

**ANKARA ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

YÜKSEK LİSANS TEZİ

**SİSMİK GENLİK ANALİZİ VE KAYAÇ ELASTİK PARAMETRELERİNİN
KULLANIMI İLE HAZNE KAYAÇ İÇERİSİNDEKİ AKIŞKAN TÜRÜNÜN
BELİRLENMESİ**

Engin SANDIKCI

JEOFİZİK MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI

ANKARA

2015

Her hakkı saklıdır

TEZ ONAYI

Engin SANDIKCI tarafından hazırlanan "**Sismik Genlik Analizi ve Kayaç Elastik Parametrelerinin Kullanımı ile Hazne Kayaç İçerisindeki Akışkan Türünün Belirlenmesi**" adlı tez çalışması aşağıdaki jüri tarafından oy birliği ile Ankara Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Jeofizik Mühendisliği Anabilim Dalı'nda **YÜKSEK LİSANS TEZİ** olarak kabul edilmiştir.

Danışman: Prof. Dr. Selma KADIOĞLU

Jüri Üyeleri:

Başkan: Prof. DR. Hülya KURT
İstanbul Teknik Üniversitesi, Jeofizik Mühendisliği



Üye: Prof. Dr. Emin CANDANSAYAR
Ankara Üniversitesi, Jeofizik Mühendisliği



Üye: Prof. Dr. Selma KADIOĞLU
Ankara Üniversitesi, Jeofizik Mühendisliği



Yukarıdaki sonucu onaylarım.

Prof. Dr. İbrahim DEMİR

Enstitü Müdürü

ETİK

Ankara Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü tez yazım kurallarına uygun olarak hazırladığım bu tez içindeki bütün bilgilerin doğru ve tam olduğunu, bilgilerin üretilmesi aşamasında bilimsel etiğe uygun davrandığımı, yararlandığım bütün kaynakları atıf yaparak belirttiğimi beyan ederim.

29.06.2015

E. Sandıkci

Engin SANDIKCI

ÖZET

Yüksek Lisans Tezi

SİSMİK GENLİK ANALİZİ VE KAYAÇ ELASTİK PARAMETRELERİNİN KULLANIMI İLE HAZNE KAYAÇ İÇERİSİNDEKİ AKIŞKAN TÜRÜNÜN BELİRLENMESİ

Engin SANDIKCI

Ankara Üniversitesi
Fen Bilimleri Enstitüsü
Jeofizik Mühendisliği Anabilim Dalı

Danışman: Prof. Dr. Selma KADIOĞLU

Açılıma bağlı genlik değişimi (Amplitude Variation with Offset, AVO) hazne kayaç ve içeriğindeki akışkanın belirlenmesinde öncelikli bir araçtır. Bununla birlikte AVO'nun yorumdaki başarısı haznenin akışkan türü, kayaç özellikleri ve bulunduğu ortam ile sınırlanmaktadır. AVO'nun haznedeki gaz ve tuzlu suyu birbirinden ayırt etmedeki başarısı kanıtlanmıştır. Genellikle fız olarak bilinen hazne kayaçtaki %25'ten az düşük hidrokarbon doygunluğu hidrokarbon araştırmalarında olağan hata olarak kabul edilmektedir. Bu sorunun altında yatan neden, az miktardaki gazın genellikle hazne kayaç içindeki sıkışma dalgasının hızını yavaşlatması, bununla birlikte artan gaz doygunluğunun sıkışma dalgası hızını belirgin biçimde değiştirmemesidir. Bu nedenle fız ve ekonomik açıdan değerli doymuş gazın AVO bilgisi neredeyse aynıdır ve birbirinden ayırt edilememektedir.

Tez çalışmasının amacı, hazne kayaçtaki düşük gaz yoğunluğunun sismik genliklerin yorumuna getirdiği sınırlamaların çözümüne yönelik; kayaç elastik parametrelerinin ve sismik genlik bilgisinin kullanılabilirliğini göstermektir. Ayrıca bu sorunun çözümünde sismik niteleyicilerin kullanımına farklı bir açıdan yaklaşım sunmaktır. Buna göre ilk aşamada, AVO eşitliklerinin, boşluktaki akışkan için en etkin sismik niteleyicilerin (Poisson Empedansı, Lambda-Rho, Akışkan Faktörü), boşluk akışkanının kayaç elastik parametrelere etkisinin ve boşluktaki akışkan için yeni geliştirilmiş bir sismik niteleyicinin kuramsal temeli tanıtılmış ve deneysel çalışmalarla elde edilen sonuçlar incelenmiştir. İkinci aşamada ise, birinci aşamanın sonuçlarını kullanarak, Meksika Körfezi ve Kuzey Denizi'ne ait veri grubu için fız, gaz, tuzlu su ve petrolün ayrımlılığını araştırılmıştır. Sonuç olarak, elde edilen bulgular ile sismik genlik bilgisinin boşluktaki akışkan türünün belirlenmesinde kullanılabilir olduğu ve sismik niteleyicilerin bu amaç doğrultusunda kullanılması gerekliliği ortaya koyulmuştur. Ayrıca elverişli yaklaşımlar altında ekonomik gaz doygunluğundan fızın ayırt edilebilirliği de gösterilmiştir.

Haziran 2015, 127 sayfa

Anahtar Kelimeler: Açılıma bağlı genlik değişimi, hazne kayaç, hidrokarbon, akışkan türü, elastik parametre, sismik niteleyici

ABSTRACT

Master Thesis

DISCRIMINATION OF FLUID TYPE IN RESERVOIR ROCK BY USING SEISMIC AMPLITUDE ANALYSIS AND ROCK ELASTIC PARAMETERS

Engin SANDIKCI

Ankara University
Graduate School of Natural and Applied Sciences
Department of Geophysical Engineering

Supervisor: Prof. Dr. Selma KADIOĞLU

Amplitude variation with offset (AVO) is a primary tool for predicting a reservoir's rock type and pore fluid content. However the interpretation success of AVO is limited by the reservoir's pore fluid content, rock properties and its surrounding media. It has been proved that AVO can successfully be used to discriminate gas and brine in the reservoir. The low hydrocarbon saturation less than 25% in the reservoir rocks often called fizz have been recognized as a common failure in hydrocarbon exploration. The reason behind of this problem is that a small amount of gas usually decreases the reservoir's compressional wave velocity, in other respects the compressional wave velocity doesn't change with increasing gas saturation significantly. Therefore, AVO responses of fizz and economic gas saturations are nearly same and often indistinguishable.

The aim of the thesis is to demonstrate that seismic attributes and rock elastic parameters can be used to bring a solution to the limitation of seismic amplitude interpretation caused by low gas saturation. Also, to present a different approach for usage of seismic attributes on this problem. For this purpose, a series of theoretical basis of AVO equations, most powerful pore-fluid seismic attributes (Poisson Impedance, Lambda-Rho, Fluid Factor), the effect of pore fluid content on rock elastic parameters and a new developed pore-fluid seismic attribute are introduced at the first stage and examined by empirical studies. At the second stage, discrimination of fizz, gas, brine and oil is researched on the dataset from Gulf of Mexico and North Sea by using the results of first stage. As a result, with the findings obtained, it is presented that the seismic amplitude can be used to discriminate pore-fluid type and it is necessary to use seismic attributes in accordance with this purpose. Besides, fizz can be discriminated from economic gas saturations when favorable assumptions are exist.

June 2015, 127 pages

Key Words: Amplitude variation with offset, reservoir rock, hydrocarbon, fluid type, elastic parameter, seismic attribute

TEŞEKKÜR

Bu tez çalışmasının her aşamasında fikir ve eleştirileriyle beni yönlendiren, gerek bilgi gerekse tecrübelerinden her zaman yararlandığım danışman hocam Sayın Prof. Dr. Selma KADIOĞLU'na teşekkürlerimi sunarım.

Yapıcı eleştiri ve görüşleriyle tezin gelişimine katkı sağlayan, tez konusu üzerine yaptığımız tartışmalarda tecrübe ve kuramsal birikimlerini esirgemeyen Sayın Jeofizik Yük. Müh. Zafer ÖZER'e (Türkiye Petrolleri Anonim Ortaklığı) ayrıca teşekkür ederim.

Tez kapsamında kullanılan Meksika Körfezi kuyu verilerinin kullanımve yayın iznini veren, ayrıca çalışmalarımı hoşgörüyüyle destekleyen Sayın Prof. Dr. Fred HILTERMAN'a (Houston Üniversitesi) özellikle teşekkürlerimi sunarım.

Son olarak, bana sundukları manevi destek için aileme içtenlikle teşekkür ederim.

Engin SANDIKCI

Ankara, Haziran 2015

İÇİNDEKİLER

TEZ ONAY SAYFASI

ETİK.....	i
ÖZET.....	ii
ABSTRACT.....	iii
TEŞEKKÜR	iv
SİMGELER DİZİNİ	vii
ŞEKİLLER DİZİNİ	viii
ÇİZELGELER DİZİNİ	xii
1. GİRİŞ	1
2. ZOEPPRITZ EŞİTLİKLERİ	5
2.1 AVO - AVA.....	7
2.2 Normal Varış Yansıma Katsayısının Akışkan Kestirimindeki Önemi	9
2.3 Düşey Ayrımlılık ve Sismik Dalganın Frekans Bantı	10
3. AKIŞKAN KESTİRİMİNDE SİSMİK GENLİK BİLGİSİ.....	13
4. BOŞLUKLU ELASTİK HAZNE KAYAÇTAKİ AKIŞKANIN KESTİRİMİ ...	21
4.1 Boşluklu Elastik Kayaç İçin Gassmann Eşitliği	21
4.2 LMR ($\lambda\rho - \mu\rho$) Yöntemi.....	26
4.3 Poisson Empedansı (PI)	28
4.4 Lambda – Poisson Empedansı (λPI).....	29
5. DENEYSEL VERİ GRUBU ÇALIŞMALARI.....	31
5.1 Castagna (1994) Veri Grubu Deneysel Çalışması	31
5.2 Akışkana Doygun Boşluklu Hazne Kayaç İçin Gassmann Kuramının Pratikte Kullanımı	43
5.2.1 Model Çalışması	46
5.3 Meksika Körfezi Kuyu Verileri	51
6. SAHA ÇALIŞMASI: KUZEY VİKİNG GRABENİ, KUZEY DENİZİ	68
6.1 Giriş	68
6.2 Kuzey Viking Grabeni Bölgesel Jeolojisi	68
6.3 Sismik Veri.....	70
6.4 Kuyu Logu Verileri	72

7. SONUÇLAR	99
KAYNAKLAR	101
EKLER.....	106
EK 1 ZOEPPRITZ EŞİTLİKLERİNE YAPILAN DOĞRUSAL	
 YAKLAŞIMLAR	107
EK 2 TABAKALI MODEL İÇİN ZOEPPRITZ HESABI	116
EK 3 HAN (1986) VERİ GRUBU DENEYSEL ÇALIŞMASI.....	121
ÖZGEÇMİŞ.....	127

SİMGELER DİZİNİ

AVO	Açılıma bağlı genlik değişimi
AVA	Açıya bağlı genlik değişimi
CDP	Ortak derinlik noktası (Common depth point)
CMP	Ortak orta nokta (Common mid point)
f	Frekans (Hz)
K	Bulk sabiti (MPa)
LMR	Lambda Rho – Mu Rho
2B	İki Boyutlu
NI	Normal varış yansıma katsayısı
PR	Poisson yansıma katsayısı
P	Sıkışma dalgası
S	Kesme dalgası
SV	Kesme dalgası düşey bileşeni
V_P	Sıkışma dalgası hızı
V_S	Kesme dalgası hızı
ρ	Yoğunluk
R_p	Sıkışma dalgası yansıma katsayısı
R_s	Kesme dalgası yansıma katsayısı
T_p	Sıkışma dalgası iletim katsayısı
T_s	Kesme dalgası iletim katsayısı
α	Sıkışma dalgası hızı
β	Kesme dalgası hızı
v	Sismik hız
v_{ARA}	Ara hız
v_{RMS}	RMS hız
I_p	Sıkışma dalgası sismik empedansı
I_s	Kesme dalgası sismik empedansı

ŞEKİLLER DİZİNİ

Şekil 2.1 Farklı hız ve yoğunluklara sahip iki ortama ait yatay sınır ara yüzeydeki yansıyan ve iletilen PP - ve SV - dalgaları	5
Şekil 2.2 Farklı hızlara sahip iki homojen elastik ortamı ayıran sınır ara yüzeydeki yansıyan ışın geometrisi	7
Şekil 2.3 Derinlikle dalğanın hızı, frekansı ve dalga boyunun göreceli değişimi (Brown 2011'den değiştirilerek alınmıştır).....	10
Şekil 3.1 Çizelge 3.1'de verilen A model parametreleri için hesaplanan $R_{\rho\rho}$, yansıma katsayılarının sınır ara yüzeye varış açılarına göre değişimi. Siyah eğri şeylin örtü katmanı olarak kabul edildiği, kırmızı eğri ise gazlı kum katmanının temel kayaç olarak kabul edilen şeyl katmanı üzerinde olduğu durum için elde edilmiştir.	15
Şekil 3.2 Çizelge 3.1'de verilen A model parametreleri için hesaplanan $R_{\rho\rho}$, yansıma katsayıları kullanılarak üç ayrı katmandan oluşan model için elde edilmiş AVA kesiti	15
Şekil 3.3 Çizelge 3.1'de verilen A model parametreleri için hesaplanan $R_{\rho\delta}$, yansıma katsayılarının sınır ara yüzeye varış açılarına göre değişimi. Siyah eğri şeylin örtü katmanı olarak kabul edildiği, kırmızı eğri ise gazlı kum katmanının temel kayaç olarak kabul edilen şeyl katmanı üzerinde olduğu durum için elde edilmiştir	16
Şekil 3.4 Çizelge 3.4'de verilen A model parametreleri için hesaplanan $R_{\rho\delta}$, yansıma katsayıları kullanılarak üç ayrı katmandan oluşan model için elde edilmiş AVA kesiti	16
Şekil 3.5 Çizelge 3.1'de verilen B model parametreleri için hesaplanan $R_{\rho\rho}$, yansıma katsayılarının sınır ara yüzeye varış açılarına göre değişimi. Siyah eğri şeylin örtü katmanı olarak kabul edildiği, kırmızı eğri gazlı kum katmanının tuzlu sulu kum tabakası üzerine katmanlandığı, mavi eğri ise temel kayaç olarak kabul edilen şeyl katmanı üzerinde tuzlu sulu kum katmanının olduğu durum için elde edilmiştir	17
Şekil 3.6 Çizelge 3.1'de verilen B model parametreleri için hesaplanan $R_{\rho\rho}$, yansıma katsayıları kullanılarak dört jeolojik katmandan oluşan model için elde edilmiş AVA kesiti.	17
Şekil 3.7 Çizelge 3.1'de verilen B model parametreleri için hesaplanan $R_{\rho\delta}$, yansıma katsayılarının sınır ara yüzeye varış açılarına göre değişimi. Siyah eğri şeylin örtü katmanı olarak kabul edildiği, kırmızı eğri gazlı kum katmanının tuzlu sulu kum tabakası üzerine katmanlandığı, mavi eğri ise temel kayaç olarak kabul edilen şeyl katmanı üzerinde tuzlu sulu kum katmanının olduğu durum için elde edilmiştir.	18
Şekil 3.8 Çizelge 3.1'de verilen B model parametreleri için hesaplanan $R_{\rho\delta}$, yansıma katsayıları kullanılarak dört jeolojik katmandan oluşan model için elde edilmiş AVA kesiti	18
Şekil 3.9 Çizelge 3.1'de verilen C model parametreleri için hesaplanan $R_{\rho\rho}$, yansıma katsayılarının sınır ara yüzeye varış açılarına göre değişimi. Siyah eğri şeylin tuzlu sulu kum katmanı üzerinde örtü katmanı olarak kabul edildiği, kırmızı eğri is tuzlu sulu kum tabakasının şeyl üzerine katmanlandığı durum için elde edilmiştir.	19

Şekil 3.10 Çizelge 3.1’de verilen C model parametreleri için hesaplanan $R_{\rho\beta}$, yansıma katsayıları kullanılarak üç ayrı jeolojik katmanlı model için elde edilmiş AVA kesiti	19
Şekil 3.11 Çizelge 3.1’de verilen C model parametreleri için hesaplanan $R_{\rho\delta}$, yansıma katsayılarının sınır ara yüzeye varış açılarına göre değişimi. Siyah eğri şeylin tuzlu sulu kum katmanı üzerinde örtü katmanı olarak kabul edildiği, kırmızı eğri is tuzlu sulu kum tabakasının şeyl üzerine katmanlandığı durum için elde edilmiştir	20
Şekil 3.12 Çizelge 3.1’de verilen C model parametreleri için hesaplanan $R_{\rho\delta}$, yansıma katsayıları kullanılarak üç ayrı jeolojik katmanlı model için elde edilmiş AVA kesiti	20
Şekil 4.1 Çizelge 4.2’de verilen iki katmanlı basit jeolojik modeli için hesaplanan $R_{\rho\beta}$, yansıma katsayıları kullanılarak hedef katman için elde edilmiş AVO kesiti	27
Şekil 4.2 Şeyl (shale), tuzlu su (brine), petrolü kum (oil sand) için sismik empedanslar ile PI arasındaki şematik ilişki (Quackenbush vd. 2006)	28
Şekil 5.1 Castagna (1994)’nın 25 adet veri grubu. Tuzluluk içeren sulu kumtaşı, şeyl ve gazlı kum, sırasıyla, yeşil, mavi ve macenta renkleriyle gösterilmektedir.....	32
Şekil 5.2 Veri grubununun $I_p - I_s$ ($(m/s)(gr/cm^3)$) değişim grafiği	33
Şekil 5.3 Veri grubununun $K - V_s$ değişim grafiği	33
Şekil 5.4 Veri grubununun $K - V_p/V_s$ değişim grafiği	34
Şekil 5.5 Veri grubununun $\lambda\rho - \mu\rho$ ($(GPa)(gr/cm^3)$) değişim grafiği	35
Şekil 5.6 Veri grubunun, hazne kayacın tuzlu su içerdiği, gaz içerdiği, şeyl olması durumundaki $I_p - I_s$ grafikleri	36
Şekil 5.7 Veri grubununun $PI - I_s$ değişim grafiği	37
Şekil 5.8 Veri grubununun $PI - K$ değişim grafiği	37
Şekil 5.9 Veri grubununun $PI - \mu\rho$ değişim grafiği.....	38
Şekil 5.10 Veri grubununun $PI - \lambda\rho$ değişim grafiği.....	38
Şekil 5.11 Veri grubununun $\lambda PI - I_p$ değişimi	39
Şekil 5.12 Veri grubununun $\lambda PI - I_s$ değişimi	39
Şekil 5.13 Veri grubununun $\lambda PI - K$ değişimi	40
Şekil 5.14 Veri grubununun $\lambda PI - PI$ değişimi	40
Şekil 5.15 Jeolojik modelinifarklı akışkan türlerine göre verdiği AVA genlik değişimleri. Genlik değişimleri dört farklı akışkan olan tuzlu su (a), petrol (b), gaz (c), fizz (d) için 50 derecelik varış açısına kadar hesaplanmıştır	47
Şekil 5.16 Jeolojik modelin farklı akışkan türlerine için hesaplanmış yansıma katsayısı serilerinin evrişiminde kullanılan Ormsby kaynak dalgacığı	48
Şekil 5.17 Hazne kayaçtaki dört farklı akışkan için sınır ara yüzeydeki varış açısına göre modellenen genlik değişimleri.....	49
Şekil 5.18 Hazne kayacın dört farklı hidrokarbon doygunluğu için sınır ara yüzeydeki varış açısına göre modellenen genlik değişimleri.....	50
Şekil 5.19 Veri grubunun V_p ve V_s değerlerinin değişimi.....	51
Şekil 5.20 Veri grubunun derinliğe göre V_s değişimi	52
Şekil 5.21 Veri grubunun derinliğe göre V_p değişimi	52

Şekil 5.22 Veri grubunun derinliğe göre ρ değişimi.....	53
Şekil 5.23 Veri grubunun derinliğe göre σ oranı değişimi	53
Şekil 5.24 Veri grubunun sismik empedanslarının birbirine göre değişimi	54
Şekil 5.25 Veri grubunun $V_S - K$ değişimi	55
Şekil 5.26 Veri grubunun $V_P/V_S - K$ değişimi	55
Şekil 5.27 Veri grubunun $\lambda\rho - \mu\rho$ grafiği.....	56
Şekil 5.28 Veri grubunun $I_S - PI$ değişimi	58
Şekil 5.29 Veri grubunun $K - PI$ değişimi	58
Şekil 5.30 Veri grubunun $\mu\rho - PI$ değişimi.....	59
Şekil 5.31 Veri grubunun $\lambda\rho - PI$ değişimi	59
Şekil 5.32 Veri grubunun $\lambda PI - I_S$ değişimi	60
Şekil 5.33 Veri grubunun $\lambda PI - I_S$ değişimi	61
Şekil 5.34 Veri grubunun normal varış yansıma katsayıları değişimi	62
Şekil 5.35 Veri grubunun $NI_P - NI_S$ değişimi	63
Şekil 5.36 Veri grubunun $\Delta F - NI_S$ değişimi.....	65
Şekil 6.1 Kuzey Denizi yapısal açılma rejimleri ve Viking Grabeni (Ryseth, 2001'den değiştirilerek alınmıştır)	69
Şekil 6.2 Şekil 6.1'de verilen Viking Grabeni'ni doğrusal kesen AB kesitinin jeolojik kesiti (Christiansson vd. 2000'den değiştirilerek alınmıştır).....	70
Şekil 6.3 Kaynaktan çıkan enerjinin kaynağın 250 m altındaki uzak alan kaydı	71
Şekil 6.4 Veri grubunun işlenmesiyle elde edilen sismik kesit (0 – 3000 ms). Yatay eksen CDP (ortak derinlik noktası), düşey eksen zaman (ms)	72
Şekil 6.5 Sismik hat üzerindeki kuyu konumları (0-3200 ms).....	73
Şekil 6.6 Sismik hat üzerindeki kuyu konumları (1400-2200 ms).....	73
Şekil 6.7 A kuyusunun V_P , V_S ve ρ değerlerini 1000 – 3100 m için derinliğe göre değişimi.....	74
Şekil 6.8 A kuyusunun jeolojik birimlerdeki boşluklarda birikmiş akışkanların derinlikle yüzdellik değişimi	75
Şekil 6.9 A kuyusu için kaydedilmiş petrofiziksel veri grubunun derinlikle değişimi	76
Şekil 6.10 A kuyusu için gazlı birimlerin V_P , V_S , ρ ve σ oranı değerlerinin derinlikle değişimi (1986 – 1998 m için).....	77
Şekil 6.11 A kuyusu için gazlı birimlerin V_P , V_S , ρ ve σ oranı değerlerinin derinlikle değişimi (2630 – 2675 m için).....	77
Şekil 6.12 A kuyusu için V_P , V_S değerlerinin derinlikle değişimi	78
Şekil 6.13 A kuyusu için V_P , V_S oranının K ile değişimi	78
Şekil 6.14 A kuyusu için V_P , V_S oranının K ile değişiminin σ oranı dağılımı	79
Şekil 6.15 A kuyusu için V_P , V_S oranının K ile değişiminin σ oranı dağılımı. Gazlı hazne birimlerin değerleri macenta rengeyle verilmektedir.....	80
Şekil 6.16 A kuyusu için V_P , V_S oranının K ile değişiminin σ oranı dağılımı. Petrollü hazne birimlerin değerleri macenta rengeyle verilmektedir.....	80
Şekil 6.17 A kuyusu için $\lambda\rho - \mu\rho$ değişiminin derinlikle dağılımı.....	81
Şekil 6.18 A kuyusu için $\lambda\rho - \mu\rho$ değişiminin derinlikle dağılımı. Gazlı hazne birimlerin değerleri macenta rengeyle verilmektedir.....	81
Şekil 6.19 A kuyusu için $\lambda\rho - \mu\rho$ değişiminin derinlikle dağılımı. Petrollü hazne birimlerin değerleri macenta rengeyle verilmektedir.....	82
Şekil 6.20 A kuyusu için $PI - I_S$ değişiminin derinlikle dağılımı.....	83

Şekil 6.21 A kuyusu için $PI - I_S$ değişiminin derinlikle dağılımı. Gazlı hazne birimlerin değerleri macenta rengeyle verilmektedir.....	83
Şekil 6.22 A kuyusu için $PI - I_S$ değişiminin derinlikle dağılımı. Petrollü hazne birimlerin değerleri macenta rengeyle verilmektedir.....	84
Şekil 6.23 A kuyusu için λPI değerlerinin I_S ile değişiminin derinlikle dağılımı	84
Şekil 6.24 A kuyusu için λPI değerlerinin I_S ile değişiminin derinlikle dağılımı. Gazlı hazne birimlerin değerleri macenta rengeyle verilmektedir	85
Şekil 6.25 A kuyusu için λPI değerlerinin I_S ile değişiminin derinlikle dağılımı. Petrollü hazne birimlerin değerleri macenta rengeyle verilmektedir	85
Şekil 6.26 A kuyusu için λPI değerlerinin K ile değişiminin derinlikle dağılımı	86
Şekil 6.27 A kuyusu için λPI değerlerinin K ile değişiminin derinlikle dağılımı. Gazlı hazne birimlerin değerleri macenta rengeyle verilmektedir.....	86
Şekil 6.28 A kuyusu için λPI değerlerinin K ile değişiminin derinlikle dağılımı. Petrollü hazne birimlerin değerleri macenta rengeyle verilmektedir.....	87
Şekil 6.29 B kuyusunun V_P , V_S ve ρ değerlerini 3100 – 3800 m için derinliğe göre değişimi	88
Şekil 6.30 B kuyusunun jeolojik birimlerdeki boşluklarda birikmiş akışkanların derinlikle yüzdelik değişimi	89
Şekil 6.31 B kuyusu için kaydedilmiş petrofiziksel veri grubunun derinlikle değişimi	90
Şekil 6.32 B kuyusu için gazlı birimlerin V_P , V_S , ρ ve σ oranı değerlerinin derinlikle değişimi (3200 – 3210 m için).....	91
Şekil 6.33 B kuyusu için V_P , V_S değerlerinin 3200 – 3700 m için değişimi	91
Şekil 6.34 B kuyusu için V_P , V_S oranının K ile 3200 – 3700 m için değişiminin derinlikle dağılımı	92
Şekil 6.35 B kuyusu için V_P , V_S oranının K ile 3200 – 3700 m için değişiminin σ oranı dağılımı	92
Şekil 6.36 B kuyusu için V_P , V_S oranının K ile değişimi. Gazlı hazne birimlerin değerleri macenta rengeyle verilmektedir.....	93
Şekil 6.37 B kuyusu için $\lambda \rho - \mu \rho$ değişiminin derinlikle dağılımı.	93
Şekil 6.38 B kuyusu için $\lambda \rho - \mu \rho$ değişiminin derinlikle dağılımı. Gazlı hazne birimlerin değerleri macenta rengeyle verilmektedir	94
Şekil 6.39 B kuyusu için $PI - I_S$ değişiminin derinlikle dağılımı	94
Şekil 6.40 B kuyusu için $PI - I_S$ değişiminin derinlikle dağılımı. Gazlı hazne birimlerin değerleri macenta rengeyle verilmektedir	95
Şekil 6.41 B kuyusu için λPI değerlerinin I_S ile değişiminin derinlikle dağılımı	95
Şekil 6.42 B kuyusu için λPI değerlerinin I_S ile değişiminin derinlikle dağılımı. Gazlı hazne birimlerin değerleri macenta rengeyle verilmektedir.....	96
Şekil 6.43 B kuyusu için λPI değerlerinin K ile değişiminin derinlikle dağılımı	96
Şekil 6.44 B kuyusu için λPI değerlerinin K ile değişiminin derinlikle dağılımı. Gazlı hazne birimlerin değerleri macenta rengeyle verilmektedir.....	97

ÇİZELGELER DİZİNİ

Çizelge 1.1 Düşey çözünürlükte dalga-boyu eşiği (Yılmaz 2001)	11
Çizelge 3.1 Üç farklı jeolojik modelin yoğunluk ve hız parametreleri (Castagna ve Backus 1993).....	14
Çizelge 4.1 Kil ve kuartz minerallerinin elastik dalga hızları ve sabitleri (Mavko vd. 2009).....	25
Çizelge 4.2 Goodway(1997)'nin iki katmanlı basit jeolojik modeli.....	27
Çizelge 5.1 Dört jeolojik birim için eşitlik (5.7)'de verilen bağıntının katsayı değerleri Greenberg ve Castagna (1992).....	45
Çizelge 5.2 Gassmann kuramı ile farklı akışkan türleri için elastik sabitlerin hesabında kullanılacak başlangıç parametreleri	45
Çizelge 5.3 A modeli için başlangıç parametreleri	46
Çizelge 5.4 A modeli için dört farklı akışkan için hazne kayac ve örtü katman sıkışma dalgası hız ve yoğunluk değerleri	46
Çizelge 6.1 Veri işlem akış şeması	71

1. GİRİŞ

Ostrander'in (1982) gaz içeren kum tabakalarına ait yansıma katsayılarının, açılımın artışı ile değişiminin nasıl doğrudan hidrokarbon belirteci olarak kullanılabileceğini göstermesiyle birlikte açılıma bağlı genlik değişimi (Amplitude Variation with Offset, AVO) analizi bir yöntem olarak tanınmaya başladı.

Zoeppritz eşitliklerinin, farklı hız ve yoğunluklara sahip yön bağımsız iki elastik ortamı ayıran sınır ara yüzeye çarpan düzlem dalganın enerji dağılımını, geliş açısı ve ortamların elastik sabitlerinin bir fonksiyonu biçiminde kesin olarak ortaya koyduğu bilinmekteydi. Ancak doğrusal olmayan bu eşitlikler hem karmaşık yapıdaydı hem de farklı kayaç özelliklerinde genliklerin nasıl değiştiğini doğrudan ortaya koymaya olanak tanımamaktaydı. Sorunun çözümü için eşitliklere, belirli sınırlamalar ve elastik parametrelerde çok küçük de olsa ihmallerle, doğrusal formdaki yaklaşımlar geliştirilmiştir (Aki ve Richard 1980, Wiggins vd. 1983, Shuey 1985, Smith ve Gidlow 1987, Fatti vd. 1994, Verm ve Hilterman 1995).

AVO'nun hidrokarbon kestiriminde faydalı olabileceği birçok araştırmacı tarafından gösterilmiştir (Ostrander 1984, Rutherford ve Williams 1989, Castagna ve Backus 1993, Fatti vd. 1994). Öte yandan AVO'nun boşluklu elastik ortamdaki hidrokarbon ve tuzlu suyu birbirinden ayırt etmedeki başarısı kanıtlanmıştır (Castagna vd. 1993). Ancak, boşluklarındaki akışkanda, farklı doygunluk oranında hidrokarbon bulunan kayaçların AVO analizleri birbirine çok benzer niteliktedir (Hilterman 2003).

Elastik dalga, yer içerisindeki yayılım doğrultusu boyunca etki ettiği kayacı sıkışma ve genişleme kuvvetleri altında bırakır. Eğer kayaç, boşluklu ve akışkana doygun ise elastik dalganın etkisi altındaki kayaç parçacıkları kayacın bulk sabitine ve boşluklarını dolduran akışkanın elastik özelliklerine bağlı olarak deformasyona maruz kalacaktır. Kayacın değişen fiziksel yapısının elastik dalga üzerinde bıraktığı anlamlı bilgi boşluktaki akışkanın modellenmesiyle elde edilebilmektedir (Biot 1941, Gassmann 1951).

Kayaçta meydana gelen kuvvetlerin belirli sınırlar içerisindeki ilişkisi Hook Yasası ile tanımlanır ve buna göre gerilme ile yamulma arasında doğrusal bir ilişki bulunmaktadır. Lamé, Hook Yasası'nın kayaç fiziği dahil modernize halini λ (sıkışmazlık) ve μ (sertlik) olmak üzere iki sabite ile tanımladı. Goodway (1997), Lamé sabitlerinin (λ , μ) kayaç içerisindeki akışkan hakkında anlamlı bilgi içerdiğini belirtti ve kayaç yoğunluğu ile Fatti vd.'nin (1994) sıkışma (P -) ve kesme (S -) dalgası empedansını elde etmekte kullandığı Zoeppritz yaklaşımını da kullanarak $\lambda\rho - \mu\rho$ 'yu tanıttı.

Pratikte PS - dalgası kayıtlarına oranla gerek maliyet gerekse veri işlem açısından PP - dalgası kayıtları AVO analizinde daha yaygın kullanılmaktadır. Lakin durum yüksek ve düşük gaz yoğunluğu arasında ayırım yapmaya geldiğinde PP - kayıtları yeterince başarı gösteremeyebilmektedir (Gonzalez vd. 2003). Öte yandan PP - kayıtlarının AVO analizinde, verinin gürültü içeriği ve yığma öncesindeki veri-işlemin başarısı elastik parametrelerin kestirimini sınırlayan diğer etmenlerdir. PP - dalga hızının gaz içeren kayaca etki ettiği andaki ani düşüşü doğrudan hidrokarbon kestiriminde kullanılabilir niteliktedir. Ancak akışkandaki hidrokarbon doygunluğunun bir belirteci değildir (Domenico 1976). Bunun yanı sıra hazne kayaçtaki farklı akışkan türleri ve farklı hidrokarbon doygunlukları için elastik parametrelerin değişimi Gassmann kuramı ile modellenebilmektedir.

Bu tez çalışması kapsamında, boşluklu elastik kayacın içerdiği akışkanın ayrımlılığı, AVO analizi ve endüstride kabul görmüş en yaygın sismik niteleyicilerin kullanımı ile modellenecektir. Bununla birlikte kayaç elastik sabitlerinin hazne kayaçtaki akışkan türünden ne şekilde etkilendiği gösterilerek, farklı akışkan türlerinde gösterdikleri hassas değişimler araştırılacaktır. Tez içerisinde hazne kayaçta birikmesi olağan dört akışkan türü üzerinde durulacaktır. Bunlar, gaz, tuzlu su (deniz suyu), petrol ve tuzlu su içerisinde az miktarda çözünmüş hidrokarbon (fizz) olarak belirlenmiştir. Bu akışkan türlerinin seçilmesindeki en önemli neden, sismik genliklerin hazne kayaçtaki hidrokarbon doygunluğundan etkilenip etkilenmediğini göstermektir. Öte yandan, akışkan kestirimindeki başarısı endüstride kabul görmüş üç temel sismik niteleyici kullanılacaktır. Bunlar, Lambda – Rho ($\lambda\rho$) (Goodway 1997), Poisson Empedansı (PI) (Quackenbush vd. 2006) ve Akışkan Faktörü (ΔF) (Smith ve Gidlow 1987) olarak seçilmiştir. Bunlardan

$\lambda\rho$ ve PI , doğrudan katman içerisindeki boşluk akışkanının belirlenmesinde gösterdikleri başarıdan dolayı, ΔF ise hazne kayacın bulunduğu katmanın sınırlarının ortaya koyulmasında gösterdiği başarıdan dolayı tez kapsamında kullanılacaktır. Kullanılan sismik niteleyicilere ek olarak $\lambda\rho$ ve PI sismik niteleyicilerine tez kapsamında yapılan yeni bir yaklaşım doğrultusunda geliştirilmiş dördüncü bir sismik niteleyici (Lambda-Poisson Empedansı (λPI)) hem kuramsal olarak tanıtılacak hem de hazne kayaçtaki boşluk akışkanının kestirimindeki sonuçları gösterilecektir.

Tezin amacı doğrultusunda, öncelikli olarak AVO'nun dayandığı temel ilkeler kuramsal olarak tanıtılarak, endüstride kabul görmüş hazne modellerin yansıma ve iletim katsayıları, doğrudan da açığa bağlı genlik değişimi (Amplitude Variation with Angle, AVA) kesitleri üretilecektir. Buradaki sismik genliklerin hidrokarbon doygunluğundan ne şekilde etkilendiği ortaya koyularak, hazne kayaçtaki tuzlu suda çözünmüş az miktardaki gazın ayrımlılığında AVA'nın sınırlandığı durum gösterilecektir. Bir sonraki adımda hazne kayaçtaki tuzlu suda çözünmüş az miktardaki gazın özellikle Meksika Körfezi'nde yapılan hidrokarbon araştırmalarında ekonomik kayıplara neden olduğunun altı vurgulanarak, bu bölgedeki bir hazne için yapay oluşturulmuş jeolojik modele ait AVA kesitleri elde edilmiştir. Ardından da bu hazne modelinde, farklı doygunluktaki hidrokarbon içeriği üzerine odaklanılarak bu doğrultuda modellenen sismik genlik bilgileri karşılaştırılacaktır.

Bu sınırlamaların çözümüne yönelik öncelikle Han (1986)'ın verisi üzerinde deneysel bir çalışma ile sismik hızların kayaç boşluk oranı, kil içeriği ve basınç ile ilişkisi araştırılarak tez kapsamında kullanılan saha verilerinin daha hassas yorumlanmasının önü açılacaktır. Ardından da Castagna (1994)'nın verisi üzerinde yapılan deneysel bir çalışma doğrultusunda kayaç elastik parametrelerinin ve sismik niteleyicilerin birlikte kullanımının gazlı ve tuzlu sulu kumtaşlarının ayrımlılığındaki etkili sonuçları gösterilecektir.

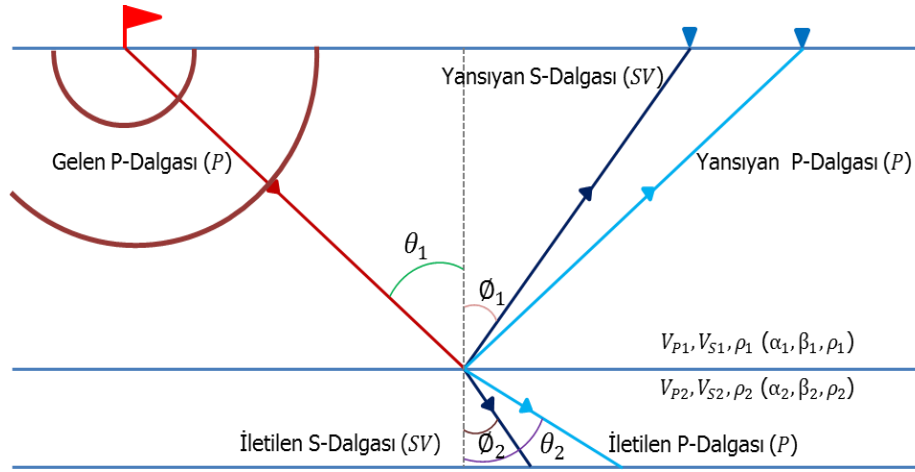
Bir sonraki aşamada deneysel çalışmaların anlamlı sonuçları doğrultusunda Meksika Körfezi'ndeki birçok kuyudan elde edilmiş sismik hız ve yoğunluk değerleri kullanılarak hem litoloji hem de tez kapsamında seçilen dört akışkan modelinin ayrımlılığı

gösterilecektir. Son olarak bu kuyu verileri üzerinde yapılan çalışmanın sonuçları doğrultusunda, Kuzey Denizi'nde kaydedilmiş iki boyutlu (2B) bir sismik hat ve bu hattı kesen iki kuyudaki gaz ve petrol hazneleri, tez kapsamında kullanılan sismik niteleyiciler ve kayaç elastik sabitlerinin kullanımı ile belirlenecektir.

