



**MENARD PRESİYOMETRESİ DENEYİNDEN
ELDE EDİLEN DEFORMASYON MODÜLÜ
İLE KAYMA DALGA HIZI TABANLI
DİNAMİK ELASTİSİTE MODÜLÜ
ARASINDAKİ İLİŞKİNİN İNCELENMESİ**

Yüksek Lisans Tezi

Tolga KABADAYI

Eskişehir 2025

**MENARD PRESİYOMETRESİ DENEYİNDEN ELDE EDİLEN
DEFORMASYON MODÜLÜ İLE KAYMA DALGA HIZI TABANLI DİNAMİK
ELASTİSİTE MODÜLÜ ARASINDAKİ İLİŞKİNİN İNCELENMESİ**

Tolga KABADAYI

YÜKSEK LİSANS TEZİ

Yer Bilimleri Anabilim Dalı

Danışman: Prof. Dr. Hakan Ahmet NEFESLİOĞLU

Eskişehir

Eskişehir Teknik Üniversitesi

Lisansüstü Eğitim Enstitüsü

Kasım 2025

JÜRİ VE ENSTİTÜ ONAYI

Tolga KABADAYI'nın MENARD PRESİYOMETRESİ DENEYİNDEN ELDE EDİLEN DEFORMASYON MODÜLÜ İLE KAYMA DALGA HIZI TABANLI DİNAMİK ELASTİSİTE MODÜLÜ ARASINDAKİ İLİŞKİNİN İNCELENMESİ başlıklı çalışması 05/11/2025 tarihinde aşağıdaki jüri tarafından değerlendirilerek "Eskişehir Teknik Üniversitesi Lisansüstü Eğitim-Öğretim ve Sınav Yönetmeliği"nin ilgili maddeleri uyarınca, Yer Bilimleri Anabilim dalında Yüksek Lisans Tezi olarak kabul edilmiştir.

Jüri Üyeleri

Unvan Adı Soyadı

İmza

Üye

: Prof. Dr. H. Ahmet NEFESLİOĞLU

Üye

: Prof. Dr. Ali KAYABAŞI

Üye

: Dr. Öğr. Üyesi Mustafa KARAMAN

Prof. Dr. Harun BÖCÜK

Lisansüstü Eğitim Enstitüsü Müdürü

DANIşMAN ONAYI

Danişmanlığını yürüttüğüm Yüksek Lisans đrencisi Tolga KABADAYI, MENARD PRESİYOMETRESİ DENEYİNDEN ELDE EDİLEN DEFORMASYON MODÜLÜ İLE KAYMA DALGA HIZI TABANLI DİNAMİK ELASTİSİTE MODÜLÜ ARASINDAKİ İLİşKİNİN İNCELENMESİ başlıklı tez çalışmasını tamamlamıştır. Hazırlamış olduğu tez tarafımca incelenmiş ve öğrencinin tez savunma sınavına alınması bilimsel ve etik açıdan uygun görülmüştür.

Tez Daniřmanı

Prof. Dr. Hakan Ahmet NEFESLİOğLU

ÖZET

MENARD PRESİYOMETRESİ DENEYİNDEN ELDE EDİLEN DEFORMASYON MODÜLÜ İLE KAYMA DALGA HIZI TABANLI DİNAMİK ELASTİSİTE MODÜLÜ ARASINDAKİ İLİŞKİNİN İNCELENMESİ

Tolga KABADAYI

Yer Bilimleri Anabilim Dalı

Eskişehir Teknik Üniversitesi, Lisansüstü Eğitim Enstitüsü, Kasım 2025

Danışman: Prof. Dr. Hakan Ahmet NEFESLİOĞLU

Bu çalışmanın temel amacı, Presiyometre deneyi (PMT) ile elde edilen Menard deformasyon modülü (E_m) ile jeofizik yöntemlerden (sismik hızlar) türetilen dinamik elastiklik modülleri arasındaki ilişkinin araştırılmasıdır. Bu doğrultuda, farklı zemin türlerinde bu iki parametre arasında bir korelasyonun varlığını belirlemek üzere deneysel çalışmalar yürütülmüştür. Çalışma kapsamında, beş adet sondaj kuyusuna yakın konumlarda sismik kırılma ve Çok Kanallı Yüzey Dalgaları Analizi (MASW) ölçümleri yapılmıştır. Bu ölçümler analiz edilerek, kayma dalgası (V_s) ve basınç dalga (V_p) hızları derinliğe bağlı olarak hesaplanmıştır. Söz konusu sondaj kuyularında farklı seviyede PMT gerçekleştirilmiştir. Yapılan arazi deneylerinin birbiriyle tutarlılığını kontrol etmek amacıyla, üç sondaj kuyusunda gerçekleştirilen Standart Penetrasyon Deneyi'nden (SPT) elde edilen N_{60} değerleri, V_s ve E_m değerleri karşılaştırmalı olarak değerlendirilmiştir. Elde edilen zemin parametrelerinin karşılaştırmalı değerlendirmesi sonucunda, farklı yöntemlerle elde edilen veriler arasında güçlü pozitif ilişkiler bulunduğu tespit edilmiştir. PMT deneyinden elde edilen statik elastisite modülü değerlerinin 20 MPa ile 40 MPa aralığında olduğu, düşük plastisiteli killer için Alpan eğrisi üzerinde oldukça uyumlu sonuçlar verdiği belirlenmiştir. SPT deneyinden hesaplanan dinamik/statik modül oranı (E_d/E_s) değerlerinin, çalışmanın tamamını kapsayan 20 MPa ile 100 MPa aralığındaki bölümde Alpan eğrisi ile yüksek düzeyde uyum gösterdiği gözlemlenmiştir. Ayrıca, yapılan F testi analizine göre, bu çalışmada elde edilen sonuçların güncel literatürde belirtilen değerler ile uyumlu olduğu anlaşılmıştır.

Anahtar Sözcükler: Kayma dalga hızı, Dinamik elastisite modülü, Statik elastisite modülü, PMT, SPT

ABSTRACT

INVESTIGATION OF THE RELATIONSHIP BETWEEN DEFORMATION MODULUS AND SHEARWAVE VELOCITY BASED DYNAMIC MODULUS OF ELASTICITY OBTAINED FROM MENARDPRESSIOMETER TEST

Tolga KABADAYI

Department of Earth Sciences

Eskişehir Technical University, Institute of Graduate Programs, November 2025

Supervisor: Prof. Dr. Hakan Ahmet NEFESLİOĞLU

The main objective of this study is to investigate the relationship between the static deformation modulus (E_m) obtained from the Menard Pressuremeter Test (PMT) and the dynamic elasticity moduli derived from geophysical methods (seismic velocities). Experimental studies were conducted to determine the existence of a correlation between these two parameters in different soil types. Within the scope of the study, seismic refraction and Multi-Channel Analysis of Surface Waves (MASW) geophysical measurements were performed at locations close to five boreholes. These measurements were analyzed, and the shear wave (V_s) and primary wave (V_p) velocities were calculated as a function of depth. Pressuremeter tests were conducted at forty different levels within the boreholes in question. To check the consistency of the performed field tests, the N60 values obtained from the Standard Penetration Test (SPT) conducted in three boreholes were evaluated comparatively against the shear wave velocity V_s and Menard modulus values. The comparative evaluation of the obtained soil parameters revealed that strong positive correlations exist between the data obtained by different methods. The static elasticity modulus values obtained from the PMT were found to be in the 20 MPa to 40 MPa range, yielding highly consistent results with the Alpan curve for soft clays. It was observed that the dynamic/static modulus ratio (E_d/E_s) calculated from the SPT provided a high level of agreement with the Alpan curve in the 20 MPa to 100 MPa range, which encompasses the entirety of the study. Furthermore, based on the F-test analysis, the results obtained in this study were found to be consistent with the values reported in the current literature.

Keywords: Shear wave velocity, Dynamic elastic modulus, Static elastic modulus, SPT, PMT

TEŞEKKÜR

İller Bankası Genel Müdürlüğü Proje Dairesi Başkanlığı bünyesinde yapılan çalışmaları ve çalışmalar sonucu elde edilen jeoteknik parametrelerin tezimde kullanılmasına izin veren İlbank Genel Müdürlüğü Statik, Geoteknik ve Zemin Etüt Müdürümüz Sayın Adnan YIKILMAZ’a teşekkür ederim.

Ayrıca çalışmalarımda fikir üreten ve düşüncelerimi geliştiren mesai arkadaşım İnşaat Mühendisi Buğra İlker KAVAK’a ve benden her türlü maddi ve manevi desteği esirgemeyen biricik eşim Esra KABADAYI’ya teşekkür ederim. Bu çalışmanın hazırlanması sürecinde değerli bilgileri ve katkılarıyla bana destek olan Dr. Öğr. Üyesi Mustafa KARAMAN ve Prof. Dr. Ali KAYABAŞI’na, ayrıca her zaman yol gösterici tutumu ve desteğiyle yanımızda olan danışman hocam Prof. Dr. Hakan Ahmet NEFESLİOĞLU’na içten teşekkürlerimi sunarım.

Tolga KABADAYI

ETİK İLKE VE KURALLARA UYGUNLUK BEYANNAMESİ

Bu tezin bana ait, özgün bir çalışma olduğunu; çalışmamın hazırlık, veri toplama, analiz ve bilgilerin sunumu olmak üzere tüm aşamalarında bilimsel etik ve kurallara uygun davrandığımı; bu çalışma kapsamında elde edilen tüm veri ve bilgiler için kaynak gösterdiğimi ve bu kaynaklara kaynakçada yer verdiğimi; bu çalışmanın Eskişehir Teknik Üniversitesi tarafından kullanılan “bilimsel intihal tespit programı”yla tarandığını ve hiçbir şekilde “intihal içermediğini” beyan ederim. Herhangi bir zamanda, çalışmamla ilgili yaptığım bu beyana aykırı bir durumun saptanması durumunda, ortaya çıkacak tüm ahlaki ve hukuki sonuçları kabul ettiğimi bildiririm.

Tolga KABADAYI

İÇİNDEKİLER

	<u>Sayfa</u>
BAŞLIK SAYFASI	I
JÜRİ VE ENSTİTÜ ONAYI.....	II
DANIŞMAN ONAYI	III
ÖZET	IV
ABSTRACT.....	V
TEŞEKKÜR	VI
ETİK İLKE VE KURALLARA UYGUNLUK BEYANNAMESİ.....	VII
İÇİNDEKİLER.....	VIII
TABLolar DİZİNİ.....	X
ŞEKİLLER DİZİNİ.....	XI
SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ.....	XIII
1. GİRİŞ.....	1
2. ÖNCEKİ ÇALIŞMALAR.....	3
3. MATERYAL VE YÖNTEM.....	14
3.1. Statik Elastisite Modülü	15
3.1.1. Konsolidasyon deneyi	16
3.1.2. Presiyometre deneyi.....	16
3.1.3. Standart penetrasyon deneyi.....	18
3.2. Dinamik Elastisite Modülü.....	20
3.2.1. Jeofizik yöntemler	20
3.2.1.1. Sismik kırılma yöntemi	21
3.2.1.2. Çok kanallı yüzey dalgaları analiz yöntemi (MASW)	22
3.2.1.3. Zemin dinamik-elastik parametreleri	23
3.3. Statik Elastisite Modülü ile Dinamik Elastisite Modülü Arasındaki İlişki	24
4. DENEYSEL ÇALIŞMALAR.....	25

4.1. Laboratuvar Deneyleri	27
4.2. Arazi Deneyleri.....	29
4.3. Deneylerden Hesaplanan Parametreler	36
4.4. Dinamik ve Statik Verilerin Karşılaştırması.....	43
4.4.1. Dinamik elastisite modülü ile statik elastisite modülü karşılaştırması	48
5. TARTIŞMA.....	51
5.1. Yapılan Çalışmanın Grafik Üzerinde Kontrolü.....	51
5.2. Yapılan Çalışmanın İstatiksel Kontrolü	53
6. SONUÇ VE ÖNERİLER.....	55
KAYNAKÇA.....	57
ÖZGEÇMİŞ	

TABLÖLAR DİZİNİ

Sayfa

Tablo 2.1. Kaya tiplerine ve koşullara göre dinamik elastisite modülü ile statik elastisite modülü arasında kurulan ilişkiler (Shijie Shen, 2024).....	6
Tablo 2.2. Tez çalışmasında taranan makaleler	12
Tablo 3.1. Menard a_m faktörü (Briaud, 1992)	18
Tablo 3.2. SPT- $N_{1,60} - E_{50}$ bağıntıları (FHWA, 2002).....	19
Tablo 3.3. Zemin türüne göre önerilen β faktörü (Poulos, 2000)	20
Tablo 4.1. 1-2 ve 12 No.lu sondaj kuyularında elek analizi deneyleri.....	27
Tablo 4.2. 1-2 ve 12 No.lu sondaj kuyularında Atterberg limitleri deneyleri.....	28
Tablo 4.3. 1-2 ve 12 No.lu sondaj kuyularında konsolidasyon deneyi, üç eksenli basınç deneyi ve su muhtevası deneyleri	29
Tablo 4.4. 1-2 ve 12 No.lu sondaj kuyularında SPT deneyi	30
Tablo 4.5. 1-2-5-10 ve 12 No.lu sondaj kuyularında presiyometre deneyi.....	37
Tablo 5.1. F testi için oluşturulan A, B ve C grubu	53

ŞEKİLLER DİZİNİ

Sayfa

Şekil 2.1. Alpan eğrisi (Alpan, 1970)'den değiştirilmiştir.	8
Şekil 2.2. $E_d/E_s - E_s$ ve $M_d/M_s - M_s$ ilişkisi (Kelder, 2015)	10
Şekil 3.1. Elastisite modülü	14
Şekil 3.2. Statik elastisite modülleri (Ramalakshmi, 2020)	15
Şekil 3.3. Presiyometre deney sonuçları.....	17
Şekil 3.4. Plastisite indisi ile E_u/N arasındaki ilişki (Poulos, 2000)	19
Şekil 3.5. P ve S dalgası (Dr. József Farkas, 2008).....	21
Şekil 3.6. Sismik kırılma yöntemi (GeoTek Hawaii, 2025)	21
Şekil 3.7. Rayleigh dalgası (Dr. József Farkas, 2008).....	22
Şekil 3.8. Tabaka kalınlıkları ve V_s değerleri.....	23
Şekil 4.1. Proje alanı yer buldurur haritası	25
Şekil 4.2. Proje alanı üzerindeki sondaj ve sismik ölçüm yerleri.....	26
Şekil 4.3. 1 No.lu sondaj kuyusu SPT, Menard modülü ve V_s Grafikleri	31
Şekil 4.4. 2 No.lu sondaj kuyusu SPT, Menard modülü ve V_s grafikleri.....	32
Şekil 4.5. 5 No.lu sondaj kuyusu Menard modülü ve V_s grafikleri.....	33
Şekil 4.6. 10 No.lu sondaj kuyusu, Menard modülü ve V_s grafikleri.....	34
Şekil 4.7. 12 No.lu sondaj kuyusu SPT, Menard modülü ve V_s grafikleri.....	35
Şekil 4.8. Plastisite indisi ile E_u/N arasındaki ilişki (Poulos, 2000)	41
Şekil 4.9. SPT ve PMT deneylerinden elde edilen statik elastisite modülleri.....	42
Şekil 4.10. 1 No.lu sondaj kuyusu SPT deneyi ile hesaplanan E_s , presiyometre deneyi ile hesaplanan E_s ve sismik yöntem ile hesaplanan E_d grafiği.....	43
Şekil 4.11. 2 No.lu sondaj kuyusu SPT deneyi ile hesaplanan E_s , presiyometre deneyi ile hesaplanan E_s ve sismik yöntem ile hesaplanan E_d grafiği.....	44
Şekil 4.12. 5 No.lu sondaj kuyusu presiyometre deneyi ile hesaplanan E_s ve sismik yöntem ile hesaplanan E_d grafiği	45

Şekil 4.13. 10 No.lu sondaj kuyusu presiyometre deneyi ile hesaplanan E_s ve sismik yöntem ile hesaplanan E_d grafiği.....	46
Şekil 4.14. 12 No.lu sondaj kuyusu SPT deneyi ile hesaplanan E_s , presiyometre deneyi ile hesaplanan E_s ve sismik yöntem ile hesaplanan E_d grafiği.....	47
Şekil 4.15. Çalışmada elde edilen E_d/E_s - E_s grafiği.....	50
Şekil 5.1. E_d/E_s - E_s değerlerinin Alpan eğrisi üzerinde gösterimi	51
Şekil 5.2. E_d/E_s değerlerinin Alpan eğrisi ve DGGT bandı üzerindeki yerleşimi bölgesi	52



SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ

α_m	: Menard Faktörü
β	: Zemin Faktörü
ε	: Birim Uzama
ν	: Poisson Oranı
σ	: Normal Gerilme
d	: Yoğunluk
E	: Elastisite Modülü ya da Young Modülü
E_d	: Dinamik Elastisite Modülü
E_m	: Menard Presiyometresinden Ölçülen Değer
E_{od}	: Odometrik Deformasyon Modülü
E_s	: Statik Elastisite Modülü
E_u	: Drenajsız Elastisite Modülü
E_{ur}	: Boşaltma Fazında Deformasyon Modülü
E_0	: Başlangıç Teğet Deformasyon Modülü
E_{50}	: %50 Nihai Gerilme Mertebesindeki Sekant Deformasyon Modülü
G	: Shear Modülü ya da Kayma Modülü
G_d	: Dinamik Kayma Modülü
G_s	: Statik Kayma Modülü
h	: Tabaka kalınlığı
K_d	: Dinamik Sıkışma Modülü
K_s	: Statik Sıkışma Modülü
M_d	: Dinamik Hacimsel Deformasyon Modülü
M_s	: Statik Hacimsel Deformasyon Modülü
SPT-N	: SPT Deneyi Vuruş Sayısı
SPT-N ₆₀	: SPT Deneyi Serbest Düşme Tokmak Enerjisinin % 60'ına Göre Düzeltilmiş Vuruş Sayısı
SPT-N _{1,60}	: SPT Deneyi Serbest Düşme Tokmak Enerjisinin % 60'ına ve Efektif Jeolojik Basınç 100 kPa Alarak Düzeltilmiş Vuruş Sayısı
PI	: Plastisite İndisi

P_L	: Limit Basınç
PMT	: Presiyometre Deneyi
SPT	: Standart Penetrasyon Deneyi
t	: Zaman
V	: Hız
V_p	: Basınç dalga hızı
V_s	: Kayma dalga hızı
x	: Yol



1. GİRİŞ

Mühendislikte zeminin, kayanın ve yapıların davranışlarını anlamak, tasarımı optimize etmek için hem malzemelerin hem de yerin mekanik özelliklerinin doğru bir şekilde karakterize edilmesi hayati öneme sahiptir.

Geoteknik mühendisliği için elastisite modülü, zeminin rijitlik davranışlarını değerlendirmek için temel bir parametre olarak kabul edilir. Mühendislik hesaplamaları yapılırken statik elastisite modülüne ihtiyaç duyulur. Statik elastisite modülünün ölçülmesi göreceli olarak zor ve maliyetlidir. Hatta bazı durumlarda imkânsız hale gelmektedir.

Presiyometre deneyi ile ölçülen Menard deformasyon modülü ile statik elastisite modülü hesaplanabilmektedir. Fakat bu deneyin de her zeminde uygulanması mümkün değildir. Buna ek olarak presiyometre deneyi kullanımında ve yorumlanmasında uzmanlık ve emek gerektirmesinden dolayı doğru veri elde etmek zorlaşmaktadır. Özellikle hacim ve basınç düzeltmelerinin doğru yapılamaması, basınç ve hacim okumalarında yapılan hatalar, limit basıncın yanlış seçilmesi, Menard deformasyon modülünü (E_m) hesaplayabilmek için gereken ve (Baguelin, 1978) bağıntısında yer alan Poisson oranının (ν) bilinmemesi, sekant deformasyon modülünü (E_{50}) hesaplayabilmek için gereken Menard faktörünü (α_m) bulabilmek için yanlış zemin türünü seçmek, elde edilen verilerin hatalı olmasına neden olmaktadır.

Yukarıda sayılan nedenlerden dolayı sismik yöntemlerden elde edilen dinamik elastisite modülü kullanılarak statik elastisite modülü hesaplama fikri oluşmuş ve bu yönde çalışmalara başlanmıştır. Her tür zemin türünde sismik yöntemin pratik olarak yapılması ve buradan elde edilen modüllerin dinamik olması nedeniyle dinamik ve statik elastisite modülleri arasındaki ilişki ve nasıl bulunabileceği, mühendislik alanında önemli bir araştırma konusu olmuştur.

Saha çalışmalarımızda karşılaştığımız problemleri de düşünerek; statik elastisite modülünü elde etmek için gerekli deneylerin yapılamadığı veya yapılan deneylerin doğruluğunu sorguladığımız durumlarda dinamik elastisite modülü bize yol gösterici olabilir mi? Hatta jeofizik yöntemlerden statik elastisite modülü elde edilebilir mi? Bu sorulara cevap bulabilmek için bir çalışma yapma fikri oluşmuştur.

Bu tez çalışması, dinamik ve statik elastisite modülleri arasındaki ilişkinin derinlemesine incelenmesini amaçlamaktadır. Mevcut literatürdeki bilgilere dayanarak ve yapılan çalışmalarla bu ilişkinin teorik temelleri ve pratik uygulamaları ele alınacak

ve bir jeofizik yöntem olan sismik kırılma yöntemi ile dinamik ve statik elastisite modüllerinin nasıl belirlenebileceği üzerinde durulacaktır.

Çalışma kapsamında Kahramanmaraş (Merkez) içerisinde hem presiyometre hem SPT hem de sismik ölçüm yapılmış elde edilen veriler karşılaştırılmıştır. Ayrıca bu veriler kullanılarak zemin dinamik ve mekanik parametreleri hesaplanmış ve bu parametreler arasında tekrar karşılaştırma yapılmıştır.

Çalışmalarda bulunan sonuçlar daha önceden yapılmış olan çalışmalarla birlikte istatistiki açıdan değerlendirilmiştir. Yapılan çalışmalar ve elde edilen sonuçlar tez kapsamında sunulmuştur.

Bu giriş bölümünün ardından tez; önceki çalışmalar, materyal ve yöntem, deneysel çalışmalar, tartışma, sonuç ve öneriler olmak üzere 5 ana bölümden oluşacaktır. Her bir bölümde, dinamik-statik elastisite modülleri arasındaki ilişki detaylı olarak inceleyecek, ayrıca tez içerisinde zemin parametreleri hesaplayan Excel programı üretilip analiz ettirecek ve sonuç olarak jeofizik mühendisliği uygulamaları için önemli sonuçlar çıkaracaktır.

2. ÖNCEKİ ÇALIŞMALAR

Geoteknik mühendisliğinde zemini daha iyi anlamak ve modellemek için kullanılan zemin parametrelerini elde etmek adına pek çok denklem geliştirilmiştir. Denklemler temel olarak basınç dalga hızı (V_p) ile kayma dalga hızı (V_s) üzerinden bulunur. Elde edilen denklemler sismik dalga denklemleri kullanılarak oluşturulmuş ve pek çok bilim adamı tarafından geliştirilip kullanılan denklemlerdir. Sismik yöntemler ile dinamik elastisite modülünün nasıl elde edileceği üzerine araştırmalar yapılmıştır.

Gardner (1974) kayaçların primer dalga hızı (V_p) ile yoğunluk (d) arasındaki ilişkiyi belirlemek için geniş kapsamlı deneysel çalışmalar yapmıştır. Çalışmanın temel amacı, sedimanter kayaçların sismik P-dalga hızı ile yoğunluğu arasındaki ampirik ilişkiyi belirlemek ve bu ilişkiyi matematiksel bir formülasyonla ifade etmektir. Bu sayede, sismik verilerden kayaç yoğunluğunun tahmin edilmesi hedeflenmiştir. Araştırma, farklı sedimanter kayaç türlerini kapsayan geniş bir veri seti üzerinde gerçekleştirilmiştir. Bu veri seti, çeşitli litolojilere sahip kayaçların sismik hız ve yoğunluk ölçümlerini içermektedir. Bu çalışma, jeofizik ve petrol mühendisliği alanlarında önemli bir referans noktası olmuş ve sismik verilerin yorumlanmasında temel bir araç haline gelmiştir. Elde edilen formül, sedimanter kayaçlar için genel bir yoğunluk-hız ilişkisi sunmaktadır ve sismik verilerden yoğunluk tahmininde yaygın olarak kullanılmaktadır. Günümüzde bu formülü temel alan benzer bir formül kullanılarak tüm zemin türleri için bir yoğunluk formülü oluşmuştur.

