

DOKUZ EYLÜL ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

ÇOK KANALLI YÜZEY DALGALARI ANALİZİ
(MASW) VE JEOTEKNİK UYGULAMALARI



Doğukan DURDAĞ

Haziran, 2018

İZMİR

ÇOK KANALLI YÜZEY DALGALARI ANALİZİ (MASW) VE JEOTEKNİK UYGULAMALARI

Dokuz Eylül Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü

Yüksek Lisans Tezi

Jeofizik Mühendisliği Anabilim Dalı

Doğukan DURDAĞ

Haziran, 2018

İZMİR

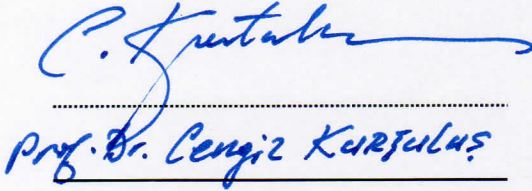
YÜKSEK LİSANS TEZİ SINAV SONUÇ FORMU

DOĞUKAN DURDAĞ, tarafından PROF.DR. MAHMUT GÖKTUĞ DRAHOR yönetiminde hazırlanan “ÇOK KANALLI YÜZEY DALGALARI ANALİZİ (MASW) VE JEOTEKTİK UYGULAMALARI” başlıklı tez tarafımızdan okunmuş, kapsamı ve niteliği açısından bir Yüksek Lisans tezi olarak kabul edilmiştir.



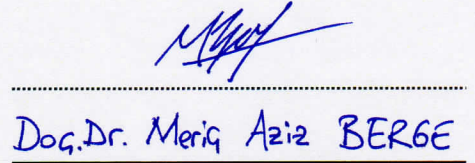
Prof. Dr. Mahmut Göktuğ DRAHOR

Yönetici



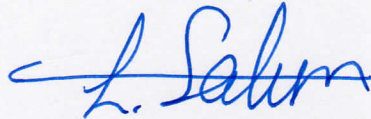
Prof. Dr. Cengiz Karşulaş

Jüri Üyesi



Doç. Dr. Meriç Aziz BERGE

Jüri Üyesi



Prof. Dr. Latif SALUM
Müdür
Fen Bilimleri Enstitüsü

TEŞEKKÜR

Yüksek Lisans eğitimim boyunca ve tezimin hazırlanması sırasında bilgi ve tecrübeleriyle beni yönlendiren, tezimin tamamlanması için destek ve yardımlarını esirgemeyen tez danışmanım Sayın Prof. Dr. Mahmut Göktuğ DRAHOR'a

Tez çalışmamda kullandığım arazi verilerini toplamak için Kocaeli Üniversitesi Jeofizik Mühendisliği Bölümü imkanlarından yararlanmama yardımcı olan Sayın Prof. Dr. Cengiz KURTULUŞ'a

Tez çalışmamı sürdürürken ihtiyaç duyduğum her konuda destek olan Sayın Dr. Öğr. Üyesi Ertan PEKŞEN'e

Tez çalışmam sırasında desteklerini esirgemeyen Jeofizik Yüksek Mühendisi Buket ORTAN'a

Arazide veri toplama işleminde yardımlarını esirgemeyen Jeofizik Mühendisi Cüneyt ŞAŞ'a ve Kocaeli Üniversitesi Jeofizik Mühendisliği Bölümü öğrencilerine,

Her zaman yanımda olan Gamze AYHAN'a ve bugünlere gelmemde maddi ve manevi emeği olan aileme,

Teşekkürlerimi sunarım.

Doğukan DURDAĞ

ÇOK KANALLI YÜZEY DALGALARI ANALİZİ (MASW) VE JEOTEKNİK UYGULAMALARI

ÖZ

Yüzey Dalgalarının Çok Kanallı Analizi (MASW) yöntemi yakın yüzey araştırmalarında yaklaşık olarak son yirmi yıl içinde kullanılan bir yöntemdir. Bu yöntem yakın yüzey araştırmalarının birçok alanında tabakaların S dalga hızlarını belirlemek için kullanılmaktadır. Köprü, tünel, baraj, rüzgâr türbini, bina ve benzeri yapıların oturacağı zeminlerin karakterizasyonu, kaya-zemin ayrımı, zemin sıvılaşma potansiyeli, yeraltı boşluklarının bulunması, normal ve ters faylarda farklı seviyelere denk gelen benzer ortamların tespit edilmesi gibi konularda jeofizik ve jeoteknik açıdan birçok konuda kullanılan bir yöntemdir. Bu tez kapsamında Türkiye'nin üç ayrı bölgesinde MASW yönteminin kullanıldığı arazi çalışmaları yapılmıştır. Bu çalışmalardan birincisi, tünel yapısının oluşturduğu boşluk yapısının bulunması ve aynı ortamdaki dolgu-zemin ayrımıdır. İkinci çalışma, düşük hız yapısına sahip bir bölgede sismik hızlar (P ve S) yardımıyla jeoteknik parametrelerin belirlenmesidir. Son çalışma ise zemin-kaya ayrımının yapılması ve sismik hızlar yardımıyla jeoteknik parametrelerin belirlenmesidir. Yapılan çalışmalar sonucunda boşluk yapısı ve dolgu-zemin ayrımı MASW yöntemiyle başarıyla tespit edilmiştir. Ayrıca farklı jeolojik birimlerin bulunduğu farklı ortamlardaki problemler başarıyla tespit edilmiştir. MASW yönteminin S dalga hızını belirleme özelliği, jeofizik açıdan problemleri tespit etmeye ve jeoteknik anlamda yeraltını yorumlamaya katkı sağladığı sonucuna varılmıştır.

Anahtar kelimeler: Dispersiyon, jeoteknik, MASW, S hızı, yüzey dalgası

MULTICHANNEL ANALYSIS OF SURFACE WAVES (MASW) AND GEOTECHNICAL APPLICATIONS

ABSTRACT

Multichannel analysis of surface waves (MASW) is a method used in near surface geophysics within the last two decades. The method is used to determine the S wave velocity in many areas of near surface researches. The method is applied in geophysical and geotechnical problems such as soil characterization of buildings as bridge, tunnel, dam, wind turbine, structure etc., rock-soil analysis, soil liquefaction potential, underground void detection, normal and reverse fault detection. Within the scope of this thesis, the field studies were carried out using MASW technique in three different regions of Turkey. First study is aim to find the void structure of the tunnel and the fill-ground separation. The goal of second study is to determine the geotechnical parameters via seismic velocities (P and S) in a zone with low velocity. The final study aimed to define the soil-rock separation and the geotechnical parameters using seismic velocities. As a result, the void and fill-ground separation were successfully determined by MASW method. In addition, problems in different locations where different geological units are located were successfully determined. The feature to determine S wave velocity of the MASW method was deduced contributing to determine problems in terms of geophysics and to interpret of the subsurface in terms of geotechnics.

Keywords: Dispersion, geotechnics, MASW, S velocity, surface wave

İÇİNDEKİLER

	Sayfa
YÜKSEK LİSANS TEZİ SINAV SONUÇ FORMU	ii
TEŞEKKÜR	iii
ÖZ	iv
ABSTRACT	v
ŞEKİLLER LİSTESİ	ix
TABLolar LİSTESİ	xii
BÖLÜM BİR - GİRİŞ	1
BÖLÜM İKİ – SİSMİK DALGALAR	4
2.1 Dalga Denklemleri	4
2.2 Cisim Dalgaları	6
2.3 Yüzey Dalgaları	8
2.3.1 Rayleigh Dalgaları	10
2.3.1.1 Dispersiyon Özelliği	11
2.3.1.2 Grup ve Faz Hızı	13
2.3.1.3 Homojen Yarı Sonsuz Ortamda Rayleigh Dalgaları	14
2.3.1.4 Çok Tabakalı Elastik Ortamda Rayleigh Dalgaları	20
2.4 Sismik Hızlarla İlişkili Jeoteknik Parametreler	22
2.4.1 Elastisite (Young) Modülü	23
2.4.2 Kayma (Shear) Modülü	23
2.4.3 Bulk Modülü	23
2.4.4 Poisson Oranı	24
2.4.5 Yoğunluk	24

BÖLÜM ÜÇ – YÜZEY DALGALARININ ÇOK KANALLI ANALİZİ 25

3.1 Yöntem ve Ekipmanlar	25
3.2 Veri Toplama Yöntemi	27
3.2.1 Kaynak Etkisi	29
3.2.2 Alıcıların Etkisi	30
3.2.3 Yakın Ofset Etkisi	30
3.2.4 Uzak Ofset Etkisi.....	31
3.2.5 Kaynak ve Alıcı Konfigürasyonu.....	31
3.2.6 Bir Boyutlu Veri Toplama.....	34
3.2.7 İki Boyutlu Veri Toplama	34
3.3 Veri İşlem Aşamaları	35
3.3.1 Dispersiyon Eğrilerinin Elde Edilmesi.....	35
3.3.2 Dispersiyon Eğrilerinin Ters Çözümü.....	37
3.3.3 SurfSeis Yazılımı ile Verilerin İşlenmesi.....	40

BÖLÜM DÖRT – ARAZİ UYGULAMALARI 42

4.1 Arazi Uygulaması - I.....	42
4.1.1 Uygulama Alanının Konumu ve Jeolojisi	42
4.1.2 Veri Toplama Parametreleri	43
4.1.3 MASW Yöntemi ile Elde Edilen Sonuçlar.....	44
4.1.4 Sismik Kırılma Yöntemi ile Elde Edilen Sonuçlar	45
4.1.5 Jeoteknik Parametrelerin Sonuçları.....	46
4.2 Arazi Uygulaması - II.....	51
4.2.1 Uygulama Alanının Konumu ve Jeolojisi	51
4.2.2 Veri Toplama Parametreleri	52
4.2.3 MASW Yöntemi ile Elde Edilen Sonuçlar.....	52
4.2.4 Sismik Kırılma Yöntemi ile Elde Edilen Sonuçlar	53
4.2.5 Jeoteknik Parametrelerin Sonuçları.....	54
4.3 Arazi Uygulaması - III	58

4.3.1 Uygulama Alanının Konumu ve Jeolojisi	58
4.3.2 Veri Toplama Parametreleri	59
4.3.3 MASW Yöntemi ile Elde Edilen Sonuçlar.....	59
4.3.4 Sismik Kırılma Yöntemi ile Elde Edilen Sonuçlar	60
4.3.5 Jeoteknik Parametrelerin Sonuçları.....	61
BÖLÜM BEŞ – SONUÇLAR.....	65
KAYNAKLAR.....	68



ŞEKİLLER LİSTESİ

	Sayfa
Şekil 2.1 İnce bir çubuk içindeki boyuna dalgaların oluşması.....	4
Şekil 2.2 İnce bir çubuk içindeki boyuna dalgaların oluşması.....	4
Şekil 2.3 Cisim dalgalarının hareketi: (a) P dalgası; (b) S dalgası.....	7
Şekil 2.4 Yüzey dalgalarının hareketi: (a) Rayleigh dalgası; (b) Love dalgası	9
Şekil 2.5 Düşey nokta kaynak tarafından üretilen yüzey dalgalarının iki boyutlu yayılma modeli.....	10
Şekil 2.6 Retrograde ve Prograde hareketin yönü.....	11
Şekil 2.7 Tabakalı ortamda düşey parçacık hareketinin derinliği	12
Şekil 2.8 Normal ve ters dispersiyon eğrisi grafiği.....	13
Şekil 2.9 Grup hızı ve faz hızının şematik gösterimi	14
Şekil 2.10 Lineer, elastik, homojen yarı-sonsuz ortamın şematik gösterimi	15
Şekil 2.11 Çok tabakalı elastik ortamın şematik gösterimi.....	20
Şekil 3.1 Sismik kayıt örneği	25
Şekil 3.2 Sismik kayıt cihazı (sol-üst), Tetikleyici-Plaka-Balyoz (Sağ-Üst), 4,5 Hz Jeofon (sol-alt), Sismik kablo (sağ-alt).....	26
Şekil 3.3 Veri toplama işleminin şematik gösterimi	27
Şekil 3.4 Topografya örneklerinin şematik gösterimleri.....	28
Şekil 3.5 Solda 4,5 kg, Ortada 9 kg, Sağda Ağırlık düşürme kaynakları kullanılarak 40 Hz alıcılar ile toplanan veriler ve elde edilen dispersiyon eğrileri	29
Şekil 3.6 Farklı frekanslardaki alıcılar kullanılarak ağırlık düşürme kaynağı ile toplanan veriler ve elde edilen dispersiyon eğrileri	30
Şekil 3.7 Yakın ofset ve uzak ofset etkilerini gösteren grafik	31
Şekil 3.8 Veri toplama işleminde muhtemel kaynak konumları	32
Şekil 3.9 Hem kaynağın hem de alıcıların birlikte hareketli olduğu dizilim türü.....	32
Şekil 3.10 Kaynağın sabit olup alıcıların hareketli olduğu dizilim türü	33
Şekil 3.11 Land Streamer alıcı sistemi.....	33
Şekil 3.12 Bir boyutlu veri toplama işleminin şematik gösterimi.....	34
Şekil 3.13 İki boyutlu veri toplama işleminin şematik gösterimi	35
Şekil 3.14 Dispersiyon eğrisi elde etme	36
Şekil 3.15 Dispersiyon eğrisi ve bir boyutlu model.....	37

Şekil 3.16 Üç tabakalı bir boyutlu S hızı model örneği	38
Şekil 3.17 Sekiz tabakalı bir boyutlu S hızı model örneği	39
Şekil 3.18 Düşük hız tabakalı bir boyutlu S hızı model örneği	39
Şekil 3.19 S hızını gösteren iki boyutlu yapay model	40
Şekil 4.1 Uygulama-I alanının ve sismik hattın konumu	42
Şekil 4.2 Uygulama alanında bulunan tünel ve hattın yönü	43
Şekil 4.3 MASW yöntemi ile elde edilen ve ön bilgiler ile yorumlanan iki boyutlu yeraltı modeli	45
Şekil 4.4 Sismik kırılma yöntemi ile elde edilen iki boyutlu yeraltı modeli	46
Şekil 4.5 Sismik hızlar yardımıyla hesaplanan Elastisite modülü kesiti	47
Şekil 4.6 Sismik hızlar yardımıyla hesaplanan Kayma modülü kesiti	48
Şekil 4.7 Sismik hızlar yardımıyla hesaplanan Bulk modülü kesiti.....	48
Şekil 4.8 Sismik hızlar yardımıyla hesaplanan yoğunluk kesiti	49
Şekil 4.9 Sismik hızlar yardımıyla hesaplanan Poisson oranı kesiti	50
Şekil 4.10 Sismik hızlar yardımıyla hesaplanan Vp/Vs oranı kesiti	50
Şekil 4.11 Uygulama - II alanının ve sismik hattın konumu	51
Şekil 4.12 MASW yöntemi ile elde edilen iki boyutlu yeraltı modeli	53
Şekil 4.13 Sismik kırılma yöntemi ile elde edilen iki boyutlu yeraltı modeli	54
Şekil 4.14 Sismik hızlar yardımıyla hesaplanan Elastisite modülü kesiti	55
Şekil 4.15 Sismik hızlar yardımıyla hesaplanan Kayma modülü kesiti	55
Şekil 4.16 Sismik hızlar yardımıyla hesaplanan Bulk modülü kesiti.....	56
Şekil 4.17 Sismik hızlar yardımıyla hesaplanan yoğunluk kesiti	56
Şekil 4.18 Sismik hızlar yardımıyla hesaplanan Poisson oranı kesiti	57
Şekil 4.19 Sismik hızlar yardımıyla hesaplanan Vp/Vs oranı kesiti	57
Şekil 4.20 Uygulama - III alanının ve sismik hattın konumu	58
Şekil 4.21 MASW yöntemi ile elde edilen iki boyutlu yeraltı modeli	60
Şekil 4.22 Sismik kırılma yöntemi ile elde edilen iki boyutlu yeraltı modeli	61
Şekil 4.23 Sismik hızlar yardımıyla hesaplanan Elastisite modülü kesiti	62
Şekil 4.24 Sismik hızlar yardımıyla hesaplanan Kayma modülü kesiti	62
Şekil 4.25 Sismik hızlar yardımıyla hesaplanan Bulk modülü kesiti.....	63
Şekil 4.26 Sismik hızlar yardımıyla hesaplanan yoğunluk kesiti	63
Şekil 4.27 Sismik hızlar yardımıyla hesaplanan Poisson oranı kesiti	64

Şekil 4.28 Sismik hızlar yardımıyla hesaplanan V_p/V_s oranı kesiti 64



TABLULAR LİSTESİ

	Sayfa
Tablo 3.1 Genel veri toplama parametreleri	28
Tablo 4.1 Akveren formasyonun genel stratigrafik bilgileri	43
Tablo 4.2 Uygulama-I için seçilen veri toplama parametreleri	44
Tablo 4.3 Çekmece formasyonun genel stratigrafik bilgileri	52
Tablo 4.4 Uygulama-II için seçilen veri toplama parametreleri	52
Tablo 4.5 Germik formasyonun genel stratigrafik bilgileri	58
Tablo 4.6 Uygulama-III için seçilen veri toplama parametreleri	59



BÖLÜM BİR

GİRİŞ

Mühendislik açısından zemin, ana kayanın üstündeki materyallerden oluşmaktadır. Yer yüzeyi ve ana kaya arasında bulunan zeminlerin kalınlıkları, elastik ve fiziksel özellikleri ile dinamik kuvvetler etkisi altındaki davranışları önem arz etmektedir. Zeminlerin bu özelliklerini ortaya çıkarmak için kullanılan bilgilerden birisi S dalga hızıdır. S dalga hızını belirlemek için yakın yüzey araştırmalarında yüksek çözünürlüklü yansıma ya da kırılma çalışmaları kullanılır. Ancak geleneksel sismik yaklaşımlar olarak tanımlanan bu uygulamalarda S dalgası üretmek zordur. Bu nedenle S dalga hızını belirlemek için alternatif yöntemlere ihtiyaç duyulmuştur. Yüzey Dalgalarının Çok Kanallı Analizi (MASW) yöntemi bu ihtiyacı karşılamaktadır.

Geleneksel sismik yöntemlerdeki sismik sinyaller 50 Hz'den yüksek frekanslı dalgalardan oluştururken MASW yönteminde daha düşük frekanslardaki (1-30 Hz) yüzey dalgaları ele alınır (Park, Miller, Xia ve Ivanov, 2007). Sismik araştırmalarda, toplam sismik enerjinin üçte ikisinden fazlası Rayleigh dalgaları olarak açığa çıkar (Richart, Hall ve Woods, 1970). Bu dalgalar, "Ground Roll" olarak da adlandırılır. Rayleigh dalgaları, farklı frekansların farklı yayılım hızına sahip olması anlamına gelen dispersiyon özelliğine sahiptir. MASW yöntemi, bir boyutlu (1D) şekilde yeraltının S dalga hızını belirleme amacıyla yüzey dalgalarının dispersif özelliğinden faydalanır. Aynı hat doğrultusunda elde edilen bir boyutlu modeller birleştirilerek iki boyutlu (2D) yeraltı modeli oluşturulur. İki boyutlu hatlar ise belirli aralıklarla birbirine paralel olacak şekilde yan yana birleştirilerek üç boyutlu (3D) yeraltı modelleri elde edilir.

MASW yöntemi genel olarak üç adım içerir: Veri toplama, dispersiyon eğrileri elde etme ve dispersiyon eğrilerinden ters çözüm ile S dalga hızını tespit etme. Veri toplama adımının dışında kalan iki adım genellikle "veri işlem" olarak adlandırılır. Veri işlem aşamasından geçen veriler ile elde edilen S dalga hızları sayesinde, sismik

hızlarla ilişkili zemine ait elastik parametreler hesaplanabilir. Bu parametrelerle birlikte yeraltı hakkında jeofizik ve jeoteknik yorumlamalar yapılır.

Yüzey dalgaları, 1900'lü yılların başlarından bu yana Dünya'nın içyapısını karakterize etmek için sismoloji biliminde çalışılan bir alan olmasına rağmen yakın yüzey araştırmalarında nispeten yeni kullanılmaktadır. 1990'lı yılların sonunda keşfedilen MASW yöntemi hala gelişmeye devam etmektedir. MASW yönteminin kullanım alanları yakın yüzey araştırmalarında oldukça yaygındır. Köprü, tünel, baraj, rüzgâr türbini, bina ve benzeri yapıların oturacağı zeminlerin karakterizasyonu, kaya-zemin ayrımı, zemin sıvılaşma potansiyeli, yeraltı boşluklarının bulunması, normal ve ters faylarda farklı seviyelere denk gelen aynı ortamların tespit edilmesi gibi konularda jeofizik ve jeoteknik açıdan birçok alanda kullanılan bir yöntemdir.

MASW yönteminin keşfedilmesinden bu yana olan süreç içinde yöntem, araştırmacılar tarafından ilgi görmüştür ve birçok alanda bu yöntem ile çalışmalar yapılmıştır. Yapılan bu çalışmalarla ilgili yayınlanmış çok sayıda makale bulunmaktadır. Yöntemin keşfi olarak adlandırılabilir Park, Miller ve Xia (1999) tarafından yapılan çalışma en temel örnektir. Zemin karakterizasyonu ile ilgili olarak Penumadu ve Park (2005) tarafından yapılan çalışma bu alandaki örneklerden biridir. Kaya-Zemin ayrımı ile ilgili olarak İsmail, Denny ve Metwaly (2014) tarafından yapılan çalışmada MASW yönteminin verdiği sonuç örnek olarak gösterilebilir. Aslında bu çalışmada MASW yöntemi ile sismik yansıma yöntemi karşılaştırılmıştır ancak sonuçlarında kaya-zemin ayrımı da tespit edilmiştir. Anakaya-Zemin ayrımına diğer bir örnek çalışma ise Miller, Xia, Park ve Ivanov (1999) tarafından yapılmıştır. Zemin sıvılaşma potansiyeli ile ilgili olarak Lin, Chang ve Chang (2004) tarafından yapılan çalışma, yöntemin bu probleme desteği konusunda örnek bir çalışmadır. MASW yönteminin teorisi düşünüldüğünde S dalga hızını elde etmek için Rayleigh dalgasının ters çözümü en önemli noktalardan birisidir. Bu konuda Xia, Miller ve Park (1999) tarafından yapılan çalışma literatürde en çok bilinen çalışmalardan birisidir. Bu çalışmanın yanı sıra dispersiyon eğrisinin ters çözümü konusunda farklı optimizasyon yöntemleri ile yapılan çalışmalar da literatürde yer almaktadır. Poormirzaee ve Moghadam (2014) tarafından Parçacık Sürü Optimizasyonu; Çaylak,

Göktürkler ve Sarı (2011) tarafından Genetik Algoritma ve Levenberg-Marquardt yöntemlerini içeren melez (hybrid) yöntem bu çalışmalardan bazılarıdır.

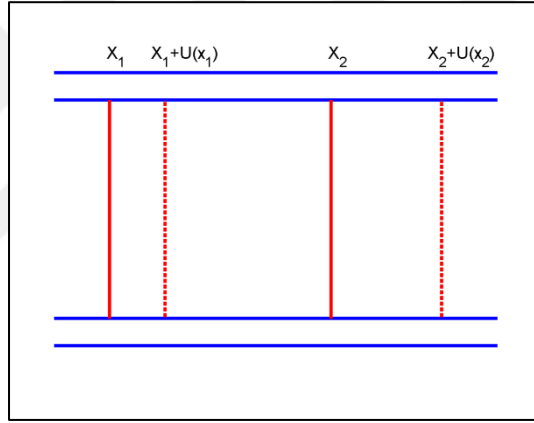
Bu tez kapsamında üç çalışma ele alınmıştır. Bu çalışmaların ilkinde, üzerinden yaya ve taşıt yolu geçen ve içi boş olan bir tünelin üstünde MASW yöntemi kullanılarak, tünel ve etrafındaki zeminin sismik hızlar kullanılarak yorumlanması hedeflenmiştir. Ayrıca bu alanda dolgu-zemin ayrımı belirlemenin yanı sıra, sismik hızlar yardımıyla jeoteknik parametreler de hesaplanmıştır. İkinci çalışma, Neojen bir ortamdaki düşük hız yapısı özelliğindeki jeolojik birimlerin jeoteknik karakterini ortaya çıkarmak anlamında yapılmıştır. Yapılan çalışmada sismik hızlar yardımıyla jeoteknik parametreler belirlenmiştir. Son çalışma ise bir jips karst bölgesinde kaya-zemin ayrımının yapılması amacıyla sismik hızlardan yararlanılarak, alandaki genel jeoteknik özelliklerin belirlenmesini hedeflemektedir.

BÖLÜM İKİ

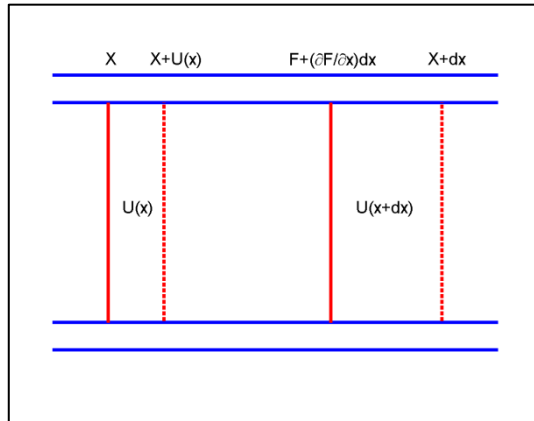
SİSMİK DALGALAR

2.1 Dalga Denklemleri

Elastik bir çubuğun x eksenı boyunca elastik deformasyon etkisi altında kaldığını varsayalım (Şekil 2.1) ve bu çubuğun young modülü E , yoğunluğu ρ ve kesiti S olsun. Çubuk üzerinde x_1 ve x_2 gibi iki sınırdaki arakesitler üzerine uygulanan kuvvetler sonucunda belirli bir zamanda x_1 sınırı $x_1+u(x_1)$ kadar, x_2 sınırı da $x_2+U(x_2)$ kadar genişleyerek kesikli çizgilerle gösterilen yere gelirler. (Kurtuluş, 2002).



Şekil 2.1 İnce bir çubuk içindeki boyuna dalgaların oluşması



Şekil 2.2 İnce bir çubuk içindeki boyuna dalgaların oluşması

Şekil 2.2 ise bu olayı x_1 ve x_2 arasındaki uzaklığın çok küçük bir dx uzaklığında olması durumunda açıklamaktadır. Newton'un ikinci kanununa göre:

$$F = m \cdot a = \rho \cdot s \cdot dx \frac{\partial^2 u}{\partial t^2} \quad (2.1)$$

yazılabilir. Burada Hook kanuna göre:

$$\text{stres} = \frac{F}{S} = \frac{\text{Kuvvet}}{\text{Birim Alan}} = E \frac{\partial u}{\partial x} \quad (2.2)$$

$$F = S \cdot E \frac{\partial u}{\partial x} \quad (2.3)$$

bulunur. x 'de etkiyen kuvvet Denklem 2.4'deki gibi

$$F = S \cdot E \frac{\partial u}{\partial x} \quad (2.4)$$

$(x+dx)$ 'de etkiyen kuvvet Denklem 2.5'deki gibi

$$F + dF = ES \frac{\partial u}{\partial x} + ES \frac{\partial^2 u}{\partial x^2} dx \quad (2.5)$$

Net ivme kuvveti ise Denklem 2.6'daki gibidir.

$$F + dF - F = dF = ES \frac{\partial^2 u}{\partial x^2} dx \quad (2.6)$$

Denklem 2.1 ve 2.6'yı eşitlersek Denklem 2.7 elde edilir ve gerekli kısaltmalar yapıldıktan sonra Denklem 2.8 elde edilebilir.

$$\rho \cdot s \cdot dx \frac{\partial^2 u}{\partial t^2} = ES \frac{\partial^2 u}{\partial x^2} dx \quad (2.7)$$

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

Denklem 2.8'deki elastik sabitler Denklem 2.9'daki gibidir.

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

Burada V dalga hızını gösterir. Görüldüğü gibi hız sadece elastik parametre ve yoğunluğa bağlıdır. Üç boyutlu dalga denklemi de aynı yol ile elde edilebilir ve P dalgaları için üç boyutlu dalga denklemi Denklem 2.10'daki gibidir.

$$\frac{\partial^2 u}{\partial t^2} = \frac{\lambda + 2\mu}{\rho} \left(\frac{\partial^2 u}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 u}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 u}{\partial z^2} \right) \quad (2.10)$$

S dalgaları için üç boyutlu dalga denklemi ise

$$\frac{\partial^2 u}{\partial t^2} = \frac{\mu}{\rho} \left(\frac{\partial^2 u}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 u}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 u}{\partial z^2} \right) \quad (2.11)$$

olarak bulunur (Kurtuluş, 2002).

2.2 Cisim Dalgaları

Sonsuz, homojen ve lineer elastik bir ortamda cisim dalgaları iki farklı türde yayılır: P dalgaları ve S dalgaları (Şekil 2.3). P dalgalarının hareket yönü parçacık hareketiyle aynı yayılma doğrultusundadır ve deformasyon olmaksızın hacim değişimine neden olur. P dalgaları, parçacık hareketinin yayılma yönüne dik olduğu S dalgalarından daha hızlı yayılır.

