

174053

**ESKİŞEHİR ZEMİNİNİN MAKASLAMA DALGASI
HIZI (V_s) DEĞİŞİMİNE BAĞLI ÖZELLİKLERİNİN
İNCELENMESİ ve DOĞAL TİTREŞİM
PERİYODUNUN (T_0) BULUNMASI**

Muammer TÜN
Yüksek Lisans Tezi

Fen Bilimleri Enstitüsü
Fizik Anabilim Dalı
Eylül – 2003

JÜRİ VE ENSTİTÜ ONAYI

Muammer Tün'ün Eskişehir Zemininin Makaslama Dalga Hızı (Vs) Değişimine Bağlı Özelliklerinin İncelenmesi ve Doğal Titreşim Periyodunun (To) Bulunması başlıklı Fizik Anabilim Dalındaki, Yüksek Lisans tezi 02.10.2003 tarihinde, aşağıdaki jüri tarafından Anadolu Üniversitesi Lisansüstü Eğitim-Öğretim ve Sınav Yönetmeliğinin ilgili maddeleri uyarınca değerlendirilerek kabul edilmiştir.

	Adı-Soyadı	İmza
Üye (Tez danışmanı):	Prof. Dr. CAN AYDAY	
Üye	: Prof. Dr. ERTUĞRUL YÖRÜKOĞULLARI	
Üye	: Yard. Doç. Dr. METİN AŞÇI	

Anadolu Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Yönetim Kurulu'nun 08.10.2003.. tarih ve 33/2... sayılı kararıyla onaylanmıştır.

FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ
M ü d ü r ü

Anadolu Üniversitesi
Merkez Kütüphane

ÖZET

Yüksek Lisans Tezi

ESKİŞEHİR ZEMİNİNİN MAKASLAMA DALGASI HIZI (V_s) DEĞİŞİMİNE BAĞLI ÖZELLİKLERİNİN İNCELENMESİ ve ZEMİNİN DOĞAL TİTREŞİM PERİYODUNUN (T_0) BULUNMASI

MUAMMER TÜN

Anadolu Üniversitesi
Fen Bilimleri Enstitüsü
Fizik Anabilim Dalı

Danışman: Prof.Dr.Can AYDAY
2003, 114 sayfa

Eskişehir, zemin koşulları ve denetimsiz yapılaşma olgusu nedeniyle, depremden olumsuz bir biçimde etkilenebilecek bir konumdadır. Bu çalışmada, Eskişehir yerleşim yerinde belirlenen çalışma alanında olası bir depremin etkileri ele alınarak, zemin koşulları ile makaslama dalgası hızı (V_s) arasındaki ilişkisinin araştırılması amaçlanmıştır. Çalışma alanı içerisinde 32 farklı noktada Sismik Konik Penetrasyon Testi (SCPT) uygulanmıştır. SCPT sırasında q_c , R_f , V_s değerleri elde edilmiştir. Bu değerler kullanılarak Robertson (1986)'ya göre zemin türü belirlenmiştir. Elde edilen tüm verilerin frekans histogramlarına bakılmış ve zemin özelliklerini ortaya koyan tanımlayıcı istatistiksel değerlendirmeler yapılmıştır. Zemin türü değişimine bağlı gruplandırılmış CPT verileri (q_c , R_f) ile SCPT'den elde edilen V_s hızı arasındaki ilişki araştırılmıştır. Elde edilen V_s değerleri kullanılarak çalışma alanının National Earthquake Hazards Reduction Program (NEHRP)'ye göre yer sınıflaması yapılmış, zeminin doğal titreşim periyodu (T_0) hesaplanmıştır. Elde edilen tüm veriler Coğrafi Bilgi Sistemi (CBS) yöntemi kullanılarak yorumlanmıştır. Çalışma alanını doğu-batı yönlü ikiye bölen Porsuk Çayı'na paralel alüvyon zeminde bulunan 5 veya 6 katlı yapıların olası bir depremde rezonansa girebileceği değerlendirilerek, yeni yapılaşmalarda çalışma alanının bu özelliklerinin dikkate alınması önerilmiştir.

Anahtar Kelimeler: Coğrafi Bilgi Sistemi (CBS), Zemin Doğal Titreşim Periyodu (T_0), Makaslama Dalgası Hızı (V_s), NEHRP Yer Sınıflaması, Sismik Konik Penetrasyon Testi (SCPT)

ABSTRACT

Master of Science Thesis

INSPECTION OF THE SHEAR WAVE VELOCITY (V_s) CHANGE BY THE SOIL PROPERTIES AND DETERMINATION OF THE NATURAL PERIOD (T_0) OF THE SOIL IN THE ESKISEHIR URBAN AREA

MUAMMER TÜN

Anadolu University
Graduate School of Natural and Applied Sciences
Physics Program

Supervisor: Prof.Dr.Can AYDAY
2003, 114 page

The urban area of Eskişehir is under the influence of earthquake phenomena due to the poor soil properties and uncontrolled building construction. The aim of this master thesis was to find out the relationship between shear wave velocity (V_s) and soil conditions with the effect of earthquake facts. Totally 32 different points were selected and Seismic Conic Penetration Tests (SCPT) were applied in these locations. The values like q_c , R_f and V_s were obtained during the SCPT tests. Soil types according to Robertson (1986) were determined by using these values. Statistical evaluation of all the obtained data which can be used as soil property indicator was done. All the frequency histograms of these data were analysed. The relation between shear wave velocity (V_s) which was obtained from SCPT and the reorganized q_c and R_f values from CPT tests were investigated. The V_s values obtained from the relation were used for the susceptibility of the studied area deposit to ground motion amplification according to the National Earthquake Hazard Reduction Program (NEHRP). The natural period (T_0) of the studied area alluvium deposits were calculated. In the end, the all obtained data were interpreted by using geographic information system (GIS) techniques. After the interpretation it is concluded that, five and six floor buildings which are located on the alluvium along the Porsuk River will have possible phenomenon of critical resonance during probably earthquake. It is proposed, these precautions must be applied during the new urban planning stage.

Key words: Geographic information system (GIS), Natural period of soil (T_0), Shear wave velocity (V_s), National Earthquake Hazard Reduction Program (NEHRP), Seismic Conic Penetration Test (SCPT).

TEŞEKKÜR

Tez çalışmasının her aşamasında yardımcı olan, çalışmalarına yön veren, ilgi ve katkılarını esirgemeyen ve yapıcı eleştirileriyle tezin son şeklini almasında büyük desteği olan değerli hocam (tez danışmanım) Prof. Dr. Can AYDAY'a,

Böylesine güncel bir konuda çalışmaya ilk olarak yönlendiren ve tezin farklı aşamalarında görüş ve önerileriyle katkıda bulunan değerli hocam ve jüri üyesi Prof. Dr. Ertuğrul Yörükoğulları'na,

Tezin farklı aşamalarında ve jüride görüş ve önerileriyle çalışmanın yürütülmesindeki katkılarından dolayı Yard. Doç. Dr. Metin Aşçı'ya (Kocaeli Ü. Jeofizik Mühendisliği Bölümü)

Tezin alt yapısını oluşturan SCPT arazi uygulamalarında teknik katkıları ve verilerin değerlendirilmesi aşamasındaki görüş ve katkılarından dolayı Jeoloji mühendisi Hakan A. Nefeslioğlu'na (Maden Tetkik ve Arama Genel Müdürlüğü)

SCPT arazi uygulamalarındaki teknik katkıları ve tezde kullanılan bilgisayar programlarının kullanılabilmesindeki katkılarından dolayı Maden Mühendisi Ayşe Dağlıyar'a (Maden Tetkik ve Arama Genel Müdürlüğü)

Tezde kullanılan verilerin CBS kullanılarak yorumlanmasında, gerekli yazılım ve donanımların kullanılabilmesindeki katkılarından dolayı Yard. Doç. Dr. Metin Altan ve Araş. Gör. Uğur Avdan'a,

Haritalama aşamasındaki alt yapı verilerinin bazılarının oluşturulmasındaki katkılarından dolayı jeofizik mühendisi Serkan Azdiken'e (DSİ III. Bölge Müdürlüğü)

Tezin farklı aşamalarında sismik verilerin yorumlanmasında sağlamış olduğu katkılarından dolayı Prof. Dr. Mustafa Erdik'e (Boğaziçi Üniversitesi Deprem Mühendisliği Bölümü)

Tezin farklı aşamalarında önerileri ile sağlamış olduğu katkılarından dolayı Dr. Kemal Beyen'e (Boğaziçi Üniversitesi Deprem Mühendisliği Bölümü)

Tezin farklı aşamalarında önerileri ile sağlamış olduğu katkılarından dolayı Fizikçi Muzaffer Gül'e (Boğaziçi Üniversitesi Deprem Mühendisliği Bölümü)

Tezin farklı aşamalarında önerileri ve sismik verilerin yorumlanmasındaki katkılarından dolayı Prof. Dr. Cengiz Kurtuluş'a (Kocaeli Ü. Jeofizik Mühendisliği Bölümü)

Tezin farklı aşamalarında önerileri ile sağlamış olduğu katkılarından dolayı Prof. Dr. Haluk Eyidoğan'a (İ.T.Ü. Jeofizik Mühendisliği Bölümü)

Tez çalışmalarının son şeklini almasında manevi destekleri için A.Ü. Fizik Bölümü öğretim üyeleri Prof. Dr. Önder ORHUN, Yard. Doç. Dr. Metin Kul ve Yard. Doç. Dr. Şenol AYBEK'e,

Tezin son şeklinin oluşturulmasındaki teknik katkıları ve görüşlerinden dolayı Araş. Gör. Mutlu UYGUN'a,

Çalışmanın tüm aşamalarında manevi destek sağlayan, gösterdikleri sabır ve yardımlarından dolayı aileme, TEŞEKKÜR ederim.

İÇİNDEKİLER

	<u>Sayfa</u>
ÖZET	i
ABSTRACT.....	ii
TEŞEKKÜR.....	iii
İÇİNDEKİLER	v
ŞEKİLLER DİZİNİ	vii
ÇİZELGELER DİZİNİ	xii
SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ	xiii
1. GİRİŞ	1
2. BÖLGESEL DEPREM RİSKİ VE ÖNCEKİ ÇALIŞMALAR.....	5
3. ÇALIŞMA ALANININ ÖZELLİKLERİ.....	13
3.1. Coğrafik Konum.....	14
3.2. Çalışma Alanının Jeolojisi.....	17
4. SİSMİK KONİK PENETRASYON TESTİ (SCPT) VE SAHA ÇALIŞMALARI	20
4.1. Sismik Konik Penetrasyon Testi (SCPT).....	20
4.2. Saha Çalışmaları.....	23
4.2.1. Konik Penetrasyon Testi (CPT) ve uygulaması.....	24
4.2.2. SCPT'nin uygulanması	28
5. LABORATUVAR ÇALIŞMALARI.....	32
5.1. Sismik Verinin İşlenmesi	33
5.2. CPT Verisinin İşlenmesi	38
5.3. CBS Kullanılarak Verilerin Yorumlanması	38

6. İSTATİSTİKSEL DEĞERLENDİRMELER	47
6.1. Zemin Özelliklerini Tanımlayıcı İstatistiksel Değerlendirmeler.....	50
6.2. CPT Zemin Parametreleri ile $V_{s\text{ara}}$ Hızı İlişkisinin Belirlenmesi.....	54
6.2.1. Elde edilen ilişki fonksiyonları kullanılarak yöntemin sınanması	61
7. ÇALIŞMA ALANININ NEHRP YER SINIFLAMASI VE T_0 HARİTASININ BELİRLENMESİ	64
8. SONUÇLAR VE ÖNERİLER.....	71
KAYNAKLAR	73
EKLER	76

ŞEKİLLER DİZİNİ

2. 1.	Yerkürenin Katmanları	5
2. 2.	Yerkürenin evriminin şematik biçimlendirmesi	5
2. 3.	Bölgesel tektonik harita	6
2. 4.	Türkiye'nin tektonik kurgusu	7
2. 5.	Türkiye Deprem Bölgeleri Haritası	8
2. 6.	17 Ağustos 1999 İzmit Depremi Mercalli Yoğunlukları ile tanımlanmış eşşiddet eğrileri haritası	8
2. 7.	Eskişehir yerleşim yeri ve civarının sismik aktivite durumu ve deprem kaynak alanları.....	9
2.8.	Zemin tabakalarının yerel özelliklerini yaklaşık olarak yansıttığı kabul edilen eşdeğer makaslama dalga hızına göre zemin büyütmesinin değişimi.....	10
2.9.	Zemin büyütmesinin ve zemin hakim periyodunun yaklaşık olarak hesaplanabildiği mikrotremor deney sonuçlarına bir örnek	10
2.10.	Memphis alanındaki test noktalarının konumları	12
3.1.	Çalışma alanının Türkiye ve çevre iller ile olan konumunu gösteren harita	13
3.2.	Eskişehir yerleşim alanı içine giren 1/25.000 ölçekli paftalar	14
3.3.	Eskişehir Ovası civarındaki İnönü ve Alpu Ovaları.....	15
3.4.	Çalışma sahasını içine alan bölgenin sayısal arazi modeli	16
3.5.	Çalışma alanını içine alan bölgenin sayısal alüvyon kalınlığı modeli	17
3.6.	Yeni alüvyon profili, Hasan Polatkan Bulvarı sonu.....	18
3.7.	Eskişehir ilini kapsayacak şekilde Doğu Marmara ve KD Ege Bölgesini içeren alandaki başlıca faylar ve önemli depremlerin merkez üsleri	19
4.1.	USGS CPT aleti üzerinde sinyalin gönderilmesi ve sismometrenin fotoğrafı	21
4.2.	Sismik konik penetrometre.....	21

4.3.	Dikey dalgaların yaratmak için uygulanan metodlar (a) dikey etki (b) sığ patlatma (c) yatay etki (d) frekans kontrollü yüzey dalgaları	22
4.4.	Memphis, Tennessee'den SCPT kayıt profili	22
4.5.	Çalışma alanının köşe noktalarının UTM koordinatları ve çalışma alanında SCPT uygulama noktaları	23
4.6.	Çalışmada kullanılan Sismik Konik Penetrasyon Test (SCPT) aleti...	24
4.7.	q_c ve f_s değerlerinin u 'ya bağlı olarak düzeltilmesinde kullanılan parametrelerin sonda üzerinde şematik gösterimi	25
4.8.	SCPT aletinin zemin üzerine sabitlenmesi. (a) karot (b) karotun zemine itilmesi (c) SCPT aletinin karotlara bağlanması	26
4.9.	21 nolu Konik Penetrasyon Testi (CPT) kaydı.....	27
4.10.	SCPT elemanları ve kullanılan konik ucun bölümleri	28
4.11.	Sismik kablosunun hazırlanması ve işlem kontrol ekranı	28
4.12.	Sismik Konik Penetrasyon Testi'nin şematik planı.....	29
4.13.	SCPT aletinde sismik sinyalin oluşturulması	29
4.14.	SCPT' de 1 m aralıklı ve 5 farklı derinlikte kaydedilen sismik sinyal izlerine bir örnek	30
4.15.	Jeofizik rezistivite ölçüm noktaları	31
5.1.	Çalışma alanındaki 32 nolu SCPT'nin 3.3m seviyesindeki sismik kaydı (a) sismik iz (b) frekans spektrumu	33
5.2.	Tam ve sahte aralıklı seyahat zamanlarının karşılaştırılması	34
5.3.	İki farklı seviyeden alınan sismik kayıt (a) filtrelenmemiş sismik iz (b) sismik sinyalin frekans spektrumu (c) filtrelenmiş sismik iz.....	35
5.4.	SC1-DAA bilgisayar yazılımı kullanılarak hesaplanmış V_s ara hızı	36
5.5.	SCPT'de V_s hızının hesabı.....	36
5.6.	Çalışma alanındaki 32 nolu SCPT sismik kaydının derinlik profili ve V_s ara hızları.....	37
5.7.	23 nolu SCPT sismik profilindeki V_s hızları (a) V_s ara hızı (b) V_s ortalama hız.....	38
5.8.	Robertson vd. (1986) zemin sınıflaması abağı üzerinde q_t ve R_f değerlerinin değişimi ve bölgelere karşılık gelen zemin türleri	39

5.9.	3 nolu CPT kaydı zemin profili (a) elimine edilmemiş profil (b) Sismik uygulama aralığında elimine edilmiş profil.....	40
5.10.	Yorumlanmış sismik verinin CBS'nde değerlendirmesi ve 32 nolu SCPT'ne ait öznitelik bilgileri.....	42
5.11.	Çalışma alanı SCPT uygulama noktaları ve makaslama dalgası hızı haritası	43
5.12.	Çalışma alanı makaslama dalgası ara hızı ($V_{s_{ara}}$) değişiminin modellenmesi.....	44
5.13.	Çalışma alanını içine alan bölgenin Robertson vd. (1986)' ne göre zemin türü modellenmesi	45
5.14.	Çalışma alanında rezistivite ölçüm noktaları ve alüvyon kalınlığı haritası	46
6.1.	Çalışma alanındaki SCPT verisinin frekans histogramları a) $V_{s_{ara}}$ hızı frekans histogramı b) zemin türü frekans histogramı.....	49
6.2.	İstatistiksel analizde kullanılan SCPT uygulama noktaları	51
6.3.	SCPT veri frekans histogramları a) $V_{s_{ara}}$ hızı frekans histogramı b) zemin türü frekans histogramı.....	52
6.4.	Uç dirence (q_c) ait frekans histogramı ve gamma dağılım fonksiyonu	53
6.5.	Sürtünme oranına (R_f) ait frekans histogramı ve normal dağılım fonksiyonu	53
6.6.	Makaslama dalgası hızına (V_s) histogramı ve log-normal dağılım fonksiyonu	53
6.7.	Zemin türüne ait frekans ait frekans histogramı.....	54
6.8.	Farklı zemin türlerinin uç direnç (q_c) – makaslama dalgası hızı (V_s) ilişkisi.....	54
6.9.	Farklı zemin türlerine ait sürtünme oranı (R_f) – makaslama dalgası hızı (V_s) ilişkisi.....	55
6.10.	Farklı zemin türlerinin q_c frekans histogramları a) kil b) siltli kil c) killi silt d) siltli kum e) kum.....	57
6.11.	Farklı zemin türlerinin R_f frekans histogramları a) kil b) siltli kil c) killi silt d) siltli kum e) kum.....	58

6.12.	Farklı zemin türlerinin V_s frekans histogramları a) kil b) siltli kil c) killi silt d) siltli kum e) kum	59
6.13.	Uç direnç (q_c) - makaslama dalgası hızı (V_s) ilişkisi	60
6.14.	Sürtünme oranı (R_f) - makaslama dalgası hızı (V_s) ilişkisi	61
6.15.	$(V_s)_g$ değerleri ile q_c ve R_f 'den belirlenen $(V_s)_b$ değerleri arasındaki ilişki	63
7.1.	Central US bölgesinde NEHRP yer sınıflamasıyla ilişkili olarak geliştirilen zemin büyütmesinin değişimi	65
7.2.	Çalışma alanı NEHRP 1997 yer sınıflaması haritası	66
7.3.	Çalışma alanında belirlenen T_0 değerleri frekans histogramı	69
EK-4.1.	Yansıma sismiği ekipmanının genel diyagramı.....	85
EK-4.2.	Yansıma Sismiği uygulamasının geometrisi.....	87
EK-4.3.	Yansıma sismiği geometrisi.....	88
EK-4.4.	Pozitif yansıma katsayılı bir sınırdan minimum ve sıfır fazlı dalgacıkların normal ve ters polariteli yansımaları.....	89
EK-4.5.	Kırılma Sismiği uygulamasının geometrisi	90
EK-4.6.	Yansıtıcı yüzey boyunca kırılma geometrisi	90
EK-4.7.	Sismik refraksiyon yöntemi geometrisi	91
EK-4.8.	Fermat prensibi geometrisi	93
EK-4.9.	Farklı hızlı ortamda ışın ilerleme geometrisi	93
EK-4.10.	Snell yasası geometrisi.....	93
EK-4.11.	Huygens prensibi geometrisi	94
EK-4.12.	Cisim dalgalarının zeminde oluşturduğu deformasyon hareketi	94
EK-4.13.	S Dalgasının yayıldığı ortamda meydana getireceği deformasyon ..	96
EK-4.14.	Cauchy Stress prensibi.....	97
EK-4.15.	Bir paralelkenar üzerine etkiyen stress vektörleri	98
EK-4.16.	Bir paralelkenar üzerine etkiyen stress tensörleri	98
EK-4.17.	Stress etkisi altında kalmış elastik bir cisim üzerinde meydana gelen deformasyon.....	99
EK-4.18.	Stress etkisi altında kalmış elastik bir cisim üzerinde meydana gelen deformasyon.....	100

EK-4.19. Makaslama gerilmesi altında kalmış dikdörtgen eleman üzerinde meydana gelebilecek deformasyon	101
EK-4.20. Hacimsel deformasyon ve dönme etkisi	103
EK-4.21. a.makaslama deformasyonu,b.sert malzemede makaslama deformasyonu	103
EK-4.22. Elastisite veya Young Modülü.....	106
EK-4.23. Hacim elemanına uygulanan dış kuvvetler	106
EK-4.19. Makaslama gerilmesi altında kalmış dikdörtgen eleman üzerinde meydana gelebilecek deformasyon	101
EK-4.20. Hacimsel deformasyon ve dönme etkisi	103
EK-4.21. a.makaslama deformasyonu,b.sert malzemede makaslama deformasyonu	103
EK-5. Çalışma alanının doğal titreşim periyodu haritası	116

ÇİZELGELER DİZİNİ

2.1.	NEHRP yer sınıflaması (NEHRP,1997).....	11
4.1.	SCPT uygulama noktalarının koordinatları ve kayıt derinliği.....	23
5.1.	CPT’de dolaylı olarak belirlenen zemin parametreleri.....	39
6.1.	Uç direnç (q_c), makaslama dalgası hızı (V_s) ve sürtünme oranı (R_f) parametrelerinin tanımlayıcı istatistiksel analiz sonuçları	51
6.2.	Zemin Parametrelerinin Olasılık Dağılım Modellerine Uygunluk Testi (X^2) Sonuçları	52
6.3.	Farklı zemin türlerinin q_c - V_s ve R_f - V_s ilişkilerinin r değerleri	55
6.4.	Farklı zemin türlerinin q_c , V_s ve R_f değerleri.....	56
6.5.	8 farklı SCPT uygulama noktasında hesaplanan ($V_{s_{ort}}$) _b ve ölçülen ($V_{s_{ort}}$) _g hızları.....	62
7.1.	NEHRP yer sınıflaması (NEHRP, 1997).....	65
7.2.	Çalışma alanında SCPT uygulama noktalarında hesaplanan T_0 değerleri	68
7.3.	Betonarme binaların öz salınım periyot değerleri	70
EK-1.	Çalışmada Kullanılan SCPT Aletinin Standartları	77
EK-2.	SCPT’den elde edilen verilerin değerleri	78
EK-3.	CPT sondajlarından elde edilen verilerin sismik uygulama aralıklarındaki değerleri.....	82
EK-4.1.	Poisson oranının zemin türüne bağlı değişimi.....	110

SİMGELER ve KISALTMALAR DİZİNİ

- A_L : Sürtünme kolunun alt kesit alanı (cm^2)
 A_N : Konik ucun net kesit alanı (cm^2)
 A_S : Sürtünme kolunun alanı (cm^2)
 A_U : Sürtünme kolunun üst kesit alanı (cm^2)
 A_T : Konik ucun toplam kesit alanı (cm^2)
 F_C : konik uca etkiyen kuvvet (N)
 F_S : Sürtünme koluna etkiyen yanal sürtünme (N)
 H : Zemin tabakası kalınlığı (m)
 H_N : Bina yüksekliği (m)
 L : Kaynak-alıcı uzaklığı (m)
 N : Örnek sayısı
 N_{60} : SPT enerji oranı
 R_f : Sürtünme oranı (%)
 S : Makaslama dalgası
 S_u : Drenajsız makaslama dayanımı (MPa)
 T_1 : Bina öz salınım periyodu (s)
 T_o : Zemin doğal titreşim periyodu (s)
 V_s : Makaslama dalgası hızı (m/s)
 a : Sabit alan çarpanı
 f_s : Yanal sürtünme (MPa)
 f_t : Boşluk suyu basıncına bağlı olarak düzeltilmiş yanal sürtünme (MPa)
 q_c : Uç direnç (MPa)
 q_t : Boşluk suyu basıncına bağlı olarak düzeltilmiş konik uç direnci (MPa)
 r : Korelasyon katsayısı
 t : Sismik sinyalin sismik alıcıya varış zamanı (s)
 u : Boşluk suyu basıncı (MPa)
 u_u : Sürtünme kolunun üst kesit alanına etkiyen boşluk suyu basıncı (MPa)
 x : Yatay doğrultuda ofset açıklığı
 z : Sismik alıcının bulunduğu derinlik (m)

Alt ve üst indisler

- a : Ara tabaka
b : Belirlenen (hesaplanan)
g : Gerçek (ölçülen)
ort: Ortalama

1. GİRİŞ

Her yıl ülkemizde ve dünyada birkaç defa şehirleri ve sanayi kuruluşlarını yerle bir edecek şiddette depremler olmaktadır. Yapılan istatistikler yılda ortalama 1 tane 8'den büyük Richter ölçüsüne sahip, 3 tane 7.5'den büyük, 15 tane de 7'den büyük depremlerin olduğunu göstermektedir [37]. Türkiye'nin dünyanın önemli aktif kuşaklarından biri olan Alp Himalaya orojenik kuşağında yer almasından dolayı bu depremlerden payını fazlasıyla almakta, can ve mal kayıpları milli ekonomiyi sarsacak boyutlara erişmektedir. Yerleşim bölgelerinde oluşan depremler uzun ve kısa dönemli sağlık, ulaşım, iletişim, eğitim ve toplum düzeni gibi sosyal yaşantımızın her alanını olumsuz bir şekilde etkilemektedir.

Son yıllarda meydana gelen depremlerde oluşan hasarlar ve bu konuda yapılmakta olan araştırmalardan elde edilen sonuçlar, depremin özellikleri ile yerel zemin koşulları arasındaki etkileşimin oldukça önemli olduğunu göstermiştir [8,9]. Her depremin sadece bir büyüklüğü olmasına karşın, yer kabuğunun değişik noktalarında, yer titreşimlerinin hissedilen şiddetleri farklı olduğu ve depremde enerjinin kaynağını oluşturan yırtılan faydan yayılan sismik dalgalar, yer kabuğunun heterojen katmanlarından geçerken çok karmaşık biçimde kırılma ve yansımalara uğradıkları bilinmektedir [32]. Deprem dalgaları, zemin tabakaları içinden geçerken depremin yerel etkilerinin değişmesi ile birlikte, bu dalgalar, zemin tabakalarının özelliklerini de etkilemektedir. Bu etki bir yumuşama ve dayanım (mukavemet) yitimine yol açabilmektedir.

Zemin, içinden geçen deprem dalgalarının özelliklerini etkilediği kadar, deprem dalgaları da, örneğin sıvılaşma ve şev kaymalarında gözleendiği gibi, zemin tabakalarının dayanım (mukavemet) ve şekil değiştirme özelliklerini de etkiler. Jeoteknik yerel zemin koşullarının etkisini incelerken, arazideki zemin tabakalaşması, zeminin cinsi, ana kaya derinliği, jeolojik yapı, yer altı su seviyesi de önemlidir. Zemin tabakalarının kalınlığı, kıvam ve esnekliği, plastisitesi, zemin büyütmesi olarak tanımlanan, zemin yüzeyindeki deprem özelliklerinin büyümesine yol açabilen etkenlerdir. Zemin tabakalarının depremler sırasında gösterecekleri bu etkilerin belirlenmesinde bu etkenlerin ayrıntılı bir biçimde incelenmesi gereklidir [8].

Günümüzde basit ve kolay bazı yöntemler geliştirilmiştir. Bunlar arasında, en önemlisi zemin tabakalarının üst bölümünde ölçülen makaslama dalgası hızlarının kullanılmasıdır. Deprem riskinin yüksek olduğu bölgelerde ayrıntılı sismolojik, jeolojik, istatistik ve jeoteknik incelemelerin yapılması gerekir. Bu çalışmalardan elde edilen sonuçlar değerlendirilerek, risk taşıyan bölgede oluşabilecek depremlerin özellikleri ve bu özelliklerin farklı jeolojik ve zemin koşullarındaki etkilerini belirlemek mümkündür. Deprem yer hareketleri sonucu oluşan sismik dalgaların zemin içerisinde ilerleme hızlarının ölçümü ilgili zeminde meydana gelebilecek deformasyonun ve deformasyon büyüklüğünün belirlenmesinde önemli bir parametredir [8,38]. Bu çalışmada deprem riski taşıyan bölgede deprem yer hareketleri sonucu zeminin tepki karakteristiklerinin belirlenmesinde anahtar bir parametre olan Makaslama Dalgası hızının (V_s) ölçülmesi amaçlanmıştır

Arazide zemin tabakalarının özelliklerinin belirlenmesinde, makaslama dalgası hızlarının ölçülmesi için farklı yöntemler kullanılmaktadır [20]. Bu yöntemler uygulanarak ve zemin türleri ve mühendislik özellikleri yeterli sayıda sondaj ve laboratuvar deneyleri ile belirlenerek, zeminde oluşacak deprem özellikleri tahmin edilebilir. Böyle bir inceleme sonucunda zeminde yer alan veya alacak olan mühendislik yapılarına gelecek deprem kuvvetlerinin daha doğru ve gerçekçi bir biçimde tahmin edilmesi mümkündür. Zemin ile sismik dalgalar birbirini etkileyen sistemin iki önemli parçası olarak düşünülebilir. Zeminin deprem dalgalarını etkilemesi zeminin iç yapısını ortaya çıkarmada oldukça önemliyse de asıl amaç; sismik dalgaların zemini ne şekilde etkileyeceği sorusuna yanıt aranması ve olası bir depremde zeminin ne şekilde davranış sergileyeceğini bulmaktır.

1985 Mexico City ve 1995 Kobe depremindeki aşırı hasar kuşağında deprem şiddetini arttıran yerel zemin koşullarının en önemli faktörlerden biri olduğu mühendislik sismolojisi, sismik ve zemin dinamiği mühendislik çalışmalarıyla aydınlatmıştır. Bu nedenle Japonya, Meksika ve A.B.D.'de deprem bölgelerinin yerel zemin koşullarının jeoteknik özelliklerinin yukarıda saydığımız yöntemlerle yeniden inceleme projeleri geliştirilmiştir. Buna somut örnek son 7.6 büyüklüğündeki Meksika depreminde ancak 14 kişinin ölmesi gösterilebilir [9].

Kentsel yerleşim ve sanayi bölgelerinde deprem tehlikesinin belirlenmesi amacıyla mikrobölgelendirme haritaları kullanılır. Deprem tehlikesi senaryoları ve mikrobölgelendirme çalışmaları Coğrafi Bilgi Sistemi (CBS) teknolojisine dayalı olarak yapılmaktadır [39]. Eskişehir’de mikrobölgelendirme çalışmalarına bir temel oluşturmayı amaçlayan bu çalışma kapsamında Eskişehir yerleşim yerinin bir kısmını içine alan bölgenin zemin özellikleri çalışılmıştır.

Eskişehir’in coğrafi konum olarak Türkiye Deprem Bölgeleri Haritasında II. bölgede yer alması ve geçmiş yıllarda 6.4 büyüklüğünde deprem yaşanması nedeni ile depremelliğin yüksek olduğu bilinmektedir. Çalışma alanının 1999 Marmara depreminden etkilenmesi bu çalışmanın gerekliliğini ortaya koyan oldukça önemli neden olarak görülmüştür. Bu çalışmada bölgedeki deprem riski göz önünde bulundurularak olası bir depremde zeminden kaynaklanabilecek yapısal hasarların meydana gelebilirlik yüzdeleri belirlenmeye çalışılmıştır. Bu kapsamda Eskişehir yerleşim alanı içerisinde 25 km² ‘lik bir alanı içine alan yeni alüvyon üzerinde 32 farklı noktada Sismik Konik Penetrasyon Testi (SCPT) yapılmıştır. SCPT uygulamasında 154 katmanda uç direnç (q_c), yanal sürtünme (f_s) ve makaslama dalgası hızı (V_s) değerleri ölçülmüştür. Aynı katmanlara ait sürtünme oranı (R_f), drenajsız makaslama dayanımı (S_u), SPT enerji oranı (N_{60}), katmanların Robertson vd. (1986)’ne göre zemin sınıfları ve zemin doğal titreşim periyodu (T) hesaplanmıştır. Ölçülen makaslama dalgası hızı, uç direnç ve yanal sürtünme, hesaplanan sürtünme oranı ve zemin türlerinin tanımlayıcı istatistiksel analizi yapılmıştır. Ölçülen ve hesaplanan zemin özellikleri sayısal verileri ile makaslama dalgası hızı korelasyonu değerlendirilmiştir.

Elde edilen sonuçlar SCPT donanımına ait yazılımlar kullanılarak sayısal ortama aktarılmış ve amaca uygun kullanımı amaçlayan veri tabanı oluşturulmaya çalışılmıştır. Bu çalışmada elde veriler ile hazırlanan tüm haritalar sayısal ortamda hazırlanmıştır. Haritaların hazırlanması ve bu haritalar kullanılarak analizlerinin yapılmasında Coğrafi Bilgi Sistemi (CBS) yöntemi kullanılmıştır. Sayısallaştırılan haritalara ait sayısal elemanlar ve bu elemanların grafik ve öznetelik değerleri bilgisayar ortamında oluşturulmuştur.

Çalışılan sahasının ayrıntılı jeolojisi ve SCPT ’nin uygulandığı yeni alüvyon zemini hakkındaki ön değerlendirmede, Anadolu Üniversitesi Uydu ve

Uzay Bilimleri Araştırma Enstitüsü tarafından 2001 yılı içerisinde tamamlanan “Eskişehir Yerleşim Yerinin Yerleşim Amaçlı Jeoloji Ve Jeoteknik Etüt Raporu” dan yararlanılmıştır. Yeni alüvyon biriminin kalınlığının belirlenmesinde ise, Eskişehir DSİ III. Bölge Müdürlüğü’nün 2001 yılı içerisinde hazırladığı “Jeofizik Rezistivite Etüt Raporu” kullanılmıştır.

Verilerin CBS ortamında yorumlanması ile elde edilen haritalar:

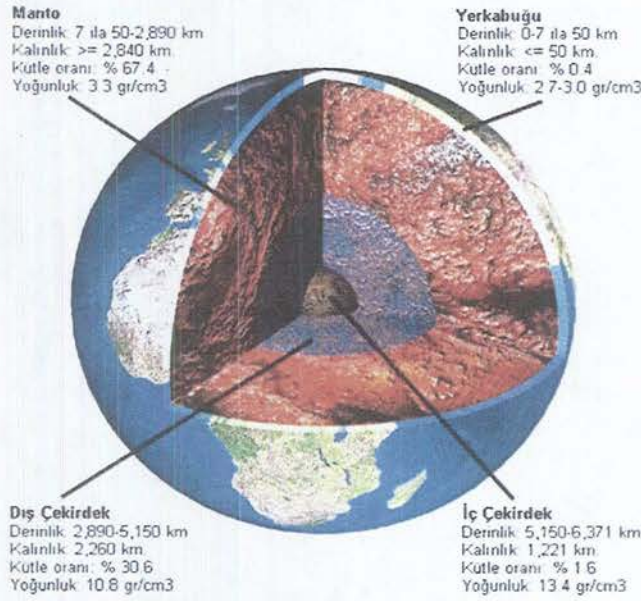
- ◆ SCPT uygulama noktaları haritası,
- ◆ Makaslama dalgası hızı (V_s) haritası,
- ◆ Rezistivite uygulama noktaları ve alüvyon kalınlığı haritası,
- ◆ Doğal titreşim periyodu (T_0) haritası.

Elde edilen verilerin derinlikle değişiminin kontrol edilebilmesi ve amaca yönelik yorumlamaların yapılabilmesi amacı ile üç boyutlu CBS modellemelerinden yararlanılmıştır. Bu amaçla oluşturulan modeller:

- ◆ Makaslama dalgası hızı modeli,
- ◆ Robertson vd. (1986) ‘ne göre zemin türü modeli,
- ◆ Alüvyon kalınlığı modeli.

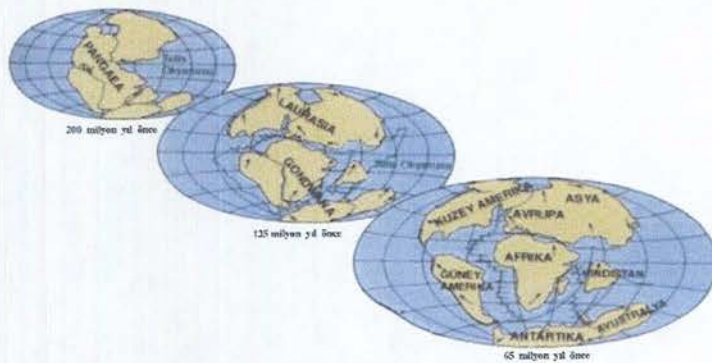
2. BÖLGESEL DEPREM RİSKİ VE ÖNCEKİ ÇALIŞMALAR

Önceki çalışmalardan bahsetmeden önce genel bir sismotektonik tanım ve Türkiye'nin bölgesel sismotektoniğinin tanımlaması uygun olacağı düşünülmüştür. Plaka tektoniği kuramının ortaya koyduğu dinamik tektonik, belirli kuşaklar boyunca depreme neden olan enerjinin nasıl birikebileceğini açıklamıştır [1,2]. Yerbilim çalışmaları ile yapısı anlaşılmaya çalışılan yerküreye ait bilgilerin çoğu, sismik dalgaların incelenmesi ile elde edilmiştir. Yerküre'nin katmanlarının şematik gösterimi Şekil 2.1'de gösterilmiştir.



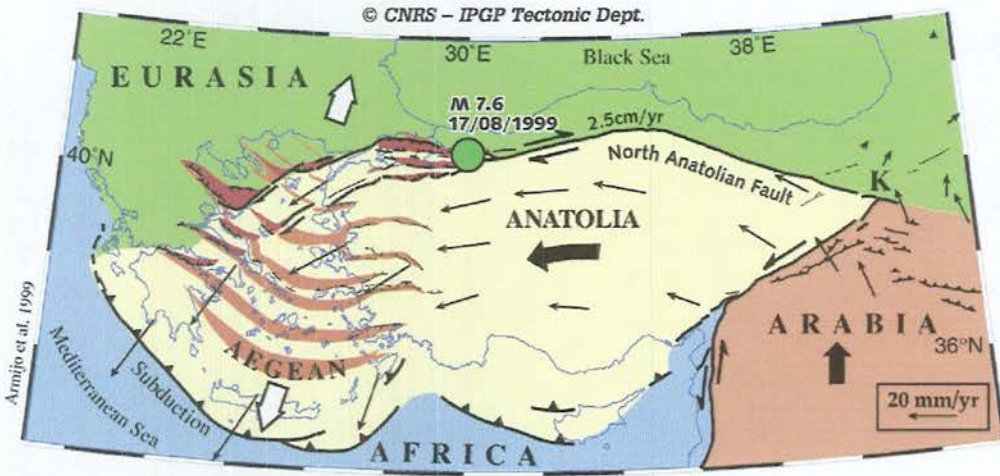
Şekil 2. 1. Yerkürenin Katmanları [3]

Plaka tektoniği kuramına göre yerküre 200 milyon yıl öncesinden günümüzdeki şeklini alıncaya kadar bir evrimden geçmiştir (Şekil 2.2).



Şekil 2. 2. Yerkürenin evriminin şematik biçimlendirmesi [3]

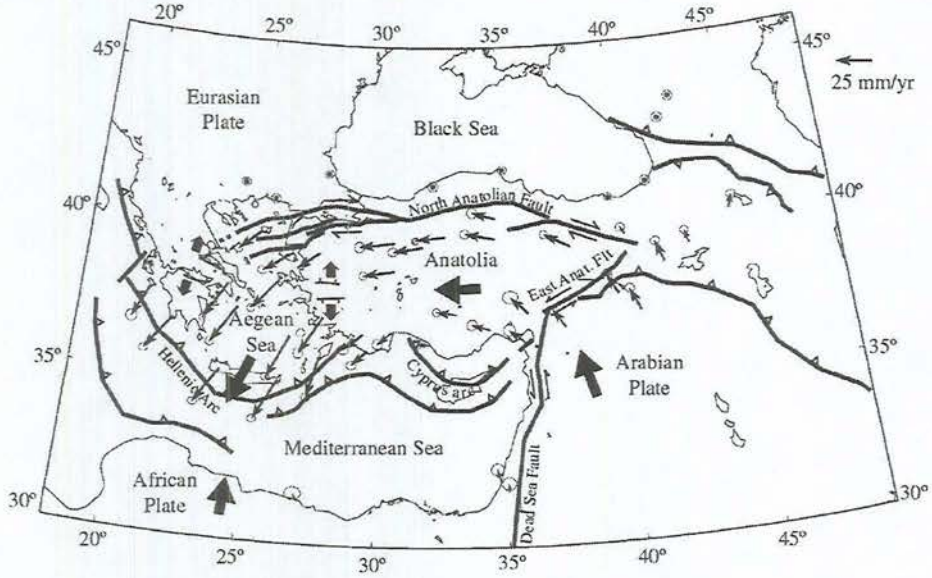
Yerkabuğunu oluşturan plakaların birbirine sürtündükleri, birbirini sıkıştırdıkları, birbirinin üzerine çıktıkları ya da altına girdikleri sınırları; dünyada depremlerin gerçekleştiği bölgeler olarak karşımıza çıkmaktadır. Eskişehir'in etkilendiği 17 Ağustos 1999 (MW=7.4) Kocaeli depremi ve 12 Kasım 1999 (MW= 7.2) Düzce depremi Arabistan ve Avrasya Levhaları'nın arasında sıkıştırılmış olan, Anadolu bloğu olarak bilinen kıtasal kabuğun sıkıştırılması hareketinin sonucu olduğu bilinmektedir [4]. Bu hareket 2 ana çarpma-kayma faylarını barındırır: Kuzey ve Doğu Anadolu Fayları (Şekil 2.3). Şekilden görüldüğü gibi Kuzey ve Doğu Anadolu Fayları arasında kalan Anadolu ve Asya Bloklarının ötelenmesi batıya doğrudur. Genel hareket Avrasya'ya bağlanır (GPS and SLR velocity vectors, in mm/yr, from Reilinger et al., 1997).