Bowles (1988) temel tasarımı, analiz yöntemleri ve mühendislik uygulamalarını kapsamlı bir şekilde ele almaktadır. Teorik bilgileri pratik mühendislik uygulamalarıyla birleştirerek, okuyuculara hem analitik hem de deneysel yöntemleri sunmaktadır. Sıkışma modülünün ve elastisite modülünün sismik hızlar ile hesaplanması hakkında formüller geliştirmiştir (denklem 2.1. ve denklem 2.2.). Yaptığı çalışma temel mühendisliği ve zemin mekaniği alanlarında en yaygın kullanılan kaynaklardan biridir.

$$\text{Sıkışma Modülü } (K) = \frac{d}{100} \left(V_p^2 - \frac{4}{3} V_s^2 \right) \quad (2.1)$$

$$\text{Elastisite Modülü } (E) = \frac{d V_s^2 (3V_p^2 - 4V_s^2)}{100 (V_p^2 - V_s^2)} \quad (2.2)$$

Lankston (1990) P ve S dalgalarının elastik özelliklere ve yoğunluğa bağlılığını ve mühendislik açısından her iki dalga hızının elde edilmesinin önemini vurgular ve ters çözüm tekniği kullanarak yer altının detaylı haritasının nasıl oluşturulacağını açıklar. Özellikle sıkı derinliklerdeki yeraltı yapılarının detaylı haritalanması için sismik kırılma

yöntemlerinin nasıl uygulanacağını ve yorumlanacağını açıklayarak, jeoteknik ve çevresel jeofizik çalışmalarında önemli bir kaynak sunmaktadır. Denklem 2.3. ile yoğunluk – V_p ilişkisini kurmuştur.

$$Yoğunluk (d) = 0,31 V_p^{0,25} \quad (2.3)$$

Kramer (1996) deprem mühendisliği ve geoteknik mühendisliği konularını birleştiren en önemli akademik kaynaklardan biridir. Deprem etkileri, zemin davranışı ve mühendislik tasarımı üzerine kapsamlı bir içerik sunmaktadır. Özellikle deprem davranışını modellemede kullanılan kayma modülü ve diğer modüllerle arasındaki ilişkiyi analiz etmiştir. Günümüzde pek çok üniversitede ders kitabı olarak okutulmaktadır. Deprem sırasında zeminlerin nasıl davrandığını anlamak ve mühendislik tasarımlarında dikkate alınması gereken parametreleri öğrenmek isteyenler için temel bir rehber niteliğindedir. Denklem 2.4.'te yoğunluk ve V_s kullanarak kayma modülünü hesabını göstermiştir.

$$Kayma Modülü(G) = dV_s^2/100 \quad (2.4)$$

Tüm yapılan çalışmaların sonucu olarak jeofizik yöntemler ile dinamik parametreler yukarıdaki formüller ile hesaplanabilmektedir. Diğer saha deneyleri ile statik elastisite modülünün nasıl elde edildiği araştırılmıştır.

JMO (2020) Menard presiyometresi deneyinin geoteknik mühendisliğinde yaygın kullanımına rağmen uygulama sırasında yapılan hataların deney sonuçlarını güvenilir olmaktan uzaklaştırdığını ortaya koymak amacıyla hazırlanmıştır. Kapsamında sondajın hazırlanma şekli, prob ve muhafaza borusunun yerleşimi, kalibrasyon işlemleri ile basınç-hacim ölçümlerinin doğruluğu gibi deneyin tüm aşamaları ele alınmış, doğru uygulama kriterleri irdelenmiştir. Sondaj sırasında zeminin örselenmemesi, prob-muhafaza düzeninin standartlara uygun kurulması, kalibrasyon ve ölçümlerin hassas yapılması gerektiği, aksi halde elde edilen limit basınç ve deformasyon modülü değerlerinin güvenilir olmayacağı vurgulanmaktadır. Dolayısıyla temel tasarımı, taşıma gücü ve oturma hesaplarının sağlıklı yapılabilmesi için mühendislerin deney öncesi hazırlıklara, ekipman standardizasyonuna ve veri yorumlama aşamasına azami özen göstermeleri gerektiği ifade edilmektedir.

Kayabaşı (2021) çalışmasının amacı, farklı deney yöntemleriyle belirlenen kaya kütlesi ve sağlam kaya elastisite ile deformasyon modüllerinin birbirine karıştırılmaması gerektiğini ortaya koymak ve aralarındaki ilişkileri istatistiksel olarak incelemektir. Bu bağlamda, Deriner barajı (Artvin) ve Ermenek barajı (Karaman) sahalarında

gerçekleştirilen dilatometre, plaka yükleme ve laboratuvar deneylerinden elde edilen veriler derlenmiş; kaya kütlesi elastisite ve deformasyon modülleri ile sağlam kaya statik ve dinamik elastisite modülleri regresyon analizleriyle karşılaştırılmıştır. Analizler, özellikle düşük modül değerlerinde deformasyon ve elastisite modüllerinin oranlarının bire yakınsadığını, yüksek değerlerde ise dağılım gösterdiğini; ayrıca laboratuvar ortamında belirlenen dinamik ve statik elastisite modüllerinin ayrışma derecesi azaldıkça birbirine yaklaştığını ortaya koymuştur. Sonuç olarak, her kaya kütlesi ve kaya örneğinin kendine özgü özellikleri nedeniyle modüllerin birbirinin yerine kullanılmasının mühendislik tasarımlarında hatalı sonuçlara yol açabileceği vurgulanmış, önerilen ampirik bağıntıların yalnızca benzer saha koşullarında geçerli olabileceği belirtilmiştir.

Tezin konusu olan dinamik elastisite modülü ile statik elastisite modülü arasındaki ilişkiyi analiz eden çalışmalar da yapılmıştır. Özellikle kayalarda yapılan çalışmalar oldukça fazladır.

Shijie Shen (2024) yaptığı çalışma ile, petrol ve doğal gaz mühendisliği uygulamalarında kritik rol oynayan kayaçların mekanik parametrelerinin belirlenmesinde kullanılan statik ve dinamik yöntemler arasındaki ilişkiyi incelemeyi amaçlamaktadır. Kapsam olarak, farklı kaya türlerinde dinamik elastisite modülü (E_d) ile statik elastisite modülü (E_s) arasındaki korelasyonlar literatürde sunulan geniş deneysel veriler üzerinden karşılaştırılmıştır. Yöntem olarak, akustik loglama, sismik veriler ve laboratuvar deneyleri ile elde edilen dinamik parametreler, basınç deneyleri ile belirlenen statik parametrelerle regresyon analizleri üzerinden ilişkilendirilmiş; doğrusal, logaritmik ve üstel dönüşüm modelleri test edilerek kaya türlerine özgü en uygun korelasyon tipleri belirlenmiştir. Sonuçlar, magmatik ve metamorfik kayaçlarda güç fonksiyonu ilişkilerinin, sedimanter kayaçlarda ise doğrusal ve logaritmik ilişkilerin en uygun tahmin modellerini sunduğunu; dinamik elastisite modülünün çoğunlukla statik elastisite modülünden daha yüksek çıktığını; buna karşılık dinamik ve statik Poisson oranları arasında belirgin bir korelasyon bulunmadığını göstermiştir. Bu bulgular derlenmiş, Tablo 2.1. üzerinde gösterilmiştir. Çalışma sondaj mühendisliği ve rezervuar modellemesi gibi uygulamalarda statik parametrelerin dinamik verilerden güvenilir biçimde tahmin edilmesine katkı sağlamaktadır.

Tablo 2.1. Kaya tiplerine ve koşullara göre dinamik elastisite modülü ile statik elastisite modülü arasında kurulan ilişkiler (Shijie Shen, 2024)

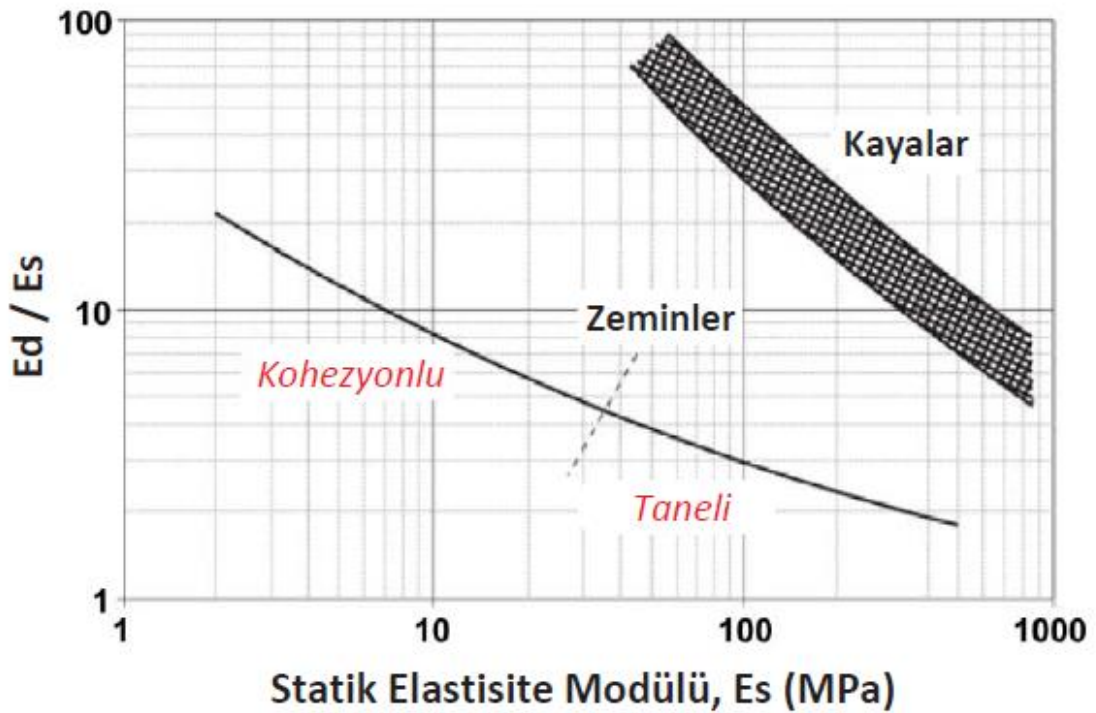
NO	Formül	Birim	Regresyon	Kaya Tipi	Referans
1	$E_s = 1.137E_d - 9.68$	GPa	0.92	Granit	Belikov et al. (1970)
2	$E_s = 1.263E_d - 29.5$	GPa	0.82	Magmatik– Metamorfik	King (1983)
3	$E_s = \alpha E_d^\beta$, $\alpha \in 0.097-0.152$, $\beta \in 1.38-1.48$	GPa	0.96–0.99	Kumtaşı– Granite	Van Heerden (1987)
4	$E_s = 0.64E_d - 0.32$	GPa	0.84	Tüm Tipler	Eissa and Kazi (1988)
4	$E_s = 0.74E_d - 0.82$	GPa	0.86	Tüm Tipler	Eissa and Kazi (1988)
5	$\log_{10} E_s = 0.77 \log_{10} (\rho_{\text{bulk}} E_d) + 0.02$	GPa	0.91	Sedimanter	Eissa and Kazi (1988)
6	$E_s = 0.69E_d + 6.40$	GPa	0.75	Tüm Tipler	McCann and Entwisle (1992)
7	$E_s = 1.05E_d - 3.16$	GPa	0.99	Sedimanter	Christaras et al. (1994)
8	$E_s = 0.83E_d$	GPa	-	Beton	Neville (1995)
9	$E_s = 1.25E_d - 19$	GPa	-	Yapısal Tasarım	CP110 (1972)
10	$E_s = 0.018E_d^2 + 0.422E_d$	MPsi	0.75	Sedimanter	Lacy (1997)
11	$E_s = 0.0293E_d^2 + 0.4533E_d$	MPsi	0.74	Kumtaşı	Lacy (1997)
12	$E_s = 0.0428E_d^2 + 0.2334E_d$	MPsi	0.72	Shale	Lacy (1997)

Tablo 2.1. (Devam) Kaya tiplerine ve koşullara göre dinamik elastisite modülü ile statik elastisite modülü arasında kurulan ilişkiler (Shijie Shen, 2024)

NO	Formül	Birim	Regresyon	Kaya Tipi	Referans
13	$E_s = 0.2807E_d$	GPa	0.60	Sedimanter	Brautigam et al. (1998)
14	$E_s = 1.153E_d - 15.2$	GPa	-	($E_s > 15$ GPa)	Nur and Wang (1999)
15	$E_s = 0.8069E_d$	GPa	0.92	Kompozit Malzeme	Helvatjoglu et al. (2006)
16	$E_s = 0.7707E_d - 5854$	GPa	0.96	Tüm Tipler	Mokovciakova and Pandula (2003)
17	$E_s = e^{(0.0477E_d)}$	GPa	0.72	Tüm Tipler	Fahimifar and Soroush (2003)
18	$E_s = 0.5087E_d - 0.6 \times 10^6$	Psi	0.60	Kumtaşı	Al-Tahini (2003)
19	$E_s = 0.0158(E_d)^{2.74}$	GPa	-	Shale	Ohen (2003)
20	$E_s = 0.541E_d + 12.852$	GPa	0.92	Kireçtaşı	Ameen et al. (2009)
21	$E_s = 0.8647E_d - 2.085$	GPa	0.96	Sedimanter	Brotons et al. (2014)
22	$\log_{10} E_s = 1.275 \log_{10} (\rho_{bulk} E_d) - 4.714$	GPa	0.97	Sedimanter	Brotons et al. (2014)
23	$E_s = 0.932E_d - 3.421$	GPa	0.95	Tüm Tipler	Brotons et al. (2016)
24	$\log_{10} E_s = 0.967 \log_{10} (\rho_{bulk} E_d) - 3.306$	GPa	0.89	Tüm Tipler	Brotons et al. (2016)
25	$E_s = 0.014E_d^{1.96}$	GPa	0.87	Kireçtaşı	Najibi et al. (2015)
26	$E_s = E_d$	GPa	-	Karbonatlı	Martínez-Martínez et al. (2012)
27	$E_s = 0.076(V_p)^{3.23}$	GPa	-	Shale	Horsrud (2001)
28	$E_s = 0.169(V_p)^{3.324}$	GPa	0.90	Kireçtaşı	Najibi et al. (2015)
29	$E_s = E_d / (3.8\lambda^{0.58})$	-	-	Kireçtaşı – Mermer	Martínez-Martínez et al. (2012)

Tablo 2.1. incelendiğinde de zeminlerde yapılan çalışmalar kayalara göre daha sınırlıdır fakat tez çalışmasında yol gösterici olmuştur. Benzer bir çalışmanın zeminler üzerinde yapılabileceği fikri oluşmuştur.

Alpan (1970) zeminin mekanik özellikleri hakkında ayrıntılı bir çalışma yapmıştır. Makalenin büyük kısmı temel gerilim-şekil değiştirme ve zaman ilişkileriyle ilgili değerlendirmelere ayrılmıştır. Etkili gerilimin önemli ilkesi sunulmakta, ardından gerilim-deformasyon ilişkileri tartışılmaktadır. Konsolidasyon süreci, yani yüklemeye sonra gözenek suyu basıncının zamana bağlı olarak dağılması, ayrıntılı olarak ele alınmaktadır. Doğrusal gerilim-şekil değiştirme ilişkilerinin sınırlı bir aralıkta topraklara uygulanabilirliği tartışılmakta, ardından özellikle hakim drenaj koşullarına vurgu yapılarak başarısızlık kriterleri ve kayma direnci hakkında bir açıklama yapılmaktadır. Gerilim oranının mukavemet üzerindeki etkisi, gerilim-şekil değiştirme-zaman ilişkilerinin ele alınmasının son bölümünün konusunu oluşturmaktadır. Bu son bölümde ise hem zeminde hem kayada statik ve dinamik elastisite modülü arasındaki ilişkiyi analiz etmiştir. Şekil 2.1. de gösterilen ilişki ise günümüz yönetmeliklerinde, kitaplarında ve bilgisayar programlarında temel olarak kullanılmaktadır.



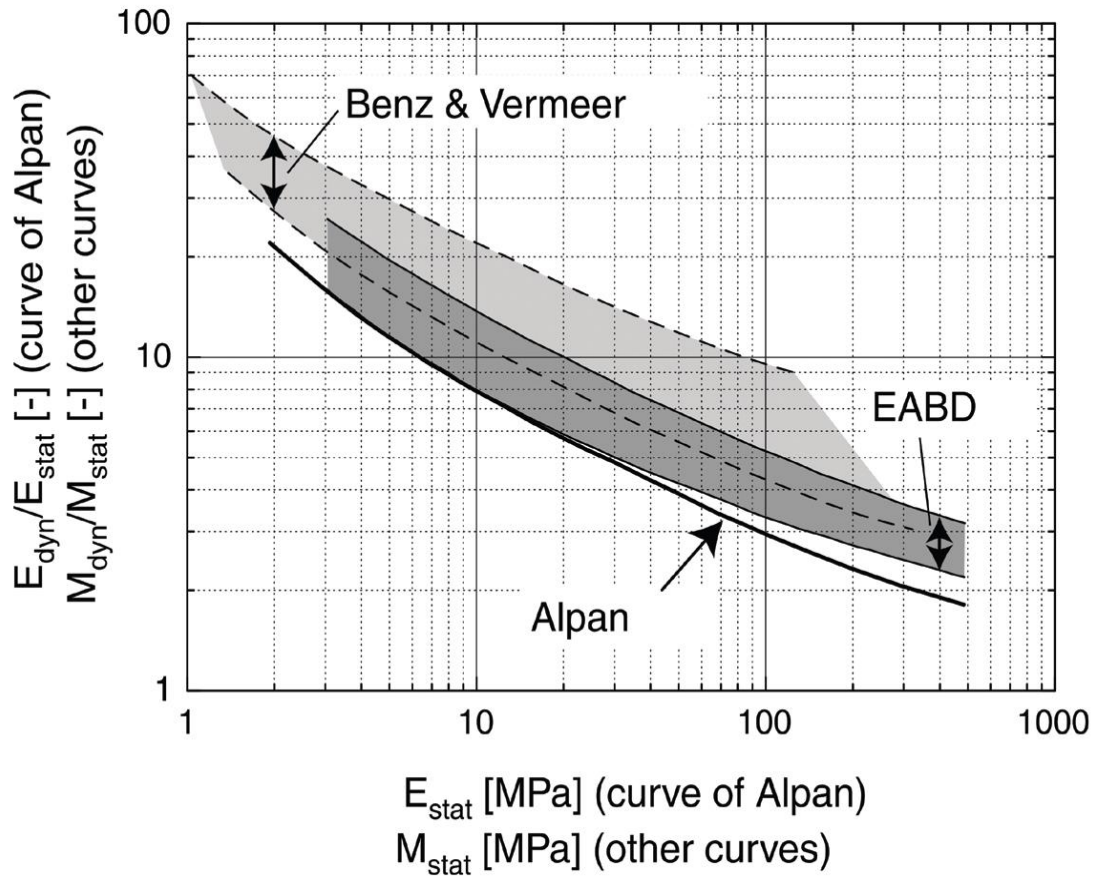
Şekil 2.1. Alpan eğrisi (Alpan, 1970)'den değiştirilmiştir.

Alman Geoteknik Derneği (EABD), bir konferans düzenleyerek geoteknik mühendisliği alanındaki en son araştırmaları, yenilikleri ve uygulamaları paylaşmak ve tartışmak için akademisyenleri, profesyonelleri ve endüstri temsilcilerini bir araya getirmektedir. 2001 yılında yapılan konferans ile zeminlerde dalga yayılımı, dinamik analizler için zemin parametrelerinin belirlenmesi, dinamik yüklere maruz kalan temeller ve kazık temeller gibi konularda çalışmalar yapılmış ve bu konulara dair mühendislik dergisi sunmuştur (EABD, 2001). 2018 yılında bu çalışma genişletilmiş ve güncellenmiş hali ile yeni bir baskı yayımlanmıştır. Geoteknik mühendisliğinin geniş yelpazesini kapsayarak, katılımcılara çeşitli perspektifler sunmuştur. Bu çalışmalar bazı kaynaklarda Alman Geoteknik Derneği (DGGT, 2018) olarak görülmektedir.

Benz (2007) kohezyonlu zeminlerde odometrik ve dinamik elastisite modülü ile hacimsel deformasyon modülü arasındaki ilişkiyi analiz etmiştir. Literatürdeki mevcut korelasyonları ve çalışmada sunulan verileri analiz ederek, bu korelasyonların güvenilirliği ve sınırlamaları üzerine yorumlarda bulunmuşlardır. Çalışmada sunulan korelasyonların geçerliliğini ve uygulanabilirliğini tartışarak, bu tür korelasyonların farklı zemin tipleri ve koşulları için nasıl değişebileceğini incelemişlerdir. Bu tartışma yazısı, zemin mekaniği alanında çalışan araştırmacılar için statik ve dinamik rijitlik modülleri arasındaki ilişkilerin daha iyi anlaşılmasına katkıda bulunmayı hedeflemektedir.

Wichtmann and Triantafyllidis (2009) zeminlerin dinamik statik rijitlik modülleri arasındaki ilişkileri ortaya koymak amacıyla bir çalışma gerçekleştirilmiş olup, farklı tane boyutu dağılımlarına ve sıklık derecelerine sahip kum ve çakıllar üzerinde yapılan deneysel incelemeleri kapsamaktadır. Çalışmada, rezonans kolon ve ultrasonik P-dalgası ölçümleri ile küçük şekil değiştirmelerde kesme ve kısıtlı modüller (G_{max} , M_{max}), odometre deneyleri ile büyük şekil değiştirme kısıtlı modülü (M_{oedo}) ve üç eksenli drenajlı basınç deneyleriyle sekant elastisite modülü (E_{50}) elde edilmiş; bu değerler farklı sıklık ve gerilme seviyeleri için karşılaştırılarak literatürde yaygın kullanılan bağıntılarla test edilmiştir. Elde edilen bulgular, mevcut korelasyonların özellikle iri taneli ve iyi derecelenmiş zeminlerde dinamik rijitliği ciddi biçimde düşük tahmin ettiğini göstermiş, bu nedenle çalışmada statik modüllerden dinamik modüllerin güvenilir şekilde tahmin edilebilmesine imkân veren yeni bağıntılar önerilmiştir. Sonuç olarak, önerilen korelasyonların sınırları net bir şekilde tanımlanmış olup, mühendislik uygulamalarında daha doğru parametrelerin kullanılmasına ve tasarım süreçlerinin güvenilirliğinin artırılmasına katkı sağlamaktadır.

Kelder (2015) Amsterdam şehir merkezindeki bir kazı çalışması sırasında oluşan deformasyonları incelemek ve bu gözlemleri sayısal analizlerle karşılaştırmaktır. Özellikle, PLAXIS 2D yazılımında kullanılan Hardening Soil (HS) ve Hardening Soil Small Strain Stiffness (HSsmall) modellerinin performanslarını değerlendirerek, bu modellerin tasarım sürecindeki etkinliklerini belirlemeyi hedeflemektedir. Bu kapsamda HS ve HSsmall zemin modelleri kullanılarak yapılan bu analizlerde, özellikle (Alpan, 1970; EABD, 2001; Benz and Vermeer, 2007) tarafından önerilen korelasyonlar dikkate alınmıştır. Elde edilen sonuçlar, inklinometre verileriyle karşılaştırılarak modellerin doğruluğu ve güvenilirliği değerlendirilmiştir. Makalesinde statik ve dinamik elastisite modülleri ve hacimsel deformasyon modüllerini arasındaki ilişkiyi incelemiş ve daha önceki 3 çalışmayı (Alpan, 1970; EABD, 2001; Benz and Vermeer, 2007) kıyaslamıştır. Çalışma, HSsmall modelinin, özellikle küçük deformasyonlar söz konusu olduğunda, zemin davranışını daha doğru bir şekilde yansıttığını göstermiştir.



