

39298

İSTANBUL TEKNİK ÜNİVERSİTESİ ★ FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

GEOTEKNİK ÖZELLİKLERİN BELİRLENMESİNDE

SİSMİK VE PENETRASYON DENEYLERİNİN KARŞILAŞTIRILMASI

DOKTORA TEZİ

39298

Y. Müh. Recep İYİSAN

Tezin Enstitüye Verildiği Tarih : 6 Eylül 1994

Tezin Savunulduğu Tarih : 21 Kasım 1994

Tez Danışmanı : Prof. Dr. Atilla M. ANSAL

Diğer Jüri Üyeleri : Prof. Dr. Turan DURGUNOĞLU

: Prof. Dr. Haluk EYİDOĞAN

KASIM 1994

ÖNSÖZ

Zemin tabakalarının davranış özellikleri, deprem gibi dinamik yükler altında meydana gelebilecek yapısal hasara etki eden önemli faktörlerden birisi olmaktadır. Bu yüzden zemin yapı ilişkisinin incelenmesinde veya depreme dayanıklı yapı tasarımıyla ilgili derinliğe kadar zemin tabakalarının dinamik davranış özelliklerinin bilinmesi gerekmektedir.

Dinamik özellikler laboratuvar ve arazide yapılan deneyler yardımı ile belirlenebilmektedir. Karşıt Kuyu ve Aşağı Kuyu gibi sismik deney yöntemleri, arazide doğal koşullarda uygulanabilmekte ve bu deneylerden elde edilen sonuçlar daha geniş bölge için kullanılabilir.

Geoteknik incelemelerde zemin özelliklerini yerinde belirlemek için geliştirilmiş arazi penetrasyon deneylerinin yaygın olarak kullanılmasının yanında, dinamik özelliklerin belirlenmesinde arazi sismik deneylerinin kullanımı ülkemizde oldukça sınırlı kalmakta çoğu zaman da hiç uygulanmamaktadır. Oysaki bu yöntemler, gerek laboratuvar gerekse diğer arazi deney yöntemleri ile karşılaştırıldığında önemli üstünlüklere sahiptirler.

Yapılan bu çalışmanın, geoteknik inceleme ve araştırmalarında arazi sismik deneylerinin kullanılması yolunda katkıda bulunacağına inancım sonsuzdur.

Bu çalışmanın gerçekleştirilmesinde her türlü desteği veren, değerli bilgi ve tecrübelerinden yararlandığım sayın hocam Prof. Dr. Atilla ANSAL'a teşekkürü bir borç bilirim.

13 Mart 1992 Erzincan depreminden sonra bölgede geoteknik inceleme ve araştırma konusunda geniş olanaklar sağlayan İ.T.Ü. Yapı ve Deprem Uygulama Araştırma Merkezi müdürü sayın hocam Prof. Dr. Remzi ÜLKER'e içten teşekkürlerimi sunarım.

Çalışmalarım süresince gerektiğinde yardımlarını esirgemeyen, mensubu bulunduğum Geoteknik Anabilim Dalı öğretim üyesi ve araştırma görevlilerine teşekkür ederim.

Bu çalışma kapsamında, tüm arazi deneylerinin uygulanması sırasında daima yardımcı olan ve büyük bir titizlikle gerekli şekilleri çizen sayın Semih VİÇ'e, çalışmalarım sırasında beni sabır ve anlayışla karşılayıp, her türlü desteği veren sevgili eşim, ailem ve yakın arkadaşlarıma da içten teşekkürlerimi sunarım.

İÇİNDEKİLER

ÖZET	vi
SUMMARY	vii
BÖLÜM 1. GİRİŞ	1
1.1. Sismik Yöntemlerin Üstünlükleri	4
1.2. Amaç ve Kapsam	5
BÖLÜM 2. SİSMİK DALGA YAYILIMI	8
2.1. Sismik Dalga Tipleri	8
2.2. Sismik Dalga Hızları	11
2.3. Sismik Deneylerden Bulunan Zemin Özellikleri	15
2.4. Deformasyon Genlikleri ve Hızları	15
2.5. Sismik Dalgalarda Sönüm Olayı	17
BÖLÜM 3. ARAZİ SİSMİK YÖNTEMLERİ ÜZERİNDE YAPILAN ÖNCEKİ ÇALIŞMALAR	22
3.1. Giriş	22
3.2. Arazi Sismik Yöntemleri	23
3.2.1. Düşük Genlikli Deformasyon Yöntemleri	23
3.2.1.1. Kuyu İçi Sismik Yöntemler	23
3.2.1.2. Yüzey Sismik Yöntemleri	29
3.2.2. Yüksek Genlikli Deformasyon Yöntemleri	33
3.3. Karşıt Kuyu ve Aşağı Kuyu Sismik Yöntemleri	33
3.3.1. Karşıt Kuyu Sismik Yöntemi	36
3.3.1.1. Karşıt Kuyu Kaynakları	36
3.3.1.2. Arazi İşlemleri	37
3.3.1.3. Alınan Kayıtların Analizi	40
3.3.2. Aşağı Kuyu Sismik Yöntemi	47
3.3.2.1. Aşağı Kuyu Kaynakları	48
3.3.2.2. Arazi İşlemleri	48
3.3.2.3. Alınan Kayıtların Analizi	49
3.3.4. Alıcılar	53
3.3.5. Kuyular	55
3.4. Karşıt Kuyu ve Aşağı Kuyu Sismik Yöntemlerinin Karşılaştırılması	56
3.5. Arazi Sönüm Ölçümleri	57
3.5.1. Analiz Yöntemleri	59

BÖLÜM 4. KULLANILAN SİSMİK DENEY SİSTEMİ	64
4.1. Giriş	64
4.2. Yüzey Sismik Deney Düzeni	65
4.2.1. Kayıt Sistemi	65
4.2.2. Dalga Kaynağı	70
4.3. Aşağı Kuyu Sismik Deney Düzeni	73
4.3.1. Alıcılar	76
4.3.2. Basınç Sistemi	76
4.4. Karşıt Kuyu Sismik Deney Düzeni	78
4.4.1. Dalga Kaynağı	78
BÖLÜM 5. DENEYSEL ÇALIŞMALAR (ARAZİ UYGULAMALARI)	84
5.1. Giriş	84
5.2. Kampüs Deneyleri	86
5.2.1 Yüzey Kırılma Deneyleri	87
5.2.2. Aşağı Kuyu Deneyleri	92
5.2.2.1. Kayıtların Analizi	95
5.2.2.2. Aşağı Kuyu Deney Sonuçları	96
5.3. Arazi Sönüm Ölçümleri	108
5.4. Laboratuvar Deneyleri	111
5.4.1. Ultrases Deneyleri	113
5.4.2. Rezonans Frekans Deneyleri	114
5.4.3. Deney Sonuçlarının Değerlendirmesi	117
5.5. Marmara Ereğlisi Arazi Deneyleri	119
5.5.1 Karşıt Kuyu Deneyleri	119
5.5.2. Aşağı Kuyu Deneyleri	126
5.5.3. Yüzey Sismik Deneyleri	133
5.5.4. Sonuçlar	140
BÖLÜM 6. ERZİNCAN DENEYLERİ VE ARAZİ ÖLÇÜMLERİNE DAYANAN KORELASYONLAR	143
6.1. Giriş	143
6.2. Arazi Korelasyonlarına Etkiyen Ana Değişkenler	147
6.2.1. Penetrasyon Dirençleri	147
6.2.1.1. Standart Penetrasyon Deneyi (SPT)	147
6.2.1.2. Koni Penetrasyon Deneyi (CPT)	151
6.2.2. Efektif Gerilme	151
6.3. Arazi Korelasyonlarına Etkiyen İkincil Değişkenler	152
6.3.1. Zemin Tipi	152
6.3.2. Jeolojik Yaş	152
6.4. Önceki Arazi Korelasyonları	153
6.5. Erzincan'da Uygulanan Arazi Deneyleri	162
6.5.1. Bölgenin Tektoniği ve Yerel Zemin Koşulları	162
6.5.2. Standart Penetrasyon Deneyleri (SPT)	163
6.5.3. Koni Penetrasyon Deneyleri (CPT)	166
6.5.4. Dinamik Sonda Deneyi (DS)	168
6.5.5. Arazi Sismik Deneyleri	170

6.6. Arazi Penetrasyon Deneyleri ve Sismik Dalga Hızları	191
6.6.1. SPT-N Darbe Sayısı ve Sismik Dalga Hızları	192
6.6.1.1. Düzeltilmemiş SPT-N Değerleri	193
6.6.1.2. Düzeltilmiş SPT-N Değerleri	199
6.6.2. CPT q_c Uç Mukavemeti-Sismik Dalga Hızları	206
6.6.3. Dinamik Sonda Deneyi-Sismik Dalga Hızları	212
6.6.4. Derinlik- V_s İlişkisi	214
6.7. Penetrasyon Dirençleri Arasındaki İlişkiler	216
6.7.1. CPT ve SPT Deneyleri	216
6.7.2. CPT ve DS Deneyleri	217
6.7.3. SPT ve DS Deneyleri	220
6.8. Sonuçlar	220
BÖLÜM 7. SONUÇLAR VE ÖNERİLER	224
KAYNAKLAR	242
ÖZGEÇMİŞ	254



ÖZET

Geoteknik Mühendisliğinde zemin kesitinde yer alan tabakaların mühendislik özellikleri laboratuvar ve arazide yapılan deneyler yardımı ile belirlenebilmektedir. Laboratuvar yöntemleri elastik ve elastik olmayan davranışların incelenmesinde ve gerilme, boşluk oranı, malzeme sönümü ve deformasyon ilişkilerinin incelenmesinde parametrik çalışmalar yapılmasına imkan tanımaktadır. Ancak bu deneylerde elde edilen sonuçlar kullanılan zemin numunelerinin özelliklerine bağlı kalmaktadır. Zemin numuneleri ise örselenmenin etkisindedir ve alındıkları tabakanın küçük bir bölgesini temsil etmektedir. İlgilenilen derinlik boyunca tabaka özelliklerinin belirlenmesinde çok sayıda deney numunesine gerek duyulmaktadır.

Zemin dinamik özelliklerinin yerinde yapılan deneyler ile bulunmasına olanak sağlayan Karşıt Kuyu ve Aşağı Kuyu gibi sismik yöntemler doğal koşullarda arazi parçasının daha geniş bölümünde uygulanabilmekte ve sonuçları tüm tabaka için geçerli olmaktadır. Yapay olarak üretilen sismik dalgaların belli mesafelerde gözlenmesini içeren bu yöntemler ile ölçülen hızlara bağlı olarak zemin özellikleri kolayca bulunabilmektedir. Diğer arazi deneyleri ve laboratuvar yöntemleri ile karşılaştırıldığında bu deney teknikleri önemli üstünlüklere sahiptir.

Arazide dinamik zemin özelliklerinin sismik yöntemler yardımı ile belirlenmesi amacıyla Karşıt Kuyu ve Aşağı Kuyu sismik deney sisteminin kurulması, kurulan bu sistem ile seçilen çeşitli sahalarda arazi uygulamalarının gerçekleştirilmesi ve ölçülen sismik dalga hızlarının, arazi penetrasyon deneyleri ile ilişkisi incelenip aralarında korelasyon bağıntılarının geliştirilmesi bu çalışmanın amacını teşkil etmektedir. Bu amaç doğrultusunda, oluşturulan bilgisayar destekli sismik deney düzeni ile üç ayrı sahada arazi uygulamaları yapılmış ve zemin kesitinde yer alan tabakaların hız profilleri elde edilmiştir. Bu sonuçlar, sondajlarda alınan numuneler üzerinde yapılan sonuçları ile karşılaştırılmıştır. Ayrıca zeminler için önemli bir özellik olan sönüm ölçümleri de gerçekleştirilmiştir.

Sismik dalga hızları ile arazi penetrasyon deneyleri arasındaki ilişki incelenirken, SPT-N darbe sayısı, CPT-q_c uç mukavemeti ve Dinamik sonda darbe sayısı değişken olarak alınmıştır. SPT-N sayılarının derinlik düzeltilmesi yapılmış değerleri de bir değişken olarak alınmış ve pratik amaçlar için belli bir güvenlik içinde kullanılabilir amprik bağıntılar çıkarılmıştır. Bu incelemelerde zemin tipi, derinlik ve efektif düşey gerilmenin etkisi de incelenmiş, kayma ve basınç dalgası hızını bu değişkenler cinsinden tahmin için çeşitli bağıntılar sunulmuştur. Arazide uygulanan SPT, CPT ve DS deney sonuçları arasında da korelasyon bağıntıları geliştirilmiştir.

THE COMPARISON OF IN-SITU SEISMIC AND PENETRATION TEST FOR THE DETERMINATION OF GEOTECHNICAL PROPERTIES

SUMMARY

In-situ testing methods involving seismic velocity measurements of wave propagation which is generated from an artificial source are widely used for determining the dynamic soil properties. Like most engineering materials, soils also behave elastically at very small strain levels. The threshold strain level where soils behave as an elastic material is about 10⁻³ percent. The seismic waves generated below this threshold strain level propagate with characteristics depending on physical properties of medium such as density, elastic moduli and material damping. As a result, observation and interpretation of seismic waves may contain very relevant information about the soil properties. Shear and constrained moduli, for example, are directly related to shear and compression wave velocities, respectively.

Seismic methods simply consist of measuring the time required for the waves generated from a source to travel given distances. Once the travel time and distances monitoring waves have been measured, wave velocities can be calculated by dividing distance of travel by travel time. If wave velocities are known, other elastic constants can be determined from following equations;

$$\text{Shear Modulus} \quad : G = (\gamma/g) V_s^2 \quad (1)$$

$$\text{Constrained Modulus} \quad : M = (\gamma/g) V_p^2 \quad (2)$$

$$\text{Poisson's Ratio} \quad : \mu = [0.5(V_p/V_s)^2 - 1] / [(V_p/V_s)^2 - 1] \quad (3)$$

$$\text{Young's Modulus} \quad : E = 2G(1 + \mu) \quad (4)$$

Where V_s is shear wave velocity, V_p is compression wave velocity, γ is total unit weight and g is gravitational acceleration.

Shear modulus and its variation with shearing strain amplitude is a very important parameter to evaluate the response of soil and soil structures during dynamic loading. Other important dynamic soil properties include material damping and Poisson's Ratio. When a disturbance is initiated in any kind of medium, a stress wave field generated and this field contains both body waves and surface waves. Body waves propagate through the body of the soil as either compression (P) or shear (S) waves while surface waves propagate along the surface of the soil as either Rayleigh (R) or Love wave. The direction of particle motion relative to the direction of wave propagation defines the real seismic wave type. P-wave propagates in the direction of particle motion while S-wave propagates perpendicular to the direction of particle motion. If shear wave particle motion confined to a vertical or horizontal plane, it is referred to

vertically polarized shear wave (SV) or horizontally polarized shear wave (SH), respectively.

Techniques of initiating seismic waves and extracting viable information about the medium is called seismic methods in geotechnical engineering. Seismic wave measurement methods such as surface reflection and refraction have been used by geophysicists for the exploration of deposits or the depth of bedrock by measuring P-wave velocity. More recently, the surface refraction technique has been used to measure shear and compression wave velocities to determine dynamic soil properties. Although wave travel times generally are measures of distances up to hundreds of meters, when using these methods, the soil layers between bedrock and surface are considered to be little importance of a few layers with constant properties. However, when it is thought that the most civil engineering problems occur within depth of 30 meters below the surface, seismic reflection and refraction methods are difficult to apply directly to civil engineering problems. Consequently, seismic methods have been developed with which detailed soil profile characteristics can be obtain at shallow depths for engineering purposes.

The requirement of more detailed dynamic soil properties necessitates the use of short distance between seismic energy source and receivers, and also the generation of identifiable waves. Among the various seismic methods used for engineering application, the Cross-Hole and Down-Hole seismic methods are most widely used and most reliable for determining dynamic soil properties, like initial elastic moduli at small strain levels.

Dynamic soil properties are determined from soil samples using laboratory testing methods such as cyclic triaxial and sample shear, and resonant column or in-situ seismic testing techniques such as Cross-Hole and Down-Hole methods performed on natural conditions. Besides of laboratory methods having some advantages for performing parametric studies on the elastic and inelastic properties of soils, these methods are influenced from sample disturbance, stress relief and simulating field stress conditions in the laboratory. The results of laboratory test represent only the limited region of soil layer from which soil sample obtained. In comparison with laboratory and other in-situ tests, seismic velocity measurement methods have distinct advantages. i) They can be performed to represent larger zones of soils. ii) They have a strong theoretical basis, based on elasticity theory. iii) Measured wave velocities are independent of equipment used, so no need any correction factor. iv) Initial field stress conditions and anisotropy are automatically incorporated. v) Large zones of soil which represent the macroscopic nature of the site can be sampled. In-situ seismic methods continue to play an important role to play in geotechnical engineering, especially when dealing with low deformational characteristics of soil.

Seismic wave velocity measurements are performed initially by generating waves at one point in or on the soil and measuring the required time for the direct waves of concern to travel to one or more receiver points. Wave velocity can be calculated from the distance between wave source and receiver, and travel time. In application, seismic methods are divided into two groups according to the geometrical configuration of the source and receivers just like surface and borehole seismic methods. In surface wave methods, source and receivers are on the soil surface, and having

economic advantage in comparison with borehole methods, because no boreholes are necessary. The steady-state Rayleigh wave method and spectral analysis-of surface-waves (SASW) methods are known as surface methods.

Borehole seismic methods are typically grouped again according to the geometrical arrangement of source and receivers, such as Cross-Hole, Down-Hole, Up-Hole, In-Hole and Bottom-Hole methods. In this study, the Cross-Hole and Down-Hole seismic methods are the only borehole methods considered.

In the Cross-Hole method, the time for seismic wave to travel horizontally from a source in a borehole to one or more receivers at the same depth as the receivers in other boreholes is measured. With Down-Hole method, the time for waves to travel almost vertically from a source on the surface to one or more receivers at different depths in a single borehole is measured.

This study is concerned with the determination of dynamic soil properties based on the in-situ testing techniques such as Cross-Hole and Down-Hole seismic wave velocity measuring. These kind of in-situ measurements have two basic aspects. The first aspect is involved with the technique of testing at the site and obtaining the necessary data. The second one is the analytical interpretation of field data to evaluate the soil properties of concern. Initially, for the Cross-Hole methods, boreholes with spacing in the order of 3-5 m are drilled and cased with plastic casing material to the desired depth. Logging is important for each borehole during drilling to determine soil type and layering. Borehole diameters should be as small as feasible to minimize factors affecting the results of measurement such as disturbance. Typical borehole diameters range from 7 to 15 cm. The Cross-Hole and Down-Hole seismic testing system used in implementation in this study at different sites in various soil condition consists of a source to generate seismic wave, receiver with proper coupling and frequency response and a 12-channel recording device. The source used in Cross-Hole method to generate identifiable seismic wave is a mechanical source, borehole shear wave hammer, which is repeatable, reversible and rich in creating of shear wave. This hammer which is developed to be used for Cross-Hole testing in this study can be coupled to the borehole wall by hydraulically expandable plates. These plates are pressed towards to borehole wall so that a falling weight can be hit the baseplate from top and bottom. Thus, shear wave can be produced in direction perpendicular to the borehole axis.

Three component velocity transducers (borehole geophones) which are housed in one case and oriented to direction of one vertical and two horizontal have been used as receivers in both Cross-Hole and Down-Hole measurements in this study. The natural frequency of the receivers is 28 Hz. With borehole wall pressing system the geophones can be fixed at optional of borehole by expanding packer tube by means of air pressure.

Two types of seismographs, analog and digital, had been used as recording system during case studies. At first in-situ applications for seismic wave velocity measurement had been performed by using surface refraction method at the location field of Istanbul Technical University Campus, Ayazağa, with the analog seismographs used for recording waveform. This

device has 12 channels and waveform are recorded directly on special recording paper which is sensitive to the sun-light, and Xenon flash is used for timing. It is difficult to utilize seismic measurement using this analog seismograph because its triggering system does not automatically and simultaneously operate with the impulse given for generation wave. In this tests, a steel plate on the soil surface and a vertical impulse with the help of a sledge hammer had been utilized for the wave source. A transducer was mounted on this plate for the triggering system of seismograph. Immediately before the impulse activates, the seismograph is operated by driving the record paper at a selected sweep rate, and waveform is recorded. But the triggering system of multichannel digital seismograph starts the recording automatically, device as soon as impulse activates. Enhancement of signal to noise ratio is accomplished by its signal enhancement and digital stacking function. There are some advantages of using this type of instrument. Lower energy impacts can be used to generate the seismic wave, and survey can be performed for much greater distances using mechanical source. By utilizing signal enhancement unit, the impact for generating the wave can be repeated a number of times, so eliminating the errors present in timing a single impulse and effects of undesirable noise in waveform traces. Continuous confirmation feasible with waveform data can be stored in its memory and waveform can be displayed on the screen and printed on the special recording paper in variable modes. Obtained data is recordable in the computer by means of RS-232 data transmission. The data are transferred to the computer from the seismograph by a transfer computer code written for this study. This computer code can also be used to analyze the signal records for determining the first arrival time.

Signal analysis of seismic waveform basically involves the determination of direct travel times for compression and shear waves by identifying characteristic point from the traces. The time between this characteristic point and zero time determined by the triggering system equals to direct travel time. If first arrivals of certain wave type at more than one point from the source are known then interval time or interval velocity can be calculated. The initial compression wave arrival at each trace is identified as the first excursion, while initial shear wave arrival is identified as the first high amplitude excursion.

The Cross-Hole and Down-hole seismic methods set up for this study had been widely used for measuring shear and compression wave velocities at different sites. In the tests performed at the Campus of Technical University, three boreholes had been drilled, cased and grouted. Shear and compression wave velocity profiles had been determined and initial shear modulus (G_{max}) and Poisson's Ratio calculated from these seismic wave values, including in-situ material damping ratio. Besides of in-situ measurements, laboratory tests of ultrasound and resonant frequency were performed on soil samples obtained from the boreholes. Determination of low amplitude material damping ratio is an important field measurement. Seismic wave amplitudes decay due to both geometrical damping and material damping while propagating within the soil. For geotechnical engineering applications material damping is expressed in terms of the damping ratio as the following relation;

$$D = [\ln(A_1 R_1 / A_2 R_2)] / \{ (2\pi t_1 / T)^2 + [\ln(A_1 R_1 / A_2 R_2)]^2 \}^{0.5} \quad (4)$$

Where D is damping ratio, A_1 and A_2 are the amplitudes of same characteristic points on waveform at distances R_1 and R_2 from the wave source, t_1 is the interval time between R_1 and R_2 , T is the period of the wave. In order to determine the damping ratio by using this equation, it is necessary to measure the wave amplitudes at least at two receiver points from the same source. For damping measurements performed at the campus site, frequency of receivers and the coupling of two receivers are the same so that receiver output is not affected. The time domain wave amplitudes in the field were measured by using Down-Hole seismic tests. Wave amplitudes generated from the same source impulse were simultaneously observed at two receivers in the same borehole. The equipments used in damping measurements consist of a source, receivers and a recording device, as in wave velocity measurements. The damping ratio were also measured on soil samples in the laboratory by resonant frequency test. In comparison of field and laboratory measurements, it is noticed that the results of each measurement are different due to the soil sample disturbance, nonrepresentative samples and inabilities in reproducing in-situ stress conditions.

After March 13, 1992 Erzincan earthquake, a detailed site investigation were carried out utilizing Standard Penetration Test (SPT), Cone Penetration Test (CPT), Dynamic Penetration Test (DPT). For determining the dynamic soil properties Down-Hole and Cross-Hole seismic wave velocity measurements techniques were carried out in cased and grouted ten boreholes.

Erzincan is located on a deep alluvial deposit layer formed with debris materials transported from the Fırat River and mountains around. The North Anatolian Fault zone is north of the Erzincan basin. The basin is filled mostly with silts, sands and gravels. Borehole data indicate sand and gravel series with small amount of silt and clay, and the layers are not continuous between different boreholes. The soil profile consists of alternating layers of silty sands, sandy gravels, gravelly sands and in some locations silty sandy clays. A dense, partly cemented gravel layer at depths of 4-5 m at the north and at depths 15-20 m at the south part of Erzincan had been observed.

According to the results of various in-situ tests performed in Erzincan, the seismic wave velocities variation with SPT-N value, CPT q_c tip resistance and dynamic penetration test results were studied and some correlations were obtained. The SPT-N values that are greater than 120 and less than 1 were not taken into account but, on the other hand, SPT-N values for all kinds of soils were included in the regression analysis both without any correction and with depth-corrected value. A correlation with high regression coefficient between SPT-N and shear wave velocity were obtained. In comparison with the previous studies, the correlations obtained in this study rather overestimate shear wave velocity values for SPT-N greater than 20. This difference is most likely due to the variation in SPT techniques incorporated and gravelly nature of soil layers. The correlation between shear wave and depth-corrected SPT-N value, (N_1), had been found to be lower than the between shear wave and SPT-N. On the other hand, when the effective overburden stress was taken into account, the correlation between shear wave and depth-corrected SPT-N became higher.

Other parameters, in addition to those described herein, were thought to influence shear wave velocity correlations. These parameters include soil type, mean grain size, (D_{50}), effective overburden stress and depth. The variation of shear wave velocity with SPT-N, overburden stress and soil type had also been studied. The soil type was divided into three groups named as clay, sand and gravel. The results of the analysis gave the highest correlation coefficient for clay while the lowest coefficient was obtained in gravel. Besides of differences in correlation coefficients, for the same SPT-N value and vertical effective stress generally the same shear wave velocity had been evaluated from the correlations for all soil types, clays and sands.

In the correlation analysis, mean grain size (D_{50}) were also be taken as an input variable and it was found that as D_{50} values became higher, greater shear wave velocity were observed. So it can be said that as the grain size increases, the calculated shear wave velocity become larger. This fact is justified by higher shear wave velocity values obtained from gravels. When vertical effective stress was taken into account, the coefficient of correlation between shear wave and D_{50} found higher than the other.

The variation of shear wave velocity with CPT- q_c tip resistance and Dynamic Penetration Test (DPT) blow account had also been studied and some correlation equations were established. Since q_c values are measured with depth at interval of few centimeters, the average of q_c values were used in the obtaining correlation between shear wave velocity and CPT q_c tip resistance. Both linear and nonlinear regression analyses were performed on the data set obtained for all kind of soil types. The coefficient of correlation between shear wave velocity and q_c tip resistance was found to be improved when effective overburden stress were utilized, as in correlation between shear wave velocity and SPT-N value. The correlations equations and coefficients obtained for shear and compression wave velocities in terms of selected variables are summarized in Table 1.

Also the correlation compression wave velocity and mentioned variables was studied and it was found that compression wave has lower correlations than the shear wave. The results of the correlation analysis made between equations and coefficients compression wave velocity and other variables are given in Table 2.

Another correlations considered in this study the correlations among in-situ penetration tests such as SPT, CPT and Dynamic Penetration Test performed in Erzincan during field investigation. Possible correlations among penetration resistances of these tests were examined. The correlations between SPT-DPT, CPT-DPT and CPT-SPT were found to be noticeable. The highest correlation was obtained between SPT and DPT tests results. The correlation equations and coefficients for In-situ tests are shown in Table 3.

Correlations used to estimate seismic velocity should not be thought of as a substitute for in-situ seismic measurements. However, these correlation equations can be useful to justify the measured values of wave velocity or to use in conjunction with a seismic testing program under certain controlled field condition.

Table 1. Correlation Equations and Coefficients Obtained in This Study for Shear Wave Velocity (V_s)

Variable(s)	Soil Type	Correlation Equation for V_s (m/sn)	Correlation Coefficient (%)
N	All	$51.5N^{0.516}$	81
σ_v	All	$115.8\sigma_v^{0.367}$	72
N and σ_v	All	$61N^{0.267}\sigma_v^{0.283}$	83
	Clay	$43.7N^{0.324}\sigma_v^{0.270}$	90
	Sand	$54N^{0.332}\sigma_v^{0.221}$	64
	Gravel	$205.7N^{0.074}\sigma_v^{0.177}$	53
D_{50}	Sand	$4082D_{50}^{0.247}$	54
D_{50} and σ_v	Sand	$116.6\sigma_v^{0.409}D_{50}^{0.289}$	78
N_1	All	$71.2N_1^{0.516}$	56
N_1 and σ_v	All	$47.1N_1^{0.272}\sigma_v^{0.395}$	56
q_c	Clay and Sand	$55.3q_c^{0.377}$	80
		$0.70q_c+218$	75
q_c and σ_v	All	$47q_c^{0.212}\sigma_v^{0.461}$	82
N_{10}	All	$86.4N_{10}^{0.377}$	71
H		$79.8H^{0.675}$	85
N and H	All	$72N^{0.267}H^{0.283}$	82

In these tables, V_s is shear wave velocity in m/sn unit, N is the Standard Penetration Test blow count (SPT-N), σ_v is effective overburden stress in t/m² unit, D_{50} is average grain size in mm unit, N_1 is depth-corrected SPT-N value, q_c is Cone Penetration Test tip resistance in kg/cm², N_{10} is the Dynamic Penetration Test blow count for 10 cm penetration, and H is depth in m unit.

Table 2. Correlation Equations and Coefficients Established in this Study for Compression Wave Velocity (V_p)

Variable(s)	Soil Type	Correlation Equation for V_p (m/sn)	Correlation Coefficient (%)
N	All	$154N^{0.488}$	72
σ_v	All	$275.6\sigma_v^{0.409}$	63
N and σ_v	All	$186.3N^{0.179}\sigma_v^{0.329}$	68
N_1	All	$192.3N_1^{0.441}$	55
N_1 and σ_v	All	$164.8N_1^{0.164}\sigma_v^{0.406}$	67
q_c	Clay and Sand	$246.4q_c^{0.182}$	57
		$0.74q_c+473.6$	56

In table V_p indicates to compression wave velocity in m/sn unit, and others are the same as in in Table 1.

Table 3. The Correlation Equations and Coefficients For In-situ Tests.

In-situ Testing	Correlation Equations	Correlation Coefficient (%)
CPT- q_c SPT-N	$q_c=7.3 N^{0.603}$	54
CPT- q_c DS- N_{10}	$q_c=6.7 N_{10}^{0.658}$	66
SPT-N DS- N_{10}	$N=2.4 N_{10}^{0.597}$	84

BÖLÜM 1

GİRİŞ

İnşaat Mühendisliğinde zeminler, hem yapı malzemesi olarak hem de her türlü mühendislik yapılarının temellerini taşıyan elemanlar olarak çeşitli statik ve dinamik yüklerin etkisinde kalmaktadırlar. Gerek statik gerekse dinamik yükler altında zemin ile ilgili problemlerin çözülmesinde, dış yükler etkisinde zemin davranışını tanımlayan gerilme-şekil değiştirme özelliklerinin bilinmesi gerekmektedir. Dış yüklemeler sırasında sergilenen davranışlar, oluşan deformasyon seviyelerine bağlı olarak ortaya çıkmakta, elastik ve plastik olabilmektedir. Deprem, titreşimli makine temelleri, dalga yükleri gibi dinamik yükler altında zemin tabakalarının ve zemin yapılarının davranışını hesaplayabilmek için, gerilme-şekil değiştirme davranışını belirleyen kayma modülü ile onun deformasyonla değişimi, sönüm oranı ve poisson oranı gibi zemin dinamik özelliklerinin bilinmesi gerekmektedir.

Hızlı şehirleşmenin sonucu olarak ortaya çıkan yüksek katlı yapılarda, yeni yapılaşmaya açılacak deprem riski taşıyan alanlarda, depreme dayanıklı bina tasarımında zemin-yapı ilişkisini incelemekte zemin tabakalarının dinamik özelliklerinin yeterli derinliğe kadar daha detaylı olarak belirlenmesi gerekmektedir. Ayrıca yerleşim bölgelerinde demiryolu ve otoyol gibi dinamik yüklerden geçici olarak etkilenen yapıların inşaaı, olması muhtemel titreşimlerin ve zemin yapılarının dinamik davranışını içeren problemlerin çözümü mühendislik açısından da yine zeminlerin dinamik özelliklerinin belirlenmesini gerektirir. Depremler sırasında meydana gelebilecek yapısal hasara etki eden önemli faktörlerden birisi de zemin kesitinde yer alan tabakaların davranışı ve yerel zemin koşulları olmaktadır. Deprem özelliklerine göre zemin tabakalarının davranışı da farklı olmakta sönümlendirici etkisinin yanında, deprem kuvvetlerini arttırıcı rol de oynamaktadır. Bu yüzden depreme dayanıklı yapı projelerinde, üst yapıda olduğu gibi temel zemininde de dinamik özelliklerin doğru seçilmesi ve mümkün ise yerinde yapılan deneylerden

saptanması önemli olmaktadır. Mühendislikte depremler sırasında yapı-zemin ilişkisi gibi dinamik problemleri incelemek ve model etmek için geliştirilen analiz yöntemlerinin ve bilgisayar programlarının başarılı bir şekilde uygulanmasında da yine ilgili derinliğe kadar zemin özelliklerinin daha detaylı bilinmesi gerekmektedir. Dinamik yükler altında zemin davranışını hesaplamada, emniyetli ve ekonomik projelendirmeler için bu özelliklerin doğru değerleri ile çalışılması gereği açıktır.

Zemin dinamik özellikleri laboratuvar ve arazide yapılan deneyler ile belirlenmektedir. Bu deney tekniklerinin birbirlerine göre bazı üstünlükleri olduğu gibi sınırlayıcı yanları da bulunmaktadır. Zemin numuneleri üzerinde yapılan laboratuvar deneylerinden elde edilen sonuçlar, örselenme ve arazi şartlarının bu deneylerde tekrar yaratılma zorluklarından etkilenmektedir. Diğer yandan deney numuneleri alındıkları tabakaların çok küçük bir bölgesini temsil etmeleri nedeni ile bulunan özellikler tüm tabaka için geçerli olmayabilir. Bu yüzden zemin tabakalarının özelliklerini daha gerçekçi olarak belirleyebilmek için laboratuvar deneylerine ek olarak arazi deneylerinin yapılması ve sonuçlarının birlikte kullanılması tercih edilmektedir. Arazi yöntemlerinde, doğal koşullarda deney yapabilme imkanı olduğundan ve ilgilenilen arazi parçasının daha geniş bölümünde uygulandığından bulgular da daha geniş alanda kullanılabilmektedir. Dinamik zemin özelliklerini bulmada kullanılan ve "sismik yöntemler" olarak bilinen bu deney teknikleri düşük deformasyon genliklerinde elastik dalga üretilmesini ve dalga hızlarının bulunmasını içermektedir.

Mühendislik malzemelerinin davranışı, etkisinde kaldığı deformasyon seviyeleri ile bağımlıdır. Deformasyonun ilerleyen seviyelerinde malzemede plastik şekil değiştirmeler oluşurken belli bir sınırın altında ise yük etkisindeki davranışı tamamen elastik olmakta ve bu deformasyon seviyeleri düşük genlikli deformasyon olarak tanımlanmaktadır. Geoteknik Mühendisliğinin ana malzemesi olan zeminler için bu elastik sınır %0.001 olarak verilmektedir. Zeminlerde bu deformasyon genliklerinde bir kaynaktan açığa çıkarılan enerjinin neden olduğu sismik hareketlerin analizi, elastik ortamlar için geliştirilen matematiksel ifadelerle yapılabilmektedir. Herhangi bir ortam içinde yayılan dalga hızı ortamın elastisite modülü, Poisson oranı ve yoğunluk gibi fiziksel özelliklerine bağlı olduğundan, ölçülen sismik dalga hızları önemli bilgiler içermektedir.

Zemin davranışının deformasyon genliğinden bağımsız olduğu sınırlarda üretilen dalgaların tabaka içinde yayılma hızları bilinirse, zemin davranışını gösteren diğer özellikler de hesaplanabilmektedir. Düşük deformasyon genliklerinde yapılan bu tür ölçümlere sismik ölçümler adı verilmektedir.

Sismik ölçümler petrol mühendisleri, jeofizikçi ve sismologlar tarafından kendi mesleki amaçları doğrultusunda sıkça uygulanmıştır. Sismik kırılma ve yansıma deneyleri 1920'li yıllardan günümüze kadar çeşitli amaçlar için kullanılan ilk sismik arazi deney teknikleridir. Bu uygulamalarda kırılan ve yansıyan dalga hızı ölçümleri ile formasyonların jeolojik değişimlerinin saptanması, yeraltı kaynaklarının belirlenmesi esas amacı teşkil ediyordu. Bu tür ölçümlerde, bir kaynaktan üretilen dalganın varış zamanları ve genlikleri oldukça uzak mesafelerde ölçüldüğünden, çoğu zaman kilometrelerce derinlerde yer alan ana kaya ile yüzey arasında kalan zemin tabakaları, daha az önemli olarak ele alınmış ve ortalama sabit özelliklere sahip tabakalar gibi analiz edilmiştir.

İnşaat mühendisliğinde zemin ile ilgili bir çok problemin yüzeyden yaklaşık 30 m derinlikte olduğu düşünüldüğünde, bu tür sismik kırılma ve yansıma yöntemlerinin, yüzeye daha yakın kesimlerde yer alan zemin tabakalarının dinamik özelliklerinin yeterli hassaslıkta belirlenmesi için kullanılmasının çok uygun olmadığı sonucuna ulaşılmaktadır.

Dinamik yüklerde zemin davranışı ve zemin-yapı ilişkisini inceleyen hesap yöntemleri daha karmaşık ve daha duyarlı olduklarından, daha sığ derinlikte yer alan zemin tabakalarının hesaplarda kullanılacak özelliklerinin daha doğru ve gerçekçi tayin edilmesi gereği, kaynak ve alıcı arasındaki mesafenin daha kısa olması, tanımlanabilir dalga üretilmesini beraberinde getirmesi yeni yöntemlerin gelişmesine önderlik etmiştir. Sismik yöntemleri, dalga üreten kaynağın ve üretilen dalganın algılanmasında kullanılacak alıcının yerleşim konumuna göre kuyu içi ve yüzey yöntemleri olarak iki gruba ayırmak mümkün olmaktadır. Kuyu içi yöntemlerinden olan Karşıt Kuyu (Cross-Hole) ve Aşağı Kuyu (Down-Hole) sismik yöntemleri, inşaat mühendisliği uygulamalarında gerekli dinamik özelliklerin sağlanmasında kullanılan en uygun ve sonuçlarına en fazla güvenilen yöntemler olarak karşımıza çıkmaktadır.

1.1. SİSMİK YÖNTEMLERİN ÜSTÜNLÜKLERİ

Geoteknik mühendisliğinde zeminlerin dinamik özelliklerini belirlemek için kullanılan laboratuvar deney teknikleri arasında Rezonans Kolon, Dinamik Üçeksenli, Dinamik Basit Kesme, Sarsma Tablası sayılabilir. Zeminlerin elastik ve elastik olmayan davranışlarının bulunmasında ve çeşitli parametrik çalışmalarda bu yöntemlerin üstünlükleri vardır. Örneğin, gerilme, boşluk oranı, deformasyon, malzeme sönümü gibi ilişkiler bu çalışmalardan sağlanabilir. Ancak deneylerde kullanılan numunelerin boyutları, onların çeşitli faktörlerin etkisinde kalarak örselenme durumları ve sonuçlarının sınırlı kullanımı da eksik yanlarını işaret etmektedir.

Zemin profilinde yeralan tabakaların mühendislik özelliklerinin arazi deneyleri ile belirlenmesi, bir çok açıdan daha güvenilir sonuçların elde edilmesine imkan tanımaktadır. Sismik yöntemlerin üstünlüklerini, onları hem laboratuvar hemde diğer arazi deneyleri ile karşılaştırarak anlamak doğru bir yaklaşım olacaktır. Sondajlar sırasında gösterilen tüm özene rağmen alınan numunelerde bir örselenme olmaktadır. Ayrıca deney için hazırlanmaları sırasında da bir miktar örselenmeye maruz kalmaktadır. Sismik yöntemde ise zeminin örselenmemiş bölgelerinin test edilebilme imkanı vardır. Diğer yandan örselenme etkisinin ihmal edilebilir olduğu varsayılsa bile, laboratuvarda üzerinde deney yapılan numunelerin alındıkları tabakanın çok küçük bir parçasını temsil etmeleri nedeniyle, bu numuneler için bulunan özellikler tüm tabaka için geçerli olmayabilir. Sismik yöntemler mevcut tabakaların daha geniş bölgelerinde uygulandığından, bulunan değerler tabakanın tamamı için kullanılabilir. Bu yöntemlerde arazideki gerilme şartlarının tekrar yaratılma sorunuyla karşılaşmaz. Gerçek gerilme durumu ve anizotropi kendiliğinden sağlanır. Yapılan bu tür arazi çalışmaları, laboratuvar deney sonuçları ile birlikte değerlendirilerek zemin tabakaları için daha güvenli sonuçlara ulaşılmaktadır. Ayrıca arazi deney sonuçları kullanılarak laboratuvar deney numunelerinin örselenme mertebeleri hakkında bilgi edinilmekte ve bu numunelerin arazideki tabakaları ne ölçüde temsil ettiği belirlenebilmektedir.

Sismik yöntemler diğer arazi deneyleri ile karşılaştırıldığı zaman da önemli üstünlüklere sahiptir. Bu deneylerin uygulanmaları sırasında arazide meydana getirilen deformasyon seviyeleri, zeminler için kabul edilen

elastik sınırın altında kalmaktadır. Zeminler bu deformasyon genliklerinde elastik davranış gösterdiklerinden, ölçülen dalga hızlarından amaçlanan özellikler elastisite teorisi ile hesaplanabilmektedir. Bu yüzden güçlü bir teorik temele oturmaktadırlar. Diğer arazi deneylerinde olduğu gibi sadece küçük bir bölgede değil daha geniş kesimlerde uygulandığından, bulgular tüm tabaka için kullanılabilir. Ölçülen dalga hızları ortamın fiziksel özelliklerine bağlı olduğundan elde edilen değerler kullanılan aletten bağımsızdır ve bu yüzden herhangi bir düzeltme faktörüne gerek yoktur, amprik ifadelere bağımlı değildir. Ölçümler düşük deformasyon genliklerinde yapıldığından ve bu bölgede zemin davranışı deformasyondan bağımsız olduğundan, sismik deneylerde deformasyon genliği ve deformasyon hızı ihmal edilebilir. En önemli dinamik özellik olan kayma modülü de bu seviyelerde deformasyondan bağımsız olarak sabittir ve başlangıç değerine eşittir. Sismik yöntemlerle başlangıç modülünün bulunması, laboratuvarda elde edilen sonuçların yorumlanmasına anahtar teşkil etmektedir.

1.2. AMAÇ VE KAPSAM

Bu çalışmada zemin dinamik özelliklerinin düşük deformasyon seviyelerinde arazide yapılan sismik deneyler yardımı ile belirlenmeye çalışılmıştır. Bu amaçla İ.T.Ü. İnşaat Fakültesi Zemin Mekaniği Laboratuvarında ölçüm yapılabilecek sismik deney düzeni oluşturma çalışmalarına başlanılmıştır. Bir analog kaydedici (sismograf) ile yüzey alıcılarından oluşturulan ilk sismik deney düzeni kullanılarak sismik dalga hız ölçümleri yapılmıştır. Basınç (P) dalgası hızı ölçülen bu deneylerden sonra bir adet kuyu içi alıcısı (jeofon) ile Aşağı Kuyu yöntemi uygulamaları gerçekleştirilmiştir. Deney sistemine sonradan bir kuyu içi jeofonu ve bir dijital sismograf dahil edilerek sistem geliştirilip genişletilmiştir. Sinyal biriktirmeli, hafızalı, otomatik tetikleme sistemli ve 12 kanal olan dijital sismograf ile yapılan ölçümler, doğrudan termal yolla özel kağıtlara alınabildiği gibi alet bilgisayar destekli de kullanılabilmekte ve veriler bilgisayar ortamına aktarılabilmektedir. Veri aktarım işlemi, alınan kayıtların analizinde de kullanılmak amacı ile yazılan bir program ile sağlanmıştır. Arazi sismik deneyleri için kurulan bu sistem, çeşitli yörelerde zemin araştırma ve inceleme işlerinde kullanılmıştır. Bu çalışma kapsamında İ.T.Ü. Ayazağa Kampüsü, Marmara Ereğlisi ve Erzincan'da yapılan Yüzey Kırılma, Karşıt

Kuyu ve ağırlıklı olarak Aşağı Kuyu deneyleri ve sonuçları yer almaktadır. Ayrıca kampüs uygulamalarında Aşağı Kuyu yönetimi ile arazi sönüm ölçümleri de yapılmıştır.

Karşıt Kuyu ve Aşağı Kuyu sismik yöntemleri, mühendislik uygulamalarında zemin özelliklerini yerinde belirlemek için sonuçlarına en fazla güvenilen yöntemler olarak karşımıza çıkmaktadır. Bir noktasal kaynaktan üretilen sismik dalgaların, bilinen mesafelerde kaydedilmesi ve bu kayıtların analizi sonucunda kayma veya basınç dalga hızlarının belirlenmesi yöntemlerin temelini teşkil etmektedir. Bir ortam içinde yayılan sismik dalga tipleri ve sismik dalga hızlarından hesaplanabilen zemin özellikleri Bölüm 2'de verilmiştir.

Karşıt Kuyu ve Aşağı Kuyu sismik yöntemlerinin genel tanımları, arazi uygulamalarında yapılması gereken işlemler, kayıtların alınması ve alınan kayıtların analizi gibi konulara daha önceki çalışmaları da kapsayan Bölüm 3'de yer verilmiştir.

Bu çalışma kapsamında arazi uygulamalarında Yüzey Kırılma, Aşağı Kuyu ve Karşıt Kuyu olmak üzere üç ayrı sismik deney uygulanmıştır. Bir arazi sismik deneyinin uygulanabilmesi için deney sistemi içinde, dalga üretme kaynağı, üretilen dalgaları izlemek için uygun frekans davranışında alıcılar ve çok kanallı sürekli kayıt yapabilen, doğru zamanlamalı bir kaydedici gibi elemanlar yer almalıdır. Ayrıca uygulamayı gerçekleştirecek deneyimli arazi ekibi de deney sistemi ile birlikte düşünülmelidir. Bu tür deneylerin arazi uygulamaları zemin yüzeyinde veya kuyu içinde herhangi bir derinlikte sismik dalganın üretilmesi ile başlamaktadır. Bu ise üretilen dalgaların tanımlanabilir tipte olmasını gerekli kılmaktadır. Yüzey ve Aşağı Kuyu yöntemlerinde dalga kaynağı daha basittir ve zemin yüzeyine yerleştirilen bir elemana yatay veya düşey yönde darbe uygulanarak dalga üretilmesi sağlanmaktadır. Ancak Karşıt Kuyu yönteminde, kuyu içinde istenilen bir derinlikte özellikle kayma dalgası üretilmesi diğer yöntemlerdeki gibi kolay olmamakta ve daha özelliği olan mekanik kaynak gerektirmektedir. Bu çalışmada yürütülen Karşıt Kuyu deneyleri için geliştirilmiş tekrarlanabilir ve tersine çevrilebilir tipte mekanik dalga üretme kaynağı ve deney sisteminde bulunan alıcı ve sismograf gibi elemanların tanıtımı fazla ayrıntıya inilmeden Bölüm 4'de verilmiştir.

Oluşturulan deney sistemi ile yapılan deneysel çalışmalar İ.T.Ü. Ayazağa Kampüsü, Marmara Ereğlisi ve geniş kapsamlı olarak Erzincan'da gerçekleştirilmiştir. İ.T.Ü. Ayazağa Kampüsü ve Marmara Ereğlisi deney sahasında yapılan arazi uygulamaları ve sonuçları Bölüm 5'de yer almaktadır. Bu bölümde ayrıca arazi sönüm ölçümleri ve alınan numuneler üzerinde laboratuvarda yapılan rezonans frekans ve ultrases deney sonuçlarına da yer verilmiştir.

Bölüm 6 ise 13 Mart 1992 Erzincan depreminden sonra bölgede yapılan çeşitli arazi penetrasyon deneyleri ile sismik deneyler ve sonuçlarını içermektedir. Burada arazi uygulamaları sırasında yapılan Standart Penetrasyon Deneyi (SPT), Koni Penetrasyon Deneyi (CPT) ve Dinamik Sonda (DS) deneyleri tek tek ele alınmış ve bu deney sonuçları ile sismik dalga hızlarının değişimi incelenerek çeşitli korelasyon bağıntıları elde edilmiştir. Bu korelasyonlarda SPT-N darbe sayısı, CPT- q_c uç mukavemeti ve Dinamik Sonda deneyi darbe sayısı N_{10} değişken olarak alınmıştır. Bu korelasyonlara zemin tipinin, efektif düşey gerilme ve derinliğin etkisi de araştırılarak, kayma dalgası hızını iki bağımsız değişken cinsinden ifade eden bağıntılar sunulmuştur. Ayrıca arazi penetrasyon deney sonuçları arasındaki ilişkiler de incelenerek amprik bağıntılar verilmiştir.

Bu bağıntıların arazi ölçümlerinin yerine kullanılması ve sonuçlarının bir deney sonucu gibi yorumlanması yerine, arazi deneylerinin yapılamadığı veya sınırlı sayıda yapılabildiği koşullarda zemin cinsine göre, korelasyonlarda yer alan SPT-N darbe sayısı, CPT- q_c uç mukavemeti veya sismik dalga hızları gibi zemin parametrelerinin yaklaşık değerleri hakkında bir fikir edinmek olarak düşünülmelidir. Eldeki sınırlı sayıdaki veriler kullanılarak çıkarılan bu bağıntıların, veri sayısının artması ile daha da geliştirilmesi veya değiştirilmesi mümkündür.

BÖLÜM 2

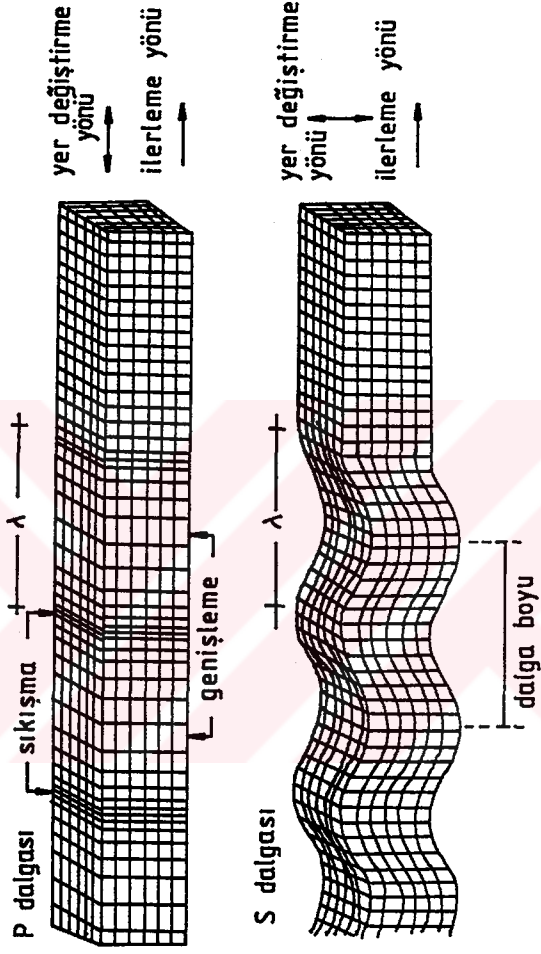
SİSMİK DALGA YAYILIMI

2.1. SİSMİK DALGA TİPLERİ

Herhangi bir ortamda dinamik bir etki yaratıldığı zaman bir dalga alanı meydana gelmekte ve bu dalgalar hem yüzeyde hem de ortamın içinde yayılmaktadır. Geoteknik mühendisliğinde tipik olarak zemin ve kayadan oluşan ortam, genelde elastik yarı sonsuz ortam olarak tanımlanmaktadır. Bu ortamda oluşturulan dalga alanı, ortam içinde yayılan cisim dalgaları ve ortamın yüzeyinde yayılan yüzey dalgaları olarak bilinen dalga tiplerini içermektedir. Ortam içinde yayılan dalgalar basınç ve kayma dalgaları, yüzeye yakın tabakalarda yayılan dalgalar ise Rayleigh veya Love dalgaları olmaktadır. Gerçek dalga tipi, parçacık hareketi yani yerdeğiştirmeleri ile dalga yayılma yönü dikkate alındığında ortaya çıkmaktadır.

Bir ortam içinde üretilen dalganın yayılma yönü ile yerdeğiştirme (parçacık hareketi) yönü aynı ise bu dalga tipine basınç dalgası adı verilmektedir. Ortamda çekme ve basınç olarak yayılırken hacim değişikliğine neden olmaktadır. Basınç dalgaları için, "P-dalgası", "birincil dalga", "boyuna dalga" ifadeleri de kullanılmaktadır.

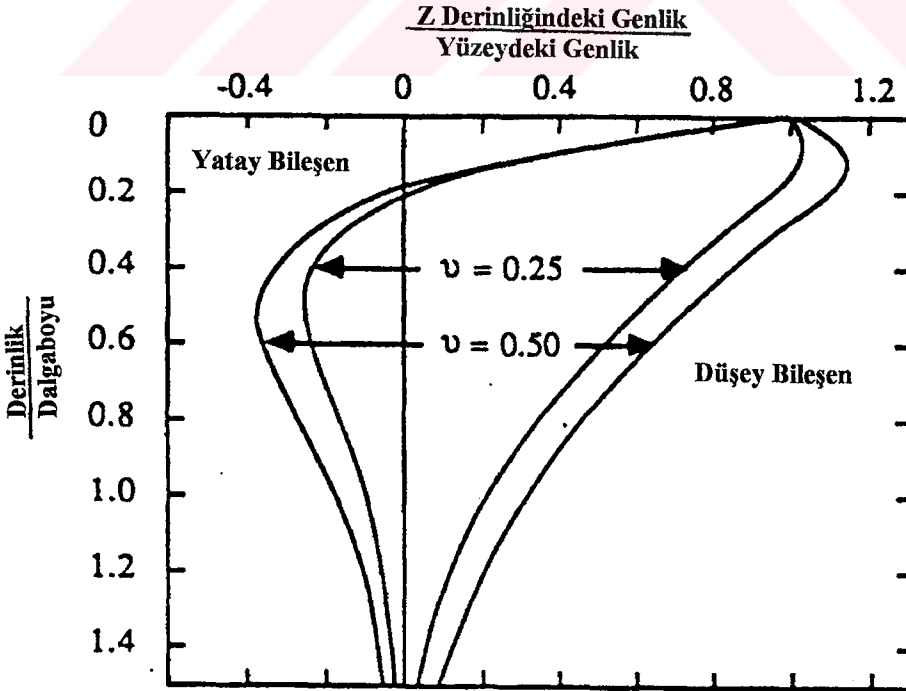
Kayma dalgaları elastik bir ortamda bükülerek, parçacık hareketine dik yönde yayılırlar. Hacim değişmesine neden olmazlar ancak ortamda şekil değişikliği meydana getirirler. Kayma dalgaları çoğu zaman "S-dalgası" olarak anılırlar ve "ikincil dalga", "transvers dalga" diğer ifade türleridir. Kayma ve basınç dalgası için dalga ilerleme ve yerdeğiştirme yönleri grafik olarak Şekil 2.1'de gösterilmiştir. Kayma dalgası parçacık hareketleri düşey bir düzlem ile çevrilirse yani yerdeğiştirmeler düşey düzlemde oluşursa bu dalgaya düşey polarize olmuş (yönlenmiş) kayma dalgası veya kısaca SV dalgası adı verilmektedir. Diğer yandan, parçacık hareketi yatay düzlemde meydana gelirse, yatay polarize olmuş kayma dalgası ya da kısaca SH dalgası adını almaktadır.



Şekil 2.1. P ve S-Dalgası Yayılma Özellikleri

Love dalgası parçacık hareketi bir yatay düzlem üzerindedir ve dalga yayılma yönüne diktir. Bu yüzey dalgaları sadece, yüksek hızlı tabaka üzerinde düşük hızlı tabakaların yer aldığı durumlarda ortaya çıkmaktadır. Bu durumda düşük hızlı tabakanın alt ve üst yüzeyleri arasında kayma dalgasının çok yönlü yansıması Love tipi dalgayı oluşturmaktadır (Love, 1911). Love dalgası yayılma hızı dalga boyuna bağlıdır ve genelde düşük hızlı tabakanın kayma dalgası hızına eşittir.

Rayleigh (R) dalgası parçacık hareketi düşey düzlemdedir ve bu düzlem dalga yayılma yönünü de içermektedir. Yatay yerdeğiştirme mevcut değildir ve parçacık hareketi yüzeyde eliptiktir. Rayleigh dalga hızı, Poisson oranına bağlı olarak kayma dalgası hızının ortalama %92'sine eşit olmaktadır (Roesset ve diğ., 1990). Rayleigh dalgasının genliği zemin yüzeyinden derine indikçe azalmakta ve dalga boyunun 1,5 katı derinlikte yüzeydeki genliğin %10'dan daha az değerine ulaşmaktadır. Rayleigh dalgası genliğinin yatay ve düşey bileşeninin, dalga boyuna göre normalize edilmiş derinlikle Poisson oranına bağlı olarak değişimi Şekil 2.2'de verilmiştir (Richart ve diğ., 1970).



Şekil 2.2. Rayleigh (R) Dalgası Genliğinin Derinlikle Değişimi (Richart ve diğ., 1970)

Tabakalı ortamların arakesitinde yayılan ve Rayleigh dalgasına benzeyen diğer bir dalga türü Stonely dalgasıdır. Genliği Rayleigh dalgasında olduğu gibi derinlikle azalmakta ve bu yüzden en büyük genlik iki tabakanın arakesitinde meydana gelmektedir. Bu ara yüzey dalgası ilk defa Stonely tarafından gösterildiği için araştırmacının adı ile anılmaktadır (Stonely, 1924).

2.2. SİSMİK DALGA HIZLARI

Sismik dalgaların ölçümü, sismik alıcılar kullanarak parçacık hareketinin (yerdeğiştirme, hız veya ivmenin) gözlenmesini gerektirmektedir. Uygulamada kullanılan birçok sismik alıcılar, maksimum duyarlılığın olduğu bir eksene sahip olacak şekilde yönlendirilmiştir. Bu yüzden sismik deneylerde başarılı bir ölçüm, dalga tipine göre maksimum parçacık hareketinin olduğu yönde alıcıların yerleştirilmesi ile mümkün olmaktadır (Hoar, 1982).

Sismik dalga hızlarının ölçüm yöntemleri genelde, bir kaynaktan açığa çıkarılan sismik enerjinin oluşturduğu dalgaları, kaynaktan bilinen mesafelerde bulunan bir veya daha fazla alıcı noktasında gözleyerek dalga varış zamanlarını belirlemeyi içermektedir. Sismik hızlar, dalganın hareket ettiği mesafenin varış zamanına bölünmesinden hesaplanmaktadır. V_s ve V_p sırası ile kayma ve basınç dalga hızları, d kaynak ile alıcı arası mesafe, t_s ve t_p kayma ve basınç dalgası için varış zamanlarını göstermek üzere dalga hızları aşağıdaki eşitlikler yardımı ile hesaplanmaktadır.

$$V_s = d/t_s \quad (2.1)$$

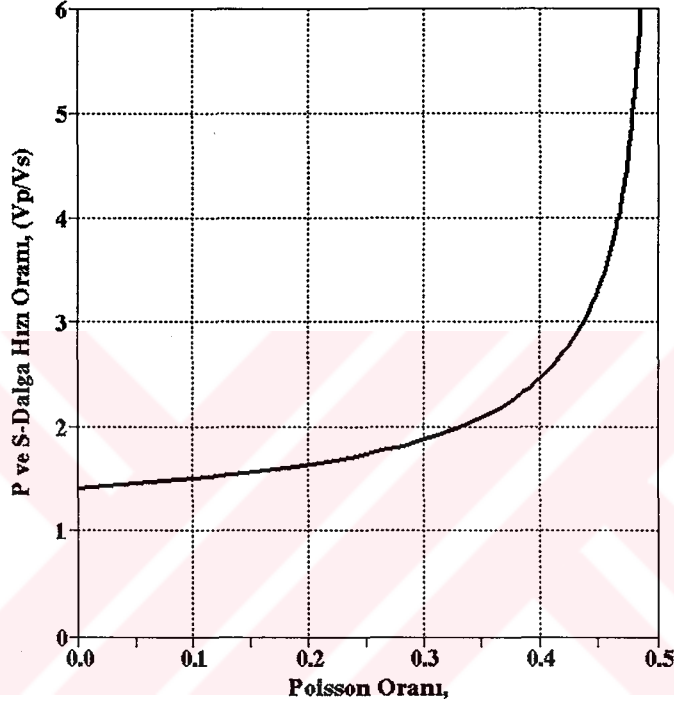
$$V_p = d/t_p \quad (2.2)$$

Bu eşitlikler Rayleigh ve Love dalga hızlarını bulmak için de kullanılabilir. Ancak Rayleigh dalgası için hız, dalga boyu ve frekans özellikleri dikkate alınarak,

$$V_R = f \cdot L_R \quad (2.3)$$

eşitliği ile hesaplanabilmektedir. Bağlıntıdaki L_R dalga boyunu, f ise frekansı göstermektedir.

Aynı zemin şartlarında P-dalga hızı, S-dalga hızından daha büyüktür. Bir elastik ortam içinde teorik olarak P-dalga ile S-dalga hızlarının oranı sadece ortamın Poisson oranına (μ) bağlı olduğu gösterilmiştir (Richart ve diğ., 1970). Şekil 2.3'de P ve S-dalga hızları oranının, Poisson oranı ile değişimi görülmektedir. Hız oranları μ 'nın sıfır değerinde $\sqrt{2}$ olmakta, μ 'ün 0.5 değerinde ise sonsuz olmaktadır. Bu durumda ortam sıkışamaz kabul edilmekte ve P-dalgası hızı da sonsuza gitmektedir.



Şekil 2.3. P ve S-Dalga Hızı Oranının Poisson Oranına Göre Değişimi

Zeminlerde ölçülen kayma dalgası (S-dalga) hızının tipik değerleri 120 ile yaklaşık 450 m/sn arasındadır. Bununla birlikte yüzeye yakın kesimlerde yer alan ve çok yumuşak kil tabakaları için 60 m/sn den daha az, derinlerde bulunan katı-sert kil ve kumlu çakıllı zeminlerde ise 600 m/sn değerinden daha fazla ölçüldüğü durumlarla da karşılaşmıştır. Zeminlerde ve çeşitli kayalarda ölçülen tipik kayma dalgası hızı değerleri kullanılarak zemin sınıfı için çeşitli tanımlamalar yapılmıştır.

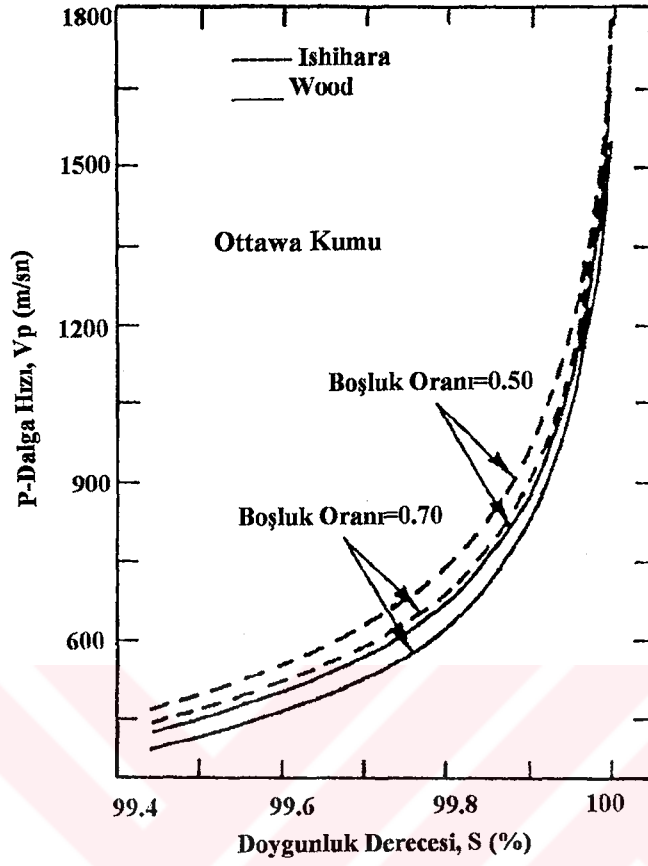
Yapılan böyle tanımlamada, S-dalga hızının 760 m/sn den daha büyük olduğu değerlerde zeminler Seed ve diğ. (1976) tarafından sağlam kayalar olarak sınıflandırılmış ve bu tanımlama depremler sırasında yerel jeoloji ve maksimum ivme ilişkisinde kullanılmıştır. Kayalar için diğer tanımlar ise Ohta ve Shima (1967) ve Murphy (1972) tarafından yapılmış, bu

araştırmacılar sırası ile S-dalga hızının 1800 m/sn ve 1200 m/sn değerlerinde zeminleri sağlam kayaç olarak sınıflandırmışlardır.

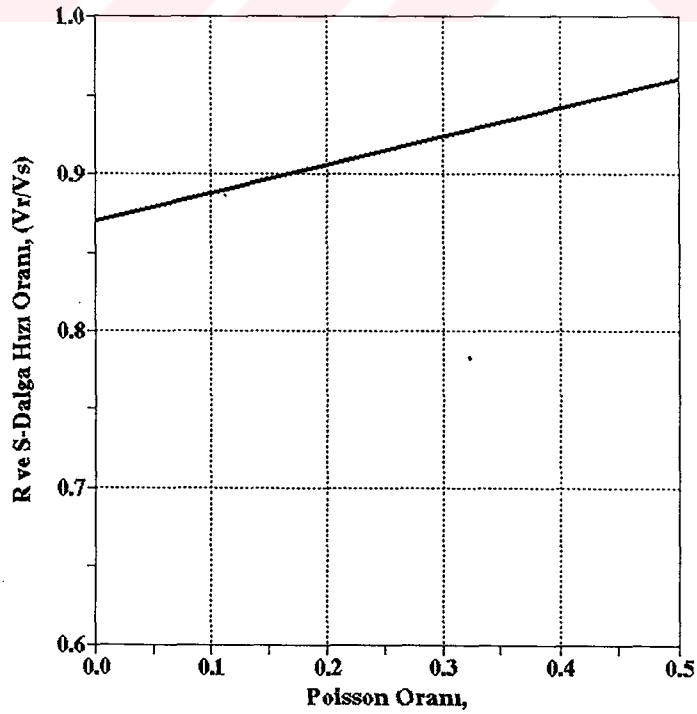
Efektif gerilmeye önemli etkisi olan zemin içindeki suyun, S-dalga hızına etkisi çok fazla olmamasına karşılık, ilk varışlardan hesaplanan P-dalga hızı doğrudan zeminlerin doygunluk derecesine bağlıdır. Kuru ve doygunluk derecesi yaklaşık %99'dan daha az olan zeminler için P-dalgası hızı 210 ile 760 m/sn arasında değerler almaktadır. Düşük deformasyon genliklerinde elastisite teorisi kullanılarak ve Poisson oranını 0.11 ve 0.23 civarında alarak, yukarıda önceden verilen S-dalga hızlarının tipik değerleri ile yapılan hesaplamalardan P-dalga hızı sınırları Hardin (1978) tarafından 120 ile 430 m/sn bulunmasına rağmen, farklı tipte sağlam kayaçlarda P-dalga hızı 2000 m/sn ile 8700 m/sn arasında değişmekte olduğu gösterilmiştir (Auld, 1977).

Suya doygun zeminlerde P-dalga hızı, suyun sıkışma özelliğinin etkisi altındadır ve zemin yapısından (rijitliğinden) çok az etkilenmektedir. Elastik teori kullanılarak zemin-su ortamında bu dalga hızının 1400 ile 2000 m/sn mertebelerinde hesaplanmış olmasına karşılık, doygun ve sonsuz bir ortamda P-dalga hızının tipik değeri 1500 m/sn dolayındadır (Wood, 1930). Doygun olamayan zeminlerde boşluk oranı, doygunluk derecesi ve Poisson Oranı gibi faktörler P-dalga hızına etki etmektedir. Doygunluk derecesine bağlı olarak P-dalga hızının değişimi Şekil 2.4'de gösterilmiştir.

Elastik teoriden yararlanarak, Rayleigh dalgasının, S-dalga hızına çok yakın olduğu ve ortamın Poisson oranına bağlı olarak değiştiği gösterilmiştir (Richart ve diğ., 1970). Şekil 2.5'de görüldüğü gibi, Poisson oranı μ 'nın 0 (sıfır) ile 0.5 değerleri arasında R-dalgası, S-dalgasının %87 ve %96'sına karşı gelmektedir. Homojen, izotrop, elastik ortamlarda R-dalgası frekans ile değişmemektedir. Ancak gerçekte zeminler homojen olmadığından R-dalga hızı derinliğe ve frekansa bağlı olarak değişmektedir. Düşük frekanslarda dalga boyu artmakta buna bağlı olarak etki derinliği ve hız değeri de yükselmektedir. Rayleigh dalgasının zemin içinde yayılırken bu frekans bağımlılığı dispersiyon olarak isimlendirilmektedir. Zemin gibi gerçek ortamlarda Love dalgası da aynı özelliği gösterdiğinden bu iki dalga tipi frekans bağımlı (dispersiv) dalga olarak anılmaktadırlar.



Şekil 2.4. Doygunluk Derecesi ile P-Dalga Hızının Değişimi (Allen, 1977)



Şekil 2.5. R ve S-Dalga Hızı Oranlarının Poisson Oranı İle Değişimi

2.3. SİSMİK DENEYLERDEN BULUNAN ZEMİN ÖZELLİKLERİ

Zeminler kayma deformasyonun %10⁻³ veya daha küçük genliklerinde elastik davranış göstermektedirler. Aşağı ve Karşıt Kuyu gibi sismik metodların kullanımları sırasında zeminde oluşturdıkları deformasyon seviyeleri ise bu sınırın altında kalmakta ve bu tür ölçümlere düşük deformasyon genlikli ölçümler denilmektedir (Stokoe ve diğ., 1989). P-dalgasının yer altı suyundan etkilenmesi ve kayma modülünün dinamik analizdeki önemi yüzünden S-dalga hızı ölçümleri mühendislik uygulamalarında ön plana çıkmaktadır (Tezcan ve diğ., 1975). Genellikle arazide yapılan bu tür ölçümler başlangıç modüllerini (G_{maks}) belirlemede kullanılmaktadır. Sismik dalgaların yayılma hızlarının belirlenmesi ile gerekli diğer zemin özellikleri elastisite teorisinde homojen izotrop ortamlar için verilen;

$$\text{Kayma Modülü} \quad G=(\gamma/g)V_s^2 \quad (2.4)$$

$$\text{Sıkışma Modülü} \quad M=(\gamma/g)V_p^2 \quad (2.5)$$

$$\text{Poisson Oranı} \quad \mu=[0.5(V_p/V_s)^2-1]/[(V_p/V_s)^2-1] \quad (2.6)$$

$$\text{Elastisite Modülü} \quad E=2(\gamma/g)V_s^2(1+\mu) \quad (2.7)$$

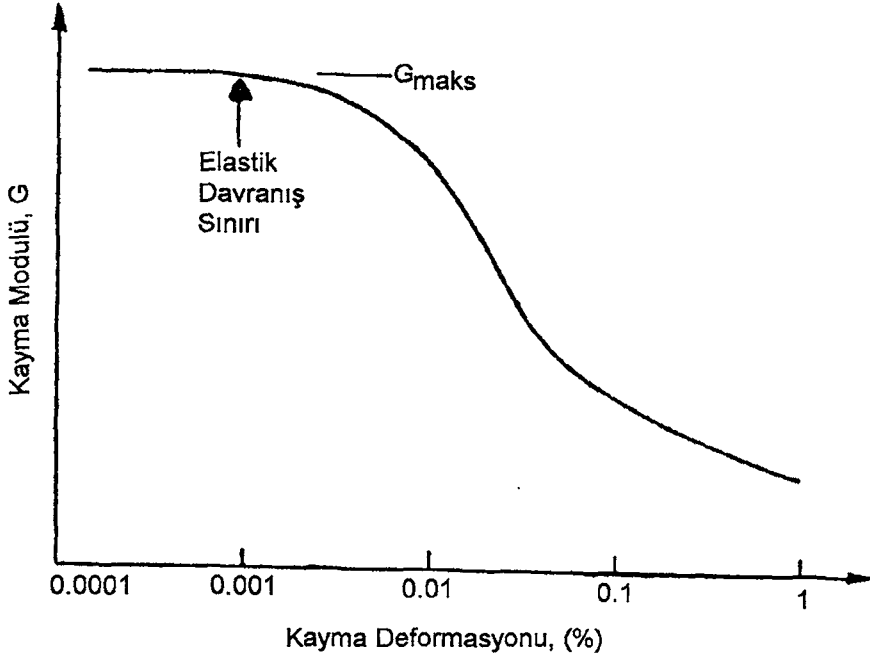
$$\text{Bulk Modülü} \quad B=(\gamma/g)(V_p^2-4/3 V_s^2) \quad (2.8)$$

$$\text{Zemin Hakim Peryodu} \quad T=4H/V_s \quad (2.9)$$

bağıntıları ile hesaplanabilmektedir. Bağıntılarda V_s ve V_p sırasıyla kayma ve basınç dalgası hızı, g yerçekimi ivmesi, γ zeminin birim hacim ağırlığı, H tabaka kalınlığı olmaktadır.

2.4. DEFORMASYON GENLİKLERİ VE HIZLARI

Zeminlerin sismik hızları, elastik modülleri ve sönüm oranları deformasyon bağımlı olarak bilinmektedir. Bu bağımlılığa bir örnek olarak kayma modülünün (G) deformasyonla değişimi Şekil 2.6'da verilmiştir. G , kayma deformasyonunun %10⁻³ gibi bir alt sınırında ve daha küçük değerlerinde sabit kalmakta ve daha sonra artan deformasyonla lineer olmayan özellikte azalmaktadır. Bu sınırın altındaki G , düşük genlik modülü olarak bilinmekte ve G_{maks} şeklinde gösterilmektedir.



Şekil 2.6. Kayma Mödülünün Deformasyon İle Değişimi

Deformasyonun bu alt sınırından daha küçük değerlerde modüllerin ve sismik dalga hızlarının sabit kalması dolayısı ile zeminler de bu sınıra kadar elastik davranış sergilemektedirler. Deformasyonun sıfır ile özelliklerin sabit kaldığı bu sınır arasında kalan bölgeye elastik bölge veya düşük deformasyon bölgesi adı verilmektedir. Sismik ölçümler sırasında alıcı yakınlarında meydana gelen deformasyon seviyelerinin, zeminlerin elastik davranış sergiledikleri deformasyon sınırından daha küçük olduğu önemli bir noktadır ve bu yüzden sismik dalgalar da elastik sınırlar içinde yer almaktadır (Stokoe, 1980). P ve S-dalga hızları ile bu değerlerden hesaplanan modüllerin deformasyon bağımlı olduklarından, sismik dalgalar tarafından yaratılan deformasyon seviyelerinin bazı hallerde bilinmesi gerekebilmektedir. Deformasyon genlikleri basit olarak, parçacık hızının dalga yayılma hızına bölümünden hesaplanmaktadır (Richart ve diğ., 1970). Sismik dalgalar tarafından oluşturulan kayma ve normal deformasyonlar aşağıda verilen bağıntılardan bulunabilmektedir.

$$\text{Kayma deformasyonu} \quad \gamma = U_s / V_s \quad (2.10)$$

$$\text{Normal deformasyon} \quad \epsilon = U_p / V_p \quad (2.11)$$

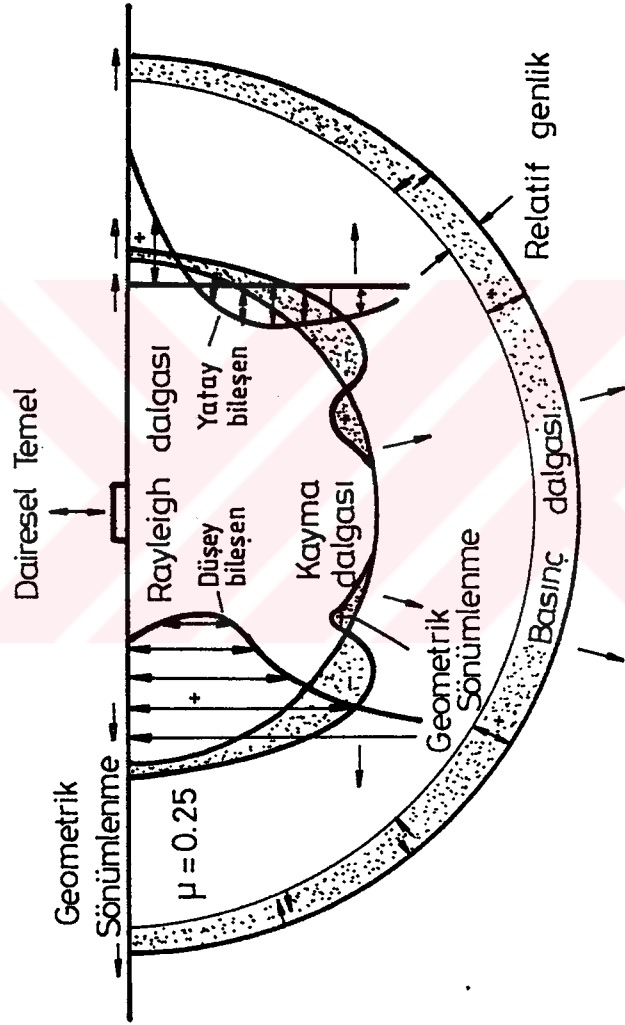
Bağıntılardaki U_s , U_p kayma ve basınç dalgası parçacık hızını, V_s ve V_p ise kayma ve basınç dalgasının ortam içinde yayılma hızını göstermektedir.

Deformasyon hızı, ölçümler sırasında sismik dalgaların sebep olduğu deformasyonun türevi alınarak bulunabilmektedir. Sismik deneylerden elde edilen deformasyon hızı ile diğer yöntemlerle örneğin dinamik ve statik laboratuvar deneylerinden bulunanlar ile aynı olması gerekmektedir. Aşağı Kuyu ve Karşıt Kuyu deneylerinde deformasyon hızı Stokoe (1980) tarafından 0.0001 ile 0.01 (inç/inç)/sn olarak bulunmuştur. Bu değer laboratuvar dinamik deneylerinde oluşan değerlere eşit, statik deneylerin biraz üzerindedir. Arazide kullanılan frekans 500 Hz den fazla olmadığı sürece deformasyon hızları sonuçları etkilememektedir. Pratik uygulamalarda kullanılan frekanslar ise bir kaç yüz Hz olması nedeniyle deformasyon hızları ihmal edilmektedir.

2.5. SİSMİK DALGALARDA SÖNÜM OLAYI

Homojen ve izotrop bir ortam içinde noktasal kaynaktan açığa çıkarılan sismik dalgalarının genlikleri iki farklı mekanizma ile azalmaktadır. Kaynaktan itibaren ortamın daha geniş bölgesinde yayıldıklarından dalgaların enerji yoğunluklarında meydana gelen değişim, genliklerde bir azalmaya sebep olmaktadır ve bu olaya geometrik sönüm adı verilmektedir. Dalga ortam içerisinde yayılırken ortamın özelliklerine bağlı olarak sürtünme kuvvetlerinden oluşan enerji kayıpları dalga genliklerinde bir azalmaya neden olmakta ve bu olaya da malzeme sönümü denilmektedir (Mok ve diğ., 1988). Ayrıca zemin gibi heterojen ortamlarda ara yüzeylerde kırılma ve yansıma olayları da dalga genliklerini etkilemektedir.

Elastik yarı sonsuz ortamın yüzeyindeki bir noktasal kaynaktan, yüzey boyunca ve ortamın içinde yayılan sismik dalgalar üretilmektedir. Bu duruma örnek olarak izotrop, homojen, elastik yarı sonsuz uzayda dairesel temelli bir vibratörden çıkan R, S ve P-dalga deplasmanları Şekil 2.7’de görülmektedir. R-dalgası kaynaktan dışa doğru silindirik bir dalga önü ile yayılırken, S ve P-dalgası yarı küresel genişleyen bir dalga önü ile yayılmaktadır. Dalga yayılırken ve dalga önü genişlerken, ortamın daha geniş hacmi içinde yayıldıklarından tüm dalga tipleri için enerji yoğunluğu azalmaktadır. Enerji yoğunluğundaki bu azalma ile orantılı olarak her dalga tipinin genliğinde de yukarıda açıklandığı gibi bir azalma görülmektedir. Bir homojen ve izotrop ortamda genlikteki bu azalma geometrik sönüm (veya radyasyon sönüm) olarak tanımlanmaktadır.



Şekil 2.7. Homojen ve İzotrop Bir Ortamda Dairesel Temelden Oluşan Dalgaların Yerdeğiştirme Özellikleri (Woods, 1968)

R-dalga genliği kaynaktan itibaren mesafenin tersinin karekökü $(1/R)^{1/2}$ ile azalmaktadır. Cisim dalgaları olan P ve S-dalgaları ortamın içinde mesafenin tersi $(1/R)$ ile, yüzeyde ise mesafenin karesi (R^2) ile orantılı olarak azalmaktadır (Rayleigh, 1894; Lamb, 1904; Kolsky, 1953; Ewing ve diğ., 1957; White, 1955).

Homojen ve izotrop elastik ortamda mesafe ile geometrik sönüm yüzünden cisim dalgalarının genliğindeki azalış aşağıda verilen bağıntı ile tahmin edilebilmektedir.

$$A=A_1(R_1/R) \quad (2.12)$$

Bu eşitlikte A, kaynaktan R mesafede tahmin edilen dalga genliğini, A_1 kaynaktan R_1 mesafede dalganın bilinen genliğini, R_1 kaynak ile genliğin bulunduğu nokta arasındaki mesafeyi, R kaynak ile genliğin tahmin edileceği nokta arası mesafeyi göstermektedir.

Zeminler deformasyon seviyelerine göre elastik olmayan davranış da gösterdiklerinden ve malzeme sönümüne sahip olduklarından yukarıda verilen bağıntı zeminlere doğrudan uygulanamaz. Zeminlerdeki malzeme sönümü, viskoz sönüm ile model edilebilir. Homojen, izotrop ve viskoelastik ortamlarda malzeme ve geometrik sönümün neden olduğu cisim dalgalarının genliklerindeki değişmeyi bulmak için aşağıda verilen ifade geliştirilmiştir (Bornitz, 1931).

$$A=A_1(R_1/R) e^{[-\alpha(R-R_1)]} \quad (2.13)$$

Burada α sönüm faktörü veya katsayısı olarak tanımlanmaktadır. α sönüm faktörü homojen, izotrop ve viskoelastik ortamın malzeme sönümünün bir ölçüsüdür. Bu yüzden bu katsayı önemli bir büyüklüktür ve kaynaktan itibaren iki veya daha fazla mesafede dalga genliklerinin bilinmesi ile hesaplanabilir. Viskoelastik ortamlar içinde yayılan cisim dalgaları için sönüm faktörü;

$$\alpha=[\ln(A_1R_1/A_2R_2)]/(R_2-R_1) \quad (2.14)$$

eşitliği yardımı ile bulunabilmektedir. A_1 ve A_2 , aynı kaynaktan R_1 ve R_2 mesafelerde ölçülen dalga genlikleridir. Bu bağıntının kullanılmasında, malzeme sönümünün üretilen sınırlar içinde deformasyon genliğinden

bağımsız olduğu, ölçülen genliklerin kırılan ve yansıyan dalgalardan etkilenmedikleri ve alıcılardan gerçek parçacık hızlarının bulunabildiği kabulleri yapılmıştır. Sönüm katsayısının, C_α sönüm sabiti ve f frekans olmak üzere frekansın $\alpha=C_\alpha f$ şeklinde yaklaşık bir lineer fonksiyonu olduğu gösterilmiştir. S-dalga hızının 100 ve 420 m/sn olarak ölçüldüğü zeminlerde, S-dalgasının frekansına bağlı olarak bu katsayının $1.2 \cdot 10^{-3}$ ile $4.6 \cdot 10^{-3}$ m/sn arasında değer aldığı bulunmuştur (Kudo ve Shima, 1970). S ve P-dalga hızlarının sırası ile 820 m/sn ve 2300 m/sn olan zeminler için sönüm katsayısını, S-dalgasında $3.9 \cdot 10^{-4}$ m/sn, P-dalgasında $4.6 \cdot 10^{-5}$ m/sn olarak hesaplanmıştır (McDonal ve diğ., 1958). Bu değerlerden, malzeme sönümünün kayma durumunda basınçtan daha büyük olduğunu ve zeminlerdeki sönümün kayaya göre daha fazla olacağı anlaşılmaktadır.

Geoteknik mühendisliğinde, zeminlerin malzeme sönümü için daha kullanışlı bir ifade de, sönüm katsayısı ile ilişkili olarak;

$$\delta = \alpha(V/f) \quad (2.15)$$

şeklinde verilen logaritmik azalımdır (Richard ve diğ., 1970). Burada V dalga hızını ve f frekansı göstermektedir. Yine geoteknikte malzeme sönümü için daha sık kullanılan bir başka ifade ise logaritmik azalım ile ilişkisi olan;

$$D = \sqrt{\delta^2 / (4\pi^2 + \delta^2)} \quad (2.16)$$

sönüm oranıdır. Burada D sönüm oranı göstermektedir. Jeofizikçi ve sismologlar tarafından kullanılan diğer bir malzeme sönümü boyutsuz Q kalite faktörüdür, (quality factor). Q ile malzeme sönümü arasındaki ilişki aşağıdaki bağıntılarla verilmektedir (Johnson ve Toksöz, 1981).

$$Q = \pi f / (\alpha V) \quad (2.17)$$

$$Q = \pi / \delta \quad (2.18)$$

$$Q = \sqrt{(1-D)} / (2D) \quad (2.19)$$

$$1/Q = dE / (2\pi E) \quad (2.20)$$

Burada dE , belli bir hacimde harmonik titreşimin bir çevriminde harcanan enerji miktarını, E aynı hacimde depolanan en büyük enerjiyi gösterir.

Benzer ifadeler devrelerdeki enerji kayıplarını göstermek için elektronikte de kullanılmaktadır. Önemli bir dinamik özelliklik olan sönüm oranı da kayma modülü gibi deformasyon genliğine bağlıdır.

Sönüm katsayısı zeminler için frekansın fonksiyonu olarak değişmesine karşılık, logaritmik azalım, sönüm oranı ve kalite faktörü frekanstan bağımsızdır ve verilen malzeme için sabittir. Logaritmik azalım, sönüm oranı ve Q, farklı malzeme ve dalga tipleri için Kuda ve Shima (1970), McDonal ve diğ. (1958) tarafından hesaplanan değerleri ile aşağıda Tablo 2.1'de verilmiştir.

Tablo 2.1. Çeşitli Zemin Tipi ve Hız Değerlerine Göre Hesaplanmış Sönümler

Zemin Tipi	Dalga Tipi	Dalga Hızı (m/sn)	Sönüm Katsayısı C_a (sn/m)	Log. Azalım δ	Sönüm Oranı D (%)	Kalite Faktör Q
Kum	SH	300	$1.31 \cdot 10^{-4}$	0.367	5.8	8.6
Silt	SH	108	$1.08 \cdot 10^{-4}$	0.118	1.9	26.6
Kiltaşlı	SH	420	$1.16 \cdot 10^{-4}$	0.525	8.3	6.0
Bitkisel	SH	150	$4.30 \cdot 10^{-4}$	0.694	1.0	4.5
Şist	SV	817	$3.68 \cdot 10^{-5}$	0.324	5.2	9.7
	P	2243	$4.21 \cdot 10^{-6}$	0.102	1.6	30.8

BÖLÜM 3

ARAZİ SİSMİK YÖNTEMLERİ ÜZERİNDE YAPILAN ÖNCEKİ ÇALIŞMALAR

3.1. GİRİŞ

Zemin tabakaları çeşitli dinamik yüklemeler ve depremler sırasında, farklı genlik ve frekans özelliklerine sahip titreşimlerin etkisi altında kalmakta ve geniş sınırlar içinde değişen şekil değiştirmelere uğramaktadırlar (Özaydın, 1982). Dinamik yükler altındaki davranış, zeminlerin dinamik gerilme-şekil değiştirme özelliklerine bağlıdır. Geoteknik mühendisliğinde bu dinamik özellikler genelde düşük deformasyon genliklerindeki kayma modülü (G) ve sönüm oranı ile tanımlanmaktadır. Kayma modülü ise zeminin yoğunluğu ve sismik ölçümlerden elde edilen kayma dalgası hızı ile ifade edilebilmektedir. Dinamik zemin özellikleri, kayma deformasyon genliği, çevre basıncı, boşluk oranı, gerilme tarihçesi ve çevrim sayısı gibi bir çok faktörlerden etkilenmektedir. Bu tür ve bunlara benzer diğer faktörlerin dinamik özelliklere etkisi Seed ve Idriss (1970), Hardin ve Drnevich (1972), Hardin (1978), Seed ve diğ. (1984) tarafından araştırılmıştır. Zemin dinamik özelliklerin belirlenmesi için kullanılan arazi ve laboratuvar yöntemleri ise Wood (1978) tarafından incelenmiştir. Laboratuvarda kil numuneler üzerinde yapılan deney sonuçlarından, plastisite indisleri farklı normal konsolide zeminlerde düşük deformasyon genliklerindeki kayma modülünün yaklaşık sabit kaldığı ancak sönüm oranının plastisite indisindeki artma ile azalacağı sonucuna varılmıştır (Vucetic ve diğ., 1991; Kagawa, 1992). Laboratuvar deney yöntemleri dinamik özelliklere etki eden faktörlerin bulunmasında ve çeşitli parametrik çalışmalar yapılmasında kullanılırken, arazi yöntemleri bu özelliklerin yerinde, doğal koşullarda elde edilmesine imkan tanımaktadır. Arazi ve laboratuvarda ölçülen düşük genlikli kayma modülü (G), numune örselenmeleri ve arazi gerilme durumunun laboratuvarda tekrar model edilmeye çalışılması gibi faktörlerin etkisinde kalarak birbirlerinden farklıdır (Durgunoğlu ve diğ., 1978; 1982). Kayma modülü gibi dinamik

özelliklerin arazi yöntemleri ile belirlenmesi, zaman ve mali kaynak gerektirdiği için bu özelliği hesaplamada amprik bağıntılar kullanılmaktadır. Bu amprik bağıntılar laboratuvarda yapılan deney sonuçlarına ve daha önce çeşitli zemin tiplerinde uygulanmış arazi ölçümlerine dayanmaktadır. Bu korelasyon bağıntılarından hesaplanan zemin parametreleri, arazi ölçümlerinin bir alternatifi olarak düşünülmemelidir. Çeşitli bağıntılardan bulunan sonuçlar arasında da farklılıklar bulunmakta ve bu tür ilişkiler arazideki tüm koşulları içermemektedirler. Ancak kayma modülünün arazide deformasyonla değişimini ölçmek için uygun bir yöntem olmadığından, kayma modülü-deformasyon ilişkisi laboratuvar deneyleri veya amprik bağıntılardan elde edilmektedir. Kayma modülünün deformasyon ile değişimini veren bağıntıların kullanılabilmesi için, arazi yöntemleri ile ölçülen başlangıç kayma modülü değeri anahtar özelliktir.

3.2. ARAZİ SİSMİK YÖNTEMLERİ

Dinamik zemin özellikleri, deformasyon genliğine bağlı olarak değişimleri nedeniyle arazi sismik deney yöntemleri uygulama sırasında üretilen ve gözlenen en büyük deformasyon genliğine göre sınıflandırılmaktadır. Arazi sismik yöntemleri bu yüzden önce düşük deformasyon ve yüksek deformasyon genlikli yöntemler olarak iki sınıfa ayrılmaktadır.

3.2.1. Düşük Genlikli Deformasyon Yöntemleri

Düşük deformasyon genlikli yöntemler deney sırasında, dalga üretmek ve üretilen dalgaları gözlemek için kullanılan kaynak ve alıcının geometrik yerleşimi dikkate alınarak, kuyu içi ve yüzey sismik yöntemleri olarak iki gruba ayrılmaktadırlar.

3.2.1.1. Kuyu içi sismik yöntemler

Sismik dalga hızlarının arazide ölçülmesi için kullanılan kaynak ve alıcı konumuna göre kuyu içi yöntemler aşağıda verilmiştir.

- 1) Karşıt Kuyu (Cross-Hole)
- 2) Aşağı Kuyu (Down-Hole)

3) Yukarı Kuyu (Up-Hole)

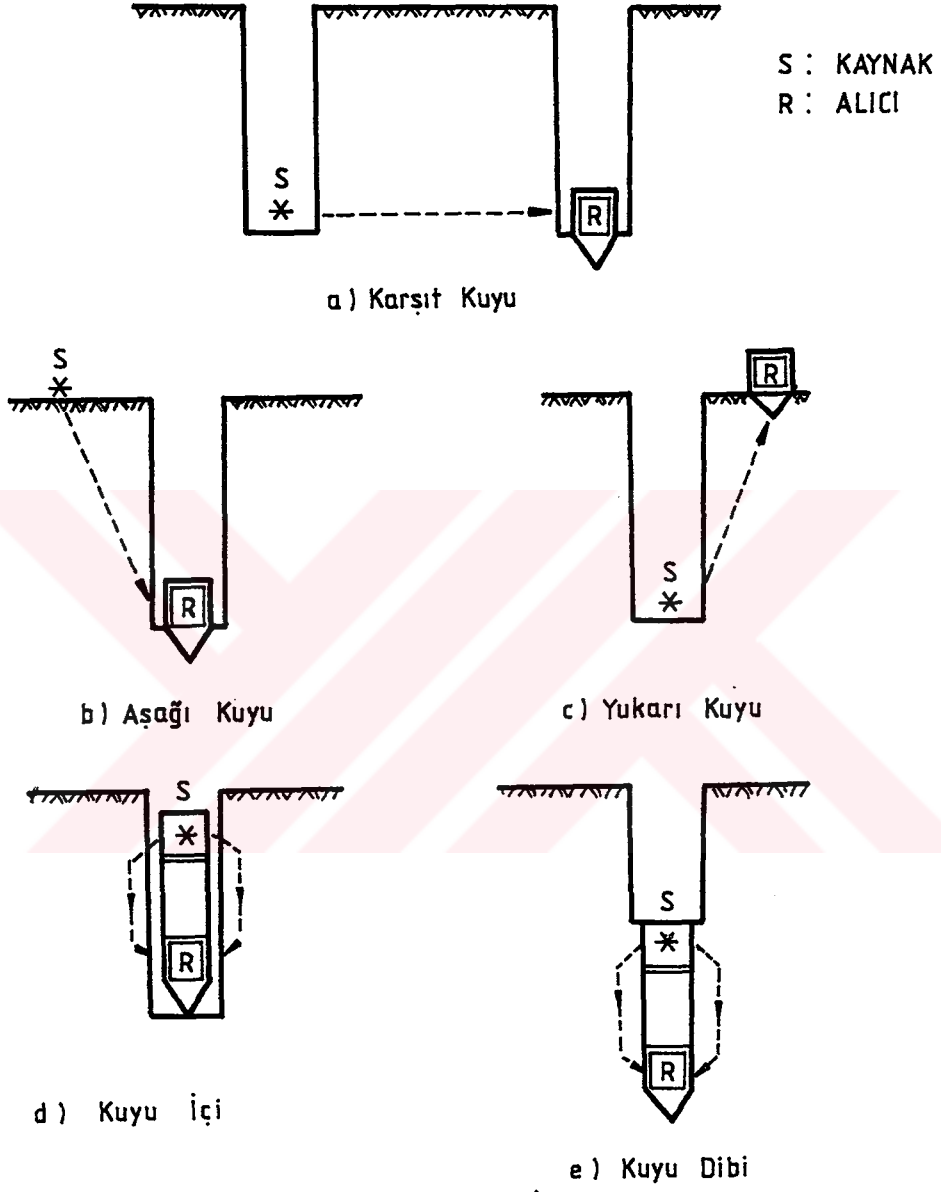
4) Kuyu İçi (In-Hole)

5) Kuyu Dibi (Bottom-Hole)

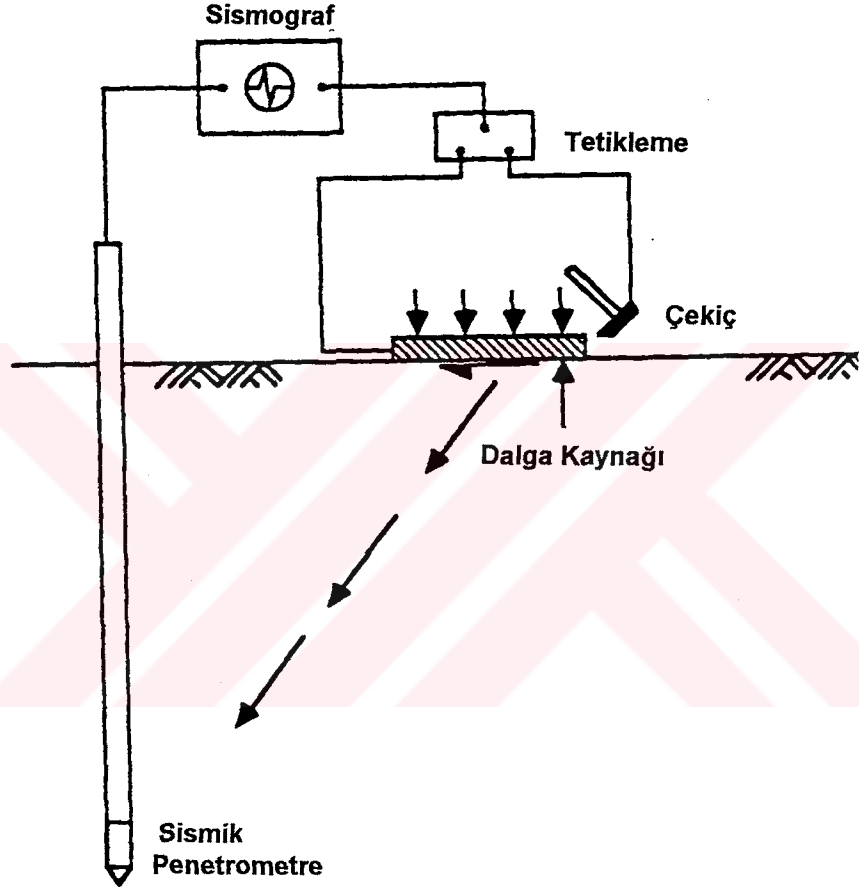
Karşıt Kuyu yönteminde, bir kaynaktan çıkan cisim dalgalarının yatay olarak aynı seviyedeki bir veya daha fazla alıcıya ulaşması için gereken zaman ölçülmektedir. Şematik olarak Şekil 3.1'de görüldüğü üzere bu yöntemde kaynak ve alıcı ayrı kuyularda aynı derinlikte yer almaktadır (Stokoe ve Wood, 1972; Hoar, 1982; Mok, 1987). Aşağı Kuyu yönteminde ise zemin yüzeyinde yer alan bir kaynaktan açığa çıkarılan sismik dalgaların, kuyu içinde bilinen bir derinlikteki alıcı veya alıcılara dikeye yakın olarak ulaşması için gereken zaman ölçülmektedir (Warrick, 1974; Beeston ve McEvelly 1977; Patel, 1981). Karşıt Kuyu ve Aşağı Kuyu sismik yöntemlerin uygulanmasında yapılacak işlemler, kayıtların alınması, kullanılan alıcı ve kaynak tipleri daha ayrıntılı bir şekilde ilerleyen bölümlerde verilecektir.