Şekil 2. 3. Bölgesel tektonik harita (<http://www.ipgp.jussieu.fr>)

Uzun zaman periyotlu jeolojik çalışmalar Kuzey Anadolu Fayının kayma hızının 2.5 cm/yıl olduğunu göstermektedir (Hubert, 1998). Türkiye'nin tektonik kurgusunun belirlenmesi amaçlı, hız ölçümü 1988-1998 yılları arasındaki süreçte Global Konumlama Sistemi (GPS) kullanılarak ölçülmüştür (McClusky et al. 2000) (Şekil 2.4). Deprem devirlerini anlamaya yönelik problemlerin çözümünde önemli bir potansiyele sahip yeni bir teknik olan radar interferometri (InSAR), yerin 800 km üzerindeki yörüngede bulunan uydulardan elde edilen verilerin işlenmesi ile gerçekleşir [5]. Bu çalışma, bölgesel sismotektonik evrimin sonucu olarak gelişen yerel sismik risklerin belirlenmesi amaçlı çalışmaların bir temeli

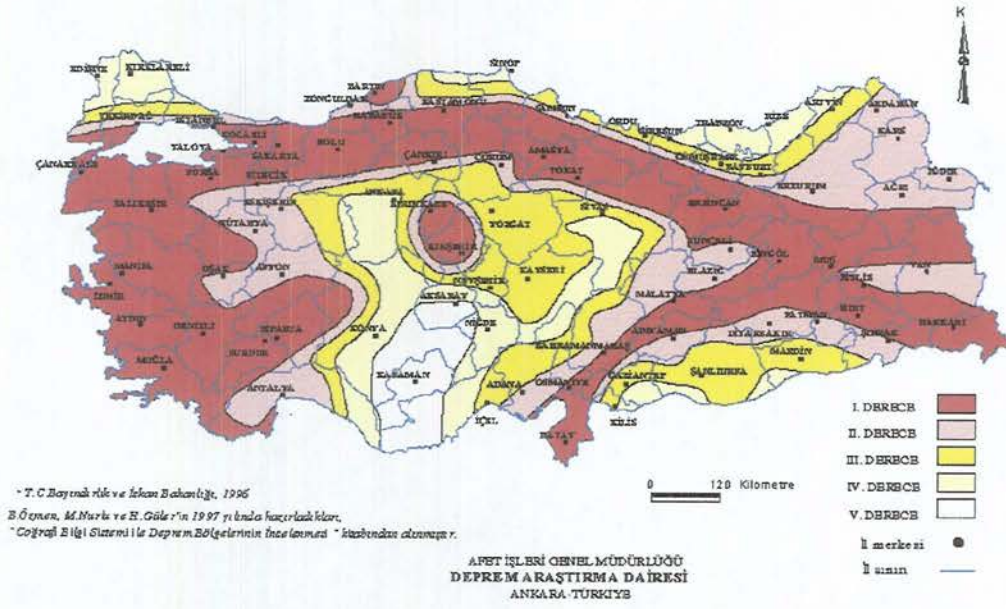
olarak görülebilir. Nitekim yerel zemin koşullarının belirlenmesi, bu tür çalışmaların devamı olarak oldukça gerekli ve önemlidir. Özellikle ülkemizdeki çarpık yapılaşma ve yapılaşmaya uygun olmayan zeminlerde kurulmuş kentsel alanlarda deprem risk analizlerinin yapılması gerekmektedir.



Şekil 2. 4. Türkiye'nin tektonik kurgusu (McClusky et al. 2000) [5]

“Türkiye Deprem Bölgeleri Haritası” olarak adlandırılan haritaya göre Eskişehir II. Derecede Deprem Bölgesi içinde yer almaktadır (Şekil 2.5). Eskişehir yerleşim alanını ve civarını etkileyebilecek bir depremin oluşturabileceği en büyük yer ivmesinin en az 0.3 g, en çok 0.4 g olması beklenmektedir [6].

Eskişehir yerleşim yerinin Kuzey Anadolu Fayı'na uzaklığı 80 km olup büyük bir bölümü kil, silt, kum ve çakıl malzemelerinden oluşan alüvyal bir zemin üzerine kurulmuştur [6] ve 17 Ağustos 1999 İzmit Depremi'nden etkilenen iller arasına girmektedir (Şekil 2.6) [7].



Şekil 2. 5. Türkiye Deprem Bölgeleri Haritası (Bayındırlık ve İskan Bak., Deprem Araş. Dairesi, 1996)



Şekil 2. 6. 17 Ağustos 1999 İzmit Depremi Mercalli Yoğunlukları ile tanımlanmış eşşiddet eğrileri haritası (<http://earthquake.usgs.gov>)

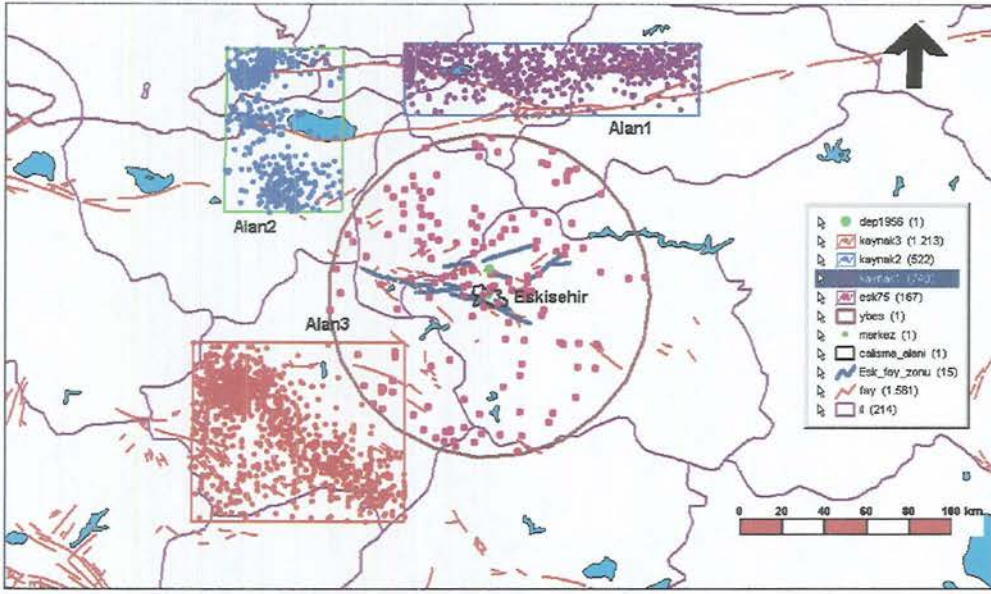
Deprem risk analizi konusunda yapılacak çalışmaların başında, o bölgenin depremselliğinin ortaya çıkartılması öncelikli çalışmalardan biridir. Depremsellik, deprem ile ilgili değişkenler kullanılarak, o bölgenin depremden etkilenme olasılığının belirlenmesi ile ortaya konulabilmektedir.

Bir bölgenin sismik tehlike analizinin yapılabilmesi için farklı yöntemler geliştirilmiştir. Bu yöntemler;

- Deterministik yöntemle sismik tehlike analizi (Reiter, 1990),

b) Olasılığa dayalı yöntemle sismik tehlike analizi (Cornell, 1968, Algermissen et. al., Reiter, 1990).

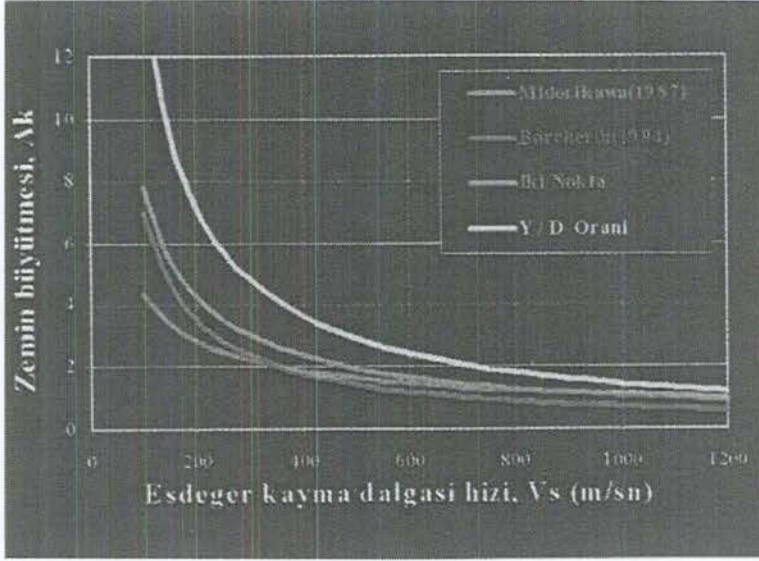
Anadolu Üniversitesi Uydu ve Uzay Bilimleri Araştırma enstitüsü tarafından hazırlanan “Eskişehir Yerleşim Yerinin Yerleşim Amaçlı Jeoloji ve Jeoteknik Etüt Raporu” kapsamında her iki yöntem de kullanılmıştır. Eskişehir yerleşim yeri ve civarının sismik aktivite durumu ve deprem kaynak alanları Şekil 2.7’de verilmiştir. Coğrafi Bilgi Sistemi kullanılarak hazırlanan bölgenin sismik aktivite durumu incelendiğinde sismik aktivitenin arttığı bölgelerin, tektonik hatların bulunduğu yerlere karşılık geldiği görülmüştür [6].



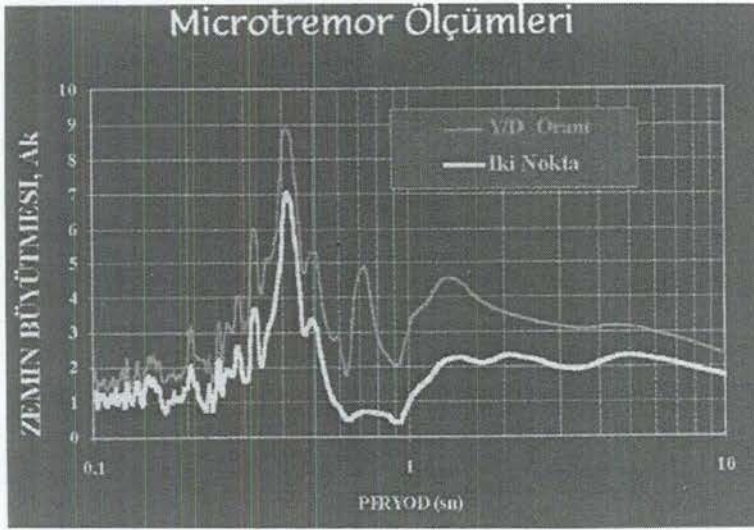
Şekil 2. 7. Eskişehir yerleşim yeri ve civarının sismik aktivite durumu ve deprem kaynak alanları [6]

Zemin tabakalarının depremler sırasında gösterecekleri etkilerin belirlenmesinde bölgenin jeolojik ve jeoteknik özelliklerinin ayrıntılı mikrosismik çalışmaları ile incelenmesi gereklidir. Günümüzde daha basit ve daha kolay bazı yöntemlerde geliştirilmiştir. Bunlar arasında, zemin tabakalarının üst bölümünde ölçülen makaslama dalgası hızlarının kullanılmasıdır (Şekil 2.8.) [8].

Bir başka başka yaklaşım da, çok hassas sismograflarla alınan mikrotremor kayıtlarından yararlanılır, bölgenin zemin hakim periyodu ve zemin büyütmesi değerleri belirlenmeye çalışılır.(Şekil 2.9). [8,15]



Şekil 2.8. Zemin tabakalarının yerel özelliklerini yaklaşık olarak yansıttığı kabul edilen eşdeğer makaslama dalga hızına göre zemin büyütmesinin değişimi [8]



Şekil 2.9. Zemin büyütmesinin ve zemin hakim periyodunun yaklaşık olarak hesaplanabildiği mikrotremor deney sonuçlarına bir örnek [8]

Çalışma sahasını içine alan bölgenin yerel zemin koşullarının belirlenmesi amacı ile:

- Sondaj araştırmaları,
- Laboratuvar deneyleri,
- Sıvılaşma analizi,
- Su durumu,

çalışmalarına ek olarak bölgenin ayrıntılı jeolojisi, zemin ve kaya türlerinin jeoteknik özelliklerinin belirleme çalışmaları yapılmıştır [6].

Yerel zemin durumları bir deprem süresince yer sarsıntılarının karakteristikleri üzerinde oldukça derin bir etkiye sahiptir. Toprak birikimlerinin oldukça fazla olduğu bölgelerde, yüzeye yakın (≤ 50 m) düşük konsolide olan toprakların SH-dalgası hızları, toprak sütunu boyunca sismik dalgaların sönümlenmesi, çökel ara yüzeylerde keskin empedans farklılıkları sonucu olarak depremler sonucu oluşan makaslama dalgalarının (SH) katı etkilerinin olacağı beklenir. Üst Mississippi Embayment bölgesine yüzeye yakın 400 farklı noktada SH-dalga hızları, SH-dalgası yansıma ve kırılma teknikleri kullanılarak belirlenmiş ve 30 m derinlikteki üst toprağın SH-dalga hızları ortalama değeri esas alınmıştır. 1997 NEHRP koşulları (BSSC, 1997) (Tablo 2.1) ile yerel sınıflandırma yapılmıştır [10].

Çizelge 2.1. NEHRP yer sınıflaması (NEHRP,1997) [10]

Yer sınıfları	Time-averaged SH-wave velocity to 30 m (V_s) ^a (m/s)
A — sert kaya	$V_s > 1,500$
B — kaya	$760 < V_s \leq 1,500$
C — yoğun zemin	$360 < V_s \leq 760$
D — sert zemin	$180 < V_s \leq 360$
E — yumuşak zemin	$V_s \leq 180$
F — özel yerel hesaplamalar gerekir	

^a $V_s = (\sum_{i=1}^n d_i) / (\sum_{i=1}^n (d_i/v_{si}))$ burada d_i 'i'ninci tabakanın kalınlığı ve, v_{si} 'i'ninci tabakanın SH-dalgası hızı

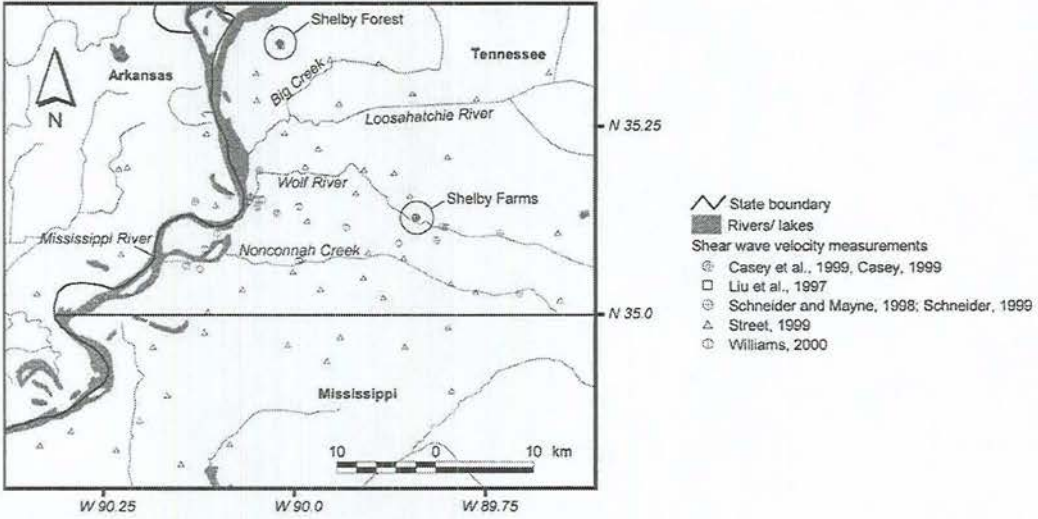
Bu çalışmanın sonucunda bir boyutlu yer etkileri, amplifikasyon ve dinamik yer periyodu hesaplanmıştır. Mississippi nehrinin taşkın yatağında (yoğunlaşan tabaka, düşük hız malzemeleri) sismik sönümlenme oldukça yüksektir ve buna bağlı olarak amplifikasyonun yüksek olması beklenir [10].

Tektonik açıdan risk taşıyan bölgelerde yer sismik risklerinin belirlenmesi; tek sondajdan, derinlik ile dört bağımsız okumayı yukarıya sağlayabilen elektronik konik penetrasyon testinin kullanılması ile oldukça kolaylaştırılmıştır. Geoteknik zemin koşullarına bağlı deprem risklerinin belirlenmesi amacı ile

SCPT'nin uygulamasının kullanılabilir olduğu ve uyumlu sonuçlar verdiği büyük Memphis alanında tamamlanılan çalışmada görülmüştür [11].

Bir seri konik penetrasyon testleri (CPTs) 1811-1812 ve önceki tarihlerde olmuş New Madrid depremlerinde sıvılaşma gözlenen yerler arasında bağlantı kurulması, jeoteknik zemin özelliklerinin elde edilmesi, sismik riskin belirlenmesi için USA merkezinde New Madrid sismik zonunun çevresinde yürütülmüştür. Bazı yerlerde iki normalize edilmiş uç direnç (q_{c1n}) ve makaslama dalgası hızı (V_{s1}) ölçümlerinin her ikisi de kullanılarak, iki bağımsız zemin sıvılaşmasının olabilirlik değerlendirilmesi yapılabildiği belirtilmiş ve uygulaması yapılmıştır [12]

Büyük Memphis alanında yer amplifikasyon hareketine bir belirleyici olabilirliğini değerlendirmek amacı ile National Earthquake Hazards Reduction Program (NEHRP) koşullarının içerikleri esas alınarak Şekil 2.10'de ölçüm noktaları belirtilen her bir ölçüm için üst 30 m'nin ortalama makaslama dalgası hızı hesaplanmıştır [13].

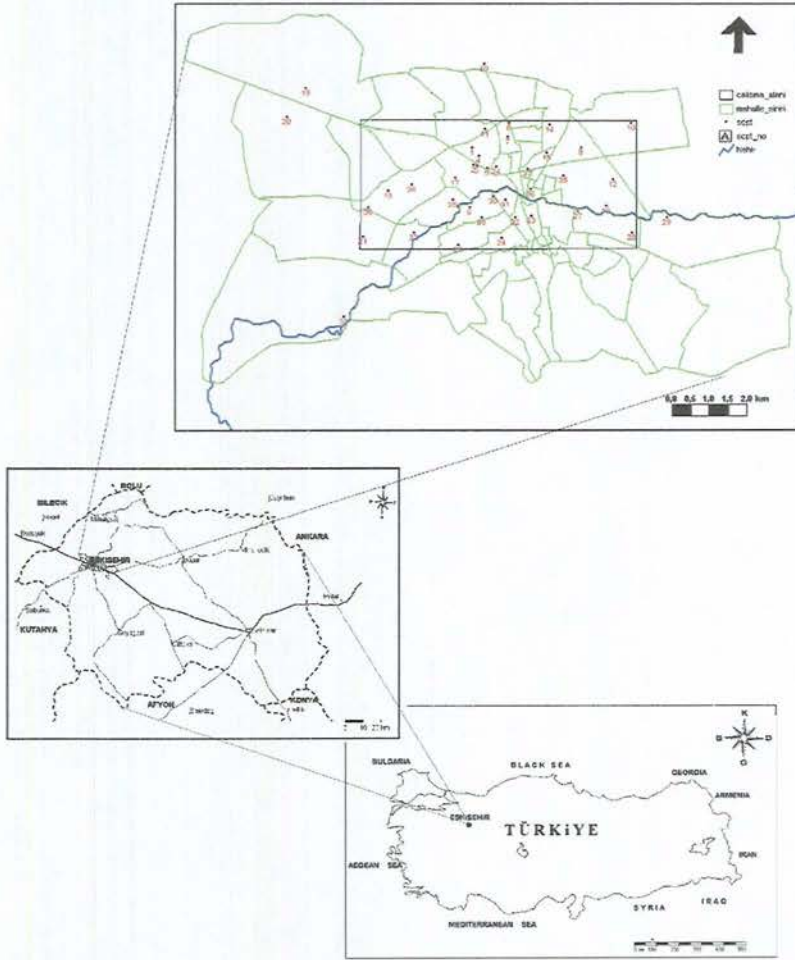


Şekil 2.10. Memphis alanındaki test noktalarının konumları [13].

Eskişehir ve yakın çevresi için mikrosismik çalışmalar oldukça sınırlı düzeyde kalmış olup yayımlanmamış raporlar biçiminde kalmıştır.

3. ÇALIŞMA ALANININ ÖZELLİKLERİ

Eskişehir ilinin büyük bir kısmı İç Anadolu Bölgesine girer. Eskişehir ili, doğu ve güneydoğuda Ankara, güneyde Konya ve Afyon, batıda Kütahya, Bilecik, kuzeyde Bilecik, Bolu ve Ankara illeri ile sınırlıdır. Çalışma alanı, Eskişehir yerleşim yerinin bir kısmını içine alır. Toplam alan yaklaşık 25031131 m² dir. (Şekil 3.1).



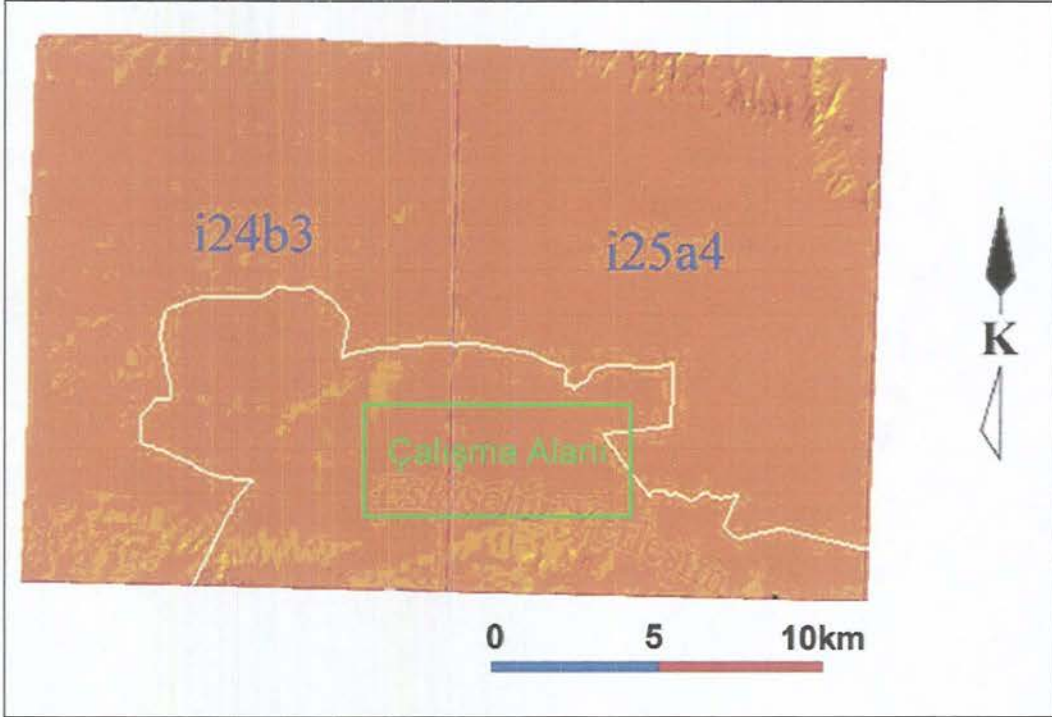
Şekil 3.1. Çalışma alanının Türkiye ve çevre iller ile olan konumunu gösteren harita

UTM koordinatları ile tanımlı çalışma alanının koordinatları:

Köşe Noktası	X	Y
Sol-üst	283303	4408022
Sağ-üst	290632	4408011
Sol-alt	283293	4404596
Sağ-alt	290621	4404606

arasında kalmaktadır. Bu alan, D-B yönünde yaklaşık 7.3 km, K-G yönünde yaklaşık 3.4 km'dir.

Çalışma alanı 1/25.000 ölçekli, Eskişehir İ24-b3, İ25-a4 isimli 2 adet paftanın içinde yer alır (Şekil 3.2).



Şekil 3.2. Eskişehir yerleşim alanı içine giren 1/25.000 ölçekli paftalar [6]

3.1. Coğrafik Konum

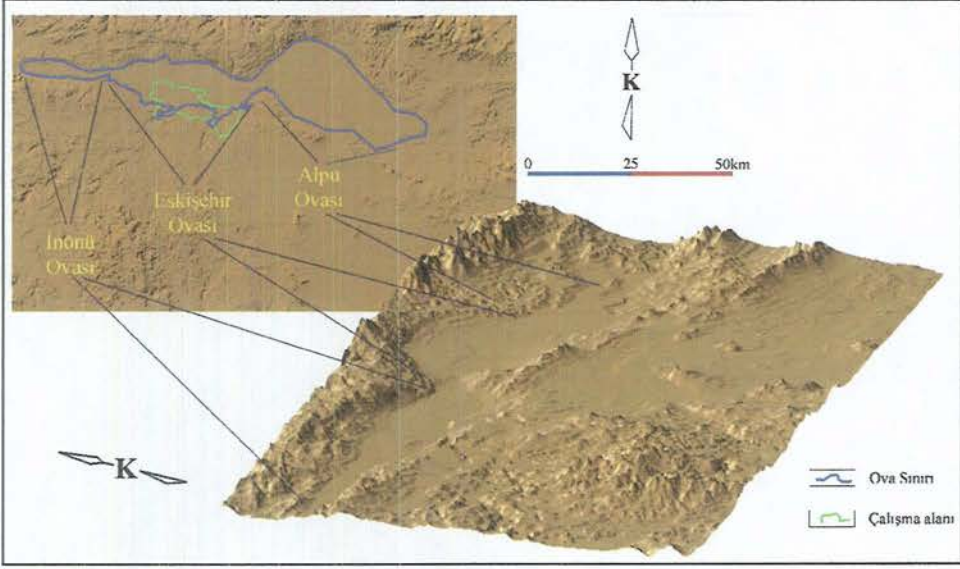
Çalışma alanının kuzeyinde ve güneyinde bulunan yükseltilere karşın, yerleşim yerinin yoğun olduğu orta kesimde düzlükler egemendir. Eskişehir ovası olarak adlandırılan bu ova, doğuda Alpu Ovası'na ve batıda İnönü ovasına açılır (Şekil 3.3).

Çalışma alanının denizden yüksekliği 779 m ile 800 m arasındadır.

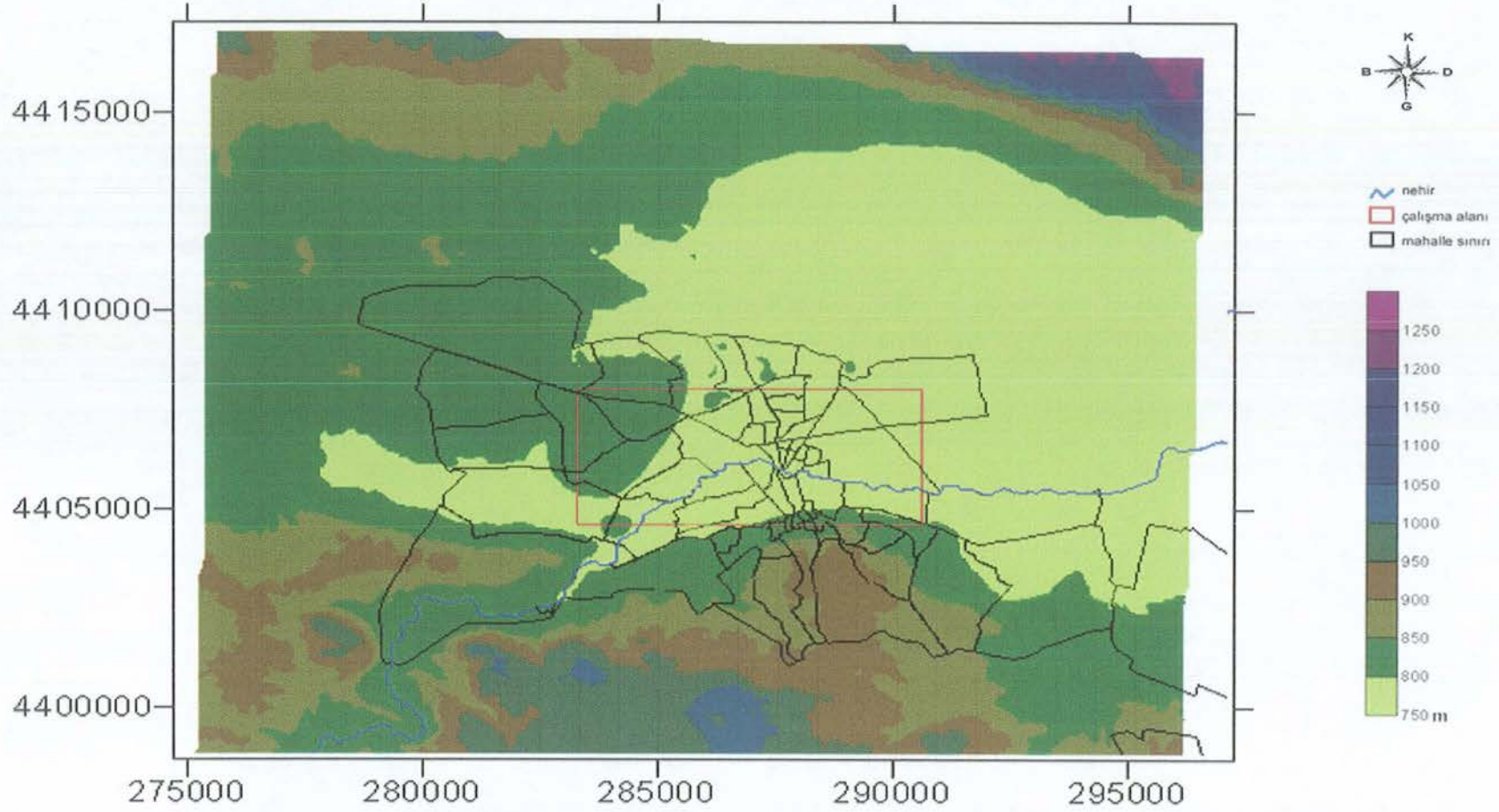
Çalışma sahasının en önemli akarsuyu Porsuk Çayı'dır. Güneyden gelerek çalışma alanına giren Porsuk, sahayı D-B yönünde iki alana böler.

Çalışma alanına ait sayısallaştırılmış 1/25.000 ölçekli paftalar kullanılarak bölgenin topoğrafya haritası yapılmış ve yükselti farkınının düşük olduğu gözlenmiştir (Şekil 3.4). Eğim haritası incelendiğinde, çalışma sahasındaki yerleşimin yoğunlaştığı yerlerde genellikle arazinin düz ve eğim açısının 5°'den

az olduğu belirlenmiştir. Yerleşim yerinin güneyinde topoğrafyanın yükselmesi ile birlikte eğimde artmaktadır. Bu yerlerde eğim açısının 10°-20° arasında değiştiği görülmektedir [6].



şekil 3.3. Eskişehir Ovası civarındaki Inönü ve Alpu Ovaları [6]

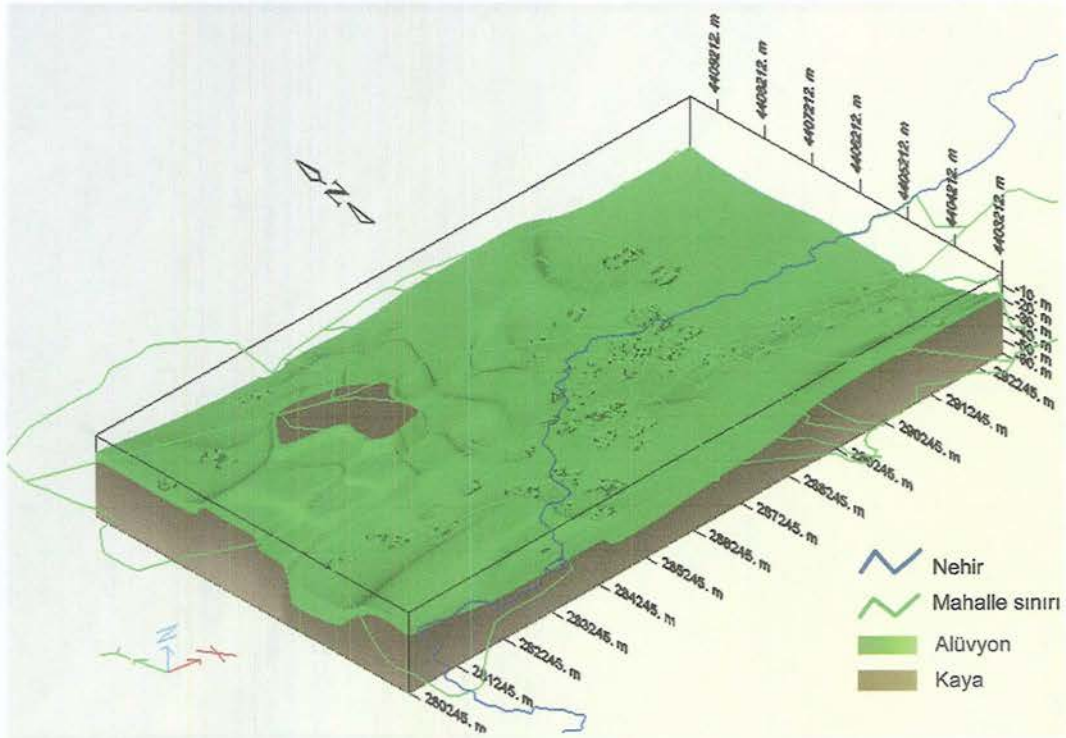


Şekil 3.4. Çalışma sahasını içine alan bölgenin sayısal arazi modeli

3.2. Çalışma Alanının Jeolojisi

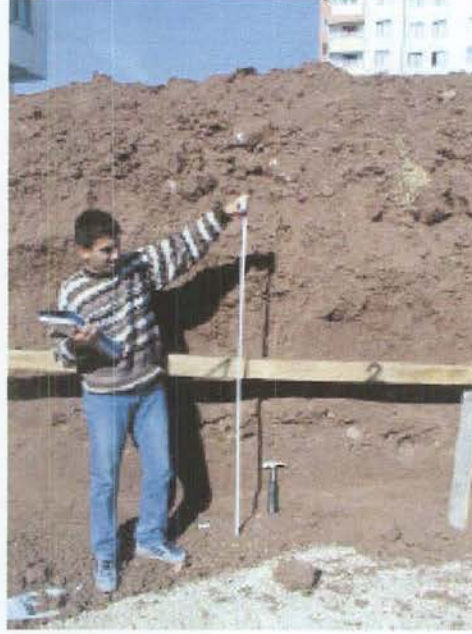
Çalışma alanının jeolojisi ayrıntılı Anadolu Üniversitesi Uydu ve Uzay Bilimleri Araştırma enstitüsü tarafından hazırlanan “Eskişehir Yerleşim Yerinin Yerleşim Amaçlı Jeoloji ve Jeoteknik Etüt Raporu” kapsamında ayrıntılı olarak incelenmiş ve tüm litolojik birimler yerinde gözlenmiştir (Ayday vd.,2001’den). Jeoloji haritasının içerdiği birimler içerisinde, bu çalışmanın yapıldığı alüvyon biriminin bazı özellikleri aşağıda belirtilmiştir.

Yeni Alüvyon: Çalışma alanının çok büyük bir kısmı, bu birim üzerinde yer alır. Yeni alüvyon Porsuk çayı ve küçük kollarının getirdiği gevşek çakıl, kum, silt ve killerden oluşmuştur. Çalışma alanının en genç birimi olup, bu çalışmada ayrıntılı olarak incelenmiştir. Yeni alüvyon çalışma alanı içinde en geniş alanı kaplar. Saha çalışmaları bölümünde ayrıntılı olarak incelenen, Eskişehir DSI III. Bölge Müdürlüğü tarafından 2001 yılı içerisinde yapılan rezistivite çalışmaları ve sondaj kuyu verileri ile bölgenin alüvyon kalınlığı modeli oluşturulmuştur (Şekil 3.5).



Şekil 3.5. Çalışma alanını içine alan bölgenin sayısal alüvyon kalınlığı modeli

Bu birim Eskişehir ovasını dolduran gevşek tortullardan oluşmuştur. Taneler arasında çimentolanmadan bahsetmek olanaksızdır (Şekil 3.6) [6].



Şekil 3.6. Yeni alüvyon profili, Hasan Polatkan Bulvarı sonu [6]

Bu birimin en üst seviyesini oluşturan organik toprak görünümündeki seviyenin kalınlığı yer yer değişir. Genellikle bu seviyenin altında silt yüzdesinin daha fazla olduğu siltli-kum gelir. Bazı yerlerde bu seviyenin altında kalın kil seviyesi gelir. Daha alt seviyelerde kum seviyesi ve onun altında siltli kum gelir. Alta doğru kum yüzdesi artar ve çakıllı kum seviyeleri başlar. Bu birimin jeoteknik özellikleri ayrıntılı olarak SCPT ile incelenmiştir.

Çalışılan bölgenin yapısal jeolojisi incelendiğinde, çalışma alanını etkileyecek fayların bulunduğu görülmüştür. Eskişehir fay zonunun birbirine paralel birkaç parçadan oluştuğu, yaklaşık 2-4 km genişliğinde bir zon içinde yer aldığı bilinmektedir [6].

Türkiye diri fay haritasından, Kuzey Anadolu Fayının kuzey ve güney segmenti Akyazı-Taraklı hattını oluşturan çizgiye yaklaştıklarında birbirlerine de yaklaştıkları gözlenir. Bu hattın batı tarafında bu segmentlerin birbirinden ayrıldığı, kuzey kısmının Sapanca-İzmit Körfezi uzantısında Marmara denizine

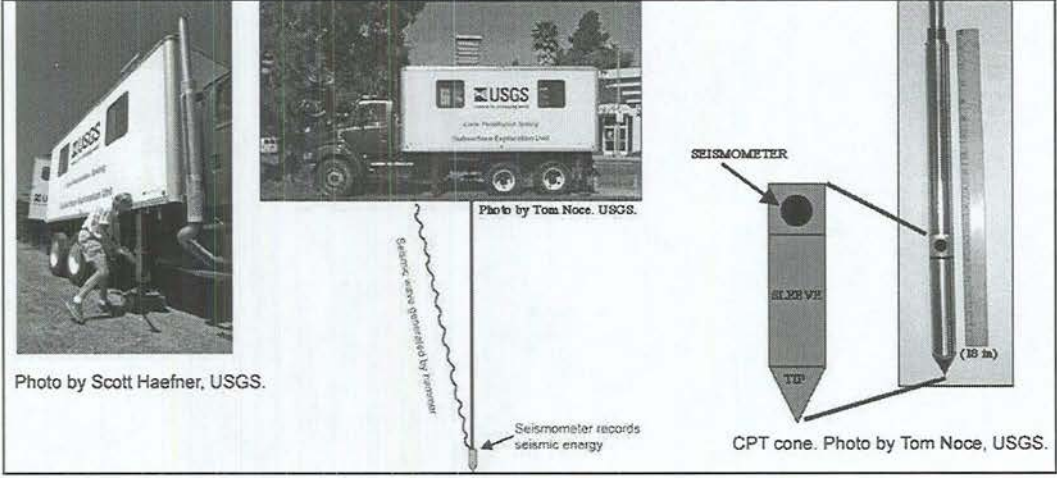
4. SİSMİK KONİK PENETRASYON TESTİ (SCPT) VE SAHA ÇALIŞMALARI

Ülkemizde özellikle 1990-1999 yılları arasında meydana gelen son depremlerde kalitesiz ve denetimsiz yapılaşmanın sonucu, yapılarda yıkım derecesine kadar yüksek hasar oranları açıkça görülmektedir. 1999 Kocaeli ve Düzce depremlerinde alüvyal zeminlerde yoğunlaşmış yerleşim alanlarında bu tür hasar oranlarının arttığı gözlenmiştir. Bu tür zeminler üzerinde plansız, kalitesiz, çarpık, çok katlı ve bitişik konumdaki binalarda hasar oranının oldukça fazla olduğu saptanmıştır [16].

Bu nedenle; yerleşimin alüvyal bir zemin üzerinde yoğunlaştığı Eskişehir'in zemin özelliklerinin belirlenmesi oldukça önem taşımaktadır. Eskişehir'in, yakın çevresinde oluşabilecek olası büyük bir depremden önemli derecede etkileneyeceği kaçınılmazdır [6]. Bu nedenlerden dolayı alüvyal zemin koşullarının belirlenmesi ve zeminin tepki karakteristiklerinin belirlenmesinde anahtar bir parametre olan makaslama dalgası hızının (V_s) ölçümü amacı ile çalışma alanının belirli noktalarında Sismik Konik Penetrasyon Testi (SCPT) yapılmıştır.