Şekil 2.2. $E_d/E_s - E_s$ ve $M_d/M_s - M_s$ ilişkisi (Kelder, 2015)

Şekil 2.2. de Alpan statik elastisite modülü (E_s) ve dinamik elastisite modülü (E_d) arasındaki bağıntı üzerine yapılan çalışmalar görülmektedir. Benz and Vermeer ve EABD ise statik hacimsel deformasyon modülü (M_s) ve dinamik hacimsel deformasyon modülü (M_d) arasındaki bağıntı üzerine çalışmalar yapmıştır. (Alpan, 1970; EABD, 2001; Benz and Vermeer, 2007) korelasyonlarının uygulanmasıyla elde edilen sonuçlar, sahada ölçülen verilerle uyumlu bulunmuştur. Bu 3 çalışmanın birbirine yakın sonuçlar veren ve kabul gören deneysel ilişkiler olduğunu belirtmiştir (Kelder, 2015). Bu bulgular, küçük deformasyonların önemli olduğu geoteknik tasarımlarda HSsmall modelinin kullanımının avantajlarını ortaya koymaktadır.

Wichtmann (2017) kum ve çakıllarda dinamik ve statik rijitlik modülleri arasındaki ilişkiyi incelemek amacıyla bir çalışma yapmıştır. Dinamik deneylerin pahalı ve karmaşık olması nedeniyle mühendislik uygulamalarında genellikle statik deneylerden yararlanılarak dinamik rijitlik tahmin edilmeye çalışılmıştır. Bu amaçla 19 farklı tane boyutu dağılımına ve ince malzeme oranına sahip malzeme üzerinde rezonans kolon ve P-dalgası ölçümleriyle küçük şekil değiştirme modülleri (G_{max} , M_{max}), ödometre deneyleriyle hacimsel deformasyon modülü (M_{oedo}) ve üç eksenli drenajlı basınç deneyleriyle Elastisite modülü (E_{50}) belirlenmiştir. Elde edilen veriler, literatürde yaygın kullanılan korelasyonlarla karşılaştırıldığında, özellikle iri taneli ve iyi derecelenmiş malzemelerde dinamik rijitliğin mevcut bağıntılarla önemli ölçüde düşük tahmin edildiği görülmüştür. Bu nedenle çalışmada, statik verilerden dinamik rijitlik modüllerini daha doğru tahmin etmeyi sağlayan yeni ve sınırları net olarak tanımlanmış korelasyonlar önerilmiştir.

Sadık Öztoprak (2018) mühendislik projelerinde zemin davranışını belirlemek amacıyla geoteknik arazi karakterizasyonunun önemini vurgulamaktadır. Farklı zemin türlerinin fiziksel ve mekanik özelliklerinin belirlenmesi, tasarım ve uygulama süreçlerinde güvenliği artırmayı hedeflemektedir. Çalışmada arazi incelemeleri, sondaj çalışmaları, laboratuvar testleri ve jeofizik yöntemler gibi farklı veri toplama teknikleri ele alınmaktadır. Zeminlerin taşıma gücü, sıkışabilirlik ve sıvılaşma potansiyeli gibi parametreleri değerlendirmek için standart penetrasyon testi (SPT), koni penetrasyon testi (CPT) ve sismik yöntemler gibi teknikler kullanılmıştır. farklı zemin türleri ve mühendislik projelerinde kullanılan geoteknik karakterizasyon yöntemlerini içermektedir. Ayrıca, çeşitli saha ve laboratuvar yöntemlerinin karşılaştırılması ve uygulanabilirliği tartışılmıştır. Karşılaştırmada statik elastisite modülü kullanılarak

dinamik elastisite modülünün doğrudan hesaplanabileceğini fakat dinamik elastisite modülü kullanılarak statik elastisite modülüne geçmenin oldukça zor olduğunu belirtmiştir.

Korkmaz, Öztoprak ve Sargın (2025) kumlu zeminlerin dinamik ve statik rijitlik değerlerini ve bu iki parametre arasındaki ilişkiyi incelemektedir. Alpan'ın rijitlik oranı ile doğruluğunu karşılaştırılarak değerlendirilmiştir. Alpan eğrisiyle en iyi uyumun, Poisson oranı (ν) 0.2 olarak kabul edildiğinde ve statik elastisite modülü (E_s) sekant modülünün (E_{50}) iki-üç katı olarak varsayıldığında elde edildiği belirlenmiştir.

Tablo 2.2. Tez çalışmasında taranan makaleler

No	Amaç	Kapsam	Yöntem	Sonuç	Çalışma
1	V_p ile yoğunluk arasındaki ampirik ilişkiyi belirlemek	Sedimanter kayalarda hız-yoğunluk ilişkisi	Geniş deneysel veri seti	Genel bir yoğunluk-hız ilişkisi sunuldu; günümüzde hâlen kullanılmakta	Gardner and Gregory (1974)
2	Temel mühendisliği ve zemin mekaniği için parametreler geliştirmek	Teorik-pratik yöntemler, elastisite ve sıkışma modülü	Sismik hızlara dayalı formüller geliştirme	Sıkışma ve elastisite modülleri için bağıntılar verildi	Bowles, <i>Foundation Analysis and Design</i> (1988)
3	P ve S dalgalarının mühendislikte önemini vurgulamak	Jeoteknik ve çevresel jeofizik uygulamaları	Yüksek çözünürlüklü sismik kırılma verilerinin yorumlanması	Yoğunluk formülü önerildi, sıkı yapılar detaylı haritalanabildi	Lankston (1990)
4	Deprem mühendisliğinde zemin davranışını açıklamak	Dinamik parametreler ve kayma modülü	Teorik analizler ve deneysel ilişkiler	Kayma modülü formülü geliştirildi; kitap ders kaynağı oldu	Kramer, <i>Geotechnical Earthquake Engineering</i> (1996)
5	Menard presiyometresi deneyindeki hataları ortaya koymak	Deney aşamaları (sondaj, prob yerleşimi, kalibrasyon vb.)	Uygulama hatalarının analizi	Yanlış uygulamalarda güvenilir olmayan değerler elde edildiği vurgulandı	JMO (2020)
6	Kaya modüllerinin karıştırılmasını önlemek ve ilişkileri istatistiksel incelemek	Baraj sahalarındaki deney verileri	Regresyon analizleri	Modüllerin yerine kullanılmasının hatalı sonuçlara yol açabileceği gösterildi	Kayabaşı (2021)
7	Dinamik ve statik modüller arasındaki ilişkiyi belirlemek	Farklı kaya türleri ve literatür verileri	Akustik loglama, sismik veriler, basınç deneyleri	Magmatik/metamorfik için güç, sedimanter için doğrusal ilişkiler bulundu	Shen, Gao and Jia (2024)

Tablo 2.2. (Devam) Tez çalışmasında taranan makaleler

No	Amaç	Kapsam	Yöntem	Sonuç	Çalışma
8	Zeminin mekanik özelliklerini incelemek	Gerilim-şekil değiştirme, konsolidasyon, kayma direnci	Teorik değerlendirme	Dinamik–statik elastisite modülü ilişkisi geliştirildi (Alpan eğrisi)	Alpan (1970)
9	Geoteknikte yenilikleri paylaşmak	Dalga yayılımı, dinamik analiz, kazık temeller	Konferans bildirileri	Dinamik parametreler ve korelasyonlar derlendi	EABD/DGGT (2001/2018)
10	Kohezyonsuz zeminlerde odometrik ve dinamik sertlik ilişkisini incelemek	Literatür korelasyonları ve yeni veriler	Karşılaştırmalı analiz	Korelasyonların güvenilirliği ve sınırlamaları tartışıldı	Benz and Vermeer (2007)
11	Zeminlerde dinamik–statik rijitlik ilişkilerini araştırmak	Kum ve çakıllar	Rezonans kolon, P-dalgası, ödometre, üç eksenli deneyler	Yeni bağıntılar önerildi; mevcutlar iri taneli zeminlerde yetersiz bulundu	Wichtmann (2009, 2017)
12	Kazı deformasyonlarını HS ve HSsmall modelleriyle kıyaslamak	Amsterdam kazı çalışması	Plaxis 2D analizleri, inklinometre karşılaştırması	HSsmall küçük deformasyonlarda daha doğru sonuç verdi	Kelder (2015)
13	Zeminlerin geoteknik karakterizasyonunun incelemek	Farklı zemin türleri, SPT, CPT, sismik testler	Arazi ve laboratuvar deneyleri	Dinamikten statik modüle geçişin zor olduğu belirtildi	Öztoprak (2018)
14	Kumlu zeminlerde dinamik–statik rijitlik ilişkisini analiz etmek	Alpan yaklaşımı ile karşılaştırma	Deneysel çalışma	En iyi uyum $v=0.2$ ve $E_s \approx 2-3 E_{50}$ varsayımıyla elde edildi	Korkmaz vd. (2025)

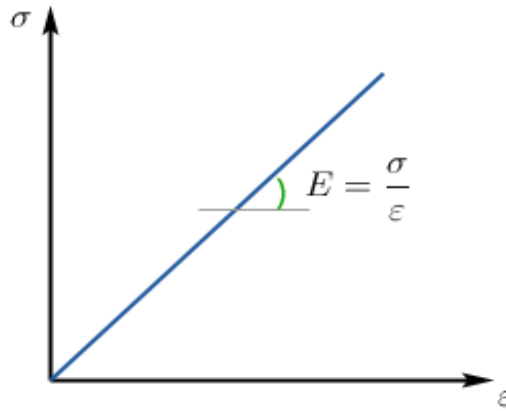
Tablo 2.2.'de gösterilen bu literatür taramasında, sismik yöntemler kullanılarak dinamik elastisite modülünün bulunabildiği fakat doğrudan statik elastisite modülünü bulabilen bir formül geliştirilemediği gözlemlenmiştir. Geoteknik analiz programları kullanılırken zeminin statik elastisite modülü gerekmektedir. Bu nedenle zeminlerde statik elastisite modülünün, jeofizik yöntemlerle hesaplanması konusunda ihtiyaç olduğu fark edilmiştir.

3. MATERİYAL VE YÖNTEM

Hooke Kanunu, malzemelerin elastik davranışını tanımlayan temel bir fizik ve mühendislik yasasıdır. Hooke Kanunu, katı malzemelerin elastik limitler içindeki davranışını açıklamak için gerilme (σ) ve gerinim (ϵ) cinsinden formüle edilir (denklem 3.1). Geoteknikte, Hooke Kanunu (gerilme-gerinim ilişkisi), deformasyon hesaplamaları ve temel tasarımında kullanılır.

Elastisite modülü; maddenin kuvvet altında elastik şekil değiştirmesinin ölçütüdür. Yani bir maddede birim boyunu bir kat arttırmak için uygulanması gerekli kuvveti gösterir. Şekil 3.1.'de gösterildiği gibi eğimden hesaplanır. Birim olarak kg/cm^2 ya da kPa olarak gösterilir.

$$\text{Elastisite Modülü (E)} = \text{Normal Gerilme (}\sigma\text{)} / \text{Birim Uzama (}\epsilon\text{)} \quad (3.1)$$



Şekil 3.1. Elastisite modülü

Geoteknik mühendisliğinde oturma analizi yapabilmek için elastisite modülü kullanılır. Analizlerde kullanılan bilgisayar programları statik elastisite modülü üzerinden hesaplamalar yapar.

Aynı zamanda sıkışma modülü, kayma modülü ve elastisite modülü arasında basit bir ilişki de vardır. Böylece modüller arası hesaplamalar Poisson kullanılarak denklem 3.2. ve denklem 3.3.'e göre yapılabilir. (Bowles, 1988) (Kramer, 1996)

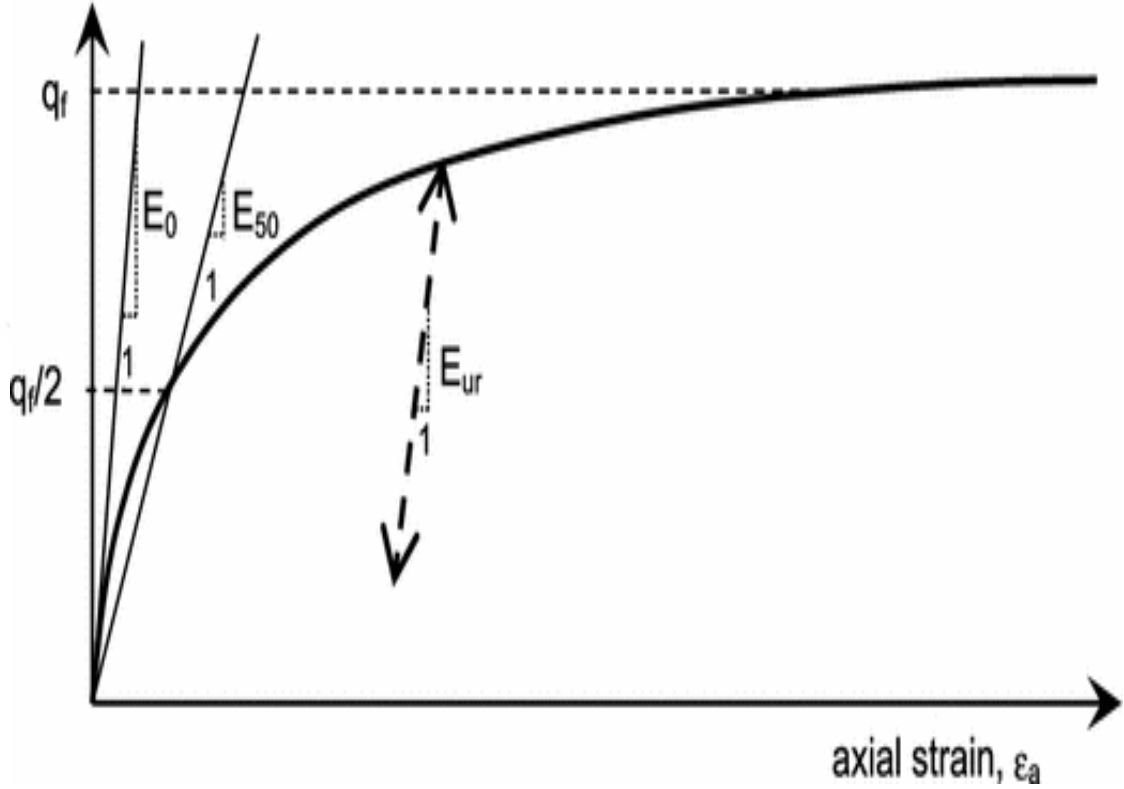
$$\text{Sıkışma Modülü (K)} = E / 3(1 - 2\nu) \quad (3.2)$$

$$\text{Kayma Modülü (G)} = E / 2(1 + \nu) \quad (3.3)$$

Burada E elastisite modülü, ν ise Poisson oranıdır. Geoteknik mühendisliği için bu üç modül de önemlidir.

3.1. Statik Elastisite Modülü

Zeminde statik elastisite modülünü elde etmek için arazide presiyometre deneyi veya alınan numuneler üzerinde laboratuvarında çekme – basma ve eğme deneyleri yapılır. Bu eğriler üzerinden elastisite modülü hesaplanabilir.



Şekil 3.2. Statik elastisite modülleri (Ramalakshmi, 2020)

Şekil 3.2. üzerinde elastisite modülünün türleri gösterilmiştir.

E_0 : Başlangıç teğet deformasyon modülüdür. Dinamik ve statik elastisite modülleri karşılaştırılırken kullanılan değerdir.

E_{50} : %50 nihai gerilme mertebesindeki sekant deformasyon modülüdür.

E_{ur} : Boşaltma fazında deformasyon modülüdür. Laboratuvar deneylerinde yükleme, boşaltma ve tekrar yükleme eğrilerinden elde edilen değerdir.

q_f : Nihai gerilme değeridir.

$q_f/2$: Nihai gerilmenin yarısı olduğu değerdir.

3.1.1. Konsolidasyon deneyi

Konsolidasyon deneyi, bir zeminin yük altında nasıl sıkıştığını ve nasıl davranış sergilediğini ölçmek için yapılan bir laboratuvar testidir. Deney genellikle kil gibi kohezyonlu zeminlerde test edilir. Bu deneyde hacimsel sıkışma katsayısı ve konsolidasyon katsayılarının yanında odometrik deformasyon modülü (E_{od}) de ölçülür. Geoteknik hesaplamalarda yaygın olarak bu modül kullanılır. Denklem 3.4.'e göre E_{50} ve E_{od} yaklaşık olarak eşit kabul edilir (EABD, 2001).

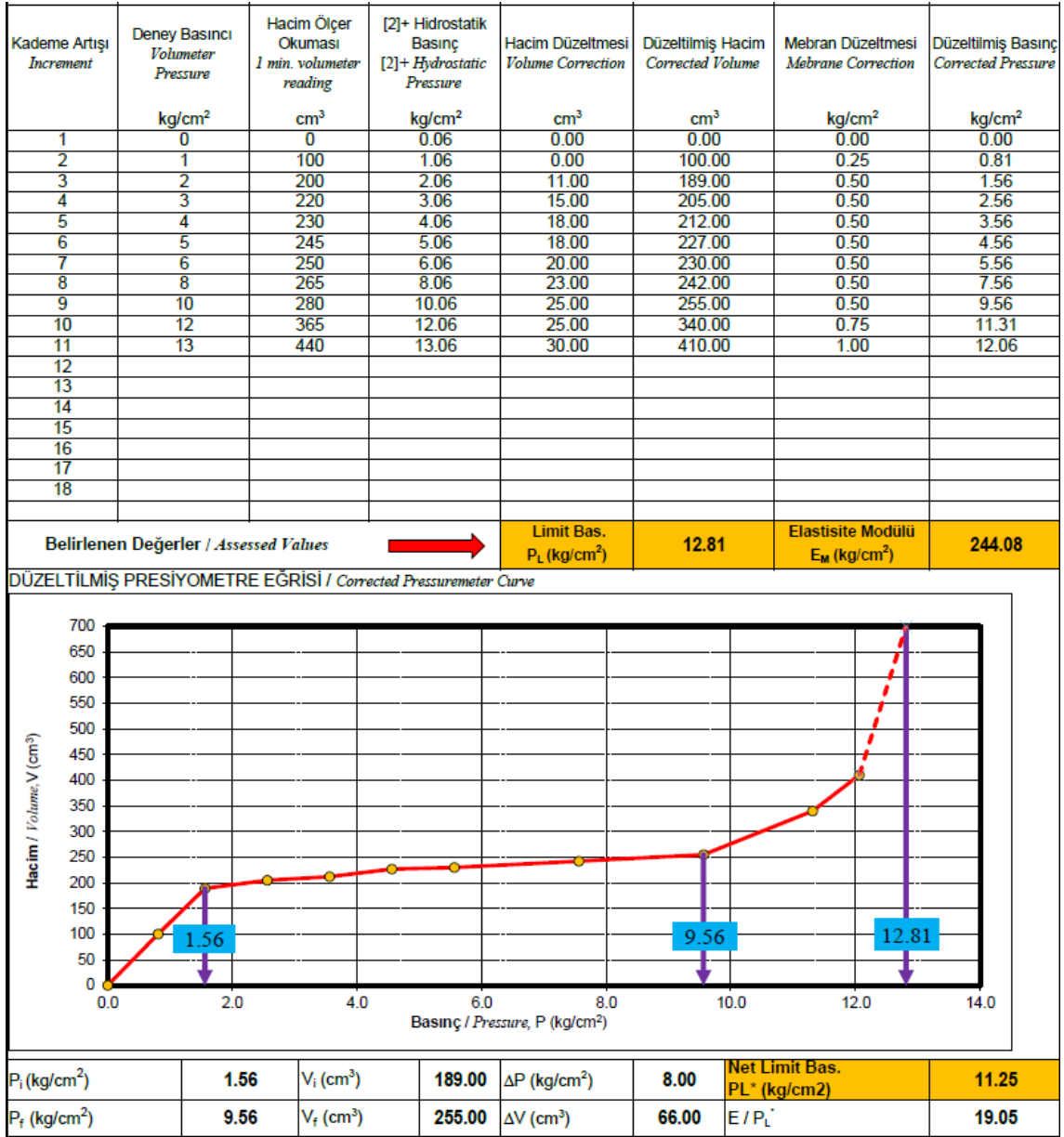
$$E_{od} \approx E_{50} \text{ (EABD, 2001)} \quad (3.4)$$

3.1.2. Presiyometre deneyi

Deney temel olarak, genişleyebilen silindirik bir probun delinmiş bir kuyuya indirilerek şişirilmesi ve bu sırada prob içerisindeki basınç ve hacim değişikliklerinin ölçülmesi şeklinde gerçekleştirilir. Ülkemizde yaygın bir şekilde G tipi Menard presiyometre kullanılır.

Menard presiyometre deneyi kendini tutabilen yumuşak zeminlerden, zayıf kayalara kadar olan zemin birimlerinde uygulanabilmektedir. Deney kuyu çeperlerinde yer alan zeminin gerilme-deformasyon özelliğini ortaya koyar.

Presiyometre deneyi teorik olarak oldukça basit bir düzeneğe sahip olmasına rağmen uygulama konusunda oldukça uzman kişilerle yapılması gereken bir saha deneyidir. Anlamlı verilerin elde edilebilmesi için ortamın özelliklerine göre prop seçimi ve prop türüne göre sondaj çapının ayarlanması gerekmektedir. Özellikle ölçüm yapılacak olan her arazide ilk önce hacim ve basınç düzeltmelerinin yapılması ayrıca her seviyede diferansiyel kalibrasyonlarının yapılması gerekmektedir.



Şekil 3.3. Presiyometre deney sonuçları

Deneyde okunan hacimler ve verilen basınçlar şekil 3.3. örneğinde olduğu gibi tabloya işlenir. Bu veriler üzerine hacim, hidrostatik ve membran düzeltmesi yapılarak düzeltilmiş hacim ve düzeltilmiş basınç değerleri hesaplanır. Hesaplanan değerler kullanılarak presiyometre eğrisi oluşturulur. Oluşan eğriden plastik ve elastik bölgeler seçilir. Bu eğrilerin plastik bölgesinden limit basınç (P_L) ve elastik bölgesinden presiyometre deformasyon modülü (E_m) denklem 3.5 ile elde edilir (Baguelin, 1978).

$$E_m = 2(1 + \nu) (V_c + V_m) \left(\frac{\Delta P}{\Delta V} \right) \quad (3.5)$$

Tablo 3.1. Menard α_m faktörü (Briaud, 1992)

<i>Zemin Tipi</i>	<i>Turba</i>		<i>Kil</i>		<i>Silt</i>		<i>Kum</i>		<i>Kum ve Çakıl</i>	
	E_m / P_{LN}	α_m	E_m / P_{LN}	α_m	E_m / P_{LN}	α_m	E_m / P_{LN}	α_m	E_m / P_{LN}	α_m
<i>Aşırı Konsolide</i>	<i>Tüm değerler</i>	1	> 16	1	> 14	2/3	> 12	1/2	> 10	1/3
<i>Normal Konsolide</i>		1	9 – 16	2/3	8 – 14	1/2	7 – 12	1/3	6 – 10	1/4
<i>Ayrılmış ve/veya Yoğrulmuş</i>		1	7 – 9	1/2	-	1/2	-	1/3	-	1/4
<i>Kaya</i>	<i>Çok çatlaklı</i>			<i>Diğer koşullar</i>				<i>Az çatlaklı veya aşırı ayrılmış</i>		
	$\alpha_m = 1/3$			$\alpha_m = 1/2$				$\alpha_m = 2/3$		

Yapılan presiyometre deneyine göre elde edilen E_m ve P_L değerlerine göre tablo 3.1. üzerinde Menard α_m faktörü belirlenir. Bu faktöre göre odometrik deformasyon modülü (E_{od}) ya da %50 nihai gerilme mertebesindeki sekant deformasyon modülüdür. (E_{50}) denklem 3.6. ile hesaplanır (Leblanc, 1982).

$$E_{50} = (E_m / \alpha_m) \quad (3.6)$$

3.1.3. Standart penetrasyon deneyi

Standart penetrasyon deneyi (SPT), zeminlerin yerinde nispi sıklık veya kıvamını belirlemek amacıyla yapılan en yaygın arazi deneylerinden biridir. Deney, genellikle karotlu sondaj çalışmaları sırasında belirli derinlik aralıklarında gerçekleştirilir ve özellikle granüler zeminlerin mühendislik özelliklerinin değerlendirilmesinde önemli bir parametre sağlar. SPT, zemin direncini darbe sayısı (N değeri) cinsinden ölçer ve bu değer çeşitli ampirik bağıntılarla zemin dayanım ve deformasyon özelliklerinin tahmininde kullanılır.

