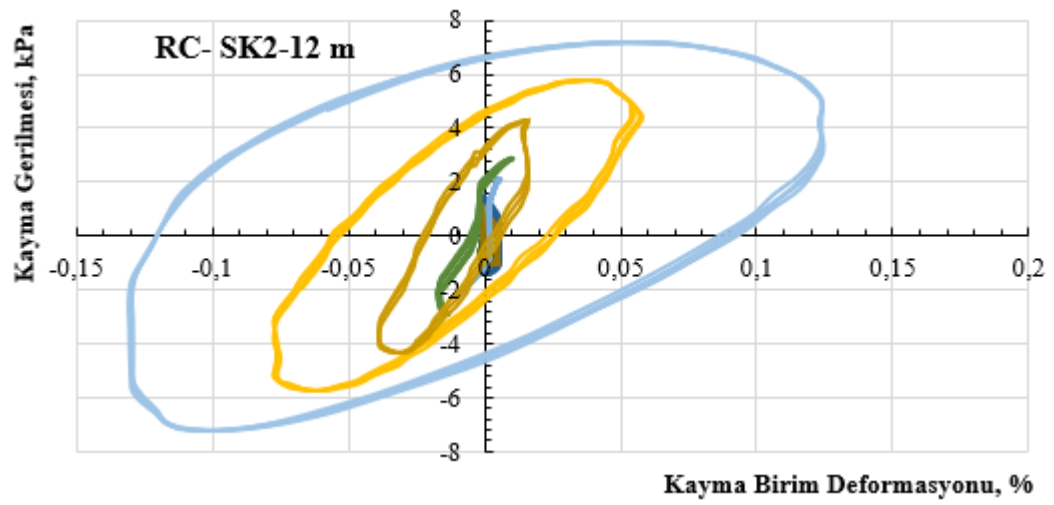
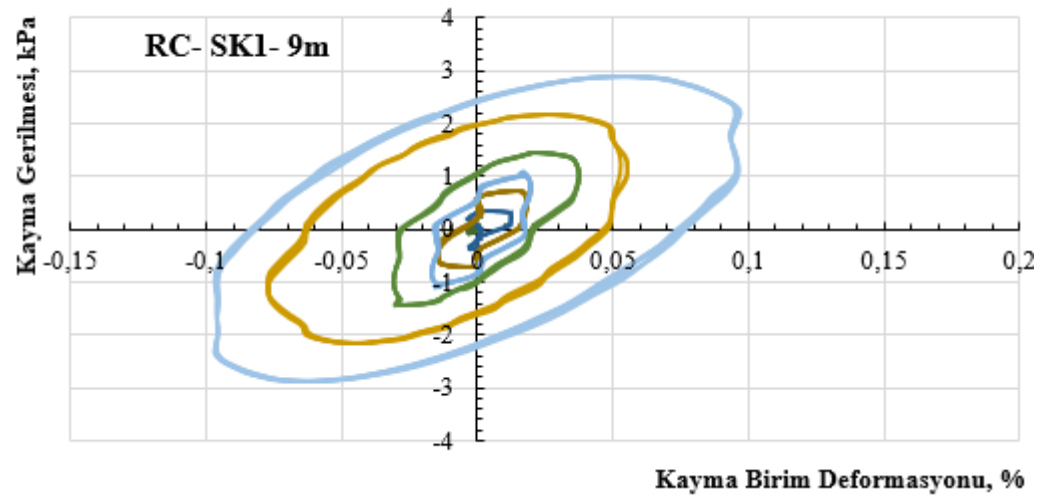
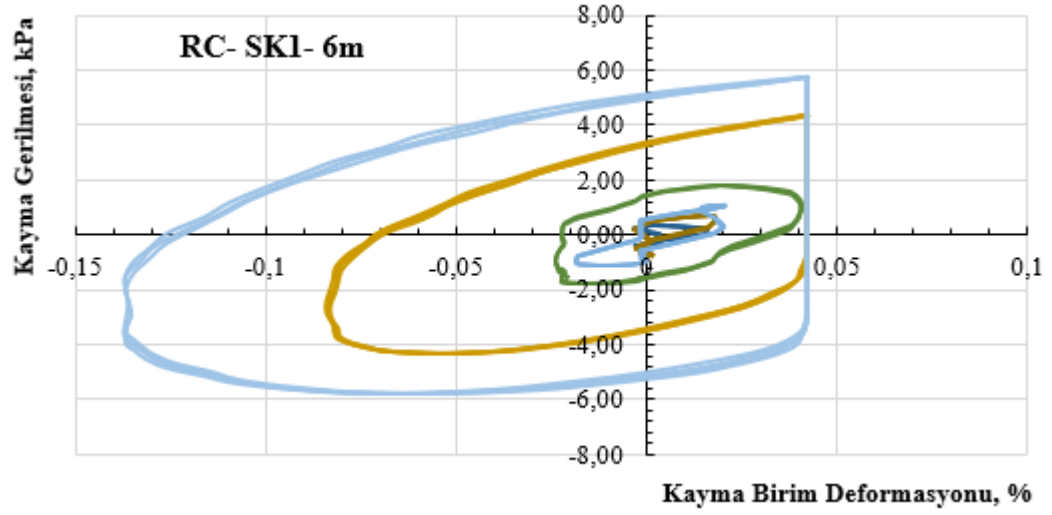
SK2-6 m

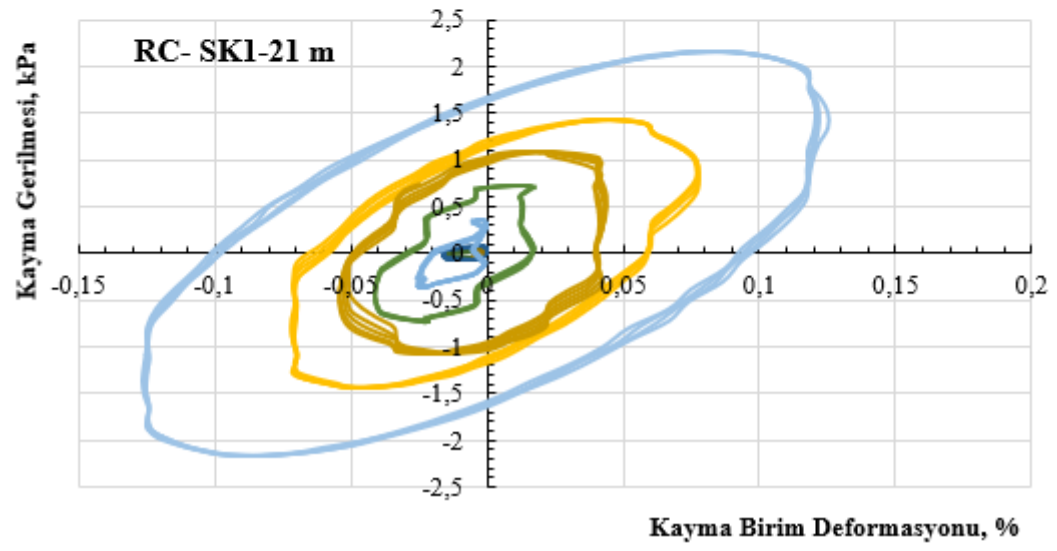