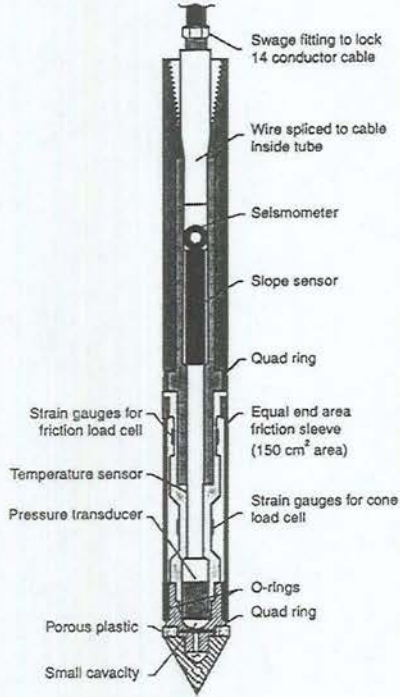
4.1 Sismik Konik Penetrasyon Testi (SCPT)

Dinamik zemin özelliklerinin belirlenmesi amacı ile farklı jeofizik metodları kullanılmaktadır. Bu yöntemler sismik yansıma ve kırılma, kuyu atışı, sürekli-durum titreşimi, aşağı-kuyu, sismik çapraz kuyu, yüzey dalgalarının spektral analizi ve SCPT'dir [20]. Bu çalışmada uygulanan SCPT yönteminde, sismik konik penetrometre kullanarak düşey sismik profiller elde edilmiştir. Daha önceki çalışmalarda, sismik konik penetrometrenin yüksek kalitede düşey sismik profil (VSP) verisi elde etmek için sonuç verici bir yöntem olduğu ispatlanmıştır [21]. Uluslararası deprem risk azaltma programının (NEHRP) bir bölümü olarak çalışan USGS Deprem Risk Programı'nda, Amerika'nın batı eyaletlerinde 2001 yılı içerisinde toplam 344 adet SCPT uygulaması tamamlanmıştır. USGS tarafından kullanılan konik penetrasyon test aletinde sismometrenin fotoğrafı ve sinyal gönderme aşaması Şekil 4.1'de gösterilmiştir [19].



Şekil 4.1. USGS CPT aleti üzerinde sinyalin gönderilmesi ve sismometrenin fotoğrafı [19]

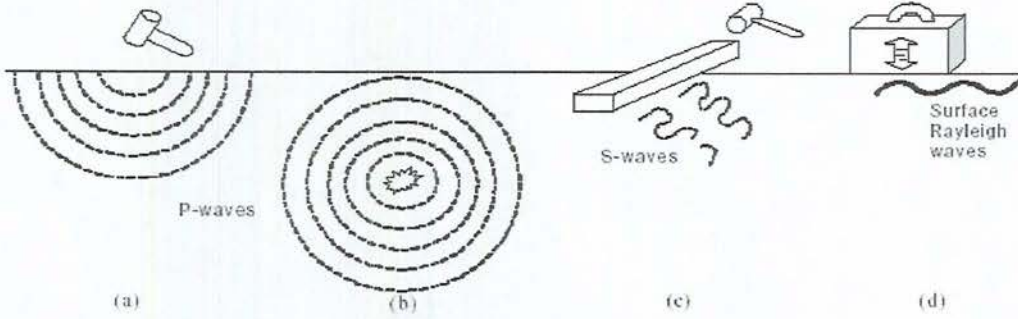
Makaslama dalgası hızının ölçülmesi için, küçük bir sismometre konik penetrometre içerisine monte edilmiştir. Sismometre yatay doğrultuda ve sinyal kaynağında enine yönlendirilen makaslama dalgalarının yatay bileşenlerini algılamak için konumlandırılmıştır Şekil 4.2 [17].



Şekil 4.2 Sismik konik penetrometre [17]

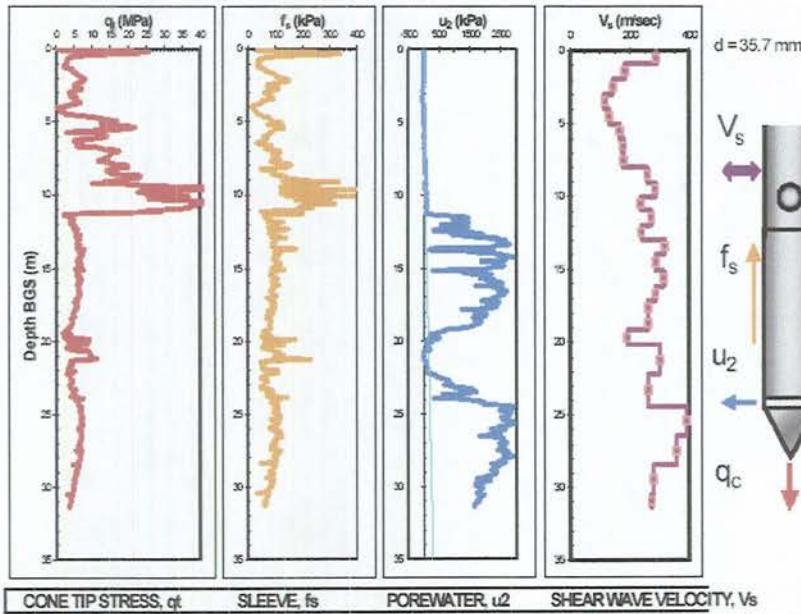
Etki dalgalarının yaratılması için farklı yöntemler geliştirilmiştir (Şekil 4.3). Dalganın yayılma doğrultusuna dik parçacık hareketine sahip S Dalgaları, zemin ile temas halinde ve yatay doğrultuda yerleştirilmiş odun parçasına

balyozun yatay doğrultuda vurulması ile oluşturulur [20]. Makaslama dalgası hızı, yüzeyde kontrollü olarak 5 kg ağırlığında çekiç ile üretilen sismik enerjinin, toprak yüzeyinden yeraltı boyunca konik uç içerisine yerleştirilmiş sismometreye ulaşma zamanının ölçülmesi ile hesaplanır.



Şekil 4.3. Dikey dalgaların yaratmak için uygulanan metodlar (a) dikey etki (b) sığ patlatma (c) yatay etki (d) frekans kontrollü yüzey dalgaları (Adapted from Kramer 1996) [20]

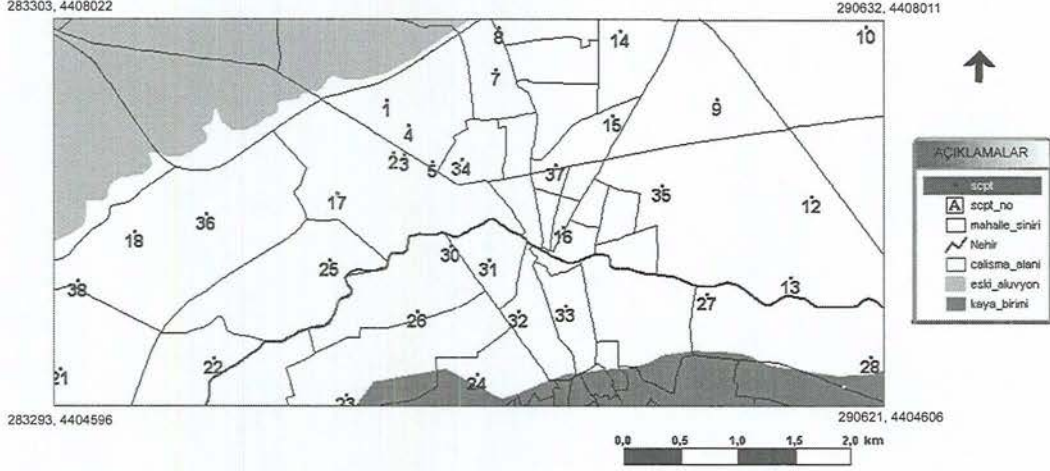
SCPT tek bir sondajda iki veya daha fazla tekniğin birleştirilmesiyle optimize edilmiş veri toplamayı sağlayan jeoteknik testlerden biridir. Derinlik ile dört bağımsız ölçümün düşey profillerini, ekonomik ve hızlı bir şekilde sağladığından dolayı çok yönlü bir yaklaşım imkanı sağlar. Şekil 4.4'da Memphis, Tennessee'de yapılmış ve 4m silt, 7m kum tabakası geçilen bir SCPT kayıt profili verilmiştir [23].



Şekil 4.4. Memphis, Tennessee'den SCPT kayıt profili [23]

4.2 Saha Çalışmaları

Çalışma alanında önceden belirlenen noktalarda toplam 32 adet Sismik Konik Penetrasyon Testi (SCPT) yapılmıştır (Şekil 4.5). SCPT uygulama noktalarının Universal Transverse Mercator (UTM) koordinatları ve sismik kayıt derinlikleri Tablo 4.1’de verilmiştir.



Şekil 4.5. Çalışma alanının köşe noktalarının UTM koordinatları ve çalışma alanında SCPT uygulama noktaları

Çizelge 4.1. SCPT uygulama noktalarının koordinatları ve kayıt derinliği

SCPT no	yer	x	y	kot	kayıt derinliği (m)
1	Havacılık müzesi yanı	286249	4407309	793	8,00
2	Kılıçoğlu Kiremit Fab.	286303	4406843	795	7,80
3	Kılıçoğlu Kiremit Fab.	286407	4406824	789	9,13
4	Eti fab. arkası, lunapark yanı	286441	4407082	788,5	9,71
5	Eldem Tic. Deposu	286658	4406766	787	8,77
7	Namık Kemal İlköğretim Okulu	287217	4407581	786	8,13
8	Prof. Dr. Orhan Oğuz Lisesi	287240	4407947	787	9,96
9	Korg. Lütfü Akdemir IOO	289157	4407310	784	7,04
10	Ali Rıza Efendi IOO	290499	4407944	778	9,65
12	Seker Çiftlik	289990	4406454	779,5	9,70
13	Tepe İnşaat	289808	4405740	781	8,28
14	Yavuz Selim IOO	288328	4407902	785	9,33
15	Gazi IOO	288242	4407169	782	8,98
16	Atatürk IOO (Devrim)	287820	4406175	788	6,25
17	Mas (Magnezit)	285812	4406489	789	9,30
18	Mualla Zeyrek IOO	284025	4406153	800	9,34
21	Emine Cahide (Sazova) IOO	283365	4404927	791	11,54
22	Adnan Menderes IOO	284711	4405033	791	7,80

Çizelge 4.1. (Devam) SCPT uygulama noktalarının koordinatları ve kayıt derinliği

SCPT no	yer	x	y	kot	kayıt derinliği (m)
23	Ahmet Sezer IOO	285850	4404669	792	11,20
25	Fatih Anadolu Lisesi	285755	4405937	789	7,60
26	DSI futbol sahası içi	286519	4405446	790	6,30
27	Aydın Arat Parkı	289073	4405600	783	8,64
28	Sevgi Yolu	290508	4405039	792	4,26
30	Fatih Sultan Mehmet IOO	286798	4405980	787	8,13
31	TEK	287258	4405891	787	2,94
32	Valilik	287411	4405443	787	7,35
33	Murat Atılgan IOO	287833	4405490	785	7,86
34	Hal Binasının parkı	286910	4406788	786	9,04
35	Satroğlu Parkı	288677	4406552	780	8,18
36	Koy Hizmetleri Eğitim	284658	4406307	793	8,39
37	Hatboyu, Ataman Sokak	287742	4406738	785	9,53
38	Rehabilitasyon	283515	4405712	791	9,55

4.2.1 Konik Penetrasyon Testi (CPT) ve uygulaması

Çalışmada kullanılan CPT (Konik Penetrasyon Testi) zeminin sertliğine bağlı olarak en fazla zeminin 30 m derinliğine kadar olan kısmının özelliklerinin belirlenmesinde kullanılır (Şekil 4.6) [22]. Bu çalışmada kullanılan SCPT aletinin özellikleri EK-1’de verilmiştir.

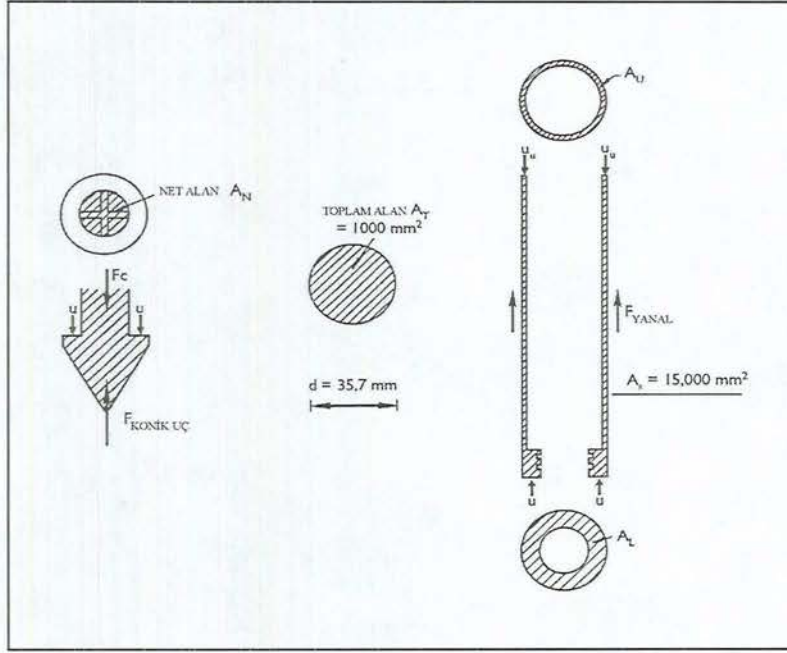


Şekil 4.6. Çalışmada kullanılan Sismik Konik Penetrasyon Test (SCPT) aleti

CPT saha uygulaması aşamasında, konik ucu zemin içerisine itmek için gerekli olan kuvvet miktarına bağlı olarak uç direnç “ q_c ” (MPa), zeminin yanal yüzeyi boyunca sıkıştırma kuvveti miktarına bağlı olarak yanal sürtünme “ f_s ” (MPa) ve boşluk suyu basıncı “ u ” (MPa) ölçülmektedir.

Konik penetrasyon testinde kesit alanı 1000 mm^2 ve konik uç açısı 60° olan silindirik sonda, 196.10^3 N itme kuvveti uygulanarak 20 mm/s 'lik sabit hız ile zemine itilmektedir. Elde edilen q_c ve f_s değerleri u 'ya bağlı olarak düzeltilmektedir [18]. Düzeltmede kullanılan parametrelerin sonda üzerindeki şematik gösterimi Şekil 4.7'de verilmiştir.

Uygulama aşamasında sistem üzerine zemin tarafından etkiyecek tepki kuvvetine karşı SCPT aleti zemine Şekil 4.8'de gösterilen karotlar kullanılarak dört farklı noktadan sabitlenir.

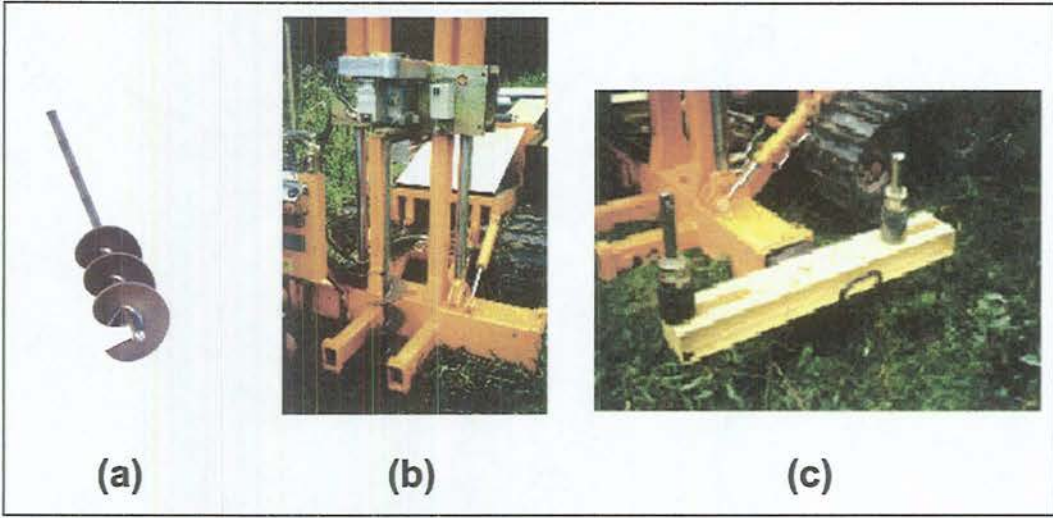


Şekil 4.7. q_c ve f_s değerlerinin u 'ya bağlı olarak düzeltilmesinde kullanılan parametrelerin sonda üzerinde şematik gösterimi [18]

Konik uç direnci (q_c)

$$q_c = \frac{F_c}{A_T} \quad (4.1)$$

formülüyle verilir. Burada F_c , konik uca etkiyen kuvvet A_T , konik ucun toplam kesit alanını göstermektedir.



Şekil 4.8. SCPT aletinin zemin üzerine sabitlenmesi. (a) karot (b) karotun zemine itilmesi (c) SCPT aletinin karotlara bağlanması

Boşluk suyu basıncına bağlı olarak düzeltilmiş konik uç direnci (q_t)

$$q_t = q_c + u(1-a) \quad a = \frac{A_N}{A_T} \quad (4.2)$$

formülüyle verilir. Burada u , boşluk suyu basıncı
 a , sabit alan çarpanı;

A_N , konik ucun net kesit alanını göstermektedir.

Yanal sürtünme (f_s)

$$f_s = \frac{F_s}{A_s} \quad (4.3)$$

formülüyle verilir. Burada F_s , sürtünme koluna etkiyen yanal sürtünme kuvveti

A_s , sürtünme kolunun alanını göstermektedir.

Boşluk suyu basıncına bağlı olarak düzeltilmiş yanal sürtünme (f_t)

$$f_t = f_s - \left(\frac{(u \cdot A_L - u_u \cdot A_u)}{A_s} \right) \quad (4.4)$$

formülüyle verilir. Burada A_L , sürtünme kolunun alt kesit alanı

A_u , sürtünme kolunun üst kesit alanı;

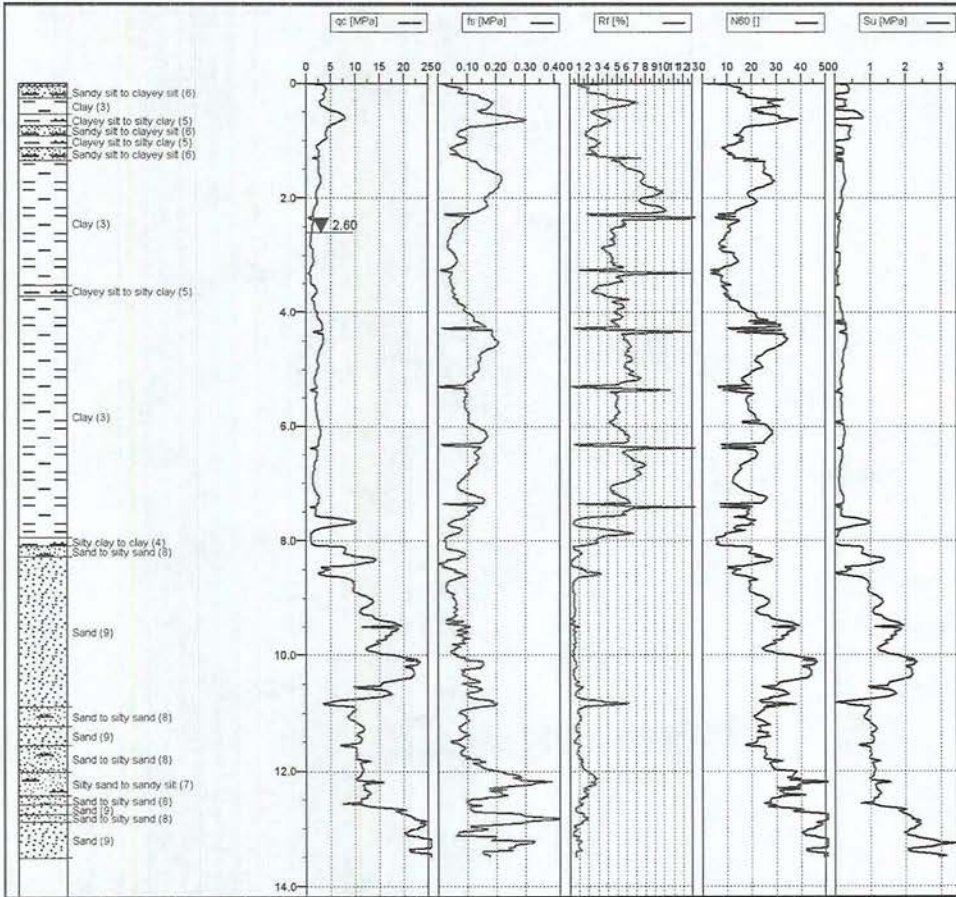
u_u , sürtünme kolunun üst kesit alanına etkileyen boşluk suyu basıncını göstermektedir.

Sürtünme oranı (R_f) CPT'de dolaylı olarak elde edilen ve yorumlamada doğrudan kullanılan bir parametredir,

$$R_f (\%) = \left(\frac{f_t}{q_t} \right) \cdot 100 \quad (4.5)$$

eşitliği ile ifade edilir [18].

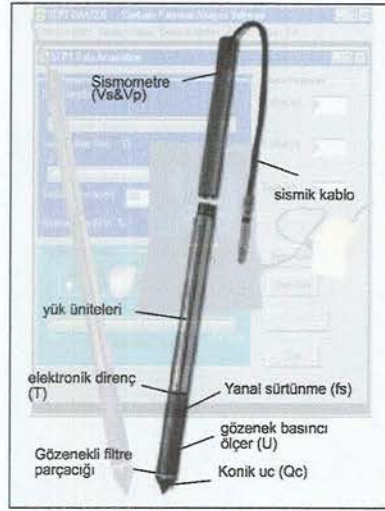
Konik ucun, $196 \cdot 10^3$ N itme kuvveti uygulanarak sabit 2 cm/s hızla aşağı itilmesi uygulama süresince en ideal verinin alınabilmesine imkan sağlar [27]. CPT'de konik uç, uygulama aşamasında 2 cm aralıklı veriyi sayısal veri olarak bilgisayara aktarır ve bilgisayar yazılımı grafik veri biçiminde yorumlar (Şekil 4.9).



Şekil 4.9. 21 nolu Konik Penetrasyon Testi (CPT) kaydı

4.2.2 SCPT'nin uygulanması

SCPT uygulaması, standart bir CPT konik ucuna sismik algılayıcının eklenmesi ile elde edilen SCPT probu ile yapılır (Şekil 4.10). Zemin dinamiği çalışmaları kapsamında zeminlerin dinamik davranışlarında, mühendislik problemlerinin çözülmesinde yeni analitik ve dinamik test metodu olarak SCPT geliştirilmiştir [17,22]. Bu çalışmadaki sismik uygulamada makaslama dalga hızı " V_s " (m/s) ölçülmüştür.



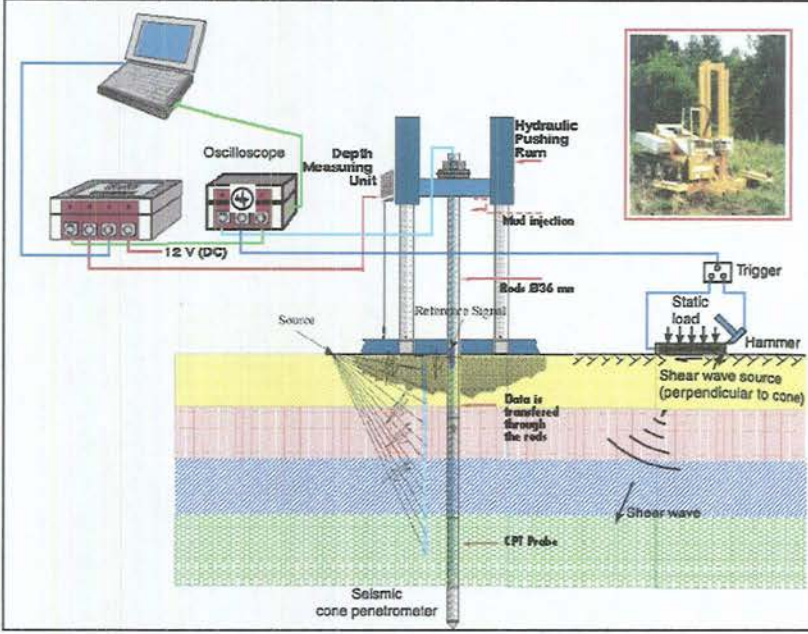
Şekil 4.10. SCPT elemanları ve kullanılan konik ucun bölümleri

Sismik ölçümün sayısal veri olarak kaydı; sismometre tarafından algılanan sismik sinyalin, uygulamanın yapıldığı derinlikten tijler içerisinden geçirilen sismik kablo vasıtasıyla sayısal ortama aktarılması ile sağlanır (Şekil 4.11).



Şekil 4.11. Sismik kablosunun hazırlanması ve işlem kontrol ekranı

Standart aşağı kuyu tekniğinin bir biçimi olan SCPT'nin planı şematik olarak Şekil 4.12'de gösterilmiştir.

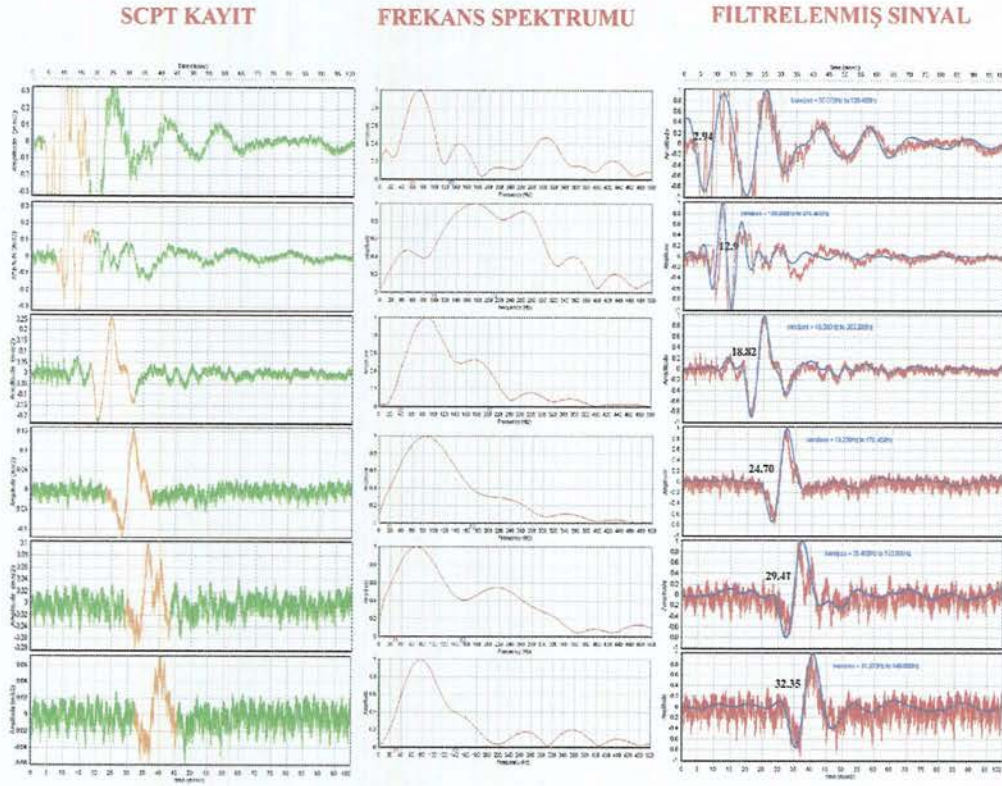


Şekil 4.12. Sismik Konik Penetrasyon Testi'nin şematik planı

Sismik enerji yüzeyde yatay doğrultuda yerleştirilmiş metal levhaya balyozun yatay doğrultuda vurulması ile oluşturulmuştur (Şekil 4.13). Bu işlem 1 m aralıklar ile tekrarlanarak ara hızlar hesaplanır. Kaydedilen grafik veri Şekil 4.14'de verilmiştir.



Şekil 4.13. SCPT aletinde sismik sinyalin oluşturulması

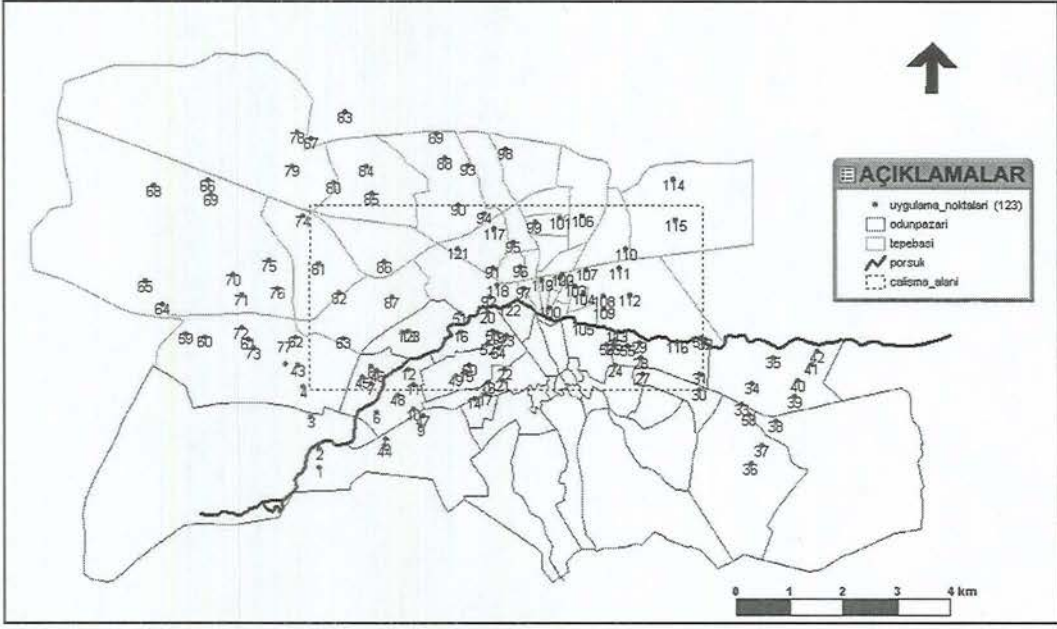


Şekil 4.14. SCPT’ de 1 m aralıklı ve 5 farklı derinlikte kaydedilen sismik sinyal izlerine bir örnek

4.2.3 Jeofizik rezistivite çalışması

Eskişehir DSİ III. Bölge Müdürlüğü tarafından Eskişehir Odunpazarı ve Tepebaşı Belediyeleri sınırları içerisinde yapılacak zemin etüdlerine done teşkil etmek amacı ile 112 lokasyonda elektrikli sondaj (E.S.) yapılmıştır ve derinlikleri yaklaşık 60 m olan jeofizik rezistivite ölçüleri alınmıştır [24,25].

Yapılan jeofizik rezistivite etüdünde doğru akımla çalışan derin rezistivite cihazı kullanılmıştır. Akım ve potansiyel elektrodu olarak dairesel kesitli elektrotlardan yararlanılmıştır. Etüt de Schlumberger elektrot açılım sistemi kullanılmıştır. Arazi şartlarının uygunluğuna göre ölçülerde 60-100 m derinliğe nüfuz edecek şekilde elektrot araları sık olarak düzenlenmiştir. Jeofizik rezistivite uygulama noktaları Şekil 4.15’de verilmiştir.



Şekil 4.15. Jeofizik rezistivite ölçüm noktaları

Bu ölçülerin neticesinde çıkartılan jeofizik kesitler, çalışılan bölgede kalan alüvyon kalınlığının 10-25 m arasında değiştiğini, kuzeydoğuya doğru gidildikçe Porsuk Çayı'nın fazla malzeme depolaması ile diğer yerlere göre 10-15 m kalınlığından 15-25 m kalınlığa kadar ulaştığı belirlenmiştir [24,25].

5. LABORATUVAR ÇALIŞMALARI

Çalışma alanının tanımlanması, SCPT uygulama noktalarının belirlenmesi, çalışmada harita koordinatlarına oturtulmuş ve sayısallaştırılmış tüm haritaların yorumlanmasında coğrafi bilgi sistemi (CBS) yöntemi kullanılmıştır. Anadolu Üniversitesi Uydu ve Uzay Bilimleri Araştırma Enstitüsü tarafından çalışma alanını içine alan 1/25000 ölçekli paftalar Image Analyst ve MicroStation SE yazılımları kullanılarak sayısallaştırılmış ve CBS yazılımları kullanılarak Eskişehir'in kent bilgi sistemi oluşturulmuştur. Bu amaçla, Eskişehir yerleşim yerini içine alan 1/25000 ölçekli paftalar taranarak rektifiye edilmiş (harita koordinatlarına oturtulmuş) ve raster görüntü olarak *.tif uzantılı kaydedilmiştir. Rektifiye edilmiş raster görüntü kullanılarak topoğrafik amaçlı, eş yükselti eğrileri vektörize edilmiştir (sayısallaştırılmış). Sayısallaştırılmış ve harita koordinatlarına oturtulmuş 1/25000 ölçekli paftalar kullanılarak GeoMedia Professional 4.0 yazılımı ile Eskişehir'in kent bilgi sistemi oluşturulmuştur.

Oluşturulan kent bilgi sistemi kullanılarak SCPT uygulama noktaları belirlenmiştir. Uygulama noktalarının harita koordinatlarında tanımlanması ve ilgili yazılımların da kullanılması ile SCPT verilerinin yorumlaması kolaylaşmıştır. Bu bölümün sonunda verilen haritalar; harita koordinatlarında mahalle sınırlarını, çalışma alanından geçen Porsuk Çayı'nı, SCPT uygulamalarının yapıldığı yeni alüvyon birimi dışındaki jeolojik birimlerin sınırlarını ve çalışma alanını tanımlayan sayısallaştırılmış haritalardır.

Sayısal veri olarak arazide yapılan SCPT sondajı sonucu elde edilen veriler kullanılmıştır. Bu veriler bu amaçlı özel yazılımlar kullanılarak yorumlanmıştır. Sismik veri işleme aşamasında Seismic Cone Data Acquisition and Analysis "SC1-DAA (ver 3.3)", CPT verilerinin işlenmesinde ve yorumlanmasında CPT_pro yazılımları kullanılmıştır. Bu yazılımlar, SCPT standartlarına uyumlu olarak hazırlanmıştır [26].

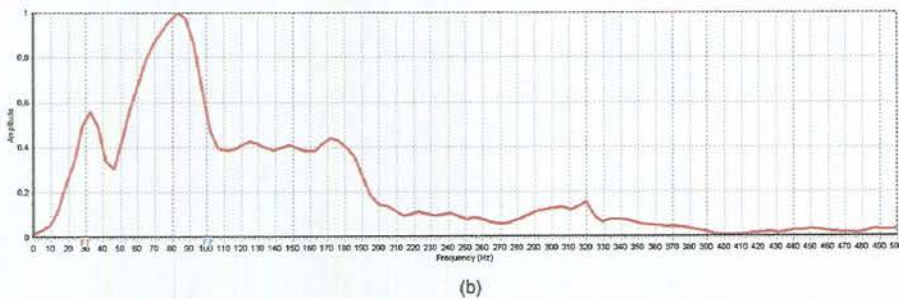
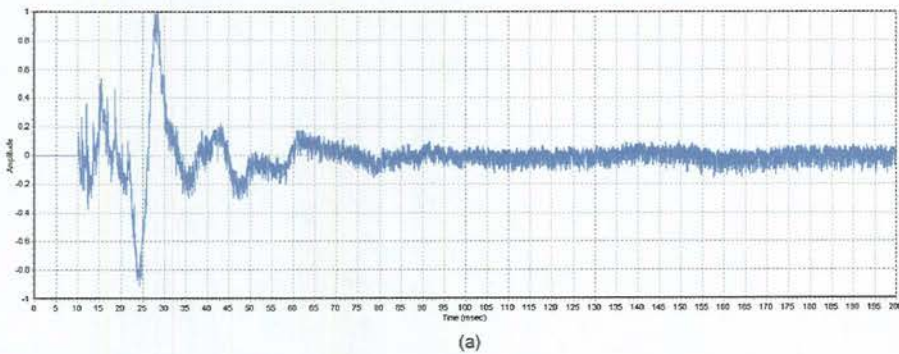
SC1-DAA (ver 3.3) yazılımı kullanılarak, SCPT ile arazide ölçülen ham sismik verilerin bandpass filtre tekniği kullanılarak uygun frekans aralıklarında filtrelemesi yapılmış ve makaslama dalgası hızı (V_s) sonuçları elde edilmiştir. CPT-pro yazılımı kullanılarak, CPT ile arazide ölçülen q_c , f_s ve u parametreleri

kullanılarak; R_f , Robertson vd. (1986)'ne göre zemin türü, N_{60} ve Su değişkenleri belirlenmiştir.

SCPT değerlerinin yorumlanması ardından elde edilen verilerin coğrafi bilgi sistemi (CBS) yöntemi ile modellenmesine çalışılmıştır. Çalışmada elde edilen veriler ile hazırlanan tüm haritalar sayısal ortamda hazırlanmıştır. Bu aşamada üç boyutlu CBS modellemelerinden de yararlanılmıştır. Haritaların sayısallaştırılmasında Image Analyst ve MicroStation SE yazılımları kullanılmıştır. Üç boyutlu modelleme çalışmalarında Voxel Analyst yazılımı kullanılmıştır. Sayısallaştırılmış haritaların CBS kullanılarak yorumlanması ve modellenmesinde GeoMedia Professional 4.0 yazılımı kullanılmıştır. Saha çalışmaları sonucu elde edilen tüm sayısal veriler istatistiksel değerlendirmeler bölümünde yorumlanmıştır.

5.1 Sismik Verinin İşlenmesi

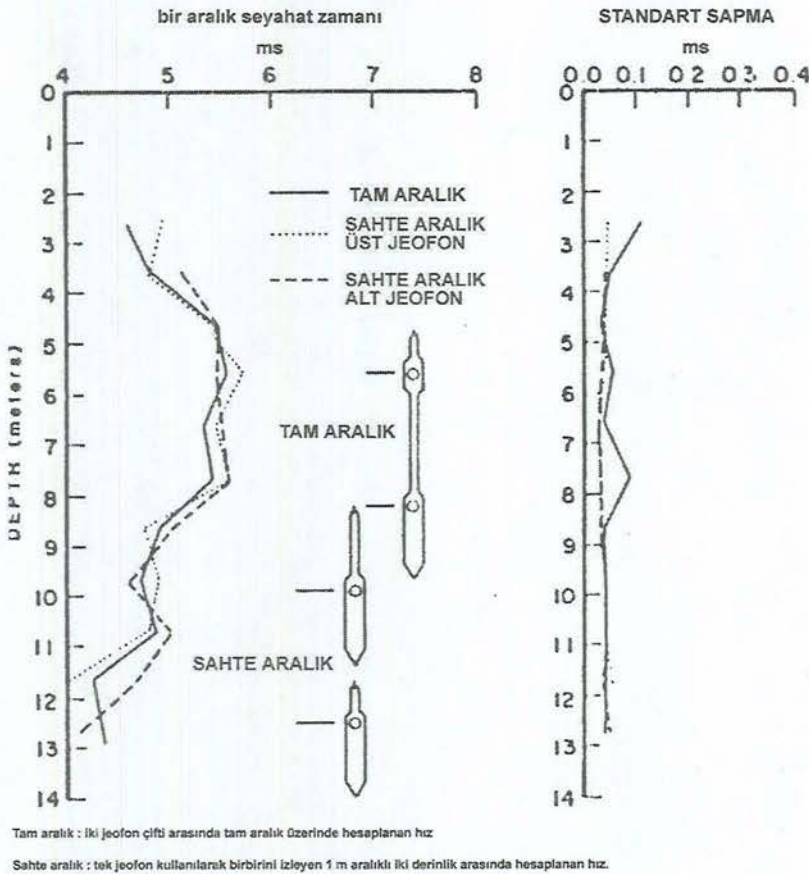
SCPT'de yüzeyde oluşturulan sismik sinyalin izi (Genlik-Zaman grafiği) algılayıcının bulunduğu silindirik şeklindeki kısmın içerisinde monte edilmiş sismometre tarafından algılanır ve sayısal veri olarak kaydedilir. Örnek olarak çalışma alanında 32 nolu SCPT kaydında kaydedilen sismik sinyalin izi ve frekans spektrumu Şekil 5.1'de verilmiştir.



Şekil 5.1. Çalışma alanındaki 32 nolu SCPT'nin 3.3m seviyesindeki sismik kaydı (a) sismik iz (b) frekans spektrumu

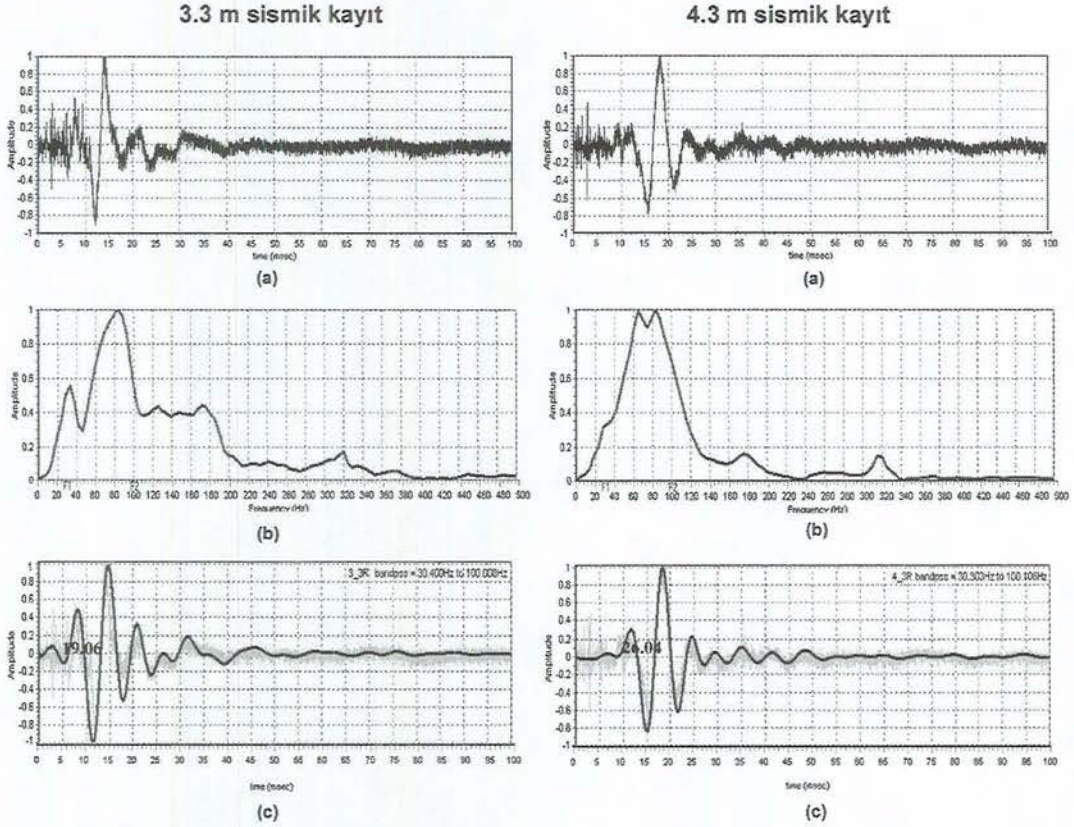
Kaydedilen sismik sinyal içerisinde gürültü olarak tanımlanan ve istenmeyen dalga türleri de bulunur. Sismik gürültülerin birkaç nedeni olmakla birlikte, bunları gerçek sismik sinyalden ayırt etmenin yöntemleri vardır. Uygun yöntemin kullanılması, uzman sismik yorumcunun veriyi analiz etmesi ile mümkündür [32,33].