Aşağı Kuyu yönteminin bir başka uygulaması, bilinen Koni Penetasyon deneyi (CPT) sondasına küçük hız ölçerler yerleştirilerek Campanella ve diğ. (1986) tarafından yapılmıştır. Sismik Koni Penetrasyon Deneyi (SCPT) adı verilen ve Şekil 3.2'de şematik olarak gösterilmiş olan bu sistem ile Aşağı Kuyu sismik deneyi ve CPT deneyi aynı anda yapılabilmektedir. Yöntemin en önemli üstünlüğü sondaj kuyusuna gerek duyulmadan deneyin uygulanabilmesi ve detaylı hız profilinin elde edilebilmesidir. Yöntemin uygulanması ve deneylerde elde edilen verilerin yorumlanması ile ilgili son çalışmalar Baziw (1993) tarafından yapılmıştır. Bu yöntem ve Karşıt Kuyu sonuçları karşılaştırıldığında, hız profillerinin büyük uyum içinde olduğu gösterilmiştir (Robertson ve diğ., 1985).

Yukarı Kuyu, Aşağı Kuyu yönteminin tamamen simetriğidir ve kaynak kuyu içinde belli bir derinlikte iken alıcı zemin yüzeyinde yer almaktadır. Kaynaktan oluşan dalgaların hemen hemen dikey olarak alıcıya varması için gereken süre ölçülmektedir. Bu yöntemde de alıcı birden fazla olabilir. Yöntem esas olarak, basınç (P) dalgası izini tanımlamak için yüzey yansıma ve kırılma ile kullanılması amacıyla geliştirilmiştir (Meisser, 1961). Kaynak olarak kuyu içinde kaliteli P-dalgası üreten patlayıcılar kullanılmaktadır. Kayma (S) dalgası üretmekte patlayıcı kaynakların



Şekil 3.1. Kuyu İçi Sismik Yöntemler

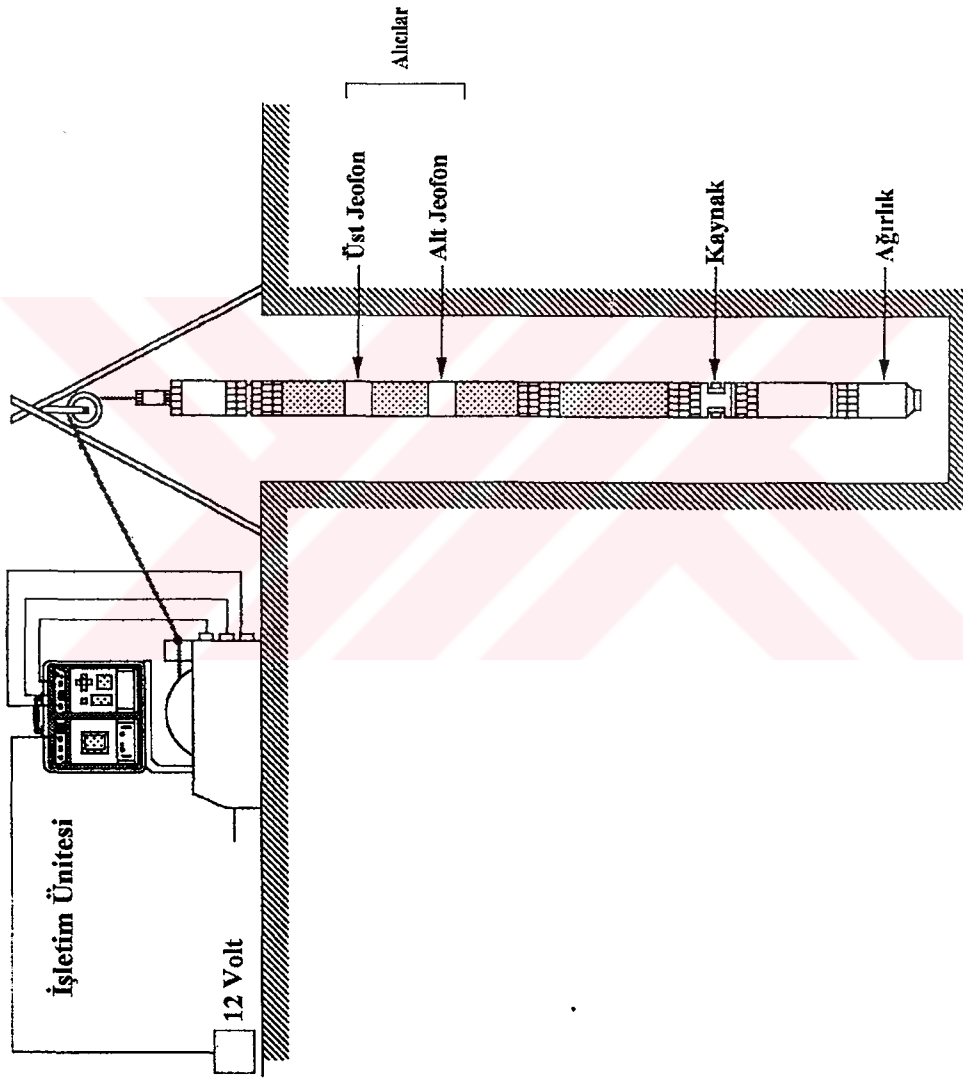


Şekil 3.2. Sismik CPT ve Aşağı Kuyu (SCPT) Şematik Görünümü
(Campanella ve diğ., 1986)

yanında tanımlanabilir dalgalar için kuyu içi mekanik kaynaklar da kullanılmıştır (Kovalev ve Molotova, 1961; Ohta ve diğ., 1960; Meisser, 1965; Ohta ve Shima, 1967; Ludeling, 1978).

Sonik logging adı da verilen kuyu içi (in-hole) yönteminde hem kaynak hemde alıcı aynı kuyu içinde yer almakta ve üretilen dalganın düşey olarak kuyu duvarından alıcıya ulaşması için geçen süre ölçülmektedir. Özel yapılmış kaynak-alıcı tertibatı olan ve kuyu duvarları ile teması olmayan bu yöntemin uygulanmasında, kuyu bir sıvı ile doldurulmaktadır (Ogura, 1970). Sismik ölçümlerde bu yöntemin kullanılması ile sadece kuyu cidarlarının yakınlarında bulunan zemin örneklenilmekte, bu bölge ise kuyu sondajı sırasında oldukça örselenmenin etkisinde kalmaktadır. Yumuşak kil ve gevşek kum zeminlerde ölçümlerin yapılmasında kuyuların kaplanması gerekmektedir. Bu deney yönteminin kendini tutabilen kaya gibi zeminlerde uygulanması uygun olmaktadır. Kutsunezaki (1980) yöntemi geliştirerek S-dalga hızı ölçümlerinde de kullanmıştır. Tek sondaj kuyusu içinde P ve S-dalga hızlarını ölçmek için geliştirilen bu sismik yöntem asılı PS sistemidir (Suspension PS Logging). PS sistemi, P ve S-dalgası üreten sismik bir kaynak ile 1 m mesafede iki adet alıcıdan oluşmakta ve pratik olarak 2000 m derinliğe kadar açık denizlerde de kullanılmaktadır (Ohya, 1983). Genel görünümü Şekil 3.3'de verilen asılı PS logging sisteminde alıcılar yatay ve düşey bileşene sahiptir. Sistemin alt tarafında bulunan manyetik bir çekiç yatay yönde kuyu duvarına, kuyu içindeki sıvı yardımı ile bir darbe uygulamakta ve bu tek darbeden her yöne dağılan P-dalgası ile kuyu boyunca yayılan S-dalgası üretilmektedir. Yukarıya doğru hareket eden bu dalgalar 1 m açıklıktaki alıcılar tarafından algılanmakta ve iki alıcı arasındaki zaman farkından hızlar hesaplanmaktadır. Sistem kuyuda bir sıvı içinde asılı kalmaktadır (Iwasaki, 1989).

Kuyu dibi yönteminde, bir veya daha fazla alıcı ile kaynağı içeren bir uç (prob) önceden açılmış kuyu tabanından itibaren tabii zemin içine itilmekte ve cisim dalgalarının kaynaktan dikey olarak alıcıya geliş süreleri ölçülmektedir. Zeminin örselenmemesi, deney düzeninin hasar görmemesi ve sistemin itilebilmesi için bu deney yönteminin yumuşak ve ince daneli zeminlerde kullanımı gerekmektedir. Yöntem açık denizdibi zeminlerin dinamik özellikleri belirlemek üzere geliştirilmiştir (Stokoe ve diğ., 1978).



Şekil 3.3. Asılı PS Sistemi (Suspension PS-Logging System) (OYO, Model-3331)

Dalga hızı profilini uygun olarak elde edebilmek için bu yöntemlerin ilgili derinliğe kadar çeşitli ölçüm aralıklarda tekrarlanması gerekmektedir. Ölçümler sonucunda dalgaların varış zamanları belirlenmekte ve dalga yayılma mesafeleri dikkate alınarak hızlar hesaplanmaktadır.

3.2.1.2. Yüzey sismik yöntemleri

Yüzey sismik yöntemlerinde kaynak ve alıcılar zemin yüzeyinde bulunmaktadır. Bu yöntemlerin uygulamalarında sondaj kuyusu gerekmemesi ekonomik açıdan en büyük üstünlükleridir. Yüzey sismik yöntemler arasında şunları sayabiliriz.

- 1) Yüzey Kırılma
- 2) Yüzey Yansıma
- 3) Harmonik Rayleigh (Steady-State, Kararlı Durum)
- 4) Yüzey Dalgalarının Spektral Analizi (SASW)

Yüzey kırılma yöntemi, yüzeydeki bir kaynaktan çıkan cisim dalgalarının lineer düzendeki alıcılara varış zamanını ölçmekten ibarettir (Redpath, 1973). Sismik dalganın en kısa yolu, dalganın daha alt tabakalardaki yayılma hızına bağlıdır ve alıcılara ilk dalga bu yoldan ulaşır. P-dalgası için en çok kullanılan kaynak patlayıcı tipte olanlardır. S-dalgası üretmekte yönlendirilmiş mekanik kaynaklar kullanılmaktadır. S-dalgası, P-dalgasından daha hızlı sönümlendiğinden etki derinliği sınırlıdır. Ayrıca zemin içine büyük miktarlarda kayma enerjisi verebilmek zordur. Ölçümlerde sinyal biriktirmeli ve yükselticili kayıt cihazları ve tekrarlı tipte darbe kaynakları kullanılarak bu zorluk bir dereceye kadar yenilebilmektedir. Yüzey kırılma yönteminin kullanımındaki sınırlamalar ise şöyle sıralanabilir.

- a) Uygulama için oldukça geniş bir alan gereklidir. Yöntemde alıcı aralıkları, ilgilenilen derinliğin yaklaşık üç katı olmalıdır.
- b) Derinlik ile verilerin kalitesinde azalma olmaktadır.
- c) Yüksek hızlı tabakalar arasında yer alan düşük hızlı tabakaların belirlenmesi oldukça zordur.

- d) Tabakaların hızı bir ortalama değer olarak belirlenebildiğinden detaylı hız profili sağlanamaz. Bu yüzden sonuçları dinamik analizde yetersiz kalmaktadır.

Yöntemin esas amacı, yer altı su seviyesinin ve ana kaya derinliğinin bulunabilmesidir. Ayrıca çok geniş alanlarda uygulama kolaylığı açısından fizibilite çalışmalarında ve iş planlamasında bir ön bilgi edinilmesi amacı ile de kullanılmaktadır.

Kavram olarak yüzey kırılmaya benzeyen yüzey yansıma yönteminde alıcılar kaynağa yakındır. Yöntemde ilk varışlardan direkt dalgaların ölçüldüğü, sonraki varışların iki tabakanın arakesitinden yansıyarak gelen dalgalar olduğu kabul edilmektedir (Born, 1978). Bu yöntem petrol aramacılığında kullanılan ilk sismik yöntemdir. P-dalgası ölçümleri yapıldığından dinamik analizde çok fazla kullanım alanı olmamaktadır.

Harmonik dalga (Steady-state) yönteminde zaman yerine bir vibratörden üretilen ve sinüzoidal olarak değişen Rayleigh (R) dalgasının farklı frekanslarda dalga boyları ölçülmektedir. Yöntem zemin tabakalarının ve asfalt sistemlerinin elastik özelliklerini ve kalınlıklarını belirlemek amacı ile geliştirilmiştir (Janes, 1958; Fry, 1963; Maxwell ve Fry, 1967; Cunny ve Fry, 1973). Yüzeye yerleştirilen bir vibratörden belli frekansta devamlı üretilen dalgalar düşey alıcılar yardımı ile izlenmekte ve ardışık iki alıcı arası mesafe dalga boyuna eşit kabul edilmektedir. R-dalga hızı frekans ve dalga boyundan;

$$V_R = f \cdot L_R \quad (3.1)$$

bağıntısı ile hesaplanmaktadır. Burada f frekansı, L_R dalga boyunu göstermektedir. Bu işlem değişik frekans değerlerinde tekrarlanarak dispersiyon eğrisi adı verilen hız-frekans (veya hız-dalga boyu) eğrisi çizilir. S-dalga hızı, Poisson oranına bağlı olarak R-dalga hızına çok yakın değerdedir. Teorik olarak, Poisson oranının 0.25 ve 0.50 değerlerinde R-dalgasından hesaplanan S-dalga hızında yaklaşık %5 civarında farklılık olmaktadır. Bu yüzden birçok pratik amaçlarda R-dalgasının S-dalga hızına eşit olduğu kabul edilmekte veya ortalama olarak

$$V_s = V_R / 0.92 \quad (3.2)$$

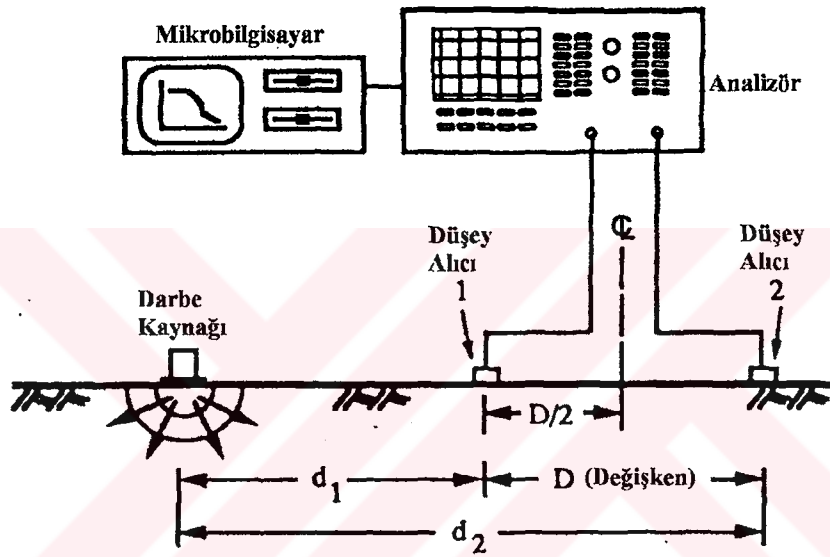
değeri kullanılmakta ve S-dalga hızı profili amprik olarak R dalgasından elde edilebilmektedir. R-dalgasının efektif etki derinliği dalga boyunun $1/2-1/3$ 'ü kadardır. Elektromanyetik vibratörler, mekanik veya eksantrik-ağırlık çeşitli frekanslarda dalga üretiminde kullanılabilir. Elektromanyetikler yüksek frekanslıdır ($>30\text{Hz}$) ve yüzeye yakın ölçümlerde, mekanik tipteki düşük frekanslı ($<5-30\text{Hz}$) vibratörler ise daha derin incelemelerde kullanılmaktadır. Daha derinlerde inceleme için büyük vibratörlere ihtiyaç olması yöntemin kullanımını zorlaştırmakta, derinlik arttıkça doğruluk ve tanımlama azalmaktadır.

Dispersiyon Rayleigh olarak da bilinen SASW yöntemi de diğerine benzemektedir. Tek farkı kullanılan kaynağın sabit frekanslı bir vibratör değil, geniş genlikli bir düşey darbe olmasıdır (Ballard ve Chang, 1973). Nazarian ve Stokoe (1986, 1987), SASW yöntemini geoteknik mühendisliğine uygulanmasında teori ve uygulama konularında uygun yöntemler geliştirmişlerdir. Şekil 3.4'de şematik olarak verilen bu yöntemin uygulamasında, alıcılar sabit bir orta noktadan itibaren lineer düzende bir önceki açıklığın iki katı mesafede tutulmaktadır. Darbe etkisiyle yaratılan yüzey dalga alanı geniş frekansları içermektedir. R-dalgasının dispersiyon özelliği dolayısı ile her frekans farklı hızda yayılmakta ve kaynaktan bilinen iki mesafede alınan yüzey dalgası kayıtlarından, faz farkları kullanılarak frekans-hız ilişkisi saptanmaktadır. Bunun için zaman kayıtları Hızlı Fourier Dönüşümleri (FFT) yardımı ile frekans bağımlı kayıtlara dönüştürülüp her frekans için iki sinyal arasındaki faz farkından aşağıdaki bağıntılar ile ara zamanlar (interval time) ve hızlar bulunarak dispersiyon eğrileri elde edilmektedir (Nazarian ve Desai, 1993).

$$t = \phi / 2\pi f = \phi / 360f \quad (3.3)$$

$$V = d/t \quad (3.4)$$

Bağıntılardaki ϕ iki alıcıda kaydedilen dalgalar arasındaki faz farkı, f frekans, d alıcılar arası mesafe, t alıcılar arası zamanı göstermektedir. Başlangıç değerleri olarak seçilen malzeme özellikleri ve tabaka kalınlıkları ile bir model oluşturularak teorik bir dispersiyon eğrisi elde edilir. Bu teorik eğri ile arazi ölçümlerinden elde edilen eğri üst üste çakışınca kadar, tabaka kalınlıkları ve bunlara ait özellikler iterasyonla değiştirilmektedir. Bu yaklaşım SASW olarak tanımlanmaktadır (Stokoe ve Nazarian, 1983; Nazarian 1984). Verilerin analizi biraz karmaşıktır ancak



Şekil 3.4. SASW Yöntemi Arazi Uygulaması (Nazarian ve Stokoe, 1986)

arazide taşınabilir FFT analizörlerin varlığı bu işlemleri kolaylaştırmaktadır. Uygulamaları daha kısa zamanda ve daha dar alanlarda yapılabilmekte, diğer yöntemlerde kullanılan kayıt sistemleri bunda da kullanılabilir. Alıcı açıklığının ilgilenilen derinliğin en az 2 katı olması gereken harmonik yöntemi uygulamak için son derece geniş boş alanlar gerekmektedir. SASW yönteminde ise alıcı açıklığının ilgilenilen derinliğin yarısı olması yeterlidir. Her ikisinde veri kalitesi derinlikle azalmakta olduğu gerçeği yöntemlerin sınırlayıcı yanlarıdır (Heisey, 1981). Yaklaşık 15 m derinliklerde çabuk ve güvenilir sonuçlar verdiğinden ve sondaj kuyusu gerektirmedikinden her türlü zeminlerde uygulanabilmekte, sonuçları örneğin sıvılaşma analizlerinde kullanılmaktadır (Stokoe ve diğ., 1989).

3.2.2. Yüksek Genlikli Deformasyon Yöntemleri

Önceki bölümlerde anlatılan arazi sismik yöntemleri sadece düşük deformasyon genliklerinde (sınır kayma deformasyonunun altında) dinamik zemin özelliklerini bulmada kullanılabilmektedir. Kayma modülünün deformasyon ile değişimini belirlemek için bu yöntemlerden elde edilen sonuçları laboratuvar deneyleri ile birlikte kullanmak gerekmektedir. Bununla birlikte arazide deformasyon bağımlı zemin özelliklerini bulmada geliştirilmiş teknikler de mevcuttur. Aslında bu yöntemler Karşıt Kuyu'nun geliştirilmiş şekilleridir ve en önemli farkları dalga üretilmesinde kullanılan kaynaklardır. Bunlar arazi impuls deneyi (in-situ impulse test) (Troncoso ve diğ., 1975) ve silindirik arazi (cylindrical in-situ test, CIST) (Higgins, 1978) deneyleridir. Deformasyon genliği alıcı mesafelerinden ve kaynaktan ayarlanmaktadır. Bunun için oldukça ağır tokmaklar kullanılmaktadır ve deneylerde %10-1 deformasyon seviyelerine ulaşılabilir. Bunların kullanımı oldukça pahalıdır ve önemli derecede teknik tecrübe gerektirmektedir, bu yüzden gelişmeleri ve kullanımları oldukça sınırlı kalmıştır.

3.3. KARŞIT KUYU VE AŞAĞI KUYU SİSMİK YÖNTEMLERİ

Mühendislik uygulamalarında düşük deformasyon genliklerinde sismik dalga hızları ölçülerek dinamik zemin özelliklerinin arazi deneyleri ile bulunmasında yaygın olarak kullanılan teknikler Karşıt Kuyu (Cross-Hole)

ve Aşağı Kuyu (Down-Hole) yöntemleridir. Kuyu içi sismik yöntemler olarak bilinen bu deney teknikleri, bir noktadan üretilen dalganın bilinen mesafelerde bir yada daha fazla alıcıya ulaşması için gerekli zamanın bulunmasını içermektedir (Patel, 1981; Hoar, 1982). Karşıt Kuyu yönteminde, zemin içinde bir kaynaktan üretilen sismik dalganın aynı derinlikte alıcılara yatay olarak ulaşması için geçen süre ölçülmekte ve yatay uzaklıklar belirlendikten sonra dalga hızları bulunmaktadır. Aşağı Kuyu yönteminde ise zemin yüzeyindeki bir kaynaktan üretilen dalganın kuyu içinde bilinen derinlikteki alıcı veya alıcılara yaklaşık dikey olarak gelmesi için gerekli zaman ölçülmekte, direkt zaman-derinlik grafiğinden hızlar hesaplanmaktadır.

Her iki yöntemin de arazide kayma ve basınç dalgası hızlarının ölçümünde kullanılabilmesi için; a) düşey doğrultuda açılmış, kaplaması ve enjeksiyonu yapılmış sondaj kuyusu, b) dalga üretmek için kullanılacak tekrarlanabilir ve tersine çevrilebilir mekanik tipte bir kaynak, c) uygun yerleşimde ve kuyu duvarlarına tutturulmuş, uygun frekans davranışında alıcı veya alıcılar, d) sürekli kayıt yapabilen ve en az iki kanallı bir kaydedici, e) doğru zamanlama için tetikleme (trigger) sistemi f) deneyimli arazi personeli gerekmektedir. Karşıt Kuyu yönteminin uygulanabilmesi için uygun mesafelerde açılmış biri kaynak diğeri alıcı için en az iki sondaj kuyusuna ihtiyaç olduğu açıktır.

Mühendislik uygulamalarında zemin dinamik özelliklerinin arazide belirlenmesi için yaygın olarak kullanılan Karşıt Kuyu ve Aşağı Kuyu yöntemleri ile P ve S-dalgası hızının derinlikle değişimi daha detaylı bir şekilde saptanabilmektedir. Karşıt Kuyu ile diğerine göre daha detaylı hız profiline ulaşılması nedeni ile bu yöntem üzerinde oldukça yoğun çalışmalar ve araştırmalar yürütülmüştür.

Dinamik analiz için kayma modülünün önemi ve P-dalgasının yeraltı suyundan etkilenmesi yüzünden Karşıt Kuyu yönteminin asıl amacı, S-dalgasının üretilmesi ve ölçülmesi olmuştur. Ana kaya derinliğinin bulunması, Poisson oranının hesaplanması, tabakalaşmanın belirlenmesi ve doygun zeminlerde yeraltı su seviyesinin tesbit edilmesi gibi amaçlar için P-dalga hızı da sık sık ölçülmektedir. Ayrıca yeraltı su seviyesinin altında yapılan ölçümlerde, alıcı-kaynak aralığı, kullanılan kayıt sisteminin tetikleme ve zaman doğruluğu gibi kalibrasyon aşamasında P-dalga hızının

ölçülmesi oldukça yararlı olmaktadır. YASS altında zemin-su karışımı ortamda P-dalgasının 1400 ile 2000 m/sn arasında değişen tipik hız değerleri vardır.

Bu yöntemlerin araştırma ve pratik uygulamalarında önceleri önemli farklılıklar bulunmakta ve en önemli farklılık kullanılan kaynak tipinde ortaya çıkmaktadır. Deneylerdeki kuyu tipinde, alıcı aralığı ve sayısında, alıcıların kuyu içinde tutturulma yöntemlerinde ve kayıt sisteminde de standart bir uygulama yoktur. Patlayıcılar, mekanik kaynaklar ve harmonik dalgalar üreten titreşim kaynakları bu yöntemlerde kaynak olarak kullanılmıştır. Üretilen dalgaların gözlenmesinde alıcı olarak en çok hız transdüserleri kullanılmıştır. Günümüzde ise aynı koruyucu içinde ortagonal düzende bir düşey, iki yatay bileşenden oluşan alıcılar tercih edilmektedir. Alıcıların kuyu içinde tutturulması, yay veya pünomatik olarak kuyu duvarına itilmesi, bir takoz yardımı ile kuyu duvarına kısıtılması ve kuyu tabanından zemine itilmesi şeklinde yapılmıştır. Kuyular genelde plastik, alüminyum ve çelik malzeme ile kaplanır ve zeminle arası doldurulur. Genel olarak Karşıt Kuyu yönteminde yapılan tüm uygulamalardan, mekanik tipte kaynak ve düşey konumda alıcı kullanılmasının ve en uzak alıcı kuyusunun kaynağa uzaklığının 6-9 m olması gerektiği sonucu çıkmaktadır. Aşağı Kuyu'da ise alıcı kuyusundan 1.5-9 m uzakta tersine çevrilebilen bir yüzey kaynağı ve doğru yönlenmiş alıcıların kullanılması gerekmektedir. Karşıt Kuyu yönteminde uygulama sırasındaki hatalar, alınan kayıtların yorumlanmasına etkimekte ve gerçek hız değerleri bulunamamaktadır. Özellikle ara zamanların kullanılması durumunda kuyu mesafelerinin çok fazla olması, ölçüm aralıklarının düşük hızlı ince tabakaların farkına varılamayacak kadar çok fazla alınması ve kuyuların dikey olarak kabul edilmesi bu hataları arttırmaktadır (Butler ve Curra, 1981). Ayrıca, tanımlanabilir bir dalga üretecek kaynak kullanımı, alıcının uygun yerleşimi ve sabitlenmesi, kayıt sistemi ve tetikleme uygun olması veri kalitesinin artmasını sağlamaktadır (Hoar, 1982).

Karşıt Kuyu ve Aşağı Kuyu yöntemleri mühendislikte düşük deformasyon genliklerinde dinamik zemin özelliklerini bulmada kullanılan ve sonuçlarına en fazla güvenilen yöntemlerdir. Dalga üretmekte kullanılan kaynak tipi, alıcıların tabii frekansları ve kuyu içinde sabitleme yöntemleri, kuyuların açılma ve kaplama yöntemleri, kuyular arası mesafe, kayıt ve tetikleme sistemi, veri toplama ve analiz yöntemleri bu deneylere etki eden

değişkenlerdir. Uygulamada bu değişkenlerin standart olmaması, sonuçları etkilemekte ve bulunan özelliklerin gerçek değerlerinden farklı olmasına sebep teşkil etmektedir. Sözü edilen değişkenler üzerinde çeşitli araştırmacılar tarafından yapılan çalışmalar ve sonuçları aşağıda özetlenmiştir.

3.3.1. Karşıt Kuyu Sismik Yöntemi

Karşıt Kuyu sismik yönteminde, bir kaynaktan üretilen kayma ve basınç dalgalarının zemin içinde aynı derinlikte bir veya daha fazla noktaya yatay olarak ulaşması için gereken zaman ölçülmektedir. Elde edilen kayıtların yorumu ile bulunan varış zamanları ve kaynak ile alıcı arası gerçek yatay mesafelerin belirlenmesi ile hızlar hesaplanmaktadır. Aşağı ve Karşıt Kuyu gibi sismik metodlar kullanımları sırasında zeminde yarattıkları deformasyon seviyeleri bakımından, küçük deformasyon genlikli ölçümler olmakta ve genellikle arazide en büyük elastik modülleri (G_{maks}) saptamakta kullanılmaktadır. Karşıt Kuyu ve Aşağı Kuyu deneylerini uygulamak için arazide yapılması gereken işlemler ve ölçümler sırasında alınan kayıtların analiz yöntemleri ile ilgili genel bilgiler aşağıda verilmiştir.

3.3.1.1. Karşıt Kuyu kaynakları

Karşıt kuyu deneyinde sismik dalga üretmekte kullanılan kaynak üzerinde farklı araştırmalar yapılmış ve hemen hemen aynı sonuçlara ulaşılmıştır (Stokoe ve Abdel-razzak, 1975; McLamore ve diğ., 1978). Araştırmacılar kuyu tabanında zemine gömülmüş açık uçlu bir tüp veya numune alıcıya bağlanmış bir çubuk sisteminin üst başlığına SPT çekici veya bir el çekici ile düşey olarak vurularak dalga üretilmesini sağladılar. Bu durumda SPT çekici daha büyük enerji açığa çıkardığından oluşan dalgaların gözlenmesinde bir zorluk olmamıştır. Stokoe ve Abdel-razzak (1975) yerinde yapılan ve arkası kum ile doldurulmuş kaplamanın tepesine vurarak, tanımlanabilir polarize olmuş kayma dalgası (SV) üretilebileceğini gösterdiler. Bu halde P-dalgası kaplamanın dibinden itibaren yayılmaya başlamaktadır.

McLamore ve diğ. (1978), kapsül ve az miktarda dinamitten oluşan patlayıcı kaynaklar ile zemin içine giren bir çubuk üzerine düşey hareket eden bir

çekicinin düşürülmesinden ibaret mekanik kaynakları karşılaştırdılar. Bu patlayıcı ve mekanik kaynak tiplerini kullanarak elde edilen S ve P-dalga hızlarının aynı olmasına karşılık, tanımlanabilme açısından S-dalgası için mekanik kaynaklar, P-dalgası için patlayıcı kaynaklar daha uygun olduğunu gösterdiler. Patlayıcı kaynaklarda sinyal-gürültü oranı (signal-to-noise ratio, SNR) P-dalgası için 10, S-dalgası için 1-2 arasında olurken mekanik kaynaklarda tam tersi meydana gelmekte, S-dalgasında 10 civarında iken P-dalgasında 1 den daha az olmaktadır. McLamore ayrıca, her iki kaynağın kullanılmasında P-dalga frekansı yaklaşık aynı kalırken, S-dalga frekansı patlayıcı kaynaklarda diğerine göre biraz daha fazla olduğunu göstermiştir.

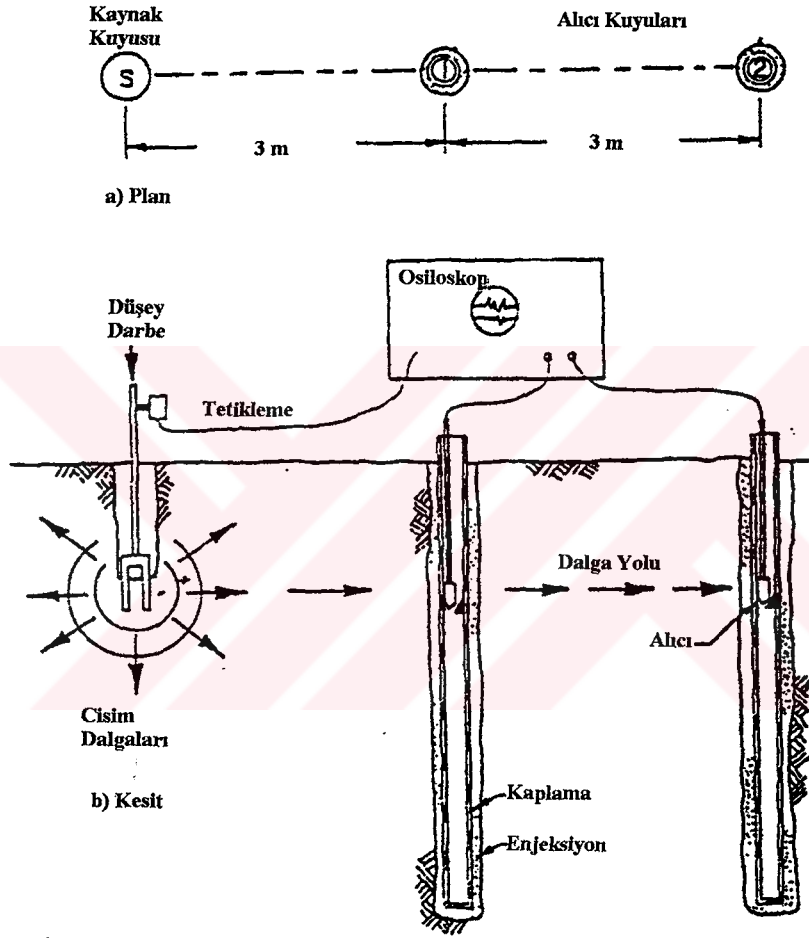
Önceden açılmış kuyularda seçilen derinlikle tersine çevrilebilir düşey darbeleri mekanik kuyu içi kaynağın kullanımı fikri Anderson ve Wood (1975) ve Auld (1975) tarafından ortaya atılmıştır. Bu tip kaynaklar kolay tanınan S ve P-dalgası üretmekte diğerlerine göre kullanım kolaylığına sahiptirler. Karşıt Kuyu uygulamalarında kullanılan bu mekanik tipteki kaynaklar, genişleyen kanatları ile kuyu duvarına sıkıca temas etmekte ve düşey yönde hareket eden ağırlığın üst yada alt başlığa vurdurulması ile dalga üretmektedir. Kaynak tersine çevrilebilir ve istenildiği kadar tekrarlanabilir niteliktedir (Edelmann, 1985).

3.3.1.2. Arazi işlemleri

Zemin kesitinde yer alan tabaka özellikleri Karşıt Kuyu yöntemi ile diğerine göre daha detaylı olarak elde edilebilmekte, ancak bu yöntemin uygulanabilmesi için belli aralıklarda en az iki tercihen üç sondaj kuyusu gerekmektedir. Mühendislik uygulamalarında başarılı bir ölçüm için kuyu aralıklarının 2.5 ile 5 m arasında olması tavsiye edilmektedir. (Hoar ve Stokoe, 1980). Zemin kesitinde bulunan tabaka cinslerinin ve kalınlıklarının saptanması için deney kuyularının açılması sırasında sondaj loglarının tutulması oldukça önemlidir. Kuyu çapları, örselenme gibi ölçümleri etkileyebilecek faktörleri en aza indirmek amacıyla küçük tutulmalıdır. Uygulamada kullanılan tipik kuyu çapları 10-15 cm civarındadır. Açılan kuyuların kaplanması için iç çapı 8-10 cm olan plastik (PVC) ve alüminyum borular uygun olmaktadır. Bununla birlikte deney kuyularının kaplanmış durumdaki çapları, uygulama sırasında kullanılacak alıcı ve dalga üretme çekici gibi elemanların boyutlarına bağlı olmaktadır. Kaplama zemin arasında oluşan boşluk zayıf çimento su enjeksiyonu ile

doldurulur. Bunun için ağırlıkça iki kısım su, bir kısım çimento ile hazırlanan karışım bu işlem için uygun olmaktadır. Enjeksiyon malzemesinin yoğunluğu, mevcut zeminin yoğunluğunda olması kuşkusuz istenilen bir durumdur. Böylece kaplama ile zemin arasında temas sağlanmış ve kuyular deney yapılabilir hale getirilmiş olmaktadır. Sismik dalga hızlarının doğru değerlerinin bulunmasında ölçümlerin yapıldığı derinliklerde kaynak ve alıcılar arasındaki gerçek yatay uzaklık için açılan kuyuların düşeyden sapmaları da bilinmelidir.

Dalga üretmek için kullanılacak kaynak ve alıcı kuyularda ilk ölçüm derinliğine indirilerek bir darbe ile Karşıt Kuyu deneyine başlanır. Genelde üç bileşenli olan alıcılar kuyu duvarlarına uygun yöntemle tutturulmalıdır (McLamore ve diğ., 1978; Statton ve diğ., 1978). Kaynakta bir başka alıcı daha vardır ve bu alıcı kayıt sisteminin tetikleme mekanizmasına bağlı durumdadır. İlk darbe ile kaynaktaki alıcının, tetikleme sistemine gönderdiği sinyal ile kayıt başlatılmaktadır. Bu işlemler tanımlanabilir bir dalga formuna ulaşılan kadar tekrarlanmakta ve bir sonraki ölçüm derinliğine geçilmektedir. Arazide uygulama sırasında dalga üretmek için kullanılan kaynak, Karşıt Kuyu yönteminin önemli bir parçasını teşkil etmektedir. Önceleri kaynak olarak bilinen Standart Penetrasyon Deneyi (SPT) numune alıcısı kullanılmıştır. Bu durumda kaynak kuyusunun ilk ölçüm derinliğinden itibaren kademeli bir şekilde açılması gerekmektedir. Arazide mühendislik uygulamalarında Stokoe ve Hoar (1978) tarafından kullanılan böyle bir deney düzeni Şekil 3.5'de verilmiştir. Kaynak için kullanılan kuyu ilk ölçüm derinliğinde açıldıktan sonra SPT deney düzeneği kuyu içine indirilmekte, çekicinin üst başlığa düşürülmesi ile oluşan dalgalar kaydedilmekte ve sonra kaynak kuyusu bir sonraki derinliğe kadar tekrar açılarak deney yapılmaktadır. Bu yöntemle dalga üretmek ve her ölçüm seviyesinde kuyuyu yeniden delmek uygulama sırasında pratik olmamaktadır. Ayrıca bu sistem ile özellikle kayma dalgasının belirlenmesinde yararlı olan kaynağın tersine çevrilebilmesi mümkün olmamakta, her darbe sonrası SPT numune alıcısı kuyu tabanına gömülmemekte ve kaynak-alıcı seviyeleri arasında farklılık ortaya çıkmaktadır. Durgunoğlu ve diğ. (1980) ise bu deneyi, tamamı açılmış kuyuları istenilen seviyede kum ile doldurarak, aşağıdan yukarıya doğru uygulamışlardır. İstenilen derinlikte açılmış ve uygun şekilde kaplanarak enjeksiyonu yapılmış kuyular içinde sismik dalgalar üretmekte kullanılan, tersine çevrilebilen ve tekrarlanabilen mekanik tipte kuyu içi çekiçlerinin



Şekil 3.5. Karşıt Kuyu Deney Düzeni (Stokoe ve Hoar, 1980)

geliştirilmesi ile bu sorunların üstesinden gelinmiştir (Stokoe ve diğ., 1985). Bu tür mekanik çekiç, genleşebilen mekanizması yardımıyla tamamı açılmış ve kaplamalı kuyularda, seçilen derinlikte kuyu duvarına sabitlenerek sismik dalga üretilmesinde kullanılmaktadır.

Bir kaynaktan açığa çıkarılan ve ortam içinde yayılan sismik dalgaların cinsleri, parçacık hareket yönü dalga yayılma yönü ile karşılaştırıldığında belli olmaktadır. Dalga yayılma yönü parçacık hareketi ile aynı olması durumunda P-dalgası, bu iki yönün birbirine dik olması halinde ise yatay ve düşey yönde polarize olabilen S-dalgası oluşmaktadır. Bu nedenle başarılı bir ölçüm yapılabilmesi, alıcıların kuyu içinde uygun yerleşimde ve kuyu duvarlarına tutturulmuş olmasını gerektirmektedir (Stokoe ve Hoar, 1978; Hoar, 1982). Alıcılar, önceleri kuyu içinde bir kama yardımı ile sıkıştırılarak sabit tutulurken, günümüzde kullanılan alıcıların genleşebilen elemanları mevcuttur. Kayıtlar bir osiloskop vasıtası ile hassas yüzeyli fotoğraf kağıtlarına alınırken, gelişen teknoloji ile dijital kayıt sistemlerinin bilgisayar destekli kullanımına imkan tanımıştır.

3.3.1.3. Alınan kayıtların analizi

Bir kaynaktan üretilen dalgaların aynı seviyedeki alıcılara yatay olarak ulaşması için gerekli zamanın ölçüldüğü Karşıt Kuyu yönteminde hızlar, alınan kayıtlardan dalga varışlarının belirlenmesi ile mümkün olmaktadır. Alınan kayıtların analizi görsel ve nümerik (dijital) olarak yapılmaktadır.

Görsel Analiz

Görsel analiz, kayıtlara bakarak sinyallerin karakteristik noktalarını tanımlamayı ve dalga geliş zamanlarını bulmayı içermektedir. Aynı kaynaktan üretilen ve eş zamanlı olarak kaydedilmiş dalga formları Şekil 3.6'da görülmektedir. Arazi sismik yöntemleri ile alınan dalga kayıtlarında tipik üç bölge bulunmaktadır.

İlk bölüm kayıtların başlangıcındaki düz kısımdır ve bu bölge dalganın üretilmiş olduğunu ancak henüz alıcılara ulaşmadığını göstermektedir. Bu sakin bölgeden sonra dalgaların ilk ve ikinci gelişler arasında kalan, diğer kısımlarla karşılaştırıldığında daha küçük genliklere sahip olan ikinci bölge başlamaktadır. Kayıtlara ilk gelen titreşim basınç dalgası, genliği büyük olan ilk dalga ise kayma dalgası ilk varışlarına işaret etmektedir. Bu

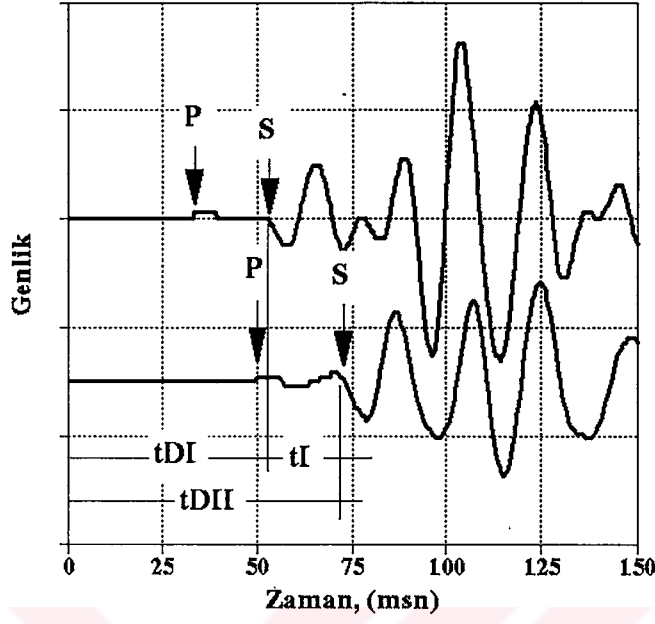
dalgalar şekilde sırasıyla P ve S ile gösterilmiştir. Dalga kayıtlarındaki üçüncü bölge ise daha büyük genlikli ve düşük frekanslı ikinci varışları içermekte ve S-dalgasını göstermektedir. Ayrıca Şekil 3.7'de görüldüğü gibi kayıtların aynı ölçüm derinliğinde kaynağın tersine çevrilerek alınması, S-dalgasını tanımlamada kolaylık sağlamaktadır. Bu durumda P-dalgası aynı kalırken, S-dalgası yön değiştirerek polarize olmaktadır (Stokoe ve Woods, 1972; Hoar, 1982)).

Karşıt Kuyu yönteminde bir kaynaktan üretilen dalgaların, bilinen mesafelerdeki alıcılara gelmesi için gereken zamanın bulunması esas amacı teşkil etmektedir. Alınan dalga kayıtlarından iki türlü zaman belirlemek mümkün olmaktadır (İyisan ve Ansal, 1991).

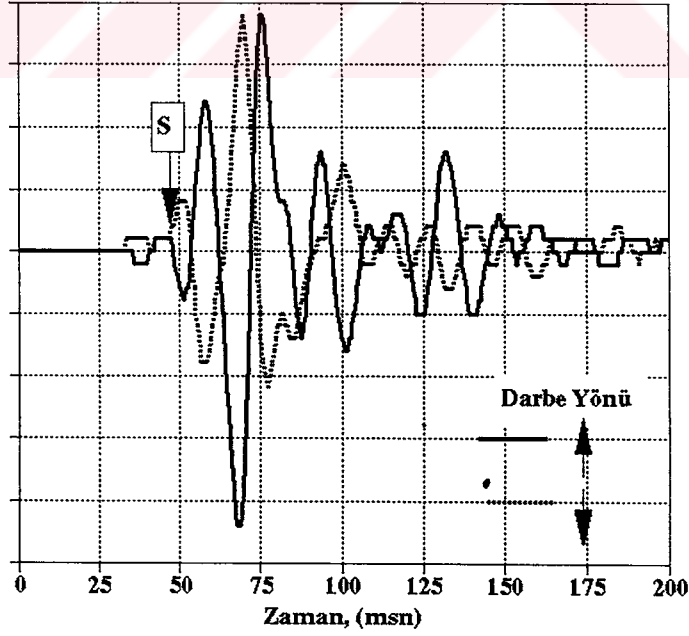
I) Varış (direkt) zamanı: Dalganın kaynaktan alıcılara ulaşması için geçen süreye eşit olan varış (direkt) zamanıdır. Varış zamanı, kayıtlardaki P ve S-dalgası için karakteristik noktalar ile tetikleme zamanı belirlediği başlangıç zamanından bulunmaktadır. (t_{DI} , t_{DII}).

II) Ara (interval) zaman: Dalganın alıcılar arasındaki hareket zamanına karşı gelmekte ve varış zamanları arasındaki farka eşit olmaktadır. ($t_I = t_{DII} - t_{DI}$).

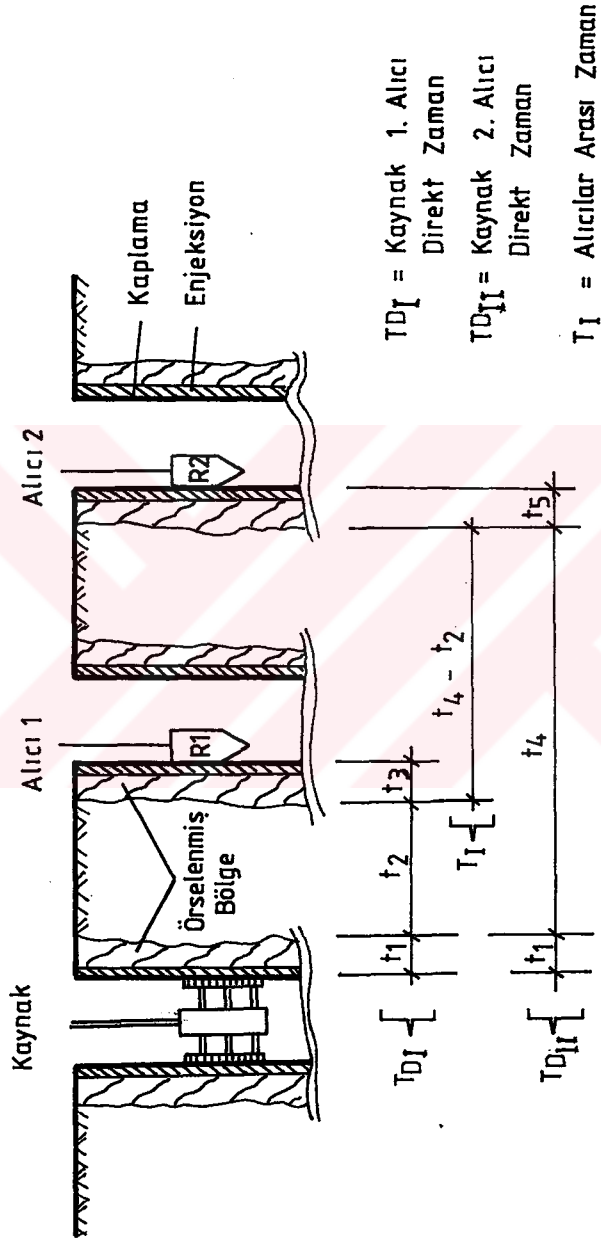
Ara zaman ölçümleri, aynı kaynaktan üretilen dalganın iki farklı noktada aynı anda kaydedilmesini gerektirmektedir. Bu zaman, dalganın iki alıcı arasındaki mesafede hareketini gösterdiğinden, dalga varış zamanlarının bilinmesine gerek yoktur. Bu yüzden tetikleme sisteminin doğruluğu bu tür ölçümlerde aranmaz. Karşıt Kuyu ölçümlerine etki eden, kuyu etrafındaki örselenmiş bölge, kaplama ve enjeksiyon etkilerini de azaltmaktadır. Bir Karşıt Kuyu uygulamasında kaynak ile alıcılar arasında ölçülen varış zamanları Şekil 3.8'de gösterildiği gibi bileşenlere ayrılabilir. t_1 zamanı, tetikleme hatalarını da içeren ve dalganın örselenmiş bölgedeki yayılma süresine karşı gelmektedir. t_2 ve t_4 , dalganın tabii zeminde sırası ile yakın ve uzak alıcıya ulaşma süresidir. t_5 ise alıcı kuyusundaki kaplama ve enjeksiyondan oluşan örselenmiş kesimdeki dalga hareket zamanıdır. Kuyuların aynı olması durumunda $t_5 = t_3$ dır. Ara zaman dalganın iki alıcıya varış süreleri farkı olduğundan bu örnekteki gibi $t_I = t_4 - t_2$ ile hesaplanmakta ve bu zamanlar da dalganın tabii zemin içinde yayılmasını içermektedir.



Şekil 3.6. Bir Karşıt Kuyu Dalga Kaydı



Şekil 3.7. Enerjinin Tersine Çevrilmesi ile S-Dalgasının Yön Değiştirmesi



Şekil 3.8. Karşıt Kuyu Yönteminde Direkt ve Ara Zamanlar

Nümerik (Dijital) Analiz

İki alıcıda aynı anda kaydedilen sismik dalgalardan ara (interval) zamanların bulunmasında diğer bir yöntem karşıt korelasyondur (cross-correlation). $x(t)$ ve $y(t)$ gibi iki benzer dalganın karşıt korelasyonu aşağıdaki ifade ile verilmektedir (Mancuso ve diğ., 1989).

$$CC(\tau) = \lim_{T \rightarrow \infty} 1/T \int x(t) y(t+\tau) dt \quad (3.5)$$

Burada T kayıt süresi, τ iki dalga arasındaki gecikme zamanıdır. Karşıt korelasyon aynı kaynaktan iki ayrı noktada kaydedilen iki dalga formun üst üste çakıştırılması yani süperpozisyonu olarak düşünülebilir. τ kadar geciken ikinci dalganın her noktasının, ilk dalga ile çarpımların toplamı karşıt korelasyonun bir değerini vermektedir. Bu işlem diğer gecikme zamanlarında tekrarlanırsa karşıt korelasyon fonksiyonu tanımlanmış olmakta ve bu fonksiyon Şekil 3.9'da görüldüğü gibi bir maksimum değer sergilemektedir. Maksimum değere karşı gelen süre ara zamana eşit olmaktadır.

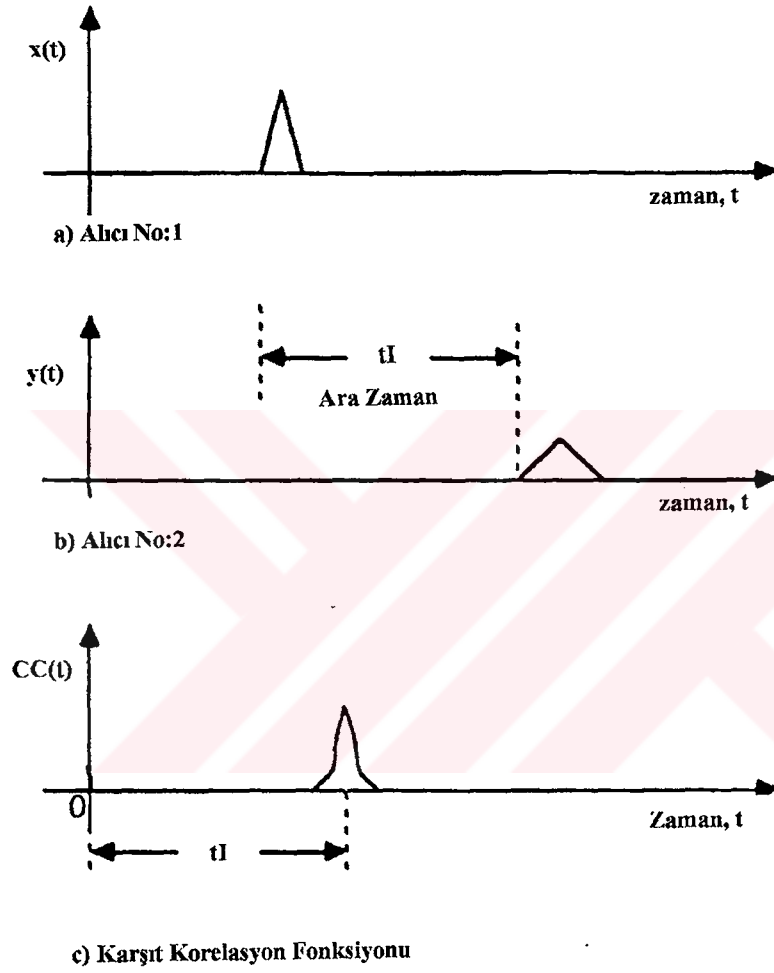
Nümerik analiz yöntemleri kaydedilen dalgaların Fourier Dönüşümlerine dayanmaktadır. Bir zaman kaydı aynı anda frekans bileşenlerini de içermekte ve Fourier Dönüşümleri ile kayıtlar frekans bileşenlerine ayrılabilir. Böylece gelişigüzel karmaşık bir dalga formu, uygun genlik ve frekanslarda n tane harmonik dalga toplamı olarak gösterilebilmektedir. Zaman kayıtları bir kere, Fourier serileri ile frekans hakim kayıtlara dönüştürülürse diğer işlemler kolayca yapılarak ara zamanlar ve dalga hızları bulunabilmektedir. Zamana bağımlı bir $x(t)$ fonksiyonu için Fourier serilerinin matematiksel ifadesi;

$$x(t) = A_0/2 + \sum_{n=1}^{\infty} [A_n \cos(nw_0t) + B_n \sin(nw_0t)] \quad (3.6)$$

$$A_n = 2/T \int x(t) \cos(nw_0t) dt \quad (3.7)$$

$$B_n = 2/T \int x(t) \sin(nw_0t) dt \quad (3.8)$$

bağıntıları ile verilmektedir (Nazarian ve Stokoe, 1985). Burada A_n ve B_n Fourier katsayıları, n bir tamsayı, w_0 açısal frekans ($w_0 = 2\pi f$), t zaman değişkeni, T periyot olmaktadır. Her frekansta yani n 'in her değerinde Fourier serisi,



Şekil 3.9. İki Ayrı Alıcıda Alınan Kayıtların Karşıt Korelasyonu (Mok, 1987)

$$C_n = (A_n^2 + B_n^2)^{\frac{1}{2}} \quad (3.9)$$

$$\Phi = \tan^{-1}(B_n/A_n) \quad (3.10)$$

ile verilen ayrı manyetüd (C_n) ve faz açısına (Φ) sahip olmaktadır. Manyetüt fonksiyonu C_n 'nin frekansa göre değişimine Lineer Spektrum ve $x(t)$ fonksiyonunun Fourier Dönüşümü adı verilmekte ve

$$LS_x(f) = FT[x(t)] \quad (3.11)$$

şeklinde gösterilmektedir. Bir $x(t)$ fonksiyonunun Fourier Dönüşümü $X(f)$ kısaca aşağıdaki bağıtı ile de gösterilmektedir.

$$X(f) = \int_{-\infty}^{\infty} x(t) e^{-i\omega t} dt, \quad (i = \sqrt{-1}) \quad (3.12)$$

İki farklı noktada bulunan alıcılarda kaydedilen $x(t)$ ve $y(t)$ gibi dalgalar arasındaki gecikme zamanını (ara zaman) belirlemekte kullanılan karşıt korelasyon, lineer spektrum cinsinden;

$$CC_{xy}(\tau) = FT^{-1}[LS_x(f) LS_y^*(f)] \quad (3.13)$$

bağıntısı ile de ifade edilebilmektedir. İfadede τ zaman değişkenini, FT^{-1} ters Fourier Dönüşümünü, $LS_x(f)$ $x(t)$ 'nin lineer spektrumunu, $LS_y^*(f)$ ise $y(t)$ 'nin lineer spektrumunun sanal (kompleks) eşleniğini göstermektedir. Karşıt korelasyon fonksiyonu bir tepe noktası yapmakta ve bu değer direkt zamanlar arasındaki farka (ara zamana) eşit olmaktadır (Hoar, 1982).

Frekans ortamında, iki dalga arasındaki Karşıt Spektrum (Cross-Power-Spectrum) her frekansta zamanı hesaplamakta kullanılabilmekte ve aşağıdaki ifade ile verilmektedir.

$$CPS_{xy}(f) = LS_x(f) LS_y^*(f) \quad (3.14)$$

Bu fonksiyon her frekansta, iki dalga arasındaki zaman gecikmesinden oluşan faz farklarını içermektedir. 360° lik bir faz farkı, bir periyotluk (T) yolculuk zamanına karşı geldiğinden, Φ derecelik fark t_1 zamanına karşı gelmekte ve bu ise ara zamana eşit olmaktadır. Bu açıklamadan iki alıcı arasındaki t_1 zamanı ve V hız değerleri,

$$t_1(f) = \Phi \cdot T / 360 = \Phi / 360 \cdot f \quad (3.15)$$

$$V(f)=R/t_1(f) \quad (3.16)$$

bağıntıları ile hesaplanmaktadır (Sanchez-Salinerro, 1987). Bağıntılardaki T periyot, f frekans, R iki alıcı arası mesafedir.

Spektral analiz adı verilen bu yöntemlerin uygulanabilmesi için, aynı kaynaktan üretilen dalgaların eşzamanlı olarak iki ayrı mesafede kaydedilmesi gerekmektedir. Bulunan zamanlar, dalganın alıcılar arasındaki hareket süresini gösterdiğinden tetikleme sistemine gerek duyulmamaktadır.

Direkt ölçümlerde, doğru tetikleme ile birlikte kaynak ve alıcı arasındaki gerçek yatay mesafe için kuyularda düşeyden sapmaların bilinmesi gerekmektedir. Ara zaman ölçümleri ise aynı kaynaktan üretilen dalgaların en az iki alıcıda aynı anda gözlenmesini içerir. Ara zaman ölçümlerinin direkt ölçümlere göre bazı üstünlükleri bulunmaktadır. Bu tür ölçümlerde kaynak kuyusunda düşeylik ve tetikleme mekanizmasında doğruluk aranmaz. Ayrıca kuyu cidarlarındaki örselenme, kaplama ve enjeksiyon etkileri ara zaman kullanımı ile azaltılmaktadır.

Karşıt Kuyu deney sisteminde düşey alıcı ve düşey darbe kullanımı, düşey yönde polarize olmuş kayma dalgası parçacık hareketini (SV) baskın duruma getirirken, P-dalgası parçacık hareketi sönümlenir. Bu yüzden Karşıt Kuyu sismik deney yöntemi genel olarak kolay tanımlanabilen S-dalga varışlarını üretmek ve S-dalga hızını belirlemek amacı ile başarılı bir şekilde kullanılmaktadır. Düşey darbe ile üretilen dalgalarda P-dalgası parçacık hareketi radyal-yatay doğrultuda olduğundan, düşey alıcılara çok zayıf olarak gelmekte ve bu sebepten Karşıt Kuyu'da P-dalga hızı ölçümlerinde genliklerin relatif olarak daha büyük algılandığı yatay alıcılar tercih edilmektedir. Özellikle gürültülü ortamlarda gerek düşey gerekse yatay alıcı ile bu deney sistemi ile P-dalga hızı ölçümleri oldukça zor olmaktadır (Hoar ve Stokoe, 1978).

3.3.2. Aşağı Kuyu Sismik Yöntemi

Aşağı Kuyu sismik deney yöntemi, zemin yüzeyindeki bir kaynaktan açığa çıkarılan dalgaların kuyu içinde bilinen bir derinlikte yer alan alıcı veya alıcılara hemen hemen dikey olarak ulaşması için geçen zamanı belirlemeyi içermektedir. Hızlar ise alınan kayıtlardan dalga geliş zamanlarını belirledikten sonra, direkt zaman derinlik eğrilerinin eğiminden

bulunmaktadır. Üretilen dalgaların kuyu içindeki alıcıya hemen hemen dikey olarak geldiği Aşağı Kuyu deneylerinde kaplama ve enjeksiyon P-dalga hızlarını etkilemektedir. Bu yüzden kendini tutabilen zeminlerde alıcıların tabii zemine doğrudan temas etmesi ve ölçümlerin bu koşullarda gerçekleştirilmesi kuşkusuz istenilen bir durumdur (Hoar, 1982; Mok, 1987).

3.3.2.1. Aşağı Kuyu kaynakları

Aşağı Kuyu yönteminde dalga üretmek için kullanılan kaynak tipleri Karşıt Kuyu'da kullanılanlardan daha basit olmaktadır. Az miktarda patlayıcı maddeler kullanarak veya zemin yüzeyine bir çekiçle vurarak P-dalgası üretilebilmektedir. Bu farklı tipteki kaynaklardan patlayıcı tipte olanları daha geniş genlikli ve belirgin ilk varışlar verdiği anlaşılmıştır (Warrick, 1974). Aşağı Kuyu yönteminde S-dalgası üretmek için yatay bir darbe ile zemine kesme kuvveti vermek gerekmektedir. Bu işlemler için aşağıdaki kaynaklar incelenmiştir.

- 1) Kuyu yakınında açılan sığ bir çukurun kenarına çekiç ile vurmak.
- 2) Çukura sabitlenmiş bir plakanın serbest kenarında yapılan patlamalar.
- 3) Sığ kuyularda her yöne yapılan patlamalar.
- 4) Zemin yüzeyine yerleştirilen bir kalasa yatay darbe uygulamak.
- 5) Zemin yüzeyine yerleştirilen ve üzerine bir araç çıkarılmış kalasa yatay darbe uygulamak. (Horizontal truck method).

İlk 4 yöntemde Aşağı Kuyu için S-dalga kaynağı, P-dalgası da üretmekte ve S-dalga gelişlerini tanımlama açısından zayıflatma eğilimi göstermektedir. Yatay darbe ile en iyi S-dalgası, zemin yüzeyine yerleştirilen ve üzerine bir araç çıkarılmış kalas ile üretildiği, bu durumda S-dalgası varışlarının daha açık olduğu gösterilmiştir (Patel, 1981; Mok, 1987).

3.3.2.2. Arazi işlemleri

Aşağı Kuyu deney yönteminin uygulanabilmesi için arazide yapılacak işlemler bir Karşıt Kuyu yönteminden çok farklı değildir ve uygulanmasında bir tek sondaj kuyusu yeterli olmaktadır. En önemli ayrım dalga üretmek

için kullanılacak kaynaktır. Alıcının bulunduğu kuyudan sabit bir mesafede zemin yüzeyine yerleştirilmiş bir plaka veya zemin içine gömülmüş beton bir blok kaynak olarak kullanılabilir. Bu deney sisteminde P-dalgası, zemin yüzeyine yerleştirilen bu plaka üzerine düşey darbe ile vurularak üretilirken, S-dalgası için plakaya yatay yönde vurulması gerekmektedir.

Aşağı Kuyu deney yönteminde alıcıların ilk ölçüm derinliğine indirilmesinden sonra ölçülecek dalga tipine uygun darbeler uygulanarak ve yatay alıcılar kullanılarak deneye başlanmaktadır. Darbe ile birlikte, kaynakta bulunan ve tetikleme sistemine bağlı olan bir alıcının gönderdiği sinyal sıfır zamanını belirleyerek kayıt alınmaya başlanır. Her derinlikte yeteri kadar kayıt alındıktan sonra alıcı veya alıcılar bir sonraki ölçüm derinliğine indirilir. S-dalga kayıtlarının her iki yönde yatay darbeler ile alınması yorumlama aşamasında dalga tipini tanımlamada büyük kolaylık sağlamaktadır. Aynı Karşıt Kuyu yönteminde olduğu gibi bu durumda P-dalgası aynı kalırken, yatay polarize olmuş kayma dalgası (SH) yön değiştirmektedir.

3.3.2.3. Alınan kayıtlarının analizi

Aşağı kuyu deney tekniği ile birbirine dik ve yatay konumdaki alıcılar kullanılarak, yatay yönde darbelerle üretilen dalga kayıtları, Karşıt Kuyu deneyinde alınan kayıtlardan çok farklı değildir ve bu kayıtlarda da aynı bölümler yer almaktadır. Alınan kayıtların analizi, dalga formları üzerinde P ve S-dalgası için karakteristik noktaların belirlenmesini ve dalga varış zamanlarının bulunmasını içermektedir. Darbenin tersine çevrilmesi ile birlikte kayma dalgası enerjisi de (genliği daha büyük olan dalga) yön değiştirerek polarize olmakta ve enerjinin yön değiştirdiği nokta S-dalgası ilk varışını göstermektedir.

Her ölçüm derinliğinde Aşağı Kuyu yönteminde yatay ve düşey konumdaki alıcılara P-dalgası ulaşmaktadır. Ancak P-dalga ölçümlerinde yatay darbe yerine genellikle düşey darbe ve düşey alıcılar tercih edilmektedir. Deneylerde alınan kayıtların analizi sonucunda bulunan varış zamanları, ölçümlerin yapıldığı derinliğe göre düzeltilerek;

$$t_d = T \cdot D / R$$

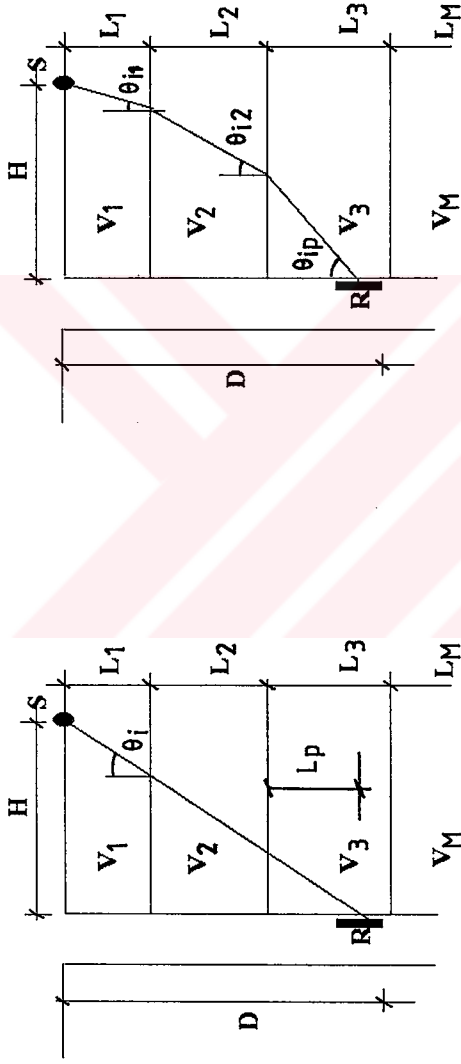
$$(3.17)$$

bağıntısı ile direkt zamanlar hesaplanır. Burada t_d direkt zaman, T varış zamanı, D ölçüm derinliği ve R kaynak ile alıcı arası mesafeyi göstermektedir. Direkt zamanın derinlikle değişimini gösteren grafiklerin eğiminden hızlar belirlenmektedir. Bu şekilde belirlenen hızlar bir tabaka içinde ortalama bir değer olarak sabit kalmakta ve fazla detay içermemektedir. Aynı kaynaktan üretilen dalganın, kuyu içinde iki farklı derinlikte kaydedilmesi ile, Karşıt Kuyu yöntminde olduğu gibi iki alıcı arasındaki zaman belirlenebilmektedir. Bu tür ölçümlere ara (interval) ölçümler adı verilmekte ve bu zamanlardan da ara hızlara hesaplanmaktadır. R_1 ve R_2 , yakın ve uzak alıcının zemin yüzeyinde yer alan kaynak noktasına uzaklıkları, T_1 ve T_2 , bu alıcılarda alınan dalga kayıtlarından bulunan varış zamanları olmak üzere hız değerleri;

$$V_1 = (R_2 - R_1) / (T_2 - T_1) \quad (3.18)$$

bağıntısı ile hesaplanmaktadır. $T_2 - T_1$ farkı t_1 ara zamana eşit olmaktadır. Bu tür uygulamaların yönelimleri ve özellikleri aynı olan ve kuyu içinde farklı derinliklerde bulunan iki ayrı alıcı kullanılarak yapılması gerekmektedir. Ara zaman ölçümlerinde alıcılar arasındaki düşey mesafe rijit bir çubuk ile sağlanmaktadır. Ara zaman ölçümlerinde iki alıcı arası mesafe yeteri kadar açık tutulmalıdır. Yüzeye yakın derinliklerde bu açıklık 1.5-3.0 m uygun bir mesafe olmasına karşılık 15 m den daha derinlerde mesafenin büyümesi gerekmektedir (Mok,1987).

Basit kaynak kullanımı, uygulama kolaylığı, tek kuyu gerekliliği ve daha ekonomik olması gibi üstünlüklerinin yanında, Aşağı Kuyu yöntemi ile elde edilen hız profili Karşıt Kuyu ile karşılaştırıldığında daha az bilgiler içermektedir. Bu ise Aşağı Kuyu yönteminin üstünlerini gölgelemekte ve daha pahalı olan Karşıt Kuyu uygulamalarını tercih sebebi yapmaktadır. Aşağı Kuyu ile elde edilen hız profilinin kalitesini arttırmak için geliştirilen bir analiz yöntemi ile bir ölçüde bu sorunun üstesinden gelinmiştir. Yöntem, arazi ölçümlerinden alınan verileri kullanarak oluşturulan bir modeli ve geri hesaplamalar (invers-theory) yaparak model parametrelerinin belirlenmesini içermektedir (Menke, 1984). Araziden alınan veriler kayıtların analizi sonucunda bulunan varış zamanları, model parametreleri ise hızlardır. Yöntemin uygulanmasında zeminin homojen ve yatay tabakalaşmış olduğu, başlangıç için dalga yolunun doğrusal olduğu kabul edilmektedir. Şematik olarak Şekil 3.10'da gösterilen M tane yatay



Şekil 3.10. Aşağı Kuyu Yönteminde Geri Hesap İçin Kullanılan Notasyon (Inverse Method),
 a) Düzgün Dalga Yolu b) Düzgün Olmayan Dalga Yolu (Snell Kanunu)
 (Mok, 1987)

tabakadan oluşan zemin kesitinde yapılan N adet Aşağı Kuyu ölçümlerinde zaman ile hızlar arasındaki ilişki şeklin geometrisinden,

$$t_i = \sum (L_j / \cos \theta_i) / V_j \quad (3.19)$$

olarak verilebilir. Burada p alıcıların içinde bulunduğu i. ölçümün yapıldığı tabakayı, L_j tabaka kalınlığını, θ_i düşey ile dalga yolu arasındaki açıyı, V_j tabaka hızını ($j=1,2,..M$), t_i zamanı ($i=1,2,..N$) göstermektedir. θ_i açısı ise,

$$\theta_i = \tan^{-1}(H/D_i) \quad (3.20)$$

olmaktadır. Bağintıdaki H kaynak noktası ile kuyu arasındaki yatay mesafe, D_i alıcının bulunduğu derinliktir. Hesap kolaylığı açısından model parametreleri olarak hızların tersi alınarak,

$$G_{i,j} m_j = d_i \quad (3.21)$$

şeklinde bir denklem yazılabilir. Burada G deney düzeni geometrisine göre tabakalar içinde dalga yolunu içeren bir matris ve

$$m = [1/V_1, 1/V_2, 1/V_3, ..., 1/V_M]^T \quad (3.22)$$

hızların tersi olarak alınan model parametreleri,

$$d = [t_1, t_2, t_3, ..., t_N]^T \quad (3.23)$$

deney verileri yani ölçülen zamanları, T ise transpoze matris formunu göstermektedir. G matrisi $N \times M$ boyutundadır. Yukarıda yazılan denklemin çözümü ile m parametreleri dolayısı ile hızlar elde edilmektedir. Düzgün dalga yolunun kabulü ile elde edilen bu hız değerleri, Snell Kanunu'na göre belirlenen eğik dalga yolunu kullanılarak hesaplanacak yeni hızlar için başlangıç olarak kullanılmaktadır (Mok, 1987).

Tabakalı ortamlarda arakesitlerde dalga ışını Snell Kanunu'na göre bükülmekte ve düzgün kabul edilenden daha fazla yol almaktadır. Bu durumda yukarıda bulunan hızlar ile Snell Kanunu uygulanarak yeni dalga yolları bulunmaktadır.

$$(\sin \theta_{i1} / V_1) = (\sin \theta_{i2} / V_2) = .. = (\sin \theta_{ij} / V_j) = .. = (\sin \theta_{ip} / V_p) \quad (3.24)$$

İlk Θ_{i1} açısı düzgün ışın yolundan Θ_i 'den, diğerleri bu eşitlikten hesaplanarak, kaynak ile kuyu arası yatay mesafe H,

$$H=L_1\tan\Theta_{i1}+L_2\tan\Theta_{i2}+L_j\tan\Theta_{ij}+L_p\tan\Theta_{ip} \quad (3.25)$$

bağıntısı ile bulunarak, gerçek değeri ile karşılaştırılarak, eşitliğin her iki tarafındaki fark belli bir sınırın altında kalıncaya kadar (0.3 cm) Θ_{i1} 'nin başka değerleri için işleme devam edilir. Belirlenen bu yeni ışın yolları ile G matrisi yeniden kurulur ve $G_{i,j}m_j=d_i$ eşitliği çözülerek yeni hızlar belirlenerek önceki değerleri ile karşılaştırılır. Elde edilen hızlar arasındaki farkın belli sınırına kadar (0.3 m/sn) işlemlere devam edilir (Mok, 1987; Mok ve diğ., 1989).

Bu yöntem ile doğru bir hız profili elde edilebilmesi için veri sayısının tabaka sayısından daha fazla olması gerekmektedir. Bu tür analiz sonucunda, hız profili daha detaylı elde edilebilmekte ve kesitte yer alan düşük hızlı ince tabakalar belirlenebilmektedir.

3.3.4. Alıcılar

Sismik deneylerde kullanılan alıcıların amacı, sismik dalgaların meydana getirdiği parçacık hareketi adı verilen mekanik titreşimleri aynı frekansta elektrik sinyallerine dönüştürmektir. Oluşan parçacık hareketlerinin algılanması için alıcıların kuyu duvarına temas etmesi ve sismik dalgaların üretildiği sınırlar içinde genlik ve frekans davranışı bakımından uygun olması gerekmektedir.

En çok bilinen sismik alıcı tipi, küçük bir koruyucu içinde bobin, yay ve mıknatıstan oluşan hız ölçerlerdir (velocity transducer). Magnetik alana asılı durumda bulunan bobin kendi ataleti sebebiyle, içinde bulunduğu malzemenin hareketinden dolayı sabit kalma eğilimindedir ve küçük bir yerdeğiştirmesi iki ucu arasında bir elektrik potansiyel voltaj farkı oluşturmaktadır. Hız ölçerler yatay ve düşey yöndeki hareketleri alabilecek şekilde biri düşey, ikisi yatay üç bileşenli olarak yapılmışlardır. Kullanılan hız ölçerlerin tabii frekansları 4-20 Hz, sönüm oranları %30-60 arasındadır. Birçok mekanik kaynak için, kayma ve basınç dalgası frekansları ise yaklaşık 50 ile 1000 Hz arasında değişmektedir. Düşük frekanslarda üretilen dalgaların kuyu içi jeofonları ile yapılan ölçümlerinde, relatif olarak sinyal-gürültü oranı artmakta ve kayıt

kalitesinde azalma görülmektedir (Chen ve Krohn, 1992; Zimmerman ve Chen, 1993).

Sismik dalga ölçümlerinde kullanılan alıcılar üzerinde yapılan araştırmalar McDonal (1958) ve Prange (1978) tarafından yürütülmüştür. Kayalarda yapılan araştırmalar sonucunda, alıcıların tabii frekans sınırlarının üzerinde üniform bir davranış göstermesi ve jeofonların kuyu içinde sabitlenmesi durumunda mekanik rezonanstan kaçınılması gerektiği sonucuna varılmıştır. Mekanik rezonansı önlemek için, sabitleme sisteminin kütlesinin küçük tutulması (<4.5 kg) ve kuyu duvarına uygulanan basıncın büyük olması (>1.4 MPa) gerekmektedir. Bununla birlikte uygulamada zeminlerde bu değerlerin daha küçük olabileceği vurgulanmaktadır (McDonal, 1958).

Prange (1978), içsel etkilerden dolayı hız ölçerlerinin dalga alanından enerji çekildiğini ve bunun faz farkı yarattığını gösterdi. Ancak kullanılan alıcıların kütlesinin küçük (<2.3 kg) olduğundan ve alıcının birim hacim ağırlığı yaklaşık zemininkine eşit olduğundan ölçümlere fazla etki etmemektedir.

Kuyu içi sismik yöntemlerinin uygulamalarında doğal frekansı 20 Hz'den daha az ve sönüm oranı yaklaşık %50 olan alıcılar kullanılmaktadır. Tabii frekansları yüksek olan alıcılar dalga sinyallerinde yükseltmeye, sönüm oranları küçük olanlar ise tabii frekanslarının altında aşırı azaltmaya sebep olmaktadır. Genelde farklı doğal frekansta ve sönüm oranlarındaki alıcılarla yapılan ölçümlerde dalga geliş zamanı aynı kalmakta ancak ölçülen dalgaların genliklerine önemli derecede etki etmektedirler. Dalga varışlarının tanımlanabilmesi için alıcıların dalga parçacık hareketi yönünde yerleştirilmiş olması gerekmektedir. Bu yüzden karşıt kuyu deneyinde S-dalga ölçümlerinde (SV) düşey alıcıların kullanılması gerekli olmaktadır. SH dalgaları ise yatay alıcılar ile gözlenmektedir. P-dalgası, kaynağa göre radyal doğrultuda yerleşmiş yatay alıcılarda en iyi izlenebilmekte ancak düşey alıcılarda da ilk varışlar belirgin olmaktadır. Aşağı kuyu ölçümlerinde S-dalgası (SH) için alıcılar darbe yönüne paralel olmalıdır. Alıcıların yerleşimi paralel (transvers) konumdan radyal-yataya doğru değişirken varış zamanlarında hata eğilimi olmakta ve dalganın genliğinde bir azalma meydana gelmektedir. Bu ölçümlerde P-dalgası için yatay alıcılar uygun olmasına rağmen bu dalga tipi genelde düşey alıcılarda gözlenmektedir (Hoar, 1982).

3.3.5. Kuyular

Arazi sismik deneylerinde alıcı veya dalga üreten kaynağın içinde bulunduğu kuyular, açılma işlemleri sırasında mekanik etkenler ve gerilme boşalması nedeni ile cidarlarında örselenmenin etkisinde kalmaktadırlar. Sondaj aletlerinin indirilmesi veya geri çekilmesi yüzünden kuyu duvarlarının oyulması, delicinin aynı derinlikte uzun süre çalışması ile bu bölgede genişlemenin oluşması, sondajlarda düşeyden sapmalar sonucunda eğik deliklerin, düzensiz silindirik şekillerin, bölgesel süreksizliklerin ve çıkıntıların meydana gelmesi ve delici aletlerin uyguladığı aşırı basınç sondaj işlemi sırasında örselenmeye sebep olmaktadır. Aşırı örselenmiş bölgeler kuyu etrafında yaklaşık 3-5 cm kalınlığındadır ve bu örselenmeler sadece delme işlemine gösterilen dikkat ve özenle azaltılabilmektedir. Yatay gerilme boşalması, kenarlarda kuyu çapının 0.4-1.2 katı kalınlığında bir plastik bölge oluşturmaktadır (Westgaard, 1940 ve Terzaghi, 1943). Yatay gerilmedeki azalma kayma dalgası hızına etki etmektedir. Yatay gerilme boşalmasının etkisi ancak kuyuların kaplanması ile azaltılabilmekte fakat yok etmek mümkün olmamaktadır. Bu faktörlerin etkisini en aza indirmek üzere deney kuyularının uygun bir malzeme ile kaplanması ve kaplama ile tabii zemin arası enjeksiyonla doldurulması gerekmektedir.

Kuyuların kaplanmasında ve zemin kaplama arasındaki dolguda kullanılan malzemenin cinsi kuyu içi yöntemler ile dalga hızı ölçümlerine etki etmektedir. Karşıt Kuyu yönteminde kullanılan çeşitli tipteki kuyuların etkisi Shannon ve Wilson (1975), Stokoe ve Abdel-razzak (1975) ve Ballard (1976) tarafından araştırılmıştır. Özel olarak hazırlanmış bir deney sahasında plastik, alüminyum, çelik gibi malzemelerle kaplanmış kuyularda dalga şekilleri, genlikler ve varış zamanları karşılaştırılmış ve kaplamanın genlikleri azalttığı, varış zamanlarında 0.4-1.2 msn arasında bir artışa sebep olduğu bulunmuştur.

PVC ile kaplanmış ve kaplama-tabii zemin arası kum malzeme ile doldurulmuş kuyularda yapılan ölçümlerden, dalga hızlarının %15-25 arasında daha küçük bulunduğu ve genliklerde önemli azalmalar ortaya çıktığı gösterilmiştir (Stokoe ve Abdel-razzak, 1975). Genlik azalması özellikle P-dalgası ilk varışlarını bulmada önemli olmakta ve bu durum tanımlanmayı zorlaştırmaktadır. Dolgu malzemesi ile tabii zeminin yoğunlukları birbirleri ile uyumlu ise ölçülen zamanlarda hata oranı azalmaktadır. Yapılan araştırmalardan ince cidarlı plastik kaplamaların hız

ölçümlerinde kullanımının sinyal kalitesini iyileştireceği sonucuna varılmıştır (Ballard, 1976).

Karşıt kuyu ölçümlerinde kaplama özellikle dalga genliklerine etki etmekte ve azalmasına yol açmaktadır. Kaplaması ve enjeksiyonu yapılmış kuyularda uygulanan deneylerden elde edilen S-dalga genliği, kendisini tutabilen ve kaplaması olmayan kuyulara göre ortalama %60 daha küçük olmaktadır. Kaplamalı kaynak kuyusu tek başına S-dalga genliğini ortalama %7 azaltmaktadır. Aşağı kuyu yönteminde kuyu kaplamaları varış zamanlarını arttırmakta ve hızlar arasında ortalama %10 fark yaratmaktadır. Bu tür ölçümlerde kaplama genlikleri azaltmakta ve derinlikle bu azalım artmaktadır. Kaplamalı kuyularda dalga genliği, diğerine göre yüzeyde yaklaşık %40, 3 m derinlikte %80 daha az olmaktadır (Hoar, 1982).

Karşıt kuyu yönteminde, kaynak ve alıcı kuyuları arasındaki yatay uzaklığın derinlikle değişimi hızları etkilemektedir. Bu yüzden gerçek yatay mesafelerin belirlenmesi için kuyularda düşeylik araştırmaları gerekmektedir. 3 m aralıkla açılmış iki kuyuda; düşeyden birkaç derecelik sapmalar 15 m derinlikte hesaplanan P ve S-dalga hızlarına %83-117 mertebesinde etki etmektedir (Hoar, 1982).

Aşağı Kuyu yöntemi ile yapılan hız ölçümleri, kaplama ve kaplama-zemin arası dolgudaki dalga yayılımından etkilenebileceği gösterilmiştir (Ballard ve McLeon, 1975; Auld, 1977; Beeston ve McEvelly, 1977; Manual 1979). Ancak birçok zeminde ölçülen dalga hızı, kullanılan bu malzemelerin hızına benzerlik göstermesi özellikle P-dalgasında bu faktörlerin etkilerini ayırt edebilmeyi zorlaştırmaktadır. Patel (1981) ise PVC kaplı ve enjeksiyonlu kuyular kullanılarak yapılan Aşağı Kuyu ölçümlerinden zemin içinde yayılan P-dalgasının izlenebilmesinin kolay olmadığını göstermiştir.

3.4. KARŞIT KUYU VE AŞAĞI KUYU SİSMİK YÖNTEMLERİNİN KARŞILAŞTIRILMASI

Bir sahada uygulanacak sismik deney yönteminin seçimi için önemi, maliyeti, sahanın büyüklüğü, çevrede mevcut gürültü oranı ve ilgilenilen derinlik gibi bir çok faktöre bağlıdır. Mühendislik amaçlar doğrultusunda dinamik zemin özelliklerinin arazide tayin edilmesinin gerekli olduğu durumlarda her iki yöntem de tercih edilebilir. Bu

yöntemlerin birbirlerine göre üstünlükleri ve kısıtlayıcı yanları bulunmaktadır.

Karşıt kuyu yöntemini uygulayabilmek için belli mesafelerde açılmış, kaplaması ve enjeksiyonu yapılmış en az iki, tercihen üç kuyu gereklidir. Aşağı Kuyu yönteminde ise tek kuyu yeterli olmaktadır. Bu sebepten Karşıt Kuyu daha pahalı bir deney yöntemidir. Aşağı Kuyu deney tekniğinde dalga üretmek için kullanılan kaynak, zemin yüzeyine yerleştirilmiş bir plakadan veya bir bloktan ibarettir ve deney süresince yerinde sabit kalmaktadır. Karşıt Kuyuda ise kuyu içinde istenilen derinlikte dalga üretmekte özel donanım gerektiren mekanik tipte çekiciler kullanılmakta ve her ölçüm derinliğinde kaynak, alıcının bulunduğu derinliğe indirilmesi zorunlu olmaktadır. Karşıt Kuyu deneyinde gerçek hızların bulunması için alıcı ve kaynak arası gerçek yatay uzaklıkların bilinmesini gerektirmekte, bu ise kuyularda düşeylik araştırmaları ile birlikte maliyeti arttırmaktadır. Karşıt Kuyu deneyinde dalga yolu aynı kalırken Aşağı Kuyu deneyinde derinlikle büyümekte ve dalga üretiminde daha büyük enerji gerektirmekte, derine inildikçe sinyal kalitesinde azalma görülmektedir. Karşıt Kuyu deneyinde kaplama ve enjeksiyon etkileri ihmal edilebilmekte, Aşağı Kuyu deneyinde ise özellikle P-dalgası ölçümlerinde bu faktörler sonuçları etkilemektedir. Karşıt Kuyu deneyinde her ölçüm derinliğinde hızlar doğrudan bulunabildiği için hız profili daha detaylı olarak bulunabilmekte ve zemin kesitinde yer alan düşük hızlı tabakalar tesbit edilebilmektedir. Aşağı kuyu deneyinde tabakalara ait hızlar ancak bir ortalama değer olarak elde edilebilmektedir. Ancak geliştirilen analiz yöntemleri ile bu eksiklik bir ölçüde giderilmiştir.

Karşıt Kuyu yöntemi daha doğru ve detaylı P ve S-dalga hızı profili vermesine rağmen, uygulanması diğerine göre daha pahalı olması Aşağı Kuyu yönteminin uygulama alanını genişletmektedir.

3.5. ARAZİ SÖNÜM ÖLÇÜMLERİ

Zeminlerin elastik davranış sergiledikleri düşük deformasyon genliklerinde malzeme sönümünün saptanması, arazi sismik ölçümlerinin önemli bir bölümünü teşkil etmektedir. Homojen ve izotrop bir ortam içinde yayılan cisim dalgalarının genlikleri, geometrik sönüm ve malzeme sönümü nedeni ile azalmaktadır (Meek ve Wolf, 1994). Ayrıca dalga genlikleri heterojen

bir ortamda ara yüzeylerde kırılma ve yansıma olaylarından da etkilenmektedir. Malzeme sönümünün arazide ölçülmesi bilinen sismik deneylerle farklı mesafelerde dalga genliklerinin ölçülmesini içermektedir. Ancak zeminlerde düşük genliklerde malzeme sönümünün de oldukça küçük olması sebebi ile bu ölçümlerden gerçek malzeme sönümünün elde edilmesi oldukça zordur. Sismik dalga hızlarında olduğu gibi geoteknik mühendisliğinde kayma (S-dalgası) durumundaki sönüm, basınç (P-dalgası) durumundan daha önemlidir. Sönüm ölçümlerinde Karşıt Kuyu yöntemi ile, Aşağı Kuyu yöntemine göre daha duyarlı veriler alınabilmektedir. Bununla birlikte sönüm oranını bulmak için P-dalgası ölçümlerinde ve Aşağı Kuyu kullanımlarında benzer işlemler ve analizler uygulanabilmektedir (Kudo ve Shima, 1970; Imai ve diğ., 1980; Redpath ve diğ., 1982; Tonouchi ve diğ., 1983).

Geoteknik mühendisliğinin esas ortamını teşkil eden zeminler içinde üretilen S ve P-dalga genliklerinde, dalga önünün genişleyerek ortamın daha geniş bir kesiminde yayılmaları yüzünden bir azalma görülmektedir. Kaynakla arasındaki mesafenin tersi ile orantılı olan bu azalım geometrik sönüm olarak tanımlanmaktadır. Malzeme sönümü ise daha karmaşıktır ve viskoelastik teoriye dayanmaktadır (Stoll ve Bryan, 1970; Winkler ve Nur, 1982). Cisim dalgaları olan P ve S-dalgaları için D sönüm oranı aşağıdaki ifade ile verilmektedir.

$$D=[\ln(A_1R_1/A_2R_2)]/[(2\pi t_1/T)^2+[\ln(A_1R_1/A_2R_2)]^2]^{0.5} \quad (3.26)$$

Bu eşitlikte A_1 ve A_2 , R_1 ve R_2 mesafede aynı kaynaktan çıkan enerji ile dalga formları üzerinde benzer karakterdeki noktalarda dalga genlikleri, T dalğanın periyodu ve t_1 ara zamanı göstermektedir (Hoar, 1982). Bu eşitlik kullanılarak sönüm oranının hesaplanmasında, Malzeme sönümü yaratılan deformasyon seviyelerinde, deformasyon genliğinden bağımsız olduğu, ölçümlerde gerçek parçacık hareketlerinin algılandığı ve kaplamanın ve alıcıların kuyu duvarlarına sabitlenme şeklinin etkisiz olduğu, ölçülen dalga genlikleri kırılan ve yansıyan dalgalardan etkilenmedikleri kabulleri yapılmaktadır.

Yukarıda verilen bağıntıdan da anlaşılacağı üzere, malzeme sönümünün arazi deneyleri ile ölçülmesinde kaynaktan iki farklı noktada dalga genliklerinin ölçülmesi gerekmektedir. Bu ölçümlerin Karşıt Kuyu deneyleri ile yapılmasında en az üç kuyunun gerekli olduğu açıktır.

Zeminlerde düşük deformasyon genliklerinde malzeme sönümünün dalga genliklerine etkisi az olduğundan, ölçümlerde aşırı dikkat ve özen gösterilmesi gerekmektedir. Sönüm ölçümlerinde dikkat edilecek hususlar aşağıda özetlenmiştir.