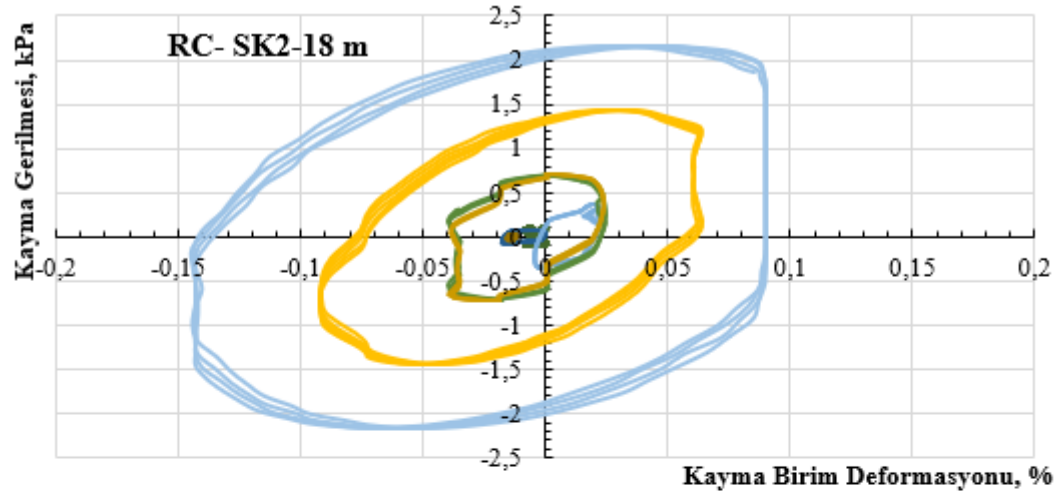


SK1-21 m**SK2-21 m**

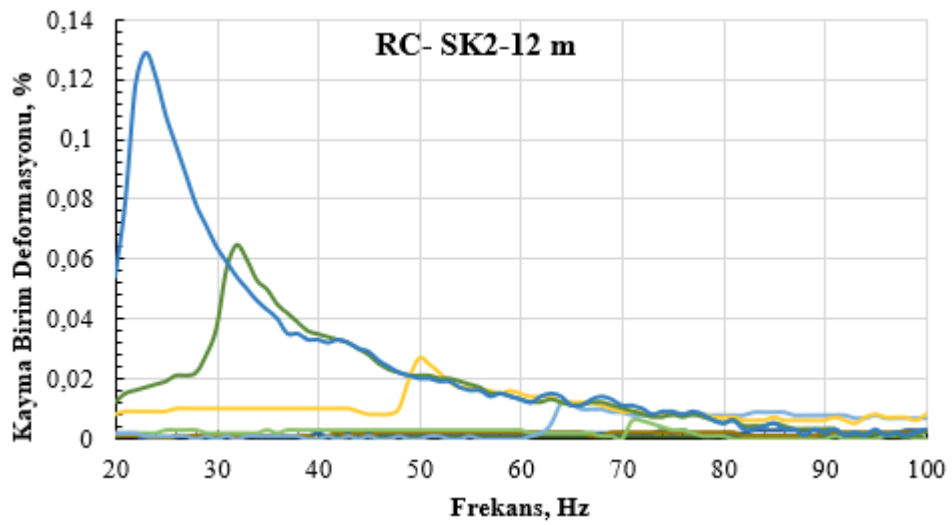
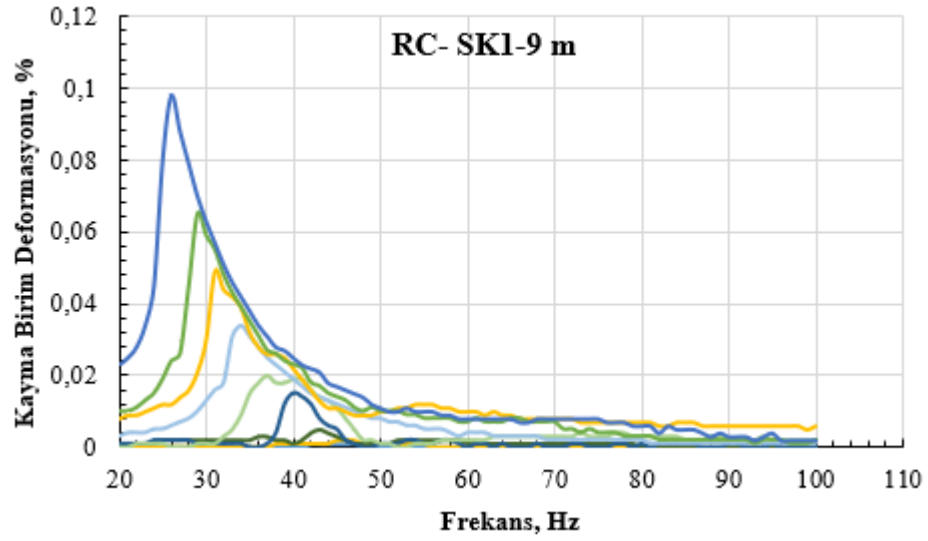