Yapay modellerin oluşturulmasında, sismik genliklerin modellenmesinde, deneysel ve saha verilerinin yorumlanmasında kullanılan programların önemli bir kısmı MATLAB paket programı kullanılarak geliştirilmiştir. Bununla birlikte hazne kayaçtaki akışkanın Gassmann kuramı ile modellenmesinde Houston Üniversitesi tarafından geliştirilmiş TIPS petroSeismic yazılımı kullanılarak hazne kayaca akışkan yerleştirilmiş ve ardından AVA kesitleri elde edilmiştir. Deniz sismiği verisinin işlenmesinde SeisSpace/ProMAX yazılımı kullanılarak hattı kesen kuyu verileriyle ilişkilendirilmeye hazır hale getirilmiştir. Tez kapsamında kullanılan Kuzey Denizi'nde toplanmış 2B sismik veri ve verinin toplandığı sismik hattı kesen iki kuyuda kaydedilmiş kuyu verileri SEG (Society of Exploration Geophysicist) veri bankasından temin edilmiştir.

2. ZOEPPRITZ EŞİTLİKLERİ

Farklı yoğunluk ve hız değerlerine sahip homojen ve yarı sonsuz iki yön bağımsız elastik ortamı ayıran yatay sınır ara yüzeye çarpan bir düzlem dalganın enerji dağılımını Zoeppritz (1919) eşitlikleri kesin olarak ortaya koymaktadır.



Şekil 2.1 Farklı hız ve yoğunluklara sahip iki ortama ait yatay sınır ara yüzeydeki yansıyan ve iletilen PP- ve SV- dalgaları

$$\begin{bmatrix} -\sin\theta_1 & -\cos\phi_1 & \sin\theta_2 & \cos\phi_2 \\ \cos\theta_1 & -\sin\phi_1 & \cos\theta_2 & -\sin\phi_2 \\ \sin 2\theta_1 & \frac{V_{P1}}{V_{S1}} \cos 2\phi_1 & \frac{\rho_2 V_{S2}^2 V_{P1}}{\rho_1 V_{S1}^2 V_{P2}} \sin 2\theta_2 & \frac{\rho_2 \rho V_{S2} V_{P1}}{\rho_1 V_{S1}^2} \cos 2\phi_2 \\ -\cos\phi_1 & \frac{V_{S1}}{V_{P1}} \sin 2\phi_1 & \frac{\rho_1 V_{P2}}{\rho_1 V_{P1}} \cos 2\phi_2 & -\frac{\rho_2 V_{S2}}{\rho_1 V_{P1}} \sin 2\phi_2 \end{bmatrix}^{-1} \begin{bmatrix} \sin\theta_1 \\ \cos\theta_1 \\ \sin 2\theta_1 \\ \cos 2\theta_1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} R_p \\ R_s \\ T_p \\ T_s \end{bmatrix} \quad (2.1)$$

Eşitlik (2.1), Zoeppritz eşitliklerinin genel formu olup sırasıyla P- ve S- dalgası için R_p , R_s yansıma katsayısı değerleri, T_p , T_s ise iletim katsayısı değerleridir. V_{P1} ve V_{S1} üst ortamın P- dalga ve S- dalga hızı, V_{P2} ve V_{S2} alt ortamın P- dalga ve S- dalga hızı

değerleridir. ρ_1 ve ρ_2 üst ve alt ortamın yoğunluk değerleridir. Varış ve yansıma açıları Şekil 2.1'deki gibidir. Eşitlikler yer değiştirme ve gerilime ait, normal ve teğetsel bileşenlerin devamlılığını gerektirmektedir. Eşitliklerin en belirgin özelliği, farklı geliş açılarında sınır ara yüzeye gelen dalganın yansıma ve iletim katsayısı serilerinin hesaplanabilmesine olanak sağlamasıdır. Bu durum AVO'nun ya da daha çok AVA'nın temeli niteliğindedir.

Tek bir sınır ara yüzey için Zoeppritz eşitliklerinin kullanılmasıyla elde edilen (2.1) düzey denklemi doğrusal değildir. Dizeylerden 4×4 formdaki birinci düzeyin tersinin alınacağına ve düzey çarpımlarının sonucunda çözüme gidileceği görülmektedir. Bunun yanı sıra farklı fiziksel özelliklere sahip kayalar için doğrusal olmayan formdaki Zoeppritz eşitlikleri, sınır ara yüzeydeki enerji paylaşımının genlik bilgisine olan etkisini ortaya koymaya olanak sağlamamaktadır. Bu nedenle Zoeppritz eşitliklerine birçok doğrusal yaklaşım yapılarak bu duruma çözüm üretilmeye çalışılmıştır (bakınız, EK 1).

Şekil 2.1'deki yarı sonsuz iki elastik ortam için yoğunluk, P - ve S - dalga hızları sırasıyla ρ , α , β olmak üzere, sınır ara yüzeye çarpan bir P - veya yansıyan SV - düzlem dalganın yansıma ve iletim katsayıları eşitlik (2.1)'de verilen Zoeppritz eşitliklerinden hesaplanabilmektedir. P - ve SV - dalgalarının düzey formu, Aki ver Richards (1980) tarafından izleyen eşitlikteki gibi verilmiştir (bakınız, EK 1).

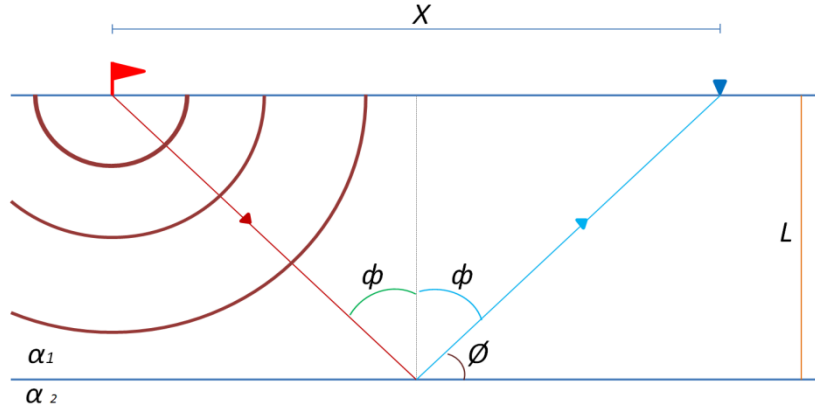
$$L^{-1}C = Z \quad (2.2)$$

Eşitlik (2.2)'de, R_{PP} , R_{PS} , T_{PP} ve T_{PS} , yansıma ve iletim katsayıları, sınır ara yüzeydeki herhangi bir varış açısı için her bir katmanın yoğunlukları ile P - ve S - dalga hızları için tam olarak tanımlanmaktadır.

Bu tez çalışması kapsamında R_{PP} , R_{PS} , T_{PP} ve T_{PS} değerleri, endüstride kabul görmüş jeolojik modeller için hesaplanacaktır. Yapılan modellemelerin amacı doğrultusunda kullanılan bu jeolojik modeller yön-bağımsızdır. Ancak bu durum bir zorunluluktan ileri gelmemektedir. Örneğin; Thomsen (1988) yön-bağımlı elastik ortam için açılıma bağlı genlik değişimini ortaya koymuştur.

2.1 AVO - AVA

Zoeppritz eşitliklerini tanımlarken, eşitliklerdeki ve eşitliklere yapılan doğrusal yaklaşımlardaki en göze çarpan özelliğin, farklı geliş açılarıyla sınır ara yüzeye çarpan bir düzlem dalğanın genlik bilgisi olduğuydu. Ancak pratikte yansıma sismiği verileri uzaklığın fonksiyonu olarak toplanmaktadır. Açılım ve açının mantıken birbirine çok yakın hatta aynı sonucu veren parametreler olduğu düşünülebilir. Ancak bu iki parametre arasında doğrusal olmayan bir ilişki bulunmaktadır. Tez kapsamında modellenen AVA kesitlerinde, genlik bilgisi açının fonksiyonu olarak hesaplanmaktadır. Bu nedenle AVO ve AVA arasındaki ilişki sayısal olarak iyi anlaşılmalıdır.



Şekil 2.2 Farklı hızlara sahip iki homojen elastik ortamı ayıran sınır ara yüzeydeki yansıyan ışın geometrisi

Şekil 2.2’de şematik olarak gösterilen tek bir kaynaktan çıkıp sabit açıyla sınır ara yüzeye gelip aynı açıyla yansıyarak alıcıya ulaşan ışın yolu için açılım ve açı arasındaki ilişki izleyen eşitliklerdeki gibidir (X , açılım, L , iki sınır ara yüzey arasındaki düşey uzaklık, α_1 ve α_2 ortamların hızlarıdır);

$$\theta + \phi = 90^\circ \quad (2.3)$$

$$\tan \phi = X/2L \quad (2.4)$$

$$2L = t_0 V \quad (2.5)$$

$$\tan \phi = X/t_0V \quad (2.6)$$

$$\tan \phi t_0V = X \quad (2.7)$$

Eşitlik (2.7), yatay iki katmanı ayıran tek bir sınır ara yüzey için geçerlidir. Çok katmanlı yatay sıralanmış bir jeolojik model için ortak orta nokta kayıtları zamanın ve uzaklığın fonksiyonu olan izleyen hiperbolik eşitlikteki gibidir;

$$t^2 = t_0^2 + \frac{x^2}{v_{RMS}^2} \quad (2.8)$$

Yine aynı model için ışın parametresi p , izleyen eşitlikteki gibidir;

$$p = \frac{dt}{dx} \quad (2.9)$$

$$\frac{dt}{dx} = \frac{1}{v_{RMS}^2} \frac{x}{t} \quad (2.10)$$

$$p = \frac{\sin \theta}{v_{ARA}} \quad (2.11)$$

Eşitlik (2.10), eşitlik (2.11)'de yerine koyulduğunda;

$$\sin \theta = \frac{x v_{ARA}}{t v_{RMS}} \quad (2.12)$$

Eşitlik (2.12), açılım ile açı arasındaki doğrusal olmayan ilişkiyi ortaya koymaktadır. Bu eşitlik ile uzaklığın fonksiyonu olarak toplanan yansıma verisi, sınır ara yüzeydeki varış açısının bir fonksiyonu biçiminde tekrar sıralanabilmektedir.

2.2 Normal Varış Yansıma Katsayısının Akışkan Kestirimindeki Önemi

Aki ve Richards (1980) elastik ortamın empedansını, ortamın parçacık hızının gerilmeye oranı olarak tanımlamıştır. Sayısal olarak sismik empedans, ortamın hızı ile yoğunluğunun sayısal çarpımı ile tanımlanmaktadır. Sismik empedans aynı zamanda sınır ara yüzeye dik olarak çarpan düzlem dalğanın yansıma katsayısıdır ve Zoeppritz denklemlerine yapılan doğrusal yaklaşımların genel formunda birinci terimdir (bakınız EK 1). Ayrıca doğrudan elastik ortamın hız ve yoğunluk değerlerine bağlı olmasından dolayı akışkan ve litoloji hakkında anlamlı bilgi içermektedir. Homojen yön-bağımsız iki elastik ortamı ayıran sınır ara yüzeydeki $R_{p,p}$ (EK 1, eşitlik (28)) izleyen eşitlikteki gibi elde edilebilmektedir;

$$R_{P_0} \approx \left[\frac{1}{2} \left(\frac{\Delta V_P}{V_P} + \frac{\Delta \rho}{\rho} \right) \right] \approx \frac{\Delta I_P}{2I_P} \approx \frac{I_{P_2} - I_{P_1}}{I_{P_2} + I_{P_1}} \quad (2.13)$$

$$\frac{I_{P_2} - I_{P_1}}{I_{P_2} + I_{P_1}} = R_{12} \quad (2.14)$$

$$I_{P_1} = \rho_1 V_{P_1} \quad (2.15)$$

$$I_{P_2} = \rho_2 V_{P_2} \quad (2.16)$$

Sınır ara yüzeye kayıpsız gelen dalga enerjisinin bir kısmı yansırken kalan kısmı ikinci ortama geçerek yayılmaya devam edecektir.

$$R_{12} + T_{12} = 1 \quad (2.17)$$

$$\frac{2I_{P_1}}{I_{P_2} + I_{P_1}} = T_{12} \quad (2.18)$$

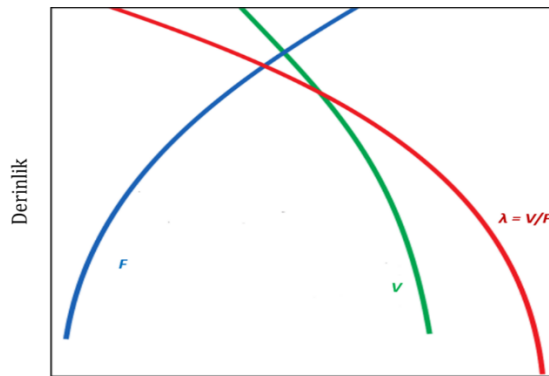
Eşitlik (2.17)'de verilen R_{12} , iki elastik ortamı ayıran sınır ara yüzeydeki yansıma katsayısı iken eşitlik (2.18)'de verilen T_{12} , iletim katsayısıdır.

2.3 Düşey Ayrımlılık ve Sismik Dalganın Frekans Bantı

Gerçek dünyada yeryuvarının homojen olmadığı ve jeolojik katmanların da çoğu zaman yatay olmayıp yön-bağımlı olduğu bilinen bir gerçektir. Peki, sismik genliklerle jeolojik katmanların kalınlığı veya eğimi ne şekilde kestirilebilir? Sismik genlikler bu kestirim için yeterli midir? Sorunun cevabı için iki temel parametreni tanımlanması gerekir – dalga hızı ve frekansı. Bu iki parametre arasındaki ilişki izleyen eşitlikteki gibidir:

$$v = f \lambda \quad (2.19)$$

Eşitlik (2.19)'da, v , sismik dalga hızı, f , sismik dalga frekansı ve λ , sismik dalganın dalga boyudur. Jeolojik katmanların yapısı derinlikle yoğunlaşmakta ve sıkılaşmaktadır. Bunun sonucu olarak da sismik dalganın hızı genel olarak derinlikle artmaktadır. Eşitlik 3.17'de verildiği üzere sismik dalganın hızı, frekansı ile ters orantılıdır yani, dalganın baskın frekansı hızın artışı ile azalacaktır (Şekil 2.3). Bu durumda, daha derindeki katman yüzeydekine oranla daha kalın olmalı ki artan dalga-boyuyla kestirimi mümkün olsun. Çizelge 1.1'de verilen kabul edilebilir düşey çözünürlük eşliğinin dalga-boyunun dörtte birine eşit olduğu görülmektedir. Örneğin, derindeki 5000 m/s hıza sahip katman ve baskın frekansın 20 Hz olduğu durumda katman kalınlığı en az 62 m olmalıdır ki sismik genlik analizinde kestirilebilsin. Sonuç olarak, hedef katman kalınlığı dalga-boyunun dörtte biri kıstasıyla kestirilemeyecek kadar küçükse ve çözünürlüğün artırılması gerekiyorsa, yığılmış sismik verinin baskın frekansının arttırılmasıyla çözüme gidilebilir (Özyılmaz 2001).



Şekil 2.3 Derinlikle dalganın hızı, frekansı ve dalga boyunun göreceli değişimi (Brown 2011'den değiştirilerek alınmıştır)

Çizelge 1.1 Düşey çözünürlükte dalga-boyu eşiği (Yılmaz 2001)

$$\lambda/4 = v/4f$$

$v(m/s)$	f (Hz)	$\lambda/4$ (m)
2000	50	10
3000	40	18
4000	30	33
5000	20	62

Sismik kesitlerdeki sinyalin doğru spektral analizi, özellikle kesitin frekans içeriğinin hedef katmanının kestirimine yönelik geliştirilmesi, verinin kayıt aşamasındaki kalitesinin yanı sıra doğru sismik veri-işlemin uygulanmasıyla da mümkündür. Ancak düşey çözünürlüğü örneklerken, her ne kadar yığılmış verinin frekans içeriğini arttırmak bir çözüm ise alçak frekanslı verinin de içerdiği genlik bilgisi bir çözüm olarak kullanılabilir.

Gerçek dünyada yapılan gerek kara gerekse deniz sismiği araştırmalarında, kaynaktan çıkan sinyalin her zaman için araştırılan jeolojik yapıyı sismik kayıtlarda ortaya koyması istenir. Temelde kaynak dalgacığının iki önemli özelliğe sahip olması, aynı zamanda da kaynağın aynı dalgacığı devamlı olarak üretmesi beklenir. Bu iki özellik, ayrımlılık ve elastik dalgaının jeolojik katmana ne kadar nüfuz ettiği. Eğer ki jeolojik katmanlar birbirine çok yakın, aynı zamanda da ince ise bu iki katmanının ayrımlılığı ancak kaynak dalgacığının doğru seçilmesiyle gerçekleştirilebilir. Bu durum kaynak dalgacığının mümkün olduğunca iğnecik formda olması ile çözümlenebilir. Eğer ki kaynak dalgacık geniş bant aralığına sahip ise bu iki katmanının ayrımlılığı yorum aşamasında olumsuz sonuçlanabilmektedir. Öte yandan kaynak dalgacığının yer içindeki seyahati boyunca ne kadar soğurulursa soğurulsun, hedef derinlikteki katmana nüfuz etmesi istenir ki bu da ancak geniş bant aralığına sahip dalgacıkla mümkün kılınabilir. Bu durumda kaynak dalgacığının bu iki özelliğe aynı anda sahip olması istenir ki bugün tüm jeofizik servis organizasyonlarının yaptıkları sismik araştırmalardaki kaynak dalgacığının, istenilen bu

özelliğe sahip olması için önemli bütçeler ayrılmaktadır. En önemli amaç ise, veri toplama aşamasındaki gürültülerin dışında, mümkün olan en geniş bant aralığına, aynı zamanda da en mümkün iğnecik forma sahip kaynak dalgacığını üretebilecek kaynak modellerini ortaya koymaktır.

Ortak orta noktaya (Common Mid Point, CMP) göre sıralanmış sismik iz kesitlerinde, hedef haznenin bulunduğu derinlik seviyesindeki genlik değişimleri, çoğu zaman yapay AVO modelleri ile desteklenmek istenir. Bu nedenle modelleme yapılırken kullanılan kaynak dalgacığının türü ve frekans içeriği doğru genlik modellerinin elde edilmesinde önemlidir. Bu durum düşey çözünürlükle doğrudan ilişkilidir ki hazne katmanın sismik genliklerde ayrımlılığı doğru frekans içeriğinin seçimi ile mümkündür.

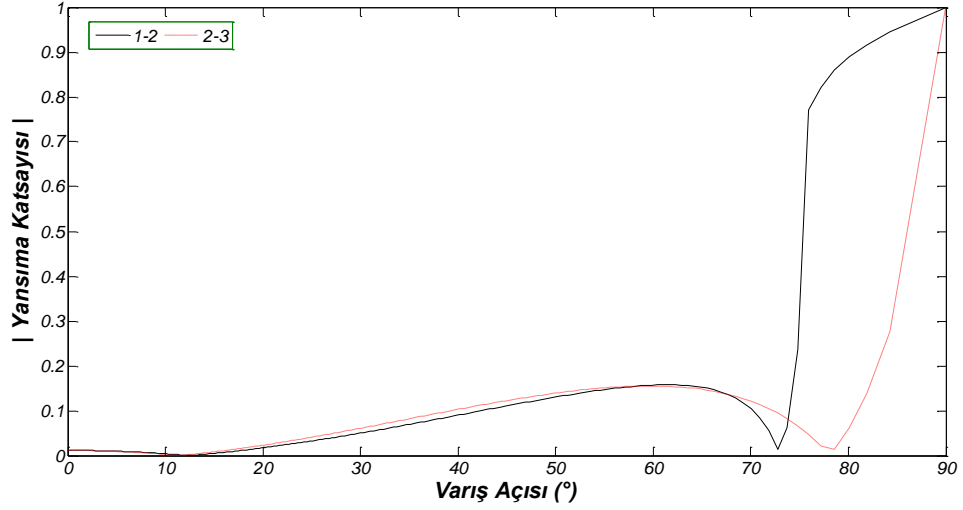
3. AKIŞKAN KESTİRİMİNDE SİSMİK GENLİK ANALİZİ

İkinci bölümde Zeoppritz eşitlikleri ve eşitliklere yapılan yaklaşımlar (bakınız EK 1) kuramsal olarak gösterilmiş, amaç ve farklılıkları üzerinde durulmuştur. Bu bölümde farklı yapay jeolojik modeller için Zeoppritz eşitlikleri kullanılarak yansıma ve iletim katsayıları hesaplanacaktır. Elde edilen yansıma ve iletim katsayılarının kullanılarak da bir boyutlu (1B) AVA kesitleri tez kapsamında geliştirilen program ile elde edilecektir. Buna göre sismik genlikler, kaynak dalgacığıyla yansıma ve iletim katsayılarının evrişiminden elde edilmiştir. Jeolojik modellerin her biri için genlik modellemesinde 35 Hz'lik bir Ricker kaynak dalgacığı kullanılmıştır. Bu doğrultuda ilk olarak Richards (1961)'in Batı Kanada'daki Paleozoik döneme ait kireçtaşları için verdiği model parametreleri kullanılarak yansıma ve iletim katsayılarının değişimi R_{pp} , $R_{p\delta}$, T_{pp} ve $T_{p\delta}$ için modellenmiştir (bakınız EK 2). Elde edilen yansıma ve iletim katsayısı eğrileri için Castagna ve Backus (1993)'un yapmış olduğu gözlemler göz önüne alınarak endüstride kabul görmüş bir jeolojik hazne modelinin AVA kesitleri hesaplanmıştır. Seçilen model Backus ve Castagna (1993)'nın çizelge 3.1'de verilen modelidir. Yoğunluk ve sismik hız parametreleri bilinen, gaz ve tuzlu su içeren hazne kayacın şeyl katmanı ile örtüldüğü bu jeolojik modele ait R_{pp} ve $R_{p\delta}$ serilerinin ne şekilde değişim gösterdiği Zoeppritz eşitlikleri kullanarak modellenmiştir. Hesaplanan eğriler 90° 'lik varış açlarına kadardır. Ancak AVA kesitlerinde en fazla 30° 'ye kadar ki açılarıdaki genlikler verilmektedir. Buradaki neden pratikte uzak açılımın $30^\circ - 35^\circ$ arasında kabul edilmesidir. Bu modelleme çalışmasındaki temel amaç, hidrokarbon ile tuzlu suyun AVA ile ayrımlılığını göstermektir. Çizelge 3.1'de iki farklı akışkan içeren üç hazne modeli verilmiştir. A modelinde, iki şeyl katmanı arasındaki gazlı kum katmanı, B modelinde, yine iki şeyl katmanı arasındaki alt alta sıralanmış gazlı kum ve tuzlu sulu kum katmanı ve C modelinde ise iki şeyl katmanı arasındaki tuzlu sulu kum katmanı verilmiştir. A ve C modelleri için Şekil 3.2'de ve 3.10'da 100 ms'deki genlik değerlerine bakıldığında, gazlı kum ile tuzlu sulu kum için genlik değerlerinin birbirinden farklı olduğu görülmektedir. Bu önemli bir bulgudur çünkü AVA ile hidrokarbonun ayırt edilebilirliğinin göstergesidir. B modeline baktığımızda burada da gazlı kum ile tuzlu sulu kumun bir sınır ara yüzeye sahip olduğu görülmektedir. Bu sınır ara yüzeydeki yansıma katsayısı serisi gazlı kum ile tuzlu sulu kumun ayrımlılığını ortaya koymalıdır eğer ki AVA'nın bu

ayrımllığı ortaya koymada başarılı olması bekleniyorsa. B modeli için Şekil 3.6'ya bakıldığında, 200 ms'deki genliklerin açılımla belirgin biçimde arttığı gözlenmektedir. Bu durum AVA'nın böyle bir problemdeki başarısını gösterir. Bununla birlikte her üç jeolojik modele ait her bir sınır ara yüzeydeki yansıma katsayısı serilerinin açılımla değişimi sismik genliklerde de belirgin biçimde gözlenmektedir ki bu durum temelde yansıma katsayısının sismik genliğe eşdeğer olmasından kaynaklıdır. Ayrıca üç jeolojik modelde de her bir sınır ara yüzey için gerek $R_{\rho\rho}$ gerekse $R_{\rho\delta}$ serilerinin artan açıyla değişimi aynı şekilde sismik genliklerde de görülmektedir. Ancak $R_{\rho\rho}$ ve $R_{\rho\delta}$ serilerinin açıyla değişimi çizdirilirken sayısal değerlerin mutlak değerleri alınarak her bir jeolojik modelin kendi içerisindeki her bir sınır ara yüzey için elde edilen değişimin karşılaştırılmasına olanak sağlanmıştır. Ancak AVA kesitlerinde bu durum söz konusu değildir ve $R_{\rho\rho}$, $R_{\rho\delta}$ serilerinin sayısal değerleri olduğu gibi kullanılmıştır.

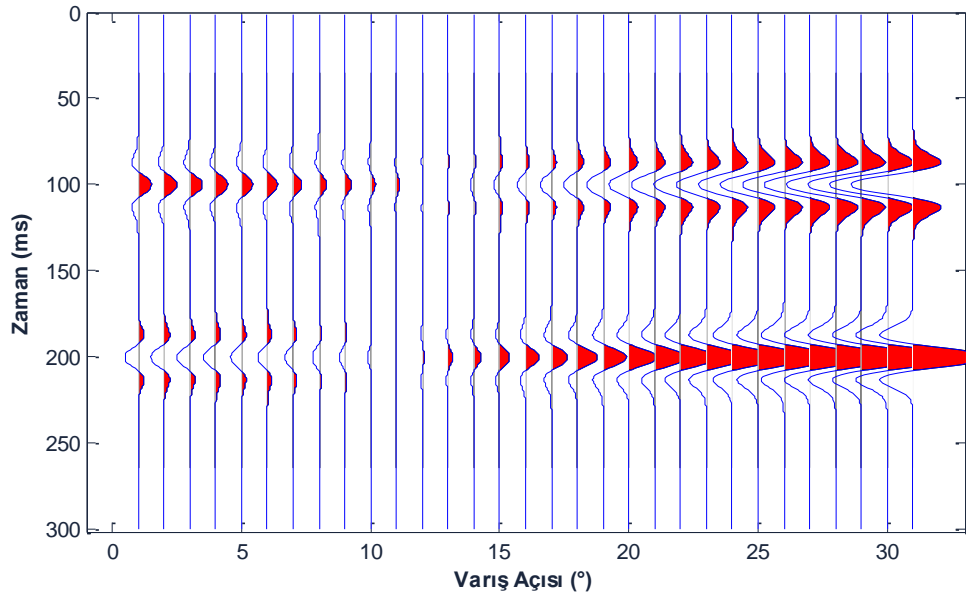
Çizelge 3.1 Üç farklı jeolojik modelin yoğunluk ve hız parametreleri (Castagna ve Backus 1993)

Litoloji	V_p (m/s)	V_s (m/s)	ρ (gm/cc)	V_p/V_s
Model A				
Şeyl	2743	1394	2.06	1.97
Gazlı Kum	2835	1762	2.04	1.61
Şeyl	2743	1394	2.06	1.97
Model B				
Şeyl	2743	1394	2.06	1.97
Gazlı Kum	2835	1762	2.04	1.61
Tuzlu Sulu Kum	2835	1472	2.08	1.93
Şeyl	2743	1394	2.06	1.97
Model C				
Şeyl	2743	1394	2.06	1.97
Tuzlu Sulu Kum	2835	1472	2.08	1.93
Şeyl	2743	1394	2.06	1.97

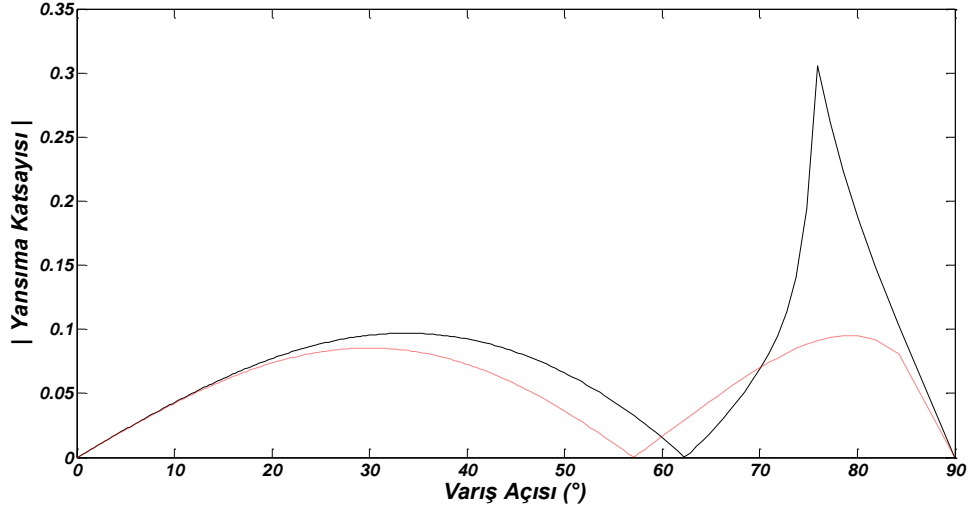


Şekil 3.1 Çizelge 3.1’de verilen A model parametreleri için hesaplanan $R_{\hat{p}\hat{p}}$, yansıma katsayılarının sınır ara yüzeye varış açlarına göre değişimi

Siyah eğri şeylin örtü katmanı olarak kabul edildiği, kırmızı eğri ise gazlı kum katmanının temel kayaç olarak kabul edilen şeyl katmanı üzerinde olduğu durum için elde edilmiştir

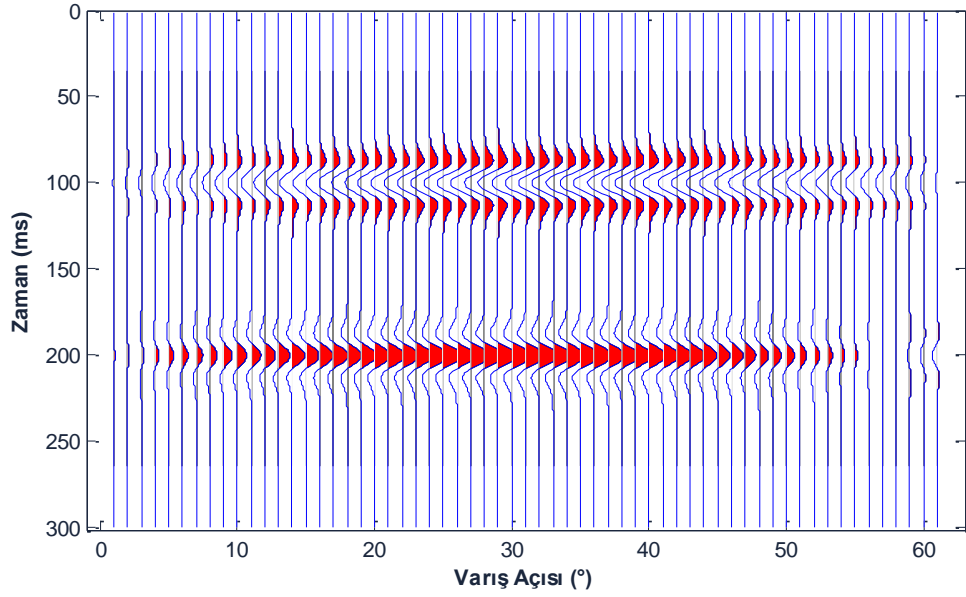


Şekil 3.2 Çizelge 3.1’de verilen A model parametreleri için hesaplanan $R_{\hat{p}\hat{p}}$, yansıma katsayıları kullanılarak üç ayrı katmandan oluşan model için elde edilmiş AVA kesiti

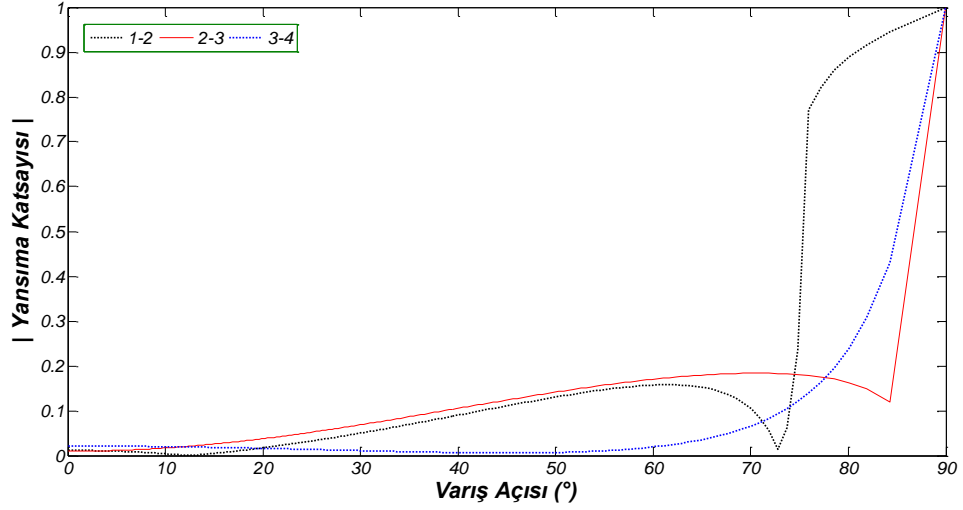


Şekil 3.3 Çizelge 3.1’de verilen A model parametreleri için hesaplanan $R_{p\delta}$, yansıma katsayılarının sınır ara yüzeye varış açlarına göre değişimi

Siyah eğri şeylin örtü katmanı olarak kabul edildiği, kırmızı eğri ise gazlı kum katmanının temel kayaç olarak kabul edilen şeyl katmanı üzerinde olduğu durum için elde edilmiştir

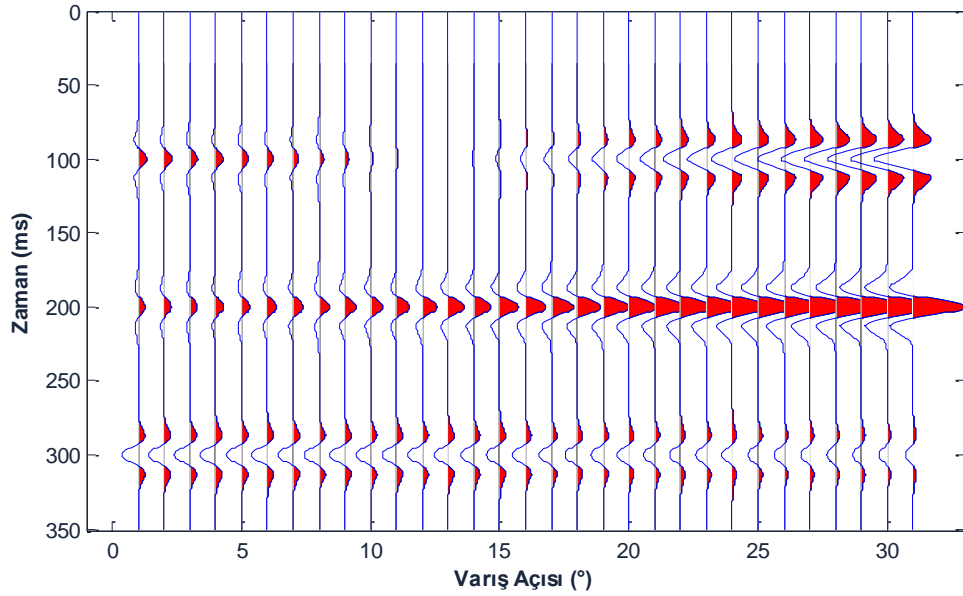


Şekil 3.4 Çizelge 3.1’de verilen A model parametreleri için hesaplanan $R_{p\delta}$, yansıma katsayıları kullanılarak üç ayrı katmandan oluşan model için elde edilmiş AVA kesiti

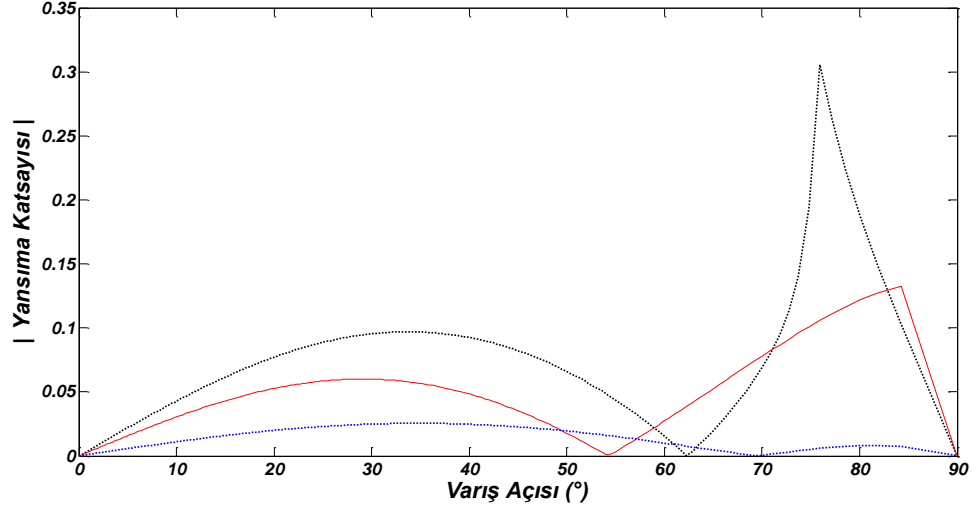


Şekil 3.5 Çizelge 3.1’de verilen B model parametreleri için hesaplanan $R_{\hat{\rho}\hat{\rho}}$, yansıma katsayılarının sınır ara yüzeye varış açlarına göre değişimi

Siyah eğri şeylin örtü katmanı olarak kabul edildiği, kırmızı eğri gazlı kum katmanının tuzlu sulu kum tabakası üzerine katmanlandığı, mavi eğri ise temel kayaç olarak kabul edilen şeyl katmanı üzerinde tuzlu sulu kum katmanının olduğu durum için elde edilmiştir

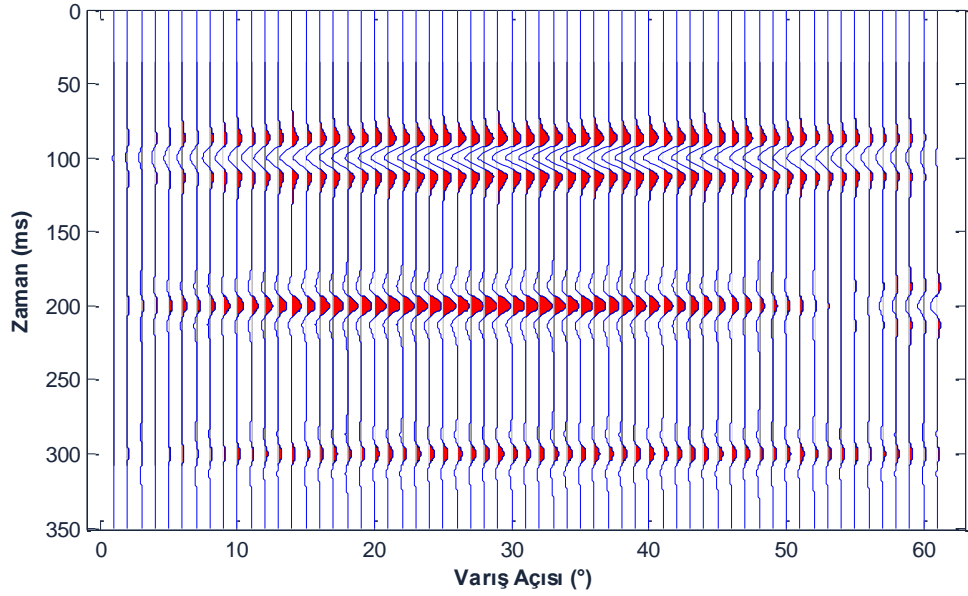


Şekil 3.6 Çizelge 3.1’de verilen B model parametreleri için hesaplanan $R_{\hat{\rho}\hat{\rho}}$, yansıma katsayıları kullanılarak dört jeolojik katmandan oluşan model için elde edilmiş AVA kesiti