Yüzeyde üretilen sinyalin sismometreye varış zamanı ölçümlerinin değişimini belirleyebilmek ve uygulama sisteminin güvenilirliği ve doğruluğu için ikinci sismometre, birinci sismometre seviyesinin 1 m altında konumlandırılır. Bu değişim ile iki farklı seviyeden alınan sismik kayıt kullanılarak 1 m aralığın hızı hesaplanabilir. Bu işlemin doğruluğu, tam aralıklı sismometre sistemi ile yapılan uygulama ile bu metodun karşılaştırılması ile ispatlanmıştır [17]. Campanella vd. 1986'dan uyarlanan tam ve sahte aralıklı seyahat zamanlarının karşılaştırılması Şekil 5.2'de verilmiştir.



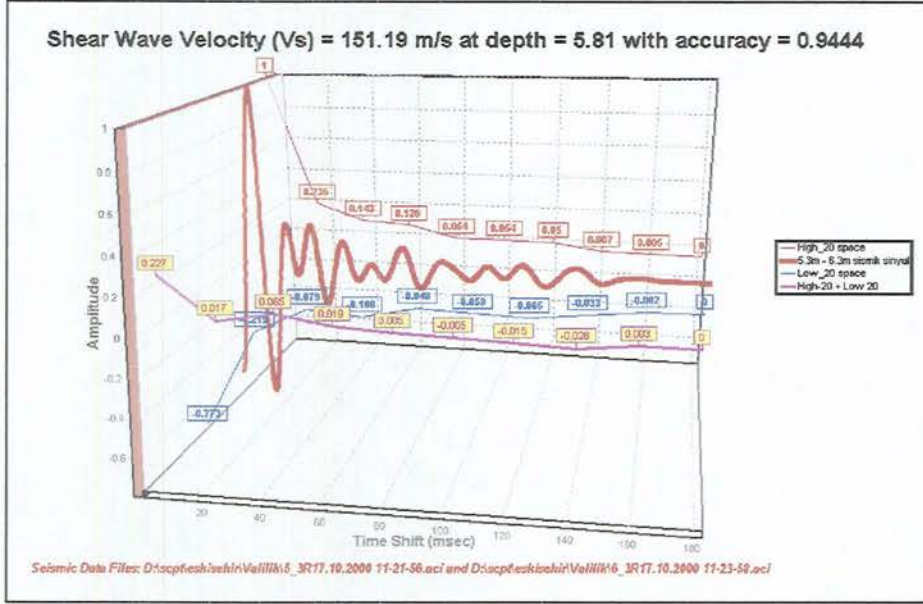
Şekil 5.2. Tam ve sahte aralıklı seyahat zamanlarının karşılaştırılması [17]

Bu çalışmada sahte aralık yöntemi uygulanmıştır. 1 m aralıklı iki seviyeden alınan sismik iz verileri, 30-100 Hz bandpass filtre uygulanarak filtrelenmiştir (Şekil 5.3). Sismik sinyallerin ayırmanın bir metodu sinyal frekansını tanımlama ve istenmeyen gürültüleri kaldırmaktır. SCPT sismik veri analizlerinde dijital filtreleme bu işlem için en ideal bir yaklaşımdır [28,29].



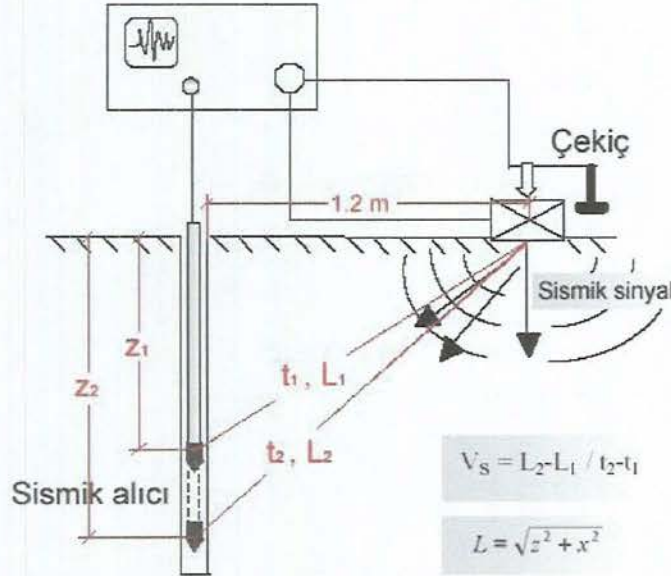
Şekil 5.3. İki farklı seviyeden alınan sismik kayıt (a) filtrelenmemiş sismik iz (b) sismik sinyalin frekans spektrumu (c) filtrelenmiş sismik iz

SC1-DAA yazılımı kullanılarak iki farklı seviyede kaydedilen ham verilerin korelasyonu ile sismik hız hesaplanır (Şekil 5.4). Bu işlem çalışma alanında 32 farklı uygulama noktasında 155 katman için yapılmıştır.



Şekil 5.4. SC1-DAA bilgisayar yazılımı kullanılarak hesaplanmış V_s ara hızı

Kontrollü olarak sismik hız hesabı için, yüzeyde üretilen sismik sinyalin üzerinde referans noktası belirleyerek sinyalin sismometreye varış zamanı kaydedilmiştir (Şekil 5.3-c). Konik penetrometrenin bulunduğu derinlik ve kaynak-alıcı uzaklığı hesaba katılarak ara hız hesaplanmıştır (Eşitlik 5.1). Bu işlemin geometrik olarak şematik gösterimi Şekil 5.5’de verilmiştir.



t: Sismik sinyalin sismik alıcıya varış zamanı,
L: kaynak-alıcı uzaklığı

Şekil 5.5. SCPT’de V_s hızının hesabı (Luna ve Jadi 2000’den uyarlanmıştır [20])

SCPT’de üretilen SH Dalgası için makaslama dalgası hızı (V_s)

$$V_s = \frac{L_2 - L_1}{t_2 - t_1} \quad L = \sqrt{z^2 + x^2} \quad (5.1)$$

formülüyle hesaplanır. Burada

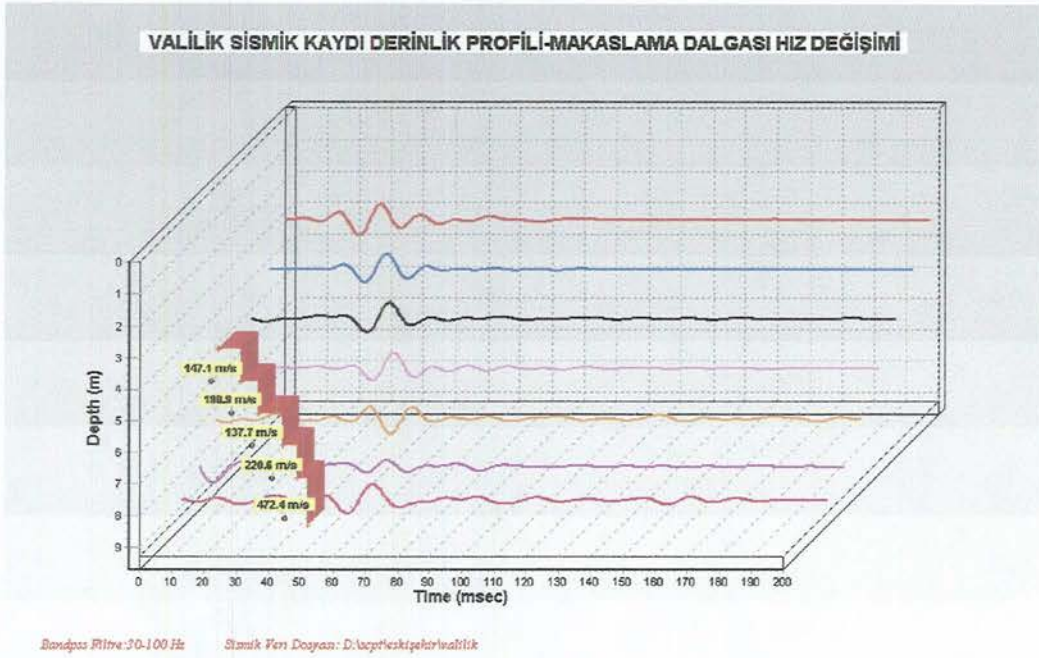
L , kaynak-alıcı uzaklığı;

t , sismik sinyalin sismik alıcıya varış zamanı;

z , sismik alıcının bulunduğu derinlik;

x , ofset açıklığı mesafesini göstermektedir.

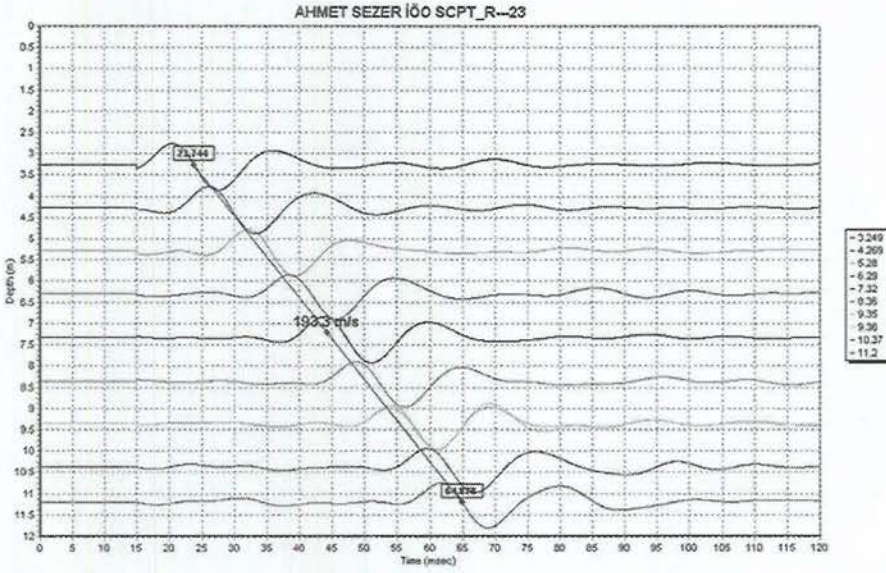
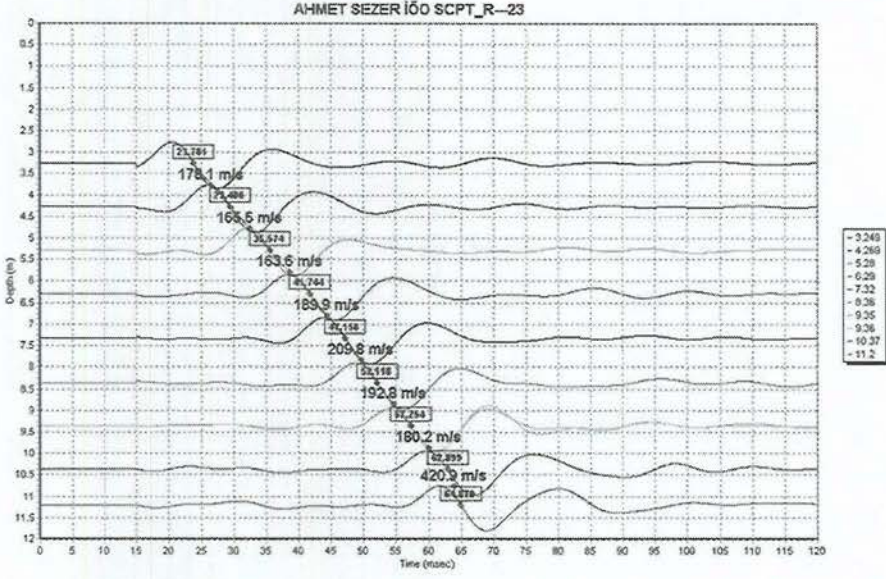
Uygulanan bir test derinliği boyunca, alınan sismik kayıtlar kullanılarak V_s hızının derinlik ile değişimi belirlenmiştir. Çalışma alanında 32 nolu SCPT sismik kaydının derinlik profili Şekil 5.6’de verilmiştir.



Şekil 5.6. Çalışma alanındaki 32 nolu SCPT sismik kaydının derinlik profili ve V_s ara hızları

Çalışma alanı içerisinde 32 farklı noktada uygulanan SCPT’de, 155 katmanın makaslama dalgası ara hızları “ V_{sara} ” ve 32 uygulama noktasının ortalama hızları “ V_{s_ort} ” hesaplanmıştır (EK 2).

SCPT uygulama noktasındaki ortalama makaslama dalgası hızı “ V_{s_ort} ”(m/s) ilk referans sinyal ve son sinyal kullanılarak belirlenmiştir (Şekil 5.7).



Şekil 5.7. 23 nolu SCPT sismik profilindeki Vs hızları (a) Vs ara hızı (b) Vs ortalama hız

5.2 CPT Verisinin İşlenmesi

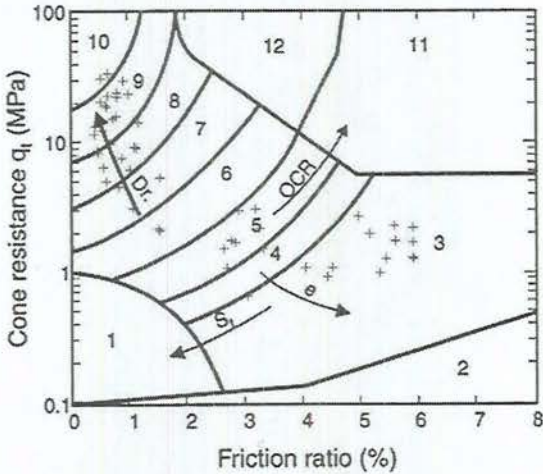
CPT uygulamalarında; yukarıdan sabit hızla (20 mm/s) uygulanan kuvvetin, uçta bulunan algılayıcının alanına (10 cm²) bölünmesi sonucunda bulunan uç direnci (q_c), toplam kuvvetin algılayıcının yan alanına bölünmesi sonucunda bulunan yanal sürtünme (f_s), boşluk suyu basıncı (u) değerleri ölçülmüştür. Bu veriler arasında ilişki fonksiyonları türetilerek yorumlamada doğrudan kullanılan diğer parametreler hesaplanır. Sürtünme oranı (R_f) bu

parametrelerin başında gelir ve f_s değerinin q_c 'ye orantılanması ile elde edilir (Eşitlik 4.5) [18]. SPT enerji oranı N_{60} 'da bu yolla hesaplanan parametreler arasındadır [34]. Bu çalışmada ele alınmayan fakat hesaplanabilen diğer zemin parametreleri Çizelge 5.1'de verilmiştir.

Çizelge 5.1. CPT'de dolaylı olarak belirlenen zemin parametreleri [31]

Zemin Parametresi	Sembol	Referans
Bağıl yoğunluk	ID	Lancelotta (1993)
Yanal yer basıncı	Ko	Kulhawy, Mayne (1990)
Yanal yer basıncı	Ko	Mayne (1990)
Drenajsız makaslama kuvveti	Su	Lunne.T, Kleven.A (1981)
Bağıl yoğunluk	ID	Jamiolkowski M. (1985)
Zoraki modül	M	Kulhawy, Mayne (1990)
Efektif sürtünme açısı	Fi	Robertson, Campanella (1983)

Çalışma alanı zemin türleri Robertson vd. (1986)'ne göre sınıflandırılmıştır. Bu sınıflama yöntemine göre, x eksenini sürtünme oranı $R_f(\%)$ (Eşitlik 4.5) değişimine bağlı y eksenini boşluk suyu basıncına bağlı olarak düzeltilmiş konik uç direnci (q_t) değişimi incelenir. Şekil 5.8'da görüldüğü gibi sınıflama abağı 12 bölgeye ayrılmış ve her bir bölge, farklı zemin türüne karşılık gelmektedir [34]. Çalışma alanında sismik uygulama aralıklarında ortalaması

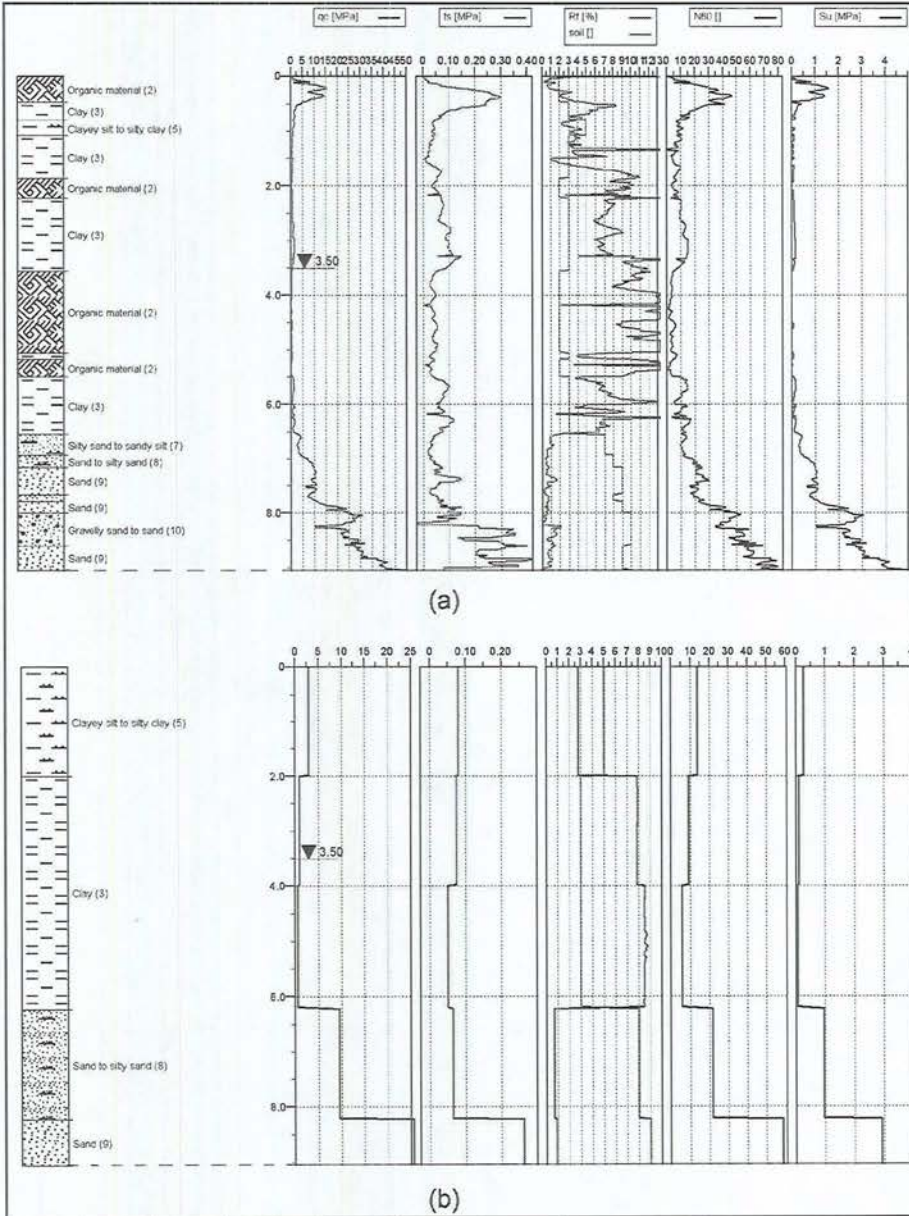


Bölge	Zemin türü
1	Duyarlı ince tane
2	Organik malzeme
3	Kil
4	Siltli kil - kil
5	Killi silt - siltli kil
6	Kumlu silt - killi silt
7	Siltli kum - kumlu silt
8	Kum - siltli kum
9	Kum
10	Çakıllı kum - kum
11	Çok sıkı ince tane
12	Kum - killi kum

Şekil 5.8. Robertson vd. (1986) zemin sınıflaması abağı üzerinde q_t ve R_f değerlerinin değişimi ve bölgelere karşılık gelen zemin türleri

alınan R_f ve q_t değerlerinin değişimi, abak üzerinde (+) işaretli noktalara karşılık gelmektedir (Şekil 5.8).

CPT uygulama aşamasında 2 cm aralıklı veri ölçer ve elde edilen bu veriler grafik olarak yorumlanır. Bu çalışmada, sismik uygulama seviyeleri esas alınarak 2 cm aralıklı okunan verinin sismik uygulama aralığı mesafesinde ortalaması alınmıştır ve bu değerler üzerinden R_f , N_{60} , S_u ve zemin türü hesaplanmıştır (Şekil 5.9). Sonuç olarak elde edilen tüm CPT verileri Ek-3’ de verilmiştir.



Şekil 5.9. 3 nolu CPT kaydı zemin profili (a) elimine edilmemiş profil (b) Sismik uygulama aralığında elimine edilmiş profil

5.3 CBS Kullanılarak Verilerin Yorumlanması

Saha çalışmaları sonucu elde edilen tüm veriler CBS kullanılarak sayısal ortamda yorumlanmıştır. Bu amaçla verilerin bölgesel değişimini belirten haritalar ve üç boyutlu analiz modelleri hazırlanmıştır.

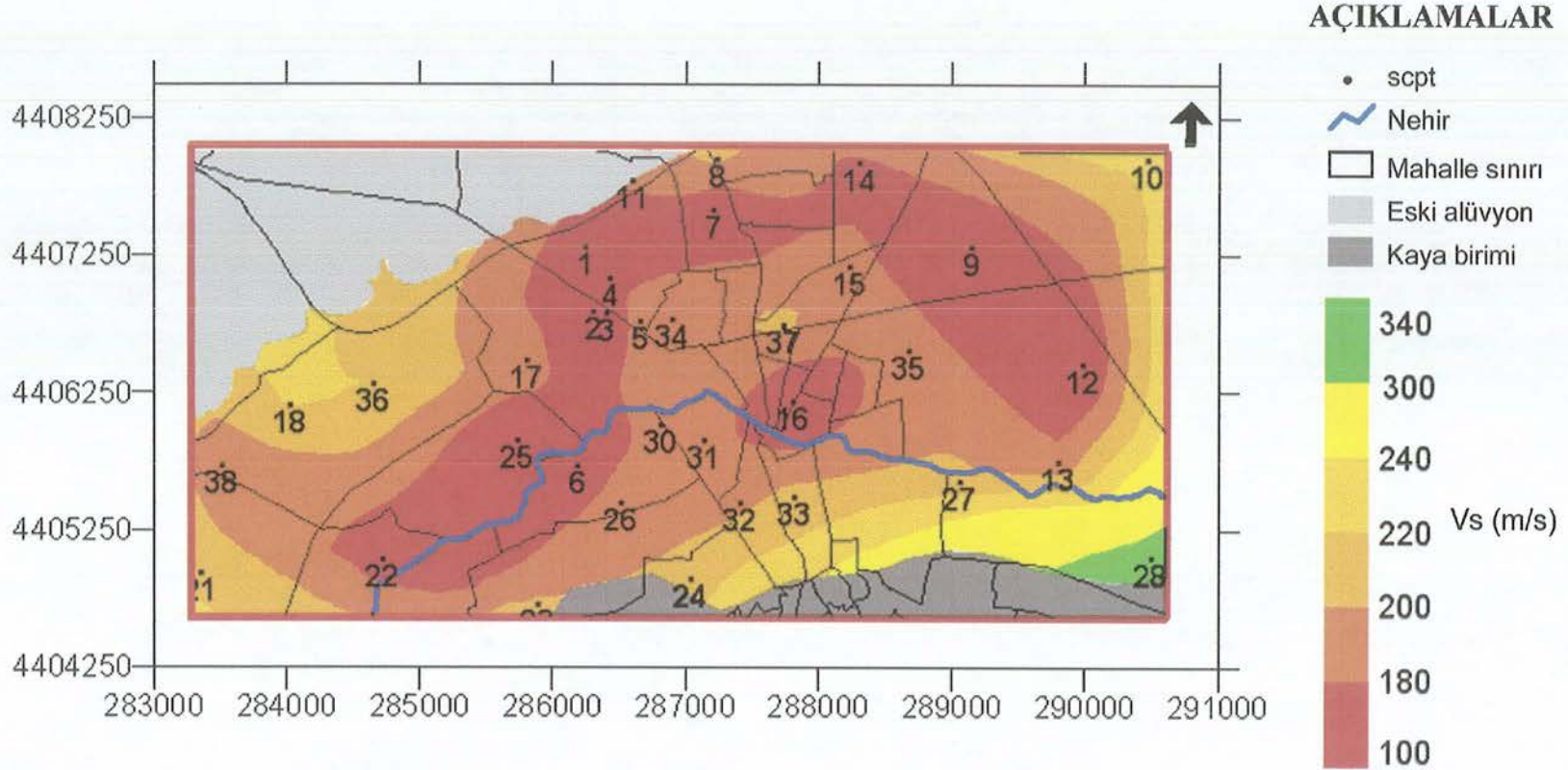
SCPT ile ölçülen makaslama dalgası ortalama hızı ($V_{s_{ort}}$) ve DSI tarafından yapılan rezistivite deneyleri kullanılarak belirlenen alüvyon kalınlığı bölgesel değişim sayısal modeli Surfer 7.0 yazılımı kullanılarak hazırlanmıştır. CPT ile belirlenen zemin türünün bölgesel ve derinlikle değişimi, makaslama dalgası ara hızı ($V_{s_{ara}}$) bölgesel ve derinlikle değişimi gibi üç boyutlu modellemeler Voxel Analyst yazılımı kullanılarak yapılmıştır.

Elde edilen haritalar, harita koordinatlarına oturtulmuş ve sayısallaştırılmıştır. Sayısallaştırılmış haritaların CBS kullanılarak yorumlanmasına çalışılmıştır. Bu aşamada harita koordinatlarında tanımlı mahalle sınırlarını, çalışma alanından geçen Porsuk nehrini, SCPT uygulamalarının yapıldığı yeni alüvyon birimi dışındaki jeolojik birimlerin sınırlarını ve çalışma alanını içeren haritalar hazırlanmıştır. Bu çalışmada yorumlamada kullanılan bazı harita ve modeller:

1. Ortalama makaslama dalgası hızı ($V_{s_{ort}}$) haritası (Şekil 5.11)
2. Makaslama dalgası ara hızı ($V_{s_{ara}}$) değişim modeli (Şekil 5.12)
3. Robertson vd. (1986)' ne göre belirlenen zemin türü modeli (Şekil 5.13)
4. Çalışma sahasını içine alan bölgenin alüvyon kalınlığı haritası (Şekil 5.14)

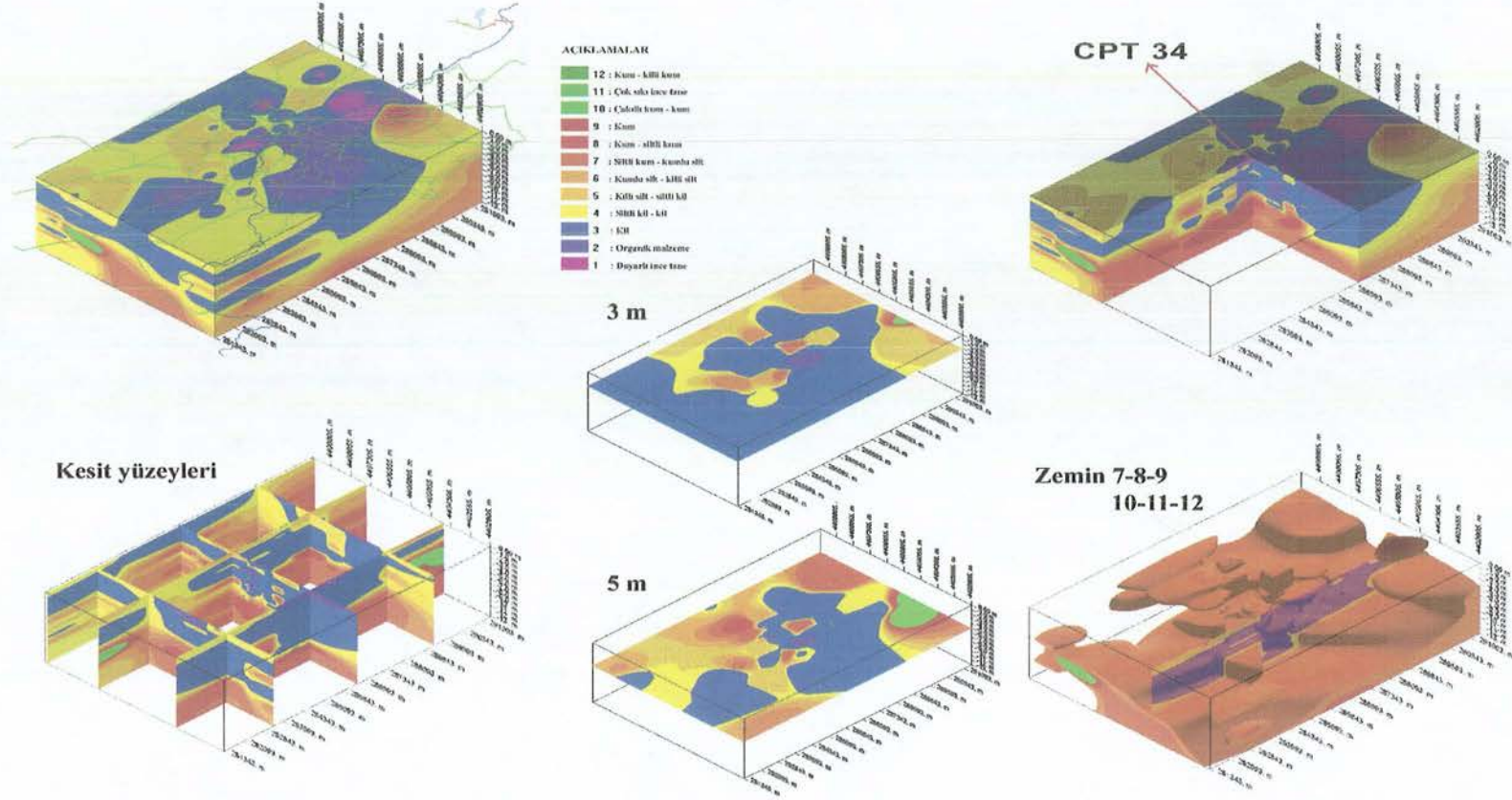
Verilerin değerlendirilmesinde oldukça kolaylık sağlayan CBS, sayısal veri kontrolüyle de yorumcuya hız kazandırır. Sayısallaştırılmış haritaların CBS kullanılarak yorumlanması için GeoMedia Professional 4.0 yazılımı kullanılmıştır. Bu aşamada sayısallaştırılan haritalara ait sayısal elemanlar ve bu elemanların grafik ve öznelik değerleri oluşturulmuştur (Şekil 5.10). Sayısal verilerin CBS kullanılarak yorumlanması ile elde edilen tüm haritalar ve modeller istatistiksel değerlendirmeler bölümünde ayrıntılı olarak yorumlanmıştır.

ÇALIŞMA ALANI MAKASLAMA DALGASI HIZI (V_s) HARİTASI



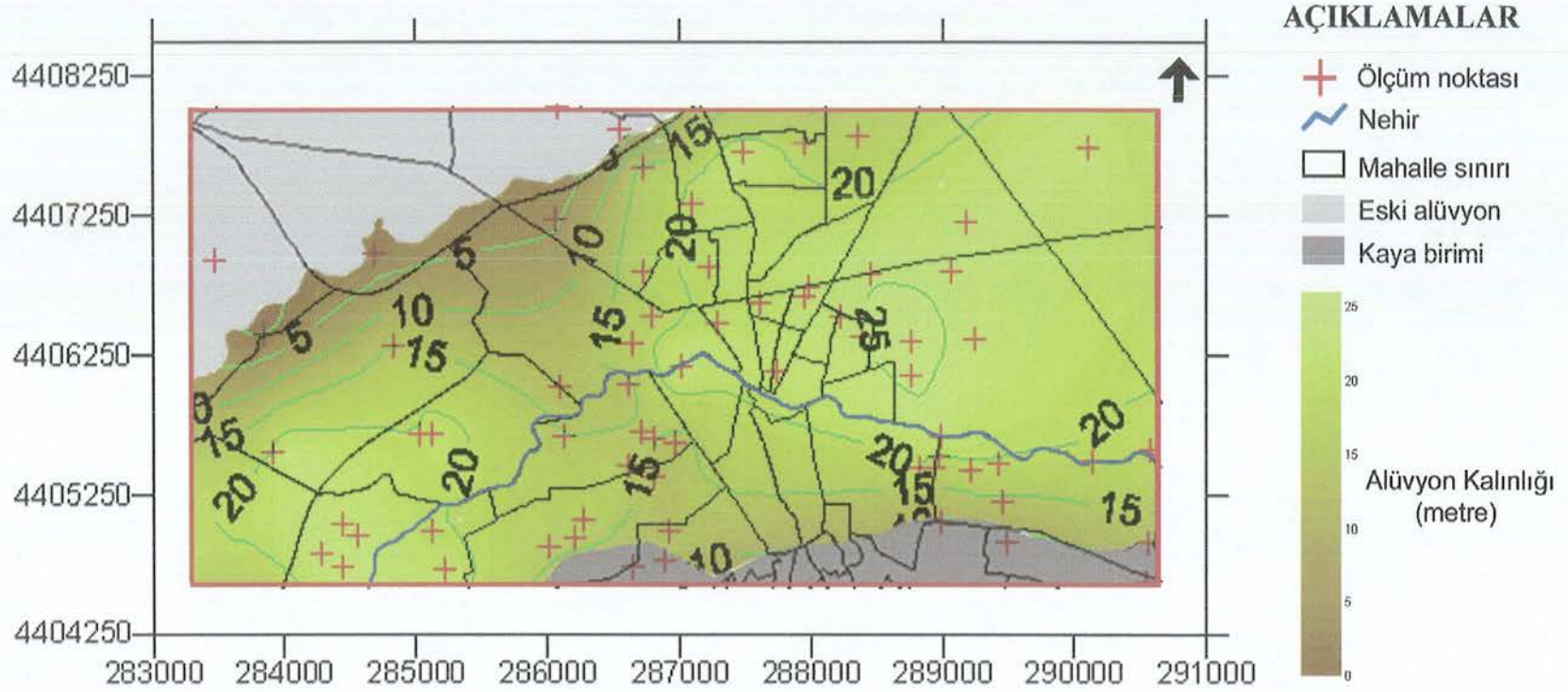
Şekil 5.11. Çalışma alanı SCPT uygulama noktaları ve makaslama dalgası hızı haritası

ÇALIŞMA ALANINI İÇİNE ALAN BÖLGENİN ZEMİN TÜRÜ MODELİ UYGULAMALARI (Robertson vd. 1986'ya göre)



Şekil 5.13. Çalışma alanını içine alan bölgenin Robertson vd. (1986)' ne göre zemin türü modellemesi

ÇALIŞMA ALANI ALÜVYON KALINLIĞI HARİTASI



Şekil 5.14. Çalışma alanında rezistivite ölçüm noktaları ve alüvyon kalınlığı haritası

6. İSTATİSTİKSEL DEĞERLENDİRMELER

Mühendislik uygulamalarında istatistik yöntemlerin kullanılması, karşılaşılan problemlerin gerçeğe en yakın bir şekilde çözümlenmesi açısından ve elde edilen verilerin ifade edilebilmesi bakımından oldukça önemlidir. Mühendislik uygulaması ile belirlenen zemin özelliklerini tanımlayan parametrelerin rastgele değişken niteliğinde olup deterministik bir yaklaşımla ele alınmaları birçok hallerde yeterli olmamaktadır.

Bir rastgele değişkenin olasılık dağılımını tam olarak belirleyebilmek için o değişkene ait mümkün olabilecek gözlemlerin tümünden oluşan toplumu gözlemiş olmak gerekir. İstatistik olasılık teorisine dayanarak uygulamadaki bilgileri analiz ederek rastgele değişkenin toplamının özellikleri hakkında en iyi tahminlerin yapılmasını sağlar, aynı zamanda bu tahminlerdeki hataları da belirler [36].

Rastgele değişimlerin olasılık dağılımlarının (frekans analizi) belirlenmesi veri yorumlamasında oldukça önemlidir. Pratikte belli grafik özelliğine sahip bazı fonksiyonların birçok rastgele değişkenlerin dağılımlarını iyi ifade ettikleri görülmektedir. İncelenen problemde bir dağılım fonksiyonu seçildikten sonra eldeki örneğe dayanarak bu fonksiyonun parametrelerinin seçilen tanımlı fonksiyona uyup uymadığının saptanmasına çalışılır. Seçilecek fonksiyonun uyumuna karar vermek kolay değildir, bunun için kesin kurallar ortaya konulmamıştır. Bu durumda çok kullanılan fonksiyonların özellikleri hakkındaki bilgi ve deneyimlerden yararlanılarak karar verilir. Karar verilirken eldeki örneklerden belirlenen histogram ile seçilen olasılık yoğunluk fonksiyonu karşılaştırılır.

Bu çalışmada, CPT ile ölçülen q_c ve hesaplanan R_f , zemin türü verilerinin, SCPT ile ölçülen V_s hızının frekans histogramları incelenmiştir. Verilerin frekans histogramları incelenirken gözlem sonuçlarını tek bir değerle tanımlayabilmek amacıyla verinin aritmetik ortalaması ve varyansı belirlenmiştir. Varyans değeri, ölçülen büyüklüğün karesi boyutunda olduğundan incelenen tüm değişkenleri fiziksel anlamı olan bir büyüklük olarak ifade edilebilmesi amacıyla varyansın karakökü alınarak standart sapması belirlenmiştir. En uygun olasılık dağılım modellerini belirlemek için X^2 testleri yapılmıştır.

Mühendislik uygulamalarında çoğu zaman aralarında istatistik anlamda bir ilişki bulunan birden fazla rastgele değişkeni birlikte ele almak gerekir. Birçok mühendislik problemlerinde iki (ya da daha çok sayıda) rastgele değişkenin aynı gözlem sırasında aldıkları değerlerin birbirinden istatistik bakımından bağımsız olmadığını, dolayısıyla bu değişkenler arasında bir ilişki bulunduğunu görülür. İki değişken arasında bir ilişki bulunması bunlardan birinin diğerinden etkilenmesi, ya da her iki değişkenin başka değişkenlerden birlikte etkilenmelerinden kaynaklanır.

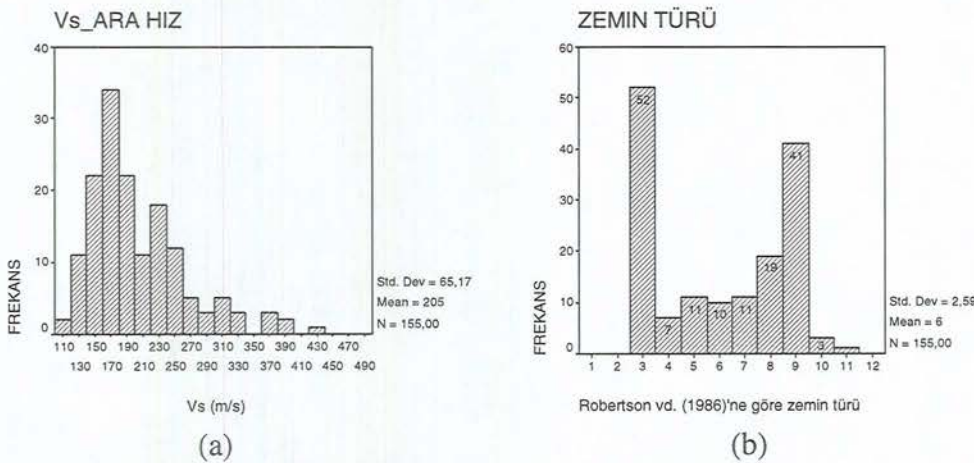
Ancak söz konusu ilişkiler her zaman deterministik (fonksiyonel) yaklaşımda değildir, yani değişkenlerden biri belli bir değer aldığı diğerinin her zaman aynı değeri alacağı söylenemez. Söz konusu ilişkide gözönüne alınmayan diğer değişkenlerin etkisiyle bu değer çeşitli gözlemlerde az çok farklı olabilir. Yine de değişkenler arasında fonksiyonel olmayan bağıntının varlığının ortaya çıkartılması ve biçiminin belirlenmesi pratikte büyük önem taşır. Bu bağıntı kullanılarak bir değişkenin alacağı değeri diğer bir değişkenin bilinen değerlerine bağlı olarak tahmin etmek mümkün olur. Bu tahmin söz konusu değişkenin alacağı gerçek değeri kesin olarak vermemekle birlikte gerçeğe yakın en iyi tahmin olur. Tahmin edilen değer gerçeğe yakın olan farkının (hata) da belli bir olasılıkla hangi sınırlar içinde kalacağı söylenebilir.