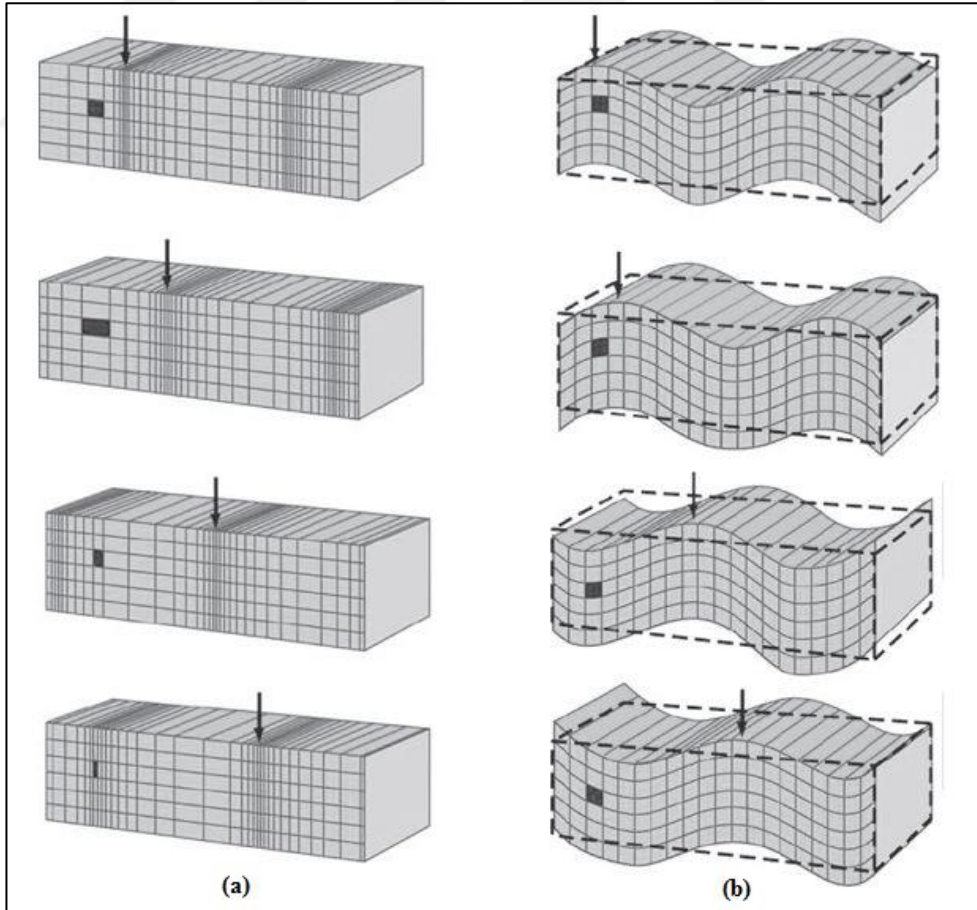
Sismik dalgaların lineer elastik katı içindeki yayılım hızı, ortamın mekanik parametreleriyle ilişkilidir. Aslında elastik bir ortamın mekanik tepkisi iki elastik

sabitlerle karakterize edilmiştir: λ (*Lame Sabiti*) ve μ (*Rijidite, Makaslama Modülü*). Sismik dalga hızı, bu sabitler ve materyalin kütle yoğunluğu ρ arasındaki ilişki ile ifade edilebilir.

$$V_P = \sqrt{\frac{\lambda + 2\mu}{\rho}} \quad (2.12)$$

$$V_S = \sqrt{\frac{\mu}{\rho}} \quad (2.13)$$

Cisim dalgalarının yayılma hızı ortamın sertliğine bağlıdır ve lineer elastik materyallerde frekansa bağlı değildir. Özellikle P dalgalarının yayılma hızı boyuna (*longitudinal*) modül ile ilişkili iken S dalgalarının yayılma hızı makaslama (*shear*) modülü ile ilişkilidir.



Şekil 2.3 Cisim dalgalarının hareketi: (a) P dalgası; (b) S dalgası (Everett, 2013)

P dalgasının fiziksel hareketi sıkışma ve genişleme şeklindedir. Kaynaktan çıkan bir P dalgası ortam içerisinde küresel olarak yayılır ve yayılırken titreşim yapan bir karakter gösterir. Eğer basınç ani bir şekilde uygulanırsa homojen bir ortam içinde bir noktada sıkışma bölgesi dışarıya doğru küresel şekilde hareket eder. Ardından düşük basınçlı ikinci bir dalga cephesi ve onu takip eden tekrar yüksek basınçlı bir dalga cephesi gelerek olay tekrarlanır (Kurtuluş, 2002).

S dalgasının fiziksel hareketinde ise tanecik hareketi dalganın hareket yönüne dik doğrultuda ve birbirine paraleldir. S dalgasının hareketi düşey (SV) ve yatay (SH) bileşen olmak üzere ikiye ayrılır. SH dalgalarında taneciğin karakteristik hareketi yatay düzlemde, SV dalgasındaki ise düşey düzlemde gerçekleşir (Kurtuluş, 2002). S dalgasının hız denklemi ele alındığında rijiditenin sıfır olduğu ortamlarda S dalga hızı sıfırdır. Bu nedenle S dalgaları sıvılarda yayılamaz. P ve S dalga hızları ile elastik sabitler arasında bağıntılar ele alınır

$$\sigma = \frac{\lambda}{2(\lambda + \mu)} \quad (2.14)$$

$$\sigma = \frac{\left(\frac{V_P}{V_S}\right)^2 - 2}{2\left(\frac{V_P}{V_S}\right)^2 - 2} \quad (2.15)$$

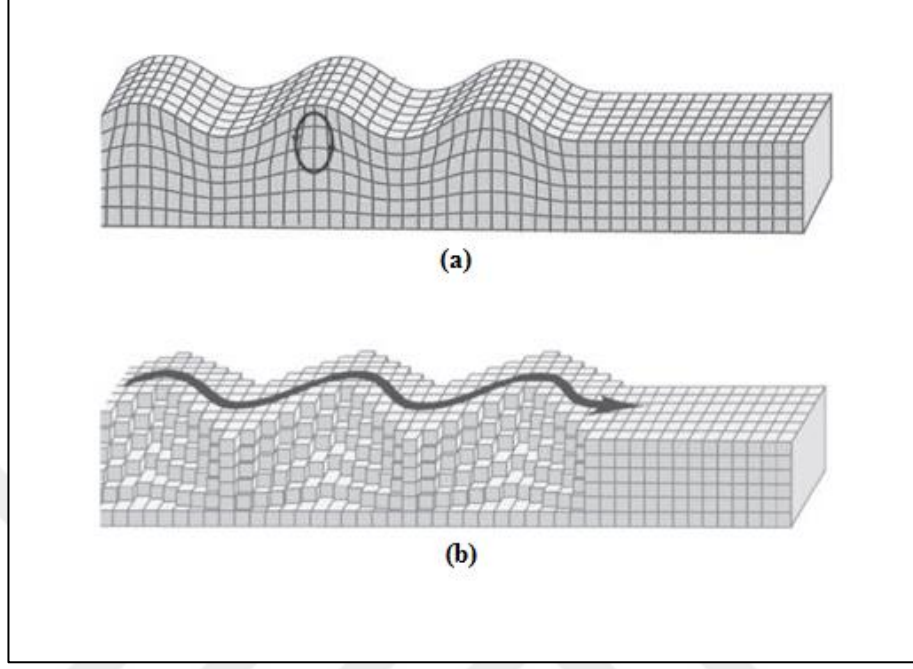
$$\frac{V_P}{V_S} = \sqrt{\frac{1 - \sigma}{\frac{1}{2} - \sigma}} \quad (2.16)$$

burada σ Poisson oranıdır ve 0 ile 0,5 arasında bir değerdir. Eğer $\sigma = 0$ alınırsa V_S/V_P oranının alacağı değer 0,7 olur. Bu nedenle Poisson oranının sıfır olduğu ortamda S dalga hızı, P dalga hızının 0,7 katı kadardır.

2.3 Yüzey Dalgaları

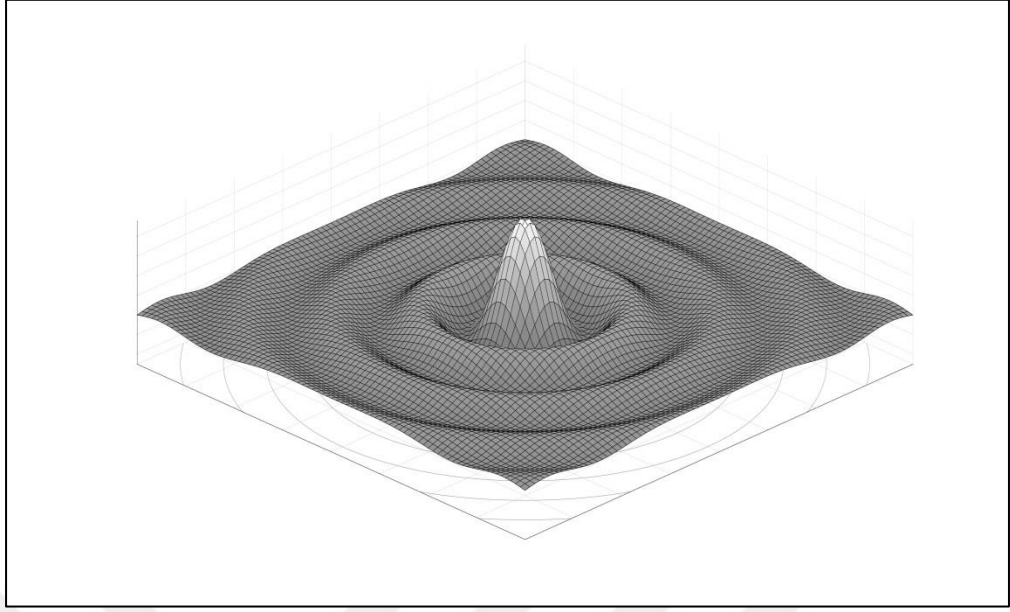
Bir kaynak; P dalgaları, S dalgaları ve yüzey dalgalarını içeren tam bir spektrum yayacaktır. Elastik enerjinin genellikle %67'si yüzey dalgaları, %26'sı S dalgaları ve %7'si ise P dalgalarıdır (Miller ve Pursey, 1955). Yüzey dalgaları en temel şekilde

Rayleigh ve Love dalgaları olarak ikiye ayrılır (Şekil 2.4). İlerleyen bölümlerde daha çok Rayleigh dalgaları ele alınacaktır.



Şekil 2.4 Yüzeysel dalgaların hareketi: (a) Rayleigh dalgası; (b) Love dalgası (Everett, 2013)

Yüzeysel dalgaların özelliklerinden birkaçı, yüzeysel dalgalarını jeomateryal karakterizasyonu için önemli kılar. Yüzeysel dalgaları bir ortamın sınırında stresin kaybolduğu koşullarda meydana gelir ve yayılma yapısı aslında iki boyutludur (Şekil 2.5). Dolayısıyla enerjisi yatay ve düşey yönde yayılan cisim dalgalarına göre çok daha düşük bir geometrik sönümlenme oranı ile karakterize edilir. Örneğin homojen elastik yarı-sonsuz ortamda bir çizgi kaynak tarafından üretilen yüzeysel dalgaları, herhangi bir geometrik sönümlenme göstermezken nokta kaynak için uzaklığa bağlı zayıflama oranı, kaynaktan olan uzaklığın karekökünün tersi ile orantılıdır. Ayrıca bir nokta kaynak için elastik yarı-sonsuz ortamın sınırı boyunca yayılım gösteren cisim dalgalarının geometrik sönümlenme faktörü, mesafenin karesinin tersiyle orantılıdır (Ewing, Jardetzky ve Press, 1957). Bu yüzden kaynaktan yaklaşık bir ile iki dalgaboyu mesafelerde cisim dalgalarının varlığı ihmal edilebilir. Çünkü dalga alanı yüzeysel dalgaları tarafından bastırılır.



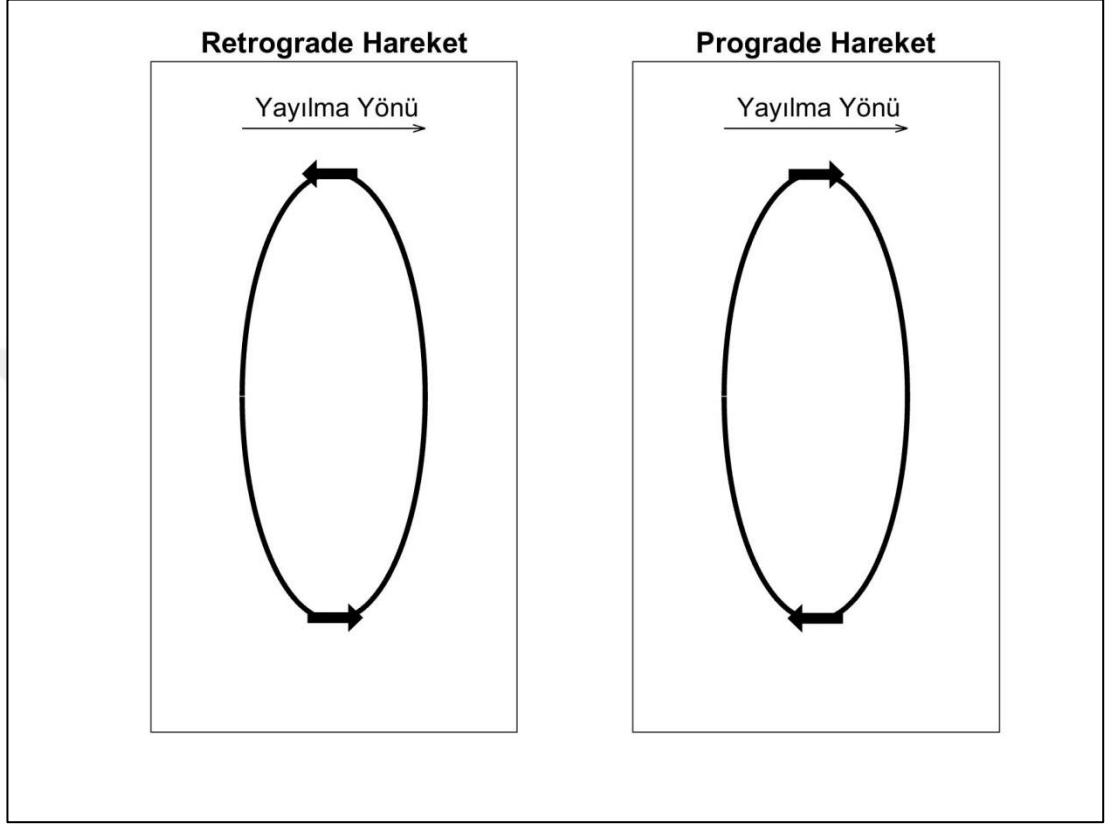
Şekil 2.5 Düşey nokta kaynak tarafından üretilen yüzey dalgalarının iki boyutlu yayılma modeli

Bir yüzey dalgası tarafından üretilen yer değiştirme alanı üstel olarak azalır çünkü yarı-sonsuz ortamın içinde hiçbir enerji yayılmaz. Yüzey dalgasının hareketi ile ilişkili gerilme enerjisinin çoğu, serbest sınırdan yaklaşık bir dalga boyu derinlik ile sınırlandırıldığı gösterilebilir. Bu nedenle daha uzun dalga boylarına sahip yüzey dalgaları, ortamın daha derinliklerine nüfuz eder. Dalgaboyu harmonik dalgalardaki frekansın tersine orantılı olduğu için bu durum şöyle yorumlanabilir: Yüksek frekanslı dalgalar ortamdaki sığ derinliklerde hareket ederken düşük frekanslı bileşenler daha derinlerde hareket eder.

2.3.1 Rayleigh Dalgaları

Yüzey dalgalarının varlığını ilk tahmin eden bilim insanı olan Lord Rayleigh'nin ismi bu dalgalara verilmiştir. Rayleigh dalgalarının özellikleri ele alındığında diğer dalga türlerine göre farklılıkları olduğu ortaya çıkmaktadır. Rayleigh dalgaları dispersiyon özelliğine sahiptir. Hızları S dalgası hızından daha yavaştır ve Poisson oranının 0,25 olduğu ortamda yaklaşık olarak S dalga hızının 0,91 katına eşittir. Tanecik hareketi doğrusal olmayıp elips şeklinde bir yörünge çizmektedir. Bu hareket retrograde hareket olarak adlandırılır. Dobrin, Lawrance ve Simon (1951) yapmış olduğu çalışmalarda taneciğin yörünge hareketlerinin derinlikle değiştiğini

saptamışlardır. Bu hareketin yaklaşık 12 metreden yukarıda retrograde, 12 metreden daha derinlerde ise prograde olduğu ortaya konmuştur. Prograde hareket, ters yönde olan retrograde harekettir (Şekil 2.6).

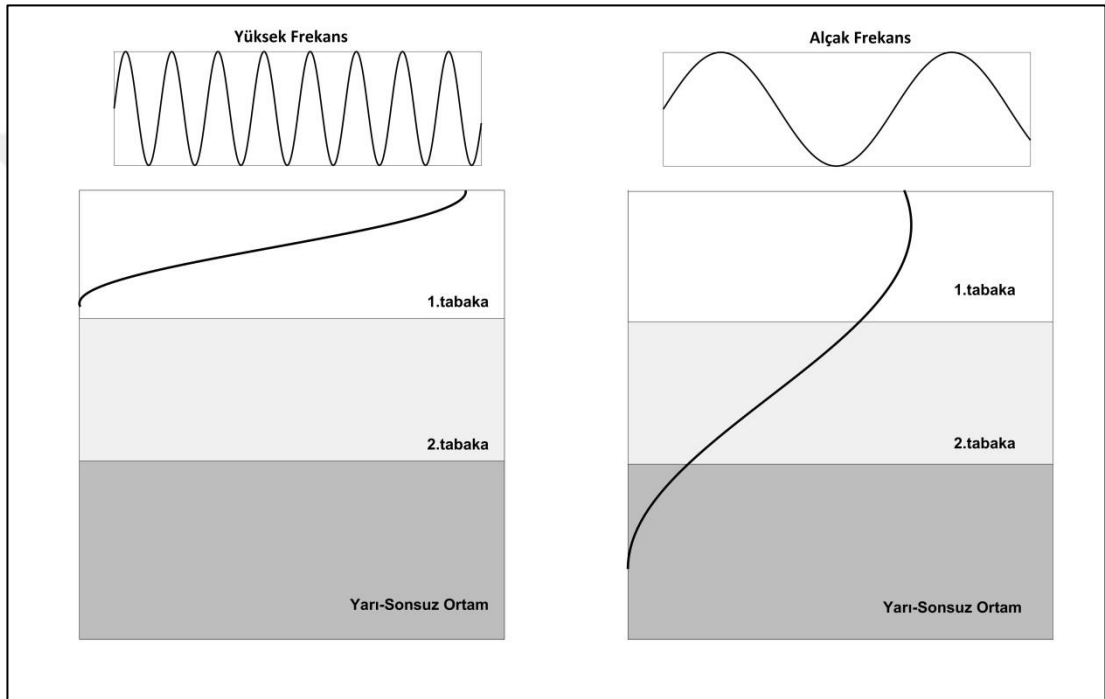


Şekil 2.6 Retrograde ve Prograde hareketin yönü

2.3.1.1 Dispersiyon Özelliği

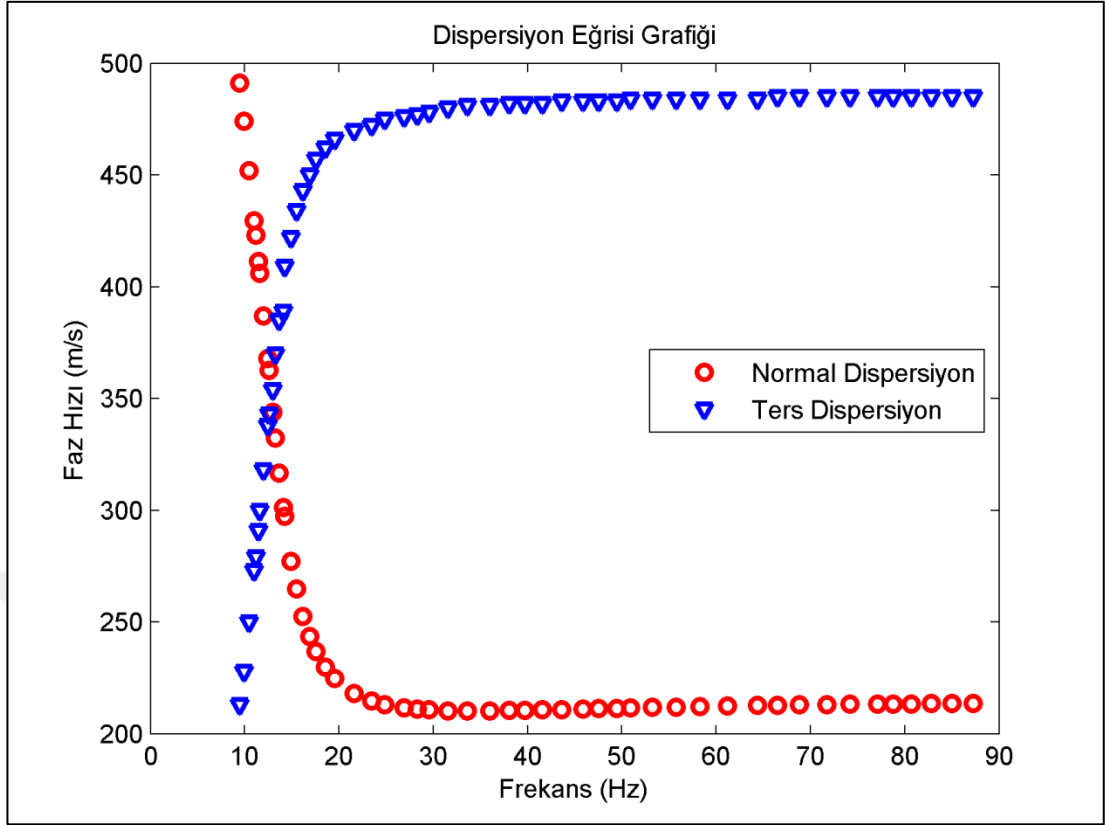
Rayleigh dalgaları; homojen, izotropik, lineer elastik yarı-sonsuz ortamda dispersif değildir. Diğer bir deyişle yayılma hızı ortamın mekanik özelliklerinin bir fonksiyonudur fakat frekansın fonksiyonu değildir. Düşey heterojen ortamda, geometrik dispersiyon esaslı ortaya çıkar ve bunun sonucunda Rayleigh dalgalarının faz hızı frekansa bağlı olur. Şekil 2.7'de gösterilen yarı-sonsuz ortam ve üzerindeki iki tabakadan oluşan bir ortamı ele aldığımızda solda yüksek frekanslı Rayleigh dalgası ile ilişkili düşey parçacık hareketi gösterilmektedir. Parçacık hareketinin çoğu, serbest yüzeyden yaklaşık bir dalga boyu kadar mesafe ile sınırlanmıştır. Bu durumda parçacık hareketi neredeyse birinci tabaka içinde gerçekleşir. Bu yüzden

birinci tabakanın materyal özellikleri Rayleigh dalgasının hızını kontrol eder. Şeklin sağ tarafında ise düşük frekanslı Rayleigh dalgaları ile ilişkili düşey parçacık hareketi gösterilmektedir. Bu durumda parçacık hareketi daha derinlere kadar uzanır ve birinci ve ikinci tabakada kayda değer, üçüncü tabakada ise daha az parçacık hareketi vardır. Sonuç olarak Rayleigh dalgalarının dispersif olmasının nedeni düşey parçacık hareketinin eliptik yörüngeler halinde olmasından kaynaklıdır. Dolayısıyla tabakalı ortamın dispersif özelliğe doğrudan etkisi vardır.



Şekil 2.7 Tabakalı ortamda düşey parçacık hareketinin derinliği

Rayleigh dalgalarının dispersiyon özelliği iki şekilde görülür; normal dispersiyon ve ters dispersiyon. Frekans arttıkça faz hızının azaldığı durum normal dispersiyon olarak tanımlanırken, artan frekansla beraber faz hızı da artıyorsa bu durum ters dispersiyon olarak tanımlanır (Şekil 2.8).



Şekil 2.8 Normal ve ters dispersiyon eğrisi grafiği

2.3.1.2 Grup ve Faz Hızı

Dispersif olmayan dalgalar tek bir hızla ve şekil değiştirmeden yayılır. Dispersiyon olduğunda ise hız frekansa bağlıdır ve dalga yayılırken şekil değiştirir. Dispersif dalgalar iki farklı hız ile tanımlanır; grup hızı ve faz hızı (Rayleigh, 1885). Faz hızı, dalga formunun tek bir fazının hızıyken, Grup hızı tüm dalga formunun hızıdır (Şekil 2.9). Bu iki hız birbirine eşit değildir. Grup ve faz hızı matematiksel olarak Denklem 2.17 ve 2.18 ile ifade edilebilir.

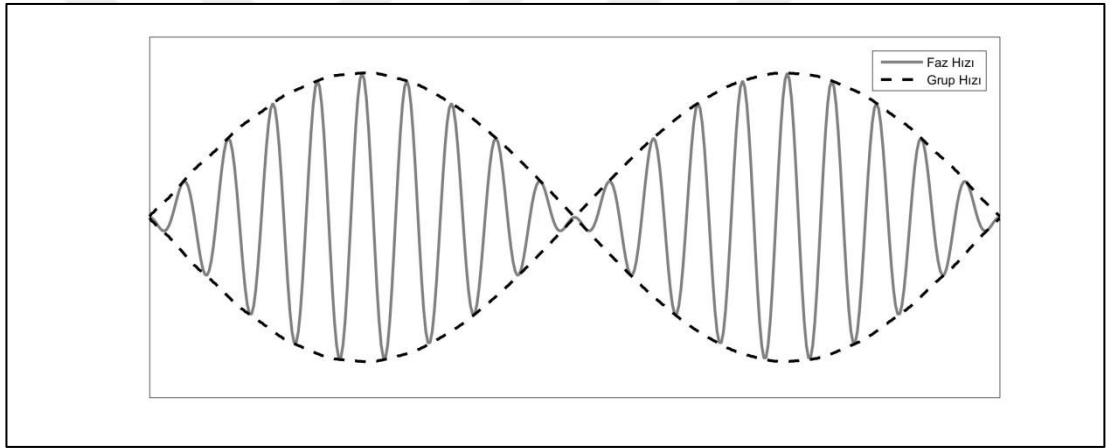
$$V_{grup} = \frac{\partial \omega}{\partial k} \quad (2.17)$$

$$V_{faz} = \frac{\omega}{k} \quad (2.18)$$

Burada ω açısal frekans, k dalga sayısıdır. Grup ve faz hızı arasındaki ilişki ise Denklem 2.19 ile gösterilebilir.

$$V_{grup} = V_{faz} + k \frac{dV_{faz}}{dk} = V_{faz} \left(1 - k \frac{dV_{faz}}{dk} \right)^{-1} \quad (2.19)$$

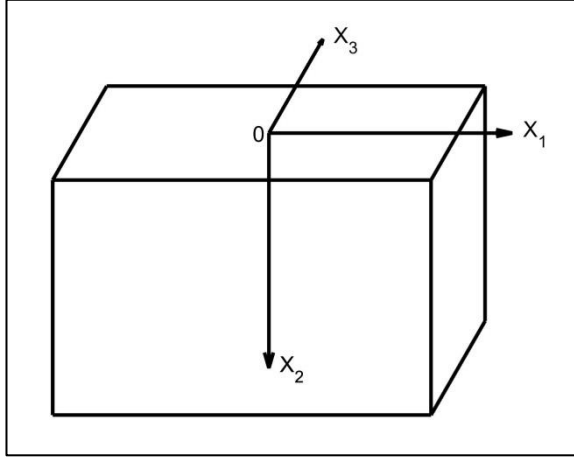
Denklem 2.19'da açıkça görülüyor ki, faz hızının türevi sıfıra eşit olduğunda grup ve faz hızları eşit olur. Faz hızının türevinin sıfır olması demek materyalin dispersif olmadığını gösterir. Dispersif ortamlarda çok modlu yüzey dalgaları için, her mod frekansa bağlı grup ve faz hızlarıyla tanımlanabilir. Denklem 2.19 tekrar ele alındığında görülüyor ki frekans arttığında, grup hızı faz hızından daha düşüktür.



Şekil 2.9 Grup hızı ve faz hızının şematik gösterimi

2.3.1.3 Homojen Yarı Sonsuz Ortamda Rayleigh Dalgaları

Rayleigh dalgalarının varlığını araştırmak için, lineer elastik, homojen yarı-sonsuz bir ortamın serbest yüzeyi boyunca (x_1 -yönü) iki boyutlu (2D) düzlem dalgaların yayılımını göz önünde bulundurmak gerekir (Şekil 2.10) ve Denklem 2.20'deki yer değiştirme alanı ile karakterize edilir (Foti, Lai, Rix ve Strobbia, 2014).



Şekil 2.10 Lineer, elastik, homojen yarı-sonsuz ortamın şematik gösterimi

$$\begin{aligned}
 u_1 &= C_1 \cdot e^{-\alpha x_2} \cdot e^{-ik(x_1-ct)} \\
 u_2 &= C_2 \cdot e^{-\alpha x_2} \cdot e^{-ik(x_1-ct)} \\
 u_3 &= 0
 \end{aligned}
 \tag{2.20}$$

Burada k ve c , dalgasayısı ve düzlem dalganın yayılma hızıdır. α karmaşık (*complex*) değerleri üstlenebilen bir sabittir. Bununla birlikte, bir yüzey dalgasını temsil etmek için yer değiştirme bileşenleri (u_1 ve u_2), x_2 'nin artmasıyla birlikte üstel olarak azalsın diye α 'nın gerçekte sıfırdan büyük kabul edilir. Denklem 2.20'de x_1 ve x_2 düzlemiyle sınırlı hareketin gerilme alanına karşılık gelir.