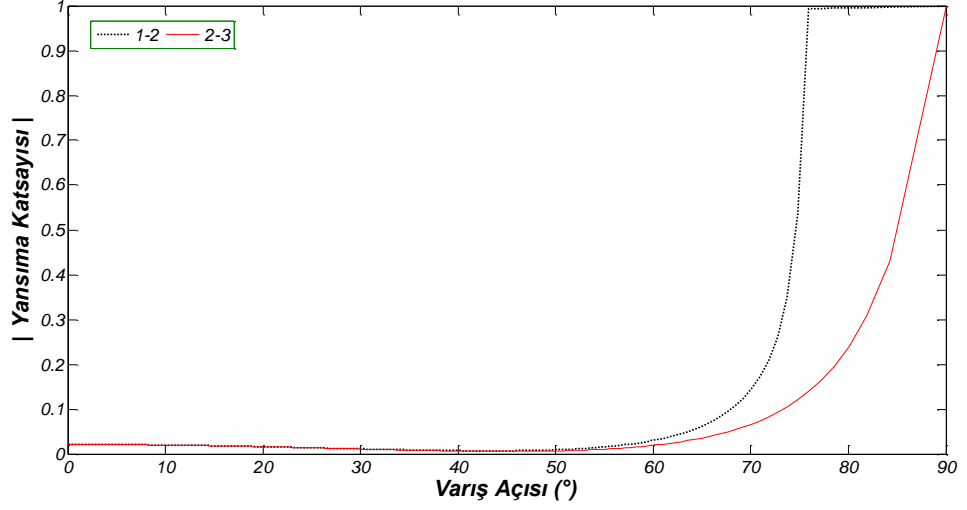


Şekil 3.7 Çizelge 3.1’de verilen B model parametreleri için hesaplanan $R_{\rho\delta}$, yansıma katsayılarının sınır ara yüzeye varış açlarına göre değişimi

Siyah eğri şeylin örtü katmanı olarak kabul edildiği, kırmızı eğri gazlı kum katmanının tuzlu sulu kum tabakası üzerine katmanlandığı, mavi eğri ise temel kayaç olarak kabul edilen şeyl katmanı üzerinde tuzlu sulu kum katmanının olduğu durum için elde edilmiştir

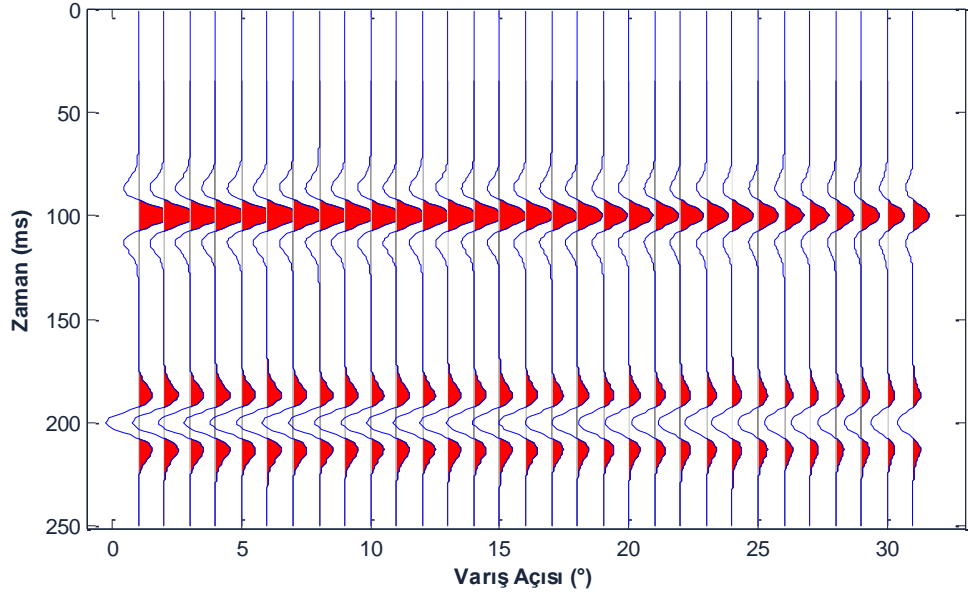


Şekil 3.8 Çizelge 3.1’de verilen B model parametreleri için hesaplanan $R_{\rho\delta}$, yansıma katsayıları kullanılarak dört jeolojik katmandan oluşan model için elde edilmiş AVA kesiti

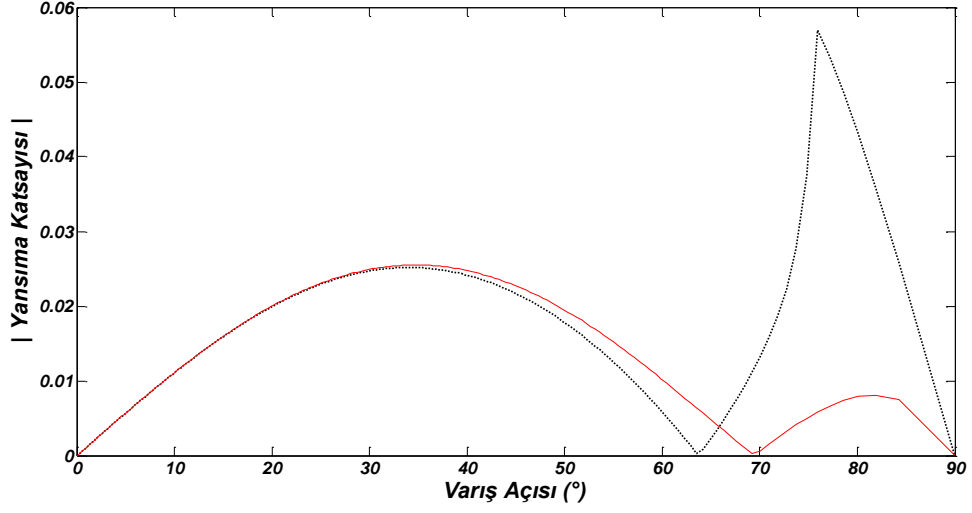


Şekil 3.9 Çizelge 3.1’de verilen C model parametreleri için hesaplanan R_{pp} , yansıma katsayılarının sınır ara yüzeye varış açısına göre değişimi

Siyah eğri şeylin tuzlu sulu kum katmanı üzerinde örtü katmanı olarak kabul edildiği, kırmızı eğri is tuzlu sulu kum tabakasının şeyl üzerine katmanlandığı durum için elde edilmiştir

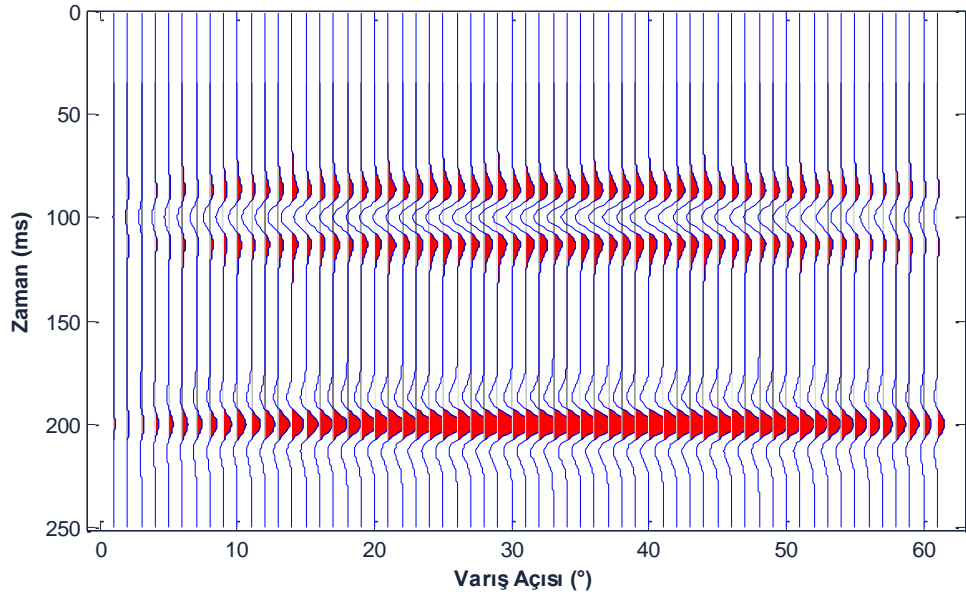


Şekil 3.10 Çizelge 3.1’de verilen C model parametreleri için hesaplanan R_{pp} , yansıma katsayıları kullanılarak üç ayrı jeolojik katmanlı model için elde edilmiş AVA kesiti



Şekil 3.11 Çizelge 3.1’de verilen C model parametreleri için hesaplanan $R_{p\zeta}$, yansıma katsayılarının sınır ara yüzeye varış açılarına göre değişimi

Siyah eğri şeylin tuzlu sulu kum katmanı üzerinde örtü katmanı olarak kabul edildiği, kırmızı eğri is tuzlu sulu kum tabakasının şeyl üzerine katmanlandığı durum için elde edilmiştir



Şekil 3.12 Çizelge 3.1’de verilen C model parametreleri için hesaplanan $R_{p\zeta}$, yansıma katsayıları kullanılarak üç ayrı jeolojik katmanlı model için elde edilmiş AVA kesiti

4. BOŞLUKLU ELASTİK HAZNE KAYAÇTAKİ AKIŞKANIN KESTİRİMİ

Gerçek dünyada, hazne kayaçların belirli bir basınç, sıcaklık ve derinlikte oluştuğu bununla birlikte belirli bir boşluk oranına, geçirimsizliğe, boşluk basıncına ve boşluklarında birikmiş olan akışkana sahip olduğu bilinmektedir. Hazne kayacın elastik parametrelerini elastik dalga kayıtlarından belirlemenin yanısıra, verinin toplandığı sahadaki kuyu logu kayıtlarının elastik parametrelerin belirlenmesinde kullanımı da büyük önem taşımaktadır. Tez kapsamında bunun örneklerini ileriki bölümlerde göreceğiz. Bu bölümde hazne kayaçtaki akışkanın nasıl modelleneceği kuramsal olarak gösterilecek ve tez kapsamında kullanılacak olan sismik nitelendiricilerin kuramsal temelleri verilecektir.

4.1 Boşluklu Elastik Kayaç İçin Gassmann Eşitliği

Giriş bölümünde de belirtildiği üzere elastik dalga, yayılım doğrultusundaki boşluklu ve akışkana doygun elastik kayacı sıkıştırma ve genişleme kuvvetleri etkisi altında bırakacak, bu etki altındaki kayaç parçacıkları da kayacın bulk sabitine ve boşluklarını dolduran akışkanın elastik özelliklerine bağlı olarak deformasyona maruz kalacaktır. Kayacın bulk sabiti hidrostatik sıkışmanın hacimsel gerilmeye oranı olarak tanımlanabilir ve sıkışmazlığın bir ölçütüdür.

Gassmann (1951) eşitliği de kayaç bulk sabitinin elastik kayacın haznesindeki akışkan doygunluğundan ne şekilde etkilendiğini elastik parametrelerle modelleyebilen ve böyle bir kayacın P -, S - dalga hızları ile yoğunluğunu farklı akışkan modellerine göre sayısal olarak ortaya koyabilen bir kuram olduğu için bu tezde kullanılacaktır. Gassmann kuramı üç temel yaklaşım içermektedir: hazne kayaç homojen, yön-bağımsız ve kayaç içerisindeki boşluklar tamamen birbirine bağlı olup içerisindeki akışkan hareket edebilmelidir.

Boşluklu yön bağımsız elastik ortamın P - ve S - dalga hızları izleyen eşitliklerden hesaplanabilmektedir.

$$V_p = \sqrt{\frac{\lambda_{sat} + \mu_{sat}}{\rho_{sat}}} = \sqrt{\frac{K_{sat} + 4/3\mu_{sat}}{\rho_{sat}}} \quad (4.1)$$

$$K_{sat} = \lambda_{sat} + 2/3\mu_{sat} \quad (4.2)$$

$$V_s = \sqrt{\frac{\mu_{sat}}{\rho_{sat}}} \quad (4.3)$$

Eşitlik 4.1-4.3'te V_p ve V_s boşluklu elastik kayacın P - ve S - dalga hızları, K_{sat} ve ρ_{sat} , belirli oranda akışkana doymun kayacın bulk sabiti ile yoğunluğudur. Bunun yanı sıra λ_{sat} ve μ_{sat} de yine belirli oranda akışkana doymun boşluklu elastik kayacın Lamé sabitleridir. Yukarıdaki eşitliklerden açıkça görüldüğü üzere belirli oranda akışkana doymun boşluklu bir hazne kayacın bulk sabiti, Lamé sabitleri bilindiğinde doğrudan hesaplanabilir. Lamé sabitlerinin hesabı için ise kayaç hızları ile yoğunluk değerlerinin bilinmesi gerekmektedir.

Eşitlik (4.5)'de verilen Gassmann (1951) eşitliği böyle bir kayacın haznesinde biriken farklı akışkan modelleri için belirtilen üç parametreyi (V_p, V_s, ρ_{sat}) hesaplamaya olanak sağlamaktadır. Gassmann eşitliğinin altında yatan temel kuram ise, boşluktaki akışkanın kayaç parçacıklarındaki sıkıştırma etkisini ortaya koymasındır. Gassmann kuramı, boşluklu hazne kayaçta birikmeye başlayan akışkanın kayma modülüne bir etkisi olmadığını varsaymaktadır (Eşitlik 4.4).

$$\mu_{sat} = \mu_{dry} \quad (4.4)$$

$$\frac{K_{sat}}{K_{matrix} - K_{sat}} = \frac{K_{dry}}{K_{matrix} - K_{dry}} + \frac{K_{fluid}}{\phi(K_{matrix} - K_{sat})} \quad (4.5)$$

Eşitlik (4.5)'te, K_{sat} , belirli oranda doygunluğa sahip boşluklu kayacın, K_{dry} , içerisinde akışkan barındırmadığı durumdaki boşluklu kuru kayacın, K_{matrix} , kayacın içerdiği mineral bileşiminin, K_{fluid} , akışkanın bulk sabitleridir. \emptyset ise boşluk oranıdır.

Gassmann'ın eşitliği ile Biot'un (1956) eşitliği düzenlenerek izleyen formda yazılabilir:

$$K_{sat} = K_{dry} + \frac{(1 - K_{dry}/K_{matrix})^2}{\frac{\emptyset}{K_{fluid}} + \frac{1 - \emptyset}{K_{matrix}} - \frac{K_{dry}}{K_{matrix}^2}} \quad (4.6)$$

Eşitlik (4.1) ve (4.3) düzenlenerek izleyen eşitlikteki gibi yeniden yazılabilir:

$$K_{sat} = \rho_{sat}(V_P^2 - 4/3V_S^2) \quad (4.7)$$

K_{dry} , hazne kayaca akışkanın depolanması sırasında değişmediği kabul edilerek, eşitlik (4.6)'nın yeniden düzenlenmesiyle izleyen eşitlikteki gibi yazılabilmektedir (Zhu ve Mcmechan 1990).

$$K_{dry} = \frac{K_{sat}(K_{matrix} \emptyset / K_{fluid} + 1 - \emptyset) - K_{matrix}}{\frac{K_{matrix} \emptyset}{K_{fluid}} + \frac{K_{sat}}{K_{matrix}} - 1 - \emptyset} \quad (4.8)$$

İzleyen eşitlikte verilen K_{matrix} , VRH yönteminden (Hill 1952) hesaplanabilmektedir:

$$K_{matrix} = 1/2[(V_{mineral_1}K_{mineral_1} + V_{mineral_2}K_{mineral_2}) + (V_{mineral_1}/K_{mineral_1} + V_{mineral_2}/K_{mineral_2})] \quad (4.9)$$

Belirli oranda doygunluğa ulaşmış boşluklu kayacın yoğunluğu ρ_{sat} , izleyen eşitlikten elde edilebilmektedir:

$$\rho_{sat} = (1 - \emptyset)\rho_{matrix} + \emptyset\rho_{fluid} \quad (4.10)$$

Kayaç boşluğundaki akışkan birden fazla akışkanın bileşimi olduğu durumda ise yoğunluk ρ_{fluid} , izleyen eşitlikten hesaplanabilmektedir:

$$\rho_{fluid} = S_{brine}\rho_{brine} + S_{oil}\rho_{oil} + S_{gas}\rho_{gas} \quad (4.11)$$

Eşitlik (4.11)'de, S_{brine} , S_{oil} , S_{gas} , sırasıyla tuzluluk içeren suyun, petrolün ve gazın doygunluklarıdır. Sayısal ve fiziksel olarak toplamları bire eşit olmak durumundadır. ρ_{brine} , ρ_{oil} , ρ_{gas} , sırasıyla tuzluluk içeren suyun, petrolün ve gazın yoğunluklarıdır.

Boşluklu elastik kayacın mineral bileşiminin yoğunluğu ρ_{matrix} , izleyen eşitlikten hesaplanabilmektedir:

$$\rho_{matrix} = f_{mineral_1}\rho_{mineral_1} + f_{mineral_2}\rho_{mineral_2} \quad (4.12)$$

Eşitlik (4.12)'de, $f_{mineral_1}$ ve $f_{mineral_2}$ sırasıyla kayacı oluşturan iki farklı mineral türünün sayısal miktarlarıdır. Eğer örtü katmanı olarak bir şey kayacı kuartz ve kil minerallerinden meydana geliyorsa, $f_{kuartz} + f_{kil} = 1$ olarak tanımlanabilir ve bu minerallerin elastik dalga hızları ve sabitleri çizelge 4.1'deki gibidir. $\rho_{mineral_1}$ ve $\rho_{mineral_2}$ ise sırasıyla kayacı oluşturan minerallerin yoğunluklarıdır.

Çizelge 4.1 Kil ve kuartz minerallerinin elastik dalga hızları ve sabitleri (Mavko vd. 2009)

	Kil (Koalinit)	Kuartz
V_p (m/s)	1440	6050
V_s (m/s)	930	4090
ρ (g/cm ³)	1.58	2.65
K (GPa)	15	6
μ (GPa)	37	44

Hazne kayaçtaki akışkanın özelliklerinin belirlenmesi, açığa bağlı genlik değişimi modellerinde ve model genliklerinin yorumlanmasında da en önemli adımı oluşturmaktadır. Eldeki verinin amaca yönelik doğru analizi ile genlik bilgisinin ve akışkan modellerinin doğruluğu, kuyu konumunun belirlenmesi aşamasında yorumcuya, üretim aşamasında da doğrudan yüklenici organizasyona gerek zaman gerekse ekonomik anlamda büyük katkı sağlayacaktır. Gassmann'ın eşitliği gerçekten de bu amaç için elverişli olarak kullanılabilir niteliktedir ancak farklı akışkan türlerine bu eşitliği uygulayabilmek için ise her akışkan için girdi verilerinin bireysel olarak hesaplanması gerekmektedir. Bu tez kapsamında dört farklı akışkan modeli kullanılacağı belirtilmişti. Bu akışkan modellerini hazne kayaç içerisine yerleştirmeden önce diğer bir değişle Gassmann eşitliklerini doğrudan kullanabilmek için Batzle ve Wang (1992)'ın eşitliklerine ihtiyaç duyulmaktadır. Batzle ve Wang (1992), bu eşitlikleri hazne kayaçta birikimi en olağan üç farklı akışkan model için tanımladılar: gaz, petrol ve tuzluluk içeren su. Eşitlikler, akışkanın elastik özelliklerinin yanısıra yoğunluğu, hızı ve bulk sabitini, akışkanın basıncı ve sıcaklığının fonksiyonu olarak ortaya koymaktadır.

4.2 LMR ($\lambda\rho - \mu\rho$) Yöntemi

Yoğunlukları ile P - ve S - dalga hızları belirlenmiş bir hazne kayacın sismik empedansları eşitlik (2.15) ve eşitlik (2.16) kullanılarak hesaplanabilmektedir. Empedans değerleri ve yoğunluğu bilinen böyle bir kayacın ise elastik parametreleri birçok sayısal dönüşüm kullanılarak elde edilebilmektedir. Goodway (1997), Lamé sabitlerinin (λ , μ) kayaç içerisindeki akışkan hakkında anlamlı bilgi içerdiğini belirtti ve kayaç yoğunluğu ile Fatti vd. (1994)'nin P - ve S - dalgası empedansını elde etmekte kullandığı Zoeppritz yaklaşımını da kullanarak $\lambda\rho - \mu\rho$ 'yu izleyen eşitliklerle tanıttı:

$$I_P^2 = (\rho V_P)^2 = (2\mu + \lambda)\rho \quad (4.13)$$

$$I_S^2 = (\rho V_S)^2 = \mu\rho \quad (4.14)$$

$$\mu\rho = I_S^2 \quad (4.15)$$

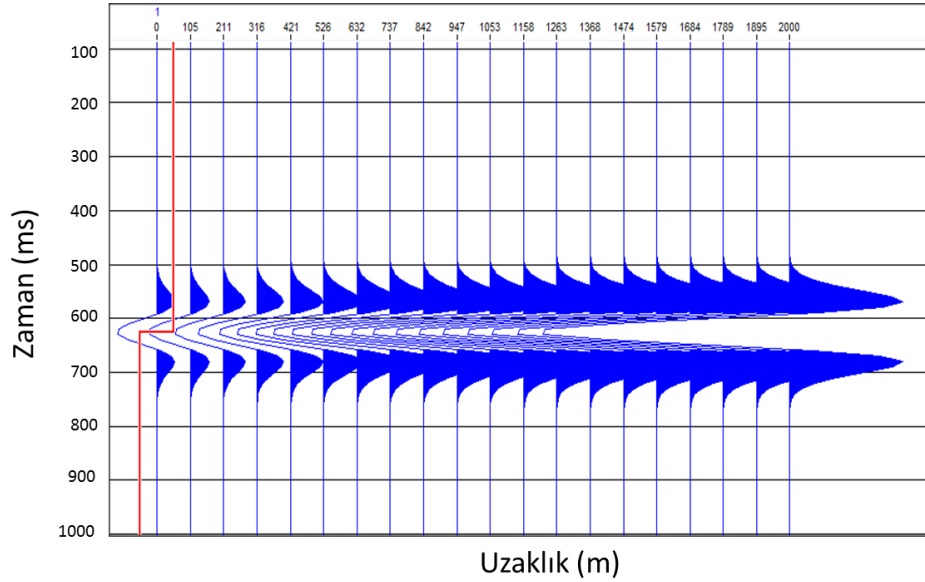
$$\lambda = V_P^2\rho - 2V_S^2\rho \quad (4.16)$$

$$\lambda\rho = I_P^2 - 2I_S^2 \quad (4.17)$$

Goodway (1997)'in çizelge 4.2'de verdiği iki katmanlı basit model, bu niteleyicilerin akışkan kestiriminde doğrudan kullanılabilir olduğunu gösterir niteliktedir. Model, örtü katmanı olarak şeyl, hazne kayaç olarak da kumtaşından oluşmaktadır. Model için hesaplanan yedi temel niteleyicinin yüzdelerik ortalama değişimleri de çizelge 4.2'de verilmektedir. Goodway'in modeli eğer sayısal olarak anlamlı ise, kuramsal olarak oluşturulmuş açılıma bağlı genlik değişimlerinde de bu gözlenmelidir. Bu nedenle böyle bir modelin açılıma bağlı genlik değişimi de modellenerek Şekil 4.1'de verilmektedir.

Çizelge 4.2 Goodway(1997)'nin iki katmanlı basit jeolojik modeli.

	Şeyl (örtü katman)	Kumtaşı (gazlı hazne)	Ortalama değişim (%)
V_p (m/s)	2898	2857	1.4
V_s (m/s)	1290	1666	25
ρ (g/cm ³)	2.425	2.275	6.4
V_p/V_s	2.25	1.71	27
$(V_p/V_s)^2$	5.1	2.9	55
σ	0.38	0.24	45
$\lambda + 2\mu$	20.37	18.53	9.2
μ (GPa)	4.035	6.314	44
λ (GPa)	12.3	5.9	70
λ/μ	3.1	0.9	110



Şekil 4.1 Çizelge 4.2'de verilen iki katmanlı basit jeolojik modeli için hesaplanan R_{PP} , yansımaya katsayıları kullanılarak hedef katman için elde edilmiş AVO kesiti

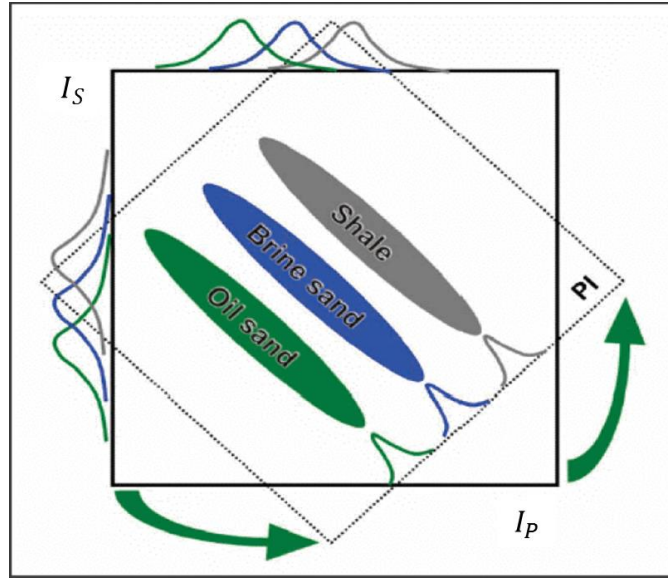
Şekil 4.1’de 35 Hz’lik bir Ricker dalgacıği kullanılarak maksimum açılım 2 km ye kadar toplamda 20 örnek için genliklerin değişimi gösterilmektedir. Açıkça görölmektedir ki gaz içeren kumtaşı hazne kayacının λ ve μ sabitlerinde gösterdiği gözle görülür değişim açılıma bağlı genlik değişimlerinde de gözlenmektedir.

4.3 Poisson Empedansı (PI)

Boşluklu kayaçtaki farklı akışkan türlerini belirlenmesinde P - ve S - empedanslarının birlikte grafiklenmesi yaygın olarak kullanılmaktadır. Eşitlik (4.18)’de verilen Poisson Empedansı (PI) (Quackenbush vd. 2006), sismik empedansları kullanarak poisson ve yoğunluk değerlerini tek bir eşitlikte birleştiren bir doğrudan hidrokarbon belirteci olarak kullanılabilir.

$$PI = I_P - cI_S \quad (4.18)$$

Eşitlik (4.18) verilen c , Şekil 4.2’de gösterildiği üzere sismik empedansların birlikte grafiklendiği ortamın uzaysal konumlarını en iyi şekilde ayarlamayı sağlayan sabittir.



Şekil 4.2 Şeyl (shale), tuzlu su (brine), petrolü kum (oil sand) için sismik empedanslar ile PI arasındaki şematik ilişki (Quackenbush vd. 2006)

Eşitlik (4.18)'de verilen c sabitinin gerek kullanılan veri gerekse içerdiği akışkanın modellenmesi açısından Quackenbush vd. (2006)'den önce de birçok değerli bilimci tarafından araştırılmış ve olası sonuçları yayınlanmıştır, Hedlin 2000, Hiltermann 2001, Dillon vd. 2003, Russel vd. 2003. Her bir araştırmacı c sabitinin gerek akışkan türüyle, gerekse kayacın fiziksel yapısıyla ilişkili olduğunu göstermiş ve örneklemiştir. Tez kapsamında c sabiti, PI dahilinde önerilen yöntem ile hesaplanacaktır. Bu yöntem, P - ve S - dalgaları için hesaplanan sismik empedanslar arasındaki doğrusal ilişkiyi en iyi tanımlayan doğru denkleminin eğiminin bire bölünmesinden c sabitinin elde edilmesi şeklindedir.

4.4 Lambda – Poisson Empedansı (λPI)

V_P/V_S kullanılarak Poisson oranı izleyen eşitlikle tekrar yazılabilmektedir:

$$\sigma = \frac{V_P^2 - 2V_S^2}{2(V_P^2 - V_S^2)} \quad (4.19)$$

Eşitlik (4.19) düzenlenerek yeniden izleyen eşitlikle yazılabilir:

$$\sigma = \frac{(V_P + \sqrt{2}V_S)}{2(V_P^2 - V_S^2)} (V_P - \sqrt{2}V_S) \quad (4.20)$$

Eşitlik (4.18)'de verilen empedans değerleri yeniden düzenlenerek izleyen eşitlikle yazılabilir:

$$PI = \rho(V_P - cV_S) \quad (4.21)$$

Eşitlik (4.21)'de c sabitinin $\sqrt{2}$ 'ye eşit olduğu durumda eşitlik (4.20) ve eşitlik (4.21), taraf tarafa sayısal olarak bölünürse:

$$\frac{PI}{\sigma} = \frac{2\rho(V_P^2 - V_S^2)}{(V_P + \sqrt{2}V_S)} \quad (4.22)$$

Eşitlik (4.22)'de PI ile σ arasındaki ilişki ρ , V_P ve V_S ile ortaya koyulmaktadır.

Bölüm 4.2'de verilen LMR yöntemindeki eşitlik (4.16), λ sabitini ortaya koymaktaydı. Eşitlik (4.16) izleyen eşitlikle yeniden düzenlenerek yazılabilir:

$$\frac{\lambda}{\rho} = (V_P - \sqrt{2}V_S)(V_P + \sqrt{2}V_S) \quad (4.23)$$

Bu aşamada bir sorunun cevabını akılda tutmak gerekir; “peki temelde lambda neyi ifade eder?”. Lambda, kayaç fiziğinde kırılmanın bir ölçütüdür, daha da teknik anlamda kayacın gevrekliğini tanımlamaktadır. Daha da önemlisi, kayacın maruz kaldığı elastik dalga kuvveti altında, kayaçta meydana gelen temel gerilme ve yamulma bileşenleri arasındaki ilişkiyi tanımlayan eşitliklerdeki iki temel bileşenden biridir. Öte yandan sayısal olarak, Poisson sabiti ve Young Modülü (E)'yle doğrudan ilişkilidir ve izleyen eşitlikle de tanımlanabilmektedir:

$$\lambda = \frac{\sigma E}{(1 + \sigma)(1 - 2\sigma)} \quad (4.24)$$

Eşitlik (4.23)'ün ikinci terimi eşitlik (4.22)'de yerine koyulduğunda izleyen eşitlik yazılabilir:

$$\lambda PI = 2\rho^2 \sigma (V_P^2 - V_S^2)(V_P - \sqrt{2}V_S) \quad (4.25)$$

Eşitlik (4.25)'de boşluklu kayaçtaki akışkan hakkında anlamlı bilgi içeren üç farklı parametre, σ , λ ve PI arasındaki ilişki ortaya koyulmaktadır. Öyle ki, σ , akışkanlığın, λ , kayacın gevrekliğinin, PI 'ın da sismik empedansların -doğrudan kayaç hız ve yoğunluklarının tek bir eşitlikte birleşerek grafiklendiği uzayı konumlandırmakta- bir ölçütü olduğu ve bu üç parametrenin tek bir eşitlikte birleştiği fikri λPI sabitinin bir sismik niteleyici olarak kullanılabilmesinin önünü açmaktadır. Bu niteleyici, ileriki bölümlerde gerek deneysel gerekse saha veri grubu ile örneklenecektir.

5. DENEYSEL VERİ GRUBU ÇALIŞMALARI

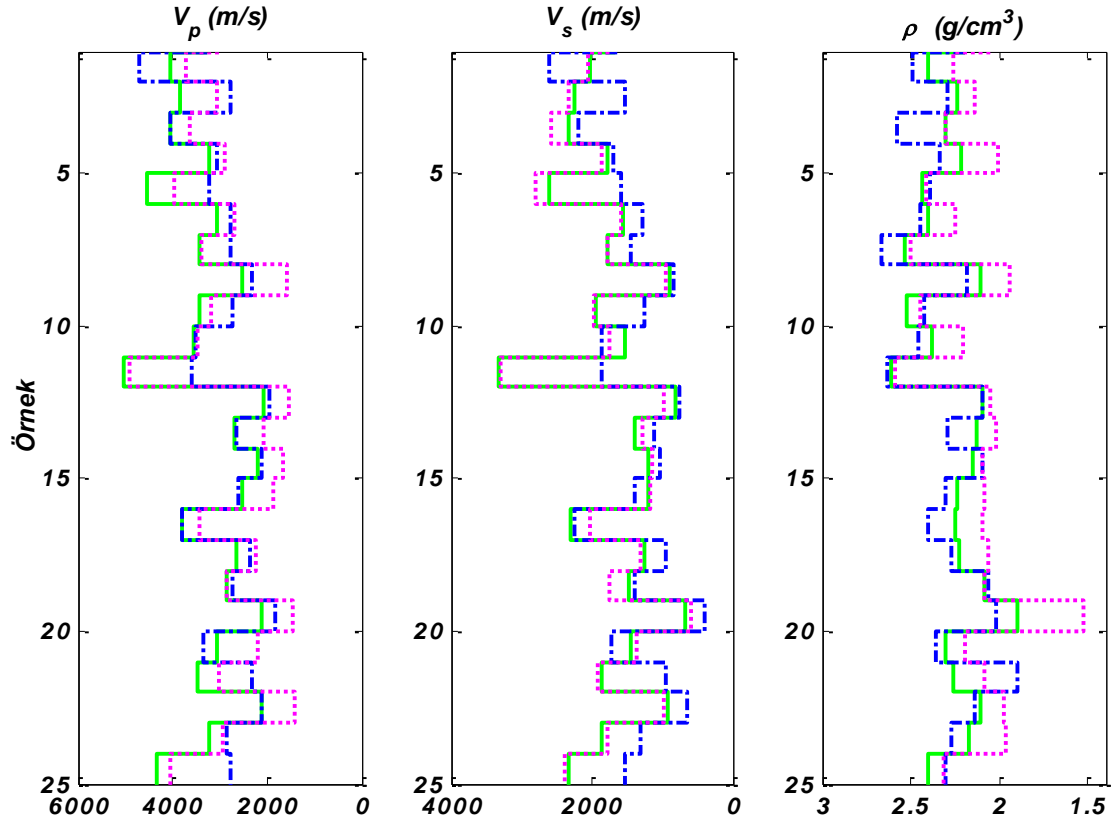
Bölüm 4.1’de boşluklu elastik hazne kayaçta depolanan akışkanın modellenmesinde hazne kayacın içerdiği boşluk oranı, kayaç yapısı ve kayaç parçacıklarına etki eden basıncın önemi kuramsal olarak açıklanmıştı. Bu parametrelerin hazne kayaç hız ve yoğunlukları ile ilişkisi sayısal olarak deneysel bir çalışma ile araştırılmıştır. Model veri grubu için Han vd. (1986)’in veri grubu kullanılarak kil içermeyen temiz kumtaşları ve killi kumtaşlarında, boşluk oranı, kil içeriği ve basıncın sismik hızlara etkisi ortaya konmuştur (bakınız EK 3). Buna göre şu gözlemler yapılmıştır:

- Kayaç boşluk oranının artımı ile sismik hızlar azalmaktadır. Kayaç boşluk oranı V_P ’ye oranla V_S ’yi daha çok etkilemektedir.
- Kayacın kil içeriğinin artması sismik hızların azalmasına sebep olmaktadır. Bununla birlikte, hazne kumtaşları üzerinde yapılmış olan araştırmalar, kil mineralinin kayaç taneleri arasındaki bağı zayıflattığı ve bulk sabitini düşürerek, kayaç dalga hızlarını azalttığını göstermektedir (Castagna vd. 1985, Miller ve Stewart 1990)
- Kayaca uygulanan basınç ile kayaç boşluk basınç arasındaki farkın artışı, her iki dalga hızının (V_P , V_S) da artışına sebep olmaktadır (Wylie vd. 1958, Todd ve Simmons 1972;, Han vd. 1986, Eberhart-Phillips vd. 1989, Best 1997)

5.1 Castagna (1994) Veri Grubu Deneysel Çalışması

Dünyanın farklı bölgelerindeki gazlı kum, tuzlu sulu kum ve şeyl kayaç türleri için toplanmış olan veri grubu 25 farklı P - ve S - dalga hızları ile kayaç yoğunluk değerlerini içermektedir. Veri grubunu oluşturulmasında, tam dalga formu sonik, dipol sonik ve geleneksel kuyu logu ve/veya laboratuvar çalışmaları kullanılmıştır. Bu deneysel çalışmasının amacı kayaç elastik sabitleri ve sismik niteleyicilerin kullanımı ile gazlı kumtaşlarından tuzlu sulu kumtaşlarının ayrımlılığı ya da doğrudan bu iki akışkan türünün ayrımlılığı gösterilecektir. Bunun yanı sıra şeyl biriminin de akışkan içeren içeren

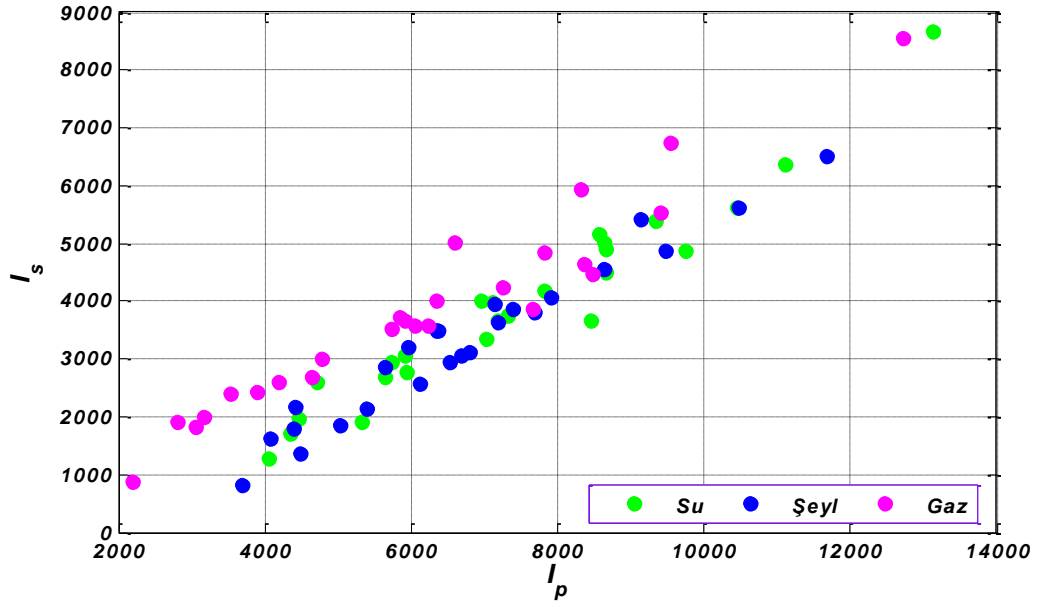
kumtaşından ayrımlılığı da yine benzer şekilde ortaya konulacaktır. Veri grubunun hız ve yoğunluk değerleri Şekil 5.1’de verilmektedir.



Şekil 5.1 Castagna (1994)'nin 25 adet veri grubu.