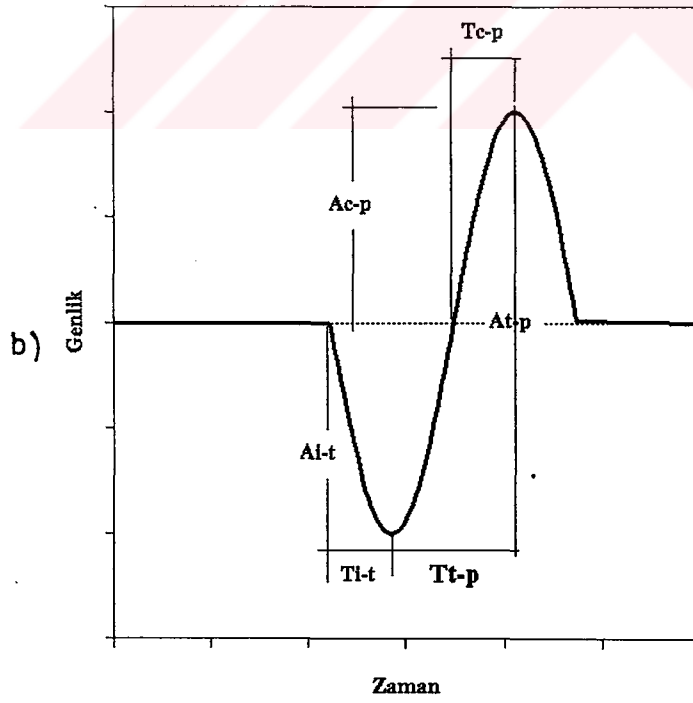
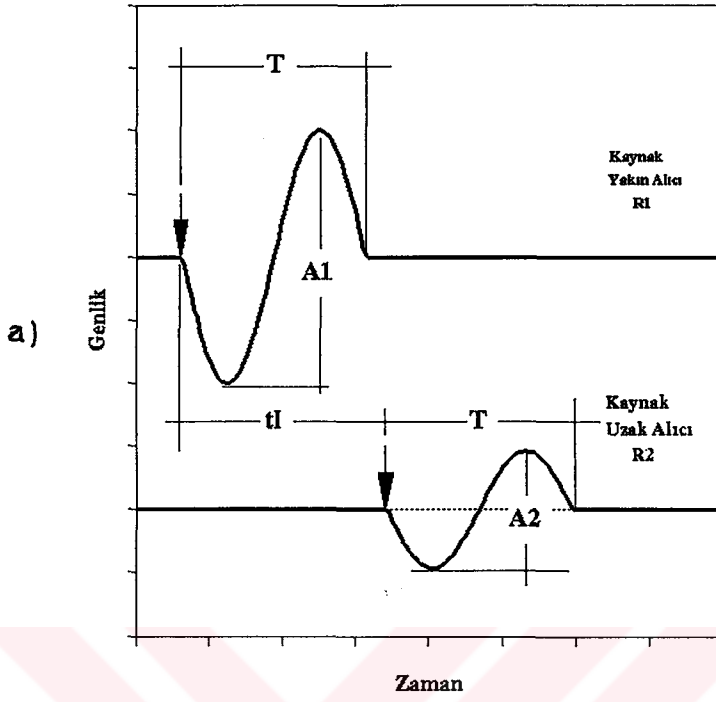
- 1) Kullanılan alıcıların tabii frekansı ve sönüm oranları uygun olmalıdır. Genelde alıcılar için tabii frekansın 50 Hz olması ve bu değer üstünde doğrusal davranış sergilemesi istenir.
- 2) Ölçümlerde kullanılan alıcılar aynı olmalıdır. Aksi durumlarda alıcıların kalibrasyonu bilinmelidir.
- 3) Alıcıların kuyu duvarlarına sabitlenme yöntemleri aynı olmalıdır. Farklı basınçlarda alıcıların etkilenmesi sözkonusudur.
- 4) Ölçüm kuyularında yapılacak kaplama ve enjeksiyon alıcılara gelen dalgaları etkilemektedir. Eğer mümkün ise sönüm ölçümleri kaplamasız kuyularda yapılmalıdır. Kaplama yapılacak ise kaplama ve enjeksiyonun işlemlerinin tamamen aynı olması gerekmektedir.

Arazide ölçülen sönüm oranı, laboratuvarında ölçülenlerden ortalama olarak yaklaşık iki kat daha fazla değerler vermektedir. Bu farklılığın sebebi şunlardır:

- a) Numune örselenmeleri,
- b) Arazi şartlarının laboratuvarında tekrar yaratılma zorluğu,
- c) Numunelerin arazideki alındıkları tabakaları yeterince temsil etmemeleri,
- d) Arazi ölçüm ve analiz yöntemlerinde görülen problemler.

3.5.1. Analiz Yöntemleri

Arazi sismik deney yöntemleri ile malzeme sönüm oranının belirlenmesi, aynı kaynaktan üretilen dalganın iki farklı mesafede gözlenmesini gerektirmektedir. Sönüm oranını hesaplamak için ölçülen dalgaların sadece genlik oranları yeterli olmakta, gerçek değerlerine gerek duyulmamaktadır. Sönüm ölçümleri için iki farklı mesafede alınmış ve idealize edilmiş sismik kayıtlar, sönüm oranı hesaplarında kullanılacak değerler ile birlikte Şekil 3.11.a'da verilmiştir. Bu simetrik kayıtlarda genliklerin tek yada çift olarak

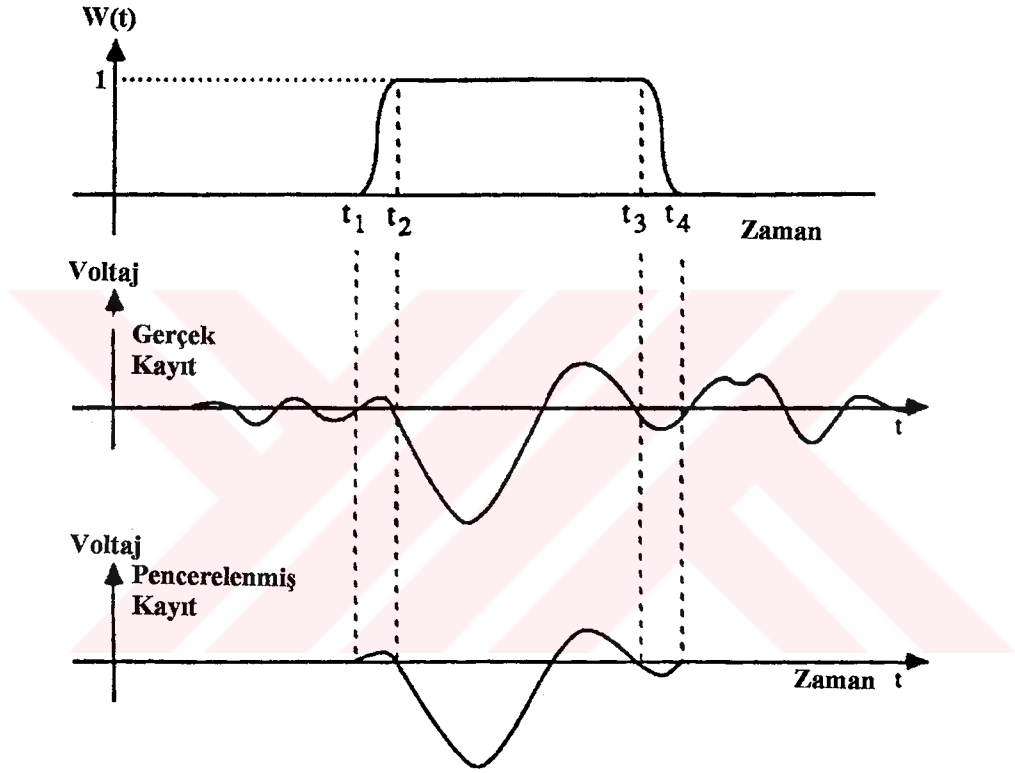


Şekil 3.11. Sönüm Oranı İçin Genlik Belirleme Yöntemleri

seçilmesi hesapları değiştirmeyecektir. Zemin gibi gerçek ortamlarda yayılan dalgaların şekilleri, genlik ve peryotları değiştiğinden ve genelde simetrik olmadığından gerçek arazi kayıtları üzerinden bu değerler farklı şekillerde bulunabilmektedir. Şekil 3.11.b'de verilen örnekte genlik ve peryot belirleme yöntemleri gösterilmiştir. Gerçek arazi kayıtlarının simetrik olmaması bu yöntemlerle bulunan peryotlarda farklılıklara yol açmaktadır. Ayrıca yayılırken dalga şekillerinde görülen değişim bulunan genlikler arasında da fark etmektedir. Bu yüzden verilen bağıntı ile sönüm hesaplanırken bu tanımlamalardan biri seçilmeli ve iki ayrı noktada kaydedilen dalgalara aynı yöntem uygulanmalıdır. Bu yöntemde, sadece direkt dalgaların algılandığı, kırılan ve yansıyan dalgaların direkt dalga genliğine etki etmediği kabulü yapılmaktadır. Ancak alınan gerçek arazi kayıtlarında direkt dalgaların yanında kırılan ve yansıyan dalgalar da bulunmakta bu ise genlik oranlarının belirlenmesini zorlaştırmaktadır.

Sönüm oranını hesaplamak için kullanılan diğer bir yöntem spektral oranlar yöntemidir (Newman ve Worthington, 1982). Kaynaktan R_1 ve R_2 mesafede ölçülen dalga genlikleri arasındaki orana (A_1/A_2) spektral oran adı verilmektedir. Sönüm oranı hesaplamak için verilen bağıntılar bir harmonik dalga içindir ve bu bağıntıların noktasal bir kaynaktan üretilen simetrik olmayan dalgalara uygulamak için frekans ortamında analiz gerekli olmaktadır. Bu yöntemde alınan zaman kayıtları Fourier Dönüşümleri uygulanarak frekans içerikleri belirlenmekte, her frekans değerinde R_1 mesafedeki dalga genliği R_2 'deki dalga genliğine bölünerek spektral oranlar elde edilip verilen ifadeden sönüm oranı hesaplanmaktadır. Analizde kırılan ve yansıyan dalga etkilerini azaltmak için arazi kayıtları, Şekil 3.12'de görüldüğü gibi seçilen sınırlar içinde pencere (windowing) uygulanarak spektral analizde ilgili olmayan frekans bileşenleri yok edilmektedir. Şekildeki t_2 ilgilenilen direkt dalga tipinin ilk varış zamanı, t_1 ilk varıştan önce yatay eksen ile ilk kesişme noktası t_3 , direkt dalganın ilk geliş noktasından itibaren bir peryotluk hareketin tamamlandığı ilk kesişim noktası ve t_4 ise bu noktadan sonra genliğin sıfır olduğu ilk noktayı göstermektedir (Ramirez, 1985).

Spektral oranlar ile sönüm oranını bulmak için uygun frekans sınırlarının da belirlenmesi gerekmektedir. Bunun için kaynak darbesinin ürettiği hakim frekanslar ve dalga boyu dikkate alınmaktadır. Sismik deneylerde kullanılan mekanik kaynakların ürettiği frekanslar genelde 10-400 Hz



Şekil 3.12. Arazi Kayıtlarının Pencerelemesi (Windowing)
(Mok ve diğ., 1988)

arasında olmakta ve bir üst sınır olarak 300 Hz alınması zeminlerde uygun olmaktadır (Mok, 1987). Kaynak alıcı mesafeleri $R_2/R_1=2$ durumunda L_R dalga boyunu göstermek üzere $R_1/L_R=2$ için, sönüm oranı gerçek değerine eşit olmakta ve sabit kalmaktadır (Sanchez-Saliner, 1987). Dalga boyu, frekans (f) ve hız (V) arasındaki $V=f \cdot L_R$ genel ilişki gözönüne alındığında, dalga boyunun $R_1/2$ den küçük olması, frekansın $2V/R_1$ den daha büyük olmasını gerektirmektedir. Böylece sismik dalga ölçümlerinden spektral oranlar ile sönüm oranı hesaplarında kullanılabilecek frekans sınırları,

$$2V_s/R_1 \leq f \leq 300 \quad (3.27)$$

$$2V_p/R_1 \leq f \leq f_{maks} \quad (3.28)$$

aralığında olmaktadır. Burada V_s ve V_p sırası ile kayma ve basınç dalgası hızı, R_1 ilk alıcı kaynak mesafesi ve f frekansıdır (Sanchez-Saliner, 1987; Mok ve diğ., 1988). Basınç dalgası ölçümlerinden sönüm oranı hesaplamak için seçilecek frekansın üst sınırı yine dalga üretimi sırasında meydana gelecek hakim frekans davranışına bağlıdır. Basınç dalgası ölçümlerinde karşılaşılan frekans içeriğinin 600-3000 Hz arasında olduğu belirtilmektedir (Lee, 1985).

BÖLÜM 4

KULLANILAN SİSMİK DENEY SİSTEMİ

4.1. GİRİŞ

Bu çalışma kapsamında, zemin dinamik özelliklerinin arazi yöntemleri yardımı ile belirlenebilmesi için bir sismik deney sistemi oluşturulmuş ve bu sistem ile seçilen değişik sahalarda arazi uygulamaları gerçekleştirilmiştir. Sismik deney düzeni bir kayıt sistemi, dalga üretmek için kullanılan mekanik kaynak ve alıcılardan oluşmaktadır. Arazi uygulamalarında, Yüzey Kırılma, Aşağı Kuyu ve Karşıt Kuyu olmak üzere üç değişik yöntem kullanılmıştır. Bu yöntemlerde, bir kaynaktan açığa çıkarılan enerjinin oluşturduğu sismik dalgalar, kaynak noktasından belli mesafelerde zemin yüzeyinde veya kuyu içinde bulunan alıcılar yardımı ile gözlenmiş ve kaydedilmiştir. Alınan kayıtların analizi sonucu bulunan dalga varış zamanlarından hızlar hesaplanmıştır. Dalga varış zamanlarının doğru bir şekilde belirlenebilmesi ve alınan kayıtların tanımlanabilir olması için, arazi deneylerinde zemin yüzeyinde ve kuyu içinde mekanik tipte dalga kaynakları kullanılmıştır. Kullanılan bu kaynaklar, ölçümlerin aynı derinlikte veya alıcıların aynı konumunda tekrarlanabilmesine olanak sağlamaktadır.

Karşıt Kuyu yönteminde kuyu içinde istenilen derinlikte dalga üretilmesi için, tekrarlanabilir ve tersine çevrilebilir bir kuyu içi mekanik çekici tasarlanmış ve deneylerde kullanılmıştır. Sismik ölçümlerde kayıtların, kaynak alıcı yerleşimini değiştirmeden kaynağın tersine çevrilerek alınması analiz aşamasında dalga tiplerini tanımlamada kolaylık sağlamaktadır. Bu durumda uygulanan darbe yönüne bağlı olarak kayma dalgasının da yön değiştirme özelliği bu dalga tipinin ilk varışını belirgin yapmaktadır. Mekanik kaynaklardan üretilen dalgaların kayıtları için ilk uygulamalarda analog, sonraki çalışmalarda ise dijital olmak üzere iki ayrı sismograf kullanılmıştır. Analog sismograf ile kayıtlar hassas yüzeyli kağıtlara alınırken, dijital sismograf ile deneyler bilgisayar destekli uygulanmış ve

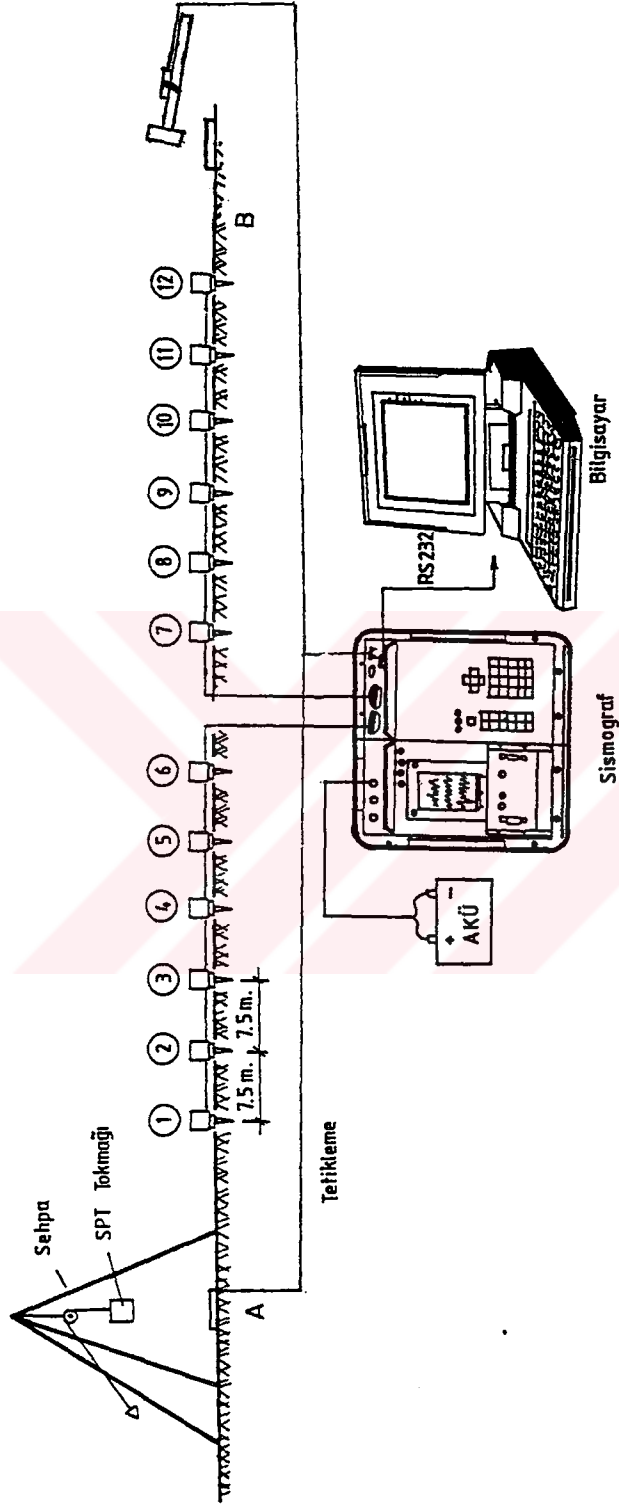
dalga formları bilgisayar ortamına kaydedilmiştir. İlk arazi deneyleri, kalibrasyon çalışmalarını yürütmek amacı ile İ.T.Ü. Ayazağa Kampüsü'nde yapılmış ve bu deneyler analog tipte bir kaydedici (sismograf) ile yüzey alıcıları ile yürütülmüştür. Sonraki uygulamalarda ise hafızalı, 12 kanallı ve sinyal biriktirmeli olan dijital sismograf ile aynı özelliklere sahip iki adet kuyu içi jeofonu kullanılmıştır. Bu çalışmada arazi uygulamalarında kullanılan sismik deney sistemi ve sistemi oluşturan başlıca elemanlar aşağıda tanıtılmıştır.

4.2. YÜZEY SİSMİK DENEY DÜZENİ

Arazi uygulamalarında kullanılan yüzey sismik deney sistemi Şekil 4.1'de şematik olarak verilmiştir. Bu deney düzeninde, 12 kanallı dijital sismograf ve taşınabilir tipte (note-book) bilgisayardan oluşan bir kayıt sistemi, 12 adet yüzey jeofonundan oluşan alıcılar ve dalga üretme kaynağı bulunmaktadır. Alıcıların ve dalga kaynağının zemin yüzeyinde bulunduğu yüzey sismik deneylerinde, P-dalgası ölçen alıcılar kullanılmıştır. Bu alıcıların iki grup serimden oluşmakta ve her grupta 7.5 m aralıklarla 6 adet alıcı bulunmaktadır.

4.2.1. Kayıt Sistemi

Sismik deneylerde kullanılan kayıt sisteminin amacı, bir kaynaktan açığa çıkarılan enerjinin meydana getirdiği ve alıcılar tarafından algılanan titreşimleri bir dalga formuna çevirmektir. Dalga formları ise bu titreşimlerin zamana göre çizilmiş bir grafiği olmaktadır. Deneylerden elde edilen bu tür grafiklere kısaca kayıt adı verilmektedir. Bir kayıt sistemindeki kanal sayısı uygulamada kullanılacak alıcı sayısına bağlı olmakla birlikte, biri tetikleme diğeri alıcı için olmak üzere en az iki kanallı olması gerekmektedir. Ancak kayıt sisteminin çok kanallı olması tercih edilmektedir. Böylece tetikleme sistemine bağımlı olmadan alıcılar arasındaki zaman ölçümleri yapılabilmekte ve günümüzde kullanılan genelde üç bileşenli olan alıcılarla dalganın üç doğrultudaki kayıtları sürekli olarak alınabilmektedir. Kayıt sistemlerinin diğeri önemli bir özelliği, her kanal için ayrı ayrı kullanılabilen sinyal yükseltici üniteleridir. Deney esnasında çevrede istenmeyen seslerin (gürültü) olması, üretilen dalgaları etkilemekte ve kayıt kalitesini düşürmektedir. Bu durumda



Şekil 4.1. Yüzey Sismik Deney Düzeni

yükselticilerin kullanımı ile üretilen sinyalin mevcut gürültüye oranı artmakta ve istenmeyen seslerin etkisi azaltılabilmektedir.

Alıcıların gönderdiği sinyallerin doğru kaydı, kayıt sisteminin uygun frekans davranışına ve doğru zamanlamasına bağlıdır. Sismik deneylerde dalga varış zamanları milisaniye, frekanslar ise birkaç yüz Hz mertebesinde kalmakta ve bu yüzden kayıt sisteminin frekans davranışının genelde 10-1000 Hz aralığında olması uygun olmaktadır (Ballard ve McLeon, 1975).

Kaydedici olarak günümüze gelene kadar manyetik teypler ve çeşitli analog tipte osiloskoplar kullanılmıştır. Fakat gelişen teknoloji ve bu tür deneylerin önemi kayıt sisteminin de gelişmesine yardımcı olmuştur. Günümüzde ise bu tür aletlerin yerini dijital, hafızalı, sinyal yükselticili ve biriktirmeli çok kanallı sismograflar almıştır. Bu tür aletlerle yapılan deneylerde, dalga formlarını üst üste biriktirerek istenmeyen seslerin etkilerini azaltma imkanı bulunmakta, ancak kullanımı tekrarlanabilir kaynak gerektirmektedir. Analog sismograflarda dalga formları fotoğraf kağıtlarına alınırken, dijital sismograflar bilgisayar destekli kullanılabilmekte ve kayıtlar bu ortamda saklanabilmektedir.

Kayıt sistemlerinin bir başka özelliği, istenmeyen frekanstaki seslerin dalga formundan ayrılması amacıyla kullanılan filtre olayıdır. Filtreler, belli frekans sınırlarını kabul etmek veya etmemek şeklinde çalışmaktadır. Dalga kayıtları, kaynaktan üretilen hakim frekanslar dışında çevrede mevcut olan gürültü niteliğindeki istenmeyen seslerin frekans bileşenlerini de içermektedir. Uygulanan filtre ile belli bir frekansın altındaki sinyallerin kayıtlara girmesi engellenmekte ancak bu uygulama dalga genliklerinde bir azalmaya, varış zamanında ise bir artışa neden olmaktadır (Hoar, 1982). Bu yüzden mümkün olduğunca filtreden kaçınmak ve bunun yerine kayıt sistemlerinde bulunan sinyal yükselticilerini kullanmak daha doğru olmaktadır. Eğer filtre kullanılacak ise aynı ölçüm derinliğinde alınan tüm kayıtlara aynı filtreyi uygulamak gerekmektedir.

Sismik ölçümlerden alınan dalga kayıtlarından, kaynak-alıcı mesafesinde dalga varış zamanlarının belirlenmesi dalganın üretildiği yani sıfır zamanın bilinmesini gerektirmektedir. Kayıt sistemlerindeki tetikleme sistemi (triggering) bu amaç için kullanılmaktadır. Dalga üretmek için uygulanan darbe ile tetikleme sistemi çalışmakta, gönderdiği sinyal kaydı başlatmakta

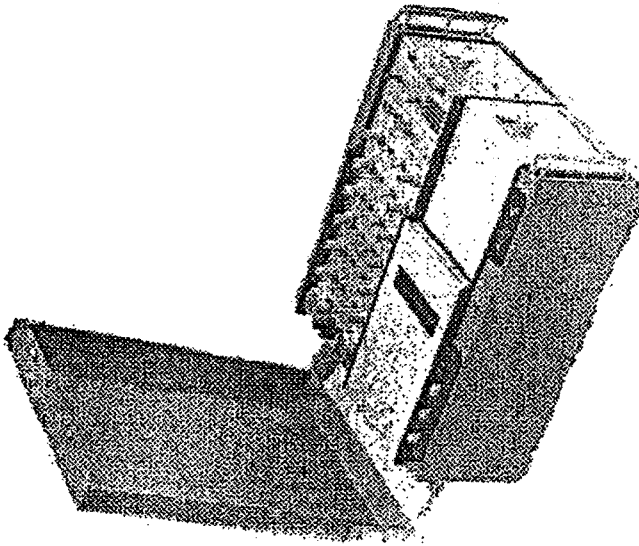
ve böylece darbenin uygulandığı an belirlenmiş olmaktadır. Özellikle kaynak-alıcı arasında yapılan direkt ölçümlerde doğru tetiklemeye ihtiyaç duyulmaktadır. Tetikleme sistemi, esas olarak hızölçerler ve elektronik devrelerden oluşmaktadır.

Bu çalışma kapsamında düşük deformasyon genliklerinde uygulanan sismik deneylerde analog ve dijital olmak üzere iki farklı kaydedici (sismograf) kullanılmıştır. Resim 4.1.a'da görülen OYO marka PS-10 model 12 kanallı analog sismograf ile kayıtlar 0.3, 0.6 ve 1.0 m/sn süpürme hızlarında hassas yüzeyli fotoğraf kağıtlarına alınmaktadır. Tetikleme sisteminin, dalga üretmek için uygulanan darbeden bağımsız olduğu bu sismograf ile alınan kayıtlardaki başlangıç zamanı, kaynağa yerleştirilen bir alıcı ve darbenin uygulanmasından kısa bir süre önce aleti çalıştırıp kaydı başlatmak sureti ile belirlenebilmektedir. Hafızalı olmadığından sinyaller doğrudan kağıt üzerine alınmakta ve biriktirme yapılamamaktadır.

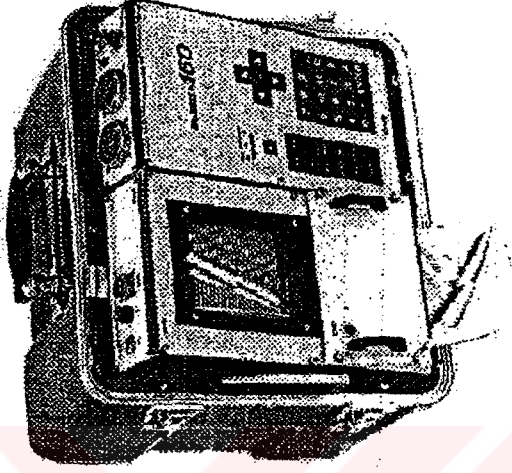
Deneylerde kullanılan diğer kaydedici ise dijital, 12 kanallı, sinyal yükseltmeli ve hafızalı OYO marka McSeis-160 model sismografıdır. Her kanal için 2048 Byte belleğe sahiptir. Dijital biriktirme fonksiyonu ile sinyal/gürültü oranı oldukça yükselmektedir. Dalga şekilleri, işletimi sırasında yapılan her türlü işlem ve çevredeki gürültü ekranından izlenebilmektedir. Ölçümlerdeki kayıtlar doğrudan özel kağıtlara basılabildiği gibi RS-232 bağlantısı ile bilgisayar ortamına da aktarılabilmektedir. Kayıtlar 25 ile 2000 mikrosaniye arasında değişik örnekleme aralıklarında alınabilme imkanı olan aletin frekans davranışı 48-1536 Hz arasındadır ve aynı aralıklarda 7 adım filtreye sahiptir. Dalga genliklerinin kazançları arttırılabilmekte ve ölçümler sırasında tetikleme sistemine 10-990 milisaniye aralığında 8 adım gecikme verilebilmektedir. Kuyu içi ve yüzey sismik deneylerinde kullanılan ve Resim 4.1.b'de görülen bu sismografin teknik özellikleri Tablo 4.1'de topluca verilmiştir.

Tablo 4.1. Kullanılan Sismografin Teknik Özellikleri

Marka ve Model	: OYO, McSeis-160
Kanal Sayısı	: 12
Kazanç	: 34 dB-80 dB (8 adım)
Frekans Davranışı	: 48 Hz-1536 Hz
Filtre	: 48 Hz-1536 Hz (7 adım)



a) Analog Sismograf



b) Dijital Sismograf

Resim 4.1. Deneylerde Kullanılan Sismograflar

Hafıza	: 2048 Byte/kanal
Gecikme	: 10-990 milisaniye
Örnekleme	: 25, 50, 100, 500, 1000, 2000 mikrosaniye
Veri Aktarımı	: RS-232
Çıkış	: Termal Baskı
Ekran	: 14 cm
İşletim Voltajı	: 12 V, 5.5 A
Boyutlar	: 39x35.5x37 cm
Ağırlık	: 16 kg

Ölçümler sırasında tabloda özellikleri verilen bu sismogaf bilgisayar destekli kullanılmış ve ölçüm sonuçları bilgisayar ortamına aktarılmıştır.

Sismograftan bilgisayara veri aktarımı, yazılan bir transfer programı ile sağlanmıştır. Deney esnasında seçilen örnekleme aralığında 2048 adet veriyi aktaran bu programla alınan kayıtların analiz işlemleri de yapılabilmektedir. Kayıtlar analiz için bilgisayar ortamında geri çağırılabilen ve dalga varışları için ilgili zaman aralığındaki bölge büyütülerek dalga formları üzerinde dalga tipini belirleyen karakteristik noktalar yeterli duyarlılıkta milisaniye cinsinden belirlenebilmektedir. Arazi deneyleri kapsamında yapılan S-dalgası ölçümlerinden sismograftan kağıt üzerine alınan kayıtlara bir örnek Şekil 4.2'de verilmiştir. Bu kayıt üzerinde örnekleme, filtre, biriktirme sayısı ve zaman ölçeği gibi bilgiler bulunmaktadır. Bu kayıt üzerinde görülen kesikli çizgiler 10 milisaniye zaman aralığını göstermekte ve dalga varışlarını belirlemek için kullanılmaktadır. Karşıt Kuyu deneylerinden 500 mikrosaniye örnekleme aralığında, 500 milisaniye uzunluğunda alınan ve sismograftan bilgisayara aktarılan S-dalgası çıkışına bir örnek ise Şekil 4.3'de verilmiştir. Üstte yer alan kayıttan görüleceği üzere dalga varışı yaklaşık 50 milisaniye civarındadır ve bu bölge bir çerçeve içine alınmıştır. Dalga varışını daha belirgin hale getirebilmek için, 40 ile 80 milisaniye arasında kalan bölge büyütülerek alttaki şekilde verilmiştir.

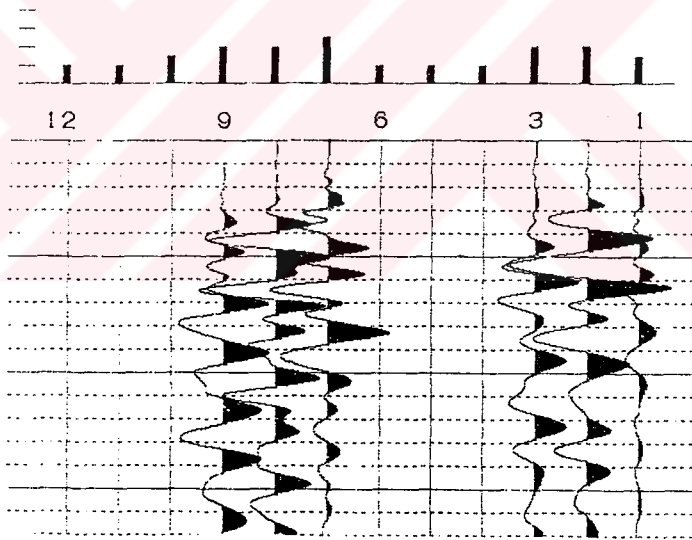
4.2.2. Dalga Kaynağı

Şekil 4.1'de verilen yüzey sismik deney sisteminde dalga üretimi, zemin yüzeyine yerleştirilen bir plakaya düşey doğrultuda darbe uygulamak sureti ile sağlanmıştır. Arazi uygulamalarında, 1.5 cm kalınlığında ve 60x40 cm

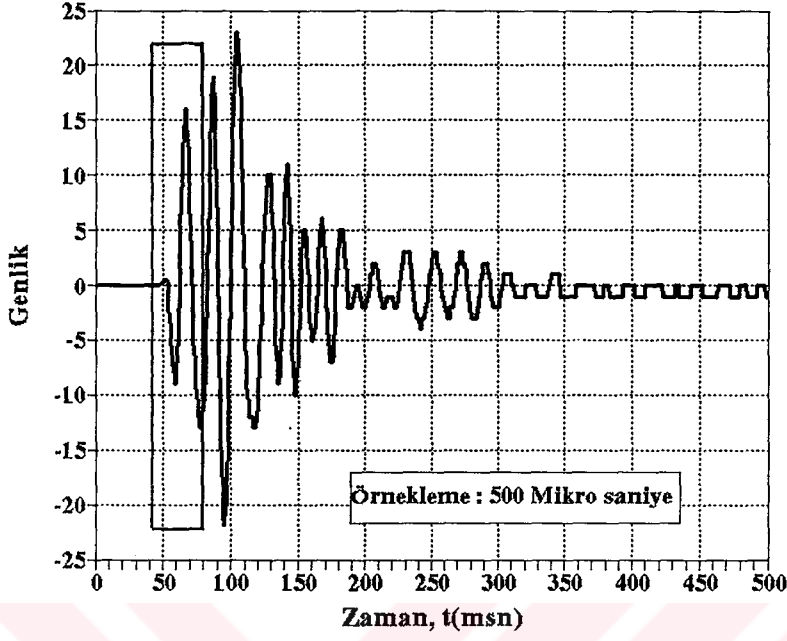
OYO

McSEIS-160 V1.81

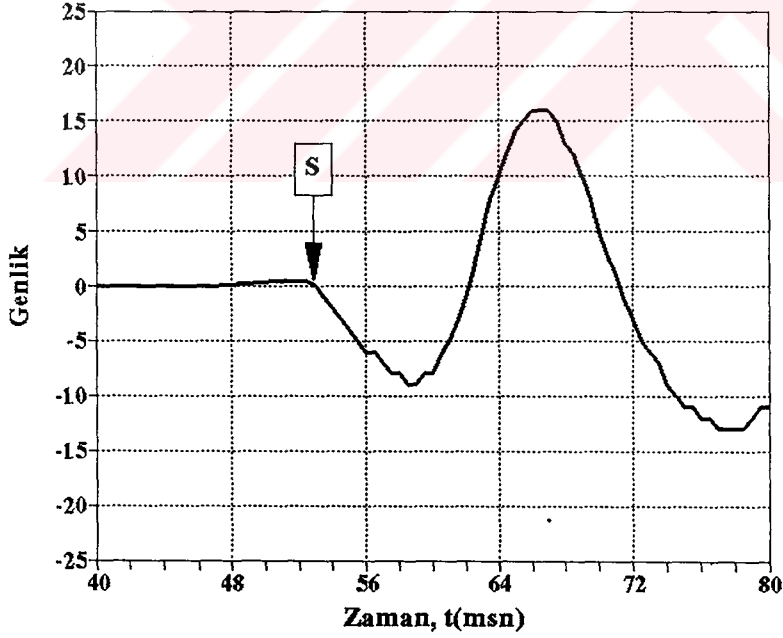
FIELD : KAMPUS
 ID.NO : 2505ME
 DATE : -- -- , -- : -- : --
 FILTER : 96 [Hz]
 STACK : 2
 SAMPLING : 500 [μ Sec]
 DELAY : 0 [mSec]
 TIME SCALE: 10 [mSec/LINE]
 TRACE SIZE: 1



Şekil 4.2. Dijital Sismograf ile Alınan Bir Kayıt Örneği



a) 500 msn Uzunluğundaki Tüm Kayıt



b) 0-80 msn Aralığının Büyütülmüş Hali

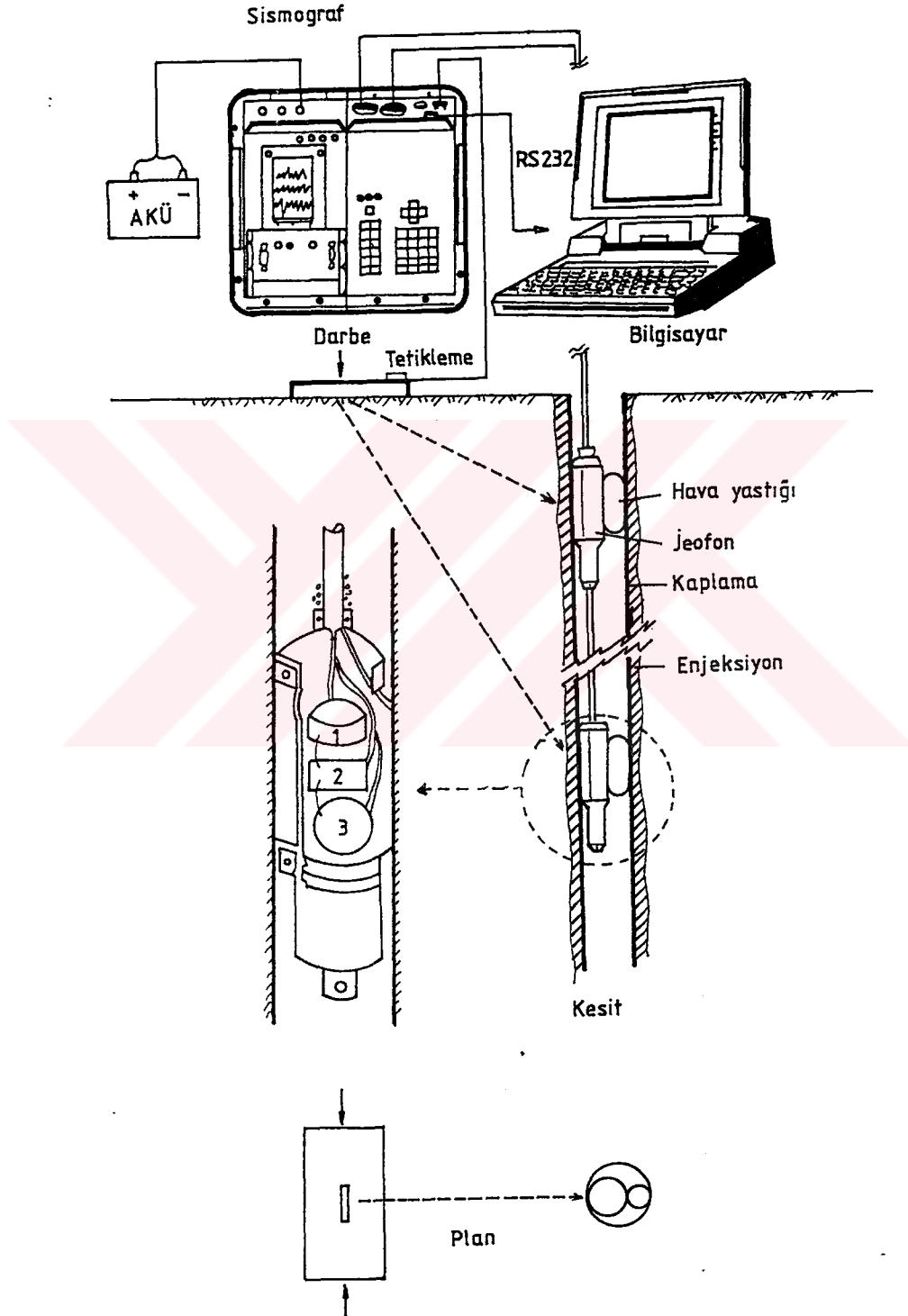
Şekil 4.3. Dijital Sismograf ile Alınan S-Dalga Örneği

boyutlarındaki çelik bir levha zemin yüzeyine yerleştirilmiş ve bu levha üzerine ağır bir çekiç (balyoz) ile vurularak P-dalgası üretilmiştir. Tetikleme sisteminin alıcısı çekicinin sapına monte edilerek kayıt aletine bağlanmış ve böylece darbenin uygulandığı sıfır zamanı belirlenmiştir. Kaynak-alıcı mesafesinin fazla olduğu durumlarda, bu şekilde üretilen dalgaların uzak alıcıda gözlenmesi zorlaşmakta ve daha büyük enerji gerekmektedir. 12 alıcı kullanılarak yapılan deneylerde bu yüzden, zemin yüzeyindeki plaka üzerine bir sehpa yardımı ile Standart Penetrasyon Deneyi (SPT)'nin 63.5 kg ağırlığındaki tokmağı düşürülerek dalga üretilmiştir. Uygulanan bu tür deneylerde tetikleme sisteminin alıcısı levha üzerine bağlanmıştır.

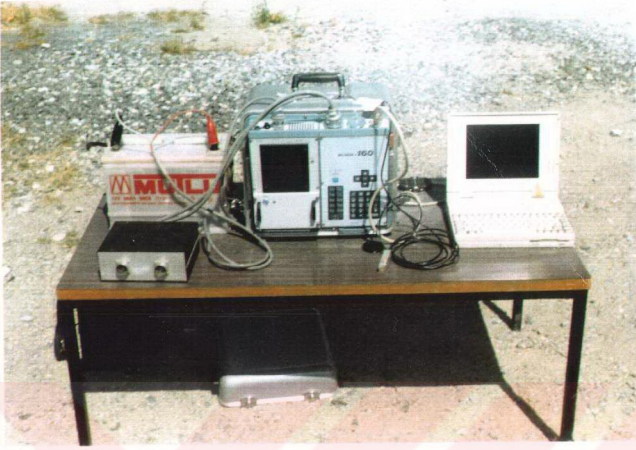
4.3. AŞAĞI KUYU SİSMİK DENEY DÜZENİ

Aşağı Kuyu yönteminde, dalga üretmek için kullanılan kaynak zemin yüzeyinde alıcılar ise kuyu içinde yer almaktadır. Bu çalışmada arazi deneylerinde kullanılan Aşağı Kuyu deney sistemi Şekil 4.4'de şematik olarak verilmiştir. Bu deney düzeni kaynak, alıcı, kayıt sistemi ve bir basınç sisteminden oluşmaktadır. Alıcıların istenilen derinlikte kuyu duvarına temas edip sabit kalması, basınç sistemi ile sağlanmaktadır. Kayıt sistemi Resim 4.2'de görüldüğü üzere 12 kanallı, dijital, hafızalı bir sismograf ve bilgisayardan meydana gelmektedir. Yüzey sismik yönteminde de kullanılan bu sistem ile ilgili bilgiler daha önce verilmiştir. Deneyin uygulanmasında dalga üretmek için zemin yüzeyine yerleştirilen bir plaka ve düşey darbe kullanılmıştır. P-dalgası ölçümlerinde bu plaka üzerine ağır bir çekiç ile düşey yönde darbe vurulmuştur. S-dalgası ölçümlerinde ise plaka, yarısına kadar zemin içine gömülmüş ve yatay yönde darbeler uygulanmıştır. Tetikleme sisteminin alıcısı ise plakanın üzerine monte edilmiştir.

Aşağı Kuyu deneylerinde alıcı olarak üç bileşenli kuyu içi jeofonları kullanılmıştır. Deneyler önce tek alıcı ile uygulanmış, ara hızların bulunmasında ve sönüm ölçümlerinde ise iki alıcı kullanılmıştır. İki adet kuyu içi jeofonu ve jeofonları kuyu içinde sabitlemek için kullanılan basınç sistemi ile deney yapılmaya hazır durumda Aşağı Kuyu sistemi Resim 4.3'de görülmektedir.



Şekil 4.4. Aşağı Kuyu Sismik Deney Düzeni



Resim 4.2. Sismik Deney Kayıt Sistemi



Resim 4.3. Aşağı Kuyu Deney Sistemi

4.3.1. Alıcılar

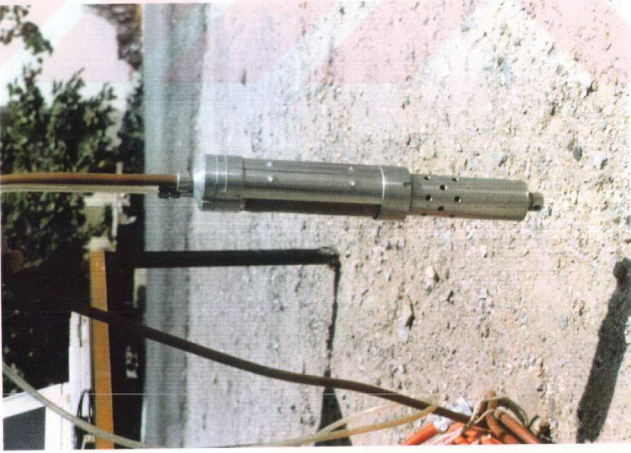
Sismik deneylerde kullanılan alıcılar, dalga parçacık hareketlerini aynı frekansta elektrik sinyallerine dönüştürmektedirler. Uygulanan Aşağı Kuyu deneylerinde alıcı olarak, hem yatay hem de düşey hareketi alabilecek şekilde bir düşey, iki yatay olmak üzere üç bileşenden oluşan ve aynı koruyucu içinde yer alan kuyu içi jeofonları kullanılmıştır. Karşıt Kuyu deneylerinde de kullanılan bu jeofonun şematik görünümü, Aşağı Kuyu sismik deney sistemi ile birlikte Şekil 4.4'de verilmiştir. Kuyu içi jeofonların tabii frekansları 28 Hz dir. Alıcıların kuyu içinde istenilen derinlikte tutulması, kauçuk membran (hava yastığı) ile sağlanmaktadır. Bir basınç sistemi ile membran şişirilmekte ve istenilen derinlikte kuyu duvarına yaslanıp sabit tutulmaktadır. Alıcılar 56-86 mm iç çapında kaplanmış kuyularda 100 m derinliğe kadar kullanılmaktadır. Alıcının bulunduğu derinlik, kablosu üzerindeki ölçü çizgilerinden kontrol edilmektedir.

Aşağı Kuyu deneylerinde S-dalgası (SH) için darbe yönüne paralel yatay alıcı kullanılmaktadır. P-dalgası için yatay alıcılar uygun olmasına rağmen bu dalga tipi düşey konumdaki alıcılarla da gözlenmektedir. Bu yüzden doğru bir sismik dalga ölçümü için alıcıların uygun yerleşimde olması gerekmektedir. Aşağı Kuyu ve Karşıt Kuyu ölçümlerinde kullanılan bir kuyu içi jeofonunun genel görünümü Resim 4.4'de verilmiştir. Kuyu içinde farklı derinliklerde yer alan İki jeofon ile uygulanan Aşağı Kuyu deneylerinde yönelimleri aynı olan iki jeofon aralığı, 2.25 m uzunluğundaki bir çubuk yardımı ile sabit tutulmuştur (Resim 4.5).

4.3.2. Basınç Sistemi

Aşağı Kuyu ve Karşıt Kuyu deneylerinde ölçümler sırasında alıcıların kuyu içinde istenilen derinlikte sabit kalmasını sağlayan basınç sistemi Resim 4.3'de deney sistemi ile birlikte görülmektedir. Bu sistem ile gönderilen hava basıncı, kuyu içi jeofonlarının kauçuk membranını şişirmekte ve kuyu kaplamasına sıkıca temas etmesini sağlamaktadır.

Alıcıların kuyu içinde sabitleme işleminde ilk arazi uygulamalarında su basıncı kullanılmıştır. Bu işlem alıcıların membranına küçük bir su pompası ile basınçlı su gönderilerek yapılmış, ancak kritik bir ölçüm derinliğinden sonra oluşan su basıncının geri alınması mümkün olmamıştır.



Resim 4.4. Kuyu İçi Jeofonu



Resim 4.5. Aşağı Kuyu Deneyleri için İki Jeofonun Bağlanması

Bu durumda jeofoların serbest kalması, basıncı arttırıp membranın patlatılması ile sağlanmış ve sistem terk edilerek hava basıncı ile çalışan sistem geliştirilmiştir. Bu sistemde basınç bir hava pompası ile verilmekte ve değeri, sistemde bulunan bir gösterge ile kontrol edilmektedir.

Ara ölçümlerin yapıldığı Aşağı Kuyu deneylerinde kullanılan iki jeofona aynı değerde basınç uygulanmıştır. Özellikle sönüm ölçümlerinde, alıcıların kuyu içinde sabitleme yöntemleri deneylere etki etmekte ve dalga genliklerinde değişimlere neden olmaktadır. Bir ölçüm derinliğinde deneylerin tamamlanmasından sonra tahliye vanası açılarak basınç düşürülmekte, böylece serbest kalan alıcılar geri çekilebilmekte veya bir sonraki ölçüm derinliğine indirilebilmektedir.

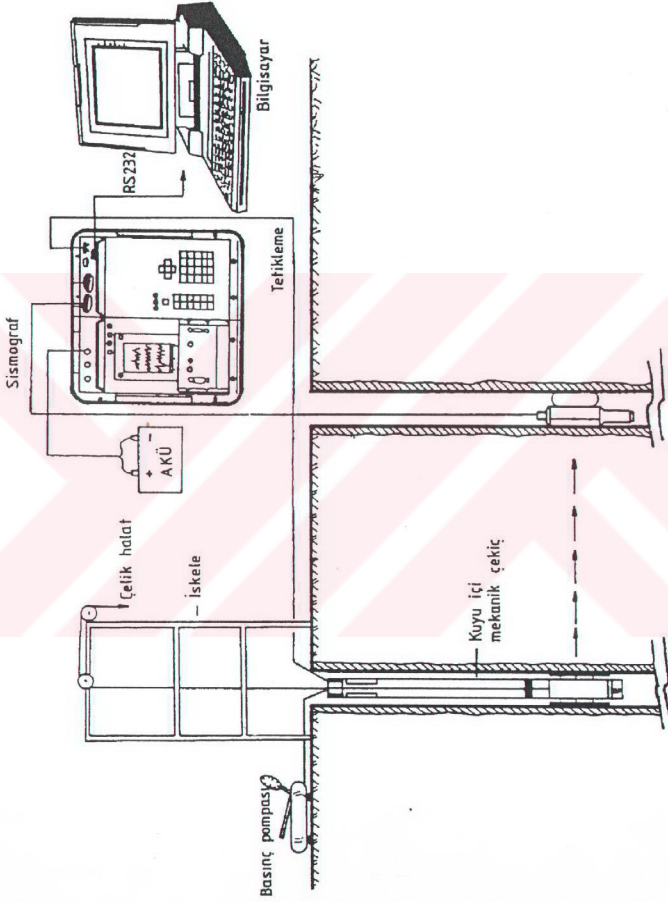
4.4. KARŞIT KUYU DENEY DÜZENİ

Alıcının ve dalga kaynağının iki ayrı kuyuda aynı derinlikte bulunduğu Karşıt Kuyu deney sistemi Şekil 4.5'de verilmiştir. Kayıt sistemi, alıcı ve alıcılar için kullanılan basınç sistemi Aşağı Kuyu ile aynıdır. Karşıt Kuyu deneylerinde mekanik kaynak ile düşey darbeden üretilen S-dalga (SV) ölçümlerinde jeofon içindeki düşey bileşen kullanılmıştır. P-dalgası için kaynağa göre radyal doğrultudaki yatay alıcı kullanımı uygun olmaktadır. Bu sistemin Aşağı Kuyu deney sisteminden en önemli farkı, dalga üretmek için kullanılan kaynaktır.

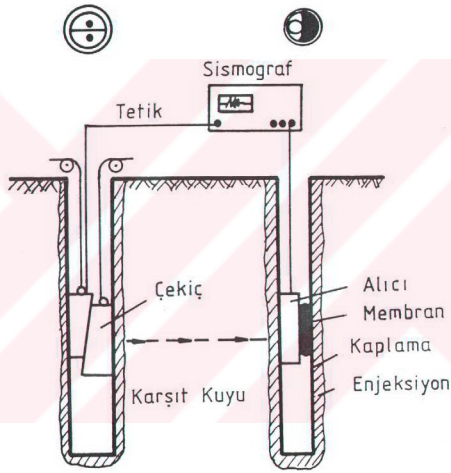
4.4.1. Dalga Kaynağı

Sismik deneylerin arazi uygulamaları, bir enerji kaynağı kullanarak sismik dalgaların üretilmesi ile başlamaktadır. Deneylerde kullanılan mekanik tipte olan dalga kaynaklarının amacı tanımlanabilir bir dalga üretilmesini sağlamaktır.

İlk Karşıt Kuyu uygulamalarında, kuyu içinde sismik dalga üretmek için, Şekil 4.6'de görüldüğü gibi iki eğik yüzeyli silindirik kütleden oluşan basit bir kaynak kullanılmıştır. Kütlelerden biri ölçüm derinliğinde sabit tutularak, diğeri belli bir yükseklikten bunun üzerine serbest düşürülmek sureti ile kuyu duvarına kesme kuvveti uygulanmış ve S-dalgası üretilmiştir. Tetikleme sisteminin alıcısı da kütlelerden birine bağlanmıştır.



Şekil 4.5. Karşıt Kuyu Sismik Deney Düzeni



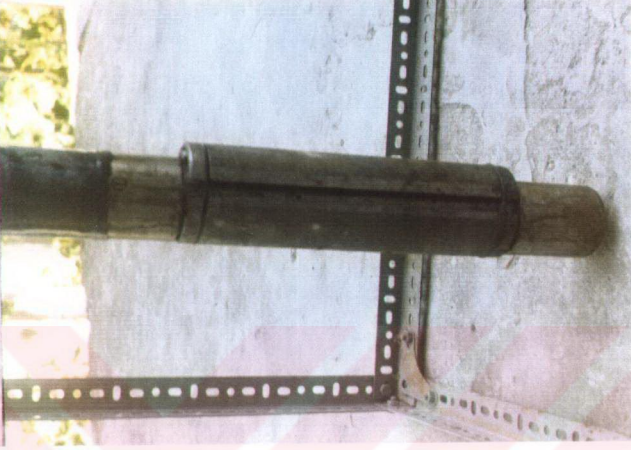
Şekil 4.6. İlk Karşıt Kuyu Deneylerinde Sismik Dalga Üretimi

Uygulama sırasında böyle bir kaynak ile derinlik arttıkça dalga üretilmesi de zorlaşmakta ve kaynağın tersine çevrilmesi mümkün olmamaktadır. Ayrıca kütlenin düşme sırasında kuyu duvarına çarpması, tetikleme sistemini erken uyarmakta ve kayıt sisteminin hatalı kayıtlar almasına neden olmaktadır.

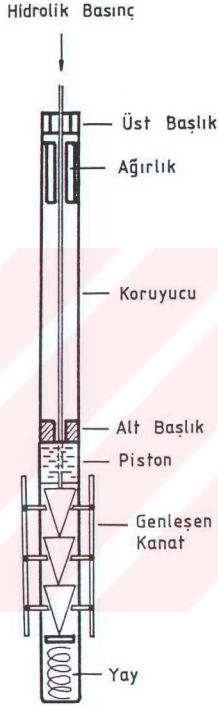
Bu düşen kütleden oluşan basit kaynağın yerine, Karşıt Kuyu deneylerinde kullanılmak üzere bir kuyu içi mekanik çekici tasarlanmıştır. Bu mekanik çekiç başlıca, düşey bir eksen üzerinde hareket eden ağırlık, genişleşebilen kanatlar ve hidrolik basınç sisteminden meydana gelmektedir. Karşıt Kuyu deneylerinde kullanılan kuyu içi dalga üretme kaynağının genel görünümü, hidrolik basınç sistemi ile birlikte Resim 4.6'da verilmiştir. Bir sehpa ve makara sistemi yardımı ile kuyuya indirilen bu çekiç Resim 4.7'de görülen genişleşebilen kanatları yardımıyla istenilen derinlikte sabitlenebilip dalga üretilmektedir. Kuyu içi mekanik dalga üretme çekicinin şematik olarak görünümü Şekil 4.7'de verilmiştir. Bu şekilden de görülebileceği üzere hidrolik olarak verilen yeteri kadar basınç pistonu aşağı doğru itmekte ve konik başlıklar kanatları kuyu duvarına doğru yaklaştırmaktadır. Yaklaşık 12 kg ağırlığındaki kütlenin alt başlığa serbestçe düşürülmesi veya üst başlığa vurdurulması ile kuyu duvarlarında bir kayma kuvveti oluşturulmakta ve kuyu eksenine dik doğrultuda S-dalgası üretilmektedir. Darbenin her iki düşey yönde olması, kaynağın tersine çevrilebilir özelliğidir. Tetikleme sisteminin alıcısı alt başlığa monte edilmiştir. Ağırlığın serbest düşürülmesi ile yaklaşık 70 joule değerinde bir sismik enerji meydana getirilmektedir. Genleşen kanatların kuyu duvarına temas yüzeyleri yaklaşık 30 cm uzunluğundadır. Kanatların kapalı olduğu durumda 70 mm çapa sahip olan çekiç, 100 mm çapa kadar genişlebilmektedir. Basınç ile piston aşağı doğru itilirken mekanik çekicinin alt tarafında bulunan yay sıkışmakta, basıncın indirilmesi ile birlikte yay, pistonu geri itmekte ve bu şekilde serbest kalan çekiç geri çekilebilmekte veya kuyu içinde daha derine indirilebilmektedir.



Resim 4.6. Mekanik Çekicin Genel görünümü



Resim 4.7. Mekanik Çekicin Genleşen Elemanı



Şekil 4.7. Kuyu İçi Mekanik Dalgı Üretme Kaynağının Şematik Görünümü

BÖLÜM 5

DENEYSEL ÇALIŞMALAR (ARAZİ UYGULAMALARI)

5.1. GİRİŞ

Bir önceki bölümde anlatılan deney düzeni kullanılarak arazi sismik yöntemleri ile dalga hızı ölçümleri için kampüs yerleşim sahasında yapılan ilk uygulamalar, sisteme işlerlik kazandırmak, aksayan yanlarını belirlemek ve kalibrasyon çalışmalarını yürütmek amacını taşımaktadır. Bu ilk ölçümlerde analog sismograf ve yüzey jeofonları kullanarak P-dalgası ölçmek sureti ile yüzey kırılma deneyleri yapılmıştır. Deneylerde kayıtlar 12 kanallı sismograf yardımı ile hassas yüzeyli kağıtlara alınmıştır. Daha eski teknoloji ürünü olan bu aletle yapılan ölçümler sırasında karşılaşılan zorlukların başında tetikleme sistemi gelmektedir. Kayıtlarda başlangıç zamanını belirlemek için kullanılan tetikleme sistemi, darbenin uygulanması ile eş zamanlı olarak çalışmadığından bu işlem elle yapılmaktadır. Kaynak veya darbe uygulanan el çekicine bir alıcı bağlanmakta ve darbeden çok kısa bir zaman önce sismograf 0.3, 0.6 ve 1.0 m/sn lik süpürme hızlarında işletilmektedir. Alınan kayıtların uzunluğu seçilen süpürme hızına bağlı olmaktadır. Yaklaşık 30 m uzunluğunda olan güneş ışığına duyarlı hassas yüzeyli kağıtlar ile 1.0 m/sn süpürme hızında en fazla 30 adet kayıt alınabilmektedir. Darbelerin yakalanamadığı veya uygun kayıtların alınamadığı durumlar da dikkate alındığında kayıt sayısı azalmakta bu ise uygulamayı zorlaştırmakta ve maliyeti arttırmaktadır. Kayıt alınan kağıtlarının güneş ışığına hassas olması ve bu ışıktan doğrudan etkilenmesi sonucunda kayıtların kaybolma ihtimali vardır. Alınan kayıtların yorumlama işlemleri diğer bir problemi oluşturmaktadır. Kaynakta bulunan alıcı yardımı ile başlangıç zamanı belirlenmekte, dalga tipine göre kayıtlar üzerinde bulunan karakteristik noktalar ile başlangıç arasında ölçülen mesafeler, süpürme hızı ile çarpılarak dalga varış zamanları belirlenebilmektedir. Yorumlamada yapılacak bir hata dalga hızlarına ve bunlar ile bulunan dinamik zemin özelliklerine yansımaktadır. Bu

sismografin her kanal için yükselticisi olmasına karşılık tüm işlemler tecrübe gerektirmektedir.

Kuyu içi sismik yöntemlerin uygulanmasına Aşağı Kuyu deneyleri ile başlanılmış ve zemin yüzeyine yerleştirilen 15 mm kalınlığındaki çelik bir plaka dalga üretme kaynağı olarak, plaka üzerine yerleştirilen bir alıcı tetikleme sistemi olarak kullanılmıştır. Deneylerin sıkça uygulanması ile birlikte kazanılan tecrübe kayıtların, yorumlanabilir nitelikte olmasını sağlamış ve böylece sismik deney düzeni aksayan yanları da giderilerek gerçek ölçümlerin alınabildiği bir sisteme dönüştürülmüştür. Daha sonra Karşıt Kuyu deney uygulamalarına geçilmiştir. Bilindiği üzere bu deney tekniğinde, alıcılar ve dalga üretici aynı derinlikte olması gerekmektedir. Kaynak olarak önceleri, bir önceki bölümde Şekil 4.6'da görülen kaplanmış kuyu içinde iki eğik yüzeyli kütle kullanılmıştır. Ölçüm yapılacak derinlikte kütlenin biri sabit tutulmakta, diğeri ise serbestçe bu kütle üzerine düşürülerek kuyu içinde kayma dalgası üretilmesi amaçlanmıştır. Basit bir mekanik kaynak olan bu sistem ile yapılan ölçümlerde başlıca problem yine tetikleme sisteminde meydana gelmiştir. Ölçüm derinliği arttıkça, düşüş mesafesine göre tetikleme zamanının ayarlanması zor olmakta ve üretilen dalgalar zayıf kalmaktadır. Ağırlığın belli bir yükseklikten düşürülmesi sırasında, diğer kütle üzerinde bulunan tetikleme sisteminin kablolarını kopardığı durumlarla da karşılaşmıştır. Ayrıca ağırlık düşerken kuyu duvarına çarpması da erken tetiklemeye neden olmaktadır.

Deney sistemine 12 kanallı, dijital, sinyal biriktirmeli ve hafızalı bir sismografin katılması ile, kaydediciden kaynaklanan problemler giderilmiştir. Bu cihazın en önemli özelliklerinden biri, tetiklemenin darbe ile birlikte otomatik olarak kayıt almayı başlatmasıdır. Ancak bu aletin kullanımı sırasında bağlantı elemanlarının uyumsuzluğu veri aktarımında görülen aksaklıklar deneyleri bir süre aksatmıştır. İlk deneme ölçümleri, kayıtların termal çıkışları ile yapılmıştır. Üzerinde zaman ölçekleri bulunan bu kayıtlardan dalga varış zamanlarının bulunması diğere göre daha kolay olmasının yanında yine de yeterli hassasiyette olmadığı düşünülerek, sismografin bilgisayar destekli kullanımı ve verilerin yazılan bir transfer programı ile sayısal olarak bilgisayara aktarımı sağlanmıştır. Ayrıca bu bilgisayar programı, dalga kayıtlarının analiz işlemlerinde de kullanılmasına olanak sağlamaktadır. Kayıtlar üzerinde ilgilenilen bölge

büyütülerek, seçilen örnekleme aralığına bağlı olarak dalga varış zamanları kolaylıkla belirlenebilmektedir.

Karşıt Kuyu deneyi için kaynak olarak kullanılan basit mekanik üreteç yerine kuyu içinde istenilen derinlikte özellikle S-dalgası üretebilen, tekrarlanabilen mekanik bir kuyu içi çekici geliştirilmiştir. Bu çekiç, hidrolik olarak genleşebilen bir eleman vasıtası ile, kuyu duvarlarına sabitlenebilmektedir. Düşey olarak her iki yönde hareket eden, alt ve üst başlığa çarparak kesme kuvveti veren bir ağırlık ile istenildiği kadar darbe kolaylıkla sağlanabilmekte ve ağırlığın hem alt hem de üst başlığa darbe vurması ile kaynak tersine çevrilebilmektedir.

Sismik deney sistemi ile gerçek ölçümlere başlanmasından sonra bir çok alanlarda uygulama imkanı elde edilmiştir. Kampüste yapılan deneylerden sonra sistem Erzincan depremi sonrasında bölgede yapılan geoteknik inceleme ve araştırmalarında kullanılarak zemin özellikleri belirlenmiş ve bu sonuçlar depremde hasar gören yapıların iyileştirme projelerinde kullanılmıştır.

Bu bölümde arazi uygulamaları kapsamında İ.T.Ü. Ayazağa Kampüsü ve Marmara Ereğlisi sahasında uygulanan deneyler ve sonuçları yer almaktadır. Ayrıca kampüste açılan sondaj kuyularından elde edilen numuneler üzerinde yapılan laboratuvar deneyleri yapılmış ve sonuçları arazi deneyleri ile karşılaştırılmıştır. Erzincan'da uygulanan arazi sismik deneylerinin daha kapsamlı olması ve bu deney sonuçlarının arazide yapılan diğer deney sonuçları ile birlikte kullanılıp, arazi ölçümlerine dayanan çeşitli korelasyonlar elde edilmesi sebebi ile bir sonraki bölümde ele alınmıştır.

5.2. KAMPÜS DENEYLERİ

Oluşturulan sismik deney düzeni ile ilk uygulamalar İstanbul Teknik Üniversitesi Ayazağa Kampüsü'nde yapılmıştır. Analog sismograf kullanılarak yapılan tüm deneyler, dijital sismografin sisteme katılması ile tekrarlanmış ve burada bu ölçümlere ait sonuçlar değerlendirmeye alınmıştır. Kampüs deneyleri yüzey kırılma ve ağırlıklı olarak Aşağı Kuyu deneylerini içermektedir. Mekanik kuyu içi dalga üretme kaynağının, sondaj kaplama borusu içinde daralmalar meydana gelmiş olmasından dolayı

belli derinlikten sonra ilerleyemeyişi sebebi ile Karşıt Kuyu deneyleri uygulanamamıştır. Kampüs deneylerinin yerleşim planı Şekil 5.1'de verilmiştir.

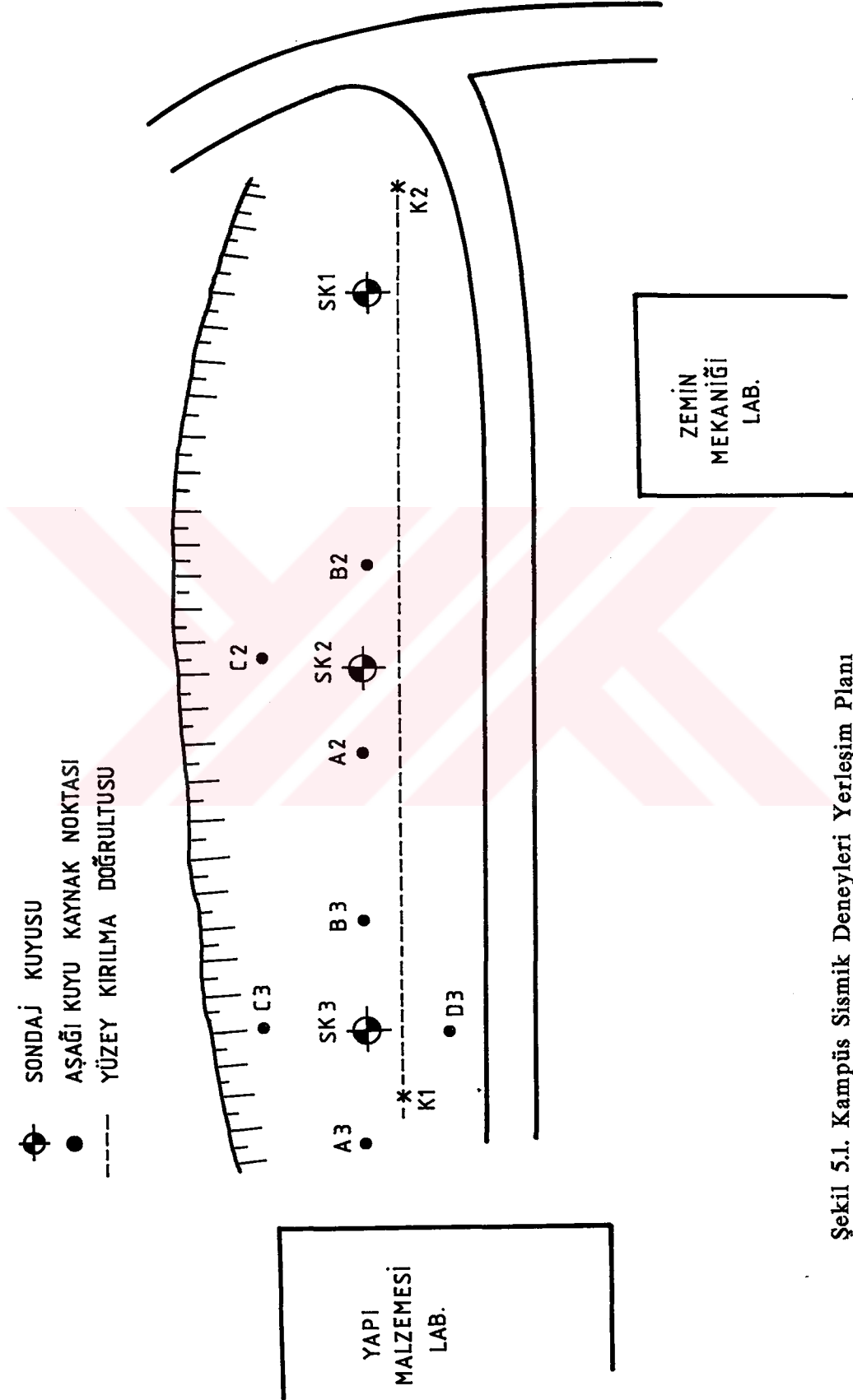
5.2.1 Yüzey Kırılma Deneyleri

Şekil 5.1'de yerleşim planında görülen sondaj kuyuları doğrultusunda uygulanan yüzey kırılma deneyinde yaklaşık 40 m mesafe içinde belli aralıklarla yerleştirilen 6 adet yüzey jeofonu ile P-dalga hızları ölçülmüştür. Tabakalaşma ve anakaya derinliğinin belirlenmeye çalışıldığı bu deneylerde kayıtlar 200 mikro saniye örnekleme aralığında dijital sismograf ile bilgisayara alınmıştır. Kaynak olarak zemin yüzeyine yerleştirilen dairesel kesitli bir demir kütle kullanılmış, üzerine tetikleme sisteminin alıcısının monte edildiği bir balyoz ile bu kütleyle düşey doğrultuda vurularak dalga üretilmiştir. Deneyler jeofon seriminin her iki tarafında K1 ve K2 kaynak noktalarında tekrarlanmıştır. Deneylerde dalga kaynağı K2 noktasında iken alınan kayıtlara bir örnek Şekil 5.2'de verilmiştir. Alınan kayıtların analizi sonucunda kaynaktan üretilen dalganın alıcılara ulaşma süreleri belirlenmiştir. Alıcıların kaynak noktalarına mesafeleri ve varış zamanları Tablo 5.1'de verilmiştir.

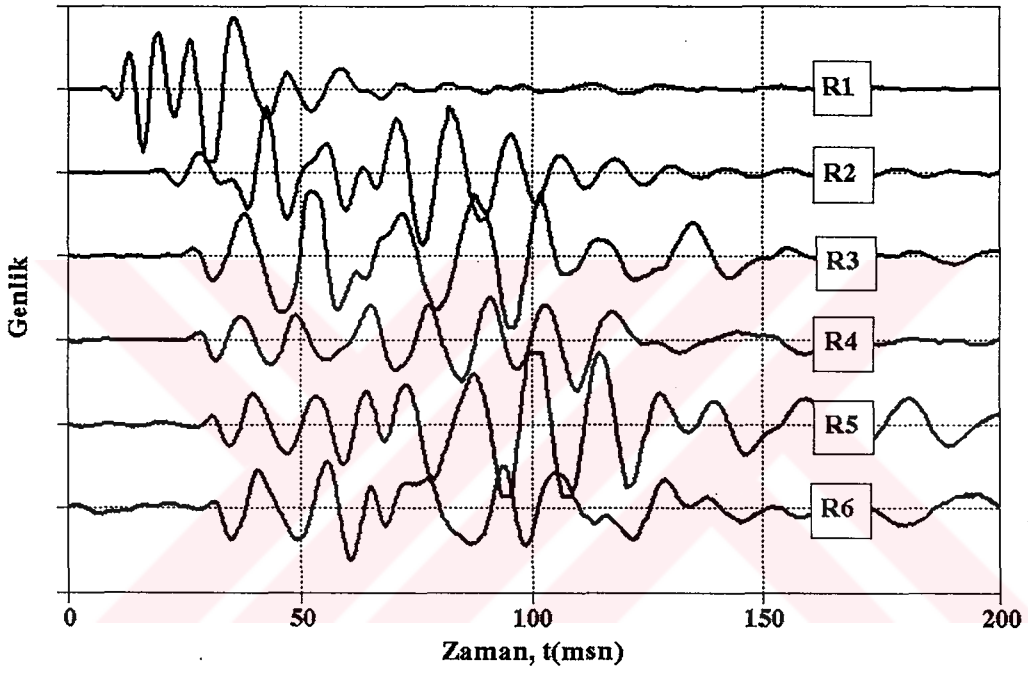
Tablo 5.1. Kampüs Yüzey Sismik Deney Sonucu

Alıcı No	Mesafe (m)	Varış Zamanı (msn)	
K ₁	0.00	T _{K1-P}	T _{K2-P}
R1	2.65	5.8	31.6
R2	7.68	13.8	29.4
R3	13.23	18.2	27.0
R4	20.68	23.5	22.8
R5	28.16	29.0	17.4
R6	35.62	32.6	6.8
K ₂	36.27	-	-

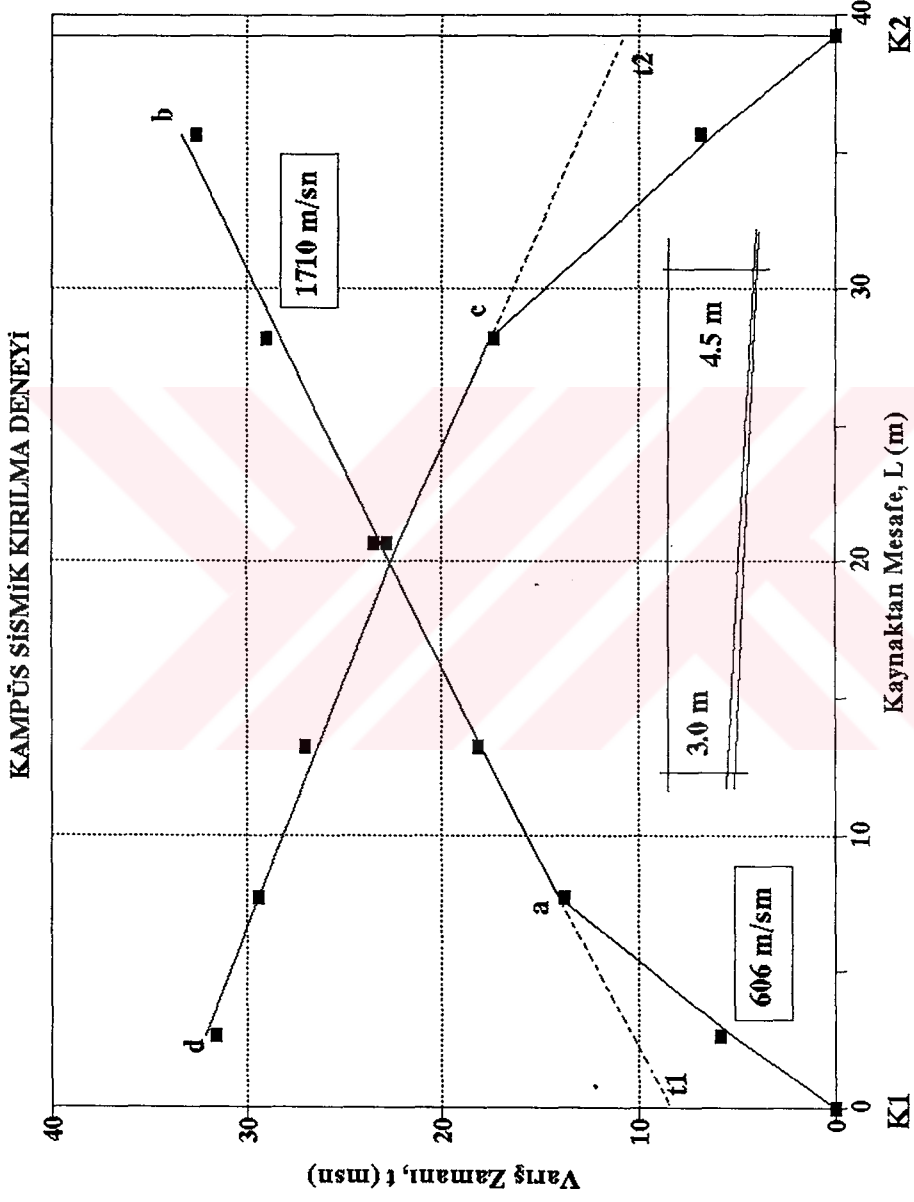
Tablodaki T_{K1-P} , K1 noktasında üretilen dalganın herhangi bir P noktasında bulunan alıcıya varış zamanını göstermektedir. Tabloda verilen değerler kullanılarak çizilen mesafe-zaman grafiği Şekil 5.3'de verilmiştir. Çizilen bu mesafe-zaman grafikleri yardımı ile tabaka hızları ve tabaka kalınlıkları tayin edilebilmektedir. Hızlar çizilen doğruların eğiminden



Şekil 5.1. Kampüs Sismik Deneyleri Yerleşim Planı



Şekil 5.2. Kampüs Kırılma Deneylerinde Kaynak Noktası K2’de iken Alınan Kayıtlara Bir Örnek



Şekil 5.3. Kampüs Yüzey Kırılma Deneyi Mesafe-Zaman Grafiği

hesaplanmaktadır. Şekilde görülen bu doğrular regresyon analizi sonucu geçirilmiştir. Doğruların eğim değiştirmeleri zemin kesitinde yer alan tabakalaşmayı göstermektedir. Tabaka derinliğini belirlemek için ölçümlerin, yüzeye yerleştirilen jeofonların her iki tarafında dalga üreterek yapılması gerekmektedir. İlk durumda kaynağa en yakın konumda bulunan alıcı, kaynağın diğer tarafa taşınması ile en uzak alıcı durumuna gelmektedir.

Tabakalı bir ortamda, altta yer alan tabakanın hızı üstteki tabakadan daha büyük olduğu durumlarda yüzeyden gelen bir dalga tabakaların ara kesitinde bir kritik açı (i_c) ile kırılmaya uğramakta ve ara kesite paralel olarak ikinci tabaka yüzeyinde hareket etmektedir. Kırılan bu dalga iki tabakanın kesişme yüzeyinde yeni bir dalga kaynağı oluşturmakta ve üst tabaka içinde zemin yüzeyine doğru aynı açı ile ilerlemektedir. İşte bu kırılan dalgalar zemin yüzeyine belli mesafelerde yerleştirilen alıcılar vasıtası ile algılanmaktadır. Kaynağa yakın alıcılara ilk olarak direkt dalga gelirken, kaynaktan daha uzak mesafelerde yer alan alıcılara kırılan dalgalar daha önce ulaşmaktadır. Tabakalı ortamda yüzeydeki bir noktasal kaynaktan açığa çıkarılan dalganın kırılma açısı;

$$i_c = 0.5[\sin^{-1}(V_1/m_1) + \sin^{-1}(V_1/m_2)] \quad (5.1)$$

ifadesi ile tanımlanmaktadır (Das, 1993). Burada m_1 ve m_2 Şekil 5.3'de verilen mesafe-zaman grafiğinde ab ve cd doğrularının eğimini göstermektedir. Kırılma açısının belirlenmesinden sonra daha yüksek hıza sahip ikinci tabaka hızı V_2 aşağıdaki eşitlik ile hesaplanmaktadır.

$$V_2 = V_1 / \sin i_c \quad (5.2)$$

Burada V_1 ilk tabaka hızıdır ve kaynağa yakın olan alıcılara direkt olarak gelen dalgaların ilk varış zamanlarından bulunmaktadır. Yatay düzlem ile β açısı yapan alt tabaka derinliği yine kritik kırılma açısından hesaplanmaktadır. Alıcı seriminin sol ve sağ tarafında yüzeydeki kaynak noktalarından, β eğimli tabakaya dik mesafeler z_1 ve z_2 aşağıda verilen bağıntılardan hesaplanmaktadır (Das, 1993).

$$z_1 = (t_1)(V_1)/(2 \cos i_c) \quad (5.3)$$

$$z_2 = (t_2)(V_1)/(2 \cos i_c) \quad (5.4)$$

$$\beta=0.5[\sin^{-1}(V_1/m_1)-\sin^{-1}(V_1/m_2)] \quad (5.5)$$

Bağıntılardaki t_1 ve t_2 , zaman-mesafe grafiklerinde kırılan dalga için çizilen doğrular ile zaman ekseninin kesim noktaları, β ise tabakanın eğim açısıdır ve zemin yüzeyinden itibaren gerçek tabaka kalınlıkları için bu açı dikkate alınmalıdır.

Seçilen doğrultu boyunca uygulanan yüzey sismik deneyleri sonucunda elde edilen verilerle yapılan hesaplamalardan bulunan hız değerlerine göre zemin kesitinde iki farklı tabaka yer almaktadır. Buna göre üstte yer alan tabakanın P-dalgası hızı ortalama 606 m/sn, daha altta bulunan tabakanın hızı ise 1710 m/sn olarak hesaplanmış ve bu tabakanın yüzeyden yaklaşık 3-4 m derinlikte olduğu bulunmuştur.

5.2.2. Aşağı Kuyu Deneyleri

Kurulan sismik deney düzeni ile Aşağı Kuyu yöntemi uygulamaları kampüste Zemin Mekanik Laboratuvarı'na yakın bir bölgede açılan sondaj kuyularında yapılmıştır. Bu amaçla yaklaşık 20 m derinliğinde 3 adet sondaj kuyusu açılmıştır. Kuyular 70 mm iç çapında plastik (PVC) borularla kaplanmış ve kaplama tabii zemin arası zayıf çimento su karışımı ile doldurulmuştur. Sondajlar sırasında tutulan kayıtlardan ve alınan numunelerin incelenmesinden, deney sahasında zemin kesitinde üstte yaklaşık 2 m kalınlığında bir dolgu tabakası altında ayrılmış, yer yer killeşmiş ardalı kıltaşı-kumtaşı tabakasının yer aldığı anlaşılmaktadır. Daha alt seviyelerde ise çatlaklı ve kırıklı kumtaşı ve kıltaşı tabakası bulunmaktadır. Karot olarak alınmış olan numunelerin RQD değerleri %0-40 arasında değişmektedir. Sondajlardan elde edilen zemin kesiti Şekil 5.4'de verilmiştir.

Kuyularda uygulanan Aşağı Kuyu deneyleri, Şekil 5.1'de verilen yerleşim planında görüldüğü gibi kaynağın bulunduğu konuma göre gruplara ayrılmıştır. Kaynak noktaları kuyu çevresinde ve kuyu eksenleri doğrultusunda seçilerek S ve P-dalga hızı ölçümleri yapılmıştır. SK1 sondaj kuyusunda, kaplamanın yaklaşık 5 m derinlikten sonra düşeyden sapması ve alıcıların kuyuya indirilememesi sebebi ile sınırlı deney yapılabilmemiş ancak sonuçları burada verilmemiştir. SK2 ve SK3 kuyuları kullanılarak yapılan Aşağı Kuyu deneyleri kaynağın bulunduğu konuma göre A, B, C ve D olarak isimlendirilmiş ve bu deneylerden seçilen SK2 için 3, SK3 için 4

Sondaj Metodu: Rotary				İ.T.Ü. AYAZAĞA KAMPÜSÜ						
Sondaj Çapı: 86/114 mm										
Muhafaza Borusu Çapı: 114 mm										
Sondaj Makinası: GMS-300										
İş yeri : İTÜ KAMPÜSÜ				Sondaj No : SK3 Zemin Kotu : +0.0 m						
	D m	TABAKA TANIMI	SPT DENEYİ DARBE SAYISI			MU BOR DER m	YASS (m)	KARO YÜZD (%)	RQD (%)	DER. (m)
			0-15 cm	15-30 cm	30-45 cm					
D1	1	Dolgu Zemin	50/10	-	-	Boş				
	2									
D2	3	KUMTAŞI-KİL TAŞI	50/5	-	-	Boş				
	4	Koyu Sarı, çok ayrılmış yer, yer killeşmiş ardalanmalı								
	5									
	6									
	7									
	8									
	9	KUMTAŞI								
	10	Sarı-koyu sarı yer yer ileri derecede ayrılmış, sık kırık ve çatlaklı; kil ve sekonder kalsit dolgulu								
	11									
	12									
	13	İnce kıltaşı bantlı								
	14									
	15									
	16									
	17									
	18	KİLTAŞI								
	19	Gri-koyu gri, sık kırıklı ve çatlaklı yer yer pirit oluşukları içerir								
	20	SONDAJ SONU								
								100	0	4.5
								64	13	6.0
								65	39	7.5
								100	40	9.0
								100	32	10.5
								100	32	11.0
								70	30	12.0
								100	40	12.5
								100	37	13.5
								100	51	15.0
								52	8	16.5
								55	12	18.0
								60	12	19.0
								62	10	20.0

Şekil 5.4. Kampüs'te Yapılan Sondajlardan Elde Edilen Zemin Kesiti

adet deney sonucu bu çalışmada değerlendirmeye alınmıştır. Kampüste uygulanan Aşağı Kuyu deneylerinde dalga üretmek için zemin yüzeyinde bulunan kaynağın, alıcıların bulunduğu kuyuya mesafeleri ve deney numaraları Tablo 5.2’de verilmiştir.

Tablo 5.2. Kampüste Yapılan Aşağı Kuyu Deneyleri

Deney No	Sondaj Kuyusu	Kaynak Mesafesi (m)	
		S-Dalga	P-Dalga
A3	SK3	4.45	5.20
B3	SK3	4.75	3.35
C3	SK3	3.30	3.30
D3	SK3	2.15	3.30
A2	SK2	2.65	2.30
B2	SK2	2.60	1.90
C2	SK2	2.65	-

Aşağı Kuyu uygulamalarında zemin yüzeyine yerleştirilen çelik bir plaka kaynak olarak kullanılmış, tetikleme sisteminin alıcısı bu plaka üzerine yerleştirilmiş ve kayıt sistemine bağlanmıştır. S-dalgası ölçümlerinde yatay doğrultuda, P-dalgası ölçümlerinde ise dikey doğrultuda darbeler ile enerji üretilmiştir. S-dalga kayıtları, kaynak tersine çevrilerek yani plakaya diğer tarafından yatay yönde vurularak ve en az iki dalganın üst üste biriktirilmesi şeklinde alınmıştır. Böylece üretilen dalgaların çevre gürültüsünden daha az etkilenmesi ve dalga ilk varışlarının daha belirgin olması sağlanmıştır.

SK2 sondaj kuyusunda yapılan deneylerde bir adet, SK3 kuyusunda yapılan deneylerinde ise iki adet kuyu içi jeofonu kullanılmıştır. Ölçümlerde iki alıcı arası mesafe bir çubuk yardımı ile 2.25 m açıklıkta sabit tutulmuş ve aynı kaynaktan açığa çıkarılan dalga, kuyu içinde iki farklı derinlikte izlenmiştir. Ölçümlerde örnekleme aralıkları değişken alınarak varış zamanlarına etkisi araştırılmış ancak genel olarak S-dalga ölçümlerinde 500,

P-dalga ölçümlerinde 200 mikrosaniye örnekleme aralığında kayıtlar alınmıştır.

5.2.2.1. Kayıtların analizi

Alınan dalga kayıtlarının analizi, dalga formu üzerinde dalga tipine göre karakteristik noktaların belirlenmesini içermektedir. P-dalga hızı daha büyük olduğundan alıcılara önce ulaşmakta ve dolayısı ile kayıtlarda sakin bölgeden sonra ilk titreşim ile kendisini belli etmektedir. P-dalgasından sonra alıcılara ulaşan S-dalgası, kayıtlarda genliği büyük olan ilk dalgadır. Kaynağın tersine çevrilmesi yani darbe yönünün değiştirilmesi ile yapılan kayıtların karşılaştırılması, S-dalgasını tanımlamada kolaylık sağlamaktadır. Önceki bölümlerde anlatıldığı üzere bu durumda P-dalgası aynı kalırken S-dalgası polarize olarak yön değiştirmektedir. Kayıtlardaki karakteristik noktalar ile tetikleme sisteminin belirlediği sıfır noktası arasında kalan süre, dalga hızlarının bulunmasında kullanılan varış zamanına eşit olmaktadır. Aşağı Kuyu deneylerinde hızlar çizilen direkt zaman-derinlik grafiklerinin eğiminden bulunmaktadır. Eğimi değiştirmeyecek şekilde karakteristik nokta seçiminde ilk varışlar alındığı gibi diğer noktalar da alınabilmektedir. Bu noktalar ilk tepe, ilk çukur veya yatay eksenle ilk kesişim noktaları olabilmektedir. Ancak kayıtların analizinde bunlardan biri seçilmeli ve tüm kayıtlarda aynı yorum yapılmalıdır.

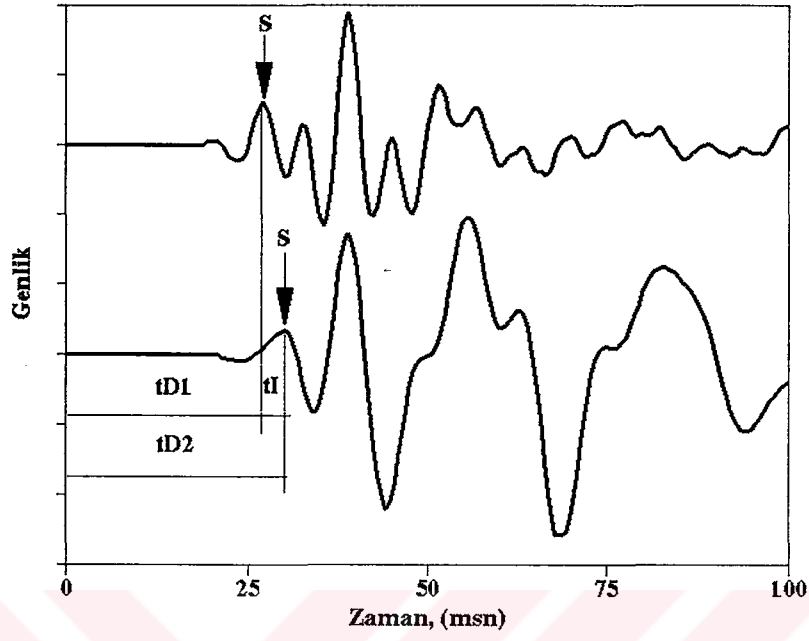
SK3 sondaj kuyusunda yapılmış S-dalga ölçümlerinden alınan kayıtlara bir örnek Şekil 5.5'de verilmiştir. B3 grubu deneylerine ait olan bu kayıt, tek darbe ile üretilen dalganın birbirinden 2.25 m mesafede sabit tutulan iki alıcı tarafından algılanmıştır. Örnekleme aralığı 500 mikrosaniye olan kayıt üzerinde S-dalga varışları oldukça açıktır ve şekil üzerinde S ile gösterilmiştir. Dalganın yakın ve uzak alıcıya varış süreleri sırasıyla t_{D1} ve t_{D2} ile belirtilmiştir. Ara zaman t_I ise bu varış süreleri arasındaki farka eşittir ve bu zamanlar kullanılarak bulunan hızlara ara hızlar adı verilmektedir. Alıcı ve kaynak arasında yapılan direkt ölçümlerde tetikleme sisteminin büyük önemi olmaktadır. Hatalı tetikleme sistemi zamanın ve hızların yanlış belirlenmesine yol açmaktadır. Ara hızlarda iki alıcı arasındaki gecikme zamanı kullanıldığı için bu ölçümler tetikleme sistemine bağlı olmamaktadır. Bu ölçümlerde dikkat edilecek nokta, bir kaynaktan açığa çıkarılan sismik dalganın iki farklı derinlikte eşzamanlı olarak gözlenmesinin gerekli olduğudur. Farklı darbe ve tek alıcı ile

yapılan ara ölçümlerin hatalı sonuçlar verebileceği düşünülerek bu tür ölçümlerden mümkün olduğunca kaçınmak ve böyle durumlarda direkt ölçümleri tercih etmek doğru olmaktadır.

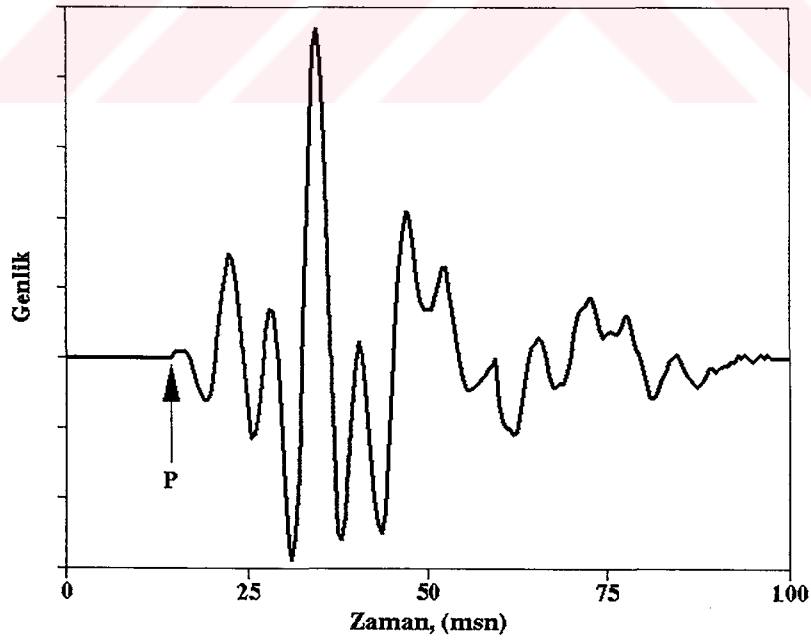
Kayıtlardaki P-dalga varışlarını belirleyecek karakteristik noktaların bulunması diğerine göre daha kolay olmaktadır. Şekil 5.6'da A3 ölçümleri kapsamında alınan P-dalga kayıtlarına bir örnek verilmiştir. Kayıtların ilk kısmında yer alan ve henüz üretilen dalganın alıcılara ulaşmadığını gösteren sakin bölgeden sonra ilk titreşim P-dalga gelişini göstermektedir. Düşey darbe ile 200 mikrosaniye örnekleme aralığında alınan şekildeki kayıta bu dalga P ile gösterilmiştir.