Bir düzlem gerilme alanına uygulanan, Navier'in yer değiştirme denklemi (Denklem 2.21), bilinmeyen yer değiştirme alanı $u(x,t)$ için Helmholtz ayrışma teoremi (Achenbach, 1984) kullanılarak başarıyla ayrılabilir.

$$\mu \nabla^2 u + (\lambda + \mu) \text{grad div } u = \rho \frac{\partial^2 u}{\partial t^2}
 \tag{2.21}$$

$$u = \text{grad } \phi + \text{curl } \Psi
 \tag{2.22}$$

Denklem 2.22'de ϕ ve Ψ sırasıyla skaler ve vektörel yer değiştirme potansiyeli fonksiyonlarıdır. Düzlem gerilme koşulları için $u_3=0$ ve Helmholtz ayrışması Denklem 2.23 ve 2.24'deki gibidir.

$$u_1 = \frac{\partial \phi}{\partial x_1} - \frac{\partial \psi}{\partial x_2} \quad (2.23)$$

$$u_2 = \frac{\partial \phi}{\partial x_2} - \frac{\partial \psi}{\partial x_1} \quad (2.24)$$

Burada $\Psi = [0 \ 0 \ \psi_3 = \psi]$ 'dir. Denklem 2.23 ve 2.24, Denklem 2.21'de yerine yazılırsa sonuç Denklem 2.25 ve 2.26'daki gibi olur.

$$\frac{\partial^2 \phi}{\partial x_1^2} + \frac{\partial^2 \phi}{\partial x_2^2} = \frac{1}{V_p^2} \cdot \frac{\partial^2 \phi}{\partial t^2} \quad (2.25)$$

$$\frac{\partial^2 \psi}{\partial x_1^2} + \frac{\partial^2 \psi}{\partial x_2^2} = \frac{1}{V_s^2} \cdot \frac{\partial^2 \psi}{\partial t^2} \quad (2.26)$$

Skaler yer değiştirme potansiyelleri ϕ ve ψ Denklem 2.20 ile temsil edilen dalga alanı ile uyumlu olacak şekilde seçilir.

$$\phi = \Phi(x_2) \cdot e^{ik(x_1 - ct)} \quad (2.27)$$

$$\psi = \Psi(x_2) \cdot e^{ik(x_1 - ct)} \quad (2.28)$$

Denklem 2.27 ve 2.28'i Denklem 2.25 ve 2.26'da yerine koyarsak Denklem 2.29 ve 2.30'daki gibi bir çift lineer, ikinci dereceden sabit katsayılı adi diferansiyel denklem elde edilir.

$$\frac{d^2 \Phi}{dx_2^2} + \left(\frac{\omega^2}{V_p^2} - k^2 \right) \cdot \Phi(x_2) = 0 \quad (2.29)$$

$$\frac{d^2 \Psi}{dx_2^2} + \left(\frac{\omega^2}{V_s^2} - k^2 \right) \cdot \Psi(x_2) = 0 \quad (2.30)$$

Burada $\omega = k \cdot c$ 'dir. Eğer $p^2 = \frac{\omega^2}{V_p^2} - k^2 > 0$ ve $q^2 = \frac{\omega^2}{V_s^2} - k^2 > 0$ eşitlikleri Denklem 2.29 ve 2.30'a uyarlanırsa, bu denklemlerin çözümü bir yüzey dalgasının derinlik bağımlılığına karşılık gelmez. Ama yine de, eğer $p < 0$ ve $q < 0$ ise, Denklem 2.29 ve 2.30'un özümü Denklem 2.31 ve 2.32'deki gibi olur.

$$\Phi(x_2) = A_3 \cdot e^{-px_2} + A_4 \cdot e^{px_2} \quad (2.31)$$

$$\Psi(x_2) = B_3 \cdot e^{-qx_2} + B_4 \cdot e^{qx_2} \quad (2.32)$$

Bu, yüzey dalgasının tipik olarak üstel sönümlenme şeklini gösterir. 2.31 ve 2.32 denklemleri, 2.27 ve 2.28 denklemlerinde yerine yazılırsa 2.33 ve 2.34 denklemleri elde edilir.

$$\phi = \Phi(x_2) \cdot e^{ik(x_1-ct)} = (A_3 \cdot e^{-px_2} + A_4 \cdot e^{px_2}) \cdot e^{i(kx_1-\omega t)} \quad (2.33)$$

$$\psi = \Psi(x_2) \cdot e^{ik(x_1-ct)} = (B_3 \cdot e^{-qx_2} + B_4 \cdot e^{qx_2}) \cdot e^{i(kx_1-\omega t)} \quad (2.34)$$

Yer değiştirme alanı; 2.33 ve 2.34 denklemlerini, 2.22 denkleminde yerine yazarak elde edilir ve yer değiştirme alanının sonucu 2.35 ve 2.36 denklemleri olur.

$$u_1 = \frac{\partial \phi}{\partial x_1} - \frac{\partial \psi}{\partial x_2}$$

$$= [(A_3 \cdot e^{-px_2} + A_4 \cdot e^{px_2}) \cdot ik + (B_3 \cdot e^{-qx_2} - B_4 \cdot e^{qx_2}) \cdot q] \cdot e^{i(kx_1-\omega t)} \quad (2.35)$$

$$u_2 = \frac{\partial \phi}{\partial x_2} - \frac{\partial \psi}{\partial x_1}$$

$$= [(A_4 \cdot e^{px_2} - A_3 \cdot e^{-px_2}) \cdot p + (B_3 \cdot e^{-qx_2} + B_4 \cdot e^{qx_2}) \cdot ik] \cdot e^{i(kx_1-\omega t)} \quad (2.36)$$

2.35 ve 2.36 denklemlerinde görünen A_3 , A_4 , B_3 ve B_4 sabitleri, yarı-sonsuz zemin yüzeyindeki gerilmenin olmadığı ve $x_2 \rightarrow \infty$ sınır şartlarından belirlenir ve 2.37 eşitliği ile ifade edilebilir.

$$x_2 \rightarrow \infty \text{ için } u_1 \rightarrow 0, \quad u_2 \rightarrow 0 \quad (2.37)$$

Bu durum, 2.35 ve 2.36 denklemlerinde A_3 ve B_3 sabitlerinin yok olduğu anlamına gelir. Dolayısıyla 2.38 ve 2.39 denklemleri elde edilir.

$$u_1 = (ik \cdot A_4 \cdot e^{-rx_2} + s \cdot B_4 \cdot e^{-sx_2}) \cdot e^{i(kx_1-\omega t)} \quad (2.38)$$

$$u_2 = (ik \cdot B_4 \cdot e^{-sx_2} - r \cdot A_4 \cdot e^{-rx_2}) \cdot e^{i(kx_1-\omega t)} \quad (2.39)$$

Burada $r^2 = k^2 - \frac{\omega^2}{v_p^2}$ ve $s^2 = k^2 - \frac{\omega^2}{v_s^2}$ 'dir. Yarı-sonsuz alanın yüzeyindeki gerilme-serbest sınır şartı, 2.40 eşitlikleriyle ifade edilir.

$$x_2 = 0 \text{ da } \quad \sigma_{21} = 0, \quad \sigma_{22} = 0 \quad (2.40)$$

Hooke yasası stres bileşenleri için yazıldığında σ_{21} ve σ_{22} Denklem 2.41 ve 2.42'deki gibi olur.

$$\sigma_{22} = \lambda \frac{\partial u_1}{\partial x_1} + (\lambda + 2\mu) \frac{\partial u_2}{\partial x_2} \quad (2.41)$$

$$\sigma_{12} = \sigma_{21} = \mu \left(\frac{\partial u_1}{\partial x_2} + \frac{\partial u_2}{\partial x_1} \right) \quad (2.42)$$

2.38 ve 2.39 denklemleri, 2.41 ve 2.42 denklemlerinde yerine yazıldığında 2.43 ve 2.44 denklemleri elde edilir.

$$\begin{aligned} \sigma_{22} &= \lambda(ikA_4e^{-rx_2} + sB_4e^{-sx_2}) \cdot ik e^{i(kx_1-\omega t)} \\ &+ (\lambda + 2\mu) \cdot (r^2A_4e^{-rx_2} - iksB_4e^{-sx_2}) \cdot e^{i(kx_1-\omega t)} \end{aligned} \quad (2.43)$$

$$\begin{aligned} \sigma_{12} &= \mu[(-ikrA_4e^{-rx_2} + sB_4e^{-sx_2}) \cdot e^{i(kx_1-\omega t)}] \\ &+ (ikB_4e^{-sx_2} - rA_4e^{-rx_2}) \cdot e^{i(kx_1-\omega t)} \end{aligned} \quad (2.44)$$

Serbest sınır şartı $x_2 = 0$ da,

$$\sigma_{22} = [\lambda(ikA_4 + sB_4) \cdot ik + (\lambda + 2\mu) \cdot (r^2A_4 - iksB_4)] \cdot e^{i(kx_1-\omega t)} = 0 \quad (2.45)$$

$$\sigma_{12} = \mu[(-ikrA_4 + sB_4) + (ikB_4 - rA_4)ik] \cdot e^{i(kx_1-\omega t)} = 0 \quad (2.46)$$

2.45 ve 2.46 denklemleri artık iki bilinmeyenli iki lineer cebirsel denklemin homojen bir sistemi olarak yeniden düzenlenirse 2.47 ve 2.48 olarak elde edilir.

$$[r^2(\lambda + 2\mu) - \lambda k^2]A_4 + [\lambda iks - (\lambda + 2\mu)iks]B_4 = 0 \quad (2.47)$$

$$[-2ikr]A_4 - [k^2 + s^2]B_4 = 0 \quad (2.48)$$

Bu ifade matris biçiminde de yazılabilir.

$$\begin{bmatrix} [r^2(\lambda + 2\mu) - \lambda k^2] & -2iks \cdot \mu \\ [-2ikr] & -(k^2 + s^2) \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} A_4 \\ B_4 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \end{bmatrix} \quad (2.49)$$

Katsayıların determinantı sıfır olursa bu denklem sisteminin aşık olmayan (*nontrivial*) bir çözümü var olur. Bu da bilinen Rayleigh dispersiyon denklemdir.

$$-(k^2 + s^2) \cdot [r^2(\lambda + 2\mu) - \lambda k^2] + 4k^2\mu rs = 0 \quad (2.50)$$

Denklem 2.50'de $r^2 = k^2 - \frac{\omega^2}{V_P^2}$ ve $s^2 = k^2 - \frac{\omega^2}{V_S^2}$ ifadeleri yeniden yerine yazılırsa

Denklem 2.51 elde edilir.

$$4k^2\mu \left[\left(k^2 - \frac{\omega^2}{V_P^2} \right) \left(k^2 - \frac{\omega^2}{V_S^2} \right) \right]^{\frac{1}{2}} - \left[2k^2 - \frac{\omega^2}{V_S^2} \right] \left[\left(k^2 - \frac{\omega^2}{V_P^2} \right) \cdot (\lambda + 2\mu) - \lambda k^2 \right] = 0 \quad (2.51)$$

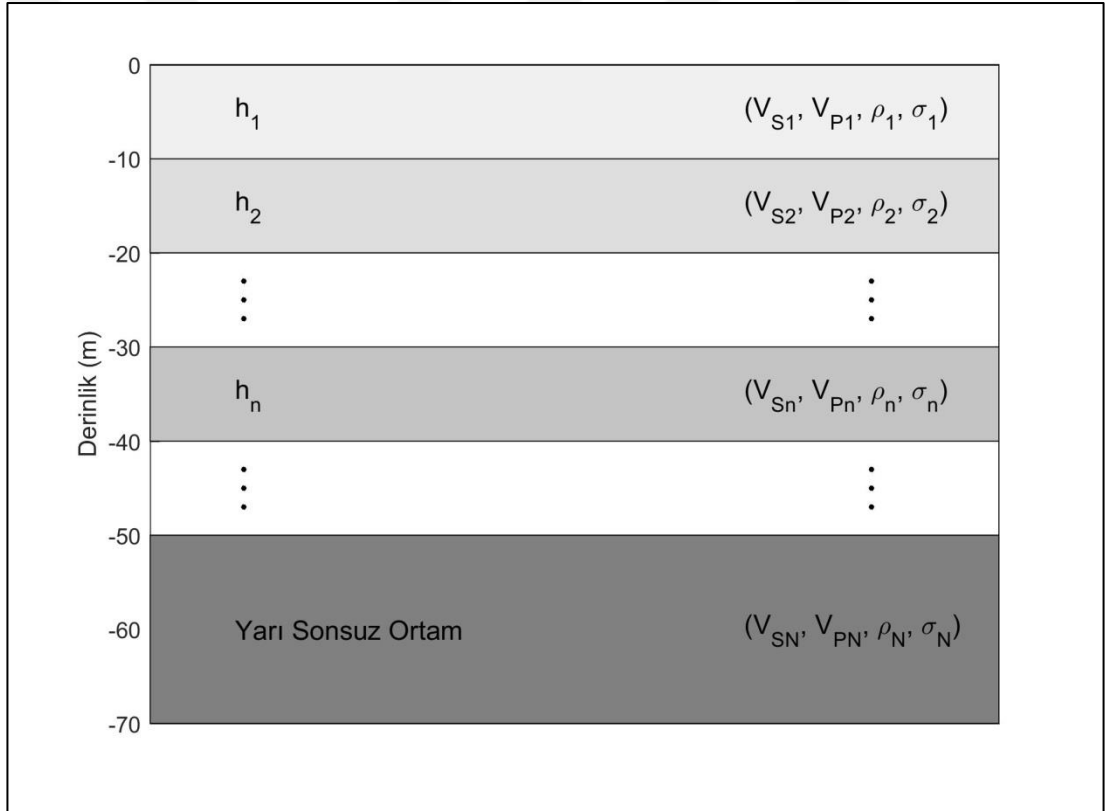
$k = \omega/c = \omega/V_R$, 2.12 ve 2.13 denklemleri yeniden ele alınırsa 2.51 denklemini, 2.52 denklemini olarak düzenlenebilir.

$$\left(\frac{V_R}{V_S} \right)^6 - 8 \left(\frac{V_R}{V_S} \right)^4 + 8 \left(\frac{V_R}{V_S} \right)^2 \cdot \left[1 + 2 \left(1 - \frac{V_S^2}{V_P^2} \right) \right] - 16 \left(1 - \frac{V_S^2}{V_P^2} \right) = 0 \quad (2.52)$$

Denklem 2.52'de V_R yarı-sonsuz ortamın serbest yüzeyi boyunca hareket eden dalganın hızını temsil eder. Bu yüzden bu dalgalara yüzey dalgaları denir. Denklem 2.52 sadece V_P ve V_S hızlarına bağlıdır. Bu yüzden V_R homojen yarı-sonsuz ortamda dispersif değildir. Bunun nedeni homojen bir yarı-sonsuz ortamın gerçek bir uzunluk ölçüğüne sahip olmamasıdır (Foti ve diğer., 2014).

2.3.1.4 Çok Tabakalı Elastik Ortamda Rayleigh Dalgaları

Rayleigh dalgalarının fiziksel hareketini tekrar hatırlayacak olursak retrograde hareket gösteren bu dalgalar frekanslarına bağlı olarak farklı derinliklere ulaşabilir. Dolayısıyla Rayleigh dalgalarının ulaştığı derinlikler farklı ortamlar olabilir ve tabakalı ortamlarda Rayleigh dalgaları hareketini sürdürebilir. Şekil 2.11'deki çok tabakalı bir ortamı göz önüne alırsak yarı-sonsuz ortam ve üzerindeki N-1 tabakanın her biri S hızı (V_S), P hızı (V_P), yoğunluk (ρ) ve Poisson oranı (σ) ile tanımlanır. Örneğin n'inci tabaka için bu özellikler V_{Sn} , V_{Pn} , ρ_n , σ_n olarak gösterilir (Everett, 2013).



Şekil 2.11 Çok tabakalı elastik ortamın şematik gösterimi

N'inci tabaka için yatay ve düşey yer değiştirme ifadeleri u_n ve w_n olarak gösterilirse skaler dalga denklemleri Denklem 2.53 ve 2.54'deki gibi olur.

$$u_n = \frac{\partial \varphi_n}{\partial z} + \frac{\partial \psi_n}{\partial x} \quad (2.53)$$

$$w_n = \frac{\partial \varphi_n}{\partial z} - \frac{\partial \psi_n}{\partial x} \quad (2.54)$$

Sıkışma potansiyeli φ_n 'nin n'inci tabakadaki genel denklemi, Denklem 2.55'deki gibidir.

$$\varphi_n = U_{P_n} \cdot e^{ir_n z} + D_{P_n} \cdot e^{-ir_n z} \quad (2.55)$$

Kesme potansiyeli için ise ψ_n 'nin genel denklemi, Denklem 2.56'daki gibidir.

$$\psi_n = U_{S_n} \cdot e^{is_n z} + D_{S_n} \cdot e^{-is_n z} \quad (2.56)$$

U_{P_n} ve U_{S_n} katsayıları V_P ve V_S hızlarına bağlı olan yukarı giden (*up-going*) dalgaya denk gelirken D_{P_n} ve D_{S_n} katsayıları aşağı giden (*down-going*) dalgaya karşılık gelir. Denklem 2.55 ve 2.56'daki r_n ve s_n ifadeleri dalga sayılarını ifade eder.

$$r_n^2 = k_{ph}^2 - k_{P_n}^2, \quad s_n^2 = k_{ph}^2 - k_{S_n}^2 \quad (2.57)$$

Burada $k = w/V$ 'dir. Bu yüzden Denklem 2.57'deki k_{P_n} ve k_{S_n} dalga sayıları n'inci tabakadaki w açısal frekansına bağlı P ve S hızlarına karşılık gelir. Denklem 2.57'deki k_{ph} ifadesi, V_{ph} faz hızıyla yayılan $f = w/2\pi$ frekanslı bir dalga ile ilişkili dalga sayısıdır.

U_{P_n} , U_{S_n} , D_{P_n} ve D_{S_n} bilinmeyen katsayıları, uygun sınır koşullarının uygulanması ile bulunur. Bu katsayılar; tabaka ara yüzü boyunca normal ve makaslama gerilmelerinin sürekliliğini, tabaka ara yüzü boyunca yatay ve düşey yer değiştirmenin sürekliliğini ve serbest yüzeyde normal ve makaslama gerilmelerinin olmadığını bilgilerini içerir. Ayrıca yarı sonsuz ortamda yukarı giden (*up-going*) hareket olmadığından $U_{P_n} = 0$ ve $U_{S_n} = 0$ 'dır.

Denklem 2.58 ele alınırsa sınır şartlarının uygulanması, yüzey yer değiştirmeleri (u_1, w_1) ve alt tabakadaki elastik dalga potansiyel katsayıları (D_{PN} , D_{SN}) arasında doğrusal bir ilişkinin olmadığını göstermektedir.

$$\begin{pmatrix} 0 \\ 0 \\ D_{PN} \\ D_{SN} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} R_{11} & R_{12} \\ R_{21} & R_{22} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} u_1 \\ w_1 \\ 0 \\ 0 \end{pmatrix} \quad (2.58)$$

Burada R_{ij} ifadeleri 2x2 boyutlu matrislerdir ki materyal ara yüzündeki sınır şartlarını içeren çok tabakalı ortamdaki elastik dalga yayılımının fiziksel özelliklerini kapsar. Dolayısıyla R_{ij} matrisleri faz hızı (V_{ph}) ve dalga frekansı (f) bilgilerini içerir. Denklem 2.58'e dikkat edildiğinde Denklem 2.59 yazılabilir.

$$\begin{pmatrix} 0 \\ 0 \end{pmatrix} = R_{11} \begin{pmatrix} u_1 \\ w_1 \end{pmatrix} \quad (2.59)$$

Yüzey yer değiştirmeleri için Denklem 2.59 ancak ve ancak R_{11} matrisinin determinantı sıfıra eşit olduğunda aşikar olmayan çözüme sahiptir.

$$\det R_{11} = 0 \quad (2.60)$$

Denklem 2.60, $g(V_{ph}, f) = 0$ ifadesinin bir örtülü denklemidir. Bu ifade ayrıca Rayleigh seküler denklemi olarak da bilinir ve R_{11} Haskell-Thomson determinantı (Thomson, 1950; Haskell, 1953) olarak adlandırılır. Denklem $g=0$ V_{ph} ve f değişkenleri üzerinde doğrusal olmayan bir kısıt oluşturur öyle ki bu iki bilinmeyen bağımsız olarak değişmez. Denklem 2.60 tarafından, verilen bir f frekansı için muhtemel V_{ph} faz hızı değerleri belirlenir. Dispersiyon karakteristiği her bir farklı f değeri için farklı V_{ph} değerlerinin belirlenmesiyle sayısal olarak kurulur (Everett, 2013).

2.4 Sismik Hızlarla İlişkili Olan Jeoteknik Parametreler

Jeoteknik açıdan zeminlerin dinamik davranışları önemlidir. Gerilme ve makaslama gibi yüklerin etkisi altında kalan zeminler, elastik parametreler ile

tanımlanır. Bu parametreler: Elastisite modülü, Kayma modülü, Bulk modülü, Poisson oranı ve yoğunluktur.

2.4.1 Elastisite (Young) Modülü

Elastisite modülü, malzemelerin kuvvet altında elastik şekil değiştirmesini yani esneklik özelliğini tanımlayan bir parametredir. E ile gösterilir. Birimi kPa'dır.

$$E = 2\mu(1 + \sigma) \quad (2.61)$$

Denklem 2.61'de görüldüğü üzere Elastisite modülü diğer elastik parametrelerle diğer bir deyişle sismik hızlar ile elde edilebilir. Burada μ kayma modülü, σ Poisson oranıdır. Bu parametreler ilerleyen başlıklar altında açıklanacaktır.

2.4.2 Kayma (Shear) Modülü

Rijidite veya makaslama modülü olarak da bilinen kayma modülü, makaslamaya karşı direnci tanımlayan bir parametredir. μ ile gösterilir. Birimi kPa'dır. Sıvıların makaslamaya karşı dirençleri yoktur yani $\mu=0$ 'dır.

$$\mu = \rho \cdot V_s^2 \quad (2.62)$$

Denklem 2.62'de görüldüğü üzere kayma modülü, yoğunluk ve S dalga hızı ile elde edilebilir. Burada ρ yoğunluk, V_s ise S dalga hızıdır.

2.4.3 Bulk Modülü

Bulk modülü hacim değişmesine karşı mukavemeti gösterir yani hacimsel değişimi ifade eder. Bir basınç altında sıkışmadan kaynaklı oluşan hacimsel küçülme eğer küçükse Bulk modülünün büyük olduğu anlamına gelir. K ile gösterilir. Birimi kPa'dır.

$$K = \rho(V_P^2 - \frac{4}{3}V_S^2) \quad (2.63)$$

Denklem 2.63’de görüldüğü üzere Bulk modülü; yoğunluk, P dalga hızı ve S dalga hızı ile elde edilebilir. Burada ρ yoğunluk, V_P P dalga hızı, V_S ise S dalga hızıdır.

2.4.4 Poisson Oranı

Poisson oranı enine büzülmenin boyuna uzamaya oranı olarak tanımlanır. Diğer bir deyişle enine deformasyonun boyuna deformasyona oranıdır. Birimsizdir. Jeofizikte, kayaçların gözenekliliğini ve gözeneklerin içeriğini ifade eder. Poisson oranının değeri 0 – 0,5 arasında değişir. Su ve havanın Poisson oranı 0,5’dir. Eğer kayaç içeriğinde su mevcutsa Poisson oranı 0,5’e yaklaşır.

$$\sigma = \frac{\left(\frac{V_P}{V_S}\right)^2 - 2}{2\left(\frac{V_P}{V_S}\right)^2 - 2} \quad (2.64)$$

Denklem 2.64’de görüldüğü üzere Poisson oranı sismik hızlar ile elde edilebilir.

2.4.5 Yoğunluk

Yukarıda bahsedilen elastik parametrelerin hesaplanmasında yoğunluk önemli bir yer almaktadır. Birimi gr/cm^3 ’tür. P dalgası hızı ile yoğunluk arasındaki ilişki denklem 2.65’deki gibi verilmiştir (Telford ve diğer., 1990).

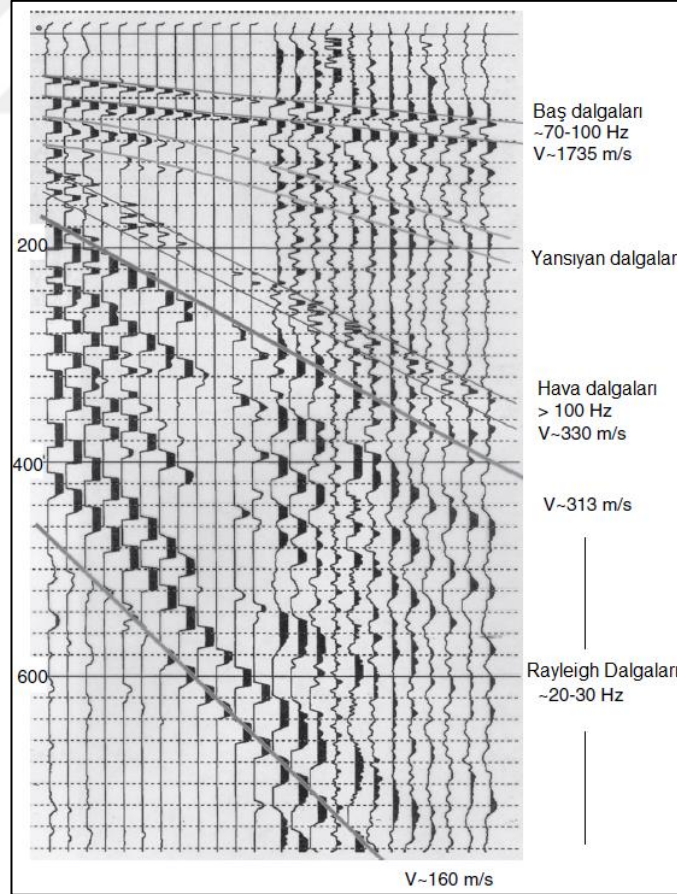
$$\rho = 0.31(V_P^{0.25}) \quad (2.65)$$

BÖLÜM ÜÇ

YÜZEY DALGALARININ ÇOK KANALLI ANALİZİ

3.1 Yöntem ve Ekipmanlar

Yüzey Dalgalarının Çok Kanallı Analizi yöntemi, Rayleigh dalgalarının dispersif özelliğinden faydalanan bir yöntemdir. Bu yöntem, derinlikle değişen S hızını (V_S) elde etmek için kullanılır. Yöntem, doğrusal bir hat boyunca yerleştirilen on iki veya daha fazla alıcı (jeofon) kullanılan geleneksel sismik yöntemlerden esinlenerek meydana gelmiştir. Yakın yüzey araştırmalarında geleneksel sismik yaklaşımlar, yüksek çözünürlüklü yansıma veya kırılma çalışmalarıdır. Bu çalışmalardaki sismik sinyaller 50 Hz'den yüksek frekanslı dalgalardan oluşur. MASW yönteminde ise daha düşük frekanslardaki (1-30 Hz) yüzey dalgaları (Şekil 3.1) ele alınır (Park ve diğer., 2007).



Şekil 3.1 Sismik kayıt örneği (Everett, 2013)

MASW yöntemi, bir boyutlu (1D) şekilde yeraltının S dalgı hızını belirleme amacıyla kullanılan bir yöntemdir. Aynı hat doğrultusunda elde edilen bir boyutlu modeller birleştirilerek iki boyutlu (2D) yeraltı modelleri oluşur. İki boyutlu hatlar ise belirli aralıklarla birbirine paralel olacak şekilde yan yana birleştirilerek üç boyutlu (3D) yeraltı modellerini oluşturur.

MASW yöntemi genel olarak üç adım içerir: Veri toplama, dispersiyon eğrileri elde etme, dispersiyon eğrilerinden ters çözüm ile S hızı elde etme. Veri toplama adımının dışında kalan adımlar genellikle “veri işlem” olarak adlandırılır.

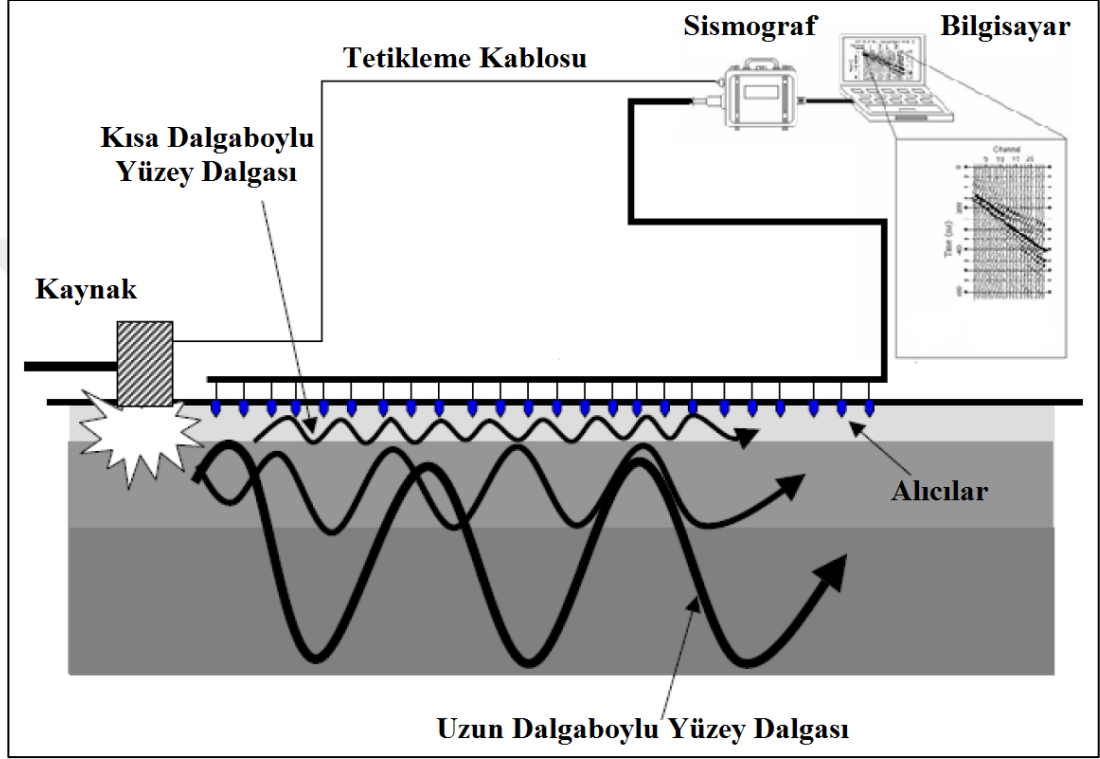
Yöntemde kullanılan ekipmanlar: Bilgisayar, sismograf, kaynak (balyoz, ağırlık düşürme vb.), alıcılar (jeofonlar), plaka, sismik kablo ve tetikleme kablosudur (Şekil 3.2).