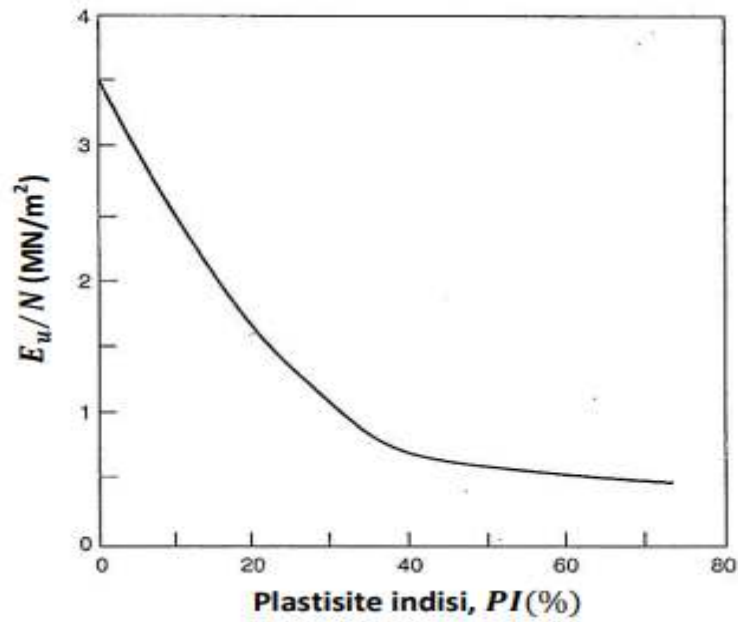
Standart penetrasyon deneyi temel olarak kohezyonsuz zeminlerdeki bir uygulamadır. Fakat deney, yaygın olarak kohezyonlu zeminlerde de yapılmaktadır. Örselenmemiş örnek almanın mümkün olduğu durumlarda kohezyonlu zeminlerde kayma dayanımı ve sıkışabilirlik parametrelerini elde etmek için laboratuvar deneyleri kullanılır.

Elde edilen N değerleri, farklı zemin türlerine göre farklı elastisite modülü tahmin etme denklemleri uygulanır. Kohezyonsuz zeminlerde (FHWA, 2002) bağıntısı ile elastisite modülü $SPT-N_{1,60}$ değeri kullanılarak zemin türüne göre tablo 3.2.'deki denklemlerle hesaplanabilir.

Tablo 3.2. $SPT-N_{1,60} - E_{50}$ bağıntıları (FHWA, 2002)

Zemin Türü	E_{50} (KPa)
Silt, kumlu silt, düşük kohezyonlu karışık zeminler	$400 N_{1,60}$
Temiz ince-orta kum ve az siltli kum	$700 N_{1,60}$
İri kum ve çakıllı kum	$1000 N_{1,60}$
Kumlu çakıl	$1200 N_{1,60}$

Kohezyonlu zeminlerde ise yaygın olarak (Poulos, 2000) yaklaşımı kullanılır. Bu yaklaşımda Atterberg limitleri deneyi ile elde edilen plastisite indisi ve bu indisten elde edilen katsayı ve zemin türü faktörü kullanılır.



Şekil 3.4. Plastisite indisi ile E_u/N arasındaki ilişki (Poulos, 2000)

Arazi deneylerinden elde edilen $SPT-N_{60}$ değerleri kullanılarak şekil 3.4. üzerinden plastisite indisine (PI) göre drenajsız elastisite modülü (E_u) belirlenir.

$$E_{50} = \beta E_u \quad (3.7)$$

Tablo 3.3. Zemin türüne göre önerilen β faktörü (Poulos, 2000)

Zemin Türü	β faktörü
Çakıl	0.9
Kum	0.8
Silt, siltli kil	0.7
Sert kil	0.6
Yumuşak kil	0.4

Zemin türüne göre β faktörü tablo 3.2.’den seçilip denklem 3.7.’de kullanılırsa sekant elastisite modülü (E_{50}) hesaplanabilir (Poulos, 2000).

3.2. Dinamik Elastisite Modülü

Zeminde dinamik elastisite modülünü hesaplamak için sismik yöntemler kullanılır. V_p ve V_s dalga hızları kullanılarak ve Hooke Kanunu temel alınarak denklem 3.8, denklem 3.9 ve denklem 3.10 adımları izlenerek elastisite modülü hesaplanır.

$$d = 0.31 V_p^{0.25} \quad (3.8)$$

$$G = V_s^2 d / 100 \quad (3.9)$$

$$E = G (3V_p^2 - 4V_s^2) / (V_p^2 - V_s^2) \quad (3.10)$$

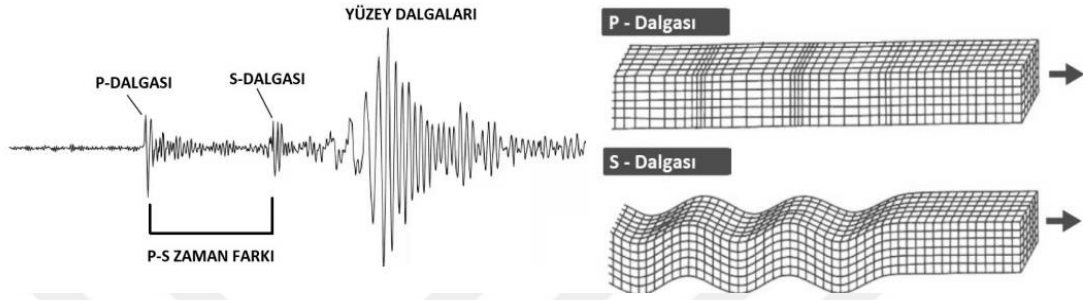
3.2.1. Jeofizik yöntemler

Jeofizik yöntemler, yeraltının yapısını, özelliklerini ve dinamiklerini incelemek için kullanılan bilimsel tekniklerdir. Bu yöntemler, yeryüzünde yapılan ölçümlerle yeraltındaki tabakaların, yapısal özelliklerin, mineral ve su kaynaklarının, petrol ve doğal gaz rezervuarlarının, fay hatlarının, volkanik aktivitelerin ve diğer jeolojik yapıların tespiti ve analizi için kullanılır.

Zemin Dinamik Elastik Parametrelerini bulabilmek için jeofizik yöntemlerden “sismik kırılma” ve “çok kanallı yüzey dalgaları analizi” yöntemleri kullanılır.

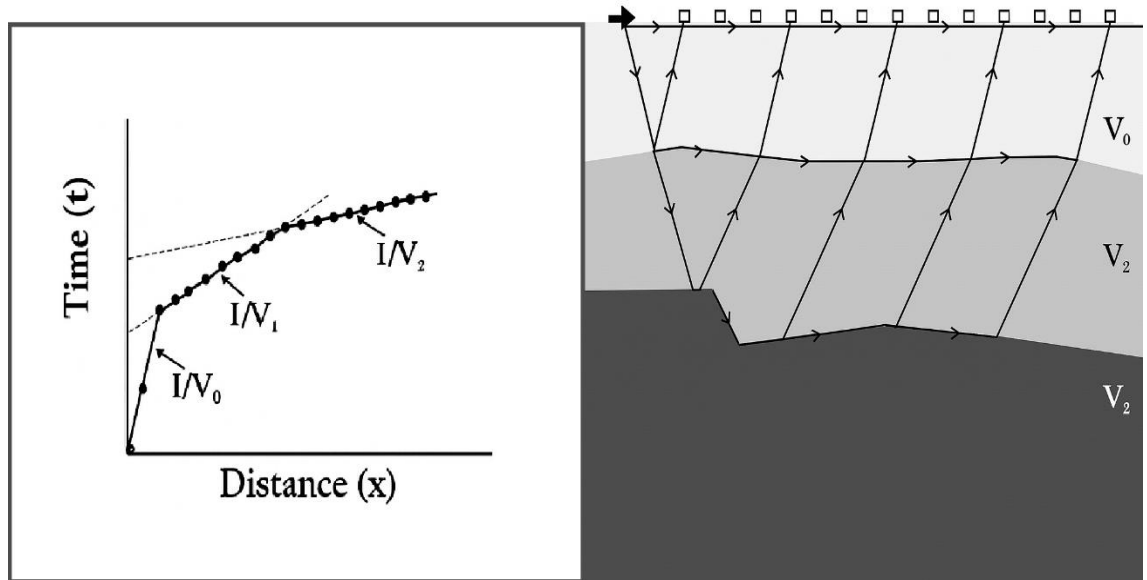
3.2.1.1. Sismik kırılma yöntemi

Sismik kırılma yönteminde yeraltına bir kaynaktan akustik dalga gönderilir. Yeraltında bulunan jeolojik formasyonlar arasındaki kırılmalar yeryüzünde zamana bağlı olarak kayıt edilir. Böylece ortaya çıkan sismik hızlardan ortamın hız dağılımlarının belirlenir ve görüntülenir.



Şekil 3.5. P ve S dalgası (Dr. József Farkas, 2008)

Sismik kırılma yöntemiyle elde edilen iki temel hız türü vardır bunlar V_p ve V_s dir. Şekil 3.5.'te görüldüğü üzere P dalgası kayda ilk gelen dalgadır. S dalgasına göre daha hızlı hareket eder. Zemin sıkılaştıkça daha hızlı ilerler. S dalgası ise kayda ikinci gelen dalgadır. Sıvı ve gaz ortamlarda hareket edemez. Yeraltında su veya boşluk varsa S dalgasının hızı düşer.



Şekil 3.6. Sismik kırılma yöntemi (https://www.geotekhawaii.com/geophys_svcs/seismic_refraction.html)

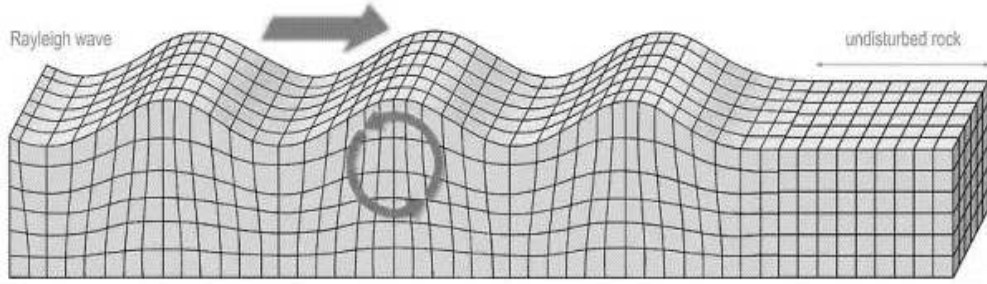
Yukardaki şekil 3.6.'de tek bir atış yapılarak yol zaman grafiği oluşturulmuştur. Jeofonlar arası mesafe (x) belli olduğundan ve jeofonlara gelen dalga süreleri (t) ölçüldüğünden dalga hızı basit olarak denklem 4.1 ile bulunur.

$$x = V t \quad (4.1)$$

Yol-zaman grafiği üzerindeki doğrular her kırılımda yeni tabakaya geçer. Doğruların eğiminden tüm tabakaların hızı bulunabilir. Karşılıklı atışlar yapılarak daha fazla veri elde edilir.

3.2.1.2. Çok kanallı yüzey dalgaları analiz yöntemi (MASW)

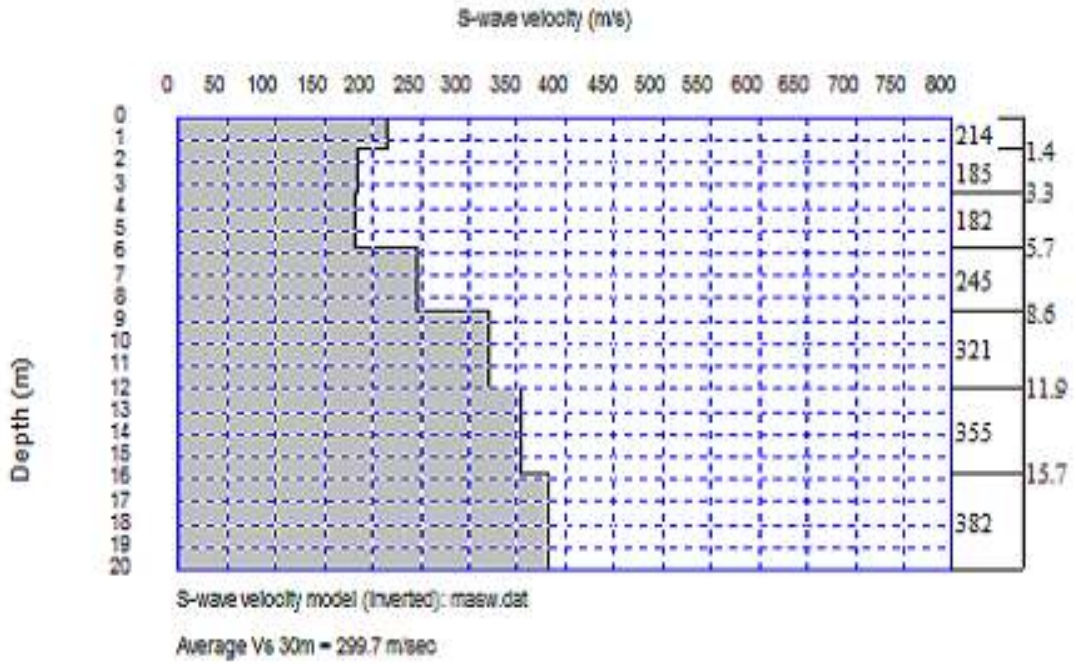
MASW yöntemi günümüzde sıkça kullanılan pratik bir yöntemdir. Bu yöntemin temelinde yüzey dalgalarından biri olan rayleigh dalgası vardır.



Şekil 3.7. Rayleigh dalgası (Dr. József Farkas, 2008)

Şekil 3.7.'de görüldüğü üzere Rayleigh dalgası, serbest yüzey boyunca, yarı sonsuz bir ortamda ilerleyen parçacıkların eliptik ve saat yönünün tersine bir hareket gösterdiği yüzey dalgasıdır.

MASW yönteminde jeofonlar yüzey dalgasını kaydeder ve kaydedilen veriler bilgisayarda frekans ortamına taşınarak tabaka kalınlıkları ve sismik hızlar bulunur. Bulunan tabaka kalınlıkları ve o tabakalara ait sismik hızlar şekil 3.8.'de gösterilmiştir.



Şekil 3.8. Tabaka kalınlıkları ve V_s değerleri

Oluşturulan dispersiyon eğri tekrar zaman ortamına atılır ve derinlik-hız ilişkisi kurulur. Buradan da tabaka kalınlıkları ve o tabakalara ait V_s değerleri elde edilir.

Sismik kırılma ve MASW yöntemi birlikte kullanılarak V_p , V_s ve h değerleri elde edilir. Bu değer ile sıkışma modülü, elastisite modülü, kayma modülü, yoğunluk, Poisson oranı gibi pek çok parametre elde edilmektedir.

3.2.1.3. Zemin dinamik-elastik parametreleri

Arazide ölçülen sismik hız değerleri zemin dinamik-elastik parametreleri hesaplamak için kullanılır. Hızlı ve düşük maliyetli olması bakımından oldukça avantajlıdır.

Fizik kuralları gereği; zemin sıkılaştıkça elastisite modülü artmaktadır. Aynı zamanda zemin sıkılaştıkça sismik hızlar da yükselmektedir. Şekilde görüldüğü gibi sismik hızlar arttıkça elastisite modülü de yükselmektedir. V_s hızından bulunan elastisite modülü dinamik elastisite modülüdür.

3.3. Statik Elastisite Modülü ile Dinamik Elastisite Modülü Arasındaki İlişki

Statik elastisite modülü (E_s), zemine yavaş ve sürekli bir kuvvet uygulandığında ortaya çıkan kalıcı olmayan deformasyon davranışını içerir. Zemin tanecikleri arasında yeniden düzenlenme, sürtünme kaybı, boşluk suyu drenajı gibi süreçler aktif hale gelir. Bu nedenle E_s , elastik + plastik deformasyonların birleşik etkisini temsil eder.

Dinamik elastisite modülü ise zemine çok kısa sürede, küçük genlikli, tekrarlı titreşimler uygulandığında ölçülür. Deformasyonlar çok küçük olduğundan zemin tamamen lineer elastik davranır ve zemin taneciklerinin elastik dokusunu temsil eder.

Statik elastisite modülü, gerçek deformasyon kapasitesini, dinamik elastisite modülü ise anlık elastik tepkiyi gösterir. Bu iki mekanizma fiziksel olarak aynı süreci temsil etmediği için, aralarında doğrudan bir eşitlik veya kesin dönüşüm kurulamaz. Fakat pratikte mühendisler, E_d verisinden statik davranışı yaklaşık tahmin etmek ister. Bu yüzden ampirik ilişkiler geliştirilmiştir.

Dinamik elastisite modülü ile statik elastisite modülü arasındaki oranlar tamamen zemin türüne, sıkılık derecesine ve deformasyon seviyesine bağlıdır. Bu nedenle E_d 'den E_s 'ye geçmek, mikro ölçekte ölçülen bir özelliği makro ölçeğe yansıtmak anlamına gelir ve bu dönüşüm, teorik değil yaklaşık ampirik bir uyarlamadır.

Pratikte mühendisler, dinamik elastisite modülü kullanarak statik davranışı yaklaşık tahmin etmek ister. Bu yüzden ampirik ilişkiler geliştirilmektedir.

4. DENEYSEL ÇALIŞMALAR

Yapılan çalışma verileri, İller Bankası bünyesinde yapılmış olan projeler için yapılan zemin etüt ve veri raporlarından elde edilmiştir. Zeminin fiziksel, mekanik ve dinamik özelliklerini anlamak için çeşitli deneyler yapılmıştır.



Şekil 4.1. Proje alanı yer bulduuru haritası

Şekil 4.1. üzerinde görüldüğü üzere Kahramanmaraş (Merkez) 9652 Ada 130 Parselde yapılan çalışmalar kapsamında 4 adet sismik ölçüm ve bunlara yakın 5 adet sondaj kuyusu açılmıştır. Bu sondaj kuyularının 3 tanesinde SPT deneyi, presiyometre deneyi ve alınan numuneler üzerinde laboratuvar deneyleri yapılmıştır. Diğer 2 sondaj kuyusu sadece presiyometre yapmak için açılmıştır. Sondaj ve sismik ölçüm lokasyonları şekil 4.2. üzerinde gösterilmiştir.



Şekil 4.2. Proje alanı üzerindeki sondaj ve sismik ölçüm yerleri

SPT deneyi yapılan kuyulardan alınan numunelere ayrıca laboratuvar deneyleri yapılmıştır. N_{60} ve Atterberg limitleri deneyinden belirlenen plastisite indisi (PI) değerleri kullanılarak sekant elastisite modülü (E_{50}) hesaplanmıştır.

Yapılan jeofizik çalışmalarında 24 kanallı sismik cihaz kullanılmıştır. V_p hızını tespit etmek için sismik kırılma yöntemi kullanılmış ve jeofon aralıkları 3 metre, offset 3 metre seçilmiştir. V_s hızını tespit etmek için MASW yöntemi kullanılmış ve jeofon aralıkları 3 metre, offset 6 metre seçilmiştir. Alınan kayıtlar bilgisayar ortamına atılıp gerekli veri işlemler yapıldıktan sonra 10 metre derinliğe sahip model oluşturulmuş ve her bir metreye ait V_p , V_s hızları belirlenmiştir. V_p , V_s hızlarından dinamik elastisite modülü hesaplanmıştır.

Sismik profil üzerinde veya yakınında 5 adet 10 metre sondaj kuyusu açılmış ve bu kuyularda presiyometre deneyi yapılmıştır. Deneyin hemen öncesinde presiyometre cihazı için basınç ve hacim kalibrasyonları yapılmış, açılan kuyularda BX türü prop kullanılmıştır. En derinden başlanarak her seviye için hacim ve basınç okumaları yapılmıştır. Okunan değerler kalibrasyonlara göre düzenlenip presiyometre eğrisi oluşturulmuştur. Eğri üzerindeki elastik evreden Menard modülü, plastik evreden ise limit

basınç değerleri hesaplanmıştır. Limit basınca ve zemin türüne göre Menard faktörü (E_m) seçilmiştir. Menard modülü, Menard faktörüne bölünerek sekant elastisite modülü (E_{50}) hesaplanmıştır.

Arazi çalışmaları kapsamında açılan, bütün kuyu logları bir bütün olarak incelendiğinde; yüzeyden itibaren 0.20-0.30 m kalınlıklarda bitkisel toprak örtü tabakası altında, 6.00-9.50 m arası derinliklere kadar kahverengi, doğal nemli, katı – sert kıvamlı, killerin yer aldığı görülmektedir. Sadece 2 No.lu sondaj kuyusunda 8-10 m arası derinliklerde siltli kumların yer aldığı görülmüştür.

4.1.Laboratuvar Deneyleri

Çalışma kapsamında 1, 2 ve 12 No.lu sondaj kuyularından alınan numuneler üzerinde elek analizi, Atterberg limitleri deneyleri, su muhtevası, konsolidasyon deneyi, üç eksenli basınç deneyi yapılmıştır.

Tablo 4.1. 1-2 ve 12 No.lu sondaj kuyularında elek analizi deneyleri

Numune Bilgisi				Elek Analizi				
Sondaj Adı	Numune Adı	Derinlik	Zemin sınıfı (USCS)	Kalın Dane Oranı Çakıl	Kalın Dane Oranı Kum	İnce Dane Oranı	İnce Dane Oranı Silt	İnce Dane Oranı Kil
-	-	m	-	G	S	FC	M	C
[#]	-	-	-	[%]	[%]	[%]	[%]	[%]
SK-1	SPT-1	1.72	CL	3.2	10.9	85.9	24.46	61.44
	UD-1	2.75	CL	5.1	14.8	80.1	-	-
	UD-2	4.25	CL	3.9	20.9	75.2	-	-
SK-2	SPT-1	1.72	CL	5.6	9.8	84.6	-	-
	UD-1	2.75	CL	7.9	13	79.1	-	-
	SPT-2	3.25	CL	8	14.7	77.3	19.61	57.69
	UD-2	4.25	CL	9.2	15	75.8	-	-
	SPT-3	4.75	CL	7.6	12.5	79.9	20.42	59.48
	SPT-6	9.25	SM	18.2	41.5	40.3	-	-
SK-12	SPT-1	1.72	CL	4.5	18.4	77.1	-	-
	UD-1	2.75	CL	1.8	38.1	60.1	-	-
	SPT-3	4.75	CL	1.2	35	63.8	18.35	45.45
	UD-2	5.25	CL	0.8	26.2	73	-	-
	SPT-6	9.25	CL	0	37.1	62.9	-	-

Tablo 4.1. üzerinde, 1, 2 ve 12 No.lu sondaj kuyularında elek analizi deneyleri gösterilmektedir. Arazide ilk tabaka ince taneli kil ve siltten oluşmaktadır.

Tablo 4.2. 1-2 ve 12 No.lu sondaj kuyularında Atterberg limitleri deneyleri

Numune Bilgisi				Atterberg Limitleri				
Sondaj Adı	Numune Adı	Derinlik	Zemin sınıfı USCS	Likit Limit	Plastik Limit	Plastisite İndeksi	Doğal Birim Hacim Ağırlık	Kuru Birim Hacim Ağırlık
-	-	m	-	LL	PL	PI	γ_n	γ_d
[#]	-	-	-	[%]	[%]	[%]	[kg/cm ³]	[kg/cm ³]
SK-1	SPT-1	1.72	CL	39.5	20.7	18.8	-	-
	UD-1	2.75	CL	37.9	22.4	15.5	1.94	1.57
	UD-2	4.25	CL	40.1	23.3	16.8	1.96	1.59
SK-2	SPT-1	1.72	CL	42.2	24.3	17.9	-	-
	UD-1	2.75	CL	39.6	23	16.6	1.91	1.55
	SPT-2	3.25	CL	38.4	22.9	15.5	-	-
	UD-2	4.25	CL	37.2	22.1	15.1	1.95	1.59
	SPT-3	4.75	CL	-	-	-	-	-
SK-12	SPT-1	1.72	CL	40.4	22.8	17.6	-	-
	UD-1	2.75	CL	40.2	26.9	13.3	1.89	-
	SPT-3	4.75	CL	43.6	21.4	16.7	-	-
	UD-2	5.25	CL	39.4	22.7	16.7	1.93	-
	SPT-6	9.25	CL	41.1	23	18.1	-	-

Tablo 4.2. üzerinde, 1, 2 ve 12 No.lu sondaj kuyularında Atterberg limitleri, doğal birim hacim ağırlık ile kuru birim hacim ağırlıkları gösterilmektedir. Arazide düşük plastisiteli killerden oluşmaktadır.