Yukarıda sözü edilen bir bağıntıyı tanımlayan matematiksel ifadeye regresyon denklemi denir. Regresyon analizinin amacı, değişkenler arasında anlamlı bir ilişki bulunup bulunmadığını belirlemek, böyle bir ilişki varsa bu ilişkiyi ifade eden regresyon denklemini belirlemek ve bu denklem kullanılarak yapılacak tahminlerin güven aralıklarını hesaplamaktır. İki rastgele değişken arasındaki fonksiyonel bağımlılığın bir ölçüsü korelasyon katsayısı olarak tanımlanır. Korelasyon katsayısının $r=0$ olması X ile Y değişkenleri arasında fonksiyonel bir bağımlılık bulunmadığını, r 'nin mutlak değerinin 1'e yaklaşması ise değişkenler arasındaki bağımlılığın gittikçe kuvvetlenerek fonksiyonel bir ilişkiye yaklaştığını ifade etmektedir. Buna göre iki rastgele değişken arasında anlamlı bir ilişki bulunup bulunmadığına karar vermek için korelasyon katsayısı değerine bakmak uygun olur.

Doğa bilimlerinde karşılaştığımız problemlerin birçoğunda, olaydaki değişkenlerin değerleri bilindiğinde probleme kesin çözüm bulunabilir. Olaylarda yasalar deterministik anlamda bilinmektedir ($F=m.a$ gibi). Buna karşılık öyle olaylar vardır ki bunlarda sonucu kesin olarak bilmek mümkün değildir. Bu genel olarak doğa olaylarındaki belirsizliklerden meydana gelir.

Bu çalışmada, SCPT verileri ile elde edilen makaslama dalgası hızı (V_s) değerlerinin yeni alüvyon olarak tanımlanan [6] zeminde farklı olması nedeni ile, yerel zemin koşulları ile V_s hızı değişkenleri arasındaki ilişki araştırılmıştır. V_s hızı ile q_c , R_f değişkenleri arasındaki regresyon denklemleri elde edilmiş ve korelasyon katsayıları belirlenmiştir.

Çalışma alanında 32 farklı noktada SCPT uygulanmıştır. Her bir SCPT uygulama noktasında farklı derinliklerden farklı V_s değerleri elde edilmiştir. Çalışma alanında 32 farklı noktadan toplam 155 farklı seviyede makaslama dalgası ara hızı ($V_{s_{ara}}$) değeri ölçülmüştür. Sismik uygulama aralığına karşılık gelen derinliklerden elde edilen CPT değerleri kullanılarak Robertson vd. 1986'ya göre zemin türü belirlenmiştir. Belirlenen bu zemin türlerinin frekans histogramlarına bakıldığında egemen zemin türünün kil:3 ve kum:9 dan oluştuğu görülmüştür. $V_{s_{ara}}$ değerlerinin aritmetik ortalaması ise 205 m/s'dir (Şekil 6.1).



Şekil 6.1 Çalışma alanındaki SCPT verisinin frekans histogramları a) $V_{s_{ara}}$ hızı frekans histogramı b) zemin türü frekans histogramı

Çalışma alanında 155 farklı seviyede ölçülen makaslama dalgası hızı, ara hızı olarak tanımlanmış ve ($V_{s_{ara}}$) gösterimi ile ifade edilmiştir. Çalışma alanında 32 farklı noktada uygulanan her bir SCPT'de tüm sismik kayıt derinliği için, ilk

kayıt derinliği sismik sinyali ve son kayıt derinliği sismik sinyali kullanılarak ölçülen makaslama dalgası hızı, ortalama hız olarak tanımlanmış ve ($V_{s_{ort}}$) gösterimi ile ifade edilmiştir. Çalışma alanında ölçülen ($V_{s_{ara}}$) ile ($V_{s_{ort}}$) değerleri EK-2’de verilmiştir. Sismik uygulama aralıklarına karşılık gelen CPT değerleri ve bu değerler kullanılarak elde edilen zemin türü değerleri EK-3’de verilmiştir.

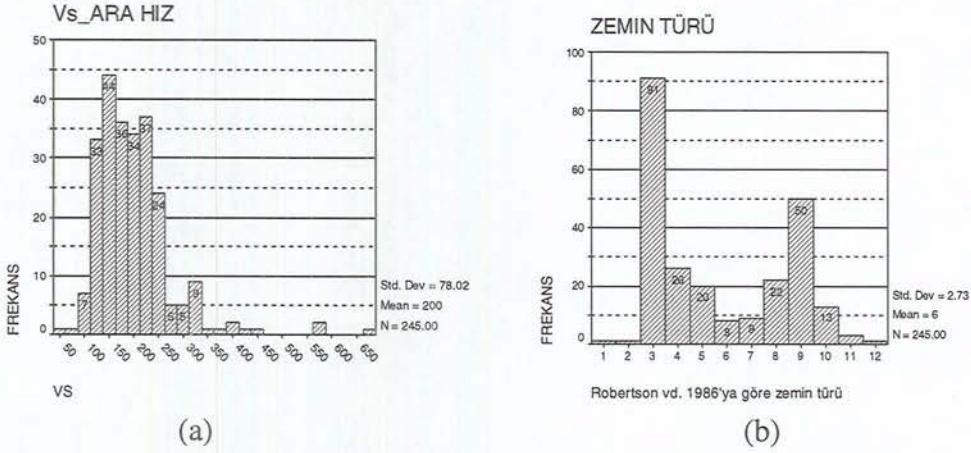
İstatistiksel analizlerin yapılmasında SPSS 9.0 yazılımı kullanılmıştır. Elde edilen veriler arasındaki regresyon denklemlerinin ve korelasyon katsayılarının belirlenmesinde Microsoft Excel yazılımından yararlanılmıştır.

6.1 Zemin Özelliklerini Tanımlayıcı İstatistiksel Değerlendirmeler

Bu bölümde CPT’den elde edilen q_c , R_f , zemin türü zemin parametrelerinin ve SCPT’den elde edilen V_s hızı değerlerinin frekans histogramları belirlenmiştir. Dağılımları belirlenen değişkenler değerlendirilerek, q_c - V_s ve R_f - V_s regresyon denklemlerinin oluşturulmasına çalışılmıştır.

Elde edilecek olan ilişki fonksiyonlarının doğruluğunu arttırabileceği düşünülerek; sismik uygulama aralığında ortalaması alınmış CPT verileri (q_c , R_f) yerine, her zemin türüne karşılık gelen derinlik aralığındaki CPT verilerinin (q_c , R_f) aritmetik ortalaması alınmıştır. Böylece veri sayısı 245’e çıkartılmıştır.

Çalışmada SCPT sayısını arttırabilmek amacıyla çalışma alanının içinde yapılan 32 adet SCPT uygulamasına ek olarak çalışma alanının dışına düşen, Anadolu Üniversitesi tarafından 2002 yılı içerisinde tamamlanan “Eskişehir Yerleşim Yeri Batısı Yeni Yerleşim Alanının Mühendislik Jeolojisi Haritası ve SCPT ile Jeoteknik Etüdünün Hazırlanması” başlıklı proje kapsamında yapılan 8 adet SCPT’de kullanılmıştır. Çalışma sahası dışında kalan ve istatistiksel analiz aşamasında kullanılan diğer SCPT ölçüm noktaları Şekil 6.2’de verilmiştir.



Şekil 6.3. SCPT veri frekans histogramları a) $V_{s_{ara}}$ hızı frekans histogramı b) zemin türü frekans histogramı

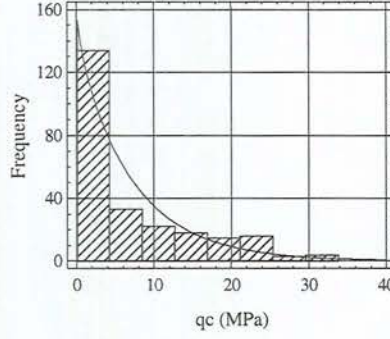
Zemin parametrelerinin olasılık dağılım modellerinin bulunmasına çalışılmıştır. Bu çalışmada olasılık dağılım modeli olarak sadece normal, log-normal, negatif eksponansiyel ve gamma dağılım modelleri kullanılmıştır. Parametrelerin modellere uyum derecelerinin test edilmeleri amacıyla X^2 testleri yapılmıştır (Çizelge 6.2).

Çizelge 6.2. Zemin Parametrelerinin Olasılık Dağılım Modellerine Uygunluk Testi (X^2) Sonuçları

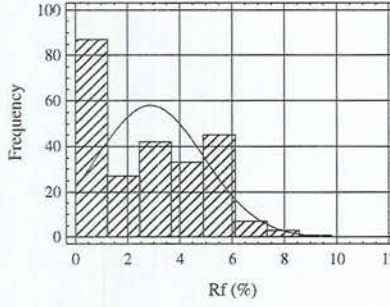
Zemin Parametresi	Olasılık Dağılım Modeli	X^2 Değeri	Serbestlik Derecesi
q_c (MPa)	Normal	74.24	3
	Log-Normal	40.21	4
	Negative Exponential	41.57	5
	Gamma	38.47	4
R_f (%)	Normal	57.01	3
	Log-Normal	125.93	6
	Negative Exponential	89.01	7
	Gamma	86.78	5
V_s (m/s)	Normal	40.27	2
	Log-Normal	4.26	1
	Negative Exponential	302.32	6
	Gamma	10.61	2
Zemin türü	Normal	402.41	9
	Log-Normal	303.27	8
	Negative Exponential	434.86	11
	Gamma	306.40	8

U_c direncin gamma olasılık dağılımına yaklaştığı (Şekil 6.4), sürtünme oranının normal olasılık dağılımına yaklaştığı (Şekil 6.5.), makaslama dalgası hızının ise log-normal olasılık dağılımı gösterme eğiliminde oldukları

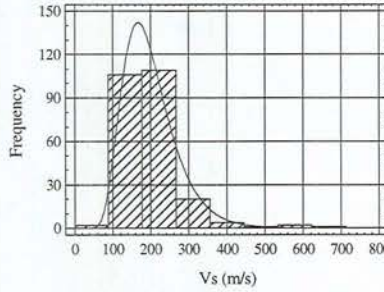
belirlenmiştir (Şekil 6.6). Zemin türü değerlerinin frekans histogramına bakıldığında ise, tanımlı olasılık dağılım fonksiyonlarının hiçbiri ile uyuşmadığı görülmüştür (Şekil 6.7).



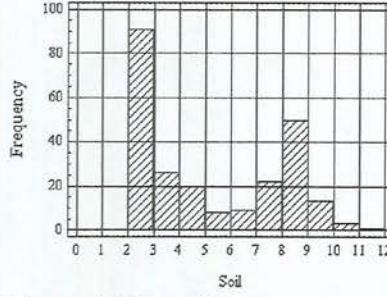
Şekil 6.4. Uç dirence (q_c) ait frekans histogramı ve gamma dağılım fonksiyonu



Şekil 6.5. Sürtünme oranına (R_f) ait frekans histogramı ve normal dağılım fonksiyonu



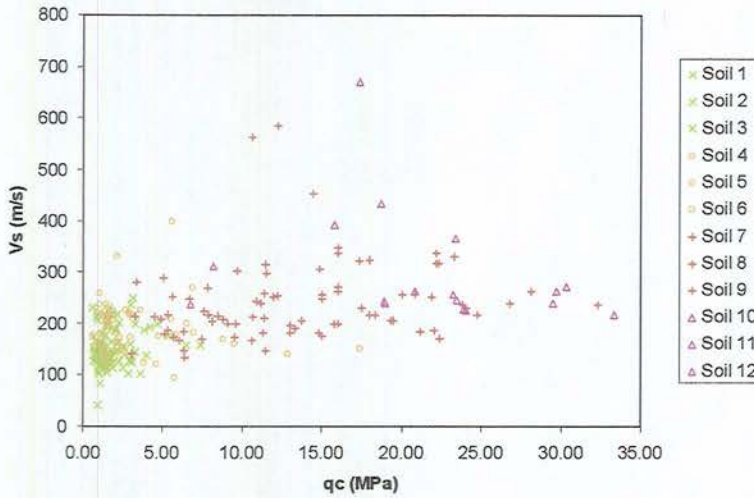
Şekil 6.6. Makaslama dalgası hızına (V_s) histogramı ve log-normal dağılım fonksiyonu



Şekil 6.7. Zemin türüne ait frekans ait frekans histogramı

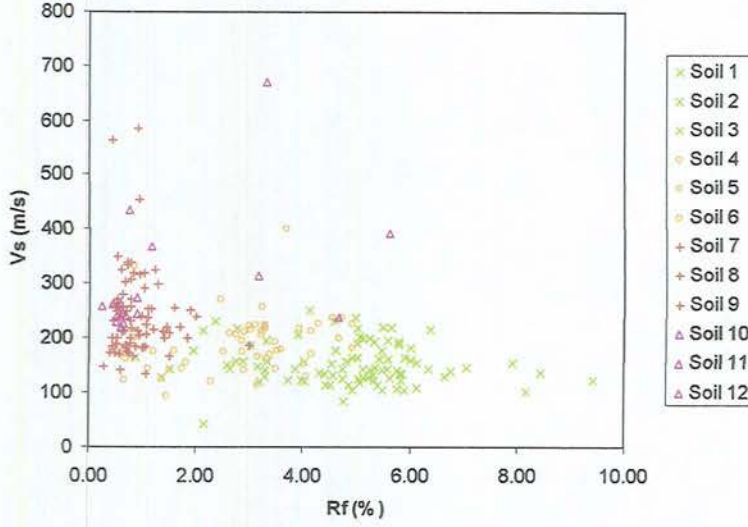
6.2. CPT Zemin Parametreleri ile $V_{s_{ara}}$ Hızı İlişkisinin Belirlenmesi

Farklı zemin türlerine ait q_c ve V_s değerleri aralarında ilişki olup olmadığının belirlenmesi için bu değerler x – y eksenine göre işaretlendiğinde, noktaların dağılımlarına bakıldığında logaritmik bir ilişkinin olabileceği görülmüştür. İlişkinin logaritmik dağılım fonksiyonuna bakıldığında ise, korelasyon katsayısının $r = 0.63$ olduğu belirlenmiştir (Şekil 6.8).



Şekil 6.8. Farklı zemin türlerinin uç direnç (q_c) – makaslama dalgası hızı (V_s) ilişkisi ($r=0.63$, log.)

Farklı zemin türlerine ait $R_f - V_s$ ilişkisinin üstel dağılım fonksiyonuna bakıldığında ise, veriler arasında bir ilişki bulunmadığı, korelasyon katsayısının $r = 0.46$ olduğu görülmüştür (Şekil 6.9).



Şekil 6.9. Farklı zemin türlerine ait sürtünme oranı (R_f) – makaslama dalgası hızı (V_s) ilişkisi ($r=0.46$, exps.)

Yukarıda belirtilen q_c-V_s ilişkisi ile R_f-V_s ilişkisi her farklı zemin sınıfı için ayrı olarak araştırılmıştır. Her farklı zemin sınıfı için ilgili ilişkilere karşılık gelen korelasyon katsayıları elde edilmiştir (Çizelge 6.3).

Çizelge 6.3. Farklı zemin türlerinin q_c-V_s ve R_f-V_s ilişkilerinin r değerleri

Zemin türü	$r(q_c-V_s)$		$r(R_f-V_s)$	
	Doğrusal	Logaritmik	Doğrusal	Eksponensiyel
3	0.59	0.61	0.13	0.13
4	0.58	0.54	0.11	0.22
5	0.00	0.08	0.36	0.37
6	0.66	0.68	0.42	0.43
7	0.47	0.50	0.39	0.39
8	0.05	0.02	0.38	0.41
9	0.18	0.19	0.13	0.13
10	0.22	0.22	0.46	0.47

Elde edilen bu verilere bakıldığında q_c-V_s ilişkisinin r değerinin doğrusal dağılım fonksiyonu için ulaştığı en büyük değer 0.66 olduğu, logaritmik dağılım fonksiyonu için en büyük değer 0.68 olduğu ortaya çıkmıştır. R_f-V_s ilişkisinde ise korelasyon katsayısı değerlerinin oldukça düşük olduğu ve doğrusal dağılım fonksiyonu için en büyük değer 0.46 olduğu, üstel dağılım fonksiyonu için en büyük değer 0.68 olduğu ortaya çıkmıştır. R_f-V_s ilişkisi pek anlamlı çıkmasa da

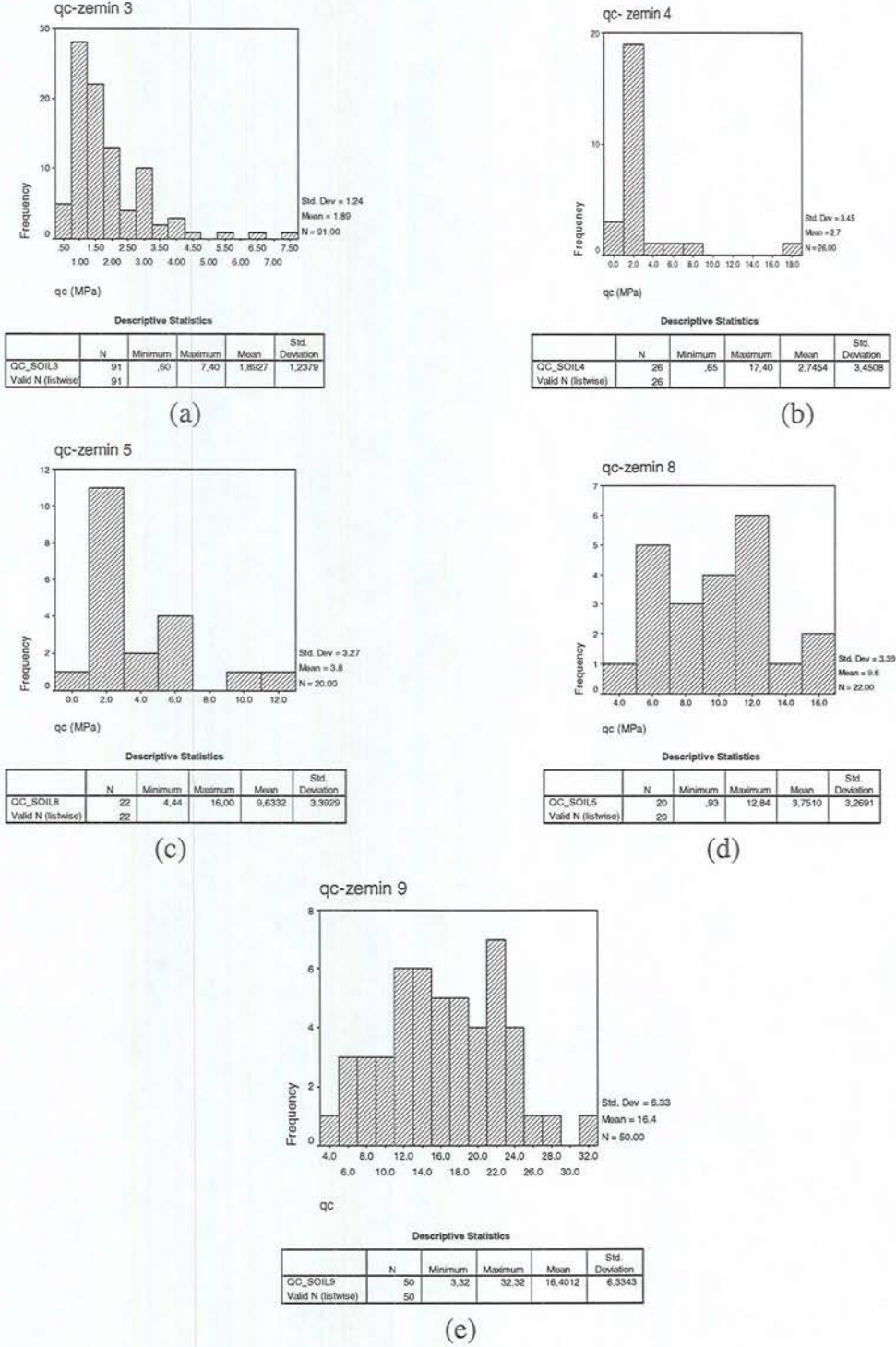
elde edilen korelasyon katsayısı değerlerine bakıldığında tane boyunun büyümesi ile, bilhassa doğrusal dağılım fonksiyonu alındığında arttığı gözlenmiştir.

Zemin türüne bağlı olarak gruplandırılmış tüm veri dağılımına bakıldığında (Çizelge 6.4), 245 aralığa karşılık gelen q_c , R_f ve V_s değerlerinin Şekil 6.3-b’de verilen oranlarda (N:tanımlı zemin türüne karşılık gelen veri sayısı) dağılım gösterdiği gözlenmiştir.

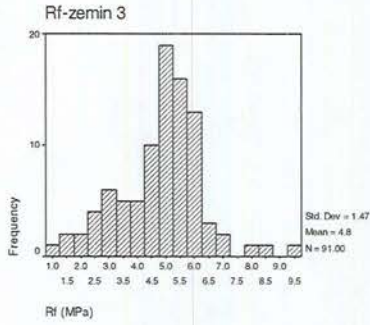
Çizelge 6.4. Farklı zemin türlerinin q_c , V_s ve R_f değerleri

zemin türü	N	q_c			V_s			r_f		
		Min	Max	Ort.	Min	Max	Ort.	Min	Max	Ort.
1	1	0.91	0.91	0.91	42	127	84	2.16	2.16	2.160
2	1	0.89	0.89	0.89	102	102	102	8.16	8.16	8.160
3	91	0.6	7.4	1.89	84	250	156	0.86	9.40	4.790
4	26	0.65	14.7	2.74	94	237	177	0.83	4.92	3.350
5	20	0.93	12.84	3.75	140	270	193	0.58	4.93	2.620
6	8	1.57	6.54	3.66	120	205	173	0.83	4.66	2.636
7	9	2.58	9.51	5.41	123	251	176	0.47	3.00	1.184
8	22	4.44	16	9.63	147	316	218	0.28	1.58	0.910
9	50	3.32	32.32	16.4	147	349	241	0.38	2.00	0.830
10	13	18.66	33.29	24.45	218	434	268	0.22	1.16	0.644
11	3	6.76	15.75	10.22	312	236	274	3.16	5.59	4.460

Örnek sayısının 15'in üzerinde olduğu zemin türleri için q_c , R_f , V_s değerlerinin frekans histogramları sırasıyla Şekil 6.10, Şekil 6.11, Şekil 6.12'de verilmiştir.

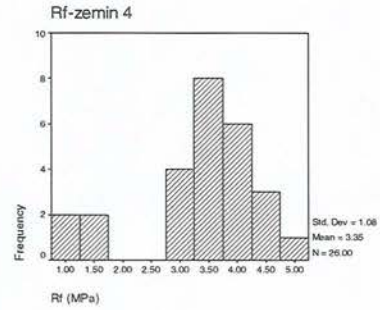


Şekil 6.10. Farklı zemin türlerinin q_c frekans histogramları a) kil b) siltli kil c) killi silt d) siltli kum e) kum



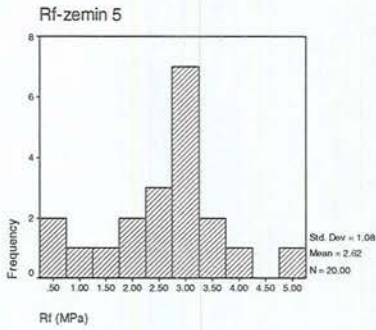
Descriptive Statistics					
	N	Minimum	Maximum	Mean	Std. Deviation
ZEMN3	91	.86	9.40	4.7908	1.4681
Valid N (listwise)	91				

(a)



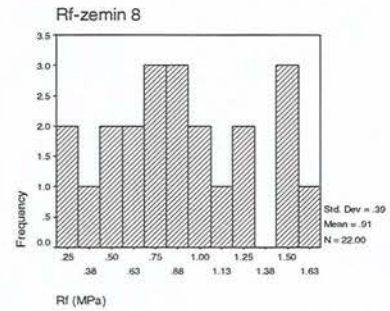
Descriptive Statistics					
	N	Minimum	Maximum	Mean	Std. Deviation
ZEMN4	26	.83	4.92	3.3500	1.0776
Valid N (listwise)	26				

(b)



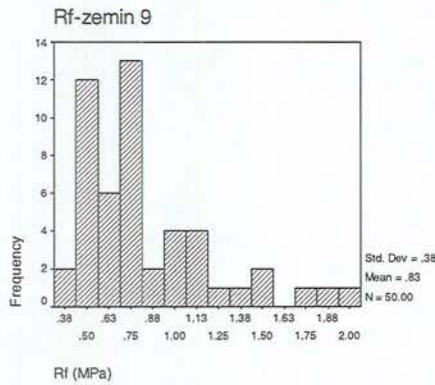
Descriptive Statistics					
	N	Minimum	Maximum	Mean	Std. Deviation
ZEMN5	20	.58	4.93	2.6205	1.0799
Valid N (listwise)	20				

(c)



Descriptive Statistics					
	N	Minimum	Maximum	Mean	Std. Deviation
ZEMN8	22	.28	1.54	.9105	.3882
Valid N (listwise)	22				

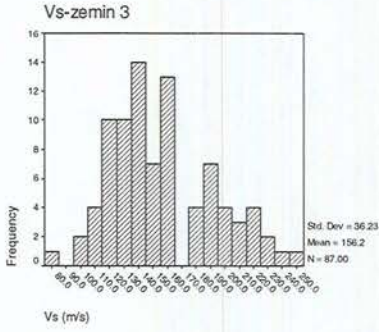
(d)



Descriptive Statistics					
	N	Minimum	Maximum	Mean	Std. Deviation
ZEMN9	50	.38	2.00	.8336	.3765
Valid N (listwise)	50				

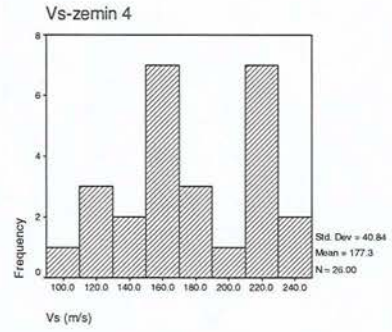
(e)

Şekil 6.11. Farklı zemin türlerinin R_f frekans histogramları a) kil b) siltli kil c) killi silt d) siltli kum e) kum



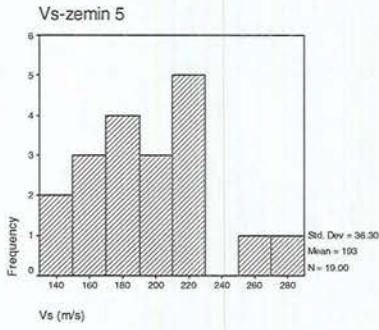
Descriptive Statistics				
	N	Minimum	Maximum	Std. Deviation
VS_SOL3	87	84,00	250,00	36,2312
Valid N (listwise)	87			

(a)



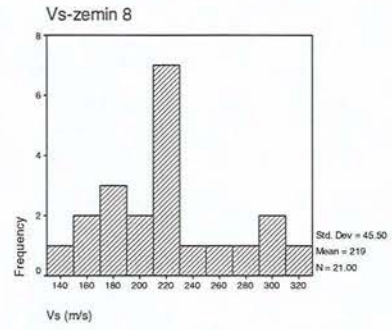
Descriptive Statistics					
	N	Minimum	Maximum	Mean	Std. Deviation
VS_SOL4	26	94,00	237,00	177,3077	40,8439
Valid N (listwise)	26				

(b)



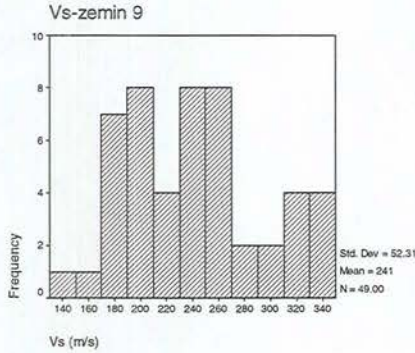
Descriptive Statistics					
	N	Minimum	Maximum	Mean	Std. Deviation
VAR00001	19	140,00	270,00	193,0000	36,3012
Valid N (listwise)	19				

(c)



Descriptive Statistics					
	N	Minimum	Maximum	Mean	Std. Deviation
VS_SOL8	21	147,00	316,00	218,9524	45,5022
Valid N (listwise)	21				

(d)



Descriptive Statistics					
	N	Minimum	Maximum	Mean	Std. Deviation
VAR00001	49	147,00	349,00	241,2449	52,3134
Valid N (listwise)	49				

(e)

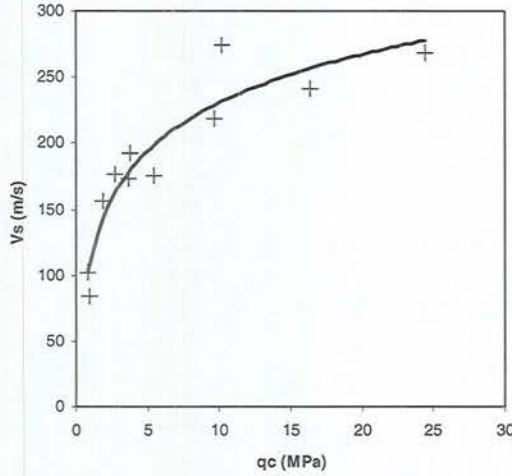
Şekil 6.12. Farklı zemin türlerinin Vs frekans histogramları a) kil b) siltli kil c) killi silt d) siltli kum e) kum

Bu aşamada düşük çıkan q_c - V_s ilişkisi ile R_f - V_s ilişkisinin hangi koşullarda yüksek ilişkili olabileceği üzerine çalışılmıştır. Bu çalışma sonucunda farklı zemin türlerinin q_c , R_f , ve V_s değerlerinin ortalamaları alınarak bu ortalama

değerler arasında ilişki araştırıldığında r değerinin oldukça yüksek değer aldığı görülmüştür. Farklı zemin türlerinin q_c - V_s ilişkisi incelendiğinde logaritmik dağılım fonksiyonu için korelasyon katsayısının 0.95 olduğu anlaşılmıştır. Bu yüksek korelasyon katsayısına sahip ilişki fonksiyonu ise

$$V_s = 52,674 \cdot \ln(q_c) + 109,29 \quad (6.1)$$

olarak elde edilmiştir (Şekil 6.13).

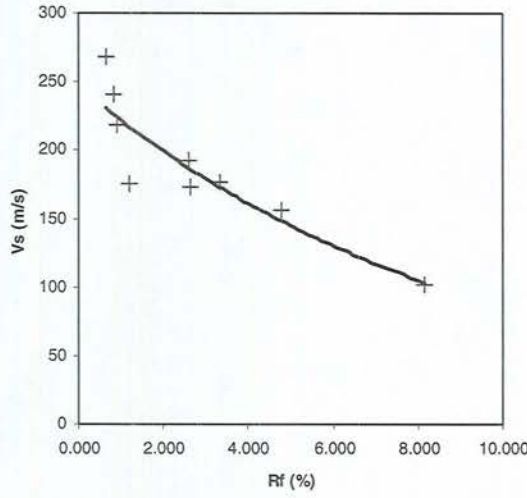


Şekil 6.13. Uç direnç (q_c) - makaslama dalgası hızı (V_s) ilişkisi ($r=0.95$, log.)

Aynı yöntem R_f - V_s ilişkisine uygulandığında farklı zemin türlerinin aritmetik ortalamalarının R_f - V_s ilişkisinde üstel dağılım fonksiyonu için $r = 0.93$ gibi yüksek bir ilişki olduğu ve ilişki fonksiyonu olarak;

$$V_s = 246,91 \cdot e^{-0,1068 \cdot R_f} \quad (6.2)$$

üstel fonksiyonu elde edilmiştir (Şekil 6.14).



Şekil 6.14. Sürtünme oranı (R_f) - makaslama dalgası hızı (V_s) ilişkisi ($r=0.93$, exps.)

Yüksek korelasyon katsayısı olan $r=0.93$ değerinin elde edilmesinde 1 ve 11 no'lu zemin türlerinden elde edilen ortalama değerler kullanılmamıştır. Robertson vd. (1986) sınıflandırmasına göre 1 no'lu zemin; hassas özelliğe sahip ince taneli zemin türü ve 11 no'lu zeminin ise; çok sıkı çimentolanmış ince taneli zemin türü olarak tanımlanmıştır. Belirtilen bu zemin türleri çalışılan alan içinde yok denecek kadar az bulunmaktadır. Bu nedenle, bu zemin türlerine ait veriler azdır ve istatistiksel analize katılmamıştır. Toplam 245 seviyenin kullanıldığı bu çalışmada, 1 no'lu zemin türüne sadece 1 seviyenin ve 11 no'lu zemin türüne ise 2 seviyenin dahil olduğu belirlenmiştir. Daha önce yapılan ve $r=0.95$ değeri elde edilen q_c-V_s ilişkisi analizi için aynı zemin türleri yok sayılarak hesaplandığında, logaritmik dağılım fonksiyonu için korelasyon katsayısının daha yüksek bir değere ulaştığı görülmüştür ($r=0.97$).

6.2.1 Elde edilen ilişki fonksiyonları kullanılarak yöntemin sınanması

Yöntemin elde edilen ilişki fonksiyonları ile sınanması için arazide 8 farklı SCPT deney noktasında belli derinliklerde veriler alınmıştır. Bu veriler, makaslama dalgası ortalama hızı ($V_{s_{ort}})_g$, değerleri ile sismik uygulama aralığındaki q_c ve R_f değerleridir. Çalışma alanında 8 farklı SCPT deney noktasında q_c-V_s , R_f-V_s ilişki fonksiyonları kullanılarak tüm sismik kayıt

derinliği için makaslama dalgası hızı hesaplanmış ve $(V_{s_{ort}})_b$ gösterimi ile ifade edilmiştir.

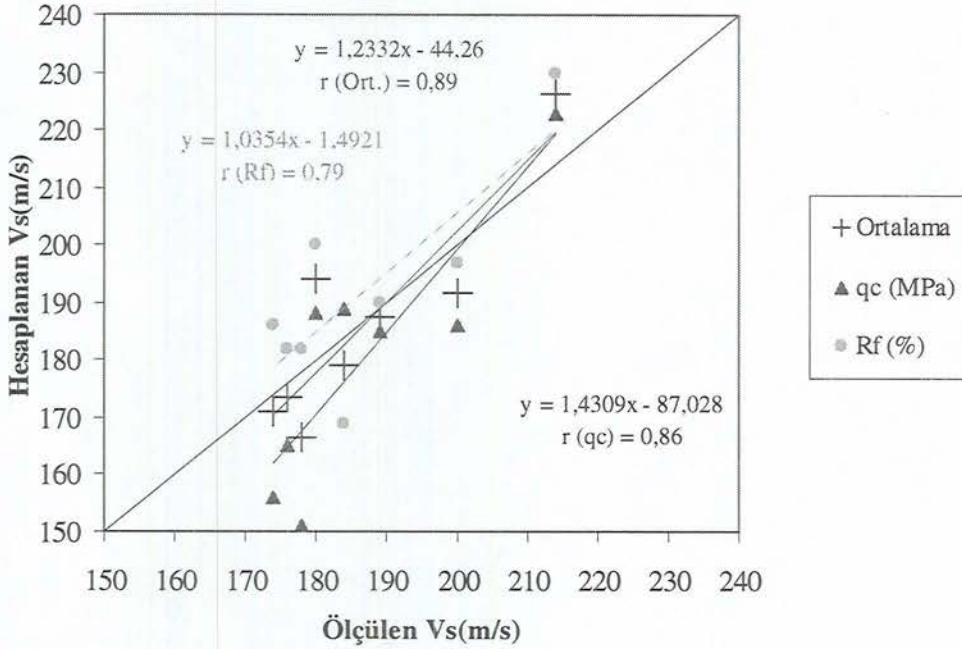
Ölçülen $(V_{s_{ort}})_g$ değeri ile q_c ve R_f değerlerinden elde edilen ilişki fonksiyonlarına konularak elde edilen $(V_{s_{ort}})_b$ değerleri izelge 6.5’de verilmiştir. Bu izelgeye bakıldığında ilişki fonksiyonlarından elde edilen $(V_{s_{ort}})_b$ değerleri ile araziden llen $(V_{s_{ort}})_g$ değerleri arasında çok büyük benzerlikler olduğu grlmştir. Bu benzerliğin ilişki fonksiyonlarından elde edilen $(V_{s_{ort}})_b$ değerlerinin ortalaması alındığında daha da arttığı gözlenmiştir. Çizelge 6.5’n hesaplamalar sütunu içinde bulunan q_c _ R_f ilişki fonksiyonlarından elde edilen makaslama dalgası hızı değerlerinin aritmatik ortalamasıdır.

Çizelge 6.5. 8 farklı SCPT uygulama noktasında hesaplanan $(V_{s_{ort}})_b$ ve llen $(V_{s_{ort}})_g$ hızları

scpt no	ölçülen	hesaplanan			fark	derinlik
		q_c	R_f	q_c _ r_f		
4	174	156	186	171	-3	7.60
13	184	189	169	179	-5	5.02
14	176	165	182	174	-3	6.10
17	200	186	197	192	-9	5.90
34	189	185	190	188	-2	5.80
35	178	151	182	167	-12	4.90
10	214	223	230	227	13	7.26
12	180	188	200	194	14	6.40

İlişki fonksiyonları ile elde edilen $(V_{s_{ort}})_b$ değerleri ile arazide llen $(V_{s_{ort}})_g$ değerleri arasındaki ilişkinin daha belirgin olarak ortaya konması amacıyla bu iki değişken arasında korelasyon katsayısının bulunulmasına çalışılmıştır. Uç direnç (q_c) değerlerinden elde edilen $(V_{s_{ort}})_b$ ile araziden llen $(V_{s_{ort}})_g$ değerleri arasında $r = 0.86$ gibi bir ilişki elde edilmiştir (şekil 6.15). Sürtünme oranı (R_f) kullanılarak hesaplanan $(V_{s_{ort}})_b$ ile llen $(V_{s_{ort}})_g$ arasında $r = 0.79$ değeri elde edilmiştir (şekil 6.15). q_c ve R_f parametrelerinden elde edilen iki farklı makaslama dalgası hızı $(V_{s_{ort}})_b$ değerlerinin aritmetik ortalaması ile arazide doğrudan saptanan $(V_{s_{ort}})_g$ değeri karşılaştırıldığında, $r = 0.89$ gibi yüksek korelasyon katsayısı bulunmuştur (şekil 6.15.). Çalışma sonucunda sahada llen $(V_{s_{ort}})_g$

hızının, q_c parametresinden hesaplanan $(V_{s_{ort}})_b$ hızından yüksek, R_f parametresinden hesaplanan $(V_{s_{ort}})_b$ hızından ise düşük olduğu görülmüştür.



Şekil 6.15. $(V_s)_g$ değerleri ile q_c ve R_f 'den belirlenen $(V_s)_b$ değerleri arasındaki ilişki

Ölçülen $(V_{s_{ort}})_g$ değerleri ile q_c ve R_f 'den belirlenen $(V_{s_{ort}})_b$ değerlerinin karşılaştırılması amacıyla ayrıca RMSE (Root Mean Square Error) testi gerçekleştirilmiştir (Çizelge 3.2). Buna göre q_c parametresi kullanılarak hesaplanan $(V_{s_{ort}})_b$ değerleri için RMSE değeri 13.946, R_f parametresi kullanılarak hesaplanan $(V_{s_{ort}})_b$ değerleri için RMSE değeri 11.657, q_c ve R_f parametrelerinden hesaplanan $(V_{s_{ort}})_b$ değerlerinin ortalaması alındığında RMSE değeri 8.653 olduğu görülmüştür.

Çalışma alanında q_c ve R_f parametrelerinden hesaplanan $(V_{s_{ort}})_b$ değerlerinin aritmetik ortalaması alınarak elde edilen $(V_{s_{ort}})_b$ değerine ait RMSE sonucunun 0'a daha yakın olduğu görülmektedir. Sonuçta, q_c ve R_f parametrelerinden $(V_s)_b$ değeri elde edilmesinde ayrı ayrı elde edilen $(V_s)_b$ değerlerinin aritmetik ortalamasının alınmasının daha doğru olacağı anlaşılmıştır.

