

T.C.

ERZİNCAN BİNALİ YILDIRIM ÜNİVERSİTESİ

FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

İNŞAAT MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI

**ERZİNCAN İLİ ZEMİNLERİNDE STANDART PENETRASYON DİRENCİ İLE
KAYMA DALGASI HIZI ARASINDAKİ KORELASYONLARIN BELİRLENMESİ**

Serap HANCIOĞLU

Danışman: Dr. Öğr. Üyesi Adem IŞIK

TEZ JÜRİ ÜYELERİ

Dr. Öğr. Üyesi Fatih KARAÇOR

Doç. Dr. Harun AKOĞUZ

Dr. Öğr. Üyesi Adem IŞIK

YÜKSEK LİSANS TEZİ

ERZİNCAN,2026

© 2026 [Serap HANCIOĞLU]. Tüm hakları saklıdır.

Kabul ve Onay Sayfası

Dr. Öğr. Üyesi Adem IŞIK danışmanlığında, Serap HANCIOĞLU tarafından hazırlanan bu çalışma tarihinde aşağıdaki jüri tarafından İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı Geoteknik Bilim Dalı'nda Yüksek Lisans olarak kabul oybirliği/oy çokluğu (.../...) ile kabul edilmiştir.

Başkan : Dr. Öğr. Üyesi Fatih KARAÇOR İmza:

Üye : Doç. Dr. Harun AKOĞUZ İmza:

Üye : Dr. Öğr. Üyesi Adem IŞIK İmza:

Yukarıdaki Yüksek Lisans Tezi Enstitü Yönetim Kurulunun / / 20.... tarih ve/..... sayılı kararı ile onaylanmıştır.

Prof. Dr. Kemal Volkan ÖZDOKUR

Enstitü Müdür V.

Not: Bu tezde kullanılan özgün ve başka kaynaklardan yapılan bildirişlerin, şekil ve tabloların kaynak olarak kullanımı, 5846 sayılı Fikir ve Sanat Eserleri Kanunundaki hükümlere tabidir.

Bilimsel Etięe Uygunluk Sayfası

“Erzincan İli Zeminlerinde Standart Penetrasyon Direnci ile Kayma Dalgası Hızı Arasındaki Korelasyonların Belirlenmesi” isimli “Yüksek Lisans” tezim tarafımca intihal tespit programı ile incelenmiştir. Buna göre tezimde bilimsel etik ihlali ve intihal olarak nitelendirilebilecek herhangi bir durum olmadığını taahhüt ederim.

Bu çalışmadaki tüm bilgilerin, akademik ve etik kurallara uygun bir biçimde elde edildiğini; aynı zamanda bu kural ve davranışların gerektirdiğı gibi, bu çalışmanın özünde olmayan tüm materyal ve sonuçları tam olarak aktardığımı ve referans gösterdiğimi beyan ederim.

..../..../.....

Serap HANCIOĞLU

ÖZET

ERZİNCAN İLİ ZEMİNLERİNDE STANDART PENETRASYON DİRENCİ İLE KAYMA DALGASI HIZI ARASINDAKİ KORELASYONLARIN BELİRLENMESİ

Serap HANCIOĞLU

Yüksek Lisans Tezi

Erzincan Binali Yıldırım Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü,

İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı

Danışman: Dr. Öğr. Üyesi Adem IŞIK

2026, 73 sayfa

Kayma dalgası hızı (V_s), zeminlerin dinamik davranışını tanımlayan en önemli parametrelerden biri olup, deprem mühendisliği ve mikrobölgeleme çalışmalarında kritik bir rol oynamaktadır. V_s değeri, genellikle arazi sismik deneyleri ile ölçülmektedir. Ancak bu yöntemlerin zaman alıcı ve maliyetli olması, daha pratik ve ekonomik alternatiflerin geliştirilmesini gerekli kılmıştır. Bu bağlamda, sondaj kuyularında yaygın olarak uygulanan Standart Penetrasyon Deneyi (SPT) sonucu elde edilen N darbe sayısı ile V_s arasındaki ilişkiler, literatürde çeşitli ampirik bağıntılarla ifade edilmektedir. Bu tez çalışmasında, Erzincan'da gerçekleştirilen sondaj ve sismik ölçümlerden elde edilen SPT-N ve V_s verileri arasındaki ilişki literatürdeki ampirik modeller kapsamında incelenerek yaklaşım eğrileri çizilmiştir. Bu yaklaşım eğrilerinden en yakın eğilimleri başta İmai ve diğ.(1977), İmai ve Yoshimura (1975) ve Ohta ve Goto (1978) çalışmaları göstermiştir. Bununla beraber, mevcut çalışma ile literatürdeki diğer bağıntılarla yapılan karşılaştırmalarda çizilen eğrilerin uyumlu olduğu görülmektedir. Bulgular, bölgesel jeolojik ve geoteknik özelliklerin SPT-N ile V_s arasındaki ilişkiyi önemli ölçüde etkilediğini göstermektedir.

Anahtar Kelimeler: Kayma dalgası hızı (V_s), standart penetrasyon deneyi (SPT).

ABSTRACT

DETERMINING CORRELATIONS BETWEEN STANDARD PENETRATION RESISTANCE AND SHEAR WAVE VELOCITY IN SOILS OF ERZİNCAN PROVINCE

Serap HANCIOĞLU

Master's Thesis

Erzincan Binali Yıldırım University, Institute of Science and Technology,

Department of Civil Engineering

Advisor: Assistant Professor Adem IŞIK

2026, 73 pages

Shear wave velocity (V_s) is one of the most important parameters defining the dynamic behavior of soils and plays a critical role in earthquake engineering and microzoning studies. The V_s value is typically measured through in-situ seismic tests. However, the time-consuming and costly nature of these methods has necessitated the development of more practical and economical alternatives. In this context, the relationship between the N blow count obtained from the Standard Penetration Test (SPT)—commonly applied in boreholes—and V_s is expressed in the literature through various empirical equations. In this thesis study, the relationship between SPT-N and V_s data obtained from drilling and seismic measurements conducted in Erzincan was examined within the framework of empirical models in the literature, and fitting curves were plotted. Among these fitting curves, the best fits were demonstrated by the studies of Imai et al. (1977), Imai and Yoshimura (1975), and Ohta and Goto (1978). In contrast, comparisons between the curves plotted in the present study and those from other relationships in the literature reveal that the curves do not align. The findings indicate that regional geological and geotechnical characteristics significantly influence the relationship between SPT-N and V_s .

Keywords: Shear wave velocity (V_s), standard penetration test (SPT).

TEŞEKKÜR

İlgi duyduğum geoteknik mühendisliği alanındaki akademik gelişimimi sağlamamda ve tez çalışması süresince bilgi ve deneyimleri ile yol gösteren kıymetli danışman hocam Dr. Öğr. Üyesi Adem IŞIK'a en içten teşekkürlerimi sunarım. Ayrıca tez çalışmamda değerli karkılarda bulunan Doç. Dr. Harun AKOĞUZ ve Dr. Öğr. Üyesi Fatih KARAÇOR hocalarıma teşekkürü borç bilirim.

Bugünlere gelmemde en büyük pay sahibi olan, bana çalışmanın, sabrın ve azmin ne demek olduğunu öğreten babamın varlığı, bu sürecin en büyük güç kaynağı olmuştur. Bu tez çalışmasını, gurur kaynağım olan başta babam olmak üzere canım aileme ithaf ediyorum.

Serap HANCIOĞLU

Haziran, 2026

İÇİNDEKİLER

ÖZET	i
ABSTRACT	ii
TEŞEKKÜR	iii
İÇİNDEKİLER.....	iv
TABLO LİSTESİ	v
ŞEKİL LİSTESİ	vi
SİMGELER VE KISALTMALAR	viii
1. GİRİŞ.....	1
2. KAVRAMSAL ÇERÇEVE VE İLGİLİ ÇALIŞMALAR	3
2.1. SPT (Standart Penetrasyon Testi)	3
2.2. Kayma Dalgası Hızı (Vs) kavramı.....	12
2.2.1. Sismik yöntemler.....	14
2.2.1.1. Yüzey sismik yöntemler.....	16
2.2.1.2. Kuyu içi sismik yöntemler	22
2.3. SPT-Vs Korelasyonları	24
3. YÖNTEM.....	35
3.1. Çalışma Alanının Tanımı	35
3.2. Çalışma Alanının Jeolojisi	36
3.3. Çalışma Alanının Depremselliği	40
3.4. Çalışma Alanına Ait Zemin Parametreleri.....	42
4. BULGULAR	54
4.1. Ohba ve Toriumi Yaklaşımı (1970).....	55
4.2. Ohsaki ve Iwasaki Yaklaşımı (1973).....	56
4.3. İmai ve Yoshimura Yaklaşımı (1975).....	57
4.4. İmai vd. Yaklaşımı (1977)	58
4.5. Ohta ve Goto Yaklaşımı (1978).....	59
4.6. Dikmen Yaklaşımı (2009).....	60
4.7. Anbazgahan vd. Yaklaşımı (2012).....	61
4.8. Thokchom vd. Yaklaşımı (2017)	62
4.9. Sil ve Haloi Yaklaşımı (2017)	63
4.10. Mehta ve Thaker Yaklaşımı (2020)	64
4.11. Singh vd. Yaklaşımı (2021)	65
4.12. Shahgholipour, Afsari ve Ghaseminejad Yaklaşımı (2023)	66
5. TARTIŞMA VE SONUÇ.....	67
KAYNAKÇA	69

TABLO LİSTESİ

Tablo 2.1 Farklı ülkelerdeki enerji oranları ve enerji düzeltme faktörleri	9
Tablo 2.2 Örtü yükü düzeltme faktörleri (C_N).....	10
Tablo 2.3 T_{ij} uzunluğu düzeltme faktörü (C_R), tüp tipi düzeltme faktörü (C_S), sondaj çapı düzeltme faktörü (C_B),darbe hızı düzeltme faktörü (C_{BF})	11
Tablo 2.4 Kohezyonlu zeminlerin V_s hızlarına göre sınıflara ayrılması.....	13
Tablo 2.5 Kohezyonsuz zeminlerin V_s hızlarına göre sınıflara ayrılması	13
Tablo 2.6 P-dalgası hızı ile zemin türleri arasındaki ilişki.	19
Tablo 2.7 f_A ve f_G Faktörleri.....	28
Tablo 2.8 Literatürdeki SPT- V_s arasındaki korelasyonları gösteren ampirik formülasyonlar.	33
Tablo 3.1 Çalışma alanına ait zemin parametreleri	43
Tablo 3.2 Grafik çizimlerinde kullanılan SPT-N ve V_s değerler	47

ŞEKİL LİSTESİ

Şekil 2.1 Standart penetrasyon testinin yapılışı.....	4
Şekil 2.2 Halka (simit) tipi şahmerdan ile SPT yapılışı	5
Şekil 2.3 Kedibaşı detayı (ASTM D1586-11).....	5
Şekil 2.4 Halatla kaldırmalı şahmerdan.....	6
Şekil 2.5 (A);halka tipi şahmerdan, (B) emniyetli şahmerdan	6
Şekil 2.6 Otomatik şahmerdan ile SPT yapılışı.....	7
Şekil 2.7 Sismik dalgalar yayılırken oluşan parçacık hareketleri a) P-dalgası b)S-dalgası	15
Şekil 2.8 Sismik dalgalar yayılırken oluşan parçacık hareketleri c) Love dalgaları d) Rayleigh dalgaları	16
Şekil 2.9 Tabakalı zeminlerde yüzey dalgalarının yayılması	16
Şekil 2.10 Sismik kırılma yöntemi	17
Şekil 2.11 Sismik yansıma yöntemi	17
Şekil 2.12 Sismik yöntemlerde sismik dalgaların yer altında yayılım şekilleri	18
Şekil 2.13 Sismik yöntemde dalga varış süresi-uzaklık grafiği	20
Şekil 2.14 SASW uygulamasının çizim ile gösterimi	21
Şekil 2.15 CSW uygulamasının çizim ile gösterimi.....	22
Şekil 2.16 Karşıt kuyu sismik deney düzeneğinin şekil ile gösterimi	23
Şekil 2.17 Aşağı ve yukarı kuyu sismik yöntemlerinin çizim ile gösterimi.....	24
Şekil 2.18 Sismik koni penetrasyon deneyinin çizim ile gösterimi.....	24
Şekil 3.1 Erzincan ilinin Türkiye haritası üzerindeki konumunu gösteren harita	35
Şekil 3.2 Çalışma alanının sondaj yerlerini gösteren harita	36
Şekil 3.3 İnceleme alanını ve çevresini gösteren jeoloji haritası.	39
Şekil 3.4 Çalışma alanının jeoloji haritası.	40
Şekil 3.5 Erzincan ilinin diri faylara olan mesafesi.....	41
Şekil 3.6 Erzincan ve çevresinde 1900-2022 yılları arasında meydana gelen depremler ($M_s \geq 4,0$)	42
Şekil 4.1 Mevcut veriler SPT-N – Vs ilişkisi ile Ohba ve Toriumi (1970) yaklaşımının karşılaştırılması.....	55
Şekil 4.2 Mevcut veriler SPT-N – Vs ilişkisi ile Ohsaki ve Iwasaki (1973) yaklaşımının karşılaştırılması.....	56
Şekil 4.3 Mevcut veriler SPT-N – Vs ilişkisi ile İmai ve Yoshimura (1975) yaklaşımının karşılaştırılması.....	57

Şekil 4.4 Mevcut veriler SPT-N – Vs ilişkisi ile İmai ve diğ. (1977) yaklaşımının karşılaştırılması.....	58
Şekil 4.5 Mevcut veriler SPT-N – Vs ilişkisi ile Ohta ve Goto (1978) yaklaşımının karşılaştırılması.....	59
Şekil 4.6 Mevcut veriler SPT-N – Vs ilişkisi ile Dikmen (2009) yaklaşımının karşılaştırılması	60
Şekil 4.7 Mevcut veriler SPT-N – Vs ilişkisi ile Anbazhagan vd. (2012) yaklaşımının karşılaştırılması.....	61
Şekil 4.8 Mevcut veriler SPT-N – Vs ilişkisi ile Thokchom vd.(2017) yaklaşımının karşılaştırılması.....	62
Şekil 4.9 Mevcut veriler SPT-N – Vs ilişkisi ile Sil ve Haloi (2017) yaklaşımının karşılaştırılması.....	63
Şekil 4.10 Mevcut veriler SPT-N – Vs ilişkisi ile Mehta ve Thaker (2020) yaklaşımının karşılaştırılması.....	64
Şekil 4.11 Mevcut veriler SPT-N – Vs ilişkisi ile Singh vd. (2021) yaklaşımının karşılaştırılması	65
Şekil 4.12 Mevcut veriler SPT-N – Vs ilişkisi ile Shahgholipour vd.(2023) yaklaşımının karşılaştırılması.....	66

SİMGELER VE KISALTMALAR

ASTM	Uluslararası Amerikan Test ve Malzeme Topluluğu
C_B	Sondaj çapı düzeltme katsayısı
C_{BF}	Darbe hızı düzeltme katsayısı
C_E	Enerji düzeltme katsayısı
C_N	Örtü yükü düzeltme katsayısı
C_R	Tij uzunluğu düzeltme katsayısı
C_S	Numune alıcı (tüp tipi) düzeltme katsayısı
CSW	Devamlı yüzey dalgası yöntemi
d	Alıcılar arası mesafe (m)
E_3, E_6, E_9	3,6,9 metredeki deformasyon modülleri
ER	Enerji oranı (%)
$E_{ölçülen}$	Ölçülen enerji (J)
E_{teorik}	Teorik enerji (J)
f	Frekans (Hz)
f_A	Jeolojik yaş faktörü
f_G	Zemin tipi faktörü
FFT	Hızlı Fourier Dönüşümü
G_{max}	Maksimum kayma modülü (kPa)
H	Derinlik (m)
h_i	i'inci tabaka kalınlığı (m)
J	Joule
KAF	Kuzey Anadolu Fayı
Kg	Kilogram
kPa	Kilopaskal
L	Love dalgası
L_R	Rayleigh dalga boyu (m)

MASW	Yüzey Dalgalarının Çok Kanallı Analizi
MTA	Maden Tetkik ve Arama Genel Müdürlüğü
N	Standart penetrasyon darbe sayısı
N'	Siltli kum düzeltmesi
(N ₁) ₆₀	%60 enerjiye göre düzeltilmiş darbe sayısı
(N ₁) _E	Enerji ve düzeltmeler uygulanmış darbe sayısı
P-dalgası	Primer (basınç) dalgası
PGA	Maksimum yer ivmesi
Ply	Yolüstü formasyonu
Plç	Çullu üyesi
PMT	Presiyometre testi
PS Logging	Kuyu içi P ve S dalgası ölçüm yöntemi
Pzh	Hınıs metaofiyoliti
Pzhp	Metaperidotit/peridotit
PzMzan	Anadolu volkano-sedimenter serisi
Qal	Alüvyon
Qh/y	Alüvyon yelpazesi, heyelan döküntüsü, yamaç molozu
q _u	Serbest basınç mukavemeti
R	Rayleigh dalgası
R ²	Belirtme katsayısı
ReMİ	Kırılma mikrotremörü yöntemi
S-dalgası	Sekonder (kayma) dalgası
SASW	Yüzey Dalgalarının Spektral Analizi
SPT	Standart Penetrasyon Testi
SPT-N	Standart Penetrasyon Deneyi Darbe Sayısı
s _u	Drenejsız kayma mukavemeti
USCS	Birleştirilmiş zemin sınıflama sistemi

V_s	Kayma dalgası hızı (m/s)
V_{s_i}	i'inci tabakanın kayma dalgası hızı (m/s)
V_{s30}	İlk 30 m için ortalama kayma dalgası hızı (m/s)
V_R	Rayleigh dalga hızı (m/s)
Y.A.S.S	Yeraltı su seviyesi
σ_v	Toplam düşey gerilme (kPa)
σ'_v	Efektif düşey gerilme (kPa)
ρ	Zemin birim hacim kütlesi (kg/m ³)
Φ	Faz farkı (radyan)

1. GİRİŞ

Depremler, özellikle hızlı kentleşme ve sanayileşmenin etkisiyle büyüyen yerleşim alanlarında önemli can ve mal kayıplarına sebep olan doğal afetlerin başında gelmektedir. Yerleşim alanlarının önemli bir bölümünün aktif tektonik kuşaklar üzerinde veya yakınında bulunması, deprem tehlikesini artırmaktadır. Türkiye'nin aktif deprem fayları üzerinde bulunması ve geçmişte yaşanan yıkıcı depremler, yerel zemin koşullarının deprem hasarları üzerindeki etkisini açıkça ortaya koymuştur. Özellikle 1999 Gölcük Depremi sonrasında yapılan çalışmalar, aynı deprem etkisi altında farklı zemin özelliklerine sahip bölgelerde hasar düzeylerinin büyük ölçüde değiştiğini göstermiştir (Bol vd., 2007). Bu durum, deprem etkilerinin yalnızca deprem büyüklüğüne değil, aynı zamanda yerel zemin özelliklerine de bağlı olduğunu ortaya koymaktadır.

Deprem sırasında oluşan yer hareketlerinin zemin tabakaları içerisindeki yayılımı ve değişimi, yapıların maruz kaldığı deprem kuvvetlerini doğrudan etkilemektedir. Yerel zemin koşullarına bağlı olarak deprem dalgalarının genliğinde meydana gelen artış veya azalış “zemin büyütmesi” olarak tanımlanmaktadır. Bu etkinin belirlenmesinde, özellikle zemin yüzeyinden itibaren ilk 30 metre içerisindeki tabakaların önemli olduğu vurgulanmaktadır. Bu nedenle, zeminlerin dinamik özelliklerinin doğru bir şekilde belirlenmesi, depreme dayanıklı yapı tasarımı ve güvenli yerleşim planlaması açısından kritik öneme sahiptir.

Zeminlerin dinamik davranışını tanımlamada en önemli parametrelerden biri kayma dalgası hızı (V_s)'dır. V_s , zeminin rijitliği ve elastik özellikleri hakkında doğrudan bilgi vermekte olup, zemin sınıflandırması, zemin büyütmesi analizi ve sıvılaşma potansiyelinin belirlenmesi gibi birçok geoteknik uygulamada temel bir parametre olarak kullanılmaktadır (İyisan, 1996).

Kayma dalgası hızının doğrudan belirlenmesi, sismik kırılma, MASW veya PS logging gibi jeofizik yöntemlerle mümkün olmakla birlikte, bu yöntemler geniş alanlar için zaman alıcı ve maliyetli olabilmektedir. Bu nedenle, saha çalışmalarında yaygın olarak uygulanan Standart Penetrasyon Deneyi (SPT) verilerinden yararlanılarak V_s değerlerinin ampirik bağıntılar aracılığıyla tahmin edilmesi yaygın bir yaklaşım haline gelmiştir. SPT-N değeri, zeminin sıklığı ve dayanımı hakkında pratik bilgiler sunmakta olup, zeminin rijitliği arttıkça hem SPT-N hem de V_s değerlerinin arttığı bilinmektedir. Bu ilişki, literatürde çok sayıda araştırmacı tarafından incelenmiş ve farklı zemin türleri için çeşitli ampirik bağıntılar geliştirilmiştir.

Ancak, SPT-Vs ilişkisine yönelik geliştirilen bu ampirik bağıntıların, her bölge için doğrudan kullanılabilir olmadığı ve yerel zemin şartlarına bağlı olarak değişiklik gösterebileceği bilinmektedir. Zeminlerin oluşum ortamı, jeolojik geçmişi, dane dağılımı ve gerilme durumu gibi birçok faktör bu ilişkiyi etkilemektedir. Bu nedenle, belirli bir çalışma alanına ait güvenilir Vs tahminlerinin yapılabilmesi için, mevcut ampirik bağıntıların yerel verilerle test edilmesi ve gerekirse yeni bağıntıların geliştirilmesi gerekmektedir.

Bu çalışma ile SPT-N değerleri ile kayma dalgası hızı (Vs) arasındaki ilişkinin incelenmesi ve çalışma alanındaki verilerin literatürdeki mevcut bağıntılarla uyum olasılığı araştırılmıştır. Bu kapsamda, saha ve sondaj çalışmalarından elde edilen veriler kullanılarak farklı ampirik modeller karşılaştırılmış, elde edilen sonuçlar grafik eğrileri çizilerek değerlendirilmiştir.

Çalışmanın önemi, doğrudan ölçümün mümkün olmadığı veya sınırlı olduğu durumlarda, SPT verileri kullanılarak güvenilir Vs tahminlerinin yapılabilmesine katkı sağlamasıdır. Bu sayede, hem mühendislik projelerinde zaman ve maliyet açısından önemli avantajlar sağlanacak hem de deprem riskinin azaltılmasına yönelik daha doğru zemin değerlendirmeleri yapılabilecektir. Ayrıca elde edilen bulguların, kentsel mikrobölgeleme çalışmaları ve depreme dayanıklı yapı tasarımı açısından yol gösterici olması beklenmektedir.

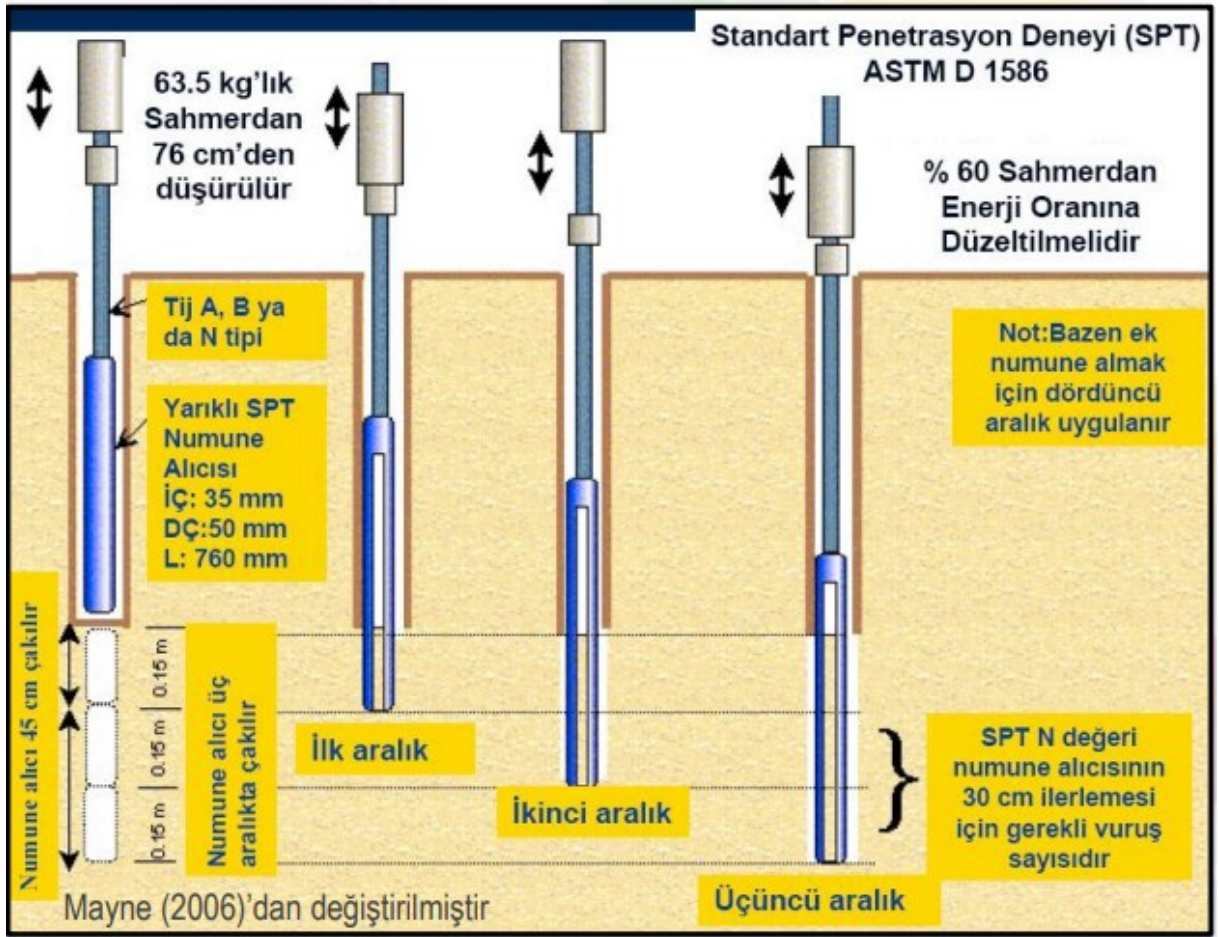
2. KAVRAMSAL ÇERÇEVE VE İLGİLİ ÇALIŞMALAR

İnsanların yaşam alanlarını imar ederken üzerinde durmaları gereken en önemli konulardan biri zeminlerin özelliklerinin tespit edilmesidir. Nitekim uzun yıllar boyunca meydana gelen depremler ile depremsiz durumlarda görülen zeminel problemler zemin araştırmalarının önemini göstermiştir. Zemin araştırmaları yapılmadığında zeminlerde istenmeyen oturmalar, taşıma gücü problemleri, yatayda kaymalar, sıvılaşma problemleri görülebilmektedir. Tüm bu olumsuzlukların yaşanmaması için zemin araştırmalarının yapılması elzemdir. Zemin özelliklerinin tespit edilmesi için SPT, kayma dalgası hızı ve presiyometre deneyleri yapılmaktadır. SPT deneyi ile zeminlerin direnç karakteristikleri belirlenerek zemin davranışı tahmin edilir. Ayrıca bu deney ile numune alma işi gerçekleştirilerek zeminlerin karakteristik özellikleri belirlenir. Kayma dalgası hızı (V_s) deneyi ile zeminin kesme deformasyonuna karşı gösterdiği direnç tespit edilir. Yapılan deneylerden elde edilen veriler değerlendirilerek zemin sınıfı belirlenir ve zemin parametreleri kullanılarak geoteknik hesaplamalar yapılır.

2.1. SPT (Standart Penetrasyon Testi)

Standart penetrasyon testi (SPT), arazide zemin özelliklerini belirlemek amacıyla uygulanan en yaygın deneylerden biridir. Deney, uygulama kolaylığı, düşük maliyetle gerçekleştirilmesi ve uzun yıllardır kullanılıyor olması nedeniyle dünya genelinde standartlaşmış durumdadır. Özellikle yapı temellerinin tasarımında, sıvılaşma analizlerinde ve taşıma gücü hesaplarında kullanılan temel verilerin elde edilmesini sağlar. SPT'nin temel amacı, zeminin direnç karakteristiklerini belirlemektir. Darbe sayısı üzerinden yorumlanan bu direnç, kaba daneli zeminlerin sıklığını, ince daneli zeminlerin kıvamının belirlenmesiyle zeminlerin mühendislik davranışını tahmin etmede önemli rol oynar. Ayrıca SPT deneyi ile örselenmiş veya örselenmemiş numune alma işlemi gerçekleştirilir. Böylelikle özgül ağırlık, atterberg limitleri, dane boyu dağılımı, su muhtevası, serbest basınç mukavemeti (q_u) ve drenajsız kayma mukavemeti (s_u) gibi zemin özellikleri belirlenebilir.