Tablo 4.3. 1-2 ve 12 No.lu sondaj kuyularında konsolidasyon deneyi, üç eksenli basınç deneyi ve su muhtevası deneyleri

Numune Bilgisi				Konsolidasyon Deneyi		Üç Eksenli Basınç Deneyleri		
Sondaj Adı	Numune Adı	Derinlik	Zemin sınıfı USCS	Konsolidasyon İndeksi	Boşluk Oranı	Kohezyon	İçsel sürtünme Açısı	Doğal Su İçeriği
-	-	m	-	Cc	e ₀	c	φ	w
[#]	-	-	-	-	-	[kPa]	[°]	[%]
SK-1	SPT-1	1.72	CL	-	-	-	-	17.2
	UD-1	2.75	CL	0.1448	0.8199	75.67	7	19.1
	UD-2	4.25	CL	-	-	68.45	8	19.5
SK-2	SPT-1	1.72	CL	-	-	-	-	21.6
	UD-1	2.75	CL	-	-	67.62	8	21
	SPT-2	3.25	CL	-	-	-	-	19.9
	UD-2	4.25	CL	0.1758	0.7276	65.09	9	18.6
	SPT-3	4.75	CL	-	-	-	-	-
SK-12	SPT-1	1.72	CL	-	-	-	-	-
	UD-1	2.75	CL	-	-	58.1	9	-
	SPT-3	4.75	CL	-	-	-	-	-
	UD-2	5.25	CL	0.1955	0.7321	63.9	7	-
	SPT-6	9.25	CL	-	-	-	-	-

Tablo 4.3. üzerinde, 1, 2 ve 12 No.lu sondaj kuyularında konsolidasyon deneyi, üç eksenli basınç deneyi ve su muhtevası deneyleri gösterilmektedir.

4.2.Arazi Deneyleri

Çalışma kapsamında 1, 2 ve 12 No.lu sondaj kuyularında hem SPT hem presiometre deneyleri (PMT) yapılmış, 5 ve 10 No.lu sondaj kuyularında sadece presiometre deneyi yapılmıştır Tüm bu sondaj kuyularına yakın yerlerde jeofizik yöntemlerden MASW ve sismik kırılma yöntemi uygulanmıştır.

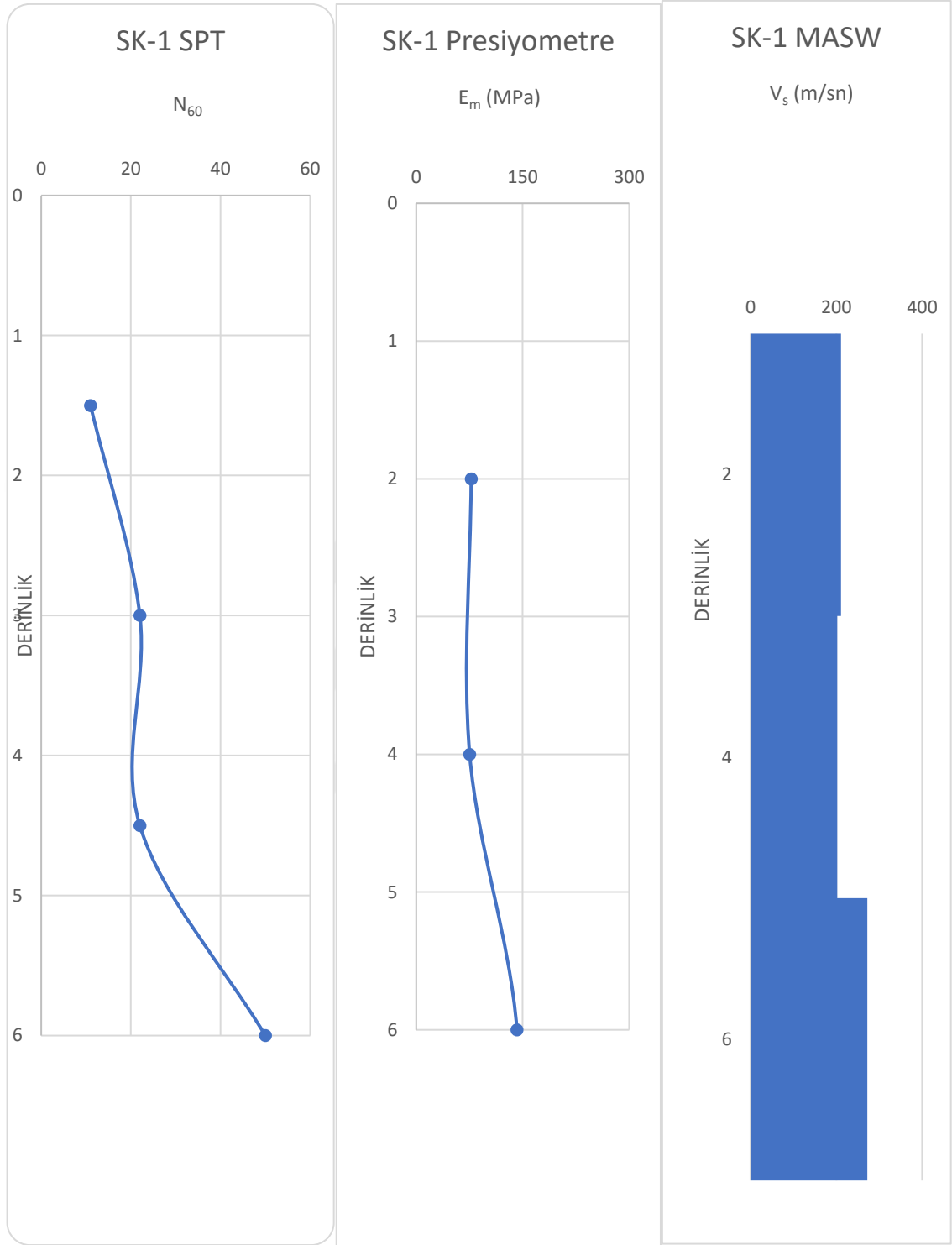
SPT değerini anlamlı hale getirmek için tij düzeltmesi, numune çıkarıcı düzeltmesi, kuyu çapı düzeltmesi, enerji düzeltmesi, düzeltilmiş N değeri, örtü yükü düzeltmesi yapılmış ve N₆₀ değeri hesaplanmıştır. Yapılan düzeltmeler ve hesaplanan veriler tablo 4.4. üzerinde gösterilmiştir.

1, 2, 5, 10 ve 12 No.lu sondaj kuyularında presiyometre deneyleri yapılmıştır. Yapılan presiyometre deneylerinde, elde edilen verilere gerekli düzeltmeler yapıp (Baguelin, 1978) bağıntısı kullanılarak Menard modülü (E_m) hesaplanmıştır. Bu değerler kullanılarak derinlik grafiği çizilmiştir.

1, 2, 5, 10 ve 12 No.lu sondaj kuyularına yakın yerde yapılan sismik ölçümlere ters çözüm uygulanarak dalga hızları tabakalara ve derinliğe göre hesaplanmıştır. Yapılan hesaplamalar sonucu elde edilen kayma dalga hızı (V_s) grafik haline getirilmiştir.

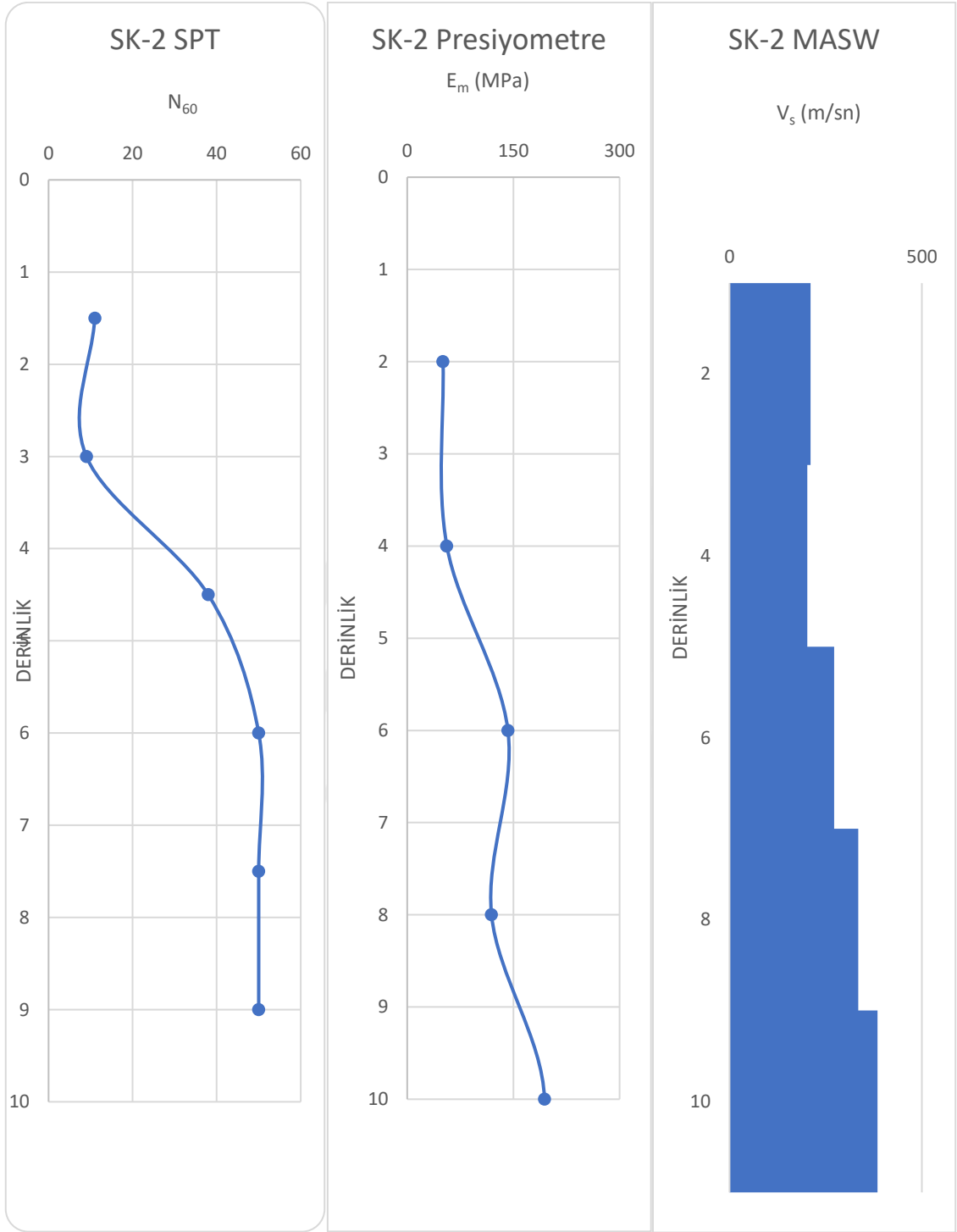
Tablo 4.4. 1-2 ve 12 No.lu sondaj kuyularında SPT deneyi

SPT								
Sondaj No	Derinlik	Tij düzeltmesi	Örtü Yüğü Düzeltmesi	Kuyu Çapı Düzeltmesi	Enerji Düzeltmesi	Numune Çıkarıcı düzeltmesi	N değeri	Düzeltilmiş N değeri
-	-	C_R	C_N	C_B	C_E	C_s	N	N_{60}
[#]	[m]	-	-	-	-	-	-	
SK-1	1.5	0.75	-	1	1	1	14	11
	3	0.85	-	1	1	1	22	18
	4.5	0.85	-	1	1	1	26	22
SK-2	1.5	0.75	-	1	1	1	15	11
	3	0.85	-	1	1	1	11	9
	4.5	0.85	-	1	1	1	45	38
	6	0.95	0.94	1	1	1	50	50
	7.5	0.95	0.84	1	1	1	50	50
	9	1	0.77	1	1	1	50	50
SK-12	1.5	0.75	-	1	1	1	11	8
	3	0.85	-	1	1	1	6	5
	4.5	0.85	-	1	1	1	10	9
	6	0.95	0.94	1	1	1	26	25
	7.5	0.95	0.84	1	1	1	24	23
	9	1	0.77	1	1	1	21	18



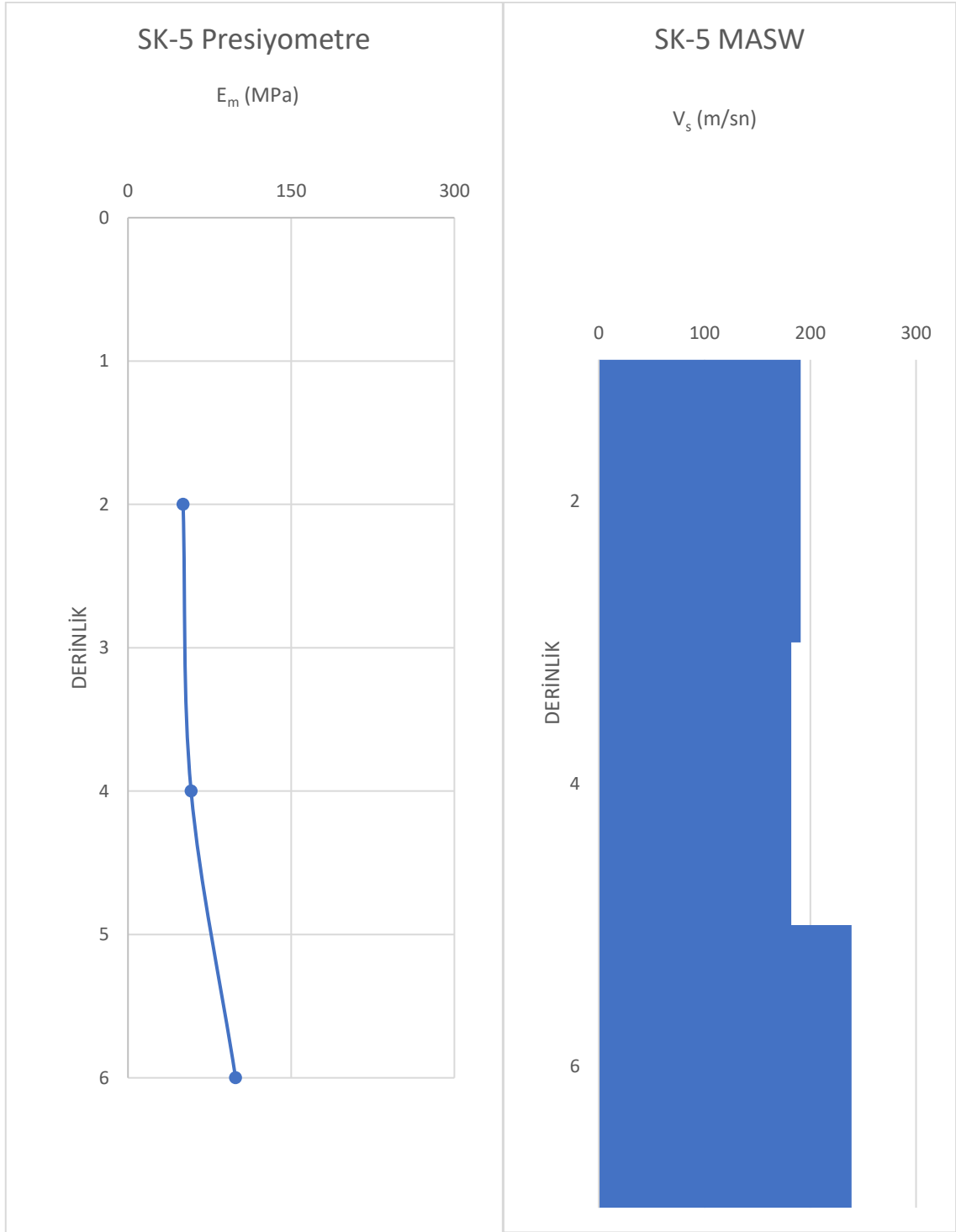
Şekil 4.3. 1 No.lu sondaj kuyusu SPT, Menard modülü ve V_s Grafikleri

Şekil 4.3. üzerinde gösterilen 1 No.lu sondaj kuyusuna ait N_{60} , Menard modülü (E_m) ve kayma dalgası hızı (V_s) değerleri derinliğe bağlı olarak grafiğe çizilmiştir.



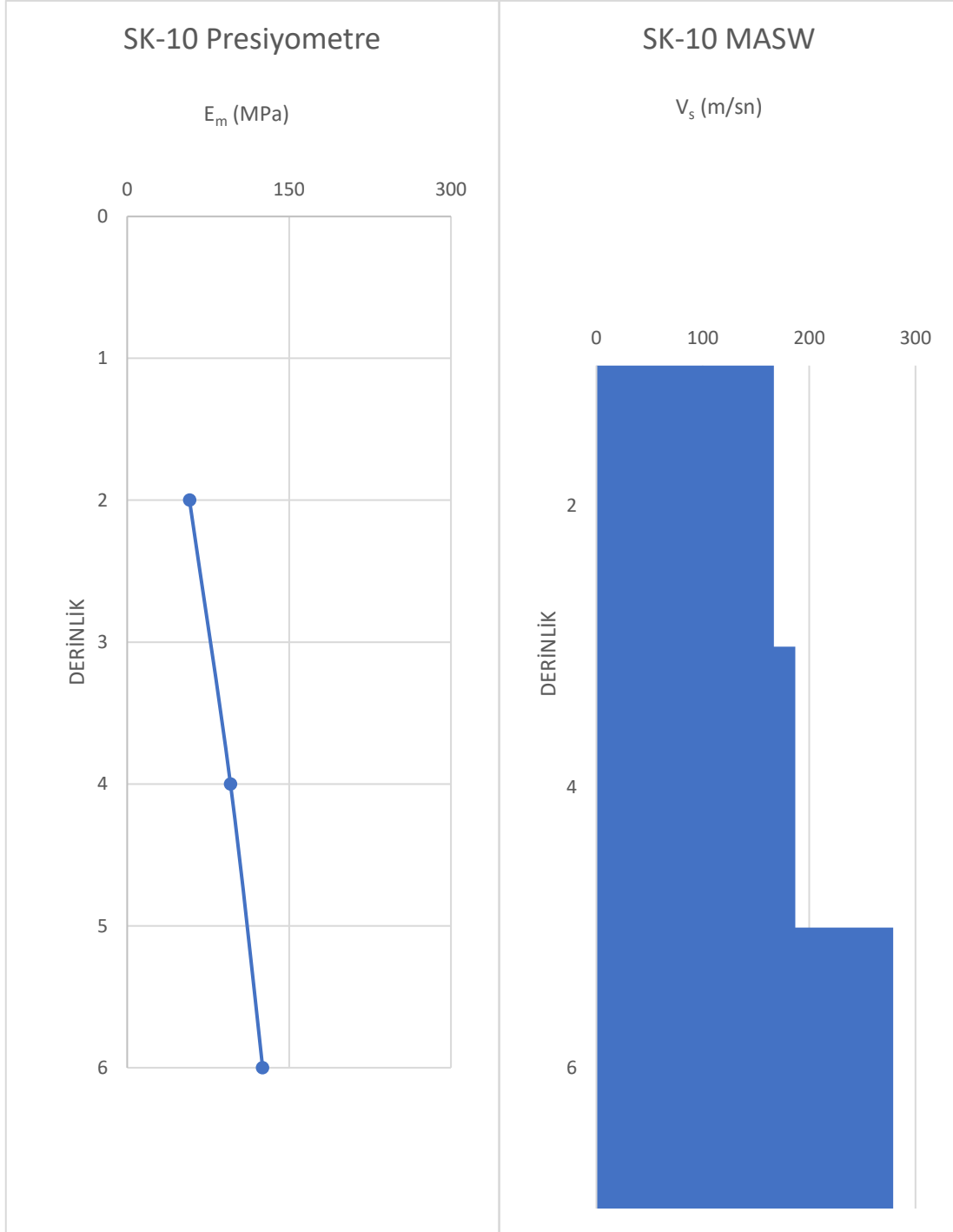
Şekil 4.4. 2 No.lu sondaj kuyusu SPT, Menard modülü ve V_s grafikleri

Şekil 4.4. üzerinde gösterilen 2 No.lu sondaj kuyusuna ait N_{60} , Menard modülü (E_m) ve kayma dalgası hızı (V_s) değerleri derinliğe bağlı olarak grafiğe çizilmiştir.



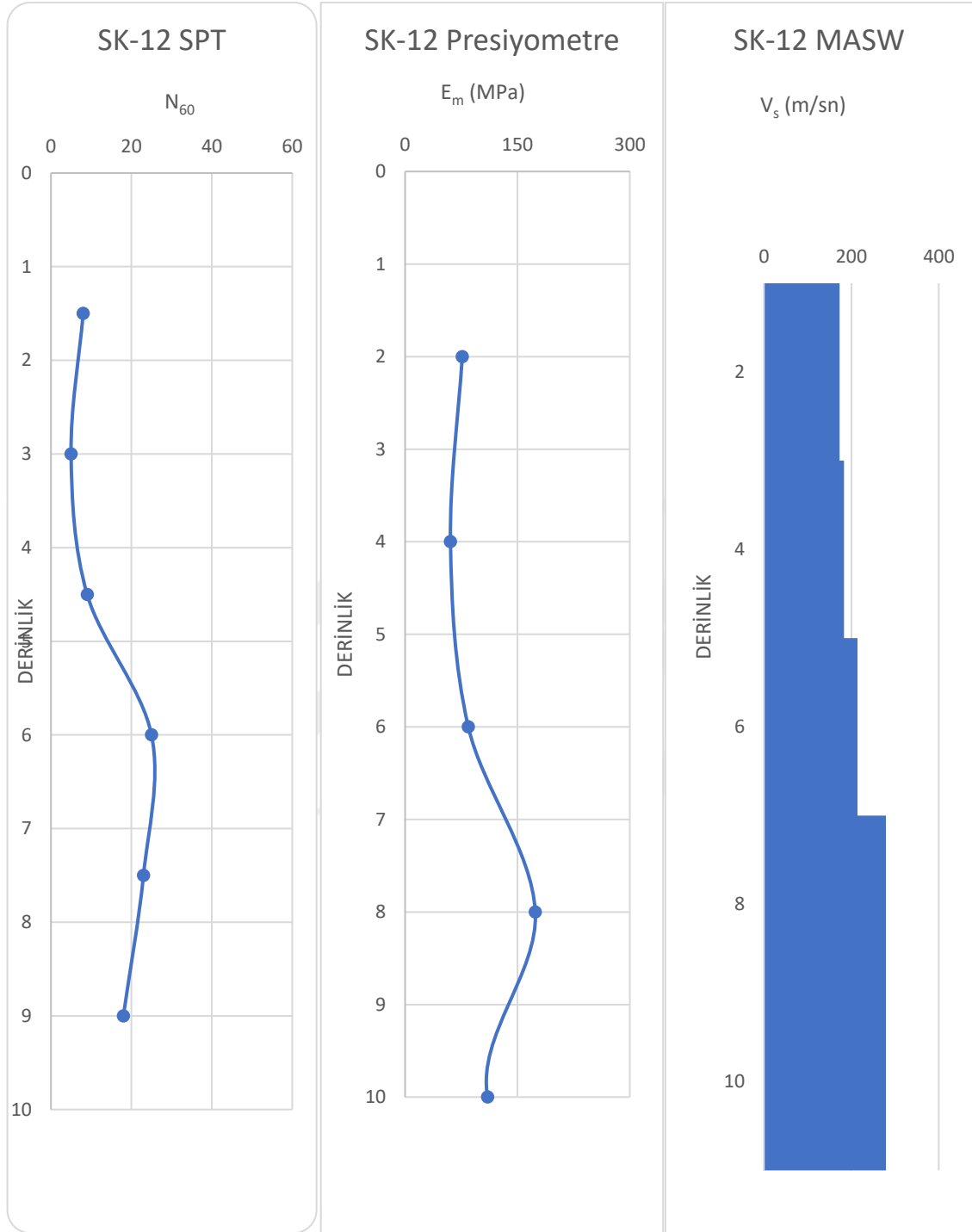
Şekil 4.5. 5 No.lu sondaj kuyusu Menard modülü ve V_s grafikleri

Şekil 4.5. üzerinde gösterilen 5 No.lu sondaj kuyusuna ait Menard modülü (E_m) ve kayma dalgası hızı (V_s) değerleri derinliğe bağlı olarak grafiğe çizilmiştir.