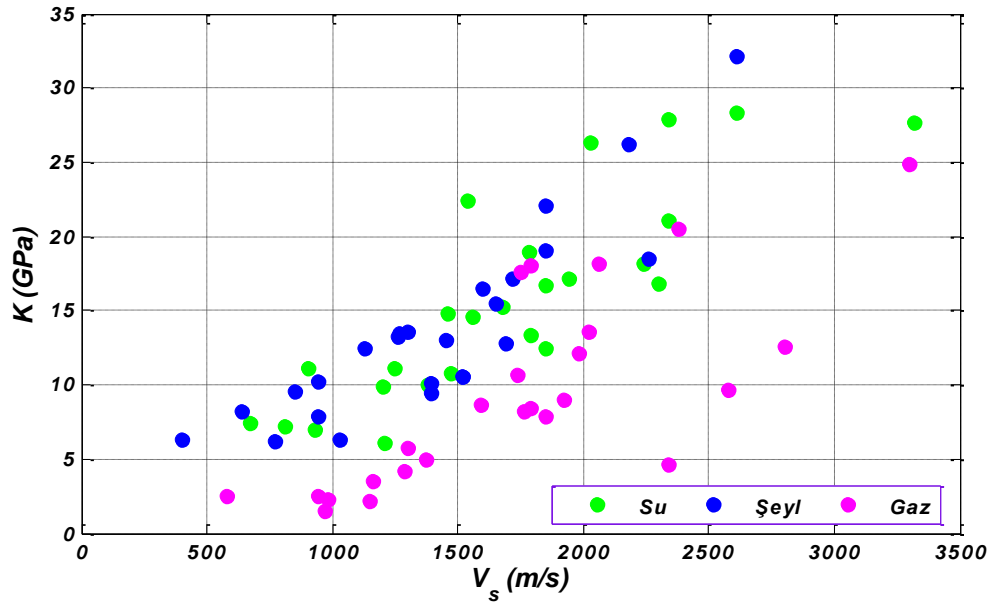
Tuzluluk içeren sulu kumtaşı, şeyl ve gazlı kum, sırasıyla, yeşil, mavi ve macenta renkleriyle gösterilmektedir

Giriş bölümünde ve sonrasındaki bölümlerde, farklı akışkan ve kayaç türlerinin ayırt edilmesinde elastik sabitlerin kullanabileceği savunulmaktaydı. Tezin amacına uygun olarak öncelikle veri grubunun sismik empedansları hesaplanmış (Şekil 5.2), ardından da kayaç bulk ve Lamé sabitleri de hesaplanarak birbirleriyle ilişkilendirilmiştir. Daha sonraki aşamada, verilerin *PI* değerleri hesaplanmış ve farklı elastik sabitlere göre değişimleri grafiklenerek gazlı kumtaşının, şeyl ve tuzluluk içeren sulu kumtaşından ayırt edilebilirliği araştırılmıştır.



Şekil 5.2 Veri grubunun $I_p - I_s$ ((m/s)(gr/cm³)) değişim grafiği

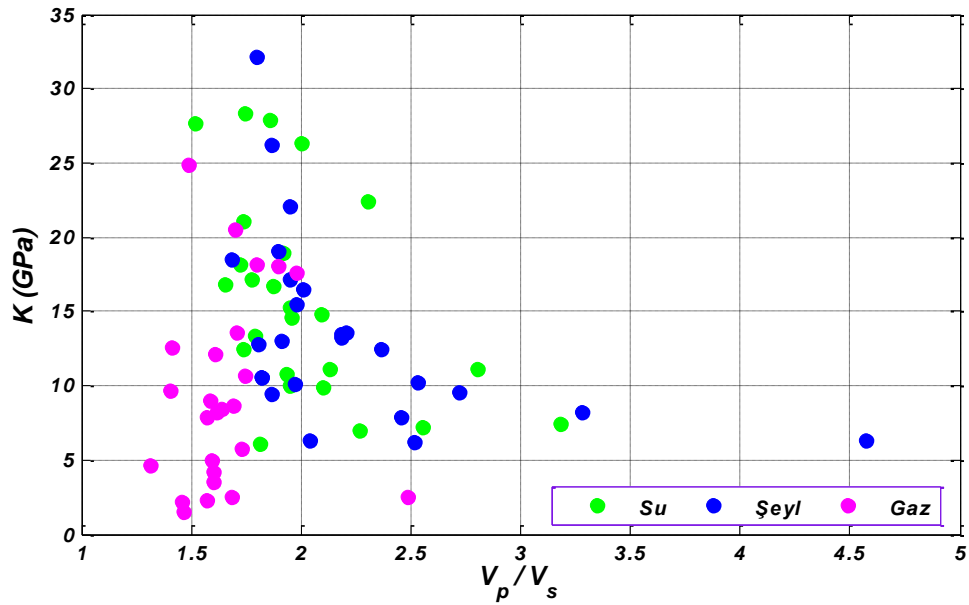
Şekil 5.2’de verilen grafiğe bakıldığında kuramsal olarak da beklenildiği üzere her üç farklı jeolojik birim için I_p ve I_s arasında doğrusal bir ilişki gözlenmektedir. Burada sayısal değerlerin göstermiş olduğu eğilimin birbirine çok yakın olduğu gözlenmektedir.



Şekil 5.3 Veri grubunun $K - V_s$ değişim grafiği

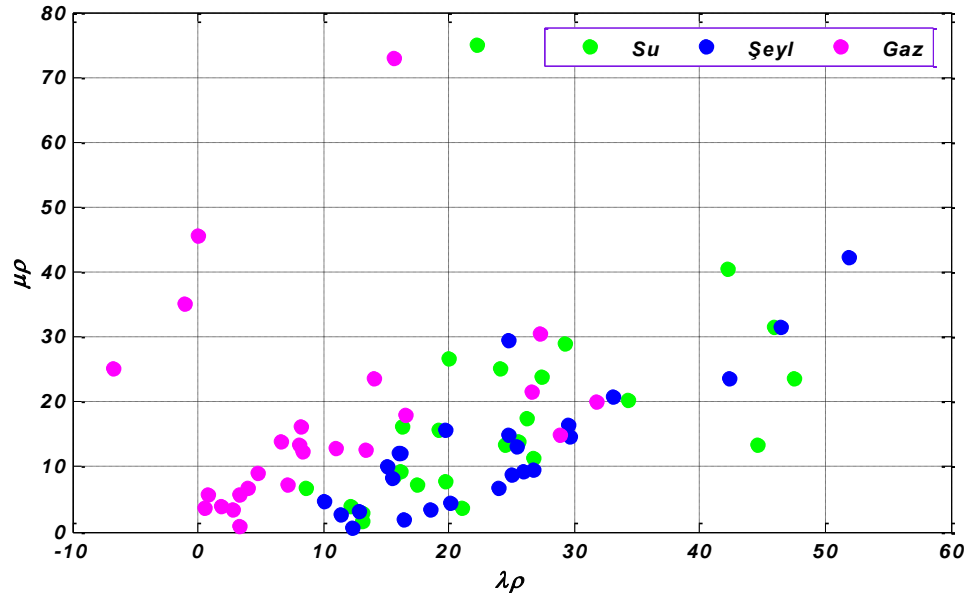
Daha önceki bölümlerde, V_S 'nin akışkan hakkında içerdiği bilginin V_P 'ye oranla daha anlamlı olduğu belirtilmişti. Bununla birlikte bulk sabitinin kayaç ve kayacın içerdiği boşluk oranıyla ilişkisi kuramsal olarak açıklanmıştı. Eğer ki kayaç boşlukları akışkana belirli oranda doygunsa bulk sabiti doğrudan etkilenmelidir. Bu nedenle ilk olarak V_S 'nin bulk katsayısıyla değişimi grafiklenerek gazlı kumtaşının ayrırlılığı araştırılmıştır (Şekil 5.3).

Çizelge 4.2'den hatırlanacak olursa, gazlı kumtaşı ile şeyl için elde edilen V_P/V_S oranının değişimi azımsanamayacak değerdedir. Bu nedenle V_P/V_S oranının K , ile değişimi grafiklenerek gazlı kumtaşının ayrırlılığı araştırılmıştır (Şekil 5.4). Gazlı kumtaşının belirli bir alanda kümelenmesi $K - V_S$ değişim grafiğine oranla gözle görülür oranda artış göstermektedir.



Şekil 5.4 Veri grubunun $K - V_P/V_S$ değişim grafiği

Bir sonraki adımda veri grubunun $\lambda\rho - \mu\rho$ değerleri hesaplanarak gazlı kumtaşının ayrırlılığı araştırılmıştır (Şekil 5.5). Dört sayısal değer dışında, gazlı kumtaşı değerlerinin şeyl ve tuzluluk içeren kumtaşı değerlerinden ayrılıp grafiğin sol tarafında toplandığı, şeyl ve tuzluluk içeren kumtaşı değerlerinin ise grafiğin sağ tarafında kümelenmesi gözlenmektedir.



Şekil 5.5 Veri grubunun $\lambda\rho - \mu\rho$ ((GPa)(gr/cm³)) değişim grafiği

Bölüm 4.3'te PI kuramsal olarak tanımlanmış ve doğrudan hidrokarbon belirteci olarak kullanılabilmesi belirtilmişti. PI değerlerinin hesaplanabilmesi için c sabitinin hesaplanması gerekmektedir. Bunun için her bir jeolojik birimin I_p ve I_s değerleri hesaplanarak grafiklenmiştir (Şekil 5.6). Ardından veri grubuna en iyi modelleyen doğru en küçük kareler yöntemiyle hesaplanmıştır. Doğrunun 1/eğimi c katsayısına eşittir ve eşitlik (4.18)'de doğrudan kullanılabilir. Buna göre veri grubunun c katsayıları izleyen eşitliklerdeki gibidir:

Tuzluluk içeren sulu kumtaşı:

$$y_1 = 0.704493x_1 - 1327.49 \quad (5.1)$$

$$c_1 = 1/0.704493 \quad (5.2)$$

Şeyl:

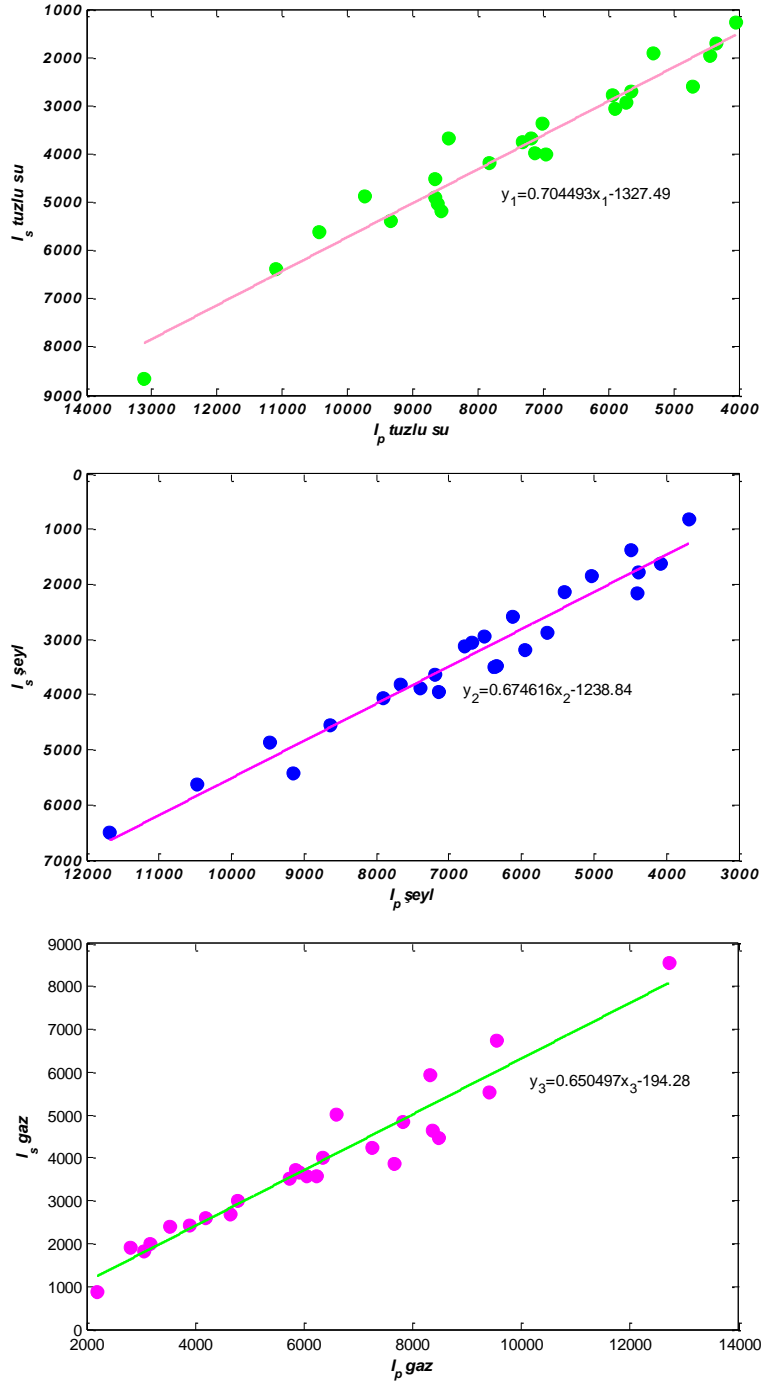
$$y_2 = 0.674616x_2 - 1238.84 \quad (5.3)$$

$$c_2 = 1/0.6746156 \quad (5.4)$$

Gazlı kumtaşı:

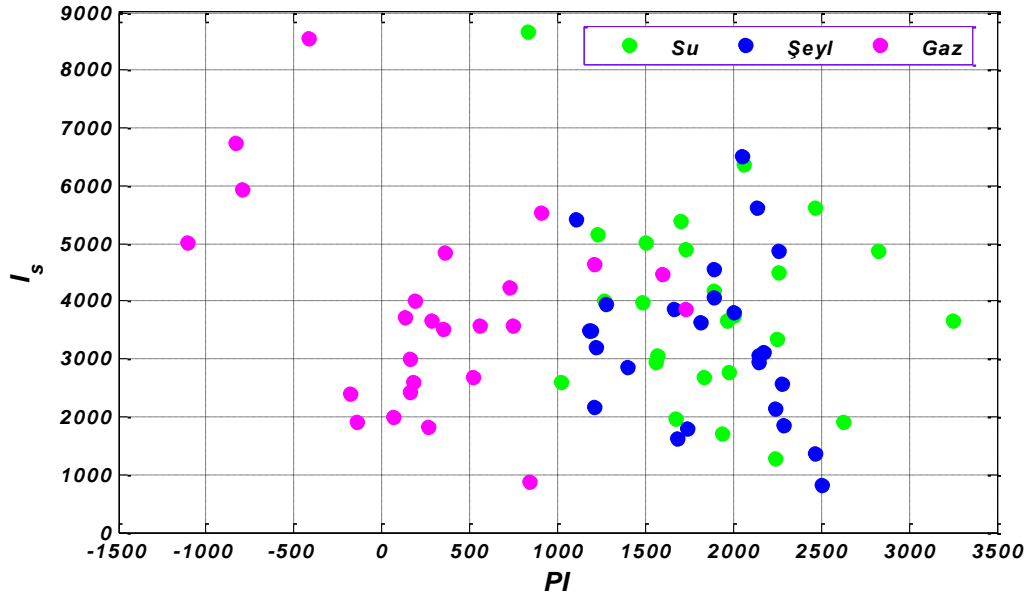
$$y_3 = 0.650497x_3 - 194.28 \quad (5.5)$$

$$c_3 = 1/0.650497 \quad (5.6)$$

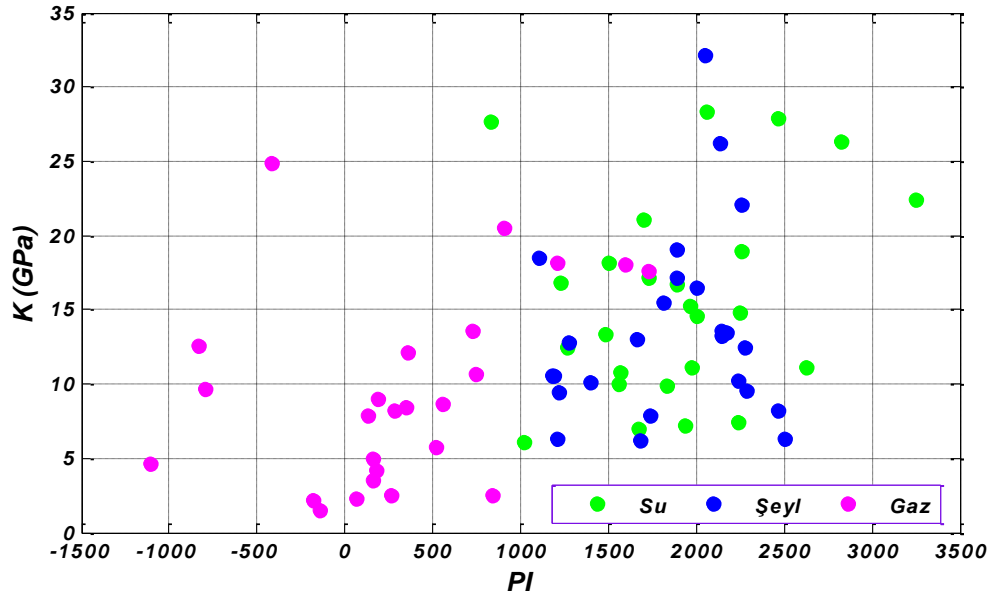


Şekil 5.6 Veri grubunun, hazne kayacın tuzlu su içerdiği, gaz içerdiği, şeyl olması durumdaki $I_p - I_s$ grafikleri

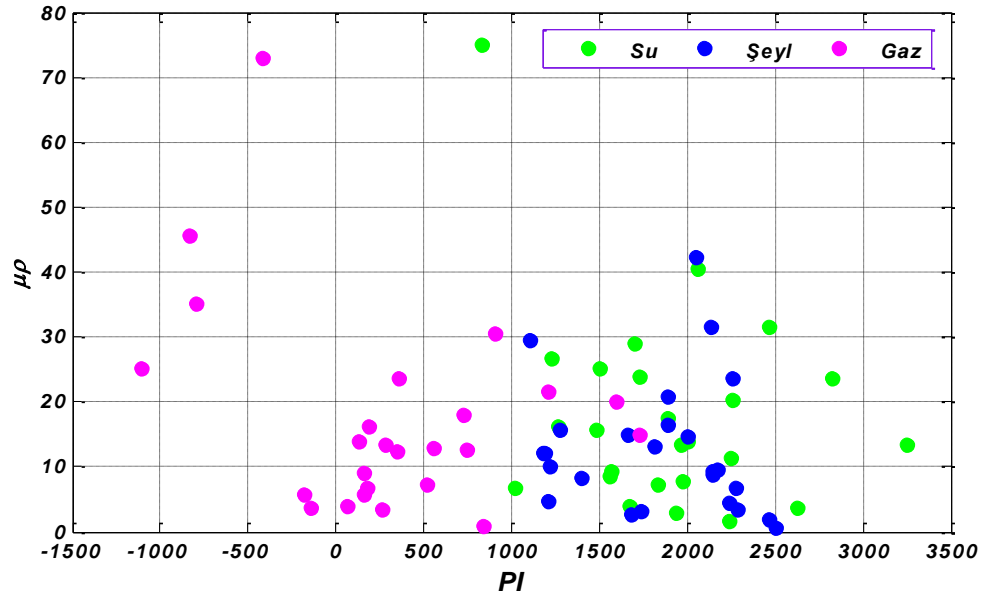
Bu aşamada, hangi elastik sabitin PI ile ilişkisi doğrudan hidrokarbon belirteci olarak kullanılabilirliğini araştırmak için öncelikle PI değerlerinin I_s ile değişimi grafiklenmiştir (Şekil 5.7). Ardından da K , $\mu\rho$ ve $\lambda\rho$ değerleriyle PI değerlerinin değişimi grafiklenmiştir (Şekil 5.8-5.10).



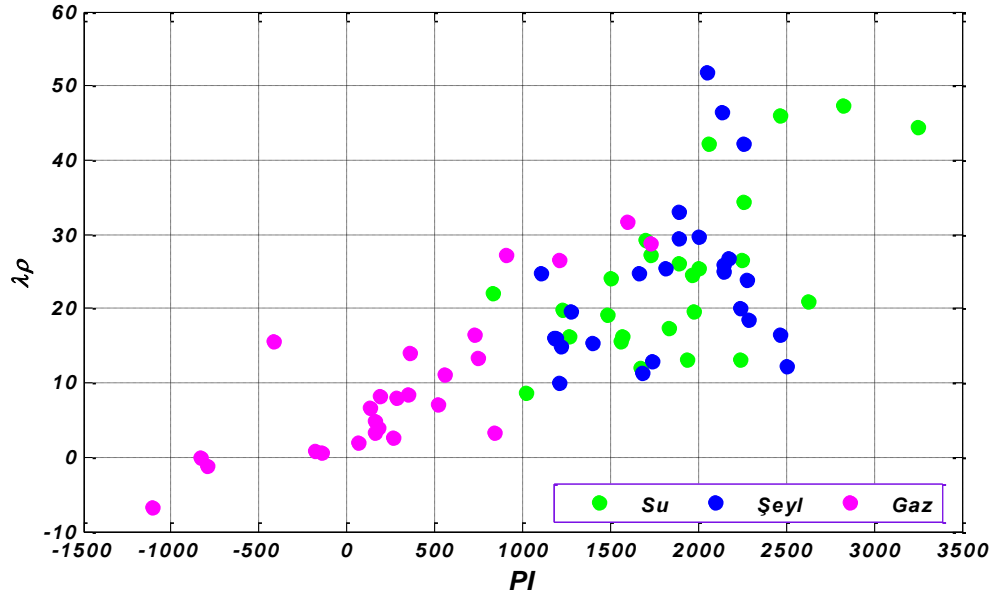
Şekil 5.7 Veri grubunun $PI - I_s$ değişim grafiği



Şekil 5.8 Veri grubunun $PI - K$ değişim grafiği

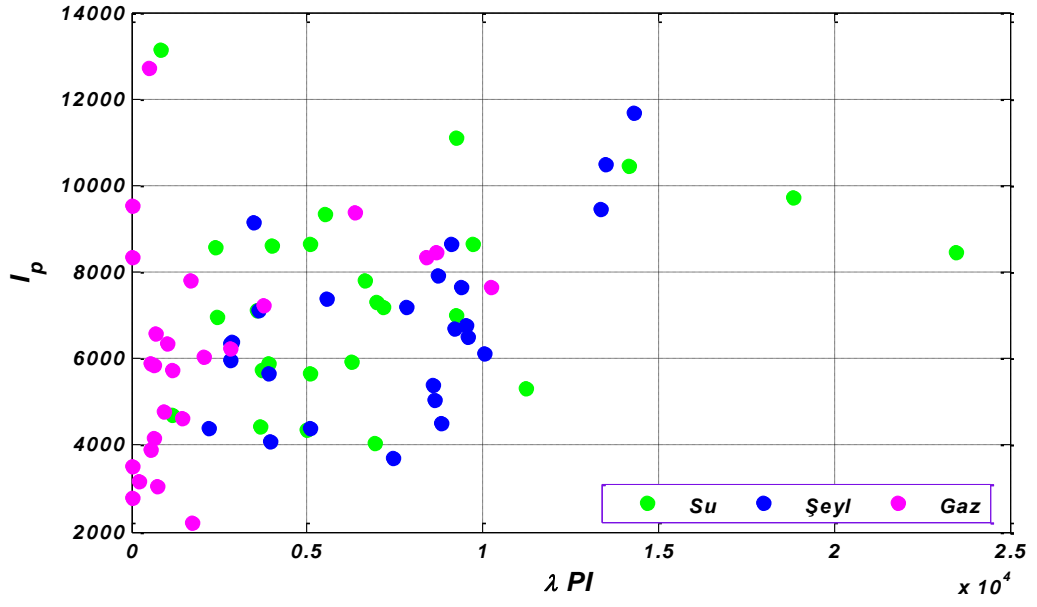


Şekil 5.9 Veri grubunun $PI - \mu\rho$ değişim grafiği

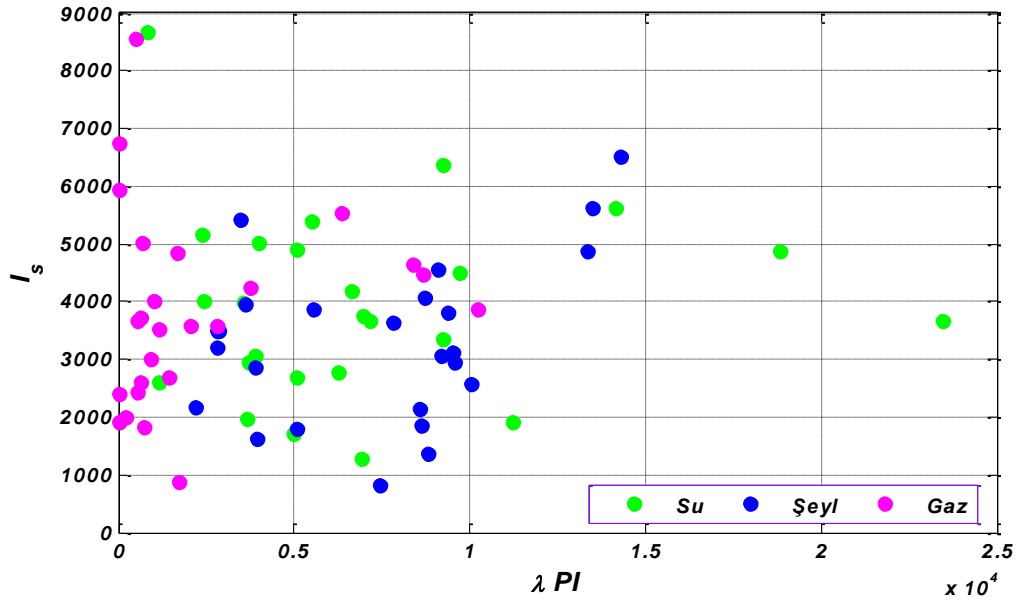


Şekil 5.10 Veri grubunun $PI - \lambda\rho$ değişim grafiği

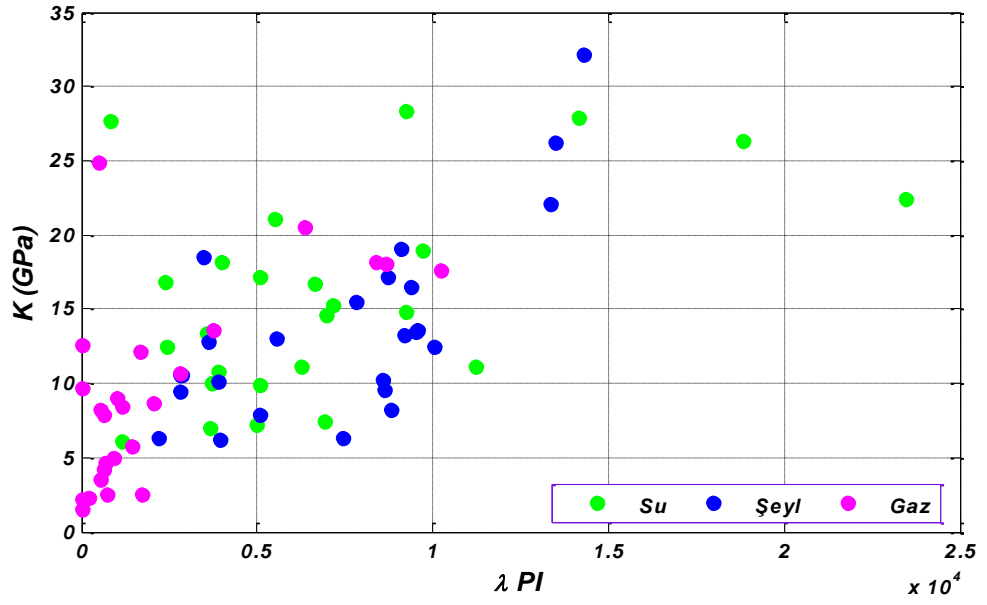
Bölüm 4.4'te lambda ve poisson empedansının (λPI) ilişkisi kuramsal olarak verilmişti. Veri grubunun son olarak λPI değerleri sayısal olarak hesaplanarak I_p, I_s, K ve PI değerleri ile değişimi grafiklenerek akışkan türünün ayrırlılıığı araştırılmıştır (Şekil 5.11-5.14).



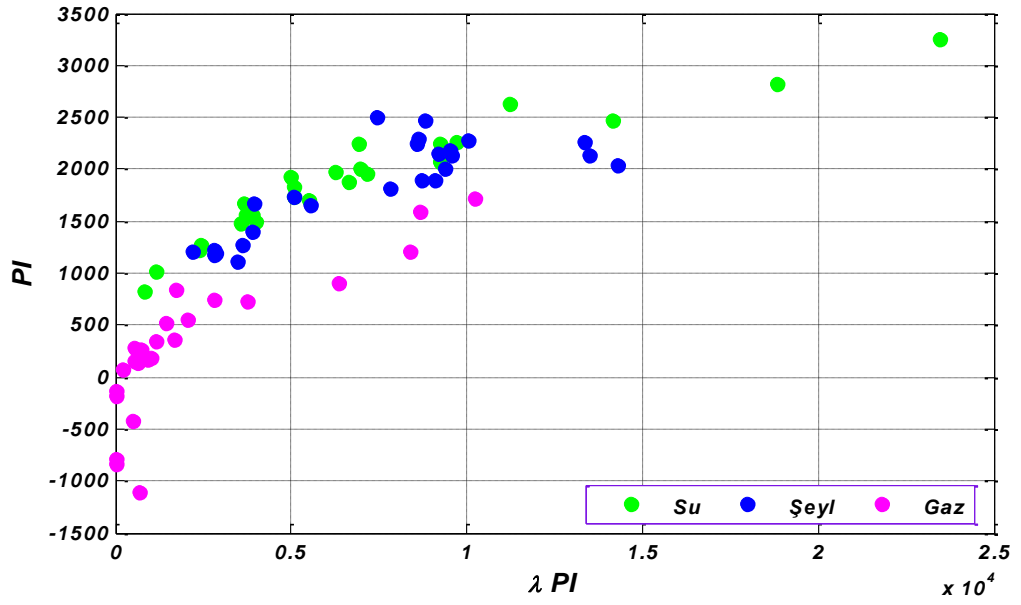
Şekil 5.11 Veri grubunun $\lambda PI - I_p$ değişimi



Şekil 5.12 Veri grubunun $\lambda PI - I_s$ değişimi



Şekil 5.13 Veri grubunun $\lambda PI - K$ değişimi



Şekil 5.14 Veri grubunun $\lambda PI - PI$ değişimi

Endüstride yansıma sismolojisi ile kaydedilen sismik veriden, her zaman için elastik dalgaının yayılım gösterdiği hedef katmana ait üç temel parametrenin (V_p, V_s, ρ) en doğru değerlerde elde edilmesi amaçlanmaktadır. Castagna (1994) verisi üzerinde yapılan deneysel çalışma da tamamen veri grubunun içerdiği bu üç temel parametrenin akışkan modellenmesinde kullanılabilir nitelikte olmasından kaynaklıdır. Bu nedenle veri grubu

üzerinde yapılan deneysel hesaplamaların sonuçları grafiklenerek hazne kayaçtaki farklı akışkan türlerinin birbirinden ayrımlılığı araştırılmıştır. İlk olarak veri grubunun sismik empedansları I_P ve I_S hesaplanarak grafiklenmiştir (Şekil 5.2). Üç farklı jeolojik modelinde birbirinden ayırt edilemeyecek kadar yakın bir eğilim içerisinde olduğu gözlenmektedir. Bir sonraki adımda V_S değerleri ile hesaplanan K değerleri birlikte grafiklenerek amaç ayrımlılık araştırılmıştır (Şekil 5.3). Her ne kadar gazlı kum değerlerinin diğer iki jeolojik birimden ayrımlılığı çok belirgin olmasa da Şekil 5.2'ye oranla daha belirgin bir eğilimle ayrımlılık gözlenmektedir. Şekil 5.4'te K değerlerinin V_P/V_S oranıyla değişimi grafiklenerek gazlı kumun ayrımlılığındaki değişim araştırılmıştır. Bu grafikte göze çarpan en önemli özellik gazlı kum değerlerini diğer iki jeolojik birime göre karşıt meyil gösterdiğidir. Bu aşamaya kadar ki hesaplanan ve grafiklenen parametreler endüstride yaygın olarak kullanılan ve sonuçlarının güvenilirliği açısından kabul görmüş parametrelerdir. Bu aşamadan sonraki parametreler son 20 yıl içerisinde geliştirilmiş olan yöntemlerin birer sonucudur. İlk olarak bölüm 4.2'de verilen LMR yöntemi kapsamında $\lambda\rho$, $\mu\rho$ parametreleri hesaplanarak grafiklenmiştir (Şekil 5.5). Öyle ki bu grafik üzerindeki gazlı kum birimlerine ait sayısal değerlerin diğer iki jeolojik birim olan tuzluluk içeren sulu kumtaşı ve şeyle oranla daha düşük $\lambda\rho$ değerleri gösterdiği, ayrıca gazlı kum birimine ait sayısal değerlerin birlikte toplanarak gösterdiği eğilin diğer iki jeolojik birimden ayrıldığı gözlenmektedir. LMR yönteminin başarısı gazlı kumtaşlarında gösterdiği ayrımlılıktan dolayı endüstride kabul görmüş ve halen yaygın olarak kullanılmaktadır. İkinci olarak bölüm 4.3'te verilen PI in geleneksel elastik parametrelerle değişiminden gazlı kum biriminin ayrımlılığı araştırılmıştır. Bu nedenle öncelikli olarak I_S değerlerine göre PI değerleri grafiklenmiştir (Şekil 5.7). PI in daha da önemlisi hesabında kullanılan c sabitinin önemi bölüm 4.3'te belirtilmişti. Şekil 5.7'ye bakıldığında gazlı kum değerlerinin grafiğin sol tarafında toplandığı gözlenmektedir. Gerçekten de kayda değer bir ayrımlılığın söz konusu olduğu bu grafikte, PI in başarısı göz ardı edilemeyecek orandadır. Daha sonraki adımda yine PI değerleri K , $\lambda\rho$ ve $\mu\rho$ 'ya göre grafiklenerek gazlı kumtaşı ayrımlılığına etkileri araştırılmıştır (Şekil 5.8-5.10). Her üç grafikte de gazlı kumtaşının ayrımlılığı Şekil 5.5'teki gibi başarılı biçimde gözlenmektedir. Bu nedenle PI in hidrokarbon içeren kum birimlerinin ayırt edilmesinde başarılı biçimde kullanılabileceği açıkça görülmektedir. Son olarak bölüm 4.4'te verilen λPI , yeni bir boşluk akışkanı sismik niteleyicisi olarak gazlı kum birimlerinin

ayrımllığına etkisi araştırılmıştır. Bu amaçla λPI değerleri hesaplanarak sırasıyla hesaplanan I_p, I_s, K ve PI sayısal değerleriyle birlikte grafiklenmiştir (şekil 5.11-5.14). Belirgin olarak önceki grafiklere oranla önemli bir unsur göze çarpmaktadır. Buna göre, gazlı kum birimlerine ait sayısal değerler, λPI eksenini üzerindeki sıfır noktasını kesen hayali bir düşey düzlem üzerinde toplanmaktadır. Bununla birlikte diğer iki jeolojik birim olan tuzluluk içeren sulu kumtaşı ve şeyle ait sayısal değerlerin bu hayali düşey düzlemden kaçarcasına bir eğilim gösterdiği gözlenmektedir.

5.2 Akışkana Doygun Boşluklu Hazne Kayaç İçin Gassmann Kuramının Pratikte Kullanımı

Bölüm 4.1’de Gassmann kuramı eşitliklerle açıklanmış, hazne kayaçtaki farklı akışkan türleri için kayaç elastik sabitlerinin elde edilmesinde kullanılabileceği belirtilmişti. Bu bölümde Gassmann kuramı ile hazne kayaçtaki boşluklara konumlanmış farklı akışkan türleri için kayaç hız ve yoğunluk değerleri hesaplanarak, sismik genliklere olan etkisi araştırılacaktır. Bu amaçla dört farklı akışkan modelleneyecektir. Bunlar öncelikli olarak ekonomik değere sahip olan gaz, ardından da petrol, tuzlu su ve içerisinde çözülmüş gaz barındıran ve ekonomik değeri olmayan tuzlu su (fizz) modelleridir. Giriş bölümünde, pratikte *PS*- dalgası kayıtlarına oranla gerek maliyet gerekse veri işlem açısından *PP*- dalgası kayıtlarının AVO analizinde daha yaygın kullanıldığından bahsetmiştik. Bu nedenle endüstride yaygın olarak jeolojik hazne kayacın yapısına göre *S*- dalga hızları *P*- dalga hızlarından türetilmektedir. Gassmann kuramından hatırlanacak olursa, kuram üç temel yaklaşım içermekteydi: hazne kayaç homojen, yön-bağımsız ve kayaç içerisindeki boşluklar tamamen birbirine bağlı olup içerisindeki akışkan hareket edebilmelidir. Burada akışkanın hareket etmesi eyleminin biraz daha açık bir biçimde ne anlama geldiği anlaşılmalıdır. Hazne kayaç boşluklarında biriken akışkanın neden olduğu boşluk basıncının, elastik dalganın kayaca etki etmeye başladığı ana kadarki süreçte serbest alan boyunca dengeye gelmesi gerekmektedir ki Gassmann kuramı başarılı olarak uygulanabilsin. Bu nedenle kuramın geçerliliği için yerinde kaydedilmiş ve 100 Hz’den daha küçük sismik kayıtlara ihtiyaç duyulmaktadır. Bunun yanı sıra arama amaçlı yapılan yansıma sismolojisi verilerinin de 10-100 Hz aralığında olduğu kabul edilmektedir. Eğer ki arama yapılan sahada hedef derinliğe kadar kaydedilmiş *S*- dipole log verileri var ise bu sayısal verilerin Gassmann eşitliğindeki uygulaması daha az başarılı olacaktır, sonik log kayıtlarının yaklaşık 1000 Hz civarında uygulandığı hatırlanacak olursa.

Greenberg ve Castagna (1992) *S* dalgasının *P*- dalgasından kestirimine olanak sağlayan deneysel bağıntıyı (eşitlik 5.7) dört jeolojik birim için (kumtaşı, kireçtaşı, dolomit ve şeyl) tanımladı (Çizelge 5.1). Bu jeolojik birimlerden kumtaşı hazne kayaç olarak kullanılırken, şeyl de örtü katmanı olarak yapay jeolojik model için kullanılacaktır.

$$V_S = a_{i2}V_P^2 + a_{i1}V_P + a_{i0} \quad (5.7)$$

Oluşturulan yapay jeolojik model için dört farklı akışkan modellenecek ve elde edilen hız ve yoğunluk değerleri kullanılarak açığa bağlı genlik değişimleri hesaplanacaktır. Burada amaç, hazne kayaçta konuşlanması olası farklı akışkan türlerinin AVA analizi ile ayrımlılığının araştırılmasıdır.