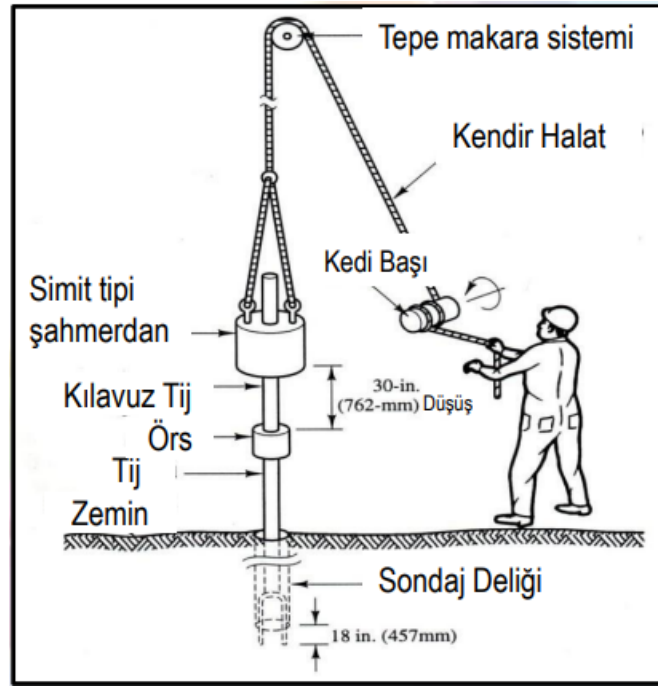
Deney, sondaj kuyusunda belirli bir derinlikte yapılır (Şekil 2.1). Sondaj tijlerine sabitlenen split-spoon numune alıcı kuyu tabanına indirilir. Tij üzerine 15 cm lik üç adet ilerleme adımı işaretlenir. 63,5 kg ağırlığındaki tokmak 76 cm düşme yüksekliğinden serbest bırakılarak çakma işlemi yapılır. Kazıcı uç, üç ardışık 15 cm'lik ilerleme boyunca çakılır. Her 15 cm lik adımda darbe sayıları tespit edilir. İlk 15 cm yerleştirme yapılırken örselenme olabileceği için dikkate alınmaz. Sonraki 30 cm'ye ait darbe sayılarının toplamı N değeri olarak kaydedilir.



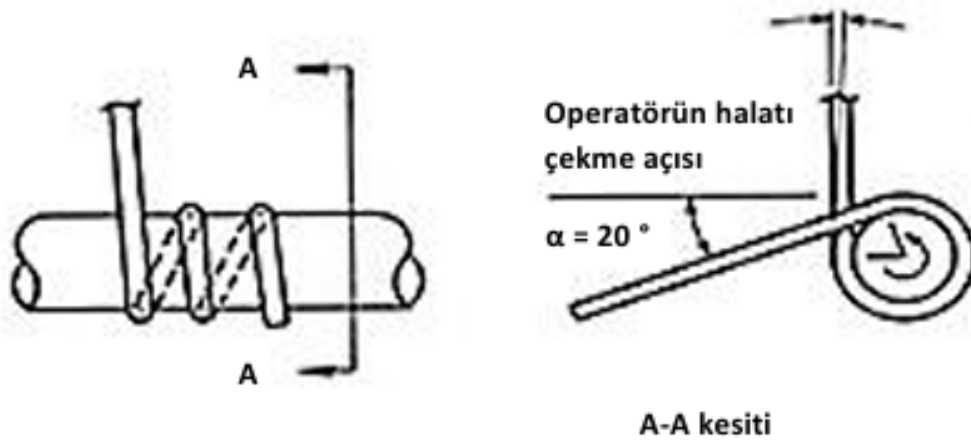
Şekil 2.1 Standart penetrasyon testinin yapılışı (Yunatçı,2021)

SPT deneyi halatla kaldırmalı şahmerdanlar, elle düşürmeli şahmerdanlar ve otomatik düşürmeli şahmerdanlar olmak üzere üç tip deney düzeneği ile gerçekleştirilmektedir.

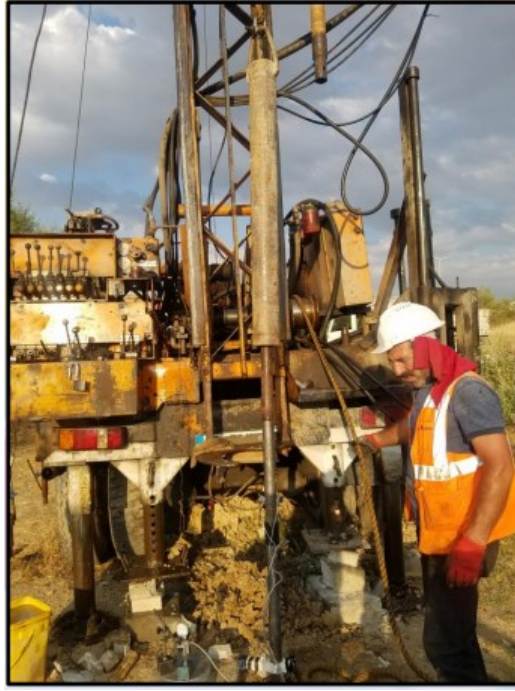
Halatla kaldırmalı şahmerdan ile deneyin yapılışı: Şahmerdana bağlı olan halat sondaj kuyusunun tepesindeki makaradan geçerek kedibaşı ile çekilir (Şekil 2.2, Şekil 2.3, Şekil 2.4). Kedibaşının ASTM D1586 da belirtilen dakikada en az 100 döngü hız ile çekilmesi gerekmektedir. Halatın çekilmesiyle yükseltelen şahmerdan halatın bırakılması ile serbest düşürülür. İşlem sırasında makara ve kedibaşına dolanan halatta sürtünme kayıpları oluşur. Farklı enerji kayıplarını önlemek için şahmerdanın her seferinde aynı yüksekliğe çekilerek kedi başına aynı şekilde dolanması gerekmektedir. Aksi halde operatör hataları deney sonuçlarını olumsuz etkilemektedir. Halatla kaldırmalı uygulamalarda halka tipi ve emniyetli şahmerdanlar kullanılmaktadır (Şekil 2.5).



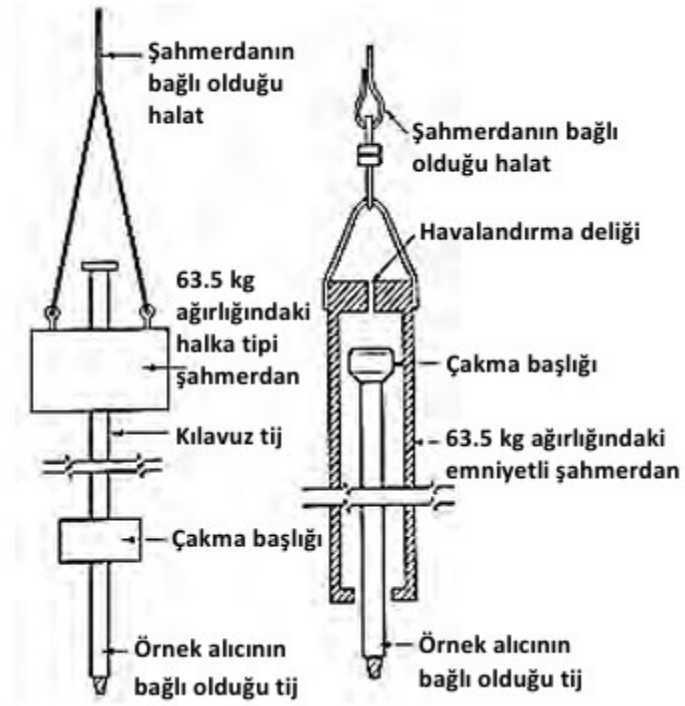
Şekil 2.2 Halka (simit) tipi şahmerdan ile SPT yapılışı (Coduto,2000)



Şekil 2.3 Kedibaşı detayı (ASTM D1586-11)



Şekil 2.4 Halatla kaldırmalı şahmerdan (Yunatçı, 2021)



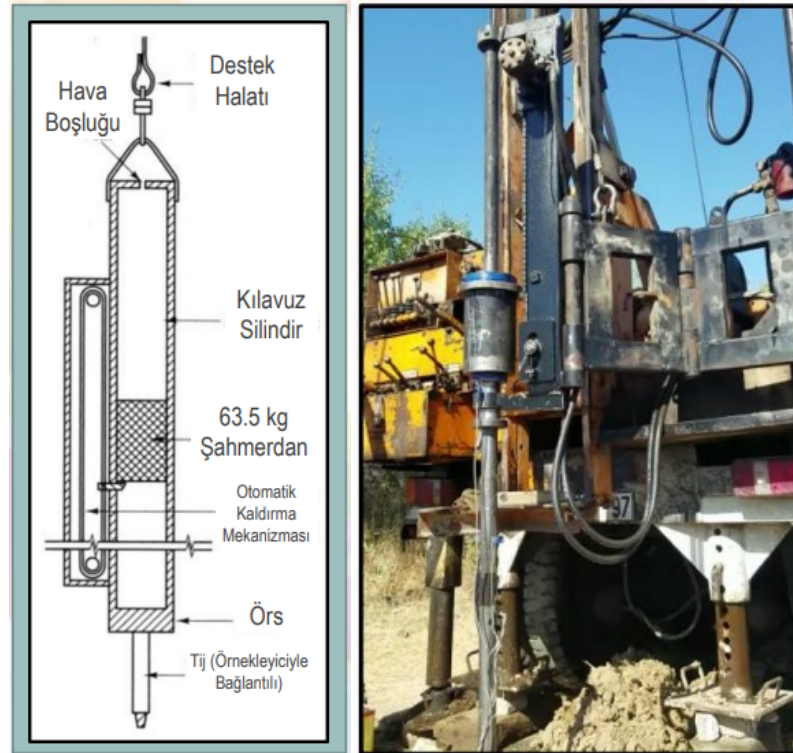
(A)

(B)

Şekil 2.5 (A);halka tipi şahmerdan, (B) emniyetli şahmerdan (Coduto,2000)

Elle düşürmeli şahmerdanlar ile deneyin yapılışı: Vinç yardımıyla standart bir yüksekliğe çıkarılan tokmak serbest olarak düşürülür. Bu yöntemde operatör hata payının yüksek olması sebebiyle için tercih edilen bir yöntem değildir.

Otomatik şahmerdan ile deneyin yapılışı: Halka tipi şahmerdan ile kıyaslandığında tijlere iletilen enerji sapması daha az olup operatör hatası bulunmamaktadır. Bu sebeple en sağlıklı sonuçlar otomatik şahmerdan ile elde edilir. Otomatik şahmerdanlar, yaygın olarak İngiltere, Japonya, Amerika ve İsrail’de kullanılmaktadır (Şekil 2.6).



Şekil 2.6 Otomatik şahmerdan ile SPT yapılışı (Coduto,2000)

Ham SPT-N değeri çeşitli faktörlerden etkilenir. SPT deneylerinde kullanılan farklı ekipman ve uygulama koşullarından kaynaklanan değişkenliği azaltmak için bir takım düzeltmeler yapılır. $(N_1)_E$, düzeltilmiş darbe sayısı; siltli kum düzeltmesi (N'), enerji düzeltme katsayısı (C_E) (Tablo 1), örtü yükü düzeltme katsayısı (C_N) (Tablo 2), sondaj çapı düzeltme katsayısı (C_B), tüp tipi için düzeltme faktörü (C_s), tij uzunluğu düzeltme katsayısı (C_R), darbe hızı düzeltme faktörü (C_{BF}) kullanılarak hesaplanır (Formül 2.1).

$$(N_1)_E = N' \times C_E \times C_N \times C_B \times C_s \times C_R \times C_{BF}$$

Formül 2.1

Bu düzeltmelere ilave olarak %60 enerji düzeltmesi yapılarak $(N_1)_{60}$ değeri hesaplanır (Formül 2.2).

$$(N_1)_{60} = N' \times \frac{ER}{60} \times C_N \times C_B \times C_S \times C_R \times C_{BF} \quad \text{Formül 2.2}$$

Yukarıdaki formüllerde kullanılan düzeltme faktörlerini sırasıyla açıklarsak;

Enerji düzeltmesi (C_E); çelik tijlere aktarılan enerji düzeltmesi, SPT-N değerine yapılan en önemli düzeltmelerdendir. Şahmerdandan tij çubuklarına aktarılan enerji, şahmerdan tipine ve serbest düşürülme yöntemine bağlı olarak değişkenlik göstermektedir. Ayrıca deney düzeneğindeki elemanlardan olan tij ve şahmerdan ağırlıkları sebebiyle sönmölen enerji, şahmerdanın örse çarparken meydana gelen ısı ve ses enerjisi, tijlerin eğilme durumu, halatların geçtiği yüzeylerle sürtünme sebebiyle ile enerji kayıpları oluşmaktadır. Tüm bu etkenlerden dolayı SPT-N değerlerinde bir enerji düzeltmesi yapılması öngörülmektedir.

SPT-N ile ilgili geliştirilen korelasyonların çoğu %60 verimliliğe sahip şahmerdanlar kullanılarak geliştirilmiştir. Deneyde tijlere uygulanan her darbeye 63,5 kg ağırlığındaki tokmağın 76,2 cm yükseklikten düşürölmesi ile 475 J teorik enerji tatbik edilir. Deney sırasında meydana gelen enerji kayıpları sebebiyle tijlere aktarılan enerji 475 J'den daha az olmaktadır ($E_{ölçölün}$). Eğer deneyde teorik enerjinin (E_{teorik}) %60'ını sağlayan bir tokmak kullanılmamışsa ölçölün SPT-N değeriinin enerji düzeltme faktörü kullanılarak düzeltilmesi gerekmektedir. Düzeltme faktörü (C_E) aşağıdaki formöl ile hesaplanır.

$$C_E = \frac{ER}{60} \quad \text{Formöl 2.3}$$

Formöldeki ER değeri; deneyde 63,5 kg ağırlığındaki tokmağın 76,2 cm yükseklikten düşürölmesi ile tijlerde ölçölün enerjinin ($E_{ölçölün}$), teorik enerjiye (E_{teorik}) yüzdelik oranını ifade eder. Tablo 2.1. de farklı ölkelerde uygulanan SPT'lerde kaydedilen ER ve C_E 'nin değışimi görölmemektedir.

Tablo 2.1 Farklı ülkelerdeki enerji oranları ve enerji düzeltme faktörleri (Clayton vd,1995)

Ülke	Şahmerdan tipi	Şahmerdan düşürme mekanizması	ER (%)	C _E
Arjantin	Halka	Kedibaşı	45	0,75
Brezilya	Çivi	Serbest elle düşürme	72	1,20
Çin	Otomatik	Tetikleme (trip)	60	1,00
	Halka	Kedibaşı	50	0,83
Kolombiya	Halka	Kedibaşı	50	0,83
Japonya	Halka	(Tombi trigger)	78-85	1,30-1,42
	Halka	Kedibaşı 2 devir	65-67	1,08-1,12
Britanya	Otomatik	Tetikleme	73	1,22
Amerika	Güvenli	Kedibaşı 2 devir	55-60	0,92-1,00
	Halka	Kedibaşı 2 devir	45	0,75
Venezüella	Halka	Kedibaşı	43	0,72

Tablo 2.1. incelendiği zaman enerji oranları farkının %43 ile %85 arasında değiştiği görülmektedir. Dolayısıyla enerji düzeltmesi yapılmadığında SPT sonuçlarının yaklaşık iki kat farklı olabileceği görülmektedir.

Örtü yükü düzeltmesi (C_N); zeminlerin birim ağırlıklarının ve su içeriklerinin derinlikle değişmediği homojen yapıda oldukları durumlarda, SPT-N değerleri derinlere inildikçe artmaktadır. Derinlik arttıkça örtü yükü gerilmeleri arttığı için deney, çevre basıncının derinlikle arttığı koşullarda yapılır. Dolayısı ile aynı penetrasyonu sağlayan darbe sayısı derinlikle artmaktadır.

Örtü yükü düzeltmesi (C_N), aynı özellikteki zemini derinliğe bağlı olmadan tek bir standart penetrasyon değeri tanımlamak amacı ile yapılır. Ölçülen SPT-N değeri standart efektif örtü yükünün (σ'_{vo}) 100 kPa'lık olduğu tabaka gerilmesine göre uyarlanmaktadır. Efektif örtü yükünün yaklaşık 100 kPa olduğu derinliklerde C_N=1, daha düşük örtü yükü değerlerinde C_N>1, daha yüksek örtü yükü değerlerinde C_N<1 değerleri alınır.

Kohezyonlu zeminlerde deneyler drenajsız koşullarda gerçekleştiğinden örtü yükü düzeltilmesi yapılmamalıdır. Tablo 2.2 de görüldüğü üzere örtü yükü düzeltme faktörleri için önerilen çeşitli formüller geliştirilmiştir.

Tablo 2.2 Örtü yükü düzeltme faktörleri (C_N)

Referanslar	Düzeltilme faktörü (C_N)	σ'_v birimleri
Teng (1962)	$C_N = \frac{50}{10 + \sigma'_{v0}}$	psi
Peck, Hansen ve Thornburn (1974)	$C_N = 0.77 \log\left(\frac{20}{\sigma'_{v0}}\right)$	ton/ft ²
Seed (1976)	$C_N = 1 - 1.25 \log(\sigma'_{v0})$	ton/ft ²
Tokimatsu ve Yozhimi (1983)	$C_N = \frac{1.7}{0.7 + \sigma'_{v0}}$	kgf/cm ²
Liao ve Whitman (1986)	$C_N = 9.78 \times \left(\frac{1}{\sigma'_{v0}}\right)^{0.5}$	kgf/cm ²

Sondaj çapı düzeltmesi (C_B); SPT, 114 mm den büyük sondaj çapına sahip olan kuyularda yapıldığında gerilme boşalması meydana geleceğinden deney sonuçlarında düzeltme yapılmalıdır. 114 mm'den büyük olan sondaj kuyularında yapılan SPT-N sonuçları daha küçük çaplı kuyularda yapılan deney sonuçlarından daha düşük çıkmaktadır. Sondaj kuyusu çapı kum zeminler için önemli olmakla beraber kil zeminlerde bu durum ihmal edilebilir. Tablo 2.3 te sondaj kuyu çapına bağlı olarak sondaj çapı düzeltme faktörleri görülmektedir.

Tüp tipi için düzeltme faktörleri (C_s); SPT deneyi yapılırken numune alıcısı kılıflı ya da kılıfsız olarak kullanılabilir. Kılıf kullanılmadığında numune alıcısının iç çapı arttığı için içerisindeki sürtünme azalır. Bu sebeple zeminin penetrasyon direnci azalır. Dolayısı ile numune alıcısının kılıfsız veya kılıflı olma durumuna göre Tablo 2.3 te öngörülen düzeltmeler yapılır.

Tij uzunluğu düzeltme faktörleri (C_R); Deney yapılırken numune alıcısına aktarılan enerji, tij uzunluğuna bağlı olarak etkilenebilmektedir. Bu sebeple SPT-N sonuçlarına Tablo 2.3 te öngörülen düzeltmeler uygulanmaktadır.

Darbe hızı düzeltme faktörü (C_{BF}); Bu düzeltme işlemi, yalnızca yeraltı su seviyesi altındaki kum zeminler için boşluk suyu basıncından dolayı yanıltıcı SPT-N sonuçlarının düzeltilmesi amacıyla yapılır.

Tablo 2.3 Tij uzunluğu düzeltme faktörü (C_R), tüp tipi düzeltme faktörü (C_S), sondaj çapı düzeltme faktörü (C_B), darbe hızı düzeltme faktörü (C_{BF})

Düzeltilme Faktörleri						
Değişkenler		Semboller	Skempton (1986)	Robertson ve Wride (1997)	McGregor ve Duncan (1998)	Bowles (1996)
Tij uzunluğu	>30 m	C_R	1	<1,0	1	1
	10-30 m		1	1	1	1
	6-10 m		0,95	0,95	1	0,95
	4-6 m		0,85	0,85	1	0,85
	3-4 m		0,75	0,75	1	0,75
	0-3 m		0,75	-	0,75	0,75
Tüp	Kılıfsız numune alıcı	C_S	1,2	1,1- 1,3	-	1,0
	Kırlıflı numune alıcı:		1	1	-	0,9
	Gevşek kum, sıkı kum ve kil		1	1	-	0,8
Sondaj kuyu çapı	60-120 mm	C_B	1	1	-	1
	150 mm		1,05	1,05	-	1,05
	200 mm		1,15	1,15	-	1,15
Tokmak vuruş sıklığı	<20 ve 10-20 vuruş /dak	C_{BF}	-	-	0,95	-
	>20 ve 10-20 vuruş /dak		-	-	1,05	

SPT sonuçlarının; çakma sırasında ekipman sürtünmesi, deney yapan personelin uygulama farklılıkları, zemin içindeki çakıllar, su seviyesinin varlığı dikkate alınarak değerlendirilmesi gerekmektedir.

Siltli kum düzeltmesi (N'); suya doymun siltli veya ince dane oranı yüksek kumlu zeminler dinamik yüklemelere maruz bırakıldığında düşük geçirgenlikleri sebebiyle bünyesindeki suyu tahliye edemediğinden boşluk suyu basınçları artmaktadır. Artan bu boşluk suyu basıncı geçici olarak zemin mukavemetini artırarak SPT-N değerlerindeki artmasına sebep olmaktadır. Dolayısıyla SPT deneyi; zemin türünün siltli veya ince dane oranı yüksek kumlu zeminler olmasıyla birlikte yeraltı suyu seviyesi altında yapıyor ise, ve darbe sayısının 15 ten fazla olması durumundaki koşulların tümüne sahipse aşağıdaki bağıntı kullanılarak siltli kum düzeltmesi yapılır (Terzaghi ve Peck,1948).

$$N'=15+\frac{1}{2}(N-15)$$

Formül 2.4

2.2. Kayma Dalgası Hızı (Vs) kavramı

Kayma dalgası hızı (Vs), zeminde kayma (S) dalgalarının yayılma hızını ifade eden dinamik bir parametredir. Kayma dalgaları, yer içinde yayılırken taneciklerin hareketi dalganın yayılma doğrultusuna dik olacak şekilde ilerler. Bu nedenle kayma dalgalarının hızı, zemin türüne göre değişmekle birlikte genellikle basınç (P) dalgalarına göre daha düşüktür.

Kayma dalgaları yalnızca katı zemin ve kaya içinde yayılır. Dolayısıyla hava ve su gibi akışkan ortamlarda kayma dalgası hızları ölçülemez. Yeraltındaki zeminlerin su içeriği hakkında fikir veren S dalgalarının hızının az olması, zeminlerde suyun varlığını işaret eder. S dalgalarının hızı yüksek ise zemin su içermemektedir. Kuru, sıkı ve çimentolu zeminlerde Vs yüksektir. Gevşek, suya doymun ve yumuşak zeminlerde Vs belirgin şekilde düşer. Kaya ortamlarında en yüksek Vs hızı görülür.

Deprem mühendisliği uygulamalarında, kayma dalgası hızının 760 m/s ve üzerinde olması, zeminin mühendislik ana kayası olarak kabul edildiği kriter bir değerdir. Bu değer üzerindeki birimler, deprem dalgalarını önemli bir büyütme etkisi oluşturmada iletken, yüksek rijitliğe sahip jeolojik ortamlardır.

Kohezyonlu zeminler açısından değerlendirildiğinde, düşük Vs değerleri zeminin yumuşak ve orta katı bir davranış sergilediğine işaret etmektedir. Bu tür zeminlerin yumuşak–orta katı sınıfında yer aldığını Vs hızının 200 m/s’den az olması belirler. Buna karşılık, Vs değerinin artmasıyla birlikte zemin rijitliği yükselmekte ve 500–750 m/s aralığındaki hızlar, kohezyonlu zeminlerin sert zemin özelliği kazandığını ifade etmektedir. Bu sınıflandırmaya ilişkin detaylar Tablo 2.4’te sunulmuştur.

Tablo 2.4 Kohezyonlu zeminlerin Vs hızlarına göre sınıflara ayrılması (Özaydın,K.,1982)

S DALGA HIZI (m/s)	ZEMİN DURUMU
<200	Yumuşak-Orta Katı
200-300	Katı
300-500	Çok Katı
500-750	Sert

Kohezyonsuz zeminler için yapılan değerlendirmede ise Vs hızı, zeminlerin sıklık derecesini tanımlamada temel bir gösterge olarak kullanılmaktadır. Vs değerinin 300 m/s’nin altında olduğu alanlar gevşek zemin olarak tanımlanırken, hızın artmasıyla zemin yapısının daha sıkı hale geldiği görülmektedir. Özellikle 800–1000 m/s aralığındaki Vs değerleri, kohezyonsuz zeminlerin çok sıkı zemin sınıfına dahil olduğunu göstermektedir. Bu sınıflandırma Tablo 2.5’te verilmiştir.

Tablo 2.5 Kohezyonsuz zeminlerin Vs hızlarına göre sınıflara ayrılması (Özaydın,K.,1982)

S DALGA HIZI (m/s)	ZEMİN DURUMU
<300	Gevşek
300-600	Orta Sıkı
600-800	Sıkı
800-1000	Çok Sıkı

Bu özellikler, Vs'nin zeminin mühendislik davranışını temsil eden en güvenilir parametrelerden biri olmasını sağlamaktadır.

Vs kullanılarak zeminin küçük deformasyon seviyelerindeki sertliğini ifade eden en temel bağıntı olan zeminin maksimum kayma modülü (Gmax) hesaplanır. Formüldeki ρ ifadesi zeminin birim hacim kütlesini ifade etmektedir.

$$G_{max} = \rho \times V_s^2 \quad \text{Formül 2.5}$$

Deprem mühendisliği tasarımlarında; zemin büyütmesi, yerel zemin koşullarının belirlenmesinde Vs, birincil parametre olarak değerlendirilir. Bu parametrenin 30 metre derinliğe kadar olan ortalama değeri, Vs30 olarak adlandırılır. Vs30, zemin yüzeyinden itibaren ilk 30 m derinlikteki kayma dalgası hızlarının ortalama bir göstergesidir ve birimi m/s'dir.

Vs30'un matematiksel olarak hesaplanması şu şekilde ifade edilir:

$$V_{S30} = \frac{30}{\sum_{i=1}^N \left(\frac{h_i}{V_{si}} \right)} \quad \text{Formül 2.6}$$

Burada h_i ve V_{si} , sırasıyla i-inci tabakanın kalınlığı ve kayma dalgası hızını ifade etmektedir. N ise ilk 30 m içindeki tabaka sayısıdır.

Kayma dalgası hızı, aşağıda anlatılan sismik saha deneyleri ve literatürde kabul gören korelasyonlar kullanılarak belirlenebilir.

2.2.1. Sismik yöntemler

Sismik dalgalar; cisim (P ve S) ve yüzey dalgaları (Lve R) olmak üzere ikiye ayrılırlar. P ve S dalgaları zeminlerin içinden geçebildikleri için cisim dalgaları olarak adlandırılırlar. (Şekil 2.7). Love ve Rayleigh dalgaları yalnızca yer yüzeyine yakın gözlemlendikleri için yüzey dalgaları olarak adlandırılırlar (Şekil 2.8). Sismik dalgaların ayrıntılı özellikleri aşağıda detaylı olarak anlatılmıştır.

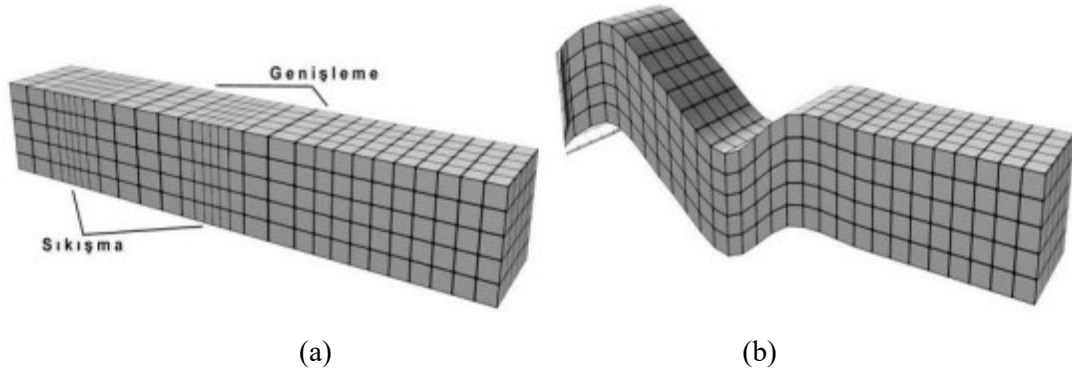
P cisim dalgası; primer dalga, basınç dalgası, boyuna dalga olarak isimlendirilirler. Dalgaların ilerleme yönü ile yerdeğiştirme yönü aynı ise bu dalga tipine basınç dalgası (P-dalgası) adı

verilmektedir. İçinden geçtikleri zeminlerin sıkışma ve genişlemelerine neden olurlar. P dalgaları çok hızlıdır ve yüzeye ilk ulaşan sismik dalgalardır.