7. ÇALIŞMA ALANININ NEHRP YER SINIFLAMASI VE T_0 HARİTASININ BELİRLENMESİ

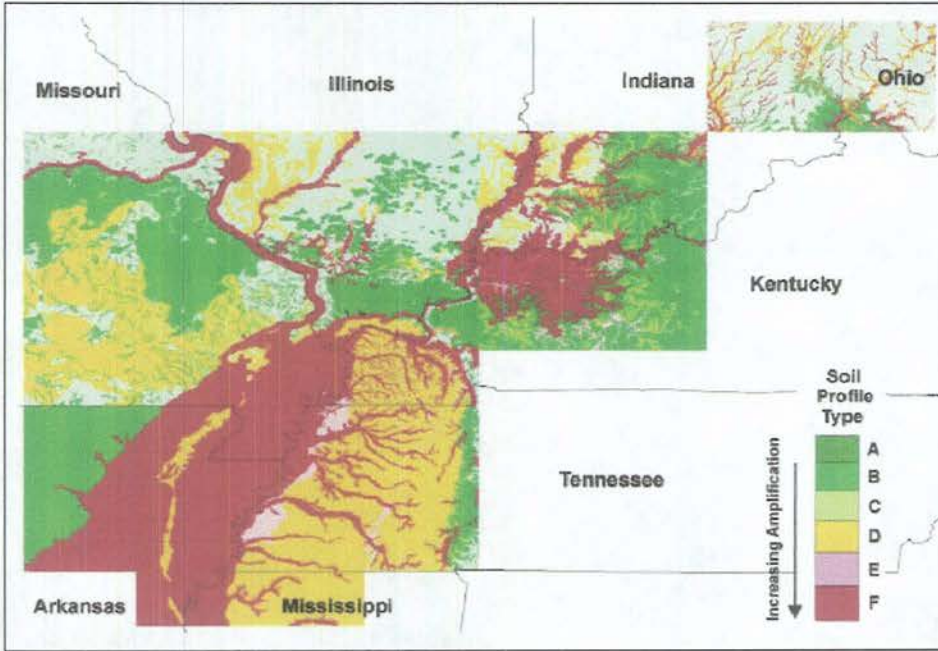
Depremler sırasında meydana gelen yerel zemin davranışlarının yol açtığı büyük derecede yapısal hasarın insan hayatına ve ekonomiye olan olumsuz etkisinden dolayı, son zamanlarda yerel zemin koşullarının belirlenmesine yönelik yapılan araştırmalar günden güne artmakta ve önem kazanmaktadır. Bu çalışmada, arazi deneylerine dayanan sismik yöntemler yardımıyla, çalışma alanının 1997 National Earthquake Hazards Reduction Program (NEHRP) yer sınıflaması yapılmış ve zemin doğal titreşim periyodu (T_0) belirlenmiştir. Zeminin doğal titreşim periyodunun belirlenmesinde V_s ve alüvyon kalınlığı verileri kullanılmıştır. NEHRP yer sınıflama sonuçları değerlendirilerek çalışma alanındaki zemin türü ve büyütme oranları teorik olarak yorumlanmaya çalışılmıştır. Çalışma alanının zemin doğal titreşim periyodu değişimi yorumlanarak yapı-yer ilişkisi incelenmiş ve rezonans açısından risk değerlendirmesi yapılmaya çalışılmıştır.

Çalışma alanı yeni alüvyon, eski alüvyon ve kaya birimi olarak tanımlanan jeolojik birimleri içermektedir. Çalışma alanında daha önce yapılan deprem risk çalışmaları yeni alüvyon zemininin, sivilaşma açısından yüksek risk bölgeleri içerdiğini göstermektedir [6].

Günümüze kadar yapılan deprem riski belirleme çalışmalarında ve bu çalışmalarda CBS tabanlı mikrozonlama uygulamalarında, makaslama dalgası hızı değişimine bağlı olarak birçok teknik kullanılmıştır [40]. Ana kayanın üzerindeki üst seviyedeki makaslama dalgası ortalama hızı değerlerinin bölgesel değişimleri kullanılarak, yer hareketi büyütmelerinin belirlenmesinde NEHRP' nin önerdiği standartlar geliştirilmiştir [13,10,41]. NEHRP (1997) yer sınıflaması Çizelge 7.1'de verilmiştir. NEHRP zemin sınıflamasıyla ilişkili olarak geliştirilen zemin büyütmesinin değişimi, ABD'nin iç bölgelerinde The Central US Earthquake Consortium (CUSEC) tarafından yapılan çalışmada belirtilmiştir (Şekil 7.1). Bu çalışmada A türü olarak tanımlana sınıftan F türü olarak tanımlanan sınıfa gidildikçe zemin büyütmesinin arttığı ortaya konmuştur [42].

Çizelge 7.1. NEHRP yer sınıflaması (NEHRP, 1997) [13]

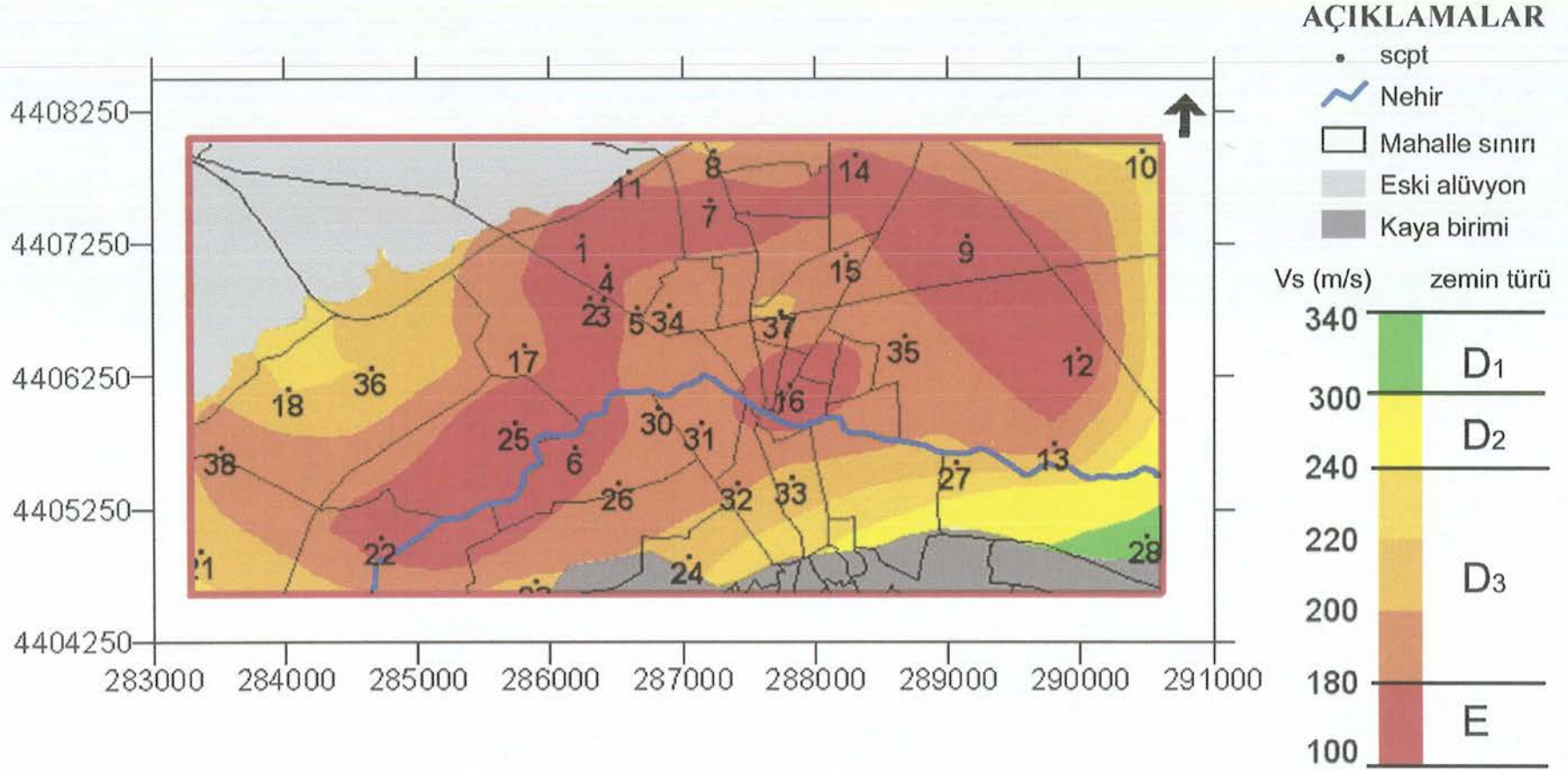
Yer Sınıfı	Tanımlama	Vs (m/s)
A	Sert kaya	$V_s > 1500$
B	Kaya	$760 < V_s \leq 1500$
C	Çok yoğun zemin ve yumuşak kaya (sert veya çok sıkı zeminler, çoğu çakıllar)	$360 < V_s \leq 760$
D	Sıkı zemin $15 \leq N \leq 50$ veya $50 \text{ kPa} \leq S \leq 100 \text{ kPa}$ (kumlar, sitler, sıkı veya çok sıkı kil, bazı çakıllar)	$180 < V_s \leq 360$
E	Kalınlığı 3 m'den daha az ve $PI > 20$, $w \geq 40\%$ ve $s_u < 25 \text{ kPa}$ olan yumuşak kil	$V_s < 180$
F	özel hesaplar gerektirir	



Şekil 7.1. ABD'nin iç bölgesinde NEHRP yer sınıflamasıyla ilişkili olarak geliştirilen zemin büyütmesinin değişimi [42]

NEHRP yer sınıflaması çalışma alanında 32 farklı noktada uygulanan SCPT'den elde edilen ortalama hız değerleri ($V_{s,ort}$) bölgesel değişimi kullanılarak Çizelge 7.1'de tanımlı NEHRP yer sınıflaması haritası hazırlanmıştır (Şekil 7.2).

ÇALIŞMA ALANI NEHRP 1997 YER SINIFLAMASI HARİTASI



Şekil 7.2. Çalışma alanı NEHRP 1997 yer sınıflaması haritası

NEHRP yer sınıflaması çalışma alanına uygulandığında hakim zemin türünün D sınıfı olduğu; ancak, çalışma alanının batısında Porsuk Çayı boyunca ve çalışma alanının kuzeyinde porsuk çayına paralel bir hatta oldukça geniş alanda E sınıfının yer aldığı görülmüştür. Deprem yer hareketlerinde olası zemin davranışlarını daha ayrıntılı ortaya koyabilmek amacı ile daha önceki çalışmalarda D sınıfına karşılık gelen $180 < V_s \leq 360$ m/s aralığın kendi içinde bölünebileceği önerilmiştir [10]. Buna göre D sınıfı; D_1 $180 < V_s \leq 240$ m/s, D_2 $240 < V_s \leq 300$ m/s ve D_3 $300 < V_s \leq 360$ m/s gibi aralıklara bölümlenmiştir. Bu çalışmada da bu bölümlenme esas alınmış ve uygulama buna göre yapılmıştır (Şekil 7.2). Bu sınıflamanın çalışma alanı için gelecekteki zemin uygulamalarında kullanılabilir bir bilgi olabileceği düşünülmektedir.

Makaslama dalgası hızı kullanılarak elde edilen bölgesel deprem risk haritalarından biri de zemin doğal titreşim periyodu (T_0) haritasıdır. Yeryüzündeki her yapı ve binanın kendine özgü kullanılan malzeme tipi, kat yüksekliği ve daha birçok parametreye bağlı olan öz salınım frekansı vardır. Depremler bir salınım olayıdır ve açığa çıkan enerji miktarına göre salınımın büyüklüğü de (genliği) artar. Sonuç olarak deprem sırasında herşey bu salınım gücüyle salınmaya başlar [44].

Zemin doğal titreşim periyodunun yapıların öz titreşim periyoduna eşit olması durumunda (rezonans); yapı üzerine etkiyen sismik yükler için en kötü koşul gerçekleşir ve yapının hasar görme veya yıkılma olasılığı artar [43].

Zemin doğal titreşim periyodu (T_0)

$$T_0 = \sum \frac{4.H_i}{V_{s_i}} \quad 7.1$$

bağıntısıyla belirlenir [38,46]. Burada H, ilgili zeminin kalınlığını

V_s ; ilgili zeminin ortalama makaslama dalga hızını göstermektedir.

Yüzeydeki tabakanın genlik-periyod ilişkisi araştırılarak, genliğin periyodun fonksiyonu olarak teorik hesabı yapıldığında, en üstteki tabakanın doğal periyodunda ($T_1=4H_1/V_1$) maksimum genliğin meydana geldiği görülmüştür [45].

Çalışma alanında 32 farklı noktada uygulanan SCPT'den elde edilen makaslama dalgası ortalama hızları ve DSİ III. Bölge Müdürlüğü tarafından

yapılan rezistivite ölçümlerinden elde edilen alüvyon kalınlığı verileri kullanılarak, alüvyon zemin için doğal titreşim periyodu hesaplanmıştır. Çalışma alanı için elde edilen doğal titreşim periyodu haritası EK-4’de verilmiştir. Her bir SCPT uygulama noktasında hesaplanan T_0 değeri Çizelge 7.2’de verilmiştir.

Çizelge 7.2. Çalışma alanında SCPT uygulama noktalarında hesaplanan T_0 değerleri

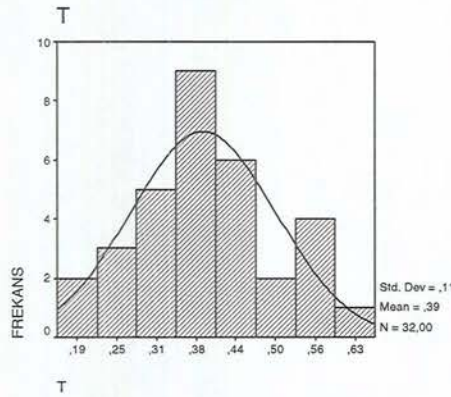
scpt no	x	y	alüvyon kalınlığı (m)	$V_{s_{ort}}$ (m/s)	T_0 (s)
1	286249	4407309	9	158	0,23
2	286303	4406843	11	124	0,35
3	286407	4406824	13	162	0,32
4	286441	4407082	13	174	0,30
5	286658	4406766	18	189	0,38
7	287217	4407581	21	160	0,53
8	287240	4407947	15	204	0,29
9	289157	4407310	23	158	0,58
10	290499	4407944	21	214	0,38
12	289990	4406454	22	180	0,57
13	289808	4405740	21	184	0,45
14	288328	4407902	16	176	0,37
15	288242	4407169	22	186	0,47
16	287820	4406175	23	151	0,61
17	285812	4406489	11	200	0,22
18	284025	4406153	10	222	0,18
21	283365	4404927	20	218	0,37
22	284711	4405033	23	167	0,55
23	285850	4404669	16	190	0,34
25	285755	4405937	16	158	0,41
26	286519	4405446	17	196	0,35
27	289073	4405600	22	205	0,43
28	290508	4405039	15	310	0,19
30	286798	4405980	19	187	0,41
31	287258	4405891	19	186	0,41
32	287411	4405443	17	193	0,35
33	287833	4405490	18	208	0,35
34	286910	4406788	20	189	0,40
35	288677	4406552	27	178	0,57
36	284658	4406307	14	220	0,25
37	287742	4406738	22	206	0,43
38	283515	4405712	14	180	0,31

Çalışma alanında SCPT uygulama noktalarında belirlenen T_0 değerleri kullanılarak elde edilen T_0 haritası incelendiğinde, zemin doğal titreşim periyodunun 0.18 s ile 0.61 s arasında değiştiği gözlenmiştir. Çalışma alanında en

belirgin özellik, çalışma alanını doğu-batı doğrultulu kesen Eskişehir Çayı'ndan kuzey batıya ve güney doğuya uzaklaştıkça zemin doğal titreşim periyodunun küçülmesidir. Eskişehir Çayı'ndan kuzey batı ve güney doğuya doğru topoğrafyada belirgin bir yükselmenin varlığı söz konusudur. Topoğrafyanın yükseldiği kesimlerde eski alüvyon ve kaya birimi olarak tanımlanan litolojik birimlere doğru T_0 değerinin değiştiği de gözlenmiştir. Çalışma alanında 18 ve 28 nolu SCPT uygulama noktalarında T_0 değerinin 0.20 s gibi düşük değer çıkması bu bölgede sert zemin olduğunu göstermektedir

Çalışma alanında 22, 25, 6, 30, 32, 16, 27, 13 nolu SCPT uygulama noktalarında değişken kalınlıklarda alüvyon bir zeminin varlığı bilinmektedir [6]. Bu noktalarda 0.40-0.61 s aralığında belirlenen yüksek T_0 değerleri ile zemin profilinin uyumlu olduğu görülür.

Çalışma alanının tümünde 32 farklı noktada belirlenen T_0 değerlerinin frekans histogramına bakıldığında minimum değer 0.18 s, maksimum değer 0.61 s olduğu görülmüştür. Tüm verinin normal dağılım fonksiyonuna uyum gösterdiği ve ortalama değer 0.39 s olup alüvyon zemin özelliği ile uyum sağladığı belirlenmiştir.



Şekil 7.3. Çalışma alanında belirlenen T_0 değerleri frekans histogramı

Çalışma alanının genelinde betonarme binaların çoğunlukta olduğu bilinmektedir. Afet bölgelerinde yapılacak yapılar hakkındaki 01.01.1998 tarih ve 23390 sayılı Resmi Gazete' de yayınlanan yönetmeliğe ait Eşdeğer Deprem Yöntemi'ndeki farklı katsayısındaki bina salınım periyotları:

$$T_1 \cong T_A = 0.05.(H_N)^{3/4} \quad H_N = \text{bina katsayısı} \times 3 \quad 7.2$$

formülü ile belirlenir [15]. Burada;

T_1 ve T_A değerleri eşit olup binanın 6z salınım periyodunu;
 H_N ; bina y6ksekliğini g6stermektedir.

Bu bağıntı kullanılarak 10 katlı binaya kadar hesaplanan T_1 değerleri
Çizelge 7.3'de verilmiştir.

Çizelge 7.3. Betonarme binaların 6z salınım periyodu (T_1) değerleri

Kat sayısı	T_1 (s)
1	0.11
2	0.19
3	0.25
4	0.32
5	0.38
6	0.44
7	0.49
8	0.54
9	0.59
10	0.64

Çalışma alanında SCPT uygulama noktalarında belirlenen T_0 değerleri kullanılarak elde edilen T_0 haritası incelendiğinde Porsuk Çayı'na paralel al6vyon zeminde konuşlanmış 5-6 katlı yapıların rezonansa girebileceği değerlendirilmektedir.

8. SONUÇLAR VE ÖNERİLER

Eskişehir’de kentleşmenin yoğunlaştığı yeni alüvyon zemini üzerinde belirlenen çalışma alanında, olası bir depremin etkileri ele alınarak, zemin koşulları ile makaslama dalgası hızı (V_s) arasındaki ilişkinin belirlenebilmesine çalışılmıştır. Çalışma alanında SCPT’den elde edilen zemin parametreleri dikkate alınarak yerel zemin koşullarının belirlenmesi ile deprem risk analizi yapılmış ve ulaşılan tüm sonuç haritalar CBS yöntemi kullanılarak yorumlanmaya çalışılmıştır. Çalışma sonucunda;

1. Çalışma alanında 32 farklı noktada (alüvyon zemin üzerinde) 155 sismik uygulama aralığında ortalaması alınan CPT verilerinden; q_c ’nin 0.60-33.29 MPa aralığında değişen değerler aldığı, R_f ’in 0.22-9.40 MPa aralığında değişen değerler aldığı görülmüştür. CPT’den elde edilen q_c , R_f parametreleri kullanılarak Robertson 1986’ya göre belirlenen zemin türü değişimine bakıldığında ise, çalışma alanında hakim zemin türünün kil ve kum olduğu belirlenmiştir.

2. Çalışma alanında 32 farklı noktada ve 155 farklı seviyeden alınan SCPT sismik kayıtları kullanılarak belirlenen makaslama dalgası ara hızı ($V_{s_{ara}}$) 100-490 m/s aralığında değiştiği görülmüştür. SCPT’nin uygulandığı 32 farklı noktanın her birinde tüm sismik kayıt derinliği için elde edilen ortalama makaslama dalgası hızının ($V_{s_{ort}}$) 100-340 m/s aralığında değiştiği belirlenmiştir.

3. Zemin türü değişimine bağlı gruplandırılmış CPT verileri (q_c , R_f) ile SCPT’den elde edilen V_s hızı arasındaki ilişki araştırılmıştır. Çalışmada önerilen yöntemlerin kullanılmasıyla $r=0.95$ olan q_c - V_s ilişkisi ve $r=0.93$ olan R_f - V_s ilişkisi ortaya konmuştur.

4. Çalışma alanında 32 farklı noktada SCPT’den elde edilen ($V_{s_{ort}}$) değerleri kullanılarak çalışma alanının National Earthquake Hazards Reduction Program (NEHRP)’ye göre yer sınıflaması yapılmıştır. Yer sınıfı değişimi Coğrafi Bilgi Sistemi (CBS) yöntemi kullanılarak yorumlanmıştır. Buna göre çalışma alanında hakim zemin türünün D sınıfı olduğu, ancak, çalışma alanının batısında Porsuk Çayı boyunca ve çalışma alanının kuzeyinde porsuk çayına paralel bir hatta oldukça geniş alanda E sınıfının yer aldığı belirlenmiştir.

5. Çalışma alanında KANAI bağıntısı kullanılarak zeminin doğal titreşim periyodu (T_0) hesaplanmış ve 0.18-0.61 s arasında değiştiği belirlenmiştir.

Zemin doğal titreşim periyodu değişimi Coğrafi Bilgi Sistemi (CBS) yöntemi kullanılarak yorumlanmıştır. Bu verilerin çalışma alanındaki jeolojik birimlerin özellikleri ile uyum sağladığı ve topoğrafyanın yükseldiği kesimlerde eski alüvyon ve kaya birimi olarak tanımlanan birimlere doğru T_0 değerinin arttığı gözlenmiştir.

Çalışma alanında elde edilen bu sonuçlar dikkate alınarak aşağıdaki önerilerde bulunulmuştur;

1. CPT parametrelerinden (q_c , R_f) makaslama dalgası hızının (V_s) elde edilmesi amacıyla çalışmada belirlenen q_c - V_s , R_f - V_s ilişki fonksiyonlarının, q_c , R_f değerleri belirli olan zeminlerde V_s hızının büyüklüğü hakkında fikir sahibi olmak amacı ile kullanılabilmesi değerlendirilmektedir.

2. Çalışma alanı içerisinde gelecekte yapılacak zemin uygulamalarında, belirlenen NEHRP yer sınıflaması değerlerinin kullanılabilmesi düşünülmektedir.

3. Çalışma alanını doğu-batı yönlü ikiye bölen Porsuk Çayı'na paralel alüvyon zeminde konuşlanmış 5-6 katlı yapıların rezonansa girebileceği değerlendirilerek yeni yapılaşmalarda çalışma alanının bu özelliklerinin dikkate alınmalıdır.

4. Çalışmada belirlenen q_c - V_s , R_f - V_s ilişki fonksiyonlarının doğruluğunun sınanması amacıyla, çalışma alanı dışında uygulanmış SCPT verileri kullanılmalıdır.

KAYNAKLAR

- [1] CANITEZ, N., *Levha Tektoniği*, İTÜ Maden Fakültesi, İstanbul, (1983).
- [2] DEWEY, J.F., *Plate Tectonics*, Scientific American, USA, (1972).
- [3] DİRİCAN, M., *Yerkabuğunun Hareketli Doğası*, Bilim ve Teknik, **382**, 18-21, (1999).
- [4] ERDİK, M. (Online), *Report On 1999 Kocaeli And Düzce (TURKEY) Earthquakes*, Boğaziçi University, Dept. of Earthquake Engineering, İstanbul, TURKEY, (2001), Erişim: <http://www.koeri.boun.edu.tr/deprenmmuh/earthquake1.htm>
- [5] WRIGHT, T.J., *Remote Monitoring of the earthquake cycle using satellite radar interferometry*, The Royal Society, University of Oxford, Department of Earth Sciences, UK, (2002).
- [6] AYDAY, C., ALTAN, M., NEFESLİOĞLU, H., CANİGUR, A., YEREL, S. ve TÜN, M., *Eskişehir Yerleşim Yerinin Yerleşim Amaçlı Jeoloji ve Jeoteknik Etüt Raporu*, Anadolu Üniversitesi, Uydu ve Uzay Bilimleri Araştırma Enstitüsü, Eskişehir, (2001).
- [7] USGS (Online), *Implications for Earthquake Risk Reduction in the United States from the Kocaeli, Turkey, Earthquake of August 17, 1999*, U.S. Geological Survey Circular 1193, USA, (2000). Erişim:<http://quake.usgs.gov/research/geology/turkey/index.html>
- [8] ANSAL, A., *Depremlerde Yerel Zemin Davranışları*, Bilim ve Teknik, **384**, 64-68, (1999).
- [9] KEÇELİ, A., *Deprem-Zemin*, Jeofizik Bülteni, **36**, 6-11, (2000).
- [10] STREET, R., WOOLERY, E.W., WANG, Z., HARRIS, J.B., *NEHRP Soil Classifications for Estimating Site-Dependent Seismic Coefficients in the Upper Mississippi Embayment*, Engineering Geology, **62**, 123-135, USA, (2001).
- [11] SCHNEIDER, J.A., MAYNE, P.W. ve RIX, G., *Geotechnical Site Characterization in the Greater Memphis Area Using Cone Penetration Tests*, Engineering Geology, **62**, 169-184, USA, (2001).
- [12] Liao, T., MAYNE, P.W., TUTTLE, M.P., SCGWEIG, E.S., ve VAN ARSDALE, R.B., *CPT Site Characterization for Seismic Hazards in the New Madrid Seismic Zone*, Soil Dynamics and Earthquake Engineering, **22**, 943-950, USA, (2002).
- [13] ROMERO, S. ve RIX, G.J., *Regional Variations in Near Surface Shear Wave Velocity in the Greater Memphis Area.*, Engineering Geology, **62**, 137-158, USA, (2001).
- [14] AYDAY, C., TUNCAN, M., ALTAN, M., AZDİKEN, S., ÖZKAN, S., GENÇLER, G., UÇAR, D., NEFESLİOĞLU, H., CANİGUR, A., YEREL, S., TUNCAN, A., ÜNAL, G., GÜNEY, Y. ve ÇETİN, A., *Eskişehir Yerleşim Yeri Mühendislik Jeolojisi Haritasının Hazırlanması*, Anadolu Üniversitesi, Uydu ve Uzay Bilimleri Araştırma Enstitüsü, Eskişehir, (2001).
- [15] SAĞLAM, H., *Demetevler (Ankara) Bölgesinin Zeminlerinin Hakim Titreşim Periyodu ve Büyütmelerinin Belirlenmesi*, Yük. Müh. Tezi, H.Ü. Fen Bil. Enst., Ankara, (2003).

- [16] TEZCAN, S. S., *Mevcut binalarda zemin ve deprem etüdü*, İnşaat S, 76-81 (1999).
- [17] CAMPANELLA, R.G., ROBERTSON, P.K. ve GILLESPIE, D., *Seismic Cone Penetration Test*, Proceedings of In Situ 86', a Specialty Conference on Use Of In Situ Tests in Geotechnical Engineering, Blacksburg, Virginia. ASCE, New York, (1986).
- [18] LARSSON, R., *The CPT Test*, Geotechnical Institute, Swedish, 77 p., (1995).
- [19] USGS (Online), *USGS CPT Data*, U.S. Geological Survey, Earthquake Hazards Program, USA, (2001). Erişim: <http://quake.wr.usgs.gov/prepare/cpt/index.html>
- [20] Luna, R. and H. Jadi, *Determination of Dynamic Soil Properties Using Geophysical Methods*, Proceedings of the First International Conference on the Application of Geophysical and NDT Methodologies to Transportation Facilities and Infrastructure, St. Louis, MO, December (2000).
- [21] Kevin Jarvis and Rosemary Knight, *The use of the seismic cone penetrometer for near-surface VSP surveys*, University of British Columbia, SEG, (1998).
- [22] ROBERTSON, P. K. ve CAMPANELLA, R. G., *Guidelines for Use and Interpretation of the Electronic Cone Penetration Test*, Soil Mechanics, Series No. 69. Vancouver, Canada: University of British Columbia, Department of Civil Engineering, (1984).
- [23] MAYNE, P.W., PhD, P.E., *Enhanced Geotechnical Site Characterization By Seismic Piezocone Penetration Tests*, Invited Lecture, Fourth International Geotechnical Conference, Cairo University, January, pp. 95-120, (2000).
- [24] AZDİKEN, S. ve ÇATALYÜREKLİ, E., *Eskişehir Odunpazarı Belediyesi Jeofizik Rezistivite etüt Raporu*, DSİ III. Bölge Müdürlüğü, Eskişehir, (2001).
- [25] AZDİKEN, S. ve ÇATALYÜREKLİ, E., *Eskişehir Tepebaşı Belediyesi Jeofizik Rezistivite etüt Raporu*, DSİ III. Bölge Müdürlüğü, Eskişehir, (2001).
- [26] GEOTECH (online), *Overview of Geotech Datalogging and Software & Software Recommended by Geotech*, Ing.firman GEOTECH AB, Sweden, (2003).
- [27] LUNNE, T., ROBERTSON, P.K., ve POWELL, J.J.M., *Cone Penetration Testing in Geotechnical Practice*, Blackie Academic and Professional, New York, Currently produced by EF-SPON, New York, 312 pp., (1997).
- [28] CAMPANELLA, R.G. ve STEWART, W.P., *Downhole Seismic Cone Analysis Using Digital Signal Processing*, 2nd International Conference on Recent Advances in Geotechnical Earthquake Engineering and Soil Dynamics, No. 1.32, Vol. 1, pp. 77-83, (1991).
- [29] CAMPANELLA, R.G., BAZIW, E.J. ve SULLY, J.P., *Interpretation of Seismic Cone Data Using Digital Filtering Techniques*, Department of Civil Engineering, University of British Columbia, Vancouver, Canada, (1989).
- [30] USGS (Online), *Results of Seismic Piezocone Penetration Tests Performed in Memphis and Tennessee*, USGS/MAE Hazard Mapping Program Central Region, Georgia Tech Research Corporation Geosystems Engineering

- Division Civil & Environmental Engineering, ATLANTA (2000).
Erişim: [http:// usgs.gov/](http://usgs.gov/)
- [31] LUNNE, T., ROBERTSON, P.K. ve POWEL, J.J.M., *Cone Penetration Testting in Geotechnical Practice*, E & FN Spon, London, (1997).
- [32] KURTULUŞ, C., *Sismik Arama*, Kocaeli Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Jeofizik Mühendisliği Bölümü Yayını, İstanbul, Türkiye, (2002).
- [33] US, E., *Sismik Yöntemler ve Yorumlamaya Giriş*, TMMOB Jeofizik Mühendisleri Odası Yayını, İstanbul, Türkiye (1998).
- [34] ROBERTSON, P.K., CAMPANELLA, R.G., GILLESPIE, D., ve GRIEG, J., *Use of piezometer cone data*, Proceedings, In-situ'86, ASCE Specialty Conference, Blacksburg, VA., (1986).
- [35] ROBERTSON, P.K., *Soil Classification Using the Cone Penetration Test*, Canadian Geotechnical Journal, February, Vol. 27, No.1, pp. 151-158., (1990).
- [36] BAYAZIT, M. ve OĞUZ, B., *Mühendisler İçin İstatistik*, İstanbul Teknik Üniversitesi, İnşaat Fakültesi, İstanbul, Türkiye, (1985).
- [37] ERDİK, M., *Kuvvetli Deprem Yer Hareketi temel Bilgiler*, Türkiye Köprü ve İnşaat Cemiyeti Yapıların Genel Deprem Hesabı Kursu , ODTÜ, Ankara, Türkiye (1982).
- [38] ERCAN, A., *Yermühendislik Özelliklerinin; Jeofizik Ölçümler, Jeolojik Gözlemler ve Jeoteknik Deneylerle Belirlenmesi*, Yerel Yöntemlerde Jeotermal Enerji ve Jeoteknik Uygulamalar Sempozyumu, Ankara, 297-331., (2000).
- [39] ERDİK, M., SWIFT-AVCI, J. ve ONUR, T., *Kentlerde Deprem Tehlikesinin Belirlenmesi: Mikrobölgeleştirme*, Tübitak Deprem Sempozyumu, Ankara, (1996).
- [40] HUNTERA, J.A., BENJUMEA, B., HARRIS, J.B., MILLER, R.D., PULLAN, S.E., BURNS, R.A. ve GOOD, R.L., *Surface and Downhole Shear Wave Seismic Methods for Thick Soil Site Investigations*, Soil Dynamics and Earthquake Engineering, 22, 931-941, (2002).
- [41] STREET, R., WOOLERY, E., WANG, Z. ve HARIK, I.E., *Soil Classifications for Estimating Site-Dependent Response Spectra and Seismic Coefficients for Building Code Provisions in Western Kentucky*, Engineering Geology, 46, 331-347, (1997).
- [42] BAUER, R.A., KIEFER, J. ve HESTER, N., *Soil Amplification Maps For Estimating Earthquake Ground Motions in the Central US*, Engineering Geology, 62, 7-17, (2001).
- [43] TRONCOSO, J.H. ve GARCES, E., *Ageing Effects in the Shear Modulus of Soils*, Soil Dynamics and Earthquake Engineering, 19, 595-601, (2000).
- [44] AKKARGAN, Ş. ve ÖZÇEP, F., *Rezonans Olayı ve Depremlerle İlişkisi*, Jeofizik Bülteni, 38, 95-96, (2000).
- [45] KENAR, Ö., *Sismik P dalgalarının Genlik Spektrumlarından yararlanılarak İstanbul ve Civarında Yerkabuğu Yapısı*, Doktora Tezi, İ.T.Ü., Maden Fakültesi, İstanbul, Türkiye, (yayınlanmamış)
- [46] WOOLERY, E.W. ve STREET, R., *3D Near-Surface Soil Response from H/V Ambient-Noise Rations*, Soil Dynamics and Earthquake Engineering, 22, 865-876, (2002).

EK-1 ÇALIŞMADA KULLANILAN SCPT ALETİNİN TEKNİK ÖZELLİKLERİ

Model	Geotech 220D
Güç kaynağı (motor)	Isuzu Diesel
Makine randımanı	32 hp
Ağırlık	1700 kg
Alçak direk uzunluğu	270 cm
Yüksek direk uzunluğu	290 cm
Alçak direk yükselme mesafesi	183 cm
Genişlik (en)	152 cm
Zemin baskısı	1.8 N/cm ²
Manevra hızı	0-5 km/saat
Maksimum meyil	20 derece
Vinç çekme kuvveti	25 kN
Hidrolik sistem basıncı	210 bar
Besleyici silindirlerin baskı tesiri	1.5 m
Dingil Sistemi	Tek
Dingildeki maksimum açılma	75 mm
Maksimum dönme momenti	2.6 kNm veya üzeri
Maksimum rpm	40 rpm
Direk meyili	Boydan boya
Maksimum itme kuvveti	200 kN
Maksimum çekme kuvveti	200 kN
Balyoz çıkışı	292 J
Darbe oranı	1200 darbe/dak.
Metal levha kavrama	22-45 mm
Metal levha kavrama kuvveti	210 bar'da 230 kN
Dip sıkıştırma	114 mm

EK-2. SCPT'DEN ELDE EDİLEN V_s DEĞERLERİ

CPT	DERİNLİK(m)	$V_{s_{ara}}$ (m/s)	$V_{s_{ort}}$ (m/s)
1	2.0_4.0	142	156
	4.0_6.0	183	
	6.0_8.0	148	
2	2.2_4.2	185	151
	4.2_5.3	103	
	5.3_7.5	150	
	7.5_7.8	383	
3	2.2_4.2	122	162
	4.2_6.2	148	
	6.2_8.2	220	
	8.2_9.1	251	
4	4.0_6.2	155	174
	6.2_8.2	168	
	8.2_9.7	268	
5	2.0_4.0	183	193
	4.0_6.2	169	
	6.2_8.2	202	
	8.2_8.8	510	
7	2.0_4.0	150	163
	4.0_6.0	148	
	6.0_8.0	198	
8	2.0_4.0	163	205
	4.0_6.0	200	
	6.0_8.0	256	
	8.0_10.0	224	
9	2.0_4.3	162	159
	4.3_6.3	136	
	6.3_7.0	260	
10	2.3_4.3	251	214
	4.3_6.4	212	
	6.4_8.4	174	
	8.4_9.65	326	
12	3.2_4.3	170	180
	4.3_5.4	169	
	5.4_6.3	162	
	6.3_7.4	150	
	7.4_8.4	258	
	8.4_9.3	254	
	9.3_9.7	200	
13	3.2_4.3	165	192
	4.3_5.3	158	
	5.3_6.4	237	
	6.4_7.4	186	
	7.4_8.3	254	

CPT	DERİNLİK(m)	Vs _{ara} (m/s)	Vs _{ort} (m/s)
14	3.2_4.3	169	176
	4.3_5.3	159	
	5.3_6.3	190	
	6.3_7.3	174	
	7.3_8.3	193	
	8.3_9.4	176	
15	3.9_4.9	143	185
	4.9_5.96	134	
	5.96_6.96	231	
	6.96_7.98	217	
	7.98_9.0	217	
16	3.2_4.2	163	168
	4.2_5.2	196	
	5.2_6.25	150	
17	3.3_4.3	131	200
	4.3_5.3	187	
	5.3_6.3	188	
	6.3_7.3	198	
	7.3_8.3	210	
	8.3_9.3	300	
18	2.9_3.9	128	220
	3.9_4.9	189	
	4.9_6.0	220	
	6.0_7.0	303	
	7.0_8.0	270	
	8.0_9.0	321	
	9.0_9.33	381	
21	3.3_4.3	172	200
	4.3_5.3	169	
	5.3_6.3	183	
	6.3_7.4	167	
	7.4_8.4	239	
	8.4_9.5	183	
	9.5_11.5	259	
	11.5_12.54	225	
22	3.28_4.33	150	177
	4.33_5.35	161	
	5.35_6.34	162	
	6.34_7.24	243	
	7.24_7.8	232	

CPT	DERİNLİK(m)	Vs _{ara} (m/s)	Vs _{ort} (m/s)
23	3.25_4.27	178	193
	4.27_5.28	166	
	5.28_6.29	164	
	6.29_7.32	190	
	7.32_8.36	210	
	8.36_9.35	193	
	9.35_10.37	180	
	10.37_11.3	421	
25	3.27_4.29	152	167
	4.29_5.31	146	
	5.31_6.32	173	
	6.32_7.35	197	
	7.35_7.60	223	
26	3.27_4.27	125	190
	4.27_5.24	238	
	5.24_6.30	271	
27	3.27_4.28	132	189
	4.28_5.29	135	
	5.29_6.31	161	
	6.31_7.35	367	
	7.35_8.38	304	
	8.38_8.64	303	
28	3.30_4.30	300	300
30	3.34_4.32	164	188
	4.32_5.29	140	
	5.29_6.35	195	
	6.35_7.36	280	
	7.36_8.12	233	
31	3.15_4.16	180	167
	4.16_5.18	168	
	5.18_6.19	154	
	6.19_7.21	168	
32	3.26_4.28	153	192
	4.28_5.29	153	
	5.29_6.33	162	
	6.33_7.35	292	
	7.35_8.85	250	
33	3.25_4.26	137	197
	4.26_5.27	154	
	5.27_6.29	225	
	6.29_7.32	330	
	7.32_7.86	298	

CPT	DERİNLİK(m)	V _{sara} (m/s)	V _{sort} (m/s)
34	3.29_4.29	160	189
	4.29_5.30	134	
	5.30_6.33	176	
	6.33_7.35	256	
	7.35_8.33	237	
	8.33_9.05	257	
35	3.19_4.17	190	178
	4.17_5.18	208	
	5.18_6.17	146	
	6.17_7.19	160	
	7.19_8.18	268	
36	3.28_4.33	179	218
	4.33_6.36	196	
	6.36_7.38	237	
	7.38_8.39	177	
	8.39_9.44	361	
37	2.92_3.84	257	203
	3.84_4.89	230	
	4.89_5.91	230	
	5.91_6.93	170	
	6.93_7.97	157	
	7.97_9.00	219	
38	3.05_4.06	117	181
	4.06_5.07	132	
	5.07_6.09	173	
	6.09_7.11	204	
	7.11_8.11	228	
	8.11_9.13	377	
	9.13_9.55	232	

EK-3. CPT SONDAJLARINDAN ELDE EDİLEN VERİLERİN SİSMİK UYGULAMA ARALIKLARINDAKİ ORTALAMA DEĞERLERİ

CPT	DERİNLİK(m)	qc(MPa)	fs(MPa)	Rf(%)	N60	Su(MPa)	Zemin türü
1	2.0_4.0	2,154	0,069	3,230	20	0,181	3
	4.0_6.0	6,313	0,035	0,555	15	0,589	6
	6.0_8.0	4,875	0,028	0,598	12	0,451	7
2	2.2_4.2	1,510	0,051	3,299	10	0,127	4
	4.2_5.3	2,120	0,031	1,510	8	0,179	6
	5.3_7.5	2,057	0,031	1,522	17	0,194	6
3	7.5_7.8	15,393	0,117	0,758	50	1,526	9
	2.2_4.2	0,884	0,072	8,147	9	0,074	3
	4.2_6.2	0,611	0,052	8,375	6	0,040	3
4	6.2_8.2	9,514	0,064	0,665	21	0,940	8
	8.2_9.1	29,431	0,262	0,888	50	2,929	9
	4.0_6.2	0,655	0,023	3,027	5	0,022	3
5	6.2_8.2	9,500	0,063	0,679	25	0,840	8
	8.2_9.7	22,356	0,138	0,619	41	2,220	9
	2.0_4.0	1,696	0,102	5,868	17	0,164	3
7	4.0_6.2	1,503	0,040	2,628	11	0,141	5
	6.2_8.2	11,956	0,064	0,535	25	1,183	9
	8.2_8.8	23,609	0,184	0,777	47	2,346	9
8	2.0_4.0	1,088	0,045	4,032	9	0,073	3
	4.0_6.0	0,930	0,044	4,393	9	0,065	3
	6.0_8.0	1,665	0,053	2,827	13	0,081	5
9	2.0_4.0	3,066	0,033	1,065	31	0,000	7
	4.0_6.0	7,446	0,065	0,875	24	0,623	8
	6.0_8.0	20,019	0,098	0,488	37	1,991	9
10	8.0_10.0	18,942	0,109	0,582	32	1,880	9
	2.0_4.3	2,198	0,129	5,868	20	0,191	3
	4.3_6.3	1,271	0,070	5,406	12	0,114	3
11	6.3_7.0	30,315	0,150	0,497	50	3,014	10
	2.3_4.3	6,110	0,062	1,007	17	0,605	8
	4.3_6.4	12,935	0,054	0,416	27	1,284	9
12	6.4_8.4	8,100	0,038	0,467	18	0,796	8
	8.4_9.65	14,962	0,105	0,710	30	1,479	9
	3.2_4.3	3,071	0,097	3,152	17	0,184	5
	4.3_5.4	1,751	0,048	2,742	9	0,074	5
	5.4_6.3	1,064	0,029	2,680	6	0,012	5
	6.3_7.4	8,828	0,098	1,112	23	0,825	8
13	7.4_8.4	9,105	0,099	1,086	24	0,868	8
	8.4_9.3	23,282	0,230	0,983	48	2,312	9
	9.3_9.7	21,889	0,171	0,784	44	2,172	9