Kuyu konumunun belirlenmesinden önceki aşamada, sismik verilerin yorumunda her zaman için destekleyici ileri veri işlem yöntemlerinden yararlanılmaktadır. AVA yöntemi de bu yöntemlerden biri olarak endüstride yaygın olarak kullanılmaktadır. Meksika Körfezi dünyanın en önemli hidrokarbon üretim havzalarından biri olarak kabul edilmektedir. Günümüzde hala faal olarak arama ve üretim yapılan Meksika Körfezi'nde karşılaşılan önemli bir soruna odaklandığımızda, hazne kayaçtaki düşük gaz doygunluğuna sahip hazneler her zaman yorum aşamasında sorun teşkil etmiştir. Ekonomik açıdan değersiz kabul edilen bu haznelerin yorum aşamasında ayırt edilmesi önemli bir ekonomik kazanç sağlamaktadır ve bu jeofiziğin günümüzde dahi önemli problemlerinden biridir. Meksika Körfezi'ndeki araştırmalar gösteriyor ki içerisinde ekonomik açıdan değerli (örneğin; % 70-80 gaz doygunluğuna sahip) haznelerin sebep olduğu *P*- dalgasındaki ani düşüş ve açılımla değişen belirgin genlik değerlerinin, içerisinde az miktarda gaz yoğunluğu içeren (Örneğin; % 10-15 gaz doygunluğuna sahip) tuzlu su haznelerinininki ile belirgin bir farklılık göstermemektedir. Özellikle pekişmemiş tortullarda gözlemlenen böyle bir problem için genlik analizi doğrudan hidrokarbon belirteci olarak kullanılamamaktadır (Hilterman ve Liang 2003). Öncelikle bu bölüm içerisinde bahsi geçen bu ikilemin genliklerde verdiği değişim AVA analizi üzerinde örneklenecektir. İkinci aşamada sorunun çözümüne yönelik önceki bölümlerde verilen yöntem ve sismik niteleyicilerin kullanımının çözüme katkısı örnekler üzerinden tartışılacaktır. Endüstride yakın ve uzak açılımın genlik bilgisine olan etkisi bilinmekte ve her zaman için yorum aşamasında kullanılmaktadır. Bölüm içerisinde oluşturulan yapay jeolojik modellerin sınır ara yüzeye varış açısına göre genliklerinin değişiminde normal varış ile uzak açılım arasında kalan genlik değerleri göz önünde bulundurulacaktır. Uzak açılım olarak, Zoeppritz eşitliklerine yapılan doğrusal yaklaşımlar hatırlanacak olursa,

30° – 35° ‘lik varış açısı yaygın olarak kabul görmüştü. Bu nedenle bölüm içerisinde elde edilecek olan açığa bağılı genlik değışimlerinde de uzak açılım 35° olarak kabul edilmiştir.

Çizelge 5.1 Dört jeolojik birim için eşitlik (5.7)’de verilen bağıntının katsayı değerleri Greenberg ve Castagna (1992).

Jeolojik Birim	a_{i2}	a_{i1}	a_{i0}
Kumtaşı	0	0.80416	-0.85588
Kireçtaşı	-0.05508	1.01677	-1.03049
Dolomit	0	0.58321	-0.07775
Şeyl	0	0.76969	-0.86735

Her bir hazne kayacın boşluklarına yerleştirilen farklı akışkan türleri için Batzle ve Wang (1992)’ın eşitlikleri kullanılarak elde edilen elastik sabitlerin hesabında çizelge 5.2’de verilen parametrelerin girdi verisi olarak kullanılması gerekmektedir ki Gassmann eşitliği başarı ile uygulanabilsin.

Çizelge 5.2 Gassmann kuramı ile farklı akışkan türleri için elastik sabitlerin hesabında kullanılacak başlangıç parametreleri.

1. Petrolün API değeri	8. Eşitlik (6.13) - Katsayılar
2. Gaz – Petrol oranı (GOR)	9. Hazne kayaç katman kalınlığı (metre)
3. Gazın özgül ağırlığı	10. Hazne kayaç derinliği (metre)
4. Sıcaklık (derece)	11. Su doygunluğu (SW)
5. Tuzluluk (ppm)	12. Kayaç P - dalga hızı (m/s)
6. Boşluk oranı	13. Kayaç yoğunluğu (gm/cc)
7. Kayacın içerdiği mineral bileşiminin yoğunluğu (gm/cc)	14. Kayacın içerdiği mineral bileşiminin Bulk Sabiti (MPa)

5.2.1 Model Çalışması

Jeolojik model A'nın Meksika Körfezi'ndeki olası bir hazne modelidir. Şekil 2.1'deki gibi yatay iki katmanlı yarı sonsuz, homojen ve yön bağımsız olup belirli oranda boşluk içermektedir. Model katmanları için boşluklu hazne kayaç olarak kumtaşı, örtü katmanı olarak da şeyl seçilmiştir. Buna göre çizelge 5.2'de verilen girdi parametrelerinin sayısal değerleri çizelge 5.3'teki gibidir.

Çizelge 5.3 Model çalışması için başlangıç parametreleri

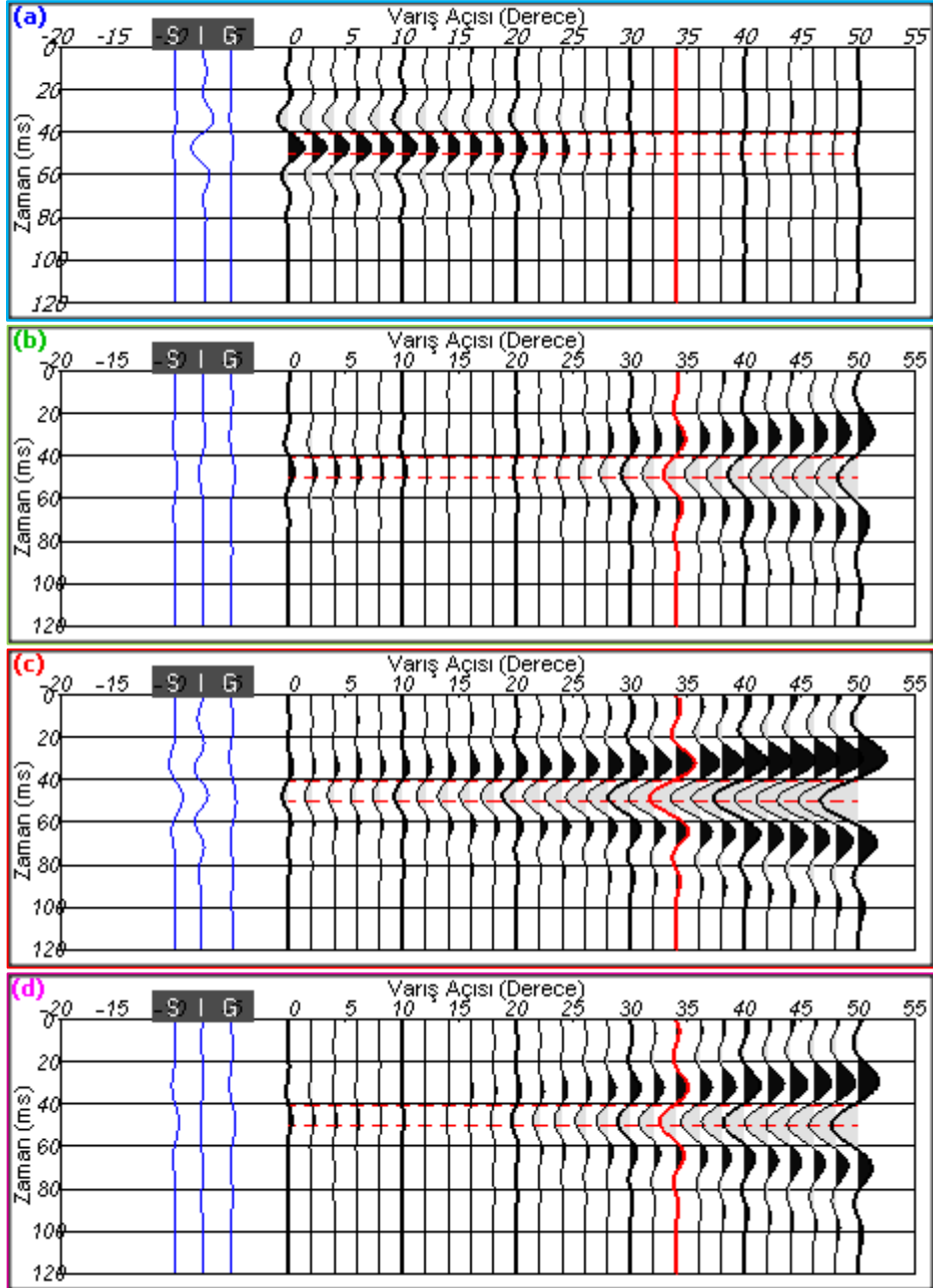
Hazne Kayaç - Kumtaşı	
1. Petrolün API değeri = 30	8. $a_{i0} = -0.856$, $a_{i1} = 0.804$
2. Gaz – Petrol oranı (GOR) = 89	9. Katman kalınlığı (m) = 14.3
3. Gazın özgül ağırlığı = 0.7	10. Hazne kayaç derinliği (m) = 3018
4. Sıcaklık (derece) = 85	11. Su doygunluğu (SW) = 0.30, 0.90
5. Tuzluluk (ppm) = 5000	12. Kayaç P- dalga hızı (m/s) = 3306.8
6. Boşluk oranı = 0.22	13. Kayaç yoğunluğu (gm/cc) = 2.29
7. Kayacın içerdiği mineral bileşiminin yoğunluğu (gm/cc) = 2.65	14. Kayacın içerdiği mineral bileşiminin Bulk Sabiti (MPa) = 40

Gassmann eşitliğinin kullanımı ile farklı akışkan türleri için elde edilen hız ve yoğunluk değerleri çizelge 5.4'teki gibidir.

Çizelge 5.4 Model çalışması için dört farklı akışkan için hazne kayaç ve örtü katman sıkışma dalgası hız ve yoğunluk değerleri

Model A	Gaz	Petrol	Fizz	Tuzlu Su	Şeyl
V_p (m/s)	3016	3140	3063	3307	3049
ρ (gm/cc)	2.18	2.25	2.27	2.29	2.24

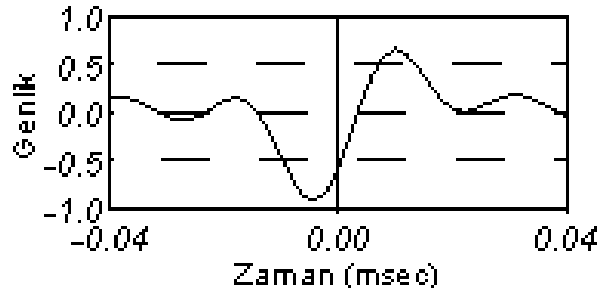
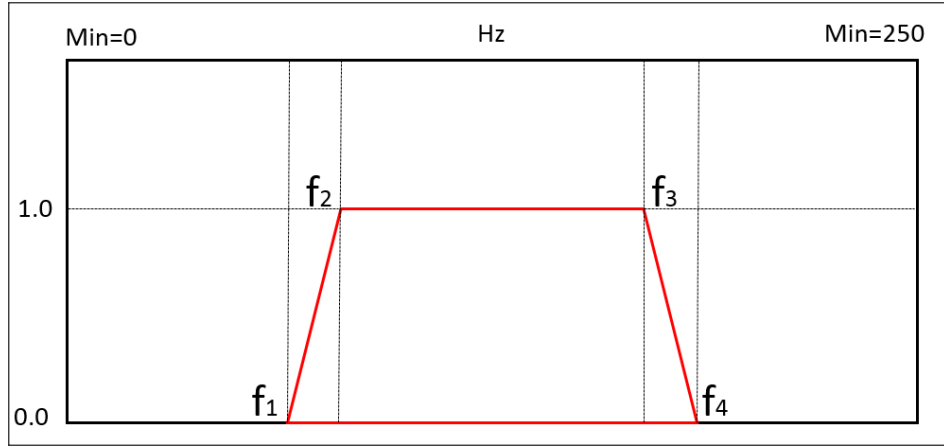
Çizelge 5.4'te fiziksel akışkan için elde edilen değerler, hazne kayacının içerdiği akışkanın tuzlu suya doygunluk oranının 0.90 ve geri kalan 0.10'luk kısım gaz olduğu durum için elde edilmiştir.



Şekil 5.15 Jeolojik modelin farklı akışkan türlerine göre verdiği AVA genlik değişimleri.

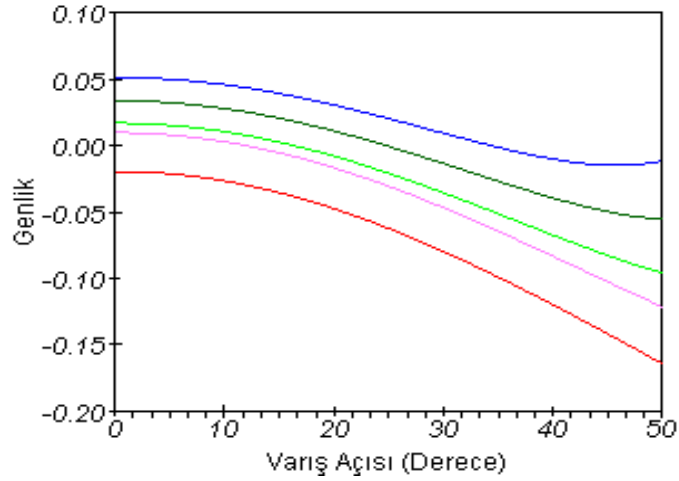
Genlik değişimleri dört farklı akışkan olan tuzlu su (a), petrol (b), gaz (c), fiziksel (d) için 50 derecelik varış açısına kadar hesaplanmıştır

Şekil 5.15'te verilen genlik modellerinin elde edilmesinde Şekil 5.16'daki gibi bir Ormsby kaynak dalgacı kullanılmıştır. Kaynak dalgacığının köşe frekans değerleri $f_1=5$, $f_2=8$, $f_3=45$, $f_4=55$ Hz'dir. Örnekleme aralığı 2 ms olup 41 örnekleme noktasında örneklenmiştir ve 235° 'lik bir faz kayması uygulanmıştır.



Şekil 5.16 Jeolojik modelin farklı akışkan türlerine için hesaplanmış yansıma katsayısı serilerinin evrişiminde kullanılan Ormsby kaynak dalgacı

Şekil 5.15'deki dört farklı akışkan için sınır ara yüzeye varış açısına göre modellenen genliklerdeki değişimi daha belirgin göstermek amacıyla Şekil 5.17'de yeniden grafiklenerek verilmektedir. Buna göre mavi renk tuzlu su, yeşil renk petrol, kırmızı renk gaz, macenta rengi, içerisinde % 30 gaz içeren tuzlu su içerdiği ve koyu yeşil renk de hazne kayacın akışkan içermediği durumdaki genlik değişimlerini temsil etmektedir.

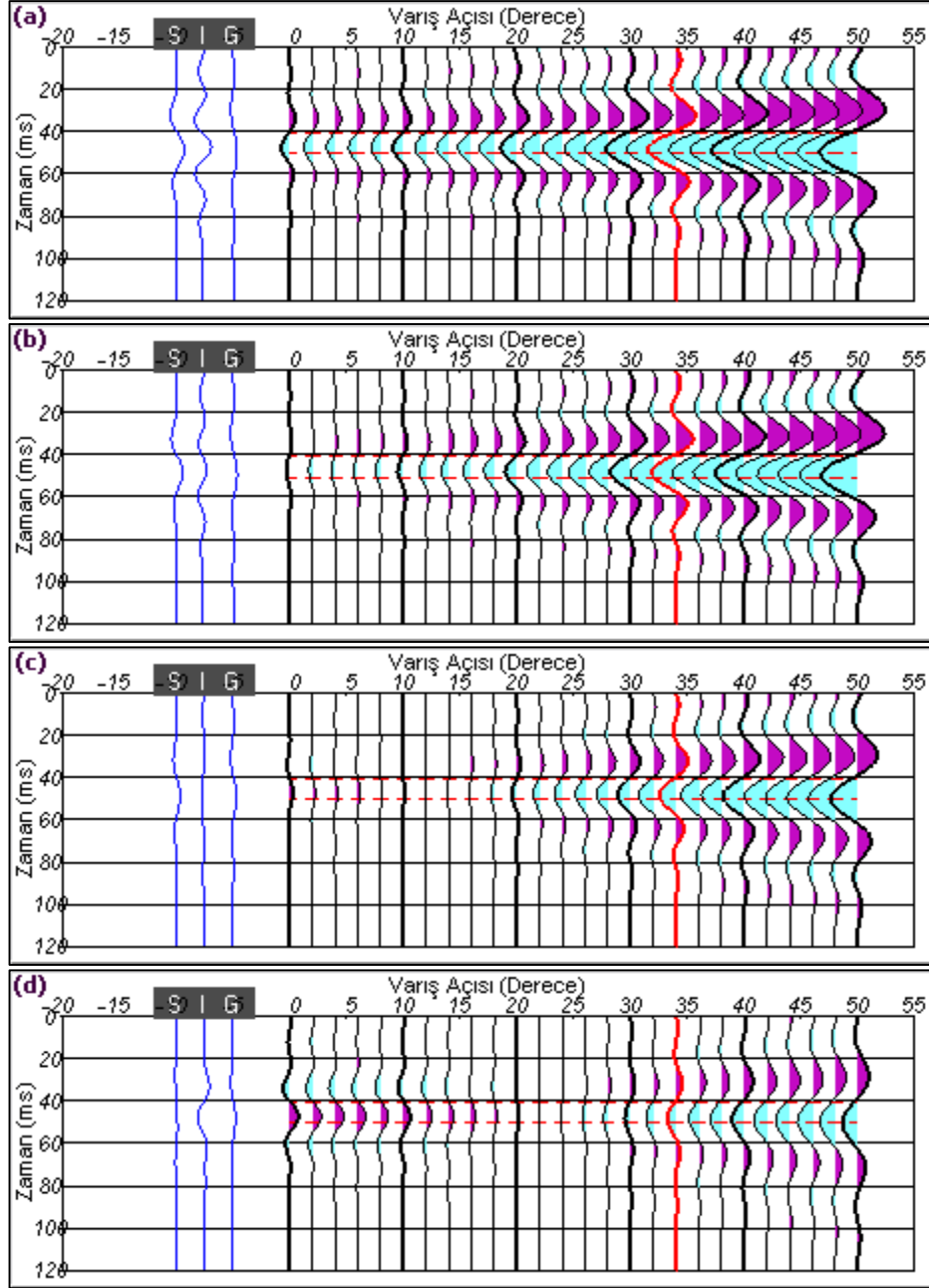


Şekil 5.17 Hazne kayaçtaki dört farklı akışkan için sınır ara yüzeydeki varış açısına göre modellenen genlik değişimleri

Mavi renk tuzlu su, yeşil renk petrol, kırmızı renk gaz, macenta rengi içerisinde % 30 gaz içeren tuzlu su içerdiği ve koyu yeşil renk de hazne kayacın akışkan içermediği durumdaki genlik değişimlerini temsil etmektedir.

Boşluklu hazne kayacın dört farklı akışkan türü içermesi durumundaki açıya bağlı genlik değişimlerine bakıldığında (Şekil 5.15), hazne kayacın tuzlu su içerdiği durumdaki genlik değişimleri artan varış açısıyla azalan bir eğilim gösterirken, akışkanın petrol, gaz ve içerisinde belirli oranda gaz konuşlanmış tuzlu su olması durumunda genliklerin tuzlu suyun aksine artan bir eğilim gösterdiği belirgindir. Ancak bölüm içerisindeki probleme odaklandığımızda, gaz ve içerisinde belirli oranda gaz konuşlanmış tuzlu suyun açıya bağlı genlik değişimleri birbirine yakın bir eğilimde olduğu, ayırt edilmesinin genlik bilgisiyle pek de kolay olmadığı gözlenmektedir. Beklenen bu durumun modellenmesinde, gerek Gassmann kuramı gerekse AVA yöntem bilimi başarılı bir şekilde uygulanmıştır. Jeofizikteki bu problemin daha net ortaya konması adına aynı jeolojik model üzerinde, hazne kayaçtaki farklı su doygunlukları için açıya bağlı genliklerindeki değişim de modellenerek Şekil 5.18'de verilmektedir. Hazne kayacın suya doygunlukları; % 0.00 (a), % 60 (b), %90 (c), % 97 (d) olarak modellenmiştir. Öyle ki % 100 gaz içeren hazne kayacın genlik değişimleri ile % 10 gaz içeren hazne kayacın genlik değişimleri birbirine çok benzer nitelikte olup birbirinden ayırt edilememektedir. Ancak hazne kayacın % 3 gibi küçük bir oranda gaz içermesi durumunda genliklerdeki değişim ayırt edilebilir niteliktedir. Bunun yanısıra yerinde kaydedilmiş hız ve yoğunluk değerlerinden öte yapay bir modelin genlik bilgisi olduğu unutulmamalıdır. Yerinde kaydedilmiş sismik verinin içeriğindeki rastgele gürültünün sismik genlikler üzerindeki

etkisi de ortak orta noktaya göre sıralanmış verinin genlik bilgisini zedelemeyecek şekilde yapılmalıdır ki bu işlem kimi zaman yapay jeolojik modellerin desteği ile tamamlanmaktadır. Bu nedenle AVO ileri çözümlemenin bir diğer önemi de bu aşamada ortaya çıkmaktadır.

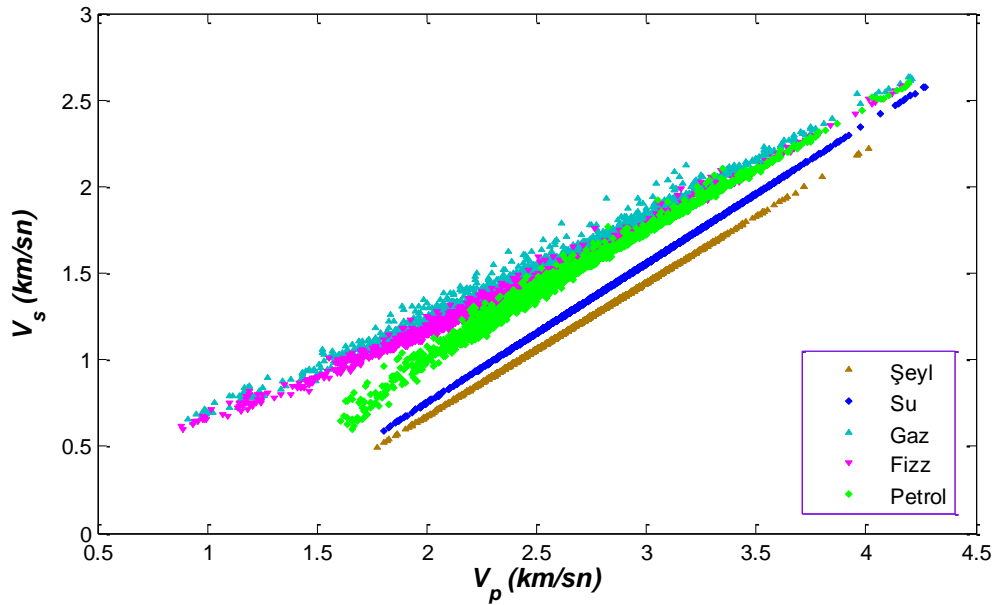


Şekil 5.18 Hazne kayacın dört farklı hidrokarbon doygunluğu için sınır ara yüzeydeki varış açısına göre modellenen genlik değişimleri

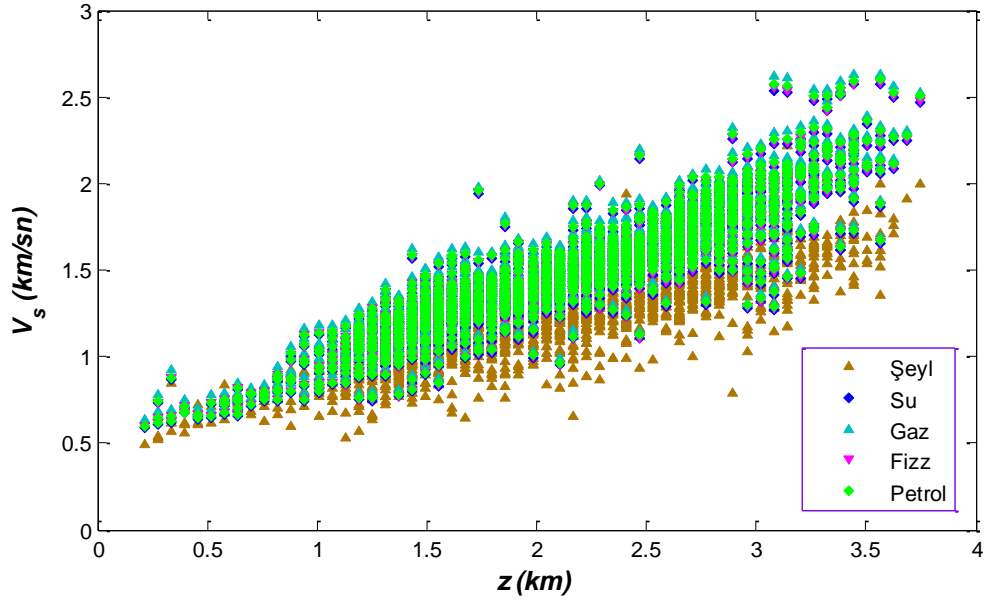
Hazne kayacın suya doygunlukları; % 0.00 (a), % 60 (b), %90 (c), % 97 (d) olarak modellenmiştir

5.3 Meksika Körfezi Kuyu Verileri

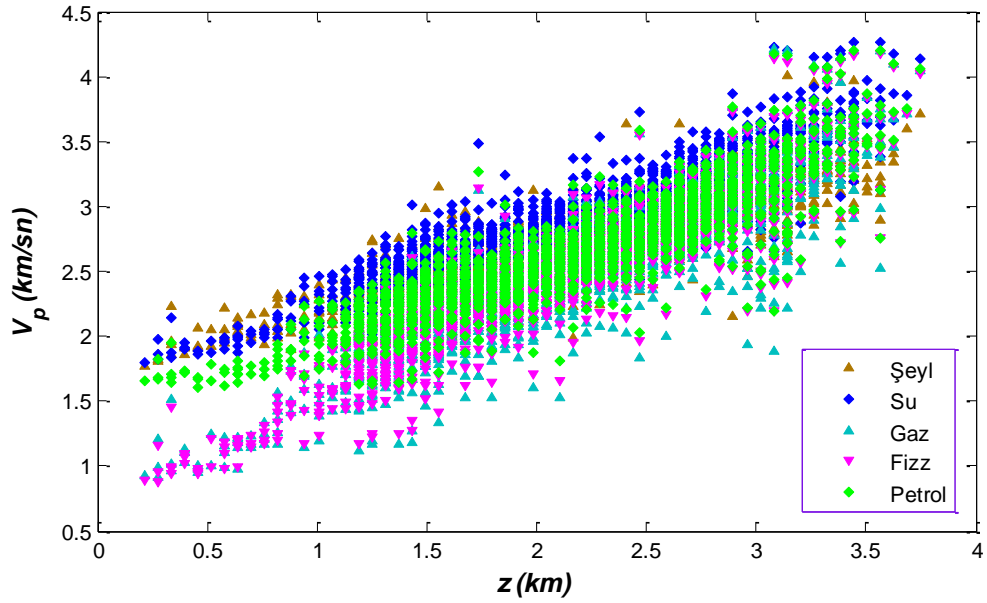
Bölüm 5.2.1’de jeofiziğin önemli bir problemini araştırarak sismik genlik bilgisinin böyle bir problemin çözümünde yetersiz olduğunu yapay modelleme çalışması üzerinde göstermiştik. Peki, buradaki temel problemin çözümüne ne şekilde bir yaklaşım sağlanabilir? Bölüm 5.1’de verilen Castagna veri grubu deneysel çalışmasında, birlikte kullanımının olumlu etkilerini gözlemlediğimiz elastik sabitler bu problemin çözümünde başarılı olabilir mi? Bu iki sorunun cevabını bir çözüm üretmek amacıyla Meksika Körfezi’ndeki 321 kuyudan toplanmış 1740 adet kumtaşı örneğine ait sismik hız ve yoğunluk değerleri üzerinde elastik sabitlerin etkisi, bu bölüm içerisinde araştırılacaktır. Veri grubu farklı derinliklerdeki örtü katmanı şeyl ve kumtaşının dört farklı akışkan olan gaz, petrol, tuzlu su ve içerisinde %25’ten daha az gaz çözülmüş tuzlu su (fizz) içermesi durumundaki P - ve S - dalga hızları ile yoğunluk değerlerinden oluşmaktadır. Veri grubunun V_p ve V_s değerlerinin birbirine göre değişimi Şekil 5.19’daki gibidir. Grafikte şeyl ve içerisinde tuzlu su barındıran hazne kayacın sismik hızlarına bakıldığında diğer üç akışkan olan gaz, petrol ve fizza oranla daha doğrusal bir eğilim göstererek ayrıldığı gözlenmektedir. S - dalga hızının P - dalga hızına oranla akışkan hakkında daha anlamlı bilgi içerdiği daha önceki bölümlerde de belirtilmişti. Buna göre sismik dalga hızlarının derinliğe göre değişimleri de Şekil 5.20-5.21’de verilmektedir.



Şekil 5.19 Veri grubunun V_p ve V_s değerlerinin değişimi



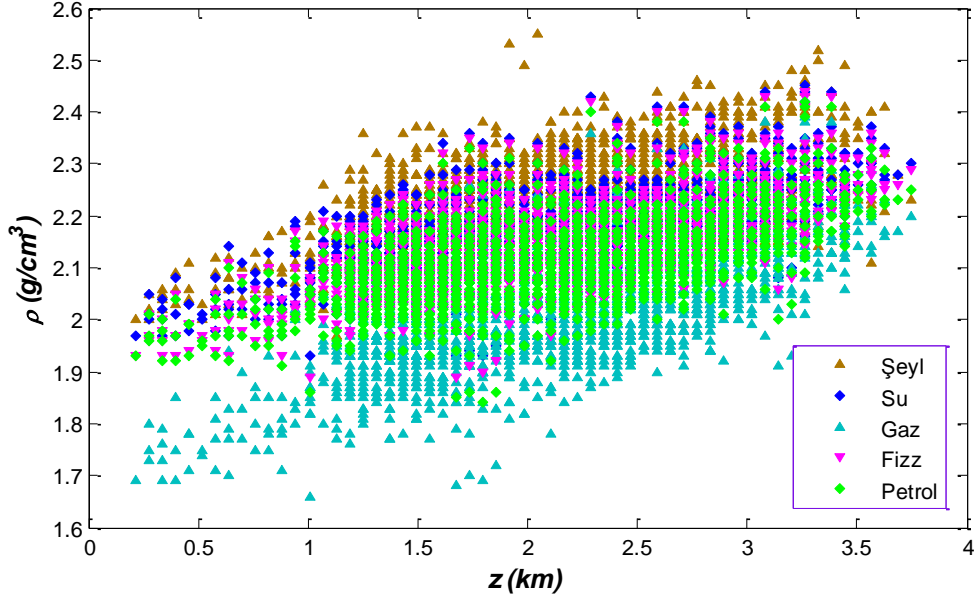
Şekil 5.20 Veri grubunun derinliğe göre V_S değişimi



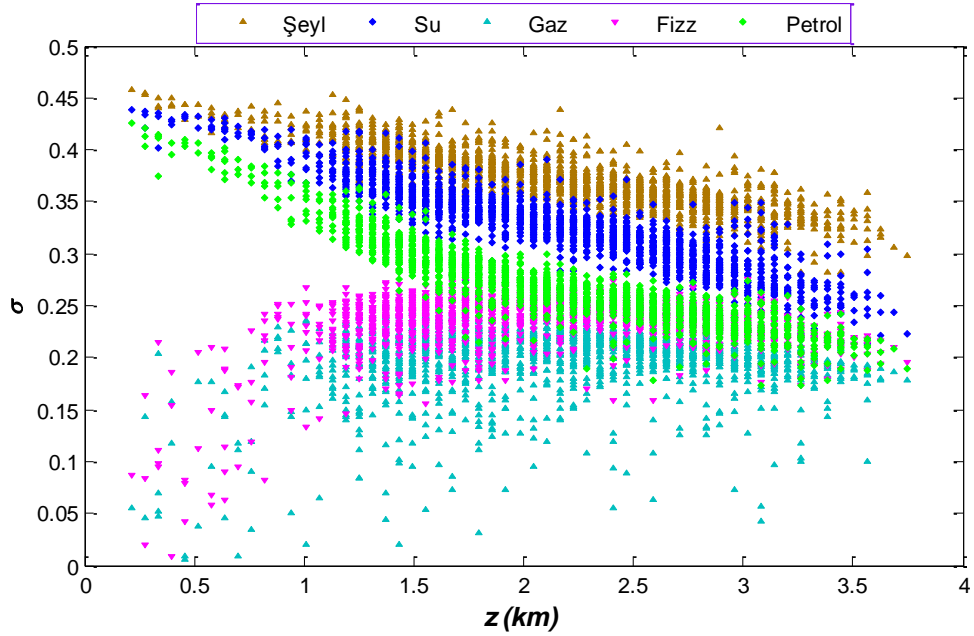
Şekil 5.21 Veri grubunun derinliğe göre V_P değişimi

Basit bir mantık çerçevesinde eğer ki hazne kayacımız kuru olsaydı, yani içerisinde herhangi bir akışkan olmasaydı birim hacime etki eden kütlelerin daha hafif olacağı açıktır. O zaman haznede biriken akışkanın gerek hacim gerekse de kayaç kütlelerine fiziksel olarak bir etkisinin olması gerekmektedir. Ayrıca derinlikle kayacın artan sıcaklık ve basıncın etkisiyle daha da pekişeceği bir diğer kabuldür. Bu nedenle veri grubunun

derinlikle değişen yoğunluğu grafiklenerek Şekil 5.22 'de verilmektedir. Bununla birlikte poisson oranının (σ akışkanlığın bir ölçütü olmasından dolayı önemlidir. Buna göre veri grubunun derinlikle poisson oranındaki değişim de Şekil 5.23'deki gibidir.

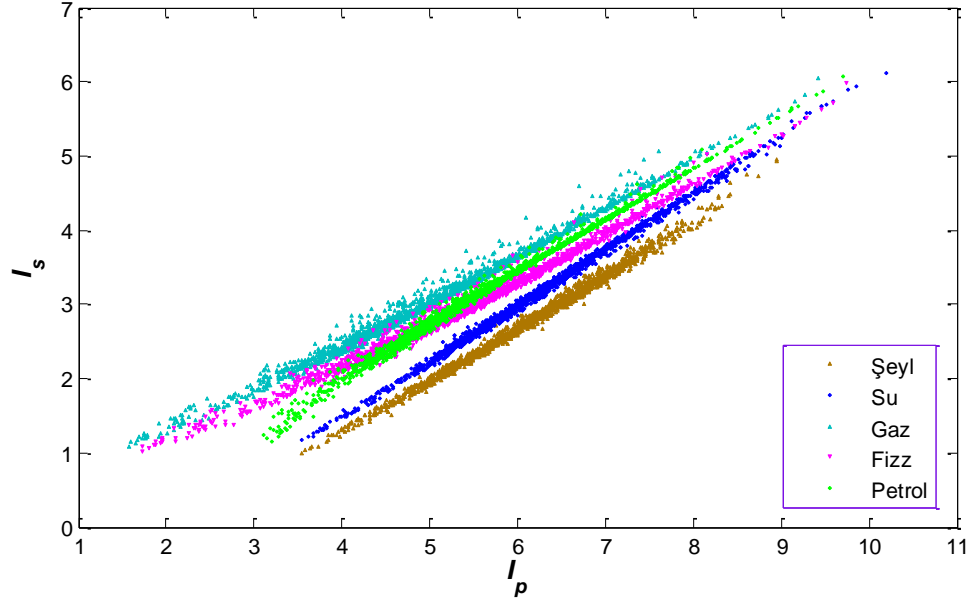


Şekil 5.22 Veri grubunun derinliğe göre ρ değişimi



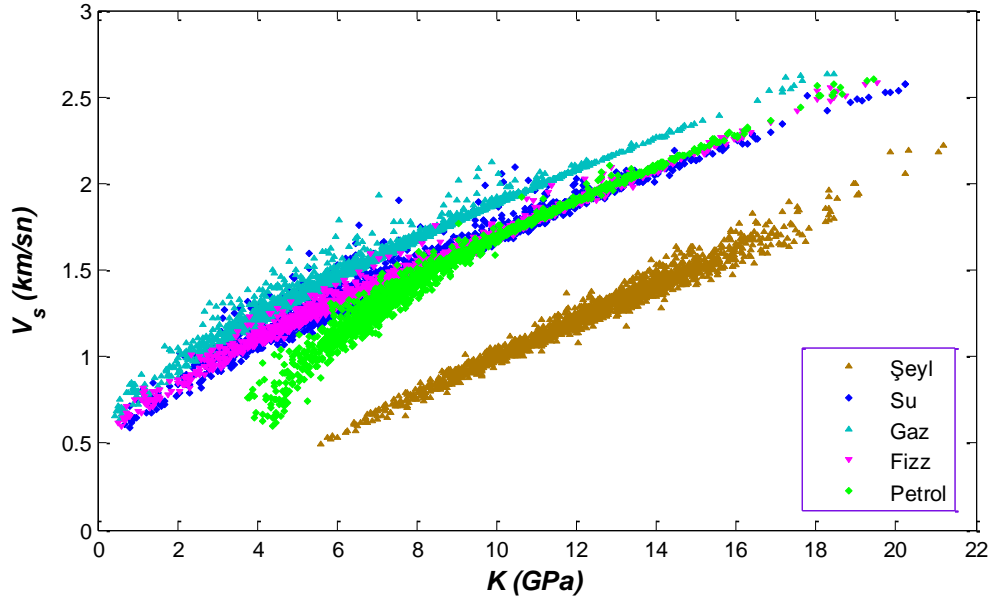
Şekil 5.23 Veri grubunun derinliğe göre σ oranı değişimi

Çoğu sismik verinin gerek veri-işleminde gerekse yorum aşamasında sismik empedansların değişiminden yararlanılarak yeraltı jeolojisi hakkında anlamlı bilgi edinmeye gereksinim duyulmaktadır. Bölüm 2.2’de, sismik empedansların çıkarımında yine V_P , V_S ve ρ değerlerinin doğrudan kullanıldığı gözlenmektedir. Bu nedenle sismik empedansların birbirine göre değişimi Şekil 5.24’da verilmektedir.



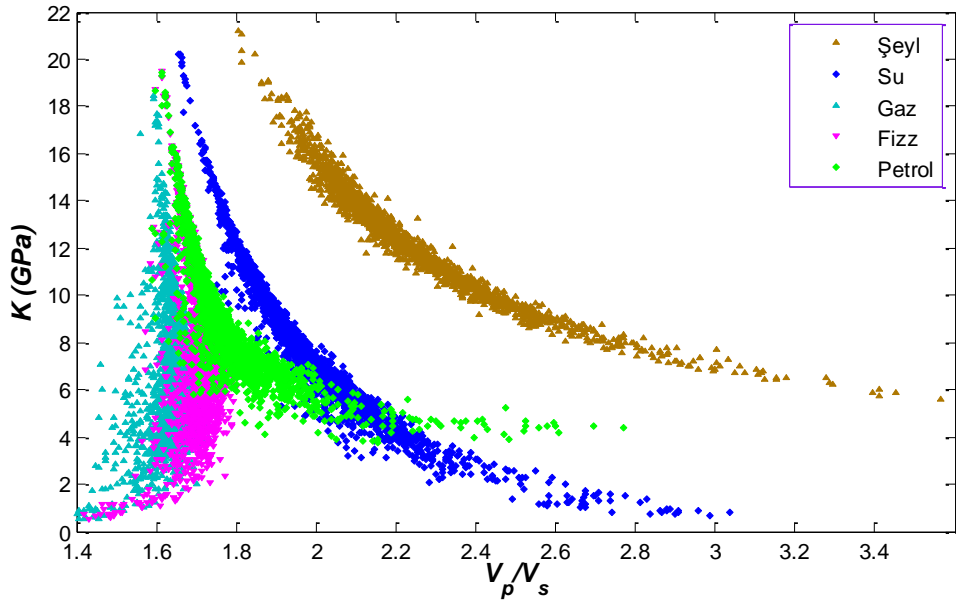
Şekil 5.24 Veri grubunun sismik empedanslarının birbirine göre değişimi

Bölüm 5.1’de S - dalga hızının K ile ilişkisi açıklanarak örneklenmişti. Bir sonraki adımda bu veri grubunun bu iki parametre için gösterdiği hassasiyeti gözlemlemek amacıyla Şekil 5.25’de birbirine göre değişimi grafiklenmiştir.