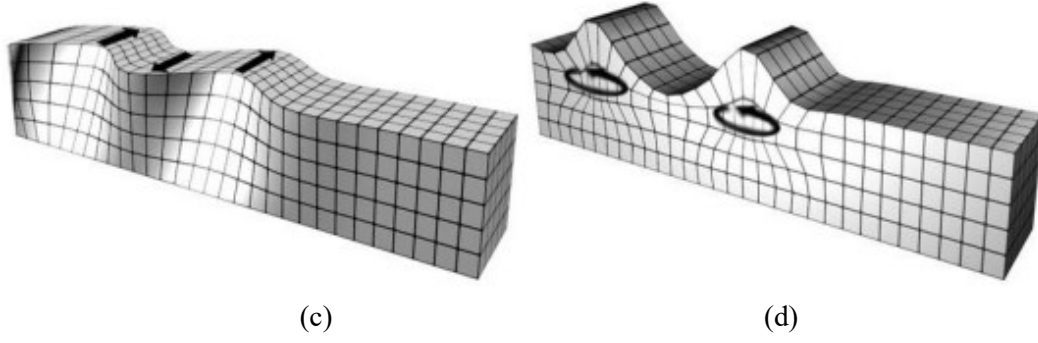
S cisim dalgası; ikincil dalga veya enine dalga olarak adlandırılırlar. Parçacık hareketine dik olarak yayılan dalgalar kayma dalgası (S-dalgası) olarak isimlendirilirler. S dalgaları zeminlerin içinde P dalgalarına göre daha yavaş ilerler. Kayma dalgaları hava ve su gibi akışkan ortamlarda yayılamazken, zemin ve kaya ortamlarında yayılabilmektedir. İçinden geçtikleri zeminlerde kayma deformasyonlarına sebep olurlar. Zeminler kayma direnci bakımından daha zayıf olduklarından yer yüzeyi hareketlerinde en büyük etkiye sahiptirler. Sismik parametreler arasında önemli bir yere sahip olan kayma dalgası (S dalgası) hızı, zeminin kayma dayanımı ve rijitliği hakkında doğrudan bilgi sunmaktadır. Düşük S dalga hızları; genellikle zayıf, gevşek veya düşük taşıma gücüne sahip zeminleri işaret etmektedir.

Love yüzey dalgaları, S dalgalarına benzemekle beraber yer yüzeyine yakın ilerleyen enine kayma dalgalarıdır. Düşük hızlı tabakaların yüksek hızlı tabakalar üzerinde bulunması halinde yatay düzlem üzerinde dalga yayılma yönüne dik olarak oluşurlar.

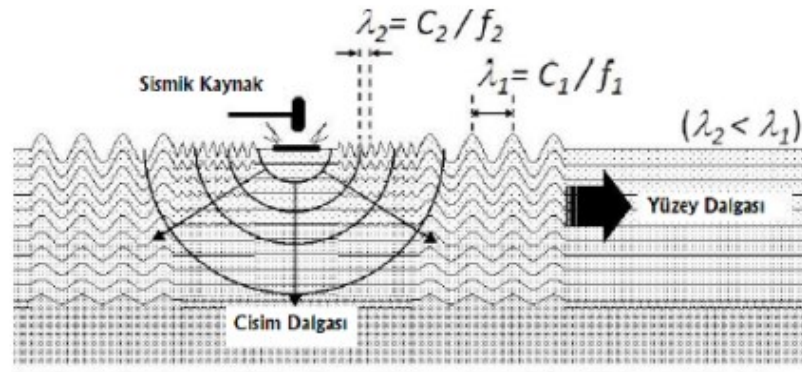
Rayleigh yüzey dalgaları, yüzey dışına yayılan düşey ve yatay yer değişmelerine sebep olan yüzey dalgalarıdır.



Şekil 2.7 Sismik dalgalar yayılırken oluşan parçacık hareketleri a) P-dalgası b) S-dalgası (Tonyalı,2011)



Şekil 2.8 Sismik dalgalar yayılırken oluşan parçacık hareketleri c) Love dalgaları d) Rayleigh dalgaları (Tonyalı,2011)



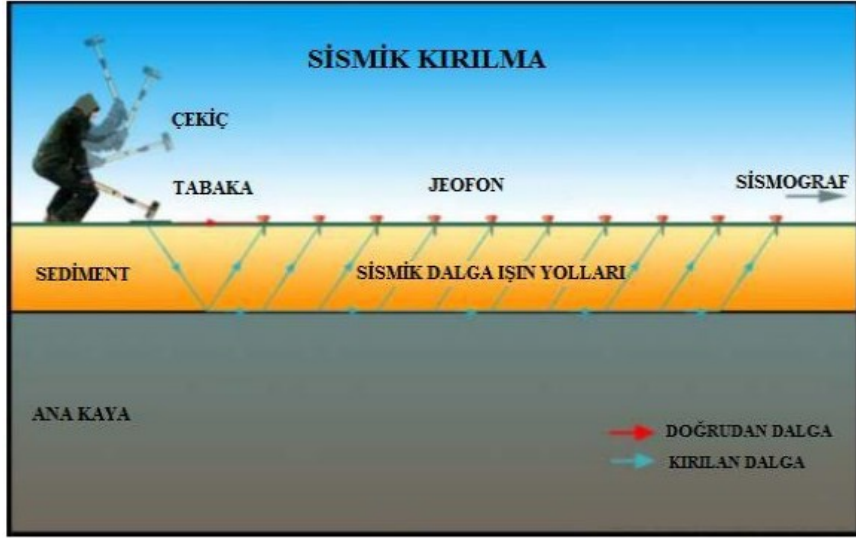
Şekil 2.9 Tabakalı zeminlerde yüzey dalgalarının yayılması (Tüzel,2009)

Sismik yöntemler, kaynak ve alıcıların geometrik konumlarına göre Yüzey Sismik ve Kuyu İçi yöntemler olmak üzere iki ana gruba ayrılırlar.

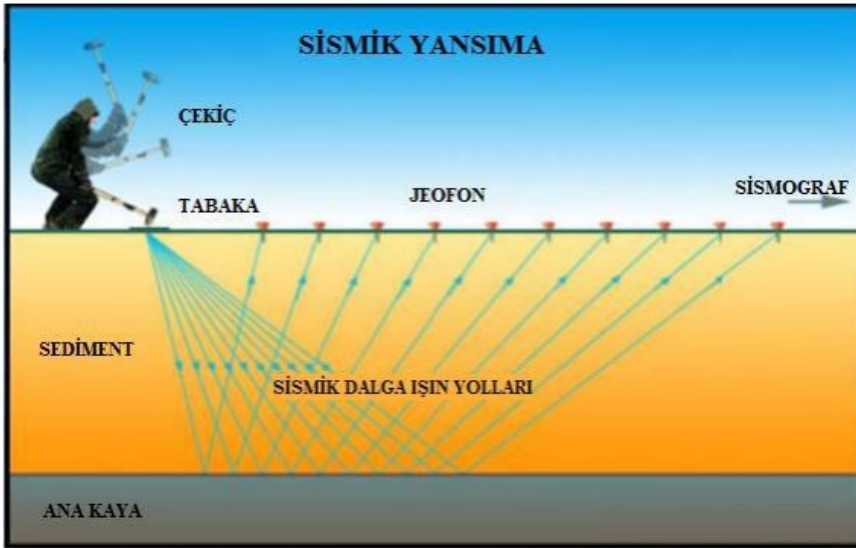
2.2.1.1. Yüzey sismik yöntemler

Yeraltındaki jeolojik birimlerin sismik hız özelliklerinin belirlenmesinde sismik yöntemlerden yararlanılmaktadır. Bu uygulamalardan en yaygın kullanılanlar sismik kırılma ve sismik yansıma yöntemleridir (Şekil 2.10, Şekil 2.11). Sismik yöntemlerin esası, zemin içerisinde yayılan elastik dalgaların tabaka sınırlarında kırılma ve yansıma davranışı göstermesi ve ortamın fiziksel özelliklerini taşıyarak yeryüzüne ulaşmasıdır. Arazi çalışmalarında, yapay olarak üretilen sismik dalgalar zemin içerisinde ilerlerken tabaka sınırlarında yansımaya ve

kırılmaya uğrar; bu dalgalar yeryüzüne yerleştirilen jeofonlar aracılığıyla algılanarak kayıt altına alınır. Kayıt edilen boyuna (P) dalgaları ile enine (S) dalgalarının jeofonlara ulaşma zamanları kullanılarak yol–zaman grafikleri oluşturulur. Bu grafikler yardımıyla tabakalı ortamların sismik hızları ve kalınlıkları belirlenebilmekte, aynı zamanda tabakaların elastik ve dinamik parametreleri hesaplanabilmektedir.

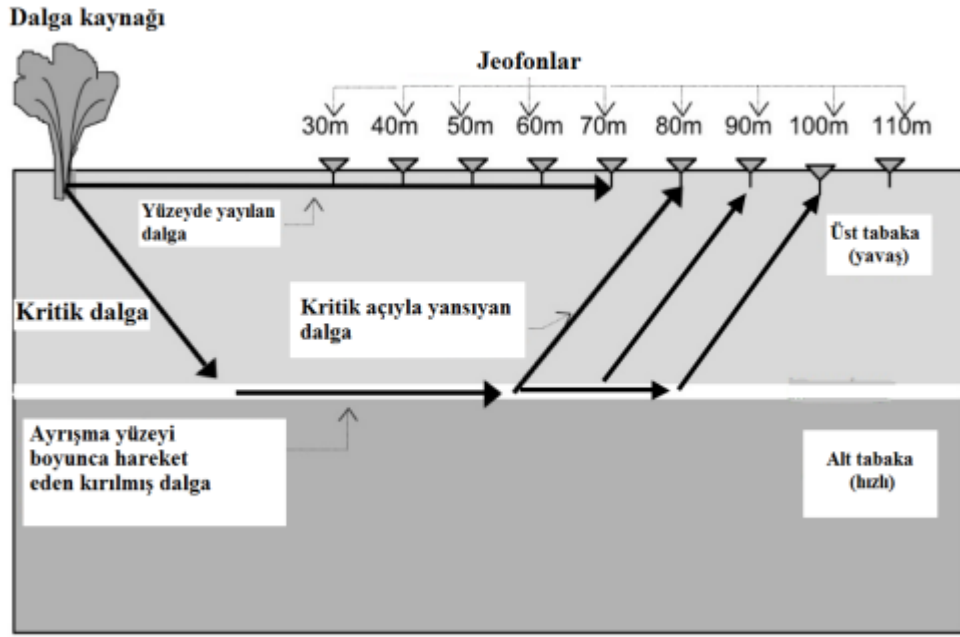


Şekil 2.10 Sismik kırılma yöntemi (Erdem,İ.,2017)



Şekil 2.11 Sismik yansıma yöntemi (Erdem,İ.,2017)

Yüzey sismik yöntemlerde, enerji kaynağı ve alıcılar doğrudan zemin yüzeyine yerleştirilir ve bu düzenekle elde edilen tabaka hızları kullanılarak zeminlerin fiziksel ve mekanik özellikleri değerlendirilir. Bu kapsamda kullanılan başlıca analiz yaklaşımları; sismik kırılma, sismik yansıma, yüzey dalgalarının spektral analizi (SASW) ve devamlı yüzey dalgası (harmonik dalga, CSW) yöntemleridir. Bu yöntemlerde ölçülen sismik dalgaların yer altındaki yayılım karakterleri şekilde şematik olarak sunulmaktadır (Şekil 2.12).



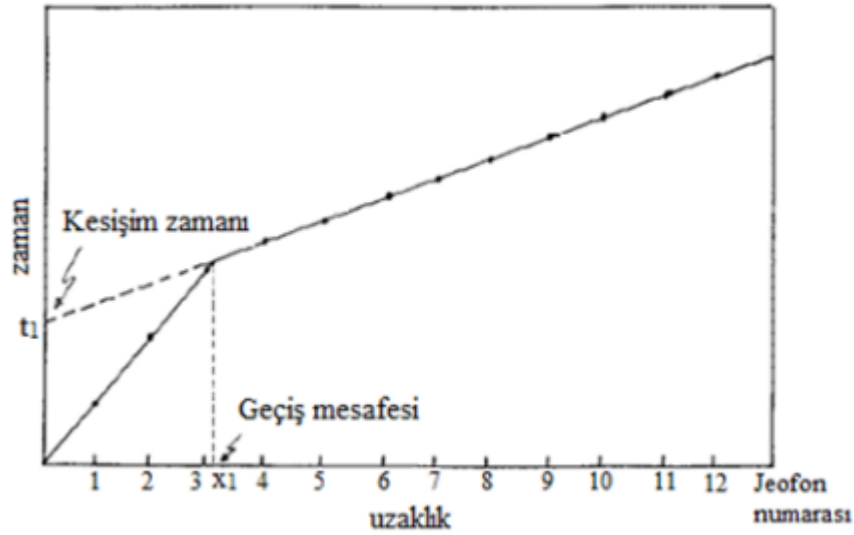
Şekil 2.12 Sismik yöntemlerde sismik dalgaların yer altında yayılım şekilleri (Tonyalı,2011)

Yüzey kırılma ve yüzey yansıma yöntemleri; fizibilite etütleri, yeraltı su seviyesinin belirlenmesi ve ana kayanın konumu ile mühendislik özelliklerinin ortaya konulması amacıyla yaygın olarak kullanılmaktadır. Bu yöntemlerden elde edilen P-dalgası hızları, özellikle kaya kütlelerinin kalitesi hakkında önemli bir gösterge sunar ve P-dalgası hızları ile zemin türü arasındaki ilişkiler tablo 2.6'da verilmektedir.

Tablo 2.6 P-dalgası hızı ile zemin türleri arasındaki ilişki (ASTM D 5777).

Materyal Tipi	P-dalga hızı (m/s)
Çakıl veya kuru kum	460-915
Doygun Kum	1120-1830
Doygun Kil	915-2750
Su	1430-1665
Deniz suyu	1460-1525
Kumtaşı	1830-3960
Tortulu şist	2750-4270
Kireçtaşı	1830-3960
Kalker	2134-6100
Granite	4575-5800
Metamorfik kayaç	3050-7000

Düşük hızlı bir tabakanın altında daha yüksek hızlı bir tabakanın bulunması durumunda, sismik dalgaların bir kısmı yüzeyde ilerlerken bir kısmı alt tabakaya ulaşarak tabaka sınırında kırılır ve yeniden yüzeye yönelir. Kaynak–alıcı mesafesi arttıkça, yüksek hızlı tabakada yayılan kırılmış dalgalar alıcılara daha erken ulaşır. Bu hız farkları, zaman–uzaklık grafikleri kullanılarak değerlendirilir. Grafikteki ilk doğru üst tabakanın, ikinci doğru ise alttaki yüksek hızlı tabakanın sismik hızını temsil eder (Şekil 2.13).



Şekil 2.13 Sismik yöntemde dalga varış süresi-uzaklık grafiği (ASTM D 5777).

Zemin koşulları, yüzey kırılma ve yüzey yansıma yöntemlerinin uygulanabilirliğini sınırlayabilmektedir. Bilhassa yumuşak bir tabakanın üzerinde daha sert bir tabakanın yer alması durumunda, yumuşak tabaka içerisinde belirgin bir kırılma dalgası gelişmez ve bu durum zeminin kalın, tek tabakalı ve tamamen sert olduğu yönünde hatalı bir değerlendirmeye yol açabilir. Benzer biçimde, beton, asfalt veya buz gibi rijit malzemelerle kaplı yüzeylerde yapılan ölçümlerde de güvenilir veri elde etmek güçleşmektedir. Ayrıca zemin tabakalarında düzensizlikler veya süreksizliklerin bulunması, sismik verilerin yanlış yorumlanma riskini artırır. Bu nedenle, elde edilen sonuçların deneyimli uzmanlar tarafından değerlendirilmesi ve mümkün olduğunda sondajlar ya da gözlem çukurları ile desteklenmesi önerilmektedir (McCarthy, 2007).

Yüzey dalgalarının spektral analizi, literatürde SASW (Spectral Analysis of Surface Waves) yöntemi olarak bilinmektedir. Bu yöntem, arazi uygulamaları kapsamında Ballard ve McLean (1975), Nazarian ve Stokoe (1984), Addo ve Robertson (1992) ile Matthews ve arkadaşları (1996) tarafından geliştirilmiştir. SASW uygulamasında kullanılan ekipmanlar ve standart ölçüm adımları Şekil 2.14’de sunulmaktadır. Yüzeysel araştırmalarda genellikle 20 kg’dan daha hafif düşey darbeli çekiçler enerji kaynağı olarak kullanılırken, daha derin tabakaların incelenmesi gerektiğinde birkaç yüz kilogram ağırlığındaki çekiçlerden yararlanılmaktadır. Kullanılan kaynak türü nedeniyle Love dalgaları çoğunlukla kaydedilemez fakat hızı S-dalgası hızından bir miktar daha düşük olan Rayleigh dalgaları güvenilir biçimde ölçülmektedir. SASW

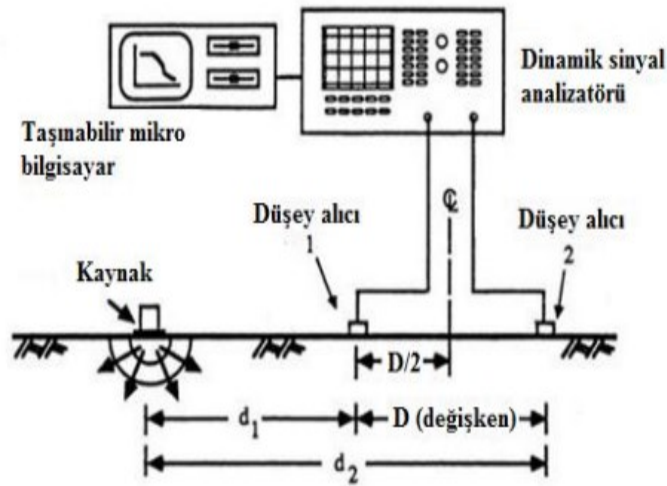
ölçümlerinde alıcılar, faz ölçer, sismograf veya spektrum analizatörüne bağlanarak, kaynaktan itibaren önceki alıcı aralığının iki katı mesafede olacak şekilde yerleştirilir. Çekiç darbeleriyle üretilen dalgaların alıcılar arasındaki faz farkları kaydedilir. Veriler, faz ölçer veya spektrum analizatörü kullanılması durumunda doğrudan elde edilirken, sismografla yapılan ölçümlerde frekans–hız ilişkileri Hızlı Fourier Dönüşümü (FFT) yardımıyla belirlenir. V_R Rayleigh dalga hızı; f frekans, L_R dalga boyu, Φ iki alıcı arasındaki faz farkı ve d alıcı aralığı kullanılarak hesaplanmaktadır (Clayton ve diğ., 1995).

$$L_R = 2\pi \frac{\Phi}{d}$$

Formül 2.7

$$V_R = f \times L_R$$

Formül 2.8



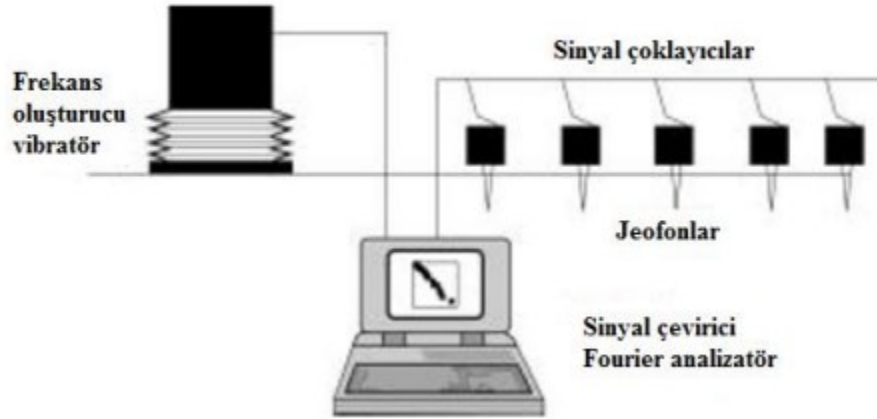
Şekil 2.14 SASW uygulamasının çizim ile gösterimi (Tonyalı,2011)

Harmonik dalga ya da devamlı yüzey dalgası (CSW) yöntemi, uygulama ve yorumlama açısından yüzey dalgalarının spektral analizi (SASW) yöntemine benzerlik göstermektedir. Deney düzeneğinin şematik gösterimi Şekil 2.15'te sunulmuştur. Bu yöntemde enerji kaynağı olarak, zemin yüzeyine yerleştirilen ve belirli bir frekansta sürekli titreşim oluşturan mekanik ağırlıklar veya elektromanyetik vibratörler kullanılmaktadır. Yüzeye yakın araştırmalarda genellikle düşük frekanslı mekanik ağırlıklar tercih edilirken, daha derin tabakaların incelenmesinde yüksek frekanslı elektromanyetik vibratörler kullanılmaktadır. Kaynaklar

tarafından üretilen yüzey dalgaları düşey alıcılar ile kaydedilir ve ardı ardına olan iki alıcı arasındaki mesafe Rayleigh dalgasının dalga boyu olarak kabul edilerek, dalga hızı bu parametreler yardımıyla hesaplanır (İyisan, 1994). İşlem farklı frekanslar kullanılarak tekrarlanır ve kayıt edilen sonuçlar kullanılarak hız-frekans grafiği elde edilir.

$$V_R = f \times L_R$$

Formül 2.9



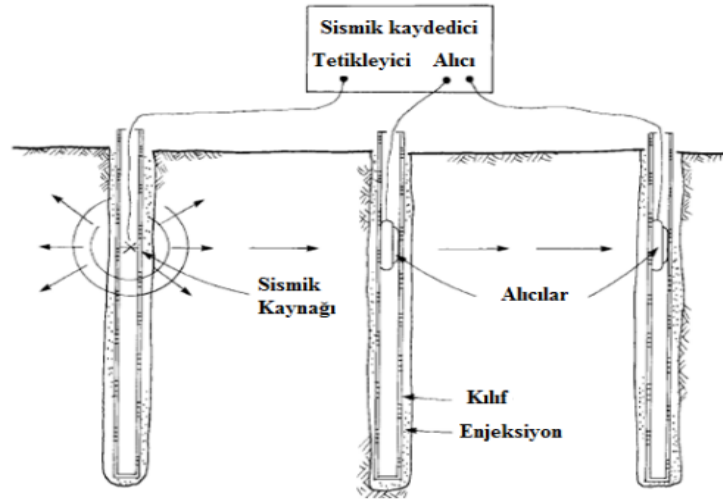
Şekil 2.15 CSW uygulamasının çizim ile gösterimi (Menzies,2001).

2.2.1.2. Kuyu içi sismik yöntemler

Kuyu içi sismik yöntemler, kaynak ve alıcıların kuyular içindeki konumlarına bağlı olarak karşıt kuyu, yukarı kuyu ve aşağı kuyu yöntemleri şeklinde sınıflandırılmaktadır. Ayrıca, aşağı kuyu yönteminin özel bir uygulaması olan Sismik Koni Penetrasyon Deneyi de zeminlerin sismik hızlarının tespit edilmesinde kullanılan önemli yöntemlerden biridir.

Bu yöntemler arasında karşıt kuyu tekniği, ASTM D 4428 standardı kapsamında tanımlanmıştır. Uygulama, Şekil 2.16'da gösterildiği gibi, aralarında genellikle 3 m mesafe bulunan ve çapları 16,5 cm'yi aşmayan üç adet kuyu içerisinde gerçekleştirilir; S-dalgası hızının 450 m/s'nin üzerinde olması durumunda kuyu aralıkları 4,5 m'ye kadar artırılabilir. Deney, muhafaza borulu ya da muhafazasız olarak yapılabilir. Muhafazalı uygulamalarda, kuyu açıldıktan sonra yaklaşık 10 cm çapında PVC veya alüminyum bir muhafaza borusu yerleştirilir ve kuyu, zemin türüne uygun seçilmiş çimento harcı ile doldurulur. Harcın hem muhafaza borusuna hem de kuyu çeperine iyi temas etmesi, ölçümlerin

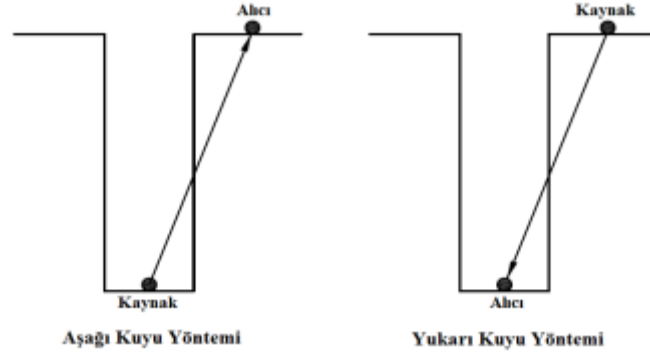
doğruluğu açısından önemlidir. Hazırlanan bu düzenek içerisinde yerleştirilen kaynak ve alıcılar yardımıyla, kaynaktan üretilen sismik dalgaların aynı derinlikte bulunan alıcılara yatay doğrultuda ulaşma süreleri kaydedilerek zeminlerin sismik özellikleri değerlendirilir.



Şekil 2.16 Karşıt kuyu sismik deney düzenekinin şekil ile gösterimi (ASTM D 4428)

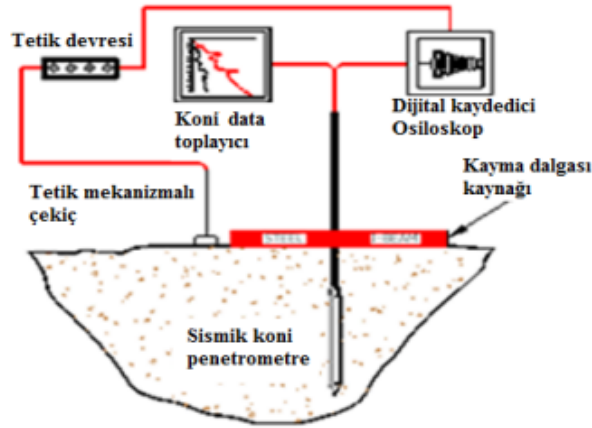
Yukarı kuyu sismik yönteminde, enerji kaynağı kuyu içerisinde konumlandırılırken alıcılar zemin yüzeyine yerleştirilir. P-dalgalarının üretilmesinde genellikle patlayıcı kaynaklar tercih edilirken, S-dalgalarının elde edilmesi amacıyla mekanik kaynaklar kullanılmaktadır. Yüzeydeki alıcılar sayesinde kaynaktan yayılan sismik dalgaların varış zamanları ölçülür ve bu verilerden dalga hızları hesaplanır.

Aşağı kuyu yönteminde ise yukarı kuyu tekniğinin tersine, kaynak yüzeyde yer alırken alıcılar kuyu tabanına indirilir. Bu yöntemde de kaynaktan çıkan dalgaların alıcılara ulaşma süreleri kaydedilerek zeminlerin sismik hızları belirlenir. Her iki yöntemin uygulama prensipleri ve geometrileri, Şekil 2.17’de şematik olarak gösterilmektedir.



Şekil 2.17 Aşağı ve yukarı kuyu sismik yöntemlerinin çizim ile gösterimi (Tonyalı,2011).

Sismik Koni Penetrasyon Deneyi, aşağı kuyu sismik yöntemi ile koni penetrasyon deneyinin birlikte uygulanması prensibiyle yapılan bir tekniktir. Bu yöntemin en önemli üstünlükleri, sondaj kuyusu açılmasına ihtiyaç duyulmaması ve zemin boyunca ayrıntılı sismik hız profillerinin elde edilebilmesidir. Deneyin uygulama prensibi Şekil 2.18’de şematik gösterimi sunulmuştur



Şekil 2.18 Sismik koni penetrasyon deneyinin çizim ile gösterimi (Tonyalı,2011).

2.3. SPT-Vs Korelasyonları

Zeminlerin kayma dalgası hızı (V_s) ile Standart Penetrasyon Deneyi (SPT) sonuçları arasındaki ilişki, geoteknik mühendisliğinde arazi koşullarının değerlendirilmesi ve tasarım parametrelerinin belirlenmesinde önemli bir yere sahiptir. Zemin dinamiği ve deprem mühendisliği açısından, kayma dalgası hızı (V_s), zeminlerin dinamik rijitliklerini belirlemekle beraber mikrobölgeleme analizleri ile sıvılaşma potansiyelinin değerlendirilmesinde ve zemin

büyütmesinin tahmininde doğrudan kullanılan temel bir parametredir. SPT ise yerindeki darbe sayısı üzerinden zeminin sıkılık veya kıvam durumunu dolaylı olarak değerlendiren ampirik bir yöntemdir. SPT-N değeri arttıkça zeminin daha sıkı ve dayanıklı olduğu kabul edilir; bu durum kayma dalgası hızına da doğrudan yansır.

Bu iki parametre arasındaki korelasyonlar, özellikle jeofizik ölçümlerin bulunmadığı veya sınırlı olduğu projelerde, zemin rijitliği hakkında ön bilgi sağlamak amacıyla yaygın biçimde kullanılmaktadır. Literatürde sunulan ampirik denklemler, genellikle geniş veri setlerinden türetilmiş olup zemin türü, sıkılık derecesi, plastisite ve yerel jeolojik koşullar gibi etkenlere bağlı olarak farklılık göstermektedir. Genel eğilim, SPT-N değerinin artmasıyla V_s 'nin de yükseldiği yöndedir. Ancak ilişkilerin belirsizlik içerdiği durumlarda ve tasarım aşamasında mutlaka saha verileri ile karşılaştırılması gerektiği kabul edilmektedir.