5.2.2.2. Aşağı Kuyu deney sonuçları

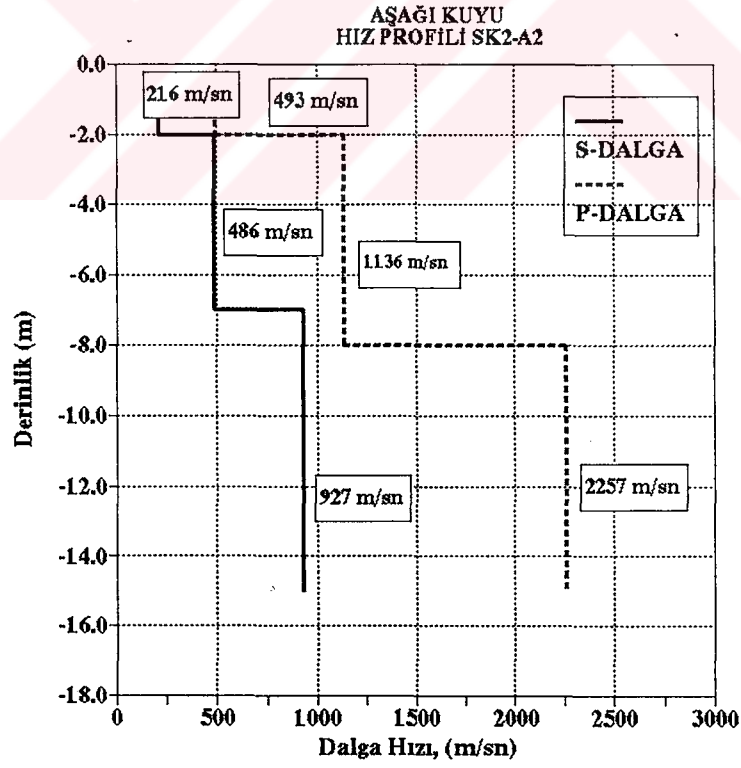
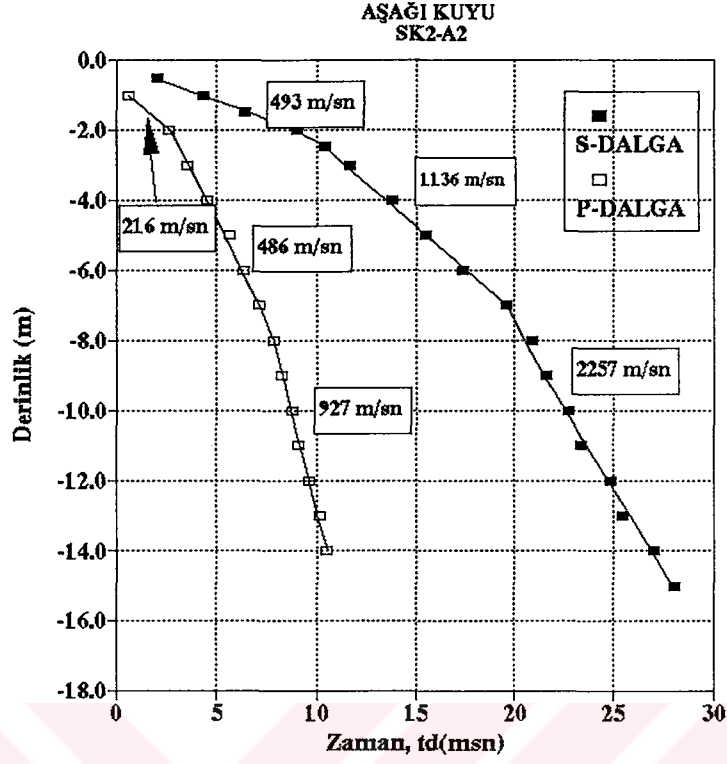
SK2 sondaj kuyusunda dalga kaynağının üç değişik konumunda sismik dalga ölçümleri yapılmış ve bu deneyler Şekil 5.1'de verilen yerleşim planında görüldüğü gibi kaynağın geometrik yerleşimine göre A2, B2, ve C2 olarak isimlendirilmiştir. A2 deneylerinde 1 m ölçüm aralıklarında S-dalga kayıtları alınmıştır. 500 mikrosaniye örnekleme aralığında alınan kayıtların analizi sonucunda belirlenen hızlar açısından zemin kesitinde üç farklı tabaka yer aldığı anlaşılmaktadır. Dolgu tabakandan oluşan ilk 2 m derinlik içinde S-dalga hızı 216 m/sn olarak bulunmuştur. Zemin kesitinde, yer yer killeşmiş çatlaklı ve ayrılmış kumtaşı-kiltaşı tabakasının bulunduğu 2-7 m derinlikleri arasında kayma dalgası hızı 486 m/sn ve bu seviyenin altında 927 m/sn değerlerini almaktadır. Yapılan P-dalgası ölçümlerinden bu tabakalar için P-dalgası sırası ile 493 m/sn, 1136 m/sn ve 2257 m/sn arasında değişmektedir. A2 deneyinden elde edilen veriler ile çizilen zaman-derinlik eğrileri ve bunlardan bulunan hız değerleri Şekil 5.7'de verilmiştir. SK2 kuyusunda yapılan ve Şekil 5.8 ile 5.9'da verilen B2 ve C2 deney sonuçlarında da benzer hız değerleri elde edilmiştir. Bu deneylerden S-dalga hızları üstte 203-217 m/sn, 2 ve yaklaşık 7 m derinlik arasında 475-478 m/sn ve daha sonra 935-973 m/sn olarak hesaplanmıştır. SK2 sondaj kuyusunda S-dalgası yapılan ölçümlerinden elde edilen sonuçlar ve hız profilleri, karşılaştırma kolaylığı açısından aynı grafik içinde Şekil 5.10'da verilmiştir. Bu şekilden de görüleceği üzere, sismik dalga hızlarının ortalama bir değer olarak belirlendiği Aşağı Kuyu deneylerinde aynı tabaka içinde, kuyu etrafında kaynak yerleşim noktalarının değiştirilmesi



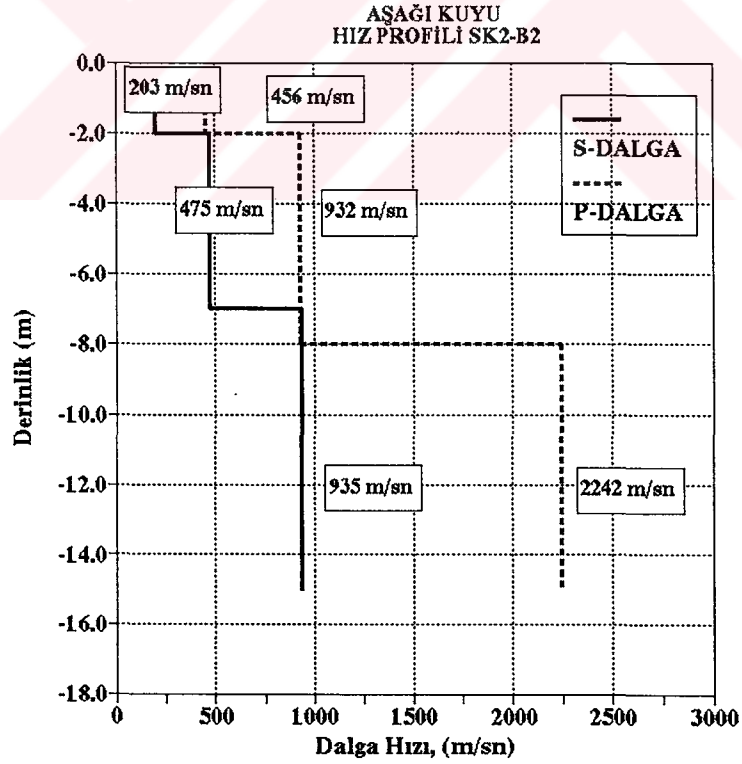
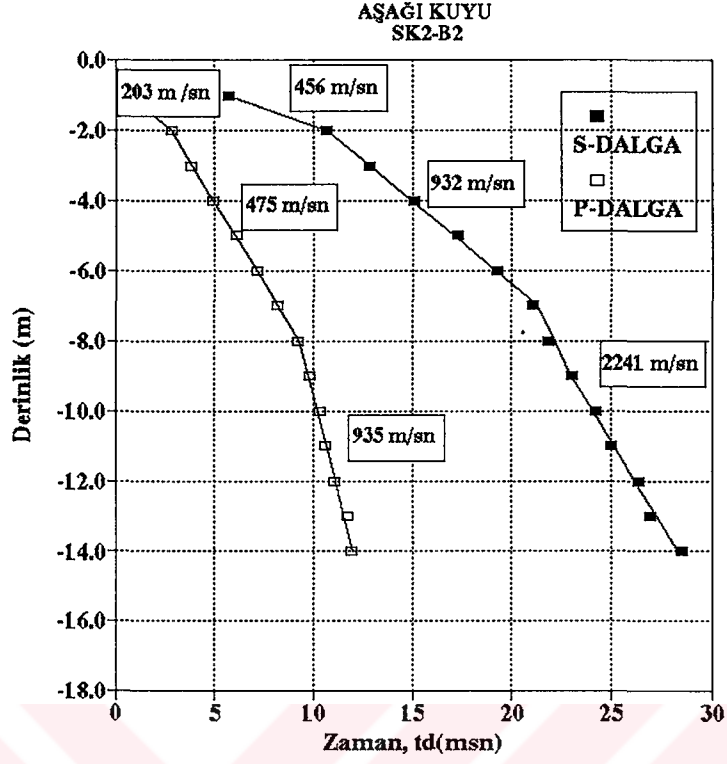
Şekil 5.5. Aşağı Kuyu S-Dalga Kayıt Örneği (B3)



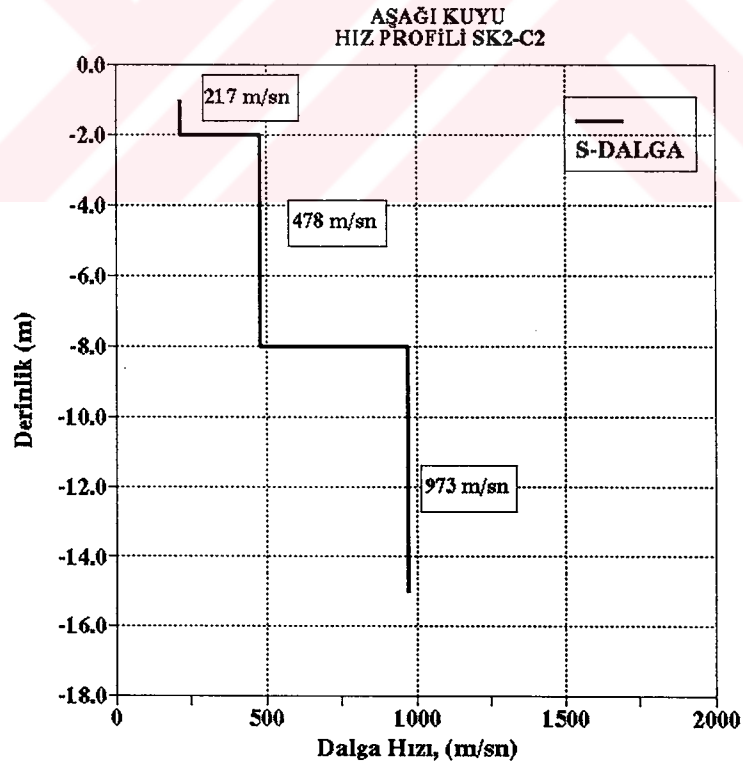
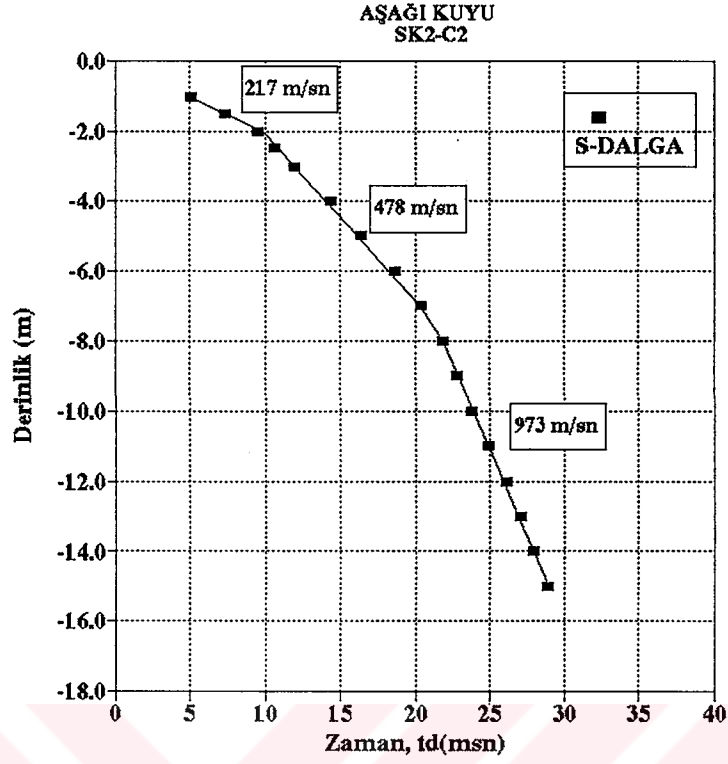
Şekil 5.6. Aşağı Kuyu P-Dalga Kayıt Örneği (A3)



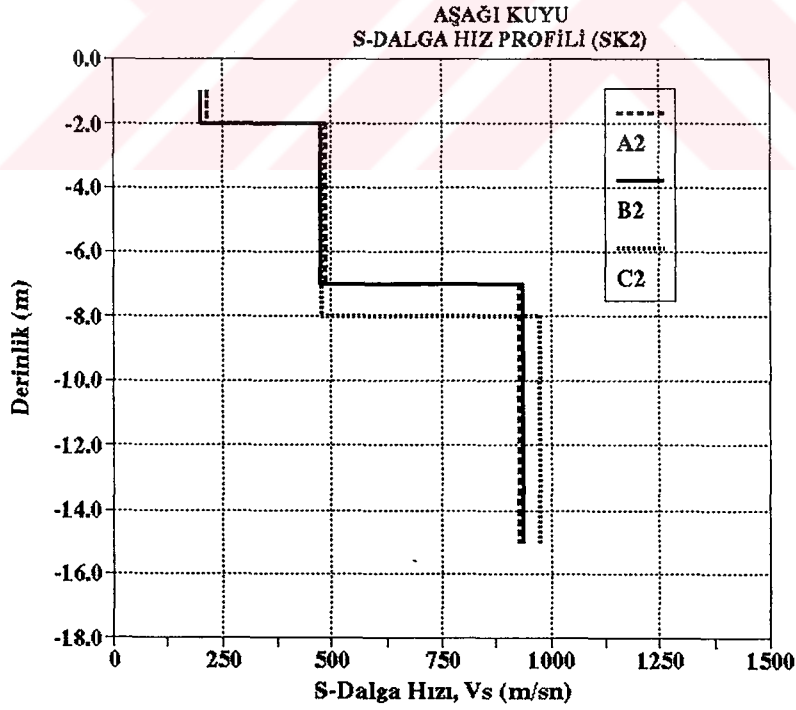
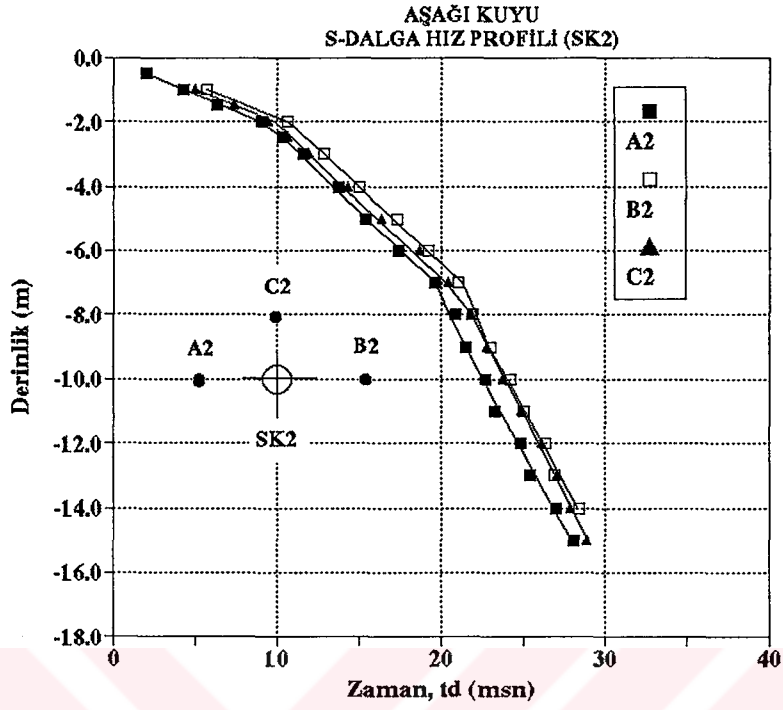
Şekil 5.7. SK2 Kuyusu A2 Aşağı Kuyu Ölçüm Sonuçları



Şekil 5.8. SK2 Kuyusu B2 Aşağı Kuyu Ölçüm Sonuçları



Şekil 5.9. SK2 Kuyusu C2 Aşağı Kuyu Ölçüm Sonuçları



Şekil 5.10. SK2 Kuyusu S-Dalga Ölçüm Sonuçlarından Elde Edilen Aşağı Kuyu Hız Profili

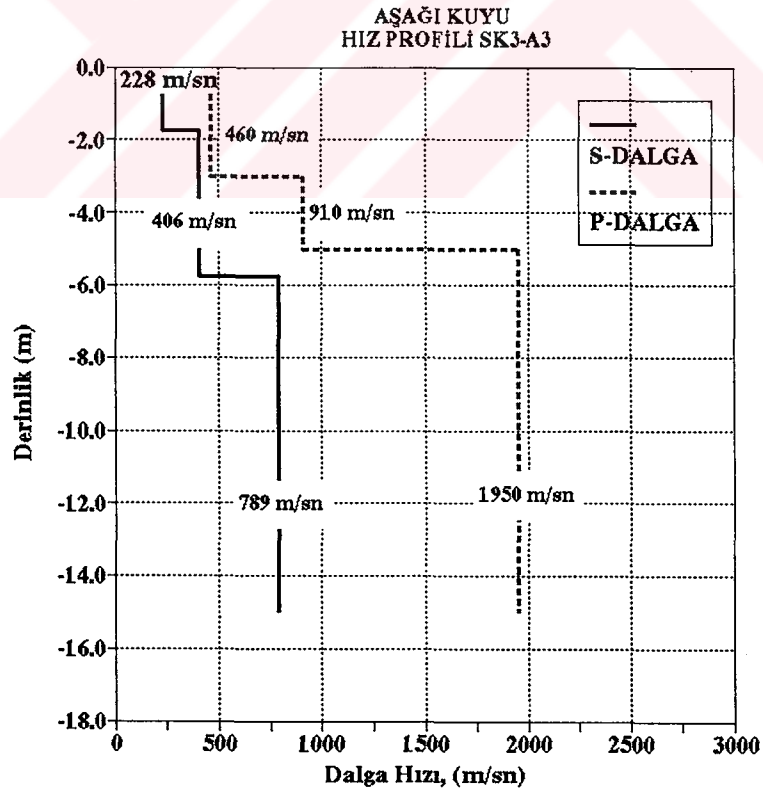
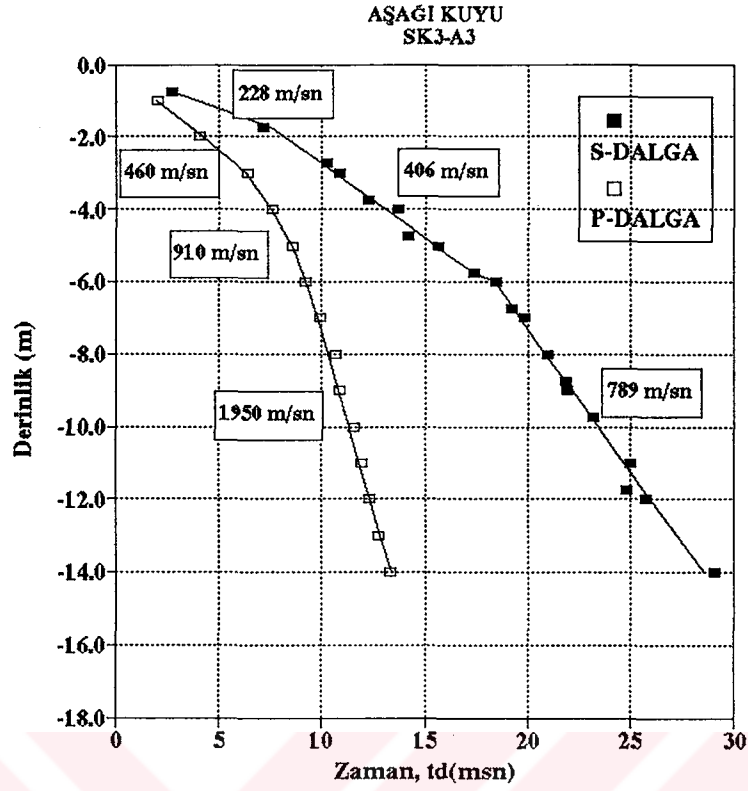
ile uygulanan deneylerin sonuçları birbirlerine oldukça yakındır ve genel olarak aynı hız profilini vermektedir.

SK3 sondaj kuyusunda uygulanan deneylerde, kuyu içinde iki adet alıcı kullanarak hem direkt hem de ara ölçümler yapılmıştır. Bir çubuk yardımı ile alıcılar arası mesafenin 2.25 m de sabit kalması sağlanmıştır. Deneyler, kuyu etrafında kaynak konumlarını değiştirerek 1 m ölçüm aralıklarında uygulanmış ve kaynağın yerleşim konumuna göre A3, B3, C3 ve D3 olarak isimlendirilmiştir. A3 grubu S-dalga ölçümleri, kuyudan 4.45 m uzaklıkta yerleştirilmiş kaynaktan üretilen dalgalarla yapılmış ve alınan kayıtların analiziden elde sonuçlar Şekil 5.11'de verilmiştir. Bu deneylerden de SK2 kuyusuna benzer sonuçlara ulaşılmış ve S-dalgası hızları 2 m derinliğe kadar 228 m/sn, 2-6 m derinlikler arası 406 m/sn ve 6 m den sonra 789 m/sn bulunmuştur. Kaynak noktası 5.20 m mesafeye taşınarak yapılan P-dalgası ölçümlerinden yüzey ile 3 m derinlik arası 460 m/sn, 3-5 m arasında 910 m/sn ve daha sonra 1950 m/sn değerleri elde edilmiştir.

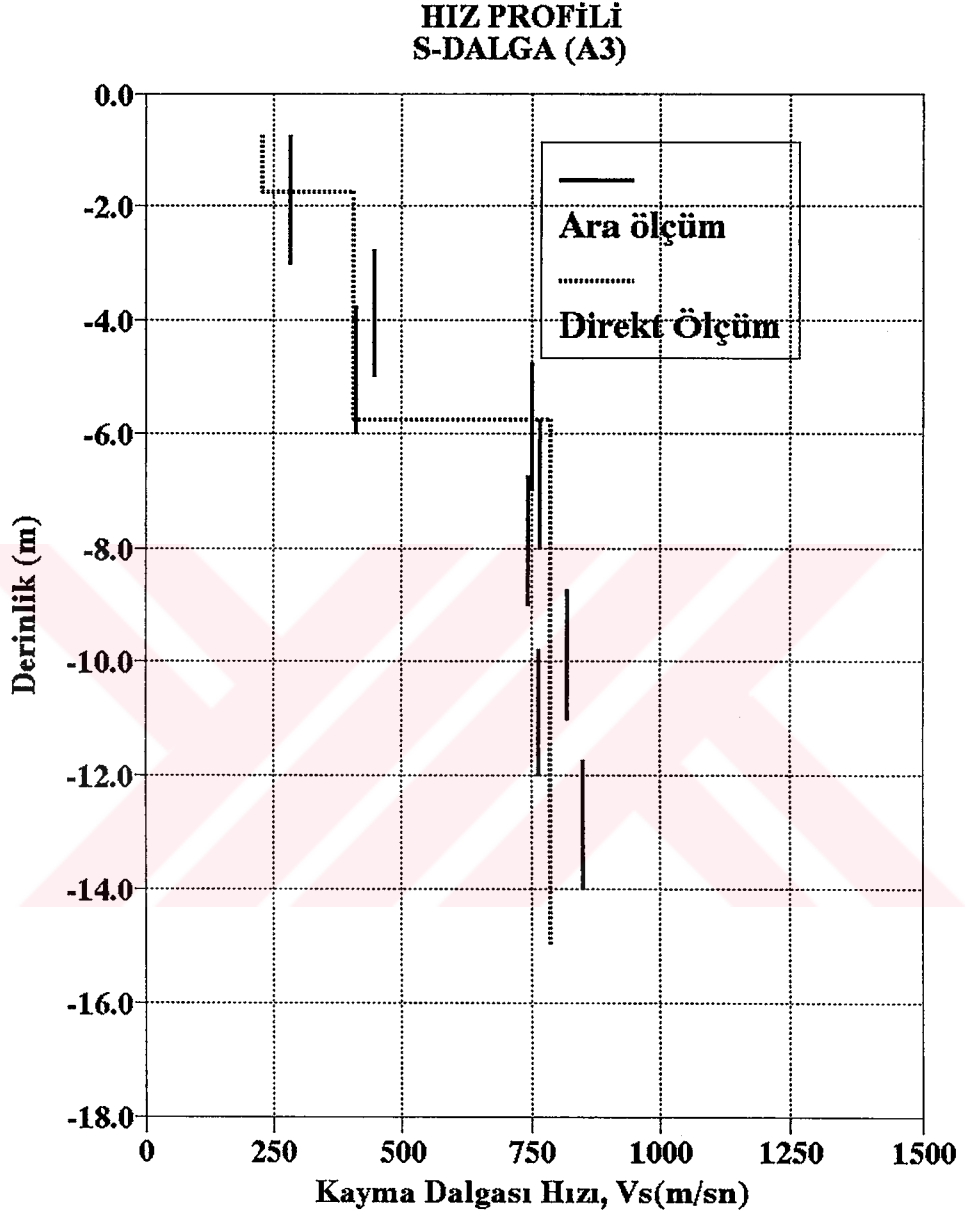
SK3 kuyusundaki deneyler, aynı darbeden üretilen sismik dalganın kuyu içinde bilinen iki farklı derinlikte yerleştirilmiş alıcılar tarafından gözlenmesi şeklinde uygulanmıştır. Böylece iki alıcı arasındaki gecikmeden ara zamanlar bulunmuş ve bunlardan ara hızlar hesaplanmıştır. R_1 ve R_2 sırası ile yakın ve uzak alıcının kaynağa uzaklıkları olmak üzere ara hızlar;

$$V_I = (R_2 - R_1) / t_I \quad (5.6)$$

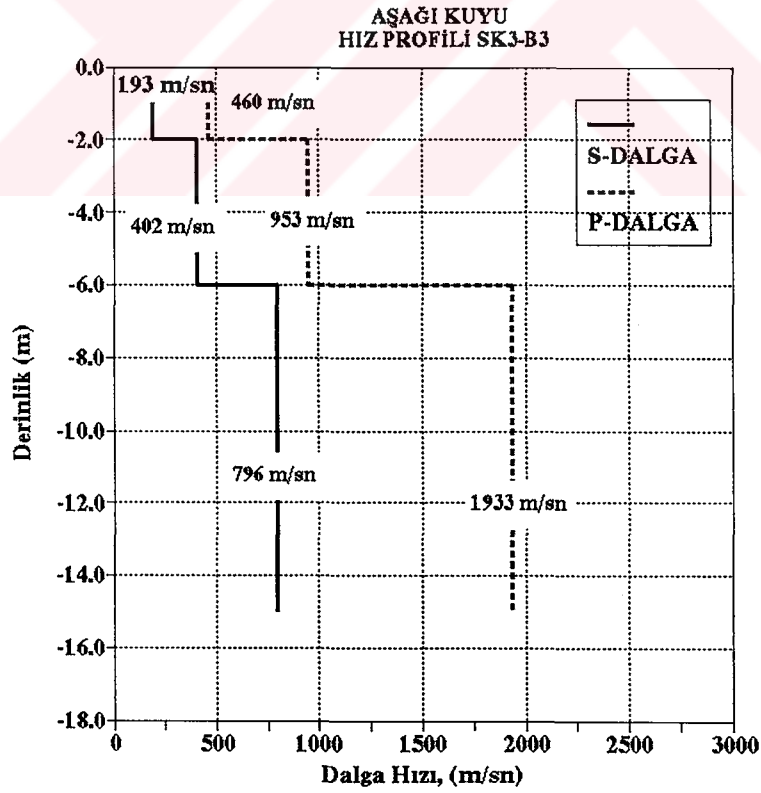
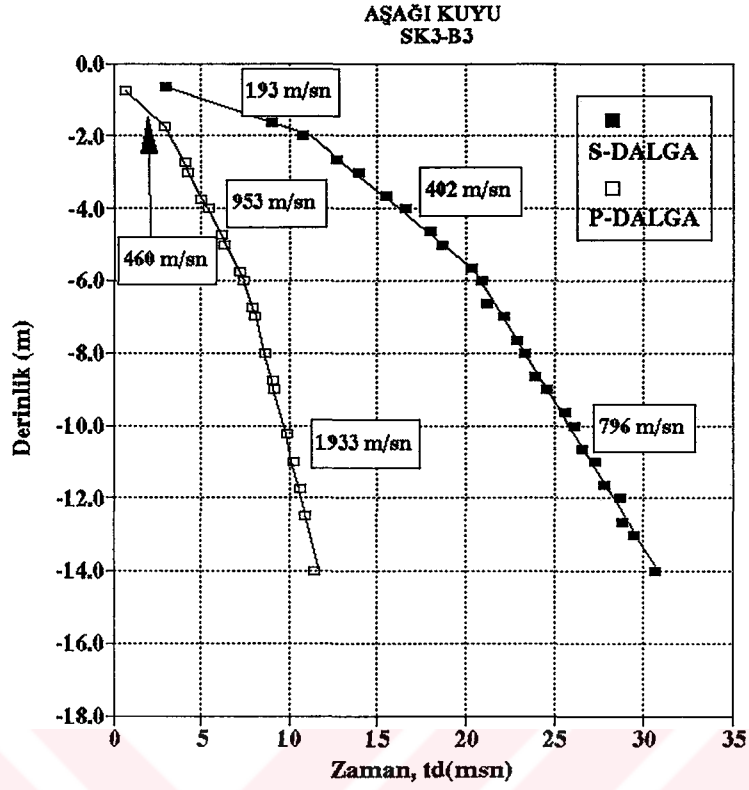
bağıntısı kullanılarak hesaplanmaktadır. Verilen bağıntıda t_I , ara zamanı göstermektedir ve varış zamanları arasındaki farka eşit olmaktadır. A3 deneyleri sonucunda direkt ve ara ölçümlerden bulunan hızlar karşılaştırma kolaylığı açısından Şekil 5.12'de verilmiştir. Direkt ölçümler sonucunda hızlar tabaka içinde sabit ve ortalama bir değer alırken, ara ölçümlerde iki alıcı arasında kalan tabaka içinde belirlenmektedir. Bir kuyuda alıcı konumları değiştirilerek tekrarlanan deneyler ile Aşağı Kuyuda hız profili daha detaylı olarak elde edilebilmektedir. Verilen şekilde direkt ölçümlerin, ara ölçümlerin bir ortalaması olduğu görülmektedir. Ara ölçümlerde zamanlar iki alıcı arasındaki gecikmeden bulunduğu için tetikleme sistemine bağlı olmamaktadır. SK3 kuyusunda kaynağın değişik yerleşim konumlarında uygulanan B3, C3 ve D3 Aşağı Kuyu ölçüm sonuçları sırası ile Şekil 5.13, 5.14 ve 5.15'de verilmiştir. Ayrıca SK3 sondaj kuyusunda yapılan S-dalga hızı deneylerinden elde edilen tüm veriler aynı



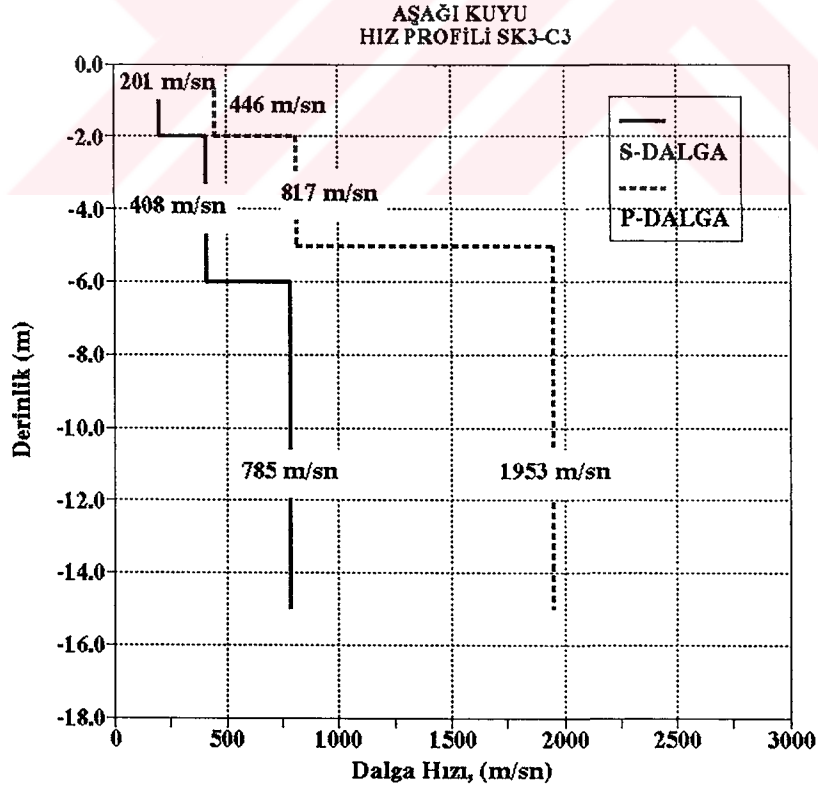
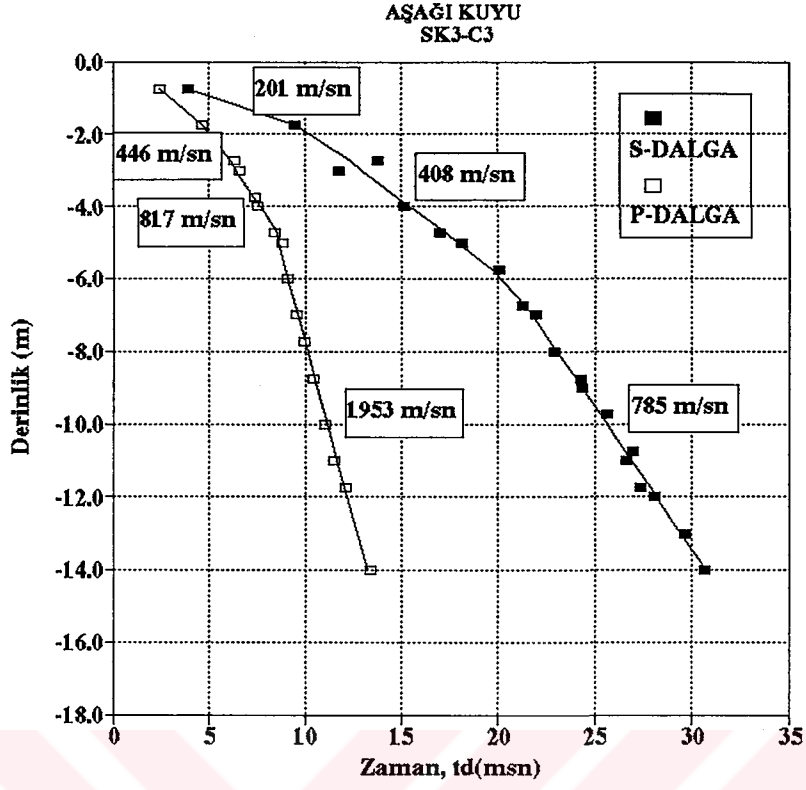
Şekil 5.11. SK3 Kuyusu A3 Aşağı Kuyu Deney Sonuçları



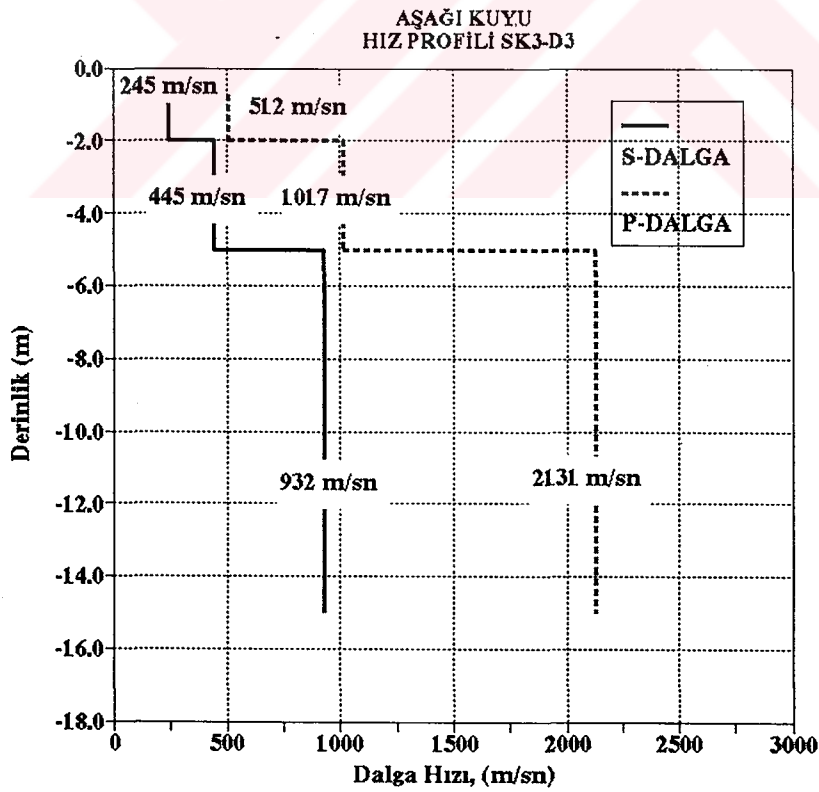
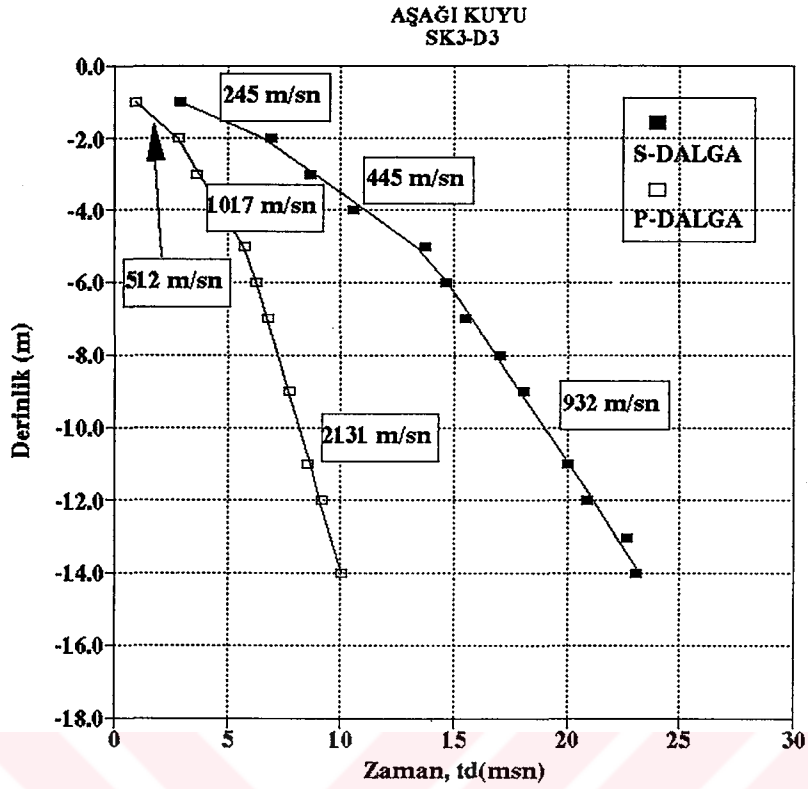
Şekil 5.12. SK3 Kuyusu A3 Aşağı Kuyu Ara Ölçüm Sonuçları



Şekil 5.13. SK3 Kuyusu B3 Aşağı Kuyu Deney Sonuçları



Şekil 5.14. SK3 Kuyusu C3 Aşağı Kuyu Deney Sonuçları



Şekil 5.15. SK3 Kuyusu D3 Aşağı Kuyu Deney Sonuçları

grafik içinde Şekil 5.16'da verilmiştir. Deney sonuçları arasında genelde bir uyum sözkonusu olmasına rağmen D3 grubu deney sonucu diğer üç deneyden biraz fark etmektedir. Bu fark P-dalgası ölçümlerinde de meydana gelmiş olması zemin yapısındaki anizotropiden kaynaklandığı düşünülmektedir. Açılan sondaj kuyularında uygulanan Aşağı Kuyu sismik deneyleri sonucunda ölçülen kayma ve basınç dalgası hızlarının ortalama değerleri kullanılarak hesaplanan zemin özellikleri aşağıdaki Tablo 5.3'de özetlenmiştir. Tabloda μ Poisson Oranı, G başlangıç Kayma modülü ve E elastisite modülünü göstermektedir.

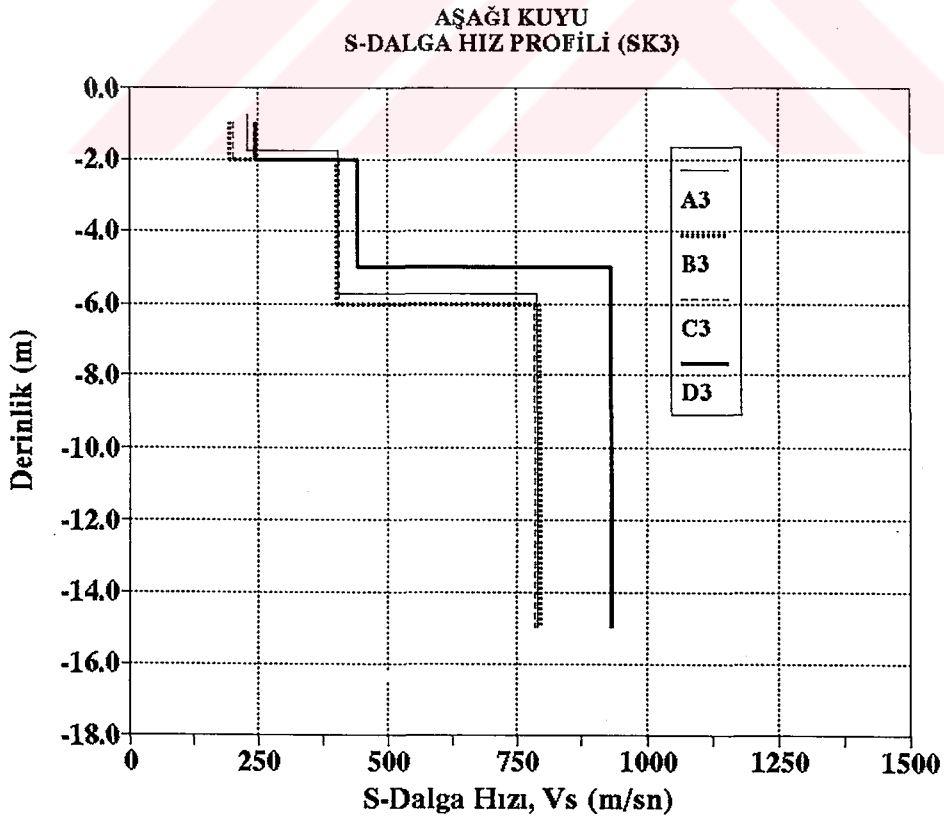
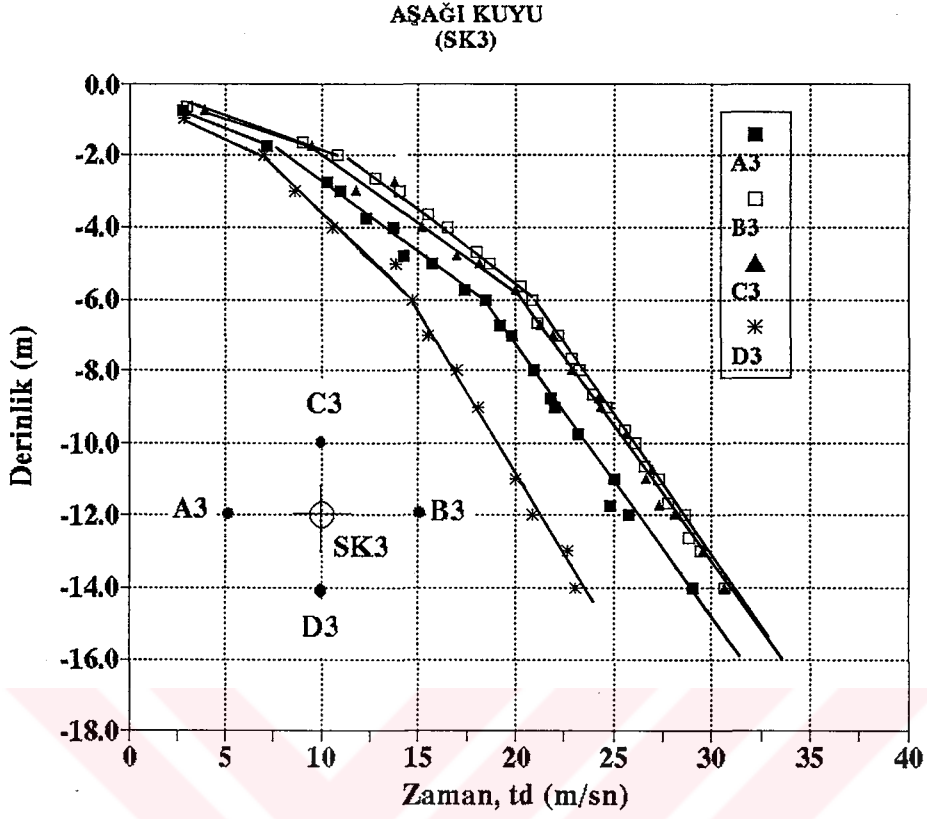
Tablo 5.3. Arazi Deneyleri ve Zemin Özellikleri

Derinlik (m)	V_s (m/sn)	V_p (m/sn)	μ	G (MPa)	E (MPa)
0.0-2.0	201	460	0.382	76.2	210.0
2.0-6.0	408	953	0.388	373.0	1040.0
6.0-14	785	1933	0.401	1440.0	4040.0

5.3. ARAZİ SÖNÜM ÖLÇÜMLERİ

Düşük genlikli malzeme sönümünün belirlenmesi, arazi ölçümlerinin önemli bir bölümünü teşkil etmektedir. Homojen ve izotrop bir ortam içinde yayılan cisim dalgalarının genlikleri, geometrik sönüm ve malzeme sönümü yüzünden azalmaktadır. Ayrıca dalga genlikleri heterojen bir ortamda ara yüzeylerde kırılma ve yansıma olaylarından da etkilenmektedir. Bu konu ile ilgili daha geniş açıklamalar 3. bölümde verilmiştir. Malzeme sönümünün arazide ölçülmesi, Karşıt Kuyu ve Aşağı Kuyu gibi bilinen sismik deney yöntemlerini kullanarak farklı mesafelerde dalga genliklerinin ölçülmesini içermektedir.

Alıcı ve kaynağın tabaka içinde aynı derinlikte bulunduğu ve dalgaların alıcılara yatay olarak geldiği Karşıt Kuyu yöntemi ile yapılan sönüm ölçümlerinde, dalga alıcılara eğik yol izleyerek ulaştığı Aşağı Kuyu yöntemine göre daha duyarlı veriler alınabilmektedir. Çünkü Aşağı Kuyu deneyinde zemin yüzeyinde bulunan kaynaktan üretilen dalgalar, alıcıların bulunduğu kuyunun kaplaması ve kaplama ile tabii zemin arasında yapılan



Şekil 5.16. SK3 Kuyusu S-Dalga Ölçüm Sonuçlarından Elde Edilen Aşağı Kuyu Hız Profili

enjeksiyondan etkilenmektedir. Ayrıca tabakalı ortamlarının ara kesitlerinde meydana gelecek kırılma ve yansımalar da genlik ölçümlerine etkili olmaktadır. Bununla birlikte Aşağı Kuyu yöntemi sönüm ölçümlerinde kullanılmakta ve elde edilen verilere sönüm oranını hesaplamak için benzer işlemler ve analizler uygulanabilmektedir. Ancak düşük deformasyon seviyelerinde zeminlerdeki sönümünün de küçük olması nedeni ile bu tür ölçümlerden sönüm oranının elde edilebilmesi kolay olmamaktadır.

Geoteknik mühendisliğinde zeminler için sönüm oranı (D) aşağıdaki ifade ile verilmektedir (Hoar, 1982).

$$D = [\ln(A_1 R_1 / A_2 R_2)] / \{(2\pi t_1 / T)^2 + [\ln(A_1 R_1 / A_2 R_2)]^2\}^{0.5} \quad (5.7)$$

Bu eşitlikte A_1 ve A_2 , R_1 ve R_2 mesafede aynı kaynaktan çıkan enerji ile dalga formları üzerinde benzer karakterdeki noktalarda dalga genlikleri, T dalga periyodu ve t_1 ara zamanı göstermektedir. Bu eşitlik kullanılarak sönüm oranının arazi deneyleri ile ölçülmesinde kaynaktan iki farklı noktada dalga genliklerinin gözlenmesi gerektiği anlaşılmaktadır.

Kampüste yapılan Aşağı Kuyu deneyleri ile SK3 sondaj kuyusunda sönüm ölçümleri yapılmıştır. A3 ve C3 kaynak yerleşiminde uygulanan bu deneylerde aynı özelliklere sahip ve tabii frekansları 28 Hz olan iki adet kuyu içi jeofonu kullanılmıştır. Her ölçüm derinliğinde alıcılar arası mesafe 2.25 m mesafede sabit tutulmuş ve kayıtlar aynı genlik kazancında alınmıştır. Alıcıların kauçuk membranlarına 1 kg/cm² hava basıncı verilerek kuyu duvarlarına sabitlenmiştir. Dalga genlikleri 3. bölümde Şekil 3.11'de gösterilen, ilk tepe noktası ile yatay eksen arasında seçilmiştir. Bu deneylerde, sönüm hesaplamalarında iki farklı mesafede ölçülen dalgaların genlik oranları yeterli olmakta, genliklerin gerçek değerlerine gerek duyulmamaktadır. Çeşitli derinliklerde alınmış kayıtlardan belirlenen genlik oranları, periyot ve zamanlar ile bunlardan hesaplanan başlangıç sönüm oranları Tablo 5.4'de verilmiştir.

Tablodaki A_1/A_2 , kaynaktan R_1 ve R_2 mesafede bulunan alıcılarda gözlenen dalgaların genlik oranı (spektral oran), t_1 iki alıcı arasındaki ara zaman, T dalga periyodu, D ise 5.7 eşitliği ile hesaplanan sönüm oranı olmaktadır.

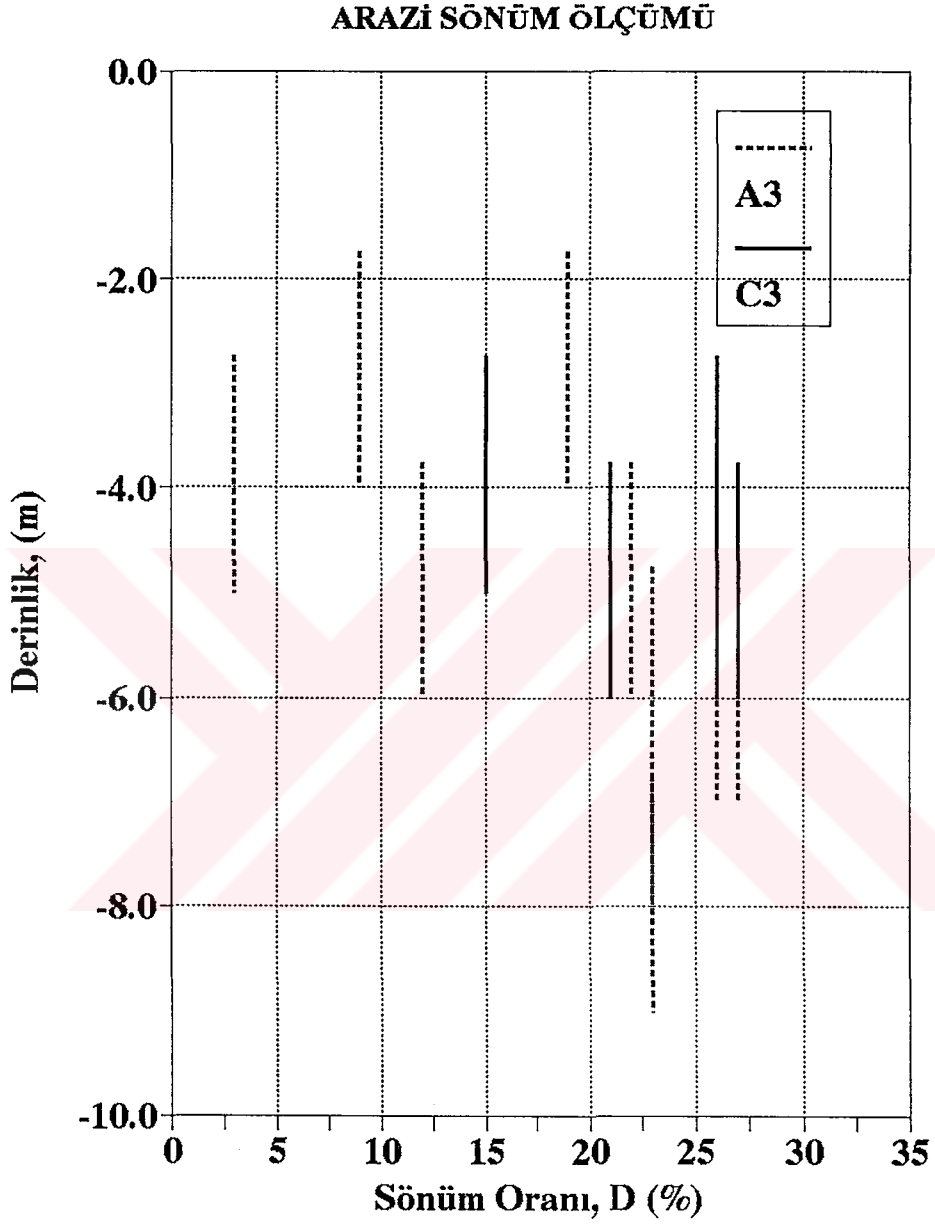
Tablo 5.4. Arazi Sönüm Ölçümleri A3 Deney Sonuçları

Deney No	Alıcı Derinliği (m)	A_1/A_2	R_1/R_2	t_I (msn)	T (msn)	D (%)
A3	1.75-4.00	2.167	0.80	3.0	6.5	19
	1.75-4.00	1.556	0.80	3.0	6.5	9
A3	3.75-6.00	4.000	0.78	4.1	5.0	22
	3.75-6.00	4.000	0.78	4.1	5.0	12
A3	4.75-7.00	4.750	0.78	4.4	5.0	23
	4.75-7.00	5.667	0.78	4.4	5.0	26
A3	5.75-8.00	2.500	0.79	2.4	5.0	23
A3	6.75-9.00	2.489	0.80	2.4	5.0	23

A3 ve C3 deneylerinde yapılan sönüm ölçümlerinden elde edilen değerler Şekil 5.17'de verilmiştir. Burada 2.25 m açıklığındaki İki jeofon arasında tabakanın değişmediği ve sönüm oranının ölçüm yapılan bu iki nokta arasında sabit kaldığı kabul edilmiştir. Derinlikle sönüm oranı değişiminde %3 ile yaklaşık %25 arasında bir dağınıklık görülmektedir. A3 ölçümlerinden bulunan sönüm oranları bir ortama değer olarak derinlikle değişimi de aynı şekilde verilmiştir. Aynı ölçüm derinliğinde aynı koşullarda tekrarlanan deneyler arasında dahi farklılıklar görülmektedir. Düşük deformasyon genliklerinde yapılan deneyler ile arazi sönüm oranının bulunması kolay olmamaktadır. Kuyularda yapılan kaplama ve enjeksiyon işlemleri dalga genliklerini etkilemektedir. Ayrıca alıcıların kuyu içinde sabitleme yöntemleri de deneylere etkili olmaktadır. Aynı ölçüm derinliğinde tekrarlanan deneylerde dalga üretimi için açığa çıkarılan enerji miktarı da bulunan genlik oranlarına etkili olmakta ve deneyler aynı genlik kazançlarında yapılmasına rağmen, oranların farklı olmasına neden olmaktadır.

5.4. LABORATUVAR DENEYLERİ

Dinamik zemin özellikleri, arazide ve laboratuvarında yapılan deney sonuçlarından elde edilen verilere göre belirlenmektedir. Zemin kesitinde



Şekil 5.17. Aşağı Kuyu ile Yapılan Sönüm Ölçüm Sonuçları

yer alan bir tabakanın bu özelliklerinin laboratuvar deneyleri yardımı ile bulunmasında rezonans kolon, dinamik üç eksenli, dinamik basit kesme gibi çeşitli teknikler kullanılmaktadır (Özüdoğru, 1993). Bu deney teknikleri arasındaki temel farklılık, uygulanan dinamik yükün şekli olmaktadır.

Mühendislik malzemelerinin yük altındaki davranışları, gerilme-şekil değiştirme ilişkisi ile incelenmektedir. Bir çok malzeme yükün ilk uygulandığı ve deformasyonun küçük genliklerinde elastik davranış sergilemektedir. Elastik davranışın görüldüğü bu deformasyon seviyelerinde gerilme-şekil değiştirme eğrisinin doğrusal kısmının teğeti başlangıç modülüne eşit olmaktadır. Başlangıç modülleri laboratuvarla ultrases ve rezonans frekans deneyleri ile de belirlenebilmektedir. Malzeme özelliklerinin bu deneylerle belirlenmesinde, numune çok küçük gerilmelerin etkisinde kalmakta ve bu gerilmeler altında meydana gelen deformasyonlar da elastik bölgede yer almaktadır. Bu koşullar altında numune iç yapısında her hangi bir değişiklik oluşmadığından bu tür deneylere tahribatsız deneyler adı verilmektedir.

Kampüste Aşağı Kuyu deneylerinin uygulandığı sondajlardan elde edilen numuneler üzerinde, dinamik özellikleri belirlemek amacı ile laboratuvarla ultrases ve rezonans frekans deneyleri yapılmış, zemin özelliklerine uygulan deney yöntemlerinin etkisi araştırılmıştır ve sonuçlar arazi deneyleri ile karşılaştırılmıştır. Arazi deneylerinin yapıldığı sahada açılan sondajlardan alınan karot numuneler üzerinde yapılan laboratuvar deneyleri aşağıda verilmiştir.

5.4.1. Ultrases Deneyleri

İnsan kulağının duyabileceği frekans sınırları dışında ($f > 16000$ Hz) oluşan ses dalgalarına ultrases adı verilmektedir. Bir cisim içinde V hızı ile yayılan bu dalgalarının meydana getirdiği enerjinin büyük bir kısmı (%90'ı) bir koni içinde yer almaktadır. Meydana getirilen enerjinin dağılmaması için koni açısının küçük yani frekansın büyük olması gerekmektedir. Ultrases dalgaları cismin yüzeyinde, enine ve boyuna doğrultuda yayılırken enerjinin bir kısmı malzeme tarafından emilmektedir. Ultrases deneyinde, L boyundaki numunenin bir ucunda ses dalgası üreten bir jeneratör diğer ucunda ise alıcı bulunmaktadır. Deneylerde, dalganın L uzunluğundaki numune içinde hareket zamanı (t_u) mikrosaniye olarak ölçülmekte ve

dalganın yayılma hızı ise numune boyunun bu zamana bölümünden elde edilmektedir. Dalganın boyuna doğrultudaki yayılma hızı (V_p) bilindiğine göre elastisite modülü (E), daha önce verilen bağıntılardan hesaplanmaktadır (Hugo, 1989).

Bu deney tekniğinde, ultrases dalgasının tamamı havada yansıyabildiği için verici ve alıcıların numuneye tam temas etmesi ince bir yağ tabakası ile sağlanmaktadır. Deney yapılan ortamın sıcaklığının $5-30^{\circ}\text{C}$ arasında olması sonuçlara etkilememekte, ancak sıcaklığın 30°C üstünde olması ölçülen zamanın yaklaşık %5 azalmasına neden olmaktadır. Arazi deneylerinin uygulandığı sondaj kuyusuna ait numuneler üzerinde yapılan ultrases deney sonuçları Tablo 5.5'de özetlenmiştir.

Tablo 5.5. Ultrases Deney Sonuçları

Numune No	Derinlik (m)	L (mm)	t_u (μsn)	$\bar{\rho}$ (kN/m^3)	V (m/sn)	E (MPa)
1	7.50	89.0	34.3	23.4	2595	8180
2	8.00	127.2	49.8	24.0	2554	8130
3	11.50	93.0	35.4	22.0	2627	7620
4	12.00	91.8	34.2	23.2	2684	8640
5	13.50	153.0	70.7	22.1	2235	5690

Tablodaki L numune boyunu, t_u mikrosaniye biriminde ölçülen dalga hareket zamanı, $\bar{\rho}$ birim hacim ağırlığı, V dalga yayılma hızı ve E ise elastisite modülünü göstermektedir.

5.4.2. Rezonans Frekans Deneyleri

Tahribatsız deneylerden olan rezonans frekans deneyinde, L boyundaki numunenin bir ucundan verilen titreşimin oluşturduğu deformasyon bir V hızı ile diğer uca ulaşmakta ve yansıyarak tekrar geri dönmektedir. Titreşimin tekrarı halinde deformasyonlarda artış olmakta ve en büyük değerinde rezonans meydana gelmektedir. Birbirini takip eden iki titreşim arasındaki t_1 zamanının,

$$t_1=2L/V \quad (5.8)$$

olacağı yukarıdaki tanımdan açıktır. Bu titreşimin bir saniyedeki tekrar sayısı, yani frekans $f=1/t_1$ olacaktır. Bu iki bağıntıdan dinamik elastisite modülü E,

$$E=4L^2f^2\delta/g \quad (5.9)$$

olarak elde edilmektedir.

Ultrases deneylerinin yapıldığı numuneler üzerinde rezonans frekans deneyleri yapılmıştır. Rezonans frekans deney aleti, elektro-manyetik vibratör ile bir alıcı ve osiloskoptan meydana gelmektedir. Vibratör ve alıcı numunenin birer uçlarına yerleştirilerek değişen frekansla numuneye boyuna doğrultuda titreşim verilmekte ve rezonansı meydana getiren frekans belirlenmektedir. Numunenin fiziksel özellikleri belli olduğuna göre dinamik elastisite modülü aşağıdaki bağıntı ile hesaplanabilmektedir.

$$E_d=DWf^2 \quad (5.10)$$

Bağıntıda W numune ağırlığı, f frekanstır. D ise numune boyutlarına bağlı bir katsayıdır ve bu katsayı silindirik numunelerde L, numune boyu d, numune çapı olmak üzere $D=519.4 \cdot 10^{-5} L/d^2$ şeklinde verilmektedir ve birimi sn^2/cm^2 dir (ASTM, 1985). Numuneler üzerinde yapılan rezonans frekans deney sonuçları ile yukarıdaki bağıntı kullanılarak hesaplanan elastisite modülü değerler Tablo 5.6'da verilmiştir.

Tablo 5.6. Rezonans Frekans Deney Sonuçları

Numune No	Derinlik (m)	L (cm)	d (cm)	f (Hz)	W (gr)	E (Mpa)
1	7.50	8.90	6.94	2315	789.6	406
2	8.00	12.72	6.93	2503	1163.0	1002
3	11.50	9.30	7.10	2284	806.6	4032
4	12.00	9.18	6.90	2095	808.1	3550
5	13.50	15.30	7.00	2334	1344.1	1188

Rezonans frekans deneylerinden bulunan kalite faktörü Q , bazı hallerde elastisite modülünden daha kullanışlı olmaktadır. Boyutsuz olan bu Q değeri, sismolog ve jeofizikçiler tarafından malzeme sönümü olarak kullanılmakta ve ortam içinde yayılan dalga genliklerine etkili olmaktadır (Hao, 1991). Q değerinin tersinden ($1/Q$) ise malzemelerin sönüm oranı hesaplanabilmektedir. Q değeri rezonans frekans aleti ile,

$$Q=f_0/(f_1-f_2) \quad (5.11)$$

bağıntısından bulunmaktadır. Burada f_0 rezonans frekansı, f_1 ve f_2 bu frekansın her iki tarafında en büyük genliğin 0.707 katına düştüğü frekans değerleri olmaktadır.

Geoteknik mühendisliğinde zeminler için yükleme sırasında her çevrimde oluşan enerji kayıpları sönüm oranı (D) olarak tarif edilmektedir. dE , belli bir hacimde harmonik titreşimin her çevrimde harcanan enerji miktarını ve E aynı hacimde depolanan toplam enerjiyi göstermek üzere, D ile Q arasında;

$$D=dE/4\pi E=1/2Q \quad (5.12)$$

şeklinde bir bağıntı mevcuttur (Mok ve diğ., 1988).

Rezonans frekans deney aleti ile yapılan sönüm ölçümlerinin sonuçlarından hesaplanan Q ve D değerleri Tablo 5.7'de verilmiştir.

Tablo 5.7. Laboratuvarda Yapılan Sönüm Ölçümleri

Numune No	Derinlik (m)	f_0 (Hz)	f_1 (Hz)	f_2 (Hz)	Q	D (%)
1	7.50	2315	2637	2095	4.3	11.6
2	8.00	2503	2558	2356	12.4	3.9
4	12.00	2095	2293	1978	6.6	7.6
5	13.50	2334	2471	2162	7.5	6.6

5.4.3. Deney Sonuçlarının Değerlendirmesi

Açılan sondaj kuyularında kuyu içi sismik yöntemleri uygulanarak S ve P-dalgası hız profilleri belirlenmiştir. Daha sonra alınan numuneler üzerinde laboratuvarda ultrases ve rezonans frekans deneyleri yapılmıştır. Zemin profilinde yaklaşık 2 m derinlikten sonra yer alan kilitli-kumtaşı tabakalarının özelliklerini belirlemek için laboratuvarda ultrases deneyleri yapılmıştır.

Deney numuneleri, RQD değerlerinin %0-40 arasında değiştiği 7.5 m ve daha sonraki derinliklere aittir. Daha sık derinlikteki zeminin RQD değerleri yaklaşık sıfır olduğundan deney numunesi elde edilememiştir. Aynı tabakadan seçilen 5 adet numune üzerinde yapılan deneyler sonucunda, arazi deneylerine göre daha yüksek hız değerlerine ulaşılmıştır.

Laboratuvar deney sonuçlarının ortalaması, arazi sismik ölçümlerinden elde edilen hız değerlerinden yaklaşık %30 daha fazla olmaktadır. Üzerinde hiç bir jeolojik yük ve çevre basıncının olmamasına rağmen bu farklılık numunelerden kaynaklanmaktadır. Deney numunelerinin alındığı tabaka sık kırıklı ve çatlaklı, yer yer ayrışmış bir özelliğe sahiptir. RQD değerleri düşük olması, hız indisine bağlı olarak arazi değerlerinin laboratuvar değerlerinin altında olduğuna işaret etmektedir (Johnson, 1988). Bu yüzden deney numuneleri daha az çatlak ve kırık içeren kendini tutabilen bölgeleri temsil etmektedir (Hugo, 1989).

Arazi ve laboratuvar deney sonuçlarına dayanarak hesaplanan başlangıç kayma modülü (G) ve dinamik elastisite modülü (E) karşılaştırma kolaylığı açısından ortalama değerler olarak Tablo 5.8'de verilmiştir.

Tablo 5.8. Arazi ve Laboratuvar Elde Edilen Modüller

Deney Türü	G (MPa)	E (MPa)
Arazi Deneyleri	1440	4011
Ultrases Deneyleri	2261	7653
Rezonans Frekans	728	2033

Arazi ve ultrases deneylerinden elde edilen hızlarda görülen farklılık, hızların kareleri ile orantılı olan modüllere de yansıtacağı açıktır. Ancak rezonans frekans deneyleri sonucunda bulunan kayma ve elastisite modülleri arazi değerlerinin altında kalmaktadır. Rezonans deneylerinde numune boyutları frekans belirlemede önemli faktördür. En iyi sonucun numune boyutları oranının (boy/çap) 2-5 arasında olması durumunda alınacağı ve bu oranın çok büyük ya da küçük değerlerinde numuneyi birinci modunda titreştirip rezonansa geçirmek zor olmaktadır. Bu ise deneyin kısıtlayıcı yanıdır. Rezonans frekans deneyi uygulanan numunelerde bu oran yaklaşık 1 civarında olduğu dikkate alındığında, deney sonuçlarına güvenirlilik azalmaktadır.

Dinamik zemin özellikleri hem arazi hem de laboratuvar deneyleri ile belirlenmeye çalışılmıştır. Açılan sondaj kuyusunda Aşağı Kuyu yöntemi ile sismik dalga hızları ölçülerek kayma modülü, poisson oranı ve elastisite modülü tayin edilmiştir. Dinamik özellikleri belirlemek için alınan numuneler üzerinde laboratuvarda ultrases ve rezonans frekans deneyleri yapılmıştır. Arazi sonuçları ile karşılaştırıldığında, ultrases deney sonuçlarından hesaplanan zemin özellikleri daha yüksek, rezonans frekans deneyleri daha düşük değerler vermektedir. Arazi ve laboratuvar deneyleri arasındaki bu farklılık numune özelliklerinden kaynaklanmaktadır. Çatlaklı ve kırıklı bir yapıya sahip tabaka içinde deney numuneleri bu tabakanın daha sağlam bölgelerini temsil etmektedir. Rezonans deneyinde ise numune boyutları önem kazanmaktadır.

Dinamik zemin özellikleri arazide ve laboratuvarda yapılan deney sonuçlarından elde edilmektedir. Geoteknik incelemeler sırasında açılan sondajlardan alınan numuneler üzerinde yapılan laboratuvar deney sonuçları numunenin alındığı bölgeyi temsil etmektedir. Numuneler ise çeşitli nedenlerle örselenme etkisinde kalmakta ve tabaka özelliklerinin belirlenmesinde çok sayıda numuneye gerek duyulmaktadır. Arazi deneyleri ise doğal koşullarda uygulanmakta ve başlangıç değerlerine doğrudan ulaşılmaktadır. Bununla birlikte bu tekniklerin uygulanması her zaman kolay ve ekonomik olmamakta, elde edilen özellikler gerçekte oluşandan daha düşük deformasyon seviyelerine ait olmaktadır (Denver ve Steffensen, 1989). Zemin kesitinde yer alan tabakaların dinamik özelliklerin belirlenmesinde, bir program çerçevesinde arazi ve laboratuvar

deney yöntemlerinin birlikte kullanılması, sonuçlarının birlikte değerlendirilmesi daha doğru bir yol olmaktadır (Tezcan ve Durgunoğlu, 1978).

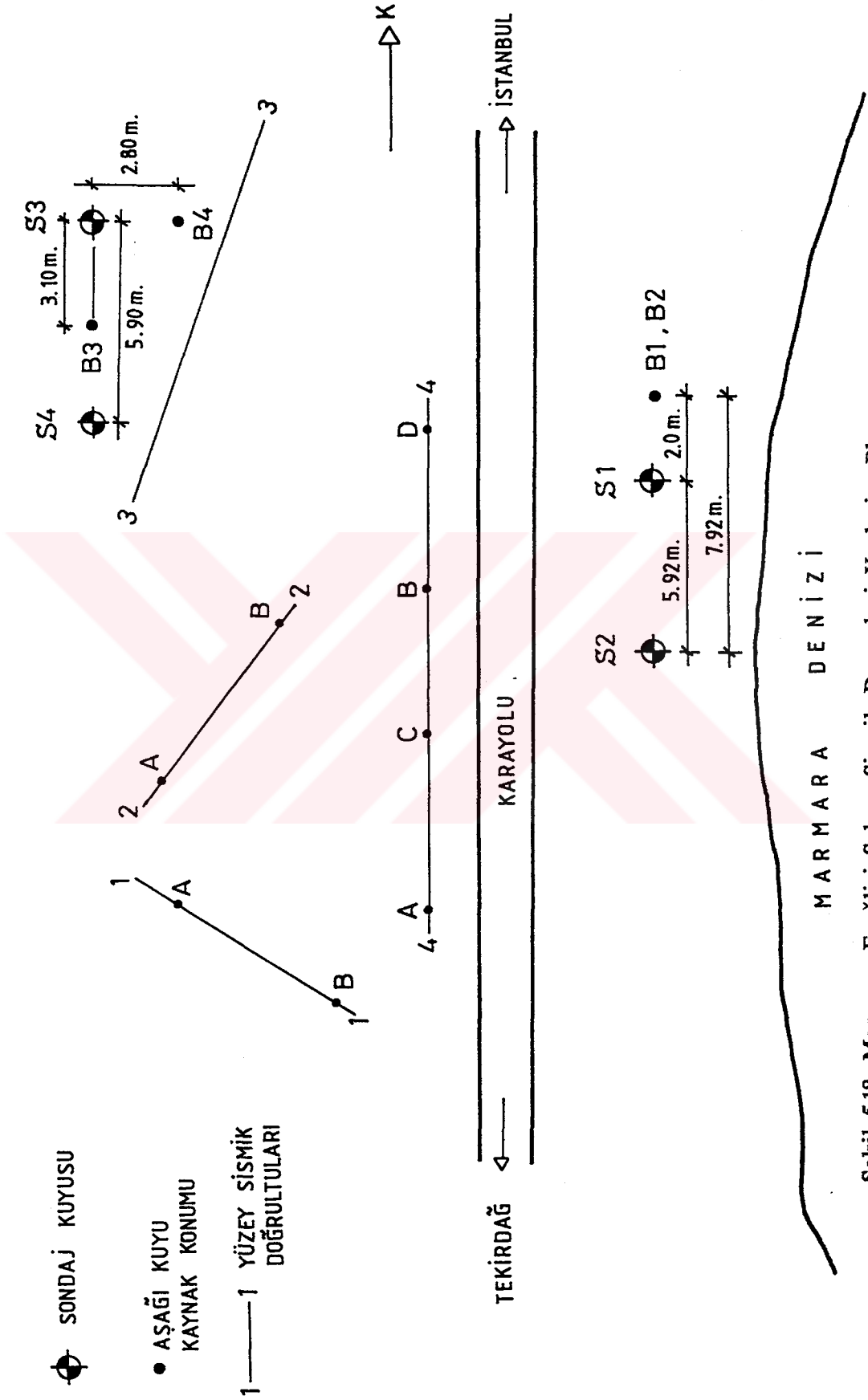
5.5. MARMARA EREĞLİSİ ARAZİ DENEYLERİ

Bu bölümde Marmara Ereğlisi'nde bir sahada yapılan geoteknik inceleme ve araştırma kapsamında uygulanan sismik deneyler ve sonuçları yer almaktadır. Bu sahada mevcut koşullarda ana kaya derinliğini ve muhtemel ayrışma bölgelerini belirlemek amacı ile çeşitli doğrultularda yüzey kırılma deneyleri ile açılan sondaj kuyularında Karşıt Kuyu ve Aşağı Kuyu deneyleri uygulanmıştır. Derinlikleri yaklaşık 30 ve 40 m olan kuyuların kaplama ve enjeksiyon işlemleri önceki bölümlerde anlatılanlara uygun bir şekilde yapılmıştır. Kaplama malzemesi olarak iç çapı 80 mm olan PVC plastik borular kullanılmıştır. Kaplama ve tabii zemin arası, zayıf çimento enjeksiyonu ile doldurulmuştur.

Deneylerin uygulandığı sahada zemin koşulları farklılıklar göstermektedir. Genel olarak bölgenin ana kayasını silttaşı-kiltaşı tabakaları oluşturmaktadır. Bu tabakaya sahanın değişik kesimlerinde 3 ile 30 m arasında girilmektedir. Ana kaya üzerinde koyu kahve renkli orta katı kil ve deniz kabuğu içeren orta sıkı kum tabakaları yer almaktadır. Sahada yapılan arazi sismik deneylerinin yerleşim planı şematik olarak Şekil 5.18'de verilmiştir.

5.5.1 Karşıt Kuyu Deneyleri

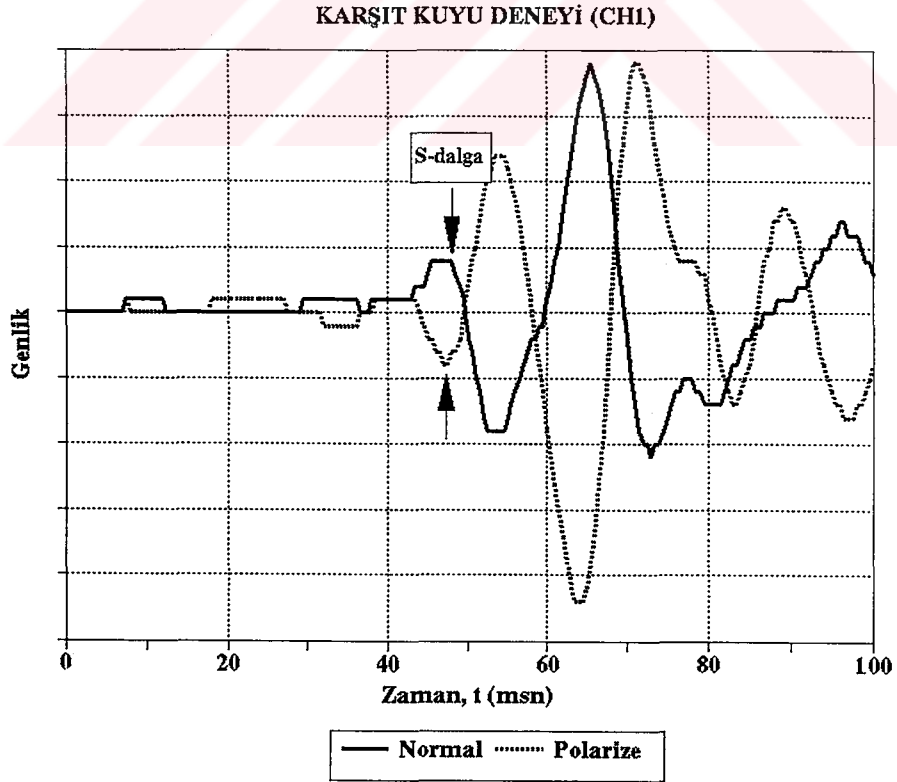
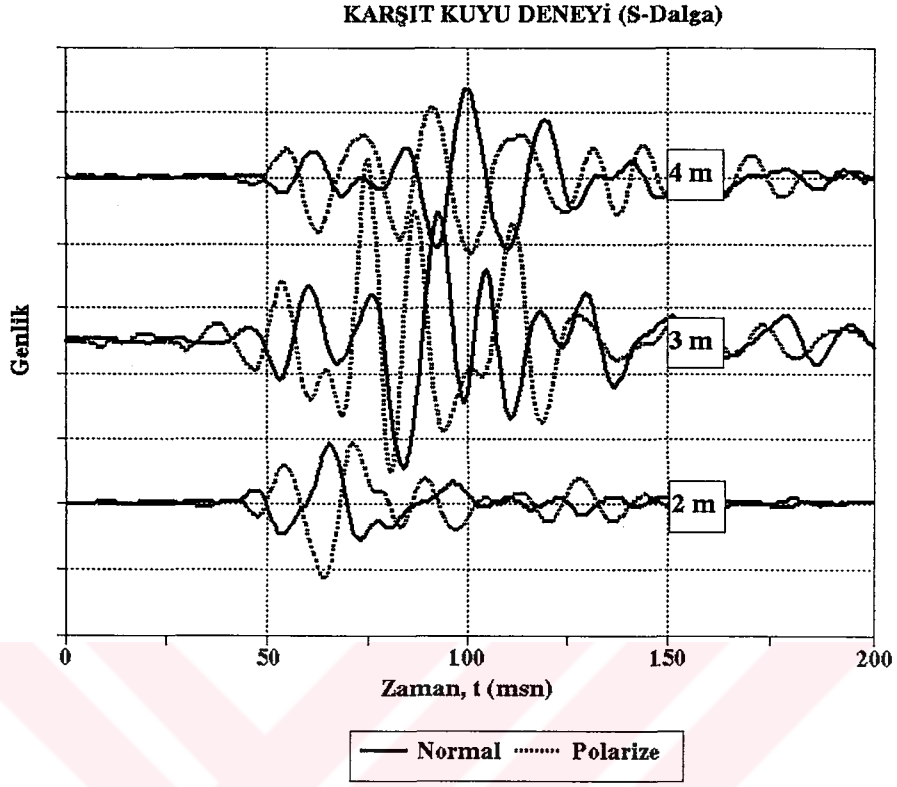
Marmara Ereğlisi'nde Karşıt Kuyu deneyleri kapsamında farklı zemin koşullarında iki set deney uygulanmıştır. Bu deneylerden ilki yerleşim planında gösterilen S1 ve S2 sondaj kuyularında gerçekleştirilmiştir. Kuyular yaklaşık 30 m derinliğinde ve 5.92 m mesafede açılmış, kaplaması ve enjeksiyonu yapılarak deneyler için hazır duruma getirilmiştir. Sondajlardan ve alınan numunelerin incelenmesinden bu kesimde zemin kesitinde üstte ince bir dolgu tabakası altında siltli, yer yer çakıllı ince kum ve siltli orta katı kil tabakalarının bulunduğu anlaşılmaktadır. Alüvyon özelliğinde olan ve deniz kabukları içeren bu tabakalar derinlik boyunca aralanmalı olarak istiflenmişlerdir.



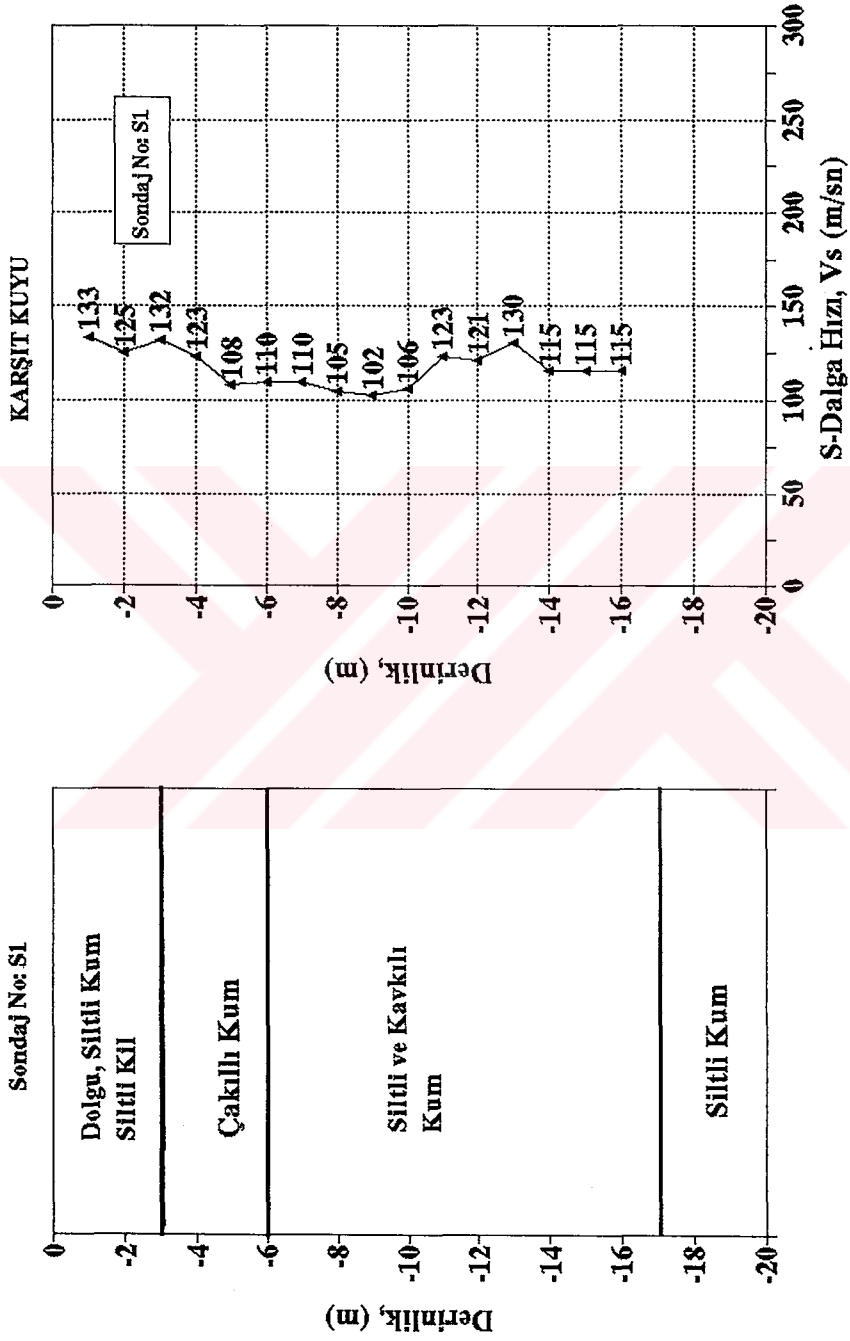
Karşıt Kuyu deneylerinde kaynak olarak tekrarlanabilir ve tersine çevrilebilir mekanik çekiç, alıcı olarak kuyu duvarına sabitlenebilen biri düşey ikisi yatay 3 bileşenli hız ölçerler, kaydedici olarak sürekli kayıt yapabilen 12 kanallı, yığmalı ve dijital sismograf kullanılmıştır. Kayma dalgası üretmekte kullanılan kuyu içi mekanik çekicinin özellikleri önceki bölümde verilmiştir. Bu kaynak kullanılarak düşey darbe ile üretilen kayma dalgası (SV) parçacık hareketi gözönüne alındığında bu dalgaların algılanmasında düşey konumdaki alıcının kullanılması gerekmektedir.

Karşıt Kuyu deneyinde zemin içinde belli bir derinlikte üretilen sismik dalganın, aynı seviyede bulunan alıcılarda gözlenmesi gerekmektedir. S1 ve S2 kuyularında Karşıt Kuyu deneyine 1 m derinlikte başlanılmış ve ölçüm aralıkları 1 m seçilmiştir. Ölçüm aralıklarının kısa tutulması elde edilen bilgilerin daha detaylı olarak bulunması sağlamaktadır. Deneyi uygulamak için kaynak ve alıcılar ilk ölçüm derinliğine indirilerek kuyu duvarlarına emniyetlice tutturulmaktadır. Deney sisteminde, mekanik çekiç üzerinde bulunan ve kayıt aletinin tetikleme (trigger) sistemine bağlı olan bir alıcı daha mevcuttur. Bu alıcı ilk darbenin vurulması ile titreşmekte ve tetikleme sistemine gönderilen sinyal vasıtasıyla kayıt başlatılmaktadır. Aynı ölçüm derinliğinde her iki yönde düşey darbe ile yeteri kadar tanımlanabilir dalga kayıtları alınmış ve bir sonraki ölçüm derinliğine inilmiştir. Bu bölgede yapılan deneylerden çeşitli derinliklerde alınmış S-dalga kayıtları Şekil 5.19'da verilmiştir. Deneylerde örnekleme aralığı 500 mikro saniye olarak sabit tutulmuş ve kayıtların tümü bilgisayara alınmıştır. Alınan kayıtların analizi sonucu belirlenen dalga varış zamanları ve kuyular arasındaki yatay mesafelerin bu zamanlara bölümünden hesaplanan S-dalga hızları Tablo 5.9'da verilmiştir.

S1 ve S2 kuyularında uygulanan Karşıt Kuyu deney sonucunda elde edilen S-dalgasının derinlikle değişimi zemin kesiti ile birlikte Şekil 5.20'de verilmiştir. Alüvyon tabakalardan oluşmuş bu bölgede dolgu, kum ve kil zeminin bulunduğu ilk 3 m derinlik içinde kayma dalgası hızları ortalama 130 m/sn civarındadır. Hızın 105 ile 110 m/sn arasında değerler aldığı 5 ve 11 m derinliklerde siltli ve kavkılı kum tabakası geçilmektedir. Dalga hızının derinlikle değişimi ve zemin kesiti karşılaştırıldığında, kum tabakası arasında yer alan ve yumuşak kıvamda olan kil tabaka içinde hızların düştüğü görülmektedir. Bu ise Karşıt Kuyu deney yönteminin üstünlüğünü



Şekil 5.19. S1 ve S2 Kuyuları Arasında Uygulanan Karşıt Kuyu S-Dalga Kayıtları



Şekil 5.20. S1 ve S2 Kuyular Arasında Uygulanan Karşit Kuyu Deneyinden Elde Edilen Hız Profili ve Zemin Kesiti

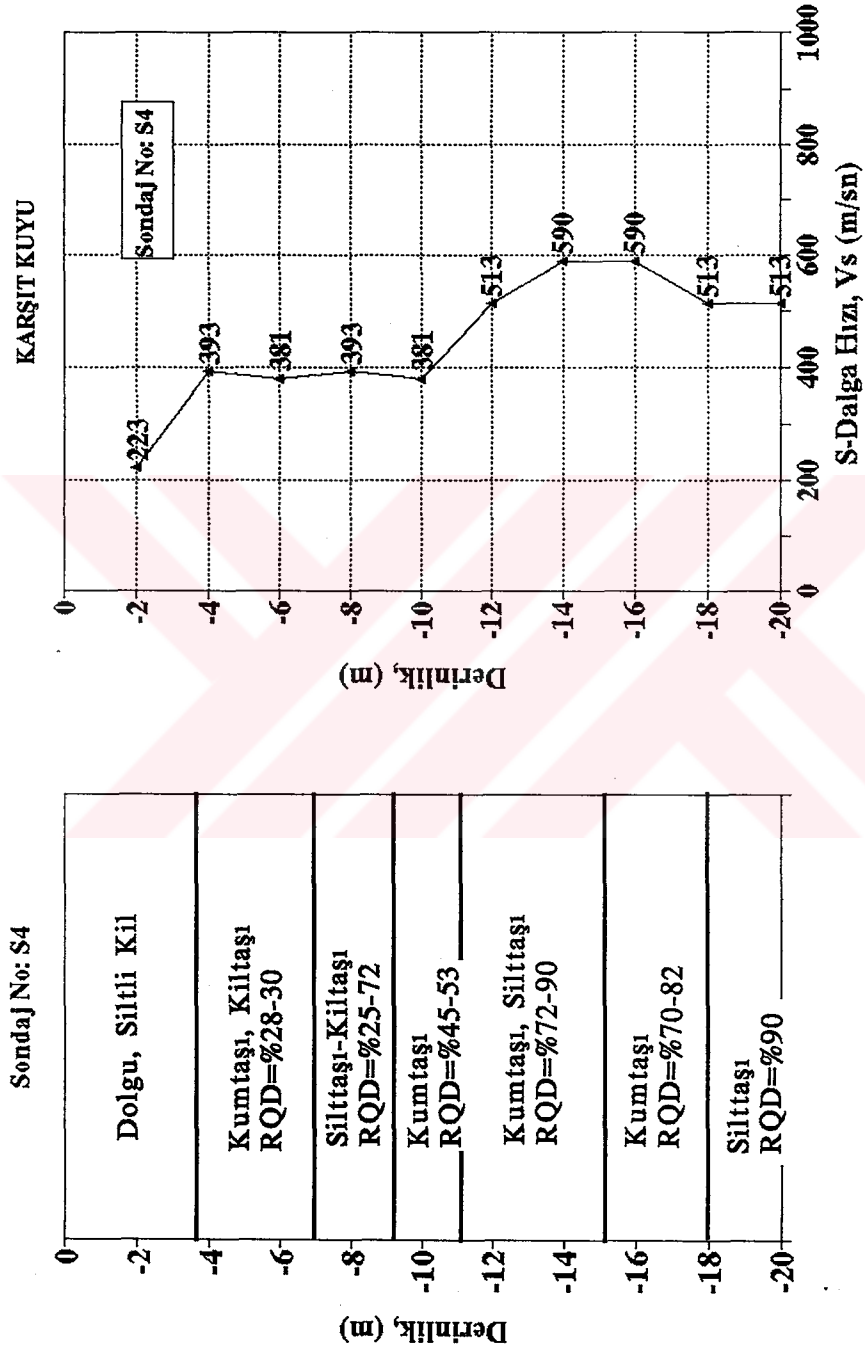
göstermektedir. Seçilen ölçüm aralıklarına bağlı olarak detaylı bir hız profili elde edilebilmektedir.

Tablo 5.9. Karşıt Kuyu Deney Sonuçları (S1-S2)

Derinlik (m)	Varış Zamanı t_s (msn)	S-Dalga Hızı V_s (m/sn)
1.00	44.5	133
2.00	47.5	125
3.00	45.0	132
4.00	48.0	123
5.00	55.0	108
6.00	54.0	110
7.00	54.5	110
8.00	56.5	105
9.00	58.0	102
10.00	56.0	106
11.00	48.0	123
12.00	49.0	121
13.00	45.5	130
14.00	51.5	115
15.00	51.5	115
16.00	51.5	115

Marmara Ereğlisi'nde ikinci Karşıt Kuyu deneyi yerleşim planında gösterilen ve ara mesafesi 5.90 m olan S3 ve S4 sondaj kuyularında uygulanmıştır. Bu alanda zemin kesitinde üstte 30 cm kalınlığında bitkisel toprak altında siltli, koyu kahve renkli kil tabakası yer almaktadır. Yaklaşık 4 m derinlikten itibaren bölgenin ana kayasını oluşturan silttaş-kiltaş tabakaları başlamaktadır. Üst seviyeleri ayırmış olan bu tabakalarda RQD değerleri %20-90 arasında değerler almaktadır. Bu zemin koşullarında 2 m aralıklarla 20 m derinliğine kadar Karşıt Kuyu deneyi uygulanmıştır. Deneylerde örnekleme aralığı yine 500 mikrosaniye olarak sabit tutulmuş ve deney sonuçları Tablo 5.10'da verilmiştir.

Derinlik boyunca kayma dalgası hızı değişimi Şekil 5.21'de görülmektedir. Bu şekilden de görülebileceği üzere üst seviyelerde hız ortalama 220 m/sn olarak hesaplanmıştır. 4 ile 10 m derinlikler arasında S-dalga hızları 380-390 m/sn mertebesinde bulunmuştur. Zemin kesitinde bu seviyelerde kumtaş, silttaş ve kiltaş ardalanması yer almaktadır. RQD değerlerinde belirgin bir artışın göze çarptığı daha derinlerde kayma dalgası hızı yaklaşık 600 m/sn olarak elde edilmiştir.



Şekil 5.21. S3 ve S4 Kuyuları Arasında Uygulanan Karşit Kuyu
Deneyinden Elde Edilen Hız Profili ve Zemin Kesiti

Tablo 5.10. Karşıt Kuyu Deney Sonuçları (S3-S4)

Derinlik (m)	Varış Zamanı t_s (msn)	S-Dalga Hızı V_s (m/sn)
2.00	26.5	235
4.00	15.0	393
6.00	15.5	381
8.00	15.0	393
10.00	15.5	381
12.00	11.5	513
14.00	10.0	590
16.00	10.0	590
18.00	11.5	513
20.00	11.5	513

5.5.2. Aşağı Kuyu Deneyleri

Marmara Ereğlisi'nde Karşıt Kuyu deneyleri için hazırlanmış sondaj kuyularında 4 adet Aşağı Kuyu sismik deneyleri de uygulanmıştır. S1 ve S2 sondaj kuyularında uygulanan Aşağı Kuyu deneyleri B1 ve B2, S3 ve S4 kuyularında uygulananlar ise B3 ve B4 olarak isimlendirilmiştir. Bu deneyler kaynak konumları ile birlikte sismik deney yerleşim planında gösterilmiştir.

B1 Aşağı Kuyu deneyinde alıcılar S1 kuyusunda, kaynak ise kuyunun kuzey tarafında ve 2 m uzaklıkta bulunmaktadır. Deneylerde kaynak olarak zemin içine radyal doğrultuda yaklaşık 30 cm gömülmüş bir plaka kullanılmıştır. S-dalgası üretebilmek için bu plakaya her iki yönde yatay olarak vurulmuş ve S-dalgası kayıtları için yatay alıcılar kullanılmıştır. B1 deneyinde ölçümler 1 m aralıklarla 29 m derinliğe kadar yapılmıştır. Bu deney tamamlanmasından sonra kaynak aynı konumda iken alıcı kuyusu olarak S2 sondajı kullanılmış ve aynı koşullarda 1 m ölçüm aralıklarında aynı derinliğe kadar B2 deneyi uygulanmıştır. Aşağı Kuyu deneylerinden elde kayıtların yorumlanması Karşıt Kuyu deneyine benzemekte ancak S-dalga hızlarının bulunmasında direkt zaman-derinlik grafiklerinin çizilmesi gerekmektedir. Aşağı Kuyu deney sonuçlarının değerlendirilmesi ile ilgili daha detaylı bilgiler önceki bölümlerde verilmişti. S1 ve S2 sondaj kuyularında yapılan B1 ve B2 Aşağı Kuyu sismik deneylerinden alınan kayıtların analizi sonucunda bulunan varış zamanları ve alıcının bulunduğu derinliğe göre hesaplanan direkt zamanlar Tablo 5.11'de verilmiştir. Tablodaki T kayıtların analizi sonucunda elde edilen ilk varışlar, R kaynak

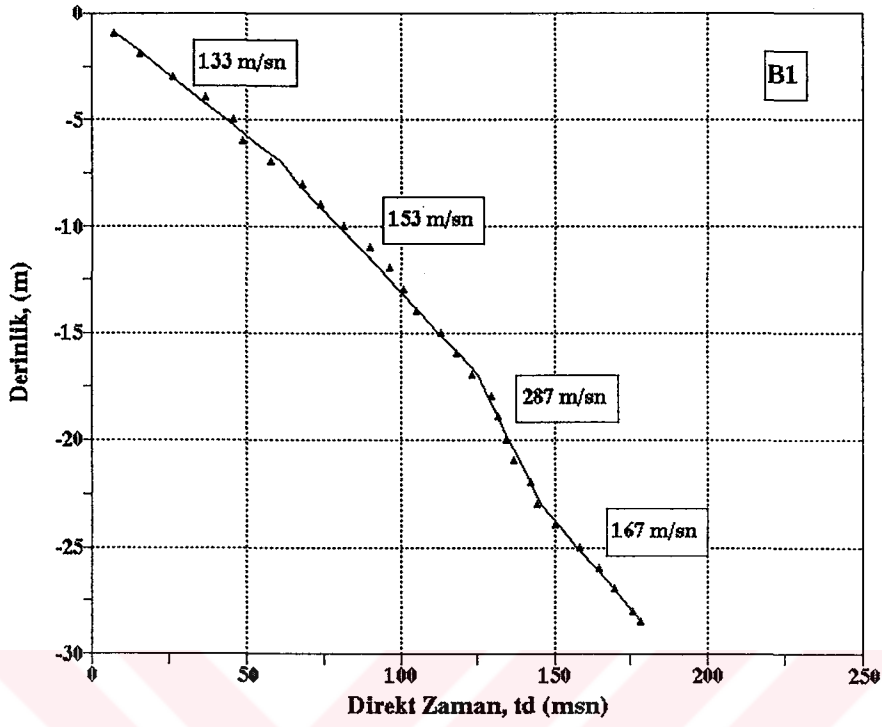
ile alıcı arası mesafe, T_d ise DT/R bağıntısı yardımı ile hesaplanan direkt zamanı, D derinliği göstermektedir.