Şekil 4.6. 10 No.lu sondaj kuyusu, Menard modülü ve V_s grafikleri

Şekil 4.6. üzerinde gösterilen 10 No.lu sondaj kuyusuna ait Menard modülü (E_m) ve kayma dalgası hızı (V_s) değerleri derinliğe bağlı olarak grafiğe çizilmiştir.



Şekil 4.7. 12 No.lu sondaj kuyusu SPT, Menard modülü ve V_s grafikleri

Şekil 4.7. üzerinde gösterilen 12 No.lu sondaj kuyusuna ait N_{60} , Menard modülü (E_m) ve kayma dalgası hızı (V_s) değerleri derinliğe bağlı olarak grafiğe çizilmiştir.

4.3.Deneylerden Hesaplanan Parametreler

Çalışma kapsamında 1, 2, 5, 10 ve 12 No.lu sondaj kuyularında presiyometre deneyleri ve bu kuyulara yakın sismik ölçümler yapılmıştır.

Arazide ölçülen sismik kayma dalga hızı ve bu hızdan elde edilen dinamik elastisite modülü ile yine aynı yerde ve derinlikte yapılan presiyometre deneyinden elde edilen Menard deformasyon modülü ve bu modül kullanılarak statik elastisite modülü hesaplanmıştır.

Presiyometre deneyinden elde edilen Menard deformasyon modülü (E_m) ve limit basınç (P_L) ile zemin türüne göre (Briaud, 1992) tablosundan Menard (α_m) faktörü belirlenmiştir. Bu değerlere göre (Leblanc, 1982) bağıntısından odometrik deformasyon modülü (E_{od}) hesaplanmıştır. Bulunan değerler (Öztoprak, 2018; Korkmaz vd., 2025) göre 3 ile çarpılarak statik elastisite modülü (E_s) hesaplanmıştır.

Sismik yöntemler ile ölçülen basınç dalgası hızı (V_p) ve kayma dalgası hızı (V_s) kullanılarak zemin yoğunluğu (ρ), kayma modülü (G), sıkışma modülü (K), hacimsel deformasyon modülü (M), Poisson oranı (ν) ve elastisite modülü (E_d) hesaplanmıştır.

SPT deneyinden elde edilen N_{60} değeri ve Atterberg limitleri deneyi ile elde edilen plastisite indisi (PI) ile (Poulos, 2000) bağıntısı kullanılarak odometrik deformasyon modülü (E_{od}) hesaplanmıştır. Bulunan değerler (Öztoprak, 2018; Korkmaz vd., 2025) göre 3 ile çarpılarak statik elastisite modülü (E_s) hesaplanmıştır.

Yapılan tüm hesaplamalar tablo haline getirilmiştir.

Tablo 4.5. 1-2-5-10 ve 12 No.lu sondaj kuyularında presiyometre deneyi

Sondaj No	Derinlik	Zemin Sınıfı	Limit Basınç	Net Limit Basınç	Menard Modülü	E_m/P_L	Menard katsayısı	Elastisite Modülü
-	-	-	P_L	P_L^*	E_m	E_m/P_L	α_m	E_s
[#]	[m]	-	[kPa]	[kPa]	[MPa]	-	-	[MPa]
SK-1	2	CL	6.56	4.75	7.59	16.3	0.66	34.50
	4	CL	7.56	5.75	7.38	13.1	0.66	33.54
	6	CL	10.56	9	13.91	15.8	0.66	63.22
SK-2	2	CL	7.56	5.75	4.96	8.8	0.5	29.78
	4	CL	10.81	9	5.49	6.2	0.5	32.94
	6	CL	10.81	9.25	13.94	15.4	0.66	63.38
	8	SM	10.81	9.25	11.67	12.9	0.33	106.08
	10	SM	12.31	10.75	19.01	18.0	0.33	172.77
SK-5	2	CL	7.81	6	4.96	8.4	0.5	29.78
	4	CL	8.06	6.25	5.69	9.3	0.66	25.85
	6	CL	10.81	9.25	9.69	10.7	0.66	44.06
SK-10	2	CL	6.56	5	5.66	11.5	0.66	25.72
	4	CL	7.56	6	9.38	16.0	1	28.14
	6	CL	12.56	11	12.30	11.4	0.66	55.90
SK-12	2	CL	6.56	5	7.48	15.3	1	22.44
	4	CL	8.06	6.5	5.94	9.3	0.66	26.99
	6	CL	10.37	8.75	8.27	9.6	0.66	37.57
	8	CL	10.56	9	17.03	19.3	0.66	77.43
	10	CL	15.56	14	10.80	7.9	0.5	64.79

$$E_{50} = (E_m/\alpha_m) \quad (4.1)$$

$$E_s = 3 E_{50} \quad (4.2)$$

Tablo 4.5. üzerinde 5 adet sondaj kuyusunda presiyometre deney verileri verilmiştir. Bu veriler tablo 4.6.da belirlenen zemin türüne göre ve denklem (4.1) ile denklem (4.2) kullanılarak elde edilmiştir.

Tablo 4.6. Menard a_m faktörü (Briaud, 1992)

Zemin Tipi	Turba		Kil		Silt		Kum		Kum ve Çakıl	
	E_m / P_{LN}	α_m	E_m / P_{LN}	α_m	E_m / P_{LN}	α_m	E_m / P_{LN}	α_m	E_m / P_{LN}	α_m
Aşırı Konsolide	Tüm değerler	1	> 16	1	> 14	2/3	> 12	1/2	> 10	1/3
Normal Konsolide		1	9 – 16	2/3	8 – 14	1/2	7 – 12	1/3	6 – 10	1/4
Ayrılmış ve/veya Yoğrulmuş		1	7 – 9	1/2	-	1/2	-	1/3	-	1/4
Kaya	Çok çatlaklı			Diğer koşullar				Az çatlaklı veya aşırı ayrılmış		
	$\alpha_m = 1/3$			$\alpha_m = 1/2$				$\alpha_m = 2/3$		

Tablo 4.7. 1-2-5-10 ve 12 No.lu sondaj kuyularına denk gelen sismik ölçüm parametreleri

Sondaj No	Derinlik	Basınç Dalgası Hızı	Kayma Dalgası Hızı	Zemin Yoğunluğu	Kayma Modülü	Sıkışma Modülü	Hacimsel Deformasyon Modülü	Poisson Oranı	Elastisite Modülü
-	-	V_p	V_s	ρ	G	K	M	ν	E_d
[#]	[m]	[m/s]	[m/s]	[cm]	[MPa]	[MPa]	[MPa]	-	[MPa]
SK-1	2	400	211	1.39	60.49	136.73	217.38	0.31	158.14
	4	420	202	1.40	56.12	167.78	242.60	0.35	151.47
	6	550	272	1.50	108.85	299.92	445.04	0.34	291.30
SK-2	2	400	211	1.39	60.49	136.73	217.38	0.31	158.14
	4	420	202	1.40	56.12	167.78	242.60	0.35	151.47
	6	550	272	1.50	108.85	299.92	445.04	0.34	291.30
	8	610	335	1.54	169.44	335.88	561.80	0.28	435.14
	10	700	385	1.59	231.62	456.87	765.70	0.28	594.42
SK-5	2	450	191	1.43	51.05	215.28	283.35	0.39	141.92
	4	420	182	1.40	45.56	181.86	242.60	0.38	126.14
	6	540	239	1.49	83.65	315.51	427.05	0.38	230.58
SK-10	2	370	167	1.36	37.16	132.86	182.41	0.37	101.97
	4	410	187	1.39	47.80	166.06	229.80	0.37	130.86
	6	580	279	1.52	116.05	346.80	501.53	0.35	313.22
SK-12	2	390	173	1.38	40.41	151.47	205.34	0.38	111.32
	4	430	183	1.41	46.33	194.02	255.79	0.39	128.74
	6	480	214	1.45	65.12	240.80	327.63	0.38	179.21
	8	600	279	1.53	117.04	385.23	541.29	0.36	318.83
	10	760	279	1.63	124.17	755.78	921.34	0.42	353.16

Tablo 4.7. üzerinde 5 adet sondaj kuyusuna yakın yerde yapılan sismik kırılma ve MASW deneyinden elde edilen farklı derinliklerdeki V_p ve V_s hızları ve bu hızlardan elde edilen dinamik parametreler gösterilmiştir.

Parametrelerden “yoğunluk” denklem 4.3., “kayma modülü” denklem 4.4., “elastisite modülü” denklem 4.5., “Poisson oranı” denklem 4.6., “sıkışma modülü” denklem 4.7. ve “hacimsel deformasyon modülü” denklem 4.8. kullanılarak hesaplanır.

$$d = 0.31 V_p^{0,25} \quad (4.3)$$

$$G = V_s^2 d / 100 \quad (4.4)$$

$$E = G (3V_p^2 - 4V_s^2) / (V_p^2 - V_s^2) \quad (4.5)$$

$$\nu = \frac{\left(\frac{V_p}{V_s}\right)^2 - 2}{2\left[\left(\frac{V_p}{V_s}\right)^2 - 1\right]} \quad (4.6)$$

$$K = \frac{V_p^2 - \frac{4}{3}V_s^2}{\rho} \quad (4.7)$$

$$M = K + \frac{4}{3}G \quad (4.8)$$

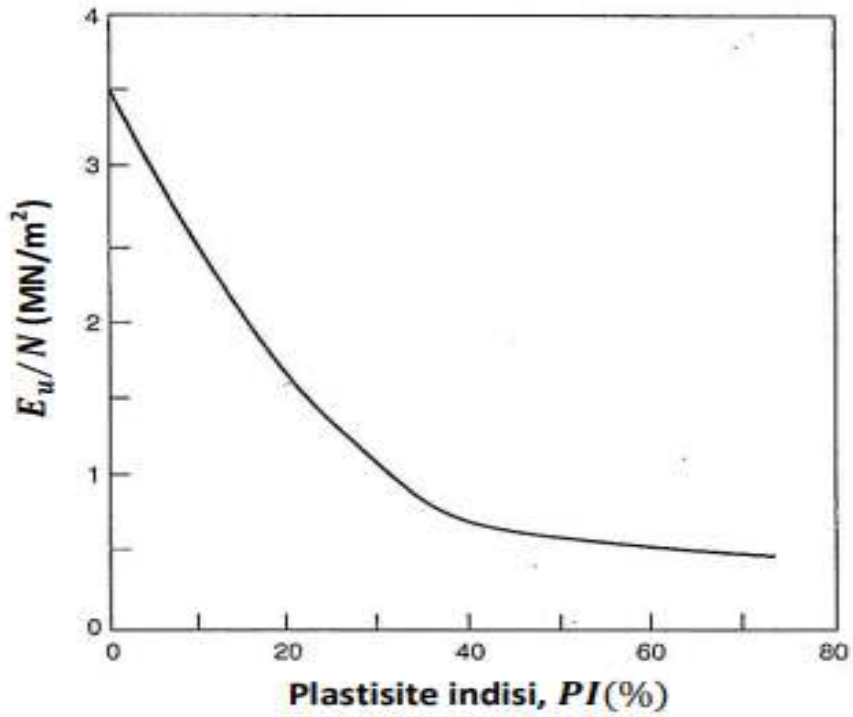
Tablo 4.8. 1-2 ve 12 No.lu sondaj kuyularına SPT deney parametreleri

	Derinlik	Zemin Sınıfı	N ₆₀	E _u /N	PI	β	E _s
	m	USCS	-	-	[%]	-	[MPa]
SK-1	1.5	CL	11	1.9	18.8	0.6	37.62
	3	CL	18	2.2	15.5	0.4	49.68
	4.5	CL	22	2	16.8	0.6	79.2
	6	CL	50	2	16.8	0.4	120
SK-2	1.5	CL	11	2	17.9	0.4	26.4
	3	CL	9	2.1	16.6	0.6	34.02
	4.5	CL	38	2.2	15.5	0.4	100.32
	6	CL	50	2.3	15.1	0.4	138
	7.5	SM	50	-	-	-	105
	9	SM	50	-	-	-	105<
SK-12	1.5	CL	8	2.1	17.6	0.4	20.16
	3	CL	5	2.7	13.3	0.6	24.3
	4.5	CL	9	2	16.7	0.6	32.4
	6	CL	25	2	16.7	0.6	90
	7.5	CL	23	2	16.7	0.6	82.8
	9	CL	18	2	16.7	0.6	64.8

Tablo 4.8. üzerinde 3 adet sondaj kuyusunda toplamda 14 adet SPT deneyi yapılmıştır. Killi zeminlerde aynı seviyelerdeki plastisite indeksi kullanılarak statik elastisite modülü (Poulos, 2000) bağıntısına göre hesaplanmıştır. Kumlu zeminlerde ise (FHWA, 2002) bağıntısına göre hesaplanmıştır.

Tablo 4.9. $SPT-N_{1,60} - E_{50}$ bağıntıları (FHWA, 2002)

Zemin Türü	E_{50} (KPa)
Silt, kumlu silt, düşük kohezyonlu karışık zeminler	$400 N_{1,60}$
Temiz ince-orta kum ve az siltli kum	$700 N_{1,60}$
İri kum ve çakıllı kum	$1000 N_{1,60}$
Kumlu çakıl	$1200 N_{1,60}$

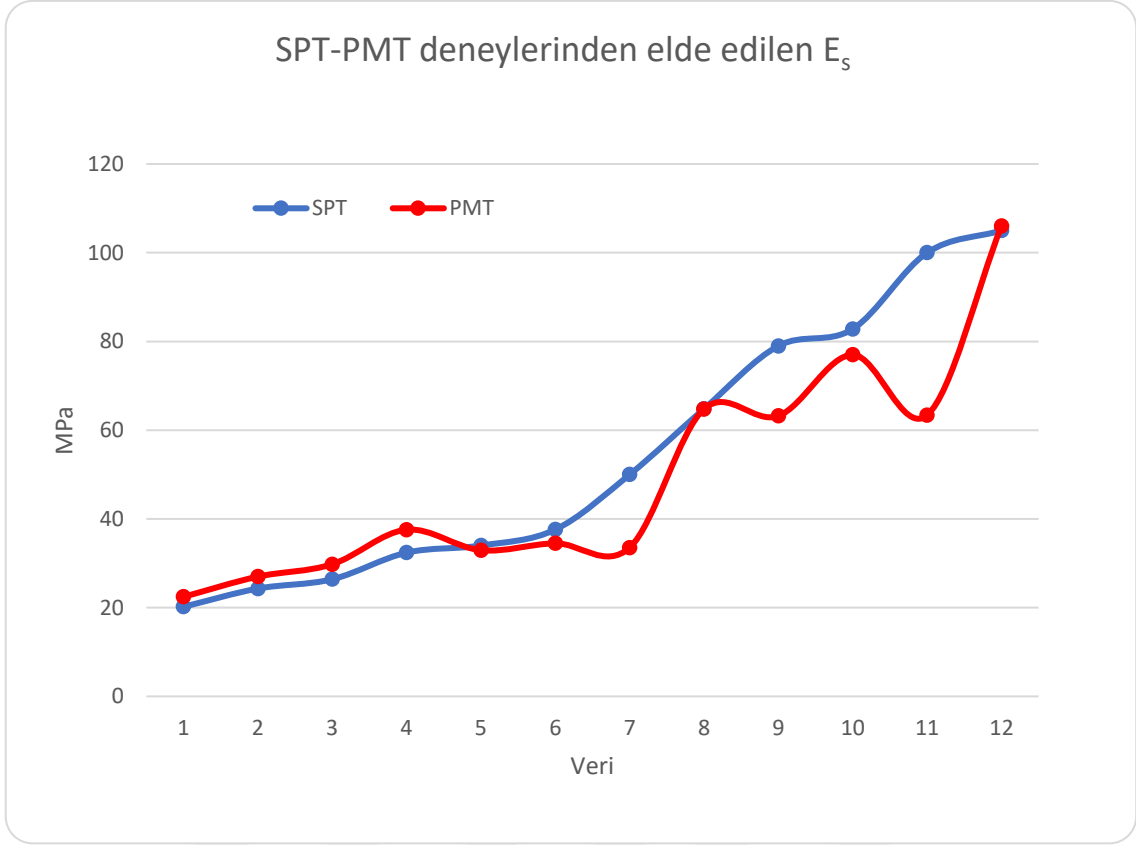


Şekil 4.8. Plastisite indisi ile E_u/N arasındaki ilişki (Poulos, 2000)

$$E_{50} = \beta E_u \quad (4.9)$$

Tablo 4.10. Zemin türüne göre önerilen β faktörü (Poulos, 2000)

Zemin Türü	β faktörü
Çakıl	0.9
Kum	0.8
Silt, siltli kil	0.7
Sert kil	0.6
Yumuşak kil	0.4



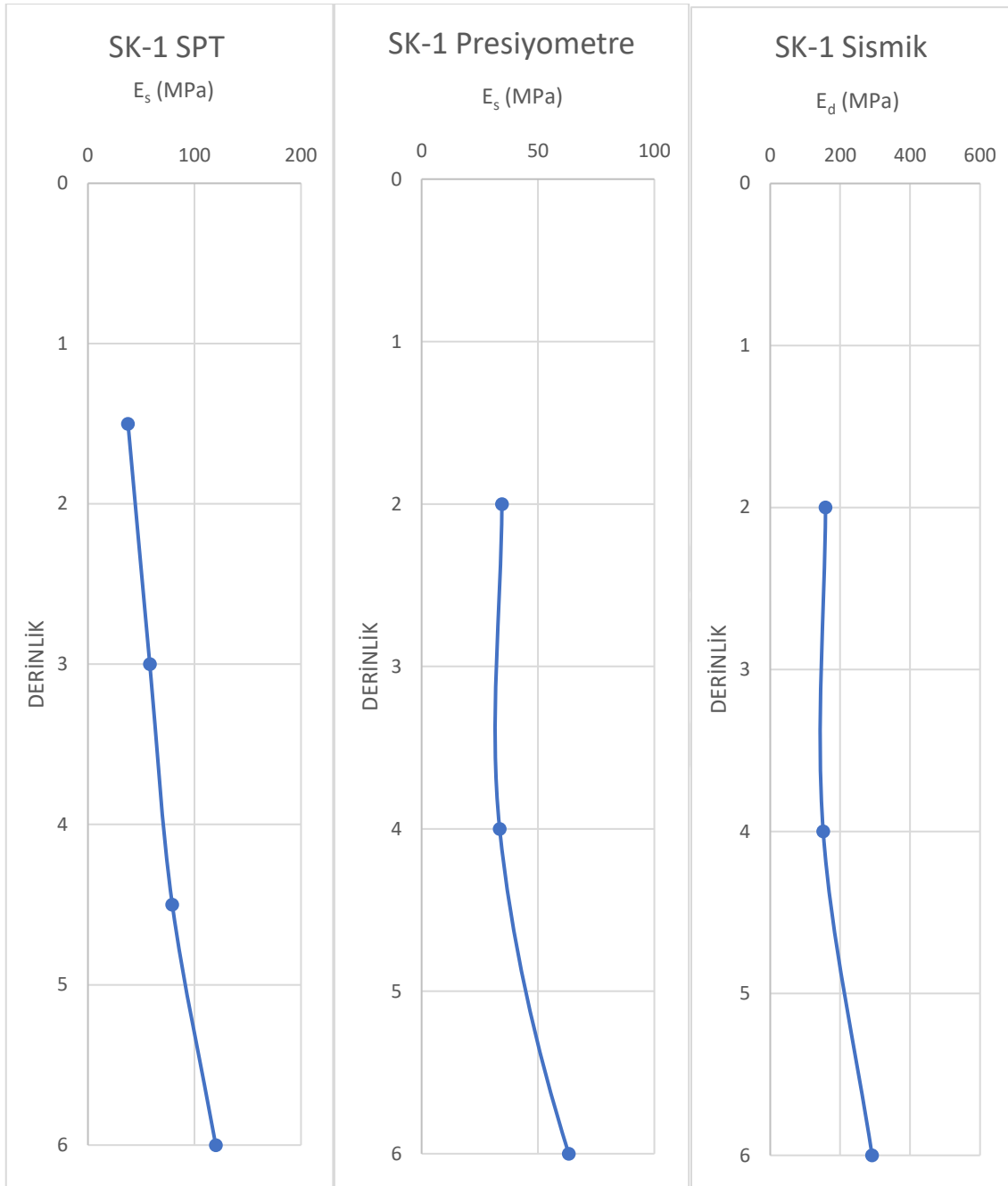
Şekil 4.9. SPT ve PMT deneylerinden elde edilen statik elastisite modülleri

Tablo 4.5. ve tablo 4.8. kullanılarak şekil 4.9.'da aynı kuyularda yapılan 12 seviye SPT ve PMT deneylerinin benzer seviyelerdeki veriler aynı grafik üzerine çizilmiştir.

SPT- E_s değerleri ve PMT- E_s değerleri arasındaki belirleme katsayısı (R^2) yaklaşık %80'i doğrusal bir model ile açıklanmaktadır. Bu, iki deney yönteminin sonuçlarının korelasyon katsayısı (R) %92 olan çok kuvvetli pozitif bir değere sahip olduğunu gösterir.

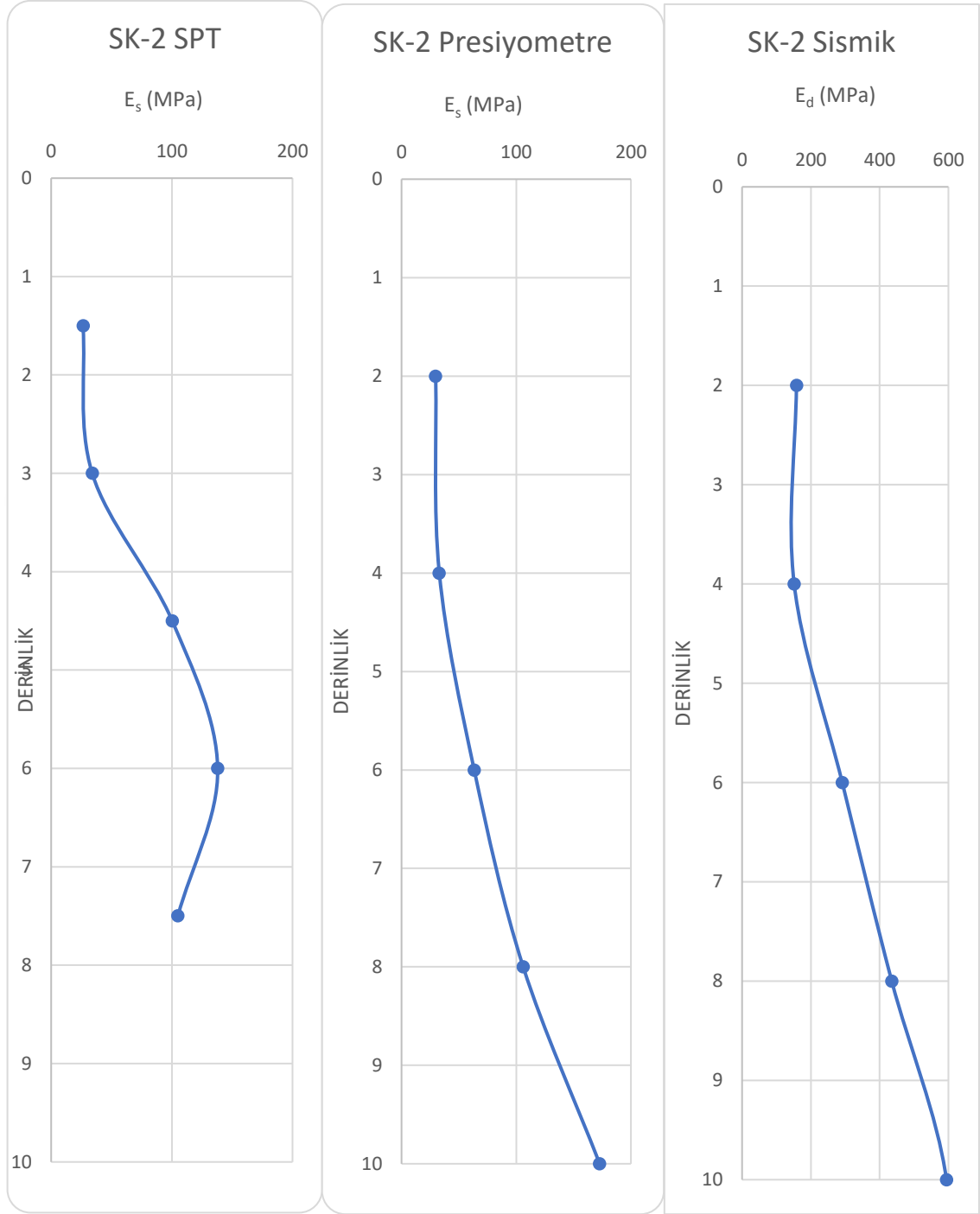
İlk 11 veri düşük plastisiteli killi zeminlerde yapılan deneylere aittir, 12 No.lu veri ise siltli kumlu zeminlere yapılan deneye aittir. 7 ve 11 No.lu verilerde SPT deneylerinin PMT deneylerinin farklı sonuç verme nedeni; SPT deneyi uygulandığı seviyede çakıl varlığının SPT-N değerini yükselttiği ve bu nedenle de hesaplanan E_s değerinin olması gerekenden fazla hesaplanmış olması düşünülmektedir.