SPT- V_s ilişkileri geoteknik ve sismik tasarım süreçlerinde çeşitli amaçlarla kullanılmaktadır. Bu kapsamda; zemin sınıflamasının yapılması, dinamik kayma modülünün tahmin edilmesi, yerel zemin etkilerinin belirlenmesi, zemin hakim periyodunun hesaplanması, sıvılaşma analizlerinde gerekli dinamik parametrelerin elde edilmesi gibi uygulamalar öne çıkmaktadır. Bununla birlikte, söz konusu korelasyonlar çoğunlukla ön tasarım ve yaklaşık parametre aralığı belirleme amacıyla tercih edilir; kesin tasarım değerlerinin belirlenmesinde doğrudan V_s ölçümlerinin (MASW, ReMi, kuyu içi sismik yöntemler vb.) kullanılmasının daha güvenilir olduğu vurgulanmaktadır.

Literatürdeki çalışmaların büyük bir kısmı, V_s ile SPT-N değeri arasındaki ilişkinin formül (2.10)'da ifade edilebildiğini göstermektedir.

$$V_s = a \times N^b$$

Formül 2.10

Bu model formül (2.11) kullanılarak logaritmik dönüşümle doğrusal hale getirilebilir.

$$\log(V_s) = \log(a) + b \times \log(N)$$

Formül 2.11

SPT-N ile V_s arasındaki bu ilişki, özellikle granüler zeminlerde güçlü, ince taneli zeminlerde ise orta seviyede korelasyon gösterir. Zemin heterojenliği ve su muhtevası gibi yerel faktörler

ilişkiyi zayıflatabilse de genel eğilim, yüksek SPT değerlerinin yüksek V_s değerleriyle uyumlu olduğudur.

Peru'nun Juliaca bölgesindeki kumlu zeminlerde yürütülen çalışmada ise düzeltilmiş N_{60} değeri ile V_s arasında aşağıdaki ilişki elde edilmiştir:

$$V_s = 83.505 \times N_{60}^{0.249} \quad \text{Formül 2.12}$$

Modelin açıklayıcılık katsayısının $R^2=0,66$ olduğu rapor edilmiştir. Bu ve benzeri çalışmalar, farklı coğrafi bölgelerde elde edilen korelasyonların önemli ölçüde değişkenlik gösterdiğini ve evrensel tek bir formülün tüm zemin koşulları için uygun olamayacağını göstermektedir.

Ohba ve Toriumi (1970), literatürde SPT darbe sayısı ile kayma dalgası hızı arasındaki ilişkiyi inceleyen ilk çalışmalardan biri olmasından dolayı önem arz etmektedir. Bu çalışmada araştırmacılar Japonya'nın Osaka şehri civarında alüvyon zeminlerde yapılan Rayleigh hızı ölçümlerini kullanarak aşağıdaki bağıntıyı geliştirmişlerdir.

$$V_s = 85.3 N^{0.31} \text{ (m/sn)} \quad \text{Formül 2.13}$$

Ohsaki ve Iwasaki (1973), araştırma, daha önce yapılan çalışmalardan faydalanılarak N - V_s ilişkisini, Japonya'da kuyu içi ölçümlerden alınan veriler ile jeolojik yaş ve zemin türü etkisi dikkate alınarak istatistik analizler yapılarak incelenmiştir. Bu çalışmanın sonucunda N - V_s arasındaki korelasyonların zemin türü ve jeolojik yaştan bağımsız olduğu görüldüğü için elde edilen bağıntılara dahil edilmemişlerdir. SPT darbe sayısındaki artışın kayma dalgası hızındaki belirgin artışa karşılık geldiği görülmüştür. SPT- N değeri ve V_s arasındaki ilişki doğrusal bir karaktere sahip olmadığından ampirik formüllerle ifade edilen aşağıdaki bağıntı elde edilmiştir.

$$V_s = 81.4 N^{0.39} \text{ (m/sn)} \quad \text{Formül 2.14}$$

İmai ve Yoshimura (1975), araştırmacılar V_s nin zemin türü ve jeolojik özellikleri ile ilişkisi olduğunu savunmuşlardır. Dolayısıyla 70 saha ve 100 sondaj kuyusundan alınan zemin parametreleri kullanılarak V_s nin zemin türleri ve zemin parametreleri ile ilişkisi incelenmiştir.

Araştırma sonucunda SPT-N ilişkisinde zemin türü etkisinin belirlenmesinin zor olduğu kanısına vararak zemin cinsinden bağımsız olarak aşağıdaki bağıntıyı geliştirmişlerdir.

$$V_s = 92 N^{0.329} \text{ (m/sn)}$$

Formül 2.15

İmai vd. (1977), tüm zemin grupları (dolgular dahil) için yeniden analiz yaparak toplam 756 data ile önceden yaptıkları çalışmayı biraz daha genişleterek, alüvyon kumlar için 79-345 m/sn ve dilüvyal kumlar için ise 175-649 m/sn kayma dalgası hızlarını tespit ederek aşağıdaki bağıntıyı elde etmişlerdir.

$$V_s = 89.9 N^{0.341} \text{ (m/sn)}$$

Formül 2.16

Ohta ve Goto (1978), kayma dalgası hızının sadece SPT darbe sayısına bağlı olmadığını, zeminlerin geoteknik ve jeolojik özellikleriyle birlikte değerlendirilmesi gerektiğini vurgulamışlardır. Çalışmada zeminlerin V_s , SPT, jeolojik yaş, zemin türü ve derinlik verilerinin bulunduğu 300 set kullanılmıştır. Çalışma alanı genel olarak Halosen devrine ait alüvyon zeminlerden oluşmakla beraber araştırmalarda zeminleri jeolojik yaş kategorisinde Halosen ve Pleistosen olarak iki ayrı gruba ayırmışlardır. Zemin türü kil, kum, çakıl ve bumlardan alt grupları olarak sınıflandırılmıştır. Deneylerde aynı V_s hızına karşılık gelen N sayılarının ortalamaları alınmıştır. Tüm bu çalışmaların sonucunda V_s nin; SPT-N, zemin türü, jeolojik yaş, derinlikle ilişkisini gösteren aşağıdaki bağıntı elde edilmiştir.

$$V_s = 68.8 N^{0.171} H^{0.199} f_A f_G \text{ (m/sn)}$$

Formül 2.17

Formülde H, derinliği ifade ederek metre birimindedir. f_A , jeolojik yaş faktörü, f_G ise zemin tipi faktörünü ifade eder. f_A ve f_G faktörleri tablo 2.7’de gösterilmiştir.

Tablo 2.7 f_A ve f_G Faktörleri (Ohta ve Goto,1978)

Zemin tipi faktörü f_G	İnce kum	Orta kum	Kaba kum	Kum-çakıl	Çakıl
	1,09	1,07	1,14	1,15	1,45
Yaş faktörü f_A	Halosen			Pleistosen	
	1,0			1,3	

Araştırmalar neticesinde, zeminlerdeki diğer değişkenler sabit olup dane çapları arttığı zaman ve benzer şartlardaki daha yaşlı zeminlerde V_S değerlerinin arttığı görülmüştür. Tüm zemin sınıfları için kayma dalgası hızını SPT-N darbe sayısı cinsinden tanımlayan aşağıdaki bağıntıyı elde etmişlerdir.

$$V_S = 85.3 N^{0.348} \text{ (m/sn)} \quad \text{Formül 2.18}$$

Seed ve Idriss (1981); Japonya ve ABD' de daha önce yapılan çalışmalarda bulunan aynı zemin tabakasındaki SPT ve V_S ölçümleri değerlendirilerek zeminlerin dinamik özelliklerinin pratik yöntemlerle tahmin edilmesi hedeflenmiş ve aşağıdaki bağıntı geliştirilmiştir.

$$V_S = 61 N_1^{0.5} \text{ (m/sn)} \quad \text{Formül 2.19}$$

Formülde kullanılan N_1 değeri, SPT-N değerinin derinliğe göre düzeltilmiş darbe sayısını ifade etmektedir.

Sykora ve Stokoe (1983); SPT ile kayma dalgası hızı arasındaki ilişkinin güvenilir biçimde kurulabilmesi için SPT sonuçlarının derinlik düzeltmesi yapılarak kullanılması ve efektif düşey gerilme etkisinin dikkate alınması gerektiğini ileri sürmüşlerdir. Bu yaklaşım ile SPT- V_S korelasyonlarının yalnızca istatistiksel değil, aynı zamanda ölçüm temelli karşılaştırmalı analizler gerçekleştirilmiştir.

$$V_S = 219.5 \sigma_v^{0.36} \text{ (m/sn)} \quad \sigma_v; \text{ efektif düşey gerilmeyi ifade etmektedir.} \quad \text{Formül 2.20}$$

$$V_S = 109.7 N_1^{0.28} \text{ (m/sn)} \quad N_1; \text{ derinlik düzeltmesi yapılmış SPT değerini ifade eder.} \quad \text{Formül 2.21}$$

Dikmen (2009); çalışma, Eskişehir ilinde yapılmış olan veri setleri kullanılarak SPT-N ve V_s değerlerinin ilişkilendirilip yeni ampirik formüller geliştirmek amacıyla yapılmıştır. Araştırmada tüm zemin türleri, kum, silt ve kil zeminler için SPT-N ve V_s ilişkisi incelenmiştir. Çalışmada, zemin cinsinin sonuçları önem arz edecek kadar etkilemediği görülmüştür. Düzeltilmemiş SPT-N değerleri kullanılarak V_s tahmini için geliştirilen korelasyonların daha önce yapılmış olan çalışmaları desteklediği sonucuna varılmıştır. SPT-N ve V_s arasında geliştirilen bu korelasyonlar geoteknik mühendisliğinde pratiklik sağlamakla beraber ölçülen V_s değerleri ile karşılaştırmaların yapılması önem arz etmektedir. Korelasyonlar aşağıda görüldüğü şekilde geliştirilmiştir.

$$V_s=58N^{0.39}(\text{tüm zemin türleri}), V_s=73N^{0.33}(\text{kum zeminler}), V_s=44N^{0.48}(\text{kil zeminler}). \text{ Formül 2.22}$$

Anbazgahan vd. (2012); zeminlerin dinamik özelliklerinin tespit edilmesinde mühim bir parametre olan kayma modülü (özellikle küçük şekil değiştirme seviyesindeki maksimum kayma modülü, G_{max}) ile Standart Penetrasyon Testi (SPT-N) değerleri arasındaki ilişkiyi kapsamlı bir şekilde incelemişlerdir. Çalışmanın temel amacı, literatürde önerilmiş farklı ampirik bağıntıları değerlendirmek ve bölgeden bağımsız olarak uygulanabilecek yeni bir korelasyon geliştirmektir. Bu kapsamda, öncelikle dünya genelinde farklı zemin türleri, jeolojik koşullar ve test yöntemleri kullanılarak elde edilmiş SPT-kayma modülü ilişkileri derlenmiş ve karşılaştırılmıştır. İncelenen bağıntıların büyük çoğunluğunun, SPT-N değerini temel alan üslü veya doğrusal formda denklemler olduğu, ancak katsayıların ve üstel ifadelerin bölgesel özelliklere bağlı olarak önemli değişiklikler gösterdiği ileri sürülmüştür. Bu durumun, zemin türü, efektif gerilme seviyesi, yeraltı suyu koşulları ve SPT uygulama detaylarından kaynaklandığı vurgulanmıştır.

Yazarlar, literatürden derlenen veriler ışığında SPT-N, kayma dalgası hızı (V_s) ve kayma modülü (G_{max}) arasındaki teorik ilişkiyi esas almıştır. Bilindiği üzere, küçük şekil değiştirme seviyesinde kayma modülü,

$$G_{max}=\rho V_s^2$$

Formül 2.23

bağıntısı ile tanımlanmaktadır. Bu nedenle, çalışmada SPT-N ile doğrudan Gmax arasında korelasyon kurmak yerine, önce SPT-Vs ilişkileri değerlendirilmiş, ardından bu ilişkiler kullanılarak SPT-Gmax bağıntıları türetilmiştir.

İstatistiksel analizler ve regresyon çalışmaları sonucunda, bölgesel veriye aşırı duyarlı olmayan, daha genel geçer bir korelasyon önerilmiştir. Geliştirilen bu yeni bağıntının, farklı ülkelerden ve farklı zemin koşullarından elde edilen verilerle karşılaştırıldığında mevcut ampirik formüllere kıyasla daha tutarlı sonuçlar verdiği belirtilmiştir. Ayrıca, önerilen korelasyonun ön tasarım ve deprem mühendisliği uygulamalarında, doğrudan ölçümün mümkün olmadığı durumlarda pratik bir tahmin yöntemi olarak kullanılabileceği belirtilmiştir. Sonuçta, Anbazhagan vd. (2012) çalışması, SPT-N ile kayma modülü arasındaki ilişkinin yalnızca yerel bağıntılarla sınırlı kalmaması gerektiğini ortaya koymuş; literatür verilerinin sentezine dayalı, genel kullanıma uygun bir SPT-Gmax yaklaşımı sunarak zemin dinamiği çalışmalarına önemli bir katkı sağlamıştır.

$$V_s = 68.96N^{0.51} \text{ (tüm zemin türleri)}, \quad V_s = 60.17N^{0.56} \text{ (kum zeminler)}, \quad V_s = 106.63N^{0.39} \text{ (kil zeminler)}.$$

Formül 2.24

Thokchom ve arkadaşları (2017), Hindistan'ın batısında yer alan Dholera bölgesinde farklı zemin türleri için Standart Penetrasyon Testi (SPT-N) ile kayma dalgası hızı (Vs) arasındaki ampirik ilişkiyi incelemiştir. Çalışmada, saha sondajlarından elde edilen SPT-N değerleri ile yüzey dalgaları yöntemleri kullanılarak ölçülen Vs değerleri birlikte değerlendirilmiştir. Araştırma kapsamında zeminler kil, silt, kum ve karışık zeminler olarak sınıflandırılarak, her zemin türü için ayrı ampirik SPT-Vs bağıntıları geliştirilmiştir. Elde edilen sonuçlar, SPT-N ile Vs arasında üslü bir ilişkinin bulunduğunu ve korelasyon katsayılarının zemin cinsine bağlı olarak önemli bir şekilde değiştiğini göstermiştir. Yazarlar, tek bir genel bağıntı yerine zemin türüne özgü korelasyonların kullanılmasının Vs tahminlerinde daha güvenilir sonuçlar verdiğini vurgulamıştır. Çalışma, özellikle mikrobölgeleme, deprem mühendisliği uygulamaları ve ön tasarım aşamalarında, SPT verilerinden Vs tahmini yapılmasına yönelik pratik ve bölgesel açıdan anlamlı katkılar sunmaktadır.

$$V_s = 3.39N + 160.5 \text{ (tüm zemin türleri)}$$

Formül 2.25

Sil ve Haloi (2017), kayma dalgası hızının (V_s) doğrudan ölçülemediği durumlarda kullanılmak üzere Standart Penetrasyon Testi (SPT-N) verilerine dayalı ampirik V_s tahmin bağıntıları geliştirmeyi amaçlamıştır. Çalışmanın temel hedefi, bölgesel kısıtlara bağımlı olmayan ve farklı zemin koşullarında uygulanabilir genel bir korelasyon ortaya koymaktır. Bu kapsamda, farklı araştırmacılar tarafından rapor edilmiş çok sayıda SPT-N ve V_s veri seti derlenmiş ve istatistiksel olarak analiz edilmiştir. Mevcut literatürde önerilen korelasyonlar karşılaştırılmış; katsayıların ve üstel ifadelerin bölgesel zemin özelliklerine bağlı olarak değiştiği gösterilmiştir. Ardından, bu dağınıklığı azaltmak amacıyla birleştirilmiş veri seti üzerinden regresyon analizi yapılmıştır. Elde edilen sonuçlar; SPT-N ile V_s arasında üslü bir ilişkinin genel olarak geçerli olduğunu ve önerilen yeni bağıntı sonuçlarının farklı bölgelerde kabul edilebilir doğrulukta olduğunu ortaya koymuştur. Yazarlar, geliştirilen korelasyonun özellikle ön tasarım, mikrobölgeleme ve deprem mühendisliği çalışmalarında, ayrıntılı jeofizik ölçümlerin bulunmadığı durumlarda pratik bir tahmin aracı olarak kullanılabileceğini vurgulamıştır.

$$V_s = 75.478N^{0.3799} \text{ (tüm zemin türleri), } V_s = 79.217N^{0.369} \text{ (kum zeminler), } V_s = 99.708N^{0.335} \text{ (kil zeminler).}$$

Formül 2.26

Mehta ve Thaker (2020), Hindistan'ın Gujarat eyaletinde yer alan Vadodara bölgesi için Standart Penetrasyon Testi (SPT-N) ile kayma dalgası hızı (V_s) arasındaki ampirik ilişkileri geliştirmeyi amaçlamıştır. Çalışmada, saha sondajlarından alınan SPT-N verileri ile yüzey dalgalarına dayalı jeofizik yöntemlerle ölçülen V_s değerleri birlikte değerlendirilmiştir. Araştırma kapsamında farklı zemin profillerine ait veriler kullanılarak SPT-N- V_s ilişkisi regresyon analizleriyle incelenmiş ve bölgeye özgü ampirik bağıntılar önerilmiştir. Elde edilen sonuçlar, SPT-N ile V_s arasında üslü bir ilişkinin geçerli olduğunu ve korelasyon katsayılarının yerel jeolojik ve zemin koşullarına bağlı olarak değiştiğini göstermiştir. Yazarlar, literatürde önerilen genel bağıntıların Vadodara bölgesi için her zaman yeterli doğruluk sağlamadığını vurgulamış; bu nedenle yerel veri ile geliştirilmiş korelasyonların, V_s tahminlerinde daha güvenilir sonuçlar verdiğini ifade etmiştir.

$$V_s = 81.71N^{0.346} \text{ (tüm zemin türleri), } V_s = 79.81N^{0.355} \text{ (kum zeminler), } V_s = 83.65N^{0.336} \text{ (kil zeminler).}$$

Formül 2.27

Singh ve arkadaşları (2021), Hindistan'ın Varanasi kenti için Standart Penetrasyon Testi (SPT-N) ile kayma dalgası hızı (V_s) arasındaki regresyon ilişkisini belirlemeyi amaçlamıştır. Çalışmada, saha sondajlarından alınan SPT-N değerleri ile sismik yöntemler kullanılarak ölçülen V_s değerleri birlikte değerlendirilmiştir. Araştırma kapsamında, farklı derinlik ve zemin koşullarına ait veriler kullanılarak SPT-N- V_s ilişkisi istatistiksel regresyon analizleriyle incelenmiş ve ampirik bağıntılar geliştirilmiştir. Elde edilen sonuçlar, SPT-N ile V_s arasında üslü bir ilişkinin bulunduğunu ve korelasyon parametrelerinin yerel zemin özelliklerinden etkilendiğini göstermiştir. Yazarlar, Varanasi bölgesi için geliştirilen bağıntıların, literatürde önerilen genel korelasyonlara kıyasla yerel ölçekte daha güvenilir V_s tahminleri sağladığını vurgulamıştır. Çalışma, özellikle mikrobölgeleme, deprem mühendisliği ve ön tasarım çalışmalarında, SPT verilerinden V_s tahmini yapılmasına yönelik bölgesel düzeyde önemli bir katkı sunmaktadır.

$$V_s=70.05N^{0.49}(\text{tüm zemin türleri}), V_s=74.80N^{0.47}(\text{kil zeminler}) \quad \text{Formül 2.28}$$

Shahgholipour, Afsari ve Ghaseminejad (2023), İran'ın Nowshahr ve Chalus bölgelerindeki zeminler için Standart Penetrasyon Testi (SPT) ile kayma dalgası hızı (V_s) arasındaki ampirik ilişkiyi incelemiştir. Çalışmada, bu iki mekanik parametrenin birlikte değerlendirilmesi amacıyla 31 farklı saha lokasyonundan elde edilen SPT-N değerleri ile V_s ölçümleri kullanılmıştır. Araştırmada elde edilen veriler kullanılarak regresyon analizleri yapılmış ve tüm zeminler için genel bir korelasyonun yanı sıra kohezyonlu ve kohezyonsuz zeminler için ayrı ampirik bağıntılar geliştirilmiştir. Sonuçlar, SPT-N ile V_s arasında genellikle üslü bir ilişkinin bulunduğunu göstermiştir ve geliştirilmiş korelasyonların yüksek regresyon katsayıları ($R^2 \approx 0,92$) ile iyi bir tahmin sunduğu gözlemlenmiştir. Elde edilen bağıntıların literatürdeki benzer çalışmalara uygun aralıkta olduğu belirtilmiş ve bu tür yerel korelasyonların özellikle mikrobölgeleme ve deprem mühendisliği analizlerinde, doğrudan V_s ölçümleri yapılmadığı durumlarda pratik tahmin aracı olarak kullanılabileceği vurgulanmıştır.

$$V_s=38.726N^{0.539}(\text{tüm zemin türleri}), V_s=42.515N^{0.496}(\text{kum zeminler}), V_s=31.241N^{0.626}(\text{kil zeminler}). \quad \text{Formül 2.29}$$

Yukarıda anlatılan ve literatürde yer alan çalışmalar Tablo 2.8 de sunulmuştur.

Tablo 2.8 Literatürdeki SPT- V_s arasındaki korelasyonları gösteren ampirik formülasyonlar (Yusuf Güzel,2024).

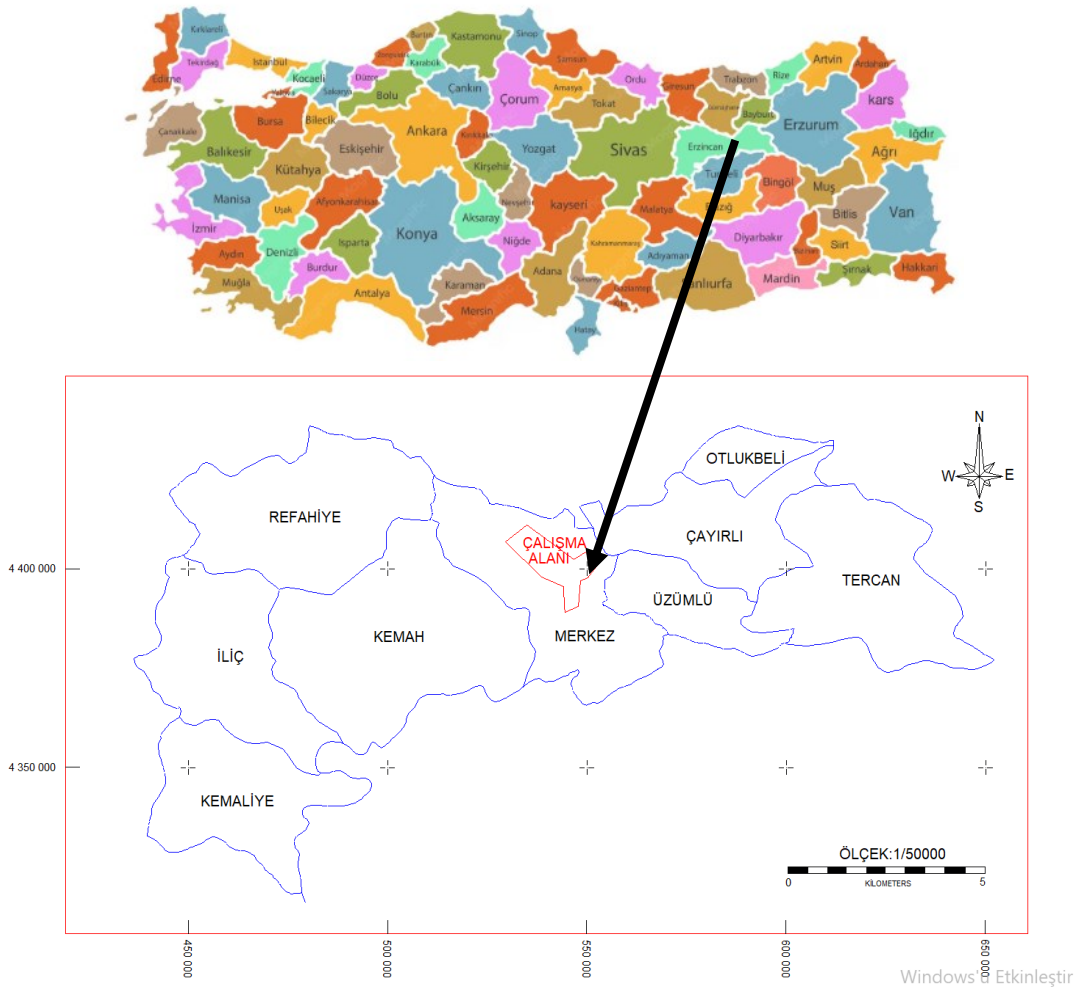
Araştırmacılar	Tüm zeminler	Kum zeminler	Kil zeminler
Ohba and Toriumi (1970)	$V_s=85.3N^{0.31}$	-	-
Athanasopoulos (1970)	$V_s=107.6N^{0.36}$	-	$V_s=76.55N^{0.445}$
Ohsaki and Iwasaki (1973)	$V_s=81.4N^{0.39}$	$V_s=59.4N^{0.47}$	-
Imai (1977)	$V_s=89.9 N^{0.341}$	$V_s=80.6N^{0.331}$	$V_s=102N^{0.29}$
Ohta and Goto (1978)	$V_s = 85.3 N^{0.348}$	$V_s=88N^{0.34}$	-
Seed ve Idriss (1981)	$V_s=61N^{0.5}$	-	-
Sykora ve Stokoe (1983)	$V_s = 109.7 N^{0.28}$	-	-
Jinan (1987)	$V_s=116.1(N+0.3185)^{0.202}$	-	-
Lee (1990)	-	$V_s=57.4N^{0.49}$	$V_s=144.43N^{0.31}$
Kalteziotis, Sabatakakis, and Vassiliou (1992)	$V_s=76.2N^{0.24}$	$V_s=49.1N^{0.5}$	$V_s=76.6N^{0.45}$
Pitilakis, Anastasiadis, and Raptakis (1992)	-	$V_s=162N^{0.178}$	-
Raptakis, Anastasiadis, Pitilakis, and Lontzetidis(1995)	-	$V_s=100N^{0.24}$	$V_s=184.2N^{0.17}$
Kayabali (1996)	-	$V_s= 175 + 3.5N$	-
Kyriazis Pitilakis, Raptakis, Lontzetidis, Tika-Vassilikou, and Jongmans (1999)	-	$V_s=145N^{0.17}$	$V_s=162N^{0.178}$
Kiku (2001)	$V_s=68.3N^{0.292}$	-	-
Hasancebi and Ulusay (2007)	$V_s=90N^{0.30}$	$V_s=90.82N^{0.319}$	$V_s=97.89N^{0.269}$
Lee and Tsai (2008)	$V_s=137.153N^{0.229}$	$V_s=98.07N^{0.30}$	$V_s=163.15N^{0.19}$
Dikmen (2009)	$V_s=58N^{0.39}$	$V_s=73N^{0.33}$	$V_s=44N^{0.48}$

Araştırmacılar	Tüm zeminler	Kum zeminler	Kil zeminler
Maheswari, Boominathan, and Dodagoudar (2010)	$V_s=95.641N^{0.3013}$	$V_s=100.53N^{0.263}$	$V_s=89.31N^{0.358}$
Tsiambaos and Sabatakakis (2011)	$V_s=105.7N^{0.327}$	$V_s=79.7N^{0.365}$	$V_s=88.8N^{0.37}$
Anbazhagan vd. (2012)	$V_s=68.96N^{0.51}$	$V_s=60.17N^{0.56}$	$V_s=106.63N^{0.39}$
Sarda Thokchom vd. (2017)	$V_s=3.39N+160.5$	-	-
Sil and Haloi (2017)	$V_s=75.478N^{0.3799}$	$V_s=79.217N^{0.369}$	$V_s=99.708N^{0.335}$
Mehta and Thaker (2020)	$V_s=81.71N^{0.346}$	$V_s=79.81N^{0.355}$	$V_s=83.65N^{0.336}$
Singh, Duggal, and Singh (2021)	$V_s=70.05N^{0.49}$	-	$V_s=74.80N^{0.47}$
Shahgholipour, Afsari, and Ghaseminejad (2023)	$V_s=38.726N^{0.539}$	$V_s=42.515N^{0.496}$	$V_s=31.241N^{0.626}$

3. YÖNTEM

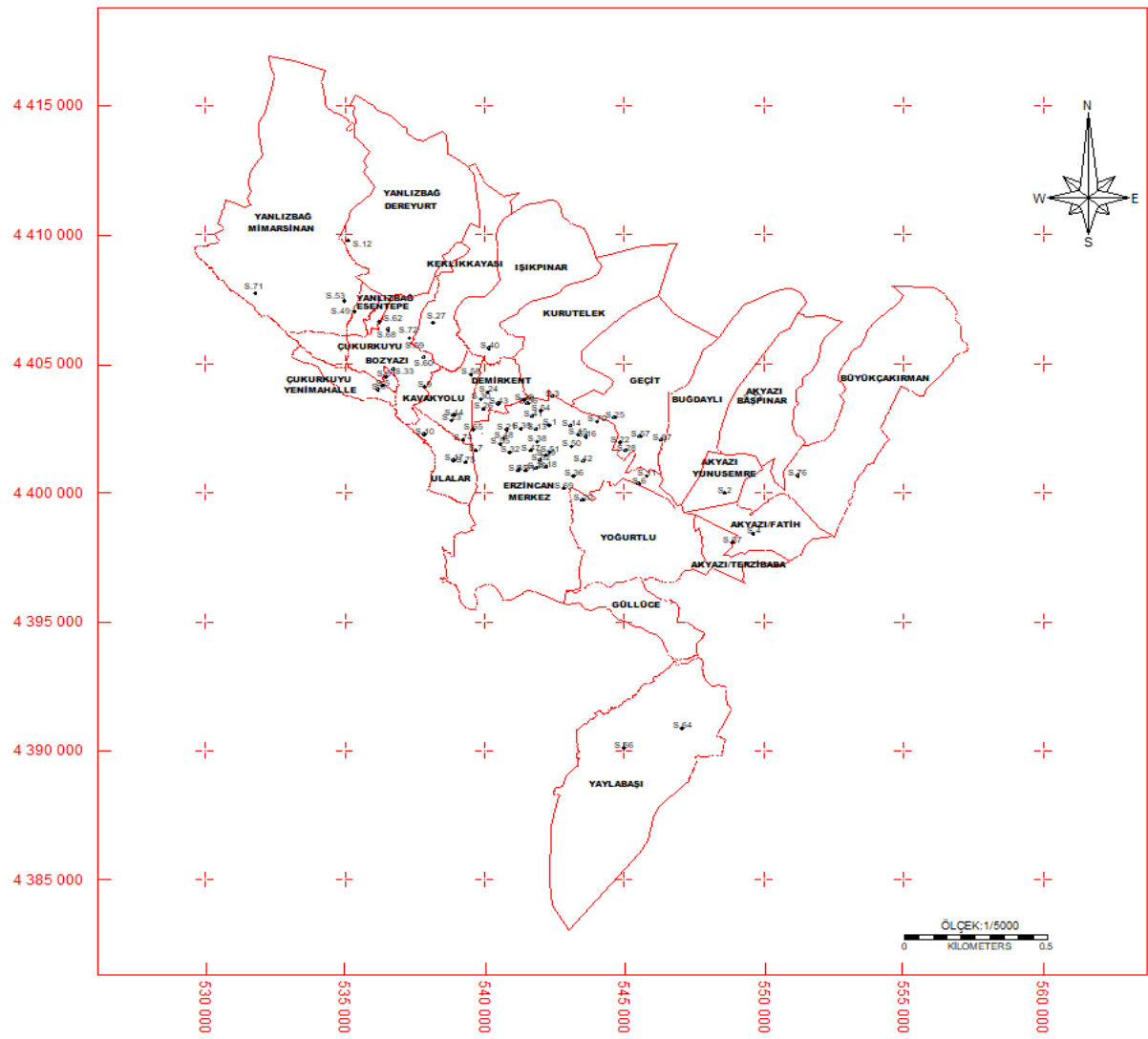
3.1. Çalışma Alanının Tanımı

Erzincan Doğu Anadolu Bölgesi Yukarı Fırat havzası $39^{\circ} 02' - 40^{\circ} 05'$ kuzey enlemleri ile $38^{\circ} 16' - 40^{\circ} 45'$ doğu boylamları arasında konumlanmaktadır. İlin yüzölçümü ortalama 11.903 km^2 , denizden yüksekliği 1.185 metredir. İl kuzeyinde Keşiş dağları, güneyinde Munzur Dağları arasında yer alan Karasu vadisi boyunca uzanan ova üzerinde kurulmuştur. İlin güneyinden Fırat nehri kollarından Karasu geçmektedir. Erzincan birinci dereceden deprem kuşağı üzerinde bulunmaktadır (Şekil 3.1).