Tablo 5.11. Aşağı Kuyu Deney Sonuçları (B1 ve B2)

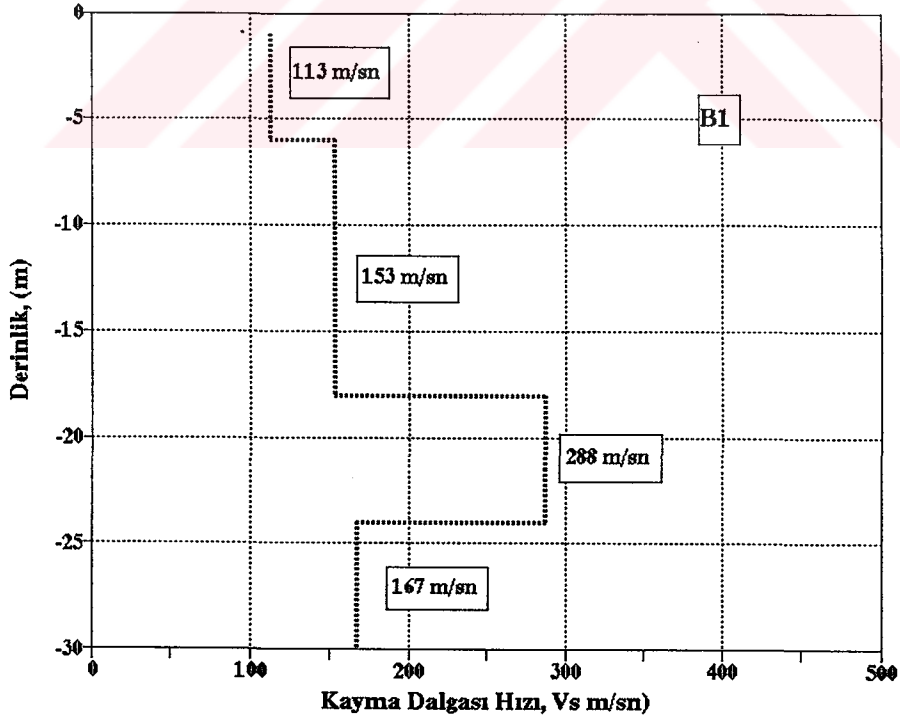
D (m)	T (msn)		R (m)		T_d (msn)	
	B1	B2	B1	B2	B1	B2
1	16.5	41.0	2.24	7.98	7.38	5.14
2	22.0	57.0	2.83	8.57	15.56	13.96
3	32.0	70.0	3.61	8.47	26.63	24.80
4	41.5	78.5	4.47	8.87	37.12	35.39
5	49.5	84.0	5.39	9.37	45.96	44.84
6	51.5	93.5	6.32	9.94	48.86	56.46
7	60.0	97.5	7.28	10.57	57.69	64.57
8	70.0	100.5	8.25	11.26	67.91	71.42
9	75.5	104.0	9.22	11.99	73.70	78.08
10	83.0	110.0	10.20	12.76	81.39	86.23
11	91.0	111.0	11.18	13.55	89.53	90.08
12	97.5	116.0	12.17	14.38	96.17	96.81
13	102.0	122.0	13.15	15.22	100.81	104.19
14	106.0	126.0	14.14	16.08	104.94	109.67
15	114.0	130.0	15.13	16.96	113.00	114.96
16	119.0	136.0	16.12	17.85	118.08	121.88
17	124.0	140.0	17.12	18.75	123.15	126.90
18	130.0	140.0	18.11	19.67	129.21	128.14
19	132.5	142.0	19.11	20.58	131.77	131.07
20	135.0	146.0	20.10	21.51	134.33	135.74
21	137.5	147.0	21.10	22.44	136.88	137.54
22	143.0	153.0	22.09	23.38	142.41	143.96
23	145.0	156.0	23.09	24.33	144.46	147.50
24	151.0	159.0	24.08	25.27	150.48	150.99
25	159.0	166.0	25.08	26.22	158.49	158.25
26	165.0	175.0	26.08	27.18	164.51	167.41
27	170.0	180.0	27.07	28.14	169.54	172.72
28	176.0	184.0	28.07	29.10	175.55	177.05
28.5	178.5	192.0	28.57	29.58	178.06	184.99

Tabloda verilen değerler esas alınarak direkt zaman derinlik grafikleri çizilmiş ve bunlardan kayma dalgası hızları bulunmuştur. Derinlik direkt zaman grafikleri ve hız profilleri B1 deneyi için Şekil 5.22'de B2 ölçümleri için Şekil 5.23'de verilmiştir. Ölçüm sonuçları hız değerleri bakımından zemin kesitinde dört ayrı tabakalaşmaya işaret etmektedir. Buna göre 6 m derinlik içinde yer alan zemin tabakaları içinde hızlar 100-113 m/sn, 6 ve 17 m derinlikler arasında 153-163 m/sn, 24 m derinliğe kadar 275-288 m/sn ve daha alttaki tabakalar için 151 ve 167 m/sn hız değerleri elde edilmiştir.

MARMARA EREĞLİSİ
S-DALGASI (B1)

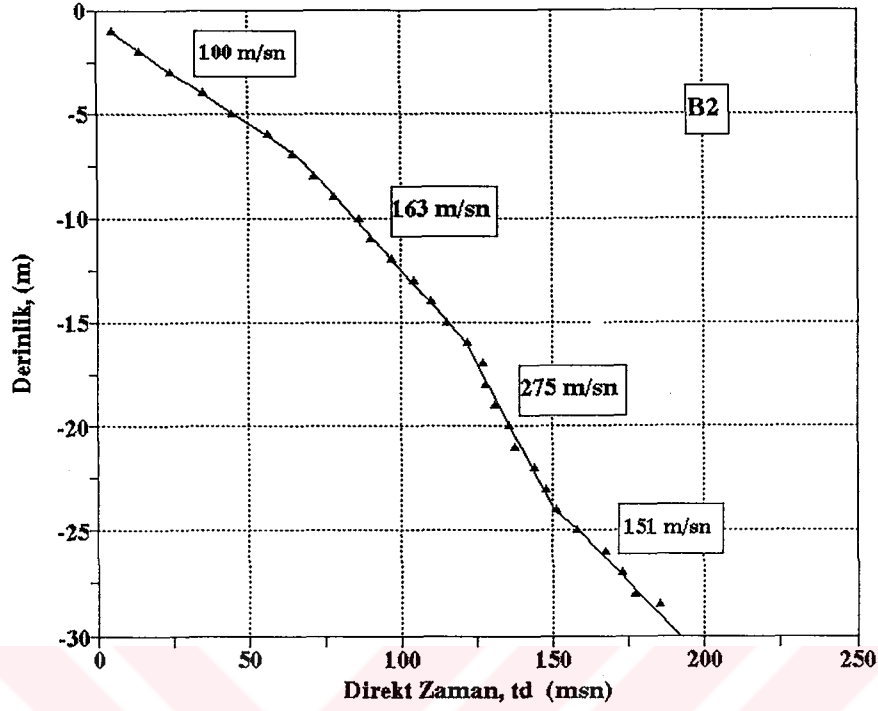


S-DALGA PROFİLİ

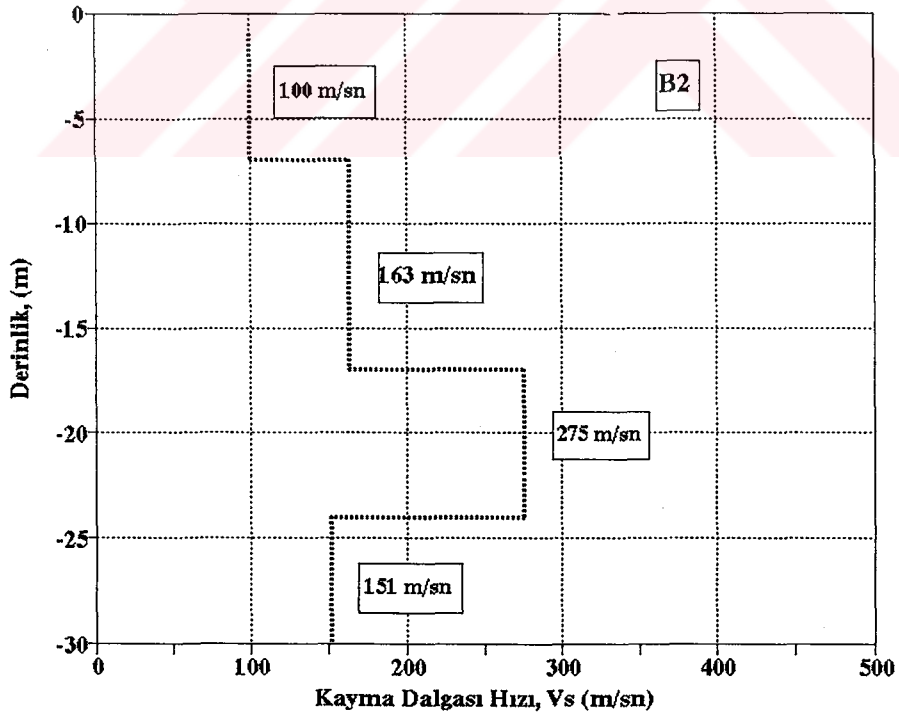


Şekil 5.22. S1 Kuyusu B1 Aşağı Kuyu Deney Sonucu

MARMARA EREĞLİSİ
S-DALGASI (B2)



S-DALGA PROFİLİ



Şekil 5.23. S2 Kuyusu B2 Aşağı Kuyu Deney Sonucu

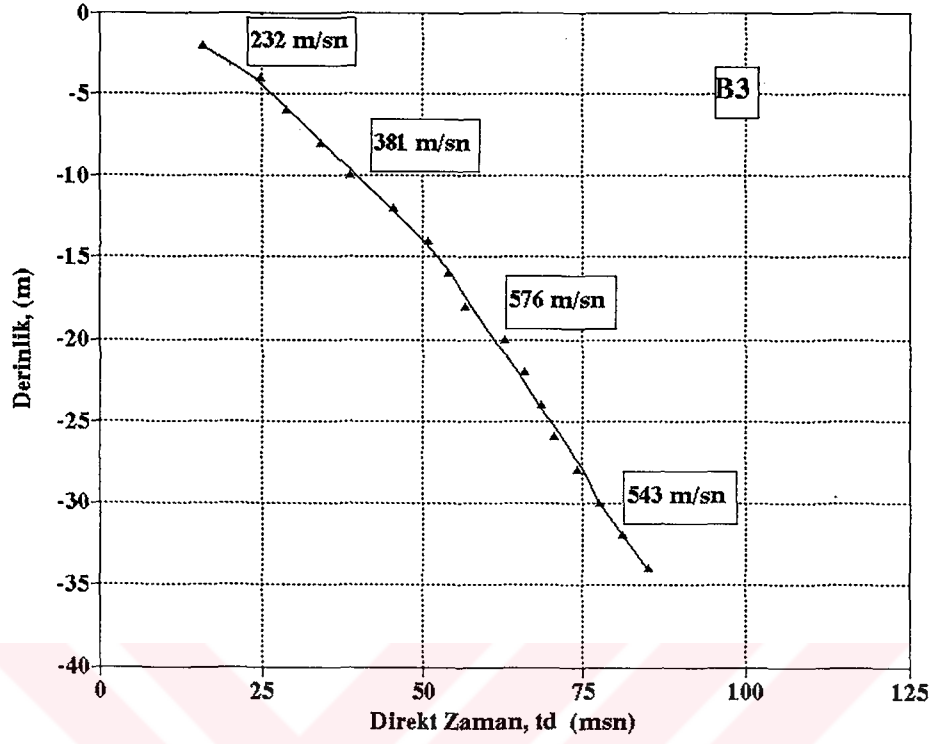
B3 ve B4 Aşağı Kuyu deneyi yerleşim planında görülen S3 sondaj kuyusunda uygulanmıştır. B3 deneyinde S-dalgası üretmekte kullanılan kaynak, S3 ve S4 kuyuları arasına S3 kuyusundan 3.10 m mesafede, B4 deneyinde ise bir önceki düzene dik doğrultuda ve 2.80 m mesafede zemin yüzeyine yerleştirilmiştir. Ölçümlere 2 m derinlikte başlanılmış ve her 2 m de deneyler tekrarlanmıştır. Bu deneylere ait kayıtların analizi sonucu elde edilen bilgiler Tablo 5.12'de verilmiştir.

Tablo 5.12. Aşağı Kuyu Deney Sonuçları (B3 ve B4)

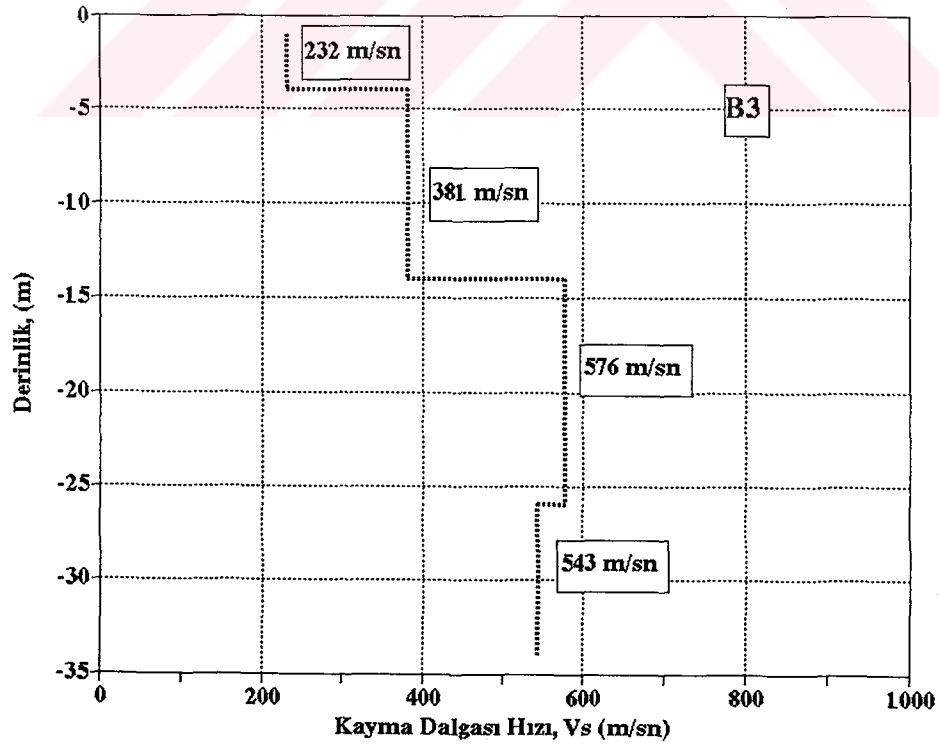
D (m)	T (msn)		R (m)		T_d (ms n)	
	B3	B4	B3	B4	B3	B4
2	30.0	20.5	3.69	3.44	16.26	11.92
4	31.5	25.5	5.06	4.88	24.90	20.89
6	32.5	28.5	6.75	6.62	28.87	25.83
8	36.5	33.5	8.58	8.48	34.03	31.70
10	40.5	39.5	10.47	10.39	38.68	38.04
12	47.0	45.0	12.39	12.32	45.51	43.82
14	52.0	52.5	14.34	14.28	50.77	51.48
16	55.0	55.0	16.30	16.24	54.00	54.18
18	57.5	59.0	18.26	18.22	56.67	58.30
20	63.5	62.0	20.24	20.20	62.75	61.40
22	66.5	65.0	22.22	22.18	65.85	64.48
24	69.0	67.5	24.20	24.16	68.43	67.05
26	71.0	70.0	26.18	26.15	70.57	69.60
28	74.5	75.0	28.17	28.14	74.05	74.63
32	78.0	78.5	30.16	30.13	77.59	78.16
34	81.5	85.0	32.15	34.12	81.12	84.71
37	85.5	92.0	34.14	37.11	85.15	91.73

B3 ve B4 Aşağı Kuyu ölçümlerinden elde edilen grafik ve hız değerleri sırası ile Şekil 5.24 ve 5.25'de verilmiştir. Elde edilen hız değerleri bu bölgede de dört ayrı tabakalaşmaya işaret etmektedir. Bu tabakalara ait hızlar ve hız sınırları iki deneyde birbirine oldukça yakın sonuçlar vermektedir. Zemin kesitinde üstte yer alan siltli kil tabakasında kayma dalgası hızı B3 deneyinde 232 m/sn olurken B4 deneyinde bu tabaka için 235 m/sn olarak ölçülmüştür. Bu derinlikten itibaren kesitte ayrılmış kumtaşı, silt ve kiltası tabakaları başlamaktadır. 4 ile 14 m derinlikleri arasında hızlar 381-344 m/sn, daha aşağıda ise 576-574 m/sn değerleri almaktadır.

MARMARA EREĞLİSİ
S-DALGASI (B3)

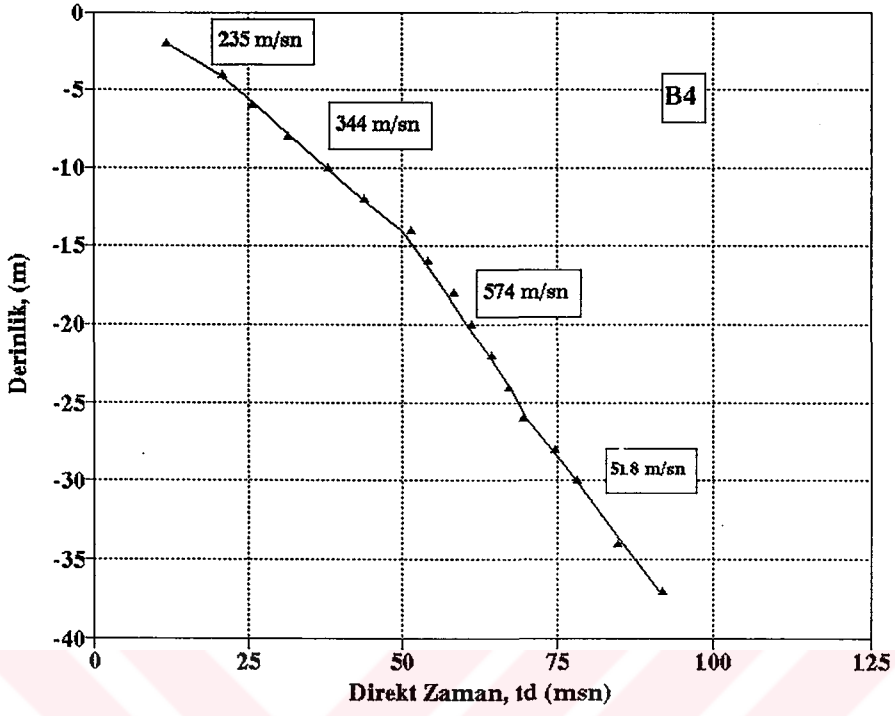


S-DALGA PROFİLİ

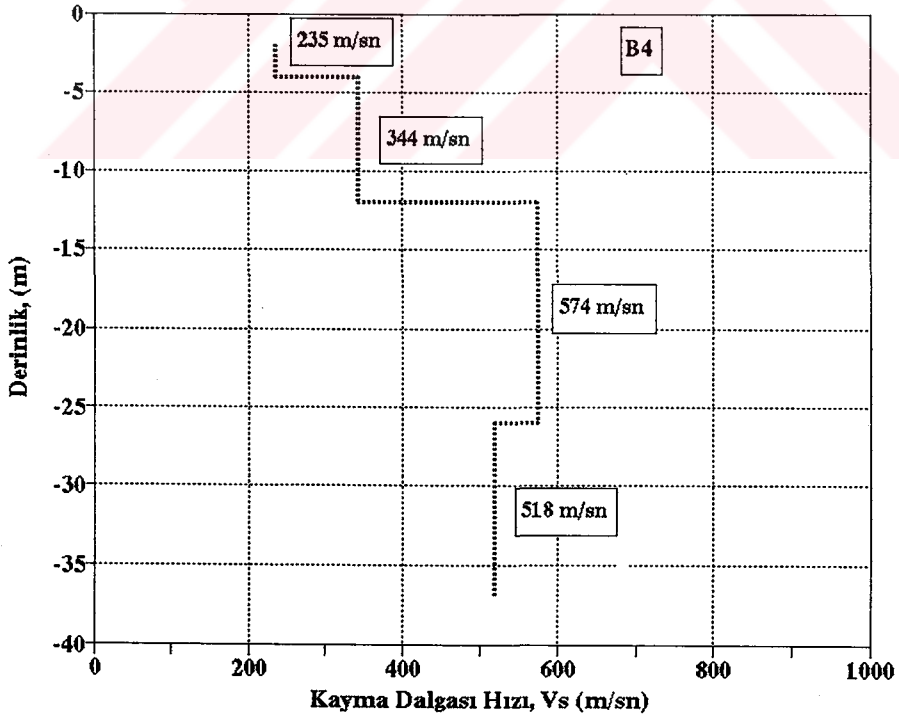


Şekil 5.24. S3 Kuyusu B3 Aşağı Kuyu Deney Sonucu

MARMARA EREĞLİSİ
S-DALGASI (B4)



S-DALGA PROFİLİ



Şekil 5.25. S3 Kuyusu B4 Aşağı Kuyu Deney Sonucu

Marmara Ereğlisi sahasında uygulanan Karşıt Kuyu ve Aşağı Kuyu deneylerinden elde edilen sonuçlarla bulunan hız profilleri Şekil 5.26'da gösterilmiştir. Karşıt Kuyu deneyinde her ölçüm derinliğinde hızlar doğrudan bulunabilmesine karşılık, bu şekilden de görülebileceği üzere Aşağı Kuyu ölçümlerinde hızlar, zemin kesitinde yer alan tabakalar içinde ortalama bir değer olarak bulunabilmekte ve tabaka içinde sabit kalmaktadır.

5.5.3. Yüzey Sismik Deneyleri

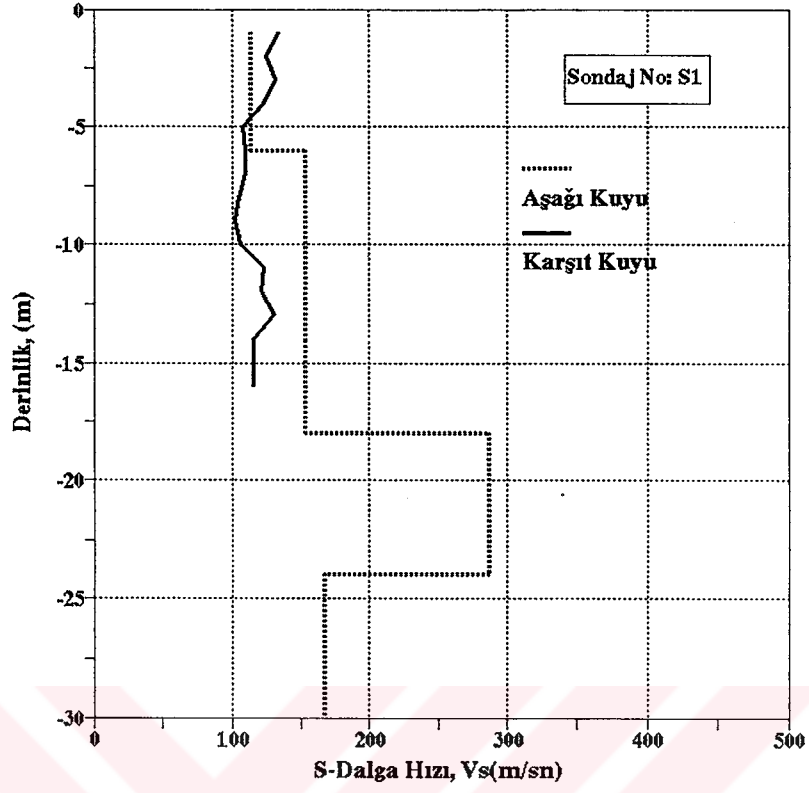
Marmara Ereğlisi sismik deneyleri kapsamında sismik kırılma deneyleri de uygulanmıştır. Bu deneyler sahada zemin sondajları başlamadan önce bölgede ana kaya derinliğini belirlemek amacı ile uygulanmıştır. Uygulanan yüzey sismik deney doğrultuları yerleşim planında gösterilmiştir.

Deneylerde alıcı olarak P-dalgası ölçen 12 adet yüzey jeofonu kullanılmıştır. Jeofonlar arası mesafe 7.5 m dir ve sismik dalga, 63.5 kg ağırlığındaki Standart Penetrasyon Deneyi (SPT) tokmağını bir sehpa yardımı ile zemin yüzeyine yerleştirilen bir plaka üzerine düşürülerek üretilmiştir. Bu uygulamalarda 4. bölümde anlatılan ve Şekil 4.1'de verilen deney sistemi kullanılmıştır.

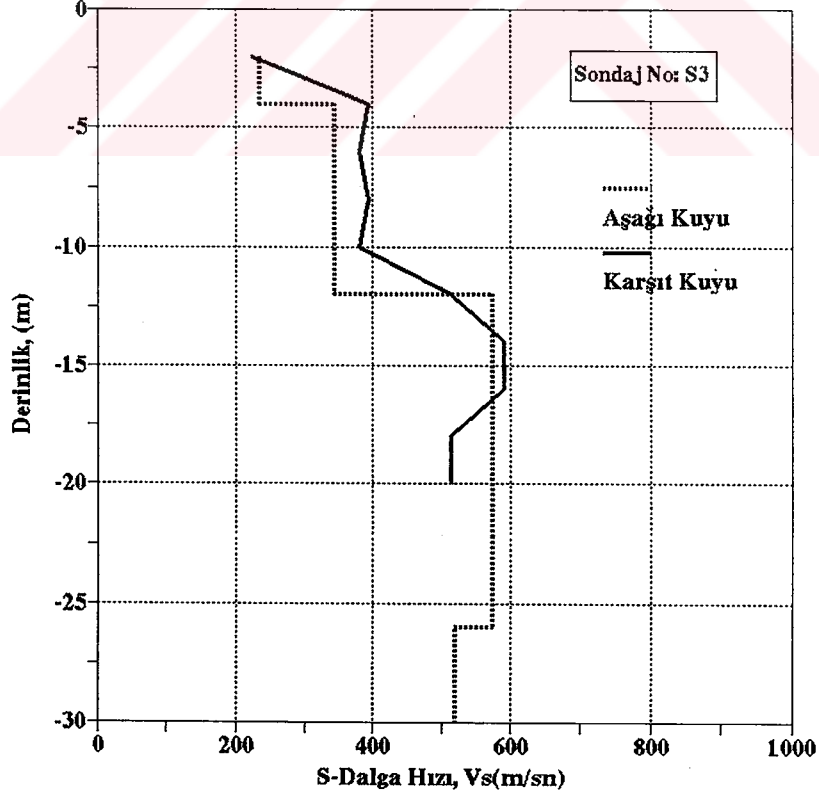
1-1 doğrultusunda yapılan yüzey kırılma deneyinde A noktasında bulunan kaynaktan itibaren lineer doğrultuda yerleştirilen 12 adet yüzey jeofonu ile yaklaşık 100 m açıklık kazanılmıştır. Kayıtlar yine aynı sistem ile 1000 mikrosaniyelik örnekleme aralığında bilgisayara alınmıştır. Aynı doğrultu üzerinde alıcı yerleşimleri sabit tutularak kaynak B noktasına taşınmış ve ölçümler yapılmıştır. Alınan kayıtların analizi sonucunda belirlenen dalga varış zamanları Tablo 5.13'de verilmiştir. T_{A-P} , kaynak A noktasında iken kaynaktan belli bir uzaklıkta P noktasında bulunan alıcı dalgaının ulaşma zamanını göstermektedir.

Tabloda verilen bu değerler ile oluşturulan mesafe-zaman grafikleri yardımı ile tabaka hızları ve tabaka kalınlıkları belirlenmiştir. 1-1 doğrultusunda yapılan deneye ait bu grafik Şekil 5.27'de görülmektedir. Doğruların eğim değiştirmeleri zemin kesitinde yer alan tabakalaşmayı göstermektedir.

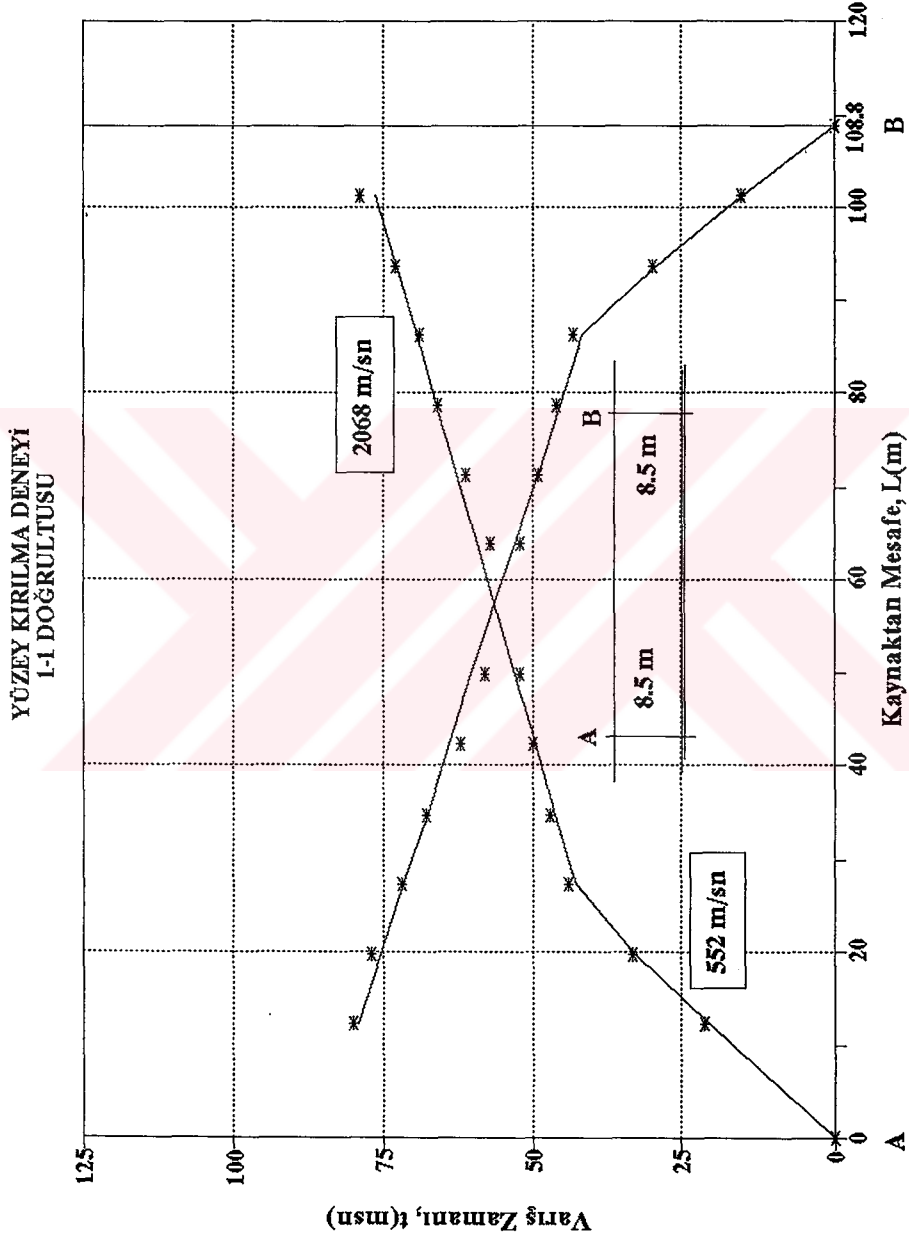
S-DALGA HIZI PROFİLİ



S-DALGA HIZI PROFİLİ



Şekil 5.26. Karşıt Kuyu ve Aşağı Kuyu Deney Sonuçlarının Karşılaştırılması



Şekil 5.27. 1-1 Doğrultusu Yüzey Kırılma Deneyi Sonucu

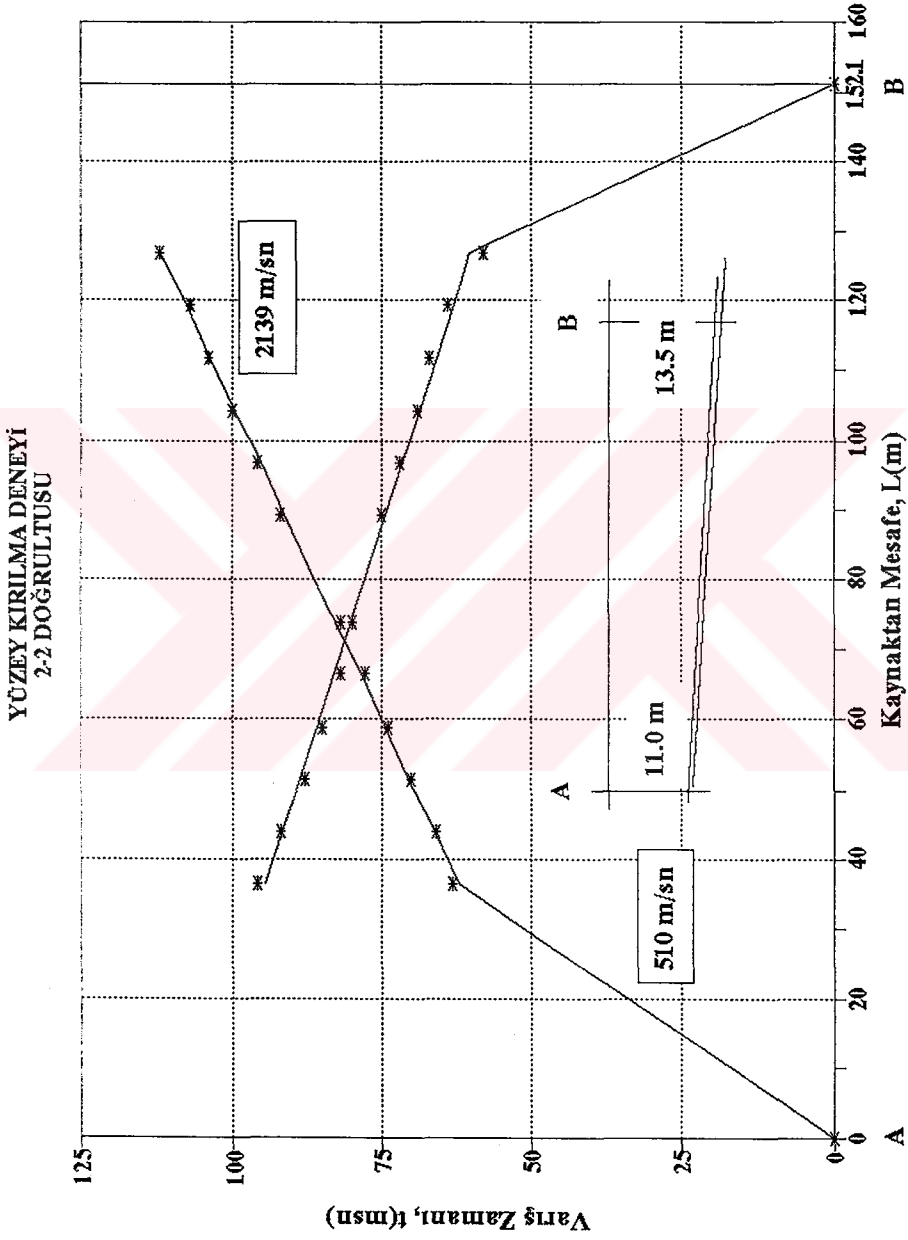
Tablo 5.13. 1-1 Doğrultusu Yüzey Sismik Deney Sonucu

Alıcı No	Mesafe (m)	T_{A-P} (msn)	T_{B-P} (msn)
Kaynak A	0.00	0	
1	12.30	21	80
2	19.80	33	77
3	27.30	44	72
4	34.80	47	68
5	42.30	50	62
6	49.80	52	58
7	63.80	57	52
8	71.30	61	49
9	78.80	66	46
10	86.30	69	43
11	93.80	73	30
12	101.30	79	15
Kaynak B	108.80		0

Tabaka derinliğini belirlemek için ölçümler, jeofon seriminin her iki tarafında üretilen dalgalarla yapılmıştır. 1-1 doğrultusunda yapılan deney sonucuna göre bu kesimde iki farklı tabakalaşma görülmektedir. Bu doğrultu üzerinde yüzeyde yer alan tabakalara ait P-dalga hızları ortalama 540 m/sn olarak bulunmuştur. Alt tabaka hızı ise 2072 m/sn dir. Hızı daha büyük olan bu tabaka derinliği ortalama 8.5 m olarak hesaplanmış ve tabakanın yaklaşık yatay olduğu anlaşılmıştır.

Sismik deney yerleşim planında görülen ve 2-2 doğrultusunda yapılan ikinci yüzey kırılma deneyinde kaynak ve ilk alıcı mesafeleri daha büyük tutularak sahada yaklaşık 150 m açıklıkta uygulanmıştır. Deneyde alınan kayıtların analizi sonucunda bulunan zamanlar alıcı mesafeleri ile birlikte Tablo 5.14'de, mesafe zaman grafiği ise Şekil 5.28'de verilmiştir.

Bu doğrultuda yapılan deneyden elde edilen hızlar 1-1 deneyi ile uyumlu olmakla birlikte tabaka derinliğinde farklılık görülmektedir. Yüksek hıza sahip ikinci tabaka derinliği yüzeyden itibaren ortalama 12 m derinlikte başlamaktadır. Bu tabakanın eğim açısı ise 1-2 derece olarak hesaplanmıştır.



Şekil 5.28. 2-2 Doğrultusu Yüzey Kırılma Deney Sonucu

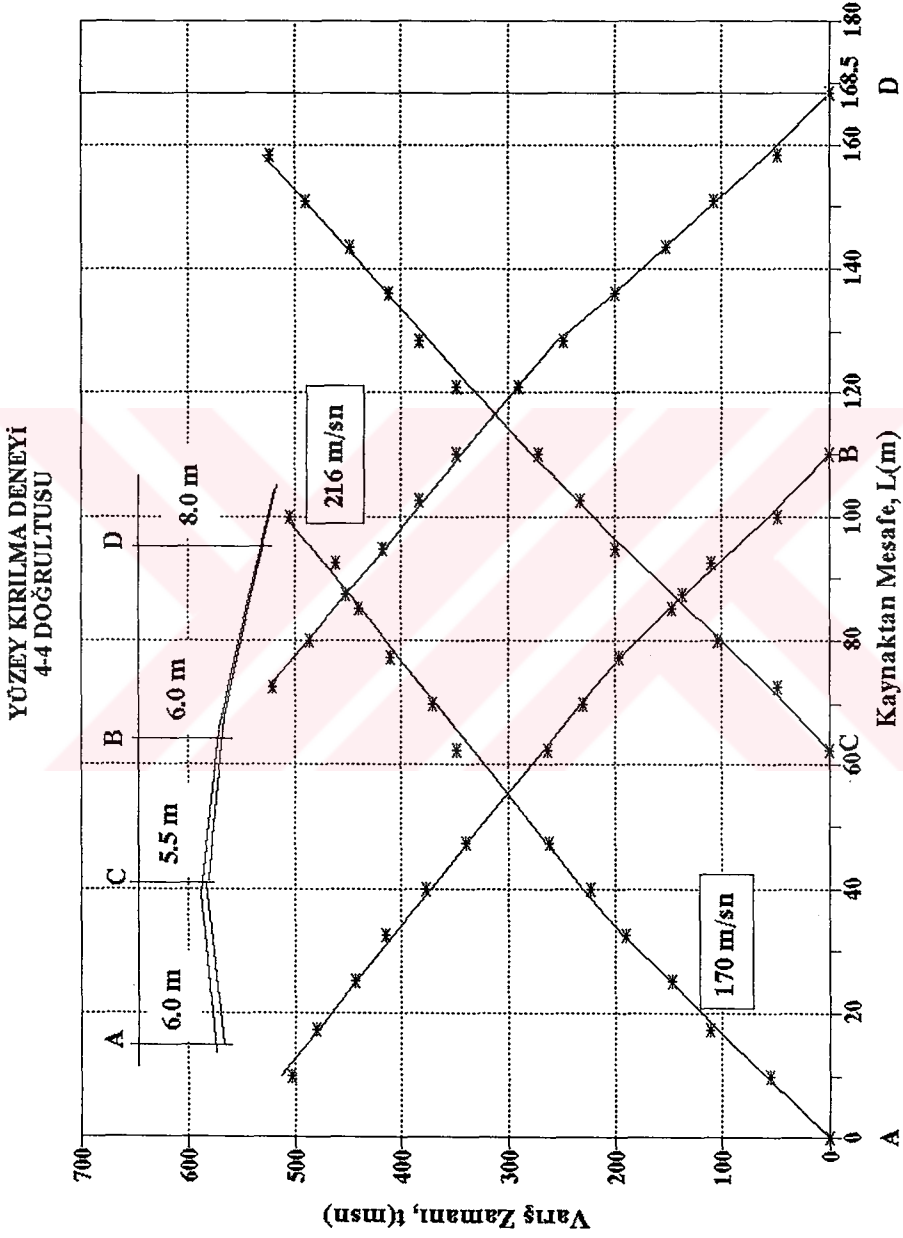
Tablo 5.14. 2-2 Doğrultusu Yüzey Sismik Deney Sonucu

Alıcı No	Mesafe (m)	T_{A-P} (msn)	T_{B-P} (msn)
Kaynak A	0.00	0	
1	36.40	63	96
2	43.90	66	92
3	51.40	70	88
4	58.90	74	85
5	66.40	78	82
6	73.90	82	80
7	89.30	92	75
8	96.80	96	72
9	104.30	100	69
10	111.80	104	67
11	119.30	107	64
12	126.80	112	58
Kaynak B	152.10		0

4-4 doğrultusunda uygulanan deneyde dalga kaynağından itibaren 100 m mesafe içinde alıcılar yerleştirilmiş ve daha sonra ilk grup alıcılar aynı hat üzerinde ileriye taşınmıştır. Böylece yaklaşık 160 m içinde tabakalaşmanın belirlenmesi amaçlanmıştır. Alüvyon zemin tabakalarından oluşmuş bu bölgede uygulanan deney sonuçları Tablo 5.15'de verilmiştir. Tabloda verilen T_{A-P} , T_{B-P} , T_{C-P} ve T_{D-P} kaynak A, B, C ve D noktalarında iken, kaynaktan herhangi bir P mesafesinde bulunan alıcı noktasına direkt dalganın varış zamanını göstermektedir.

Bu doğrultuda 4 ayrı noktada yer alan kaynaktan üretilen dalgalarla yapılan sismik ölçümlerden elde edilen veriler ile çizilen mesafe-zaman grafiği Şekil 5.29'da gösterilmiştir.

Deneyler sonucunda ölçülen P-dalga hızları bakımından iki farklı tabakalaşma ile karşılaşmıştır. Bu hat boyunca 5.5-8.0 m derinlikte yer alan tabakanın hızı ortalama olarak 216 m/sn olarak elde edilmiştir. P-dalgası açısından oldukça düşük bulunan bu hız değeri kesitte bu derinliklerde çok gevşek yerleşimde veya çok yumuşak kıvamda tabakaların olduğuna işaret etmektedir.



Şekil 5.29. 4-4 Doğrultusu Yüzey Kırılma Deney Sonucu

Tablo 5.15. 4-4 Doğrultusu Yüzey Sismik Deney Sonucu

Alıcı No	Mesafe (m)	T_{A-P} (msn)	T_{B-P} (msn)	Alıcı No	Mesafe (m)	T_{C-P} (msn)	T_{D-P} (msn)
A	0.00	0					
1	10.00	56	502				
2	17.50	112	480				
3	25.00	146	444				
4	32.50	190	416				
5	40.00	224	378				
6	47.50	262	340	C	0.00		
7	62.50	348	264				
8	70.00	372	230	1	10.00	48	520
9	77.50	410	196	2	17.50	104	486
10	85.00	440	146	3	25.00	136	452
11	92.50	462	110	4	32.50	200	418
12	100.00	504	48	5	40.00	232	384
B	110.00		0	6	47.50	272	348
				7	58.50	348	290
				8	66.00	384	248
				9	73.50	412	200
				10	81.00	448	152
				11	88.50	490	108
				12	96.00	522	48
				D	106.00		0

5.5.4. Sonuçlar

Dinamik zemin özelliklerini yerinde belirlemek için düşük deformasyon genliklerinde kuyu içi ve yüzey kırılma sismik yöntemleri uygulanmıştır. Yaklaşık 30 m derinliğinde açılmış kaplaması ve enjeksiyonu yapılan kuyularda hem Karşıt Kuyu hem de Aşağı Kuyu deneyleri yapılmıştır. Karşıt Kuyu deneyinde hızlar, ölçüm derinliklerinde dalga varış zamanlarının kuyular arası uzaklığa bölümünden doğrudan bulunurken, Aşağı Kuyuda direkt zaman-derinlik grafiklerinden elde edilebilmektedir. Bu yüzden Aşağı Kuyu yöntemi ile belirlenen hızlar tabaka içinde bir ortalama değer olarak sabit kalmaktadır. Karşılaştırma kolaylığı açısından uygulanan Karşıt Kuyu ve Aşağı Kuyu yöntemleri ile elde edilen hız profilleri Şekil 5.26'da aynı grafikte verilmiştir.

Ölçüm derinliklerinde zemin tabakaları içinde dalga yayılma hızlarının doğrudan belirlendiği Karşıt Kuyu yönteminde hız profili diğerine göre daha detaylı elde edilebilmektedir. Deneylerde ölçüm aralıklarının yeteri

kadar küçük seçilmesi ile yüksek hızlı tabakalar arasında yer alan ve kalınlığı fazla olmayan düşük hızlı zemin tabakaları ve bunlara ait özellikler de belirlenebilmektedir. Aşağı Kuyuda ise bu tür tabakaların yakalanamama ihtimali bulunmaktadır. Bununla birlikte zemin tabakalarında her iki yöntem ile belirlenen hız değerlerinde büyük farklılıklar bulunmamaktadır.

Başarılı bir Karşıt Kuyu uygulaması için tanımlanabilir S-dalga üretilmesini gerekli kılmaktadır. Kuyu içinde istenilen derinlikte S-dalgası üretmekte kuyu içi mekanik çekiç kullanılmıştır. Tersine çevrilebilen ve istenildiği kadar tekrarlanabilen bu çekiç, genleşebilen elemanı ile kuyu duvarına sabitlenmekte ve düşey olarak hareket eden ağırlığı ile bulunduğu derinlikte kuyu duvarına kesme kuvveti uygulayarak S-dalgası üretmektedir. Üretilen dalgaların tanımlanabilir olması, kaydedilen dalga formları üzerinde dalga tiplerini belirleyen karakteristik noktaların açık bulunabilmesi anlamına gelmektedir. Mekanik çekiç ile tanımlanabilir kalitede dalga üretmekte oldukça iyi sonuçlar alınmış ancak su altında sorunlarla karşılaşmıştır. Bu sorunlardan dolayı su seviyesi altında dalga üretilmemiş ve Karşıt Kuyu deneyleri, sondaj kuyularındaki su derinliğine bağlı kalmıştır. Bu yüzden mekanik çekiç üzerinde iyileştirme işlemleri gerekmiştir.

Aşağı Kuyu uygulamalarında zemin içine dikey olarak yerleştirilen bir plaka kaynak olarak kullanılmış ve başarılı ölçümler yapılmıştır. Ancak bu deney tekniğinde dalga kaynağı daima zemin yüzeyde kaldığından, ölçüm derinliği ile birlikte kayıtların kalitesinde bir azalma görülmektedir. Derin ölçümlerde dalga genlikleri kayıt sisteminin sinyal yükseltici ünitesi yardımıyla büyütülmekte fakat bu halde de çevreden gürültü algılanmakta ve kayıt kalitesi azalmaktadır. Aşağı Kuyu deneylerinde yüzeyde bulunan kaynak noktasının, alıcı kuyusuna mesafesi arttıkça yine kayıt kalitesinde azalma olmaktadır.

Karşıt Kuyu ve Aşağı Kuyu deneylerinin yanında bölgede yüzey kırılma sismik deneyleri de uygulanmıştır. Kuyu içi yöntemlerine göre daha geniş açıklıkta uygulanmasına rağmen yüzey kırılma yöntemi ile elde edilen özellikler daha yüzeysel kalmaktadır. Uygulanan deneyler sonucunda bölgede iki farklı hız değerleri bulunmuştur. Sondajlar ve buralarda uygulanan karşıt ve Aşağı Kuyu deneyler zemin kesitinde daha fazla tabaka olduğuna işaret etmektedir. Yüzey yöntemlerinde bir kaynaktan

Üretilen dalgalar oldukça uzakta yer alan alıcılarda izlenmekte ve ana kaya üzerinde yer alan tabaka özellikleri ortalama bir değer olarak bulunmaktadır. Ana kayanın derinlerde bulunması durumunda, dalga üretmek için kullanılan enerjinin de daha büyük olması gerekmektedir. Bu çalışmada yüzey kırılma deneylerinde standart SPT ağırlığı kullanılmıştır. Özellikle alüvyon tabakalarından oluşmuş bölgede yapılan deneylerde enerjinin bu tabakalar içinde büyük sönüme uğraması nedeni ile sığ derinlikteki zeminler hakkında bilgiler elde edilebilmiştir. Bu durumda yüksek enerjili kaynaklar kullanılarak, yüzey kırılma yöntemine göre üstünlükleri ve çözümleme gücü olan sismik yansıma tekniklerinin uygulanması ile daha detaylı sonuçlara ulaşmak mümkün olmaktadır. Daha yüksek enerji kaynağı ile sismik dalgaların penetrasyonunu arttırmak olanaklıdır. Ancak bu tür deneylerde daha derin tabakalar için daha büyük darbelerin kullanımı bazı durumlarda pratik olmamaktadır. Sonuç olarak yüzey yöntemlerinin geoteknik mühendisliğinde zeminlerin dinamik özelliklerini belirlemek için çok uygun yöntemler olmadığı anlaşılmaktadır.

BÖLÜM 6

ERZİNCAN DENEYLERİ VE ARAZİ ÖLÇÜMLERİNE DAYANAN KORELASYONLAR

6.1. GİRİŞ

Bu bölümde, arazi sismik deneyleri kapsamında 13 Mart 1992 tarihinde meydana gelen Erzincan Depreminden sonra bölgede yapılan arazi uygulamaları yer almaktadır. Kuzey Anadolu Fay Hattı üzerinde yer alan ve tarihinde birçok deprem yaşamış olan Erzincan'da bu son depremten hemen sonra bölgede geniş çaplı geoteknik incelemeler başlatılmıştır. Bu inceleme ve araştırmalar kapsamında, kuyu içi yöntemler ile sismik hız ölçümlerinin yanında Standart Penetrasyon Deneyi (SPT), Koni Penetrasyon Deneyi (CPT) ve Dinamik Sonda (DS) gibi çeşitli arazi penetrasyon deneyleri de uygulanmıştır. Bu deneylerden elde edilen veriler ile sismik dalga hızlarının, penetrasyon dirençlerine göre değişimi incelenmiş ve bazı korelasyon eşitlikleri geliştirilmiştir.

Sismik riski yüksek yerleşim merkezlerinden biri olan Erzincan şehri, 13 Mart 1992 tarihinde $M=6.8$ büyüklüğünde bir deprem yaşamıştır. Merkez üssünün şehir merkezine yakın olan bu depremin odak derinliği 10-12 km kadardır (Eyidoğan, 1993). Kuzey Anadolu Fay Hattının Batı kesiminde meydana gelen depremin ana şoku 3 adet kuvvetli yer hareketi ölçen (strong motion) deprem istasyonunda kaydedilmiştir. Şehir merkezinde kaydedilmiş 3 bileşenli yer ivmesi kayıtlarından en büyük ivmenin doğu-batı yönünde 492 gal, kuzey-güney doğrultusunda 390 gal ve düşey yönde 244 gal olduğu bulunmuştur. Düşey yöndeki en büyük ivme yataydakinin yaklaşık % 50'si kadardır. İvme değerlerinin relatif olarak büyük olmasına rağmen, depremin süresi kısadır ve 10 saniye civarındadır. Erzincan'ın 60 km batısındaki Refahiye ve 70 km doğusundaki Tercan'da kurulu diğer deprem istasyonlarında kaydedilen en büyük ivmeler ise 52-74 gal mertebesinde-dir. Bölgedeki sönüm, jeolojik formasyonlardaki süreksizlik ve çok derin alüvyon dolgu tabakası sebebi ile oldukça önemlidir. Birbirinden

60 km uzakta iki ayrı istasyondaki kayıtların benzer olmayışı yerel zemin koşullarının çok önemli olduğuna işaret etmektedir (Ansal ve diğ., 1993). Şehir merkezinde alınan kayıtlardan ana şokun tüm bileşenlerin hakim peryodları 0.3-1.0 saniye olarak hesaplanmıştır. Erzincan depremi bölgede çok sayıda can ve mal kaybına neden olmuş, bölge ve ülke ekonomisini etkilemiş, binlerce insanı barınaksız bırakmış ve iş merkezlerini tahrip etmiştir. Deprem nedeni ile resmi rakamlara göre yaklaşık 550 kişi hayatını kaybetmiş ve 3850 kişi de yaralanmıştır. Bölgede yaklaşık 4100'ü ağır olmak üzere toplam 18000 bina çeşitli derecelerde hasar görmüştür.

Hasarlı yapıların tesbiti, orta ve hafif hasarlı binaların onarılarak tekrar kullanıma açılması amacı ile bölgede bir çalışma programı hazırlanmıştır. Bu program çerçevesinde, şehir merkezindeki hasarlı yaklaşık 2000 konutun tamir ve takviyesi için İstanbul Teknik Üniversitesi adına Yapı ve Deprem Uygulama Araştırma Merkezi de görev almıştır. Uygulanacak takviye projelerinin hazırlanmasında hesaplarda kullanılacak, temel zeminin mukavemet ve dinamik özelliklerinin belirlenmesi ve hasara yerel zemin koşullarının etkisinin araştırılması için geniş kapsamlı geoteknik incelemeler başlatılmıştır. İnceleme ve araştırmalar genelde arazi deneyleri üzerinde yoğunlaşmış sismik deneylerin yanında çeşitli penetrasyon deneyleri yapılmış, sondajlar sırasında alınan örselenmiş ve örselenmemiş zemin numuneleri üzerinde de çeşitli laboratuvar deneyleri yürütülmüştür.

Geoteknik incelemelerde zeminlerin mukavemet özelliklerini yerinde tayin etmek için geliştirilmiş arazi deney teknikleri günümüzde sıkça kullanılmaktadır. Zemin araştırmalarında açılan sondaj kuyuları içinde uygulanan SPT deneyi, hem numune almak hem de bu deneyden elde edilen darbe sayılarına bağlı olarak zeminlerin sıklık ve kıvamları hakkında bir bilgi edinilmesi açısından oldukça önemli bir arazi deneyidir. Diğer arazi deneyleri arasında CPT, Dinamik Sonda ve sismik deneyler gösterebilir. Zeminlerin dinamik özelliklerinin bulunmasında ise genel olarak Karşıt Kuyu ve Aşağı Kuyu sismik deney yöntemleri kullanılmaktadır. Bu yöntemlerin uygulanmasında diğer arazi deneylerine göre, açılan sondaj kuyularının uygun şekilde kaplanması, kaplama zemin arasının enjeksiyon ile doldurulması, Karşıt Kuyu için uygun mesafelerde açılmış en az iki tercihen üç kuyunun gerekli olması gibi arazide yapılacak ek işlemler bulunmaktadır. Bu tür işlemler de maliyetin artmasına ve böylece sismik deneylerin ancak daha kapsamlı ve detay isteyen

araştırmalarda tercih edilmesine yol açmaktadır. Sismik deneylerin uygulanmadığı veya sınırlı miktarda uygulandığı fakat diğer arazi deneylerin yapıldığı durumlarda dinamik özelliklerin tahmin edilebilme gereği, bu özellikler ile arazide uygulanan çeşitli penetrasyon deney sonuçları arasındaki ilişkilerin aranmasına yol açmıştır. Bu amaçla yapılan araştırmalar sonucunda çeşitli korelasyon eşitlikleri geliştirilmiştir. Çeşitli penetrasyon deneyleri ile sismik dalga hızları arasında geliştirilen bu korelasyonlardan elde edilen sonuçları, arazi sismik deneylerinden bulunanlar gibi değerlendirmek doğru olmamaktadır. Bununla birlikte bu korelasyonları, bir program çerçevesinde yürütülen arazi deney sonuçları ile birlikte kullanmak bir çok sahada yararlı olmaktadır.

Çeşitli zemin özellikleri ile düşük genlikli kayma modülü veya kayma dalgası hızı arasında korelasyonlar geliştirmek son yıllarda araştırmacıların ilgisini çekmiş ve hem arazi hem de laboratuvar deney sonuçları kullanılarak çeşitli korelasyon bağıntıları elde edilmiştir. Genel olarak bakıldığında bu korelasyonlar kullanılabirlik açısından birbirlerinden farklılıklar göstermektedir. Ölçüm teknikleri, toplanan veri sayısı ve analizde seçilen değişkenler korelasyonları etkilemektedir. Sismik dalga hızlarını içeren arazi korelasyonları, elde edilen kullanılabilir verilerin sınırlı miktarda olması sebebiyle günümüze kadar daha az kabul görmekteydi. Ancak gelişen teknoloji ile birlikte arazi deney aletlerinin gelişmesi, arazi deney uygulamalarını ve analiz işlemlerini kolaylaştırmış, bu ise veri sayısında artışa neden olarak korelasyon bağıntılarına güvenirliliği arttırmıştır.

Arazide yapılan ölçümlerden elde edilen kayma dalgasını içeren yayınlanmış korelasyonlar genel olarak Japonya'da ve Amerika'da yoğunlaşmıştır. Bu çalışmalarda çeşitli değişkenler kullanılarak geliştirilen V_s korelasyon eşitliklerinin korelasyon katsayıları ve doğruluk dereceleri, birbirine göre oldukça farklılıklar sergilemektedir. Sismik dalga hızlarını içeren arazi korelasyonlarında ana değişken Standart Penetrasyon N-darbe sayısıdır (SPT-N). N sayısına bağlı olarak sunulan tüm bağıntılar genelde düzeltilmemiş SPT-N sayısına göre çıkarılmış, efektif düşey gerilme hesaba hemen hemen hiç katılmamıştır. Yine bu çalışmalarda çekiç tipi ve düşürme yöntemi gibi kullanılan SPT ekipmanı ve uygulamadaki detay hakkında yeterli bilgi bulunmamaktadır. Bu yüzden bu amprik bağıntıları

arazi deney sonuçları gibi değerlendirmek yerine, arazi ölçümlerinin daha iyi derlenip, yorumlanmasında kullanılması faydalı olacaktır.

Özellikle sismik aktivitesi yüksek olan bölgelerde sismik dalga ölçüm miktarlarında günümüzde bir artma söz konusudur. Karşıt kuyu ve Aşağı Kuyu yöntemleri sismik dalgaların zemin içinde yayılma hızlarının doğru olarak ölçülmesinde kullanılan tekniklerdir ve artık uygulamasında da bir standarda ulaşılmıştır. Düşük genlikli bu teknikler kayma deformasyonunun %10-3 ve daha küçük değerlerinde dalga hızının saptanmasında kullanılmaktadır. Bu deformasyon seviyelerinde kayma deformasyonunun kayma modülü üzerindeki etkisi önemsizdir. Bu durumda mühendislik uygulamalarında yapılan arazi ölçümlerinden sismik hız tahmini uygun ve kullanılabilir olarak görülmektedir.

Kayma dalgası hızı ile diğer arazi deney sonuçları arasında geliştirilen korelasyonlar incelendiğinde önceleri ana değişken olarak SPT-N darbe sayısının alındığı ancak daha sonraki çalışmalarda diğer zemin özelliklerinin de incelendiği görülmektedir. Bunlar arasında V_s -N ilişkisini içeren bağıntılar, V_s 'in diğer değişkenler ile olan ilişkisinden, korelasyon katsayıları karşılaştırıldığında daha güvenli sonuçlar vermektedir. Bununla beraber istatistik analiz sonuçları, V_s bağıntılarını geliştirmek için bir çok değişkenin ve daha fazla verinin kullanılması gerektiğini göstermektedir. Önceki çalışma ürünleri V_s -N korelasyonlarını en fazla etkileyen parametre derinlik ve jeolojik yaş olarak ortaya çıkmaktadır. Genelde kayma dalgası hızı V_s , N darbe sayısına bağlı olarak artmaktadır. Bu artış derinlik ve jeolojik yaşta da görülmektedir. Bazı korelasyonlarda zemin tipinin etkisi de görülmektedir. Bütün bunlardan, arazi korelasyonlarına etki eden çeşitli penetrasyon dirençleri ve efektif gerilme gibi değişkenleri ana değişkenler, diğer parametreleri ise ikincil değişkenler olarak iki gruba ayırmak mümkün görülmektedir.

Bu bölümde önce arazi korelasyonlarına etki eden bu değişkenler ele alınacak, çeşitli araştırmacılar tarafından yapılan ve arazi korelasyonlarını içeren çalışmalar özetlenecektir. Daha sonra Erzincan'da uygulanan sismik ve diğer arazi deneyleri ile bu deneylere ait sonuçlara yer verilecek ayrıca bu deneylerden elde edilen sonuçlar kullanılarak geliştirilen ve arazi ölçümlerine dayanan korelasyon eşitlikleri sunulacaktır.

6.2. ARAZİ KORELASYONLARINA ETKİYEN ANA DEĞİŞKENLER

Kayma dalgası hızı ve diğer arazi parametreleri arasında ilişkiler incelenirken dikkate alınan ana değişkenler Standart Penetrasyon Deneyi SPT-N darbe sayısı, Koni Penetrasyon Deneyi uç mukavemeti CPT- q_c ve efektif gerilme değeridir. Zemin tipi, jeolojik yaş ve sismik bölge gibi değişkenlerin etkisi daha az olmaktadır.

6.2.1. Penetrasyon Dirençleri

6.2.1.1. Standart Penetrasyon Deneyi (SPT)

Geoteknik mühendisliğinde zemin incelemelerinde arazide en fazla kullanılan deneylerden biri olan SPT, dinamik olarak belli yükseklikten bir ağırlığı standart bir uca düşürerek zemine son 30 cm girmesi için gerekli darbe sayısının bulunması şeklinde uygulanmaktadır (ASTM D-1586). Uzun yıllardan beri mühendisliğin hizmetinde olan bu deney tekniğinin sonuçları arasında, kullanılan donanım, çekiç düşürme yöntemleri ve operatörden kaynaklanan farklılıklar bulunmaktadır. SPT-N değerine etki eden faktörlerin araştırılmasına hala devam edilmektedir.

Gibbs ve Holtz (1957), SPT deneyini laboratuvarında bir hücre içinde kumlar üzerinde uygulayarak, efektif düşey gerilmenin SPT-N darbe sayısına belirgin bir etkisinin olduğu ve boşluk oranının (e) bir fonksiyonu olarak relatif sıkılık (D_r) ile ilişkili olduğu sonucuna varmışlardır. Buna göre düşey efektif gerilme veya D_r artarken N sayısı da artmaktadır. Aynı araştırmacılar N sayısının, zeminin suya doymun olduğu durumlarda biraz azalacağını kaydetmişlerdir.

Schultze ve Menzenbach (1961), SPT-N sayısındaki bu azalmanın, yeraltı su seviyesi (YASS) altında yapılan deneylerde ortalama %15 olacağını ve daha gevşek zeminlerde bu etkinin daha da belirgin olacağını söylemişlerdir.

Melzer (1971), SPT-N değerinin su altında daha düşük olduğunu hem arazi hem de laboratuvarında yaptığı deney sonuçlarından göstermiştir.

De Mello (1971), kumlarda relatif sıkılık (D_r), efektif düşey gerilme ve kayma mukavemeti açısı ile SPT-N darbe sayısını etkileyen faktörleri

araştırmış ve SPT deneyinin efektif düşey gerilmeden (σ_v) daha çok ortalama yatay gerilmenin ($\sigma_m = \sigma_v(1+2K_0)/3$) etkisinde olduğu sonucuna ulaşmıştır.

Schmertmann (1971), De Mello'nun bu yayınına karşı yaptığı araştırmalar sonucunda, SPT numune alıcısına etkiyen kuvvetleri inceleyerek, zemin cinsinin bir özelliği olan sürtünme oranını (F_r) kum zeminler için kullanarak toplam direncin %56'sının uç mukavemetine ve %44'ünün çevre sürtünmesine harcadığını belirtmiş ve düşey gerilmenin önemini vurgulamıştır. Burada F_r , CPT deneyinden bulunan çevre sürtünmesinin, uç mukavemetine oranıdır ($F_r = q_f/q_c$).

Bieganousky ve Marcuson (1976), laboratuvarında uyguladıkları SPT deney sonuçlarından N değerinin, yoğunluğun değişmesinden, aşırı konsolide oranından ve düşey efektif gerilmeden etkilendiğini ve bunlarda meydana gelecek bir artışın SPT- N değerinde önemli bir artışa sebep olacağını göstermişlerdir.

İyisan ve Ansal (1989), farklı zemin gruplarında ve farklı kurumlarca yapılmış SPT deneylerinden bulunmuş SPT- N darbe sayıları ile laboratuvarında elde edilen drenajsız kayma mukavemetleri arasında geliştirdikleri korelasyon sonuçlarını kullanarak önerdikleri düzeltme faktörünün büyük olmasını, yapılan SPT deneylerindeki enerji kayıplarının büyük olmasına bağlamışlardır.

Yapılan SPT deneylerinden elde edilen N sayısının düşey efektif gerilmeye göre düzeltilmesi yönünde bir eğilim vardır. Bu tür düzeltme faktörleri Peck (1974), Seed ve diğ. (1977), Seed ve Idriss (1981) tarafından verilmiştir. Seed tarafından önerilen düzeltme, birim düşey efektif gerilmeye göredir. C_N düzeltme faktörü olmak üzere, düzeltilmiş SPT- N sayısı $N_1 = C_N * N$ olarak bulunabilmektedir. Bazı araştırmacılar tarafından yayınlanmış düzeltme faktörlerinin bir özeti Tablo 6.1'de verilmiştir.

SPT deneyini etkileyen faktörler, arazi şartlarından daha çok onun uygulama yöntemlerinden kaynaklanmaktadır. Örneğin çekiç düşürme sistemi bu faktörlerin en önemlisi olarak görülmekte ve düşürme yöntemine bağlı olarak sonuçlar arasında %40'a varan değişimler olmaktadır (Frydman, 1970; Kovacs, 1977).

Tablo 6.1. Çeşitli Araştırmacılara Ait Düzeltme Faktörleri

Kaynak	Düzeltme Faktörü, C_N	σ_v birimi
Teng (1962)	$C_N=50/(10+\sigma_v)$	psi
Bazaraa (1967)	$C_N=4/(1+2\sigma_v)$ $\sigma_v < 1.5$ $C_N=4/(3.25+0.5\sigma_v)$ $\sigma_v > 1.5$	ksf
Peck, Hansen ve Thornburn (1974)	$C_N=0.77 \log(20/\sigma_v)$	tsf
Seed (1976)	$C_N=1-1.25 \log(\sigma_v)$	tsf
Tokimatsu ve Yoshimi (1983)	$C_N=1.7/(0.7+\sigma_v)$	kg/cm ²

(1 psi=6.895 kPa, 1 tsf=107.6 kPa, 1 ksf=47.88 kPa)

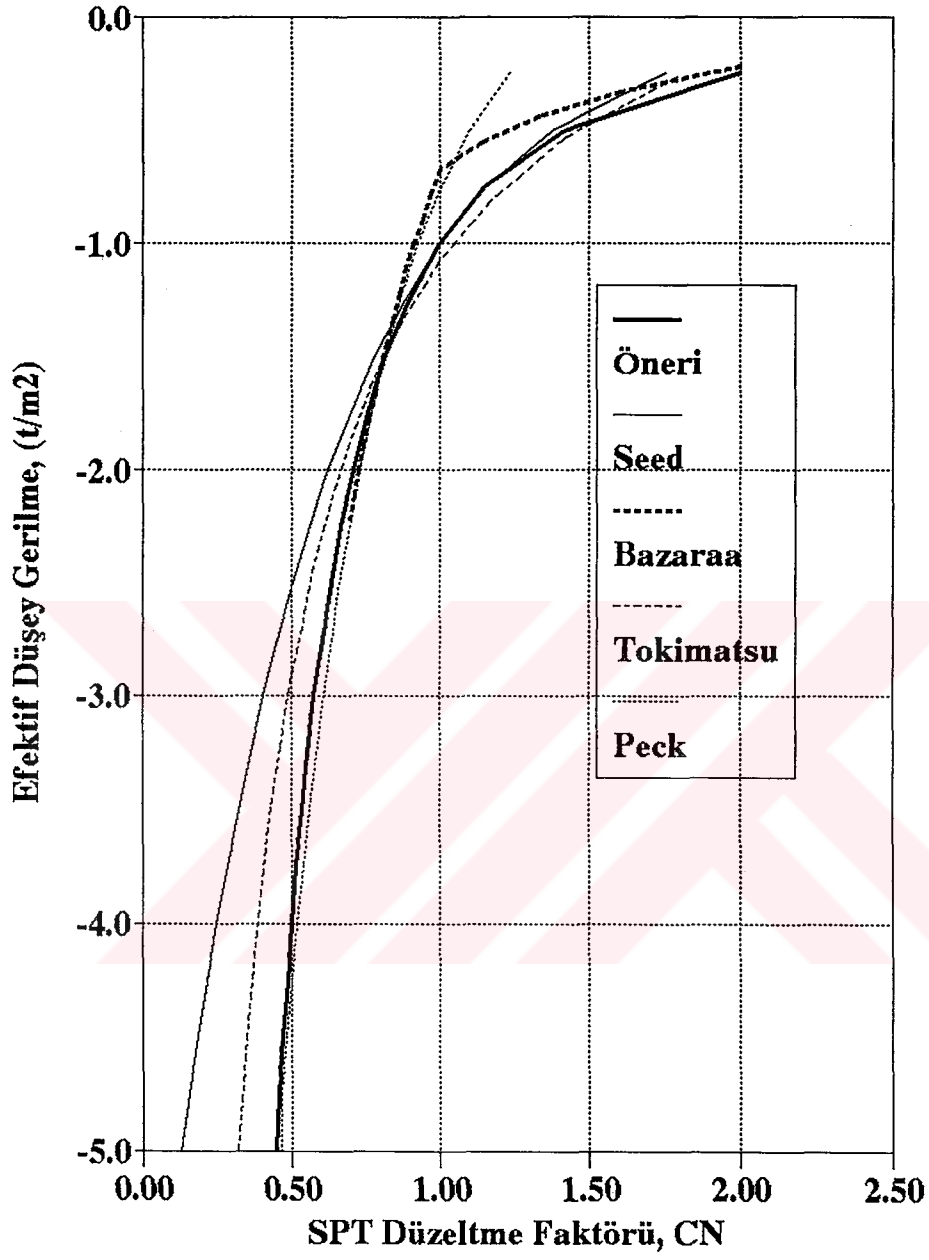
SPT deneyinin uygulanması sırasında kullanılan tekniklerin farklı olması N darbe sayısında da farklılıklara neden olmaktadır. Bu nedenle, elde edilen N sayıları sabit bir enerji oranına veya efektif düşey gerilmeye göre normalize edilmesi yani düzeltilmesi doğru bir yaklaşım olmaktadır. Seçilen sabit enerji oranına göre yapılacak düzeltmede, $ER_r=\%60$ kullanılması tavsiye edilmektedir (Skempton, 1986). Bu durumda enerji düzeltmesi,

$$N_{60}=N*ER_r/60 \quad (6.1)$$

şeklinde verilmektedir. ER_r , çubuk enerji oranıdır ve deney esnasında ağırlığın bilinen bir yükseklikten düşürülmesi ile oluşan toplam enerjinin çubuklara aktarılan kısmını göstermektedir. Pratik uygulamada, efektif düşey gerilmeye göre yapılacak düzeltmede deneyden bulunan SPT-N değeri C_N gibi bir düzeltme katsayısı ile çarpılmaktadır. Çeşitli araştırmacılar tarafından önerilmiş düzeltme faktörleri içinde birbiri ile uyum gösterenlerin ortalaması olarak,

$$C_N = (1/\sigma_v)^{0.5} \quad (6.2)$$

bağıntısı kullanılabilir. Burada σ_v düşey efektif gerilme olup (kg/cm²) cinsinden alınmalıdır (Liao ve Whitman, 1986). Bu önerilen düzeltme faktörü ile diğer araştırmacılar tarafından geliştirilen faktörlerden bazıları Şekil 6.1 de gösterilmiştir.



Şekil 6.1. Çeşitli Araştırmacıların Önerdiği SPT-N Düzeltme Faktörleri

6.2.1.2. Koni Penetrasyon Deneyi (CPT)

Statik sonda deneyi olarak da bilinen CPT deneyi, 60 derecelik, 10 cm² kesit alana sahip konik bir başlığın (pistonun) hidrostatik bir basınç ve sabit bir hızla zemin içine itilmesi sureti ile uygulanan bir arazi deney yöntemidir. Piston hızı 100-200 mm/dak mertebesinde dir. Deney toplam ve uç okumaları alınarak uygulanmaktadır. Toplam okuma ile uç okuması arasındaki fark çevre sürtünmesine eşit olmaktadır (ASTM D-3441). Geoteknik Mühendisliğinde giderek daha fazla kullanım alanı bulan ve sondaj kuyusu gerektirmeyen CPT deneyinde, standart bir uç zemine çakılmadan, sabit hızla zemin içine itilerek hem uç mukavemeti q_c , hemde sürtünme direnci q_f bulunabilmektedir. SPT deneyinde olduğu gibi belli noktalarda değil sürekli ölçüm yapılabilmekte ve uygulamasında büyük ölçüde operatör etkisinde olmamaktadır.

Genel olarak SPT deneyini etkileyen benzer faktörler bu deneyi de etkilemektedir. CPT uç mukavemeti q_c , kumlarda relatif sıkılığın bir fonksiyonudur. Dane dağılımı, çimentolaşma, yatay gerilme ve derinlik uç mukavemetini etkileyen önemli faktörlerdir. Ancak D_r ve efektif gerilmenin etkisini tek tek ayırt etmek pek kolay olmamaktadır (Schmertmann, 1978).

Baldi ve diğ. (1981), dikkatlice kontrol ederek laboratuvar da kuru kumlarda yaptıkları deney sonuçlarından q_c uç mukavemetinin relatif sıkılık ve düşey efektif gerilme ile değiştiğini göstermişlerdir. Araştırmacılar ayrıca uç mukavemetinin yatay gerilmeden de etkilendiği ve bu sebepten, q_c ile diğer parametreler arasında korelasyon yapılacağı zaman, aşırı konsolide zeminlerde yatay gerilmenin hesaplanması gerektiğine işaret etmişlerdir.

Veismanis (1974), yatay efektif gerilmenin penetrasyon direncine etkisini inceleyerek kumlarda ilk sıkılığın bir fonksiyonu olarak yatay gerilme ile q_c değerinin arttığını göstermiştir.

6.2.2. Efektif Gerilme

Zeminleri etkileyen efektif ortalama gerilme, V_s ve N üzerinde de ana etkenlerdir. Laboratuvar da yapılan bir çok parametrik çalışmalarda da bu gösterilmiştir. Arazide bu gerilmeyi tayin etmek zor olduğundan ve sukünetteki toprak basıncı katsayısına (K_0) gerek duyulduğundan

korelasyonlarda genelde efektif düşey gerilme kullanılmıştır. Bu gerilmenin hesaplanmasında yeraltı su seviyesi (YASS) ve ortamın yoğunluğu yeterli olmaktadır. Derinlikle düşey efektif gerilmenin artması YASS altında %50 civarında azalmaktadır. Efektif düşey gerilme ile V_s arasındaki korelasyonlar mühendislikte faydalı olmakta ve kullanım alanı bulmaktadır. Bu korelasyon eşitlikleri yardımı ile zemin numunesi ve laboratuvar deneyleri olmadan, zeminin etkisinde kaldığı gerilme tahmin edilebilmektedir.

6.3. ARAZİ KORELASYONLARINA ETKİYEN İKİNCİL DEĞİŞKENLER

6.3.1. Zemin Tipi

Farklı zemin tipleri benzer şartlar altında farklı davranış sergilemektedirler. Bu farklı davranış sismik dalga hızlarında da görülmektedir. Hemen hemen bütün araştırmacılar kayma dalgası hızını (V_s) içeren arazi korelasyonları ile ilgili analizleri yaparken zeminleri sınıflarına göre ayırmışlardır. - Bu araştırmalar sonucunda her zemin cinsinin V_s 'in belli karakteristik sınırlara sahip olmasının yanında, zemin tipinin V_s -N arasındaki korelasyonlarda çok fazla bir etkisi olmadığı gösterilmiştir. Zemin tipinin etkisi kayma dalgası hızı ile derinlik arasındaki ilişkide önemli bir rol oynamaktadır. Bu yüzden zemin tipi, V_s ile çeşitli penetrasyon dirençleri arasında geliştirilen korelasyonlarda bir değişken olarak alınmamıştır.

Laboratuvar çalışmaları boşluk oranının (e) değişmesiyle V_s 'nin de değiştiğini göstermiştir. Fakat özellikle kohezyonsuz zeminlerde boşluk oranını arazide doğrudan belirlemek kolay olmamakta ve bu özellik relatif sıkılıktan hesaplanabilmektedir. Genelde dane boyutu büyüdükçe sismik dalga hızlarının da yükseldiği kabul edilmektedir.

6.3.2 Jeolojik Yaş

Önceki korelasyon çalışmalarında jeolojik yaşı V_s -N ilişkisine çok fazla etkili olmadığı sonucuna varılmasına rağmen, kayma dalgası hızı yaşa bağlı olmaktadır. Genelde daha genç zeminler, daha yaşlı zeminler ile karşılaştırıldığında daha düşük hıza sahiptir ve korelasyonlarda daha fazla

saçılım göstermektedirler. Jeolojik yaşın, V_s -derinlik üzerinde oldukça fazla etkisi olduğu Cambell ve Duke (1976), Fumal (1978) tarafından gösterilmiştir.

Jeolojik yaşın artışıındaki esas etki, boşluk oranında olmakta ve onun azalmasına yol açmaktadır. Boşluk oranı azaldıkça hız ve SPT-N değeri artmaktadır. Jeolojik yaşın diğer etkisi ise zemin danecikleri arasında çimentolaşmanın başlamasına sebep olmasıdır. Çimentolaşma ise zemin yapısında rijitliği arttırmakta ve dolayısı ile kayma dalgası hızının daha yüksek değerde olmasına neden olmaktadır.

6.4. ÖNCEKİ ARAZİ KORELASYONLARI

Arazi ekipmanlarının ve modern deney tekniklerinin gelişimi daha kaliteli ve sayıca daha fazla miktardaki arazi verilerinin toplanabilmesine ve bu verilerle istatistik analiz yapılarak mühendislik uygulamalarında pratik amaçlar için kullanılabilecek bazı korelasyonlar geliştirilmesine imkan tanımıştır. Sismik dalga hızlarını, özellikle deprem ve geoteknik mühendisliğinde çok önemli bir parametre olan kayma dalgası hızını içeren bu korelasyonlar, her geçen gün artan veri sayısına paralel olarak geliştirilerek kullanıma sunulmaktadır. Önceleri mikrotremer, plaka yükleme deneyleri kullanılarak V_s -N ilişkilerinin incelenmesindeki çalışmalar, küçük ölçekli olarak 1975 yılına kadar devam etmiştir. Daha sonra karşıt kuyu, Aşağı kuyu ve diğer sismik deneylerden bulunan dalga hızları ile diğer arazi deneylerinden elde edilen sonuçlar (SPT-N darbe sayısı, CPT- q_c uç direnci vs. gibi) arasında ilişkiler bu önceki çalışmalardan yola çıkarak geliştirilmiştir. 1968 yılında başlayan bu çalışmalar hala güncelliğini korumakta ve çeşitli ülkelerde yapılanlarla karşılaştırma imkanı yaratılmaktadır. Burada çeşitli araştırmacılar tarafından yapılan çalışmalara kısaca değinilmiştir.

Sakai (1968), deprem analizinde kullanmak için V_s -N ilişkisinin olasılığını araştırmıştır. Çalışmasında zemini elastik ortam kabul edip, SPT ve plaka yükleme deneyini kullanarak V_s 'i bulmak için;

$$V_s = [(E/\delta) * 1/2(1+\mu)]^{0.5} \quad (\text{m/sn}) \quad (6.3)$$

eşitliğini kullanmıştır. Burada E elastisite modülü (t/m^2), δ yoğunluk (tsn^2/m^4) ve μ ise Poisson oranıdır. Burada V_s için E , bilinmesi gereken önemli bir parametre olmaktadır. Sakai, plaka yükleme deneyi ile N sayısından elde edilen taşıma gücünü karşılaştırarak E 'i saptamayı ve böylece V_s 'i N sayısına göre hesaplamayı düşünmüştür. Plaka yükleme deneyinde deformasyonun derinlikle değiştiğinden, dairesel yükleme plağı çapının 3-4 katı derinlikteki ortalama deformasyonu kullanarak Kayma dalgası ve SPT-N darbe sayısı arasında aşağıdaki bağıntıyı vermiştir.

$$V_s = (15-30.5) \cdot N^{0.5} \quad (m/sn) \quad (6.4)$$

Kanai ve diğ. (1966), genelde kumlarda yapılan yaklaşık 70 mikrotromer ölçüm sonuçlarını kullanarak aşağıda verilen ilişkiyi önermiştir.

$$V_s = 19 \cdot N^{0.6} \quad (m/sn) \quad (6.5)$$

Shibata (1970), öncelikle daha önce yapılan ve V_s 'i etkileyen faktörleri içeren çalışmaların sonuçlarını birleştirerek, V_s - N arasındaki korelasyonlara yoğunluk ve efektif jeolojik gerilmeyi önemli parametreler olarak işin içine katmıştır. Önce Gibbs ve Holtz (1957), Schultze ve Menzenbach (1961) ve Yanase (1968) tarafından yapılmış relatif sıkılık, (D_r) ve efektif jeolojik yükün (σ_v) N sayısına etkisini içeren çalışmaları inceleyerek, $\log N$ - $\log \sigma$ ilişkisinin D_r 'nin yaklaşık 0.5 gibi bir değerinde lineer olduğu sonucuna varmıştır. Ayrıca zeminlerin porozitesini (n) kullanarak σ_v 'nin bir özel değerinde N darbe sayısının ($n_{maks}-n$) nin bir fonksiyonu olarak düşünerek;

$$N = A \cdot (n_{maks} - n) \cdot \sigma_v^{0.5} \quad (düşüş/30 \text{ cm}) \quad (6.6)$$

eşitliğini çıkarmıştır. Burada σ_v psi, A ise $57-61 \cdot (lb^{0.5} düş./30 \text{ cm})$ biriminde bir sabittir. Shibata, sınırları laboratuvarında yapılan çalışmalardan geliştirerek, diğer çalışmaları da incelemiştir. Toki (1969) teorik hesaplar yaparak kumlarda;

$$V_s^2 = A \cdot (n_{maks} - n) \cdot \sigma_v^{0.5} \quad (ft^2/sn^2) \quad (6.7)$$

ifadesini geliştirdi. A sabitini ultrasonik testle üçeksenlide bulmuştur. Shibata V_s 'in, n ve σ_v fonksiyonu olarak N değeri cinsinden ifade edilebileceğini saptadıktan sonra son iki bağıntıyı birleştirerek kumlar için aşağıdaki ifadeyi geliştirmiştir.

$$V_s = 31.7 * N^{0.5} \quad (\text{m/sn}) \quad (6.8)$$

Ohda ve Toriuma (1970), Japonyada Osaka yakınlarında alüvyon zeminlerde yapılan Rayleigh hızı ölçümlerine dayanan aşağıdaki bağıntıyı sunmuşlardır.

$$V_s = 85.3 * N^{0.31} \quad (\text{m/sn}) \quad (6.9)$$

Ohsaki ve Iwasaki (1973), genelde Aşağı Kuyu ölçümlerinden sağlanan veriler ile, jeolojik yaşın ve zemin tipinin etkisini de dikkate alarak V_s -N ilişkisini basit istatistik analizle incelediler. Analizde, Ohsaki ve Sakaguchi (1972) tarafından önerilen basitleştirilmiş zemin profili içinde her zemin tipi için ortalama olarak alınan N değerleri kullanılmıştır. Bu yöntemle göre kayma modülü (G) veya kayma dalgası hızının sabit olduğu tabaka içinde, aynı hız veya kayma modülüne ortalama bir N darbe sayısı karşı gelmektedir. Araştırmacılar Kanai'nin verilerini kullanarak kum ve killer için kayma modülleri arasında, tipik arazi yoğunlukları belirleyerek karşılaştırma yapmışlardır. Bu çalışmalardan aynı N değerinde kilin daha büyük kayma modülüne sahip olduğu sonucuna varılmış ve Japonya'da kumlar için birim hacim ağırlığı 1.80 t/m³ kabul edilerek;

$$V_s = 81.4 * N^{0.39} \quad (\text{m/sn}) \quad (6.10)$$

ifadesi verilmiştir. Daha sonra verileri zemin tipi ve jeolojik yaşa göre ayırarak $G = a * N^b$ formundaki eşitlik için istatistik analiz sonucunda çeşitli korelasyon katsayılarına sahip bağıntılar elde edilmiştir. Bu analiz sonucunda korelasyon katsayıları bakımından en iyi ilişki sadece kohezyonlu zeminlerde uygulanan deneylerden elde edilen verilerden, ikinci en iyi ilişki tüm verilerle yapılan analizde bulunmuştur. Bu çalışmalardan V_s ile N arasındaki korelasyonların hemen hemen zemin tipi ve jeolojik yaştan bağımsız olduğuna işaret ederek çok önemli sonuçlara ulaşmışlardır.

İmai ve Yoshimura (1975), Aşağı Kuyu sismik ölçümleri ile 70 sahada 100 sondaj kuyusunda toplanan arazi verilerini kullanarak V_s 'in zemin tipi ve jeoloji ilişkisini inceyerek V_s ile zeminlerin diğer mühendislik özellikleri arasında iyi sayılabilecek bir korelasyon olduğunu savunmuşlardır. Kayma dalgası hızının Holosen yaşlı alüvyon kumlarda 78-329 m/sn ve Pleistosen dilüvyal kumlarda ise 220-649 m/sn arasında değiştiğini ve daha yaşlı zeminlerin açık olarak daha yüksek değerlerde ve daha geniş sınırlarda V_s 'e sahip olduğunu gösterdiler. Daha yaşlı zeminlerin genç zeminlere göre daha derinlerde olduğu düşünüldüğünde, sahip olduğu efektif yükten dolayı

daha fazla V_s 'e sahip olması doğal bir sonuçtur. Bu araştırmacılar, N - V_s ilişkisinde zemin tipinin etkisinin ayırt edilmesinin zor olduğu sonucuna vararak, zemin cinsinden bağımsız olarak tüm verilerle aşağıdaki bağıntıya ulaştılar. Bağıntıda SPT- N sayılarının son girişte 50 den büyük olması durumunda, 50 darbe için giriş miktarına göre eşdeğer N sayısı alınmıştır.

$$V_s = 92 * N^{0.329} \quad (\text{m/sn}) \quad (6.11)$$

İmai ve diğ. (1975), daha sonra toplam 756 data ile dolgular dahil tüm zemin grupları için yeniden analiz yaparak önceden verdikleri sınırları biraz daha geliştirerek, alüvyon kumlar için 79-345 m/sn ve dilüvyal kumlar için ise 175-649 m/sn arasında kayma dalgası hızları bularak yeni bir bağıntı önermişlerdir.

$$V_s = 89.9 * N^{0.341} \quad (\text{m/sn}) \quad (6.12)$$

Ohta ve diğ. (1972), 18 sahadan toplanan 100 veri ile regresyon analizi yaparak Ohsaki'ye benzer bir bağıntı elde etmiş ve birim hacim ağırlığı 1.80 t/m³ kabul ederek;

$$V_s = 87.2 * N^{0.36} \quad (\text{m/sn}) \quad (6.13)$$

şeklinde öncekilere benzeyen bir korelasyon eşitliği elde etmişlerdir.

Ohta ve Goto (1978), her birinde V_s , N , derinlik, jeolojik yaş ve zemin tipi ile ilgili bilgiler bulunan 300 set veriyi kullanarak, kayma dalgası hızının bu değişkenler ile ilişkisini incelemişlerdir. Bu incelemede, jeolojik yaşı Halosen ve Pleistosen olarak iki ayrı gruba ayırmışlar, fakat genelde arazi verisini Halosen devrine ait alüvyon zeminler teşkil ediyordu. Zemin tipi ise kil, kum, çakıl olarak üç grupta toplanmış ancak bunlarda alt gruplara ayrılmıştır. Aynı V_s hızında birden fazla N sayısı karşı geldiği durumlarda ortalama değerler alınmıştır. Çok sıkı zeminlerde SPT deneyinde, 30 cm nin 50 vuruşta geçilememesi halinde N değerleri, 50 darbe için sağlanan giriş miktarından hesaplanmıştır. SPT- N değeri, derinlik, jeolojik yaş ve zemin cinsi ile kayma dalgası arasında yaptıkları analiz sonucunda Ohta ve Goto tarafından aşağıdaki korelasyon eşitliği verilmiştir.

$$V_s = 68.8 * N^{0.171} H^{0.199} f_A f_G \quad (\text{m/sn}) \quad (6.14)$$

Burada H, metre biriminde derinliği f_A , jeolojik yaş faktörü f_G ise zemin tipi faktörlerini göstermektedir ve aldığı değerler Tablo 6.2'de verilmiştir.

Tablo 6.2. f_A f_G Faktörleri (Ohta ve Goto, 1978)

Zemin Tipi Faktörü f_G	İnce Kum	Orta Kum	Kaba Kum	Kum Çakıl	Çakıl
	1.09	1.07	1.14	1.15	1.45
Yaş Faktörü f_A	Halosen		Pleistosen		
	1.0		1.3		

Bu analiz sonucunda araştırmacılar, daha yaşlı zeminlerin benzer şartlarda daha yüksek kayma dalgası hızına sahip olduğunu ve zeminlerdeki hakim dane çapı büyürken diğer değişkenlerin sabit kalması durumunda V_s 'in büyümekte olduğunu gösterdiler. Oysaki Kanai ve Ohta, aynı N değerinde killerin daha büyük V_s sergileyeceğini savunmuşlardı. Ohta ve Goto (1978), ayrıca tüm zemin sınıfı için kayma dalgası hızını SPT-N darbe sayısı ve derinlik cinsinden tanımlayan aşağıdaki ifadeleri vermişlerdir.

$$V_s = 85.3 \cdot N^{0.348} \quad (\text{m/sn}) \quad (6.15)$$

$$V_s = 92 \cdot H^{0.339} \quad (\text{m/sn}) \quad (6.16)$$

Burada H metre birimindedir. İlk bağıntının korelasyon katsayısı %72, diğerinin %67 olarak elde edilmiştir.

Amerika'da V_s korelasyonları ile ilk uğraşan bilim adamı Hamilton (1976), deniz sedimentlerinde V_s 'in derinlik ve basınçla değişimini incelemiştir. Düşük genlikli arazi ölçüm yöntemlerinden Rayleigh ve Aşağı Kuyu ile 12 m derinliğe kadar sağlanan 29 veri ile, H (m) derinlik olmak üzere aşağıda verilen amprik bir bağıntı önermiştir.

$$V_s = 128 \cdot H^{0.28} \quad (\text{m/sn}) \quad (6.17)$$

Yine aynı araştırmacı kayma dalgası hızına efektif düşey gerilmenin etkisini incelemek için kaba kumlar üzerinde laboratuvarında yaptığı deneyler sonucunda,

$$V_s = 257.9 \cdot \sigma_v^{0.31} \quad (\text{m/sn}) \quad (6.18)$$

bağıntısını önermiştir. Burada σ_v kg/cm² biriminde düşey efektif gerilmeyi göstermektedir.

Fumal (1978), SPT-N darbe sayısı, derinlik, zemin tipi, jeolojik yaş, YASS değişkenlerini içeren 59 sahadan Aşağı Kuyu ile tüm zemin grupları için toplanan verilerle V_s korelasyonları üzerinde çalışmalar yapmıştır. Bu çalışmaların sonuçları San Fransisko bölgesinde yapılan mikrobölgeleme çalışmalarında da kullanılmıştır. Fumal çalışmalarında, SPT-N sayısının 40 dan düşük olduğu durumlarda kumları gevşek olarak tanımlamış ve gevşek kumlarda en büyük V_s değerini 250 m/sn, çakıllar için en düşük V_s değerini 360 m/sn almıştır. 38 veri ile yaptığı incelemede V_s ve N arasında çok büyük saçılımların olduğunu görünce, V_s -N korelasyonundan vazgeçerek diğer özellikler arasındaki ilişkiyi araştırmış ve derinlik ile kumlarda aşağıdaki bağıntıyı geliştirmiştir.

$$V_s = 182 \cdot H^{0.20} \quad (\text{m/sn}) \quad (6.19)$$

Campbell ve Duke (1976), 5 yıllık bir periyot içinde yüzey kırılma ve yansıma deneylerinden toplanan 63 veriyi kullanarak yaptıkları çalışmalarda, çakıl oranının kayma dalgası hızına oldukça fazla etkisi olduğunu, çakıl ve kum zeminlerin hız oranının yaklaşık 1.5 olduğunu göstermişler ve derinlik ile kayma dalgası arasında alüvyon zeminler için aşağıdaki bağıntıları geliştirmişlerdir. Bağıntılarda H metre, V_s m/sn birimindedir.

genç alüvyonda

$$V_s = 153.8 \cdot H^{0.386} \quad (\text{m/sn}) \quad (6.20)$$

yaşlı alüvyonda;

$$V_s = 195.4 \cdot H^{0.358} \quad (\text{m/sn}) \quad (6.21)$$

Seed ve Idriss (1981), topladıkları arazi verilerine kendi deneyimlerini de katarak tüm zeminler için, derinliğe göre düzeltilmiş SPT-N sayısı N_1 'e göre aşağıdaki bağıntıyı vermişlerdir.

$$V_s = 61 \cdot N_1^{0.5} \quad (\text{m/sn}) \quad (6.22)$$

Sykora ve Stokoe (1983), arazi korelasyonları üzerinde yaptıkları çalışmalar sonunda kayma dalgası hızının çeşitli zemin özellikleri ile değişimini incelemişlerdir. Çalışmalarda değişken olarak jeolojik yaş, efektif düşey gerilme, SPT-N darbe sayısı, CPT uç mukavemeti q_c alınmış, Karşıt Kuyu ve Aşağı Kuyu yöntemleri ile ölçülen kayma dalgası hızının değişimi incelenmiştir. Araştırmacılar yaptıkları regresyon analizi sonucunda efektif düşey gerilme ile kayma dalgası hızı arasında kohezyonsuz zeminler için aşağıdaki bağıntıyı vermişlerdir.

$$V_s = 219.5 \cdot \sigma_v^{0.36} \quad (\text{m/sn}) \quad (6.23)$$

Bağıntıdaki σ_v , kg/cm^2 biriminde efektif düşey gerilmedir. Efektif gerilmenin sıfır olduğu durumlarda kohezyonsuz zeminler için en düşük dalga hızının 114 m/sn olacağını söyleyen araştırmacılar, zeminlerde jeolojik yaşın artması ile V_s değerinde de artış olacağını gösterdiler. Ayrıca Karşıt Kuyu yöntemiyle ölçülen dalga hızlarının daha yüksek korelasyon katsayısı verdiği savunarak, bu yöntem ile ölçülen kayma dalgası hızının SPT-N darbe sayısı ile ilişkisini incelemişler ve yaptıkları analiz sonucunda;

$$V_s = 100.5 \cdot N^{0.29} \quad (\text{m/sn}) \quad (6.24)$$

korelasyon bağıntısını önermişlerdir. Yeraltı su seviyesi (YASS) üstünde ve altında kum zeminlerde yapılan ölçümlerden sağlanan 229 veri ile yapılan bu analizin korelasyon katsayısı %84 olarak bulunmuştur. Aynı SPT-N değerlerini, Seed ve Idriss (1976) tarafından önerilen düzeltme faktörüne göre düzeltilmiş şekli ile kullanarak, analiz tekrarlanmış ve korelasyon katsayısı %67 olan aşağıdaki bağıntı verilmiştir.

$$V_s = 109.7 \cdot N_1^{0.28} \quad (\text{m/sn}) \quad (6.25)$$

Burada N_1 derinlik düzeltilmesi yapılmış SPT-N sayıdır. Ayrıca kullandıkları veriler ile elde ettikleri en düşük hız değerini aşağıda verilen eşitlik yardımıyla tanımlamışlardır.

$$(V_s)_{\min} = 4N + 114 \quad (\text{m/sn}) \quad (6.26)$$

Bağıntıdan sıfır N sayısında en küçük hız değeri olarak yaklaşık 114 m/sn elde edilmekte, bu ise efektif gerilmenin sıfır olduğu andaki değer ile üst üste düşmektedir.