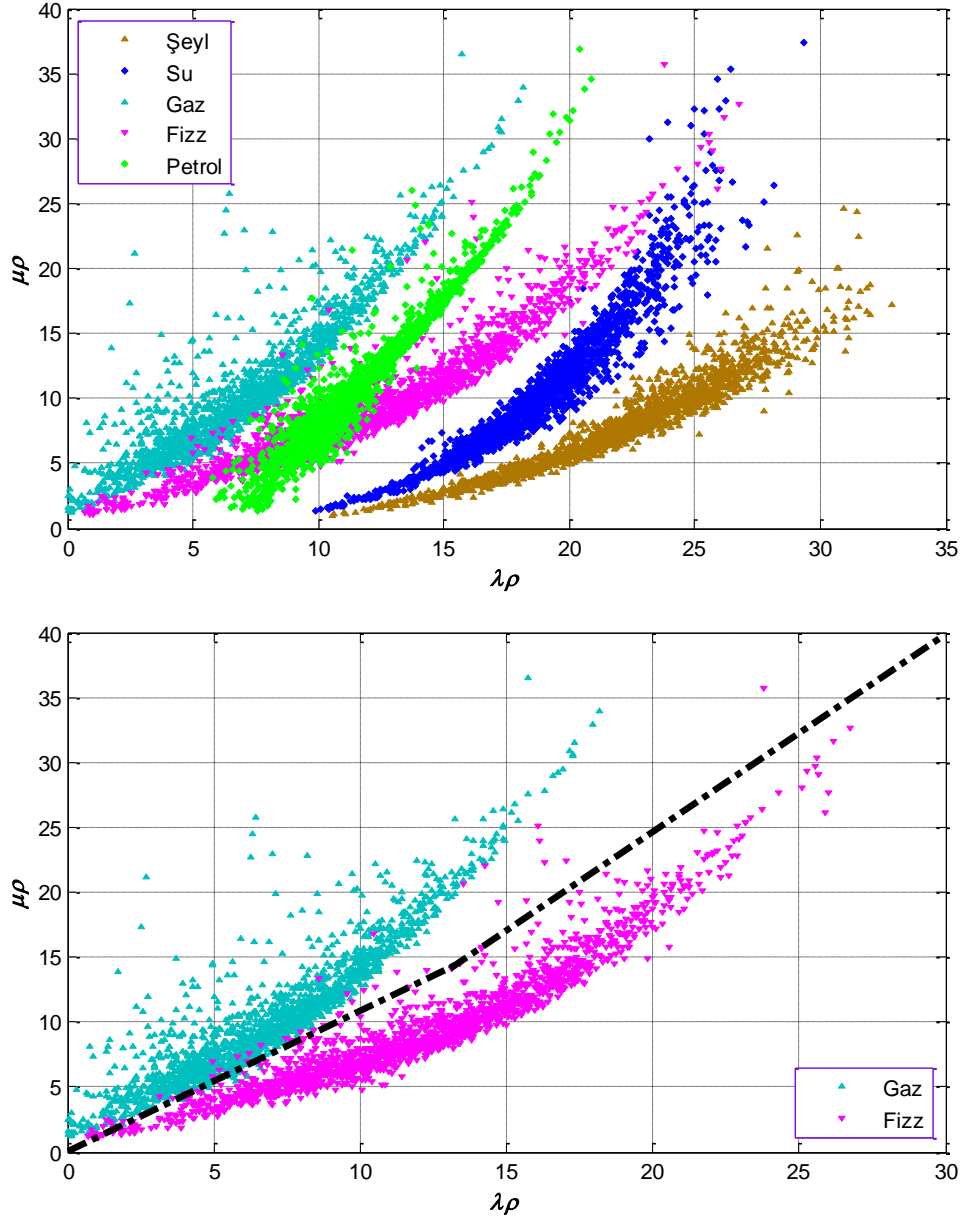
Şekil 5.25 Veri grubunun $V_S - K$ değişimi

Şekil 5.25'deki değişime bakıldığında, şeyl örtü katmanının diğer dört farklı akışkan içeren hazne kayaktan çok net bir ayrımlılık gösterdiği açıkça gözlenmektedir. Sismik hızların birbirine oranının bulk sabiti ile değişimi de Şekil 5.26'da verilmektedir.



Şekil 5.26 Veri grubunun $V_P/V_S - K$ değişimi

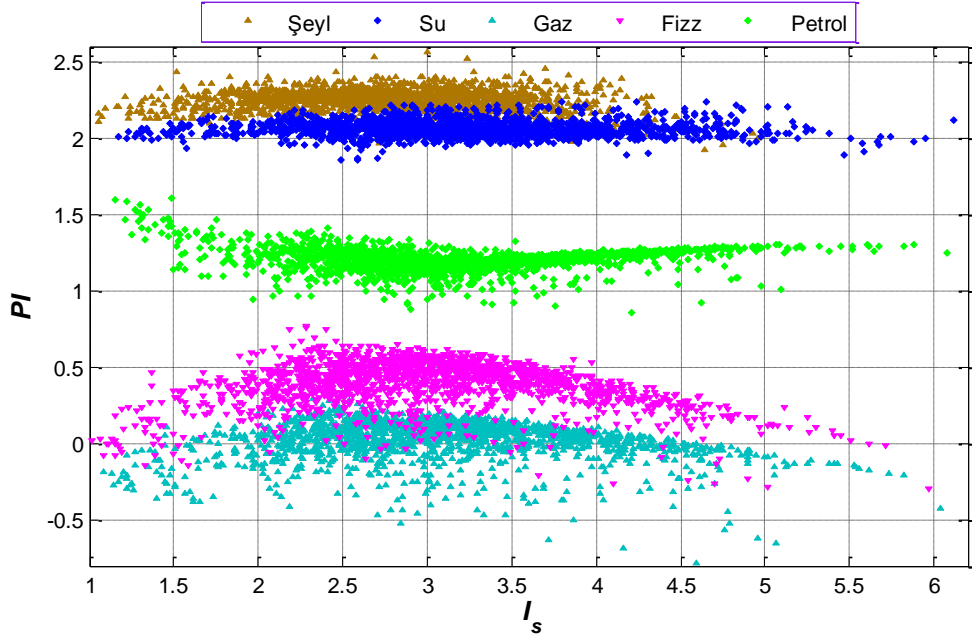
Bu aşamaya kadar ki grafiklerde (Şekil 5.19-5.26) veri grubunun V_p , V_s değerlerinin birbirine göre değişimi, derinliğe göre değişimi ve oranlarının K ile değişimi modellenmiştir. Bu grafiklerin içerisinde Şekil 5.25'e ve Şekil 5.26'ya bakıldığında şeyl birimine ait değerlerin içerisinde akışkan barındıran kumtaşı değerlerinden ayrıldığı gözlenmektedir.



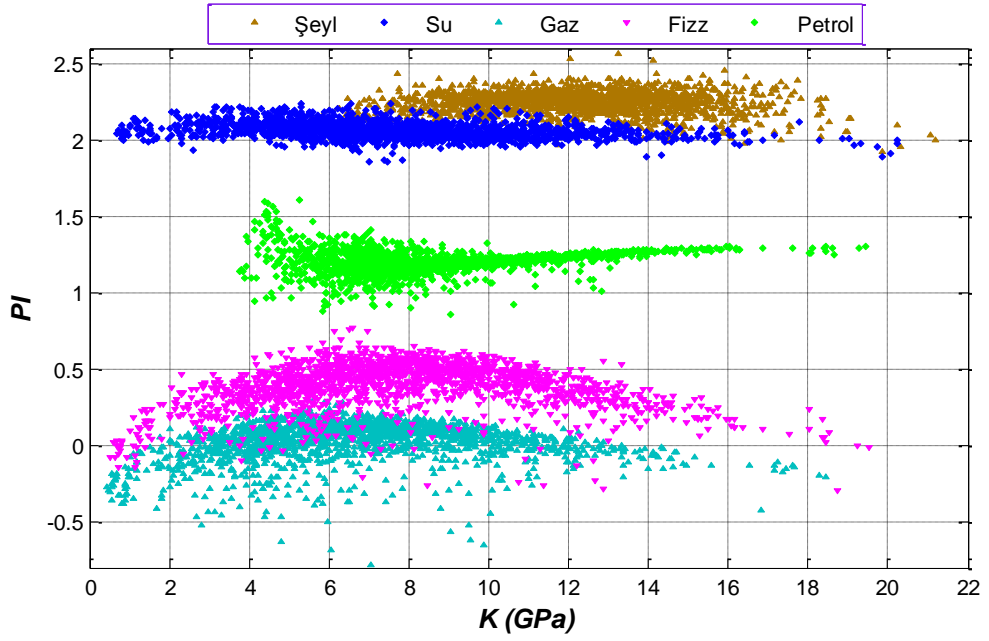
Şekil 5.27 Veri grubunun $\lambda\rho - \mu\rho$ grafiği

Hatırlanacak olursa Gassmann kuramını açıklarken elastik dalganın yayılım doğrultusundaki boşluklu ve akışkana doygun elastik kayacı sıkışma ve genişleme kuvvetleri altında bırakacağını, bu etki altındaki kayaç parçacıklarının da yer değiştirmeye maruz kalarak haznesinde biriken akışkanı da aynı gerilmeye maruz bırakıp kayacın bulk sabitini değiştireceğini belirtmiştik. Akışkan içeren kumtaşının K değerlerindeki değişim ile şeyl biriminin K değerlerindeki değişimi farklı bir meyille birbirinden ayrılmaktadır. Bundan sonraki adımda, bölüm 4.2’de verilen $\lambda\rho - \mu\rho$ yönteminin sonuçlarını gözlemek amacıyla veri grubunun $\lambda\rho$ ve $\mu\rho$ farklı akışkan türleri için birbirine göre değişim grafiği Şekil 5.27’de verilmektedir. Şekil 5.27’de petrol ve gaz içeren kumtaşı değerlerinin sulu kumtaşı ve şeyl birimine oranla daha belirgin biçimde daha küçük $\lambda\rho$ değerleri gösterdiği gözlenmektedir. Bu durum anlamlıdır ancak asıl problemimiz gaz ve fız içeren kumtaşı değerlerinin benzer özellik göstermesidir.

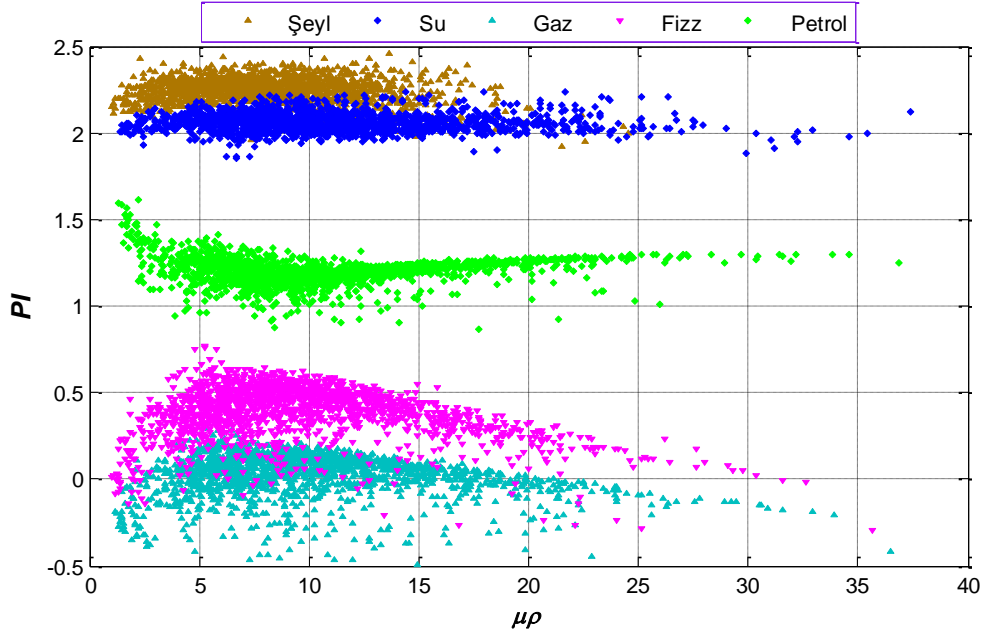
Peki, veri grubunun PI değerlerine gösterdiği hassasiyet sorununuzun çözümünde kullanılabilir nitelikte midir? Bunu araştırmak amacıyla veri grubunun PI değerleri hesaplanarak, öncelikle I_5 ile birlikte grafiklenmiştir (Şekil 5.28). Ardından da K ile değişimi grafiklenmiştir (Şekil 5.29). Bu iki şekil üzerindeki sonuçlarına bakıldığında birbirine çok benzer özellik gösteren iki grafik ortaya çıkmaktadır. Ancak bu grafiklerin en önemli yanı, sulu kumtaşı ile şeyl birimi diğer üç kumtaşı biriminden (gaz, petrol, fız) daha yüksek PI değerleri gösterirken hayali bir yatay düzlem üzerinde sıralanmaktadır. Bu grafiklerin bir diğer önemli yanı ise petrollü kumtaşının da gaz ve fız barındıran kumtaşı değerlerinden belirgin olarak daha yüksek değerler içerdiği, aynı zamanda da bu iki birimden önemli oranda ayrıldığı gözlenmektedir. Aynı grafikler üzerinde gazlı ve fızlı kumtaşı değerlerinin birbirine çok yakın PI değerleri içerdiği bir diğer önemli bulgudur. Amacımız bu iki akışkanının birbirinde ayrımlılığını ortaya koymaktır. Bu nedenle PI değerlerinin sırasıyla $\mu\rho$ ve $\lambda\rho$ ’ya göre değişimleri de grafiklenerek Şekil 5.30 ve Şekil 5.31’de verilmektedir. PI değerlerinin $\mu\rho$ ’ya göre değişimi Şekil 5.28’deki ve Şekil 5.29’dakine çok benzer niteliktedir. Ancak PI değerlerinin $\lambda\rho$ ’ya göre değişimlerine bakıldığında farklı bir kümelenmenin söz konusu olduğu gözlenmektedir.



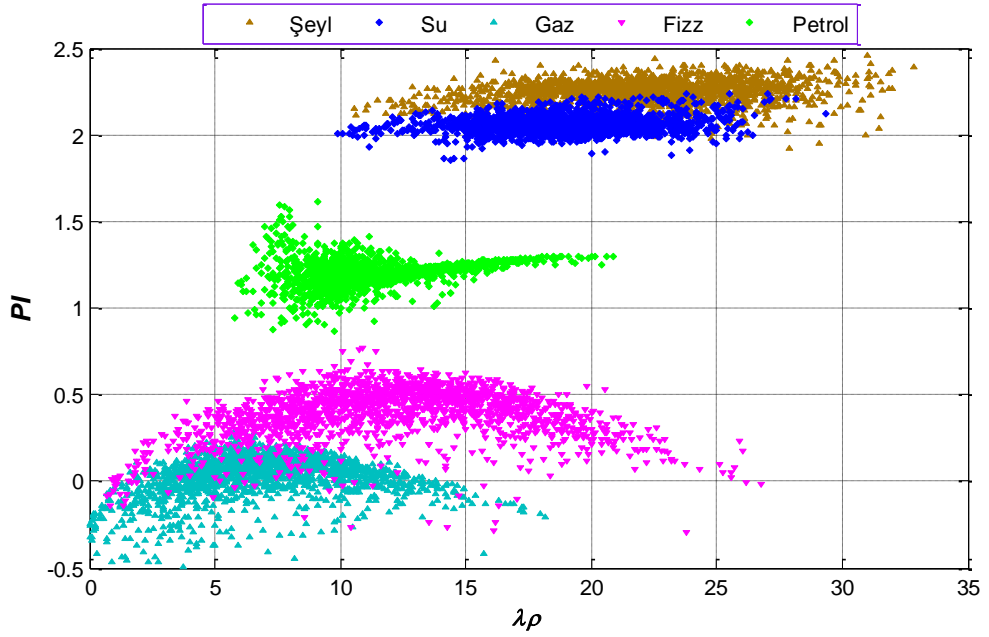
Şekil 5.28 Veri grubunun $I_s - PI$ değişimi



Şekil 5.29 Veri grubunun $K - PI$ değişimi



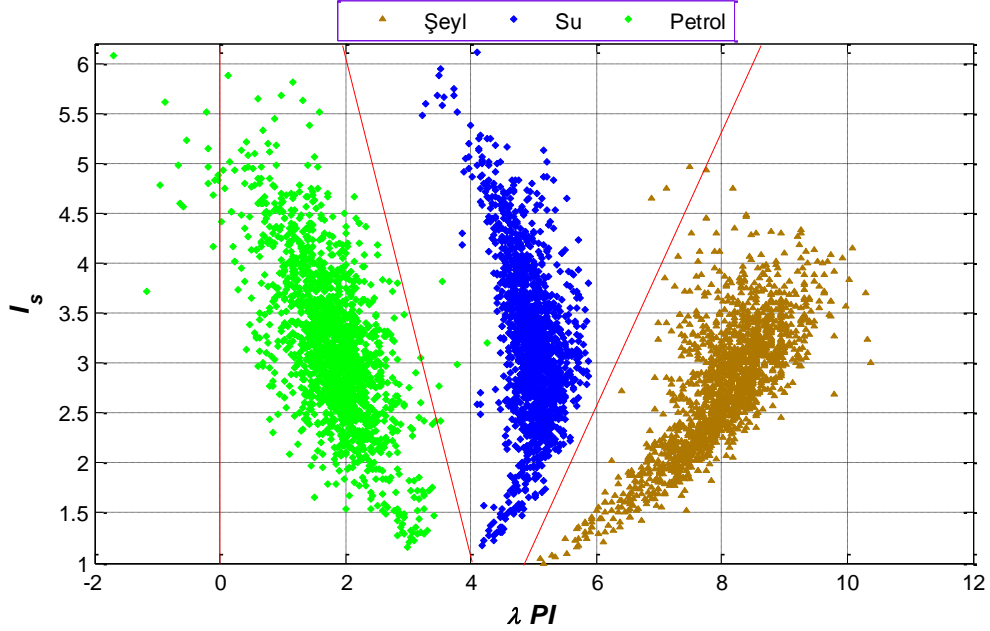
Şekil 5.30 Veri grubunun $\mu\rho - PI$ değişimi



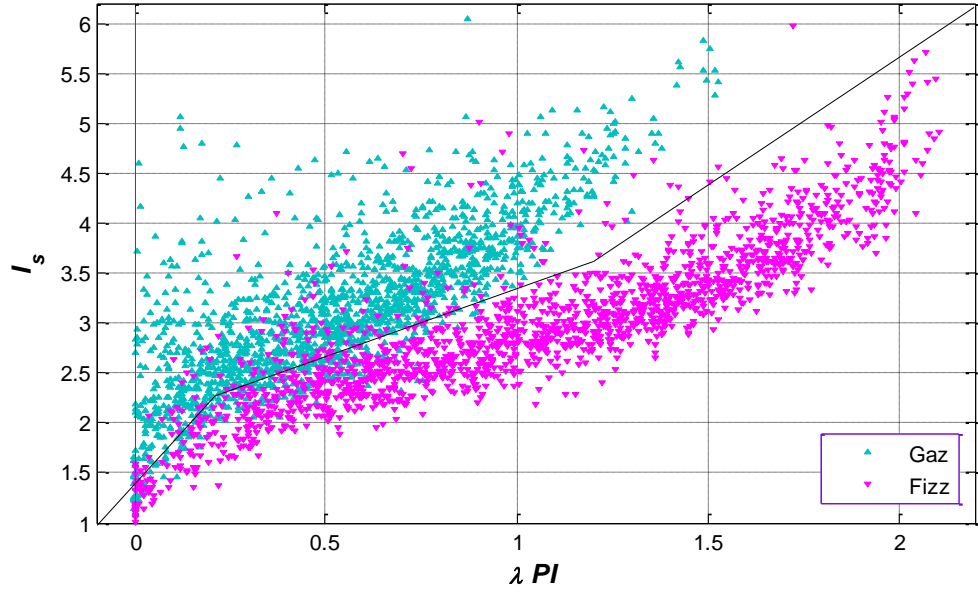
Şekil 5.31 Veri grubunun $\lambda\rho - PI$ değişimi

Bölüm 4.3'te λPI tanıtılmış ve öncelikli olarak bölüm 5.1'de Castagna (1994) verisi için hesaplanarak olası sonuçları grafiklenmişti. Gazlı kumtaşı değerlerinin λPI 'a gösterdiği hassasiyet göz ardı edilemeyecek konumdaydı. Meksika Körfezi'ndeki bu önemli

problemin çözümünde veri grubunun λPI 'ya gösterdiği hassasiyeti araştırmak amacıyla her bir veri örneği için bu niteleyici hesaplanmıştır. λPI 'ın hesabında kullanılan eşitlik 4.25 hatırlanacak olursa, σ oranının eşitlikte önemli bir yere sahip olduğu açıkça görülmektedir. Şekil 5.23'de σ oranının derinlikle değişiminde, gazlı ve fizli kumtaşının petrolü, sulu kumtaşı ve şeyle oranla daha düşük değerlerde seyrettiği gözlenmektedir. Bunun yanısıra petrolü, sulu kumtaşı ve şey için σ oranı değerleri derinlikle artarken birbirine de çok yakın bir meğille değişim göstermektedir. Bu önemli bir gözlemdir. Çünkü λPI 'ın birlikte grafikleneceği elastik sabitin seçiminde bu ayrımlılık göz önüne alındığında, daha başarılı sonuçlar elde edilmektedir. Öncelikli olarak λPI 'ın S - dalgası empedansı ile değişimi petrolü, sulu kumtaşı ve şeyle grafiklenmiştir (Şekil 5.32). Ardından da gazlı ve fizli kumtaşı için λPI 'ın S - dalgası empedansı ile değişimi grafiklenmiştir. (Şekil 5.33). Şekil 5.32'ya bakıldığında, çok anlamlı biçimde üç farklı birimin birbirinde ayrımlılığı gözlenmektedir. Şekil 5.33'de ise yine belirgin bir ayrımlılığın varlığı görülmektedir.

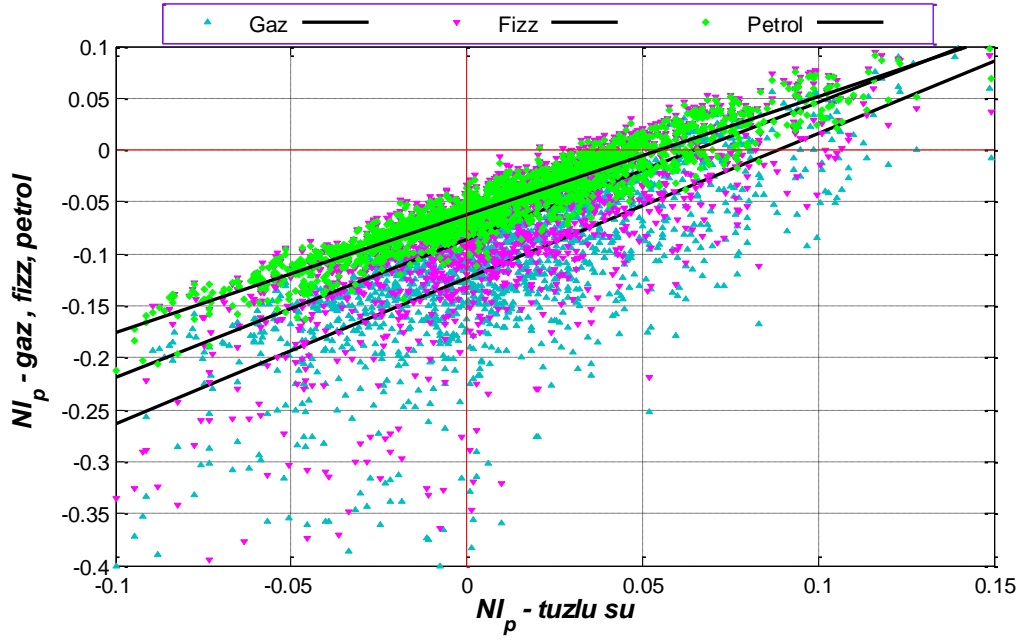


Şekil 5.32 Veri grubunun $\lambda PI - I_s$ değişimi



Şekil 5.33 Veri grubunun $\lambda PI - I_s$ değişimi

Bu aşamaya kadarki grafiklerde veri grubunun farklı elastik sabitler için gösterdiği genel değişim görsel olarak gösterilmiştir. Bu aşamadan sonra problemimizin çözümüne yönelik deneysel bir çalışmayla elde edilecek sayısal sonuçlar birer eşitlik ile tanımlanarak aralarındaki ilişki araştırılacaktır. Sismik empedansların gerek PI ve gerekse $\lambda\rho - \mu\rho$ niteleyicilerinin hesaplanmasında doğrudan kullanıldığı gösterilmiştir. Bununla birlikte eşitlik (2.14) hatırlanacak olursa, normal varış yansıma katsayısı (NI) da doğrudan sismik empedansların kullanımıyla hesaplanmaktadır. Peki, farklı akışkan türlerinin normal varış yansıma katsayıları arasında bir ilişki olabilir mi? Bu sorunun cevabı iki aşamada araştırılacaktır. İlk etapta tuzlu sulu kumtaşının gaz, fizz ve petrolle ilişkisi P - dalgası normal yansıma katsayılarıyla, ikinci etapta da fizzli kumtaşının gaz ve petrolle ilişkisi normal yansıma katsayılarıyla koyulacaktır. Bu nedenle tuzlu sulu kumtaşının P - dalgası normal yansıma katsayılarının, gaz, fizz ve petrolü kumtaşı P - dalgası normal yansıma katsayıları ile birlikte grafiği Şekil 5.34'daki gibidir.



Şekil 5.34 Veri grubunun normal variş yansıma katsayıları değışimi

Şekil 5.34’de her bir veri grubunu en iyi tanımlayan doğru denklemleri izleyen eşitliklerdeki gibidir;

Tuzlu sulu kumtaşı – gaz için;

$$NI_{gaz} - 1.392NI_{tuzlu su} = -0.12428 \quad (5.8)$$

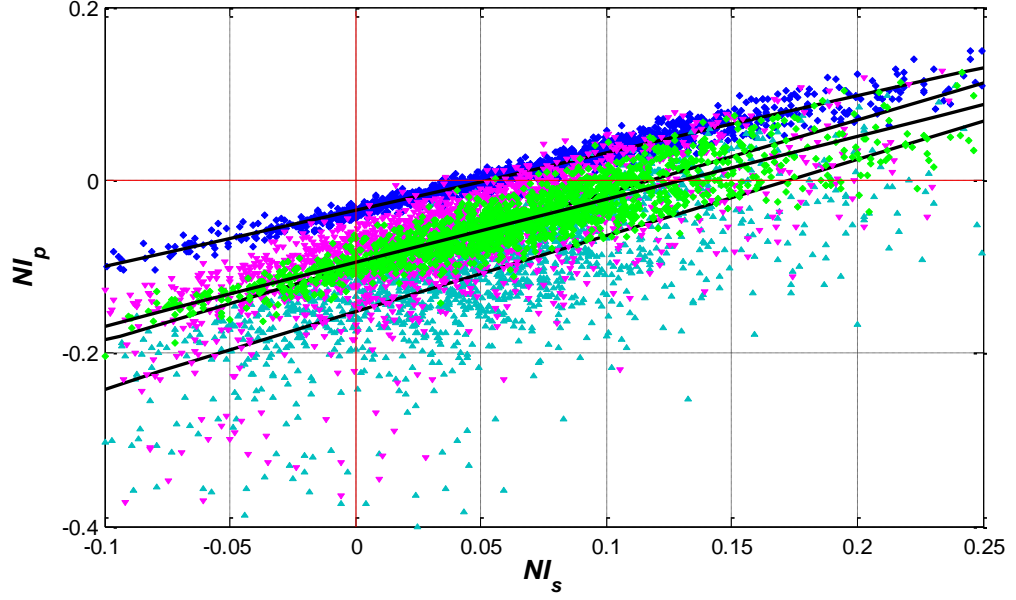
Tuzlu sulu kumtaşı – fizz için;

$$NI_{fizz} - 1.323NI_{tuzlu su} = -0.08628 \quad (5.9)$$

Tuzlu sulu kumtaşı – petrol için;

$$NI_{petrol} - 1.14NI_{tuzlu su} = -0.06228 \quad (5.10)$$

Bir sonraki adıma dört akışkan için P - dalgası normal yansıma katsayıları (NI_P) ile S - dalgası normal yansıma katsayılarının (NI_S) birbirine göre değişimi grafiklenerek Şekil 5.35’de verilmektedir.



Şekil 5.35 Veri grubunun $NI_P - NI_S$ değişimi

Şekil 5.35’de her bir veri grubunu en iyi tanımlayan doğru denklemleri izleyen eşitliklerdeki gibidir;

Tuzlu sulu kumtaşı için;

$$NI_{PT} - 0.66 NI_{ST} = -0.03 \quad (5.11)$$

Gazlı kumtaşı için;

$$NI_{PG} - 0.88 NI_{SG} = -0.15 \quad (5.12)$$

Fizzli kumtaşı için;

$$NI_{PF} - 0.84 NI_{SF} = -0.10 \quad (5.13)$$

Petrollü kumtaşı için;

$$NI_{P_P} - 0.72 NI_{S_P} = -0.09 \quad (5.14)$$

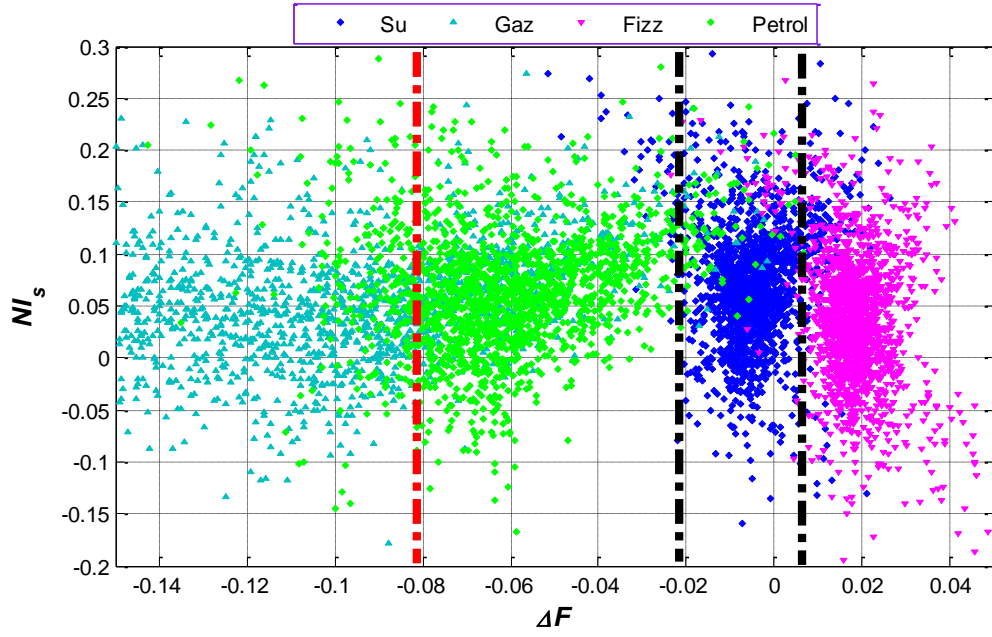
Şekil 5.35'te hazne kayacın tuzlu su içerdiği durumdaki sayısal değerleri en iyi tanımlayan doğru denkleminin (eşitlik 5.11), diğer üç akışkan türünü en iyi tanımlayan doğru denklemlerinden daha uzak sayısal değerler içerdiği gözlenmektedir. Bu aşamada Smith ve Gidlow (1987)'nin akışkan faktörü (ΔF)'nün tanımlanması gerekmektedir (eşitlik 5.15).

$$\Delta F = NI_P - \gamma NI_S \quad (5.15)$$

Eşitlik (5.15)'de verilen eşitlikte γ , bir ayarlama ölçütü olarak sismik veriden veya kuyu verisinden hesaplanabilmektedir. Eşitlik (5.11)'de verilen NI_P ve NI_S arasındaki ilişki hazne kayadaki tuzlu suyun etkisini göstermektedir ve aynı zamanda tuzlu sulu hazne kayacın sınır ara yüzeyinde hesaplanmış olan akışkanlık faktörüdür (eşitlik 5.16).

$$\Delta F = NI_{P_T} - 0.66 NI_{S_T} + 0.03 \quad (5.16)$$

Eğer ki eşitlik (5.16) tuzlu suyu en iyi tanımlayan doğru denklemi ise, diğer akışkan türleri için bu faktör tuzlu sudan ayrılan sayısal değerleri ortaya koyacaktır. Bu amaçla, diğer akışkan türleri için eşitlik 5.16'de verilen ΔF değerleri hesaplanarak NI_S 'le değişimi Şekil 5.36'da verilmektedir.



Şekil 5.36 Veri grubunun $\Delta F - NI_s$ değişimi

Bölüm 5.2.1’de jeofiziğin sismik araştırmalarda karşılaşılan önemli bir problemi yapay jeolojik birimlerin kullanımı ile modellenerek genlik bilgisinin kullanım sınırları araştırılmıştı. Modellenen genliklerin açılımla değişiminde kullanılan elastik parametreler, kayaç sismik hız ve yoğunluk değerleriydi ve ekonomik açıdan değersiz olup içerisinde %25’ten daha az gaz çözünmüş tuzlu suyun genlik modelleriyle belirlenmesi olanaksızdı. Bu aşamada sorunun daha derinlemesine incelemek adına kayaç hız ve yoğunluk parametrelerinin nelerden etkilenebileceği temel sorusu üzerine yoğunlaşmak gerekir. Meksika Körfezi veri grubu endüstride de kendisine başvuru mükemmel bir veri bankası olması nedeniyle de problemin çözümünün araştırılmasında kullanılmıştır. Veri grubunun hız ve yoğunluk değerlerinden kayaç elastik sabitleri hesaplanarak problemin çözümüne bir yaklaşım geliştirmeye odaklanılmıştır. Öncelikle sismik hızların birbirine göre değişimi grafiklenerek (Şekil 5.19), farklı akışkan türlerinin genel yönelimi araştırılmıştır. Tuzlu sulu hazne kayaç ve şeyl birimlerinin diğer üç akışkan olan gaz, fizz ve petrolden daha doğrusal yapıda olduğu gözlenmektedir. Bunun yanı sıra gazlı ve fizzli haznenin petrolü haznedeki düşük hızlarda ayrıldığı, ancak yüksek hız değerlerinde üst üste çakıştığı gözlenmektedir. Öte yandan gazlı ve fizzli hazne kayacın sismik hızlarının birbirine göre değişimi ayırt edilemeyecek kadar benzer bir eğilim içindedir. Asıl problemimiz de bu aşamada ortaya çıkmaktadır. Biz artık biliyoruz

ki , V_S hızının akışkan hakkında içerdiği bilgi V_P hızından daha anlamlıdır. Ancak derinlikle bu üç akışkanın çakıştığı gözleminden yola çıkarak derinlikle sismik hızların değişimi de grafiklenerek (Şekil 5.20-5.21) ne yönde bir değişim olduğu araştırılmıştır. Şekil 5.20'ye bakıldığında, akışkan içeren hazne kayaç birimleri üst üste çakışan bir eğilimdeyken akışkan içermeyen şeyl biriminden ayrılmaktadır. Şekil 5.21'de ise gazlı ve fizli birimlerin 0-1.5 km derinlikle petrollü ve tuzlu sulu hazne birimle şeylden ayrıldığı ancak 1.5 km'den sonra bütün jeolojik birimlerin üst üste çakışmaya başladığı gözlenmektedir. Bu aşamada derinliğin kayaç üzerindeki etkisine bir anlam yüklenebilir. Bölüm 2.3'te sismik dalga hızının derinlikle değişimi üzerinde durulmuştu. Jeolojik açıdan derinlikle üst üste binen jeolojik birimlerin sıkılaşacağı, bunun da birçok doğrultuda daha büyük basınca sebep olacağı, aynı zamanda sıcaklığın artarak kayaç yapısına etki edeceği basit bir mantık çerçevesinde kabul edilebilir ki Gassmann kuramında da bu belirtilmişti. Peki, hazne kayaçta konuşlanmış gaz ve petrol bu süreçte nasıl etkilenmektedir. Akışkanlı hazne kayacın yoğunluğuyla doğrudan ilişkili bu durumun derinlikle değişimini gözlemlemek amacıyla grafiklenen yoğunluk değerlerinde (Şekil 5.22), gazlı ve petrollü haznenin diğer birimlere oranla daha düşük değerlerde seyrettiği gözlenmektedir. Bir sonraki adımda akışkanlığın bir ölçütü olarak nitelendirilebilecek poisson oranının derinlikle değişimi de grafiklenerek sonuçları araştırılmıştır (Şekil 5.23). Gazlı ve fizli birimler birbirine çok yakın bir eğilimde diğer üç birimden farklı bir yönelim göstermektedir. Gazlı ve fizli birimin poisson değerleri derinlikle artarken diğer üç birimin derinlikle azalan değerlerde seyrettiği gözlenmektedir. Akışkanın kayaç bulk sabitine etkisinin V_S 'ye göre değişimi bir sonraki adımda grafiklenerek (Şekil 5.25) şeyl biriminin akışkanlı birimden ayıldığı gözlenmektedir. Sismik hızların birbirine oranının çizelge 4.2'den hatırlanacak olursa önemli bir oran olduğu görülmüştü. Bu nedenle bu sefer de bu oranın bulk sabitiyle değişimi grafiklenerek veri grubunun gösterdiği dağılım araştırılmıştır (Şekil 5.26). Buna göre şeylin, tuzlu sulu ve petrollü hazne birimlerinin gazlı ve fizli hazne birimlerine karşıt yönelimle ayrıldığı gözlenmektedir. Ancak gazlı ve fizli birimlerin birlikte aynı bölgede toplanması istenmeyen bir bulgudur. Bu aşamadan sonra üç niteleyicinin kullanımı ile veri grubunun ayrımlılığı araştırılmaktadır. Öncelikle $\lambda\rho - \mu\rho$ değerleri grafiklenerek sonuçları araştırılmıştır (Şekil 5.27). Her bir akışkanın birbirinden ayrımlılığının yanısıra hepsinin şeylden ayrımlılığı da başarılıdır. Özellikle gazlı ve fizli

birimlerin ayrımlılığı da belirgin ve nettir. $\lambda\rho - \mu\rho$ yönteminin başarısı bir kez daha gözlenmektedir. Peki, PI için de bu durum gözlenebilmekte midir? Bu nedenle PI değerleri hesaplanarak I_S , K , $\mu\rho$ ve $\lambda\rho$ 'ya göre değişimleri de grafiklenmiştir (Şekil 5.28-5.31). Yine her biri birimin birbirinden ayrımlılığı belirgindir ancak $PI - \lambda\rho$ grafiğinde daha farklı bir kümelenme gözlenmektedir. Yine aynı şekilde λPI değerleri de veri grubun için hesaplanarak I_S ile değişimi grafiklenmiştir (Şekil 5.32-5.33). Veri grubunu poisson oranının derinlikle değişiminde gazlı ve fizli birimin birbirinden farklı bir yönelimde olduğu gözlenmekteydi. Bu nedenle bu iki akışkan için ayrı, diğer birimler için ayrı ayrı λPI değerlerinin I_S ile değişimi grafiklenmiştir. Ve şeyl ile tuzlu su ve petrollü hazne birimlerinin ayrımlılığı belirgin olarak gözlenmektedir. Yine fiz ve gazlı haznenin ayrımlılığı da önemli oranda başarılıdır.