CPT	DERİNLİK(m)	qc(MPa)	fs(MPa)	Rf(%)	N60	Su(MPa)	Zemin türü
13	3.2_4.3	1,965	0,101	5,120	19	0,166	3
	4.3_5.3	1,727	0,097	5,574	16	0,140	3
	5.3_6.4	2,669	0,134	4,932	21	0,120	3
	6.4_7.4	13,914	0,161	1,147	34	1,326	8
	7.4_8.3	33,292	0,207	0,618	50	3,315	10
14	3.2_4.3	2,931	0,084	2,881	17	0,251	5
	4.3_5.3	1,296	0,076	5,865	11	0,103	3
	5.3_6.3	1,089	0,049	4,480	10	0,077	3
	6.3_7.3	4,443	0,036	0,814	13	0,424	7
	7.3_8.3	8,469	0,037	0,435	19	0,833	8
	8.3_9.4	11,310	0,043	0,382	23	1,115	9
15	3.9_4.9	0,993	0,054	5,301	10	0,092	3
	4.9_5.96	1,273	0,074	5,890	12	0,108	3
	5.96_6.96	2,298	0,128	5,552	21	0,176	3
	6.96_7.98	5,286	0,081	1,532	19	0,439	7
	7.98_9.0	18,212	0,110	0,602	37	1,798	9
16	3.2_4.2	1,312	0,064	4,803	13	0,125	3
	4.2_5.2	1,104	0,029	2,592	11	0,102	5
	5.2_6.25	15,991	0,044	0,728	32	1,589	9
17	3.3_4.3	0,823	0,035	4,242	8	0,076	3
	4.3_5.3	1,487	0,047	3,150	15	0,140	5
	5.3_6.3	1,488	0,044	0,027	15	0,139	5
	6.3_7.3	6,972	0,041	0,591	50	0,685	8
	7.3_8.3	13,169	0,084	0,647	50	1,303	9
	8.3_9.3	22,694	0,151	0,671	50	2,254	9
18	2.9_3.9	0,884	0,048	5,400	9	0,082	3
	3.9_4.9	2,139	0,125	5,777	20	0,167	3
	4.9_6.0	6,226	0,116	1,848	22	0,603	7
	6.0_7.0	8,812	0,039	0,448	20	0,869	9
	7.0_8.0	17,504	0,103	0,591	34	1,737	9
	8.0_9.0	23,152	0,161	0,700	45	2,300	9
	9.0_9.33	24,198	0,417	1,714	50	2,403	8
21	3.3_4.3	1,766	0,078	4,530	15	0,121	3
	4.3_5.3	2,486	0,152	6,131	24	0,240	3
	5.3_6.3	2,214	0,113	5,107	21	0,198	3
	6.3_7.4	1,847	0,109	5,867	18	0,169	3
	7.4_8.4	5,308	0,063	1,196	16	0,502	7
	8.4_9.5	10,592	0,054	0,513	23	1,035	9
	9.5_11.5	14,389	0,100	0,701	31	1,415	9
	11.5_12.54	11,333	0,175	1,550	31	1,111	8
22	3.28_4.33	0,606	0,020	3,293	5	0,034	3
	4.33_5.35	2,216	0,031	1,362	9	0,182	6
	5.35_6.34	15,954	0,072	1,448	32	1,585	9
	6.34_7.24	12,177	0,083	0,683	26	1,192	9
	7.24_7.8	23,982	0,180	0,753	47	2,385	9

CPT	DERİNLİK(m)	qc(MPa)	fs(MPa)	Rf(%)	N60	Su(MPa)	Zemin türü
23	3.25_4.27	1.532	0.108	7.046	15	0.147	3
	4.27_5.28	1.205	0.094	7.898	12	0.112	3
	5.28_6.29	1.114	0.065	5.987	11	0.101	3
	6.29_7.32	1.342	0.055	4.168	13	0.122	3
	7.32_8.36	1.231	0.041	3.444	12	0.109	4
	8.36_9.35	1.295	0.044	3.476	13	0.114	4
	9.35_10.37	23.944	0.164	0.690	50	2.377	9
	10.37_11.3	19.531	0.161	0.831	50	1.934	9
25	3.27_4.29	0.973	0.053	5.480	9	0.073	3
	4.29_5.31	0.647	0.031	4.740	6	0.047	3
	5.31_6.32	1.681	0.084	5.006	15	0.123	3
	6.32_7.35	2.582	0.078	2.988	14	0.221	5
	7.35_7.60	11.396	0.166	1.458	35	1.048	8
26	3.27_4.27	0.890	0.053	6.022	9	0.079	3
	4.27_5.24	3.758	0.083	2.248	17	0.310	6
	5.24_6.30	20.123	0.155	0.765	41	2.002	9
27	3.27_4.28	1.285	0.063	4.857	13	0.122	3
	4.28_5.29	0.705	0.027	3.700	7	0.049	3
	5.29_6.31	5.335	0.105	1.962	20	0.459	7
	6.31_7.35	10.622	0.083	0.781	24	1.050	8
	7.35_8.38	27.023	0.213	0.786	50	2.688	9
	8.38_8.64	32.927	0.312	0.945	50	3.277	9
28	3.3_4.3	6.137	0.441	6.737	50	0.058	11
30	3.34_4.32	1.403	0.084	5.646	14	0.132	3
	4.32_5.29	0.973	0.058	5.394	10	0.080	3
	5.29_6.35	2.014	0.115	0.115	17	0.109	3
	6.35_7.36	3.531	0.088	2.095	17	0.323	6
	7.36_8.12	14.939	0.219	1.429	36	1.455	8
31	3.15_4.16	0.895	0.060	6.696	9	0.082	3
	4.16_5.18	0.472	0.033	7.032	5	0.027	3
	5.18_6.19	1.747	0.066	3.766	12	0.094	4
	6.19_7.21	3.079	0.076	2.471	14	0.241	6
32	3.26_4.28	1.182	0.061	4.574	11	0.080	3
	4.28_5.29	0.718	0.036	4.004	6	0.036	3
	5.29_6.33	1.855	0.077	3.889	13	0.123	4
	6.33_7.35	15.111	0.083	0.455	31	1.491	9
	7.35_8.85	23.512	0.117	0.452	44	2.337	9
33	3.25_4.26	1.126	0.057	5.058	11	0.098	3
	4.26_5.27	1.751	0.083	4.724	16	0.129	3
	5.27_6.29	3.840	0.082	2.123	17	0.363	6
	6.29_7.32	19.430	0.200	1.025	44	1.913	9
	7.32_7.86	32.321	0.201	0.619	50	3.219	10

CPT	DERİNLİK(m)	qc(MPa)	fs(MPa)	Rf(%)	N60	Su(MPa)	Zemin türü
34	3.29_4.29	1.095	0.065	5.752	11	0.102	3
	4.29_5.30	0.782	0.033	3.907	7	0.044	3
	5.30_6.33	1.940	0.063	3.137	13	0.105	5
	6.33_7.35	11.472	0.068	0.572	24	1.135	9
	7.35_8.33	23.428	0.124	0.492	44	2.329	9
	8.33_9.05	22.305	0.259	1.156	49	2.215	9
35	3.19_4.17	5.828	0.094	1.596	19	0.526	7
	4.17_5.18	3.325	0.062	1.829	13	0.271	6
	5.18_6.17	0.876	0.039	4.285	8	0.056	3
	6.17_7.19	0.803	0.038	4.510	8	0.085	3
	7.19_8.18	11.924	0.068	0.555	24	1.164	9
36	3.28_4.33	12.972	0.092	0.699	27	1.290	9
	4.33_6.36	4.223	0.047	1.087	13	0.405	7
	6.36_7.38	1.597	0.070	4.269	13	0.073	3
	7.38_8.39	11.472	0.085	0.681	25	1.121	9
	8.39_9.44	23.503	0.202	0.830	47	2.334	9
37	2.92_3.84	14.990	0.120	0.792	32	1.460	9
	3.84_4.89	22.118	0.334	1.506	50	2.204	8
	4.89_5.91	5.075	0.047	0.905	14	0.471	7
	5.91_6.93	0.834	0.029	3.227	6	0.021	4
	6.93_7.97	1.442	0.053	3.510	10	0.035	4
	7.97_9.00	6.066	0.076	1.211	16	0.529	7
38	3.05_4.06	1.226	0.069	5.301	12	0.114	3
	4.06_5.07	1.211	0.065	5.045	12	0.113	3
	5.07_6.09	2.135	0.049	2.146	11	0.167	6
	6.09_7.11	10.087	0.087	0.825	24	0.997	8
	7.11_8.11	9.358	0.077	0.765	22	0.906	8
	8.11_9.13	11.538	0.111	0.905	26	1.138	8
	9.13_9.55	15.912	0.123	0.742	32	1.575	9

Sismik enerji kaynağı olarak patlayıcı enerji kaynakları ve yüzey enerji kaynakları olmak üzere iki tür enerji kaynağı kullanılmaktadır. Patlayıcı enerji kaynağı olarak dinamitler kullanılır. Dinamitler sondaj kuyuları içerisine yerleştirilerek patlatma gerçekleştirilir ve sismik kayıtlar tutulur. Yüzey enerji kaynağı olarak ağırlıklar kullanılır. Bu ağırlıklar 2-3 metre yüksekten yere serbest düşürülür ve sismik kayıt elde edilir.

2. SİSMİK YÖNTEMLER

Temel sismik arama tekniği, sismik dalgaların üretilmesi ve kaynaklardan jeofon serilerine giden dalgalar için gerekli zamanı ölçmekten oluşur. Yerin iç yapısını ve özelliklerini ortaya koyma amacı güden bu çalışmalarda birbirinden farklı yöntemler geliştirilmiştir. En fazla kullanılan iki yöntem:

1. Kırılma (Refraksiyon) : İki kayaç tabakası arasındaki ara yüzey boyunca olan kırılma yolu.
2. Yansıma (Refleksiyon) : İki tabakayı birleştiren sınırdaki yansıyan yeryüzüne dönen yansıma yolu.

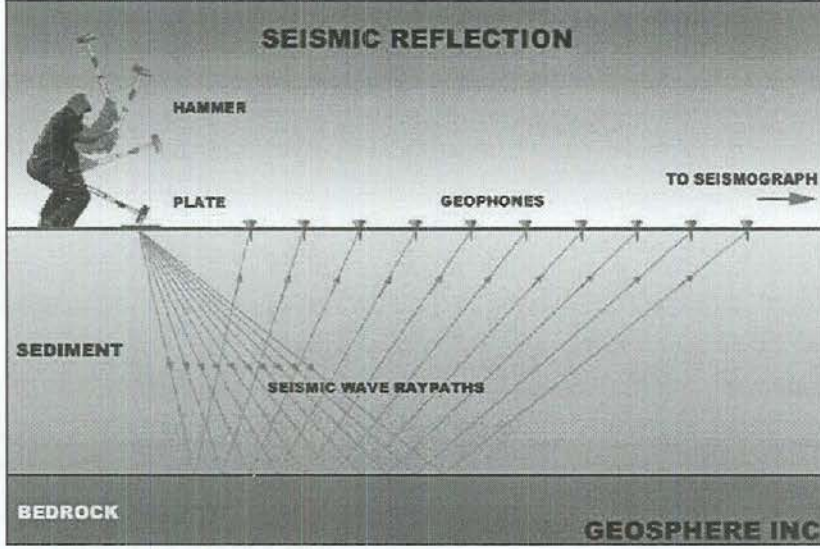
Yukarıda belirtilen her iki yol tipi için, gidiş zamanları kayaçların fiziksel özelliklerine ve tabakaların durumlarına bağlıdır. Enerji kaynaklarından yayılan gürültü veri işlemede istenmeyen kirliliklerdir. Bu nedenle, arazide alınan kayıtlarda gerçek sinyalleri kullanmak amacıyla veri üzerinde filtreleme yapılır. Bu aşamada bu konuda yazılmış bilgisayar yazılımlarından faydalanılır. Günümüzde sayısal bilgisayarların gelişmesine paralel olarak sismik veri toplama teknikleri ve kapasiteleri oldukça gelişmiştir. Sismik verilerin yorumlanması başlı başına bir uzmanlık alanı olup, çok dikkat gerektiren bir işidir.

Sismik dalgacık farklı frekans ve genliğe sahip sinüs eğrilerinin toplamından oluşur. Dalgacık zengin frekans içeriğine sahip olduğu için bilgi, farklı kalınlıklara sahip tabakalardan bilgi taşıyabilir.

2.1. Yansıma Sismiği

Yansıma sismiği, kaynak (dinamit) ve alıcılar olmak üzere iki sistemden oluşur. Kaynaktan küresel olarak yayılan dalga cephesi yerin içerlerine doğru ilerler. Bu ilerleme doğrultusu boyunca farklı litolojik ve akustik özelliklere sahip ortamlardan geçer. Bu geçiş sırasında, süreksizlik yüzeylerinde bir kısım dalga kırılarak yoluna devam ederken, bir kısım dalga da aynı zamanda

yansıyarak yüzeye geri döner. Sismik dalganın yansıma ve kırılma oranları süreksizliklerdeki enerji bölümü ile yakından ilişkili olup süreksizliğin iki yanındaki litolojik yapının hızlarıyla ilişkilidir. Yüzeye yansıyarak gelen bu dalgalar alıcılar tarafından kaydedilir (Şekil EK-4.2.).



Şekil EK-4.2. Yansıma Sismiği uygulamasının geometrisi (<http://www.geop.itu.edu.tr/>)

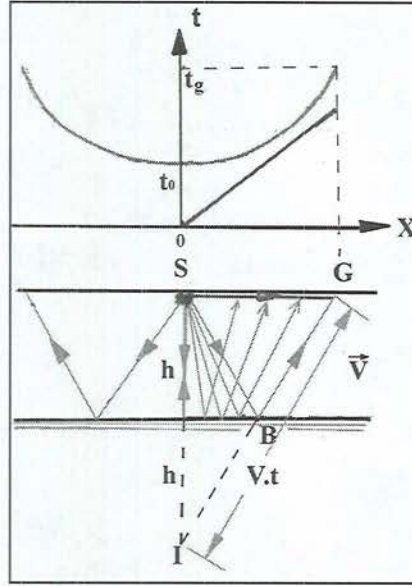
Yansıma sismiği; çalışılacak bölgede jeofon gruplarının amaca uygun dizildikten sonra kaynaktan yayılan sismik dalgaların kayıtlarının tutulması ve bu kayıtların yorumlanması olmak üzere iki aşamada gerçekleştirilir.

- i. Sismik veri işlem,
- ii. Sismik yorumlama

Sismik veri işlemin amacı, verilerin niteliğini arttırmak ve onları yerbilimsel yoruma açık hale getirmektir. Yorumlamada ise, sismik verilerin yapısı ve nitelik ölçütleri (sismik stratigrafi) kullanılarak sismik kesit yorumlanmaya çalışılır. Sismik yansıma çalışmasında ilk patlama atışı olarak adlandırılır. Atışın yapıldığı yüzey noktasına "atış noktası", bunun sonucu oluşan ses dalgacığına "kaynak dalgacığı" denir.

Tabakalar arasındaki sismik özellik farkına "akustik empedans farkı" denir ve tabakaların hız ve yoğunluk farklılıklarından elde edilir. Tabaka sınırlarından yansıyan dalgalara "yansıma" ya da "reflection" adı verilir. Yansımaların yüzeyde bulunan alıcılar tarafından belli bir zaman sürecinde kaydedilmiş şekline "sismik

iz” denir. Yansımanın meydana geldiği yüzeyin altındaki tabakaya “yansıtıcı” ya da “reflektör” adı verilir. Yansıma sismiği geometrisi Şekil EK-4.3.’de verilmiştir.

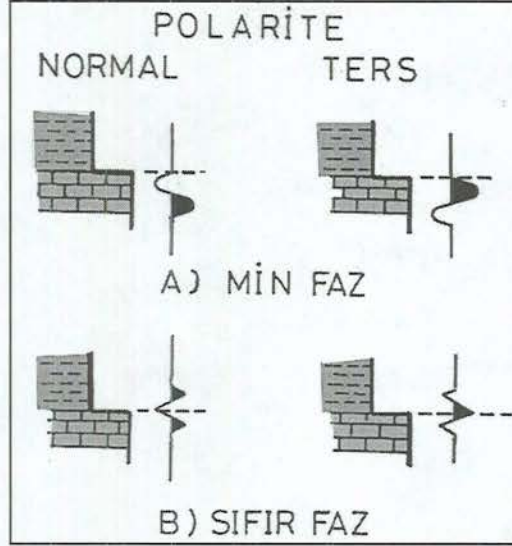


Şekil EK-4.3. Yansıma sismiği geometrisi

Sismik yorumlama aşamasında yer içerisine kaynaktan gönderilen sismik enerjinin, fiziksel büyüklükleri ve zemin yapısına bağlı sismik algılayıcı tarafından alınan, yansıtıcı yüzeylerden gelen sinyallerin sismik cevaplar (sinyallerin sismik kesitteki şekilleri) büyük önem taşımaktadır. Sismik kaynaktan yayılan enerjinin yeraltındaki süreksizlik sınırları veya yansıtıcı yüzeylerden yansıması sonucu, sismik kayıt cihazına gelen sismik sinyallerin her biri sismik kesitlerde görülmeyebilir. Bunun nedeni, çok zayıf sinyal olmaları veya diğer kuvvetli refleksiyonların üst üste binmesi ile birbirlerini nötrlemeleridir. Eğer üstteki tabaka altında bulunan tabakadan daha düşük hız özelliğine sahip ise, yani düşük akustik empedansa sahip ise, yansıma “pozitif”, bunun tersi ise negatif değer alır. Aynı yansıtıcı yüzeyden sismik algılayıcıya ulaşan pozitif ve negatif yansıma sinyalleri, aynı sinyal özelliklerini taşımasına rağmen biri diğerinin tersidir. Bunların sismik kesitlerde görünüm biçimi “polarite” olarak bilinir (Şekil EK-4.4.).

Yansıma sismolojisi çalışmalarında, kaynaktan yayılan enerjinin sismik algılayıcılar tarafından algılanması ile elde edilen sismik verilerin işlenmesi sonucu sismik kesit olarak tanımlanan sismik sinyal grupları elde edilir. Bu sismik kesit yerbilimsel kesitin yapısal özelliklerini taşır. Yansıma tabakaları sismik

kesitlerde gözlenebilir ve yorumcu yerin yerbilimsel yapısını haritalamada bu kesitleri kullanır.



Şekil EK-4.4. Pozitif yansımaya katsayılı bir sınırdan minimum ve sıfır fazlı dalgacıkların normal ve ters polariteli yansımaları

Sismik kesitin üzerinde bulunan yatay ölçek, sismik hattın yüzey noktalarına karşılık gelir. Sismik yansımada çalışmada yeraltı tabakalarından yansıtıp gelen sinyalleri almak için, arazi üzerine düzenli olarak yerleştirilmiş jeofon grupları kullanılır. Bu jeofon gruplarının araziye dizilim şekilleri sinyallerin kullanılması açısından çok önemlidir.

2.2. Kırılma Sismiği

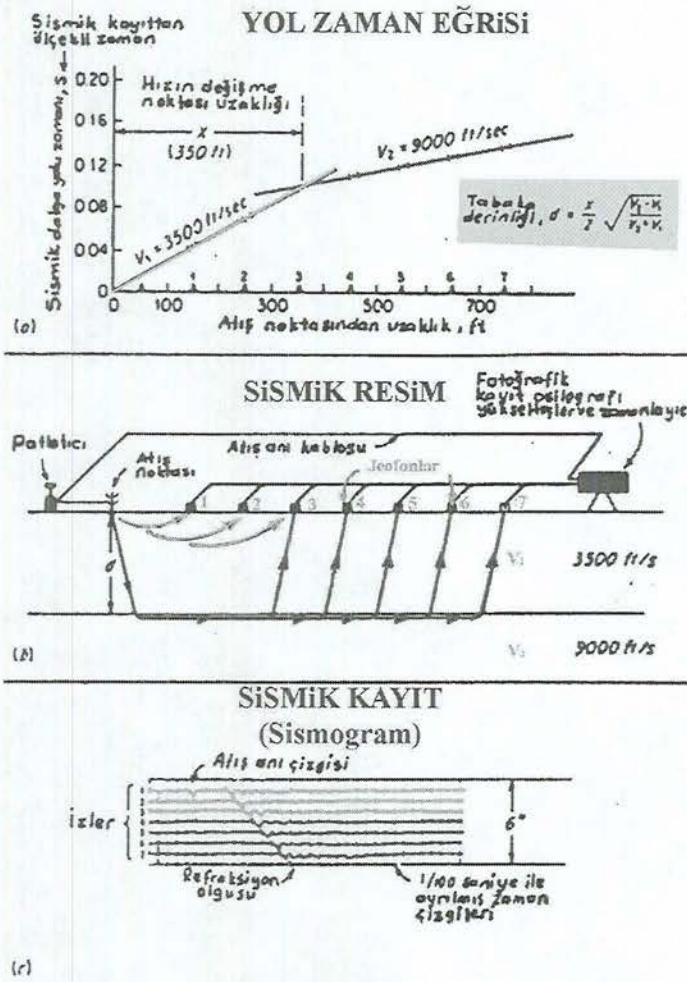
Kırılma sismiğinde yansımada sismiğinde olduğu gibi jeofon gruplarına ihtiyaç yoktur. 12 kanallı bir kayıt cihazı kırılma çalışması için yeterli olacaktır. Elde edilen sismik kesitten konum zaman grafiği elde edilerek hız hesabına gidilir.

Kırılan dalgalar iki farklı hıza sahip ortamların her ikisinde de yayıldığından bu iki hıza bağımlıdır. Bu dalgaların yüzeyde kaydedilebilmeleri için kritik açı koşulunun sağlanması gerekir.

Yansıtıcı yüzeye kritik açıyla gelen dalgalar yüzey boyunca kırılarak yayılırlar ve bu dalgalara öncü dalgalar denir. Dalganın bu kritik açı altında

Şekil EK-4.5.'de hızları V_1 ve V_2 olan ($V_2 > V_1$) iki ortamı ayıran yatay bir sınır görülmektedir. Geometrik şekilden kaynaktan çıkan sinyalin jeofona ulaşma zamanı, tabaka kalınlığı gibi değerleri elde etmek mümkündür .

Kırılma çalışması mühendisliğe dönük zemin etüdü, boşluk aramaları, heyelan araştırması, baraj etüdüleri gibi çalışmalarda kullanılan yöntemdir. Sismik kırılma yöntemi uygulaması ve veri çözümlemesinin şematik gösterimi Şekil EK-4.6'da verilmiştir..



Şekil EK-4.6. Sismik refraksiyon yöntemi geometrisi

Refleksiyon atışında sismik sinyaller haritalanan yatay derinliğe kıyasla atış noktasından büyük mesafelerde kaydedilirler. Patlama ile elde edilen dalgalar, yer içinden geçerek büyük mesafeler katetmek zorundadırlar. Çeşitli kaynak alıcı uzaklıklarında yol almaları için gereken zamanlar, yayılımları boyunca içinden geçtikleri yeraltı formasyonlarının derinlikleri ve hızları hakkında bilgi verirler.

Sismik kırılma çalışması yansıma çalışmasına göre daha kısa sürede uygulanabilen ve daha ekonomik bir yöntemdir. Bu yöntem tabakaların hızları hakkında bilgi sağlaması bakımından önemlidir.

3. DALGA YAYILIM PRENSİPLERİ

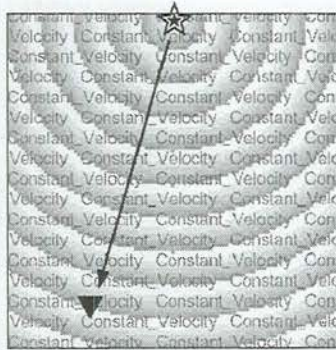
Sismik dalga türleri için genel bir hareket denklemini matematiksel olarak tanımlamak mümkündür. Bu hareket denklemini tanımlarken, içinde yayıldıkları ortamı tam elastik bir cisim olarak kabul edebilir ve elastik cisimlerin deformasyonu hakkındaki tüm yasalar deprem dalgalarına uygulanabilir. Bunun dışında klasik fizikte kullandığımız ışın teorileri ve enerji yayılımında kullanılan fizik yasaları elastik ortamda yayılan bu dalga türleri için de geçerlidir. Bu yasalar;

- Dalga cephesi ve ışın teorisi
- Fermat Prensibi
- Snell Kanunu
- Huygens Prensibi
- Sınırdaki enerji bölünmesi (Yansıma ve kırılma katsayıları)
- Küresel açılma

3.1. Fermat Prensibi

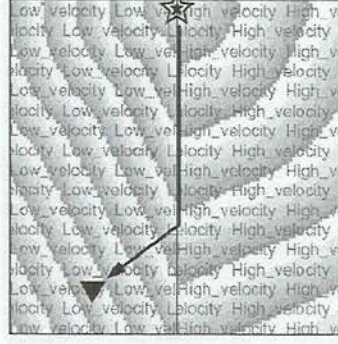
Sabit hızlı bir ortamda;

- 1- Dalga cephesi, dalga yayılım doğrultusuna diktir
- 2- Işın yolları doğrusaldır



Şekil EK-4.7. Fermat prensibi geometrisi (<http://www.geop.itu.edu.tr/>)

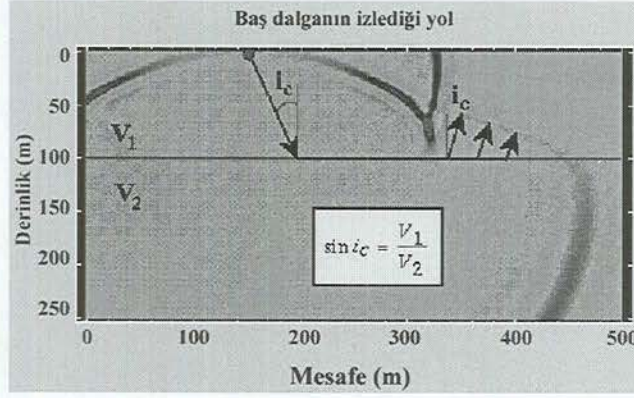
Ortam sabit hızlı değilse, ışın gideceği noktaya minimum zamanı kullanarak gider (yüksek hızlı ortamda seyahat etmeyi seçer); (Şekil EK-4.8).



Şekil EK-4.8. Farklı hızlı ortamda ışın ilerleme geometrisi (<http://www.geop.itu.edu.tr/>)

3.2. Snell Yasası

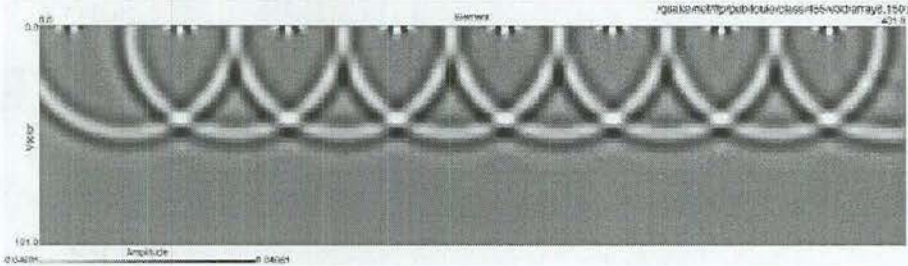
Kırılma oluşabilmesi için $V_2 > V_1$ olmalıdır (Şekil EK-4.9.). Burada V_1 , V_2 ortam hızları, i_c ; kritik açıyı belirtmektedir.



Şekil EK-4.9. Snell yasası geometrisi (<http://www.geop.itu.edu.tr/>)

3.3. Huygens Prensibi

Dalga cephesi üzerindeki her bir nokta kendi başına bir noktasal kaynak gibi davranır (Şekil EK-4.10).



Şekil EK-4.10. Huygens prensibi geometrisi (<http://www.geop.itu.edu.tr/>)

Bir kaynaktan çıkan sismik dalga elastik ortam içinde yayılırken enerjisi ortam tarafından dereceli olarak azaltılıp ısı enerjisine çevrilir. Bu işlem emilme veya absorpsiyon olarak bilinir. Zeminin yumuşaklık derecesine bağlı olarak emilme katsayısı artar. Çalışma sahası ve uygulanan büyüklüklere bağlı olarak bu

değerler değişim gösterir. Yayıldığı ortamın özellikleri sismik dalgaların yayılım biçimlerini, enerji yoğunluğunu büyük ölçüde etkiler.

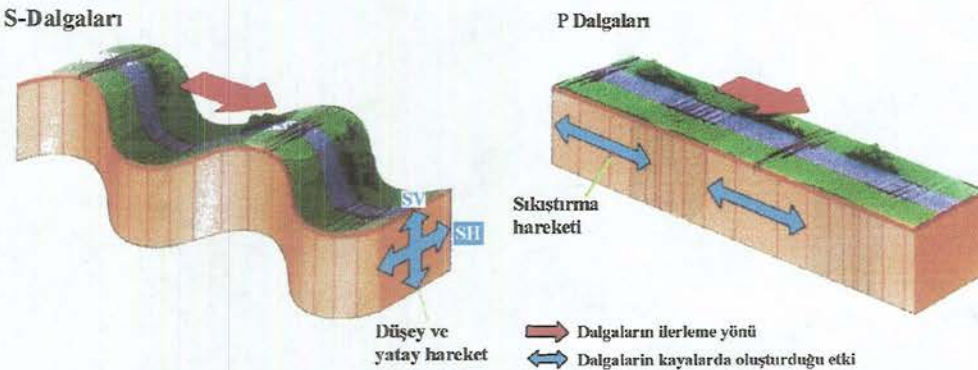
Kuvvetli yer hareketleri sonucu oluşan deprem dalgaları maddesel bir ortamda yayılan bir enerjinin varlığını gösterir. Bu enerjinin yayılım biçimine bağlı olarak farklı özelliklere sahip deprem dalga türleri oluşur. Sonuç olarak bir dalga hareketinin oluşması ve yayılabilmesi için;

- Sarsıntı kaynağına (Faylanma Hareketi)
- Dalganın yayılabileceği bir ortama
- Ortamın komşu parçacıklarının birbirini etkileme mekanizmasına

gereksinim vardır. Bu etkenler bölgesel olarak farklılık gösterir, zemin özelliklerinin incelenmesiyle, deprem yer hareketleri ile birlikte meydana gelebilecek olası dinamik zemin davranışlarının ortaya konması yapılması gereken çalışmaların başında gelir.

4. ELASTİSİTE TEORİSİ VE ELASTİK DALGALAR

Elastik ortamların şeklini değiştiren kuvvetler elastik dalga üretirler. Yayılan bu dalgaların elastik ortamda meydana getirdikleri deformasyonlar birbirine göre farklılık gösterir ve kendi aralarındaki sınıflamaları, oluşturdukları deformasyon biçimlerine bağlı olarak yapılmıştır. Örneğin “P” dalgalarının parçacık hareketleri yayılım doğrultusunda olmasına karşın “S” dalgalarındaki hareket yayılım doğrultusuna dik olup yatay “SH” ve dikey “SV” bileşenleri mevcuttur (Şekil EK-4.11).



Şekil EK-4.11. Cisim dalgalarının zeminde oluşturduğu deformasyon hareketi

Elastik bir cisim içinde ne gibi dalgaların oluşup, yayılabileceğini incelemeye başlamadan önce esneklik ile ilgili bazı kavramlarla, esneklik parametrelerini tanımlamamız gerekir. Deprem dalgaları ile sismik prospeksiyonda gözlenen dalgalar gibi kısa periyotlu titreşim hareketleri karşısında yeri oluşturan maddenin tümünün tam elastik bir cisim gibi davrandığı anlaşılmaktadır. Öte yandan uzun periyotlu (milyonlarca yıl süren) kuvvetler karşısında yer kabuğunun tam elastik olmaktan çıkarak plastik bir cisim gibi kıvrıldığı ve adı geçen kuvvetlerin etkisi altında, şekil aldığı görülür. Buna göre deprem dalgaları bakımından yer tam elastik bir cisim gibi kabul edilebilir ve elastik cisimlerin deformasyonu hakkındaki fizik yasaları deprem dalgalarına uygulanabilir.

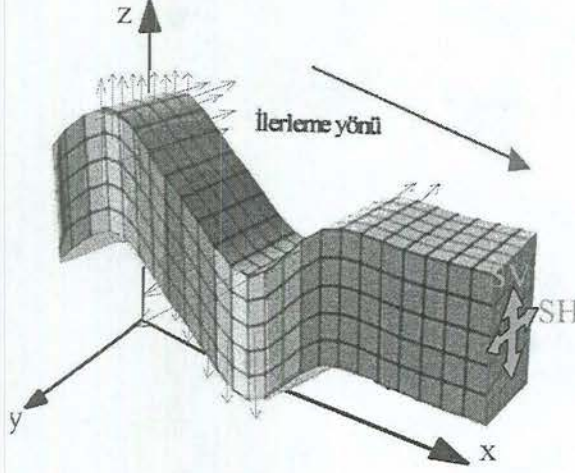
Sismik dalgaların yer içerisindeki yayılımlarını fiziksel olarak yorumlayabilmek ve matematiksel ifadelerle ortaya koyabilmek için genel anlamda elastisite teorisini bilmek gerekir. Bu anlayış içerisinde, elastik dalgaların zemin içerisinde yayılım karakteristiklerini anlayabilmek amacıyla daha gerçekçi yaklaşımlarla olayı irdeleyebilmek mümkün hale gelecektir. Buradan yola çıkarak elastik dalgaların yer içerisindeki hareketini tanımlayan denklemleri türetilir. Bu açıklamalar ışığında kayaçların esneklik özelliklerini ortaya koyan elastik parametreler ile dalga yayılım hızları arasında ilişkinin yakalanması, fizik yasalarının ortaya koyacağı kaçınılmaz bir sonuçtur. Bu ilişkiyi ortaya koyan bağıntılar deprem mühendislik ve jeofizik alanlarında yürütülen çalışmalarında türetilmiş ve arazi deneyleri ile kanıtlanmıştır.

Arazide kayıt cihazları ile ölçülen hız büyüklükleri ile zemin elastik özelliklerinin yanısıra, olası bir depremde oluşan sismik dalgaların zemini ne şekilde etkileyebileceği sorusuna da kuramsal yaklaşımlarla cevap vermek mümkün olabilmektedir.

Bu bölümde elastisite teorisi yanısıra sismik hız özellikleri, sismik hız saptama yöntemleri, sismik hızı etkileyen faktörler üzerinde durulacak ve elastisite teorisi ile olan ilişkileri irdelenecektir.

4.1. Elastisite Teorisi

Sismik dalgalar elastik bandın gerilmesinde olduğu gibi, içinde yayıldıkları ortamın şeklini bozmasına (deformasyonuna) sebep olurlar ve deformasyon biçimi sismik dalga türüne bağlı değişim gösterir. S dalgasının oluşturduğu deformasyon (Şekil EK-4.12)



Şekil EK-4.12. S Dalgasının yayıldığı ortamda meydana getireceği deformasyon

Sabit hacimli katı bir cisim bir dış kuvvet etkisi altında kaldığında, hacim ve biçimce değişime uğrar. Elastik katılar üzerine etkiyen dış kuvvet kaldırıldığında, eski hacim ve biçimine dönerler. Küçük kısa zaman aralığında oluşan ve küçük deformasyonlarda kayalar da elastik özelliklerini korurlar.

Sismik dalga yayılımının kayaların elastik özelliklerine bağlı olduğu bilinmektedir. Şekil ve hacim olarak değişimlere karşı koyma ve dış kuvvetler kaldırıldığı zaman deforme olmadığı şartlara geri dönüş özelliğine *elastisite* denir. Uygulanan kuvvetlerle deformasyonlar arasındaki bağıntılar, gerilme (gerilme) ve deformasyon (deformasyon) kavramları ile açıklanabilir.

Gerilme (Stress)

Elastik yer değiştirme ile ilgili birim alandaki kuvvet olarak 1 m^2 lik bir alana 1 Newton'luk kuvvet uygulanırsa, gerilme $1 \text{ N/m}^2 \equiv 1 \text{ Pascal (Pa)}$ şeklinde tanımlanır. Alanlara etki eden iki tip kuvvet vardır. Eğer kuvvet yüzeye dik doğrultuda etkiyor ise, gerilme; normal gerilme, eğer kuvvet yüzeye teğetsel etkiyor ise, gerilme; makaslama gerilmesi olarak adlandırılır.

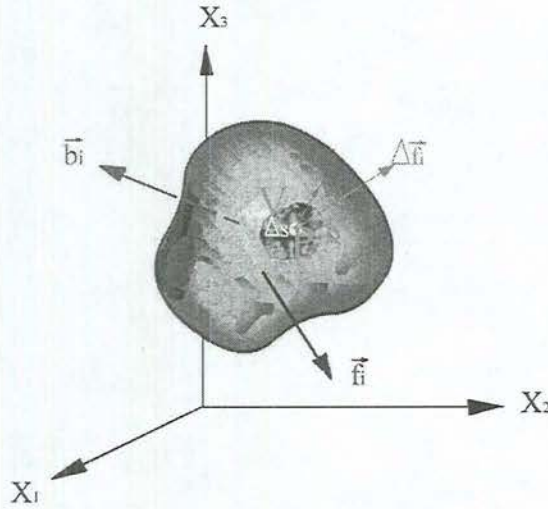
Genellikle, kuvvetin tamamen normal ya da teğetsel olması beklenemez. Bazı durumlarda herhangi bir açı ile cisim üzerine etkiliyor olabilir, bu durumda problem çözümü kuvvetin normal ve teğetsel yüzeyler boyunca etki ettiği bileşenleri hesaplanır. Buradan yola çıkarak normal gerilme ve makaslama stresi hesaplanır. Bir cisme uygulanan dışa yönelmiş olan çekme “stres” gerilme pozitif işaret alır, içe yönelmiş olan basınç gerilmeleri negatif işaret alır.

Şekil EK-4.13’de gösterildiği gibi bir cisim f_i , b_i kuvvetleri etkisi altında kalmıştır. Bu durumda bir S yüzeyi ile çevrelenen V hacmindeki kütle, dışındaki materyal ile karşılıklı hareket yapar. S yüzeyinin Δs küçük bir yüzey elamanı içinde bir P noktasından dışarıya doğru birim normal vektör n_i ve V hacminin dışındaki materyal tarafından Δs yüzeyi boyunca etkileyen ortalama “net” kuvvet Δf_i olarak tanımlanır. Δs üzerindeki kuvvet dağılımının her yerde aynı olmasına gereksinim yoktur. Bu yaklaşımlar altında gerilme; birim alan Δs başına ortalama kuvvet

$$\Delta f_i / \Delta s$$

4.1

olarak bulunur.



Şekil EK-4.13. Cauchy Gerilme prensibi

Cauchy Gerilme Prensibi $\Delta f_i / \Delta s$ oranının Δs 'in P noktasında sıfıra yaklaşması durumunda

4.2

$$\lim_{\Delta s \rightarrow 0} \frac{\Delta \vec{f}_i}{\Delta s} = \frac{d\vec{f}_i}{ds} = t_i^n$$

olduğunu belirtir. Burada $d\vec{f}_i / ds$ oranı t_i^n : gerilme vektörü olarak isimlendirilir.

Gerilme vektörleri:

$$\begin{aligned} t^{(\hat{e}_1)} &= t_1^{(\hat{e}_1)} \hat{e}_1 + t_2^{(\hat{e}_1)} \hat{e}_2 + t_3^{(\hat{e}_1)} \hat{e}_3 \\ t^{(\hat{e}_2)} &= t_1^{(\hat{e}_2)} \hat{e}_1 + t_2^{(\hat{e}_2)} \hat{e}_2 + t_3^{(\hat{e}_2)} \hat{e}_3 \\ t^{(\hat{e}_3)} &= t_1^{(\hat{e}_3)} \hat{e}_1 + t_2^{(\hat{e}_3)} \hat{e}_2 + t_3^{(\hat{e}_3)} \hat{e}_3 \end{aligned} \quad 4.3$$

biçiminde tanımlı olup 9 adet bileşeni vardır (Şekil EK-4.13). Her bir yüzey üzerinde, stresleri çözebilmek için x,y,z yönlerindeki bileşenleri ayrı ayrı ifade edilir. Bu 9 adet gerilme vektör bileşenini ikinci mertebeden kartezyen tensör olan gerilme tensorü σ_{ij} şeklinde tek bir ifadeyle göstermek mümkündür (Şekil EK-4.14). Denklem 4.4

$$t_j^{(\hat{e}_i)} = \sigma_{ij} \quad 4.4$$

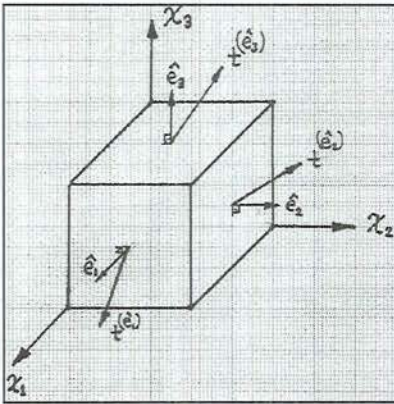
$$\sigma_{ij} = \begin{pmatrix} \sigma_{11} & \sigma_{12} & \sigma_{13} \\ \sigma_{21} & \sigma_{22} & \sigma_{23} \\ \sigma_{31} & \sigma_{32} & \sigma_{33} \end{pmatrix}$$

$$\begin{aligned} t^{(\hat{e}_1)} &= t_1^{(\hat{e}_1)} \hat{e}_1 + t_2^{(\hat{e}_1)} \hat{e}_2 + t_3^{(\hat{e}_1)} \hat{e}_3 \\ t^{(\hat{e}_2)} &= t_1^{(\hat{e}_2)} \hat{e}_1 + t_2^{(\hat{e}_2)} \hat{e}_2 + t_3^{(\hat{e}_2)} \hat{e}_3 \\ t^{(\hat{e}_3)} &= t_1^{(\hat{e}_3)} \hat{e}_1 + t_2^{(\hat{e}_3)} \hat{e}_2 + t_3^{(\hat{e}_3)} \hat{e}_3 \end{aligned} \quad 4.5$$

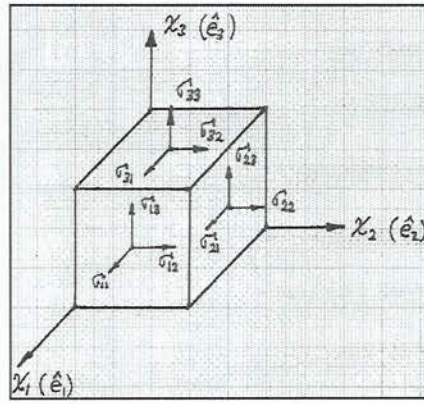
Burada t_i^n : gerilme vektörü

σ_{ij} : gerilme tensorü

$\sigma_{11}, \sigma_{22}, \sigma_{33}$: normal stresler, diğerleri makaslama gerilmeleridir.