Şekil 3.1 Erzincan ilinin Türkiye haritası üzerindeki konumunu gösteren harita

Bu çalışma Erzincan ilinin merkez ilçesine bağlı olan 75 mahallesinde yapılmıştır. Şekil 3.2. de çalışma alanındaki 76 adet sondaj noktasını gösteren harita sunulmuştur.



Şekil 3.2 Çalışma alanının sondaj yerlerini gösteren harita

3.2. Çalışma Alanının Jeolojisi

Erzincan ve çevresi jeolojik yapısı itibarıyla Türkiye'nin en karmaşık bölgelerinden biridir. Bu karmaşıklığın temeli, Mesozoik'in başından Tersiyer ortasına kadar süren farklı okyanusların açılıp kapanmasıyla oluşan tektonik süreçlere dayanır. Genç yanal atımlı fayların etkisiyle ova vasfını kazanan Erzincan farklı suture kuşaklarının birleştiği bir jeolojik düğüm üzerinde yer alır.

Erzincan Belediyesi için hazırlanan 'Erzincan (merkez) İmar Planına Esas Mikrobölgeleme Etüt Raporunda (2022) inceleme alanı; yolüstü formasyonu (ply), alüvyon yelpazesi (Qh/y),

çullu üyesi (plç), alüvyon (Qal), Anadolu volkano-sedimanter serisi(PzMzan), Hınıs metaofiyoliti (Pzhp) birimlerden oluşmaktadır (Şekil 3.3,Şekil 3.4).

Hınıs Metaofiyoliti/Ofiyoliti (Pzh), peridotit, piroksenit, olivinli ve tabakalı gabro gibi birbiri ile ilişkili kayaçlardan oluşan düzenli bir ofiyolit dizisinden oluşmaktadır. Bu birimler, Erzincan havzasının kuzey ve güney yamaçları boyunca geniş alanlarda yüzeylemektedir. Çalışma alanında tektonik süreçlerin etkisiyle deformasyona uğramış bu kayaçlar, metamorfik seviyelerle birlikte dik eğimli yamaçlar oluşturmakta; bu yamaçlarda hem serbest bloklar hem de kayaç ayrışması sonucu oluşan gevşek bloklu yamaç molozları birikmektedir.

Anadolu Volkanosedimanter Serisi (PzMzan), derin denizel çökeller, çeşitli lav türleri (spilit, bazalt, andezit, dasit), piroklastikler, ofiyolit parçaları ve mermerleşmiş karbonat kayaçlarından oluşan karmaşık bir birimdir. Çalışma alanının kuzeybatısında, Erzincan–Gümüşhane karayolu boyunca yüzeylemektedir. Sondaj ve arazi incelemelerinde gri-yeşil renkli dasit ve andezit kayaçları belirlenmiştir. Bu oluşum, Neotetis Okyanusu’nun kuzey koluna ait tektonosedimanter nitelikteki ultrabazik kayaların bir ürünüdür. Kuzey Anadolu Fay Zonu’nun etkisiyle deformasyona uğrayan bu birimde kırıklı ve parçalanmış bir yapı hakimdir. Ayrıca volkanosedimanter istif içinde kil ara bantlarının varlığı mevcuttur.

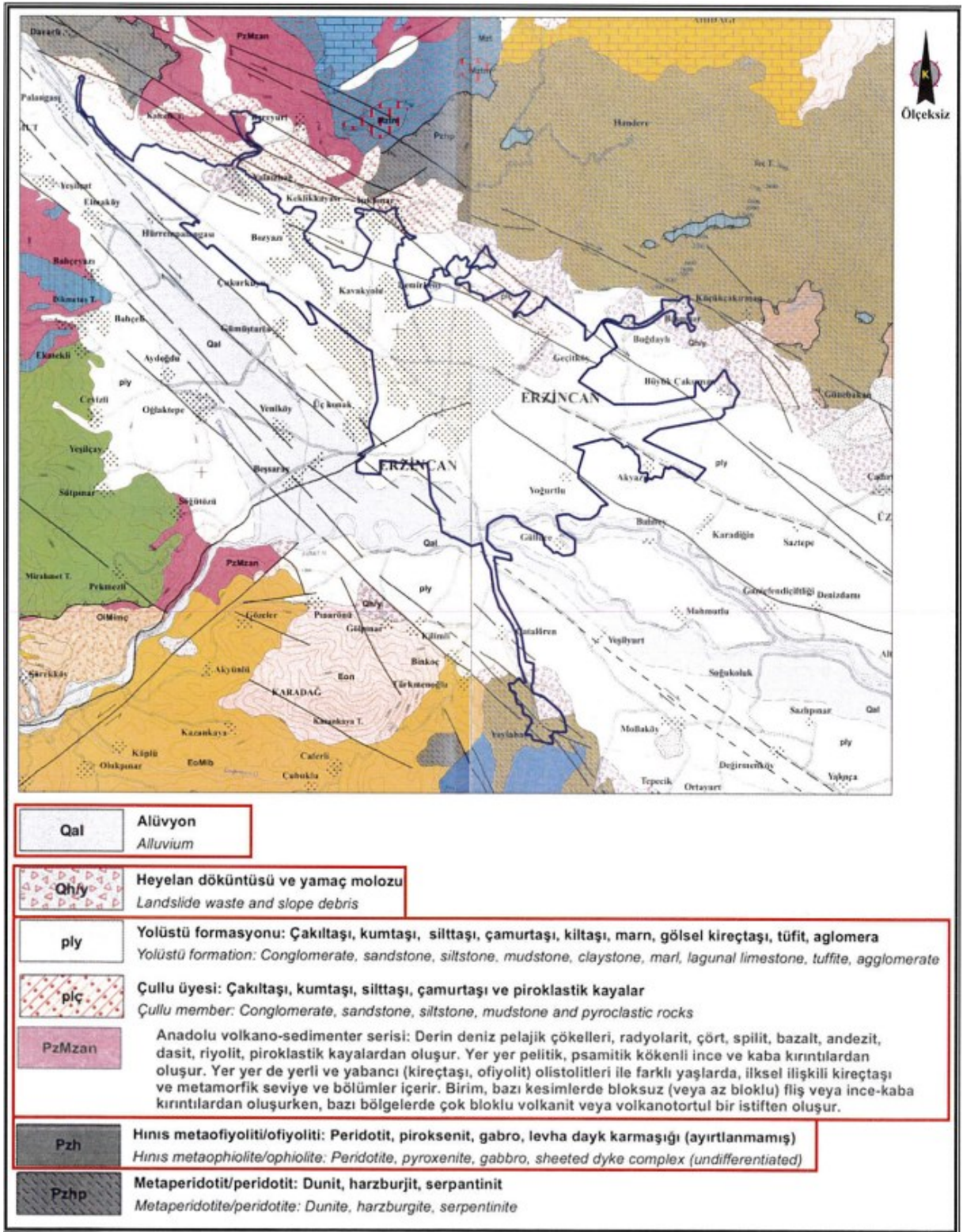
Hamurpet Volkanitleri’nin Çullu Üyesi, aglomera, volkanik breş, tuf, tüfit, ponza ve perlit gibi piroklastik kayaçlarla; bazalt, bazaltik andezit, andezit, dasit ve çeşitli traki türlerinden oluşan lav kayaçlarını içeren geniş bir volkanik istiften meydana gelir. İnceleme alanında bu üyenin baskın litolojisini piroklastik kökenli volkanik kayaçlar oluşturur. Çullu Üyesi, genellikle karasal tortullar ile volkanik piroklastik birimlerin ardalanmasından oluşur ve Kuzey Anadolu Fay Zonu’nun etkisiyle çalışma alanının kuzey kesiminde konumlanmıştır. Birim içinde belirgin tabakalanma görülmemekte, bunun yerine tektonik deformasyon ve yoğun ayrışma sonucu gelişmiş zemin özellikli seviyeler yaygın olarak izlenmektedir.

Yolüstü formasyonu, çakıltaşı, kumtaşı, silt ve kilaşı gibi gölsel kökenli birimlerden oluşan, ince-orta kalınlıklı ve yatay tabakalı bir çökel istifidir. İçerdiği çakıllı ve kumlu seviyeler arasında yer yer kömür ve aglomera katkıları da görülmektedir.

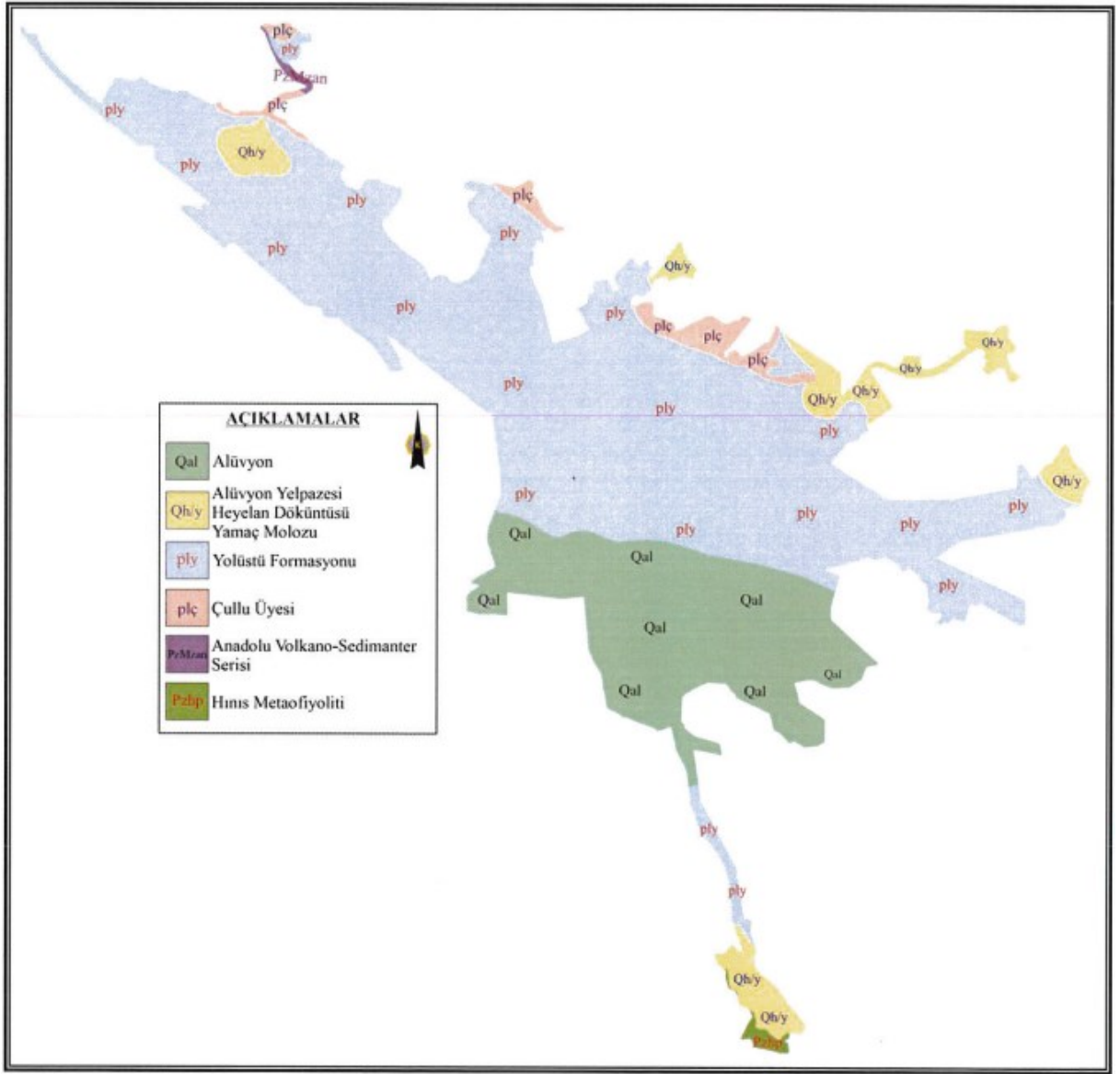
Alüvyon yelpazesi, yamaç molozu, heyelan döküntüsü birimleri, tektonik olaylar ve akarsular tarafından taşınarak havzaya depolanan en genç çökellerdir. Gevşek ve heterojen yapıda olan birim kaba daneli blok, çakıl, orta- kaba kum, silt- kil malzemelerden oluşmaktadır.

Alüvyon birimler, kaya kırıntıları ve parçaları, gevşek blok, çakıl, kum, mil, kil ve çamur içererek akarsu ve dere yataklarında oluşur. Erzincandaki alüvyon birimler Fırat nehri ve nehre bağlanan küçük dere yataklarında oluşumunu sağlamıştır. Fırat nehri boyunca yer altı suyu zengin olup, zemin gevşek yapıdadır.

Tüm bu birimler incelendiğinde çullu üyesi ve yolüstü formasyonunun gevşek birimleri, alüvyon ve alüvyon yelpazesi birimleri, anadolu volkanosedimanter formasyonları zemin niteliğinde, Hınıs ofiyolitleri, çullu formasyonuna ait proklastikler ve Anadolu volkanosedimanter serisine ait kayalar kaya türleri olarak nitelendirilmişlerdir.



Şekil 3.3 İnceleme alanını ve çevresini gösteren jeoloji haritası. (Erzincan (merkez) İmar Planına Esas Mikrobölgeleme Etüt Raporu (2022)).



Şekil 3.4 Çalışma alanının jeoloji haritası. (Erzincan (merkez) İmar Planına Esas Mikrobölgeleme Etüt Raporu (2022)).

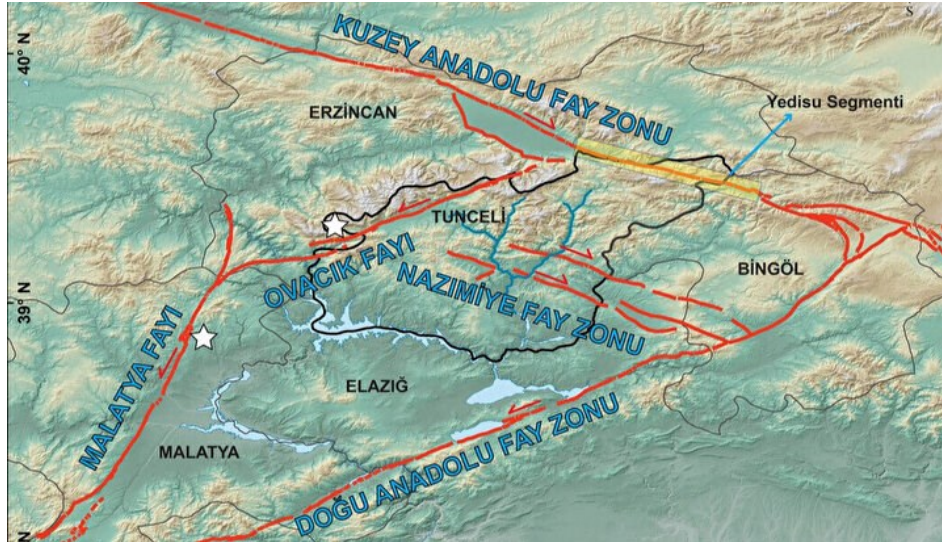
3.3. Çalışma Alanının Depremselliği

Erzincan ilinin en yüksek PGA 475 değeri, 18.03.2018 tarihli 30364 sayılı resmi gazetede yayınlanıp 01.01.2019 tarihinde yürürlğe giren Türkiye Deprem Tehlike Haritasında ‘0,605 g’ olarak belirtilmiştir (Şekil 3.5). Haritada görüldüğü üzere il Kuzey Anadolu Fayı üzerinde yer almaktadır. Buna ilave olarak Sancak Uzunpınar Fay Zonu, Ovacık Fayı ve Bingöl Karakoçan Faylarına yakın konumdadır.

Kuzey Anadolu Fayı (KAF), batıda Saros Körfezi'nden başlayarak doğuda Karlıova'ya kadar devam ederek Doğu Anadolu sıkışma alanını Ege-Kıbrıs yayına bağlar. KAF sistemi yüksek sismik aktivite gösterir, sağ yönlü doğrultu atımlı ve 1500 km uzunluğundadır. 1939 yılında 7,9 M_s büyüklüğündeki Erzincan depremi ile başlayan ve devamında büyüklüğü 6,7 den büyük 9 depremin meydana gelmesiyle KAF hattının Erzincan ve İzmit Körfezi arasındaki kısmı tamamı ile kırılmış olup, oluşan yüzey kırığı 1000 km den fazladır.

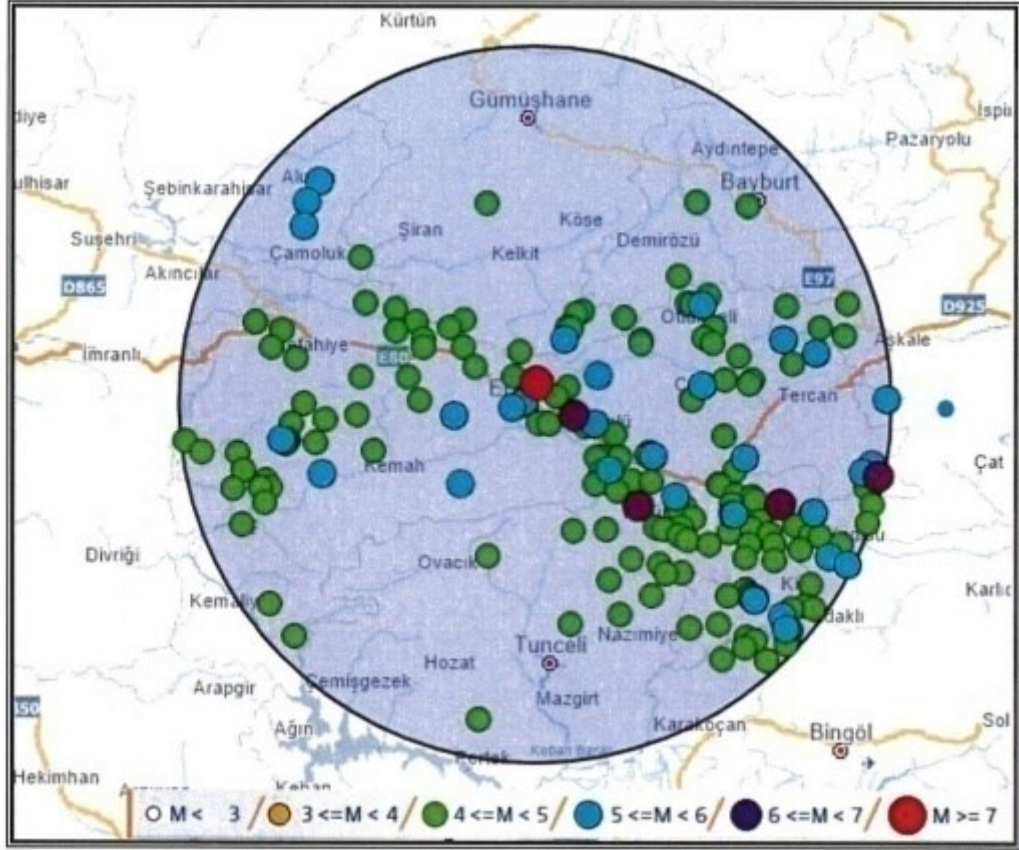
Bingöl Karakoçan Fayı, MTA tarafından tanımlanmış, kuzeybatı–güneydoğu doğrultusunda uzanan ve Doğu Anadolu Fayı'na dik açıyla bağlanan bir fay zonudur. İçinde farklı boyutlarda çok sayıda diri fay segmenti barındırdığı için oldukça hareketli bir yapıdadır. Bundan dolayı bölgede benzer büyüklüklerde depremler sık aralıklarla meydana gelmektedir.

Ovacık Fay Zonu, Erzincan yakınlarında Kuzey Anadolu Fayı'ndan ayrılan fay, sol yanal atımlı olup yaklaşık 240 km uzunluğundadır. Fayın ilk 120 km'lik kısmı batı–güneybatı doğrultusunda ilerleyen Ovacık Segmenti'nden oluşur ve daha sonra Malatya Segmenti ile güneybatıya yönelir. Ovacık Fayı, Erzincan havzasında Kuzey Anadolu Fayı'nı kesmekte olup bölgenin geçmişte Arap, Anadolu ve Avrasya plakalarının bulunduğu üçlü bir kavşak noktası olduğunu göstermektedir. Doğu Anadolu ve Kuzey Anadolu faylarının doğu segmentlerinin oluşmasıyla birlikte Ovacık Fayı'nın etkinliği azalmış, üçlü birleşme noktası ise Erzincan havzasından Karlıova'ya doğru kaymıştır.



Şekil 3.5 Erzincan ilinin diri faylara olan mesafesi (internet)

Erzincan Belediyesi için hazırlanan ‘Erzincan (merkez) İmar Planına Esas Mikrobölgeleme Etüt Raporunda (2022), Erzincan ve çevresinde 1900-2022 yılları arasında yaşanan depremler ($M_s \geq 4,0$) Şekil 3.6 da gösterilmiştir. Şekilde ilin geçmiş yıllar boyunca yıkıcı depremlere maruz kaldığı görülmektedir. Depremlerin meydana gelme periyodu, gelecekte olacağı öngörülen depremlerin kaç yılda bir olacağı ve yaklaşık büyüklüğü hakkında fikir verir. Deprem mühendisliği için önem arz eden bu parametreler ilin deprem açısından risk teşkil ettiğini göstermektedir.



Şekil 3.6 Erzincan ve çevresinde 1900-2022 yılları arasında meydana gelen depremler ($M_s \geq 4,0$) (Erzincan (merkez) İmar Planına Esas Mikrobölgeleme Etüt Raporu, 2022)

3.4. Çalışma Alanına Ait Zemin Parametreleri

Tablo 3.1'de, çalışma alanında açılan toplam 76 araştırma noktasına ait koordinat, tabaka kalınlığı, ortalama SPT-N değerleri, ortalama kayma dalgası hızı (V_s), ortalama presiyometre deney sonuçları, yeraltı su seviyeleri ve zemin sınıfları birlikte sunulmuştur. Araştırma noktalarında SPT inceleme derinlikleri genel olarak 10,5 m ve 15,0 m arasında değişmekte olup; SPT deneyleri 3,0 m, 4,5 m, 6,0 m, 7,5 m, 9,0 m, 10,5 m, 12,0 m, 13,5 m ve 15,0 m

derinliklerde gerçekleştirilmiştir. Bu doğrultuda elde edilen SPT-N değerleri, ortalama olarak 17-50 darbe sayıları arasında değişmektedir. Tabloda ayrıca presiyometre deneylerine ait deformasyon modülü değerleri yer almakta olup, ortalama PMT değerleri 9 ile 173 arasında değişmektedir.

Kayma dalgası hızı (V_s) değerleri her araştırma noktası için ayrı ayrı verilmiş olup ölçülen V_s değerleri yaklaşık 154 m/s ile 423 m/s arasında değişmektedir. Yeraltı su seviyesi yalnızca 4 noktada yüzeye yakın olup, yüzeyden 1,5 ila 6 m derinliklerde mevcuttur. Araştırma alanındaki zeminler ise Birleştirilmiş Zemin Sınıflama Sistemi'ne (USCS) göre; GM, GC, GP, CL, SM, SC, SM-SC, GM-GC ve GM-SM olarak sınıflandırılmış olup tabloda gösterilmiştir.