Zeoppritz eşitliklerine yapılan doğrusal yaklaşımlar hatırlanacak olursa, normal yansıma katsayısı eşitliklerin ilk parametresini oluşturmaktaydı. Bu nedenle öncelikle veri grubundaki her bir akışkan için hazne kayacın normal yansıma katsayı değerleri V_P ve V_S için ayrı ayrı hesaplanmıştır. Öncelikle tuzlu sulu hazne birimin diğer akışkanlardan ayrımlılığı için $NI_{P_{tuzlu\ su}}$ değerlerinin $NI_{P_{gaz-fiz-petrol}}$ değerlerine göre değişimi grafiklenerek (Şekil 5.34) birer doğru denklemi ile tanımlanmış, aralarındaki ilişki sayısal olarak ortaya koyulmuştur. Daha sonra da her bir akışkan için NI_S değerlerinin NI_P ile değişimi grafiklenerek birer doğrusal eşitlikle ortaya konmuştur (Şekil 5.35). Eşitlik (5.16)'da verilen ΔF ile her bir akışkan türü için hesaplanan NI_P değerleri de grafiklenerek akışkanların ayrımlılığı ortaya koyulmuştur. Her bir akışkanın ayrımlılığında önemli bir başarı gözlenmektedir. Özellikle temel problemimiz olan gazlı ve fizli birimlerin birbirinden ayrımlılığı çok net iken bu sefer de gazlı ve petrollü birimler her ne kadar birbirinden ayrılrsa da saçılarak iç içe geçmektedir.

6. SAHA ÇALIŞMASI: KUZEY VİKİNG GRABENİ, KUZEY DENİZİ

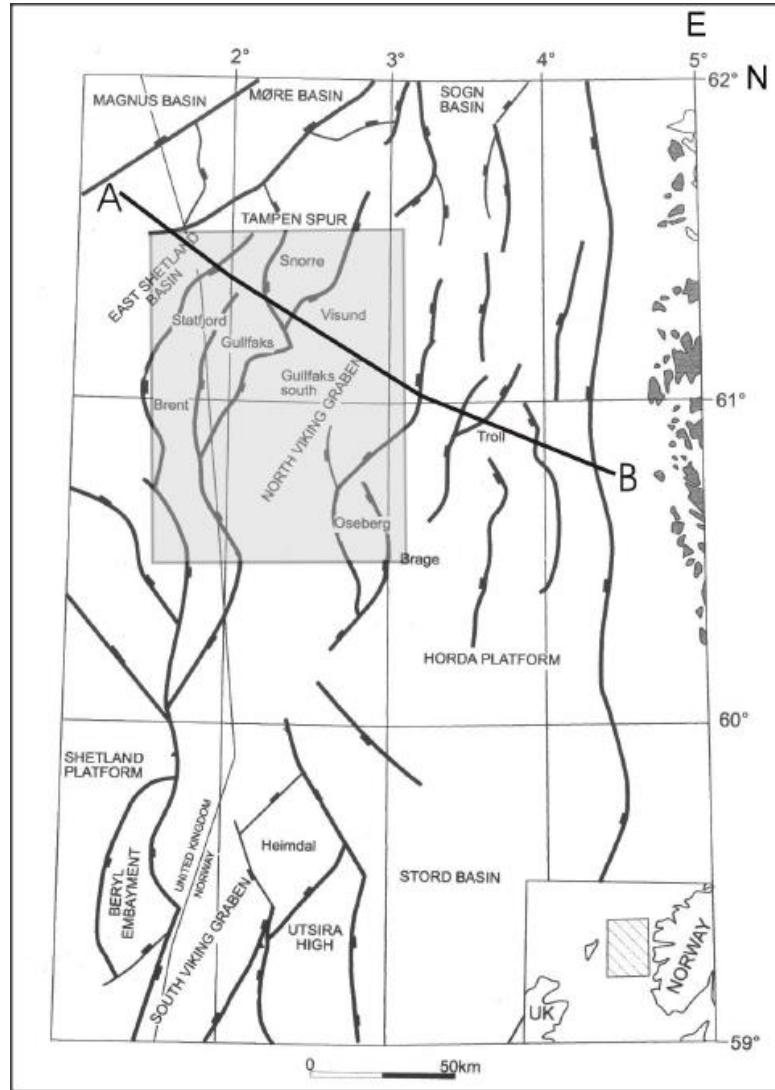
6.1 Giriş

Veri grubu Mobil Petrol tarafından Kuzey Denizi'ndeki Kuzey Viking Grabeninden toplanmıştır (Şekil 6.1 – 6.2). 2B'li deniz sismiği verisi ile aynı sismik hat üzerindeki iki farklı kuyudan toplanmış kuyu logu kayıtlarını içeren veri grubu ilk defa 1994 yılında SEG (Society of Exploration Geophysicists) tarafından Los Angeles'ta düzenlenen 64. SEG Uluslararası Sergi ve Yıllık Buluşması'ndaki bir eğitim seminerinde tanıtılmıştır. Eğitim semineri, özellikle AVO ve ters çözüm tekniklerinin geliştirilmesi başta olmak üzere, sismik veri ile kuyu logu verilerinin nasıl en iyi şekilde hidrokarbon belirteci olarak kullanımının araştırılması üzerine verilmiştir (Keys vd. 1998). Veri grubu, Stanford Üniversitesi araştırma raporları başta olmak üzere birçok araştırmacının yayınlarında kullanılmış olup içerdiği yoğun deniz tabanı tekrarlı yansımalarının bastırılması amacıyla veri işlem akış şemalarının geliştirilmesinde de araştırmalara dahil edilmiştir. Verinin tez kapsamında kullanımının başlıca nedeni ise aktif olarak hidrokarbon haznesi olan bir bölgede kaydedilmiş sismik veri ile bu verinin toplandığı sismik hattı kesen iki kuyudan elde edilmiş log verisi ile bu kuyulardan elde edilmiş petrofiziksel verileri içermesidir.

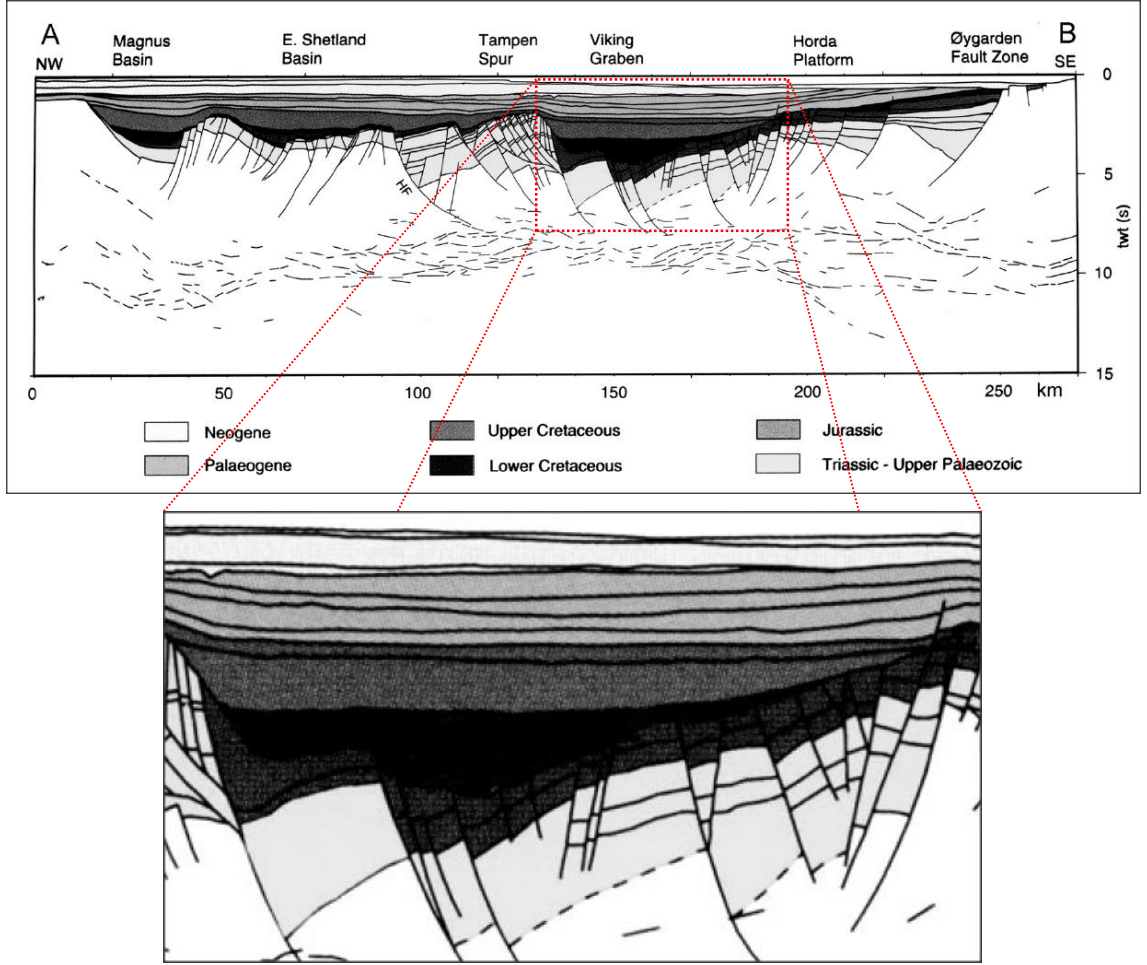
6.2 Kuzey Viking Grabeni Bölgesel Jeolojisi

Kuzey Denizi Batı Avrupa'nın en geniş petrol sistemlerini barındırmaktadır. Açılma rejimi gösteren tektonik birimlerin yoğunluğu petrolün ikinci göçündeki kapanlanmasına ev sahipliği yapmaktadır. Kuzey Denizi'ndeki birincil hazne birikimleri, Jurasik yaşlı klastik tortulları, ikincil hazne birikimleri ise Paleosen yaşlı derin su klastikleri olmakla beraber petrol ve gaz oluşumu, Cretaceous zamandan başlayıp günümüze kadar devam etmektedir. Bölgedeki petrol ve gaz birikimleri, Kimmeridgian Şeylleri Toplam Petrol (KŞTP) Sistemi olarak tek bir isim altında toplanmaktadır. KŞTP Sistemi'nin kaynak kayaçları, geç dönem Jurassic'den erken dönem Cretaceous'a kadarki süre içerisindeki açılma rejimi gösteren birimlerde depolanmıştır. Kimmeridgian şeylleri, tipik ikinci tip kerojen karışımı içermektedir. Cretaceous'un tabanında belirgin bir uyumsuzluk zonu

bulunmaktadır ki sismik hat üzerindeki açılmış kuyulardan A - kuyusunda yaklaşık 1970 ms (çift yol seyahat zamanı) ve B - kuyusunda yaklaşık 2460 ms'ye (çift yol seyahat zamanı) denk gelmektedir. Kuzey Viking Grabeni'nde birincil hazne birimleri Jurassic yaşlı klastik tortullar oluşturmaktadır. Hidrokarbon kapanları genellikle faylarla sınırlanmıştır. Grabenin ikincil hazne birimleri ise Paleosen yaşlı derin deniz klastiklerinden oluşmaktadır.



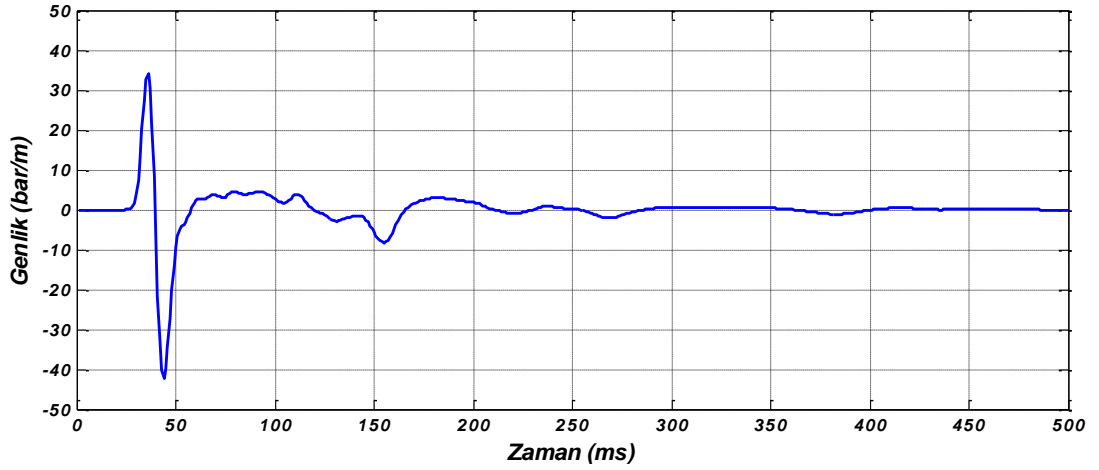
Şekil 6.1 Kuzey Denizi yapısal açılma rejimleri ve Viking Grabeni (Ryseth, 2001'den değiştirilerek alınmıştır)



Şekil 6.2 Şekil 6.1’de verilen Viking Grabeni’ni doğrusal kesen AB kesitinin jeolojik kesiti (Christiansson vd. 2000’den değiştirilerek alınmıştır)

6.3 Sismik Veri

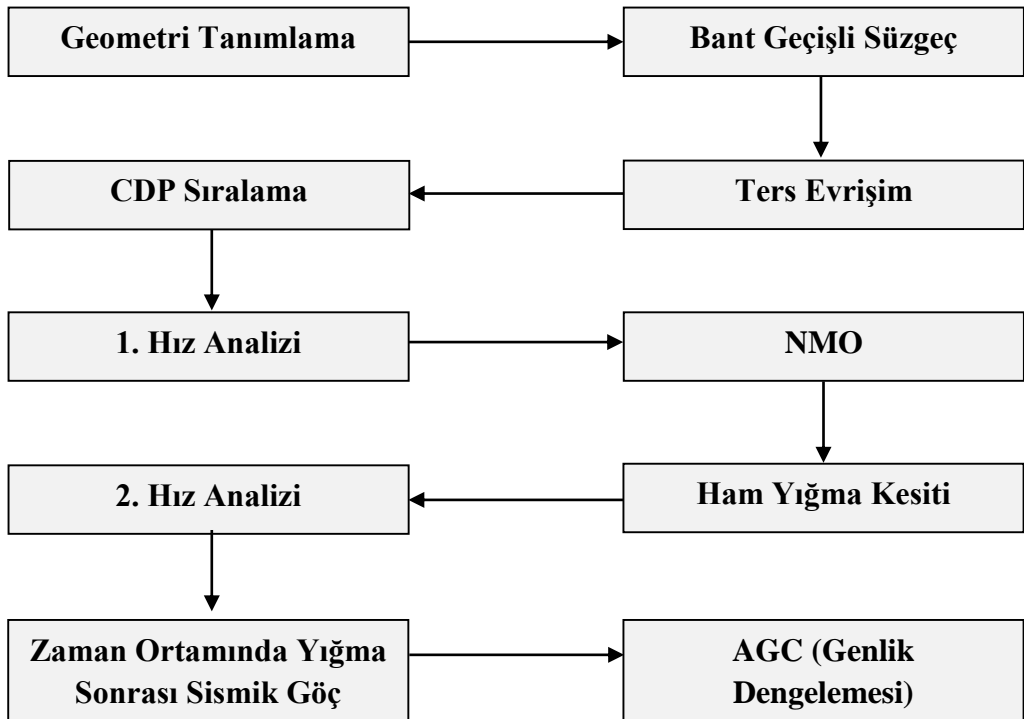
Sismik deniz verisi 2B’li olup toplamda 1001 atış kaydı içermektedir. Her atış kaydı için 120 alıcı içermektedir. Verinin kayıt süresi 6 sn olup örnekleme aralığı 4 ms’dir. Atış ve alıcı grup aralığı 25 m’dir. Yakın açılımdaki alıcı 262 m, uzak açılımdaki alıcı ise 3237 m’dir. Kaynaktan çıkan enerjinin kaynağın 250 m altındaki uzak alan kaydı Şekil 6.3’teki gibidir. Proje kapsamında kayıt alınmak istenen alıcı derinliği 10 m olup hava tabancası grubunun derinliği 6 m’dir. Kaynak grubu toplamda 24 aktif hava tabancası içermektedir ve toplam hacim 3650 $inç^3$ ’tür. Deniz tabanı derinliği ortalama 350 m’dir.

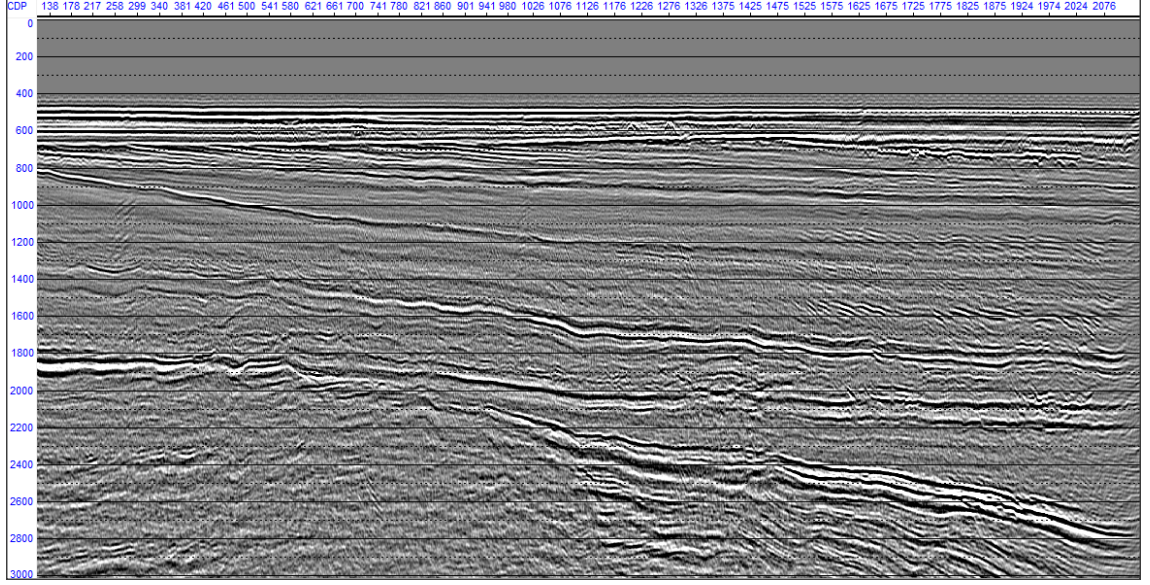


Şekil 6.3 Kaynaktan çıkan enerjinin kaynağın 250 m altındaki uzak alan kaydı

Veri grubunun işlenerek elde edilen sismik kesit, çizelge 6.1’de verilen veri işlem aşamaları uygulanmasıyla elde edilmiştir. Elde edilen sismik kesit 0 – 3000 ms için Şekil 6.4’te verilmektedir. Bununla birlikte kuyu konumlarının sismik hat üzerindeki konumları da Şekil 6.5’te ve Şekil 6.6’daki gibidir.

Çizelge 6.1 Veri işlem akış şeması



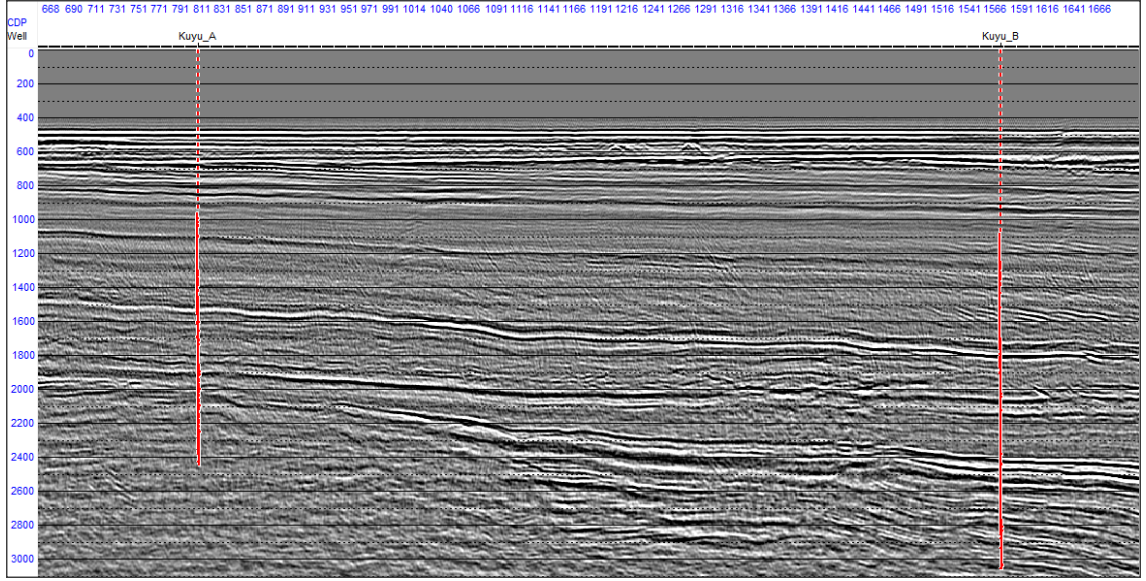


Şekil 6.4 Veri grubunun işlenmesiyle elde edilen sismik kesit (0 – 3000 ms).

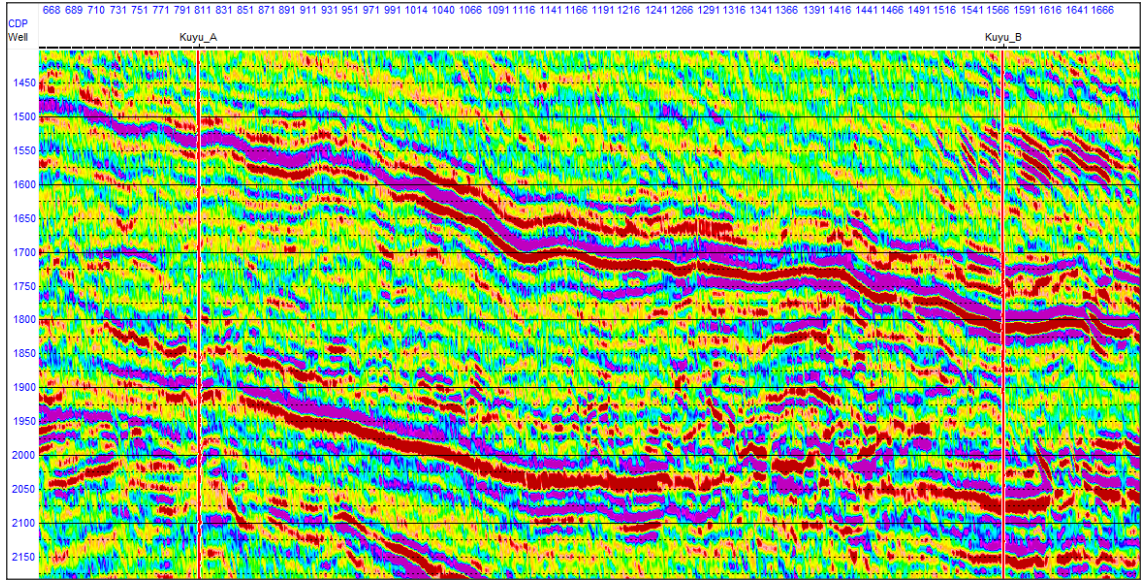
Yatay eksen CDP (ortak derinlik noktası), düşey eksen zaman (ms)

6.4 Kuyu Logu Verileri

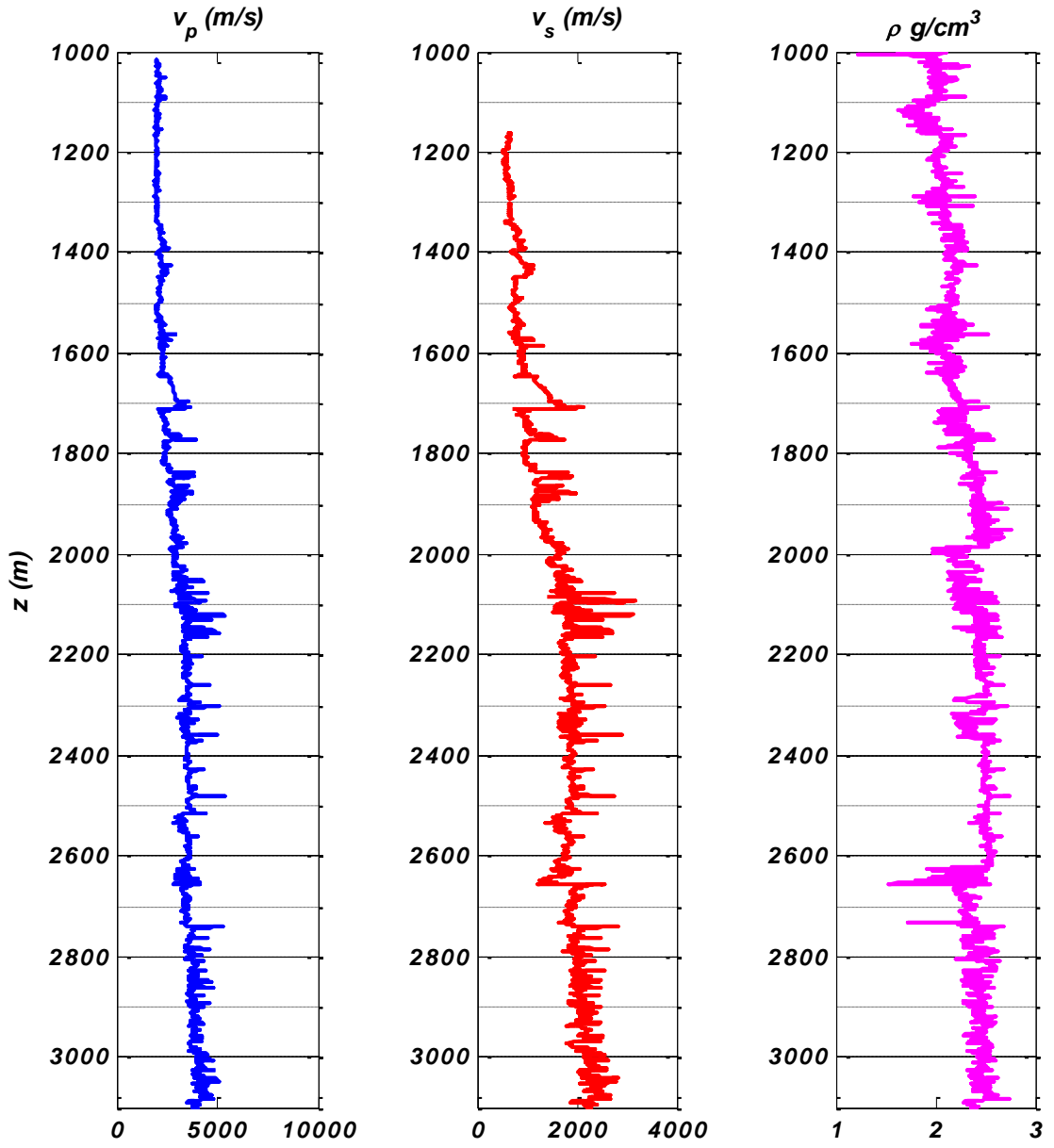
Veri grubunu sismik hattı kesen iki kuyudan toplanmıştı (kuyu A ve B) . A kuyusu sismik hat üzerindeki 440. atış noktasında (CDP 808), B kuyusu ise 822. atış noktasında (CDP 1572) hat ile kesişmektedir. Kuyu logu verileri V_P , V_S ve ρ değerlerini içermektedir ve 1000 – 3000 m derinlik için kaydedilmiştir. Tüm kuyu verileri RKB (Rotary Kelly Bushing) üzerinden kaydedilmiş olup A kuyusu için kabaca deniz yüzeyinden 17.5 m yukarıda (deniz tabanı 355 m) ve B kuyusu için 26.5 m (deniz tabanı 355.5 m) yukarıdadır. Bununla birlikte gerek jeolojik birimlerin gerekse boşluklardaki akışkanın kestirimine yönelik her bir kuyu petrofiziksel veri içermektedir. A kuyusunun V_P , V_S ve ρ değerleri 1000 – 3100 m için derinliğe göre değişimi Şekil 6.7’deki gibidir. Aynı zamanda bu kuyu için jeolojik birimlerdeki boşluklarda birikmiş akışkanların derinlikle yüzdelik değişimi de Şekil 6.8’de verilmektedir. A kuyusu için kaydedilmiş petrofiziksel veri grubunun derinlikle değişimi Şekil 6.9’daki gibidir.



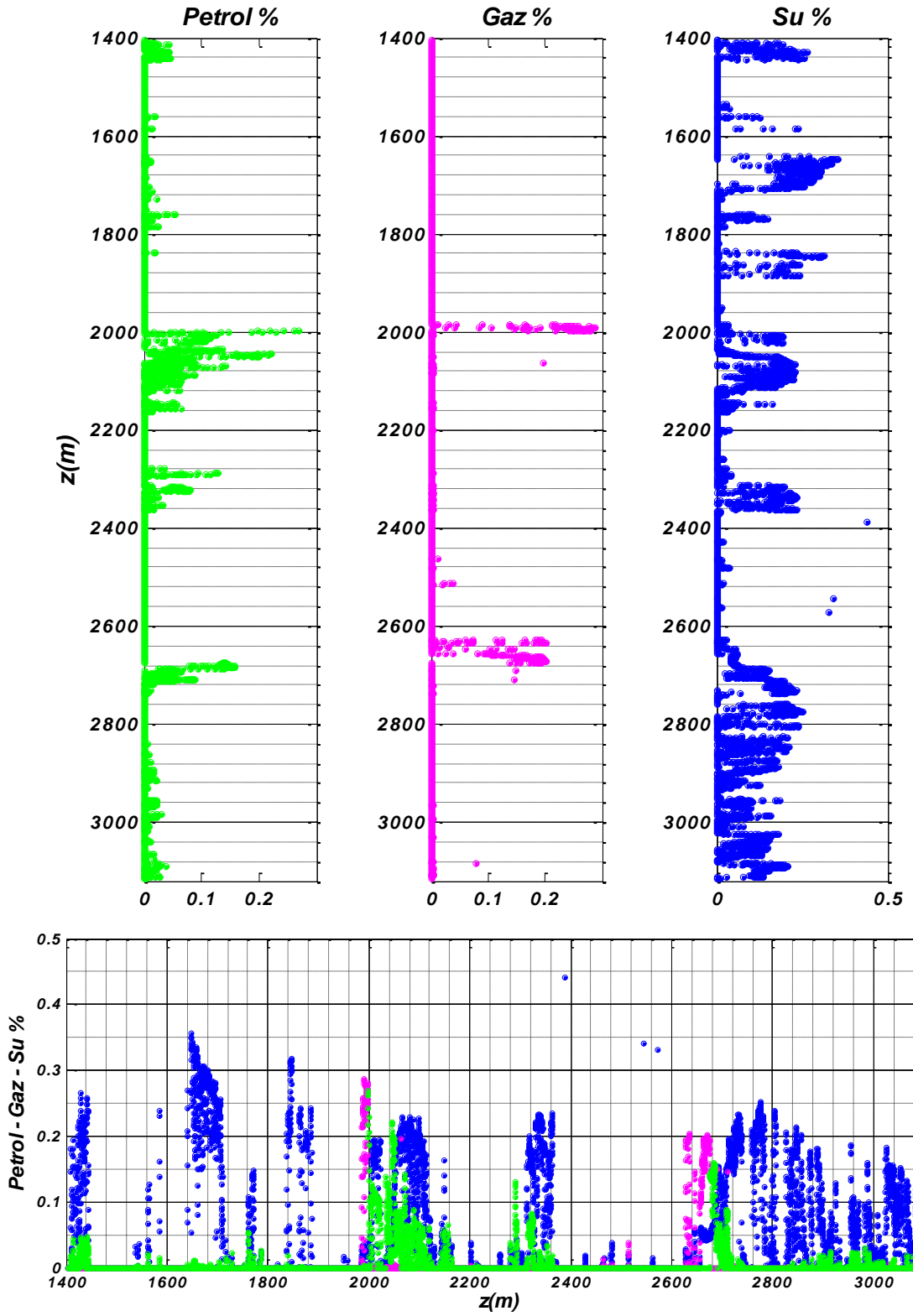
Şekil 6.5 Sismik hat üzerindeki kuyu konumları (0-3200 ms)



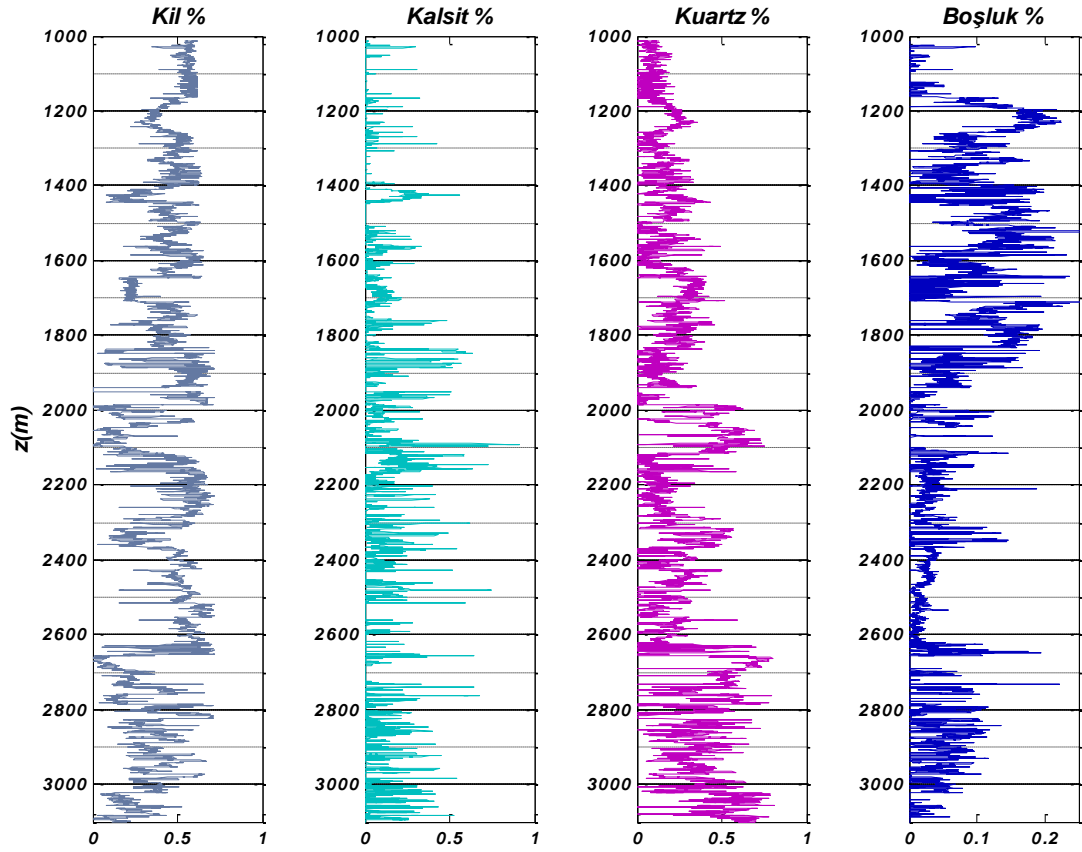
Şekil 6.6 Sismik hat üzerindeki kuyu konumları (1400-2200 ms)



Şekil 6.7 A kuyusunun V_p , V_s ve ρ değerlerinin 1000 – 3100 m için derinliğe göre değişimi



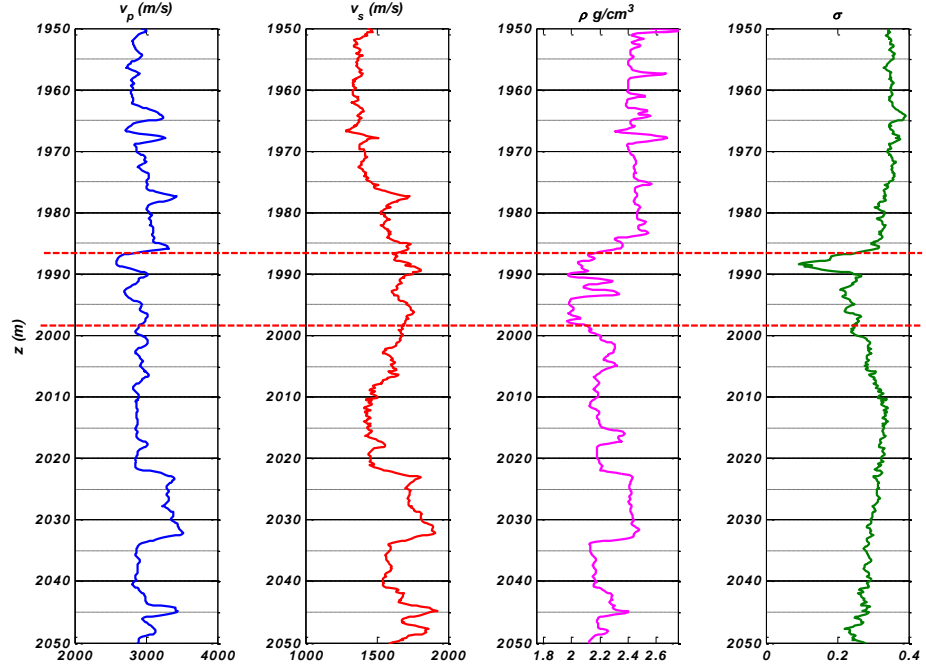
Şekil 6.8 A kuyusunun jeolojik birimlerdeki boşluklarda birikmiş akışkanların derinlikle yüzdelik değişimi



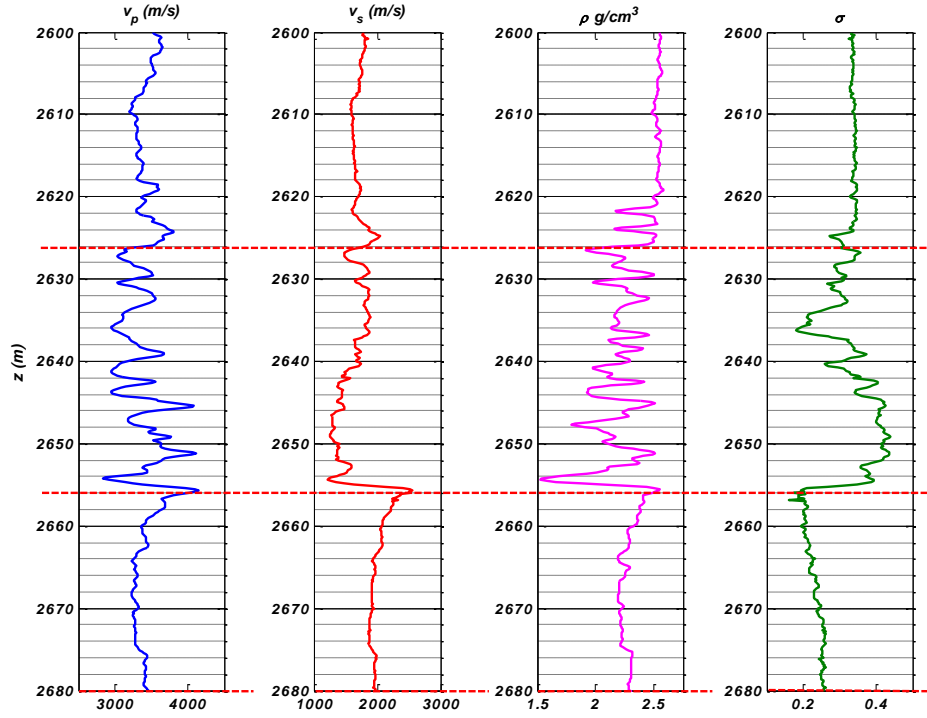
Şekil 6.9 A kuyusu için kaydedilmiş petrofiziksel veri grubunun derinlikle değişimi

Şekil 6.8’de gaz içeren hazne birimler göz önüne alınarak Şekil 6.7’te verilen kuyu loglarını daha hassas yorumlamak adına, gazlı hazne birimlerin bulunduğu derinlik değerleri büyütülerek Şekil 6.10’da ve Şekil 6.11’de verilmektedir. Aynı zamanda A kuyusu için σ oranı da hesaplanarak üçüncül bir değişken olarak Şekil 6.10-6.11 üzerinde verilmektedir. Şekil 6.10’a bakıldığında, bütün elastik parametrelerdeki ani düşüş 1986 m’de gözlenmektedir. Yaklaşık 1998 m’de, yoğunluktaki ani artış da anlamlıdır. Keza, σ oranındaki ani artış da bu noktada beklendiği gibidir ki gazlı hazne birimin bittiği yaklaşık derinliğe denk gelmektedir. Bununla birlikte, Şekil 6.11’e bakıldığında, bütün elastik parametrelerdeki ani düşüş 2630 m’de gözlenmektedir. Yaklaşık 2655 m’de V_P , V_S ve ρ değerlerinde ani bir artış gözlenirken, bu seviyeden sonra V_P , V_S , ρ ve σ oranında keskin ve ani bir düşüş 2680 m’ye kadar gözlenmektedir. İlginçtir Şekil 6.8’e bakıldığında, gazlı birimlerde bu aralık için yoğun bir artış gözlenmektedir. Bununla birlikte Şekil 6.9’da verilen petrofiziksel veriye bakıldığında, 2000 m civarında, kuartz ve boşluk oranında ani

bir artış gözlenirken, kil ve kireçtaşı değerlerinde ani bir düşüş gözlenmektedir. Benzer biçimde 2650 m'den sonra bu durum tekrarlanarak kendini göstermektedir.