Şekil EK-4.13 Bir paralelkenar üzerine etkiyen gerilme vektörleri



Şekil EK-4.14 Bir paralelkenar üzerine etkiyen gerilme tensorleri

Gerilme vektörü ile gerilme tensörü arasında ;

$$[\hat{t}_1, \hat{t}_2, \hat{t}_3] = [\hat{n}_1, \hat{n}_2, \hat{n}_3] \begin{vmatrix} \sigma_{11} & \sigma_{12} & \sigma_{13} \\ \sigma_{21} & \sigma_{22} & \sigma_{23} \\ \sigma_{31} & \sigma_{32} & \sigma_{33} \end{vmatrix} \quad 4.6$$

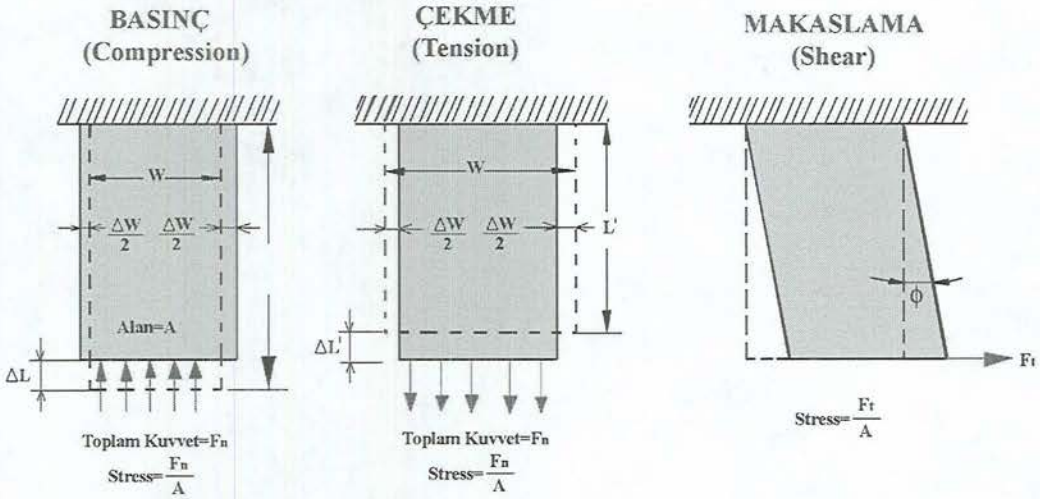
$$t^{(\hat{n})} = \hat{n}_i \sigma_{ij} \quad 4.7$$

ilişkisi vardır.

Deformasyon (Strain)

Bir elastik cisim gerilmelere uğradığında, şekil “biçim” ve boyutlarında değişimler meydana gelir. Bu değişimlere deformasyon adı verilir. Deformasyon; gerilme etkisi altında kalan bir cismin birim miktarına karşılık gelen biçim ve hacim değişmesidir.

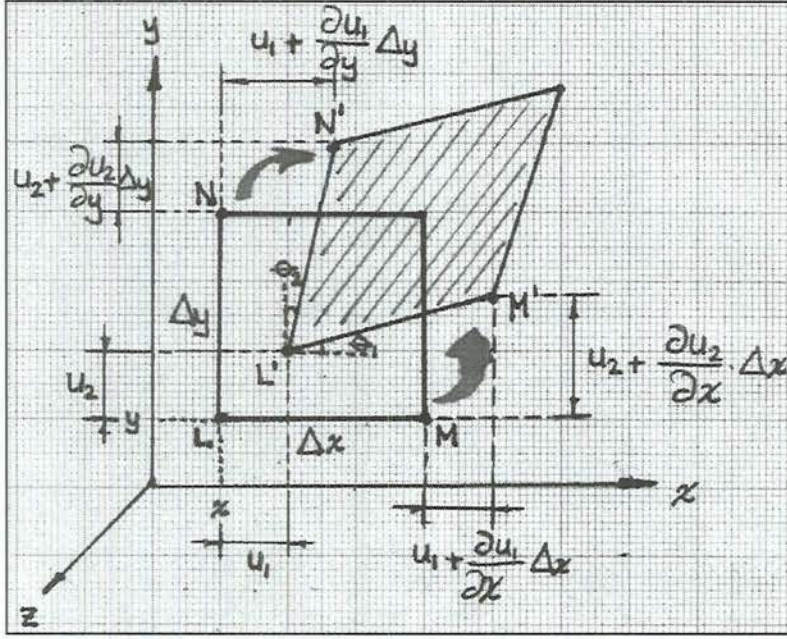
Gerilmelerin sebep olduğu Δl uzama veya kısalmasının gerilme öncesi orjinal l uzunluğuna oranı boyuna deformasyon (ϵ_l), Δw enine daralması için aynı işlem enine deformasyon (ϵ_w) 'yı verir. Dış kuvvet etkisinde olan bir cisimde meydana gelebilecek deformasyon türleri Şekil EK-4.15'de verilmiştir. Şekilde noktalı çizgiler deformasyon öncesi şekilleri ifade etmektedir.



Şekil EK-4.15. Gerilme etkisi altında kalmış elastik bir cisim üzerinde meydana gelen deformasyon

$$\text{Burada boyuna deformasyon } \epsilon_l = \frac{\Delta l}{l} \text{ veya } \frac{\Delta l'}{l'} \quad 4.8$$

$$\text{Enine deformasyon } \epsilon_w = \frac{\Delta w}{w} \quad 4.9$$



Şekil EK-4.17. Makaslama gerilmesi altında kalmış dikdörtgen eleman üzerinde meydana gelebilecek deformasyon.

Şekil EK-4.17.'de L,M,N noktaları uzamadan sonra L', M', N' noktalarına gelir, bu durumda oluşan deformasyon:

$$L = (x, y)$$

$$L' = (x + u, y + v)$$

$$M = (x + \Delta x, y)$$

$$M' = \left(x + \Delta x + u + \frac{\partial u}{\partial x} \Delta x, y + v + \frac{\partial v}{\partial x} \Delta x \right) \quad 4.14$$

$$N = (x, y + \Delta y)$$

$$N' = \left(x + u + \frac{\partial u}{\partial y} \Delta y, y + \Delta y + v + \frac{\partial v}{\partial y} \Delta y \right)$$

Bu durumda x eksenini boyunca oluşacak deformasyon,

$$\epsilon_{xx} = \frac{(LM)'}{LM} = \frac{\Delta x + \frac{\partial u}{\partial x} \Delta x - \Delta x}{\Delta x} = \frac{\partial u}{\partial x} \quad 4.15$$

bulunur.

Ayrıca y eksenini boyunca meydana gelen deformasyon,

$$\epsilon_{yy} = \frac{LM' \text{nin Uzunluğundaki Değişim}}{LM' \text{nin Orjinal Uzunluğu}} = \frac{\partial u_2}{\partial y} \quad 4.16$$

olarak bulunur.

x ve y eksenlerinde belirli uzunluk boyunca çok küçük deformasyonlar, normal deformasyon olarak adlandırılır.

Üç boyutlu düşünülecek olursa; $\epsilon_{zz}=\partial U_3/\partial z$ ifadesi üçüncü normal deformasyon olacaktır. Genel olarak deformasyon kartezyen koordinatlarda çalıştığımızda

$$\epsilon_{ij} = \frac{1}{2} \left(\frac{\partial U_j}{\partial x_i} + \frac{\partial U_i}{\partial x_j} \right) \quad i, j= 1, 2, 3 \quad 4.17$$

şeklinde ifade edilir ve $i=j$ ise normal deformasyon, $i \neq j$ ise makaslama deformasyonu olarak isimlendirilir. Eğer bir dikdörtgen cismin biçiminde bir değişme meydana gelmiş ise, bu durumda deformasyonun makaslama bileşenlerinden bahsedilir ve ϵ_{xy} şeklinde yazılır. Üç boyutlu bir cisimde deformasyonun, 6 farklı bileşeninden bahsedilir.

Burada U_1, U_2, U_3 deformasyon miktarları olup sırasıyla x, y, z eksenleri

$$\epsilon_{xy} = \epsilon_{yx} = \frac{1}{2} \left(\frac{\partial U_1}{\partial y} + \frac{\partial U_2}{\partial x} \right) \quad 4.18$$

$$\epsilon_{xz} = \epsilon_{zx} = \frac{1}{2} \left(\frac{\partial U_1}{\partial z} + \frac{\partial U_3}{\partial x} \right) \quad 4.19$$

$$\epsilon_{zy} = \epsilon_{yz} = \frac{1}{2} \left(\frac{\partial U_3}{\partial y} + \frac{\partial U_2}{\partial z} \right) \quad 4.20$$

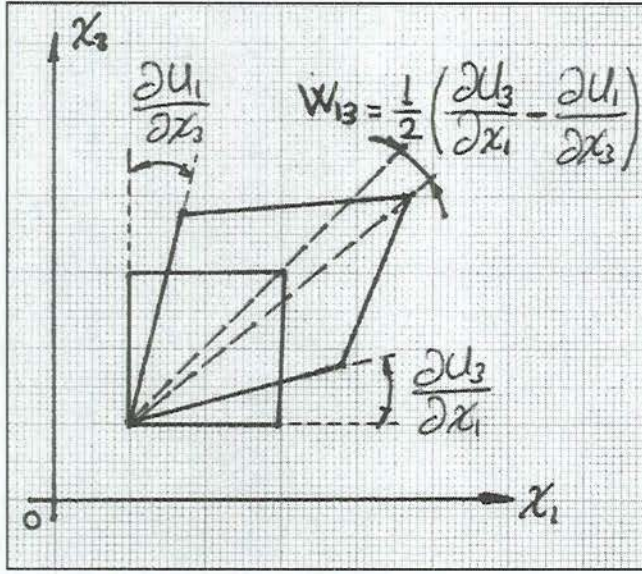
boyunca deformasyon miktarlarıdır. Ayrıca gösterimlerde $X_1=x, X_2=y, X_3=z$ notasyonu da kullanılmıştır. Genel olarak

$$\epsilon_{ij} = \frac{1}{2} \left(\frac{\partial U_j}{\partial x_i} + \frac{\partial U_i}{\partial x_j} \right) \quad \text{deformasyon tensör} \quad 4.21$$

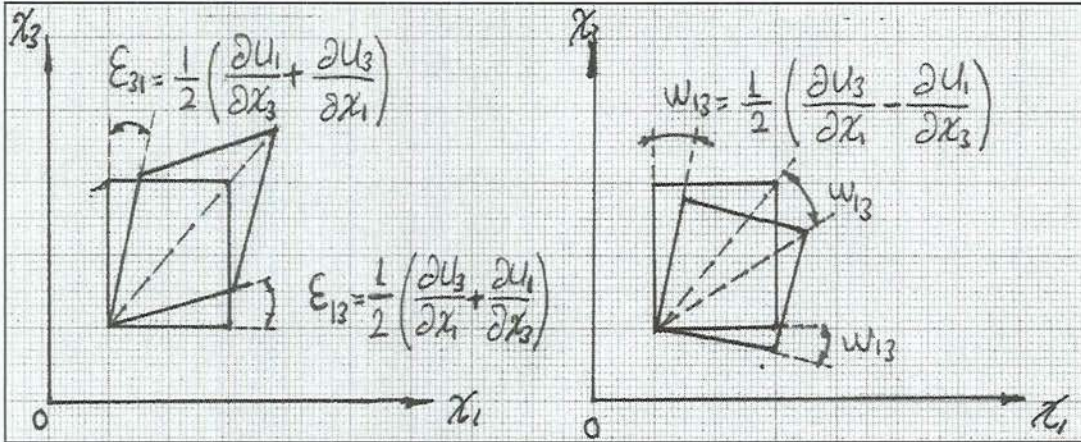
şeklinde ifade edilir. Kare bir cisimde meydana gelen makaslama deformasyonu Şekil EK-4.19a'de gösterilmiştir. Makaslama etkisinin dikdörtgen üzerinde açılmal bir dönmeye neden olması durumu farklı bir deformasyon etkisi olup rotation tensör olarak tanımlanır ve W_{ij} ile gösterilir. (Şekil EK4.18-Şekil EK-4.19b)

$$W_{ij} = \frac{1}{2} \left(\frac{\partial U_j}{\partial x_i} - \frac{\partial U_i}{\partial x_j} \right)$$

4.22



Şekil EK-4.18. Hacimsel deformasyon ve dönme etkisi



Şekil EK-4.19. a.makaslama deformasyonu, b.sert malzemede makaslama deformasyonu.

Şekil EK-4.19'da z eksenini boyunca dönme açısı,

$$\theta_z = \frac{1}{2} (\theta_1 - \theta_2)$$

$$\theta_z = \frac{1}{2} \left(\frac{\partial U_2}{\partial x_1} - \frac{\partial U_1}{\partial x_2} \right)$$

4.23

olarak yazmak mümkündür. Bu teoriyi 3 boyutlu bir sistem için genellenecek olunursa;

$$\begin{aligned}\theta_{u1} &= \frac{\partial U_1}{\partial x_1} \Delta x + \frac{\partial U_1}{\partial x_2} \Delta y + \frac{\partial U_1}{\partial x_3} \Delta z \\ \theta_{u2} &= \frac{\partial U_2}{\partial x_1} \Delta x + \frac{\partial U_2}{\partial x_2} \Delta y + \frac{\partial U_2}{\partial x_3} \Delta z \\ \theta_{u3} &= \frac{\partial U_3}{\partial x_1} \Delta x + \frac{\partial U_3}{\partial x_2} \Delta y + \frac{\partial U_3}{\partial x_3} \Delta z\end{aligned}\tag{4.24}$$

Ayrıca 4.24 eşitliği simetrik ve antisimetrik olarak dağılımı yapılabilir, buna göre;

$$\begin{aligned}\theta_{u1} &= \sum xx \cdot \Delta x + \sum xy \cdot \Delta y + \sum xz \cdot \Delta z - \theta_z \cdot \Delta x + \theta_y \cdot \Delta y \\ \theta_{u2} &= \sum xy \cdot \Delta x + \sum yy \cdot \Delta y + \sum yz \cdot \Delta z + \theta_z \cdot \Delta x - \theta_x \cdot \Delta z \\ \theta_{u3} &= \sum xz \cdot \Delta x + \sum yz \cdot \Delta y + \sum zz \cdot \Delta z - \theta_y \cdot \Delta x + \theta_x \cdot \Delta y\end{aligned}\tag{4.25}$$

Burada, dönme açıları

$$\begin{aligned}\theta_x &= \frac{1}{2} \left(\frac{\partial U_3}{\partial x_2} - \frac{\partial U_2}{\partial x_3} \right) \\ \theta_y &= \frac{1}{2} \left(\frac{\partial U_1}{\partial x_3} - \frac{\partial U_3}{\partial x_1} \right) \\ \theta_z &= \frac{1}{2} \left(\frac{\partial U_2}{\partial x_1} - \frac{\partial U_1}{\partial x_2} \right)\end{aligned}\tag{4.26}$$

tanımlanmıştır. 4.24 eşitliğini matris formda yazacak olursak

$$(\theta_x, \theta_y, \theta_z) = \begin{pmatrix} \sum xx & \sum xy & \sum xz \\ \sum xy & \sum yy & \sum yz \\ \sum xz & \sum yz & \sum zz \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \Delta x \\ \Delta y \\ \Delta z \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} 0 & -Qu_2 & -Qu_2 \\ \theta_{u3} & 0 & -Qu_1 \\ -\theta_{u2} & Qu_1 & 0 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \Delta x \\ \Delta y \\ \Delta z \end{pmatrix}\tag{4.27}$$

şeklinde tanımlanabilir. Deformasyon boyutsal bir nicelik olup genellikle sismolojide, sismik dalganın zemin içerisinde ilerlemesi, deformasyonun nedenidir.

Cisim belirli bir deformasyon neticesinde birim hacim elemanında çok küçük bir artış olacaktır, bu artış kübik genişleme olarak adlandırılır ve Δ ile sembolize edilir. Burada orjinal paralel kenarın hacmi V' dir.

$$V = \Delta x \cdot \Delta y \cdot \Delta z \quad 4.28$$

Hacimce meydana gelen bir deformasyon neticesinde hacimdeki artış ΔV kadar olacaktır.

$$V + \Delta V = (1 + \sum xx) \cdot \Delta x \cdot (1 + \sum yy) \cdot \Delta y \cdot (1 + \sum zz) \cdot \Delta z \quad 4.29$$

Bu sonuca göre kübik dilatasyon,

$$\Delta = \frac{\text{HacimdekiDeğişim}}{\text{OrjinalHacim}} = \frac{V + \Delta V - V}{V} \quad 4.30$$

$$\Delta = \frac{(1 + \sum xx)(1 + \sum yy)(1 + \sum zz) \cdot \Delta x \cdot \Delta y \cdot \Delta z - \Delta x \cdot \Delta y \cdot \Delta z}{\Delta x \cdot \Delta y \cdot \Delta z}$$

olacaktır. Buna göre üç boyutlu bir sistemde hacimdeki ortalama artma

$$\Delta = \sum xx + \sum yy + \sum zz \quad 4.31$$

bağıntısıyla verilir ve dilatasyon (Δ) olarak isimlendirilir.

$$\Delta = \frac{\partial U_1}{\partial x} + \frac{\partial U_2}{\partial y} + \frac{\partial U_3}{\partial z} \quad 4.32$$

$$\Delta = \vec{\nabla} \cdot \vec{U} \quad 4.33$$

5. HOOKE YASASI VE ELASTİK PARAMETRELER

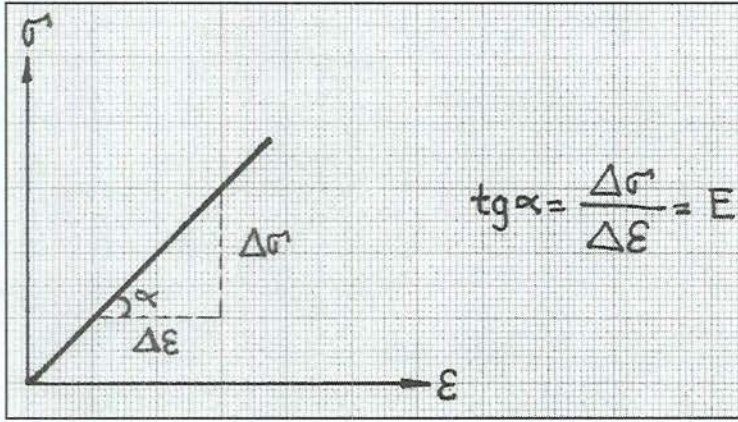
Gerilmeler bilindiğinde deformasyonları hesaplamak için gerilme ile deformasyon arasındaki ilişkiyi bilmek zorundayız. Bu amaçla 1976'da İngiliz Matematikçi Robert HOOKE küçük deformasyonlarda (cisim elastik dayanım sınırını aşmadığı sürece) gerilme ile deformasyon arasında doğrusal bir ilişki olduğunu ortaya koymuştur. Buna göre verilen bir deformasyon onu meydana getiren gerilme ile doğru orantılıdır ve bunu veren bağıntı Hooke Yasası olarak tanımlanmıştır.

Yer içinde bir noktadan yayılan deprem dalgaları ilerledikleri ortamın elastik parametreleri (λ, μ) ve yoğunluğuna bağlı olarak değişime uğrarlar.

Deprem dalgaları bakımından yer tam elastik bir cisim olarak kabul edilebilir ve elastik cisimlerin deformasyonu hakkındaki yasaları deprem dalgalarına uygulayabiliriz.

Hooke Yasası

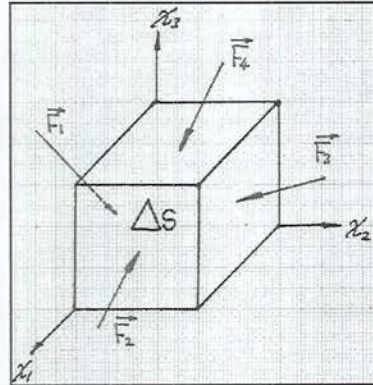
Hooke yasası verilen bir deformasyon ile onu meydana getiren gerilme arasında doğru orantı olduğunu belirtir (Şekil EK-4.20). Çeşitli gerilmelerin olması halinde herbiri diğerlerinden bağımsız bir şekilde deformasyon oluşturacağından toplam deformasyon, bireysel gerilmeler tarafından meydana getirilen deformasyonların toplamıdır.(Şekil EK-4.21)



Şekil EK-4.20 Elastisite veya Young Modülü

$$\text{Stresler: } \frac{\vec{F}_1}{\Delta s}, \frac{\vec{F}_2}{\Delta s}, \frac{\vec{F}_3}{\Delta s}, \frac{\vec{F}_4}{\Delta s} \quad 4.34$$

$$\text{Toplam deformasyon } \sum \Delta l = \Delta l_1 + \Delta l_2 + \Delta l_3 + \Delta l_4 \quad 4.35$$



Şekil EK-4.21 Hacim elemanına uygulanan dış kuvvetler

Bu sonuçlara göre her bir deformasyon, gerilmelerin tamamının doğrusal bir fonksiyonudur (veya tersi). Eğer ortam izotrop ise, yani özellikler yöne bağlı değil ise;

$$\sigma_{ii} = \lambda \Delta + 2\mu \epsilon_{ii} \quad \text{Normal} \quad 4.36$$

$$\sigma_{ij} = \mu \epsilon_{ij} \quad \text{Makaslama} \quad 4.37$$

şeklinde ilişkilendirilmiştir.

λ =Lame Sabiti (17.yy'dan sonra Fransız matematikçi G.Lame)

μ =Rijidite veya makaslama modülü.(Makaslama deformasyon direncinin bir ölçüsüdür)

Δ =dilatasyon

σ_{ii} =normal gerilme

σ_{ij} =makaslama gerilmesi

ϵ_{ii} =normal deformasyon

ϵ_{ij} =makaslama deformasyonu

Eğer $\epsilon_{ij}=(\sigma_{ij} / \mu)$ şeklinde yazılacak olursa daha büyük μ değerleri için ϵ_{ij} 'nin daha küçük olduğu açıkça görülür. Bu sebepten μ , makaslama deformasyonuna karşı gösterilen direncin bir ölçüsüdür.

$$\sigma_{xx} = c \cdot \epsilon_{xx} \quad 4.38$$

Teoriyi üç boyuta genişletecek olursak 36 farklı değer içereceği görülecektir

$$\sigma_{xx} = c_{11} \cdot \epsilon_{xx} + c_{12} \cdot \epsilon_{xy} + c_{13} \cdot \epsilon_{xz} + c_{14} \cdot \epsilon_{yy} + c_{15} \cdot \epsilon_{yz} + c_{16} \cdot \epsilon_{zz} \quad 4.39$$

↓

$$\sigma_{zz} = c_{31} \cdot \epsilon_{xx} + c_{32} \cdot \epsilon_{xy} + c_{33} \cdot \epsilon_{xz} + c_{34} \cdot \epsilon_{yy} + c_{35} \cdot \epsilon_{yz} + c_{36} \cdot \epsilon_{zz}$$

Sadece izotropik cisim için düşünüldüğünde, numaralandırılmış içerikler ikiye düşürülmüş olacaktır.

$$\begin{aligned} \sigma_{xx} &= (\lambda + 2\mu) \cdot \epsilon_{xx} + \lambda \cdot \epsilon_{yy} + \lambda \cdot \epsilon_{zz} \\ &= \lambda \Delta + 2\mu \cdot \epsilon_{xx} \end{aligned} \quad 4.40$$

$$\sigma_{yy} = \lambda \Delta + 2\mu \cdot \epsilon_{yy}$$

$$\sigma_{zz} = \lambda \Delta + 2\mu \cdot \epsilon_{zz}$$

$$\sigma_{xy} = \sigma_{yx} = 2\mu.\varepsilon_{xy}$$

$$\sigma_{xz} = \sigma_{zx} = 2\mu.\varepsilon_{xz}$$

$$\sigma_{yz} = \sigma_{zy} = 2\mu.\varepsilon_{yz}$$

4.40 denkleminin son hali genel olarak yazılacak olunursa;

$$\sigma_{ij} = \lambda.\Delta.\delta_{ij} + 2\mu.\varepsilon_{ij} \quad i, j = x, y, z; (1, 2, 3) \quad 4.41$$

$$\delta_{ij} = 1 \Rightarrow i = j$$

$$\delta_{ij} = 0 \Rightarrow i \neq j$$

elde edilir. Burada δ_{ij} , kronocker deltası olarak isimlendirilir ve:

Hooke yasası geniş bir uygulamaya sahip ise de, büyük gerilmeler için geçerliliğini kaybeder. Verilen bir madde için gerilme, cismin elastik limitinin üzerine çıktığı zaman Hooke Yasası geçerliliğini daha fazla sürdüremez ve deformasyonlar daha hızlı bir şekilde artar. Bu sınırı aşan gerilmelerde meydana gelen deformasyonlar, gerilmeler kaldırıldığında bile tamamiyle ortadan kalkmaz. Hooke Yasası uygulanabilmesi için aşağıdaki koşulların oluştuğu varsayılır. Bu koşullar;

i- Ortam izotrop olacak,

ii- Küçük deformasyon meydana gelecek,

Hooke Yasası zeminin elastik özelliklerini baz alarak yeraltı formasyonlarının dinamik etkilerini ortaya koyma açısından önemlidir.

Elastik Parametreler ve Elastik Dalgalar

Zemin veya kayaçların üzerlerinde bulunan ağır yükler altında veya deprem yer hareketleri sonucunda oluşan makaslama gerilmelerine bağlı olarak farklı deformasyonlara uğradığı bilinmektedir. Yer sarsıntılarının oluşturduğu hareket gibi yanal bir basınç uygulandığında, yerde bir burkulma ya da yamulma oluşur. Biçim değiştirici güç kalktığında, ortam ilk biçimine dönüşürse ortam esnek davranışlı olarak nitelendirilir.

Yerin bu tür esneklik özellikleri ilerleyen sismik dalgaların büyüklüklerinin ölçülerek belirlenmesi mümkündür. Yerin elastik özelliklerini tanımlayan elastik parametreler;

- Young (Elastisite) Modülü (E)
- Poisson Oranı (σ)
- Makaslama (rijidite) Modülü (μ)
- Hacimsel Elastik (Bulk) Modülü (k)
- Lame sabiti (λ)

Bir noktadan yayılan deprem dalgaları katettikleri ortamın elastik parametreleri (λ, μ) ve yoğunluğa bağlı olarak değişime uğrarlar. Süreksizlik sınırlarında (hızların ve yoğunluğun ani olarak değiştiği) sismik dalgaların uğradığı değişimler yansıma, kırılma ve dönüşüm (conversion) şeklinde olmaktadır.

Dalga türlerinden birisi olan P-Dalgası, ortam zamana bağlı olarak hacimsel değişime uğrarken dalga yayılır. Ana dalga veya basınç çekme dalgası olarak da bilinen bu dalga hareketinde, yayılma sırasında ilerleme doğrultusunda ve ona dik doğrultuda yer değiştirmeler ve normal gerilmeler meydana gelir.

Zeminlerde veya kayalarda dış kuvvet sonucu oluşan deformasyon türüne bağlı olmak üzere türetilen dalga denklemi;

$$\frac{\partial^2 \phi}{\partial t^2} = \frac{\lambda + 2\mu}{\rho} \cdot \nabla^2 \phi \quad \nabla = \left(\frac{\partial^2 \phi}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 \phi}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 \phi}{\partial z^2} \right)$$

Diğer bir cisim dalgası türü olan S-Dalgalarında yayılma doğrultusuna dik doğrultuda yer değiştirmeler gözlenir. İkincil dalga veya makaslama dalgası olarak da bilinen bu dalga hareketinin özel olarak yatay veya düşey düzlemde meydana gelmesi durumları;

Yatayda kesme dalgası (SH)

Düşeyde kayma dalgası (SV)

olarak bilinir.

Deformasyon türüne bağlı olarak türetilen dalga denklemi:

$$\frac{\partial^2 \Psi}{\partial t^2} = \frac{\mu}{\rho} \cdot \nabla^2 \Psi$$

Young (Elastisite) Modülü (E): Düşey basınç altında zeminin yamulmasını tanımlar. Aşağıdaki eşitlik ile ifade edilir.

$$E = \frac{F/A}{\Delta L/L} = \frac{\text{gerilme}}{\text{deformasyon}} = \frac{\sigma_x}{\epsilon_x} \quad 4.42$$

Genel olarak alüvyon türü zeminlerde $E=2,9.10^5$ kg/cm² değerine, granit türü kaya birimlerinde ise $E=4,7.10^5$ kg/cm² değerini aldığı bilinmektedir.

Düşey yükler altında alüvyon biriminin dayanımının örtüye göre yüksek olduğu ancak genel olarak düşük olduğu gözlenmiştir. (A.ERCAN 1999)

Poisson Oranı (σ): Gerilme-deformasyon ilişkisinin bir ölçüsü olmayıp geometrik şekil değiştirmesinin bir ölçüsüdür.

$$\sigma = \frac{-\epsilon_w}{\epsilon_l} \quad \begin{array}{l} \epsilon_w : \text{enine daralma deformasyonu} \\ \epsilon_l : \text{boyuna uzama deformasyonu} \end{array} \quad 4.43$$

Zemin türlerinin belirlenmesinde (V_p/V_s oranından yararlanılarak) kullanılır. Sulu, yumuşak ortamlarda poisson oranı yüksek olmasına karşın sıkışmaz ortamlarda sıfıra yaklaşır. Eğer $\sigma=0,5$ ise çok dayanıksız porozitesi fazla sıvılaşmaya müsait bir zemini tanımlar.

Genellikle kil, kum, çakıldan oluşan alüvyal zeminlerde $\sigma=0,46$ olarak ölçülmüştür. (A.ERCAN) Bu durum alüvyonun oldukça gevşek bir yapıya sahip olduğunu ifade eder.

Çizelge EK-4.1. Poisson oranının zemin türüne bağlı değişimi

σ		Vp/Vs
0,5	Çok gevşek	∞
0,25-0,5	Sıkı	1,73
0	Çok sıkı	1,41

Granit $\sigma=0,21$
Kumtaşı $\sigma=0,1$
Kireçtaşı $\sigma=0,26$

Makaslama (rijidite) Modülü (μ)

Deprem dalgalarından ya da yanal basınç ağırlıklarından oluşan yamulmayı tanımlayan parametredir. Parçacık boyutundaki hareket; yanal basınç etkisi altında kalan parçacıkların birbiri üzerinde kayması şeklinde ortaya çıkan harekete karşı zeminin parçacık düzlemlerinin direncinin bir ölçüsüdür.

$$\mu = \frac{\sigma_{xy}}{\varepsilon_{xy}} = \frac{\text{makaslama gerilmesi}}{\text{makaslama deformasyonu}} \quad 4.44$$

Sıvıların makaslama yamulmasına karşı direnci olmadığından $\mu=0$ 'dır. Buna göre $\sigma=0,5$ olan zemin türlerinde (çok yumuşak sulu zeminler) $\mu=0$ olacağı görülür.

$$\mu = \frac{\rho \cdot Vs^2}{g} \quad \mu = \frac{E}{2(1+\sigma)} \quad 4.45$$

ρ : yoğunluk

g : yerçekimi ivmesi

Alüvyon $\mu=1,00 \cdot 10^5 \text{ kg/cm}^2$

Granit $\mu=1,94 \cdot 10^5 \text{ kg/cm}^2$

Kumtaşı $\mu=2,6 \cdot 10^5 \text{ kg/cm}^2$

Bu sonuçlara bakılacak olursa granit kum taşına oranla daha fazla eğrilebilir. Parçacıklar arasındaki çekim kuvveti ile orantılı olarak makaslama gerilmesine maruz kalan hacim elemanının biçim değişmesi meydana gelecektir.

Hacimsel Elastik (Bulk) Modülü (k)

Zemin veya kayaçların hidrostatik basınç altında kalması durumunda hacim değişimine karşı dayanımı tanımlayan parametredir.

$$k = -\frac{P}{\Delta} = \frac{\text{Hidrostatik basınç}}{\text{Dilatasyon}} \quad 4.46$$

$$P = \sigma_{xx} = \sigma_{yy} = \sigma_{zz} \Leftrightarrow \sigma_{xy} = \sigma_{xz} = \sigma_{yz} = 0 \quad 4.47$$

$$\Delta = \varepsilon_{xx} + \varepsilon_{yy} + \varepsilon_{zz} \quad 4.48$$

$$k = \lambda + \frac{2}{3} \cdot \mu \quad 4.49$$

Lame Sabiti (λ)

X eksenindeki stresin z eksenindeki deformasyona oranı olarak tanımlanır.

$$\lambda = \frac{\sigma_{xx}}{\varepsilon_{zz}} \quad 4.50$$

6. SİSMİK DALGA HIZLARI VE BAĞLI OLDUĞU PARAMETRELER

Faylanma hareketleri sonucu elastik ortamda dinamik bir etki farklı özelliklere sahip elastik dalgalar biçiminde yayılmaktadır. Cisim Dalgaları olarak adlandırdığımız P ve S Dalgaları ve bunların farklı katmanlardan yansıması sonucunda oluşan yüzey dalgalarının yayılım hızları farklılık gösterir.

Farklı türdeki dalgahareketlerinin, yayıldıkları ortamın elastik modüllerine (gerilme-deformasyon ilişkisi) bağlı olarak farklı özelliklere sahip olacaktır. Bu özelliklerden birisi de yayılım hızlarıdır.

Bu sonuçlardan yola çıkarak S Dalgalarının yayılım özelliklerinin incelenmesi; farklı tür zeminlerde, deprem yer hareketlerinden ve yatay yer değiştirme etkili gerilmelerden meydana gelebilecek dinamik etkilerin (deformasyonlar) ortaya konulması açısından oldukça büyük önem taşır.

Sismik dalga hızları moleküller arası çekim kuvvetlerinin etkisi olan elastik modüller ve yoğunluğun fonksiyonu olarak değişir.

Kesme Dalgası Hızı (V_s) yayıldığı ortamı oluşturan tanelerin boyutu, biçimi, sıklığı(pekişme derecesi) veya sertliği, esneklik (elastisite) özelliğinden etkilenen fiziksel bir büyüklüktür.

Genel bir değerlendirme yapılacak olursa:

- i. Yoğunluk artması
- ii. Tane büyüklüğünün artması
- iii. Üstteki kayacın basıncının artması

ile artar.

- i. Porozite (gözeneklilik) artması
- ii. Sıcaklık artması
- iii. Dokular arası sıvı basıncının artması

ile azalır.

Zemin ile olan ilişkisi

Sismik Dalgaların zemin içerisinde ilerleme hızlarının ölçümü, deprem yer hareketi sonucu oluşan zemin deformasyon biçimleri ve büyüklüklerinin belirlenmesinde önemli bir parametredir. Sismik kayma dalgası hızı (V_s) ve sıkışma dalgası hızı (V_p); zemin hakim periyodu, katman sıklığını, zeminin elastik özelliklerini, katman konumlarını ve zeminin deprem şiddetini artırma özelliklerini saptamada kullanılan büyüklüklerdir.

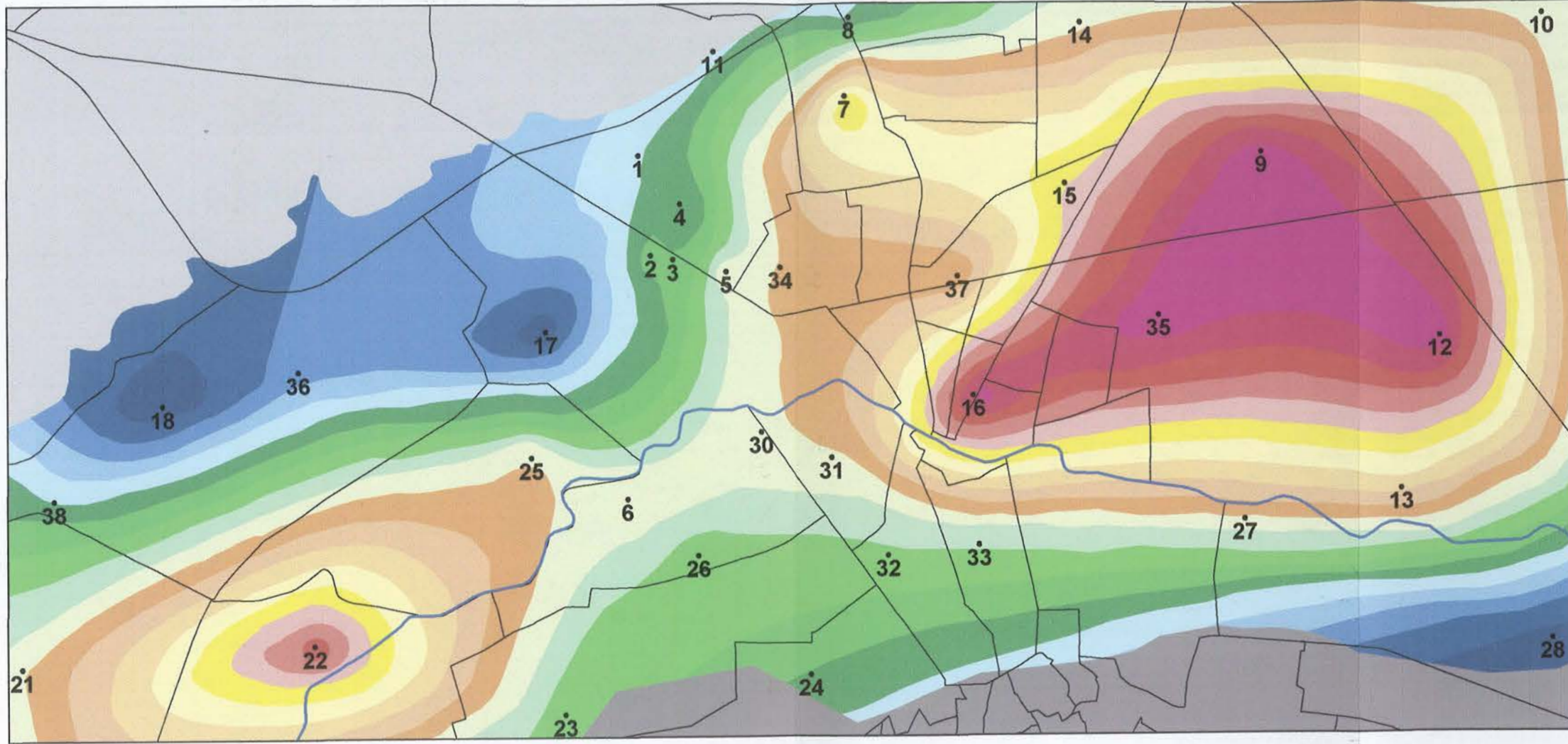
Deprem Dalgaları, zemini oluşturan tabakaları içinden geçerken deprem yer hareketi yayılım özelliklerinin değişmesi yanında, bu dalgalar, tabakalarını özelliklerini de etkilemektedir.

Sismik Dalgaların zemin içerisinde yayılımına bağlı zemin ile etkileşimi farklı olacaktır. Bir depremin şiddet dağılım özellikleri homojen olan ortamlarda küresel dağılım göstermesi gerekirken, bölgenin jeolojisinin hem fiziksel hemde yapısal olarak çok farklılıklara sahip olması nedeni ile, oluşan sismik dalgalar gelişgüzel dağılım göstererek farklı yerlerde farklı enerjinin açığa çıkmasına neden olacaktır. Açığa çıkan enerjideki bu farklılık farklı yerlerde farklı hasarların oluşmasına sebep olacaktır. Marmara Depreminde bu durum gözlenmiştir. (A.KEÇELİ 1999)

EK-5. ÇALIŞMA ALANI DOĞAL TİTREŞİM PERİYODU (T₀) HARİTASI

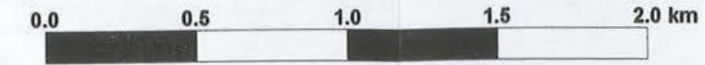
283303, 4408022

290632, 4408011



283293, 4404596

290621, 4404606



ACIKLAMALAR

ÖZNİTELİK

- scpt
- ~ Nehir
- mahalle_siniri

JEOLJİK BİRİM

- eski_aluvyon
- kaya_birimi

DOĞAL TİTREŞİM PERİYODU, T(s)

■ dtp_T_02	■ dtp_T_03	■ dtp_T_040	■ dtp_T_05
■ dtp_T_022	■ dtp_T_032	■ dtp_T_042	■ dtp_T_052
■ dtp_T_024	■ dtp_T_034	■ dtp_T_044	■ dtp_T_054
■ dtp_T_026	■ dtp_T_036	■ dtp_T_046	■ dtp_T_056
■ dtp_T_028	■ dtp_T_038	■ dtp_T_048	■ dtp_T_058