Sykora ve Stokoe (1983), CPT uç direnci q_c ile kayma dalgası ilişkisini de incelemişlerdir. Kohezyonsuz zeminlerde YASS dikkate alınmadan yapılan deneylerden sağlanan 256 veri ile yapılan lineer ve lineer olmayan regresyon analizi sonucunda aşağıdaki eşitlikleri vermişlerdir.

$$V_s = 1.7 * q_c + 134 \quad (\text{m/sn}) \quad (6.27)$$

$$V_s = 109.7 * q_c^{0.29} \quad (\text{m/sn}) \quad (6.28)$$

Bağıntılardaki q_c , kg/cm^2 biriminde olmak üzere CPT uç direncini göstermektedir. q_c uç mukavemetinin 10 ile 700 kg/cm^2 arasındaki değerlerinin kullanıldığı bu bağıntıların korelasyon katsayıları sırası ile %78 ve %71 bulunmuştur.

Baldi ve diğ. (1989), SPT deneyleri ile Karşıt Kuyu ve Aşağı Kuyu deneylerinden, YASS'nin 1-3 m derinlikte olduğu farklı sahalardan kohezyonsuz zeminlerden sağladıkları veriler ile yaptıkları çalışmalarda Ohta ve Goto (1978) tarafından verilen 6.14 nolu bağıntıyı kullanmışlardır. SPT deney sonuçlarını %60 enerji oranına göre düzelterek bu bağıntının katsayısını, 68.8 yerine 67.9 olarak değiştirmişlerdir.

Lo Presti ve Lai (1989), genelde kum zeminlerde uygulanan sismik ve CPT deney sonuçlarını kullanarak, q_c uç mukavemeti ve efektif düşey gerilmeyi (σ_v) değişken olarak alıp, kayma dalgası hızını içeren, q_c ve σ_v MPa biriminde olmak üzere aşağıdaki bağıntıyı vermişlerdir.

$$V_s = 277 * q_c^{0.13} \sigma_v^{0.27} \quad (\text{m/sn}) \quad (6.29)$$

Sismik dalga hızları ile diğer arazi deney sonuçları arasında çeşitli araştırmacılar tarafından geliştirilmiş korelasyon bağıntıları, genel olarak kayma dalgası ile SPT-N darbe sayısını içermektedir. CPT deneyinin sahip olduğu üstünlüklere rağmen, çakıllı ve çimentolaşmış zeminlerde uygulamasında görülen zorluk ve sonuçlarından direkt olarak zemin sınıfına geçilememesi gibi bazı sınırlayıcı sebeplerden dolayı, bu deney sonuçlarına dayanan korelasyonlar daha az miktardadır. Kayma dalgası hızı V_s ile SPT-N darbe sayısı arasında değişik araştırmacı tarafından geliştirilmiş korelasyon bağıntılarının özeti aşağıda Tablo 6.3'de topluca verilmiştir.

Tablo 6.3. Çeşitli Araştırmacılar Tarafından Verilen V_s -N Korelasyonları

No	Araştırmacı	Zemin Cinsi	Bağıntı V_s (m/sn)
1	Kanai ve diğ. (1966)	Tüm	$19 \cdot N^{0.60}$
2	Sakai (1968)	Kum	$(15-30.5) \cdot N^{0.5}$
3	Shibata (1970)	Kum	$31.7 \cdot N^{0.5}$
4	Imai ve Yoshimura (1966)	Tüm	$76.2 \cdot N^{0.39}$
5	Ohba ve Toriuma (1972)	Tüm	$85.3 \cdot N^{0.31}$
6	Ohta ve diğ. (1972)	Tüm	$87.2 \cdot N^{0.36}$
7	Ohsaki ve Iwasaki (1972)	Tüm	$81.4 \cdot N^{0.39}$
8	Ohsaki ve Iwasaki (1973)	Kum	$59.4 \cdot N^{0.47}$
9	Imai ve Yoshimura (1975)	Tüm	$92 \cdot N^{0.329}$
10	Imai, Fumoto ve Yokota (1975)	Tüm	$89.9 \cdot N^{0.341}$
11	Ohta ve Goto (1978)	Tüm	$85.3 \cdot N^{0.348}$
12	Ohta ve Goto (1978)	Kum	$88.4 \cdot N^{0.34}$
13	Ohta ve Goto (1978)	Çakıl	$94.2 \cdot N^{0.34}$
14	Seed ve Idriss (1982)	Tüm	$56.4 \cdot N^{0.5}$
15	Sykora ve Stokoe (1983)	Kum	$100.5 \cdot N^{0.29}$

Tablodaki V_s m/sn biriminde kayma dalgası hızı, N ise Standart Penetrasyon Deneyi (SPT) darbe sayısını göstermektedir.

6.5. ERZİNCAN'DA UYGULANAN ARAZİ DENEYLERİ

Erzincan arazi çalışmaları kapsamında şehrin belirlenen yerlerinde çeşitli derinliklerde 21 adet sondaj kuyusu açılmış, sondaj kuyuları içinde Standart Penetrasyon Deneyleri (SPT) yapılmıştır. Zemin yapısının ve mukavemet özelliklerinin belirlenmesi amacı ile 26 adet Koni Penetrasyon Deneyi (CPT) ve yaklaşık 250 civarında da Dinamik Sonda (DS) Deneyleri yapılmıştır. Sondajlardan alınan numuneler üzerinde laboratuvar deneyleri yapılarak zemin cinsleri ve mühendislik özellikleri tayin edilmeye çalışılmıştır.

Açılan sondaj kuyularından uygun görülen 10 tanesinin kaplama ve enjeksiyonları tamamlanarak deney yapılabilir duruma getirildikten sonra, dinamik zemin özelliklerinin belirlenmesi için kuyu içi sismik yöntemler uygulanmıştır. Aşağı Kuyu ve Karşıt Kuyu sismik yöntemleri ile ölçülen dalga hızları kullanılarak zemin kesitinde yer alan tabakaların dinamik özellikleri bulunmaya çalışılmış, sismik dalga hızlarının SPT-N darbe sayısı, CPT uç mukavemeti q_c ve dinamik sonda sonuçları arasında bir ilişki kurulmaya çalışılarak çeşitli korelasyon bağıntıları geliştirilmiştir.

Kalın bir alüvyon tabakasından meydana gelmiş havza içinde yer alan Erzincan'da zemin koşulları oldukça değişkenlik göstermektedir. Kuzey Anadolu Fay Hattının şehrin kuzey kesiminden geçmekte ve bölgede çeşitli kollara ayrılmaktadır. Tarihinde bir çok büyük depreme maruz kalan Erzincan bu yüzden sismik riski fazla olan bir bölgedir. Bu bölümde önce bölgede hakim zemin yapısının özellikleri incelenecek daha sonra arazide uygulanan deneyler anlatılacaktır.

6.5.1. Bölgenin Tektoniği ve Yerel Zemin Koşulları

Türkiye'nin Doğu Anadolu Bölgesi'nde yer alan Erzincan, Kuzey Anadolu Fay Hattı üzerinde kurulmuş bir kenttir. Kuzey Anadolu Fay Hattı, kuzey-güney doğrultusunda uzanan Arabistan ve Avrasya plakları arasında sıkışmış Anadolu bloğunun kuzey sınırını teşkil etmektedir. Kuzey Anadolu Fayı Erzincan alanında üç ana bileşene ayrılmakta ve bu hatlar boyunca geçmiş tarihlerde binlerce can kaybına neden olan bir çok tahrip edici deprem yaşanmıştır (Erdik ve diğ., 1992).

Sismik riski oldukça yüksek Erzincan, Fırat Nehri tarafından ve etrafını çevreleyen dağların yamaçlarından erozyonla taşınmış malzemelerin istiflenmesinden oluşan kalın ve homojen olmayan bir alüvyon tabakasının meydana getirdiği bir havzanın kuzey kesiminde yer almaktadır. Havza silt, kum ve çakıl ardalanması ile dolmuş ve bu istifin toplam kalınlığı 0.5 ile 3.5 km arasında tahmin edilmektedir. Zemin kesitinde yer alan farklı kalınlıklarda ince ve kaba daneli tabakalar farklı sondaj kuyularında herhangi bir süreklilik göstermemekte, kesitte ardışık olarak bulunmaktadır (Ülker ve diğ., 1992). Havzanın kuzeyinde yaklaşık 30 m derinlikte bulunan yeraltı su seviyesi, şehir merkezine doğru azalmaktadır. Bölgede yapılan sondajlardan elde edilen zemin kesitine örnekler Şekil 6.2'de verilmiştir. Bu şekillerden de görülebileceği üzere zemin yapısı içinde farklı seviyelerde ve kalınlıklarda zemin kesitinde düşük plastisiteli siltli yer yer kumlu ve çakıllı kil-killi silt (CL/ML), siltli çakıllı kum yada kumlu çakıl (GM/GC, GW-GP, SM/SC, SP/SM) tabakaları yataklanmış durumdadır. Yerel zemin koşullarını belirlemek için yapılan sondajlardan ve çok sayıdaki sondalama deneylerinden, kuzeyde 4-5 m, güneyde ise yaklaşık 15-20 m derinliğinde rastlanan sıkı, kısmen çimentolaşmış, çakıl tabakası bölgenin hakim özelliği olarak görülmektedir. Yapılan bir araştırmada, bu çakıl tabakasının derinliği azaldıkça bölgede yer alan zeminin hakim periyotları azalmakta ve depremin hakim periyodu ile çakışma olasılığının artmakta olduğu ve bu durumun da yapısal hasara etkili olduğu sonucuna varılmıştır (Lav ve Ansal, 1993). Yapılan çalışmalar derinlik boyunca farklılıklar gösteren zemin yapısının aynı seviyelerde yatayda ve birbirine yakın kesimlerde de farklılıklar olduğunu göstermektedir (İyisan ve Ansal, 1993).

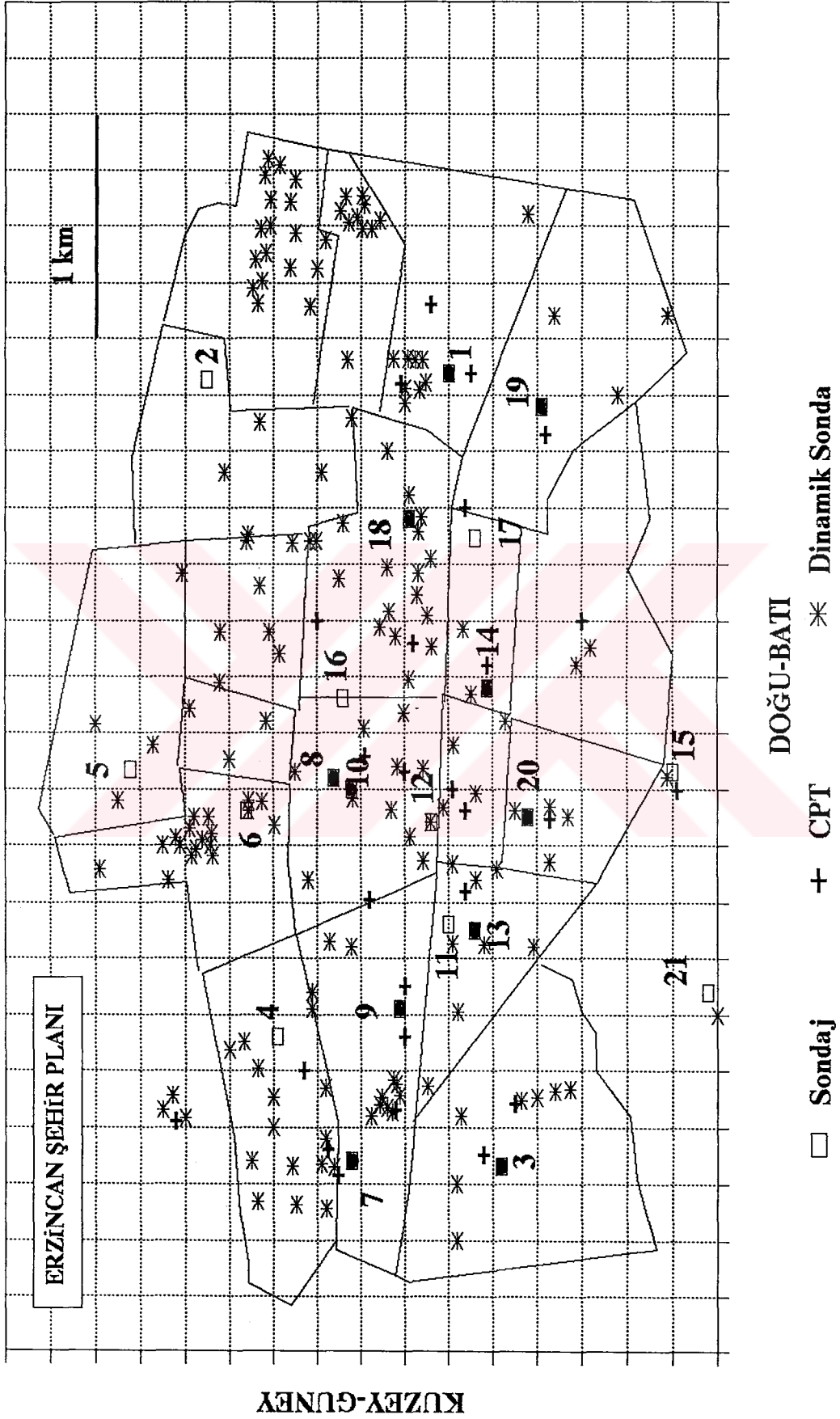
6.5.2. Standart Penetrasyon Deneyleri (SPT)

Geoteknik incelemeler amacıyla açılan sondaj kuyuları içinde kaba daneli zeminlerin yerleşim sıklıkları, ince daneli zeminlerin kıvamını belirlemek ve örselenmiş numune almak için yapılan SPT deneyi sonuçlarına dayanılarak zemin parametreleri pratik olarak bulunabilmektedir. Şekil 6.3'de Erzincan deneyleri yerleşim planında görülen noktalarda açılmış olan sondaj kuyularında SPT deneyleri yapılmıştır. Koyu renkli olarak gösterilen kuyularda ise sismik deneyler yürütülmüştür. Yüzeye yakın kesimlerde ince kumlu silt-kil tabakasında SPT-N darbe sayıları genelde 10-20 arasında elde edilmiştir. Zemin kesitinde 8-12 m derinliklerde

ERZİNCAN Sondaj Tar.: 28/7-14/8/1992				SONDAJ NO: S1 Zemin Kotu : +0.					
	o	m	ZEMİN CİNSİ	SPT Deneyi Darbe Sayısı / 30					
				1	2	3	4	50	
N1	1	SM	siltli killi kum	*					
N2	2	ML		*					
	3	SM		*					
N3	4	CL/		*					
N4	5	ML		*					
U1	6	SM		*					
	7		Çakıllı, Siltli kil						
U2	8	CL/							
	9	ML							
N7	10	SM	killi siltli KUM	*					
N9	11			*					
N10	12	SM		*					
	13	GP	zayıf çimentolu çakıl						
N11	14	SM							> 50
N12	15	GW							
	16								
	17		kumlu silt zayıf çimentol orta sıkı-sıkı kum						
N13	18			*					
N14	19	CL/		*					
N15	20	ML		*					
	21	SC		*					
	22			*					
N16	23			*					
	24			*					
	25		siltli kum						
N17	26								> 50
	27	SP/							
	28	SM							
N18	29		zayıf çimentolu killi çakıl						
	30	SM							
N19	31	SM							> 50
	32	SM							
	33		zayıf çimentolu killi çakıl						
N20	34								> 50
N21	35								
N22	36	SM							> 50
	37		kumlu silt, siltli, çakıllı kum	*					
N23	38	SM		*					> 50
N24	39	SM		*					
	40			*					
N25	41			*					
	42	SW/	killi sıkı kum						
N26	43	SM							
	44								
N27	45	SM	çakıllı, killi silt						
	46								
N28	47	SM							
N29	48								
	49		SONDAJ SON						> 50
N30	50								> 50

ERZİNCAN Sondaj Tar.: 1-16/8/1992				SONDAJ NO: S3 Zemin Kotu : +0					
	o	m	ZEMİN CİNSİ	SPT Deneyi Darbe Sayısı / 30					
				1	2	3	4	50	
N1	1	GM	kumlu silt						*
N2	2	SC	siltli kum-çakıl						> 50
	3	SM	ince kumlu, killi silt	*					
N3	4	SC		*					
U1	5			*					
	6			*					
N5	7		zayıf çimentolu çakıl						
N6	8	CL							
	9								
N7	10	SM	zayıf çimentolu çakıl						> 50
N8	11	SC							> 50
N9	12								
	13								> 50
N10	14								
N11	15	GW							> 50
	16	GM							
N12	17								
	18		çakıllı siltli kil	*					
N13	19	CL		*					
	20			*					
	21			*					
N14	22			*					
U2	23			*					
	24			*					
	25		kumlu siltli kil						
N16	26	SM							
	27	SC							
	28	CL/							
N17	29	ML	zayıf çimentol kum-çakıl						
	30								
	31	SW/							
N18	32	SM							> 50
	33								
	34		zayıf çimentol kum-çakıl						
N19	35								> 50
N20	36	GM							
	37	CL/							
N21	38	ML	kumlu killi silt						
	39								
	40								
N22	41	CL							
	42								
	43	CL/							
N23	44	ML							
	45		kumlu çakıl SONDAJ SON						> 50
N24	46	SM							
	47								
	48								

Şekil 6.2. Erzincan Sondajlarından Elde Edilen Tipik Zemin Kesitleri



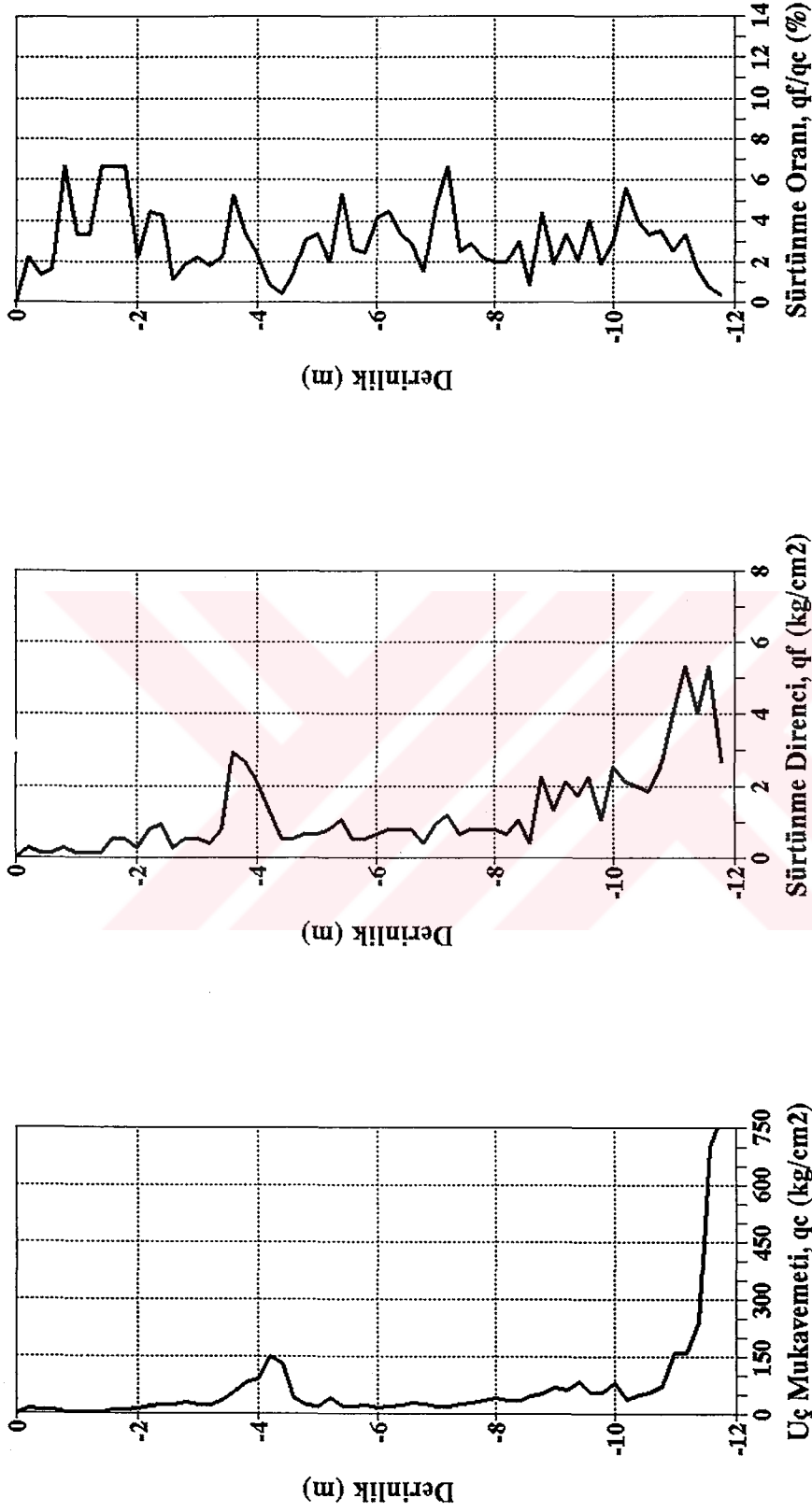
Şekil 6.3. Erzurum Arazi Deneyleri Yerleşim Planı

karşılaşılan sıkı, kısmen çimentolaşmış, konglomeratik çakıl tabakası içinde SPT-N darbe sayıları 50'den büyük bulunmuştur. SPT-N sayısının 50 den büyük olduğu ve deneyin 45 cm penetrasyon sağlanıncaya kadar devam ettirilemediği durumlarda, deneyde elde edilen giriş miktarı ve darbe sayısı gözönüne alınarak N_{30} hesaplanmıştır. Bazı sondaj yerlerinde bu çakıl tabakası daha sıkı derinlikte olduğundan ve bu tabaka SPT ile geçilemediğinden, N değeri daha sınırlı sayıda kalmıştır. Bölgede açılan her sondaj kuyusunda sismik deney yürütülemediği için, ileride görülecek olan N darbe sayısı ile sismik hızlar arasında kurulmaya çalışılan ilişkide tüm SPT verileri bu çalışmada kullanılamamıştır. Kullanılan SPT-N sayıları aynı zamanda kuyu içi sismik deneylerin uygulandığı sondaj kuyularına aittir. SPT-N darbe sayılarının derinlikle değişimi, zemin kesitleri ile birlikte Şekil 6.2'de verilmiştir.

Arazide yapılan SPT sonuçlarına göre yapılan korelasyonlar zemin mühendisliğinde geniş bir kullanım alanı bulmaktadır. Drenajsız kayma mukavemeti, relatif sıkılık, kayma mukavemeti açısı ve kayma dalgası hızı gibi değerlerin hesaplanmasında N sayısına bağlı olarak çıkarılmış çeşitli bağıntılar bulunmaktadır. SPT deneyinin arazide uygulanması sırasında kullanılan tekniklerin farklı olması deney sonuçlarını da etkilemekte ve bu durum farklı yorumlamalara sebep olmaktadır. Bu nedenle, elde edilen SPT-N darbe sayılarının sabit bir enerji oranına veya efektif düşey gerilmeye göre düzeltilmesi uygun görülmektedir. Bu çalışmada SPT deneylerinden elde edilen N sayıları, korelasyonlarda hem düzeltilmemiş hem de derinlik düzeltilmesi yapılmış değerleri ile kullanılmıştır.

6.5.3. Koni Penetrasyon Deneyleri (CPT)

Şekil 6.3'de verilen yerleşim planında görülen noktalarda yapılan CPT deneyi, 10 cm² kesit alana sahip 60 derecelik konik bir başlığın hidrostatik bir basınç ve sabit bir hızla zemin içine itilmesi sureti ile toplam ve uç okumaları alınarak uygulanmıştır. Bu iki değer arasındaki fark çevre sürtünmesine eşit olmakta ve çevre sürtünmesinin uç mukavemetine oranı ise (q_f/q_c) sürtünme oranı olarak tarif edilmektedir. Bölgede yapılan CPT deneylerinin bazıları hem toplam hem de uç okumaları alınarak uygulanmıştır. S1 sondajı yanında yapılan böyle bir deney sonucu uç mukavemeti q_c , sürtünme direnci q_f ve sürtünme oranı q_f/q_c nin derinlikle değişimi Şekil 6.4'de verilmiştir. Bu yüzden korelasyonlarda bu deneyden



Şekil 6.4. S1 Sondaj Kuyusu Yanında Yapılan CPT Deneyi Sonuçları

elde edilen uç mukavemeti q_c kullanılmıştır. CPT deneyinde q_c uç direnci ortalama her 20 cm de bir okuma alınarak bulunmuştur. Yerleşim planında gösterilen noktalarda yapılan CPT deneyleri genelde sıkı yerleşimli ve çimentolaşmış, blok boyutunda malzeme içeren çakıl tabakası içinde son bulmuştur. Bu tabaka içinde q_c uç mukavemeti yaklaşık 700 kg/cm² değerine kadar ulaşmaktadır.

6.5.4. Dinamik Sonda Deneyi (DS)

Dinamik sonda deneyi W ağırlığındaki bir çekici H yüksekliğinden düşürmek sureti ile, D çapında F kesit alanına sahip dik açılı konik bir ucu (sondayı) zemine dinamik olarak çakmak suretiyle uygulanmaktadır. Kullanılan ağırlık, düşme yüksekliği ve konik ucun boyutlarına göre hafif, orta ve ağır olmak üzere çeşitleri bulunmaktadır. Hafif sonda deneyi genelde 8 m derinliğe kadar kullanılmaktadır. Daha derin sondalama için, yaklaşık 25 m derinliğe kadar veya zemin mukavemetinin yüksek olduğu durumlarda ağır sonda tercih edilmektedir.

Dinamik Sonda deneyi, arazi incelemelerinde zemin tabakalarının yerleşim sıklıklarını, sağlam tabaka derinliğini ve bu tabakaların penetrasyon dirençlerini belirlemek için zemin sondajları ve diğer arazi deneylerinin yanında kolayca uygulanabilen bir arazi penetrasyon deneyidir. Bu penetrasyon deneyi, standart ölçülere sahip konik bir başlığın zemine 10 cm girmesi için gerekli darbe sayısının veya 10 darbe için sağlanan giriş miktarının bulunması şeklinde yapılmaktadır.

Dinamik Sonda deneyinde ucun zemine çakılması, ağırlığın dakikada 15-30 defa kesintisiz olarak düşürülmesi ile sağlanmaktadır. Çekiç düşürme frekansı sadece kum ve çakıl gibi permeabilitesi yüksek olan zeminlerde çok fazla etkili olmamasına karşılık, diğer zeminlerde sonuçları etkilemektedir. Bu yüzden düşük permeabiliteli kohezyonsuz zeminlerde çekiç düşürme frekansı dakikada 60 düşüşe kadar çıkarılabilmektedir. Deneyde kullanılan ağırlık zeminin cinsine ve mukavemet özelliklerine bağlı olarak değişik olabilmektedir. Bu deney ile ilgili kullanılan ağırlık, düşürme yüksekliği ve standart uç özellikleri Tablo 6.4'de verilmiştir (DIN 4094).

Tablo 6.4. Dinamik Sonda Deney Çeşitleri

Açıklama		Ağırlık W (kg)	Düşüş Yüks. H (cm)	Konik Çapı D (cm)	Kesit Alan F (cm ²)
Hafif Sonda	LRS-5	10	50	2.52	5
	LRS-10	10	50	3.56	10
Orta Sonda	MRS-A	30	20	3.56	10
	MRS-B	30	50	3.56	10
Ağır Sonda	SRS-10	50	50	3.56	10
	SRS-15	50	50	4.37	15

Genel olarak dinamik sonda sonuçları, kullanılan çekicinin kütlesinin artması ve konik uç çapının azalması ile daha düşük değerler vermektedir. Konik uçta ve çubuklardaki direnci içeren penetrasyon direnci zeminin mekanik mukavemeti ve deformasyon özelliklerine bağlıdır. Ayrıca zemin yapısı, dane dağılımı, dane şekli ve pürüzlülük de uç direncini belirleyen etkenlerdir. Zeminin sıklığı ile bu direnç doğrusal olarak artmaktadır. Düzgün danelere sahip zeminlere oranla, pürüzlü, sivri, köşeli dane yapısına sahip olanlar daha yüksek mukavemet gösterirler. Aynı penetrasyon direncinin elde edilmesi, zemin cinslerinin aynı olduğu veya kohezyonsuz zeminler için aynı yerleşim sıklığına sahip anlamına gelmez. Penetrasyon direncinden sıklık hesaplanmasında zeminin dane dağılımı etken olmaktadır. Bu etki, incelenen zeminin ortalama dane çapının yaklaşık konik ucun çapı ile aynı veya daha büyük olması durumunda daha açık görülebilir. Kohezyonlu zeminlerin sonda direnci plastisite ve yapısı ile belirlenir ve jeolojik geçmişi ile ilgilidir. Bu yüzden bu tür zeminlerde sonda deney sonuçlarını, sondaj logları ve diğer bilgilerle beraber kullanmak ve yorumlamak daha doğru bir yol olmaktadır. Dinamik sonda deney sonuçlarına derinlik ve buna bağlı olarak düşey gerilme de etki etmektedir. Belli bir kritik derinliğe kadar verilen bir yerleşim sıklığında penetrasyon direnci derinlik ile belirgin şekilde artarken, bu derinliğin altında direnç sabit kalmakta veya daha az bir hızla artmaktadır. Kritik derinlik zeminin yerleşim sıklığı ve konik ucun çapına bağlıdır. Bu değerler artarken kritik derinlik de artmaktadır. İncelenen zeminin etkisinde kaldığı düşey gerilme veya herhangi bir sebepten oluşan ek

gerilmeler penetrasyon dirençlerini arttırabilir. Kohezyonsuz zeminlerde özellikle ince ve orta kumlarda diğer tüm koşullar aynı kalmak şartı ile yeraltı su seviyesi altında daha düşük değerler elde edilmektedir (DIN 4094).

Zemin kesitinde yer alan tabakalarının yerleşim sıklığını, kıvamını ve sağlam tabaka derinliğini belirlemek amacıyla Erzincan şehir merkezinde, CPT ve SPT deneylerine ek olarak yaklaşık 250 adet dinamik sonda deneyi yapılmıştır. Deneylerin tümünde LRS-10 tipi motorize hafif sonda deney aleti kullanılmıştır. Zemin koşullarının çok değişken olması ve zemin kesitinde kaba daneli zeminin bulunması, dane çaplarının bazı kesimlerde blok boyutuna ulaşması nedeni ile dinamik sonda penetrasyon derinlikleri de oldukça değişkendir. Dinamik sonda deneylerinde çakma derinlikleri, CPT ve SPT ile de geçilmekte zorluk görülen kısmen çimentolaşmış, sıkı yerleşimdeki çakıl tabakası derinliğine bağlı olarak 3-18 m arasındadır ve sonda deneyleri bu tabaka içinde sona ermektedir. S1, S7 ve S9 sondaj kuyularının yakınlarında, 10 cm giriş için gerekli darbe sayısının bulunması şeklinde yapılan Dinamik Sonda Deney sonuçları Şekil 6.5'de verilmiştir. Ayrıca aynı sondaj kuyularında yapılan SPT deneylerinden elde edilen N darbe sayıları ile Dinamik Sonda darbe sayıları N_{10} 'un derinlikle değişimi birlikte Şekil 6.6'da verilmiştir.

6.5.5. Arazi Sismik Deneyleri

Zeminlerin dinamik özelliklerinin arazi deneyleri yardımı ile belirlemek amacıyla kuyu içi sismik yöntemler uygulanmıştır. Bunun için çeşitli yerleşim alanlarında açılan sondajlardan açılan, bölgenin genel özelliklerini yansıtacak şekilde seçilen 10 tanesi sismik deneyler için hazırlanmıştır. Kuyular 70 mm çapındaki PVC borularla kaplanmış, kaplama ile zemin arası boşluklar zayıf çimento şerbetiyle doldurularak kuyu içi sismik deneyleri uygulanmış, kayma (S) ve basınç (P) dalga hızı ölçümleri yapılmıştır. Deneylerde 4. bölümde verilen sistemler kullanılmıştır. Ölçümlerde genelde Aşağı Kuyu yöntemi uygulanmıştır. Yerleşim planında görülen ve sismik deneylerin yürütüldüğü sondaj kuyuları, ölçüm derinlikleri ile birlikte Tablo 6.5'de verilmiştir.

Bu tabloda görülen sondaj ve ölçüm derinlikleri arasındaki farklılık, sondaj sonuna kadar PVC kaplama borusunun indirilememesi, istiflenmiş

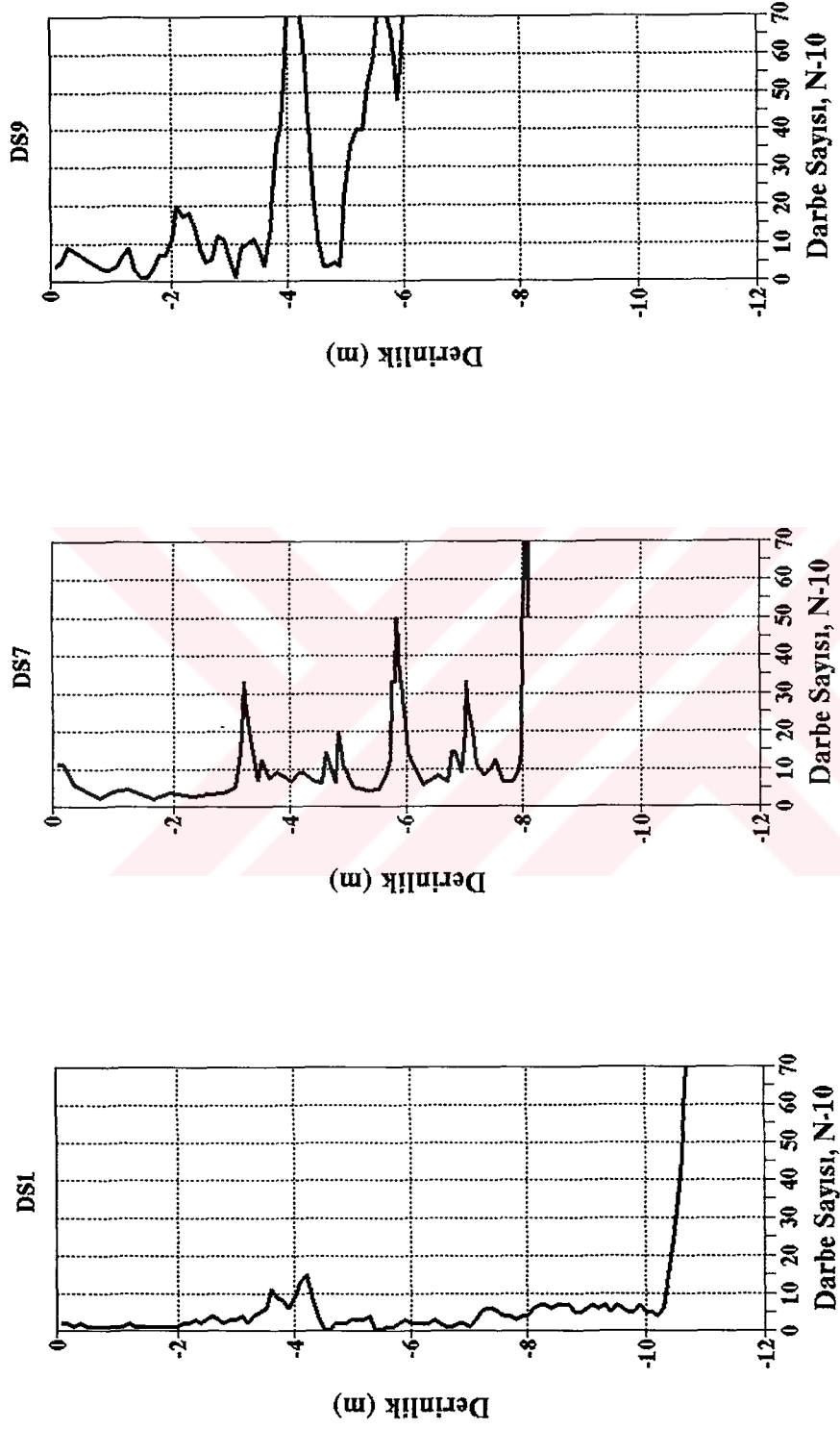
gerilmeler penetrasyon dirençlerini arttırabilir. Kohezyonsuz zeminlerde özellikle ince ve orta kumlarda diğer tüm koşullar aynı kalmak şartı ile yeraltı su seviyesi altında daha düşük değerler elde edilmektedir (DIN 4094).

Zemin kesitinde yer alan tabakalarının yerleşim sıklığını, kıvamını ve sağlam tabaka derinliğini belirlemek amacıyla Erzincan şehir merkezinde, CPT ve SPT deneylerine ek olarak yaklaşık 250 adet dinamik sonda deneyi yapılmıştır. Deneylerin tümünde LRS-10 tipi motorize hafif sonda deney aleti kullanılmıştır. Zemin koşullarının çok değişken olması ve zemin kesitinde kaba daneli zeminin bulunması, dane çaplarının bazı kesimlerde blok boyutuna ulaşması nedeni ile dinamik sonda penetrasyon derinlikleri de oldukça değişkendir. Dinamik sonda deneylerinde çakma derinlikleri, CPT ve SPT ile de geçilmekte zorluk görülen kısmen çimentolaşmış, sıkı yerleşimdeki çakıl tabakası derinliğine bağlı olarak 3-18 m arasındadır ve sonda deneyleri bu tabaka içinde sona ermektedir. S1, S7 ve S9 sondaj kuyularının yakınlarında, 10 cm giriş için gerekli darbe sayısının bulunması şeklinde yapılan Dinamik Sonda Deney sonuçları Şekil 6.5'de verilmiştir. Ayrıca aynı sondaj kuyularında yapılan SPT deneylerinden elde edilen N darbe sayıları ile Dinamik Sonda darbe sayıları N_{10} 'un derinlikle değişimi birlikte Şekil 6.6'da verilmiştir.

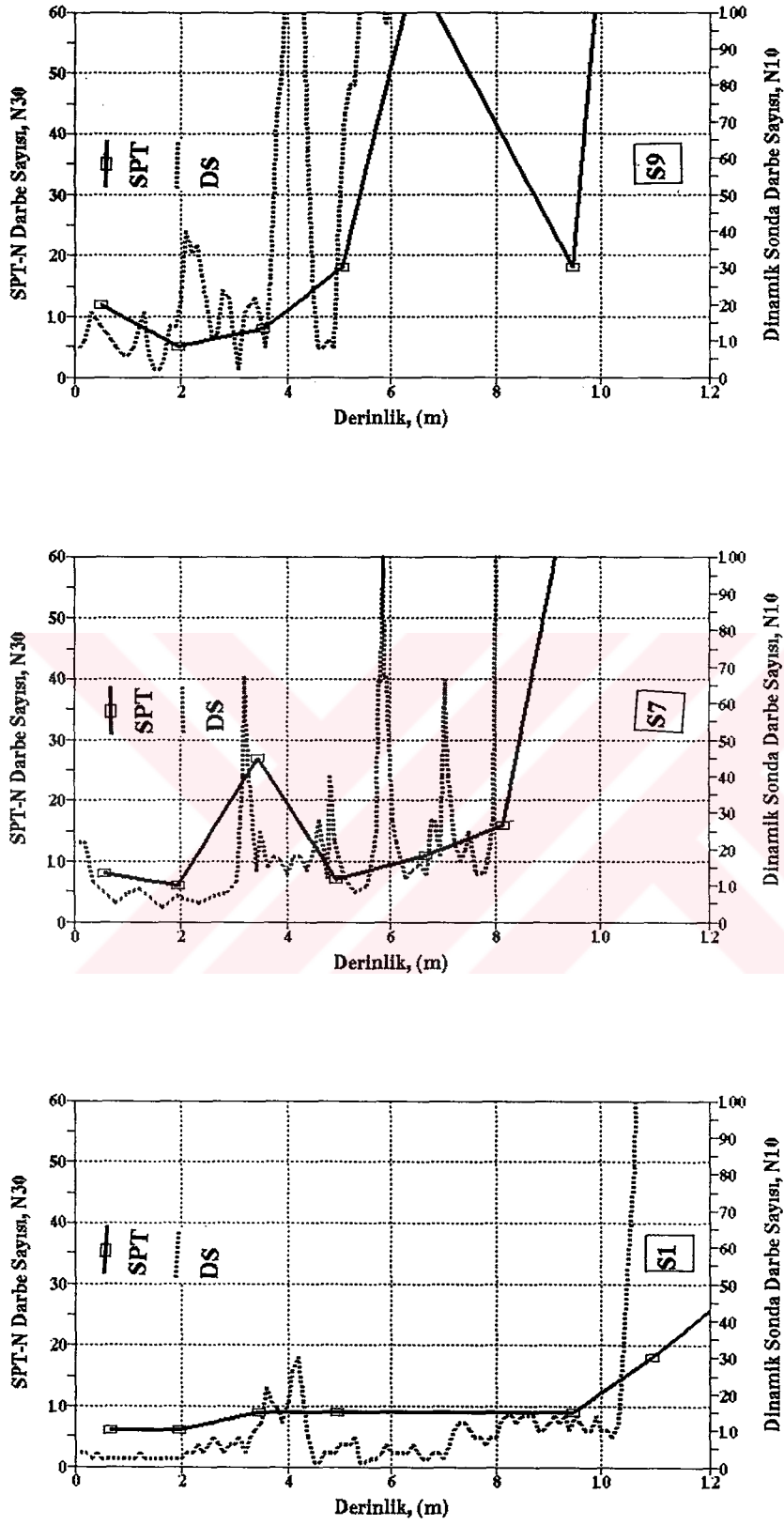
6.5.5. Arazi Sismik Deneyleri

Zeminlerin dinamik özelliklerinin arazi deneyleri yardımı ile belirlemek amacıyla kuyu içi sismik yöntemler uygulanmıştır. Bunun için çeşitli yerleşim alanlarında açılan sondajlardan açılan, bölgenin genel özelliklerini yansıtabilecek şekilde seçilen 10 tanesi sismik deneyler için hazırlanmıştır. Kuyular 70 mm çapındaki PVC borularla kaplanmış, kaplama ile zemin arası boşluklar zayıf çimento şerbetiyle doldurularak kuyu içi sismik deneyleri uygulanmış, kayma (S) ve basınç (P) dalga hızı ölçümleri yapılmıştır. Deneylerde 4. bölümde verilen sistemler kullanılmıştır. Ölçümler genelde Aşağı Kuyu yöntemi uygulanmıştır. Yerleşim planında görülen ve sismik deneylerin yürütüldüğü sondaj kuyuları, ölçüm derinlikleri ile birlikte Tablo 6.5'de verilmiştir.

Bu tabloda görülen sondaj ve ölçüm derinlikleri arasındaki farklılık, sondaj sonuna kadar PVC kaplama borusunun indirilememesi, istiflenmiş



Şekil 6.5. S1, S7 ve S9 Sondajı Yanında Yapılmış Dinamik Sonda Deney Sonuçları



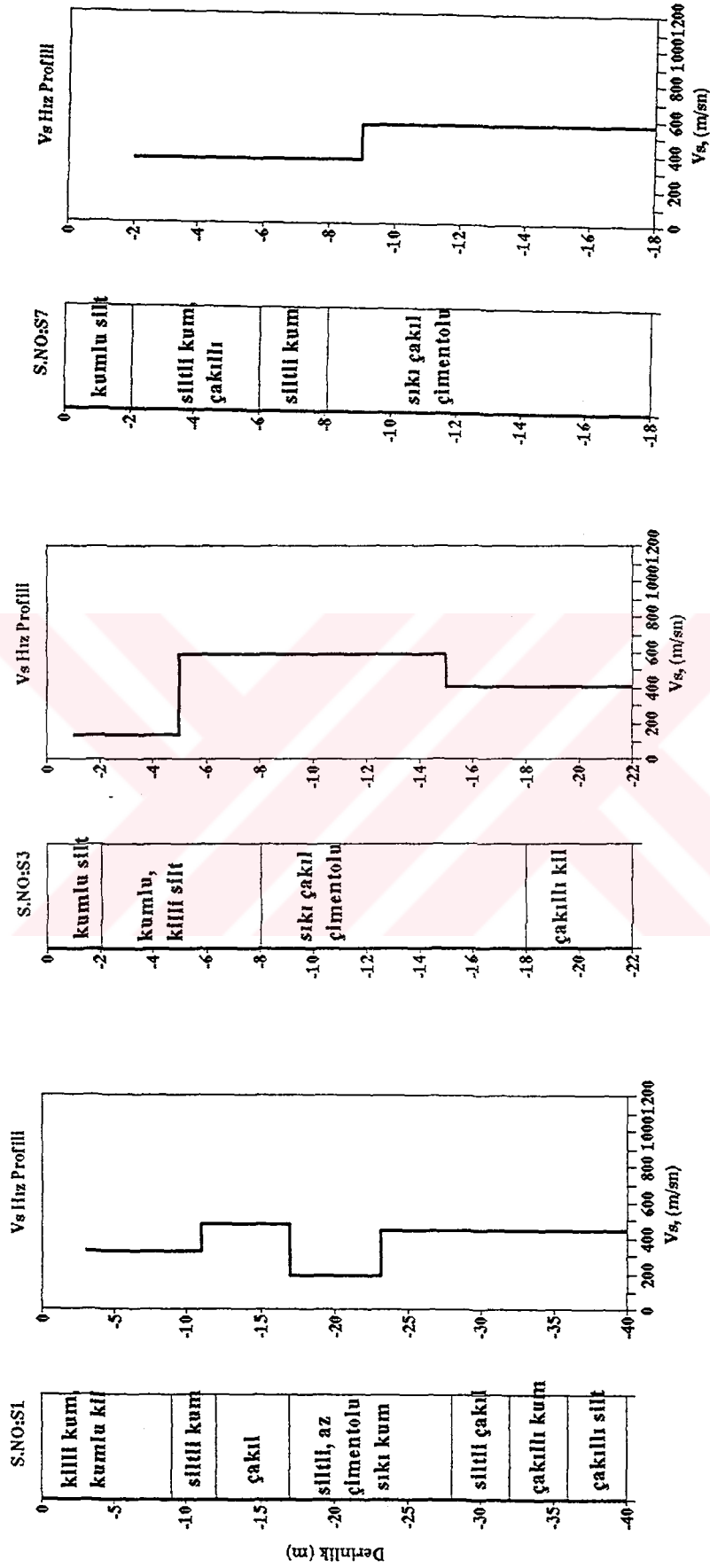
Şekil 6.6. Dinamik Sonda ve SPT Deneyi Darbe Sayılarının Derinlik ile Değişimi

durumdaki zeminin sondaj kaplama borusunun çekilmesi sırasında kuyu duvarlarında oluşan göçme gibi çeşitli nedenlerle kaplamadan sonra kuyu dibinin dolmasından kaynaklanmaktadır.

Tablo 6.5. Erzincan Sismik Deney Kuyuları

Sondaj No	Sondaj Der. (m)	Ölçüm Der. (m)	Sondaj Yeri
S1	50.45	37.00	Fatih Mah.
S3	47.50	21.00	Mimar Sinan Mah.
S7	17.00	16.50	Yavuz Selim Mah.
S8	20.00	17.00	İnönü Mah.
S9	15.30	13.00	Bahçelievler Mah.
S13	20.00	18.00	Halitpaşa Mah.
S14	20.00	12.00	Karaagaç M. (Devlet H.)
S18	14.50	13.00	Atatürk Mah.
S19	21.00	19.00	İzzetpaşa Mah.
S20	21.30	20.00	Hocabey Mah.

Deneylerde alıcı olarak tabii frekansı 28 Hz olan üç bileşeli (1 düşey, 2 yatay) kuyu içi jeofonları kullanılmış ve kayıtlar 12 kanallı, analog sismograf ile güneş ışığına hassas yüzeyli kağıt üzerine alınmıştır. Aşağı Kuyu yönteminde P-dalgası üretmek için zemin yüzeyine yerleştirilen bir plaka üzerine düşey yönde darbe, S-dalgası için ise aynı plakanın dikey olarak zemine gömülü haline her iki taraftan yatay darbe uygulanmış ve bu deneylerde ölçüm aralıkları 1-3 m alınmıştır. Karşıt Kuyu deneyinde ise dalga üretimi Bölüm 4, Şekil 4.6'da gösterilen iki eğik yüzeyli kütle kullanılarak sağlanmıştır. Yapılan ölçümlerden elde edilen kayıtların yorumlanması ile sismik dalga hızları belirlenmiştir. S1, S3 ve S7 sondaj kuyularında yapılan ölçüm sonucu bulunan kayma dalgası hızlarının, zemin tabakaları içinde değişimi Şekil 6.7'de verilmiştir. Yapılan ölçümlerden elde edilen sonuçlar ile ilgili bilgiler aşağıda özetlenmiştir.



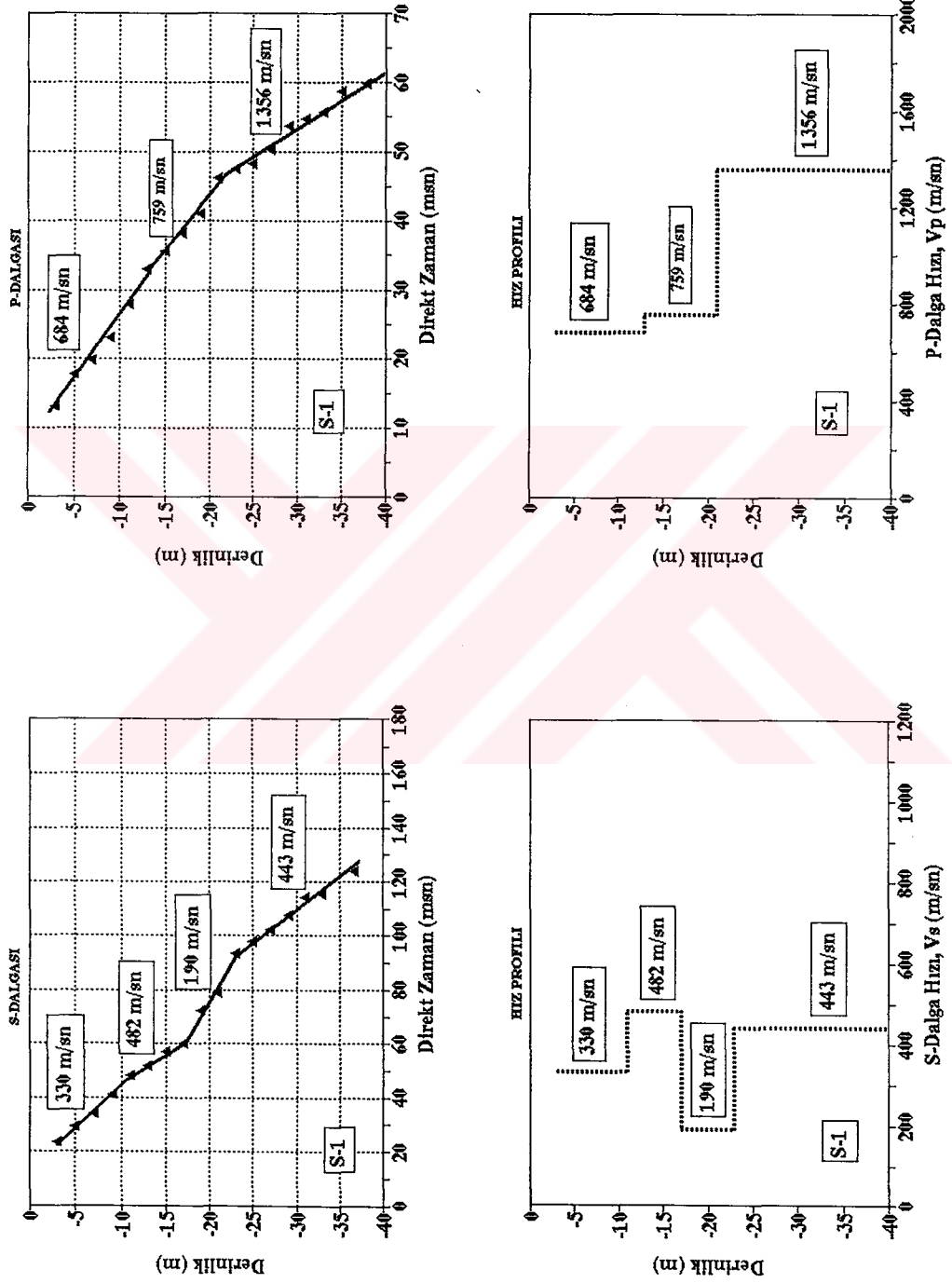
Şekil 6.7. S1, S3 ve S7 Kuyularında Ölçülen Kayma Dalgası Hızının Değişimi

S1 Sondajı

Erzincan şehir merkezine çok yakın olan Fatih Mahallesi, Meslek Yüksek Okulu bahçesinde yaklaşık 50 m derinliğinde açılan S1 sondajında yaklaşık 37 m derinliğe kadar Aşağı Kuyu yöntemi uygulanarak S ve P-dalga hız ölçümleri yapılmıştır. Üstteki dolgu tabakası nedeni ile bu kuyuda ölçümlere 3 m derinlikten başlanmış ve ölçüm aralıkları 2 m alınmıştır. Alınan kayıtların analizi sonucunda elde edilen derinlik-direkt zaman grafiği ve derinlikle hız değişimleri Şekil 6.8'de verilmiştir. Zemin kesitinde 6 m derinliğe kadar dolgu ve siltli, kil bantlı kum (SM) ile killi silt (ML), 6-12 m derinlikleri arasında ince çakıllı siltli kil (CL) tabakası ve siltli kum tabakası yer almaktadır. Bu tabakalardan alınan numuneler üzerinde yapılan laboratuvar deney sonuçlarından ince daneli malzeme oranının (silt+kil) %28-74 arasında değiştiği tespit edilmiştir. Zemin kesitinde bulunan bu tabakalar içinde kayma dalgası hızı V_s , 330 m/sn olarak ölçülmüştür. Tabakaların değişmesine rağmen hızın sabit kaldığı derinlik boyunca SPT-N sayıları ise ortalama 10 civarındadır. Bu tabaka altında yer yer bloklu kısmen çimentolaşmış konglomeratik çakıl (GW/GP) tabakası yer almaktadır. 17 m ye kadar devam eden bu tabaka içinde N sayıları bazı kesimlerde 50 den büyük değerler almaktadır. Sıkı yerleşime sahip olduğu anlaşılan tabaka içinde kayma dalgası hızı 482 m/sn bulunmuştur. Hız profiline göre 17-23 m arasında V_s , 190 m/sn olan bir tabaka yer almaktadır. Sondajdan çıkarılan zemin kesitinde ise tabaka, çimentolaşmış çakıl tabakası üzerinde yer alan kumlu silt olarak görülmektedir. Bu seviyeden sonra kesitte bulunan tabakalar için V_s , 443 m/sn de sabit kalmaktadır. Burada N darbe sayıları 50 nin üzerindedir. Bu kuyuda 37 m den sonra, kuyu dibinin dolması nedeni ile ölçüm yapılamamıştır. P-dalga hızı ölçümlerinden yukarıda anlatılan derinliklerde V_p , sırasıile 684, 759 ve 1350 m/sn arasında değiştiği bulunmuştur.

S3 Sondajı

Şehir planına göre, şehrin güney batı kesimindeki Mimar Sinan Mahallesi'nde açılmış S3 sondaj kuyusu 47.50 m derinliktedir. Kuyu içine yapılan kaplamanın ekseninden sapması nedeni ile sismik ölçümler 2 m aralıklarla 21 m derinliğe kadar yapılabilmektedir. Zemin kesitinde 2 m kalınlığında kumlu silt ve siltli çakıl (GM), daha altta 8 m ye kadar devam eden siltli, killi kum (SM/SC) tabakaları yer almaktadır. SPT-N darbe sayıları 20 civarındadır. Bu seviyeden sonra bölgenin karakteristik özelliği



Şekil 6.8. S1 Sondajı Aşağı Kuyu Sismik Deney Sonuçları

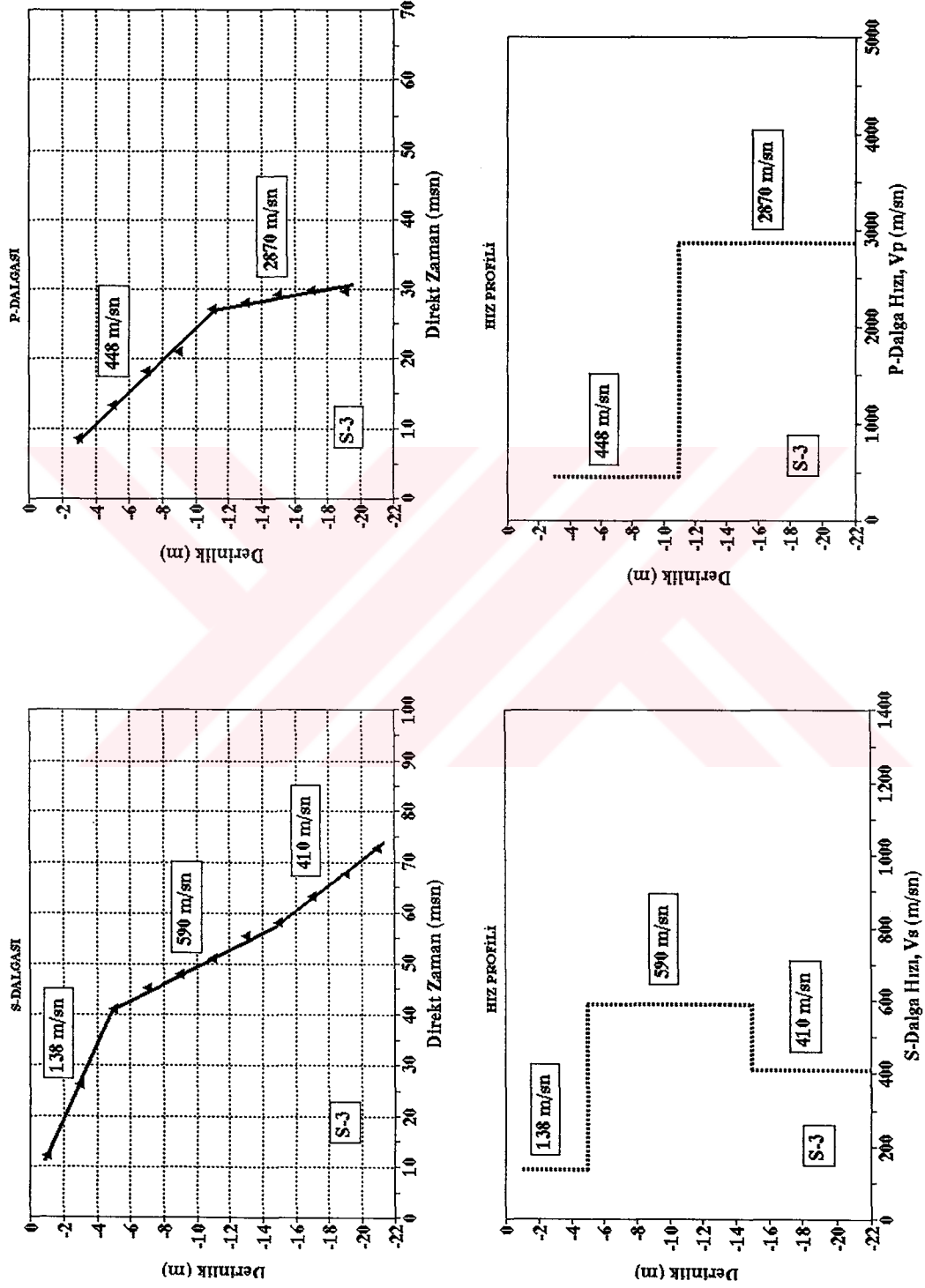
olan, yer yer zayıf çimentolaşmış sıkı çakıl (GW/GP) tabakası başlamakta ve 18 m derinliğe kadar devam etmektedir. SPT-N darbe sayılarının 50 den büyük olduğu bu tabakadan sonra çakıllı, siltli kil (CL) tabakası yer almaktadır. Bu zemin cinslerinin bulunduğu S3 sondaj kuyusunda yapılan S ve P-dalga hızı ölçüm sonuçları ve hız profilleri Şekil 6.9'da verilmiştir. Şekillerden de izlenebileceği üzere elde edilen hız profilinde kayma dalgası hızları ilk 5 m içinde 138 m/sn, 5-15 m arasında 590 m/sn ve bu derinlikten sonra 410 m/sn olarak bulunmuştur. P-dalgası hızları ise yaklaşık 10 m ye kadar 448 m/sn daha aşağıda ise 2870 m/sn hesaplanmıştır.

S7 Sondajı

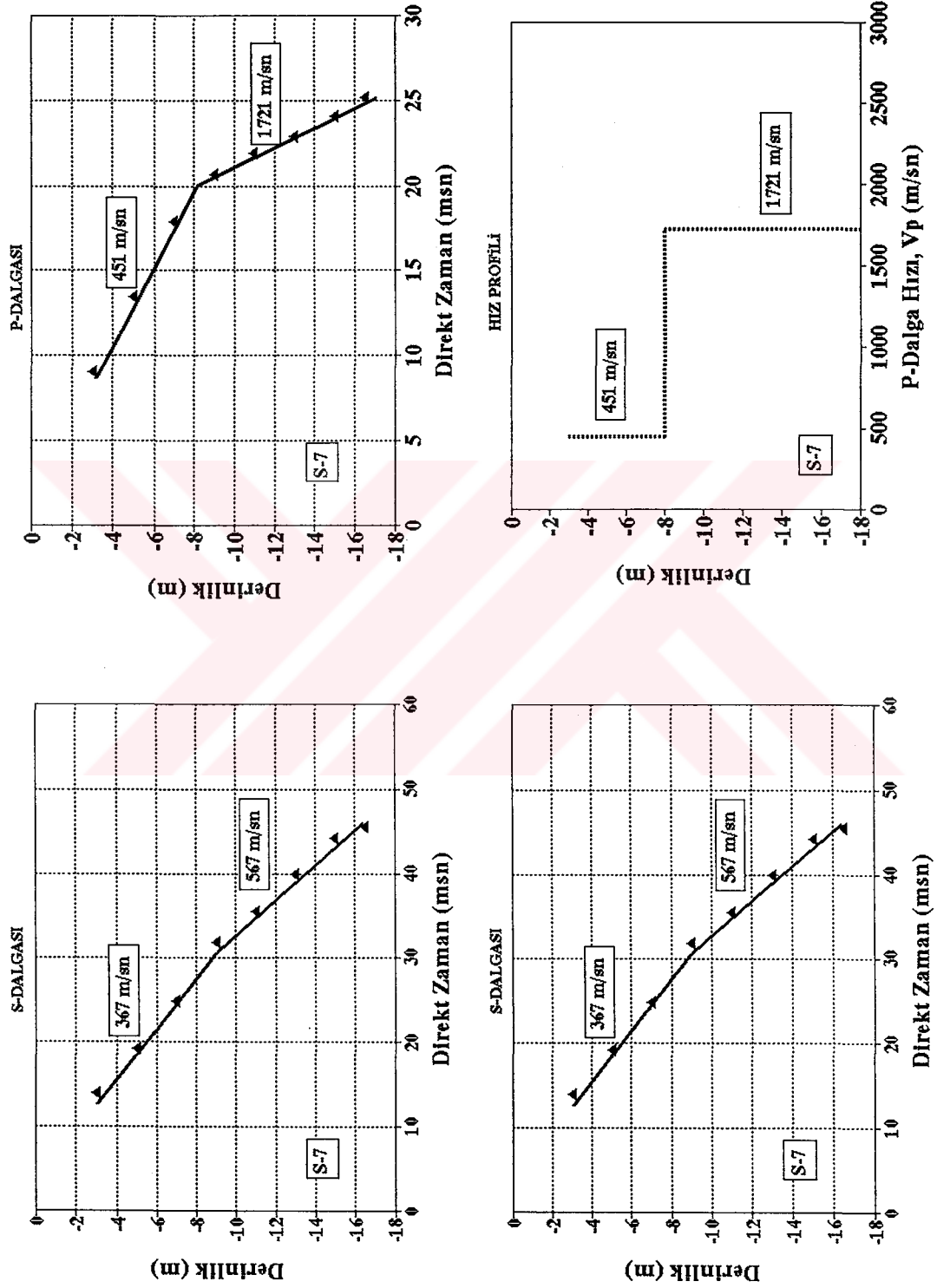
Şehir merkezinin batısında bulunan yerleşim alanında açılan S7 sondaj kuyu 17.0 m derinliktedir. Bu yerleşim sahasında bulunan kooperatif binalarında deprem sonrası çeşitli derecelerde hasar meydana gelmiştir. Birbirlerine çok yakın olan çeşitli kooperatif yapılarında az, orta ve kullanılamayacak derecede ağır hasar meydana gelmiş olması, yerel zemin koşullarının etkisini göstermektedir. Açılan sondajdan zemin kesitinde üstte N sayılarının ortalama 10 olduğu siltli kil (CL) tabakasının bulunduğu anlaşılmaktadır. Laboratuvar deneylerinden bu tabakada likit limit %38, plastik limit %19 bulunmuştur. 2-6 m derinlikleri arası kum bantlı, siltli çakıl (GM; GP) serisi geçilmektedir ve N sayıları 30'a yaklaşmaktadır. 6-8 metrelerde ince çakıllı, siltli kum (SM/SC), daha aşağıda ise $N > 50$ olduğu sıkı çakıl tabakasına girilmektedir. İnce malzeme oranı %2-49 arasında değişmektedir. Aynı bölgede açılan diğer bir sondaj kuyusunda ise bu sıkı çakıl tabakası ile 4 m derinlikte karşılaşmış ve N darbe sayıları 5 m den sonra bulunamamıştır. Birbirine yakın iki sondajda böyle farklı durumun ortaya çıkması, zemin şartlarının oldukça değişkenliğine işaret etmektedir. Bu sondaj kuyusunda 2 m aralıklarla yaklaşık 16 m derinliğe kadar yapılan P ve S-dalgası ölçüm sonuçları Şekil 6.10'da verilmiştir. Bu bölgede hız profilinde başlıca iki tabakalaşma göze çarpmaktadır. Kayma dalgası hızları 8 m derinlik içinde 367 m/sn, daha sonra 567 m/sn olarak bulunmuştur. Aynı seviyelerde P-dalgası hızları ise sırasıyla 451 m/sn ve 1721 m/sn olarak ölçülmüştür.

S8-S10 Sondajları

Şehir merkezinde, 1992 deprem kayıtlarının alındığı Meteoroloji binasının hemen yakınında bulunan Ziya Gökalp İlkokulu bahçesinde yaklaşık 10 m



Şekil 6.9. S3 Sondajı Aşağı Kuyu Sismik Deney Sonuçları



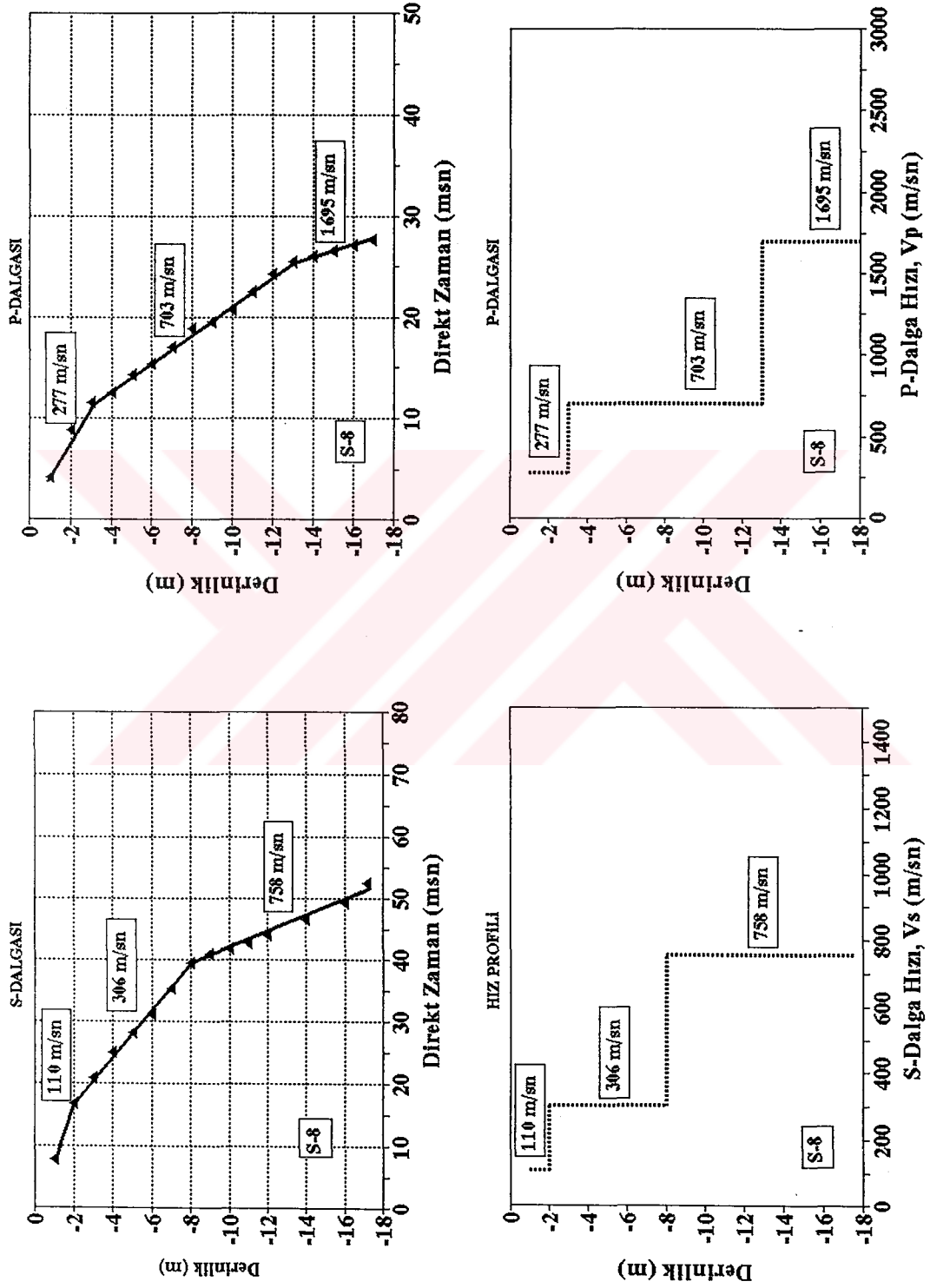
Şekil 6.10. S7 Sondajı Aşağı Kuyu Sismik Deney Sonuçları

mesafede, 20 m ve 17.0 m derinlikte iki adet sondaj yapılmış ve kuyular kaplanmıştır. Birbirine böylesine yakın iki kuyu arasında gerek N sayıları gerekse zemin istiflenmesi açısından farklılıklar sergilenmektedir. S8 sondajında ilk 2 m de kumlu, çakıllı silt (ML) yer almaktadır. N sayısının 10 olduğu bu tabakada Bu kuyuda Aşağı Kuyu ile yürütülen S ve P-dalga hızları ölçümlerine ait zaman-derinlik grafikleri ve hız profilleri Şekil 6.11'de verilmiştir. Bu ölçümlerden yukarıdaki tabaka için kayma dalgası hızı V_s , 110 m/sn bulunmuştur. 2-8 m arasında kumlu, siltli çakıl ve kumlu silt ardalanması mevcuttur. Bu derinlikte S8 sondajında N sayıları 50'nin üzerinde iken, S10 sondajında ortalama 15 dolayındadır. Bu tabakalar içinde kayma dalga hızı 306 m/sn ölçülmüştür. 8. metreden sonra diğer kuyularda olduğu gibi sıkı çakıl tabakasına girilmiş burada V_s , 750 m/sn ölçülmüştür. Yapılan ölçümlerden P-dalga hızı için üst seviyelerde 277 m/sn daha aşağı tabakalarda ise 703 m/sn değerleri elde edilmiştir.

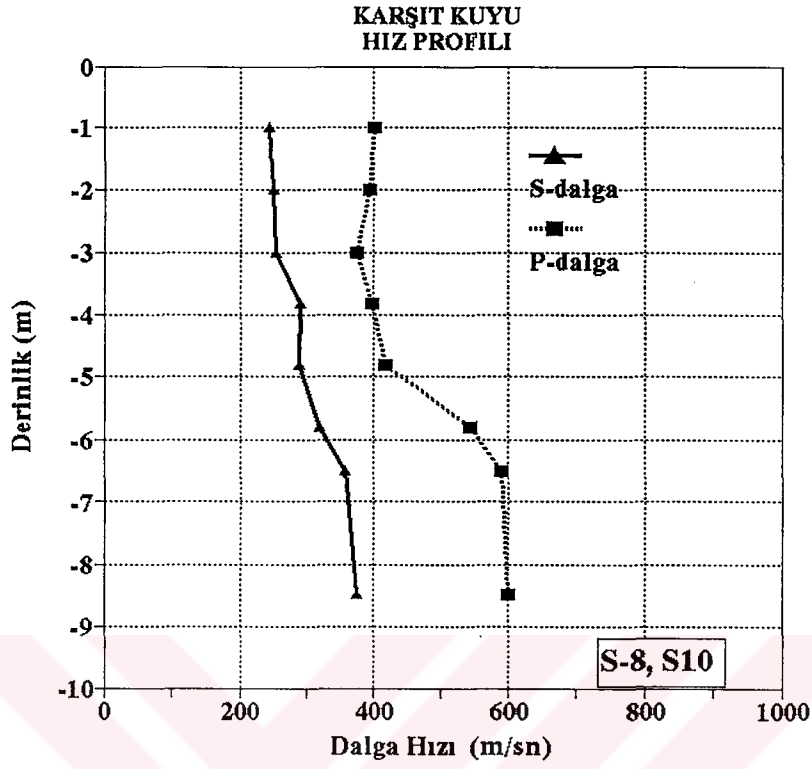
S8 ve S10 kuyuları arasında ayrıca Karşıt Kuyu deneyi uygulanmıştır. Kuyu içinde S-dalgası üretmek için eğik yüzeyli iki kütle kullanılmıştır. Bu kaynak hakkında daha geniş bilgiler önceki bölümde verilmiştir. Karşıt Kuyu tekniği ile ölçülen S ve P-dalga hızlarının derinlikle değişimi Şekil 6.12'de görülmektedir. Burada ilk 3 m içinde kayma dalgası hızı ortalama 225 m/sn, 3-6 m arasında 250 m/sn ve daha alt seviyelerde 350 m/sn mertebesinde ölçülmüştür. P-dalgası ölçümlerinden ise ortalama 400 ve 600 m/sn lik hızlar bulunmuştur. Aşağı Kuyu ve Karşıt Kuyu yöntemi ile bulunan kayma dalgası hızları karşılaştırma kolaylığı açısından Şekil 6.13'de verilmiştir. Her iki yöntemle bulunan hız değerleri mertebe olarak birbirlerine yakındır, ancak Karşıt Kuyu sonuçları daha fazla detay içermektedir.

S9 Sondajı

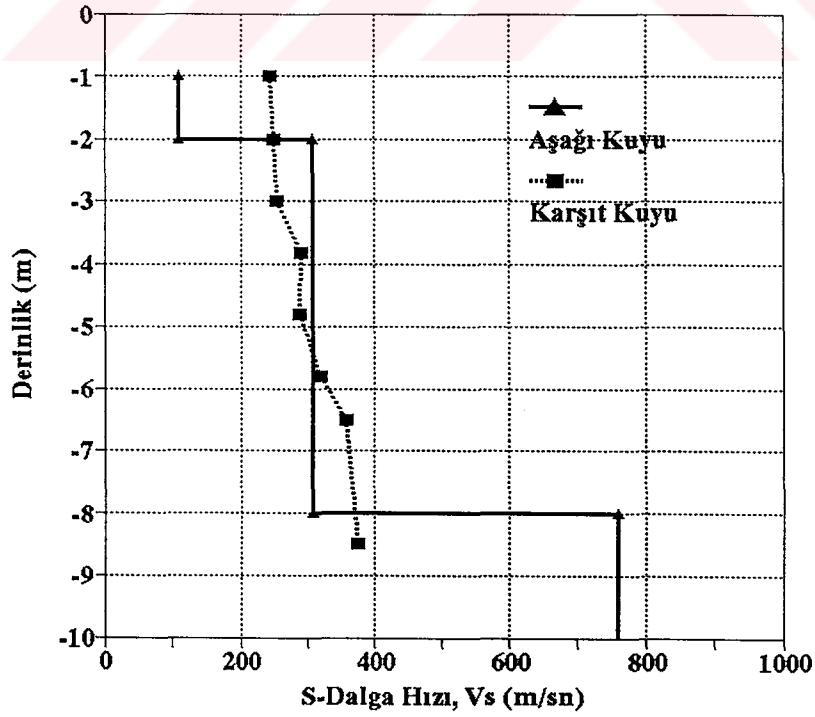
S9 sondajı Bahçelievler Mahallesi'nde 15.30 m derinlikte açılmış ve burada 13 m ölçüm yapılabilmektedir. Bu sondaj kuyusunda da ince ve kaba daneli zeminler derinlik boyunca ardalanmalı olarak kesitte yer almaktadır. 5 m derinliğe kadar çakıl bantlı, kumlu silt tabakası içinde N değerleri oldukça değişken değerler almaktadır. N sayıları üst kesimlerde 10-20 arasında iken, aynı tabakanın alt seviyelerinde 50 den büyük değerler almaktadır. Bu tabaka içinde S-dalga hızı 108 m/sn, P-dalga hızı ise 425 m/sn olarak ölçülmüştür. 5 m derinlikten sonra girilen siltli kum-çakıl tabakası 9 m ye



Şekil 6.11. S8 Sondajı Aşağı Kuyu Sismik Deney Sonuçları



Şekil 6.12. Karşıt Kuyu Deney Sonucu (S-8, S10)



Şekil 6.13. Karşıt Kuyu ve Aşağı Kuyu Hız Profili

kadar devam etmekte ve daha sonra $N > 50$ olduğu bloklu sıkı yerleşimdeki çakıl tabakası başlamaktadır. Şekil 6.14'de verilen ölçüm sonuçlarından da görüleceği üzere bu tabakalar boyunca S-dalga hızı 462 m/sn, P-dalga hızı 800 m/sn bulunmuştur.

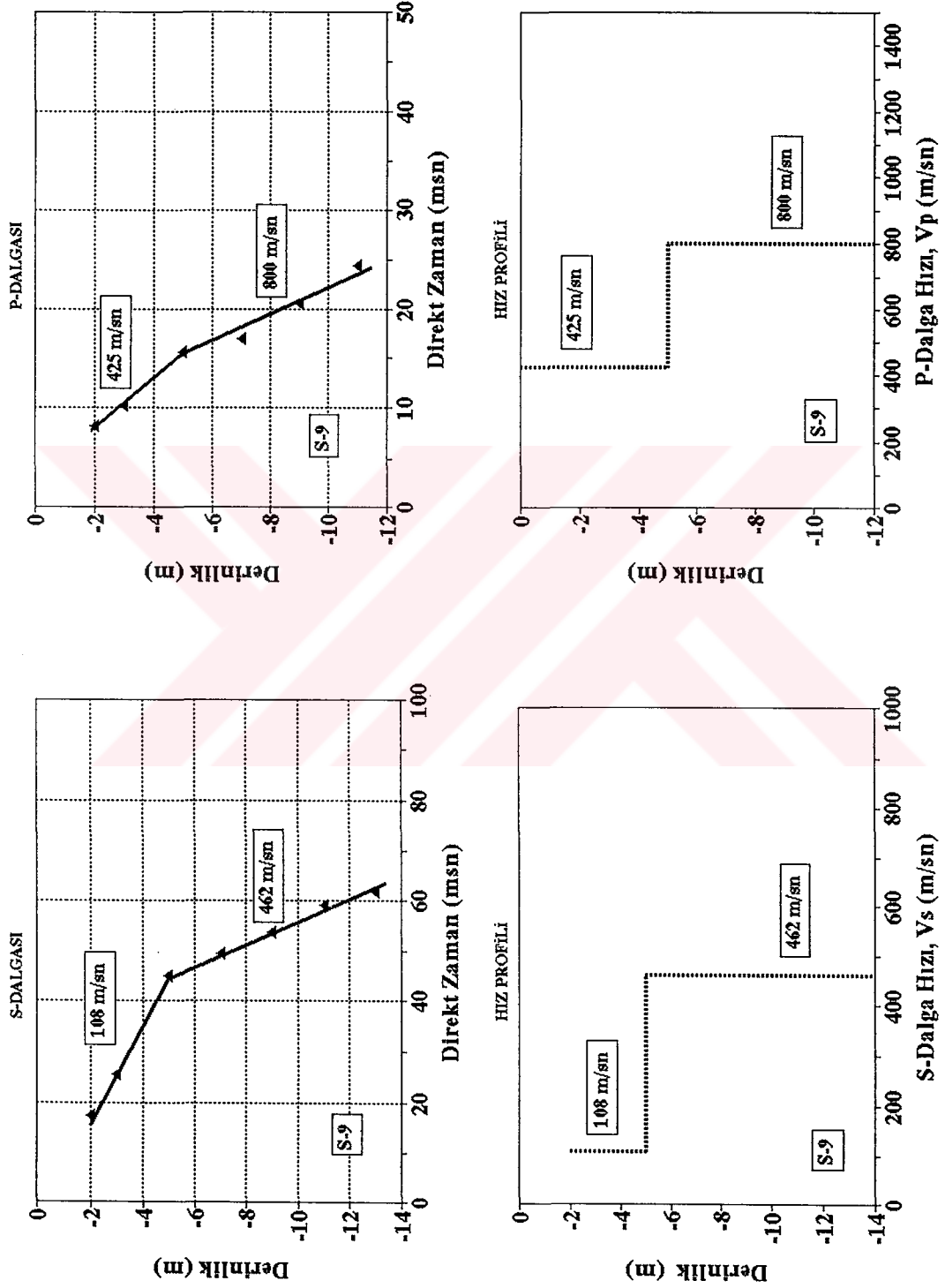
S13 Sondajı

20 m derinliğinde olan S13 sondajında yaklaşık 18 m derinliğe kadar sadece P-dalgası ölçümleri yapılmıştır. Zemin kesitinde bu bölgede 6 m derinliğe kadar ince kumlu ve çakıllı, siltli kil tabakası bulunmakta ve SPT-N sayıları tabaka içinde 8 ile 30 arasında değişmektedir. 6-9 m arasında kum-çakıl ve siltli kil serileri geçilerek, blok boyutunda malzemeleri içeren sıkı çakıl tabakasına girilmektedir. Bu tabakada N darbe sayıları daima 50 den büyük elde edilmiştir. Yapılan ölçümlerin değerlendirilmesi sonucunda P-dalga hızları 1-4 m arasında 259 m/sn, 4-9 m arasında 558 m/sn ve daha sonra 1087 m/sn değerlerini almaktadır. Ölçüm sonuçları Şekil 6.15'de verilmiştir.

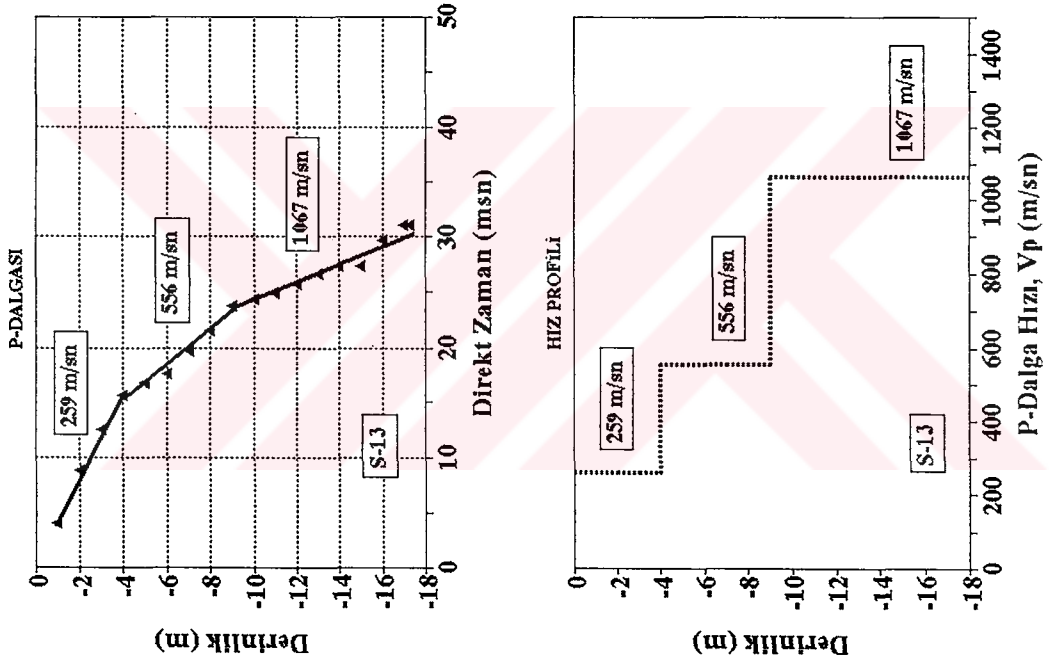
S14 Sondajı

Arazi deneyleri yerleşim planında görülen bölgede, Erzincan Devlet Hastanesi bahçesinde açılmış 20 m derinliğindeki S14 sondaj kuyusunda yine Aşağı Kuyu sismik deney yöntemi ile kayma ve basınç dalgası hızları ölçülmüştür. Bu sondaj kuyusunda zemin kesitinde başlıca iki tabaka göze çarpmaktadır. Üstte 6 m kalınlığında çakıllı, siltli kil (CL/ML) tabakası yer almaktadır. Tabaka içinde SPT-N darbe sayıları 10-20 arasında değişmektedir.

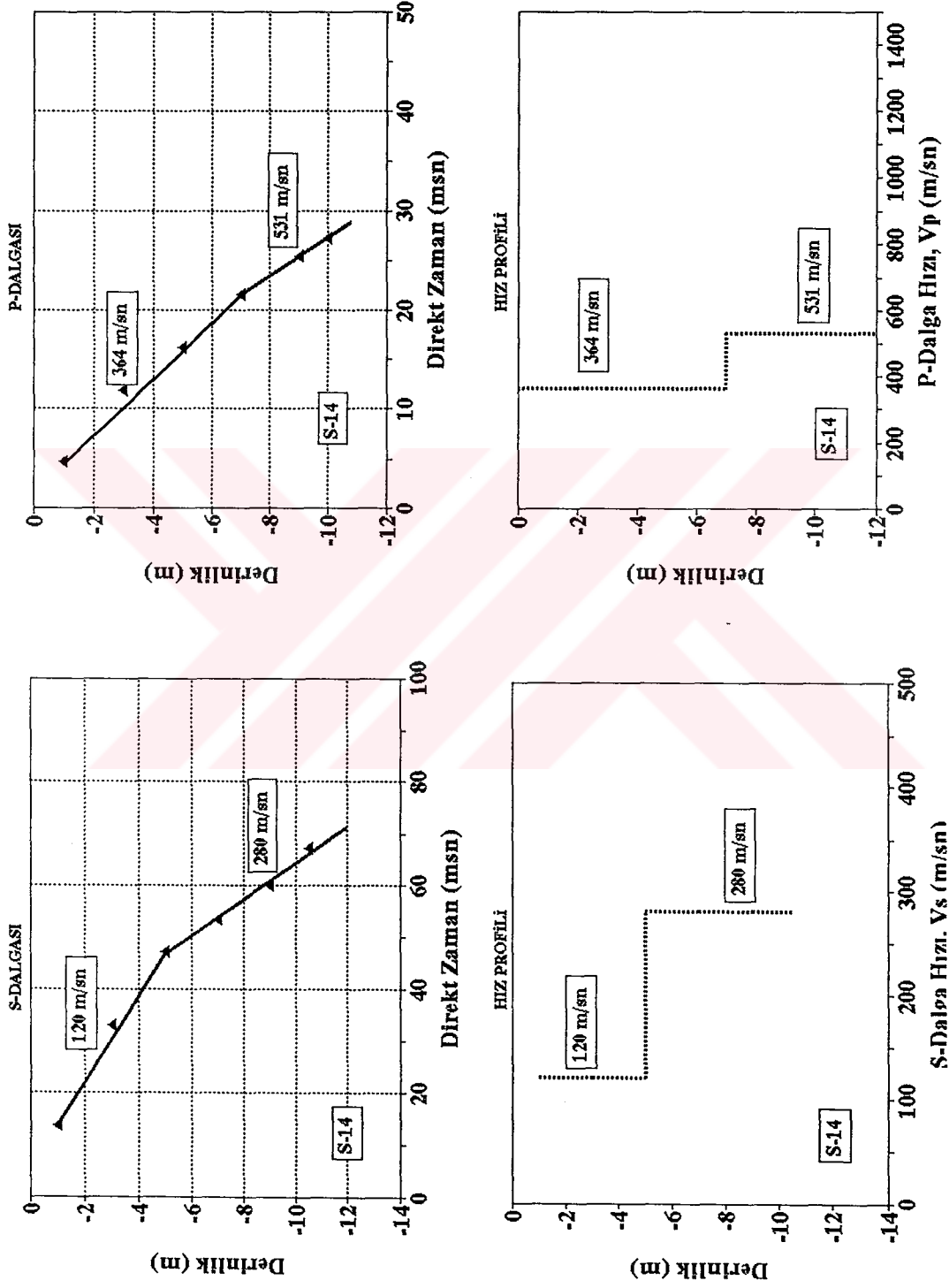
Sismik ölçümler sonucunda elde edilen hız profili Şekil 6.16'da görülmektedir. Ölçümlerden üstteki tabaka içinde kayma dalgası hızı 120 m/sn, basınç dalgası 364 m/sn olarak bulunmuştur. Kuyuda 6 m derinlikten sonra, diğer kuyularda da çeşitli derinlikte karşılaşılan bloklu, sıkı çakıl tabakasına girilmektedir. N sayılarının 50 nin üzerinde olduğu bu tabaka içinde S ve P dalga hızları sırası ile 280 m/sn ve 531 m/sn bulunmuştur. S14 sondaj kuyusunda ölçümler 12 m ile sınırlı kaldığından daha derinlerde yer alan tabakalara ait hızlar hakkında bilgi edinilememiştir.



Şekil 6.14. S9 Sondajı Aşağı Kuyu Sismik Deney Sonuçları



Şekil 6.15. S13 Sondajı Aşağı Kuyu Sismik Deney Sonuçları



Şekil 6.16. S14 Sondajı Aşağı Kuyu Sismik Deney Sonuçları

S18 Sondajı

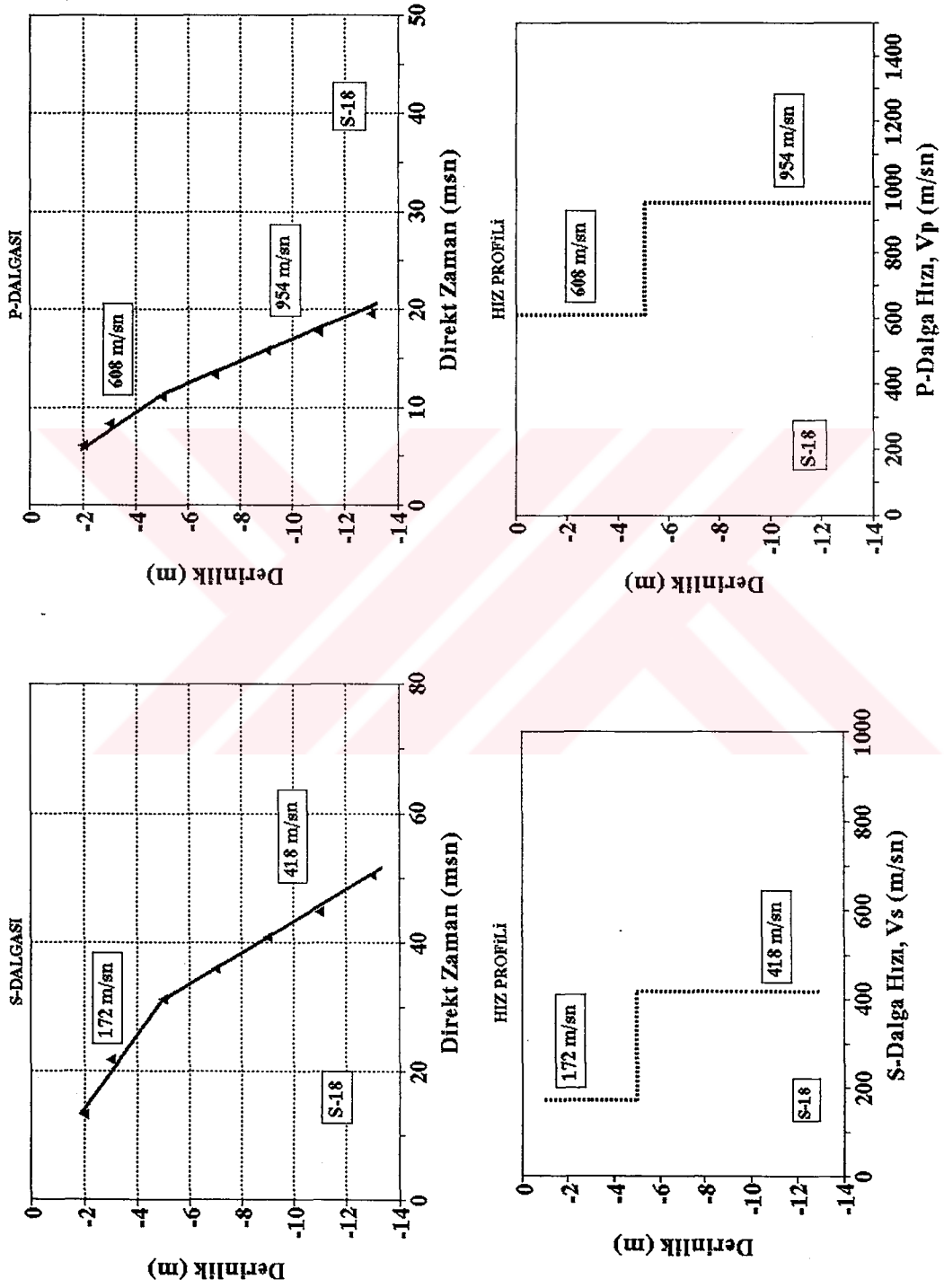
Bu kuyuda yapılan kuyu içi sismik ölçümleri Şekil 6.17'de verilmiştir. Şekilden de görüleceği üzere burada 5 m derinlik içinde yer alan tabakalarda kayma dalgası hızı 172 m/sn, 5-13 m arasında 418 m/sn, yine aynı derinliklerde P-dalga hızı 608 m/sn ile 954 m/sn mertebesinde elde edilmiştir. Şehrin doğusunda 14.50 m derinliğinde açılmış S18 sondajından zemin kesitinde 5 m derinliğe kadar kumlu, az çakıllı, killi silt ve siltli kil (CL/ML), daha aşağıda 5-10 m derinlikleri arasında çimentolaşmış sıkı çakıl ve onun altında ise siltli kum (SM) tabakaları yer almaktadır. Derinlik boyunca SPT-N sayıları genelde yüksek değerler almakta, 4 m civarında 15, çakıl içinde $N > 50$ olmaktadır.