Tablo 3.1 Çalışma alanına ait zemin parametreleri

Nokta No	X	Y	Tabaka Kalınlığı (m)	SPT Ortalama	PMT Ortalama	$V_s(h)$	Y.A.S.S.	Zemin Sınıfı
1	39,7564	39,4940	3,0-15,0	39	173	311,0	—	SM
2	39,7325	39,5669	3,0-10,5	19	38	235,0	—	CL
3	39,7666	39,4954	3,0-15,0	43	35	287,7	—	CL
4	39,7181	39,5788	3,0-15,0	34	22	205,0	6 m	CL
5	39,7705	39,4243	3,0-10,5	31	12	300,0	—	SM
6	39,7359	39,5311	3,0-15,0	29	42	313,0	—	GM
7	39,7478	39,4632	3,0-15,0	33	-	229,0	—	CL
8	39,7692	39,4224	3,0-10,5	26	36	335,0	—	GM
9	39,7701	39,4420	3,0-10,5	43	42	271,0	—	CL
10	39,7535	39,4416	3,0-10,5	40	22	208,0	—	CL
11	39,7385	39,5345	3,0-10,5	30	22	203,0	—	GM
12	39,8212	39,4103	3,0-10,5	38	18	236,0	—	GM
13	39,7550	39,4884	3,0-15,0	30	30	306,0	—	GM
14	39,7562	39,5028	3,0-15,0	41	18	290,0	—	GM
15	39,7531	39,5058	3,0-15,0	46	22	330,0	—	CL

Nokta No	X	Y	Tabaka Kalınlığı (m)	SPT Ortalama	PMT Ortalama	Vs(h)	Y.A.S.S.	Zemin Sınıfı
16	39,7524	39,5092	3,0-10,5	25	26	241,0	—	GM
17	39,7444	39,4538	3,0-10,5	23	19	238,0	—	CL
18	39,7418	39,4926	3,0-15,0	36	38	310,0	—	GM
19	39,7459	39,4924	3,0-15,0	47	39	324,0	—	GM
20	39,7302	39,5076	3,0-10,5	17	10	241,0	—	SM
21	39,7550	39,4761	3,0-15,0	44	20	323,0	—	CL
22	39,7502	39,5233	3,0-10,5	31	18	209,0	—	GM
23	39,7582	39,4531	3,0-15,0	31	19	323,0	—	GM
24	39,7680	39,4683	3,0-15,0	30	18	212,0	—	SM
25	39,7590	39,5212	3,0-10,5	20	37	326,0	—	GM
26	39,7622	39,4665	3,0-15,0	42	37	326,0	—	GM
27	39,7924	39,4456	3,0-10,5	40	170	423,0	—	GM-SM
28	39,7475	39,5257	3,0-10,5	31	169	251,0	—	GM
29	39,7414	39,4884	3,0-15,0	34	22	243,0	—	GM
30	39,7656	39,4654	3,0-15,0	43	18	359,0	—	GM
31	39,7406	39,4838	3,0-15,0	21	39	258,0	—	GM
32	39,7470	39,4774	3,0-15,0	38	16	260,0	—	GM-GC
33	39,7763	39,4288	3,0-10,5	26	15	241,0	—	SM
34	39,7705	39,4243	3,0-10,5	33	12	300,0	—	SM
35	39,7552	39,4821	3,0-15,0	46	30	341,0	—	CL
36	39,7387	39,5039	3,0-10,5	24	38	291,0	—	SM
37	39,7151	39,5700	3,0-10,5	25	9	196,0	1,5	GM
38	39,7506	39,4887	3,0-15,0	40	22	321,0	—	GC
39	39,7652	39,4835	3,0-15,0	47	21	306,0	—	CL
40	39,7834	39,4689	3,0-10,5	32	15	245,0	—	GM-GC

Nokta No	X	Y	Tabaka Kalınlığı (m)	SPT Ortalama	PMT Ortalama	Vs(h)	Y.A.S.S.	Zemin Sınıfı
41	39,7596	39,4869	1,5-15,0	47	-	303,3	—	CL
42	39,7439	39,5080	3,0-15,0	29	39	249,0	—	GM
43	39,7640	39,4726	3,0-15,0	44	15	341,0	—	SM
44	39,7601	39,4540	3,0-10,5	20	15	154,0	—	GM
45	39,7407	39,4808	3,0-15,0	35	11	317,0	—	GM
46	39,7359	39,5311	3,0-15,0	29	42	387,0	—	GM
47	39,7476	39,4860	3,0-15,0	43	18	237,0	—	GM
48	39,7520	39,4749	3,0-15,0	41	-	296,3	—	GM
49	39,7964	39,4128	3,0-10,5	42	10	341,0	—	GM
50	39,7490	39,5032	3,0-15,0	37	76	310,0	—	GM
51	39,7470	39,4940	6,0-15,0	42	18	334,0	—	GC
52	39,7443	39,4899	3,0-15,0	34	45	315,0	—	GP
53	39,8001	39,4085	3,0-10,5	44	24	318,0	—	GM
54	39,7615	39,4904	3,0-10,5	28	50	292,0	—	CL
55	39,7499	39,4734	3,0-15,0	30	24	323,0	—	GM
56	39,7641	39,4849	3,0-15,0	48	11	408,0	—	GM
57	39,7524	39,5318	3,0-10,5	26	18	209,0	—	GM
58	39,7742	39,4613	3,0-15,0	35	25	301,0	—	GM
59	39,7836	39,4376	3,0-10,5	27	14	209,0	—	GM-GC
60	39,7803	39,4416	3,0-10,5	30	41	230,0	—	CL
61	39,7735	39,4258	3,0-10,5	19	15	306,0	—	GM
62	39,7929	39,4233	3,0-10,5	31	18	251,0	—	SM-SC
63	39,7552	39,4623	3,0-15,0	37	21	350,0	—	SM-SC
64	39,6504	39,5485	3,0-10,5	39	12	241,0	3	SM
65	39,7550	39,4621	3,0-15,0	25	11	272,0	—	SM-SC

Nokta No	X	Y	Tabaka Kalınlığı (m)	SPT Ortalama	PMT Ortalama	Vs(h)	Y.A.S.S.	Zemin Sınıfı
66	39,6436	39,5241	3,0-10,5	35	14	317,0	—	GM-GC
67	39,7511	39,5406	3,0-10,5	32	10	241,0	—	SM
68	39,7901	39,4267	3,0-10,5	26	17	241,0	—	GM-GC
69	39,7344	39,4998	3,0-15,0	24	-	213,0	2	CL
70	39,7576	39,5138	3,0-15,0	34	14	291,0	—	SM-SC
71	39,8030	39,3714	3,0-10,5	41	85	369,0	—	SM-GM
72	39,7871	39,4357	3,0-10,5	19	15	306,0	—	SM
73	39,7648	39,5786	3,0-10,5	27	16	241,0	—	GM
74	39,7515	39,4578	3,0-15,0	41	25	304,0	—	CL
75	39,7437	39,4588	3,0-10,5	33	18	241,0	—	SM
76	39,7383	39,5975	3,0-10,5	17	16	241,0	—	SM

Tablo 3.2. de grafik çizimlerinde kullanılması amacıyla zemin etüt raporlarından alınan SPT-N ve Vs değerleri gösterilmiştir.

Tablo 3.2 Grafik çizimlerinde kullanılan SPT-N ve V_s değerler

Noktalar	Ölçüm Yöntemleri	Derinliklere göre SPT-N ve V _s değerleri									
		1,5	3,0	4,5	6,0	7,5	9	10,5	12	13,5	15
1	SPT	-	-	R	R	-	-	-	-	-	R
	V _s	-	-	-	246	-	-	-	-	-	-
2	SPT	-	27	18	19	17	20	16	-	-	-
	V _s	-	183	218	242	242	254	254	-	-	-
3	SPT	-	18	29	-	-	-	-	-	-	-
	V _s	-	193	265	-	-	-	-	-	-	-
4	SPT	-	-	26	-	-	-	-	-	-	-
	V _s	-	-	267	-	-	-	-	-	-	-
5	SPT	-	-	-	29	27	-	-	-	-	-
	V _s	-	-	-	300	300	-	-	-	-	-
6	SPT	-	-	-	33	46	-	-	-	-	-
	V _s	-	-	-	250	345	-	-	-	-	-
7	SPT	-	35	31	-	-	-	-	-	-	-
	V _s	-	-	207	-	-	-	-	-	-	-
8	SPT	-	15	18	17	-	R	-	-	-	-
	V _s	-	208	236	310	-	398	-	-	-	-
9	SPT	-	15	30	-	-	-	-	-	-	-
	V _s	-	175	210	-	-	-	-	-	-	-
10	SPT	-	-	18	-	-	-	-	-	-	-
	V _s	-	-	232	-	-	-	-	-	-	-
11	SPT	-	-	38	18	37	22	28	-	-	-
	V _s	-	-	-	190	-	220	220	-	-	-
12	SPT	-	-	-	24	31	47	-	-	-	-
	V _s	-	-	-	230	287	291	-	-	-	-

Noktalar	Ölçüm Yöntemleri	Derinliklere göre SPT-N ve Vs değerleri									
		1,5	3,0	4,5	6,0	7,5	9	10,5	12	13,5	15
13	SPT	-	-	-	-	-	17	34	-	-	-
	Vs	-	-	-	-	-	277	277	-	-	-
14	SPT	-	26	-	-	-	-	-	25	-	-
	Vs	-	194	-	-	-	-	-	286	-	-
15	SPT	-	-	-	19	19	R	R	R	R	R
	Vs	-	-	-	356	356	378	378	392	392	398
16	SPT	-	33	21	15	15	19	36	-	-	-
	Vs	-	-	213	226	233	236	230	-	-	-
17	SPT	-	13	28	17	20	29	34	-	-	-
	Vs	-	184	202	222	267	299	315	-	-	-
18	SPT	-	23	24	29	30	-	-	R	R	R
	Vs	-	204	238	329	340	-	-	402	404	404
19	SPT	-	-	R	-	R	R	-	R	-	R
	Vs	-	-	356	-	369	365	-	367	-	369
20	SPT	-	17	-	-	19	15	17	-	-	-
	Vs	-	185	-	-	269	275	275	-	-	-
21	SPT	-	24	25	-	-	-	-	-	-	-
	Vs	-	219	243	-	-	-	-	-	-	-
22	SPT	-	9	-	-	-	-	-	-	-	-
	Vs	-	178	-	-	-	-	-	-	-	-
23	SPT	-	-	25	-	24	-	-	-	R	-
	Vs	-	-	268	-	346	-	-	-	367	-
24	SPT	-	-	13	-	R	-	-	17	21	12
	Vs	-	-	182	-	378	-	-	219	272	272
25	SPT	-	-	-	-	-	R	R	-	-	-

Noktalar	Ölçüm Yöntemleri	Derinliklere göre SPT-N ve Vs değerleri									
		1,5	3,0	4,5	6,0	7,5	9	10,5	12	13,5	15
	Vs	-	-	-	-	-	389	389	-	-	-
26	SPT	-	-	24	17	-	R	-	-	R	-
	Vs	-	-	263	263	-	414	-	-	414	-
27	SPT	-	39	36	R	R	-	-	-	-	-
	Vs	-	289	319	371	440	-	-	-	-	-
28	SPT	-	40	15	16	33	50	25	-	-	-
	Vs	-	251	251	251	251		251	-	-	-
29	SPT	-	35	31	33	29	24	23	15	50	50
	Vs	-	-	208	236	236	236	236	236	-	-
30	SPT	-	20	44	50	50	45	R	R	R	R
	Vs	-	310	331	382	382	413	413	431	431	442
31	SPT	-	-	16	-	-	-	-	-	-	-
	Vs	-	-	242	-	-	-	-	-	-	-
32	SPT	-	-	-	30	40	31	49	46	-	-
	Vs	-	-	-	267	267	267	-	-	-	-
33	SPT	-	10	26	20	27	38	33	-	-	-
	Vs	-	178	213	226	233	236	236	-	-	-
34	SPT	-	22	33	26	26	40	47	-	-	-
	Vs	-	194	247	287	323	370	370	-	-	-
35	SPT	-	38	35	31	-	-	-	-	-	-
	Vs	-	234	254	271	-	-	-	-	-	-
36	SPT	-	-	33	-	33	16	17	-	-	-
	Vs	-	-	309	-	320	329	329	-	-	-
37	SPT	-	11	13	33	40	-	-	-	-	-
	Vs	-	272	-	366	305	-	-	-	-	-

Noktalar	Ölçüm Yöntemleri	Derinliklere göre SPT-N ve Vs değerleri									
		1,5	3,0	4,5	6,0	7,5	9	10,5	12	13,5	15
38	SPT	-	-	-	27	R	R	R	R	R	R
	Vs	-	-	-	309	309	330	330	340	340	345
39	SPT	-	18	20	R	R	R	R	R	R	R
	Vs	-	187	219	314	314	339	339	354	354	358
40	SPT	-	-	-	23	-	-	-	-	-	-
	Vs	-	-	-	240	-	-	-	-	-	-
41	SPT	25	43	48	-	-	-	-	-	-	-
	Vs	216	-	288	-	-	-	-	-	-	-
42	SPT	-	15	16	26	18	20	31	25	-	-
	Vs	-	165	229	268	287	293	293	291	-	-
43	SPT	-	38	20	R	-	R	-	-	-	R
	Vs	-	-	320	393	-	405	-	-	-	400
44	SPT	-	-	-	6	-	23	24	-	-	-
	Vs	-	-	-	163	-	264	264	-	-	-
45	SPT	-	29	21	39	38	-	-	-	-	-
	Vs	-	252	265	292	340	-	-	-	-	-
46	SPT	-	21	37	33	46	26	24	28	34	31
	Vs	-	241	314	335	347	351	351	351	351	351
47	SPT	-	-	-	13	-	-	-	-	-	-
	Vs	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
48	SPT	-	23	35	-	-	-	-	-	-	-
	Vs	-	220	256	-	-	-	-	-	-	-
49	SPT	-	24	29	47	R	47	R	-	-	-
	Vs	-	322	337	344	344	344	344	-	-	-
50	SPT	-	13	-	-	-	-	27	34	29	R

Noktalar	Ölçüm Yöntemleri	Derinliklere göre SPT-N ve Vs değerleri									
		1,5	3,0	4,5	6,0	7,5	9	10,5	12	13,5	15
	Vs	-	-	-	-	-	-	337	344	346	346
51	SPT	-	-	-	20	45	46	R	R	40	R
	Vs	-	-	-	334	334	334	334	334	334	334
52	SPT	-	-	17	22	40	R	R	R	R	R
	Vs	-	-	208	311	323	405	405	406	403	403
53	SPT	-	-	-	28	37	-	-	-	-	-
	Vs	-	-	-	247	290	-	-	-	-	-
54	SPT	-	-	-	-	33	R	R	-	-	-
	Vs	-	-	-	-	336	353	353	-	-	-
55	SPT	-	13	21	-	-	39	R	-	-	-
	Vs	-	214	269	-	-	341	341	-	-	-
56	SPT	-	44	44	R	R	R	R	-	R	-
	Vs	-	235	344	408	446	-	-	-	-	-
57	SPT	-	26	38	21	20	-	-	-	-	-
	Vs	-	187	250	260	222	-	-	-	-	-
58	SPT	-	-	18	46	R	R	R	-	-	R
	Vs	-	-	284	397	427	444	444	-	-	444
59	SPT	-	35	33	17	16	-	-	-	-	-
	Vs	-	-	250	260	222	-	-	-	-	-
60	SPT	-	-	-	-	18	-	32	-	-	-
	Vs	-	-	-	-	236	-	243	-	-	-
61	SPT	-	24	-	20	-	-	18	-	-	-
	Vs	-	184	-	221	-	-	322	-	-	-
62	SPT	-	-	29	33	24	31	32	-	-	-
	Vs	-	-	233	230	287	291	291	-	-	-

Noktalar	Ölçüm Yöntemleri	Derinliklere göre SPT-N ve Vs değerleri									
		1,5	3,0	4,5	6,0	7,5	9	10,5	12	13,5	15
63	SPT	-	24	20	-	-	R	R	R	R	R
	Vs	-	255	261	-	-	367	387	387	401	410
64	SPT	-	-	39	28	25	39	42	-	-	-
	Vs	-	-	-	226	233	236	236	-	-	-
65	SPT	-	-	-	-	19	-	-	-	-	-
	Vs	-	-	-	-	272	-	-	-	-	-
66	SPT	-	-	25	-	-	-	-	-	-	-
	Vs	-	-	275	-	-	-	-	-	-	-
67	SPT	-	11	31	34	-	-	-	-	-	-
	Vs	-	185	232	258	-	-	-	-	-	-
68	SPT	-	13	-	38	21	-	39	-	-	-
	Vs	-	178	-	226	233	-	236	-	-	-
69	SPT	-	-	-	19	16	23	22	32	40	42
	Vs	-	-	-	244	265	275	275	274	268	268
70	SPT	-	-	-	-	37	27	-	-	-	-
	Vs	-	-	-	-	320	329	-	-	-	-
71	SPT	-	-	48	R	-	R	R	-	-	-
	Vs	-	-	369	369	-	369	369	-	-	-
72	SPT	-	-	-	20	-	15	18	-	-	-
	Vs	-	-	-	358	-	263	263	-	-	-
73	SPT	-	18	44	23	19	19	25	-	-	-
	Vs	-	185	232	258	269	275	275	-	-	-
74	SPT	-	49	48	-	-	-	-	-	-	-
	Vs	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
75	SPT	-	8	-	-	-	-	-	-	-	-

Noktalar	Ölçüm Yöntemleri	Derinliklere göre SPT-N ve Vs değerleri									
		1,5	3,0	4,5	6,0	7,5	9	10,5	12	13,5	15
	Vs	-	178	-	-	-	-	-	-	-	-
76	SPT	-	-	24	-	-	-	-	-	-	-
	Vs	-	-	206	-	-	-	-	-	-	-

4. BULGULAR

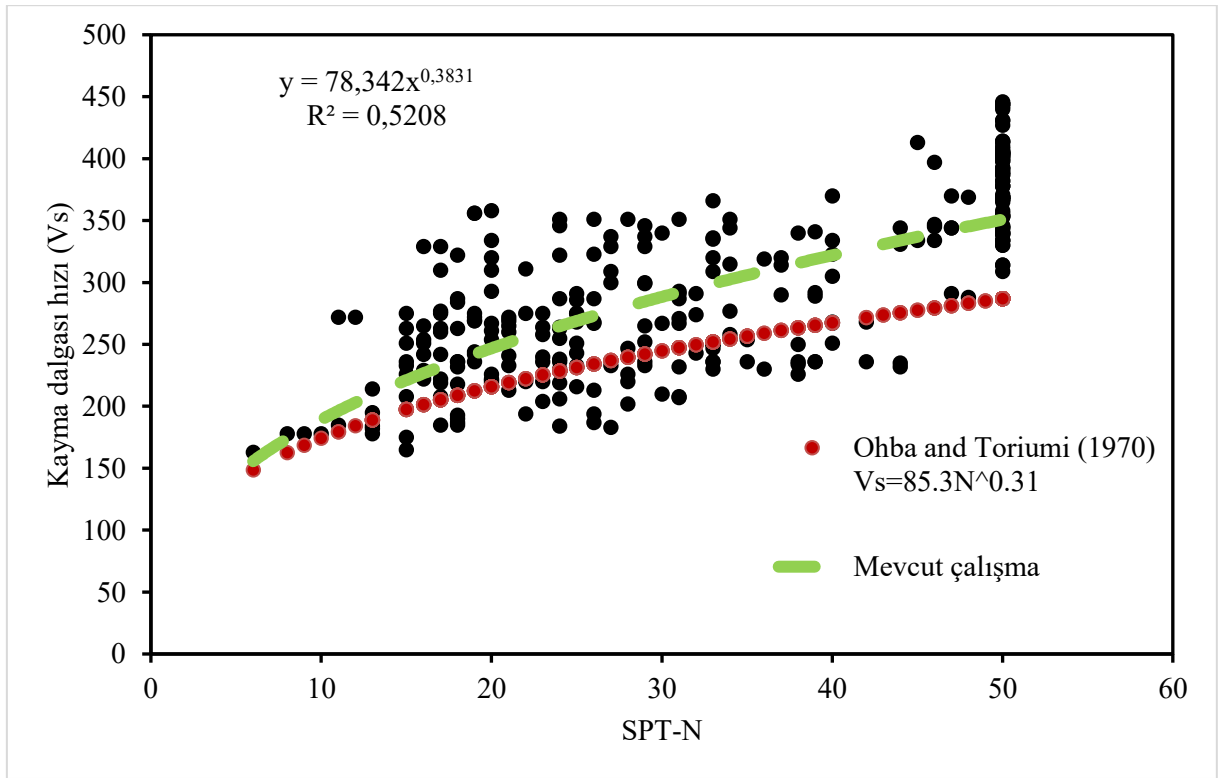
Geoteknik deprem mühendisliğinde zeminlerin dinamik davranışlarının belirlenmesinde kayma dalgası hızı (V_s) temel bir parametre olarak kabul edilmektedir. Başlangıç kayma modülü, zemin hâkim periyodu ve zemin büyütmesi gibi önemli parametreler doğrudan kayma dalgası hızı kullanılarak tanımlanabilmektedir. Bunun yanı sıra, V_s değerleri yardımıyla mikrobölgeleme çalışmaları yapılabilmekte, sıvılaşma potansiyeli değerlendirilebilmekte ve anakayadan yüzeye ulaşan deprem etkilerinin oluşturacağı gerilme dağılımları ile deprem karakteristikleri belirlenebilmektedir.

Kayma dalgası hızı; sismik kırılma ve sismik yansıma gibi yüzey sismik yöntemleri ile kuyu içi jeofizik yöntemler kullanılarak ölçülmektedir. Ancak bu yöntemlerin yüksek maliyetli olması veya bazı saha koşullarında uygulanamaması nedeniyle, kayma dalgası hızı ile diğer arazi deneyleri arasındaki ilişkilerin araştırılması önem kazanmıştır. Bu kapsamda, birçok araştırmacı kayma dalgası hızının tahmininde SPT-N değerlerini kullanmış ve SPT-N değerini etkileyen faktörlerin aynı zamanda kayma dalgası hızını da etkilediğini ortaya koymuştur.

Bu çalışmada, zeminlerin dinamik özelliklerinin belirlenmesinde kritik bir parametre olan kayma dalgası hızının doğrudan ölçülemediği veya sınırlı sayıda ölçülebildiği durumlar için, mevcut SPT-N verilerinden yararlanılarak V_s tahmini yapılması amaçlanmıştır. Bu doğrultuda, Erzincan ili merkez mahallelerinde yer alan parsellerin zemin etüt raporlarından elde edilen 76 farklı noktaya ait 3–15 m derinlik aralığındaki SPT-N değerleri kullanılmıştır. Literatürde tüm zemin türleri için önerilmiş ampirik bağıntılar aracılığıyla kayma dalgası hızı değerleri hesaplanmış, ardından bu tahmini değerler ile zemin etütlerinden elde edilen mevcut V_s değerleri karşılaştırılarak değerlendirilmiştir.

4.1. Ohba ve Toriumi Yaklaşımı (1970)

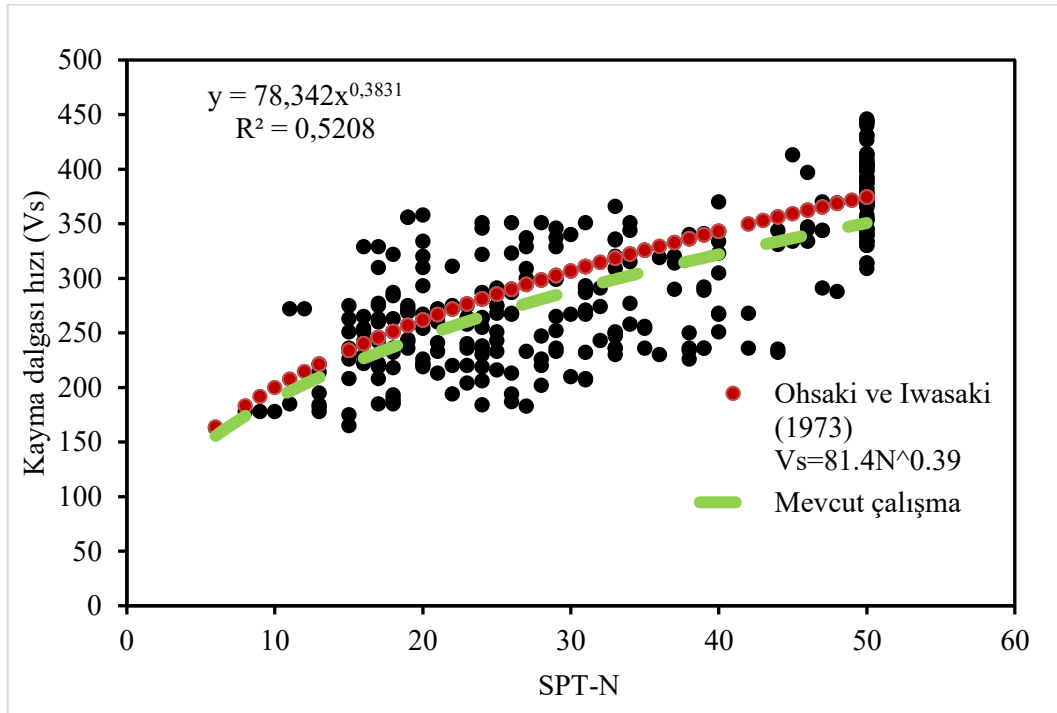
Ohba ve Toriumi, 1970 yılında yaptıkları çalışma ile SPT- V_s arasındaki ilişkiyi $V_s = 85.3 N^{0.31}$ (m/sn) yaklaşımı ile ifade etmişlerdir. Çalışmada zemin etüt raporlarından alınan mevcut veriler ile SPT- V_s arasındaki ilişkiye bakılmış ve bu ilişkinin literatür karşılaştırması yapılmıştır. Literatür karşılaştırması kapsamında, Ohba ve Toriumi tarafından önerilen ampirik bağıntı kullanılarak, çalışmada yer alan 76 noktada 3–15 m derinlikteki SPT-N değerlerine bağlı olarak V_s değişimi incelenmiştir. Kayma dalgası hızının SPT-N değerine bağlı değişimini gösteren grafikte elde edilen üslü fonksiyonun belirtme katsayısı $R^2 = 0,520$ olarak belirlenmiş olup, tüm zemin türleri için kayma dalgası hızı ile SPT-N arasındaki korelasyon katsayısı 0,72 olarak hesaplanmıştır. Mevcut çalışma verileri arasındaki korelasyon doğrusal bir şekilde ilerlerken daha yüksek SPT-N değerlerinde düz eğilim göstermektedir. Ohba ve Toriumi eğrisi ise daha düz eğilim göstermektedir. Bu yaklaşımdaki grafik eğrisi, SPT-N değerlerindeki artış ile düzleşme eğilimi göstermekte ve daha düşük V_s değerlerini sağlamaktadır. Kayma dalgası hızının SPT-N ile değişimini gösteren grafik, şekil 4.1 de gösterilmiştir.



Şekil 4.1 Mevcut veriler SPT-N – V_s ilişkisi ile Ohba ve Toriumi (1970) yaklaşımının karşılaştırılması

4.2. Ohsaki ve Iwasaki Yaklaşımı (1973)

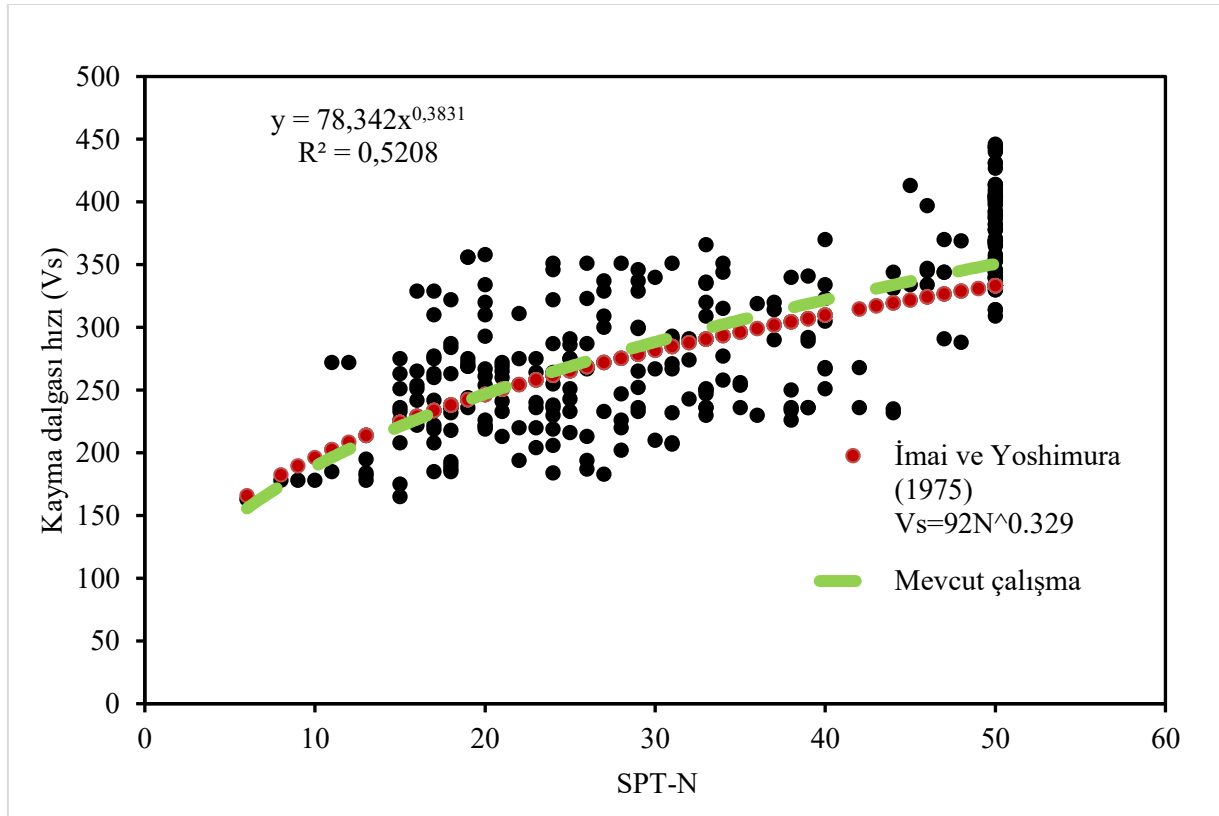
Ohsaki ve Iwasaki, 1973 yılında Japonya’da kuyu içi ölçümlerden alınan veriler ile jeolojik yaş ve zemin türü etkisi dikkate alınıp istatistik analizler yapılarak SPT- V_s arasındaki ilişkiyi $V_s = 81.4 N^{0.39}$ (m/sn) yaklaşımı ile ifade etmişlerdir. Çalışmada zemin etüt raporlarından alınan mevcut veriler ile SPT- V_s arasındaki ilişkiye bakılmış ve bu ilişkinin literatür karşılaştırması yapılmıştır. Literatür karşılaştırması kapsamında, Ohsaki ve Iwasaki tarafından önerilen ampirik bağıntı kullanılarak, çalışmada yer alan 76 noktada 3–15 m derinlikteki SPT-N değerlerine bağlı olarak V_s değişimi incelenmiştir. Kayma dalgası hızının SPT-N değerine bağlı değişimini gösteren grafikte elde edilen üslü fonksiyonun belirtme katsayısı $R^2 = 0,520$ olarak belirlenmiş olup, tüm zemin türleri için kayma dalgası hızı ile SPT-N arasındaki korelasyon katsayısı 0,72 olarak hesaplanmıştır. Mevcut çalışma verileri arasındaki korelasyon doğrusal bir şekilde ilerlerken daha yüksek SPT-N değerlerinde düz eğilim göstermektedir. Ohsaki ve Iwasaki eğrisinin mevcut çalışma eğrisi ile yaklaşık olarak aynı eğilimde olduğu görülmekte ve daha yüksek V_s değerlerine karşılık gelmektedir. Kayma dalgası hızının SPT-N ile değişimini gösteren grafik, şekil 4.2 de gösterilmiştir.