Şekil 3.2 Sismik kayıt cihazı (sol-üst), Tetikleme-Plaka-Balyoz (Sağ-Üst), 4,5 Hz Jeofon (sol-alt), Sismik kablo (sağ-alt) (Kişisel arşiv, 2018)

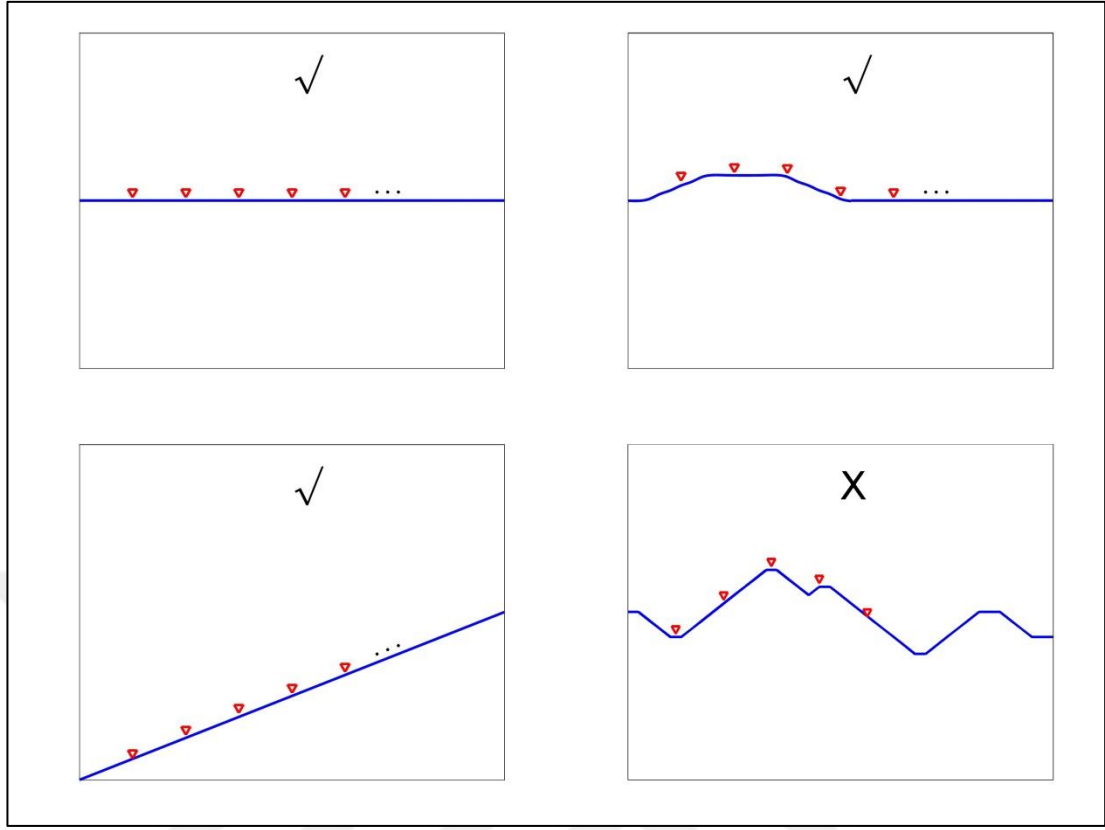
3.2 Veri Toplama Yöntemi

MASW yöntemi için alan konfigürasyonu, sismik kırılma yöntemi ile genel olarak aynıdır (Şekil 3.3). Bu benzerlik, yakın yüzey hız farklılıklarının MASW yöntemi kullanılarak elde edilmesine izin verir.



Şekil 3.3 Veri toplama işleminin şematik gösterimi (Hayashi, 2003; Penumadu ve Park, 2005)

Veri toplama işleminde yüzey dalgaları düz bir zeminde en iyi şekilde elde edilir. Ölçüm hattının tamamında topografik farklılık önemsenmemelidir. Ancak yine de serim boyunun %10'undan büyük topografik farklılıklar yüzey dalgası oluşumunda önemli bir engel olacaktır. Şekil 3.4'de gösterilen dört farklı şematik topografya örneğinde sağ alt köşede gösterilen örnek, veri toplamak için uygun değildir. Veri toplama işleminde bu durumu göz önünde bulundurmak gerekir. Diğer üç şematik gösterim ise veri toplamak için idealdir.



Şekil 3.4 Topografya örneklerinin şematik gösterimleri

Veri toplama işleminde önemli olan bazı parametreler vardır (Tablo 3.1). Bunlar: Kaynak ile ilk alıcı arasındaki mesafe (kaynak ofseti ya da yakın ofset (X_1)), ilk alıcı ile son alıcı arasındaki mesafe (Serim boyu (D)), alıcılar arası mesafe (dx), balyoz ağırlığı (*)'dır.

Tablo 3.1 Genel veri toplama parametreleri (Penumadu ve Park, 2002)

Materyal Türü V_S (m/s)	X_1 (m)	dx (m)	D (m)	Optimum Alıcı (Hz)	Optimum Kaynak* (kg)	Kayıt Süresi (ms)	Örnekleme Aralığı (ms)
Çok Yumuşak ($V_S < 100$)	1-5	0,25-0,5	≤ 20	4,5	$\geq 5,0$	1000	1,0
Yumuşak ($100 < V_S < 300$)	5-10	0,5-1,0	≤ 30	4,5	$\geq 5,0$	1000	1,0
Sıkı ($200 < V_S < 500$)	10-20	1,0-2,0	≤ 50	4,5-10	$\geq 5,0$	500	0,5
Çok Sıkı ($500 < V_S$)	20-40	2,0-5,0	≤ 100	4,5-10	$\geq 5,0$	500	0,5

Serim boyunun (D) uzunluğu araştırma derinliği (Z_{max}) ile ilişkilidir.

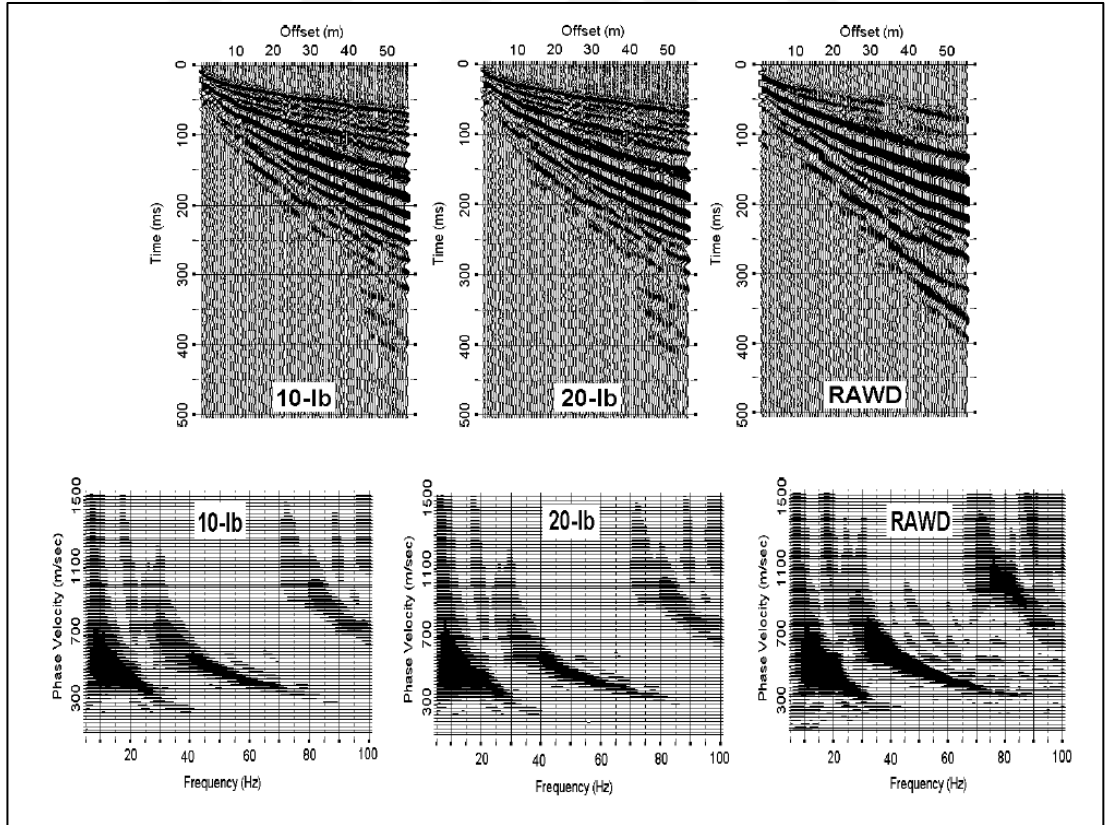
$$D \approx Z_{max} \quad (3.1)$$

Alıcılar arası mesafe sığ çözümlenebilir derinlik (Z_{min}) ile ilişkilidir.

$$dx \approx Z_{min} \quad (3.2)$$

3.2.1 Kaynak Etkisi

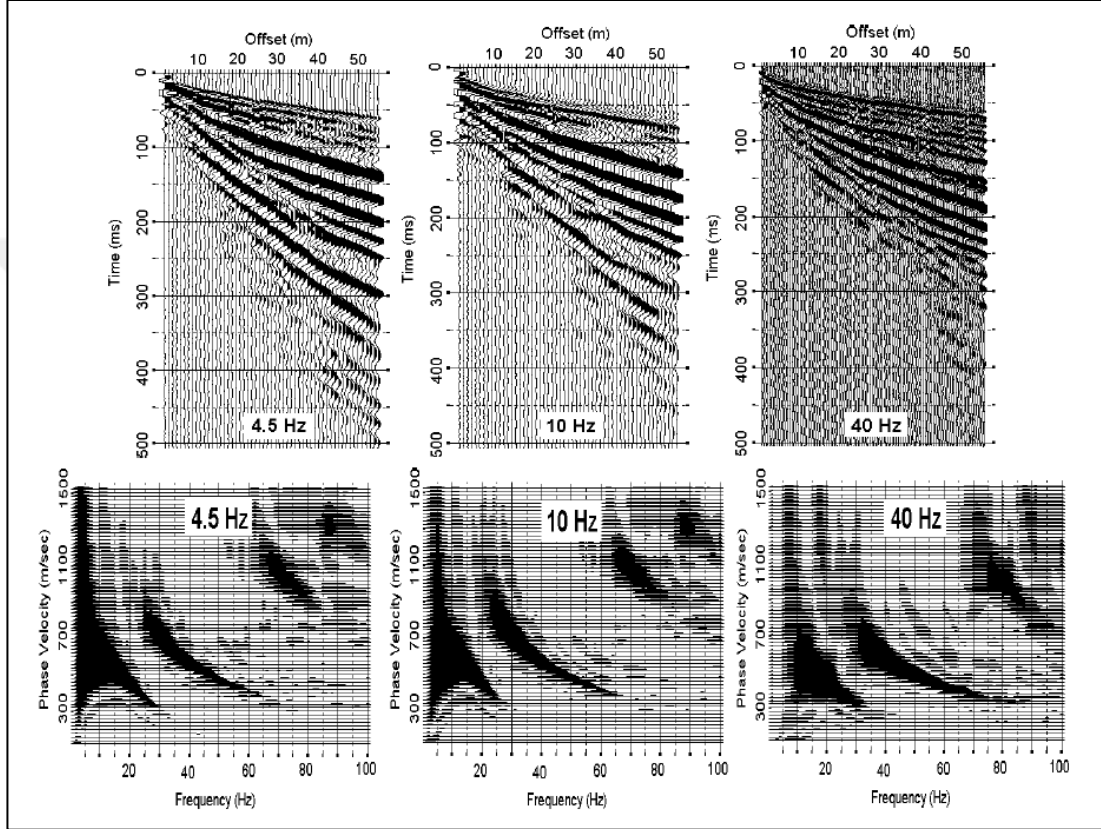
Kaynak ağırlığının artması kaynağın kuvvetinin artmasına neden olur. MASW yönteminde yapılan araştırmalarda (Park, Miller ve Miura, 2002) kaynak ağırlığının artması, istenmeyen yüksek modların ve cisim dalgalarının etkilerinin artmasına neden olduğunu ortaya koymuştur (Şekil 3.5).



Şekil 3.5 Solda 4,5 kg, ortada 9 kg, sağda ağırlık düşürme kaynakları kullanılarak 40 Hz alıcılar ile toplanan veriler ve elde edilen dispersiyon eğrileri (Park ve diğer., 2002)

3.2.2 Alıcıların Etkisi

Alıcıların frekansının artması hem yüksek mod etkilerinin kayıtlarda artış göstermesine hem de temel modun kalitesinin azalmasına neden olur. Bu nedenle MASW yönteminde düşük frekanslı (4,5 Hz) alıcı kullanımı idealdir (Şekil 3.6).



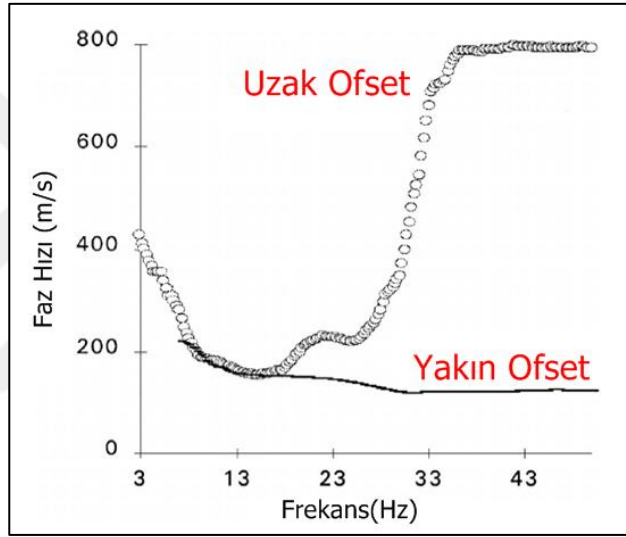
Şekil 3.6 Farklı frekanslardaki alıcılar kullanılarak ağırlık düşürme kaynağı ile toplanan veriler ve elde edilen dispersiyon eğrileri (Park ve diğer., 2002)

3.2.3 Yakın Ofset Etkisi

Rayleigh dalgaları, kaynaktan belli bir uzaklıkta düzlem dalga gibi işlem görür. Yüzey dalgalarının düzlem dalga şeklinde yayılımı, yakın ofsetin maksimum dalga boyunun (λ_{max}) yarısından fazla olduğu durumda meydana gelir (Stokoe, Wright, James ve Jose, 1994). Bu nedenle yüzey dalgalarını daha iyi elde etmek için ofsetin çok yakın olmaması gerekir (Şekil 3.7).

3.2.4 Uzak Ofset Etkisi

Yüzey dalgalarının yüksek frekanslı (kısa dalga boylu) bileşenleri kaynaktan uzaklaştıkça hızlı bir şekilde sönümlenir (Bullen, 1963). Eğer ofset çok büyükse yüzey dalgalarının yüksek frekanslı bileşenlerinin enerjisi diğer yüksek frekanslı bileşenleri (özellikle de cisim dalgalarını) bastıramayacaktır (Şekil 3.7). Uzak ofset etkisi, ground roll dalgalarında eğimin azalması ya da düşük hızlı ground roll ve yüksek hızlı cisim dalgalarının girişimi yüzünden varışlardaki doğrusal uyumun azalması şeklinde görülür (Park ve diğer., 1999).



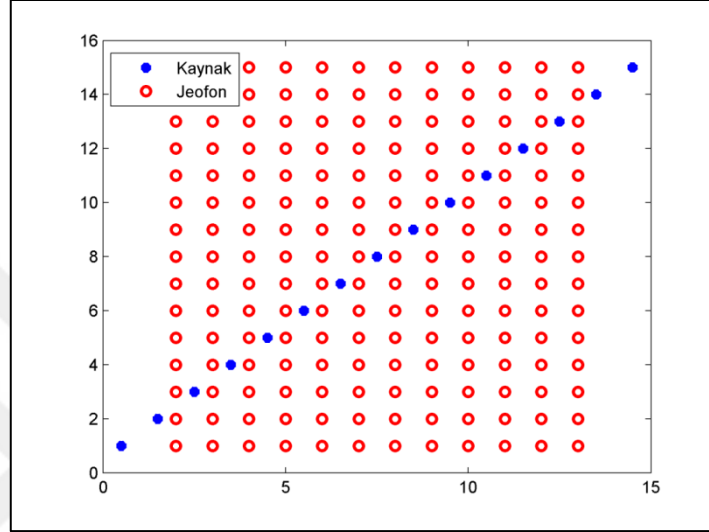
Şekil 3.7 Yakın ofset ve uzak ofset etkilerini gösteren grafik. (Park ve diğer., 1999)

Araştırmacılar tarafından yapılan çalışmalarda elde edilen sonuçlara göre optimum kaynak ağırlığı 5-10 kg arasında olmalıdır. Alıcılar ise düşük frekanslı olmalı ve genellikle 4,5 Hz frekansa sahip alıcılar kullanılmalıdır. Ofset uzaklığı ve alıcılar arası mesafe ise çalışmanın amacına uygun bir şekilde araştırmacı tarafından belirlenmelidir.

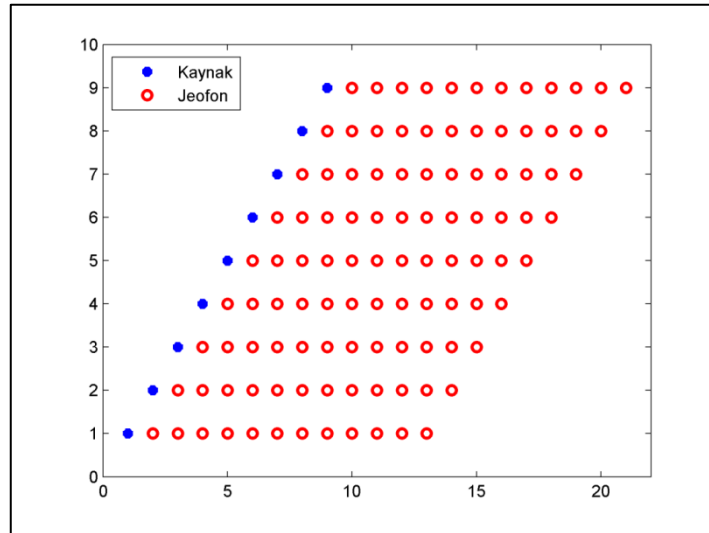
3.2.5 Kaynak ve Alıcı Konfigürasyonu

Veri toplama işleminde kaynak serimin başında, sonunda ya da alıcıların arasında olabilir (Şekil 3.8). Kaynak ve alıcı hareketlerine bağlı olarak veri toplama türleri

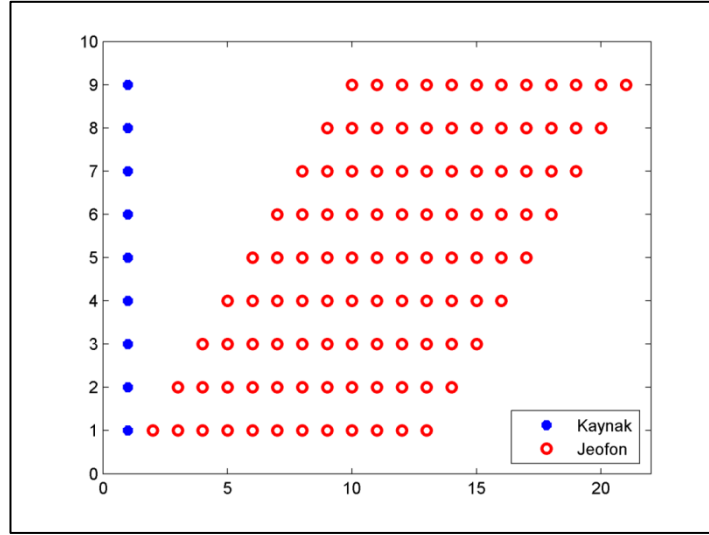
ortaya çıkar. Hem kaynağın hem de alıcıların birlikte hareketli (Şekil 3.9) ya da kaynağın sabit olup alıcıların hareketli (Şekil 3.10) olduğu veri toplama yöntemleri vardır. Bu dizilimleri kullanarak bir boyutlu ya da iki boyutlu yeraltı modelleri elde edilir. Ayrıca iki boyutlu modelleri birleştirme ile üç boyutlu yeraltı modelleri elde etmek mümkündür.



Şekil 3.8 Veri toplama işleminde muhtemel kaynak konumları



Şekil 3.9 Hem kaynağın hem de alıcıların birlikte hareketli olduğu dizilim türü



Şekil 3.10 Kaynağın sabit olup alıcıların hareketli olduğu dizilim türü

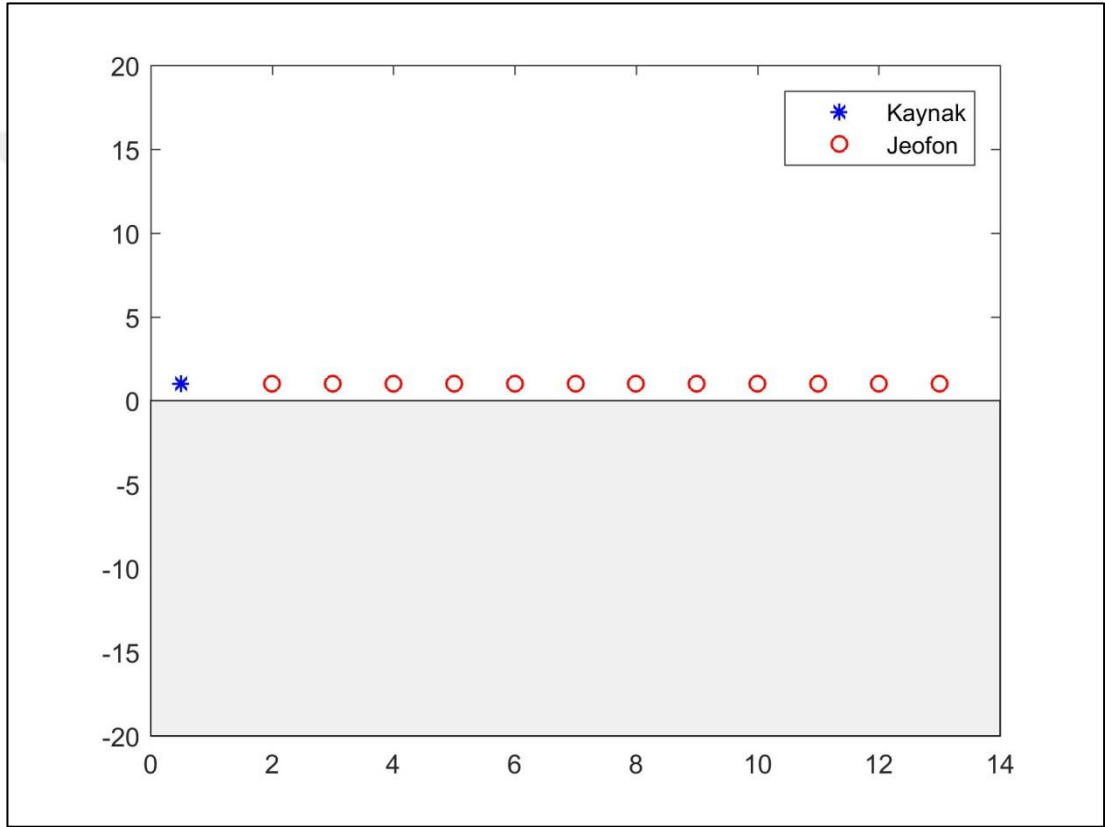
Dizilimler çalışmanın amacına uygun olarak seçilip uygulanmalıdır. Çalışmanın maliyeti, zaman tasarrufu ve eldeki imkanlar gibi etkenler göz önünde bulundurulmalıdır. Örneğin alıcıların hareketli olduğu dizilim türlerini yere sabitlenen alıcılar ile uygulamak çok fazla zaman gerektirecektir. Bu nedenle sabit alıcı kullanılan çalışmalarda kaynağın hareketli olup alıcıların yer değiştirmedikleri dizilim türü kullanmak zamandan ve maliyetten tasarruf sağlayacaktır. Ancak “*Land Streamer*” (Şekil 3.11) olarak adlandırılan, alıcıların yere sabitlenmediği sistemler imkanlar dahilinde ise alıcıların hareketli olduğu dizilimleri kullanmak daha elverişli olacaktır.



Şekil 3.11 Land Streamer alıcı sistemi (Terra Australis Geophysics Pty Ltd, b.t)

3.2.6 Bir Boyutlu Veri Toplama

Bir boyutlu veri toplama işlemi, aslında yöntemin temel veri toplama şeklidir. Şekil 3.12’de olduğu gibi kaynak yardımıyla bir noktada atış yapılır ve alıcılar tarafından veri kaydedilir. Kaydedilen bu verinin temsil ettiği noktanın dizilimin ortasına denk geldiği kabul edilir. Veri işlem sonrası elde edilen derinlik ve hız bilgisi orta noktayı temsil eder.

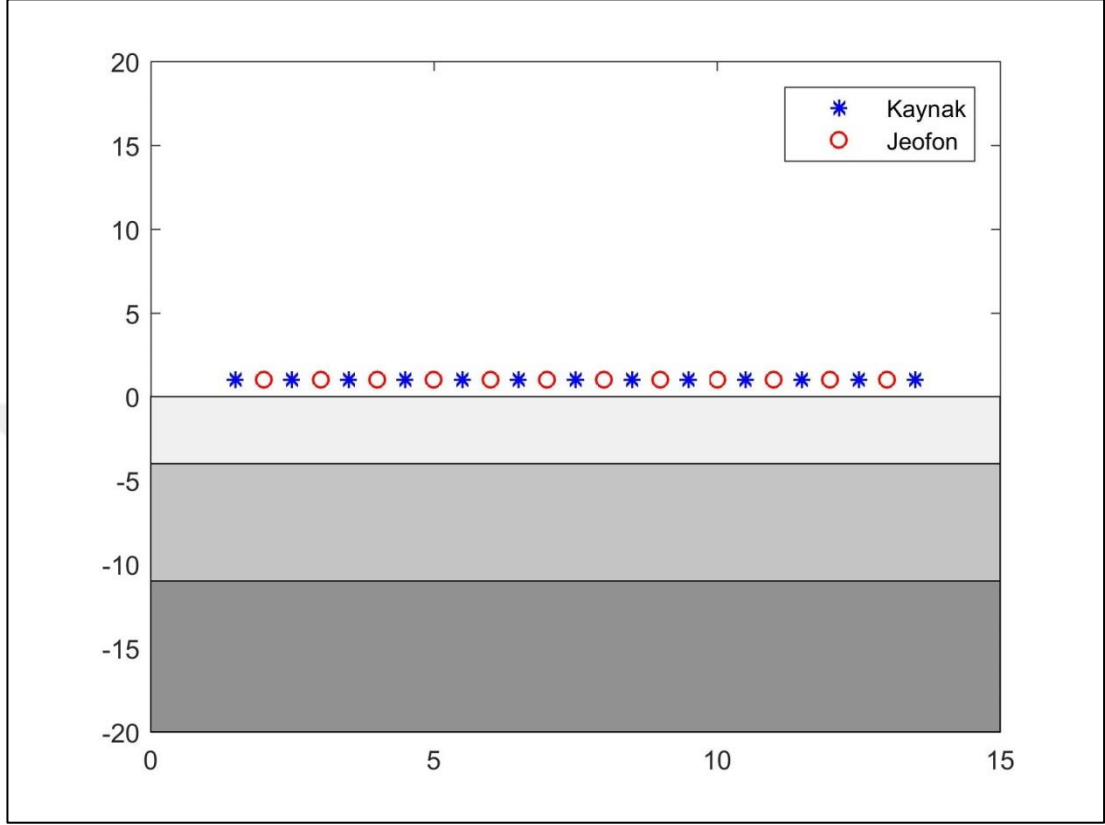


Şekil 3.12 Bir boyutlu veri toplama işleminin şematik gösterimi

3.2.7 İki Boyutlu Veri Toplama

İki boyutlu veri toplama işlemi aslında bir boyutlu veri toplama işleminin ardı ardına yapılarak elde edilmiş halidir. Kaynak ve alıcı konfigürasyonu başlığı altında verilen dizilim türleri kullanılarak elde edilir. Farklı noktalarda yapılan atışlar ile ayrı ayrı kaydedilen veriler, veri işlem aşamasında birleştirilerek yeraltının hız ve derinlik

bilgisini tomografik şekilde elde etmemizi sağlar. Şekil 3.13'deki şematik gösterimde alıcıların sabit, kaynağın ise hareketli olduğu bir sistem görülmektedir.