S19 Sondajı

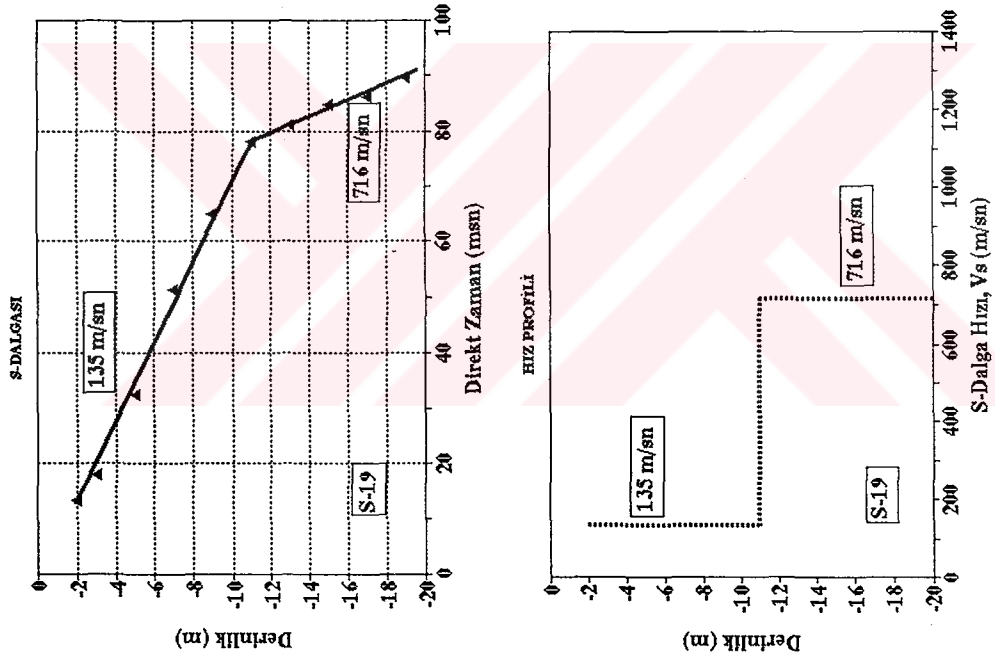
Erzincan'ın güney doğusunda İzzetpaşa Mahallesi yerleşim alanında açılan 21 m derinliğindeki bu sondajdan elde edilen bilgiler ışığında zemin kesitinde, 7 m derinliğine kadar ince kumlu, alt seviyeleri çakıllı killi silt ve siltli kil tabakalarının bulunduğu anlaşılmıştır. N sayıları 5-20 arasında değişmektedir. Bu tabaka altında 9 m ye kadar kumlu kil yer almaktadır. Geçilen bu iki tabaka içinde kayma dalgası hızı 135 m/sn ölçülmüştür. Daha derinlerde ise bu hız 716 m/sn değerine ulaşmaktadır. Yapılan sismik ölçümlerin sonucu Şekil 6.18'de verilmiştir. Aynı kuyuda uygulanan P-dalgası ölçümlerinde, çeşitli nedenlerden dolayı 12 m derinlikten sonra yorumlanabilir bir kayıt alınamamıştır. P-dalgası için bu kuyuda ölçümler bu sevide tamamlanmış ve 577 m/sn olarak bulunmuştur.

S20 Sondajı

Şekil 6.19'da verilen S ve P-dalga hız ölçümleri, bölgede uygulanan son kuyu içi sismik yöntemidir. Erzincan kentinin güney doğu bölgesinde 21.3 m derinliğinde açılan S20 sondaj kuyusundan edinilen bilgilere göre burada, üstte siltli kum-çakıl, altta kum bantlı, çakıllı silt (ML) tabakaları yer almaktadır. Alınan numuneler üzerinde yapılan laboratuvar deneylerinden silt tabakasında likit limit %38, plastik limit %22 ve plastisite indisi %16 bulunmuştur. Bu tabakalarda N sayıları 10 civarında değerler almaktadır. Bu derinlikten sonra çakıl tabakasına girilmekte ve tabaka içinde $N > 50$ olmaktadır. Uygulanan Aşağı Kuyu deneylerinden S-dalga hızı 1-5 m arasında 148 m/sn, 5-13 m arasında 343 m/sn ve bu



Şekil 6.17. S18 Sondajı Aşağı Kuyu Sismik Deney Sonuçları



Şekil 6.18. S19 Sondajı Aşağı Kuyu Sismik Deney Sonuçları

seviyeden sonra 485 m/sn elde edilmiştir. Yaklaşık aynı derinliklerde P-dalga hızları sırası ile 301, 554 ve 926 m/sn olarak ölçülmüştür.

6.6. ARAZİ PENETRASYON DENEYLERİ VE SİSMİK DALGA HIZLARI

Erzincan'da zemin incelemeleri sırasında uygulanan Standart Penetrasyon Deneyi, Koni Penetrasyon Deneyi ve Dinamik Sonda gibi arazi deneylerinin yanısıra açılan sondaj kuyularının bazılarında kuyu içi sismik deneyleri de yapılmış ve dalga hızları ölçülmüştür. Erzincan şehri gibi sismik riski yüksek olan birinci derece deprem bölgelerinde, depreme dayanıklı yapı tasarımında zemin dinamik özellikleri oldukça önem kazanmakta ve bunların doğru değerleri ile çalışılması gereği ortaya çıkmaktadır. Arazide doğal koşullarda uygulanan deney teknikleri ile elde edilen bilgilerden dinamik zemin özelliklerini belirlemek uygun bir yol olarak görülmektedir. Yukarıda sayılan arazi deneyleri Erzincan'da çok sayıda uygulanmış ancak Aşağı Kuyu ve Karşıt Kuyu sismik yöntemleri sınırlı sayıda uygulanabilmektedir. Bölgede yer alan aynı tür zemin cinslerinde uygulanan bu deneylerin birbirleri ile ilişkisini araştırmak, aralarında bir korelasyon geliştirmek ve bunları daha az inceleme yapılan yerlerde bir ön bilgi olarak kullanabilmek amacı ile çalışmalar yapılmış ve sismik dalga hızları ile diğer arazi deneyleri arasında bazı bağıntılar elde edilmiştir. Bu korelasyonlara zemin tipinin, düşey efektif gerilme ve derinliğin de etkisi araştırılmış, sismik dalga hızını iki bağımsız değişken cinsinden ifade eden korelasyon eşitlikleri geliştirilmiştir.

Sismik dalga hızlarını özellikle kayma dalgası hızını (V_s) içeren korelasyon eşitlikleri genel olarak üç bağımsız değişken kullanılarak elde edilmiştir. Bunlar Standart Penetrasyon Deneyi N darbe sayısı (SPT-N), Koni Penetrasyon Deneyi uç mukavemeti (CPT- q_c) ile Dinamik Sonda Deney sonuçlarıdır. Dinamik Sonda deneyleri arazide, 10 cm giriş için gerekli darbe sayısının belirlenmesi ve az sayıda da 10 darbe için penetrasyon miktarının belirlenmesi olmak üzere iki şekilde uygulanmıştır. Sismik dalga hızı ile dinamik sonda sonuçlarını arasındaki ilişki incelenirken 10 cm penetrasyon için gerekli darbe sayısı (N_{10}) değişken olarak seçilmiştir. Ayrıca arazide uygulanan SPT, CPT ve Dinamik Sonda deney sonuçları kullanılarak SPT-Dinamik Sonda, CPT-Dinamik Sonda ve SPT-CPT ilişkisi incelenmiş ve çeşitli korelasyon bağıntıları elde edilmiştir.

Korelasyon eşitliklerini elde etmek için toplanan verilere regresyon analizi uygulanarak lineer ve lineer olmayan ilişkiler araştırılmış, en uygun bağıntılar ve onlara karşı gelen korelasyon katsayıları belirlenmiştir. Regresyon analizlerinde ve grafik çizimlerinde tablo türü bir bilgisayar programı kullanılmıştır. Sismik dalga hızını seçilen değişkenler cinsinden ifade edebilmek ve lineer olmayan bir eşitlik geliştirmek için regresyon analizinde $y=ax^b$ formunda üstel bir bağıntı kullanılmıştır. Burada y , V_s ve V_p sismik dalga hızlarını, x analizde kullanılan SPT-N darbe sayısı, CPT- q_c uç mukavemeti, Dinamik Sonda deneyi darbe sayısı N_{10} gibi değişkenleri göstermektedir. Bağıntıdaki a ve b , regresyon analizi sonucunda bulunan katsayıları ifade etmektedir. Analizi basitleştirmek için korelasyon eğrisinin başlangıç noktasından geçtiği kabul edilmiştir. Bu kabul daha önceki çalışmalarda arazi korelasyonları ile ilgilenen bir çok araştırmacı tarafından da yapılmıştır. Bununla birlikte Özellikle CPT- q_c ve V_s arasında bir ilişki aranırken, bu değerler arasında çizilen grafiklerin genelde başlangıçtan geçmediği görülmektedir. Bu durumda yukarıdaki şekilde lineer olmayan bir analizin uygulanabilmesi mümkün olmamaktadır. Bu halde lineer regresyon analizi uygulanarak $y=ax+b$ formunda bir eşitlik geliştirilmeye çalışılmıştır. Uygulanan analizler sonucunda elde edilen korelasyon eşitlikleri ve korelasyon katsayıları, seçilen parametrelerin incelendiği bölümlerde ayrı ayrı verilmiştir.

6.6.1. SPT-N Darbe Sayısı ve Sismik Dalga Hızları

Bu bölümde Standart Penetrasyon Deneyi direncini gösteren SPT-N sayısı ile kayma dalgası (V_s) ve basınç dalgası (V_p) hızı arasındaki ilişkiler incelenmiştir. Bunun için önceki bölümde anlatılan analiz yöntemi kullanılarak hem düzeltilmemiş (N) hem de derinlik düzeltmesi yapılmış (N_1) değerleri ile analiz yapılmış, korelasyon eşitlikleri ve katsayıları bulunmuştur. Elde edilen bu bağıntılar ile önceki çalışmalardan bulunanlar karşılaştırılmıştır. Arazide toplanan tüm veriler üzerinde lineer olmayan analiz uygulanmış ve üstel fonksiyon olarak bağıntılar elde edilmiştir. Dalga hızı ölçümlerinin yapıldığı kuyularda genelde yeraltı su seviyesi, ölçüm derinliğinin altında kaldığından bu çalışmada YASS'nin etkisi dikkate alınmamıştır.

6.6.1.1. Düzeltilmemiş SPT-N değerleri

Arazide açılan her sondaj kuyusunda SPT deneyleri yapılmış ve N değerleri bulunmuştur. Buna karşılık dalga hızlarının ölçüldüğü sismik deneyler ise bu sondaj kuyularının 10 tanesinde uygulanabilmiştir. Ayrıca sismik deneylerin yürütüldüğü sondaj kuyularında SPT deneyinin yapılamadığı seviyeler ile de karşılaşılmıştır. Özellikle sıkı yerleşimde ve kısmen çimentolaşmış olan çakıl tabakasında veya konglomeratik kum-çakıl tabakalarında SPT deneyleri uygulanamamıştır. Yine bu tabakalar içinde bazı deneylerde son 30 cm penetrasyona ulaşılmadan deneye son verilmiş veya bu deney için gerekli giriş miktarı çok yüksek darbe sayılarında elde edilmiştir. Bu deneylerin sonuçları korelasyonlara dahil edilmemiştir. Bu yüzden korelasyon bağıntılarını elde etmek için uygulanan analizlerde sınırlı sayıda veriler kullanılabilmektedir. Hız ölçümleri yapılan sondaj kuyularında yeraltı su seviyesi genelde ölçüm derinliklerinin altında kaldığı için, yapılan analizlerde yeraltı su seviyesinin (YASS) etkisi dikkate alınmamıştır.

Sismik dalga hız ölçümlerinin yapıldığı kuyularda, kayma dalgası V_s ile bu hızlara karşı gelen SPT-N darbe sayıları Şekil 6.20'de verilmiştir. Bu şekilden görülebileceği gibi V_s ve N arasında geniş bir alanda dağılım söz konusudur ayrıca, bu çalışmada elde edilen sismik veriler genelde Aşağı Kuyu yöntemine ait olduğu ve bu yöntem ile kayma dalgası hızı aynı tabaka içinde ortalama bir değer olarak bulunabildiği için aynı kayma dalgası değerine değişik N sayıları karşı gelmektedir. Şekilde verilen N ve V_s verilerine ait dağılım incelendiğinde, N değeri ile en düşük V_s arasında bir ilişki görülmektedir. Bu ilişki verilerin yaklaşık alt sınırından geçen bir doğru ile,

$$(V_s)_{\min} = 2.98 \cdot N + 60 \quad (\text{m/sn}) \quad (6.30)$$

şeklinde belirlenmiştir. Eşitlikte N, SPT deneyinde son 30 cm giriş için gerekli darbe sayısıdır. SPT-N darbe sayılarında düzeltme yapılmadan alınan değerleri ile hız profilinde bu değerlere karşı gelen kayma dalgası hızı arasında yapılan regresyon analizi sonucunda en uygun eğri geçirilerek,

$$V_s = 51.5 \cdot N^{0.516} \quad (\text{m/sn}) \quad (6.31)$$

bağıntısı elde edilmiştir. Arazide SPT ve kuyu içi sismik deneylerinden sağlanan tüm veriler içinden seçilen 65 adedi ile yapılan regresyon analizi sonucu elde edilen bu korelasyon bağıntısının korelasyon katsayısı %81 olarak saptanmıştır.

Genelde geoteknik mühendisliğinde basınç dalgası (P), kayma dalgasına (S) göre daha az kullanım alanı bulmasına rağmen, zemin tabakasının kayma modülü dışında diğer elastik özelliklerinin bulunmasında gerekli olan bir büyüklüktür. Bu yüzden kayma dalgası (V_s) ölçümlerinin alındığı sondaj kuyularında aynı zamanda basınç dalgası (V_p) hızları da ölçülmüştür. S-dalgası için yapılan işlemler P-dalgası için de tekrarlanmış ve N ile P-dalgasının değişimi de incelenmiştir. Düzeltilmemiş SPT-N darbe sayılarına göre bu değişim Şekil 6.21'de verilmiştir. Ölçülen P-dalga hızlarına karşı gelen SPT sayıları kullanılarak yapılan regresyon analizi sonucunda korelasyon katsayısı %72 olan,

$$V_p = 154 \cdot N^{0.488} \quad (\text{m/sn}) \quad (6.32)$$

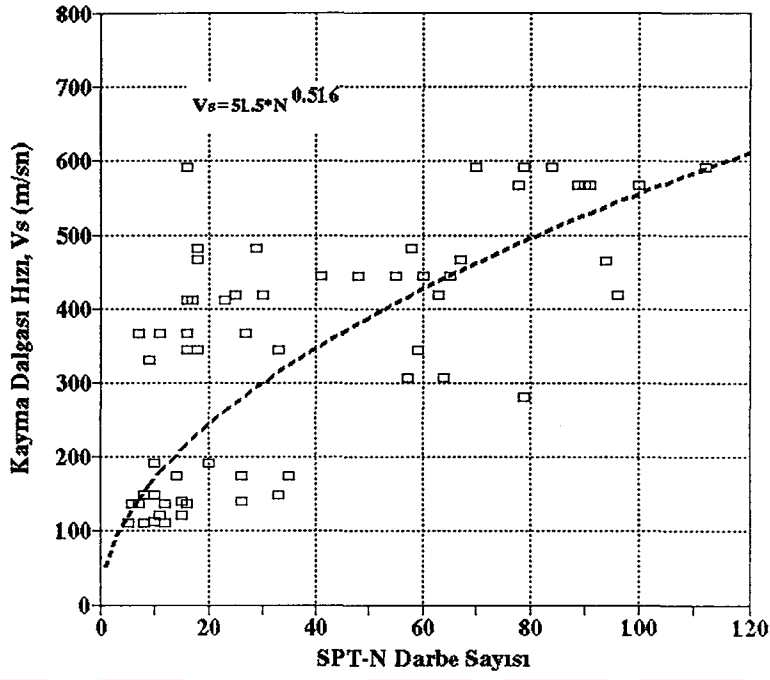
bağıntı elde edilmiştir.

Düşey Gerilme Etkisi

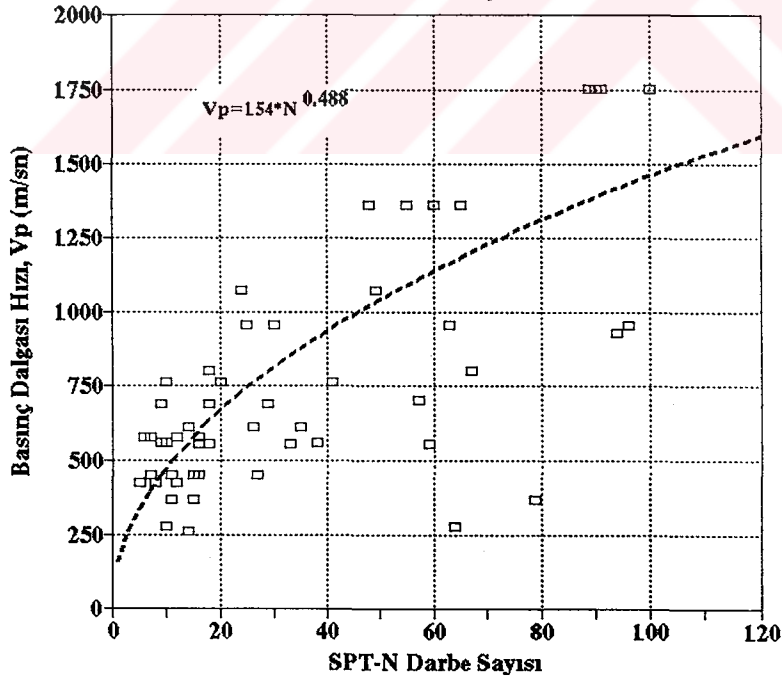
Zemin tabakalarının etkisinde kaldığı düşey efektif gerilme, zeminlerin davranışına etki eden önemli bir faktör olduğundan SPT-N sayısı ve sismik dalga hızı değerleri üzerinde de etkili olmaktadır. Genel olarak düşey gerilme artarken kayma dalgası hızı ve N değerinde artış eğilimi görülmektedir. Arazi deneylerinin uygulanmadığı durumlarda kayma ve basınç dalgası hızını düşey efektif gerilme cinsinden tahmin edebilmek için korelasyon bağıntıları geliştirilmiştir. Bu korelasyonların amacı, arazi ölçümlerinden veya arazi ölçümlerine dayanan amprik bağıntılardan elde edilen hız değerlerini karşılaştırmaktır. SPT-N darbe sayısı ile sismik hızlar arasındaki ilişkilerin çıkarıldığı veriler kullanılarak ve zeminin birim hacim ağırlığını ortalama 1.80 t/m^3 alarak yapılan regresyon analizi sonucunda,

$$V_s = 115.8 \cdot \sigma_v^{0.367} \quad (\text{m/sn}) \quad (6.33)$$

$$V_p = 257.6 \cdot \sigma_v^{0.409} \quad (\text{m/sn}) \quad (6.34)$$



Şekil 6.20. Kayma Dalgası Hızının SPT-N ile Değişimi



Şekil 6.21. Basınç Dalgası Hızının SPT-N ile Değişimi

korelasyon eşitlikleri elde edilmiştir. Bağıntılarda V_s ve V_p sırası ile kayma ve basınç dalgası hızı, σ_v ise t/m² biriminde efektif düşey gerilmeyi göstermektedir. Yapılan analiz sonucunda bu bağıntıların korelasyon katsayıları V_s için %71.9 ve V_p için %63.4 olarak bulunmuştur. Arazi ölçümlerine dayanan korelasyonlara penetrasyon direnci ve düşey gerilme birinci derecede etki eden değişkenlerdir. Bu değişkenler ile ilgili açıklamalara daha önceki bölümlerde yer verilmiştir. Bu iki ana değişkenin, sismik dalga hızlarını tahmin etmekte kullanılan korelasyonlara dahil etmenin daha gerçekçi olacağı düşünülmektedir. Bu düşünce ile SPT-N darbe sayısı ve efektif düşey gerilme iki bağımsız değişken olarak analizlere katılmıştır. Sismik dalga hızları ile N arasındaki ilişkinin incelendiği 65 adet veriye, ilgili derinliklerde hesaplanan düşey gerilmeler ilave edilerek yapılan analiz sonucunda kayma ve basınç dalgası hızları için korelasyon katsayıları V_s için %83 V_p için %68 olan aşağıdaki eşitlikler elde edilmiştir.

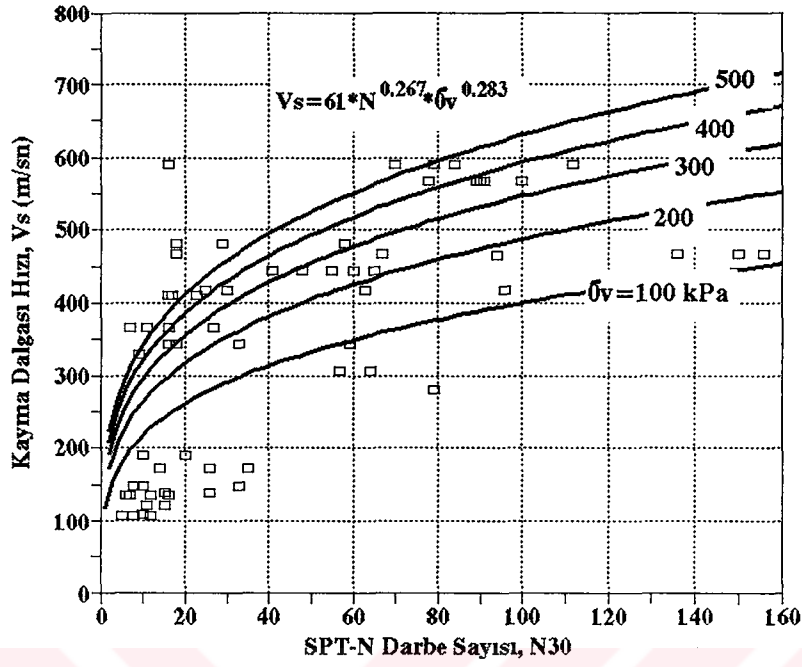
$$V_s = 61 \cdot N^{0.267} \cdot \sigma_v^{0.283} \quad (\text{m/sn}) \quad (6.35)$$

$$V_p = 186.3 \cdot N^{0.179} \cdot \sigma_v^{0.329} \quad (\text{m/sn}) \quad (6.36)$$

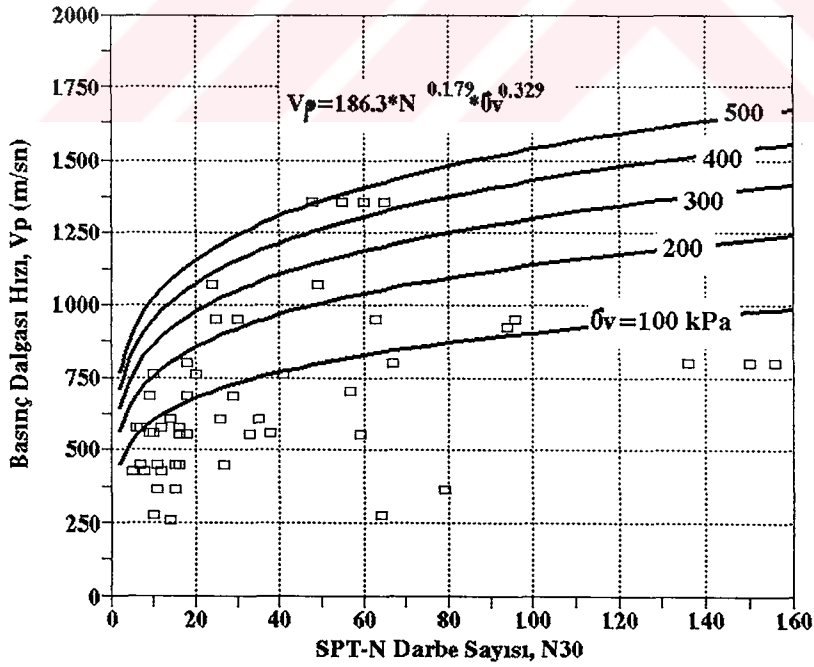
Bağıntılarda yine σ_v t/m² biriminde efektif düşey gerilmeyi ifade etmektedir. Kayma dalgası ve basınç dalgası hızının, N darbe sayısı ile düşey efektif gerilmenin 10, 20, 30, 40 ve 50 t/m² (100, 200, 300, 400 ve 500 kPa) değerlerindeki değişimi Şekil 6.22 ve 6.23'de verilmiştir. Sismik dalga hızları ile SPT-N darbe sayısı ve düşey gerilme arasında tüm zemin sınıfı için geliştirilen eşitlikler ve bunlara karşı gelen korelasyon katsayıları aşağıda Tablo 6.6'da verilmiştir.

Tablo 6.6. Tüm Zemin Sınıfı İçin SPT-N Darbe Sayısı ve Düşey Efektif Gerilme cinsinden Sismik Dalga Hızları

S-Dalgası		P-Dalgası	
V_s (m/sn)	Kor. Kats. (%)	V_p (m/sn)	Kor. Kats. (%)
$51.5N^{0.516}$	81	$154N^{0.488}$	72
$115.8\sigma_v^{0.384}$	72	$275.6\sigma_v^{0.409}$	63
$61N^{0.267}\sigma_v^{0.283}$	82	$186.3N^{0.179}\sigma_v^{0.329}$	68



Şekil 6.22. Kayma Dalgası Hızının SPT-N Darbe Sayısı ve Efektif Düşey Gerilme ile Değişimi



Şekil 6.23. Basınç Dalgası Hızının SPT-N Darbe Sayısı ve Efektif Düşey Gerilme ile Değişimi

Tablodaki V_s , kayma dalgası hızını V_p , basınç dalgası hızını N , SPT-N darbe sayısını σ_v , t/m² biriminde düşey efektif gerilmeyi göstermektedir.

Zemin Tipinin Etkisi

Buraya kadar verilen korelasyon bağıntıları, sismik ölçümlerin yapıldığı sondaj kuyularında hızlara karşı gelen SPT-N değerleri ile zemin sınıfı dikkate alınmadan yapılan analizler sonucu elde edilmiştir. Ancak zemin tipinin de bu tür korelasyonlara etkiyen bir faktör olduğu bilinmektedir. Aynı efektif gerilme altında sismik dalga hızları, dane boyutu ile birlikte genelde bir artış göstermektedir. Zemin tipinin korelasyonlara etkisini araştırmak amacı ile arazi deneyleri sonucunda sağlanan tüm veriler kil, kum ve çakıl olmak üzere üç ana gruba ayrılmıştır. Bu ayrım sonucunda 25 veri kum, 18 veri kil ve 22 veri de çakıl sınıfında yer almıştır. Kil grubu içinde yer alan veriler, Birleştirilmiş Zemin Sınıflandırma Sistemine göre CL (düşük plastisiteli kil) sınıfına dahildir ve numuneler üzerinde laboratuvar da yapılan kıvam limitleri deneylerinden, likit limit %28-48, plastik limit %15-29 ve plastisite indisi ise %10-29 arasında bulunmuştur. Kum grubuna ayrılan veriler %15-40 ince daneli malzeme ve %8-20 oranında çakıl boyutunda malzeme içermektedir. Sondajlar sırasında alınan ve bu gruba ait numuneler üzerinde yapılan deneyler sonucu dane dağılımları belirlenmiş ve genellikle SM (siltli kum) sınıfında yer aldığı tespit edilmiştir. Çakıl verileri ise, bölgede çeşitli derinliklerde karşılaşılan kısmen çimentolaşmış ve yer yer blok boyutunda daneler içeren sıkı yerleşimdeki tabakalara aittir. Genelde GP (kötü derecelenmiş çakıl) ve GM (sitli çakıl) sınıfında olan bu veri seti az miktarda kil de içermektedir.

Her zemin tipi için, kayma dalgası hızını SPT-N darbe sayısı ve düşey gerilmeye bağlı olarak tahmin edebilmek için yapılan analizler sonucunda çeşitli korelasyon katsayılarına sahip aşağıdaki bağıntılar geliştirilmiştir.

Kil için:

$$V_s = 47.3 * N^{0.324} * \sigma_v^{0.270} \quad (\text{m/sn}) \quad (6.37)$$

Kum için:

$$V_s = 54 * N^{0.332} * \sigma_v^{0.221} \quad (\text{m/sn}) \quad (6.38)$$

Çakıl için:

$$V_s = 205.7 * N^{0.074} * \sigma_v^{0.177} \quad (\text{m/sn}) \quad (6.39)$$

Bağıntılardaki terimler ve birimleri daha öncekiler ile aynıdır. Korelasyon katsayıları bakımından en yüksek değer %90 ile kil grubu için, en düşük değer %53 ile çakıl grubu için verilen bağıntıdan elde edilmiştir. Kumlar için verilen bağıntının katsayısı ise %64 olarak bulunmuştur. Zemin tipinin korelasyonlara olan etkisini daha iyi gözleyebilmek amacı ile 100 kPa (10 t/m²) düşey gerilme için yukarıdaki eşitliklerden, N sayısına bağlı olarak hesaplanan kayma dalgası hızları karşılaştırma kolaylığı açısından Şekil 6.24'de topluca verilmiştir. Bu şekilden de görüleceği üzere kum, kil ve (6.35) nolu bağıntı ile verilen tüm zemin gruplarını içeren korelasyon eşitlikleri, korelasyon katsayılarındaki farklılıklara rağmen yaklaşık aynı hız değerlerini vermektedir. Ancak çakıl grubuna ait veriler kullanılarak elde edilen bağıntı, dane boyutu ve çimentolaşmanın etkisi ile bunların oldukça üzerinde yer almaktadır.

Kum grubu içinde yer alan ve genelde SM sınıfındaki verilere ait zemin numuneleri üzerinde laboratuvarda yapılan granülometri analizi sonucunda ortalama dane çapları (D_{50}) belirlenerek kayma dalgası hızı ile ilgili korelasyonlarda bir değişken olarak kullanılmıştır. Kayma dalgasını doğrudan D_{50} 'ye bağlı olarak belirlemek amacı ile 25 veri üzerinde yapılan regresyon analizi sonucunda,

$$V_s = 408 * D_{50}^{0.247} \quad (\text{m/sn}) \quad (6.40)$$

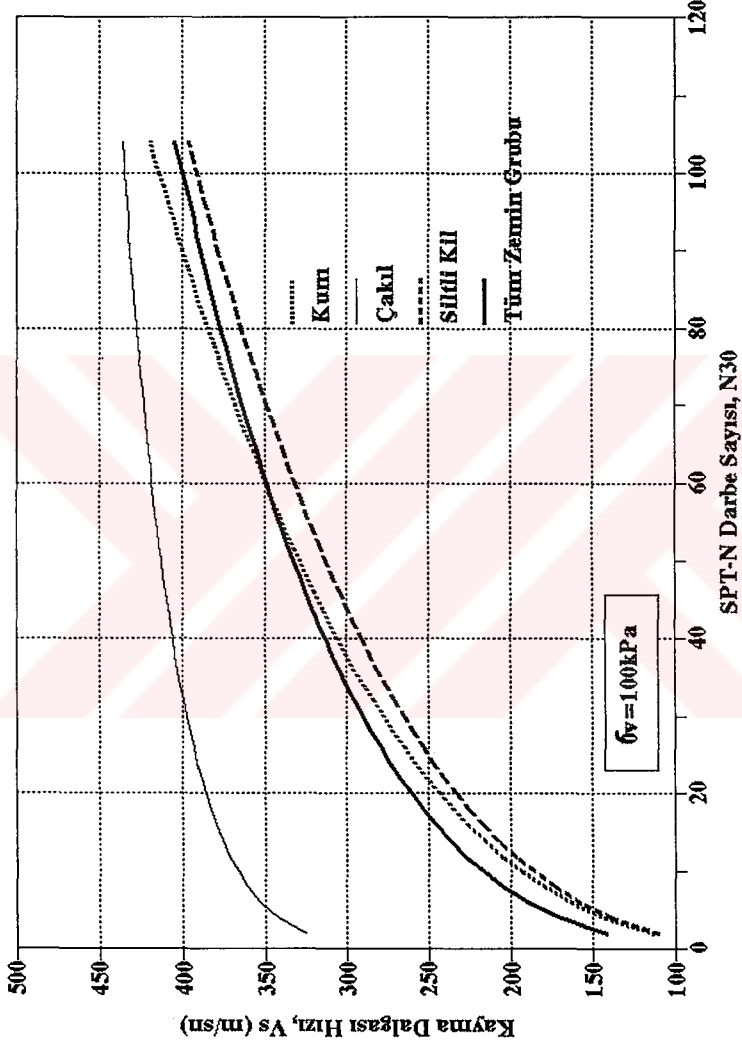
bağıntısı elde edilmiştir. Burada D_{50} mm biriminde ortalama dane çapıdır. Bu korelasyon eşitliğinin katsayısı %54 olarak belirlenmiştir. Ancak aynı verilere düşey gerilme de bir değişken olarak ilave edildiğinde,

$$V_s = 116.6 * \sigma_v^{0.409} * D_{50}^{0.289} \quad (\text{m/sn}) \quad (6.41)$$

şeklinde yeni bir bağıntı elde edilmiştir. Bu bağıntının korelasyon katsayısı %78 dir. Korelasyon katsayısının yüksek olması bu tür ilişkilerde tabakaların etkisinde kaldığı düşey gerilmenin önemli etkisine işaret etmektedir.

6.6.1.2. Düzeltilmiş SPT-N değerleri

Sondajlar sırasında yapılan Standart Penetrasyon deney sonuçları ve aynı sondaj kuyularında yürütülen kuyu içi sismik deneyleri ile bulunan sismik dalga hızları arasında aynı veriler kullanılarak ve N sayılarını efektif düşey gerilmeye göre düzelterek yeni bir analiz yapılmıştır. Düzeltme



Şekil 6.24. Zemin Tipine Göre Kayma Dalgası Hızının SPT-N Darbe Sayısı ve Efektif Düşey Gerilme ile Değişimi

faktörünün bulunmasında (C_N) önceki bölümde anlatılan ve birbirleri ile uyum gösterenlerin bir ortalaması olan (6.2) nolu bağıntı kullanılmıştır. Bu bağıntıda, zeminin ortalama birim hacim ağırlığı 1.80 t/m^3 alınarak, düzeltme faktörü derinlik cinsinden ifade edilmiştir. Bu derinlik-düzeltilme faktörü Şekil 6.25'de gösterilmiştir. Şekilden de görüleceği üzere N sayılarının düzeltilmesi işleminde, özellikle yüzeye yakın kesimlerde düzeltme faktörü oldukça yüksek çıkmakta ve bu durumda N sayıları çok fazla büyümektedir. Bu yüzden düzeltme işleminde aşırılıktan kaçınmak için düzeltme faktörünün en büyük değeri 2 olarak alınmıştır. Düzeltilmiş bu değerler ile V_s 'in değişimi Şekil 6.26'da gösterilmiştir. Düzeltilmemiş değerlerde olduğu gibi burada da verilerde bir saçılım söz konusudur ancak,

$$(V_s)_{\min} = 2.92 \cdot N_1 + 57 \quad (\text{m/sn}) \quad (6.42)$$

ifadesi ile en düşük bir V_s değeri tanımlamak mümkün olmaktadır. Bağıntıdaki N_1 , düzeltilmiş SPT-N darbe sayısıdır. Düzeltilmemiş N sayıları ve derinlik düzeltilmesi yapılan N_1 sayıları ile yapılan korelasyonlarda tanımlanan minimum V_s bağıntılarından hemen hemen aynı değerler elde edilmektedir. Düzeltilmemiş SPT-N ile V_s arasında kurulan ilişkide kullanılan N değerlerinin düşey jeolojik yüke göre düzeltilmesinden elde edilen N_1 değerleri kullanılarak yapılan analiz sonucunda

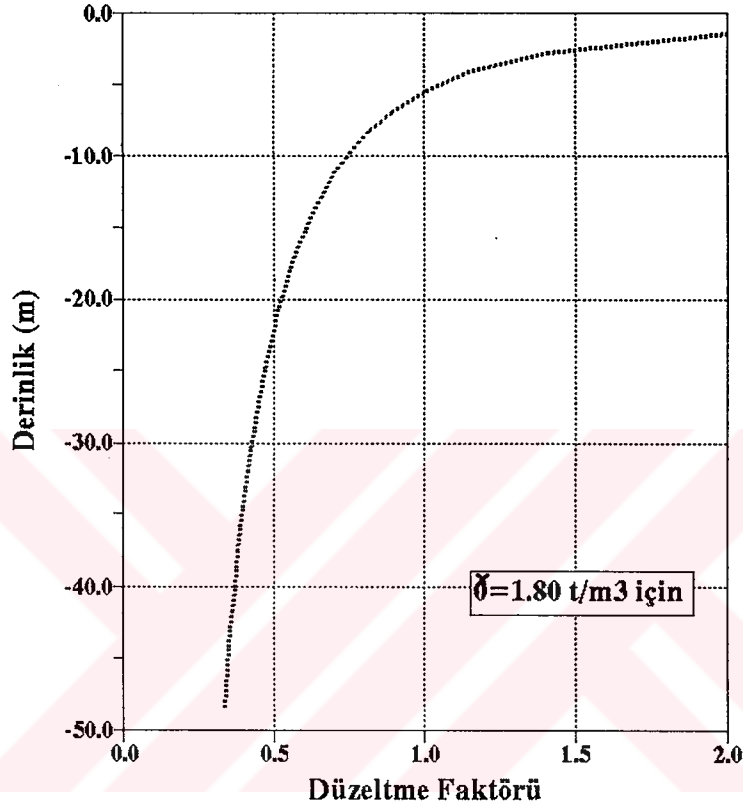
$$V_s = 71.2 \cdot N_1^{0.440} \quad (\text{m/sn}) \quad (6.43)$$

şeklinde bir eşitlik geliştirilmiştir. Bu bağıntının korelasyon katsayısı %56 olarak bulunmuştur.

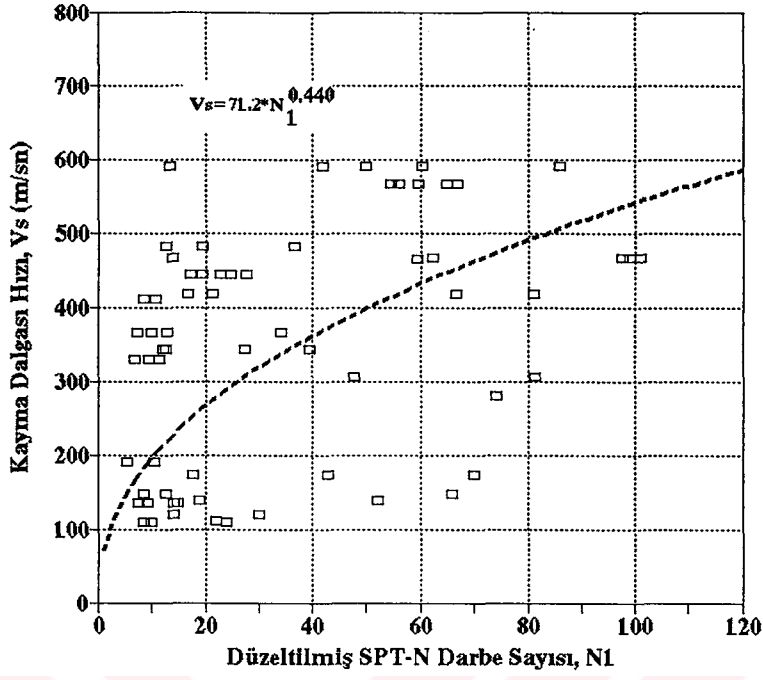
Şekil 6.27'de P-dalgası hızı V_p ile düzeltilmiş SPT-N (N_1) arasındaki değişim görülmektedir. Bu değerler ile yapılan analizde N_1 - V_p arasında ise,

$$V_p = 192.3 \cdot N_1^{0.441} \quad (\text{m/sn}) \quad (6.44)$$

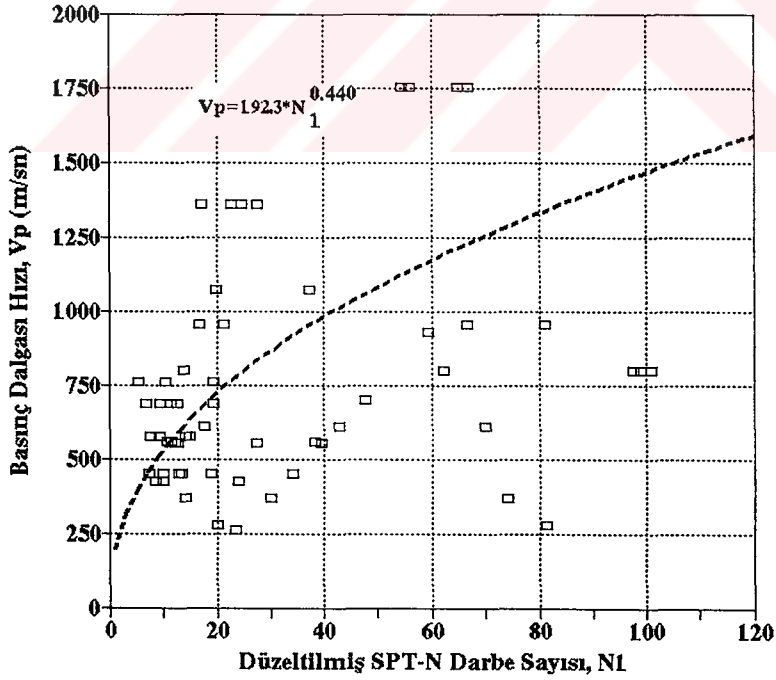
korelasyon katsayısı %55 olan bağıntı elde edilmiştir. Düzeltilmemiş N sayıları ile karşılaştırıldığında derinlik düzeltilmesi yapılan N değerleri kullanılarak bulunan bağıntıların korelasyon katsayıları oldukça düşük çıkmaktadır. V_s - N ilişkisinde kullanılan N sayılarının düzeltilmiş değerleri ve düşey gerilmenin bir fonksiyonu olarak kayma ve basınç dalgası hızını belirleyebilmek için 65 adet veri tekrar analiz yapılmış ve korelasyon



Şekil 6.25. SPT-N Sayıları İçin Kullanılan Düzeltme Faktörü



Şekil 6.26. Kayma Dalgası Hızının Düzeltilmiş SPT-N ile Değişimi



Şekil 6.27. Basınç Dalgası Hızının Düzeltilmiş SPT-N ile Değişimi

katsayısının yükseldiği görülmüştür. Bu analiz sonucunda sismik dalga hızları için,

$$V_s = 47.1 \cdot N_1^{0.272} \cdot \sigma_v^{0.395} \quad (\text{m/sn}) \quad (6.45)$$

$$V_p = 164.8 \cdot N_1^{0.164} \cdot \sigma_v^{0.406} \quad (\text{m/sn}) \quad (6.46)$$

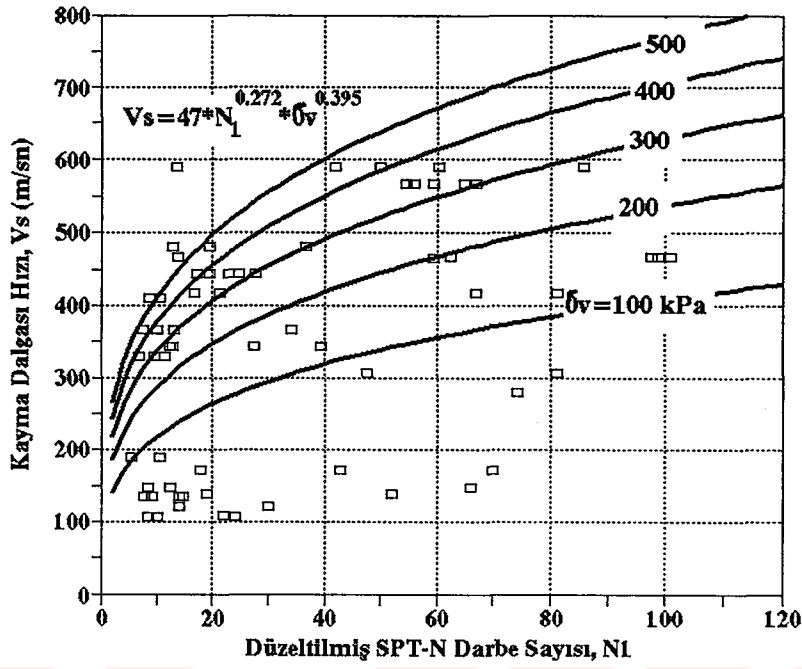
bağıntıları elde edilmiştir. Burada V_s ve V_p kayma ve basınç dalgası hızı, N_1 düzeltilmiş SPT-N darbe sayısı ve σ_v ise t/m² biriminde düşey efektif gerilmedir. Bağıntıların korelasyon katsayıları V_s ve V_p için sırası ile %82 ve %67 olarak hesaplanmıştır. Kayma dalgası ve basınç dalgası hızının, N_1 değeri ile düşey efektif gerilmenin belirli değerlerindeki değişimi Şekil 6.28 ve 6.29'da verilmiştir.

Kuyu içi sismik yöntemler kullanılarak bulunan kayma ve basınç dalgası hızları ile SPT-N darbe sayılarının derinlik düzeltilmesi yapılmış N_1 değerleri ve düşey gerilme arasında geliştirilen bağıntılar ve korelasyon katsayıları Tablo 6.7'de verilmiştir. Tablodaki σ_v , t/m² biriminde düşey efektif gerilmeyi göstermektedir.

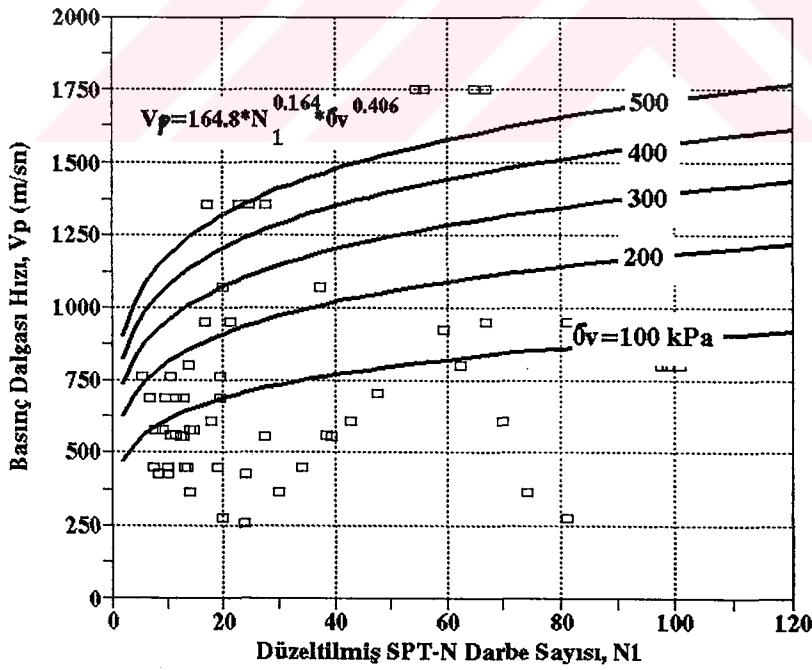
Tablo 6.7. N_1 Değerleri ve Sismik Dalga Hızları

S-Dalgası		P-Dalgası	
V_s (m/sn)	Kor. Kats. (%)	V_p (m/sn)	Kor. Kats. (%)
$71.2 N_1^{0.440}$	56	$192.3 N_1^{0.495}$	55
$47.1 N_1^{0.272} \sigma_v^{0.395}$	82	$164.8 N_1^{0.164} \sigma_v^{0.406}$	67

Düzeltilmiş SPT-N darbe sayısı N_1 'e bağlı olarak geliştirilen bağıntılarda N değerlerinin düzeltilmesi işleminde (6.2) nolu bağıntı kullanılmıştır. $C_N = (1/\sigma_v)^{0.5}$ şeklinde verilen bu düzeltme faktörü, bir çok araştırmacı tarafından verilen ve birbirleri ile uyum gösteren düzeltme faktörlerinin bir ortalaması olarak karşımıza çıkmaktadır. N sayılarını düzeltmede kullanılacak yöntemler arasındaki farklılıklar kuşkusuz bu değerler ile bulunan korelasyon bağıntılarına ve katsayılarına da yansımacaktır. Korelasyonlarda kullanılan N değerlerini Tablo 6.1'de değişik araştırmacılar tarafından önerilen düzeltme faktörlerine göre düzelterek, aynı veriler ile



Şekil 6.28. Kayma Dalgası Hızının Düzeltilmiş SPT-N ve Efektif Düşey Gerilme ile Değişimi



Şekil 6.29. Basınç Dalgası Hızının Düzeltilmiş SPT-N ve Efektif Düşey Gerilme ile Değişimi

yapılan analiz sonucunda kayma dalgası için elde edilen bağıntılar ve katsayıları Tablo 6.8'de verilmiştir.

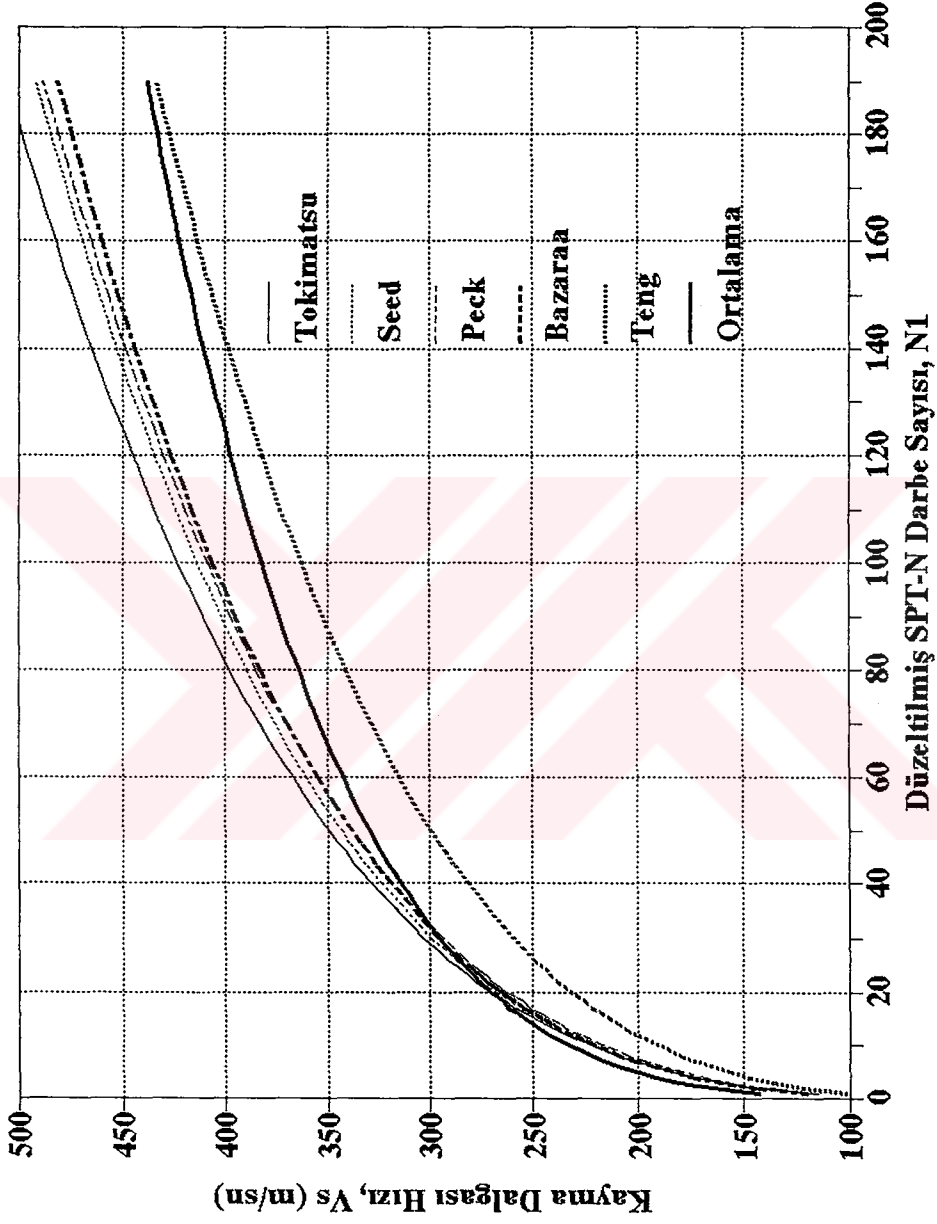
Tablo 6.8. Çeşitli Araştırmacılara Ait Düzeltme Faktörlerinden Bulunan N_1 Değerleri ile Elde Edilen Korelasyon Eşitlikleri

Kullanılan Düzeltme Faktörü	Elde Edilen Korelasyon Bağıntısı	Kor.Kats. (%)
Teng (1962)	$V_s = 43.3 N_1^{0.278} \sigma_v^{0.367}$	83.8
Bazaraa (1967)	$V_s = 49.6 N_1^{0.264} \sigma_v^{0.385}$	82.4
Peck, Hansen ve Thornburn (1974)	$V_s = 48.8 N_1^{0.275} \sigma_v^{0.373}$	83.2
Seed (1976)	$V_s = 42.3 N_1^{0.269} \sigma_v^{0.452}$	83.7
Tokimatsu ve Yoshimi (1983)	$V_s = 44.2 N_1^{0.278} \sigma_v^{0.425}$	83.2

Tablodaki V_s m/sn biriminde kayma dalgası hızı σ_v ise t/m² biriminde düşey efektif gerilmedir. N sayısının değişik yöntemler ile düzeltilmiş değerleri ile yapılan analizler sonucunda elde edilen bağıntılar ve korelasyon katsayıları arasında bir uyum söz konusudur. Bu bağıntılar ve daha önce elde edilen (6.45) nolu bağıntı ile 10 t/m² düşey efektif gerilme değerinde hesaplanan kayma dalgası hızlarının değişimi Şekil 6.30'da gösterilmiştir. Bu şekilden de izlenebileceği üzere en düşük hız değerlerini, Teng (1962) tarafından önerilmiş düzeltme faktörü ile bulunan N_1 sayılarından elde edilmiş bağıntı vermektedir. Diğerleri ise N_1 'in 30 değerine kadar hemen hemen eşit kayma dalgası hızı vermektedir. N_1 'in 30 olduğu durumda Teng diğerlerinden yaklaşık olarak %14 daha düşük hız değeri vermektedir. Yine N_1 'in bu değerinden sonra, Tokimatsu ve diğ. (1983) tarafından verilen düzeltme faktörü kullanılarak elde edilen düzeltilmiş N sayıları ile bulunan bağıntıdan en yüksek hız değerleri hesaplanmaktadır.

6.6.2. CPT q_c Uç Mukavemeti-Sismik Dalga Hızları

Arazide kuyu içi yöntemler ile dalga hızı ölçümlerinin yapıldığı sondaj kuyuları yakınlarında CPT deneyleri de uygulanmıştır. CPT deneyi q_c uç mukavemeti ile kayma ve basınç dalgası hızları arasındaki ilişkiler, arazide



Şekil 6.30. S-Dalga Hızının, Sabit Düşey Gerilme Altında Çeşitli Yöntemlere Göre Düzeltilmiş SPT-N İle Değişimi

toplanan tüm zemin grubuna ait veriler üzerinde doğrusal ve doğrusal olmayan analiz uygulanarak incelenmiştir. Bu çalışma kapsamında CPT deneyleri genelde q_c uç mukavemeti okunarak yapılmış ve analizlerde bu değerler değişken olarak kullanılmıştır. Deneylerde q_c uç mukavemeti her 20 cm de bir okuma alınarak bulunmuştur. Bu yüzden bir noktada uygulanan CPT deneyinden, SPT-N değerleri ile karşılaştırıldığında oldukça fazla miktarda veri sağlanmıştır. Sismik hız ölçümleri genelde Aşağı Kuyu yöntemi uygulanarak yapıldığından hızlar aynı tabaka içinde sabit bir değer olarak elde edilmiştir. Böylece sabit hızlı bir tabaka içinde aynı hız değerine birden fazla q_c değerinin karşı gelmesi kaçınılmaz olmaktadır. Yapılan arazi deneylerinden sağlanan q_c uç mukavemeti ile bunlara karşı gelen hız değerlerinden oluşan veri sayısı 184 adettir. Arazi deneylerinden sağlanan ve regresyon analizinde kullanılan q_c ve V_s değerleri Şekil 6.31'de gösterilmiştir. İki değişken arasındaki korelasyon eşitlik eğrisinin başlangıç noktasından geçtiği kabul edilerek yapılan analiz sonucunda doğrusal olmayan ve korelasyon katsayısı %80 olan aşağıda verilen eşitlik elde edilmiştir.

$$V_s = 55.3 * q_c^{0.377} \quad (\text{m/sn}) \quad (6.47)$$

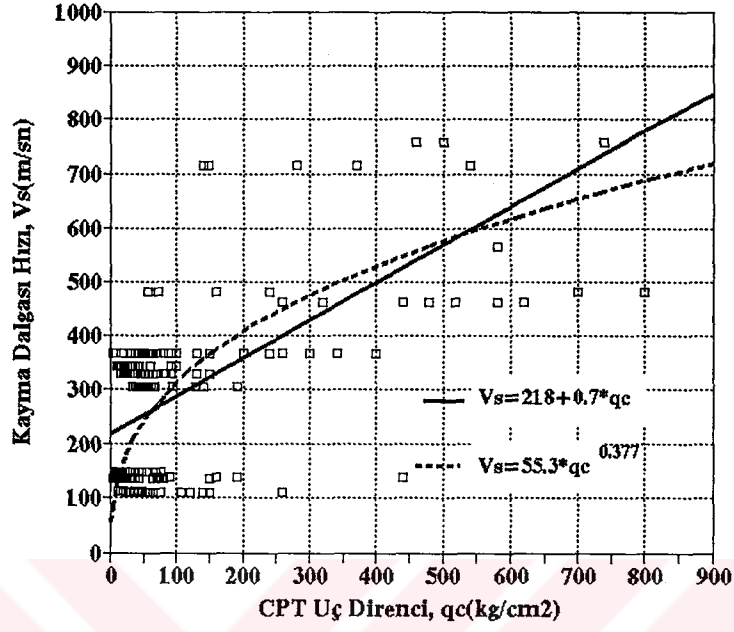
Burada q_c , kg/cm^2 biriminde olmak üzere CPT deneyi uç mukavemetini göstermektedir. V_s ile q_c arasındaki ilişkiyi araştırırken, bu değerler arasında çizilen grafiklerin başlangıç noktasından geçmediği ve aralarında doğrusal bir ilişkinin de bulunduğu görülmektedir. q_c ve kayma dalgası hızı arasında yapılan lineer regresyon analizi sonucunda da,

$$V_s = 0.7 * q_c + 218 \quad (\text{m/sn}) \quad (6.48)$$

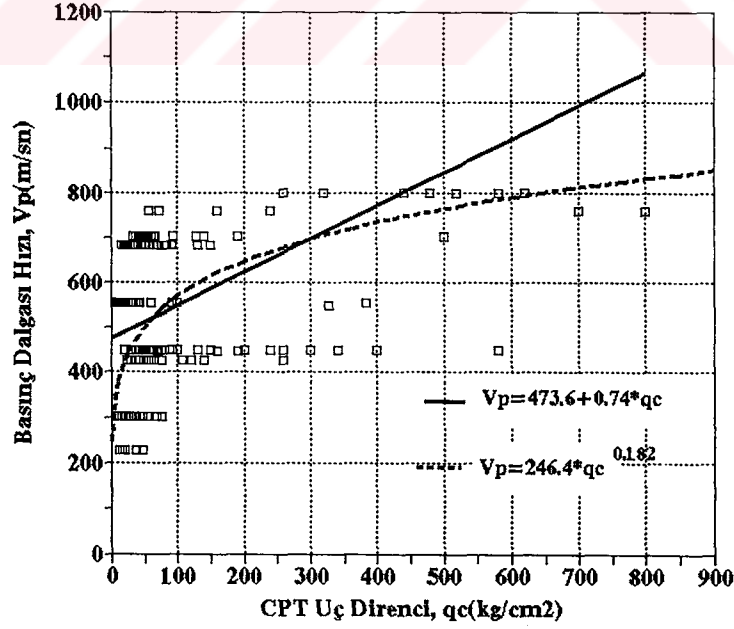
şeklinde, korelasyon katsayısı %75 olan bir bağıntı elde edilmiştir. Yine burada q_c , kg/cm^2 biriminde alınmalıdır.

CPT uç direnci q_c ile S-dalgası arasında yapılan tüm işlemler, aynı kuyularda ölçülen P-dalgası arasında da tekrarlanmıştır. q_c - V_p arasındaki ilişki Şekil 6.32'de görülmektedir. 106 veri ile yapılan regresyon analizi sonucunda P-dalgası için doğrusal ve doğrusal olmayan regresyon bağıntıları elde edilmiş ve aşağıda verilmiştir. P-dalgası için elde edilmiş olan bu bağıntılara ait korelasyon katsayıları yaklaşık %57 olarak bulunmuştur.

$$V_p = 246.4 * q_c^{0.182} \quad (\text{m/sn}) \quad (6.49)$$



Şekil 6.31. Kayma Dalgası - CPT ilişkisi



Şekil 6.32. Basınç Dalgası - CPT ilişkisi

$$V_p = 0.74 \cdot q_c + 473.6 \quad (\text{m/sn}) \quad (6.50)$$

SPT-N darbe sayısı ile sismik dalga hızları arasındaki korelasyonlarda olduğu gibi düşey gerilme, q_c uç mukavemetini içeren korelasyonlara da etkili olmaktadır. Düşey efektif gerilme dikkate alınarak yapılan analizler sonucu elde edilen bağıntıların sahip oldukları daha yüksek korelasyon katsayıları da bu gerçeğe işaret etmektedir. Kayma dalgası hızını q_c uç mukavemeti ve düşey efektif gerilmenin bir fonksiyonu olarak ifade edebilmek için 184 veri ile yapılan regresyon analizi sonucunda,

$$V_s = 41 \cdot q_c^{0.212} \cdot \sigma_v^{0.461} \quad (\text{m/sn}) \quad (6.51)$$

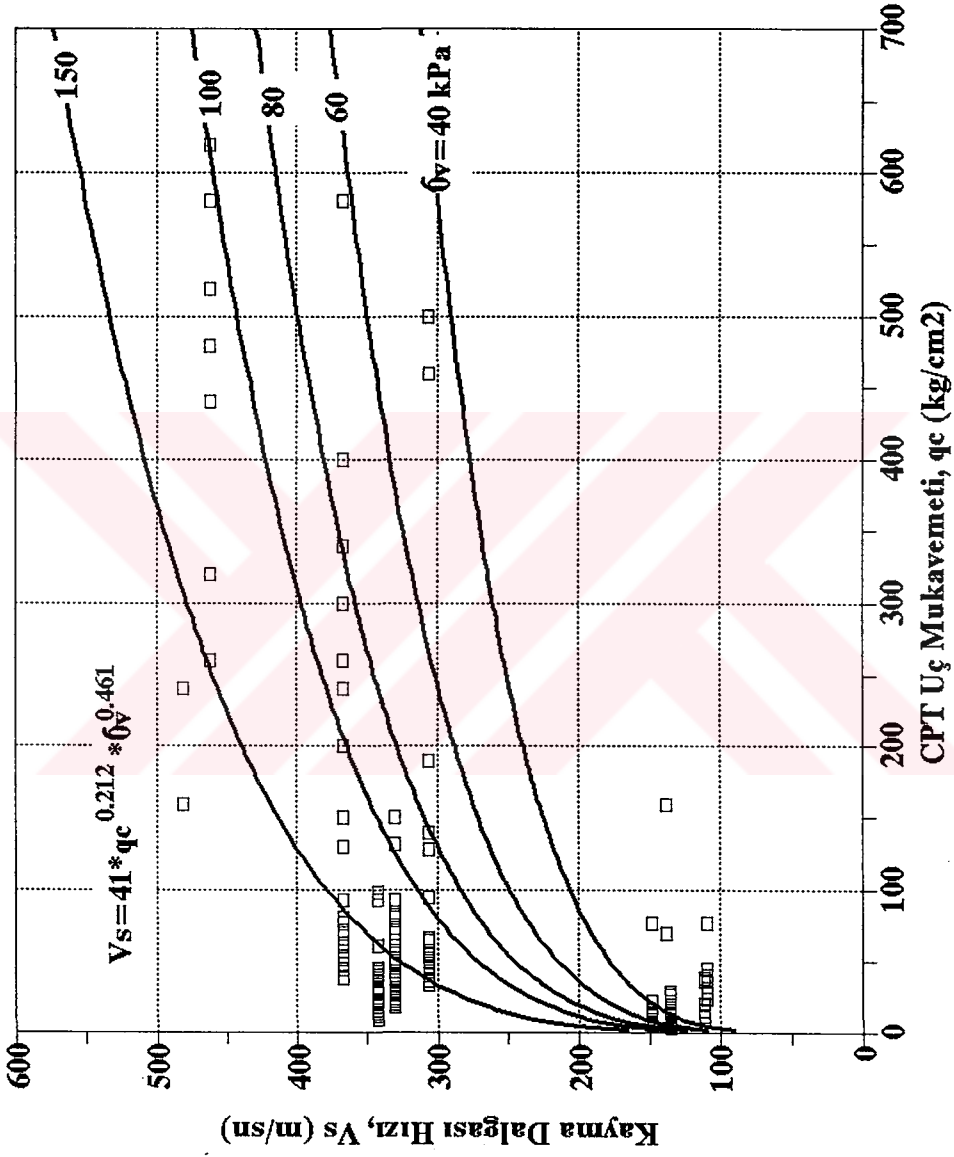
$$V_s = 110 + 0.4q_c + 12.6\sigma_v \quad (\text{m/sn}) \quad (6.52)$$

üstel ve doğrusal eşitlikler geliştirilmiştir. Bu ifadelerin korelasyon katsayıları sırası ile %82 ve %76 olarak bulunmuştur. Bağıntıda q_c kg/cm² olarak uç mukavemeti ve σ_v t/m² biriminde tabakanın etkisinde kaldığı efektif gerilmedir. Üstel fonksiyon olarak elde edilen bağıntı kullanılarak, düşey efektif gerilmenin 40, 60, 80, 100 ve 150 kPa (4, 6, 8, 10 ve 15 t/m²) değerlerinde kayma dalgası hızının q_c uç mukavemeti ile değişimi Şekil 6.33'de verilmiştir.

CPT deneyi q_c uç mukavemeti ile kuyu içi sismik yöntemleri ile ölçülen kayma ve basınç dalgası hızları arasında uygulanan doğrusal ve doğrusal olmayan analizler sonucu elde edilen bağıntılar ve bunlara karşı gelen korelasyon katsayıları topluca Tablo 6.9'da verilmiştir.

Tablo 6.9. CPT- q_c Uç Mukavemeti ve Sismik Dalga Hızları

Analiz	S-Dalgası		P-Dalgası	
	V_s (m/sn)	Kor. Kat. (%)	V_p (m/sn)	Kor. Kat. (%)
Doğrusal	$0.7q_c + 218$	75	$0.74q_c + 473.6$	56
	$110 + 0.4q_c + 12.6\sigma_v$	76		
Doğrusal olmayan	$55.3q_c^{0.377}$	80	$246.4q_c^{0.182}$	57
	$41q_c^{0.212}\sigma_v^{0.461}$	82		



Şekil 6.33. S-Dalga Hızının CPT- q_c Uç Mukavemeti ve Efektif Düşey Gerilme İle Değişimi

6.6.3. Dinamik Sonda Deneyi-Sismik Dalga Hızları

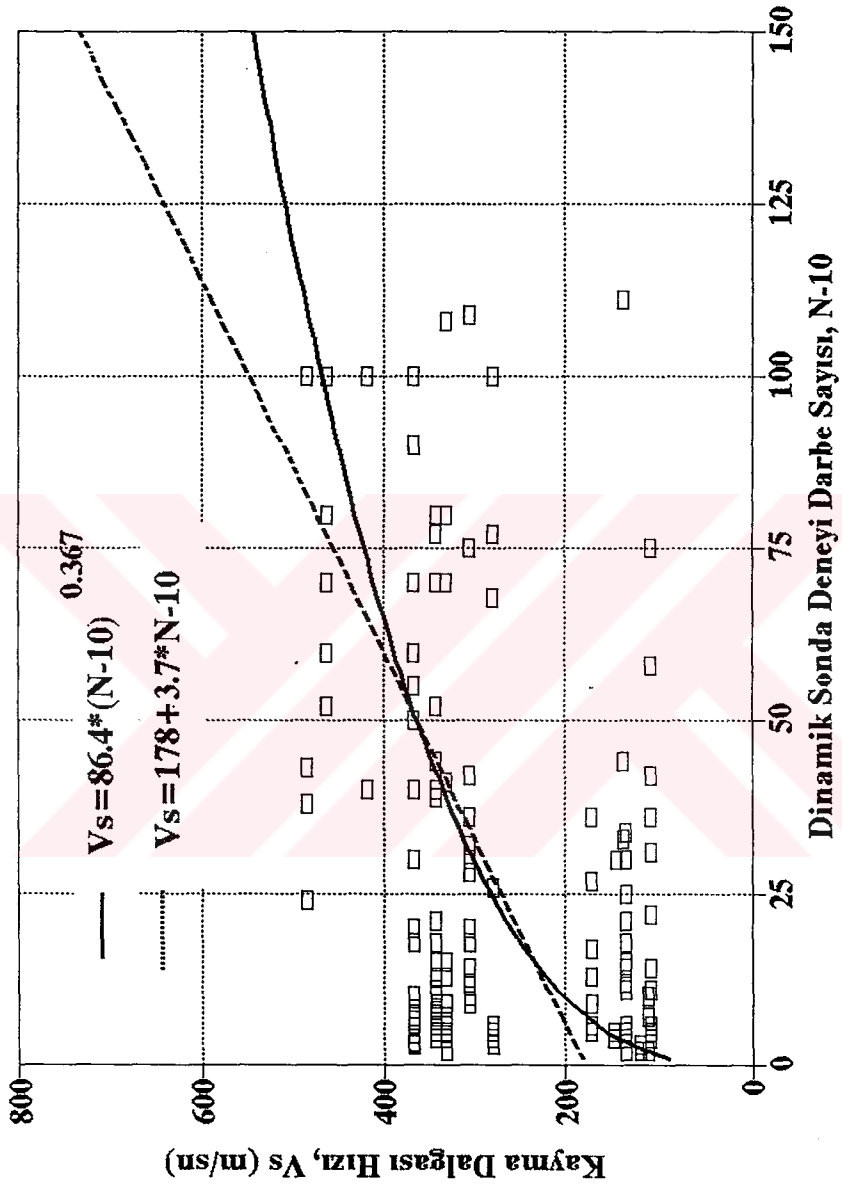
Dinamik Sonda Deneyi, zemin mukavemet özellikleri, yerleşim sıklığı ve sağlam tabaka derinliğini tespit etmekte kullanılan ve arazide uygulaması diğer arazi deneylerine göre daha kolay ve ekonomik olan bir sondalama deneyidir. Bu çalışmada arazi deneylerinde hafif ağırlıklı motorize sonda aleti kullanılmıştır. Deneyler mevcut zemin koşullarına göre, 10 darbe için giriş miktarların bulunması ve 10 cm penetrasyon için gerekli darbe sayısının bulunması olarak iki şekilde uygulanmıştır. Ancak değerlendirme ve yorumlama açısından tüm deney sonuçları 10 cm giriş için gerekli darbe sayısına (N_{10}) dönüştürülmüştür. Çeşitli yerleşim sahalarında 250 civarında dinamik sonda deneyi yapılmıştır. Dinamik sonda deneyinde CPT deneyinde olduğu gibi değerler sürekli olarak alınmakta buna karşılık kayma dalgası hızı tabaka içinde bir ortalama sabit değere sahip olmaktadır. Dinamik Sonda deneyi sonuçlarının derinlikle değişiminde her 10 cm aralıkta bir darbe sayısı bulunmakta ve aynı tabaka içinde bu darbe sayıları birbirine oldukça yakın değerler vermektedir. Bu yüzden derinlik boyunca ve aynı tabaka içinde yer alan bu değerlerin ortalaması alınarak sonda sonuçlarında bir azaltma yapılmıştır. Böylece sabit hıza sahip bir tabaka içinde, aynı hıza onlarca değer yerine sadece birkaç sonda sonucu karşı gelmiş ve 75 adet veri seti oluşturulmuştur.

Bu veriler kullanılarak Dinamik Sonda deneyi darbe sayısı N_{10} ile kayma dalgası hızı arasında doğrusal ve doğrusal olmayan ilişkiler aranmış ve yapılan regresyon analizi sonucunda dinamik sonda deneyinden, 10 cm penetrasyon için gerekli darbe sayısı N_{10} 'a bağlı olarak aşağıda verilen bağıntılar elde edilmiştir.

$$V_s = 86.4 * N_{10}^{0.367} \quad (m/sn) \quad (6.53)$$

$$V_s = 3.7 * N_{10} + 178 \quad (m/sn) \quad (6.54)$$

Şekil 6.34'de dinamik sonda deneyi ve kuyu içi sismik deneylerden sağlanan, N_{10} ile V_s arasındaki ilişki görülmektedir. Her iki bağıntının korelasyon katsayıları yaklaşık %70 civarındadır ancak doğrusal ilişkinin katsayısı biraz daha küçük olmaktadır. Dinamik sonda deneyi ile kayma dalgası hızı arasında yapılan regresyon analizi sonucunda elde edilen korelasyon eşitlikleri ve korelasyon katsayıları Tablo 6.10'da verilmiştir. Burada N_{10} , dinamik sonda deneyinde 10 cm giriş için gerekli darbe sayısını göstermektedir.



Şekil 6.34. S-Dalga Hızının Dinamik Sonda Darbe Sayısına (N_{10}) Göre Değişimi

Tablo 6.10. Dinamik Sonda Darbe Sayısı ve Kayma Dalgası Hızı Arasında Elde Edilen Bağlıntılar

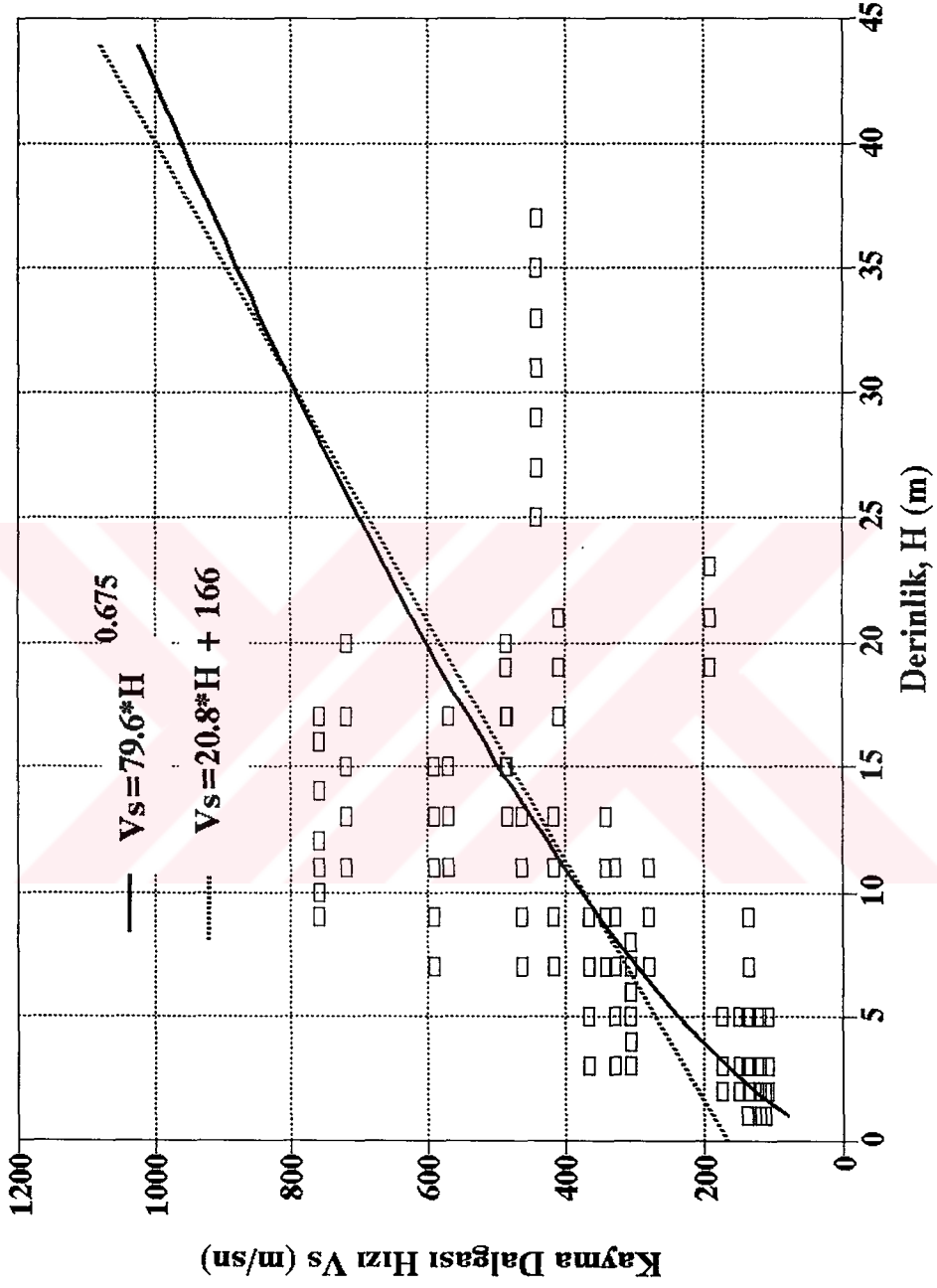
Analiz Yöntemi	Bağıntı V_s (m/sn)	Korelasyon Katsayısı (%)
Doğrusal	$178+3.7N_{10}$	67
Üstel	$86.4N_{10}^{0.367}$	71

6.6.4. Derinlik- V_s İlişkisi

Zeminlerin davranışına etki eden en önemli faktör efektif düşey gerilmedir ve bu gerilmedeki değişiklikler, uygulanan deney sonuçlarını da etkilemekte ve SPT-N darbe sayılarında olduğu gibi elde edilen değerleri efektif gerilmeye göre düzeltme gereği ortaya çıkmaktadır. Zemin tabakasının bulunduğu derinlik, birim hacim ağırlık ve YASS'nin bir fonksiyonu olan efektif gerilme aynı zamanda, arazi ölçümlerine dayanan ve çeşitli zemin özelliklerinin değişken olarak alındığı korelasyonları da etkilemektedir. Çeşitli araştırmacılar tarafından yapılan çalışmalardan, zeminin etkisinde kaldığı düşey gerilmenin, kayma dalgası hızı ile penetrasyon dirençleri arasındaki ilişkiden daha çok, V_s -derinlik değişimine önemli etkisinin olduğu sonucuna varılmıştır (Sykora ve Stokoe, 1983).

Bu çalışma kapsamında, arazide yapılan V_s ölçümleri ile derinlik ilişkisi de incelenmiştir. Sismik deneylerin uygulandığı sondaj kuyularından alınan numuneler üzerinde her türlü laboratuvar deneylerinin yapılması mümkün olmadığı için zeminlerin yerindeki gerçek yoğunlukları toplanan verilerin tamamında belirlenememiştir. Bununla birlikte yapılan deneylerden birim hacim ağırlıkların 1.70-1.90 t/m³ arasında değiştiği bulunmuştur. Uygulanan kuyu içi sismik deneyleri genel olarak YASS üzerinde kalmıştır. Bu sebepten kayma dalgası hızının, düşey gerilmenin yanında derinlikle değişimi de incelenmiştir. Ölçümlerin alındığı derinlikler ve bu derinliklerdeki kayma dalgası hızları arasındaki ilişki Şekil 6.35'de verilmiştir. 65 veri ile yapılan regresyon analizi sonucunda V_s ile derinlik arasında doğrusal ve doğrusal olmayan aşağıda verilen korelasyon ifadeleri elde edilmiştir.

$$V_s = 20.8 \cdot H + 166 \quad (\text{m/sn}) \quad (6.55)$$



Şekil 6.35. S-Dalga Hızının Derinliğe Göre Değişimi

$$V_s = 79.8 \cdot H^{0.675} \quad (\text{m/sn}) \quad (6.56)$$

Bağıntılardaki H, metre biriminde derinliği göstermektedir. Şekilde görülebileceği gibi bu iki ilişki birbirine oldukça yakın değerler vermesine rağmen, korelasyon katsayıları birbirinden farklıdır ve üstel ifadenin korelasyon katsayısı %85, diğerinin ise %71 olarak bulunmuştur. İlk bağıntı, derinliğin sıfır olduğu durumda yani yüzeyde en düşük hız değerinin 166 m/sn olacağına işaret etmektedir.

Kayma dalgası hızının derinlik ile değişiminin incelendiği verilere, ilgili derinliklerdeki SPT-N darbe sayıları da ilave edilerek bu değişim yeniden incelenmiş ve aşağıdaki bağıntı elde edilmiştir.

$$V_s = 72 \cdot N^{0.267} \cdot H^{0.283} \quad (\text{m/sn}) \quad (6.57)$$

Bağıntının korelasyon katsayısı %82.5 dir ve H metre cinsinden derinliği göstermektedir.

6.7. PENETRASYON DİRENÇLERİ ARASINDAKİ İLİŞKİLER

Bu çalışma kapsamında arazi uygulamalarında Standart Penetrasyon Deneyi (SPT), Koni Penetrasyon Deneyi (CPT) ve Dinamik Sonda (DS) olmak üzere üç değişik penetrasyon deneyi yapılmıştır. Bu deney sonuçlarından elde edilen verilerden penetrasyon dirençleri kullanılarak, yapılan sismik dalga hızı ölçümleri ile çeşitli korelasyon eşitlikleri geliştirmiştir. Bu korelasyon bağıntıları, sismik deneylerin yapılamadığı veya sınırlı sayıda yapıldığı durumlarda kayma ve basınç dalgası hız değerlerini penetrasyon dirençlerine bağlı olarak yaklaşık tahmin edebilmek amacı ile geliştirilmiştir. Aynı düşünceyle arazide uygulanan penetrasyon dirençlerini birbirleri cinsinden ifade etmek için bu deneyler arasında ilişkiler aranmıştır. Bu amaçla CPT q_c uç mukavemeti ile SPT-N darbe sayısı, q_c ile dinamik sonda deneyi darbe sayısı N_{10} ve SPT-N darbe sayısı ile N_{10} arasında korelasyon bağıntıları elde edilmiştir.

6.7.1. CPT ve SPT Deneyleri

SPT deneyleri ile bu deneyin yapıldığı sondaj kuyularının yanlarında uygulanan CPT deneylerinden elde edilen veriler kullanılarak q_c uç mukavemeti ve SPT-N darbe sayısı arasında bir ilişki kurulmaya

çalışılmıştır. Bu amaçla SPT deneyinde son 30 cm girişe karşı gelen q_c değerleri alınarak toplam olarak 115 veri sağlanmıştır. N darbe sayısı ile q_c 'nin değişimi Şekil 6.36'da gösterilmiştir. Geniş bir alanda dağılım sergileyen bu veriler kullanılarak yapılan regresyon analizi sonucunda iki penetrasyon direnci arasında aşağıdaki bağıntı elde edilmiştir.

$$q_c = 7.3 \cdot N^{0.603} \quad (\text{kg/cm}^2) \quad (6.58)$$

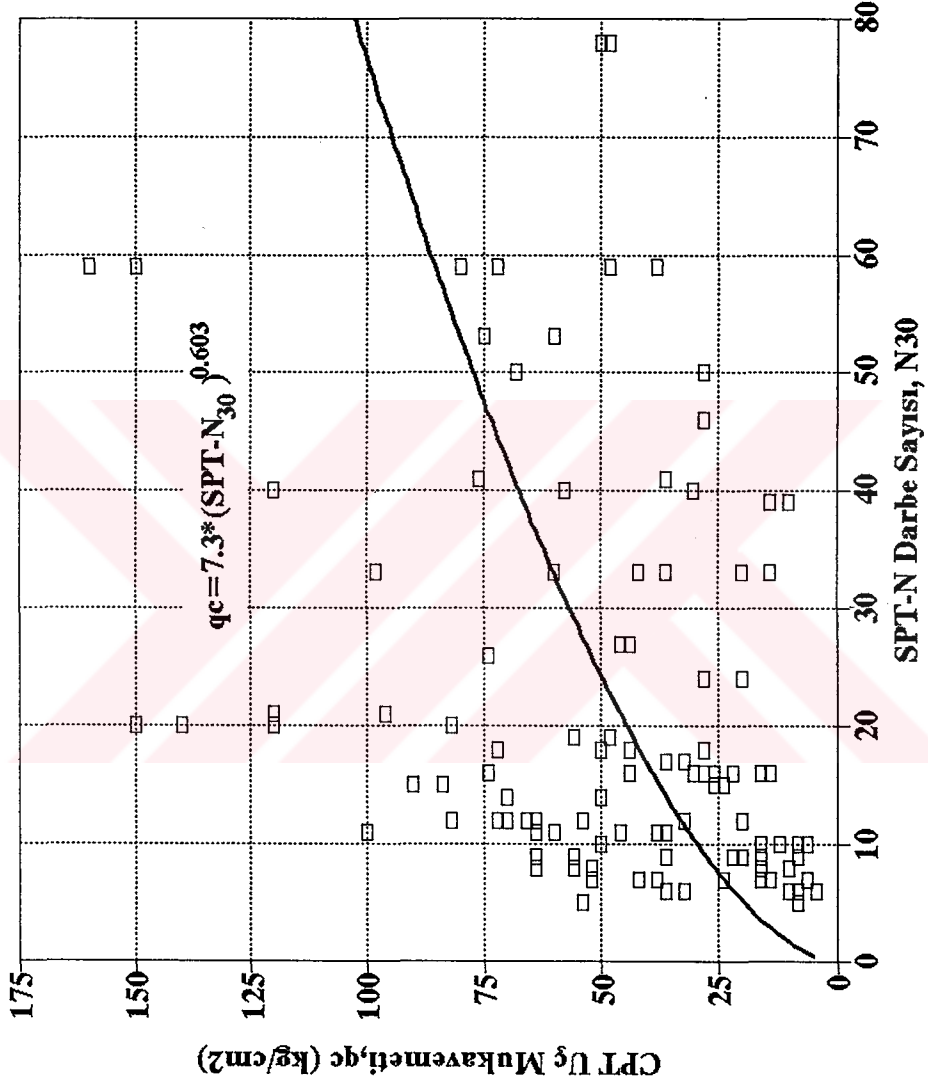
Korelasyon katsayısı %54 civarında kalan bu bağıntıda q_c kg/cm² biriminde CPT uç mukavemetidir. Veriler N sayısının 5-20 ve q_c 'nin 5-100 kg/cm² değerlerinde bir yığılma göstermektedir. Bölgede yapılan CPT deneyleri genellikle sıkı yerleşimli ve kısmen çimentolaşmış çakıl tabakası içinde son bulmuştur. SPT deneylerinin de uygulanamadığı bu tabaka derinliği ortalama 4-8 m civarındadır. Bu sebepten korelasyonlarda kullanılan veriler genelde kum ve siltli kil/killi silt tabakalarına aittir ve belli bir bölgede yığılma göstermektedir.

6.7.2. CPT ve DS Deneyleri

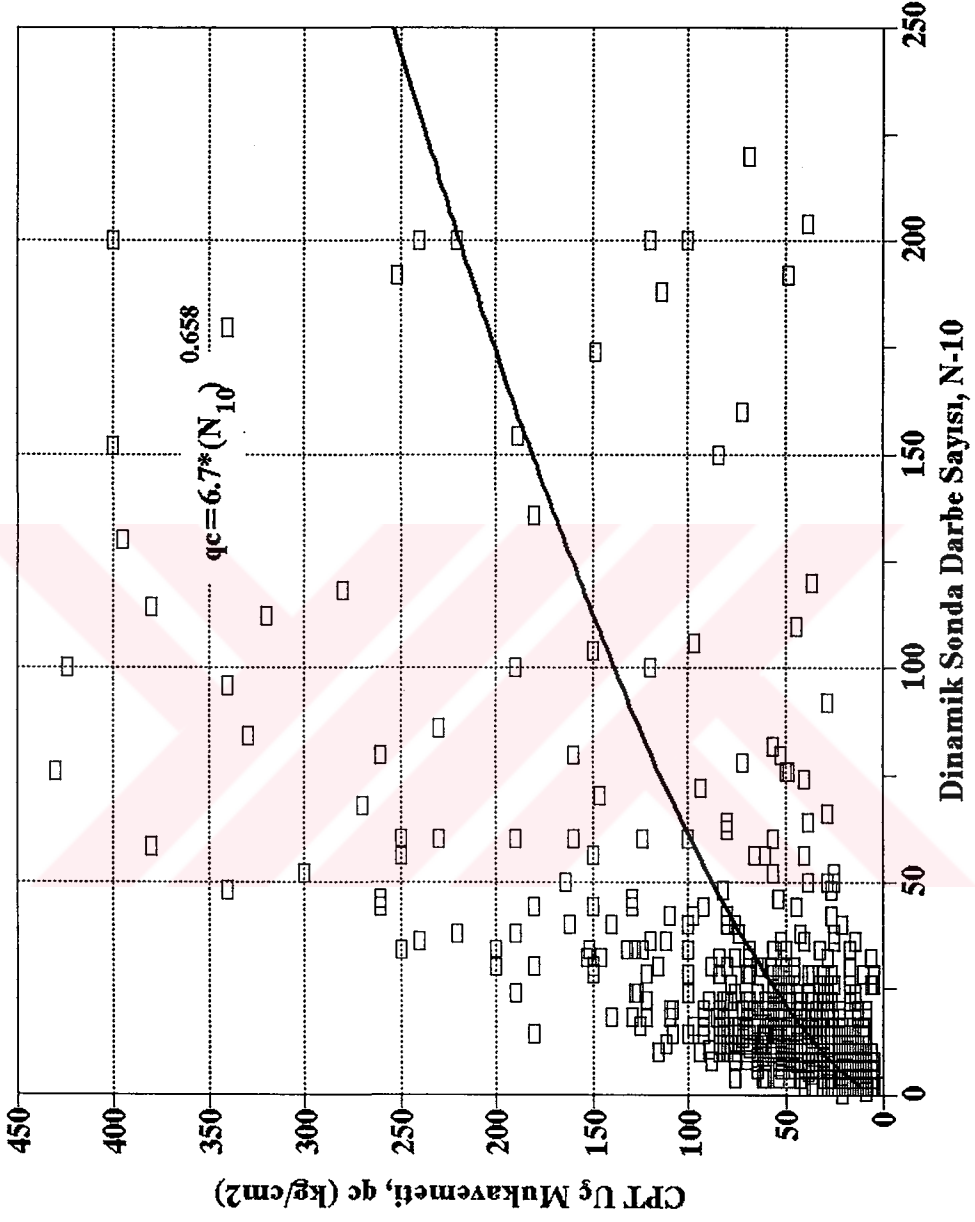
CPT uç mukavemeti q_c ile dinamik sonda deneyi darbe sayısı N_{10} 'nun değişimi Şekil 6.37'de verilmiştir. CPT deneyinin yapıldığı noktalara yakın yerlerde uygulanan dinamik sonda deneyi, 10 cm giriş için gerekli darbe sayısının belirlenmesi şeklinde yürütülmüştür. CPT deneyi ise 20 cm aralıklarla q_c değeri okunarak yapılmıştır. Böylece toplam olarak 686 adet veri sağlanmıştır. Verilen şekilden de görüleceği gibi q_c 'nin 150 kg/cm² ve N_{10} 'nun 50 değerine kadar olan bölgede verilerde bir yoğunluk sözkonusudur. CPT deneyinde olduğu gibi Dinamik Sonda deneyinde de sıkı çakıl tabakası penetrasyon derinliğinde ve darbe sayısında belirleyici etken olmuştur ve bu veriler genelde kum ve siltli kil tabakalarından alınmıştır. 686 adet verinin tamamı kullanılarak yapılan analiz sonucunda CPT ile Dinamik Sonda deney sonuçları arasında korelasyon katsayısı %66 olan,

$$q_c = 6.7 \cdot N_{10}^{0.658} \quad (\text{kg/cm}^2) \quad (6.59)$$

bağıntıya ulaşılmıştır. Bağıntıda q_c 'nin birimi kg/cm² dir ve N_{10} Dinamik Sonda deneyinde 10 cm giriş için darbe sayısını göstermektedir.