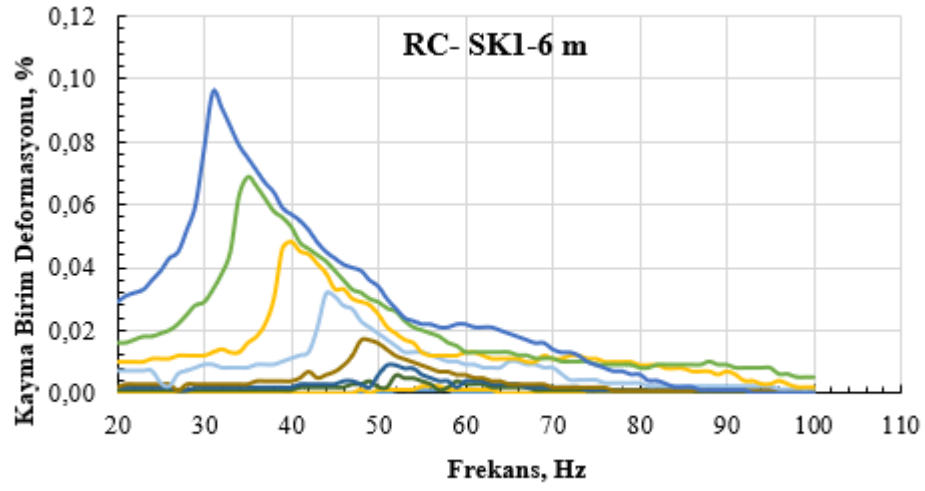
EK-3. Rezonant Kolon Deneyi Sonuçları

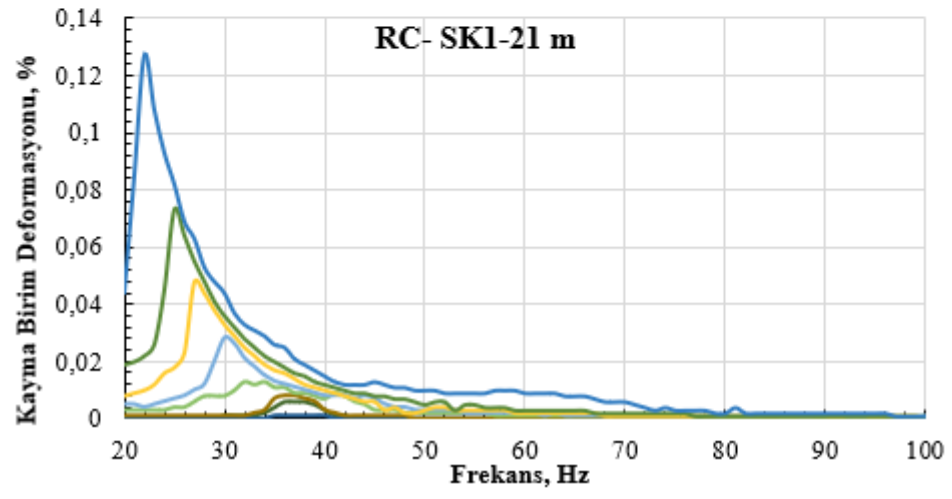
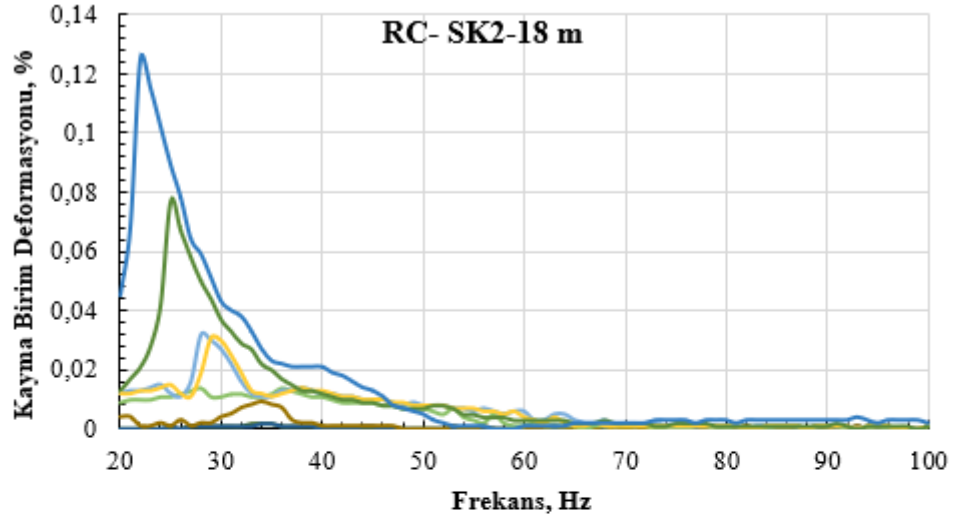