Şekil 4.2 Mevcut veriler SPT-N – V_s ilişkisi ile Ohsaki ve Iwasaki (1973) yaklaşımının karşılaştırılması

4.3. İmai ve Yoshimura Yaklaşımı (1975)

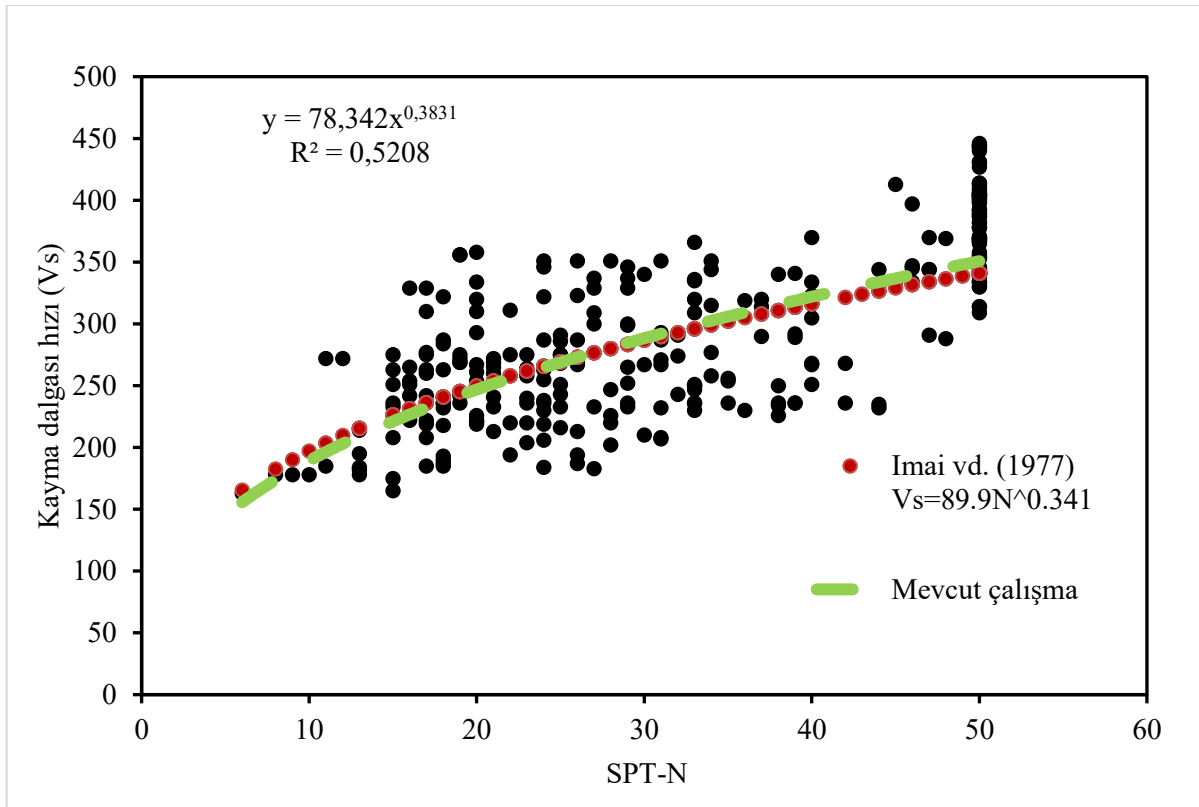
İmai ve Yoshimura, 1975 yılında zemin cinsinden bağımsız olarak SPT- V_s arasındaki ilişkiyi $V_s = 92 N^{0.329}$ (m/sn) yaklaşımı ile ifade etmişlerdir. Çalışmada zemin etüt raporlarından alınan mevcut veriler ile SPT- V_s arasındaki ilişkiye bakılmış ve bu ilişkinin literatür karşılaştırması yapılmıştır. Literatür karşılaştırması kapsamında, İmai ve Yoshimura tarafından önerilen ampirik bağıntı kullanılarak, çalışmada yer alan 76 noktada 3–15 m derinlikteki SPT-N değerlerine bağlı olarak V_s değişimi incelenmiştir. Kayma dalgası hızının SPT-N değerine bağlı değişimini gösteren grafikte elde edilen üslü fonksiyonun belirtme katsayısı $R^2 = 0,520$ olarak belirlenmiş olup, tüm zemin türleri için kayma dalgası hızı ile SPT-N arasındaki korelasyon katsayısı 0,72 olarak hesaplanmıştır. İmai ve Yoshimura eğrisinin SPT-N değeri küçük değerlerde doğrusal, artan değerlerde ise mevcut çalışmaya göre daha düz bir şekilde eğilim gösterdiği ifade edilebilir. Kayma dalgası hızının SPT-N ile değişimini gösteren grafik, şekil 4.3 te gösterilmiştir.



Şekil 4.3 Mevcut veriler SPT-N – V_s ilişkisi ile İmai ve Yoshimura (1975) yaklaşımının karşılaştırılması

4.4. İmai vd. Yaklaşımı (1977)

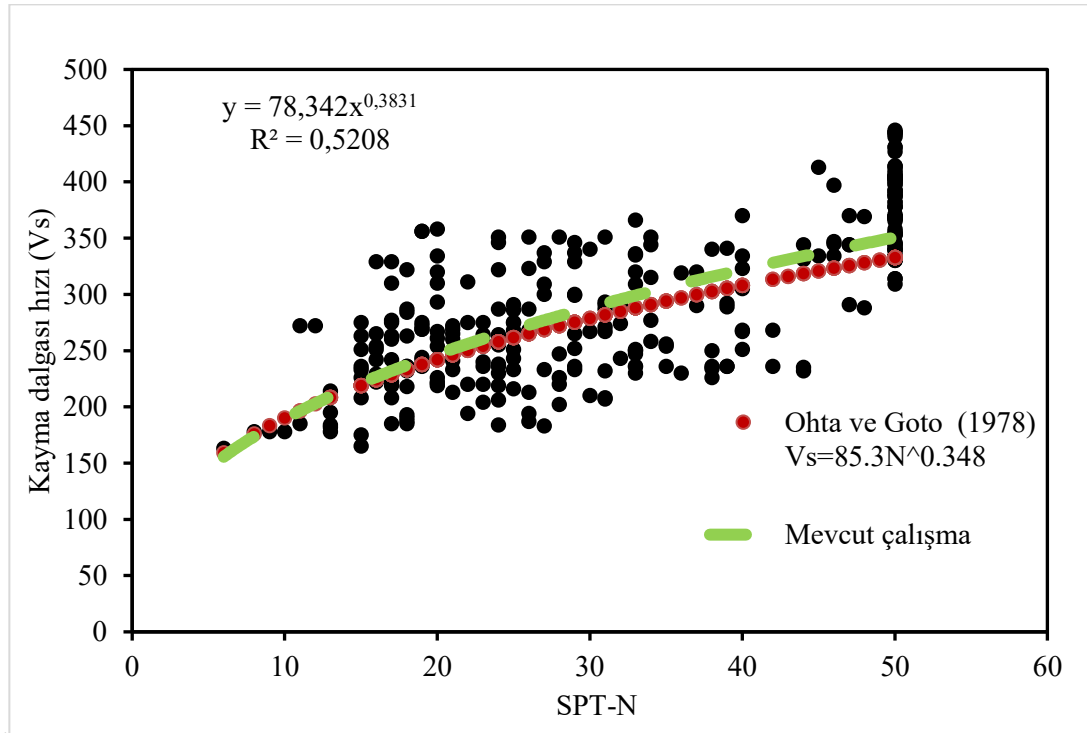
Araştırmacılar 1977 yılında, tüm zemin grupları (dolgular dahil) için yeniden analiz yaparak toplam 756 data ile önceden yaptıkları çalışmayı biraz daha genişleterek, alüvyon kumlar için 79-345 m/sn ve dilüvyal kumlar için ise 175-649 m/sn kayma dalgası hızlarını tespit ederek $V_s = 89.9 N^{0.341}$ (m/sn) bağıntısını elde etmişlerdir. Çalışmada zemin etüt raporlarından alınan mevcut veriler ile SPT- V_s arasındaki ilişkiye bakılmış ve bu ilişkinin literatür karşılaştırması yapılmıştır. Literatür karşılaştırması kapsamında, İmai ve diğ. tarafından önerilen ampirik bağıntı kullanılarak, çalışmada yer alan 76 noktada 3–15 m derinlikteki SPT-N değerlerine bağlı olarak V_s değişimi incelenmiştir. Kayma dalgası hızının SPT-N değerine bağlı değişimini gösteren grafikte elde edilen üslü fonksiyonun belirtme katsayısı $R^2 = 0,520$ olarak belirlenmiş olup, tüm zemin türleri için kayma dalgası hızı ile SPT-N arasındaki korelasyon katsayısı 0,72 olarak hesaplanmıştır. İmai ve diğ. eğrisi mevcut çalışma ile aynı eğilimde ilerlerken SPT-N sayısı arttıkça mevcut çalışmaya göre daha düz bir eğilim gösterdiği ifade edilebilir. Kayma dalgası hızının SPT-N ile değişimini gösteren grafik, şekil 4.4 te gösterilmiştir.



Şekil 4.4 Mevcut veriler SPT-N – V_s ilişkisi ile İmai ve diğ. (1977) yaklaşımının karşılaştırılması

4.5. Ohta ve Goto Yaklaşımı (1978)

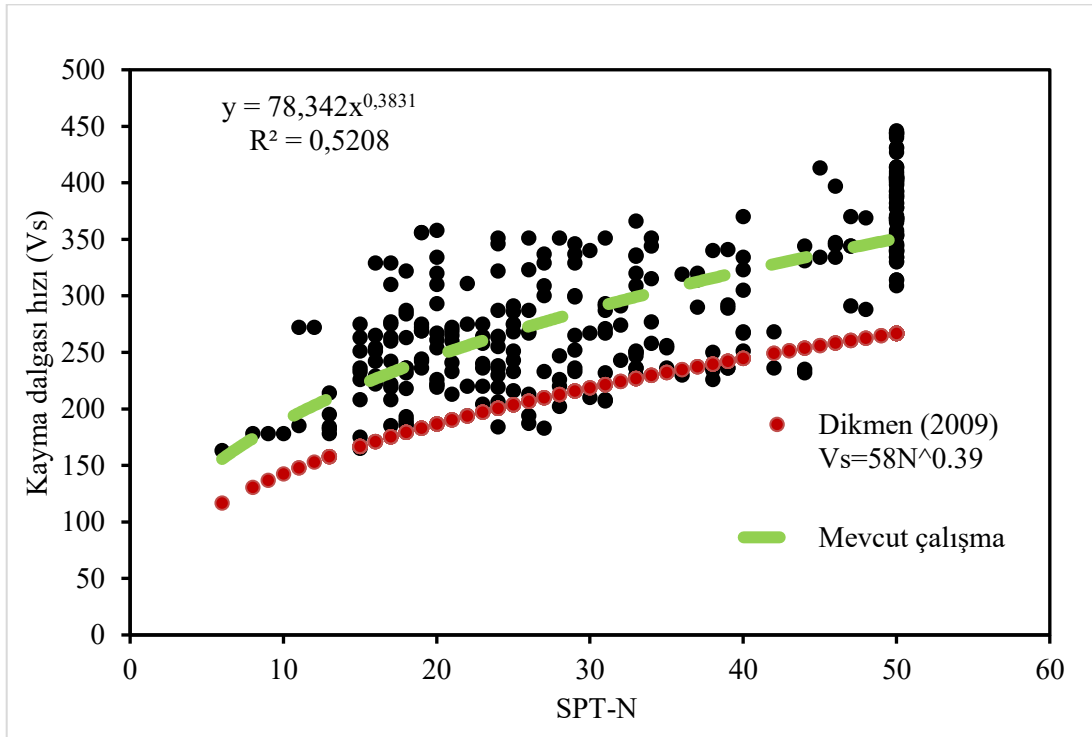
Ohta ve Goto, 1978 yılında yaptıkları araştırmalar neticesinde, zeminlerdeki diğer değişkenler sabit olup dane çapları arttığı zaman ve benzer şartlardaki daha yaşlı zeminlerde V_s değerlerinin arttığını ifade ederek tüm zemin sınıfları için kayma dalgası hızını SPT-N darbe sayısı cinsinden tanımlayan $V_s = 85.3 N^{0.348}$ (m/sn) bağıntısını elde etmişlerdir. Çalışmada zemin etüt raporlarından alınan mevcut veriler ile SPT- V_s arasındaki ilişkiye bakılmış ve bu ilişkinin literatür karşılaştırması yapılmıştır. Literatür karşılaştırması kapsamında, Ohta ve Goto tarafından önerilen ampirik bağıntı kullanılarak, çalışmada yer alan 76 noktada 3–15 m derinlikteki SPT-N değerlerine bağlı olarak V_s değişimi incelenmiştir. Kayma dalgası hızının SPT-N değerine bağlı değişimini gösteren grafikte elde edilen üslü fonksiyonun belirtme katsayısı $R^2=0,520$ olarak belirlenmiş olup, tüm zemin türleri için kayma dalgası hızı ile SPT-N arasındaki korelasyon katsayısı 0,72 olarak hesaplanmıştır. Ohta ve Goto yaklaşım eğrisinde artan SPT-N değerlerine karşı gelen V_s değerleri mevcut çalışmadaki değerlere kıyasla daha düşüktür. Kayma dalgası hızının SPT-N ile değişimini gösteren grafik, şekil 4.5 te gösterilmiştir



Şekil 4.5 Mevcut veriler SPT-N – V_s ilişkisi ile Ohta ve Goto (1978) yaklaşımının karşılaştırılması

4.6. Dikmen Yaklaşımı (2009)

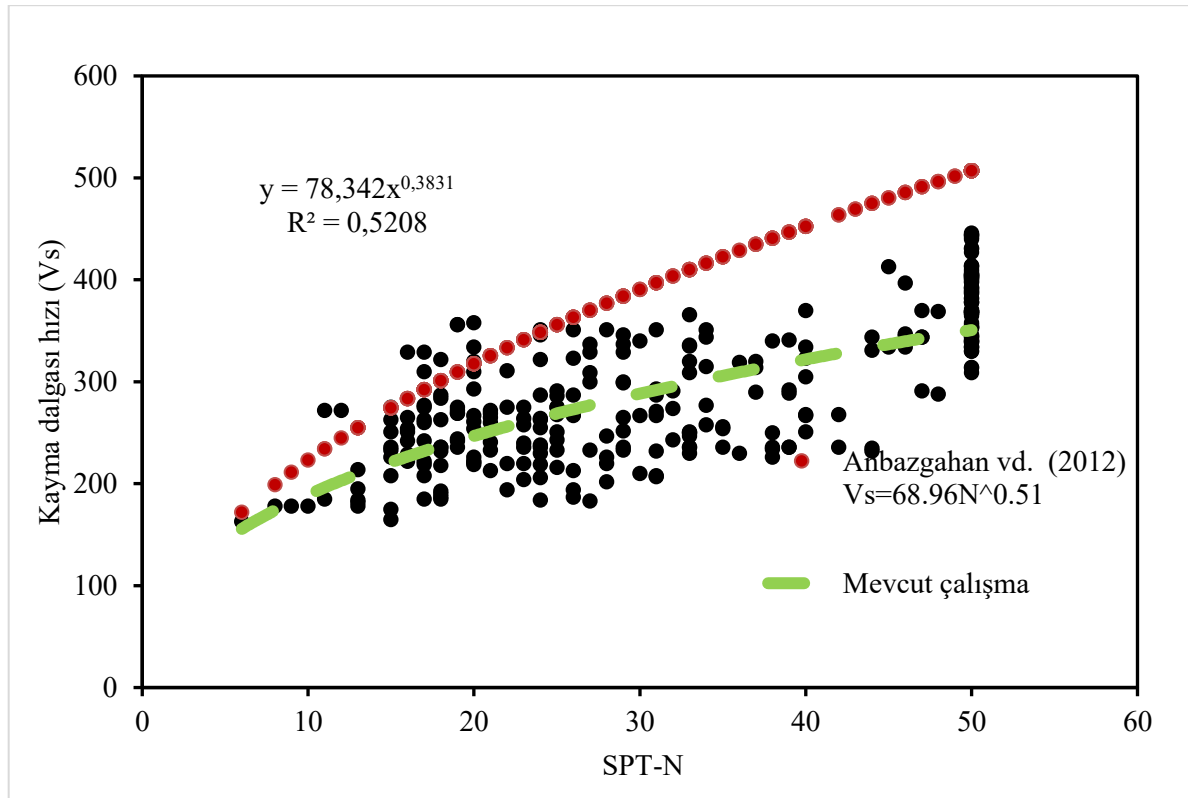
Dikmen, 2009 yılında yaptığı çalışmada Eskişehir ilinde yapılmış olan veri setlerini kullanarak SPT-N ve V_s değerlerini ilişkilendirilip yeni ampirik formüller geliştirmeyi amaçlamıştır. Araştırmada tüm zemin türleri, kum, silt ve kil zeminler için SPT-N ve V_s ilişkisini incelemiştir. Zemin cinsinin sonuçlar üzerinde mühim bir etkisinin olmadığını gözlemleyerek tüm zemin türleri için $V_s=58N^{0.39}$ (m/sn) bağıntısını geliştirmiştir. Çalışmada zemin etüt raporlarından alınan mevcut veriler ile SPT- V_s arasındaki ilişkiye bakılmış ve bu ilişkinin literatür karşılaştırması yapılmıştır. Literatür karşılaştırması kapsamında, Dikmen tarafından önerilen ampirik bağıntı kullanılarak, çalışmada yer alan 76 noktada 3–15 m derinlikteki SPT-N değerlerine bağlı olarak V_s değişimi incelenmiştir. Kayma dalgası hızının SPT-N değerine bağlı değişimini gösteren grafikte elde edilen üslü fonksiyonun belirtme katsayısı $R^2=0,520$ olarak belirlenmiş olup, tüm zemin türleri için kayma dalgası hızı ile SPT-N arasındaki korelasyon katsayısı 0,72 olarak hesaplanmıştır. Dikmen yaklaşımında SPT-N değerlerine karşılık gelen V_s değerleri mevcut çalışmadaki V_s değerlerinden daha düşüktür. Kayma dalgası hızının SPT-N ile değişimini gösteren grafik, şekil 4.6 da gösterilmiştir.



Şekil 4.6 Mevcut veriler SPT-N – V_s ilişkisi ile Dikmen (2009) yaklaşımının karşılaştırılması

4.7. Anbazhagan vd. Yaklaşımı (2012)

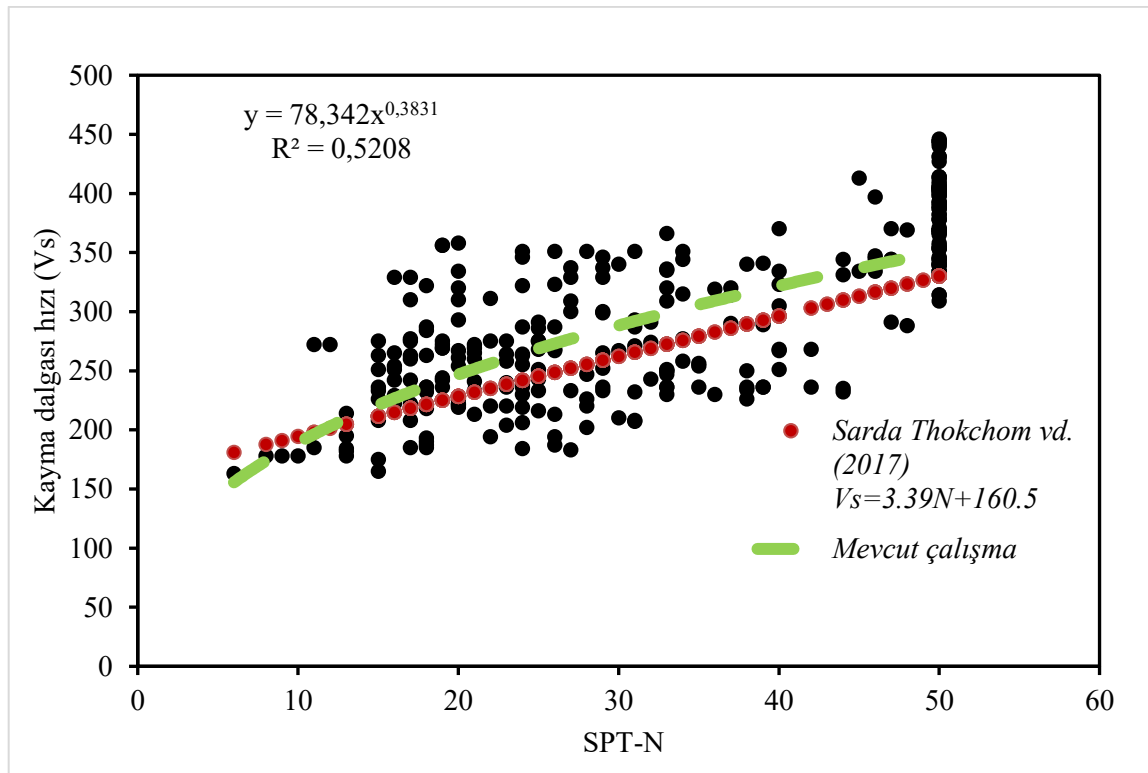
Anbazhagan vd., (2012) çalışması, SPT-N ile kayma modülü arasındaki ilişkinin yalnızca yerel bağıntılarla sınırlı kalmaması gerektiğini ileri sürerek literatür verilerinin sentezine dayalı, genel kullanıma uygun bir SPT-Gmax yaklaşımı sunarak tüm zemin türleri için $V_s=68.96N^{0.51}$ bağıntısını geliştirmişlerdir. Çalışmada zemin etüt raporlarından alınan mevcut veriler ile SPT- V_s arasındaki ilişkiye bakılmış ve bu ilişkinin literatür karşılaştırması yapılmıştır. Literatür karşılaştırması kapsamında, Anbazhagan vd. tarafından önerilen ampirik bağıntı kullanılarak, çalışmada yer alan 76 noktada 3–15 m derinlikteki SPT-N değerlerine bağlı olarak V_s değişimi incelenmiştir. Kayma dalgası hızının SPT-N değerine bağlı değişimini gösteren grafikte elde edilen üslü fonksiyonun belirtme katsayısı $R^2=0,520$ olarak belirlenmiş olup, tüm zemin türleri için kayma dalgası hızı ile SPT-N arasındaki korelasyon katsayısı 0,72 olarak hesaplanmıştır. Anbazhagan vd. yaklaşımında SPT-N değerlerine karşılık gelen V_s değerleri mevcut çalışmadaki V_s değerlerinden daha yüksektir. Kayma dalgası hızının SPT-N ile değişimini gösteren grafik, şekil 4.7 de gösterilmiştir.



Şekil 4.7 Mevcut veriler SPT-N – V_s ilişkisi ile Anbazhagan vd. (2012) yaklaşımının karşılaştırılması

4.8. Thokchom vd. Yaklaşımı (2017)

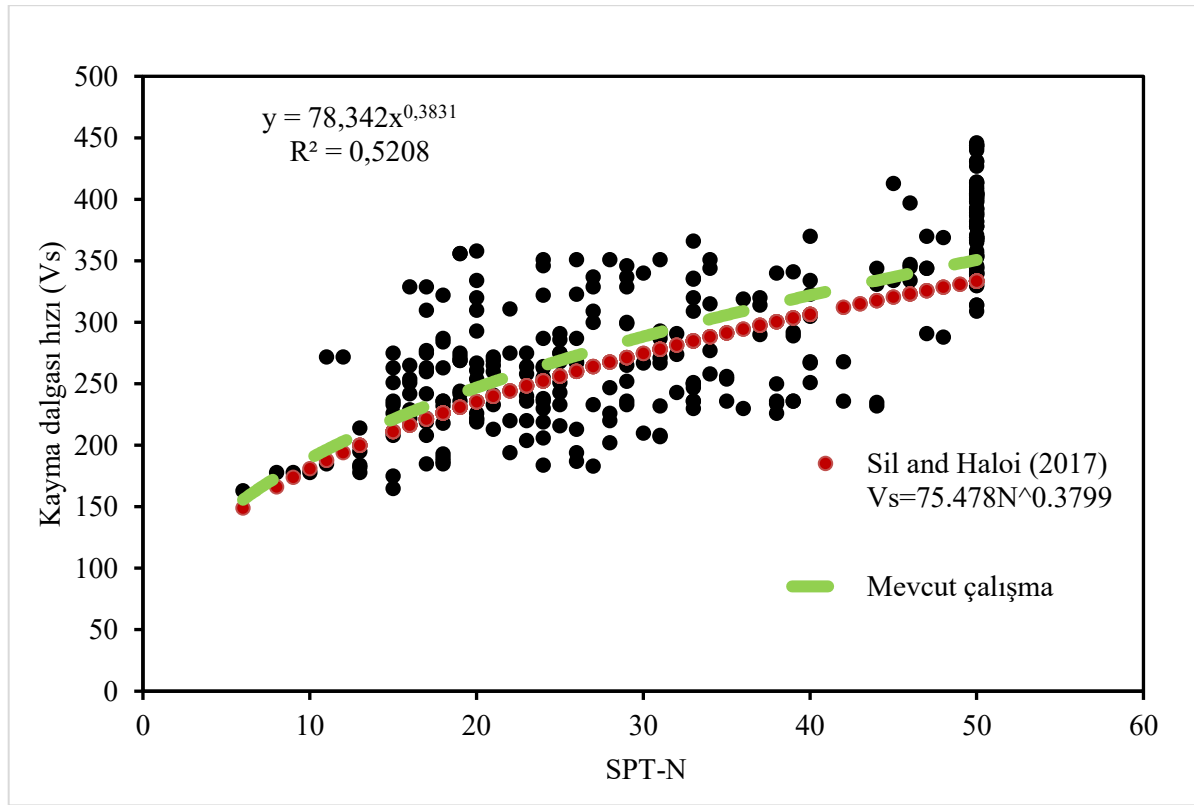
Thokchom ve arkadaşları, Hindistan'ın batısında yer alan Dholera bölgesinde farklı zemin türleri için SPT-N ile V_s arasındaki ampirik ilişkiyi inceleyerek tüm zemin türleri için $V_s=3.39N+160.5$ bağıntısını geliştirmişlerdir. Çalışmada zemin etüt raporlarından alınan mevcut veriler ile SPT- V_s arasındaki ilişkiye bakılmış ve bu ilişkinin literatür karşılaştırması yapılmıştır. Literatür karşılaştırması kapsamında, Thokchom ve arkadaşları tarafından önerilen ampirik bağıntı kullanılarak, çalışmada yer alan 76 noktada 3–15 m derinlikteki SPT-N değerlerine bağlı olarak V_s değişimi incelenmiştir. Kayma dalgası hızının SPT-N değerine bağlı değişimini gösteren grafikte elde edilen üslü fonksiyonun belirtme katsayısı $R^2= 0,520$ olarak belirlenmiş olup, tüm zemin türleri için kayma dalgası hızı ile SPT-N arasındaki korelasyon katsayısı 0,72 olarak hesaplanmıştır. Thokchom vd. eğrisi, 10–12 aralığındaki SPT-N değerleri için mevcut çalışmaya kıyasla daha yüksek V_s değerleri verirken, SPT-N değerinin artmasıyla birlikte mevcut çalışmaya göre daha düşük V_s değerleri sağlamaktadır. Kayma dalgası hızının SPT-N ile değişimini gösteren grafik, şekil 4.8 de gösterilmiştir.