4.4.Dinamik ve Statik Verilerin Karşılaştırması



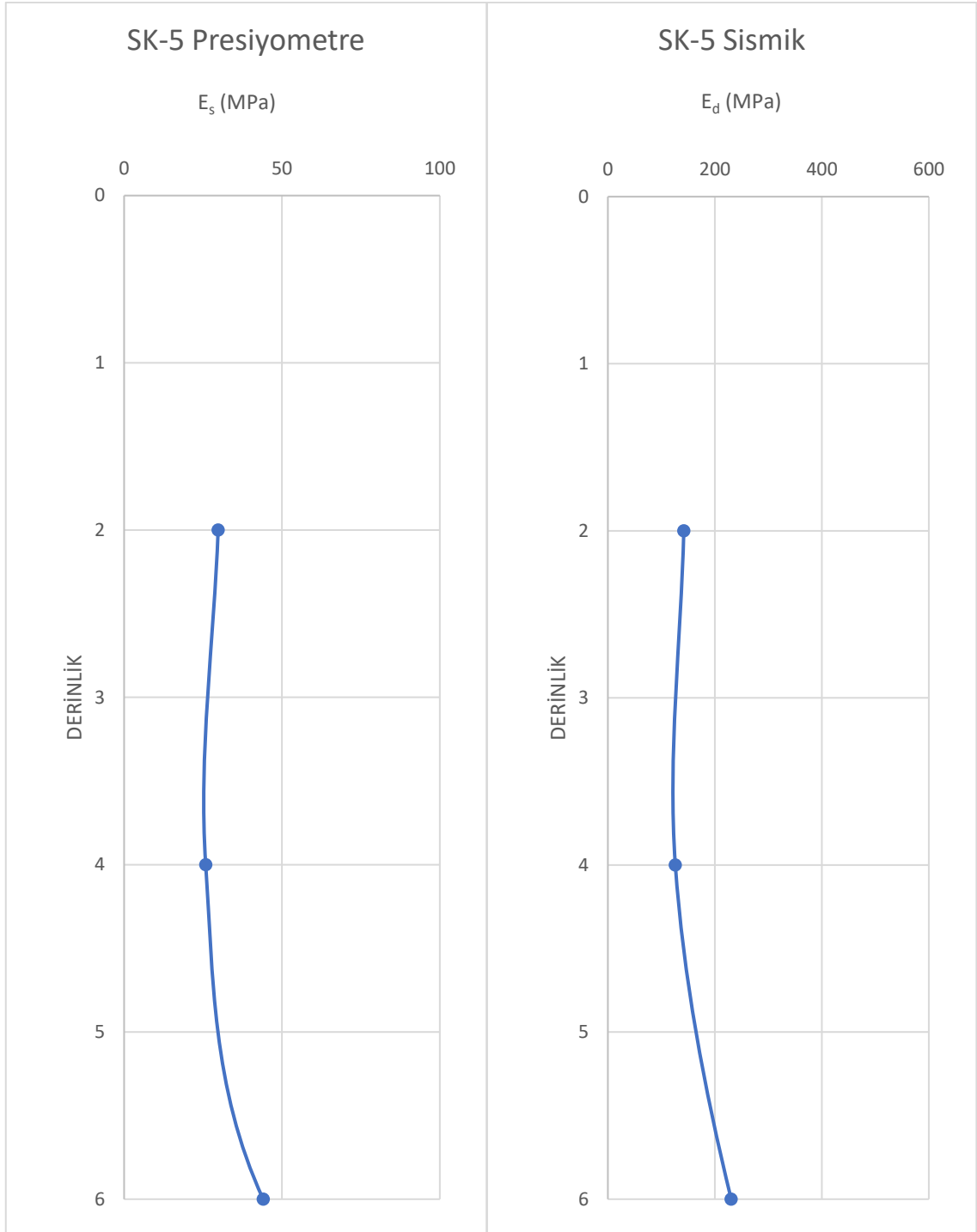
Şekil 4.10. 1 No.lu sondaj kuyusu SPT deneyi ile hesaplanan E_s , presiyometre deneyi ile hesaplanan E_s ve sismik yöntem ile hesaplanan E_d grafiği

Şekil 4.10.'da 1 No.lu sondaj kuyusu içinde yapılan SPT deneyinden hesaplanan (E_s), presiyometre deneyinden elde edilen statik elastisite modülü (E_s) ve jeofizik yöntemler ile hesaplanan dinamik elastisite modülü (E_d) değerleri derinliğe bağlı olarak grafiğe çizilmiştir.



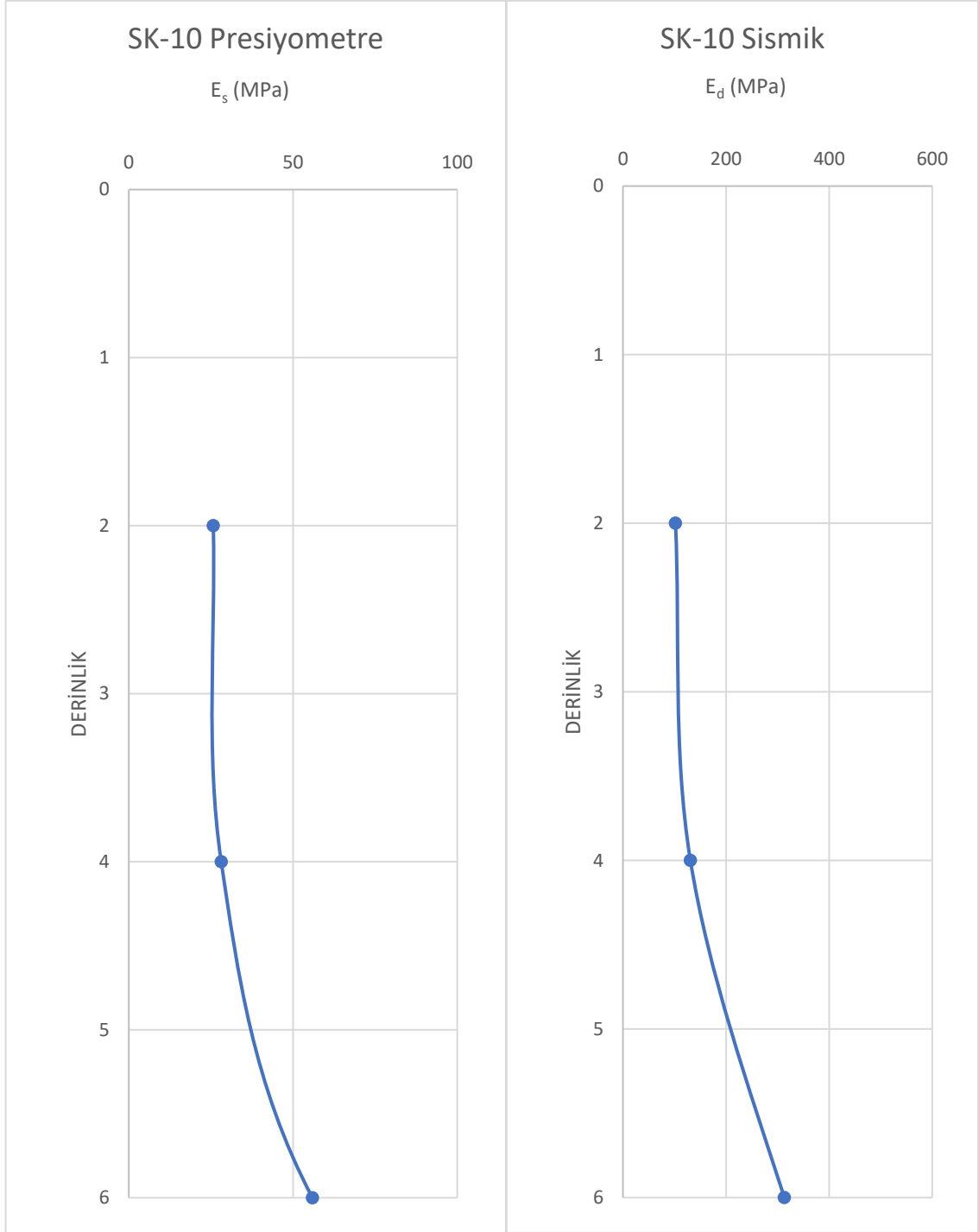
Şekil 4.11. 2 No.lu sondaj kuyusu SPT deneyi ile hesaplanan E_s , presiyometre deneyi ile hesaplanan E_s ve sismik yöntem ile hesaplanan E_d grafiği

Şekil 4.11.'de 2 No.lu sondaj kuyusu içinde yapılan SPT deneyinden hesaplanan (E_s), presiyometre deneyinden elde edilen statik elastisite modülü (E_s) ve jeofizik yöntemler ile hesaplanan dinamik elastisite modülü (E_d) değerleri derinliğe bağlı olarak grafiğe çizilmiştir.



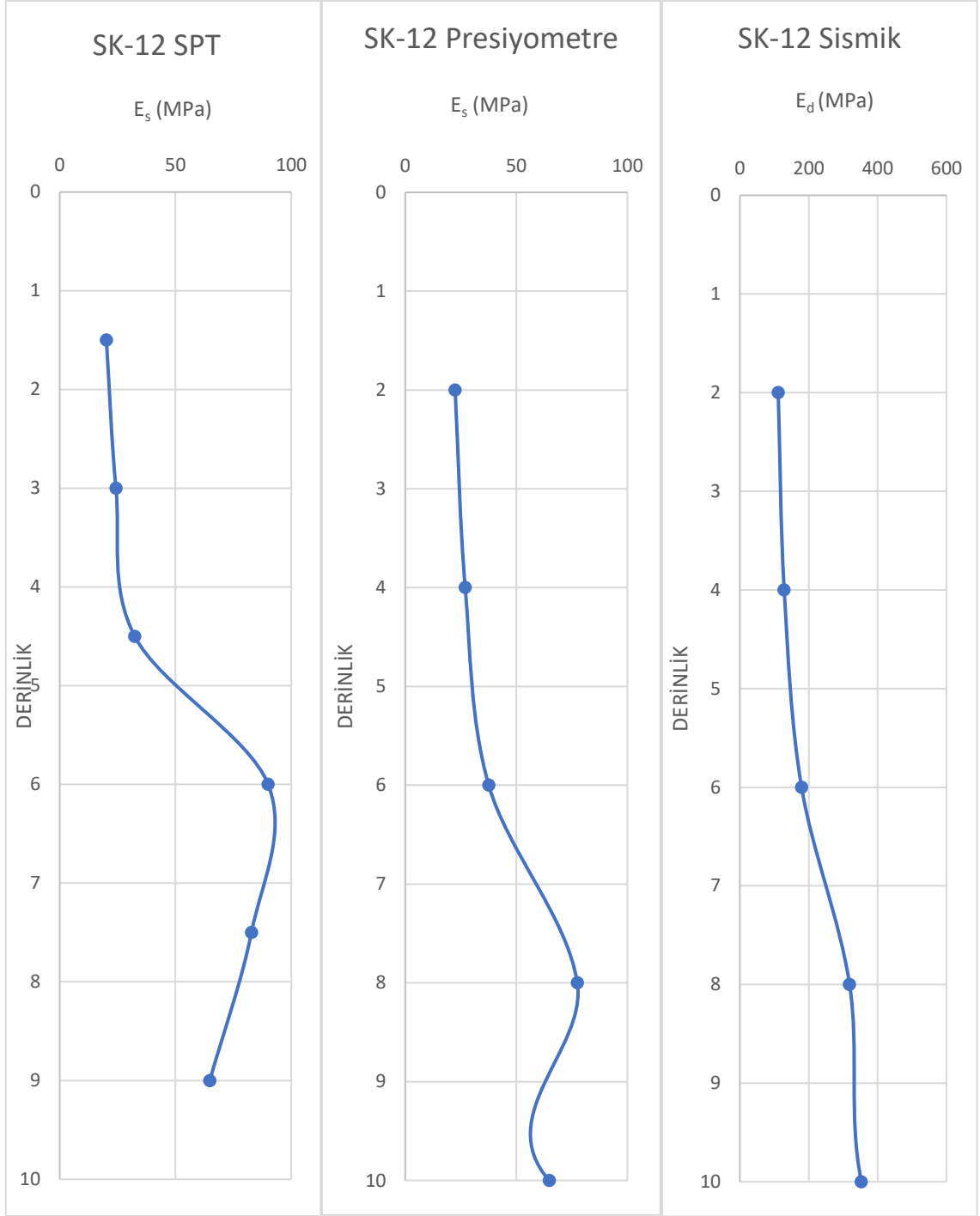
Şekil 4.12. 5 No.lu sondaj kuyusu presiyometre deneyi ile hesaplanan E_s ve sismik yöntem ile hesaplanan E_d grafiği

Şekil 4.12.'de 5 No.lu sondaj kuyusu içinde yapılan presiyometre deneyinden elde edilen statik elastisite modülü (E_s) ve jeofizik yöntemler ile hesaplanan dinamik elastisite modülü (E_d) değerleri derinliğe bağlı olarak grafiğe çizilmiştir.



Şekil 4.13. 10 No.lu sondaj kuyusu presiyometre deneyi ile hesaplanan E_s ve sismik yöntem ile hesaplanan E_d grafiği

Şekil 4.13.'te 10 No.lu sondaj kuyusu içinde yapılan presiyometre deneyinden elde edilen statik elastisite modülü (E_s) ve jeofizik yöntemler ile hesaplanan dinamik elastisite modülü (E_d) değerleri derinliğe bağlı olarak grafiğe çizilmiştir.



Şekil 4.14. 12 No.lu sondaj kuyusu SPT deneyi ile hesaplanan E_s , presiyometre deneyi ile hesaplanan E_s ve sismik yöntem ile hesaplanan E_d grafiği

Şekil 4.14.'te 12 No.lu sondaj kuyusu içinde yapılan SPT deneyinden hesaplanan (E_s), presiyometre deneyinden elde edilen statik elastisite modülü (E_s) ve jeofizik yöntemler ile hesaplanan dinamik elastisite modülü (E_d) değerleri derinliğe bağlı olarak grafiğe çizilmiştir.

4.4.1. Dinamik elastisite modülü ile statik elastisite modülü karşılaştırması

Jeofizik yöntemler kullanılarak hesaplanan dinamik elastisite modülü ile presiyometre deneyi ve standart penetrasyon testi kullanılarak hesaplanan statik elastisite modülü arasındaki ilişki incelenmiştir. Tablo 4.11. ve tablo 4.12. üzerinde kayma dalga hızına (V_s) göre küçükten büyüğe sıralanarak dinamik elastisite modülünün statik elastisite modülüne oranı hesaplanmıştır.

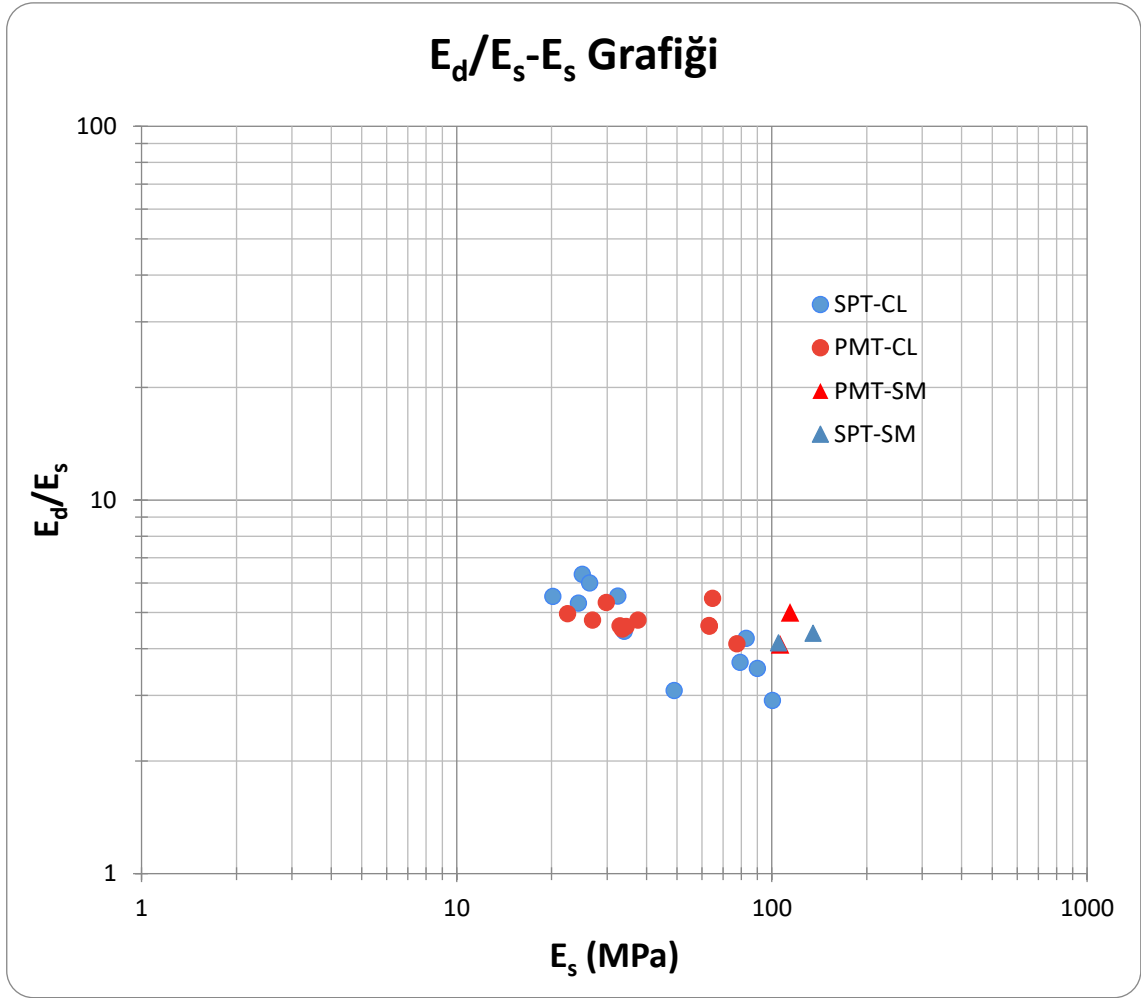
Tablo 4.11. *Dinamik elastisite modülü ve SPT deneyinden üretilen statik elastisite modülü*

No	Kayma Dalgası Hızı (m/sn)	Dinamik Elastisite Modülü [MPa]	E_d/E_s	Statik Elastisite Modülü [MPa]	Zemin Sınıfı
1	173	111.32	5.52	20.16	CL
2	183	128.74	5.30	24.3	CL
3	202	151.47	3.09	49.69	CL
4	202	151.47	4.45	34.02	CL
5	211	158.14	4.20	37.62	CL
6	211	158.14	5.99	26.4	CL
7	214	179.21	5.53	32.4	CL
8	272	291.30	3.68	79.2	CL
9	272	291.30	2.90	100.3	CL
10	279	318.83	3.54	90	CL
11	279	353.16	4.27	82.8	CL
12	335	435.14	4.14	105	SM
13	385	594.42	-	105<	SM

Tablo 4.12. *Dinamik elastisite modülü ve PMT deneyinden üretilen statik elastisite modülü*

No	Kayma Dalgası Hızı (m/sn)	Dinamik Elastisite Modülü [MPa]	E_d/E_s	Statik Elastisite Modülü [MPa]	Zemin Sınıfı
1	167	101.97	3.96	25.72	CL
2	173	111.32	4.96	22.44	CL
3	182	126.14	4.88	25.85	CL
4	183	128.74	4.77	26.99	CL
5	187	130.86	4.65	28.14	CL
6	191	141.92	4.77	29.78	CL
7	202	151.47	4.52	33.54	CL
8	202	151.47	4.60	32.94	CL
9	211	158.14	4.58	34.50	CL
10	211	158.14	5.31	29.78	CL
11	214	179.21	4.77	37.57	CL
12	239	230.58	5.23	44.06	CL
13	272	291.30	4.61	63.22	CL
14	272	291.30	4.60	63.38	CL
15	279	313.22	5.60	55.90	CL
16	279	318.83	4.12	77.43	CL
17	279	353.16	5.45	64.79	CL
18	335	435.14	4.10	106.09	SM
19	385	594.42	5.21	114.03	SM

Tablo 4.11.de hesaplanan dinamik elastisite modülünün SPT deneyi ile elde edilen statik elastisite modülüne oranını gösterilmiştir. Tablo 4.12.de ise hesaplanan dinamik elastisite modülünün PMT deneyi ile elde edilen statik elastisite modülüne oranını gösterilmiştir. İki tablo üzerinde gösterilen veriler grafik haline getirilmiş olup zemin sınıflarına ve deneylere göre renklendirilip şekil 4.15.te gösterilmiştir.