Histerezis Eğrileri



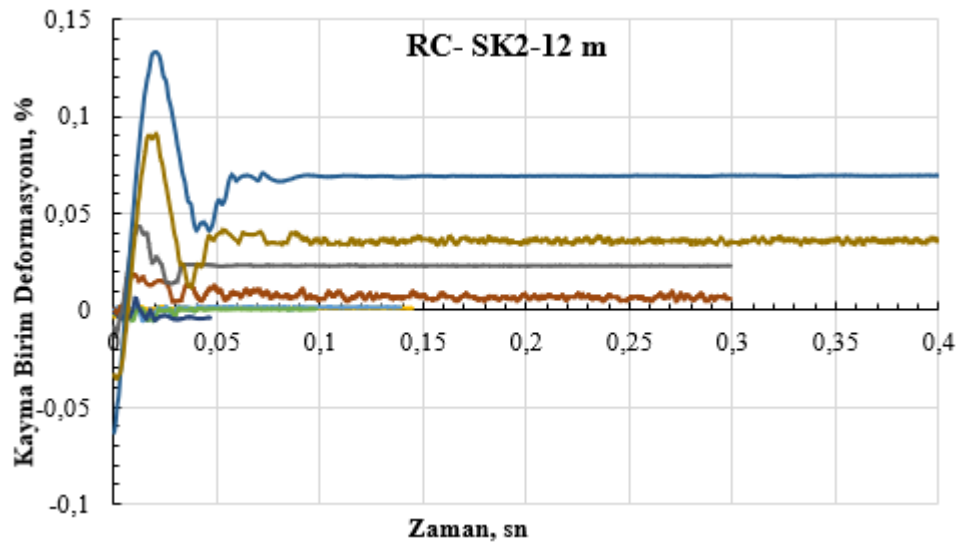
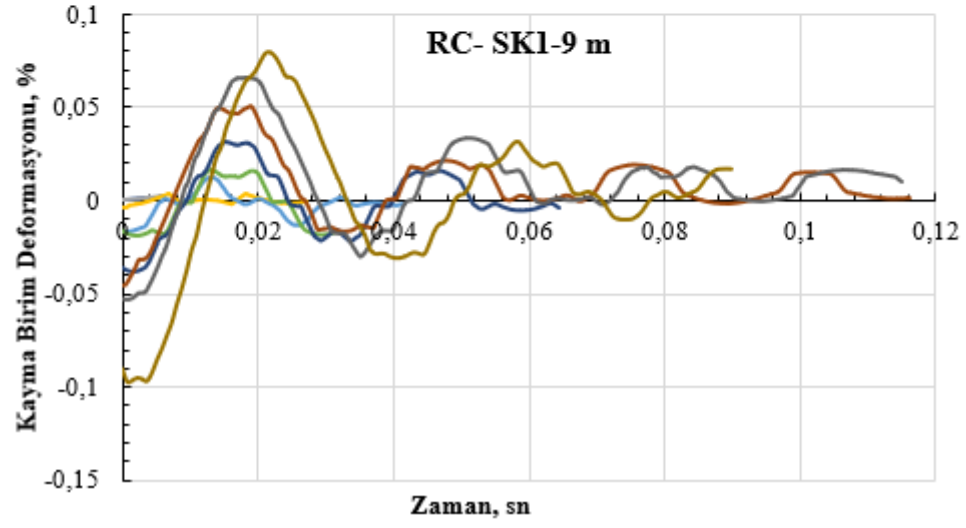
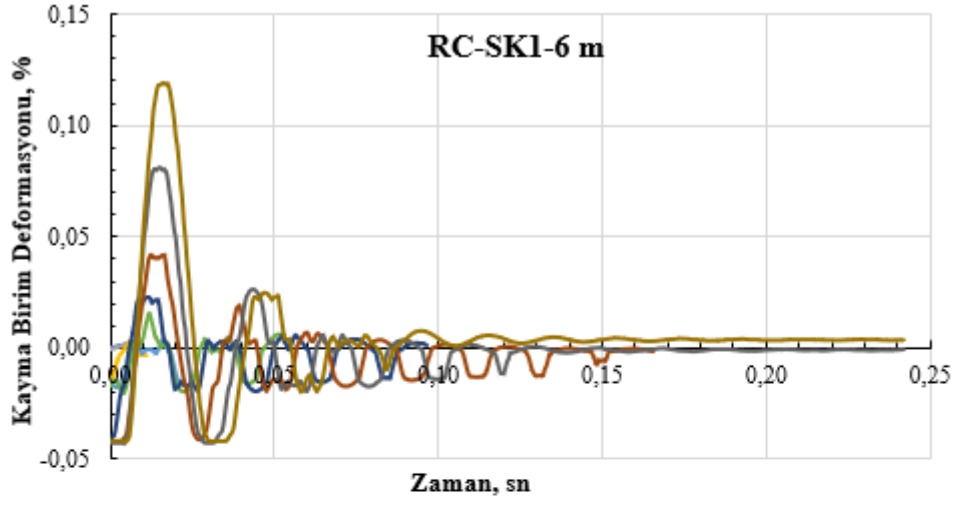


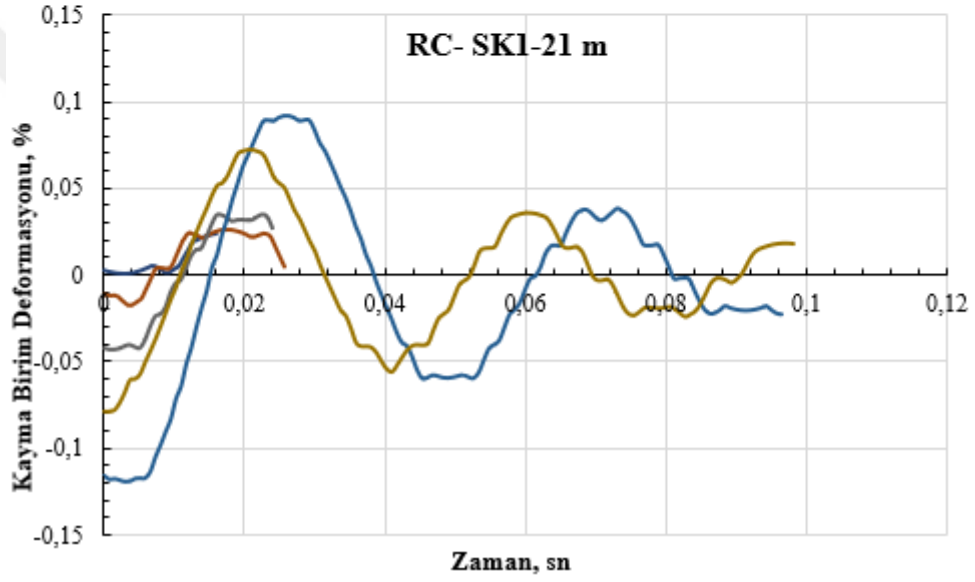