Şekil 3.13 İki boyutlu veri toplama işleminin şematik gösterimi

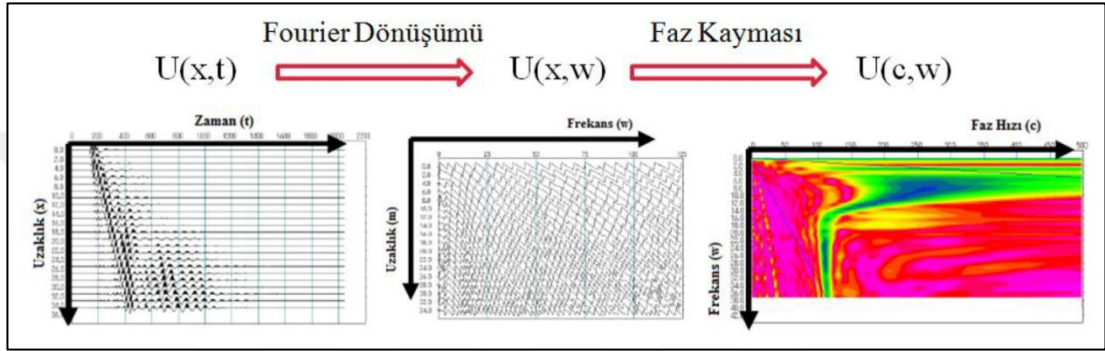
3.3 Veri İşlem Aşamaları

Yüzey Dalgalarının Çok Kanallı Analizi yönteminde veri işlem adımları sırasıyla: Arazi verilerinden dispersiyon eğrilerinin elde edilmesi, elde edilen dispersiyon eğrilerinden ters çözüm işlemi ile tabakalara ait S hızlarının belirlenmesidir.

3.3.1 Dispersiyon Eğrilerinin Elde Edilmesi

Dispersiyon eğrisi, faz hızının frekansa karşılık gelen değişimini gösteren eğridir. Dispersiyon eğrisinin üretilmesi, doğru S dalga hızı üretmek için en önemli bölümlerden birisidir. Dispersiyon eğrisinin doğruluğu Rayleigh dalgalarından gürültülerin atılması ve bu dalgaların analizi ile artırılabilir (Park ve diğer., 1999).

Veri toplama işlemi ile elde edilen veriler zaman ortamında alınan kayıtlar olduğu için zaman-uzaklık grafikleri şeklindedir. Fourier Dönüşümü kullanılarak veri zaman ortamından frekans ortamına geçirilir. Frekans ortamındaki veriden; frekans-dalgasayısı dönüşümü, frekans-yavaşlık dönüşümü, faz kayması gibi yöntemler aracılığıyla faz hızı-frekans görüntüleri elde edilir. Faz hızı-frekans görüntülerinde yüksek genlikli bölgeler, dispersiyon eğrisi olarak seçilmesi gereken bölgelerdir (Şekil 3.14).



Şekil 3.14 Dispersiyon eğrisi elde etme (Hayashi, 2003)

Uzaklık-Zaman (x,t) eksenlerine sahip bir sismik kayıt ele alınırsa ortam $u(x,t)$ olarak temsil edilebilir. Bu $u(x,t)$ ifadesinin zaman eksenine Fourier dönüşümü uygulanırsa $U(x,w)$ elde edilir (Denklem 3.3).

$$U(x, w) = \int U(x, t) e^{iwt} dt \quad (3.3)$$

$U(x,w)$ iki ayrı terimin çarpımı olarak Denklem 3.4'deki gibi gösterilebilir.

$$U(x, w) = P(x, w)A(x, w) \quad (3.4)$$

Burada $P(x,w)$ ve $A(x,w)$ sırasıyla faz ve genlik spektrumudur. $U(x,w)$ 'de her frekans bileşeni diğer frekanslardan tamamen ayrılır ve varış zamanı bilgisi faz spektrumu $P(x,w)$ 'de bulunur. $P(x,w)$ dispersiyon özellikleri ile ilgili tüm bilgileri içerirken $A(x,w)$ sönümlenme ve küresel sapma gibi özellikler hakkında bilgileri içerir. Böylece $U(x,w)$ Denklem 3.5'deki gibi gösterilebilir.

$$U(x, w) = e^{-i\Phi t} A(x, w) \quad (3.5)$$

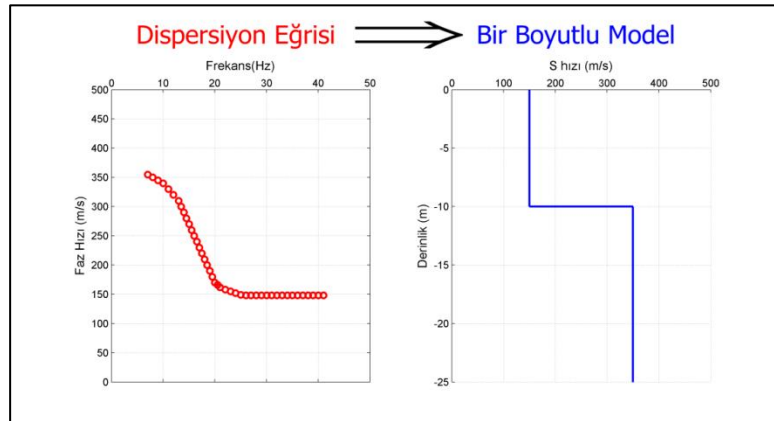
Burada $\Phi = w/c_w$, w açısal frekans ve c_w faz hızıdır. Denklem 3.6'daki integral dönüşümü $U(x, w)$ ifadesine uygulanırsa $V(w, \varphi)$ elde edilir.

$$\begin{aligned} V(w, \varphi) &= \int e^{-i\varphi x} [U(x, w)/|U(x, w)|] dx \\ &= \int e^{-i(\Phi-\varphi)x} [U(x, w)/|U(x, w)|] dx \end{aligned} \quad (3.6)$$

Burada $U(x, w)$ sönümlenme ve küresel sapmanın etkilerini karşılama için normalleştirilmiştir. Verilen bir w değeri için $\varphi = \Phi = w/c_w$ olduğunda $V(w, \varphi)$ maksimum olacaktır. Bir $V(w, \varphi)$ pikinin meydana geldiği bir φ değeri için faz hızı c_w belirlenebilir. Dispersiyon eğrileri, $I(w, c_w)$ elde etmek için $c_w = w/\varphi$ değişken değişimiyle $V(w, \varphi)$ 'nin dönüşümünden meydana gelir (Park, Miller ve Xia, 1998).

3.3.2 Dispersiyon Eğrilerinin Ters Çözümü

Dispersiyon eğrilerinin ters çözümü ile bir boyutlu ve iki boyutlu modeller elde edilir. Ayrıca iki boyutlu modellerin yan yana getirilmesi ile enterpolasyon yapılarak üç boyutlu modeller elde etmek mümkündür. Dispersiyon eğrisinde düşük hız ve yüksek frekanslı bölgeler sıg tabakaları; yüksek hız ve düşük frekanslı bölgeler ise derin tabakaları gösterir (Şekil 3.15).

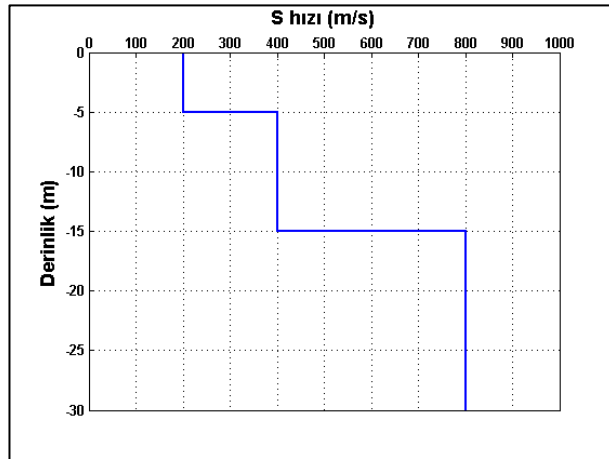


Şekil 3.15 Dispersiyon eğrisi ve bir boyutlu model

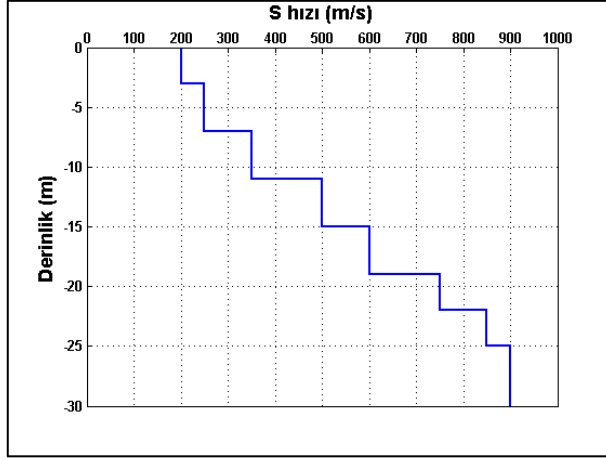
Bir boyutlu S hızı profilleri, yüzey dalgalarının faz hızının ters çözümü ile elde edilebilir (Dorman ve Ewing, 1962; Aki ve Richards, 1980; Mari, 1984). Ters çözüm işleminde bir başlangıç yer modeline ihtiyaç vardır. Başlangıç modeli 4 farklı parametre içerir: Tabaka kalınlığı, P hızı, S hızı ve yoğunluk (Xia ve diğer., 1999). Başlangıç modelinde S hızı en önemli etkiye sahiptir çünkü algoritmanın yakınsamasında güvenilirdir. Yakınsamanın kesinliği ve güvenilirliği ile ilgili bazı çalışmalar vardır. Bu çalışmalara örnek olarak Heukelom ve Foster (1960) ve Vardoulakis ve Vrettos (1988) verilebilir.

Xia ve diğer. (1999) tarafından Rayleigh dalgalarından elde edilen dispersiyon eğrilerinin ters çözümüyle başarılı bir şekilde S hızı elde edilmiştir. Literatürde en çok bilinen çalışmalardan birisidir. Çalışmada düz çözüm için Knopoff yöntemi (Schwab ve Knopoff, 1972) kullanılmış ve ters çözüm işleminde Levenberg-Marquardt (Levenberg, 1944; Marquardt, 1963) algoritması kullanılarak S hızı elde edilmiştir.

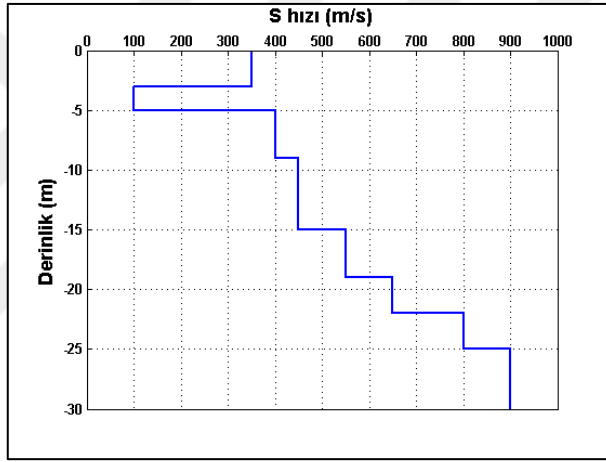
Dispersiyon eğrilerinin ters çözümü ile elde edilen bir boyutlu modeller yeraltının yapısına göre farklılıklar gösterebilir. İki ya da daha fazla tabakalı modeller elde etmek olağan sonuçlardır (Şekil 3.16 ve 3.17). Yeraltının yapısı gereği sismik hızlar derinlikle birlikte artış göstermektedir. Ancak yeraltı suyunun varlığı ya da düşük hız tabakasının olması durumunda hız düşmesini gösteren modeller de ortaya çıkabilir (Şekil 3.18).



Şekil 3.16 Üç tabakalı bir boyutlu S hızı model örneği



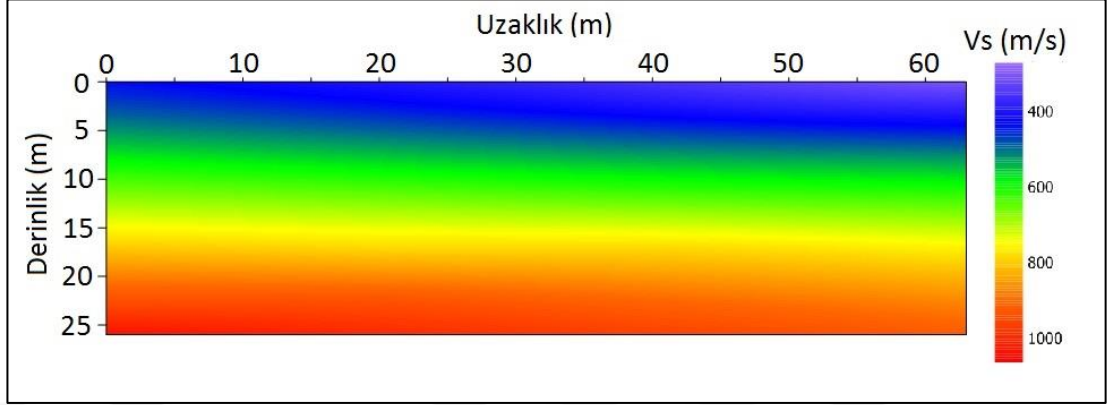
Şekil 3.17 Sekiz tabakalı bir boyutlu S hızı model örneği



Şekil 3.18 Düşük hız tabakalı bir boyutlu S hızı model örneği

İki boyutlu modeller, aslında bir boyutlu elde edilen dispersiyon eğrilerinin birlikte ters çözüme sokulması ile elde edilen modellerdir. Örneğin Şekil 3.13'deki şematik gösterimde yer alan 13 adet atıştan ayrı ayrı olan 13 kayıt elde edilir. Bu kayıtlardan 13 adet dispersiyon eğrisi elde edilerek birlikte ters çözüme sokulmasıyla iki boyutlu yeraltı modeli elde edilebilir. Diğer bir yöntem ise ters çözüm sonucunda bir boyutlu olarak elde edilen yeraltı modellerine ait hız ve derinlik bilgilerinin grid işlemi yapılmasıyla 2 boyutlu yeraltı modellerinin çizdirilmesidir. Örneğin Şekil 3.9'daki şematik gösterimde yer alan 9 adet atıştan ayrı ayrı olan 9 kayıt elde edilir. Bu kayıtlardan 9 adet dispersiyon eğrisi elde edilerek 9 ayrı yer altı modeli edilir. Bu 9 yeraltı modelinin hız ve derinlik bilgileri grid işlemi yapılarak çizdirilir ve iki

boyutlu yeraltı modeli bu şekilde elde edilmiş olur. Şekil 3.19’da iki boyutlu yeraltı modeline bir örnek verilmiştir.



Şekil 3.19 S hızını gösteren iki boyutlu yapay model

3.3.3 SurfSeis Yazılımı ile Verilerin İşlenmesi

Tez kapsamında arazide elde edilen kayıtların işlenmesi için SurfSeis5 yazılımından yararlanılmıştır. Yazılımda öncelikle DoReMi sismik cihazı ile elde edilen SEG2 formatındaki veriler, yazılımın içerisindeki dönüştürücü ile KGS formatına dönüştürülmüştür. Bu işlemin sonucunda veriler tek bir dosyada birleştirilmektedir. Tek bir dosya haline dönüştürülen veriler geometri (*Geometry*) sekmesi altında açılarak arazi geometrisi veri dosyasına işlenir. Geometri bilgisi işlenen veriler, dispersiyon eğrisi görüntüleri üretme (*Make Dispersion Curve Images*) sekmesi ile açılır. Burada veri kalitesi; yüzey dalgalarının baskın frekansı, yaklaşık yüzey dalgası hız aralığı gibi bilgiler ekranda görülür. Dispersiyon eğrisi görüntüleri için frekans ve faz hızı aralıkları belirlenir ve kontrast ayarı seçilir. Gerekli seçimlerden sonra işlemi başlat (*Start Processing*) yaparak dispersiyon eğrisi görüntülerini içeren dosya oluşturulur. Bu işlemin sonucunda, geometri bilgisi tanımlanmış verilerden her bir kayıt için dispersiyon eğrileri elde edilmiş olur. Dispersiyon eğrisi görüntülerini içeren veri dosyası, dispersiyon eğrisi seçimi için görüntülerden dispersiyon eğrisi işaretleme (*Pick Dispersion Curve (from Images)*) sekmesi aracılığıyla açılır. Dispersiyon eğrisi işaretlemek için sınırlar (*Bounds*) seçeneği seçilir. Daha sonra dispersiyon eğrisi görüntüsünde yüksek genliğe sahip bölgeler (kırmızı bölgeler) fare yardımıyla işaretlenir. Bu sayede uygun dispersiyon

eğrisi çizimi için o bölgeler sınırlandırılmış olur. Daha sonra ise dispersiyon eğrisi seç (*Extract DC*) seçeneği ile dispersiyon eğrisi üretilir. Üretilen bu eğri dispersiyon eğrisi kaydet (*Save DC*) seçeneği ile kaydedilir ve bir sonraki kayıttan dispersiyon eğrisi görüntüsü otomatik olarak ekrana gelir ve her kayıt için bu işlem tekrarlanır. Son kayıta ait dispersiyon eğrisinin üretilmesi işleminden sonra ters çözüm (*Inversion*) seçeneği ile ters çözüm işleminin yapılacağı pencereye geçilir. Burada yer alan kontroller (*Controls*) seçeneği seçildiğinde açılan pencerede her bir kayıta ait Sinyal/Gürültü oranı kontrol edilebilir. Kontrol penceresinde yer alan yineleme (*Iteration*) sekmesinden, ters çözüm işleminde yapılacak yineleme sayısı ve RMS (Hataların Ortalama Karekökü) değeri değiştirilebilir. Tabaka (*Layer*) seçeneği ile başlangıç modeli üzerinde değişiklikler yapılabilir. Çalıştır (*Run*) seçeneği ile ters çözüm işlemi başlatılır. Burada her bir dispersiyon eğrisinin ters çözümü sırasıyla otomatik olarak program tarafından yapılır. Her bir kayıttan bir boyutlu yeraltı S hızı modelleri elde edilir. Her kayıta ait hız modeli, o veriye ait dizilimin orta noktasına denk gelecek şekilde program tarafından atanır. Dizilimin orta noktasına atanan tüm verilere ait bir boyutlu yeraltı S hızı modelleri kullanılarak iki boyutlu (2D) yeraltı S hızı modeli elde edilir.

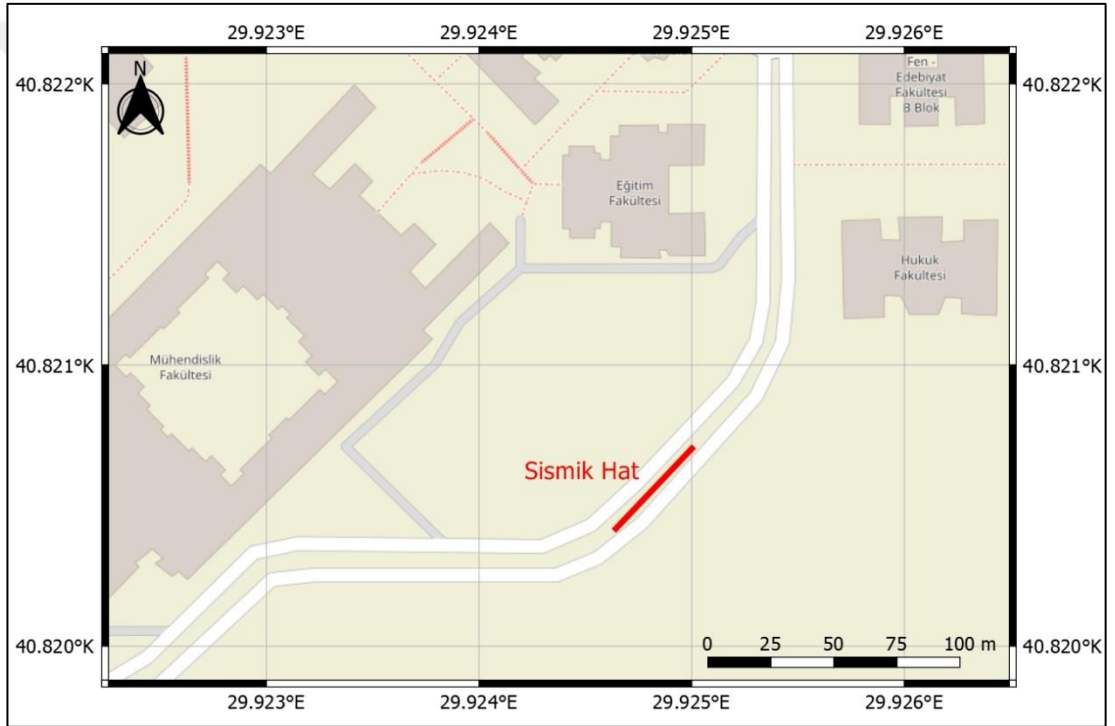
BÖLÜM DÖRT

ARAZİ UYGULAMALARI

4.1 Arazi Uygulaması – I

4.1.1 Uygulama Alanının Konumu ve Jeolojisi

Uygulama-I alanı, Kocaeli Üniversitesi Umuttepe Yerleşkesinin içinde Mühendislik Fakültesi ve öğrenci yurtları arasında yer almaktadır (Şekil 4.1).



Şekil 4.1 Uygulama - I alanının ve sismik hattın konumu

Uygulama alanında jeolojik birim Akveren formasyonu olarak adlandırılan Üst Kretase, (Kampaniyen-Maastrichtiyen) yaşlı (70-100 milyon) birimlerden oluşur. Bu formasyon gri, pembe renkli genellikle ince tabakalı, kireçtaşı, marn ve kumtaşından oluşmaktadır. Kalınlığı yaklaşık olarak 260 metredir. İçerisinde makro ve mikro fosil bulundurulur. Bu fosillere ait bilgiler Tablo 4.1'de görülmektedir (Çakır, 2000).

Tablo 4.1 Akveren formasyonun genel stratigrafik bilgileri

Çağ	Sistem	Kat	Litoloji	Fosiller
Mesozoyik	Üst Kretase	Kampaniyen Maastrichtiyen	Gri, pembe renkli genellikle ince tabakalı kireçtaşı, marn ve kumtaşı	Morozovella angulata Gansserina gansseri Fithonella ovalis Rosita fornicata Marssonella sp.

Uygulama alanında tünelin ve diğer yapıların inşasından önce bölge dik yamaçlara sahip olduğu için doldurulmuştur. Bu nedenle Şekil 4.2’de görülen tünelin etrafında kalan alanlar dolgu alanlarıdır.



Şekil 4.2 Uygulama - I alanında bulunan tünelin ve hattın yönü (Kişisel arşiv, 2017)

4.1.2 Veri Toplama Parametreleri

Veri toplama işleminde; Sara DoReMi sismik kayıt cihazı, 4,5 Hz frekansa sahip 24 adet alıcı ve 10 kg ağırlığında balyoz kullanılmıştır. Alıcılar arası mesafe 1 metre, ofset uzaklığı 5 metre seçilmiştir. Ofset uzaklığını uygun şekilde belirlemek için farklı mesafelerde deneme atışları yapılmıştır. 5 metreden daha yakın yapılan

atışlarda, yüzey dalgalarının cisim dalgaları tarafından bastırılması ile yüksek mod etkileri dispersiyon eğrilerinde belirlemektedir. Bu nedenden dolayı 5 metreden yapılan atışlar ile kalite seviyesi iyi olan kayıtlar elde edilmiştir. Ayrıca uygun kayıt süresi seçimi için test kayıtları alınarak veri kaliteleri kontrol edilmiştir. Kayıt süresi 500 milisaniye (ms), 1000 ms ve 2000 ms olan kayıtlar alınmıştır. Anlık araç geçişleri nedeniyle ortamın gürültülü olması, 2000 ms kayıt süresi ile alınan kayıtlarda veri kalitesini düşürmüştür. Test kayıtlarında 2000 ms'den daha az kayıt süresi seçildiğinde ise bu gürültülerin kayıtlara girmesinin önüne geçildiği görülmüştür. Veri toplama işlemi için kayıt süresi 1000 ms seçilmiştir. Örnekleme Aralığı 2 ms seçilerek 500 örnek sayısı elde edilmiştir. Tablo 4.2'de veri toplama parametreleri genel olarak görülmektedir.

Tablo 4.2 Uygulama-I için seçilen veri toplama parametreleri

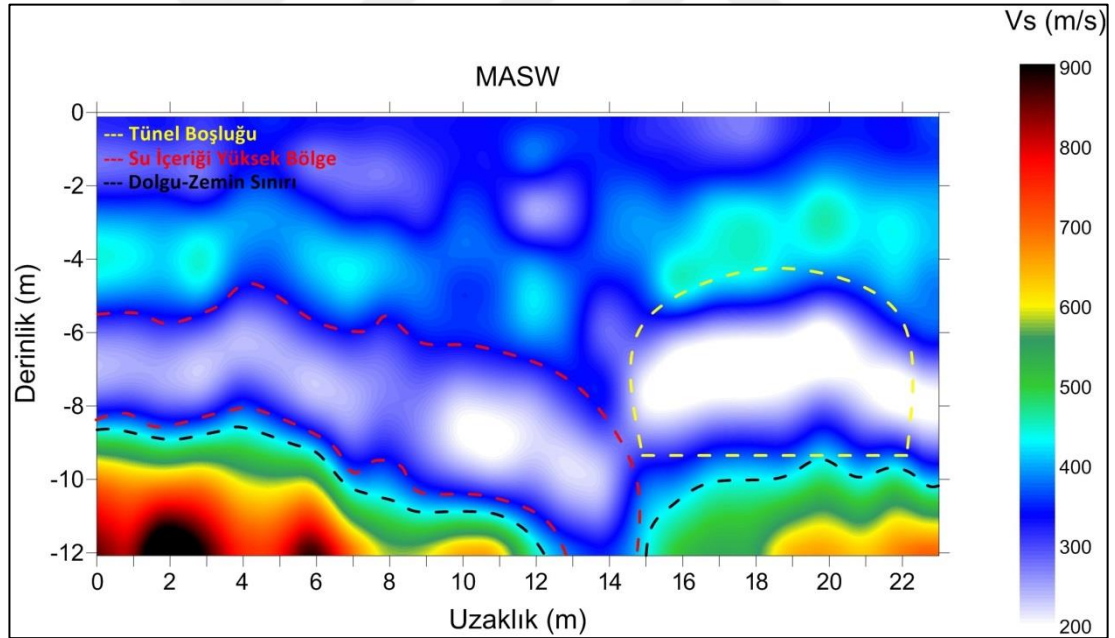
Ofset	Alıcılar Arası Mesafe	Serim Boyu	Alıcı Frekansı	Kaynak Ağırlığı	Kayıt Süresi	Örnekleme Aralığı
5 m	1 m	23 m	4,5 Hz	10 kg	1000 ms	2 ms

Dizilim türü olarak hem kaynağın hem de alıcıların birlikte hareketli olduğu dizilim türü kullanılmıştır (Şekil 3.9). Her kaydırma işleminde serimdeki her alıcı ve atış noktası bir bütün şeklinde 1 metre ileri yönlü hareket etmiştir. 24 adet kaydırma işlemi sonucunda elde edilen 24 adet sismik kayıt ile 23 metrelik bir kesit elde edilmesi hedeflenmiştir.

4.1.3 MASW Yöntemi ile Elde Edilen Sonuçlar

Uygulama-I alanında bulunan tünel yapısı Şekil 4.2'de gösterilmiştir. Kocaeli Üniversitesi Yapı İşleri Daire Başkanlığından edinilen bilgilere göre tünel yapısının etrafındaki bölgeler dolgu malzemesinden oluşmaktadır. Üniversitenin bulunduğu bölge, dik yamaçlara sahip tepelerden oluşmasından dolayı bu alanları birbirine bağlamak için yapılan yolların altında dolgu malzemesi bulunmaktadır. Bu ön bilgiler yardımıyla model yorumlanmış ve bu bilgiler model üzerine işlenmiştir. Veri işlem sonucu elde edilen iki boyutlu yeraltı modeli ve üzerinde işaretlenen bölgeler

Şekil 4.3’de gösterilmiştir. Tünel yapısının oluşturduğu boşluk, dolgu malzemesi ve bu malzemenin altında başlayan doğal yapı iki boyutlu model üzerinde gösterilmektedir. Sarı kesikli çizgi ile gösterilen bölge tünel yapısının konumunu belirtmektedir. Tünelin sol tarafında kalan kırmızı kesikli çizgiyle gösterilen bölge ise su içeriği yüksek dolgu malzemesi olarak yorumlanmıştır. Su içeriği yüksek dolgu malzemesi ve tünelin üstünde kalan bölgeler yine dolgu malzemesinden oluşmaktadır. Ancak su içeriğinin düşük olması nedeniyle S dalga hızlarında önceki bölgelere göre bir yükselme söz konusudur. Dolgunun ve tünelin altında kalan kısımda ise, alandaki dolgu öncesi doğal morfolojinin varlığının gösteren yüksek sismik hızlar elde edilmiştir. Jeolojik birim ile dolgu sınırı siyah kesikli çizgi ile gösterilmiştir. Modelden de açıkça görülebildiği gibi, sismik S hızları 200m/s’den 800 m/s değerine hızlı bir geçiş yapmaktadır. Böylece kullanılan bu yöntem yardımıyla dolgu-jeolojik sınır ayrıntılı bir biçimde belirlenebilmiştir.