Şekil 6.36. SPT-N ve CPT-q_c ilişkisi



Şekil 6.37. CPT- q_c Uç Mukavemeti ve Dinamik Sonda darbe sayısı N_{10} ilişkisi

6.7.3. SPT ve DS Deneyleri

Açılan sondaj kuyularının yanlarında yapılan Dinamik Sonda deneyi darbe sayısı N_{10} ile bu kuyularda elde edilen SPT-N darbe sayısının değişimi Şekil 6.38'de verilmiştir. SPT deneyinin yapıldığı derinlikte son 30 cm giriş miktarına karşı gelen N_{10} değerleri alınmıştır. Dinamik Sonda deneyinde her 10 cm ara ile bir darbe sayısı bulunduğundan, aynı seviyede uygulanan SPT-N darbe sayısına en fazla üç N_{10} değeri karşı gelmektedir. Ancak aynı tabaka içinde birbirini takip eden bu sayılar da çoğu zaman eşit olmaktadır. Toplam 94 adet veri ile yapılan analiz sonucunda,

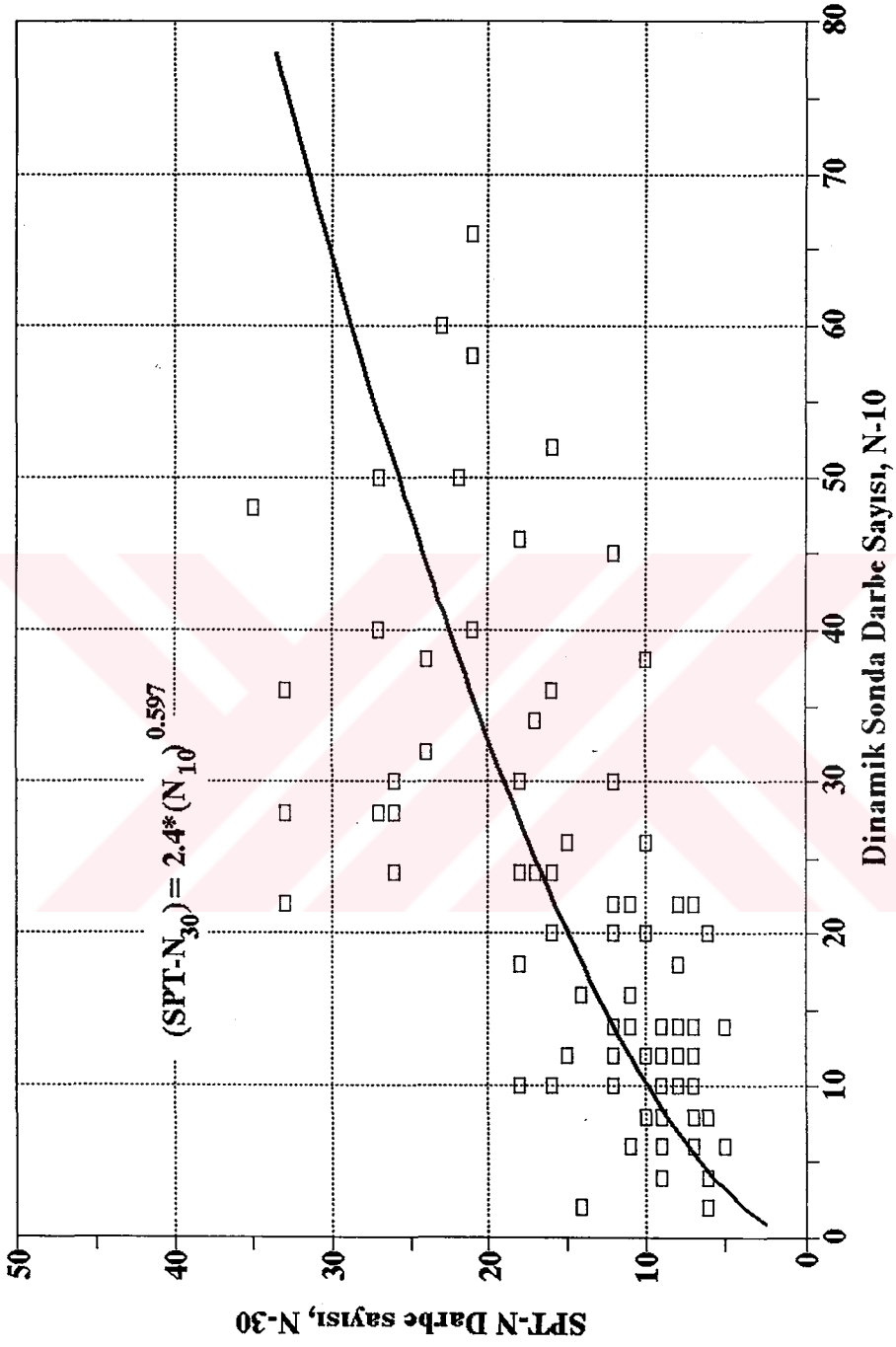
$$N=2.4*N_{10}^{0.597} \quad (6.60)$$

bağıntısı elde edilmiştir. Korelasyon katsayısı %84 olan bu bağıntıda N , SPT deneyi darbe sayısını N_{10} ise 10 cm penetrasyon için gerekli Dinamik Sonda darbe sayısını göstermektedir.

Arazi penetrasyon deney sonuçları arasında geliştirilen diğer bağıntılarla karşılaştırıldığında, SPT ile Dinamik Sonda deneyi en yüksek korelasyon katsayısına sahip bağıntıyı vermektedir. CPT deneyi, konik bir sondayı sabit bir basınçla zemin içine itilerek uygulanırken diğer iki deney dinamik olarak yapılmaktadır. Uygulama yöntemlerindeki bu benzerlik korelasyon eşitliklerine de yansımaktadır.

6.8. SONUÇLAR

Bu bölümde yer alan çalışmaların sonuçları Erzincan'da uygulanan arazi deneylerine dayanmaktadır. 1992 depreminden sonra bölgede başlatılan inceleme ve araştırma kapsamında SPT, CPT ve Dinamik Sonda olmak üzere üç ayrı arazi penetrasyon deneyleri uygulanmış ve açılan sondaj kuyularının bazılarında Aşağı Kuyu ve Karşıt Kuyu sismik yöntemleri ile kayma ve basınç dalgası hızları ölçülmüştür. Zemin dinamik özelliklerini belirlemek amacı ile uygulanan sismik deneylerden dalga hızlarının derinlikle değişimi bulunmuştur. Noktasal bir kaynaktan üretilen sismik dalgalar, zemin tabakalarının elastisite modülü ve yoğunluk gibi fiziki özelliklerine bağlı olarak yayıldıklarından ölçülen dalga hızları önemli bilgiler içermektedirler. Sismik yöntemlerde üretilen dalgalar, zeminlerin elastik davranış sergiledikleri deformasyon sınırları içinde kaldığından, elastik ortamlar için verilen bağıntılardan dalga hızlarına bağlı olarak



Şekil 6.38. SPT-N ve Dinamik Sonda N_{10} ilişkisi

kayma modülü, Poisson oranı gibi özellikler kolayca hesaplanabilmektedir. Yapılan ölçümlerden kayma dalgası hızı için yüzeye yakın kesimlerde yer alan zemin tabakaları ve siltli kil, killi silt içinde 100-140 m/sn, siltli ve çakıllı kum tabakalarında 190-360 m/sn, sıkı yerleşime sahip kısmen çimentolaşmış çakıl tabakası içinde ise yaklaşık 400-750 m/sn değerleri elde edilmiştir. Bu tabakalara ait basınç dalgası hızları ise 300-450, 500-750 ve 800-2800 m/sn aralıklarında ölçülmüştür. Kuyu içi sismik yöntemler ile yapılan ölçümlerden elde edilen dalga hızı değerleri ve sondaj kuyularında ölçümlerin uygulandığı derinliklerde karşılaşılan zemin tabakalarının kısa tanımı ile birlikte Tablo 6.11'de verilmiştir. Tabloda yer alan V_s , kayma dalgası hızını V_p ise basınç dalgası hızını göstermektedir.

Bu çalışmada kuyu içi sismik yöntemleri ile ölçülen bu dalga hızları ile arazi incelemeleri sırasında uygulanan çeşitli penetrasyon deney sonuçları arasındaki ilişkiler araştırılmıştır. Yapılan analizlerde SPT-N darbe sayısı, CPT- q_c uç mukavemeti ve Dinamik Sonda darbe sayısı N_{10} değişken olarak alınmış ve çeşitli korelasyon eşitlikleri geliştirilmiştir. Ayrıca kayma dalgası hızının derinlik, efektif düşey gerilme ve zemin cinsi ile değişimi de incelenmiş ve iki bağımsız değişken cinsinden kayma dalgası hızını belirlemede kullanılmak üzere korelasyon bağıntıları verilmiştir. V_s -N arasındaki korelasyonlarda SPT-N darbe sayısı, hem düzeltilmemiş hem de derinlik düzeltilmesi yapılmış N_1 değerleri kullanılmıştır. Arazi deneyleri kapsamında, 10 cm penetrasyon için gerekli darbe sayısının bulunması şeklinde uygulanmış çok sayıda Dinamik Sonda deney sonuçları da analizlerde bir değişken olarak ele alınmıştır. Kayma dalgası hızının derinlik ile değişimi incelenerek, derinlikle kayma dalgası hızını tahmin etmekte kullanılabilecek bağıntılar verilmiştir. Yapılan sismik ölçüm derinlikleri, genelde yer altı su seviyesi (YASS) üzerinde kaldığından, YASS ile zemin davranışına etkiyen faktörlerden olan aşırı konsolidasyon oranının etkisi analizlerde dikkate alınmamıştır. Arazide uygulanan SPT, CPT ve Dinamik sonda gibi penetrasyon deney sonuçları kullanılarak bunlar arasında da korelasyon bağıntıları geliştirilmiştir.

Bu araştırma kapsamında kayma dalgası hızı V_s ile arazi penetrasyon deney sonuçları arasında yapılan analizler sonucu elde edilen eşitliklerden önemli görülenleri korelasyon katsayıları ile birlikte aşağıda Tablo 6.12'de topluca verilmiştir.

Tablo 6.11. Arazi Ölçümleri Sonucunda Elde Edilen Hız Değerleri

Sondaj No	Derinlik (m)	V_s (m/sn)	V_p (m/sn)	Zemin Tabakası Tanımı
S1	3-11	330	646	çakıllı, siltli kum
	11-17	482	759	çimentolaşmış çakıl
	17-23	190	759	siltli kum
	23-40	443	1356	çakıllı siltli kum
S3	1-5	138	448	killi silt, kumlu
	5-15	590	-	çimentolaşmış çakıl
	15-22	410	2870	siltli kil
	23-40	443	-	killi, siltli kum
S7	2-9	367	451	çakıllı, siltli kum
	9-18	576	1721	çimentolaşmış çakıl
S8	1-2	110	277	kumlu silt
	2-8	306	703	kumlu, siltli çakıl
	8-18	758	1695	çimentolaşmış çakıl
S9	2-5	108	425	çakıllı, killi silt
	5-14	462	800	kumlu, siltli çakıl
S13	1-4	-	258	killi, çakıllı silt
	4-9	-	556	siltli, kumlu çakıl
	9-18	-	1067	çimentolaşmış çakıl
S14	1-5	120	364	killi, kumlu silt
	5-11	280	532	çakıllı kum
S18	1-5	172	608	kumlu, killi silt
	5-14	418	954	siltli, kumlu çakıl
S19	2-11	135	-	killi silt, siltli kil
	11-20	716	-	çimentolaşmış çakıl
S20	1-5	148	301	kumlu, çakıllı silt
	5-13	343	554	siltli, çakıllı kum
	13-22	465	926	kumlu çakıl

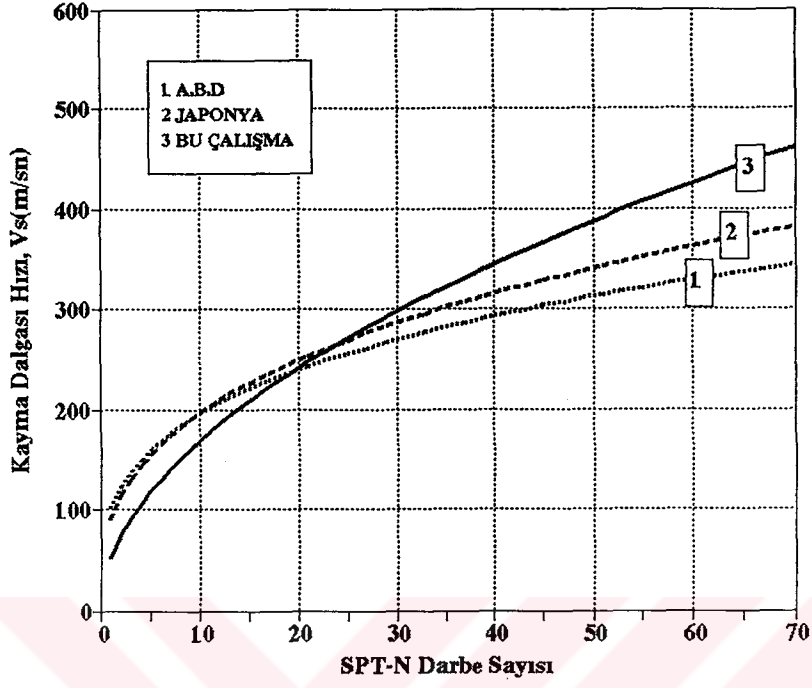
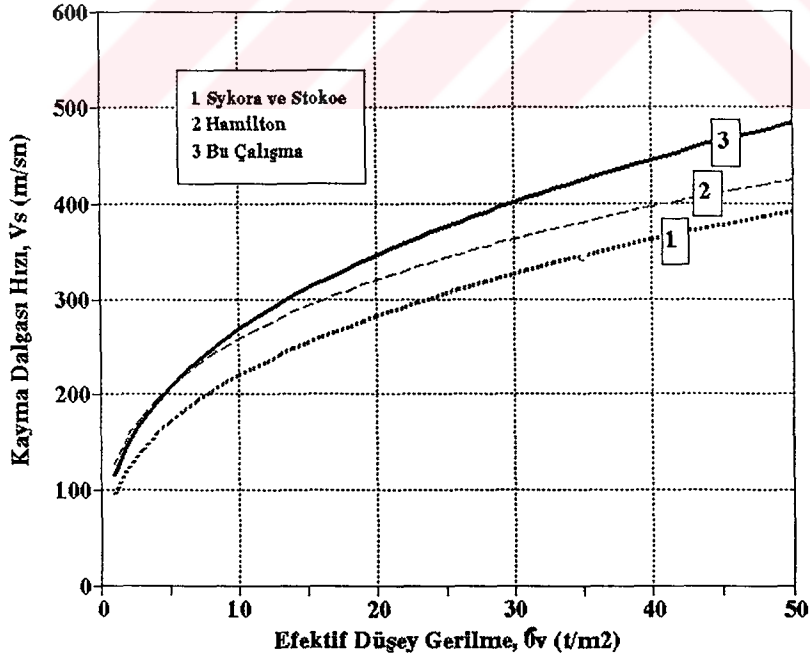
Tablo 6.12. Kayma Dalgası için Korelasyon Eşitlikleri ve Katsayıları

Kullanılan Değişken	Zemin Sınıfı	V_s (m/sn)	Kor. Kats. (%)
SPT-N	Tüm	$51.5N^{0.516}$	81
σ_v (t/m ²)	Tüm	$115.8\sigma_v^{0.367}$	72
SPT-N ve σ_v (t/m ²)	Tüm	$61N^{0.267}\sigma_v^{0.283}$	83
	Kil	$43.7N^{0.324}\sigma_v^{0.270}$	90
	Kum	$54N^{0.332}\sigma_v^{0.221}$	64
	Çakıl	$205.7N^{0.074}\sigma_v^{0.177}$	53
D_{50} (mm)	Kum	$4082D_{50}^{0.247}$	54
D_{50} ve σ_v	Kum	$116.6\sigma_v^{0.409}D_{50}^{0.289}$	78
N_1	Tüm	$71.2N_1^{0.516}$	56
N_1 ve σ_v	Tüm	$47.1N_1^{0.272}\sigma_v^{0.395}$	56
CPT Uç Mukavemeti q_c , (kg/cm ²)	Kil, Kum	$55.3q_c^{0.377}$	80
	Kil, Kum	$0.70q_c+218$	75
q_c ve σ_v	Kil, Kum	$47q_c^{0.212}\sigma_v^{0.461}$	82
Dinamik Sonda Darbe Sayısı (N_{10})	Tüm	$86.4N_{10}^{0.377}$	71
	Tüm	$3.7N_{10}+178$	67
Derinlik H (m)	Tüm	$79.8H^{0.675}$	85
	Tüm	$20.8H+166$	71
SPT-N ve Derinlik	Tüm	$72N^{0.267}H^{0.283}$	82

Bağıntılar sonucu hesaplanan hız değeri m/sn cinsindendir. Tabloda kullanılan değişkenlerden SPT-N son 30 cm giriş için gerekli Standart Penetrasyon darbe sayısı, σ_v t/m² biriminde düşey efektif gerilme, D_{50} mm biriminde ortalama dane çapı, N_1 düzeltilmiş SPT-N darbe sayısı, q_c kg/cm² biriminde CPT uç mukavemeti, N_{10} Dinamik Sonda deneyinde 10 cm giriş için gerekli darbe sayısı, H merte biriminde derinlik olmaktadır.

Kayma dalgası hızı ile düzeltilmemiş SPT-N darbe sayıları arasında yapılan regresyon analizi sonucunda elde edilen doğrusal olmayan bağıntının korelasyon katsayısı %81 olarak bulunmuştur. Geliştirilen bu bağıntının daha önce yapılan çalışmalardan bulunan korelasyonlar ile karşılaştırılması Şekil 6.39'da verilmiştir. SPT-N sayılarının belli değerine kadar daha düşük hız veren bu ifadeden, yüksek N değerlerinde diğerlerine göre daha yüksek hız tahmini yapılmaktadır. N sayısının yaklaşık 30 değerinden sonra belirgin bir farklılaşma göze çarpmaktadır. Bu farklılığın, SPT deneyinin arazide uygulanması sırasında kullanılan donanım ve deney tekniklerinin birbirinden farklı olması ile analizlerde kullanılan veri sayısından kaynaklanmakta olduğu düşünülmektedir. Derinlik düzeltilmesi yapılmış SPT-N sayıları, N_1 ile yapılan analizlerde daha düşük korelasyon katsayıları elde edilmiştir. Ancak bu korelasyonlarda, düşey gerilme ikinci bağımsız değişken olarak dikkate alındığında korelasyon katsayılarının yükseldiği görülmüştür. Buradan bu tür korelasyonlara zemin tabakalarının etkisinde kaldığı efektif düşey gerilmenin önemli derecede etkili olduğu sonucuna varılmaktadır. Kayma dalgası hızını düşey efektif gerilmeye bağlı olarak tahmin edebilmek amacı ile tüm zemin sınıfı için geliştirilen bağıntının, diğer bazı araştırmacılar tarafından önerilenler ile karşılaştırması Şekil 6.40'da verilmiştir. Bu şekilden de görülebileceği üzere genel olarak, bu çalışma kapsamında elde edilen bağıntıdan aynı düşey gerilme seviyesinde daha yüksek hız değerlerine ulaşılmaktadır. Efektif gerilmenin 10 t/m² değerine kadar Hamilton tarafından verilen bağıntı ile aynı hıza ulaşılırken diğerine göre yaklaşık %18 daha yüksek hız değerleri elde edilmektedir. 20 t/m² düşey gerilme için bu farklılık sırası ile %6 ve %20 olmaktadır.

Kayma dalgası hızının, SPT-N darbe sayısı ve düşey gerilme ile değişiminde zemin tipinin etkisini araştırmak için arazi verileri kil, kum ve çakıl olmak üzere üç ana sınıfa ayrılmıştır. Yapılan analiz sonucunda en yüksek korelasyon katsayısı %90 ile kil grubu zeminlerde, en düşük ise %53 ile çakıl grubu zeminlerde elde edilmiştir. Korelasyon katsayıları farklı olmasına karşılık tüm zemin, kil ve kum grubu için elde edilen bağıntılardan aynı N ve düşey gerilme seviyelerinde genel olarak benzer hız değerleri hesaplanmakta, ancak çakıl sınıfı için geliştirilen bağıntı ise bu değerlerin oldukça üzerinde yer almaktadır. Buradan aynı efektif gerilme altında kayma dalgası hızı, dane boyutu ile birlikte genelde bir artış gösterdiği sonucu çıkmaktadır. Arazi sondajlarından elde edilen

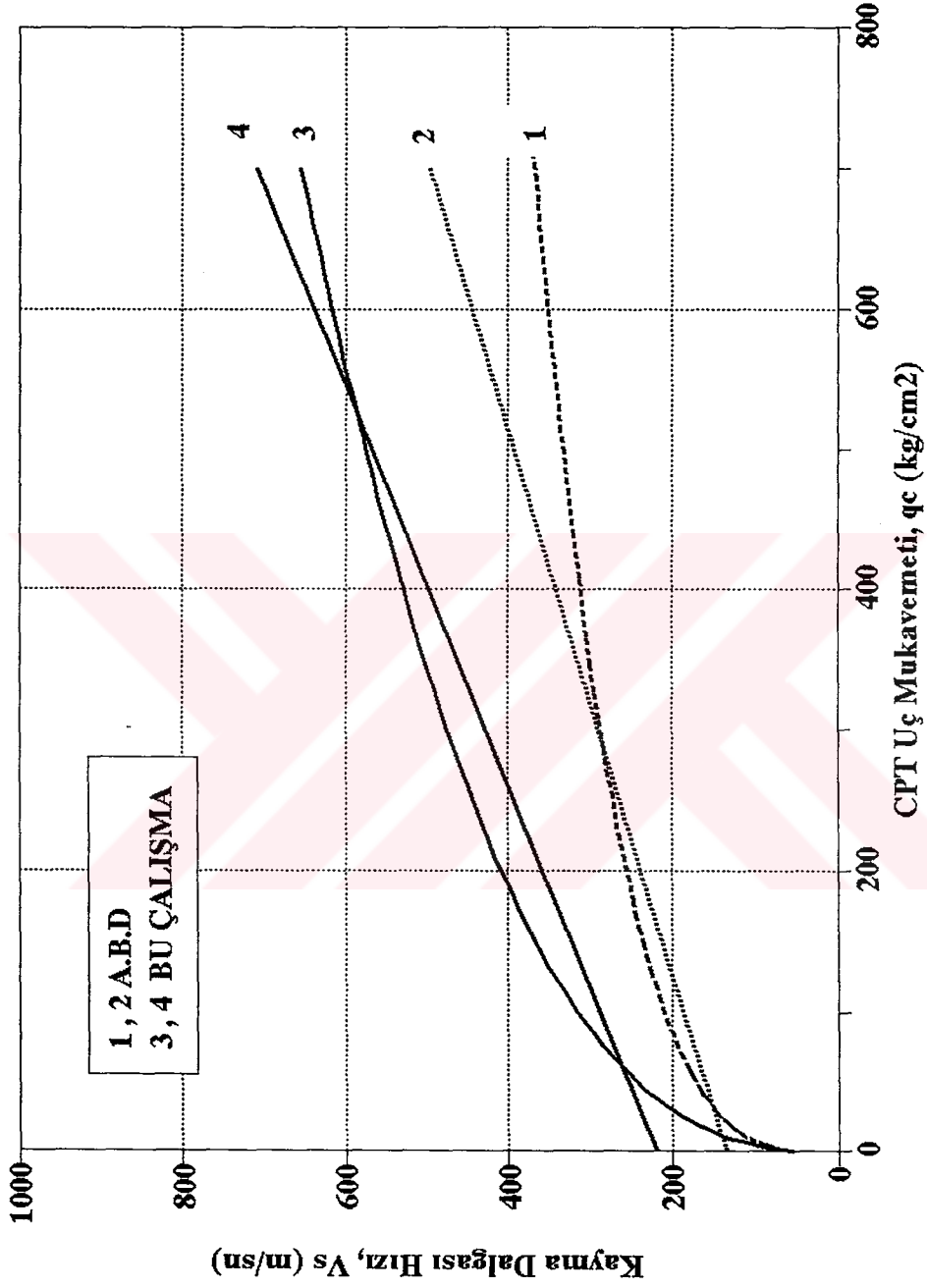
Şekil 6.39. V_s -N Bağlılıklarının KarşılaştırılmasıŞekil 6.40. V_s -Düşey Gerilme Bağlılıklarının Karşılaştırılması

numuneler üzerinde yapılan laboratuvar deneylerinden kumlar için bulunan ortalama dane çapı (D_{50}) de bu çalışmada kayma dalgası hızını içeren korelasyonlarda bir değişken olarak alınmıştır. Sadece D_{50} 'ye bağlı olarak bulunan bağıntının korelasyon katsayısı %54 mertebesinde kalmasına rağmen, bu bağıntıya düşey gerilme ikinci bir değişken olarak katıldığında korelasyon katsayısı %78'e ulaşmıştır.

CPT uç mukavemeti q_c ile kayma dalgası arasında yapılan analizler sonucunda doğrusal ve doğrusal olmayan bağıntılar elde edilmiştir. Bu eşitlikler ile önceki çalışmalardan elde edilen bağıntıların karşılaştırması Şekil 6.41'de verilmiştir. Görüldüğü gibi hem doğrusal hemde üstel formdaki ifadeler önceki çalışmaların üzerinde yer almaktadır. Bunun sebebi deneylerde kullanılan alet ve uygulama teknikleri ile sismik deney teknikleri arasındaki ayrımdır. Karşıt Kuyu yöntemi ile kayma dalgası hızları tabaka içinde doğrudan bulunabilmekte, Aşağı Kuyu yönteminde ise bu değerler çizilen derinlik-zaman grafiklerden hesaplanmaktadır. Bu yüzden aynı tabaka içinde hız sabit kalmakta ve aynı hıza bir çok uç okumaları karşı gelmektedir.

Derinlikle kayma dalgası hızının değişimi, ölçüm derinliklerine bağlı olarak yaklaşık 40 m ye kadar incelenebilmiştir. Yapılan analiz sonucunda yüzeyde en düşük V_s 'in 166 m/sn mertebesinde olduğu bulunmuştur. Derinlikle hızın artış göstermesine karşılık uygulanan arazi deneylerinde, zemin kesitinde ince ve kaba daneli tabakaların aralanmalı olarak yer alması nedeni ile, yüksek hıza sahip tabakalar altında daha düşük hızlı tabakalar ile karşılaşmıştır. Yapılan analizlerden elde edilen korelasyon bağıntısının önceki çalışmalarla bir karşılaştırılması Şekil 6.42'de verilmiştir. Bu çalışma sonucu bulunan ifade, diğerlerine göre yaklaşık 8 m den sonra daha yüksek hız değerleri vermektedir. Derinlik ile kayma dalgası hızı ilişkisinin incelendiği veriler kil, kum ve çakılı içeren tüm zemin sınıflarına aittir ve arazi deneylerinin uygulandığı Erzincan şehrinde yaklaşık bu derinliklerde, yüksek hıza sahip sıkı, çimentolaşmış ve bünyesinde blok boyutunda malzeme içeren çakıl tabakaları yer almaktadır.

Derinlikle kayma dalgasının arasında görülen bu farklılık, V_s 'in derinlik ve SPT-N darbe sayısı ile değişiminde de görülmektedir. Ohta ve Goto (1978) tarafından zemin tipine göre verilmiş olan (6.14) bağıntısında kaba kum ve çakıl zeminlere ait zemin tipi faktörleri kullanılarak, bu araştırma sonucu



Şekil 6.41. V_s - q_c Korelasyonlarının Karşılaştırılması

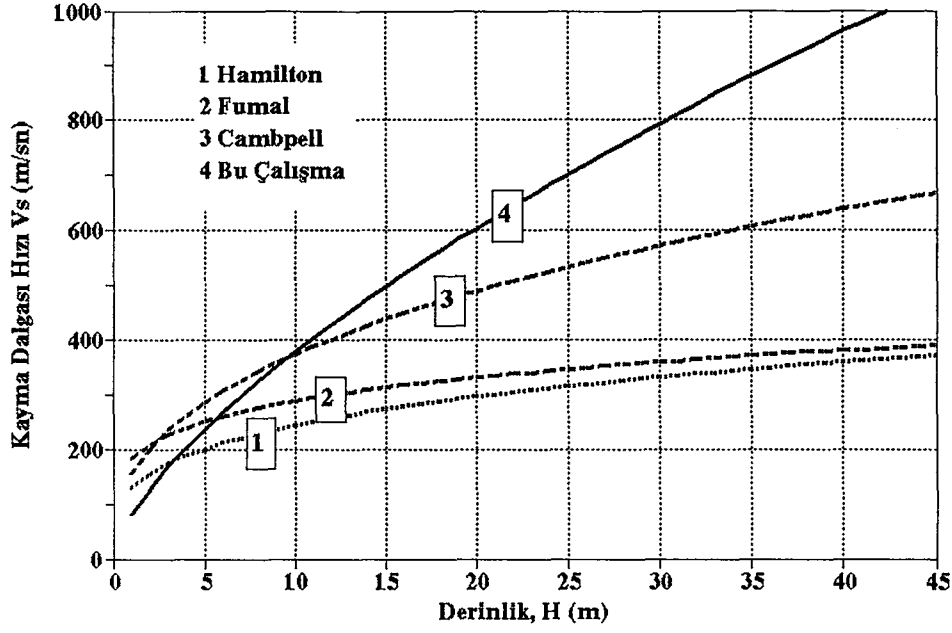
elde edilen ve Tablo 6.12'de verilmiş bağıntısının karşılaştırılması Şekil 6.43'de verilmiştir. Bu değişimde derinlik 5 m için sabit alınmıştır. Elde edilen bağıntı kum ve çakıl için verilen bağıntıların arasında yer almaktadır. SPT-N sayısının 10 değerinden sonra kumlar için verilen ifade ile farklılık görülmekte ve daha yüksek hız vermektedir. Çakıl için verilen bağıntı ile bir paralellik söz konusu olmasına karşılık daha düşük hız değerlerine ulaşılmaktadır.

Arazi uygulamalarında kayma dalgası hızı ölçümlerinin yapıldığı kuyularda basınç dalgası hızları da ölçülmüştür. Bu çalışmada P-dalgası ile diğer arazi deney sonuçlarının ilişkisi de incelenmiştir. SPT-N sayısı ve derinlik düzeltilmesi yapılmış değeri ve CPT uç mukavemeti q_c 'nin, V_s korelasyonlarında kullanılan değerleri ile V_p değişimi incelenerek Tablo 6.13'de verilen bağıntılar elde edilmiştir.

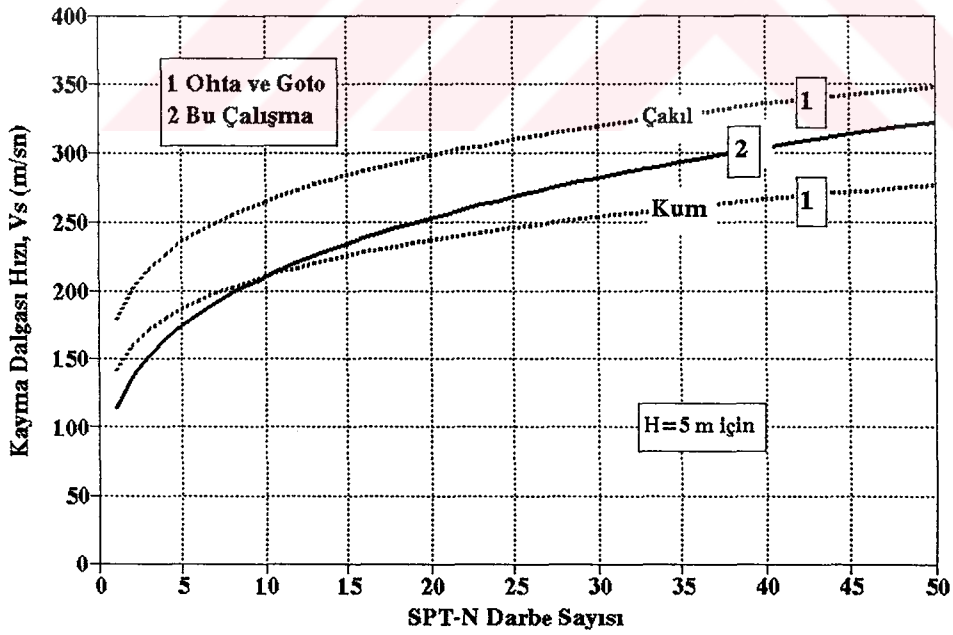
Tablo 6.13. Basınç Dalgası Korelasyon Eşitlikleri ve Katsayıları

Kullanılan Değişken	Zemin Sınıfı	V_p (m/sn)	Kor. Kats. (%)
SPT-N	Tüm	$154N^{0.488}$	72
σ_v (t/m ²)	Tüm	$275.6\sigma_v^{0.409}$	63
SPT-N ve σ_v	Tüm	$186.3N^{0.179}\sigma_v^{0.329}$	68
N_1	Tüm	$192.3N_1^{0.441}$	55
N_1 ve σ_v	Tüm	$164.8N_1^{0.164}\sigma_v^{0.406}$	67
CPT Uç Mukavemeti q_c , (kg/cm ²)	Kil, Kum	$246.4q_c^{0.182}$	57
	Kil, Kum	$0.74q_c+473.6$	56

Korelasyon katsayıları karşılaştırıldığında V_s bağıntıları V_p bağıntılarına göre daha yüksek değerler vermektedir. Özellikle Aşağı Kuyu yöntemi kullanılarak yapılan P-dalgası hız ölçümlerinde, zemin yüzeyinden üretilen dalgalar kuyu içinde belli bir derinlikte bulunan alıcıya hemen hemen dikey olarak gelmektedir. Bu sebepten basınç dalgası V_p , sondaj kuyusuna indirilen kaplama ve kaplama ile zemin arasında yer alan zayıf çimento enjeksiyonundan etkilenmektedir. V_p ölçümlerine etki eden diğer bir faktör ise yeraltı su seviyesi durumudur. Ancak bu çalışma kapsamında



Şekil 6.42. Kayma Dalgası Hızı-Derinlik Bağıntılarının Karşılaştırılması



Şekil 6.43. Kayma Dalgası Hızı-SPT-N ve Derinlik Bağıntılarının Karşılaştırılması

yapılan sismik dalga hız ölçümleri genelde bu seviyenin üzerinde yürütülmüştür.

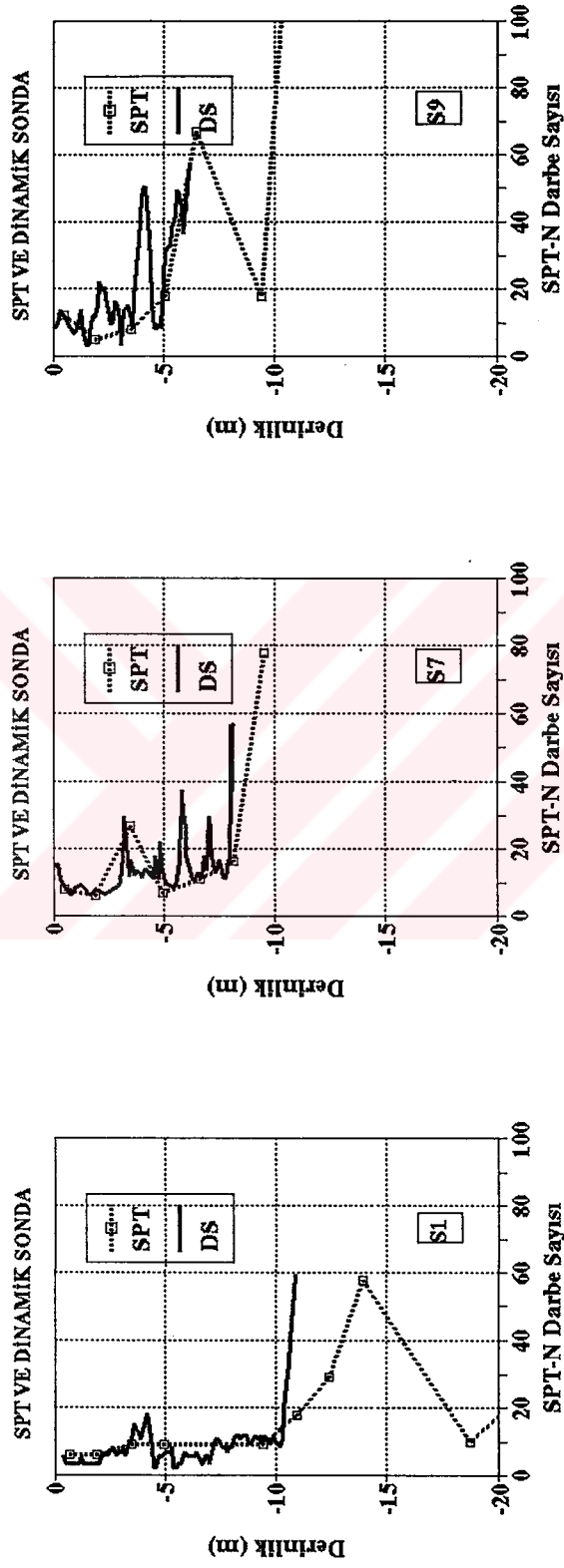
Sismik dalga hızlarını diğer arazi deneyleri sonuçlarından elde edebilmek için çeşitli penetrasyon deneyleri yapılmıştır. Yapılan bu deney sonuçları kullanılarak arazi penetrasyon dirençleri arasında korelasyon bağıntıları geliştirilmiştir. Bu korelasyonlar ve korelasyon katsayıları toplu halde Tablo 6.14'de verilmiştir.

Tablo 6.14. Arazi Penetrasyon Deneyleri Arasında Geliştirilen Korelasyon Bağıntıları ve Katsayıları

Arazi Deneyleri	Bağıntı	Korelasyon Katsayısı (%)
CPT- q_c SPT-N	$q_c = 7.3 N^{0.603}$	54
CPT- q_c DS- N_{10}	$q_c = 6.7 N_{10}^{0.658}$	66
SPT-N DS- N_{10}	$N = 2.4 N_{10}^{0.597}$	84

Bu korelasyon eşitlikleri arasında en yüksek korelasyon katsayısı, SPT-N darbe sayısı ve Dinamik Sonda deneyi N_{10} darbe sayısı arasındaki ilişkiden bulunmuştur. Bu deneylerin uygulamasında benzerlikler bulunmaktadır. Her iki deneyde de sabit ağırlıklı bir kütle belli bir yükseklikten düşürülerek uygulanmaktadır. Uygulama yöntemlerindeki bu benzerlik korelasyon eşitliklerine de yansımaktadır. Standart Penetrasyon Deneyi ve Dinamik Sonda Deneyi arasında geliştirilen korelasyon bağıntısı kullanılarak, S1, S7 ve S9 sondaj kuyuları yanında yapılan sonda deneyi N_{10} darbe sayılarından N hesaplanarak o kuyularda yapılan SPT deneylerinden elde edilen gerçek N değerlerinin derinlikle değişimi karşılaştırma açısından Şekil 6.44'de verilmiştir.

Geoteknik Mühendisliğinde zeminlerin özelliklerini belirlemek için laboratuvarında yapılan deney sonuçlarından elde edilen bilgiler, sadece deney numunelerinin alındığı tabakanın küçük bir kesimini temsil etmekte ve kesitte yer alan tabaka özelliklerinin yeterli yaklaşımla bulunabilmesinde çok sayıda deney numunesine gerek duyulmaktadır.



Şekil 6.44. Dinamik Sonda Sonuçlarından Elde Edilen ve Gerçek SPT-N Sayılarının Derinlikle Değişimi

Ayrıca deneylerde kullanılan numune boyutlarının sınırlı olması, bu zemin numunelerinin çeşitli sebeplerden dolayı örselenmenin etkisinde kalmaları ve arazi şartlarının laboratuvarda tekrar yaratılmaya çalışılması da deney sonuçları üzerinde etkili olmaktadır. Buna karşılık laboratuvar deney teknikleri ile belirlenen zemin özelliklerine etkiyen faktörlerin daha detaylı bir şekilde incelenebilme ve parametrik çalışma yapabilme imkanı vardır. Arazi deney teknikleri ise doğal koşullarda inceleme yapabilme imkanı tanımakta ve deney bulguları zemin yapısının genel özellikleri hakkında bilgiler içermekte, bu bilgiler daha geniş bir bölge için kullanılabilir. Bu yüzden ilgilenilen bölgede zemin özelliklerini bulmada, laboratuvar deneylerinin yanında arazi deneylerinin de kullanılması ve sonuçlarının birlikte değerlendirilmesi daha doğru bir yol olmaktadır. Arazi deney sonuçlarına dayanarak geliştirilmiş olan korelasyon bağıntılarını, arazi ölçümlerinden bulunan sonuçlar gibi değerlendirme yoluna gidilmemelidir. Bununla birlikte bu korelasyonlar arazi sismik deneylerinin yapılamadığı veya sınırlı sayıda uygulanabildiği durumlarda, zemin dinamik özellikleri hakkında bilgi edinmek için yararlı olacağı düşünülmektedir.

BÖLÜM 7

SONUÇLAR VE ÖNERİLER

Çeşitli dış yükler etkisinde zeminlerin davranışı gerilme şekil değiştirme özellikleri ile tanımlanmakta ve bu yükler altında oluşan deformasyon seviyeleri de davranış biçimini belirlemektedir. Her türlü mühendislik malzemesinde olduğu gibi, zeminler de belli deformasyon sınırları içinde elastik davranış sergilemektedir. Zeminlerin elastik davranış gösterdikleri deformasyon sınırları içinde sismik dalgaların yayılma özellikleri, elastik ortamlar için geliştirilmiş ifadelerle incelenebilmektedir. Bir noktasal kaynaktan açığa çıkarılan enerjinin meydana getirdiği düşük deformasyon genliklerindeki elastik dalgalar, zeminlerin fiziksel özelliklerine bağlı olarak yayılmakta ve ortam hakkında önemli bilgiler içermektedirler. Zemin yüzeyinde veya içinde üretilen elastik dalgaların yayılma hızları bilinirse, elastisite modülü, kayma modülü, Poisson oranı ve sönüm oranı gibi diğer önemli özellikler bu hızlardan hesaplanabilmektedir. Zemin dinamik özelliklerinin belirlenmesinde kullanılan bu tür ölçümlere sismik yöntemler adı verilmektedir. Mühendislik uygulamalarında dinamik zemin özelliklerinin arazide belirlenmesinde en uygun yöntemler, Karşıt Kuyu ve Aşağı Kuyu sismik yöntemleri olmaktadır. Kuyu içi sismik yöntemler olarak bilinen bu deney teknikleri, düşük deformasyon genliklerinde yapay olarak üretilen dalgaların bilinen mesafelerde bulunan alıcı noktalarına ulaşması için gerekli zamanın ölçülmesini içermektedir. Karşıt Kuyu yönteminde dalga üreten kaynak ve alıcılar ayrı kuyularda ve aynı derinlikte iken Aşağı Kuyu yönteminde kaynak zemin yüzeyinde yer almaktadır. Bu iki yöntemin arazi uygulamasında, tanımlanabilir dalga üreten bir kaynağa, üretilen dalgaları izlemek için bir veya daha fazla alıcıya, doğru zamanlamalı ve çok kanallı bir kayıt sistemi ile deneyimli arazi ekibine gereksinim duyulmaktadır.

Geoteknik özelliklerin arazi deneyleri yardımı ile belirlenebilmesi için sismik deney sisteminin oluşturulması, bu sistem ile çeşitli zemin koşullarında arazi uygulamalarının gerçekleştirilmesi ve sismik deneylerden

elde edilen dalga hızları ile diğer arazi penetrasyon deney sonuçları arasında pratik uygulamalarda yararlı olabilecek korelasyonların geliştirilmesi bu çalışmanın amacını teşkil etmektedir.

Arazi uygulamalarında, Yüzey Kırılma, Aşağı Kuyu ve Karşıt Kuyu olmak üzere üç değişik yöntem kullanılarak sismik dalga hızları ölçülmüştür. Yöntemlerde dalga hızları, alınan kayıtlardan bulunan dalga varış zamanlarından hesaplanmaktadır. Alınan kayıtlardan bu zamanı hassas bir şekilde belirlemek için doğru tetikleme sistemi ve tanımlanabilir dalga üretimi gerekli olmaktadır. Ayrıca özellikle S-dalga ölçümlerinde, kayıtların aynı kaynak-alıcı yerleşiminde tersine çevrilmiş kaynak ile de alınması analizlerde bu dalga tipinin tanınmasında büyük kolaylık sağlamaktadır. Bu durumda P-dalgası sabit kalırken, S-dalgası parçacık hareketi darbe yönüne bağlı olarak yön değiştirmektedir. Bu yüzden dalga kaynaklarının tekrarlanabilir ve tersine çevrilebilir özellikte olması çok önemlidir. Bu çalışmada sismik ölçümlerde dalga kayıtları bilgisayar ortamına alınmış ve analizleri yazılan bir program ile yapılmıştır. Yüzey ve Aşağı Kuyu yöntemlerinde dalga üretmek için zemin yüzeyine yerleştirilen çelik plaka kullanılmıştır. Basınç (P) dalgası ölçümlerinde bu plakaya düşey, kayma (S) dalgası ölçümlerinde ise her iki yönde yatay darbe uygulamak gerekmektedir. Dalga kaynağının ve alıcıların kuyu içinde bulunduğu Karşıt Kuyu deneyinde, kuyu içinde ölçümlerin yürütüldüğü derinlikte dalga üretmek diğer yöntemler kadar kolay olmamaktadır. Bu çalışmada Karşıt Kuyu deneyinde kuyu içinde istenilen derinlikte dalga üretilmek üzere tekrarlanabilir ve tersine çevrilebilir bir kuyu içi mekanik kaynak (kuyu içi çekici) tasarlanmış ve deneylerde kullanılmıştır. Bu kaynak, genleşebilen kanatlar yardımı ile kuyu kaplamasına sıkıca temas etmekte ve bir düşey eksen üzerinde hareket eden ağırlığın alt ve üst başlığa çarptırılması ile kuyu eksenine dik doğrultuda S-dalgası üretmektedir.

Bu araştırma kapsamında kurulan sismik deney sistemi ile yapılan deneysel çalışmalardan elde edilen genel sonuçlar aşağıda verilmiştir.

1) Karşıt Kuyu ve Aşağı Kuyu gibi kuyu içi yöntemlerinin uygulandığı sahalarda yüzey sismik yöntemleri de uygulanmış ve hız profilleri belirlenmiştir. Kuyu içi yöntemlerine göre daha geniş açıklıkta uygulanmasına karşın yüzey kırılma yöntemi ile elde edilen özellikler daha

yüzeysel kalmakta ve zemin kesitinde ardışık olarak yer alan tabaka özellikleri bu yöntem ile ancak ortalama bir değer olarak belirlenebilmektedir. Özellikle kalın tabakalar arasında bulunan ve alçak hız değerlerine sahip zemin tabakaları hakkında bilgi edinilememektedir. Ayrıca alüvyon tabakalarından oluşmuş bölgede yapılan deneylerde enerjinin bu tabakalar içinde büyük sönüme uğraması nedeni ile daha büyük sismik enerjinin üretilmesi gerekmekte bu ise çoğu durumlarda pratik olmamaktadır. Bu yüzden yüzey yöntemlerinin geoteknik mühendisliğinde zeminlerin dinamik özelliklerinin belirlenmesinde doğrudan kullanılması çok uygun olmamaktadır.

2) Her ölçüm derinliğinde kaynak-alıcı arası mesafenin yaklaşık aynı kaldığı Karşıt Kuyu yönteminde hız profili, Aşağı Kuyu yöntemine göre daha detaylı elde edilebilmektedir. Karşıt Kuyu deneylerinde ölçüm aralıklarının yeteri kadar küçük seçilmesi ile yüksek hızlı tabakalar arasında yer alan ve kalınlığı fazla olmayan daha düşük hızlı tabakalara ait özellikler de belirlenebilmektedir. Aşağı Kuyu'da ise bu tür tabakaların farkına varılamaması ihtimali bulunmaktadır. Bununla birlikte zemin tabakaları için her iki yöntem ile belirlenen hız değerlerinde büyük farklılıklar bulunmamaktadır.

3) Aşağı Kuyu deney yönteminde dalga kaynağı zemin yüzeyinde yer aldığından, ölçüm derinliğinin ve kaynak-alıcı kuyusu mesafesinin artması ile birlikte kayıtların kalitesinde bir azalma görülmektedir. Derin ölçümlerde dalga genlikleri, kayıt sisteminin sinyal yükseltici ünitesi yardımıyla büyütülebilmekte fakat bu durumda çevreden gürültü niteliğindeki istenmeyen sesler algılanmakta ve kayıt kalitesi yine azalmaktadır. Aşağı Kuyu deneylerinde zemin yüzeyinde bulunan kaynağın alıcı kuyusundan 3-5 m mesafede yerleştirilmesi ve ölçüm aralıklarının 1-2 m arasında seçilmesi uygun olmaktadır. Bununla birlikte ölçüm aralıkları, zemin kesitinde yer alan tabaka kalınlıklarına bağlı olarak değişik seçilebilmektedir. Kaynak noktasının alıcının bulunduğu kuyuya çok fazla yakın olması durumunda yapılan kaplama ve enjeksiyon, deneyleri etkilemekte ve daha yüksek hız değerlerine ulaşılmaktadır.

4) Sismik deneylerden bulunan dalga hızlarının doğruluğu, alınan kayıtların analizi sonucu elde edilen varış zamanının doğruluğuna bağlıdır. Bu ise tanımlanabilir dalga üretilmesini ve doğru tetikleme sistemini

gerektirmektedir. Alıcıların yerleşimi ise parçacık hareketi doğrultusunda olmalıdır. Dalga üretiminde tekrarlanabilir ve tersine çevrilebilir özellikte olan mekanik kaynaklar bu tür ölçümlerde başarı ile kullanılmaktadır. Kayıtların aynı ölçüm derinliğinde tersine çevrilmiş kaynaktan üretilen dalgalarla alınması S-dalgasını tanımakta yardımcı olmaktadır.

5) Sismik dalgaların, aynı kaynaktan iki farklı mesafede uygun yerleşimde ve aynı özellikte olan alıcılar ile kaydedilmesi ara zamanın bulunmasına olanak sağlamaktadır. Bu zaman, alıcılar arasında dalganın yolculuk süresine eşit olduğundan tetikleme sisteminden bağımsızdır. Ara zaman kullanılarak hesaplanan hızlar, bu yüzden muhtemel tetikleme hatalarını içermezler.

6) Bir ölçüm derinliğinde, yeteri kadar kayıt alınması ve analiz sırasında bunların karşılaştırılması doğru olmaktadır. Böylece ölçümler sırasında farkına varılmadan meydana gelebilecek her hangi bir hatanın etkisi azaltılmış olmaktadır. Ayrıca kayıtların tek darbe ile üretilen dalga yerine birkaç darbeden üretilen dalgaların üst üste biriktirilerek alınması, hem çevrede mevcut gürültü etkisinin azaltılması hem de tek darbeden kaynaklanabilecek hataların yok edilmesi açısından oldukça önemlidir. Ancak bunun için hafızası ve sinyal biriktirme ünitesi olan dijital kaydedicilere ihtiyaç vardır. Bu çalışmada tüm kayıtlar bir dijital sismograf ile en az üç yığma yapılarak alınmıştır.

7) Arazi sönüm ölçümleri, bilinen sismik yöntemler ile aynı kaynaktan iki farklı noktada dalga genliklerinin belirlenmesini içermektedir. Bu tür ölçümlerde kullanılan alıcılar, alıcıların kuyu duvarlarına sabitleme yöntemleri, sondaj kuyularında yapılan kaplama ve enjeksiyon işlemleri aynı özelliklere sahip olmalıdır. Bu çalışmada arazi sönüm ölçümlerinde Aşağı Kuyu yöntemi kullanılmıştır. Bu ölçümler sonucunda elde edilen değerler, laboratuvarında yapılan deney sonuçlarından yaklaşık iki kat daha yüksek bulunmuştur. Bu yüksek değerlerin, kaplama ve tabii zemin ile kaplama arasında yapılan enjeksiyondan kaynaklanmakta olduğu düşünülmektedir. Ölçümlerin yapıldığı sondaj kuyuları, 114 mm çapında açılmış ancak 70 mm iç çapında plastik borular ile kaplanmıştır. Sondaj sırasında kuyu çevresinde oluşan örselenmiş bölge dışında, kaplama ve zemin arası boşluğun doldurulması için yapılan enjeksiyon da dalga genliklerinde çok fazla azalmaya yol açmıştır. Görüldüğü üzere kuyularda

yapılan işlemler sönüm ölçümlerine etkili olmaktadır. Kendini tutabilen zeminlerde sönüm ölçümlerinin kaplamasız kuyularda yapılması, bu mümkün değil ise sondaj kuyularının kullanılacak kaplama çapına uygun açılması ve kaplama-tabii zemin arasının boşluksuz olarak zemin yoğunluğundaki malzeme ile doldurulması uygun olacaktır.

Kuyu içi sismik yöntemlerin uygulandığı sondaj kuyularından elde edilen numuneler üzerinde laboratuvarda ultrases ve rezonans frekans deneyleri yapılmış, sonuçları arazi deneyleri ile karşılaştırılmıştır. Laboratuvar deneylerinin yürütüldüğü numuneler Kampüs uygulamalarının yapıldığı sondajlara aittir. Laboratuvarda aynı tabakalardan alınmış numuneler üzerinde yapılan deney sonuçlarının ortalaması, arazi sismik ölçüm sonuçlarından daha yüksek değerler vermektedir. Üzerinde hiç bir jeolojik yük ve çevre basıncının olmamasına rağmen bu farklılık numune özelliklerinden kaynaklanmaktadır. Deney numunelerinin alındığı tabaka sık kırıklı ve çatlaklı, yer yer ayrılmış bir özelliğe sahiptir. Bu yüzden deney numuneleri daha az çatlak ve kırık içeren kendini tutabilen daha sağlam bölgeleri temsil etmektedir. Bu deney numuneleri 7.5 m derinlikten sonra yer alan tabakalardan sağlanmıştır. Daha sık derinlikten numune elde edilemediği için laboratuvar deneyleri de yapılamamış ve buradaki tabakalar hakkında bilgi edinilememiştir. Arazi deneylerinde deney numunesine gereksinim olmaması, doğal koşullarda uygulanması, sonuçların tüm tabaka için kullanılabilir olması bu deney tekniklerinin üstünlüklerine işaret etmektedir.

Arazi sismik ve laboratuvar ultrases deneylerinden elde edilen hızlarda görülen farklılık, hızların kareleri ile orantılı olan modüllere de yansımaktadır. Ancak rezonans frekans deneyleri sonucunda bulunan kayma ve elastisite modülleri arazi değerlerinin altında kalmaktadır. Rezonans deneylerinde numune boyutları, frekans belirlemeye etki eden önemli bir faktördür. Bu deneylerde numune boyu ile çapı arasındaki oranın ikiden büyük olması uygun olmakta, bu oranın çok büyük ya da küçük olması numuneyi birinci modunda titreştirip rezonansa geçirmek mümkün olmamakta veya bulunan değerlere güven azalmaktadır. Geoteknik incelemeler sırasında açılan sondajlardan alınan numuneler üzerinde yapılan laboratuvar deney sonuçları numunenin alındığı bölgeyi temsil etmektedir. Numuneler ise çeşitli nedenlerle örselenme etkisinde kalmakta ve tabaka özelliklerinin belirlenmesinde çok sayıda numuneye

gerek duyulmaktadır. Arazi deneyleri ise doğal koşullarda uygulanmakta ve başlangıç değerlerine doğrudan ulaşılmaktadır. Bununla birlikte bu tekniklerin uygulanması her zaman kolay ve ekonomik olmamakta, elde edilen özellikler gerçekte oluşandan daha düşük deformasyon seviyelerine ait olmaktadır. Zemin kesitinde yer alan tabakaların dinamik özelliklerin belirlenmesinde, bir program çerçevesinde arazi ve laboratuvar deney yöntemlerinin birlikte kullanılması, sonuçlarının birlikte değerlendirilmesi daha doğru bir yol olmaktadır.

Kuyu içi sismik yöntemleri ile ölçülen dalga hızları ile arazi incelemeleri sırasında uygulanan SPT, CPT ve Dinamik Sonda (DS) gibi çeşitli penetrasyon deney sonuçları arasındaki ilişkilerin incelenmesi de bu çalışma kapsamına dahil edilmiştir. Yapılan analizlerde SPT-N darbe sayısı, CPT- q_c uç mukavemeti ve DS darbe sayısı N_{10} ile sismik dalgalar arasında çeşitli korelasyon eşitlikleri geliştirilmiştir. Bu korelasyonlara derinlik, efektif düşey gerilme ve zemin cinsinin etkisi araştırılmış ve sonuçlar aşağıda verilmiştir.

1) Kayma dalgası hızının SPT-N darbe sayıları ile değişiminde geniş bir alanda dağılım olmasına rağmen yüksek korelasyon katsayısına sahip bir bağıntı elde edilmiştir. Bu bağıntı daha önce yapılan çalışmalardan bulunanlar ile karşılaştırıldığında, SPT-N sayısının yaklaşık 30 değerinden sonra belirgin bir farklılaşma göze çarpmaktadır. Bu farklılığın, SPT deneyinin arazide uygulanması sırasında kullanılan donanım ve deney tekniklerinin birbirinden farklı olması ile analizlerde kullanılan veri sayısından kaynaklanmakta olduğu düşünülmektedir.

2) SPT-N darbe sayılarının derinlik düzeltilmesi yapılmış değerleri (N_1) ile yapılan analizlerde daha düşük korelasyonlara ulaşılmıştır. Ancak bu korelasyonlarda, düşey gerilme ikinci bağımsız değişken olarak dikkate alındığında korelasyon katsayılarında farkedilir bir yükselme göze çarpmaktadır. Zemin tabakalarının etkisinde kaldığı efektif düşey gerilme bu tür korelasyonlara önemli dercede etki etmektedir.

3) Kayma dalgası hızının, SPT-N darbe sayısı ve düşey gerilme ile değişiminde zemin tipinin etkisini araştırmak için yapılan analizlerde en yüksek korelasyon katsayısı kil grubu zeminlerde, en düşüğü ise çakıl grubu zeminlerde elde edilmiştir. Korelasyon katsayıları farklı olmasına

karşılık tüm zemin, kil ve kum grubu için elde edilen bağıntılardan aynı N ve düşey gerilme seviyelerinde genel olarak benzer hız değerleri hesaplanmakta ancak çakıl sınıfı için geliştirilen bağıntı ise bu değerlerin oldukça üzerinde yer almaktadır.

4) Kayma dalgası hızının ortalama dane çapı D_{50} ile değişiminde güçlü bir korelasyon olmamasına karşılık, bu incelemeye düşey gerilme ikinci bir değişken olarak katıldığında korelasyon katsayısını yükselmektedir. Aynı efektif gerilme altında kayma dalgası hızı, dane boyutu ile birlikte genelde bir artış göstermektedir.

5) Kayma dalgası ile CPT uç mukavemeti q_c arasında hem doğrusal hem de doğrusal olamayan ilişkiler mevcuttur. Elde edilen bu eşitlikler, önceki çalışma sonuçlarının üzerinde yer almaktadır. Bu farklılığın, deneylerde kullanılan alet ve uygulama teknikleri ile sismik deney yöntemlerinden kaynaklanmakta olduğu düşünülmektedir. Karşıt Kuyu yöntemi ile kayma dalgası hızları tabaka içinde her ölçüm derinliğinde bulunabilirken, Aşağı Kuyu yönteminde aynı tabaka içinde ortalama bir değer olarak elde edilebilmektedir. Bu yöntemle yapılan ölçümlerde bu yüzden aynı hız değerine bir çok q_c karşı gelmektedir ve korelasyon azalmaktadır. Kayma dalgası ile q_c ilişkisinin Karşıt kuyu deneylerinden elde edilen hız profili ile incelenmesi daha uygun olacaktır.

6) Derinlikle kayma dalgası hızı genel olarak artış göstermekte ve derinliğin sıfır olduğu zemin yüzeyinde en düşük hız 166 m/sn mertebesinde değer vermektedir. Derinlikle hızın artış göstermesinin yanında, arazi uygulamalarında zemin kesitinde ince ve kaba daneli tabakaların ardalanmalı olarak yer alması nedeni ile, yüksek hıza sahip tabakalar altında daha düşük hızlı tabakalar ile de karşılaşmıştır.

7) Korelasyon katsayıları karşılaştırıldığında kayma dalgası hızı için elde edilen bağıntılar, basınç dalgası bağıntılarına göre daha yüksek değerler vermektedir. Özellikle Aşağı Kuyu yöntemi kullanılarak yapılan basınç dalgası ölçümleri, kuyulardaki kaplama ve enjeksiyon kuyuda bulunan su seviyesinden etkilenmektedir.

8) Arazi penetrasyon deney sonuçları arasında yapılan incelemelerden en iyi korelasyon SPT-N darbe sayısı ve Dinamik Sonda deneyi N_{10} darbe

sayısı arasındaki ilişkiden elde edilmiştir. Deney yöntemlerinin uygulamasında görülen benzerlikler korelasyon eşitliklerine de yansımaktadır.

Arazi sismik ve penetrasyon deneyleri sonuçlarına dayanarak geliştirilmiş olan korelasyon bağıntılarının, arazi ölçümlerinin yerini alması mümkün değildir ve bu amprik bağıntılardan tahmin edilen hız değerlerini, yerinde yapılan deneylerden bulunan sonuçlar gibi değerlendirmek yoluna gidilmemelidir. Bununla birlikte bu korelasyonlar arazi sismik deneylerinin yapılamadığı veya sınırlı sayıda uygulanabildiği durumlarda, zemin dinamik özellikleri hakkında bilgi edinmek için yararlı olacağı düşünülmektedir. Arazi ölçümlerinden elde edilebilen sınırlı sayıdaki veri ile geliştirilmiş bu korelasyon eşitliklerinin, sonraki çalışmalardan sağlanacak veriler ile geliştirilmesi daima mümkün olmaktadır. Geoteknik amaçlı yapılacak inceleme ve araştırmalarda arazi deneylerinin bir program çerçevesinde uygulanması ve zemin tipine göre daha fazla veri elde edilmesi arzu edilmektedir.

KAYNAKLAR

- ANDERSON, D.G., WOODS, R.D., (1975), Comparison of Field and Laboratory Shear Moduli, Proceedings of the Conference on In Situ Measurement of Soil Properties, ASCE, Vol. I, Rayleigh, NC, pp. 69-92.
- ANSAL, A.M., İYİSAN, R., ŞENGİZER, B.S., GENÇOĞLU, S., (1993), The Damage Distributions in March 13, 1992 Erzincan Earthquake and Effects of Geotechnical Factors, Proceedings of the Seminar on Soil Dynamics and Geotechnical Earthquake Engineering, Balkema, pp. 413-434.
- ASTM Designation, (1985), Standard Test Method for Fundamental Transvers, Longitudinal, and Torsional Frequencies of Concrete Specimens, ASTM Committee on Standards, C 215-85 1916 Race St., PA 19103, Philadelphia.
- AULD, B., (1977), Cross-Hole and Down-Hole V_s by Mechanical Impulse, Journal of the Geotechnical Engineering Division, ASCE, Vol. 103, GT12, pp. 1381-1398.
- BALDI, G., BELLOTTI, R., GHIONNA, V., JAMIOLKOWSKI, M., PASQUALINI, E., (1981), Cone Resistance in Dry N.C. and O.C. Sands, Proceedings of the Session on Cone Penetration Testing and Experience, ASCE Geotechnical Engineering Division, St. Louis, MO, Oct. 26-30, pp. 145-177.
- BALDI, G., JAMIOLKOWSKI, M., LO PRESTI, D.C.F., MANFREDINI, G., RIX, G.J., (1989), Italian Experience in Assessing Shear Wave Velocity from CPT and SPT, Proceedings of Discussion Session on Influence of Local Conditions on Seismic Response, XII. ICSMFE, Rio De Janerio, pp. 157-168.
- BALLARD, R.F., JR., CHANG, F.K., (1973), Rapid Subsurface Exploration, Review of Selected Geophysical Techniques, Miscellaneous Paper S-73-36, U.S. Army Engineer Waterways Experiment Station, Corps of Engineers, P.O. Box 631, Vicksburg, MS, 39180.
- BALLARD, R.F., JR., McLEAN, F.G., (1975), Seismic Field Methods for In Situ Moduli, Proceedings of the Conference on In Situ Measurement of Soil Properties, ASCE, Vol. I, Raleigh, NC, pp. 121-150.
- BALLARD, R.F., JR., (1976), Method for Cross-Hole Seismic Testing, Journal of the Geotechnical Engineering Division, ASCE, Vol. 102, No. GT2, pp. 1261-1273.

- BALLARD, R.F., STOKOE, K.H., II., McLAMORE, R., (1983), Proposed Standard Test Method for Cross-Hole Seismic Testing, *Geotechnical Testing Journal*, ASTM, Vol.6, No.4, pp. 210-219.
- BAZARAA, A.R.S., (1967), Use of the Standard Penetration Test for Estimating Settlements of Shallow Foundations on Sand, Ph. D. thesis, presented to University of Illinois, at Urbana, IL.
- BAZIW, E. J., (1993), Digital Filtering Techniques for Interpreting Seismic Cone Data, *Journal of Geotechnical Engineering*, ASCE, Vol. 119, No. 6, June, pp. 998-1017.
- BEESTON, H.E., McEVILLY, T.V., (1977), Shear Wave Velocities From Down-Hole Measurements, *Earthquake Engineering and Structural Dynamics*, John Wiley & Sons, Ltd., Vol. 5, No. 2, pp. 181-190.
- BEIGANOUSKY, W., MARCUSON, W., III, (1976), Liquefaction Potential of Dams and Foundations; Laboratory Standard Penetration Tests on Reid Bedford Model and Ottawa Sands, Research Report S-76-2, Report 1, U. s. Army Engineer Waterways Experiment Station, CE, Vicksburg, Miss., 43 pp.
- BORM, G.W., (1978), Methods From Exploration Seismology, Reflection, Refraction and Borehole Prospecting, Proceedings of the Conference on Dynamical Methods in Soil and Rock Mechanics, Karlsruhe, Germany, Vol. III, pp. 87-114.
- BORNITZ, G., (1931), *Über die Ausbreitung der von Großkolbenmaschinen erzeugten Bodenschwingungen in die Tiefe*, J.Springer, Berlin.
- BOSSCHER, P.J. ve SHOWERS, D.R., (1987), Effect of soil type on standart penetration test input energy, *ASCE, Journal of Geotechnical Engineering*, Vol.113, No.GT4, pp.385-389.
- BUTLER, D.K., and CURRO, J.R., JR., (1981), Cross-Hole Seismic Testing Procedures and Pitfalls, *Geophysics*, Vol. 46, No. 1, pp.23-29.
- CAMPANELLA, R. G., ROBERTSON, P. K., GILLESPIE, D. (1986), Seismic cone Penetration Test, in *Use of In Situ Tests in Geotechnical Engineering*, Geotechnical Special Publication, No. 6, Virginia Tech., Blacksburg, VA, pp.116-130.
- CAMPBELL, K., DUKE, C., (1976), Correlations Among Seismic Velocity, Depth and Geology in the Los Angeles Area, University of California at Los Angeles School of Engineering and Applied Science Report ENG-7662.
- CHEN, S.T., KROHN, C.E., (1992), Comparison of Downhole Geophones and Hydrophones, *Society of Explorations Geophysicists*, *Geophysics*, Vol. 57, No. 6, July, p. 841-847.

- CUNNY, R.W., FRY, Z.B., (1973), Vibratory In Situ and Laboratory Soil Moduli Compared, Journal of the Soil Mechanics and Foundations Division, ASCE, Vol. 99, No. SM12, pp. 1055-1076.
- DAS, B. M., (1993), Principles of Soil Dynamics, PWS-KENT Publishing Company, Boston, 569 p.
- DE MELLO, V. F., (1971), The Standard Penetration Test, Proceedings of the Fourth Panamerican Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering, Puerto Rico, Vol.1, pp. 1-861.
- DENVER, H., STEFFENSEN, H., (1989), Ground Moduli Determined by Seismic Methods Proc. of the Twelfth Int. Conf. on Soil Mech. and Found. Eng. Vol.1, pp. 215-218, Rio de Janeiro.
- DIN 4094, (1974), Dinamik ve Statik Penetrometreler Alman Standartları, Berlin.
- DOUGLAS, B.J., (1982), SPT Blow count variability correlated to the CPT, Proc. 2nd European Symposium on Penetration Testing, Vol.7, pp.41-46.
- DOWRICK, D.J., (1987), Earthquake Resistant Design for Engineers and Architects, Second Edition, John Wiley and Sons, Great Britain.
- DURGUNOĞLU, H.T., TEZCAN, S.S., ERDEN, S., ve ACAR, Y., (1978), A Comparison of Insitu and Laboratory Measured Dynamic Soil Properties, Proceedings of Sixth European Conference on Earthquake Engineering, Vol.4 September, Dubrovnik, Yugoslavia, p. 39-46.
- DURGUNOĞLU, H.T., TEZCAN, S.S., ERDEN, S., ve ACAR, Y., (1980), Crosshole Survey at a Nuclear Power Plant, Proceedings of Seventh World Conference on Earthquake Engineering, Geotechnical Aspects, Vol.3, September, İstanbul, Turkey, pp. 297-304.
- DURGUNOĞLU, H.T., TEZCAN, S.S., ve ACAR, Y., (1982), A Study on Comparision of Emprically and In-situ Determined Dynamics Soil Properties, Proceedings of Seventh European Conference on Earthquake Engineering, Vol.2, Athens, Greece, pp. 291-299.
- EDELMANN, H.A.K., (1985), Shear-Wave Energy Sources, Handbook of Geophysical Exploration, Section I. Seismic Exploration, Volume 15 B, Part B: Aplications, Chapter 3, 134-178, Geophysical Press Limited, London
- ERDİK, M., BARKA, A., İŞİKARA, A.M., DURUKAL, E., (1992), March 13, 1992 (Ms=6.8) Erazincan Earthquake: A Preliminary Reconnaissance Report, Prepared by Kandilli Observatory and Earthquake Research Institute and Faculty of Eng. Dep. of Civil Engineering, Boğaziçi Üniversitesi, Yayın No: 505.

- EWING, W.M., JARDETZKY, W.S., PRESS, F., (1957), Elastic Waves in Layered Media, McGraw-Hill Book Co., Inc.
- EYİDOĞAN, H., (1993), 13 Mart 1992 Erzincan Depremi: Faylanma Mekanizması ve Deprem Yeri Üzerinde Bir Tartışma, 2. Ulusal Deprem Müh. Konferansı, TMMOB İnş. Müh. Odası İstanbul Şubesi, Bildiriler Kitabı, s. 392-399.
- FRY, Z.B., (1963), A Procedure for Determining Elastic Moduli of Soils by Field Vibratory Techniques, Miscellaneous Paper No. 4-577, U.S. Army Engineer Waterways Experiment Station, Corps of Engineers, P.O. Box 631, Vicksburg, MS 39180.
- FRYDMAN, S., (1970), Discussion on the dynamic penetration test: a standard that is not standardized, *Geotechnique*, Vol.20, No.4, pp.454-455.
- FUMAL, T., (1978), Correlations Between Seismic Wave Velocities and Physical Properties of Geologic Materials in the Southern San Francisco Bay Region, California, U.S.G.S. Open File Report 78-1067, 114 pp.
- GIBBS, H., HOLTZ, W., (1957), Research on Determining the Density of Sands by Spoon Penetration Testing, Proceedings of the Fourth Int. Conference on Soil Mechanics and Foundation Eng., London, Vol.1 pp. 35-39.
- HAMILTON, E., (1976), Shear Wave Velocity Versus Depth in Marine Sediments: A Review, *Geophysics*, Vol. 41, No. 5, pp. 985-996.
- HAO, X., SEO, K., SAMANO, T., (1991), Effects of Underground Structure and Q-Value on Seismic Wave Propagation in Yutian, China Proceedings Fourth Int. Conf. on Seismic Zonation, Vol. 2, pp. 311-318, Stanford, California.
- HARDIN, B.O., (1978), The Nature of Stress-Strain Behavior in Soils, Proceedings of the Earthquake Engineering and Soil Dynamics Conference, ASCE, Pasadena, CA, Vol. 1, pp. 3-90.
- HEISEY, S., (1981), Determination of In Situ Shear Wave Velocity from Spectral Analysis of Surface Waves, thesis presented to the University of Texas at Austin, Texas, in partial fulfillment of the requirements for the degree of Master of Science in Civil Engineering, 300 pp.
- HIGGINS, C. J., BRATTON, J. L., (1978), Measuring Dynamic In Situ Geotechnical Properties, Procc. of The Conference on Earthquake Eng. and Soil Dynamics, ASCE, Vol. 1, Pasadena, CA, pp. 272-289.
- HOAR, R.J., (1982), Field Measurement of Seismic Wave Velocity and Attenuation for Dynamic Analyses, Ph.D Dissertation, The University of Texas at Austin, 478 p.

- HOAR, R.J., STOKOE, K.H., II., (1978), Generation and Measurement of Shear Waves In Situ, Dynamic Geotechnical Testing, ASTM STP.654, pp. 3-29.
- HOAR, R.J., STOKOE, K.H., II., (1980), Investigation of Variables Affecting In Situ Seismic Wave Velocity Measurements, report submitted to the U.S. Army Engineer Waterways Experiment Station, Corps of Engineers, P.O. Box 631, Vicksburg, MS, 39180, 63 pp.
- HUGO, F., ENGELBRECHT, J.C., DUTOIT, J., (1989), Correlation of Elastic Engineering Parameters Obtained from Dynamic Triaxial Tests with Seismic and Ultrasonic Tests, Proc. of the Twelfth Int. Conf. on Soil Mech. and Found. Eng. Vol.1, pp. 233-238, Rio de Janeiro.
- IMAI, T., FUMOTO, H., YOKOTA, K., (1975), The Relation of Mechanical Properties of Soils to P- and S-Wave Velocities for Soil Ground in Japan, Proceedings of the Fourth Japanese Earthquake Engineering Symposium, pp. 86-96, (In Japanese; Trans. by H. Umehara).
- IMAI, T., TONOUCHI, K., (1980), Determining Dynamic Deformation Characteristics of Soils by In-Situ Measurements and Laboratory Testing, Proceedings of the Seventh World Conf. on Earthquake Eng. V.3, pp. 289-296, İstanbul.
- IWASAKI, T. Y., (1989), In-Situ Seismic Velocity and Its Relationship with Soil Characteristics in Osaka Bay, Earthquake Engineering and Soil Dynamic II, Procc. of The Speciality Conference, ASCE, June, 27-30, Park City, Utah.
- İYİSAN, R., ANSAL, A., (1990), SPT-N Darbe Sayıları ile Kayma Mukavemeti İlişkisi, Zemin Mekaniği ve Temel Mühendisliği Üçüncü Ulusal Kongresi, Boğaziçi Üniversitesi, İstanbul, II. Cilt, s. 303-314.
- İYİSAN, R., ANSAL, A., (1991), Kayma Dalgası Hızlarının Arazide Bulunması, Türkiye İnşaat Mühendisliği, XI. Teknik Kongresi, Bildiriler Kitabı, TMMOB İstanbul Şubesi, 1. Cilt, s. 570-581
- İYİSAN, R., ANSAL, A., (1993), Erzincan'da Dinamik Zemin Özelliklerinin Kuyu İçerisinde Sismik Yöntemler ile Bulunması, 2. Ulusal Deprem Müh. Konferansı, TMMOB İnş. Müh. Odası İstanbul Şubesi, Bildiriler Kitabı, s. 372-379.
- JOHNSON, D.H., TOKSÖZ, M.N., (1981), Seismic Wave Attenuation, Society of Exploration Geophysicists, Geophysics reprint series No. 2, 459 pp.
- JOHNSON, R.B., DeGRAFF, J.V., (1988), Principles of Engineering Geology, John Wiley and Sons, USA.
- JONES, R., (1958), In-Situ Measurement of the Dynamic Properties of Soil by Vibration Methods, Geotechnique, Vol. 8, pp. 1-21.

- KAGAWA, T., (1992), Moduli and Damping Factors of Soft Marine Clays, *Journal of Geotechnical Engineering*, ASCE, Vol. 118, No. 9, September, pp. 1360-1375.
- KANAI, K., et al, (1966), Observation of Microtremors, XI. Matsushiro Earthquake Swarm Areas, *Bulletin of Earthquake Research Institute*, XLIV, Part 3, University of Tokyo.
- KOLSKY, H., (1953), Stress Waves in Solids, Dover Publications, Inc., New York, 213 p.
- KOVACS, W.D., (1979), Velocity measurement of free fall SPT Hammer, *ASCE, Journal of Geotechnical Engineering*, Vol.105, No.GT1, pp.1-10.
- KOVACS, W.D., (1981), Result and Interpretation of SPT Practice Study, *Geotechnical Engineering*, Vol.4, No.3, pp. 126-129.
- KOVACS, W.D., EVANS, J.C., GRIFFITH, A.H., (1977), Towards a more Standardized SPT, Proc. 9th Int.Conf.Soil Mechanics and Foundation Engineering, Tokyo, Vol.2, pp. 269-276.
- KOVACS, W.D., ve SALAMONE, L.A., (1982), SPT Hammer Energy Measurement ASCE, *Journal of Geotechnical Engineering*, Vol.108, pp.599-620.
- KOVALEV, O.I., MOLOTOVA, L.V., (1961), Borehole Percussion Device for The Excitation of Various Types of Elastic Waves, *Bulletin of the Academy of Science of the USSR, Geophysics Series*, Colombia Technical Translation, No. 7, pp. 639-346.
- KUDO, K., SHIMA, E., (1970), Attenuation of Shear Waves in Soil, *Bulletin Earthquake Research Institute, University of Tokyo, Japan*, Vol. 48, Part 1, pp. 145-158.
- KUTSUNEZAKI, C., (1980), A New Method for Shear-Wave Logging, *Geophysics*, 45, pp. 1489-1506
- LAMB, H., (1904), On the propagation of Tremors Over the Surface of an Elastic Solid, *Philosophical Transactions of the Royal Society of London, Series A, Mathematical and Physical Sciences*, Vol. 203, pp. 1-42.
- LAV, A., ANSAL, A., (1993), Erzincan Depreminde Zemin Büyütmesi, 2. Ulusal Deprem Müh. Konferansı, TMMOB İnş. Müh. Odası İstanbul Şubesi, *Bildiriler Kitabı*, s. 363-371.
- LEE, S. H., (1985), Investigation of Low-Amplitude Shear Wave Velocity in Anisotropic Material, Ph. D. Dissertation, The University of Texas at Austin, 400 p.

- LIAO, S.S.C., WHITMAN, R.W., (1986), Overbuden correction factors for SPT in sand, ASCE, Journal of Geotechnical Engineering, Vol.112, No.GT3, pp.373-377.
- LO PRESTI, D.C.F., LAI, C., (1989), Shear Wave Velocity from Penetration Tests, Atti del Dipartimento di Ingegneria Strutturale, Politecnico di Torino, Torino.
- LOVE, A.E.H., (1911), Some Problems of Geodynamics, University Press, Cambridge.
- LUDELING, R., (1978), Shear Wave Measurements Using the Seismic Up-Hole Method, Proceedings Of the Conference on Dynamical Methods in Soil and Rock Mechanics, Karlsruhe, Germany, Vol. III, pp. 139-148.
- MANCUSO, C., SIMONELLI, A.L., VINALE, F., (1989), Numerical Analysis of in situ S-wave Measurements, Proceedings of the 12 th International Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering, Rio de Janerio, Vol.1, pp. 277-280.
- MAXWELL, A.A., FRY, F.B., (1967), A Precedure for Determining Elastic Moduli of In-Situ Soils by Dynamic Techniques, Proceedings of the International Symposium on Wave Propagation and Dynamic Properties of Earth Materials, Albuquerque, NM, pp. 913-920.
- MCDONAL, F.J., ANGONA, F.A., MILLS, R.L., SENGBUSH, R.L., VANNOSTRAND, R.G., WHITE, J.E., (1958), Attenuation of Shear and Compressional Waves in Pierre Shale, Geophysics, Vol. 23, No. 23, No. 3, pp. 421-439.
- McLAMORE, V.R., ANDERSON, D.G., ESPANA, C., (1978), Cross-Hole Testing Using Explosive and Mechanical Energy Sources, Dynamic Geotechnical Testing, ASTM STP 654, American Society for Testing and Materials, pp. 30-55.
- MEEK, J.W., WOLF, J.P., (1994), Material Damping for Lumped-Parameter Models of Foundations, Earthquake Engineering and Structural Dynamics, John Wiley and Sons Ltd, Vol. 23, pp. 349-362.
- MEISSNER, R., (1961), Wave-Front Diagrams from Up-Hole Shooting, Geophysical Prospecting, Vol. 9, No. 4, pp. 533-543.
- MEISSNER, R., (1965), P and SV-Waves from Up-Hole Shooting, Geophysical Prospecting, Vol. 13, No. 3, pp. 433-459.
- MELZER, K., (1971), The Standard Penetration Test, discussion to De Mello's paper, Proceedings of the Fourth Panamerican Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering, Puerto Rico, Vol. III, pp. 80-81.

- MENKE, W., (1984), Geophysical Data Analysis: Discrete Inverse Theory, Academic Press, Inc., Orlando, Florida, 260 pp.
- MOK, Y.J., (1987), Analytical and Experimental Studies of Borehole Seismic Methods, Ph.D. Dissertation, The University of Texas at Austin, 258 pp.
- MOK, Y. J., STOKOE, K.H., II., WILSON, C. R., (1989), Analysis of Downhole Seismic Data Using Inverse Theory, Proceedings, Ninth World Conference on Earthquake Engineering, Tokyo, Japan, Vol. III, pp. 65-70.
- MOK, Y.J., SANCHEZ-SALINERO, I., STOKOE, K.H., II., ROESSET, J.M., (1988), In Situ Damping Measurements by Cross-Hole Seismic Method Earthquake Engineering and Soil Dynamics II, Proceedings of the Specialty Conf. ASCE, pp. 305-320, Park City, Utah.
- MURPHY, V.J. (1972), Geophysical Engineering Investigation Techniques for Microzonation, Proceedings of the International Conference on Microzonation for Safer Construction, Research and Application, Vol. I, Seattle, WA, pp. 131-159.
- NAZARIAN, S., (1984), In Situ Determination of Elastic Moduli of Soil Deposits and Pavement System by Spectral-Analysis-of-Surface-Waves Method, Ph. D. Diss., University of Texas, 458 pp.
- NAZARIAN, S., STOKOE, K.H.II, (1986), In situ Determination of Elastic Moduli of Pavement System by Spectral-Analysis-of-Surface-Waves Methods (Practical Aspects), Research Report, No. 1123-1, Center for Transp. Res., The University of Texas at Austin, Texas.
- NAZARIAN, S., STOKOE, K.H.II, (1987), In situ Determination of Elastic Moduli of Pavement System by Spectral-Analysis-of-Surface-Waves Methods (Theoretical Aspects), Research Report, No. 437-2, Center for Transp. Res., The University of Texas at Austin, Texas.
- NAZARIAN, S., DESAI, M. R., (1993), Automated Surface Wave Method: Field Testing, Journal of Geotechnical Engineering, ASCE, Vol. 119, No. 7, July, pp. 1094-1111.
- NEWMAN, P. J., WORTHINGTON, M. H., (1982), In-Situ Investigation of Seismic Body Wave Attenuation in Heterogeneous Media, Geophys. Prosp., Vol. 30, pp. 377-400.
- OGURA, K., (1979), Development of A Suspension Type S-Wave Log System, OYO Tech. Note, TN.34, OYO Corp., Tokyo, Japan, 23 pp.
- OHBA, S., TORIUMA, I., (1972), Research on Vibrational Characteristics of Soil Deposits in Osaka, Part 2, On Velocities of Wave Propagation and Predominant Periods of Soil Deposits, Abstracts of Technical Meeting of Architectural Institute of Japan.

- OHKUBO, T., TERASAKI, A., (1977), Physical Property and Seismic Wave Velocity of Rock OYO Technical Note, TN-22, OYO Corp., Urawa Research Institute, Tokyo.
- OHOKA, H., (1984), Comparison of SPT N Values by Cathead-and-Rope Method and Trip Monkey Method, Proc.19th Annual Meeting of Japanese Society of Soil Mechanics and Foundation Engineering.
- OHSAKI, Y., IWASAKI, R., (1973), On Dynamic Shear Moduli and Poisson's Ratio of Soil Deposits, Soil and Foundation, Vol. 13, No. 4, pp. 61-73.
- OHSAKI, Y., SAKAGUCHI, O., (1972), Major Types of Soil Deposits in Urban Areas of Japan, Faculty of Engineering Research Report 72-03, University of Tokyo (in Japanese).
- OHTA, Y., GOTO, N., (1978), Empirical Shear Wave Velocity Equations in Terms of Characteristic Soil Indexes, Earthquake Engineering and Structural Dynamics, Vol. 6, pp. 167-187.
- OHTA, Y., SHIMA, E., (1967), Experimental Study on Generation and Propagation of S-Waves, II. Preliminary Experiments on Generation of SV-Waves, Bulletin of the Earthquake Research Institute, University of Tokyo, Japan, Vol. 45, Part 1, pp. 33-42.
- OHTA, Y., et al, (1972), Elastic Moduli of Soil Deposits Estimated by N-values, Proceedings of the Seventh Annual Conference, The Japanese Society of Soil Mechanics and Foundation Engineering (in Japanese).
- ÖZAYDIN, K., (1982), Zemin Dinamiği Deprem Mühendisliği Türk Milli Komitesi Yayınları No.1, İ.T.Ü. İnşaat Fak. Matbaası, İstanbul.
- ÖZÜDOĞRU, K., (1993), Zeminlerin Deprem Parametrelerinin Arazi ve Laboratuvar Yöntemleri ile Tayini, 2. Ulusal Deprem Müh. Konferansı, TMMOB İnş. Müh. Odası İstanbul Şubesi, Bildiriler Kitabı, s. 594-606.
- PATEL, N.S., (1981), Generation and Attenuation of Seismic Waves in Down-Hole Testing, Thesis Presented to The University of Texas at Austin, Texas, in partial fulfillment of the requirements for the degree of Master of Science in Civil Engineering, 411 p.
- PECK, R., HANSON, W., THORNBURN, T., (1974), Foundation Engineering, John Wiley and Sons Inc., New York.
- POSTACIOĞLU, B., (1981), Cisimlerin Yapısı ve Özellikleri, Cilt 1, İçyapı ve Mekanik Özellikler, İTÜ, İnşaat Fakültesi, İTÜ Matbaası, Gümüşsuyu, İstanbul.
- RAMIREZ, R.W., (1985), The FFT, Fundamentals and Concepts, Prentice-Hall, Inc., Englewood Cliffs, N.J., 178 p.

- RAYLEIGH, LORD (J.W. STRUTT), (1984), The Theory of Sound, MacMillan and Co., Ltd., London, 2ED, Vol. 1, 480 pp., Vol. 2, 504 pp.
- REDPATH, B.B., (1973), Seismic Refraction Exploration for Engineering Site Investigation, Technical Report TR E-73-4, U.S. Army Engineer Waterways Experiment Station, Corps of Engineers, P.O. Box 631, Vicksburg, MS, 39180, 52 pp.
- REDPATH, B.B., EDWARDS, R. B., HALE, R. J., KINTZER, F. Z., (1982), Development of Field Techniques to Measure Damping Values for Near-Surface Rocks and Soils, Report- URS/John A. Blume and Assoc., San Francisco, 120 p.
- RICHART, F.E., JR., HALL, J.R., JR., WOODS, R.D., (1970), Vibrations of Soils and Foundations, Prentice-Hall, Inc., Englewood Cliffs, New Jersey, 414 pp.
- ROBERTSON, P. K., CAMPANELLA, R. G., (1985), Guidelines for Use and Interpretation of The Electronics Cone Penetration Test, Soil Mechanics Series, Dept. of Civil Eng., The Univ. of British Columbia, Vancouver.
- ROESSET, J.M., CHANG, D.W., STOKOE, K.H.II., AOUAD, M., (1990), Modulus and Thickness of Pavement Surface Layer from SASW Tests, Transportation Research Board National Research Council, No. 1260, Washington, pp. 53-63
- SAKAI, Y., (1968), A Study on the Determination of S-Wave Velocity by the Soil Penetrometer Test, (in Japanese, as translated by J.Inove).
- SANCHEZ-SALINERO, I., ROESSET, J.M., STOKOE, K.H., II., (1986), Analytical Studies of Body Wave Propagation and Attenuation, Geotechnical Engineering Report, GR86-15, Geotechnical Engineering Center, The University of Texas at Austin, 269 pp.
- SANCHEZ-SALINERO, I., ROESSET, J.M., SHAO, K.Y., STOKOE, K.H.II., RIX, G.J., (1987), Analy. Evaluation of Variables Affecting Surface Wave Testing of Pavements, Transportation Research Record 1136, Washington, D.C., 86-95.
- SCHMERTMANN, J., (1971), The Standard Penetration Test, discussion to De Mello's paper, Proceedings of the Fourth Panamerican Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering, Puerto Rico, Vol. III, pp. 90-98.
- SCHMERTMANN, J.H., (1978), Use of the SPT to Measure Dynamic Soil Properties? Yes, But., Dynamic Geotechnical Testing, ASTM STP 654, pp.341-355.

- SCHULTZE, E., MENZENBACH, E., (1961), Standard Penetration Test and Compressibility of Soils, Proceedings of the Fifth International Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering, Paris, Vol. 1, pp. 527-532.
- SEED, H.B., IDRIS, I.M., (1970), Soil Moduli and Damping Factors for Dynamic Response Analyses, Report No. EERC 70-10, University of California, Berkeley.
- SEED, H.B., MURARKA, R., LYSMER, J., IDRIS, I.M., (1976), Relationships of Maximum Acceleration, Maximum Velocity, Distance from Source, and Local Site Conditions for Moderately Strong Earthquakes, Bulletin of the Seismological Society of America, Vol. 66, No. 4, pp. 1323-1342.
- SEED, H.B., MORI, K., CHAN, C., (1977), Influence of Seismic History on Liquefaction of Sands, Journal of the Geotechnical Engineering Division, Vol. 103, GT4, pp. 257-270.
- SEED, H.B., IDRIS, I.M., (1981), Evaluation of Liquefaction Potential of Sand Deposits Based on Observations of Performance in Previous Earthquakes, Proceedings of the Conference on In Situ Testing to Evaluate Liquefaction Susceptibility, ASCE, St. Louis, MO, 26 pp.
- SEED, H.B., WONG, R.T., IDRIS, I.M., ve TOKIMATSU, K., (1984), Moduli and Damping Factors for Dynamic Analysis of Cohesionless Soils, Earthquake Engineering Research Center Report No.EERC-84/14, University of California, Berkeley.
- SHANNON AND WILSON, INC., AGBABIAN ASSOCIATES (1975), In Situ Impulse Test, An Experimental and Analytical Evaluation of Data Interpretation Procedures, Report No. NUREG-0028, Nuclear Regulatory Commission, 264 pp.
- SHIBATA, T., (1970), The Relationship Between The N-Value and S-Wave Velocity in the Soil Layer, Disaster Prevention Research Laboratory, Kyoto University (in Japanese; as translated by Y. Yamamoto).
- STATTON, C.T., AULD, B., FRITZ, A., (1978), In Situ Seismic Shear Wave Velocity Measurements and Proposed Procedures, Dynamic Geotechnical Testing, ASTM STP 654, American Society for Testing and Materials, pp. 56-65.
- STOKOE, K.H., II., (1980), Field Measurement of Dynamic Soil Properties, presented to the Speciality Conference on Civil Engineering and Nuclear Power, ASCE, Sept. 15-17, Knoxville, TN, 31 pp.
- STOKOE, K.H., II., ABDEL-RAZZAK, K.H., (1975), Shear Moduli of Two Compacted Fills, Proceedings of the Conference on In Situ Measurement of Soil Properties, ASCE, Vol. 1, Raleigh, NC, pp. 442-449.

- STOKOE, K.H., II., HOAR, R.J., (1978), Variables Affecting In Situ Seismic Measurements, Proceedings of the Conference on Earthquake Engineering and Soil Dynamics, ASCE, Pasadena, CA, Vol. II, pp. 919-939.
- STOKOE, K.H., II., NAZARIAN, S., (1983), Effectiveness of Ground Improvement from Spectral Analysis of Surface Waves, Proc. of Eighth European Conference on Soil Mechn. and Found. Eng., Helsinki, Finland.
- STOKOE, K.H., II., WOODS, R.D., (1972), In situ Shear Wave Velocity by Cross-Hole Method, Journal of Soil Mechanics and Foundation Division, ASCE, Vol.98, No.SM5, pp. 443-460.
- STOKOE, K.H., II., ARNOLD, E.J., HOAR, R.J., SHIRLEY, D.J., ANDERSON, D.G., (1978), Development of a Bottom-Hole Device for Offshore Shear Wave Velocity Measurement, Proceedings of the Tenth Annual Offshore Technology Conference, Paper No. OTC 3210, pp. 1367-1380.
- STOKOE, K.H., II., MOK, Y.J., LEE, N., LOPEZ, R., (1989), In situ Seismic Methods: Recent Advances in Testing, Understanding and Applications, Conferenze di Geotecnica di Torino, 43 p.
- STOKOE, K.H., II., SANCHEZ-SALINERO, I., MOK, Y. J., (1985), Evaluation of Shear Wave Velocity Profiles at O'Neill Forebay, San Luis and Contra Loma Dams, California, Geotechnical Eng. Report, GR 85-2, The University of Texas at Austin.
- STOKOE, K.H., II., ROESSET, J. M., BIERSCWALE, J.G., AOUAD, M., (1989), Liquefaction Potential of Sands from Shear Wave Velocity, Proceedings Ninth World Conf. Earthquake Eng., Tokyo, Japan, Vol. III, pp. 213-218.
- STOLL, R.D., BRYAN, G.M., (1970), Wave Attenuation in Saturated Sediments, J. Acous. Soc. Am. Vol. 47, pp.1440-1447.
- STONELY, R., (1924), Elastic Waves at the Surface of Separation of Two Solids, Proceedings of the Royal Society of London, Series A, Mathematical and Physical Sciences, Vol. 106, pp. 416-428.
- STROUD, M.A., (1975), The standart penetration test in insensitive clay and soft rocks, Proc. 1st European Symposium on Penetration Testing, Vol.2, pp.367-375.
- SYKORA, D.W., STOKOE, K.H., II., (1983), Correlations of In Situ Measurements in Sands of Shear Wave Velocity, Soil Characteristics, and Site Conditions, Geotechnical Engineering Report GR83-33, The University of Texas, Austin, 484 p.
- TENG, W.C., (1962), Foundation Design, Prentice-Hall, Inc., Englewood Cliffs, NJ.

- TERZAGHI, K., (1943), Theoretical Soil Mechanics, 5th ed., John Wiley & Sons, Inc., New York, NY, 510 p.
- TERZAGHI, K., PECK, R.B., (1948), Soil Mechanics in Engineering Practice, John Wiley, New York.
- TEZCAN, S.S., ERDEN, S.M., ve DURGUNOĞLU, H.T., (1975), In-situ Measurement of Shear Wave Velocity at Boğaziçi University Campus, Proceedings, İstanbul Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering, Vol.2 April, p. 157-164.
- TEZCAN, S.S., ve DURGUNOĞLU, H.T., (1978), Subsoil Investigation and Earthquake Design Parametres for a Nuclear Power Plant, Proceedings of Sixth European Conference on Earthquake Engineering, Vol.4 September, Dubrovnik, Yugoslavia, p. 47-54.
- TOKI, (1969), Consideration of Homogeneous Layers from a Mechanical Point of View, Chidanken Technical Report No. 17, (in Japanese).
- TOKIMATSU, K., YOSHIMI, Y., (1983), Empirical Correlation of Soil Liquefaction Based on SPT N-Value and Fines Content, Soils and Foundations, 23(4), December, pp. 56-74.
- TONOUCHI, K., SAKAYAMA, T., IMAI, T., (1983), S Waves Velocity in The Ground and The Damping Factor, Bulletin of The International Association of Eng. Geology, No. 26-27, Paris, pp. 326-333.
- TRONCOSO, J.H., BROWN, F.R., MILLER, R.P., (1977), In Situ Impulse Measurements of Shear Modulus of Soils as a Function of Strain, Preprints of Sixth World Conference on Earthquake Engineering, New Delhi, India, Vol. 6, pp. 165-170.
- ÜLKER, R., DEMİR, H., BODUROĞLU, H., CELEP, Z., KARADOĞAN, F., EREN, İ., ANSAL, A., (1992), 13 Mart Erazincan Depremi Hakkında, İ.T.Ü. Yapı ve Deprem Araştırma Merkezi, Rapor 1.
- VEISMANIS, A., (1974), Cone Penetrometers in Sand, Proceedings of the European Symposium on Penetration Testing, Stockholm, Vol. 2:2, pp. 407-419.
- VUCETIC, M., DOBRY, R., (1991), Effect of Soil Plasticity on Cyclic Response, Journal of Geotechnical Engineering, ASCE, Vol. 117, No. 1, January, pp. 89-107.
- WARRICK, R.E., (1974), Seismic Investigation of a San Francisco Bay Mud Site, Bulletin of the Seismological Society of America, Vol. 64, No.2, pp. 375-385.
- WESTGAARD, H.M., (1940), Plastic State of Stress Around a Deep Well, Journal of the Boston Society of Civil Engineers, Vol. 27, No.1, pp. 1-5.

- WINKLER, K.W., NUR, A., (1982), Seismic Attenuation: Effects of Pore Fluids and Frictional Sliding, Geophysics, Vol. 47, pp. 1-15.
- WOODS, R.D., (1978), Measurement of Dynamic Soil Properties, Proceedings of the Conference on Earthquake Engineering and Soil Dynamics, ASCE, Vol. I, Pasadena, CA, pp. 91-178.
- WOODS, R.D., STOKOE, K.H., II., (1985), Shallow Seismic Expoloration In Soil Dynamics, Proceedings, Richart Commemorative Lectures, ASCE, Geotechnical Engineering Division, pp. 120-156.
- YOSHIMI, Y., TOKIMATSU, K., (1983), SPT Practice Survey and Comparative test, Soils and Foundation, Vol.23, No.3, pp. 106-111.
- ZIMMERMAN, L.J., CHEN, S.T., (1992), Comparison of Vertical Seismic Profiling Techniques, Society of Explorations Geophysicists, Geophysics, Vol. 58, No. 1, January, p. 134-140.