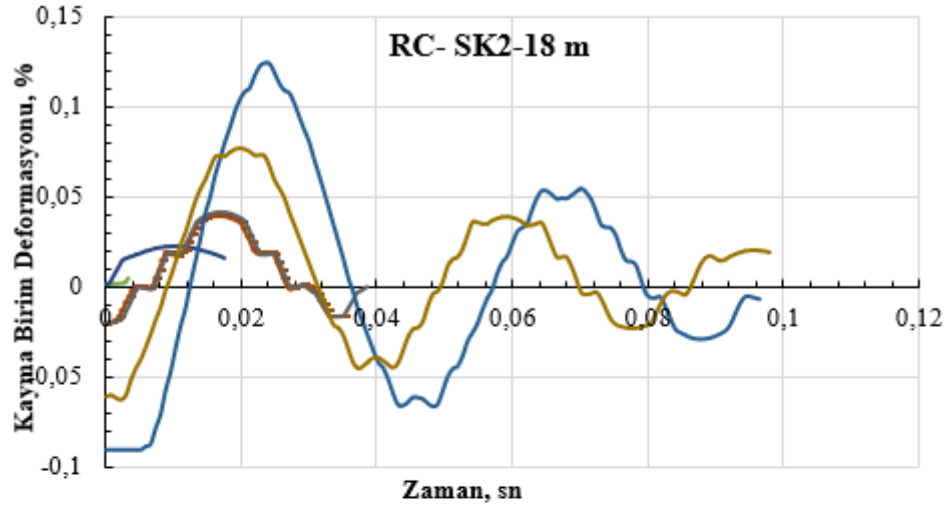
Frekans- Kayma Birim Deformasyonu Eğrileri





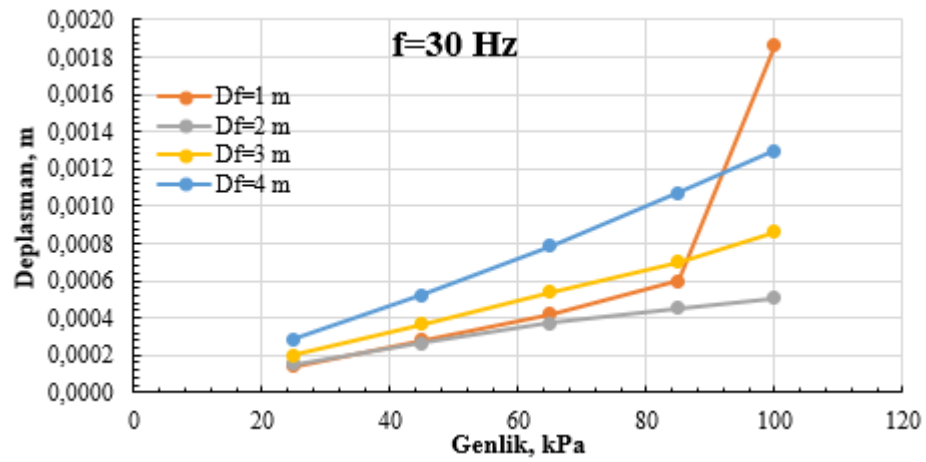