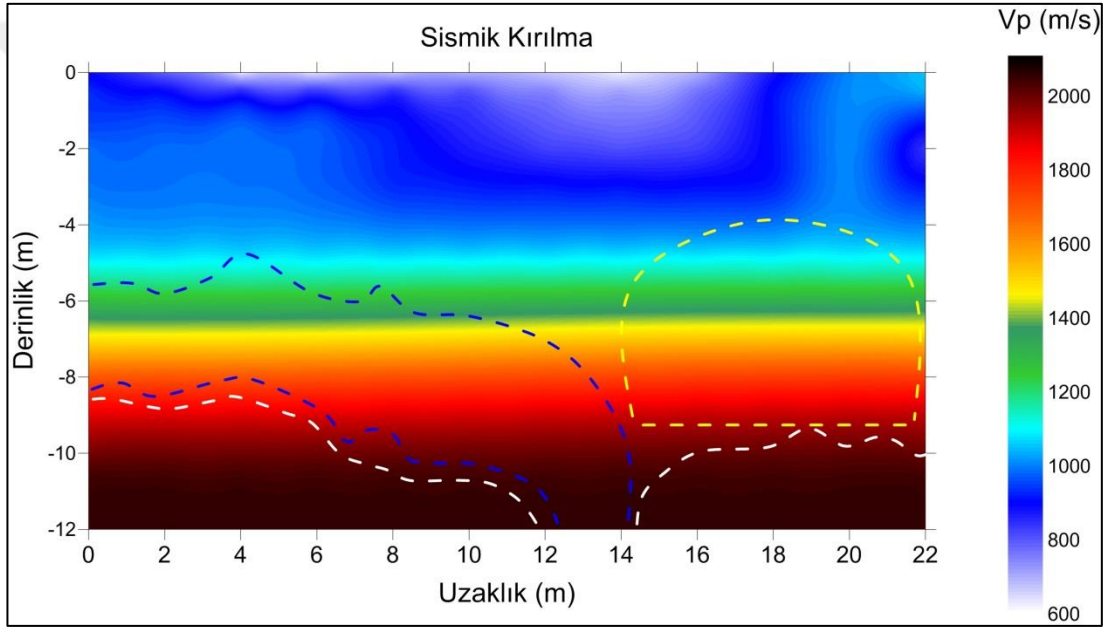
Şekil 4.3 MASW yöntemi ile elde edilen ve ön bilgiler ile yorumlanan iki boyutlu yeraltı modeli

4.1.4 Sismik Kırılma Yöntemi ile Elde Edilen Sonuçlar

Uygulama-I alanına ait jeoteknik parametrelerin hesaplanması için P hızlarının da bilinmesi gereklidir. Bu amaç doğrultusunda uygulama alanında Sismik Kırılma yöntemi ile P hızları elde edilmiştir. Yöntemde kullanılan ekipmanlar MASW

yönteminde kullanılan ekipmanlarla aynıdır. Sadece kullanılan alıcıların frekansı 14 Hz'dir. Veri toplama parametrelerinden; kayıt süresi 200 ms ve örnekleme aralığı 0,125 ms'dir.

Sismik kırılma yöntemi ile elde edilen sismik kırılma kesiti Şekil 4.4'de gösterilmiştir. Sismik kırılma kesitinde gözlenen hızlar, yüzeye yakın bölgelerde yaklaşık 600 m/s'den başlayıp derinlikle beraber artmaktadır. Kesitin ulaştığı en derin noktada yaklaşık 1900 m/s hız görülmektedir. Sismik P hız modelinde hızlar derine doğru doğrusal bir artış göstermiş ve ortamsal ayrımları ortaya koymamıştır.

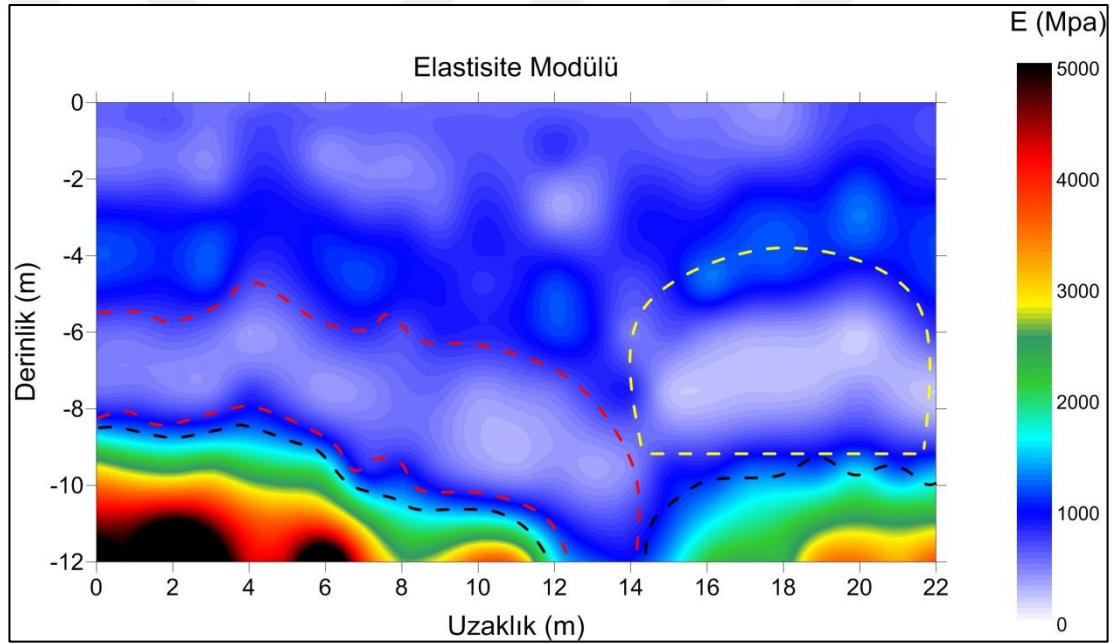


Şekil 4.4 Sismik kırılma yöntemi ile elde edilen iki boyutlu yeraltı modeli

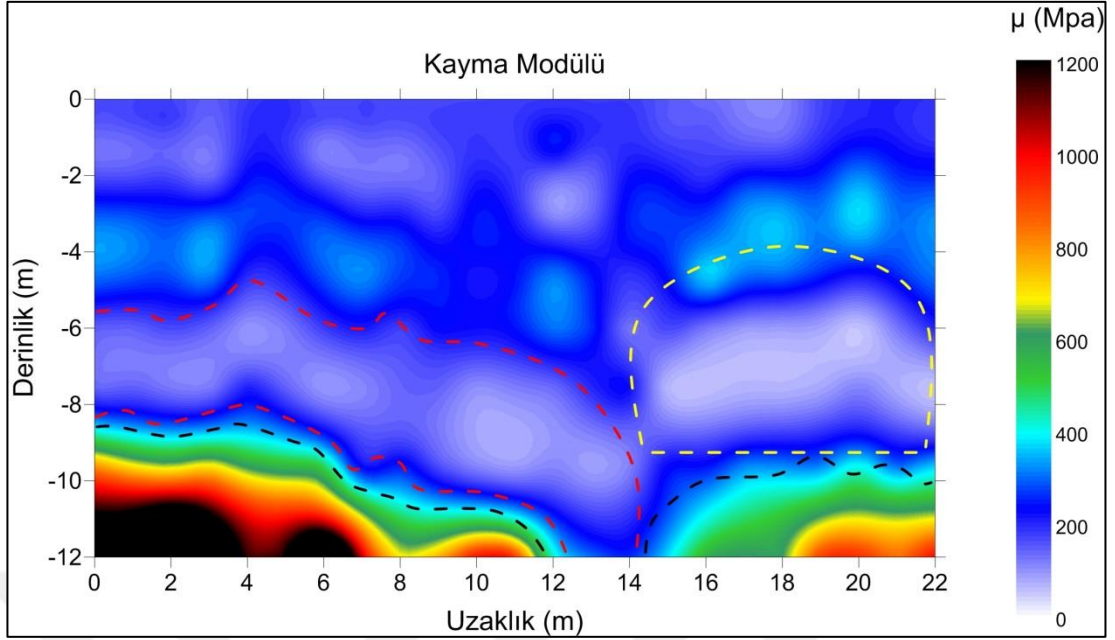
4.1.5 Jeoteknik Parametrelerin Sonuçları

Sismik Kırılma ve MASW yöntemleri ile elde edilen P ve S hızlarıyla sismik hızlarla ilişkili bağıntılar yardımıyla tabakaların; Yoğunluğu, Kayma modülü, Elastisite modülü, Bulk modülü, Poisson oranı ve Vp/Vs oranları hesaplanmıştır. Bu hesaplamalar sonucunda jeoteknik parametrelere ait modeller çizilmiştir. Şekil 4.5'te Elastisite modülü, Şekil 4.6'da Kayma modülü, Şekil 4.7'de Bulk modülü, Şekil 4.8'de Yoğunluk, Şekil 4.9'da Poisson oranı ve Şekil 4.10'da Vp/Vs oranı olmak üzere hesaplanan jeoteknik parametrelerin iki boyutlu kesitleri verilmektedir.

Elastisite modülünün hesaplanması doğrudan Kayma modülü ve Poisson oranı ile ilişkili olması sebebiyle Elastisite ve Kayma modülü kesitleri birbirine benzerdir. Kayma modülü ise Yoğunluk ve S hızları ile ilişkilidir. Bu yüzden Elastisite ve Kayma modülü kesitleri karakteristik olarak S hızı kesitiyle benzerdir. Elastisite ve Kayma modülü kesitlerinde dolgu malzemesi ve tünel yapısının olduğu bölgeler çok düşük değerlere sahiptir. S hızının havada ve suda yayılmamasından dolayı, Kayma modülünün su içeriği yüksek dolgu malzemesinde ve tünel boşluğunun olduğu bölgelerde yaklaşık 200 Mpa olduğu görülmektedir. Doğal topoğrafyanın başladığı bölgelerde ise Elastisite modülü yaklaşık 2300 Mpa, Kayma modülü ise yaklaşık 600 Mpa'dır.

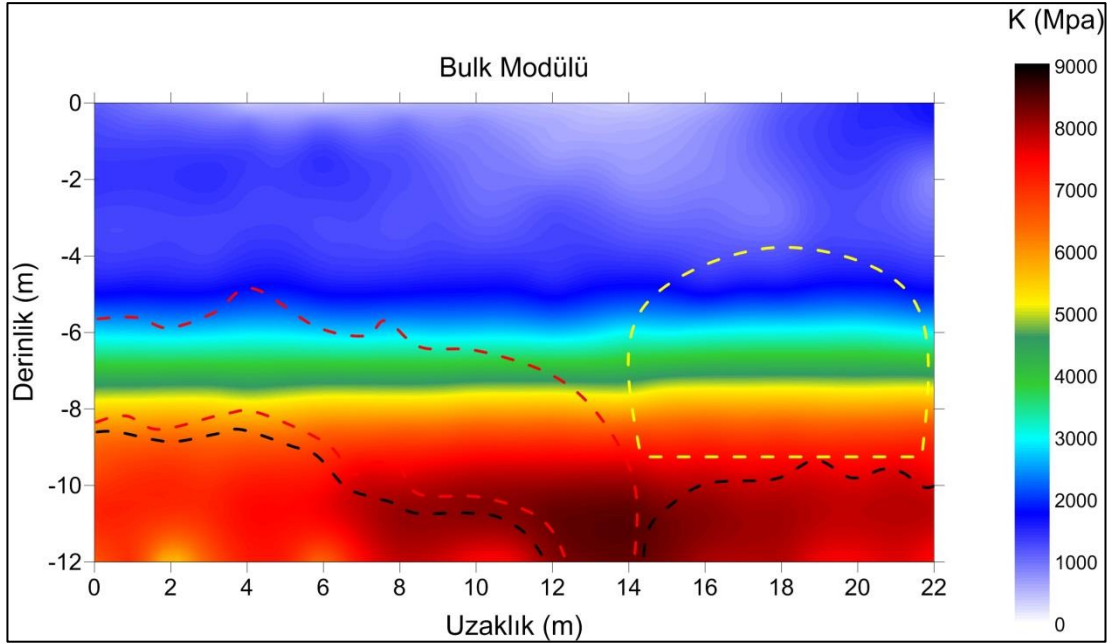


Şekil 4.5 Sismik hızlar yardımıyla hesaplanan Elastisite modülü kesiti

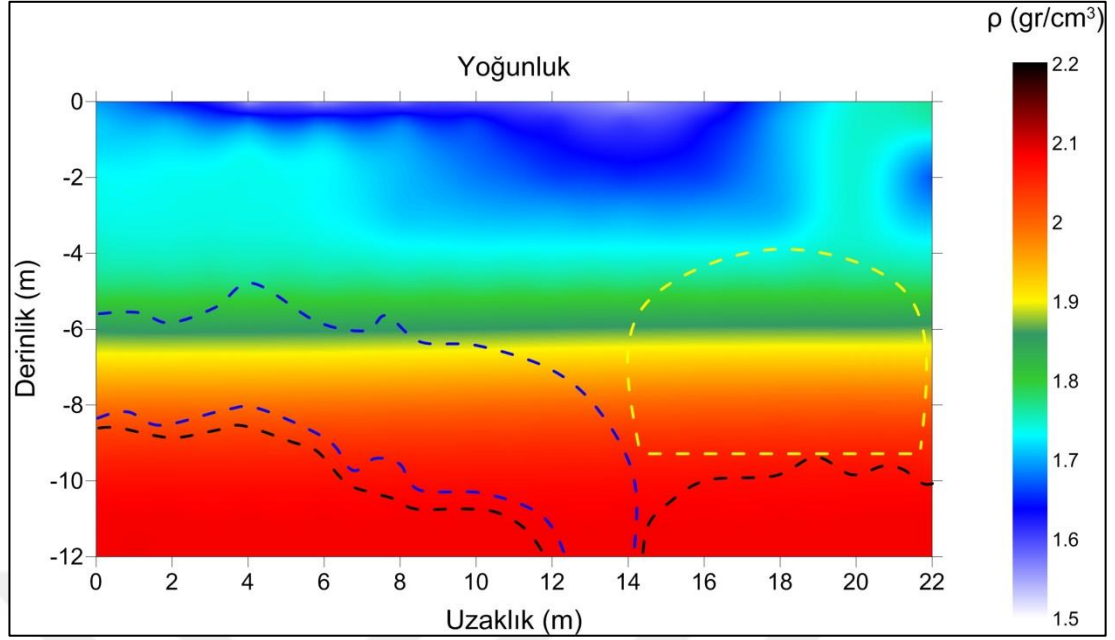


Şekil 4.6 Sismik hızlar yardımıyla hesaplanan Kayma modülü kesiti

Bulk modülünün hesaplamasında ise baskın parametre P dalgı hızıdır. Bu yüzden Bulk modülü kesiti karakteristik olarak sismik kırılma kesitine benzemektedir. Yüzeyde yaklaşık 1000 Mpa'dan başlayıp derinlikle beraber artmaktadır. Kesitin en derin seviyesi olan 12 metre civarında 8000-8500 Mpa değerine ulaşmaktadır.



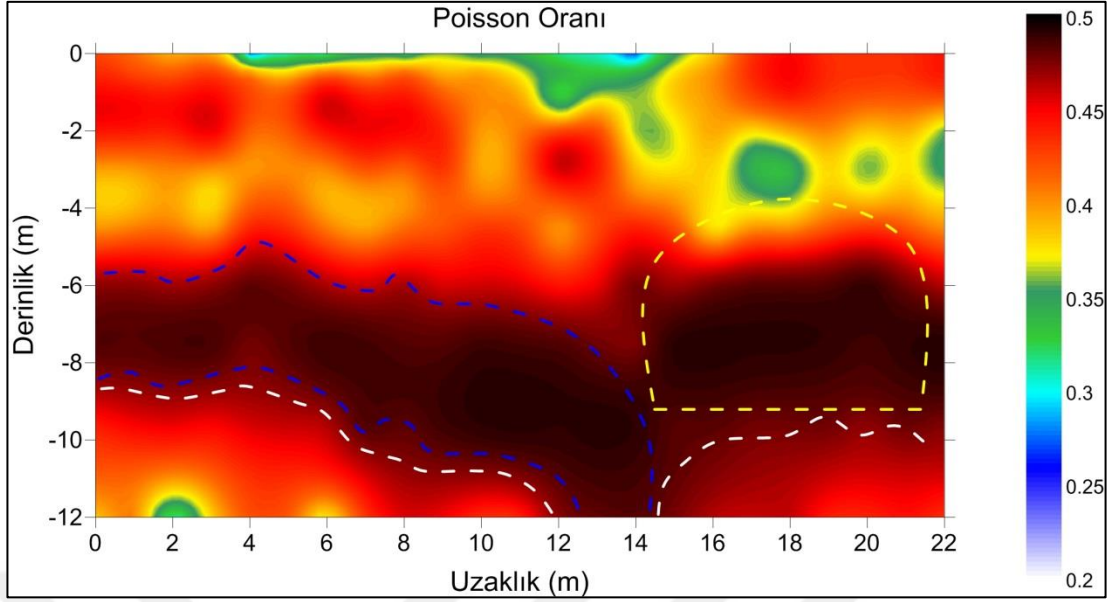
Şekil 4.7 Sismik hızlar yardımıyla hesaplanan Bulk modülü kesiti



Şekil 4.8 Sismik hızlar yardımıyla hesaplanan yoğunluk kesiti

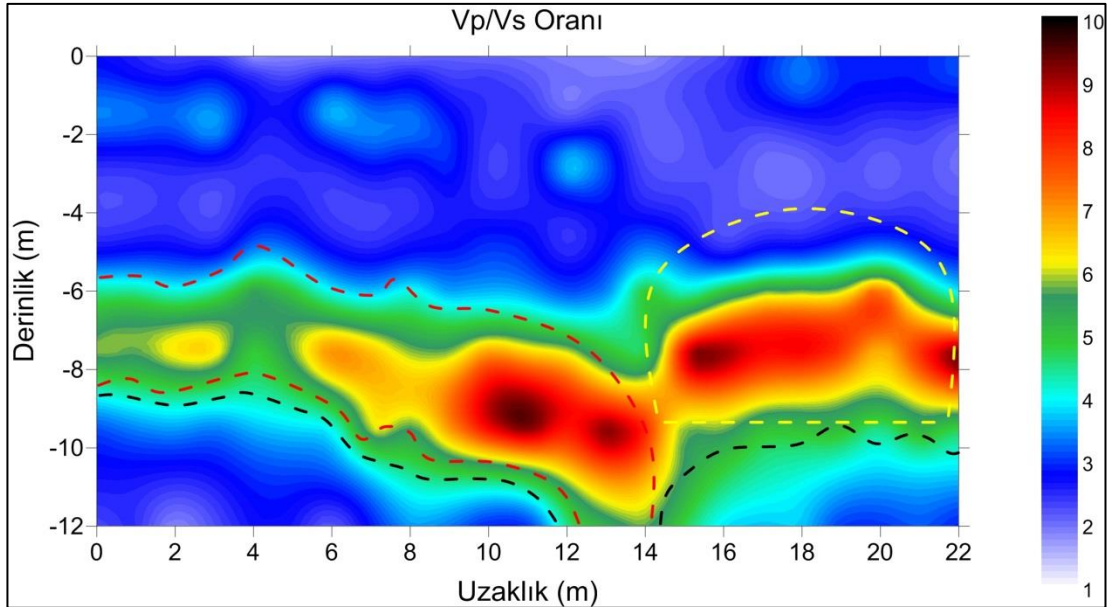
Yoğunluk hesaplaması, yakın yüzey araştırmalarında P dalga hızı ile doğrudan ilişkili olduğundan yoğunluk kesiti sismik kırılma ile benzerdir. Yaklaşık olarak 1,6 gr/cm^3 değerinden başlayan yoğunluk, derinlikle birlikte artarak 2,1 gr/cm^3 değerlerine ulaşmaktadır.

Poisson oranı kesiti incelendiğinde su içeriğinin yüksek olduğu dolgu malzemesi ve tünel yapısının olduğu bölgelerde 0,47-0,49 değerleri elde edilmiştir. Dolgu malzemesinin su içeriği daha az olan kısımlar ise yaklaşık 0,40 değerleri görülmektedir. Ayrıca betonun Poisson oranı yaklaşık 0,2 olduğu bilinmektedir. Ancak tünelin üst tarafında bulunan tünele ait beton malzemeden kaynaklı yaklaşık 0,33-0,35 değerleri görülmüştür. Burada Poisson oranının 0,2'den yüksek çıkması çevre birimlerin yüksek Poisson oranına sahip olmasından kaynaklanmaktadır.



Şekil 4.9 Sismik hızlar yardımıyla hesaplanan Poisson oranı kesiti

Vp/Vs oranı kesitinde su içeriği yüksek bölgeler ve tünel yapısının olduğu bölge, hem ana topoğrafyadan hem de su içeriği yüksek olmayan normal dolgu malzemesinden çok net bir şekilde ayrılmıştır. Vp/Vs oranı su ve boşluktan kaynaklı, 5-10 aralığında değerler almıştır. Diğer bölgeler ise 1,5-3 arasında değerlere sahiptir.

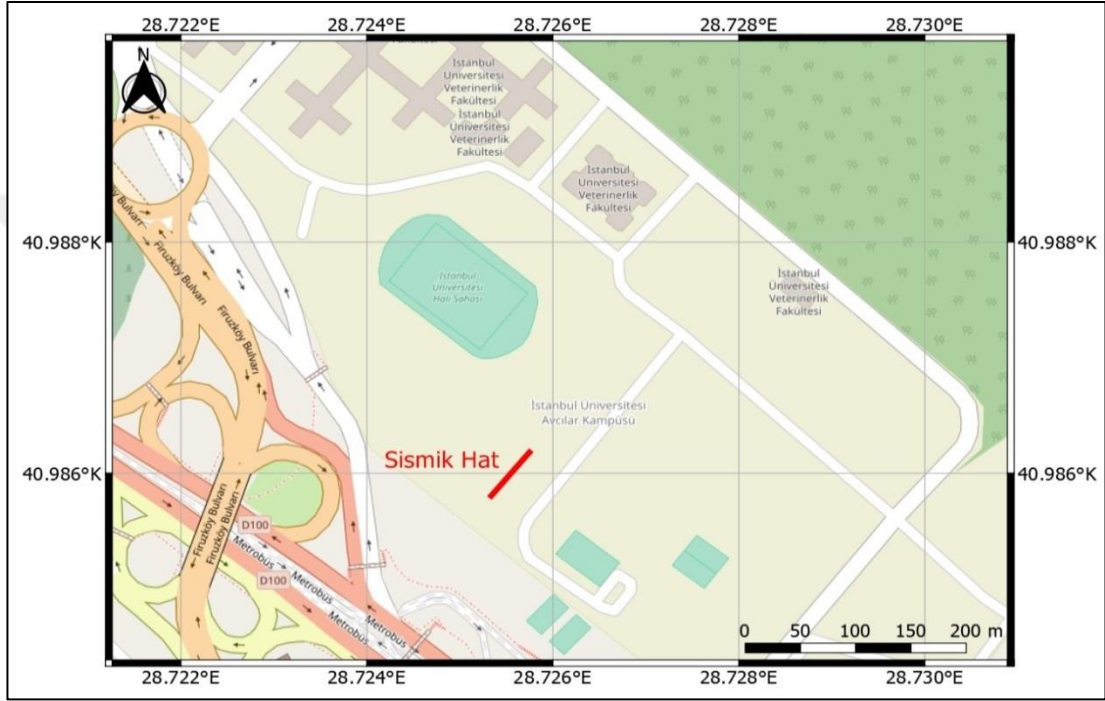


Şekil 4.10 Sismik hızlar yardımıyla hesaplanan Vp/Vs oranı kesiti

4.2 Arazi Uygulaması – II

4.2.1 Uygulama Alanının Konumu ve Jeolojisi

Uygulama-II alanı, İstanbul Üniversitesi Avcılar Kampüsü içinde Veterinerlik Fakültesi ve D100 karayolu arasında yer almaktadır (Şekil 4.11).



Şekil 4.11 Uygulama - II alanının ve sismik hattın konumu

Uygulama-II alanın genel jeolojisi incelendiğinde bölge genel olarak Çekmece Formasyonundan oluşmaktadır. Miyosen yaşa sahip olan Çekmece Formasyonu, Bakırköy ve Güngören olmak üzere iki üyeye ayrılmıştır. Bakırköy Üyesi çoğunlukla kil ve kireçtaşlarından oluşurken Güngören Üyesi çoğunlukla kil ve kum içerir (Sayar, 1989).

Tablo 4.3 Çekmece formasyonun genel stratigrafik bilgileri

Çağ	Sistem	Seri	Üye	Litoloji	Fosiller
Senozoyik	Neojen	Üst Miyosen	Bakırköy	Kil ve seyrek kirli beyaz killi kireçtaşı, beyaz kireçtaşı	Mactra, Unio, Planorbis, Ostracod
			Güngören	Sarımsı koyu yeşil renkli kil, beyaz renkli marn	Helix

4.2.2 Veri Toplama Parametreleri

Uygulama-II'de 4,5 Hz frekansa sahip 24 adet alıcı ve 10 kg ağırlığında balyoz kullanılmıştır. Alıcılar arası mesafe 3 metre, ofset 1,5 metre seçilmiştir. Veri toplama işlemi için kayıt süresi 2000 ms seçilmiştir. Örnekleme Aralığı 1 ms seçilerek 2000 örnek sayısı elde edilmiştir. Tablo 4.3'de veri toplama parametreleri verilmiştir.

Tablo 4.4 Uygulama-II için seçilen veri toplama parametreleri

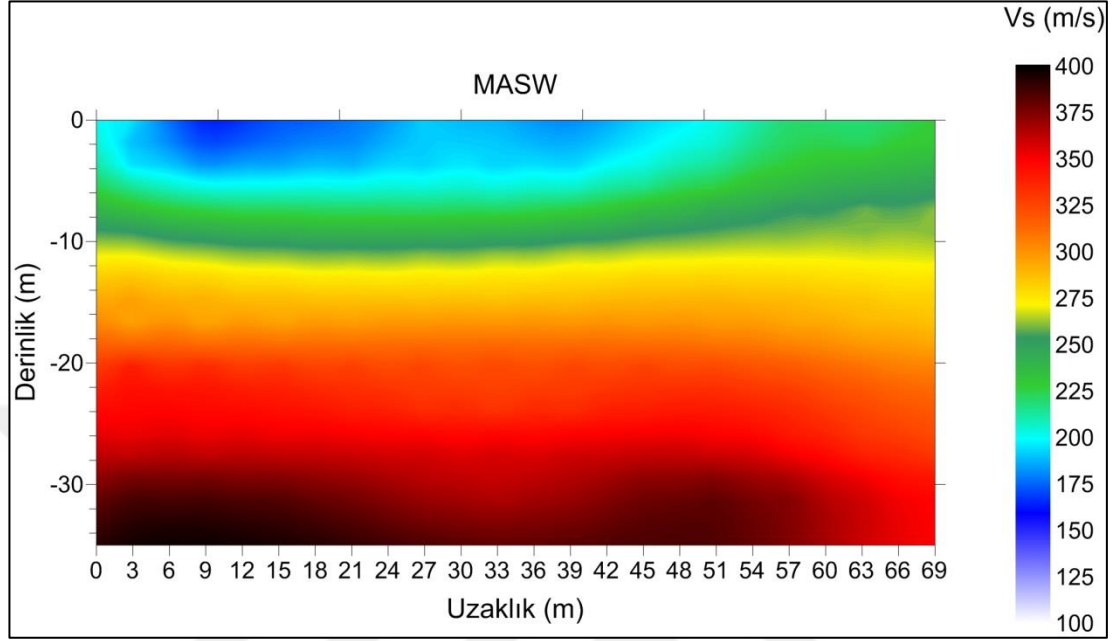
Ofset	Alıcılar Arası Mesafe	Serim Boyu	Alıcı Frekansı	Kaynak Ağırlığı	Kayıt Süresi	Örnekleme Aralığı
1,5 m	3 m	69 m	4,5 Hz	10 kg	2000 ms	1 ms

Dizilim türü olarak kaynağın hareketli alıcıların sabit olduğu dizilim türü kullanılmıştır (Şekil 3.8). Kaydırma işleminde sadece atış noktası 3 metre ileri yönlü hareket etmiştir. 24 adet kaydırma işlemi sonucunda elde edilen 25 adet sismik kayıt ile 69 metrelik bir kesit elde edilmesi hedeflenmiştir.

4.2.3 MASW Yöntemi ile Elde Edilen Sonuçlar

Veri işlem sonucu elde edilen iki boyutlu MASW kesitinde (Şekil 4.12) bölgenin oldukça düşük S hızına sahip olduğu görülmektedir. 35 metre derinlikli kesitte,

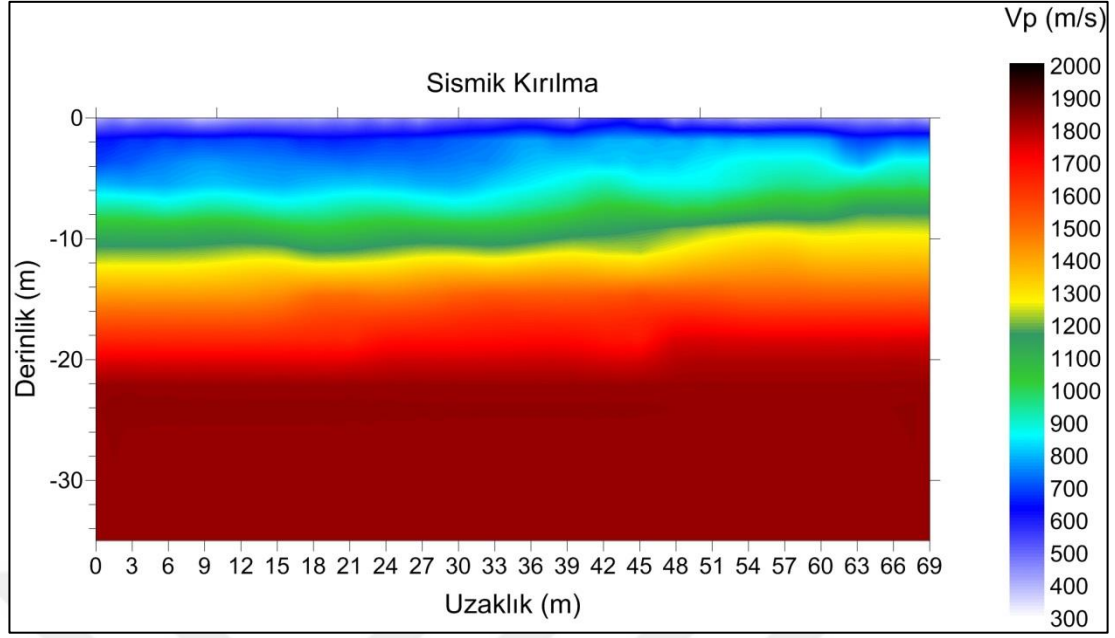
yüzeye yakın yerlerde ortalama 200 m/s S hızı tespit edilmişken, 35 metre derinliklerde ortalama 400 m/s S hızı tespit edilmiştir.