Şekil 4.15. Çalışmada elde edilen E_d/E_s - E_s grafiği

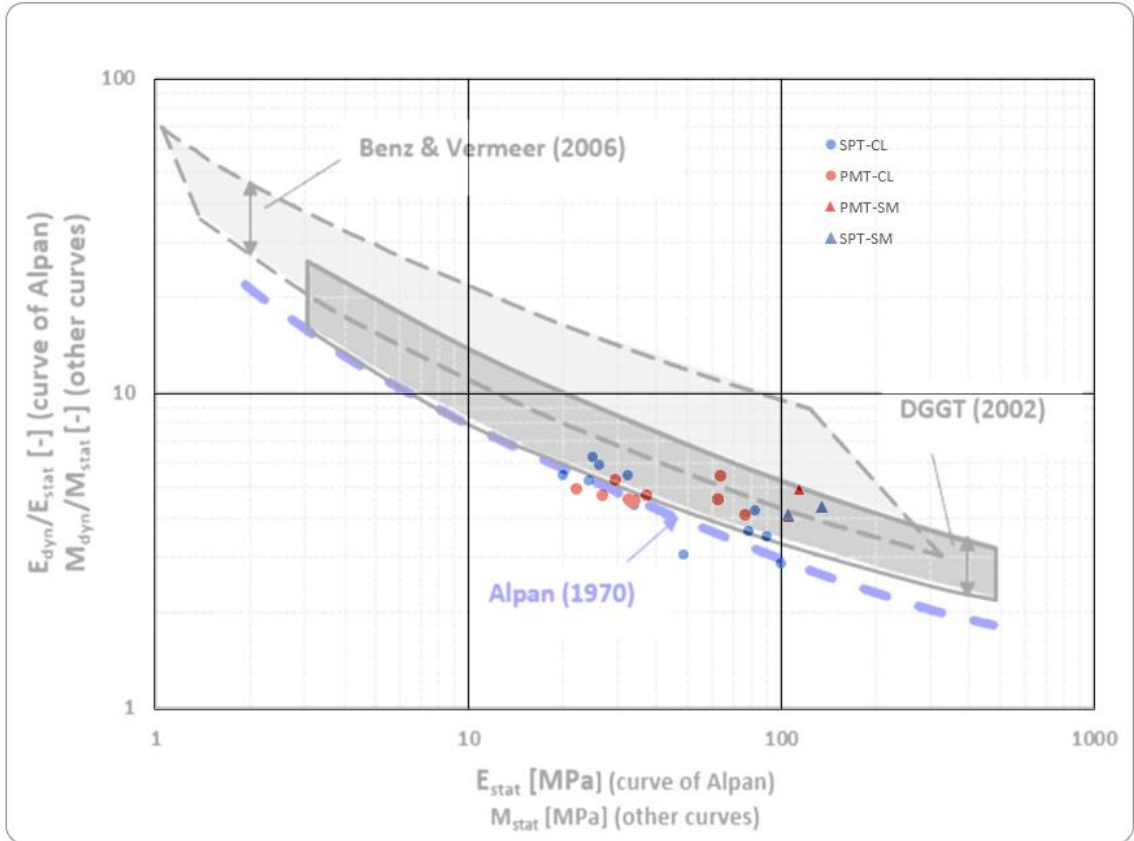
Tablo 4.11. ve tablo 4.12.'daki veriler kullanılarak şekil 4.15.'te dinamik elastisite modülünün statik elastisite modülüne oranını statik elastisite modülüne göre değerleri grafik olarak çizilmiştir. İki eksen de logaritmik ölçek kullanılmıştır. Mavi renkteki dairesel noktalar SPT deneyinden elde edilen düşük plastisiteli killeri, kırmızı renkteki dairesel noktalar PMT deneyinden elde edilen düşük plastisiteli killeri, Mavi renkteki üçgen noktalar SPT deneyinden elde edilen siltli kumları, kırmızı renkteki üçgen noktalar PMT deneyinden elde edilen siltli kumları temsil etmektedir.

5. TARTIŞMA

Çalışmanın amacı doğrultusunda laboratuvar deneyleri ve arazi deneyleri yapılmıştır. Deneylerden elde edilen veriler incelenmiş ve presiyometre deneyinden elde edilen statik elastisite modülü ile jeofizik yöntemler kullanılarak hesaplanan dinamik elastisite modülü arasındaki ilişki incelenmiştir.

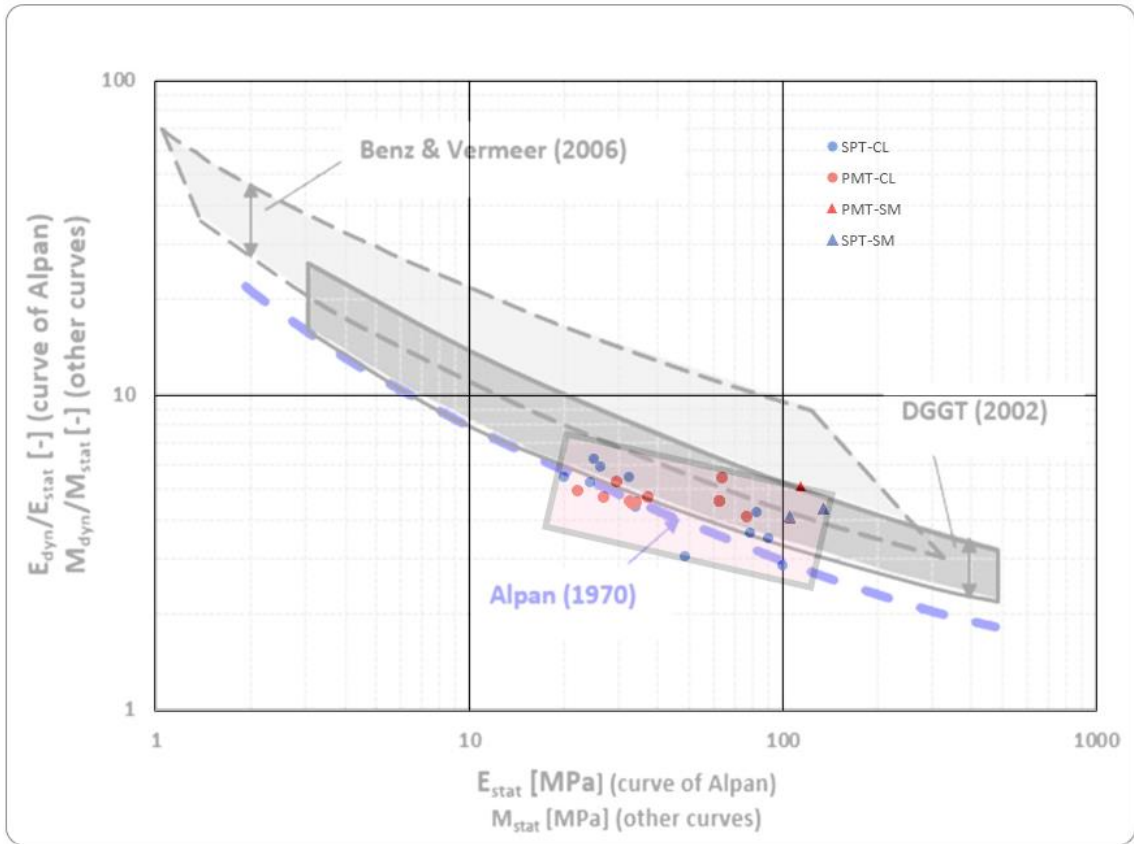
Sismik yöntemle elde edilen dinamik elastisite modülü, SPT ve PMT deneyinden elde edilen statik elastisite modülünün 4 ile 5 katı büyüklüğündedir. Sismik yöntem, e dalgalarının yayılım hızına dayanır ve yükleme süresi milisaniye mertebesindedir. Tamamen dinamik koşullarda ölçüm yapılır, zemin, anlık deformasyon altında daha rijit davranır. PMT deneyinde yükleme işlemi nispeten uzun sürede ve artan basınç adımlarıyla gerçekleştirildiğinden zeminin daha fazla deformasyon göstermesine ve statik elastisite modülünün (E_s) görece düşük çıkmasına neden olur. Bu bulgu, elastisite modülünün yalnızca zemin tipine değil, aynı zamanda yükleme hızına ve zaman ölçeğine bağlı bir parametre olduğunu ortaya koymaktadır.

5.1.Yapılan Çalışmanın Grafik Üzerinde Kontrolü



Şekil 5.1. E_d/E_s değerlerinin Alpan eğrisi üzerinde gösterimi

Şekil 5.1. daha önce yapılmış olan (Alpan, 1970) ile birlikte çalışma içerisinde oluşturulan şekil 4.15. ile karşılaştırılmıştır. Şekil incelendiğinde hem SPT hem de PMT deneylerinden elde edilen verilerin hem siltli-kum hem de düşük plastisiteli killi zeminler için Alpan eğrisine üzerinde uyumlu bir dağılım gösterdiği görülmektedir. SPT deneyinden elde edilen E_s değerlerinin PMT deneyine kıyasla daha yüksek çıktığı görülmektedir. Bunun nedenini deneyin yapıldığı seviyedeki çakıl etkisinden kaynaklandığını söyleyebiliriz. PMT deneyinden elde edilen E_d/E_s oranlarının ise Alpan eğrisine göre daha biraz daha yüksek söylenebilir. Fakat bu değerlerin DGGT (2002) bandı ile daha uyumlu söylenebilir.



Şekil 5.2. E_d/E_s değerlerinin Alpan eğrisi ve DGGT bandı üzerindeki yerleşimi bölgesi

Şekil 5.2.'de PMT ve SPT verilerini kapsayacak bir bant oluşturularak E_d/E_s - E_s grafiği çizilmiştir. Şekilde görüldüğü üzere oluşturulan bandın Alpan eğrisi ve DGGT bandı üzerindeki konumu oldukça tutarlıdır.

5.2.Yapılan Çalışmanın İstatiksel Kontrolü

Çalışma içerisinde hesaplanan dinamik elastisite modülü ile statik elastisite modül oranlarının doğruluğunu ölçmek için F testi yapılmıştır. F testi, istatistikte iki grubun varyanslarını karşılaştırmak için kullanılan bir testtir. İki grup arasındaki varyansın eşit olup olmadığını test eder.

Test için üç grup oluşturulmuştur. A grubu presiyometre deneyi ve jeofizik çalışmalar sonucu elde edilen E_d/E_s değerleri, B grubu SPT deneyi ve jeofizik çalışmalar sonucu elde edilen E_d/E_s değerleri, C grubu ise daha önce yazılmış olan makale (Öztoprak S., 2018)ve çıkarılan yönetmelikteki (KDYY, 2023) E_d/E_s değerleridir. C grubu kontrol grubu olup, A-C ve B-C grupları arasındaki ilişkiyi incelemek için killi zeminlerde kayma hızlarına karşılık gelen E_d/E_s değerleri arasındaki ilişki tablo 5.1.'de gösterilmiştir.

Tablo 5.1. F testi için oluşturulan A, B ve C grubu

No	V_s (m/sn)	A Grubu (PMT Çalışması) E_d/E_s	B Grubu (SPT Çalışması) E_d/E_s	C Grubu (KDYY ve Öztoprak) E_d/E_s	Zemin
1	180	4.88	5.52	4.9	Kil
2	185	4.51	5.30	4.0	Kil
3	204	4.60	4.45	4.9	Kil
4	278	4.12	3.54	2.9	Kil
5	300	3.49	2.5	2.5	Kil

Tablo 5.1'de sunulan 5 farklı hıza karşılık gelen değerler ikili gruplar halinde F testinde değerlendirilmiştir.

A (PMT Çalışması) Varyans : 0.306

B (SPT Çalışması) Varyans : 1.580

C (Literatür) Varyans : 0.963

A Grubu F istatistiği : 4.084

A Grubu Kritik F değeri (%95) : 3.14

$$F_{a \text{ hesap}} = 3.14 < F_{a \text{ kritik}} = 4.084$$

B Grubu F istatistiği : 1.64

B Grubu Kritik F değeri (%95) : 6.38

$$F_{b \text{ hesap}} = 1.64 < F_{b \text{ kritik}} = 6.38$$

Bu sonuçlar, PMT değerleri kullanılarak elde edilen verilerin dağılım özellikleri bakımından güvenilir olduğunu gösterir. İstatistiksel olarak iki grup birbirine eşit kabul edilir. Yani denklemlerle elde edilen değerler, literatür verileriyle değişkenlik açısından oldukça tutarlıdır. SPT deneyinden elde edilen değerlerin istatistiksel olarak anlamlı bir fark yoktur. Hatta değerler literatür ile oldukça yakındır. Fakat veri sayısının az olması analiz gücünü azaltmaktadır.

F testine ek olarak elde edilen denklemlerin ne kadar saptığını ölçmek için standart sapma testi yapılmıştır. Standart sapma, bir veri setindeki değerlerin ortalamadan ne kadar saptığını veya ne kadar yayılmış olduğunu gösteren bir istatistiksel ölçüdür.

A (Çalışma) varyans ≈ 0.31

B (Çalışma) varyans ≈ 1.58

C (Literatür) varyans ≈ 0.96

A (Çalışma) standart sapma ≈ 0.55

B (Çalışma) standart sapma ≈ 1.25

C (Literatür) standart sapma ≈ 0.98

Killi zeminlerin elastisite modülü yaklaşımlarının değerlendirilmesinde, SPT sonuçları literatüre daha yakındır fakat PMT deney verilerinin literatür verilerine göre daha kararlı (düşük varyanslı) olduğu görülmektedir.

Çalışmada elde edilen PMT ve SPT deney verilerinin ortalaması literatür verilerine göre daha yüksek çıkmıştır, ancak bu yükseklik istatistiksel olarak anlamlı değildir. Yani aslında bu 3 grup birbirine benzer görünmektedir.

Her üç gruba bakıldığında V_s değerleri arttıkça E_d/E_s oranının azaldığı görülmektedir. Bu bakımdan da oluşturulan grupların tutarlı olduğu söylenebilir.

Sonuç olarak arazide yapılan SPT ve PMT deneylerinden elde edilen E_d/E_s oranı daha önce yapılmış çalışmalar ile kıyaslandığında, killi zeminlerde hesaplanan bu oranın benzer çıktığı, çalışmada elde edilen veriler ile kıyaslandığında tutarlı olduğu görülmektedir. Fakat hem PMT hem de SPT deneyinden hesaplanan oranların ise eski çalışmalara göre biraz daha yüksek olduğu söylenebilir. Daha güçlü bir sonuç elde etmek için daha fazla verilere ihtiyaç vardır.

6. SONUÇ VE ÖNERİLER

Bu tez çalışması; zeminlerde dinamik elastisite modülü ve statik elastisite modülü arasındaki ilişkileri incelemek için yapılmıştır.

Kahramanmaraş ilinde jeoteknik çalışmalar yapılmıştır. Bu çalışmalar kapsamında açılan 5 adet sondaj kuyusuna yakın mesafelerde jeofizik yöntemlerden sismik kırılma ve MASW ölçümleri yapılmıştır. Ölçümler çözümlenerek V_s ve V_p hızları derinliğe bağlı olarak hesaplanmıştır. Bu hızlar üzerinden dinamik zemin parametreleri elde edilmiş ve tablolastırılmıştır. 5 adet sondaj kuyusunda toplam 19 seviyede presiyometre deneyi yapılmış ve bu deneyden elde edilen parametreler tablolar halinde sunulmuştur. Yapılan arazi deneylerinin birbiri ile uyumunu kontrol etmek amacıyla 3 adet sondaj kuyusunda yapılan SPT N_{60} , kayma dalga hızı (V_s) ve Menard modülü (E_m) değerleri birbirleri ile karşılaştırılmıştır.

Zeminin davranışını ve karakteristik özelliklerini daha iyi anlayabilmek için 3 ayrı sondaj kuyusundan alınan numuneler üzerinde laboratuvar deneyleri yapılmıştır. Yapılan bütün deneyler ve sonuçlar tablolar halinde sunulmuştur.

Arazide yapılan sondajlarda SPT ve PMT deneylerinin birbiri ile uyumu ve bu verilerden elde edilen statik elastisite modüllerinin kontrolü yapılmıştır. Kontrol sonucu bu verilerin birbiri arasında çok güçlü pozitif bir ilişki olduğu görülmüştür. Bu bakımdan yapılan iki deney verilerinin birbirlerine benzer ve güvenilir olduğu görülmüştür.

Dinamik ve statik elastisite modülü arasındaki ilişkinin kayma dalga hızına göre değişimi incelenmiştir. Zeminlerde 13 adet SPT deneyinden elde edilen E_s değerine karşılık E_d / E_s oranı ve 19 adet PMT deneyinden elde edilen E_s değerine karşılık E_d / E_s oranı zemin ve deney türüne göre renklendirilip grafik üzerine işlenmiştir. Aynı veri kümesi bir bant haline getirilmiş ve tekrar grafik üzerine işlenmiştir.

Zemin ortamda elde edilen değerlerin daha önce oluşturulan Alban eğrisi ve DGGT bandı ile uyumu kontrol edilmiştir. PMT deneyinden elde edilen statik elastisite modülünün 20 MPa ile 40 MPa arasında olduğu düşük plastisiteli killerin Alban eğrisi üzerinde bulunduğu ve oldukça uyumlu olduğu görülmektedir. PMT deneyinden elde edilen statik elastisite modülünün 60 MPa ile 80 MPa arasında olduğu sert killerin ve siltli kumların dinamik elastisite modülüne oranlarının Alban eğrisine göre biraz daha yüksek, DGGT bant aralığında uyumlu görülmektedir. SPT deneyinden hesaplanan E_d / E_s oranının çalışmanın tamamını kapsayan 20MPa ile 100MPa arasında olduğu bölümde Alban eğrisi ve DGGT bandı üzerinde oldukça uyumlu sonuçlar verdiği görülmektedir.

Fakat SPT deney verilerinin de saçılmış ve PMT deneyine göre daha yüksek sonuçlar verdiği görülmektedir. Bunun nedeninin SPT deneyi uygulandığı seviyede çakıl varlığının deneyi etkilemesi olabilir. Çakıllı seviyelerin SPT-N değerini yükselttiği ve bu nedenle de hesaplanan E_s değerinin olması gerekenden biraz daha fazla hesaplanmış olduğu düşünülmektedir.

Çalışma kapsamında dinamik elastisite ve statik elastisite değerlerini elde etmek için yapılan hesaplamalar, daha önce yapılmış olan Öztoprak (2018) ve KDYY (2023) çalışmalarındaki veriler karşılaştırılmıştır. Aynı V_s hızına karşılık gelen E_d/E_s oranları tablo haline getirilmiştir. Hem PMT deneyinden hem de SPT deneyinden elde edilen verilere ayrı ayrı F testi uygulanmıştır. F testine göre, çalışma değerleri ile literatür değerlerinin yüksek oranda benzer olduğu ortaya çıkmıştır. Bu sonuçlar ile birlikte yapılan çalışmanın oldukça benzer düzeyde değere sahip olduğu şeklinde yorumlanabilir.

Literatürde benzer çalışmaların artması ve tekrar F testi, standart sapma ve grafik analizlerinin test edilmesi böylece üretilen denklemin kontrolünün daha çok veri ile yapılması istenmektedir.

Bu çalışma, jeofizik mühendisliği, geoteknik mühendisliği ve akademik araştırmalar için faydalı bir kaynak olabilir. Bulunan sonuçlar önceki çalışmalar ile uyumlu, anlamlı ve kullanılabilir seviyededir.

İleri dönemlerde benzer bir çalışmayla arazi verileri arttırılarak jeofizik üzerinden doğrudan statik elastisite modülünün hesaplanabileceği verimli bir formül elde edilmesi önerilmektedir. Ayrıca benzer bir çalışmanın farklı ortamlarda yapılması ve geliştirilmesi böylelikle veri setinin arttırılıp analizlerin güçlendirilmesi önerilmektedir.

KAYNAKÇA

- Alpan, I. (1970). The geotechnical properties of soils. *Earth-Science Reviews*, 6, 5–49.
- Al-Tahini, A. (2003). *The effect of cementation on the mechanical properties of the Jauf Reservoir, Saudi Arabia* (Doctoral dissertation). University of Oklahoma.
- Baguelin, F., Jezequel, J. F., and Shields, D. H. (1978). *The pressuremeter and foundation engineering*. Trans Tech Publications.
- Belikov, B. P., Alexandrov, K. S., and Rysova, T. V. (1970). *Elastic properties of rock-forming minerals and rocks*. Moscow: Nauka.
- Benz, T. (2007). Zuschrift zum Beitrag „Über die Korrelation der ödometrischen und der elastischen Kennwerte“. *Bautechnik*, 84, 482–491.
- Birch, F. (1988). The velocity of compressional waves in rocks to 10 kilobars, Part 2: Elastic properties and equations of state. *Journal of Geophysical Research*, 93(B5), 91–116.
- Bowles, J. E. (1988). *Foundation analysis and design* (4th ed.). McGraw-Hill.
- Bowles, J. E. (1996). *Foundation analysis and design* (5th ed.). McGraw-Hill.
- Brautigam, T., Knöchel, A., and Lehne, M. (1998). Prognosis of uniaxial compressive strength and stiffness of rocks based on point load tests. *Otto-Graf-Journal*, 9, 61–79.
- Briaud, J. L. (1992). *The pressuremeter*. A.A. Balkema.
- Brotons, V., Tomás, R., Ivorra, S., and Grediaga, A. (2014). Relationship between static and dynamic elastic modulus of calcarenite heated at different temperatures. *Bulletin of Engineering Geology and the Environment*, 73, 791–799.
- Brotons, V., Tomás, R., Ivorra, S., and Grediaga, A. (2016). Improved correlation between the static and dynamic elastic modulus of different types of rocks. *Materials and Structures*, 49, 3021–3037.
- Christaras, B., Auger, F., and Mosse, E. (1994). Determination of the moduli of elasticity of rocks: Comparison of ultrasonic velocity and mechanical tests. *Materials and Structures*, 27, 222–228.
- CP110. (1972). *Code of practice for the structural use of concrete*. British Standards Institution.
- EABD. (2001). Empfehlungen des Arbeitskreises 1.4 „Baugrunddynamik“. *Bautechnik*, 78, 792–805.
- Eissa, E. A., and Kazi, A. (1988). Relation between static and dynamic Young's moduli of rocks. *Rock Mechanics and Rock Engineering*, 21, 479–482.
- FHWA. (2002). *Geotechnical engineering circular No. 5: Evaluation of soil and rock properties*. Federal Highway Administration.
- Fahimifar, A., and Soroush, H. (2003). Evaluation of some physical and mechanical properties of rocks using ultrasonic pulse technique. In *ISRM Technology Roadmap for Rock Mechanics* (pp. 23–52). ISRM.

- Gardner, G. H. F., Gardner, L. W., and Gregory, A. R. (1974). Formation velocity and density—The diagnostic basics for stratigraphic traps. *Geophysics*, 39, 770–780.
- Helvatjoglu-Antoniades, M., Papadogiannis, Y., Lakes, R., and Dionysopoulos, P. (2006). Dynamic and static elastic properties of dental materials. *Dental Materials*, 22, 450–490.
- JMO. (2020). *Menard presiyometre deneyi*. TMMOB Jeoloji Mühendisleri Odası.
- Kayabaşı, A. (2021). Regression analysis between rock modulus values obtained from static and dynamic tests. *Arabian Journal of Geosciences*, 14, 10–13.
- KDYY. (2023). *Kazı destek yapıları yönetmeliği*. Yapı İşleri Genel Müdürlüğü.
- King, M. S. (1983). Static and dynamic elastic properties of igneous and metamorphic rocks. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, 20, 237–241.
- Kramer, S. L. (1996). *Geotechnical earthquake engineering*. Prentice Hall.
- Korkmaz, G., Sargin, S., ve Öztoprak, S. (2025). Comparative experimental study on the dynamic and static stiffness of sandy soils utilizing Alpan’s empirical approach. *Applied Sciences*, 15, 14–19.
- Martínez-Martínez, J., Benavente, D., and García-del-Cura, M. A. (2012). Comparison of the static and dynamic elastic modulus in carbonate rocks. *Bulletin of Engineering Geology and the Environment*, 71, 263–268.
- McCann, D. M. (1992). Determination of Young’s modulus of rock mass from geophysical well logs. *Geological Society Special Publication*, 65, 317–325.
- Najibi, A., Ghafoori, M., Lashkaripour, G., and Asef, M. (2015). Empirical relations between strength and static and dynamic elastic properties of limestones. *Journal of Petroleum Science and Engineering*, 128, 78–82.
- Nur, A., and Wang, Z. (1999). *Seismic and acoustic velocities in reservoir rocks*. Society of Exploration Geophysicists.
- Tezcan, S. S. (2006). Allowable bearing capacity of shallow foundations based on shear wave velocity. *Geotechnical and Geological Engineering*, 24, 203–218.
- Van Heerden, W. L. (1987). General relations between static and dynamic moduli of rocks. *Rock Mechanics and Rock Engineering*, 20, 381–385.
- Wichtmann, T., and Triantafyllidis, T. (2009). On the correlation of “static” and “dynamic” stiffness moduli. *Bautechnik Special*, 7–39.
- Wichtmann, T. (2017). On correlations between “dynamic” (small-strain) and “static” (large-strain) stiffness moduli. *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, 92, 72–83.
- Yürekli, A. (2019). *Lisansüstü eğitim enstitüsü tez yazım kılavuzu*. Eskişehir Teknik Üniversitesi.
- http-1: https://www.geotekhawaii.com/geophys_svcs/seismic_refraction.html (Erişim tarihi 27.10.2025).

ÖZGEÇMİŞ

ORCID NO: 0009-0001-6606-9532

Ad Soyad : Tolga KABADAYI

Yabancı Dil : İngilizce

Eğitim ve Mesleki Geçmişi:

- 2015, Ankara Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Jeofizik Mühendisliği Bölümü
- 2016, Kredi Yurtlar Kurumu, Yurt Yönetim Personeli
- 2021, İller Bankası, Jeofizik Mühendisi