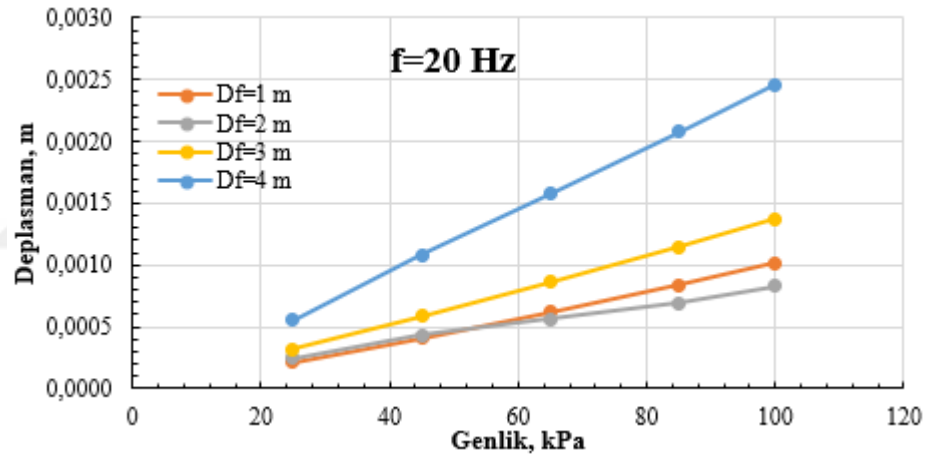
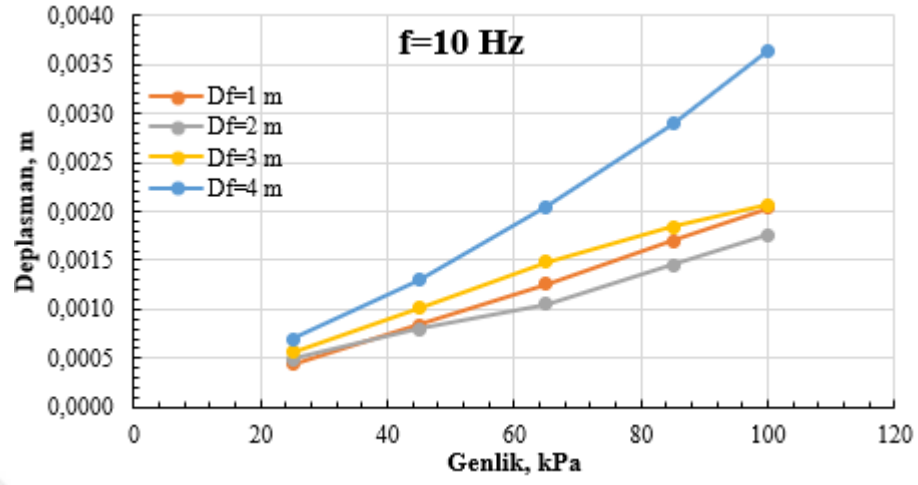
Logaritmik Azalım Eğrileri

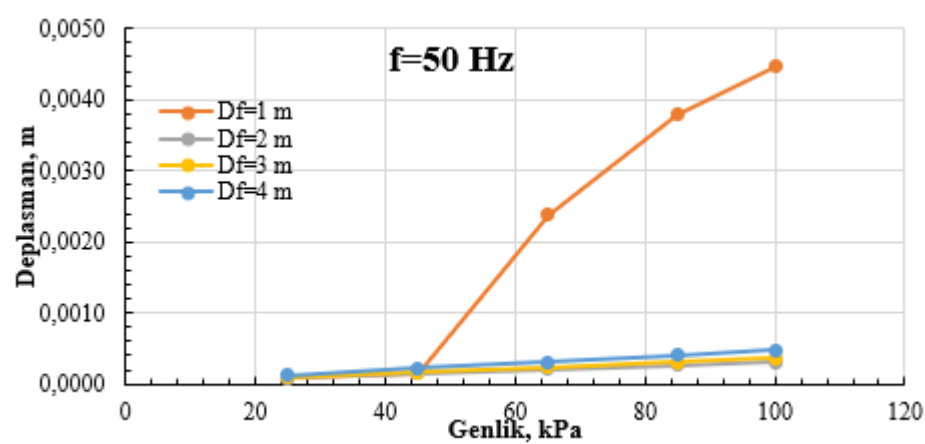
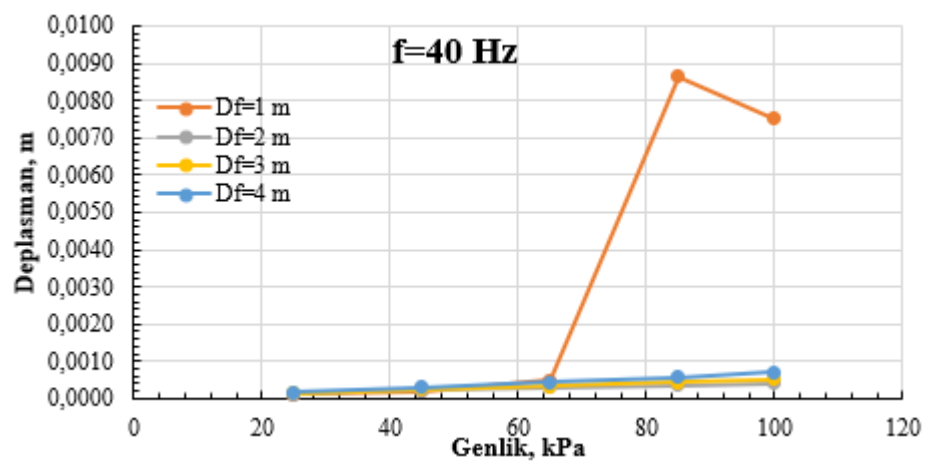