Şekil 4.12 MASW yöntemi ile elde edilen iki boyutlu yeraltı modeli

4.2.4 Sismik Kırılma Yöntemi ile Elde Edilen Sonuçlar

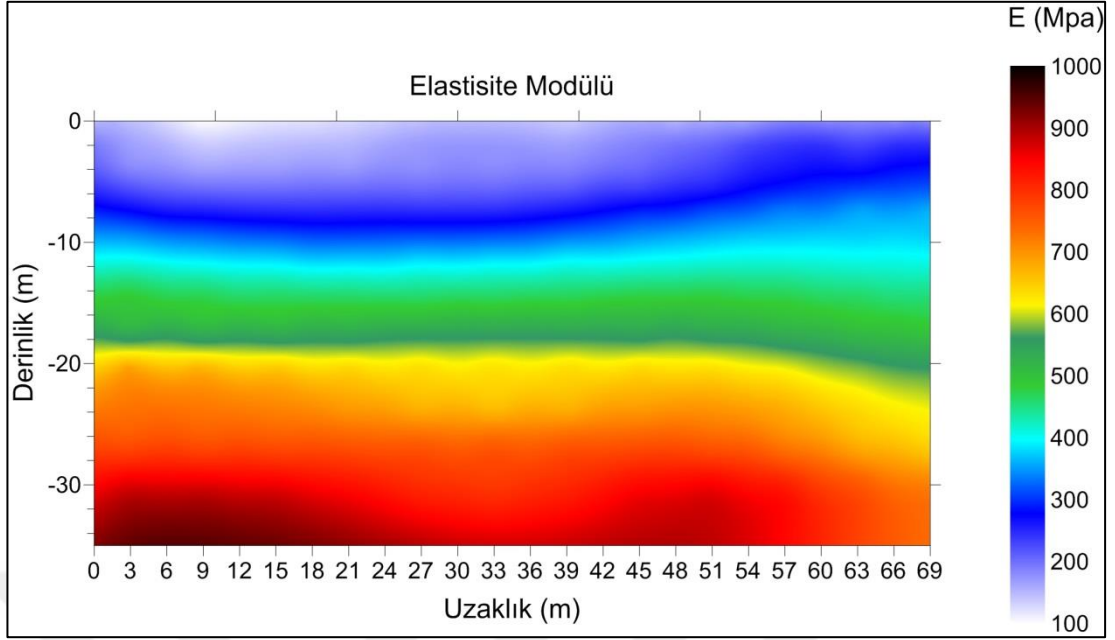
Uygulama-II alanına ait jeoteknik parametrelerin hesaplanması için P hızlarının da bilinmesi gereklidir. Bu amaç doğrultusunda uygulama alanında Sismik Kırılma yöntemi ile P hızları elde edilmiştir. Veri işlem sonucu elde edilen sismik kırılma kesiti Şekil 4.13'de gösterilmiştir. Sismik kırılma kesitinde gözlenen hızlar, yüzeye yakın bölgelerde yaklaşık 600 m/s'den başlayıp derinlikle beraber artmaktadır. Kesitin ulaştığı en derin noktada yaklaşık 1800 m/s hız görülmektedir.



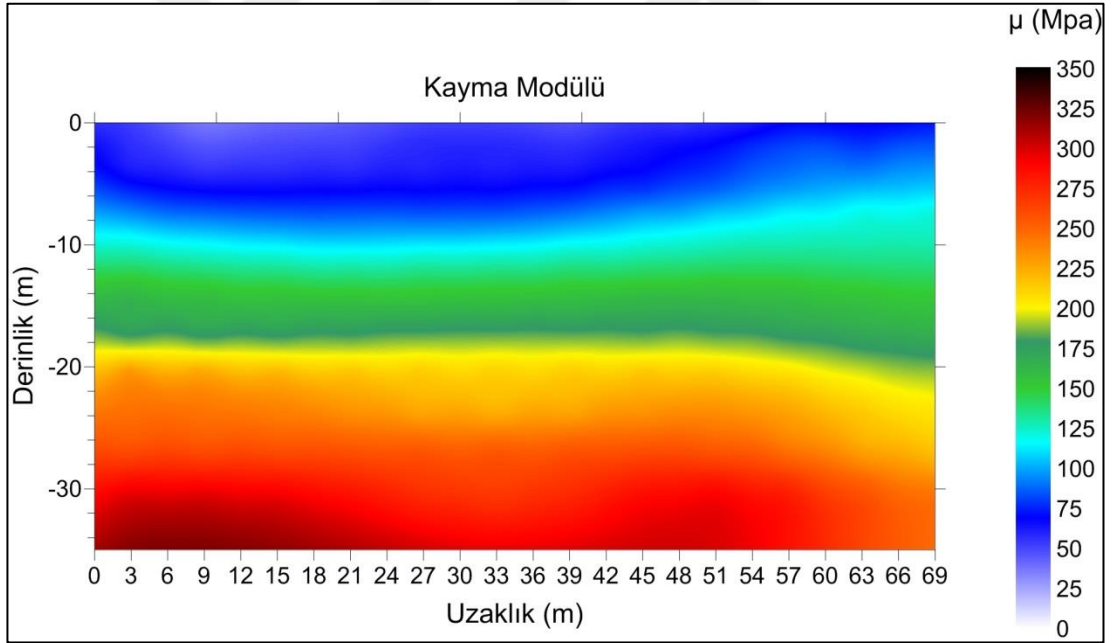
Şekil 4.13 Sismik kırılma yöntemi ile elde edilen iki boyutlu yeraltı modeli

4.2.5 Jeoteknik Parametrelerin Sonuçları

Uygulama-II için sismik kırılma ve MASW yöntemleri ile elde edilen P ve S hızlarıyla sismik hızlarla ilişkili bağıntılar yardımıyla tabakaların Yoğunluğu, Kayma modülü, Elastisite modülü, Bulk modülü, Poisson oranı ve V_p/V_s oranları hesaplanmıştır. Bu hesaplamalar sonucunda jeoteknik parametrelere ait modeller çizilmiştir. Şekil 4.14'te Elastisite modülü, Şekil 4.15'te Kayma modülü, Şekil 4.16'da Bulk modülü, Şekil 4.17'de Yoğunluk, Şekil 4.18'de Poisson oranı ve Şekil 4.19'da V_p/V_s oranı olmak üzere hesaplanan jeoteknik parametrelerin kesitleri gösterilmektedir. Elastisite modülünün hesaplanması doğrudan Kayma modülü ve Poisson oranı ile ilişkili olduğu ve Kayma modülünün ise yoğunluk ve S hızları ile ilişkili olduğu Uygulama-I'de bahsedilmişti. Bunun sonucunda bu uygulamada da Elastisite ve Kayma modülü kesitleri S hızı kesitiyle karakteristik olarak benzer olarak çıkmıştır. Elastisite modülü kesiti incelediğinde uygulama alanında 100-1000 Mpa aralığında derinlikle artan Elastisite modülü değeri vardır. Kayma modülünde ise 50-350 Mpa aralığında derinlikle artan değerler görülmektedir.

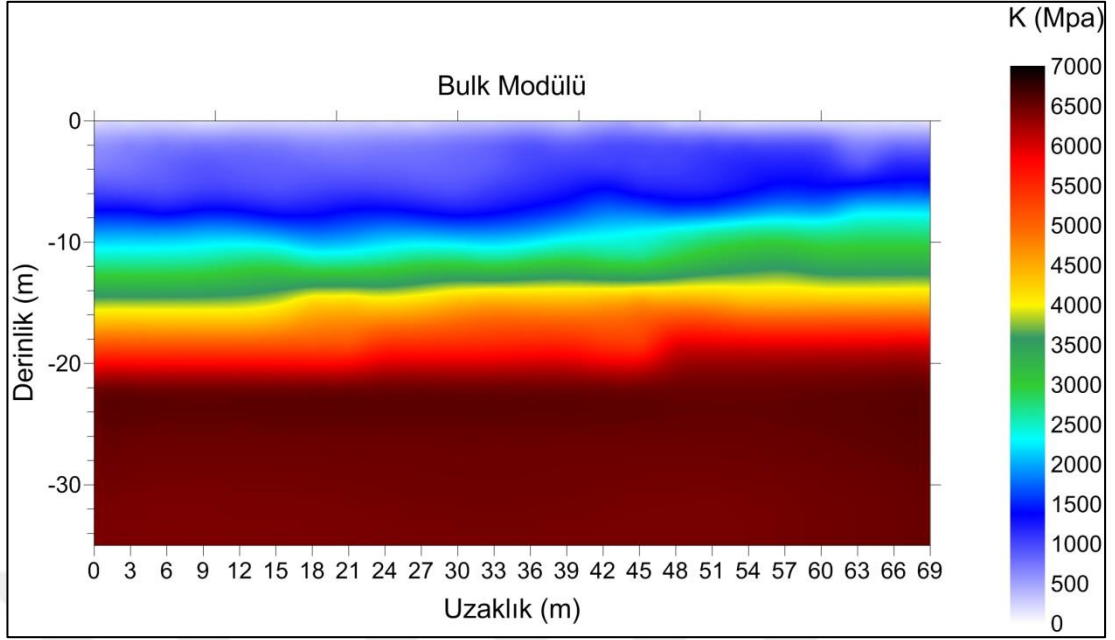


Şekil 4.14 Sismik hızlar yardımıyla hesaplanan Elastisite modülü kesiti



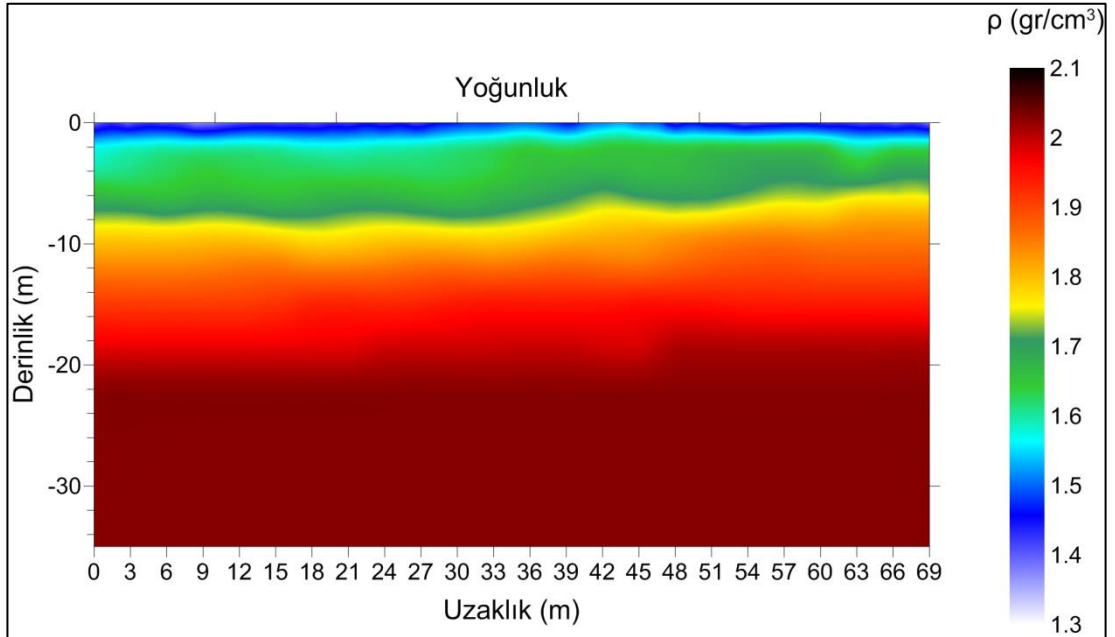
Şekil 4.15 Sismik hızlar yardımıyla hesaplanan Kayma modülü kesiti

Bulk modülünün hesaplamasında ise baskın parametre P dalga hızı olmasından dolayı Bulk modülü kesiti karakteristik olarak yine sismik kırılma kesitine benzemektedir. Yüzeyle yaklaşık 1000 Mpa'dan başlayıp derinlikle beraber artan Bulk modülü kesitin en derin seviyesi olan 35 metre noktasında 7000 Mpa değerine ulaşmaktadır.



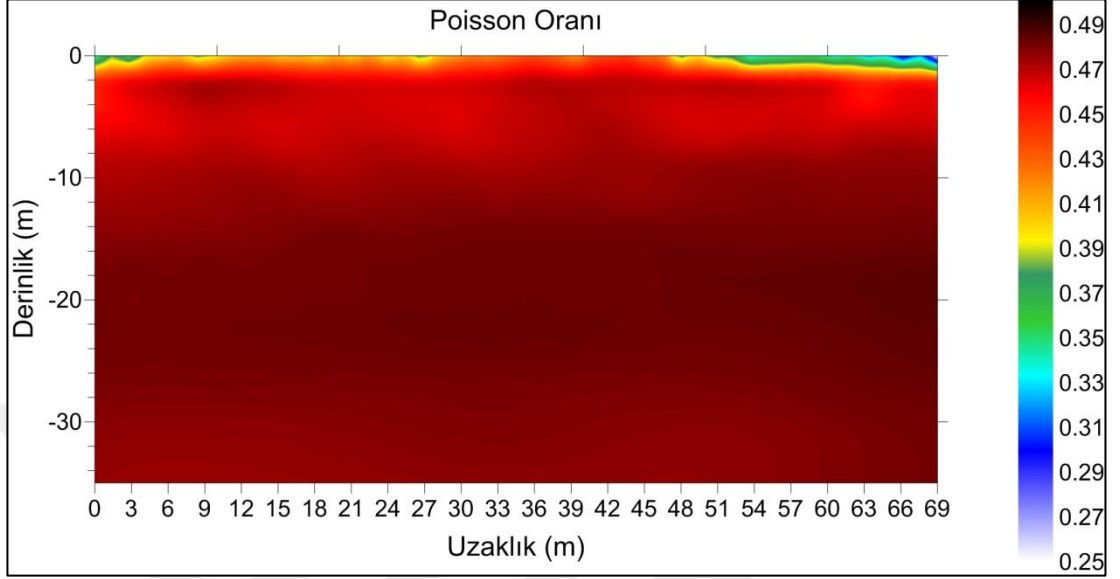
Şekil 4.16 Sismik hızlar yardımıyla hesaplanan Bulk modülü kesiti

Yoğunluk hesaplaması yakın yüzey araştırmalarında P dalga hızı ile doğrudan ilişkili olduğundan yoğunluk kesiti yine sismik kırılma kesiti ile benzerdir. Yaklaşık olarak $1,5 \text{ gr/cm}^3$ değerinden başlayan yoğunluk, derinlikle birlikte artarak $2,1 \text{ gr/cm}^3$ değerlerine ulaşmaktadır.



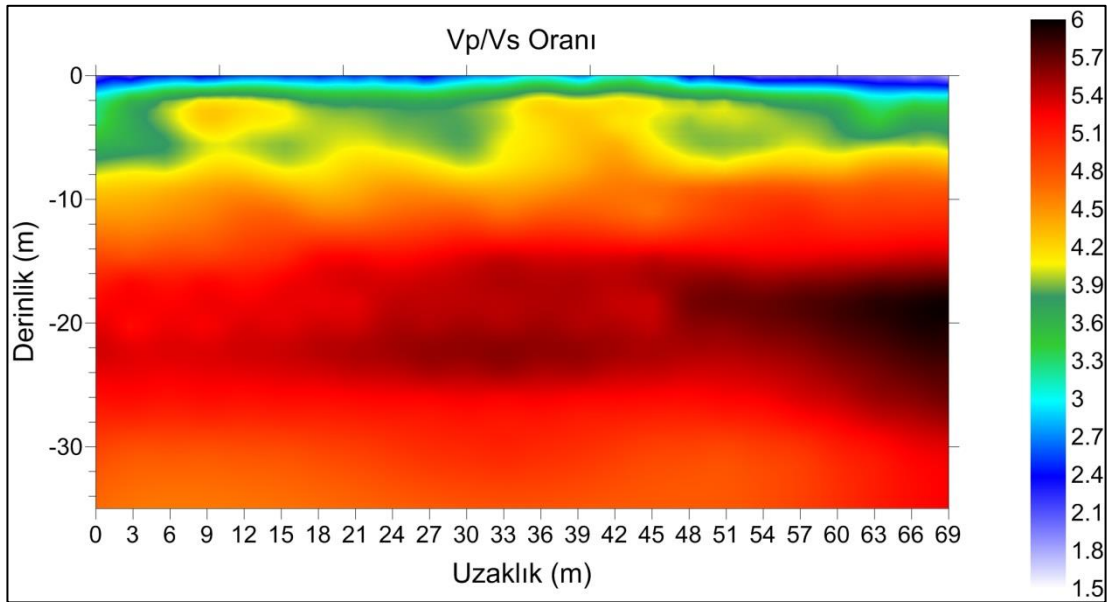
Şekil 4.17 Sismik hızlar yardımıyla hesaplanan yoğunluk kesiti

Poisson oranı kesiti incelendiğinde S dalga hızının uygulama alanında genel olarak düşük olmasından dolayı 0,46-0,48 aralığında bir değer elde edilmiştir.



Şekil 4.18 Sismik hızlar yardımıyla hesaplanan Poisson oranı kesiti

Vp/Vs oranı ilk 8 metrede ortalama 3,5-4 değerine sahipken 8 metreden sonraki seviyede yaklaşık olarak 5-6 aralığında değerlere sahiptir. Uygulama alanının düşük S hızlarına sahip olması, Vp/Vs oranının yüksek çıkmasında etkili olmuştur.

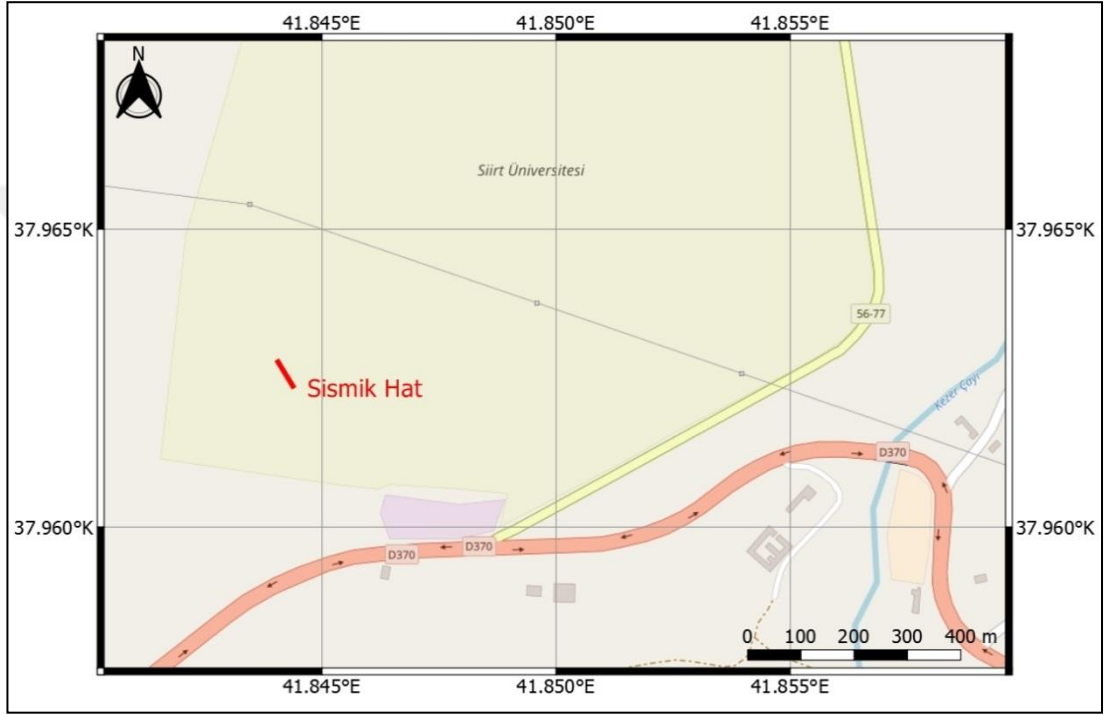


Şekil 4.19 Sismik hızlar yardımıyla hesaplanan Vp/Vs oranı kesiti

4.3 Arazi Uygulaması – III

4.3.1 Uygulama Alanının Konumu ve Jeolojisi

Uygulama-III alanı, Siirt Üniversitesi Kezer Yerleşkesi içinde öğrenci yurtlarının olduğu bölgede yer almaktadır (Şekil 4.20).



Şekil 4.20 Uygulama - III alanının ve sismik hattın konumu

Uygulama alanının genel jeolojisi incelendiğinde, bölge genel olarak Germik Formasyonundan oluşmaktadır. Germik Formasyonu Oligosen yaşta sahiptir. Bu formasyonda çoğunlukla kireçtaşı ve jips görülmektedir (Yeşilova ve Helvacı, 2012).

Tablo 4.5 Germik formasyonunun genel stratigrafik bilgileri

Çağ	Sistem	Seri	Litoloji
Senozoyik	Paleojen	Oligosen	Kahverengi-sarı renkli kireçtaşı, Krem-bej renkli jipsli kireçtaşı, Gri-beyaz renkli jips, killi jips, Pembe-bej renkli çamurlu jips

4.3.2 Veri Toplama Parametreleri

Uygulama-III'te 4,5 Hz frekansa sahip 24 adet alıcı ve 10 kg ağırlığında balyoz kullanılmıştır. Alıcılar arası mesafe 3 metre, ofset 1,5 metre seçilmiştir. Veri toplama işlemi için kayıt süresi 2000 ms seçilmiştir. Örnekleme aralığı 1 ms seçilerek 2000 örnek sayısı elde edilmiştir. Tablo 4.4'de veri toplama parametreleri verilmiştir.

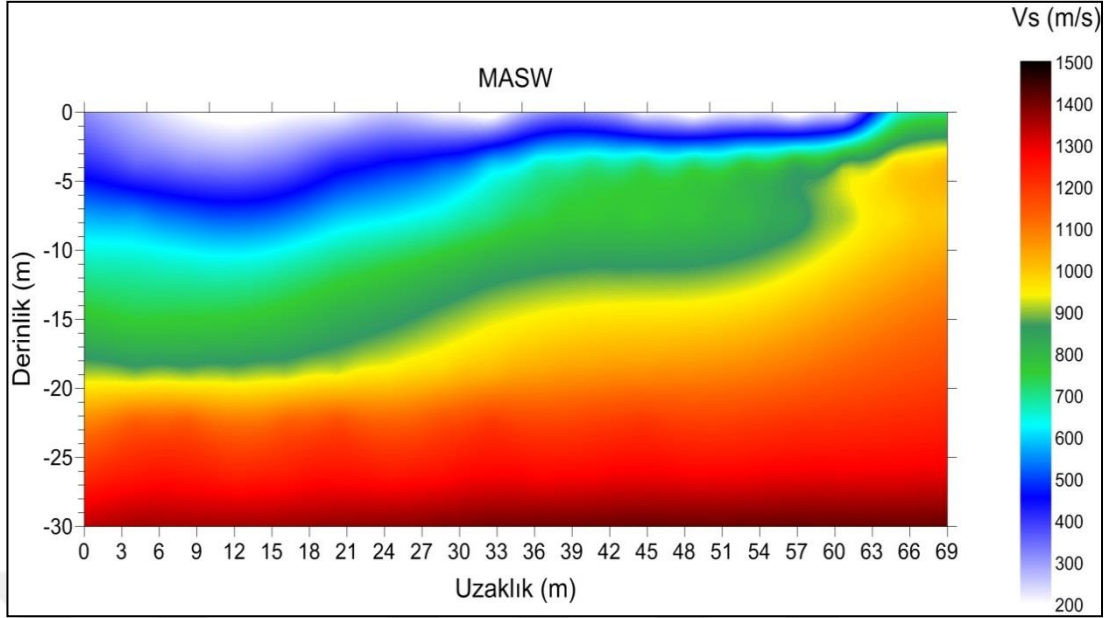
Tablo 4.6 Uygulama-III için seçilen veri toplama parametreleri

Ofset	Alıcılar Arası Mesafe	Serim Boyu	Alıcı Frekansı	Kaynak Ağırlığı	Kayıt Süresi	Örnekleme Aralığı
1,5 m	3 m	69 m	4,5 Hz	10 kg	2000 ms	1 ms

Dizilim türü olarak, kaynağın hareketli alıcıların sabit olduğu dizilim türü kullanılmıştır (Şekil 3.8). Kaydırma işleminde sadece atış noktası 3 metre ileri yönlü hareket etmiştir. 24 adet kaydırma işlemi sonucunda elde edilen 25 adet sismik kayıt ile 69 metrelik bir kesit elde edilmesi hedeflenmiştir.

4.3.3 MASW Yöntemi ile Elde Edilen Sonuçlar

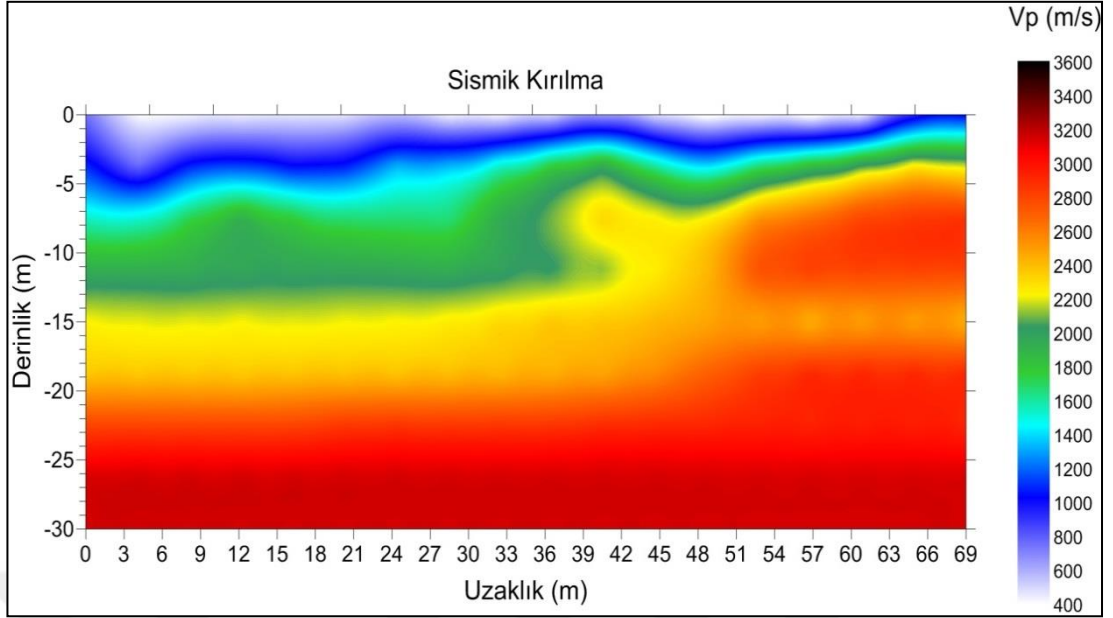
Veri işlem sonucu elde edilen iki boyutlu MASW kesitinde (Şekil 4.21) uygulama alanındaki S hızları görülmektedir. S kesitine bakıldığında 3 ayrı tabakanın var olduğu görülmektedir. Kesitte görülen ilk tabaka (mavi bölge) yaklaşık 400 m/s S hızına sahipken ikinci tabaka (yeşil bölge) yaklaşık 800 m/s, üçüncü tabaka (kırmızı bölge) 1300 m/s S hızına sahiptir. Birinci ve ikinci tabaka arasındaki sınır, zemin-kaya sınırını göstermektedir.



Şekil 4.21 MASW yöntemi ile elde edilen iki boyutlu yeraltı modeli

4.3.4 Sismik Kırılma Yöntemi ile Elde Edilen Sonuçlar

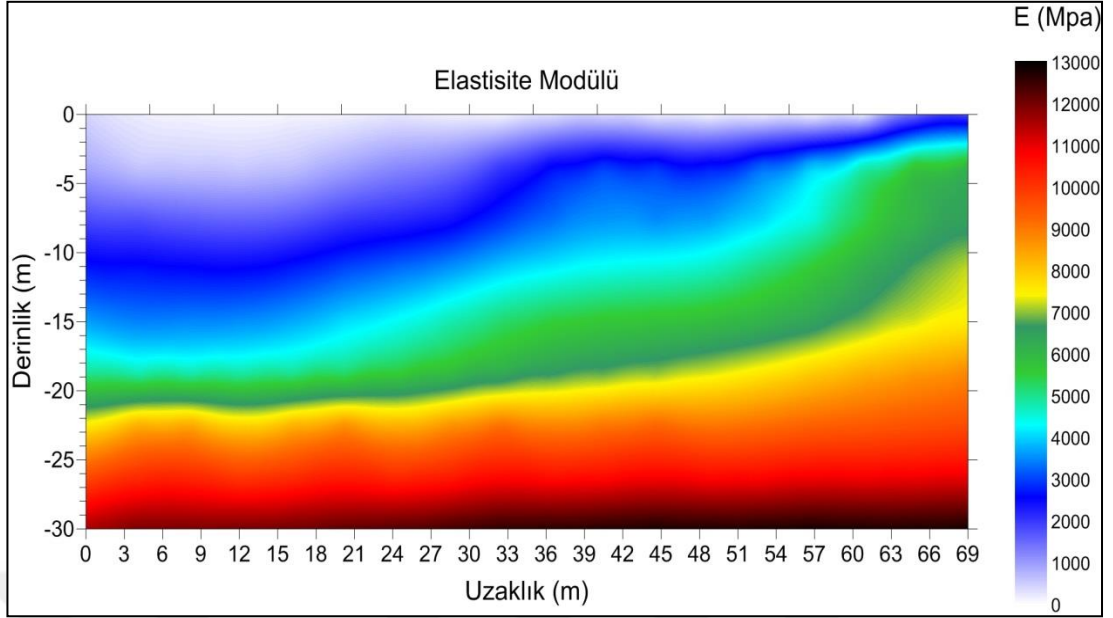
Uygulama-III alanına ait jeoteknik parametrelerin hesaplanması için P hızlarının da belirlenmesi gereklidir. Bu amaç doğrultusunda uygulama alanında Sismik Kırılma yöntemi ile P hızları elde edilmiştir. Veri işlem sonucu elde edilen sismik kırılma kesiti şekil 4.22’de gösterilmiştir. P kesitine bakıldığında üç tabakalı bir ortamın varlığı görülmektedir. Sismik kırılma kesitinde gözlenen hızlar, birinci tabakada (mavi bölge) yaklaşık 1000 m/s, ikinci tabakada (yeşil bölge) yaklaşık 2000 m/s ve üçüncü tabakada (kırmızı bölge) ortalama 3100 m/s’dir.