Şekil 4.8 Mevcut veriler SPT-N – V_s ilişkisi ile Thokchom vd.(2017) yaklaşımının karşılaştırılması

4.9. Sil ve Haloi Yaklaşımı (2017)

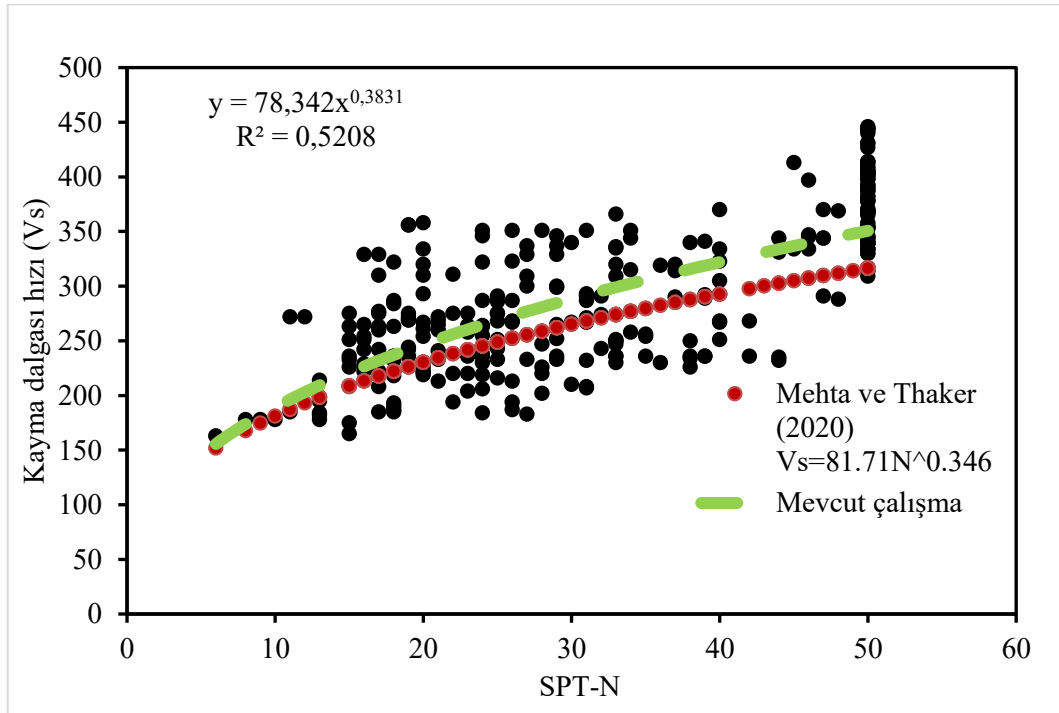
Sil ve Haloi'nin 2017 yılında yaptıkları çalışmada elde ettikleri sonuçlarda SPT-N ile V_s arasında üslü bir ilişkinin genel olarak geçerli olduğunu ve önerdikleri $V_s=75.478N^{0.3799}$ bağıntısının farklı bölgelerde kabul edilebilir doğrulukta sonuçlar verdiğini ileri sürmüşlerdir. Çalışmada zemin etüt raporlarından alınan mevcut veriler ile SPT- V_s arasındaki ilişkiye bakılmış ve bu ilişkinin literatür karşılaştırması yapılmıştır. Literatür karşılaştırması kapsamında, Sil ve Haloi tarafından önerilen ampirik bağıntı kullanılarak, çalışmada yer alan 76 noktada 3–15 m derinlikteki SPT-N değerlerine bağlı olarak V_s değişimi incelenmiştir. Kayma dalgası hızının SPT-N değerine bağlı değişimini gösteren grafikte elde edilen üslü fonksiyonun belirtme katsayısı $R^2=0,520$ olarak belirlenmiş olup, tüm zemin türleri için kayma dalgası hızı ile SPT-N arasındaki korelasyon katsayısı 0,72 olarak hesaplanmıştır. Sil ve Haloi yaklaşım eğrisinde artan SPT-N değerlerine karşı gelen V_s değerleri mevcut çalışmadaki değerlere kıyasla daha düşüktür. Kayma dalgası hızının SPT-N ile değişimini gösteren grafik, şekil 4.9 da gösterilmiştir.



Şekil 4.9 Mevcut veriler SPT-N – V_s ilişkisi ile Sil ve Haloi (2017) yaklaşımının karşılaştırılması

4.10. Mehta ve Thaker Yaklaşımı (2020)

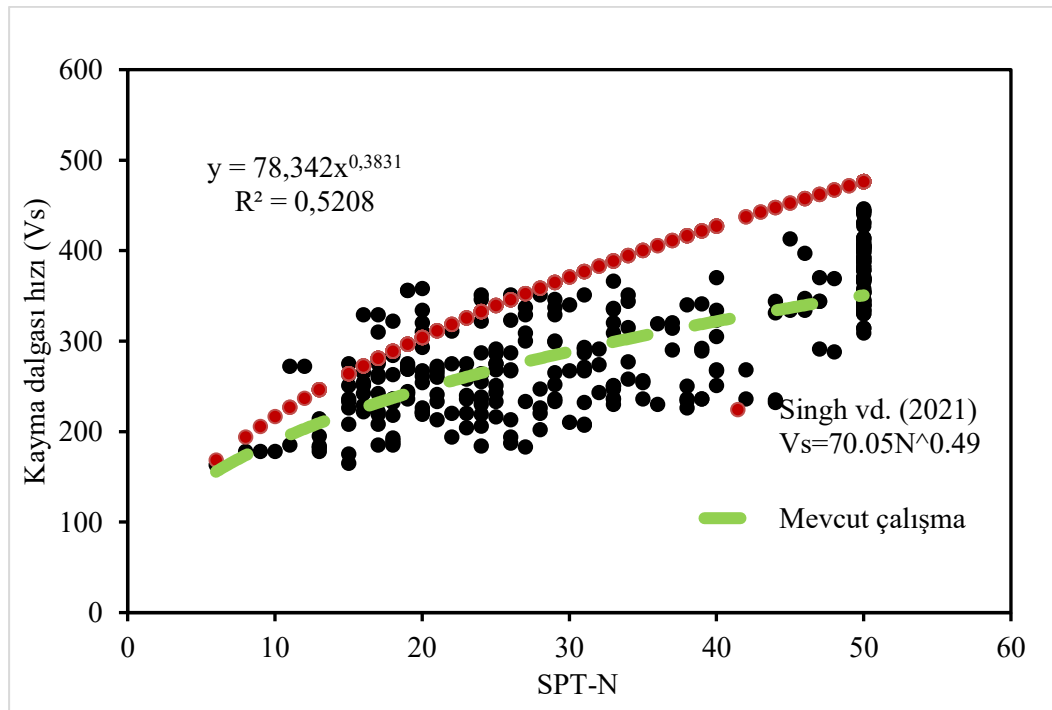
Mehta ve Thaker, Hindistan'ın Gujarat eyaletinde yer alan Vadodara bölgesi için SPT-N ile V_s arasındaki ampirik ilişkileri geliştirmeyi amaçlamıştır. SPT-N ile V_s arasında üslü bir ilişkinin geçerli olduğunu ve korelasyon katsayılarının yerel jeolojik ve zemin koşullarına bağlı olarak değiştiğini vurgulayarak tüm zemin türleri için $V_s=81.71N^{0.346}$ bağıntısını geliştirmişlerdir. Çalışmada zemin etüt raporlarından alınan mevcut veriler ile SPT- V_s arasındaki ilişkiye bakılmış ve bu ilişkinin literatür karşılaştırması yapılmıştır. Literatür karşılaştırması kapsamında, Mehta ve Thaker tarafından önerilen ampirik bağıntı kullanılarak, çalışmada yer alan 76 noktada 3–15 m derinlikteki SPT-N değerlerine bağlı olarak V_s değişimi incelenmiştir. Kayma dalgası hızının SPT-N değerine bağlı değişimini gösteren grafikte elde edilen üslü fonksiyonun belirtme katsayısı $R^2=0,520$ olarak belirlenmiş olup, tüm zemin türleri için kayma dalgası hızı ile SPT-N arasındaki korelasyon katsayısı 0,72 olarak hesaplanmıştır. Mehta ve Thaker yaklaşım eğrisinde artan SPT-N değerlerine karşı gelen V_s değerleri mevcut çalışmadaki değerlere kıyasla daha düşüktür. Kayma dalgası hızının SPT-N ile değişimini gösteren grafik, şekil+ 4.10 da gösterilmiştir.



Şekil 4.10 Mevcut veriler SPT-N – V_s ilişkisi ile Mehta ve Thaker (2020) yaklaşımının karşılaştırılması

4.11. Singh vd. Yaklaşımı (2021)

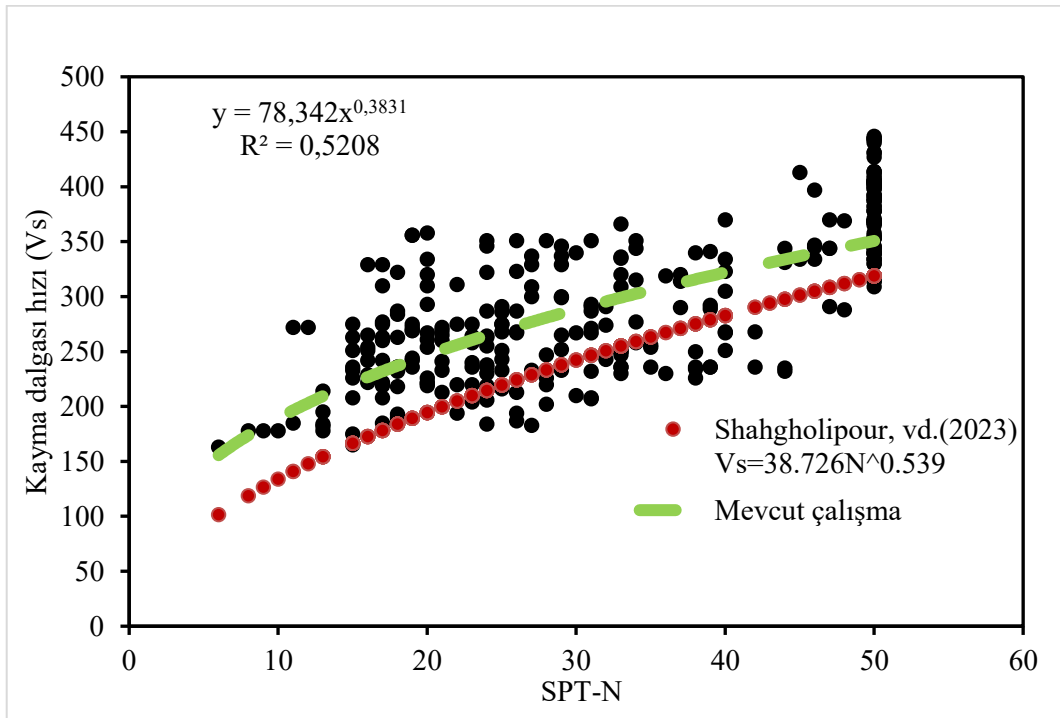
Singh ve arkadaşları, 2021 yılında yaptıkları çalışmada SPT-N ile V_s arasında üslü bir ilişkinin bulunduğunu ve korelasyon parametrelerinin yerel zemin özelliklerinden etkilendiğini ileri sürerek tüm zeminler için $V_s=70.05N^{0.49}$ bağıntısını sunmuşlardır. Çalışmada zemin etüt raporlarından alınan mevcut veriler ile SPT- V_s arasındaki ilişkiye bakılmış ve bu ilişkinin literatür karşılaştırması yapılmıştır. Literatür karşılaştırması kapsamında, Singh ve arkadaşları tarafından önerilen ampirik bağıntı kullanılarak, çalışmada yer alan 76 noktada 3–15 m derinlikteki SPT-N değerlerine bağlı olarak V_s değişimi incelenmiştir. Kayma dalgası hızının SPT-N değerine bağlı değişimini gösteren grafikte elde edilen üslü fonksiyonun belirtme katsayısı $R^2=0,520$ olarak belirlenmiş olup, tüm zemin türleri için kayma dalgası hızı ile SPT-N arasındaki korelasyon katsayısı 0,72 olarak hesaplanmıştır. Singh ve arkadaşları yaklaşımında SPT-N değerlerine karşılık gelen V_s değerleri mevcut çalışmadaki V_s değerlerinden daha yüksektir. Kayma dalgası hızının SPT-N ile değişimini gösteren grafik, şekil 4.11 de gösterilmiştir.



Şekil 4.11 Mevcut veriler SPT-N – V_s ilişkisi ile Singh vd. (2021) yaklaşımının karşılaştırılması

4.12. Shahgholipour, Afsari ve Ghaseminejad Yaklaşımı (2023)

Shahgholipour, Afsari ve Ghaseminejad, İran'ın Nowshahr ve Chalus bölgelerindeki zeminler için Standart Penetrasyon Testi (SPT) ile kayma dalgası hızı (V_s) arasındaki ampirik ilişkiyi inceleyerek $V_s=38.726N^{0.539}$ bağıntısını geliştirmişlerdir. Çalışmada zemin etüt raporlarından alınan mevcut veriler ile SPT- V_s arasındaki ilişkiye bakılmış ve bu ilişkinin literatür karşılaştırması yapılmıştır. Literatür karşılaştırması kapsamında, Shahgholipour vd. tarafından önerilen ampirik bağıntı kullanılarak, çalışmada yer alan 76 noktada 3–15 m derinlikteki SPT-N değerlerine bağlı olarak V_s değişimi incelenmiştir. Kayma dalgası hızının SPT-N değerine bağlı değişimini gösteren grafikte elde edilen üslü fonksiyonun belirtme katsayısı $R^2= 0,520$ olarak belirlenmiş olup, tüm zemin türleri için kayma dalgası hızı ile SPT-N arasındaki korelasyon katsayısı 0,72 olarak hesaplanmıştır. Shahgholipour vd. yaklaşımında SPT-N değerlerine karşılık gelen V_s değerleri mevcut çalışmadaki V_s değerlerinden daha düşüktür. Kayma dalgası hızının SPT-N ile değişimini gösteren grafik, şekil 4.12 de gösterilmiştir.



Şekil 4.12 Mevcut veriler SPT-N – V_s ilişkisi ile Shahgholipour vd.(2023) yaklaşımının karşılaştırılması

5. TARTIŞMA VE SONUÇ

Bu çalışmada, Erzincan ili merkez mahallelerindeki 76 noktaya ait zemin etütlerinden elde edilen SPT-N verileri ile kayma dalgası hızı (V_s) arasındaki ilişki incelenmiş ve literatürdeki ampirik bağıntılar kullanılarak elde edilen sonuçlar karşılaştırılmıştır. Elde edilen bulgular, SPT-N ile V_s arasında anlamlı bir ilişki bulunduğunu göstermektedir. Tüm veri seti için hesaplanan korelasyon katsayısının yaklaşık 0,72 olması, bu iki parametre arasında orta-iyi düzeyde bir ilişki olduğunu ortaya koymaktadır. Belirtme katsayısının ($R^2= 0,52$) ise SPT-N değerleri ile V_s değişiminin yaklaşık yarısını açıklayabildiğini göstermesi, bu ilişkinin tek başına yeterli olmadığını ancak mühendislik uygulamaları için kabul edilebilir bir yaklaşım sunduğunu göstermektedir. Elde edilen grafiksel değerlendirmelerde, düşük ve orta SPT-N değerlerinde doğrusal bir artış eğilimi gözlenirken, yüksek SPT-N değerlerinde V_s artışının azalan bir hızla devam ettiği belirlenmiştir. Bu durum, zemin rijitliğinin belirli bir seviyeden sonra daha sınırlı artış göstermesi ile açıklanabilir.

Farklı araştırmacılar tarafından önerilen ampirik bağıntılar ile elde edilen V_s değerleri karşılaştırıldığında; Ohba ve Toriumi (1970), Ohta ve Goto (1978), Sil ve Haloi (2017), Mehta ve Thaker (2020) yaklaşımlarının, mevcut çalışmaya göre daha düşük V_s değerleri verdiği, İmai ve Yoshimura (1975), İmai ve diğ. (1977) ve Ohta ve Goto (1978) bağıntılarının mevcut verilerle daha uyumlu eğilim gösterdiği tespit edilmiştir. Öte yandan Dikmen (2009), Shahgholipour vd. (2023) bağıntılarının genel olarak daha düşük tahminler sunduğu, Ohsaki ve Iwasaki (1973), Anbazhagan vd. (2012) ve Singh vd. (2021) bağıntılarının ise daha yüksek V_s değerleri verdiği belirlenmiştir. Son olarak, Thokchom vd. (2017) bağıntısının ise düşük SPT-N değerlerinde yüksek, yüksek SPT-N değerlerinde ise düşük tahminler ürettiği tespit edilmiştir. Özellikle İmai, Ohta ve Goto gibi araştırmacıların önerdiği bağıntılar incelendiğinde, V_s 'nin N değerinin bir fonksiyonu olarak arttığı görülmektedir. Bu durum, SPT-N değerinin zemin sıklığı ve dayanımını temsil etmesi nedeniyle, zemin rijitliği ile doğrudan ilişkili olmasıyla açıklanabilir. Ancak çalışmada farklı bağıntıların önemli ölçüde farklı sonuçlar vermesi, literatürde de vurgulanan bölgesel bağımlılık kavramını desteklemektedir. Bu farklılıkların temel nedenlerinin aşağıda açıklanan zemin özellikleri ve deney uygulama yöntemlerinden kaynaklandığı düşünülmektedir. SPT deneyindeki; enerji kayıpları, jeolojik yük farklılıkları, ekipman farklılıkları ile V_s ölçümlerinde kullanılan yöntemlerin farklılığı (MASW, PS logging vb.) sonuçları doğrudan etkilemektedir. Bu çalışmadan elde edilen bulgular doğrultusunda Erzincan ve benzer jeolojik özelliklere sahip bölgeler için, daha

güvenilir sonuçlar elde edebilmek amacıyla yerel SPT-Vs bağıntılarının geliştirilmesi gerekmektedir.

Sonuç olarak, bu çalışma SPT-N ile kayma dalgası hızı arasında anlamlı bir ilişki olduğunu belirtmekle beraber bu ilişkinin tek bir evrensel bağıntı ile ifade edilemeyeceğini ortaya koymuştur. Yerel zemin koşullarının etkisi belirleyici olup, güvenilir mühendislik uygulamaları için bölgeye özgü modellerin geliştirilmesi gereklidir. Bu durum, deprem mühendisliği ve zemin davranışı analizlerinde daha doğru ve güvenilir sonuçlar elde edilmesi için önem arz etmektedir.

KAYNAKÇA

- Addo, K. O., & Robertson, P. K. (1992). Shear-wave velocity measurement of soils using Rayleigh waves. *Canadian Geotechnical Journal*, 29(4), 558–568. <https://doi.org/10.1139/t92-063>
- Anbazhagan, P., Parihar, A., & Rashmi, H. N. (2012). Review of correlations between SPT N and shear modulus: *A new correlation applicable to any region*. *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, 36, 52–69. <https://doi.org/10.1016/j.soildyn.2012.01.005>
- ASTM. (2000). Standard test method for crosshole seismic testing (*ASTM D4428/D4428M-00*). West Conshohocken, PA: ASTM International.
- ASTM. (2000). Standard guide for using the seismic refraction method for subsurface investigation (*ASTM D5777-00*). West Conshohocken, PA: ASTM International.
- ASTM. (2011). Standard test method for standard penetration test (SPT) and split-barrel sampling of soils (*ASTM D1586-11*). West Conshohocken, PA: ASTM International.
- Ballard, R. F., Jr., & McLean, F. G. (1975). Seismic field methods for in situ moduli. In *Proceedings of the ASCE Specialty Conference on In Situ Measurement of Soil Properties (Vol. 1, pp. 121–150)*. Raleigh, NC, USA.
- Bol, E., Arel, E., & Önalp, A. (2007). Yerel zemin koşullarının deprem hasarına etkisi: Adapazarı örneği. Altıncı Ulusal Deprem Mühendisliği Konferansı, İstanbul, Türkiye.
- Bowles, J. E. (1996). McGraw-Hill. *Foundation analysis and design* (5th ed.).
- Clayton, C. R. I., Matthews, M. C., & Simons, N. E. (1995). *Site investigation (2nd ed.)*. Blackwell Science.
- Coduto, D. P. (2001). Foundation design: Principles and practices (2nd ed.). Upper Saddle River, NJ: Prentice Hall.
- Dikmen, Ü. (2009). Statistical correlations of shear wave velocity and penetration resistance for soils. *Journal of Geophysics and Engineering*, 6(1), 61–72. <https://doi.org/10.1088/1742-2132/6/1/007>
- Erdem, İ. (2017). Konya il merkezinin sismik hız özelliklerinin incelenmesi. *Yüksek Lisans Tezi, Nevşehir Hacı Bektaş Veli Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Nevşehir*.
- Haque, E., Kamal, M., Ullah, W., & Alam, B. (2013). Comparison of shear wave velocity derived from PS logging and MASW: *A case study of Mymensingh Pourashava, Bangladesh*. *Bangladesh Journal of Geology*, 31–32, 84–96.

- Hasancebi, N., & Ulusay, R. (2007). Empirical correlations between shear wave velocity and penetration resistance for ground shaking assessments. *Bulletin of Engineering Geology and the Environment*, 66(2), 203–213.
- Imai, T. (1977). P and S wave velocities of the ground in Japan. *In Proceedings of the 9th International Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering* (Vol. 2, pp. 257–260), Tokyo, Japan.
- İller Bankası Genel Müdürlüğü. (2022). Erzincan (Merkez) imar planına esas mikrobölgeleme etüt raporu (YERBİS Barkod No: 20001300052331). *Erzincan Belediye Başkanlığı, Erzincan*.
- İyisan, R. (1996). Zeminlerde kayma dalgası hızı ile penetrasyon deney sonuçları arasındaki bağıntılar. *Teknik Dergi*, 7(4), Yazı 89, 1187–1199.
- İyisan, R. (1994). Geoteknik özelliklerin belirlenmesinde sismik ve penetrasyon deneylerinin karşılaştırılması. *Doktora Tezi, İstanbul Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul*.
- Jinan, Z. (1987). Correlation between seismic wave velocity and the number of blow of SPT and depth. *Chinese Journal of Geotechnical Engineering*, 92–100.
- Kalteziotis, N., Sabatakakis, N., & Vassiliou, J. (1992). Evaluation of dynamic characteristics of Greek soil formations. *In Proceedings of the 2nd Hellenic Conference on Geotechnical Engineering* (Vol. 2, pp. 239–246).
- Kayabali, K. (1996). Soil liquefaction evaluation using shear wave velocity. *Engineering Geology*, 44(1–4), 121–127. [https://doi.org/10.1016/S0013-7952\(96\)00063-4](https://doi.org/10.1016/S0013-7952(96)00063-4)
- Kiku, H., & Yoshida, N. (2001). In-situ penetration tests and soil profiling in Adapazarı, Turkey. *In Proceedings of the 15th ICSMGE TC4 Satellite Conference on Lessons Learned from Recent Strong Earthquakes* (pp. 259–265), İstanbul, Türkiye.
- Lee, S. H., & Tsai, C. C. (2008). Mapping Vs30 in Taiwan. *Terrestrial, Atmospheric and Oceanic Sciences*, 19(6), 671–682.
- Lee, S. H. H. (1990). Regression models of shear wave velocities in Taipei Basin. *Journal of the Chinese Institute of Engineers*, 13(5), 519–532.
- Liao, S. S. C., & Whitman, R. V. (1986). Overburden correction factors for SPT in sand. *Journal of Geotechnical Engineering*, 112(3), 373–377.
- Maheswari, R. U., Boominathan, A., & Dodagoudar, G. R. (2010). Use of surface waves in statistical correlations of shear wave velocity and penetration resistance of Chennai soils. *Geotechnical and Geological Engineering*, 28(2), 119–137.

- Matthews, M. C., Hope, V. S., & Clayton, C. R. I. (1996). The use of surface waves in the determination of ground stiffness profiles. *Proceedings of the Institution of Civil Engineers: Geotechnical Engineering*, 119(2), 84–95.
- McCarthy, D. F. (2007). Essentials of soil mechanics and foundations: Basic geotechnics (7th ed.). Upper Saddle River, NJ: Pearson/Prentice Hall.
- McGregor, J. A., & Duncan, J. M. (1998). Performance and use of the standard penetration test in geotechnical engineering practice. *Virginia Polytechnic Institute and State University*.
- Mehta, P., & Thaker, T. (2020). Development of correlations between shear wave velocity and SPT-N for Vadodara Region, Gujarat, India. *Journal of GeoEngineering*, 15(3), 145–157.
- Menzies, B. K. (2001). Interpretation of in situ tests for geotechnical design. Proceedings of the Institution of Civil Engineers: *Geotechnical Engineering*, 149(2), 73–84.
- Nazarian, S., & Stokoe, K. H. II. (1984). In-situ shear wave velocities from spectral analysis of surface waves. In *Proceedings of the 8th World Conference on Earthquake Engineering* (Vol. 3, pp. 31–38), San Francisco, CA, USA.
- Ohba, S., & Toriumi, I. (1970). Dynamic response characteristics of Osaka Plain. Proceedings of the Annual Meeting of the Architectural Institute of Japan, Tokyo, Japan.
- Ohsaki, Y., & Iwasaki, R. (1973). On dynamic shear moduli and Poisson's ratios of soil deposits. *Soils and Foundations*, 13(4), 61–73.
- Ohta, Y., & Goto, N. (1978). Empirical shear wave velocity equations in terms of characteristic soil indexes. *Earthquake Engineering & Structural Dynamics*, 6(2), 167–187.
- Özaydın, K. (1982). Zemin dinamiği. *Deprem Mühendisliği Türk Millî Komitesi Yayınları, İstanbul*.
- Pamuk, E. (2014). İzmir (Buca) bölgesinde yüzey dalgası yöntemleriyle elde edilen kayma dalgası hızlarının (Vs) analizi ve mikrotremor uygulamaları. *Yüksek Lisans Tezi, Dokuz Eylül Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İzmir*.
- Peck, R. B., Hanson, W. E., & Thornburn, T. H. (1974). Foundation engineering (2nd ed.). John Wiley & Sons, New York.
- Pitilakis, K., Anastasiadis, A., & Raptakis, D. (1992). Field and laboratory determination of dynamic properties of natural soil deposits. In *Proceedings of the 10th World Conference on Earthquake Engineering* (pp. 1275–1280).
- Raptakis, D., Anastasiadis, A., Pitilakis, K., & Lontzetidis, K. (1995). Shear wave velocities and damping of Greek natural soils. In *Proceedings of the 10th European Conference on Earthquake Engineering* (pp. 477–482), Vienna, Austria.

- Robertson, P. K., & Wride, C. E. (1997). Cyclic liquefaction and its evaluation based on the SPT and CPT. *In Proceedings of the NCEER Workshop on Evaluation of Liquefaction Resistance of Soils*.
- Seed, H. B., & Idriss, I. M. (1981). Evaluation of liquefaction potential using field performance data. *Journal of the Geotechnical Engineering Division*, 107(GT11), 1425–1445.
- Seed, H. B., Martin, G. R., & Lysmer, J. (1976). Pore-water pressure changes during soil liquefaction. *Journal of the Geotechnical Engineering Division*, 102(GT4), 323–346.
- Shahgholipour, M., Afsari, A., & Ghaseminejad, H. (2023). Correlation between shear wave velocity and standard penetration test for Nowshahr and Chalus. *Iranian Journal of Geophysics*, 17(6), 37–52.
- Sil, A., & Haloi, J. (2017). Empirical correlations with standard penetration test (SPT)-N for estimating shear wave velocity applicable to any region. *International Journal of Geosynthetics and Ground Engineering*, 3, Article 22.
- Singh, M., Duggal, S. K., & Singh, V. P. (2021). A study to establish regression correlation between shear wave velocity and "N"-value for Varanasi City, India. *Proceedings of the National Academy of Sciences, India Section A: Physical Sciences*, 91(2), 405–417.
- Sivrikaya, O., & Toğrol, E. (2009). Arazi deneyleri ve geoteknik tasarımda kullanımları. *İstanbul: Birsen Yayınevi*.
- Skempton, A. W. (1986). Standard penetration test procedures and the effects in sands of overburden pressure, relative density, particle size, aging and overconsolidation. *Géotechnique*, 36(3), 425–447.
- Sykora, D. W., & Stokoe, K. H. (1983). Correlations of in situ measurements in sands with shear wave velocity. *Geotechnical Engineering Report GR83-33, The University of Texas at Austin, Austin, TX, USA*.
- Teng, W. C. (1962). Foundation design (3rd ed.). *Prentice-Hall, Inc., Englewood Cliffs, New Jersey*.
- Terzaghi, K., & Peck, R. B. (1948). Soil mechanics in engineering practice. *John Wiley & Sons, New York*.
- Thokchom, S., Rastogi, B., Dogra, N., Pancholi, V., Sairam, B., Bhattacharya, F., & Patel, V. (2017). Empirical correlation of SPT blow counts versus shear wave velocity for different types of soils in Dholera, Western India. *Natural Hazards*, 86, 1291–1306.
- Tokimatsu, K., & Yoshimi, Y. (1983). Empirical correlation of soil liquefaction based on SPT-N value and fines content. *Soils and Foundations*, 23(4), 56–74.

- Tonyalı, İ. (2011). Laboratuvar, arazi ve jeofizik deney sonuçlarını kullanan zemin taşıma gücü hesap yöntemlerinin incelenmesi ve karşılaştırılması. *Yüksek Lisans Tezi, İstanbul Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul.*
- Tsiambaos, G., & Sabatakakis, N. (2011). Empirical estimation of shear wave velocity from in situ tests on soil formations in Greece. *Bulletin of Engineering Geology and the Environment*, 70, 291–297.
- Tüzel, B. (2009). Yüzey dalgasının ters çözümü yöntemiyle İzmir Menemen ilçesi yerleşim alanlarının kayma dalgası (V_{s30}) haritalaması. *Doktora Tezi, Süleyman Demirel Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Isparta.*
- Yunatçı, A. (2021). Kabuller ve gerçekler: Geoteknik alanındaki ölçüm teknolojileri ışığında bir adım ötesi [Seminer].