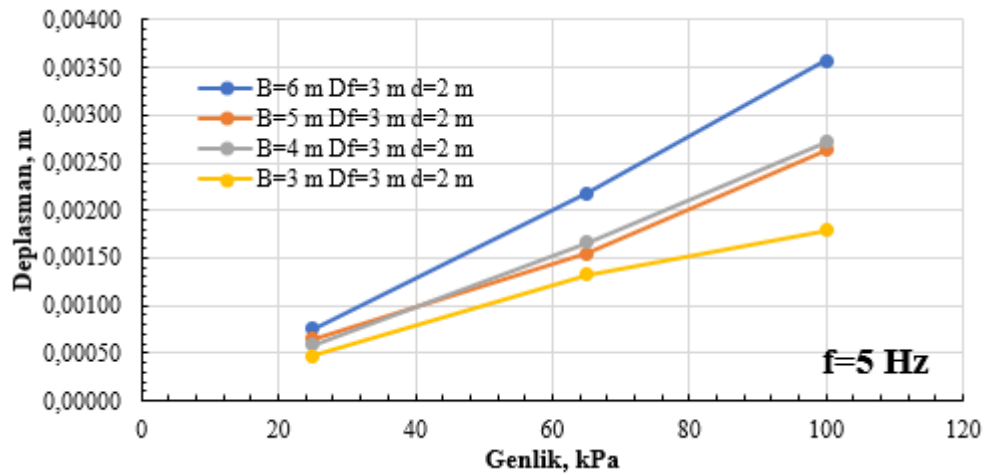
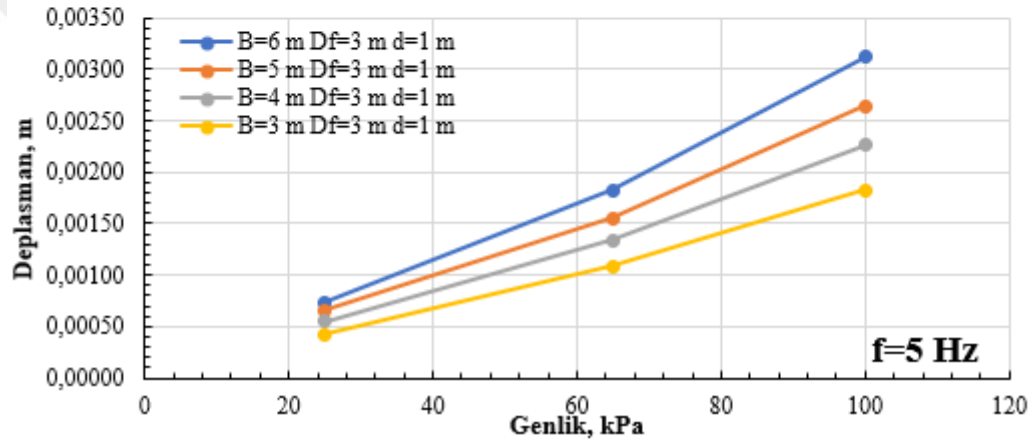
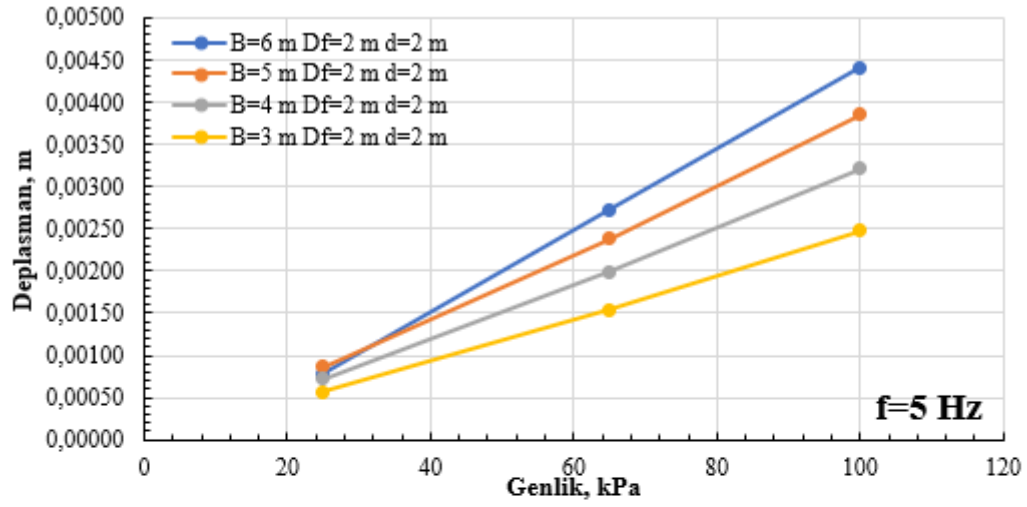
EK-4. PLAXIS 2D Modelleme Sonuçları

B=6 m, d=0,5 m için gömme derinliğine bağlı grafikler





Temel genişliğine bağlı grafikler



3 m temel genliği için gömme derinliğinin etkisi