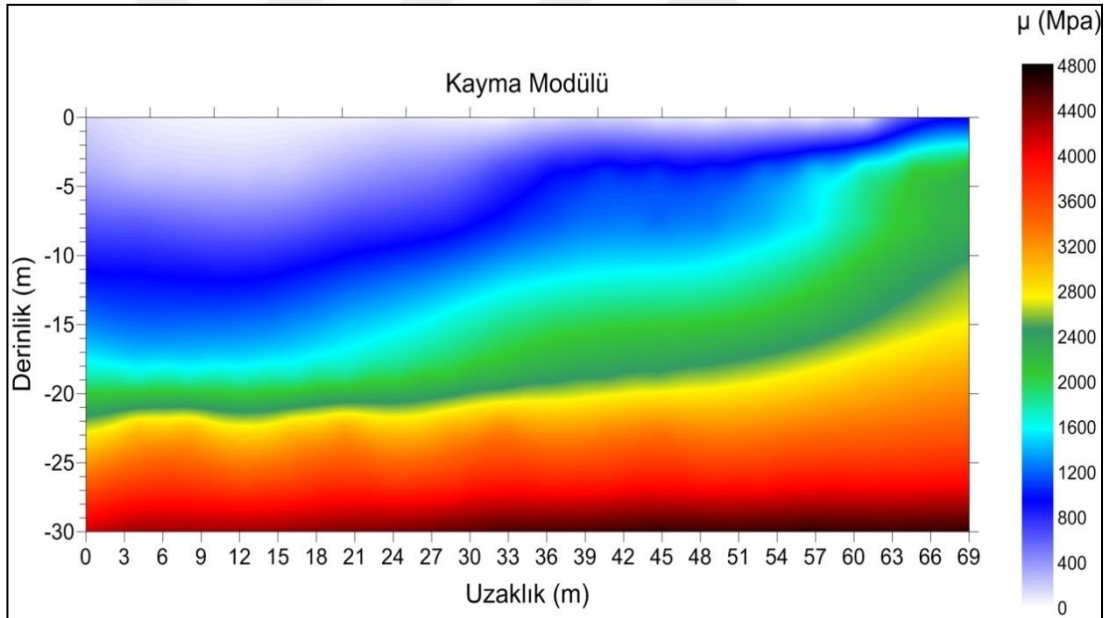
Şekil 4.22 Sismik kırılma yöntemi ile elde edilen iki boyutlu yeraltı modeli

4.3.5 Jeoteknik Parametrelerin Sonuçları

Uygulama-III için sismik kırılma ve MASW yöntemleri ile elde edilen P ve S hızlarıyla sismik hızlarla ilişkili bağıntılar yardımıyla tabakaların Yoğunluğu, Kayma modülü, Elastisite modülü, Bulk modülü, Poisson oranı ve V_p/V_s oranları hesaplanmıştır. Bu hesaplamalar sonucunda jeoteknik parametrelere ait modeller çizilmiştir. Şekil 4.23'de Elastisite modülü, Şekil 4.24'te Kayma modülü, Şekil 4.25'de Bulk modülü, Şekil 4.26'te Yoğunluk, Şekil 4.27'da Poisson oranı ve Şekil 4.28'de V_p/V_s oranı olmak üzere hesaplanan jeoteknik parametrelerin kesitleri gösterilmektedir. Elastisite modülünün doğrudan Kayma modülü ve Poisson oranı ile ilişkili olduğu ve Kayma modülünün ise yoğunluk ve S hızları ile ilişkili olduğu Uygulama-I ve Uygulama-II'de vurgulanmıştı. Elastisite ve Kayma modülü kesitleri incelendiğinde bu uygulamada da Elastisite ve Kayma modülü kesitleri S hızı kesitiyle karakteristik olarak benzer olarak çıkmıştır. Elastisite modülü kesiti incelendiğinde uygulama alanında 2000-13000 Mpa aralığında derinlikle artan Elastisite modülü değerleri vardır. Kayma modülünde ise 400-4800 Mpa aralığında derinlikle artan değerler görülmektedir.

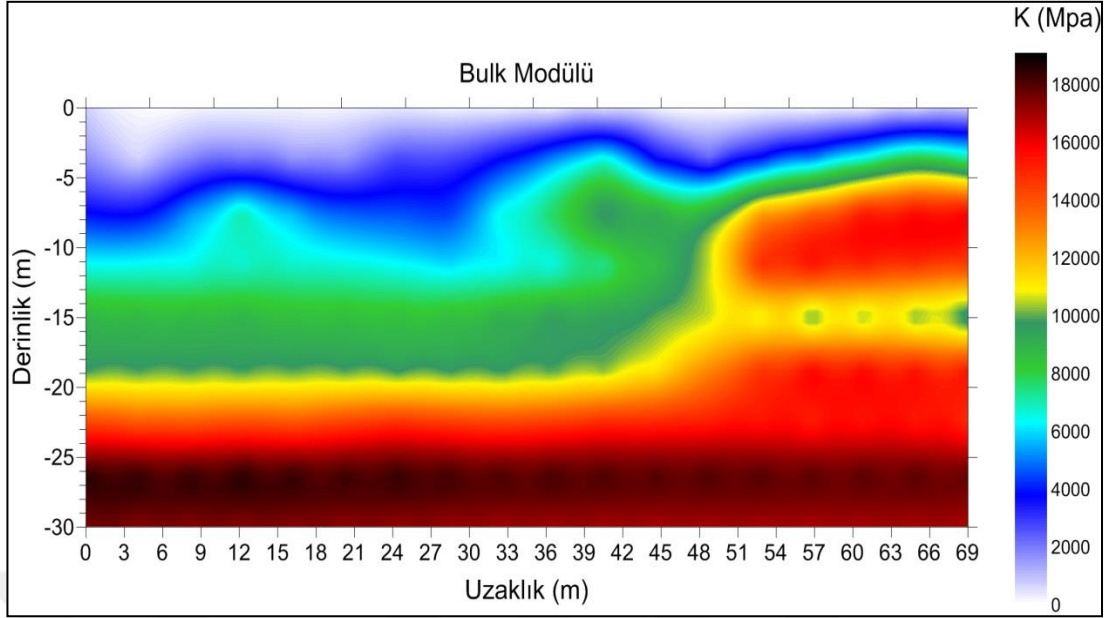


Şekil 4.23 Sismik hızlar yardımıyla hesaplanan Elastisite modülü kesiti



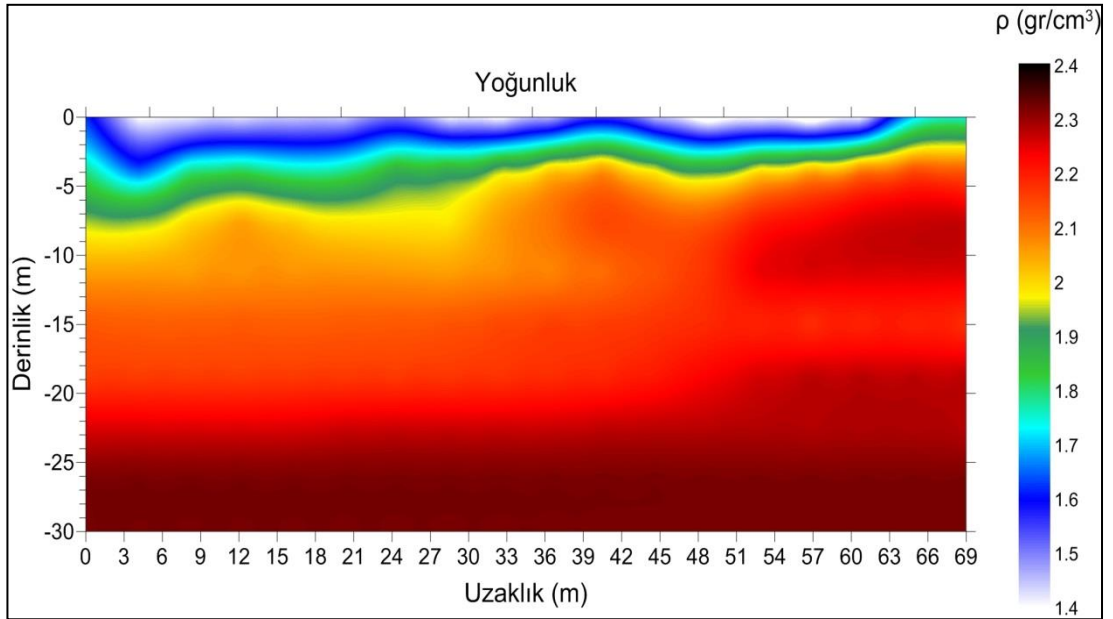
Şekil 4.24 Sismik hızlar yardımıyla hesaplanan Kayma modülü kesiti

Önceki iki arazi uygulamasında da bahsedildiği gibi Bulk modülünün hesaplamasında ise baskın parametre P dalgı hızıdır. Bu yüzden Bulk modülü kesiti karakteristik olarak sismik kırılma kesitine benzemektedir. Yüzeyde yaklaşık 2000 Mpa'dan başlayıp derinlikle beraber artan Bulk modülü kesitin en derin seviyesi olan yaklaşık 30 metre noktasında 18000 Mpa değerine ulaşmaktadır.



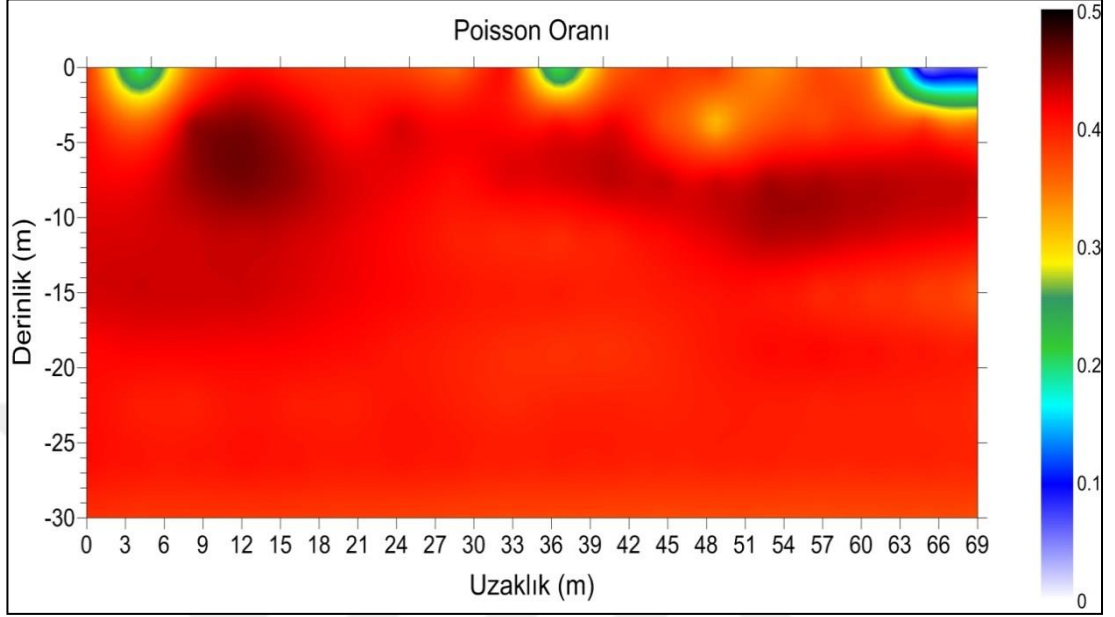
Şekil 4.25 Sismik hızlar yardımıyla hesaplanan Bulk modülü kesiti

Yoğunluk hesaplaması yakın yüzey araştırmalarında P dalga hızı ile doğrudan ilişkili olduğundan yoğunluk kesiti yine sismik kırılma kesiti ile benzerdir. Yaklaşık olarak $1,6 \text{ gr/cm}^3$ değerinden başlayan yoğunluk, derinlikle birlikte artarak $2,3 \text{ gr/cm}^3$ değerlerine ulaşmaktadır.



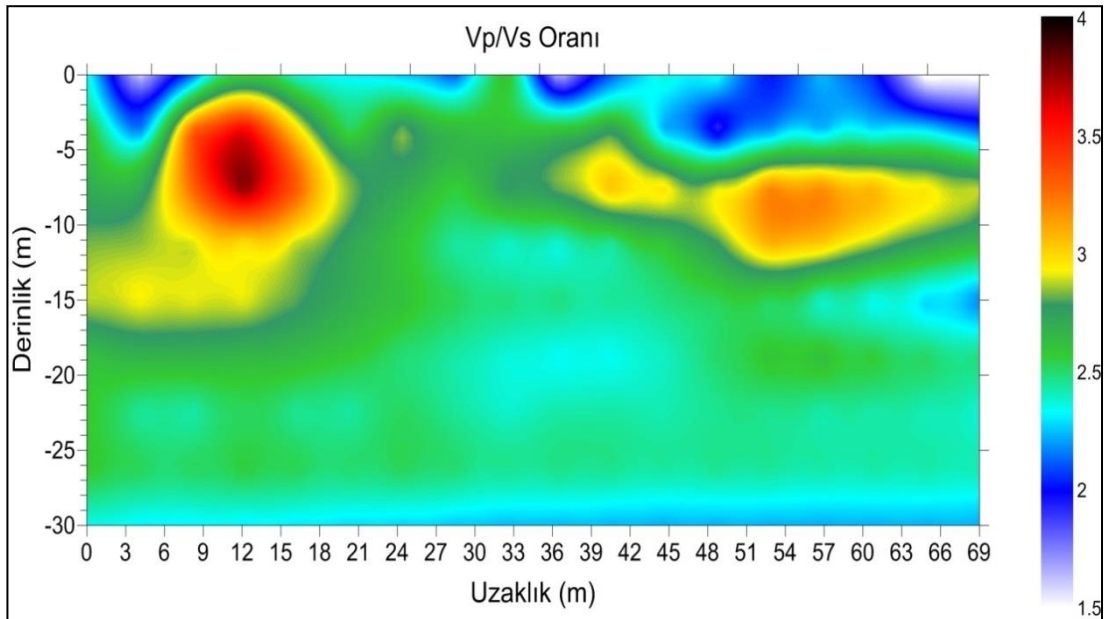
Şekil 4.26 Sismik hızlar yardımıyla hesaplanan yoğunluk kesiti

Poisson oranı kesitinde uygulama alanında yaklaşık 0,39 Poisson oranı değerinin hakim olduğu görülmektedir.



Şekil 4.27 Sismik hızlar yardımıyla hesaplanan Poisson oranı kesiti

Vp/Vs oranı yüzeyde yaklaşık 2 metre kalınlık içerisinde ortalama 2 değerine sahipken 2 metreden sonraki seviyede ortalama 2,5 değere sahiptir. Uygulama alanının S hızının yüksek olması Vp/Vs oranının düşük çıkmasında etkili olmuştur.



Şekil 4.28 Sismik hızlar yardımıyla hesaplanan Vp/Vs oranı kesiti

BÖLÜM BEŞ

SONUÇLAR

Tez çalışmasının kapsamında Türkiye'nin üç ayrı bölgesinde farklı jeolojik ortamlardaki sorunların saptanması amacıyla yapılan jeofizik çalışmalar bu alanlardaki jeoteknik özellikleri dinamik zemin davranışı anlamında saptamayı hedeflemektedir. Bu amaçla bu alanlarda yapılan sismik çalışmalarda iki boyutlu P tomografi ve MASW tomografi yöntemleri kullanılarak, bu yöntemlerden elde edilen sonuçlarla ortamların yorumlanması olanaklı olmuştur.

Tez kapsamında yapılan uygulamaların birincisinde MASW ve sismik kırılma çalışmalarının yardımıyla, uygulama alanında bulunan tünel, dolgu ve zeminle ilgili gerekli parametreler hesaplanmış ve bunlar yardımıyla ortamın jeoteknik özellikleri ortaya konulmaya çalışılmıştır. Bu uygulamanın sonuçlarında tünelin olduğu bölgede S dalga hızı değerinin önemli oranda düştüğü ve benzer hız düşüşlerinin suya doygun dolgu tabakalarında görüldüğü belirlenmiştir. Dolgunun ve tünelin altında başlayan doğal zemin daha yüksek sismik hız değerlerine sahiptir ve bu ortamın özellikle morfolojik karakteri S dalgası modelinde belirgin olarak saptanmıştır. Jeoteknik parametrelerden özellikle Poisson ve V_p/V_s oranlarında tünel ve dolgunun su içeriği yüksek bölgeleri belirgin olarak diğer bölgelerden ayrılmıştır. Ayrıca bu bölgelerin yüksek Poisson ve V_p/V_s oranına sahip olması, dolgunun gözenekliliği ve tünel boşluğunun varlığıyla uyumlu bir sonuç göstermiştir. Elastisite ve Kayma modüllerinde ise ana topoğrafya diğer birimlerden belirgin bir şekilde ayrılmaktadır. Elastisite ve Kayma modülü değerleri dolgu alanının düşük elastikliğe ve makaslama direncine sahip olduğunu göstermiştir. Sonuç olarak bu uygulama, tünel boşluğunun ve dolgu zemin ayrımının hem sismik hızlarla hem de jeoteknik parametrelerle anlamlı ve yorumlanabilir olması MASW yönteminin bu konuda başarılı sonuçlar verdiğini ortaya koymuştur.

Tez kapsamında yapılan uygulamaların ikincisinde MASW ve sismik P kırılma çalışmalarıyla yeraltı yapısı ortaya çıkarılmıştır. Bölgenin Neojen sistemi içerisinde killi birimlerden oluşması ve çevresinde heyelan oluşumlarının var olduğu bilinmesi

jeolojik açıdan yorumlandığında yeraltının düşük hız yapısına sahip olabileceğini göstermektedir. MASW ve sismik P kırılma çalışmalarında bölgenin düşük hızlı bir yeraltı yapısına sahip olduğu görülmüştür. Özellikle yüzeye yakın bölgelerde S dalga hızının çok düşük olması bölgenin yumuşak ve gevşek birimlerden oluştuğunu göstermektedir. Hesaplanan jeoteknik parametreler incelendiğinde, kesitte özellikle yüzeyden itibaren çok yüksek Poisson oranının görülmesi zeminin çok yumuşak malzemedan oluştuğunu ve sıvı içeriğinin yüksek olduğunu ortaya koymaktadır. Bu sonuç jeolojik bilgilerle karşılaştırıldığında ortamda yoğun olarak bulunan killi birimlerin bu sonuca etki ettiğini göstermektedir. Elastisite, Kayma ve Bulk modülü gibi parametreler incelendiğinde ise zeminin zayıf olduğu görülmektedir. Elastisite ve Kayma modülü değerlerinin düşük olması zeminin dinamik kuvvetler etkisi altında kalması durumunda elastiklik özelliği ve makaslama hareketine karşı direnç gösteremeyeceğini ortaya koymaktadır. Bu bölgede yapılacak olan bir yapılaşma için gerekli önlemlerin alınmasının ve zemin iyileştirme çalışmalarının mutlaka yapılmasının gereklilik olduğu ortaya çıkmıştır. Uygulamanın sonuçları, MASW yönteminin düşük sismik hızlara sahip bölgelerde başarılı bir şekilde yorumlamaya katkı sağladığı ve yöntemin iki boyutlu uygulanmasının jeoteknik hesaplamalara önemli katkılar sağlayacağını belirtmektedir.

Tez kapsamında bulunan son uygulamada ise jips karstlaşmasının olduğu bir alanda, bu birimlerin erimesi nedeniyle ortaya çıkan bir çökmenin olduğu kısımda yapılan MASW ve sismik P kırılma çalışmalarında uygulama alanının yeraltı yapısı ortaya çıkarılmıştır. Bölgede çökel-jips ayrımı sismik hızlar yardımıyla belirlenmiştir. Sismik çalışmaların modelleri incelendiğinde bölgenin genelde yüksek sismik hızlara sahip olduğu görülmektedir. Sismik sonuçlar, jeolojik bilgilerle karşılaştırıldığında jipslerin hakim olduğu bölgelerde yüksek P ve S hızları görülürken, ayrışmaya uğrayan bölgelerde hız değerleri düşmektedir. Özellikle çok ayrışmış kısımlarda ve içinde alüvyonal çökellerin bulunduğu bölgelerde sismik hız değerlerinin çok düştüğü belirlenmiştir. Sismik yöntemlerle elde edilen sonuçların jeolojik bilgilerle uyumlu olduğu görülmüştür. Hesaplanan jeoteknik parametreler incelendiğinde zeminin sismik hızların yüksek olduğu kısımlarında sıkı ve sağlam olduğu, nispeten düşük Poisson ve V_p/V_s oranları ve yüksek Elastisite, Kayma ve

Bulk modülü değerleri tespit edilmiştir. Ayrışma oranına bağlı olarak, bu değerlerde önemli değişimlerin ortaya çıktığı görülmüştür. Bu değişimler düşük Elastisite, Kayma ve Bulk modülü değerleri olarak ortaya çıkmıştır. Bölgenin ayrışmaya uğrayan bu kısımları ayrışmamış kısımlardan hem sismik yöntemlerle hem de jeoteknik parametrelerle ayırt edilmiştir. Zeminin ayrışmaya uğramış kısımlarında olan yapılaşmalar için zemin iyileştirme çalışmaları yapılmalıdır. Ayrıca drenaj yapılarak yeraltı suyunun bölgeden tahliye edilmesi sağlanmalı ve yeniden oluşabilecek ayrışmaların önüne geçilmelidir. Uygulamanın sonuçları, MASW yönteminin jips gibi ayrışma özelliği olan kaya birimlerinde de başarılı sonuçlar verdiğini ve ortamdaki ayrışmaların jeoteknik anlamda yorumlanabileceğini ortaya çıkarmıştır.

KAYNAKLAR

- Achenbach, J. D. (1984). *Wave Propagation in Elastic Solids*. Amsterdam, The Netherlands: North-Holland Publishing.
- Aki, K. & Richards, P. G. (1980). *Quantitative seismology* (2nd ed.). Sausalito, CA: W.H. Freeman & Co.
- Bullen, K. E. (1963). *An introduction to the theory of seismology* (4th ed.). Cambridge: Cambridge University Press.
- Çakır, Ş. (2000). *Demirciler-Sadıklar-Gündoğdu-Tütünçiftlik (Kocaeli) Bölgesinin Jeolojisi*. Yayınlanmamış Doktora Tezi. Kocaeli Üniversitesi, Kocaeli
- Çaylak, Ç., Göktürkler, G. & Sarı, C. (2011). Inversion of multi-channel surface wave data using a sequential hybrid approach. *Journal of Geophysics and Engineering*. 9(1), 19.
- Dobrin, M. B., Simon, R. F. & Lawrence, P. L. (1951). Rayleigh waves from small explosions. *Transactions American Geophysical Union*. 32, 822-832.
- Dorman, J. & Ewing, M. (1962). Numerical inversion of seismic surface wave dispersion data and crust-mantle structure in the New York-Pennsylvania area. *Journal of Geophysical Research*. 67, 5227-5241.
- Everett, M. E. (2013). *Near-Surface Applied Geophysics* (1st ed.). Cambridge: Cambridge University Press.
- Ewing, W. M., Jardetzky, W.S. & Press, F. (1957). *Elastic waves in layered media* (1st ed.). New York: McGraw-Hill Companies.

- Foti, S., Lai, C. G., Rix, G. J. & Strobbia, C. (2014) *Surface Wave Methods for Near-Surface Site Characterization* (1st ed.). CRC Press.
- Haskell, N. A. (1953). The dispersion of surface waves on multilayered media. *Bulletin of the Seismological Society of America*. 43(1), 17–34.
- Hayashi, K. (2003). Data Acquisition and Analysis of Active and Passive Surface Waves Short Course Notes. *Symposium on the Application of Geophysics to Environmental and Engineering Problems*. San Antonio, Texas, USA.
- Heukelom, W. & Foster, C. R. (1960). Dynamic testing of pavements. *Journal of Soil Mechanics and Foundations Division*. 86, 1–28.
- Ismail, A., Denny, F. B. & Metwaly, M. (2014). Comparing continuous profiles from MASW and shear-wave reflection seismic methods. *Journal of Applied Geophysics*. 105, 67-77.
- Kurtuluş, C. (2002). *Sismik Arama* (1.Baskı). Kocaeli: Kocaeli Üniversitesi Yayınları
- Levenberg, K. (1944). A method for the solution of certain non-linear problems in least squares. *Quarterly of applied mathematics*. 2(2), 164-168.
- Lin, C. P., Chang, C. C. & Chang, T. S. (2004). The use of MASW method in the assessment of soil liquefaction potential. *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*. 24, 689-698.
- Mari, J. L. (1984). Estimation of static correction for shear-wave profiling using the dispersion properties of Love waves. *Geophysics*. 49, 1169-1179.
- Marquardt, D. W. (1963). An algorithm for least-squares estimation of nonlinear parameters. *Journal of the society for Industrial and Applied Mathematics*. 11(2), 431-441.

- Miller, G. F. & Pursey, H. (1955). On the partition of energy between elastic waves in a semi-infinite solid. *The Royal Society*. 233, 55-69.
- Miller, R. D., Xia, J., Park, C. B., & Ivanov, J. M. (1999). Multichannel analysis of surface waves to map bedrock. *The Leading Edge*, 18(12), 1392-1396.
- Park, C. B., Miller, R. D. & Miura, H. (2002). Optimum field parameters of an MASW survey. *Society of Exploration Geophysicists of Japan Conference*. Tokyo, Japan.
- Park, C. B., Miller, R. D., & Xia, J. (1998). Imaging dispersion curves of surface waves on multi-channel record. *SEG Technical Program Expanded Abstracts 1998*. 1377-1380.
- Park, C. B., Miller, R. D. & Xia, J. (1999). Multichannel analysis of surface waves. *Geophysics*, 64(3), 800-808.
- Park, C. B., Miller, R. D., Xia, J. & Ivanov, J. (2007). Multichannel analysis of surface waves (MASW) - active and passive methods. *The Leading Edge*, 26(1), 60-64.
- Penumadu, D. & Park, C. B. (2005). Multichannel Analysis of Surface Wave (MASW) Method for Geotechnical Site Characterization. *Earthquake Engineering and Soil Dynamics*. Geo-Frontiers Congress. 1 – 10.
- Poormirzaee, R. & Moghadam, R. H. (2014). Using Particle Swarm Optimization Method to Invert Active Surface Waves. *In International Conference on Swarm Intelligence Based Optimization*. 26-34.
- Rayleigh, J. W. S. (1885). On waves propagated along the plane surface of an elastic solid. *Proceeding of the London Mathematical Society*. 17, 4–11.
- Richart, F. E., Hall, J. R., & Woods, R. D. (1970). *Vibrations of Soils and Foundations* (1st ed.). Englewood Cliffs, NJ: Prentice-Hall Inc.

- Sayar, C. (1989). İstanbul ve Çevresi Neojen Çökelleri ve Paratetis İçindeki Konumu. *Maden Fakültesi 40.Yıl Bülteni*. 250-266.
- Schwab, F. A., Knopoff, L., & Bolt, B. A. (1972). Fast surface wave and free mode computations. *Methods in computational physics*. 11, 87-180.
- Stokoe, K. H., Wright, G. W., James, A. B. & Jose, M. R. (1994). *Characterization of geotechnical sites by SASW method, in Geophysical characterization of sites*. ISSMFE Technical Committee #10, edited by R. D. Woods. New Delhi: Oxford Publishers.
- Telford, W. M., Geldart, L. P. & Sheriff, R. E. (1990). *Applied Geophysics* (1st ed.). New York: Cambridge University Press.
- Terra Australis Geophysica Pty Ltd. (b.t). 08 Şubat 2017, <http://www.terra-au.com/LandStreamer.asp>
- Thomson, W. T. (1950). Transmission of elastic waves through a stratified solid medium. *Journal of Applied Physics*. 21, 89-93.
- Vardoulakis, I. & Vrettos, C. (1988). Dispersion law of Rayleigh-type waves in a compressible Gibson half space. *International Journal Numerical and Analytical Methods in Geomechanics*. 12, 639-655.
- Xia, J., Miller, R. D. & Park, C. B. (1999). Estimation of near-surface shear-wave velocity by inversion of Rayleigh waves. *Geophysics*. 64(3), 691-700.
- Yeşilova, Ç. & Helvacı, C. (2011). Batman-Siirt kuzeyi stratigrafisi ve sedimentolojisi, Türkiye. *Türkiye Petrol Jeologları Derneği Bülteni*. 23(2), 7-49.