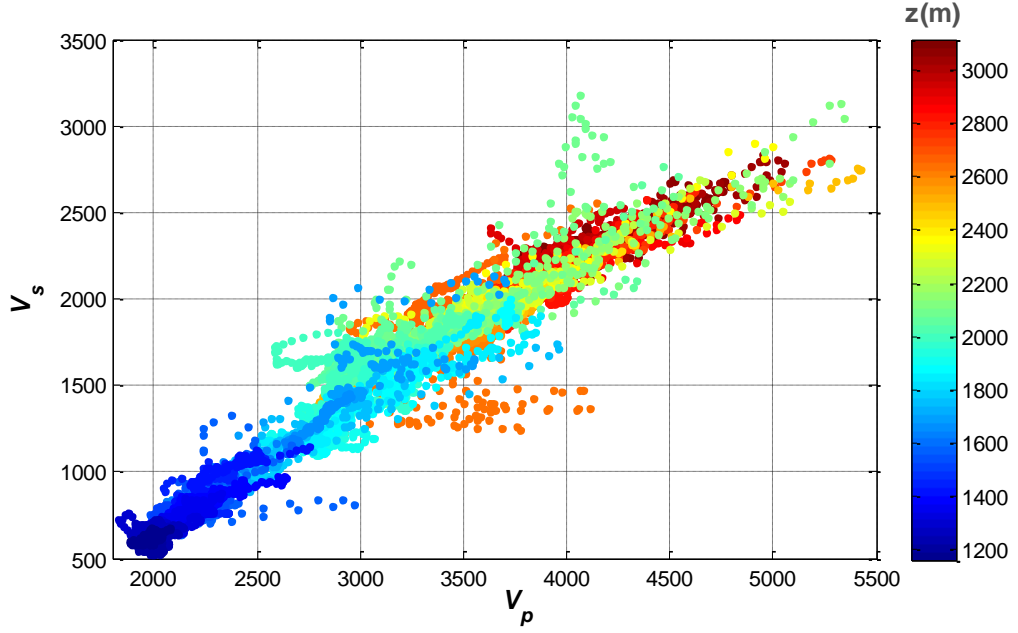


Şekil 6.10 A kuyusu için gazlı birimlerin V_p , V_s , ρ ve σ oranı değerlerinin derinlike değişimi (1986 – 1998 m için)

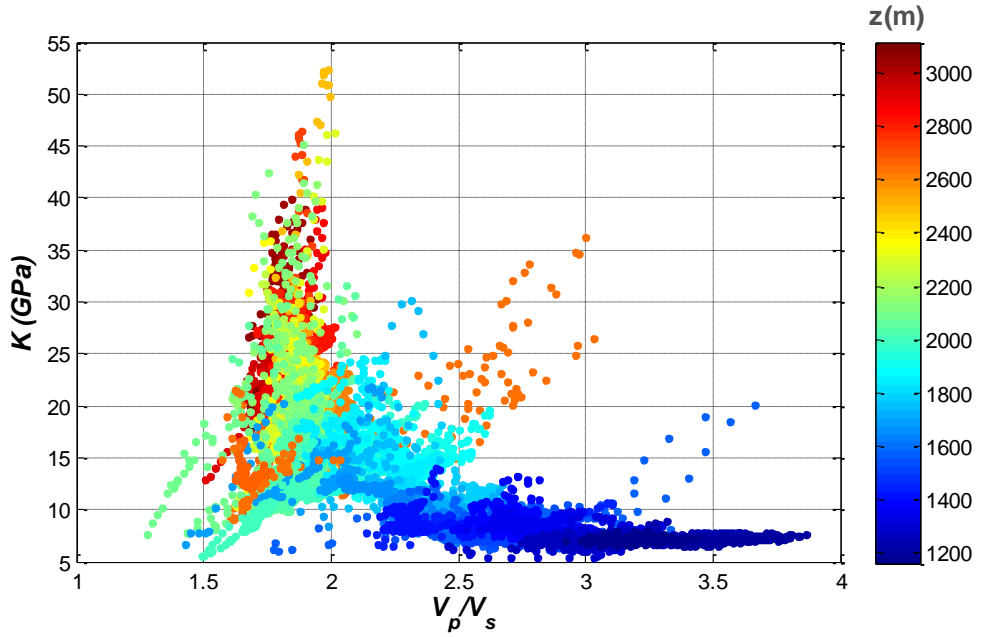


Şekil 6.11 A kuyusu için gazlı birimlerin V_p , V_s , ρ ve σ oranı değerlerinin derinlike değişimi (2630 – 2675 m için)

Bu aşamadan sonra gerek bölüm 5.1'deki gerekse bölüm 5.3'teki uygulamaların sonuçları temel alınarak araştırılan elastik parametrelerin değişimi A kuyusu verileri için de hesaplanarak grafiklenmiştir. Öncelikli olarak sismik hızların birbirine göre değişimi grafiklenerek derinlikle değişimleri araştırılmıştır (Şekil 6.12). Ardından da V_p , V_s oranının K ile değişimi derinlikle verilmektedir (Şekil 6.13).

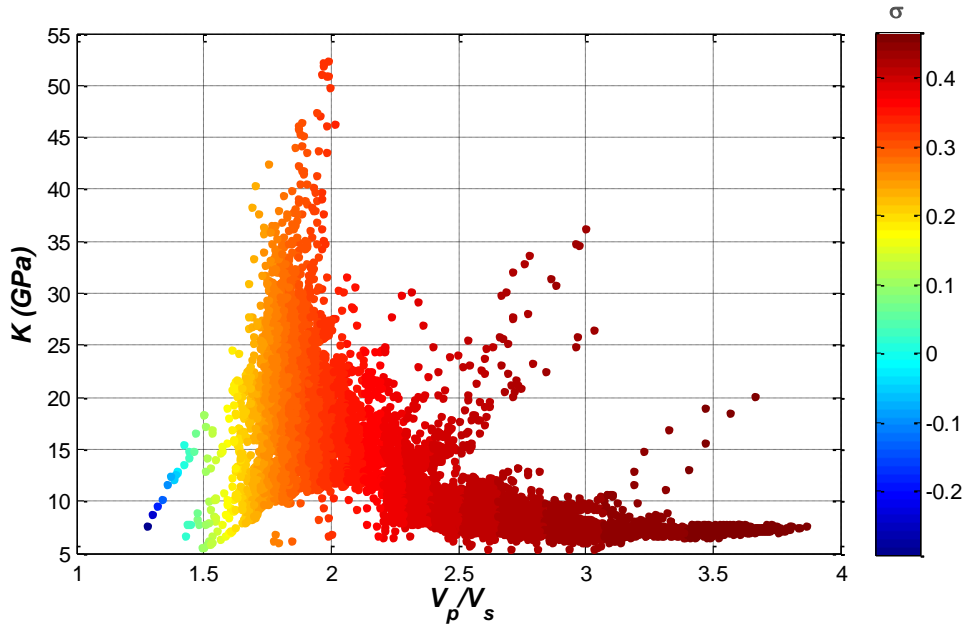


Şekil 6.12 A kuyusu için V_p , V_s değerlerinin derinlike değişimi



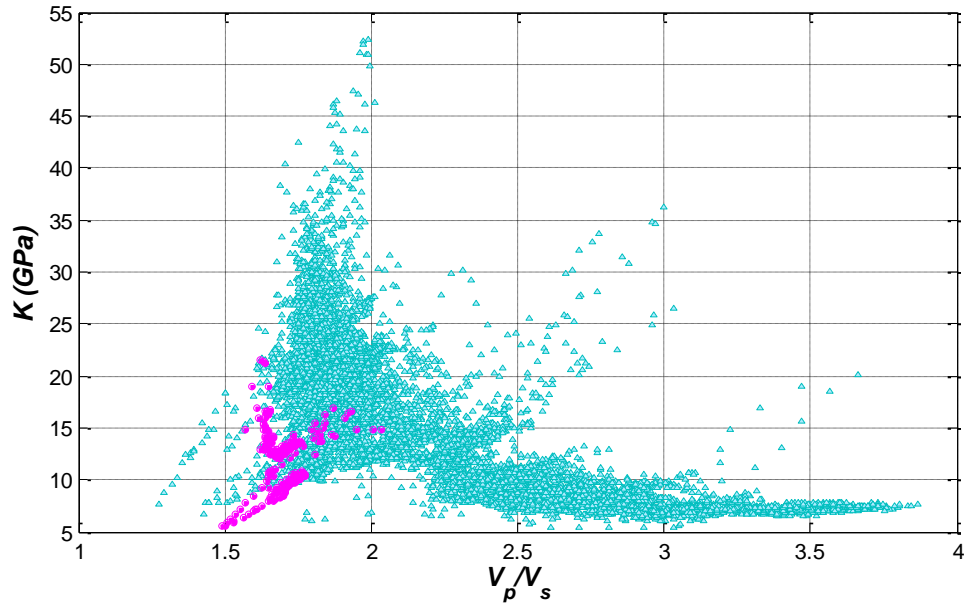
Şekil 6.13 A kuyusu için V_p , V_s oranının K ile değişimi

Benzer şekilde V_p , V_s oranının K ile değişiminin üçüncül bir değişken için σ oranı ile değişimi de grafiklenerek Şekil 6.14’de verilmektedir. Gerek K sabitinde, gerekse V_p , V_s orandaki küçük değerlerin ortaya çıktığı alana odaklanıldığında, kuyu logu verileriyle bu seviye ilişkilendirilebilir niteliktedir. Şekil 6.8’de olası gaz ve petrolün derinlik seviyeleri bilinmektedir. Bu nedenle hedef hazne seviyelerin derinlikleri öncelikli olarak gaz ardında petrol için belirlenerek, hazne olarak nitelendirilebilecek derinlikteki V_p , V_s oranlarının K ile değişimleri sırasıyla gaz ve petrollü hazne birimler için Şekil 6.15’te ve Şekil 6.16’da verilmektedir. Şekil 5.4 ve Şekil 5.26 hatırlanacak olursa, gazlı ve petrollü birimlerin sulu birimlere oranla daha düşük V_p/V_s değerlerine sahip olduğu gözlenmişti. Aynı şekilde A kuyusu içinde bu durum söz konusudur. Şekil 6.14’ye tekrar bakıldığında, σ oranının düşük değerlerde seyrettiği alanlar gazlı ve petrollü birimlere denk gelmektedir.



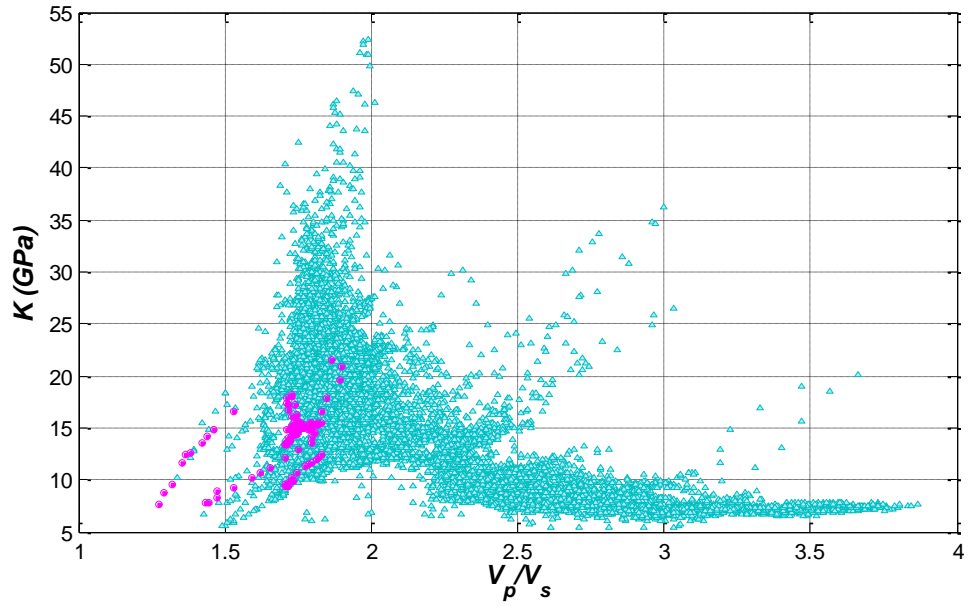
Şekil 6.14 A kuyusu için V_p , V_s oranının K ile değişiminin σ oranı dağılımı

Benzer şekilde A kuyusunun $\lambda\rho - \mu\rho$ değerleri de hesaplanarak Şekil 6.17’de verilmektedir. Gazlı ve petrollü hazne birimlerin düşük $\lambda\rho$ değerlere sahip olduğu gerek Şekil 5.5’te gerekse Şekil 5.27’de gözlenmektedir. Aynı şekilde A kuyusunun olası gazlı ve petrollü hazne birimleri ayrı ayrı çizdirilerek bakıldığında, bu birimler hedef derinliğe denk geldiği alan için düşük $\lambda\rho$ değerlerinde ortaya çıkmaktadır (Şekil 6.18-6.19).



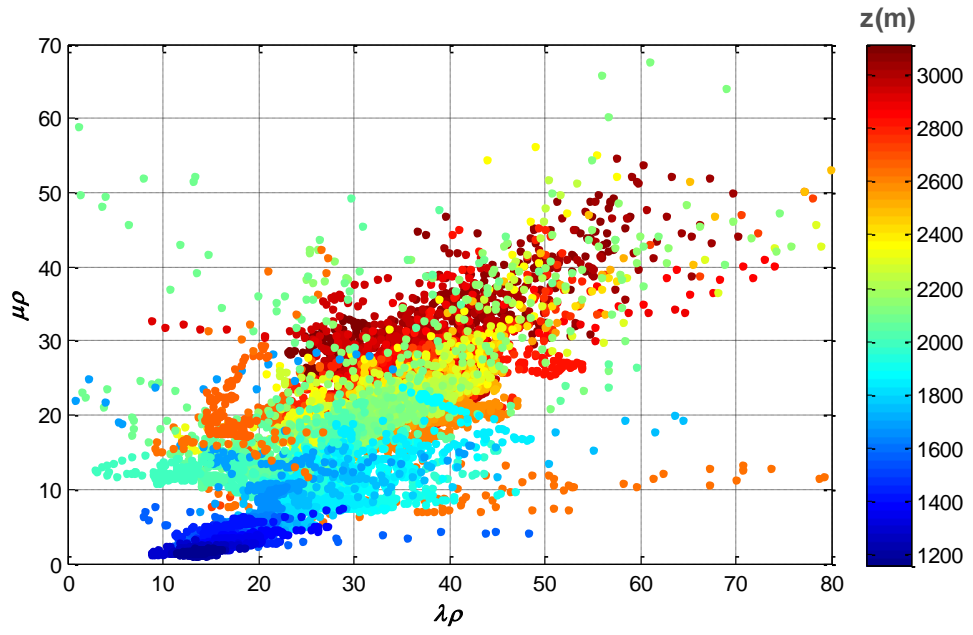
Şekil 6.15 A kuyusu için V_p , V_s oranının K ile değişiminin σ oranı dağılımı.

Gazlı hazne birimlerin değerleri macenta rengeyle verilmektedir

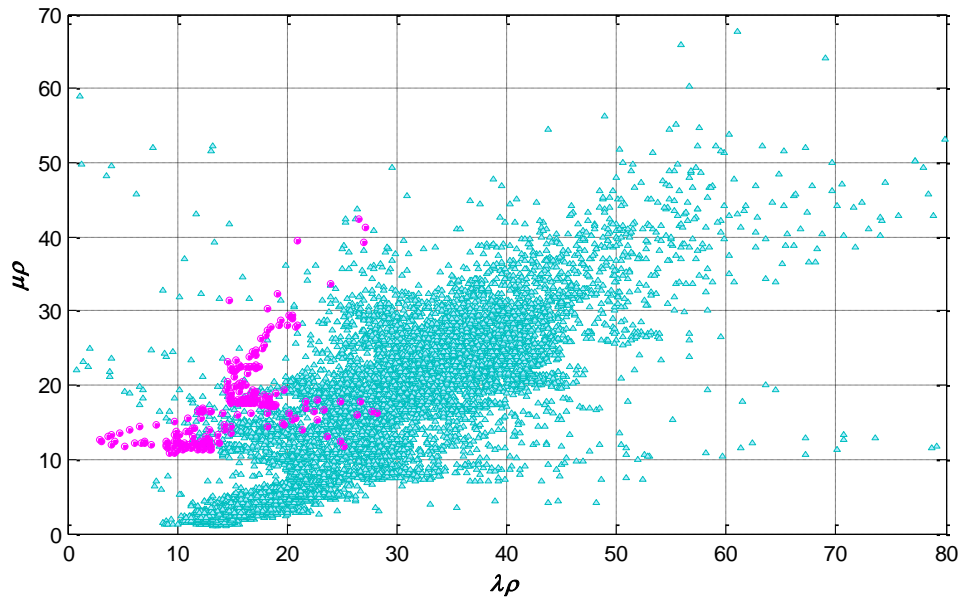


Şekil 6.16 A kuyusu için V_p , V_s oranının K ile değişiminin σ oranı dağılımı.

Petrollü hazne birimlerin değerleri macenta rengeyle verilmektedir

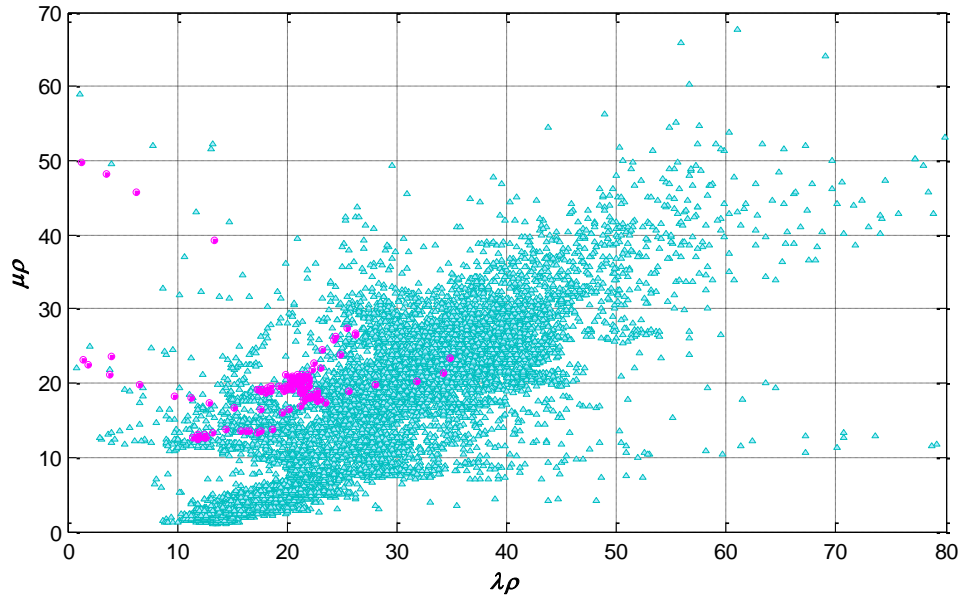


Şekil 6.17 A kuyusu için $\lambda\rho - \mu\rho$ değişiminin derinlikle dağılımı



Şekil 6.18 A kuyusu için $\lambda\rho - \mu\rho$ değişiminin derinlikle dağılımı.

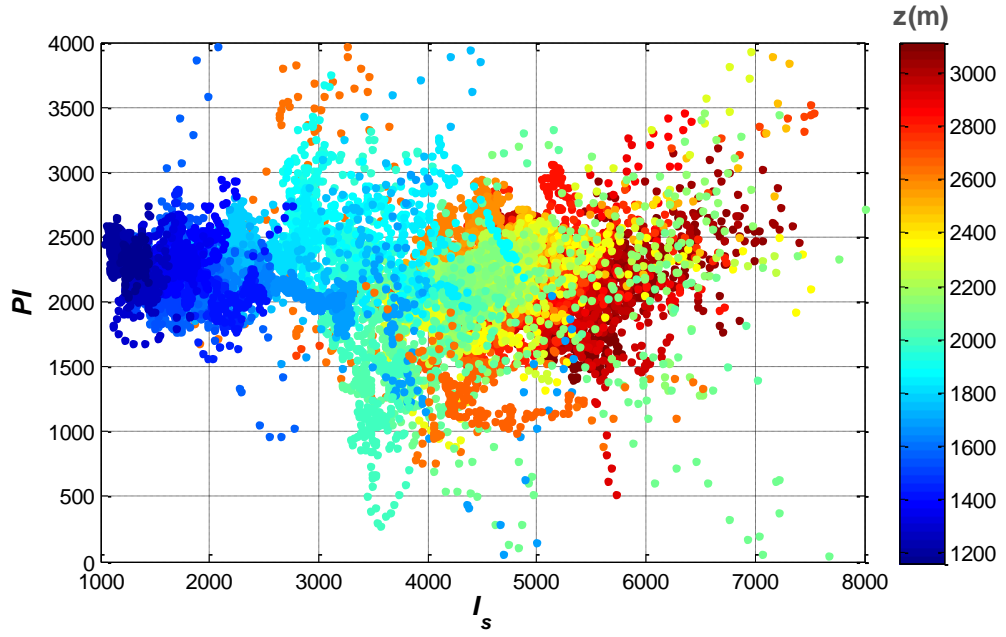
Gazlı hazne birimlerin değerleri macenta rengeyle verilmektedir



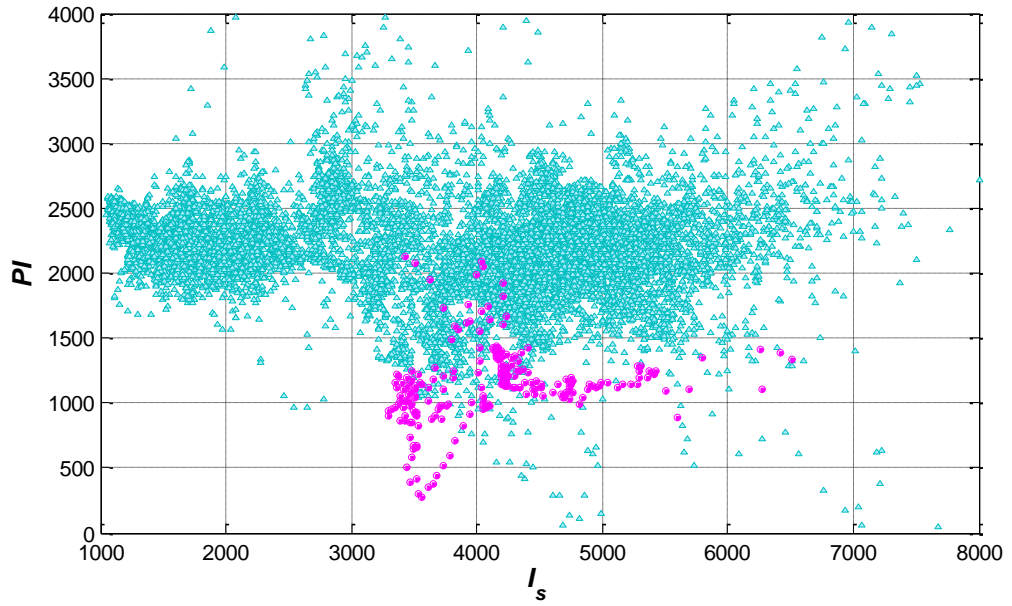
Şekil 6.19 A kuyusu için $\lambda\rho - \mu\rho$ değişiminin derinlikle dağılımı.

Petrollü hazne birimlerin değerleri macenta rengeyle verilmektedir

Bir sonraki aşamada A kuyusunun PI değerleri hesaplanmış ve I_S değişiminin derinlikle dağılımı Şekil 6.20’de verilmektedir. PI değerlerinin hesaplanmasında, c sabiti $\sqrt{2}$ olarak kabul edilmiştir. Buradaki temel amaç, bir sonraki adımda hesaplanacak olan λPI değerlerine de bir yaklaşım sağlamaktır. Hatırlanacak olursa, λPI ’in kuramsal temelinde c sabitine $\sqrt{2}$ varsayımı yapılmıştı. Yine olası gazlı ve petrollü hazne birimler de ayrı ayrı çizdirilerek bakıldığında (Şekil 6.21-6.22), bu hazne birimlerin hedef derinliğe denk geldiği alanların düşük PI değerlerinde ortaya çıktığı gözlenmektedir. Şekil 5.7 ve Şekil 5.28’de de bu durum benzer biçimde gözlenmektedir. A kuyusunun λPI değerlerinin I_S ile değişimi de öncelikle derinlikle grafiklenerek Şekil 6.23’de verilmektedir. Olası gazlı ve petrollü hazne birimler de yine ayrı ayrı çizdirilerek bakıldığında (Şekil 6.24-6.25), bu hazne birimlerin hedef derinliğe denk geldiği alanların düşük λPI değerlerinde ortaya çıktığı gözlenmektedir. Son olarak λPI değerlerinin K ile değişimi de ilk etapta derinlikle grafiklenerek Şekil 6.26’te verilmektedir. Olası gazlı ve petrollü hazne birimler de yine ayrı ayrı çizdirilerek bakıldığında (Şekil 6.27-6.28), bu hazne birimlerin hedef derinliğe denk geldiği alanların sifra yaklaşıma eğiliminde olduğu gözlenmektedir ki benzer bir durum Şekil 5.14’te da gözlenmektedir.

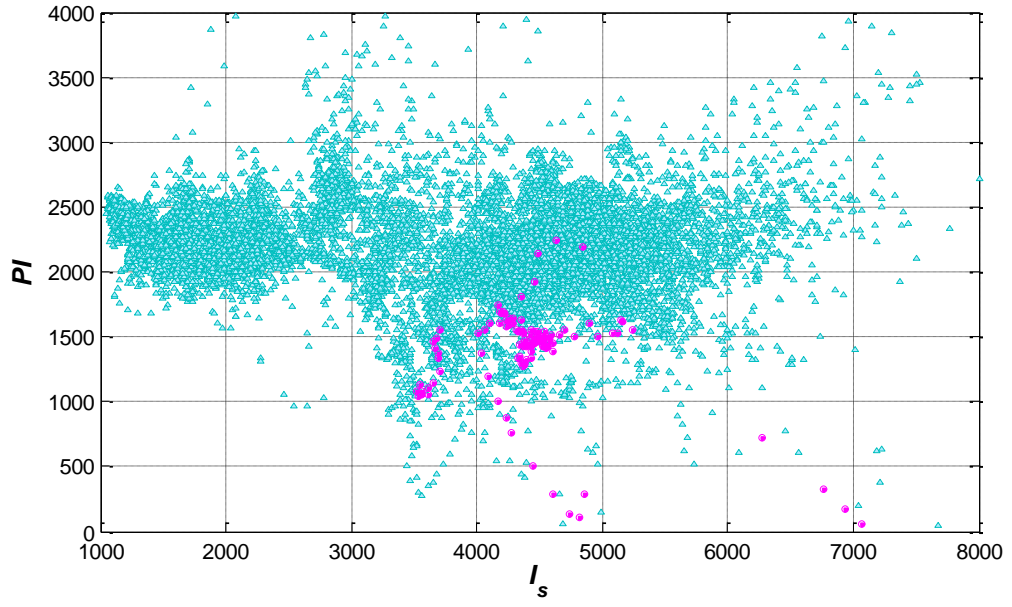


Şekil 6.20 A kuyusu için $PI - I_s$ değişiminin derinlikle dağılımı



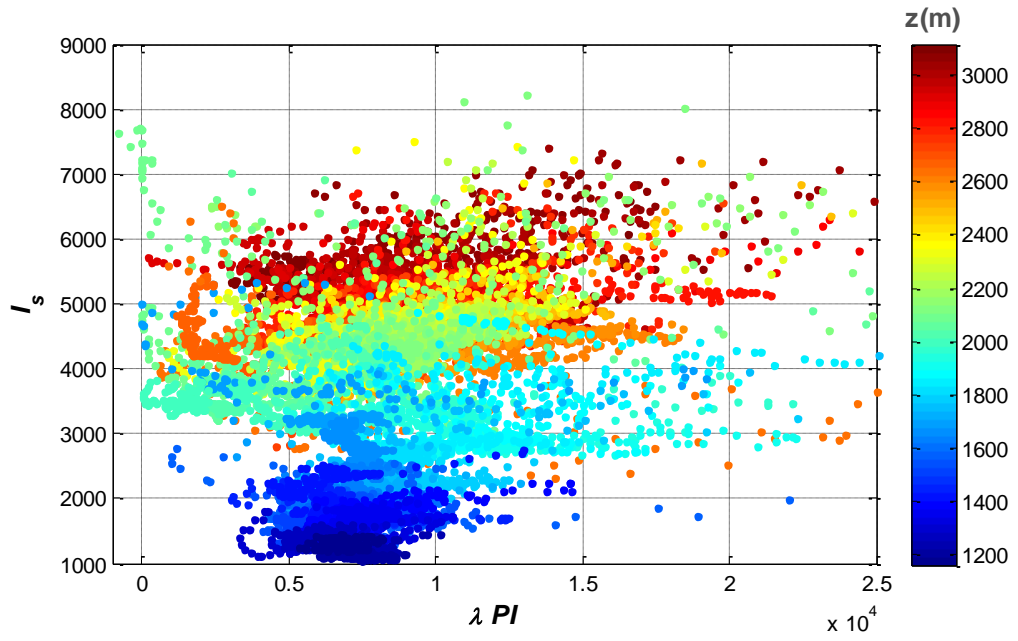
Şekil 6.21 A kuyusu için $PI - I_s$ değişiminin derinlikle dağılımı.

Gazlı hazne birimlerin değerleri macenta rengiyle verilmektedir

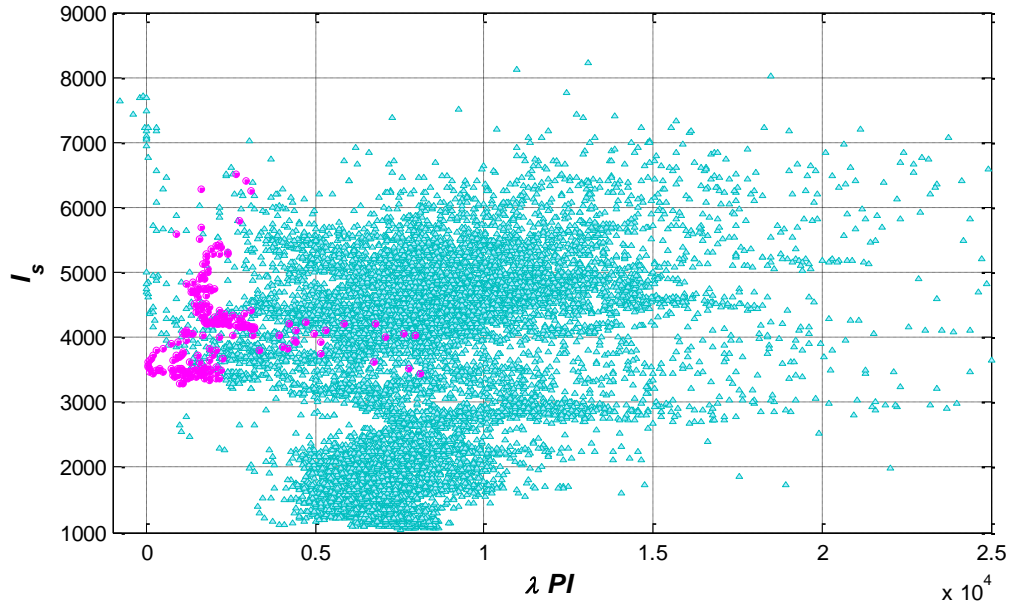


Şekil 6.22 A kuyusu için $PI - I_s$ değişiminin derinlikle dağılımı.

Petrollü hazne birimlerin değerleri macenta rengeyle verilmektedir

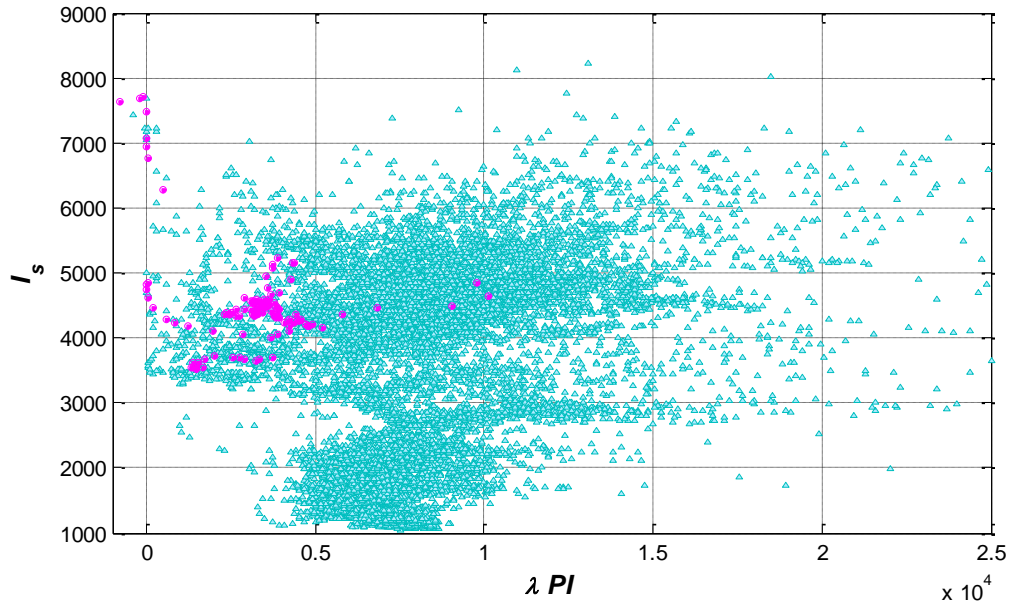


Şekil 6.23 A kuyusu için λPI değerlerinin I_s ile değişiminin derinlikle dağılımı



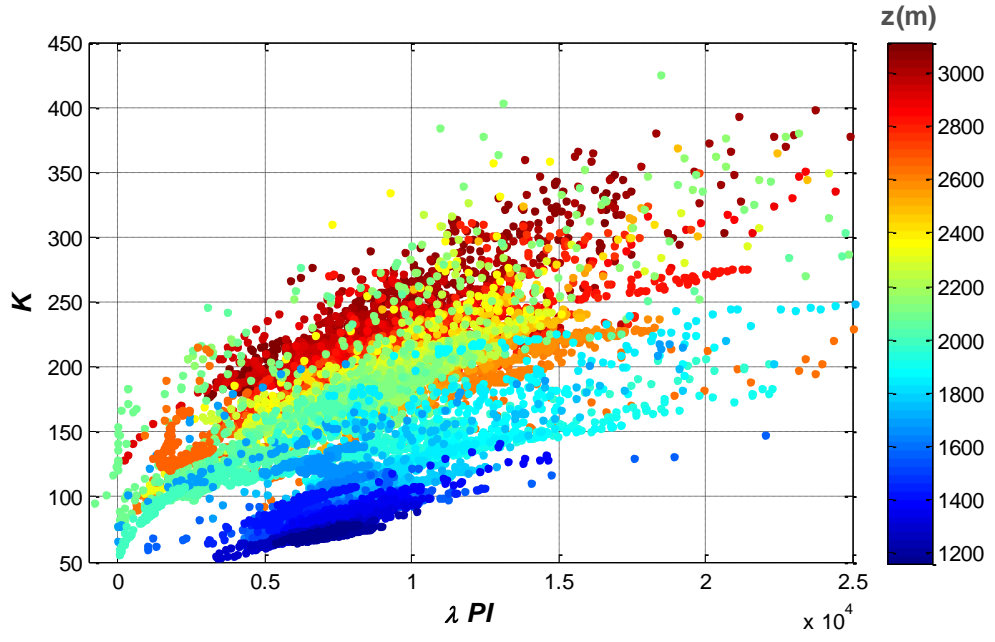
Şekil 6.24 A kuyusu için λPI değerlerinin I_s ile değişiminin derinlikle dağılımı.

Gazlı hazne birimlerin değerleri macenta rengeyle verilmektedir

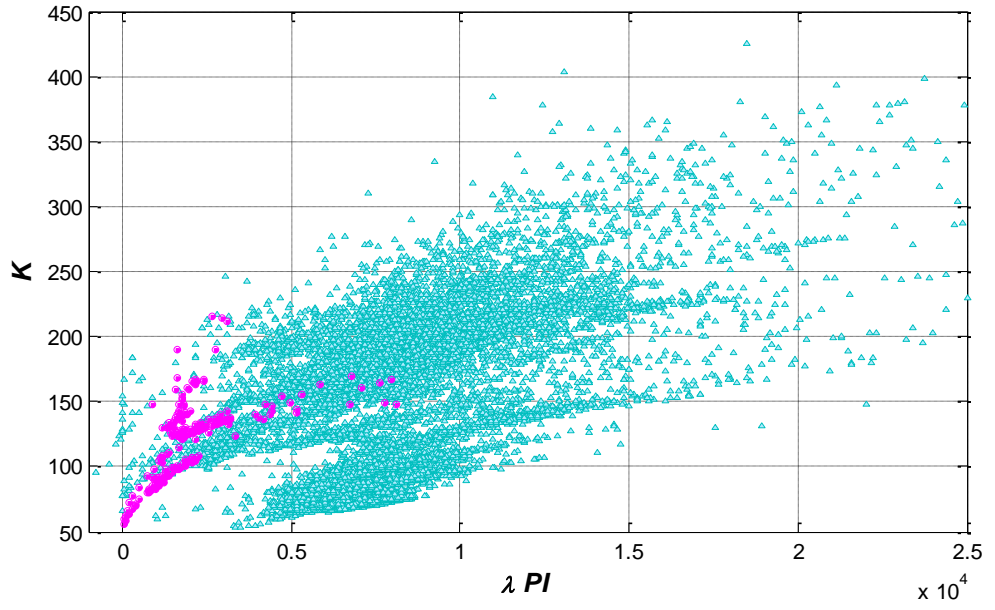


Şekil 6.25 A kuyusu için λPI değerlerinin I_s ile değişiminin derinlikle dağılımı.

Petrollü hazne birimlerin değerleri macenta rengeyle verilmektedir

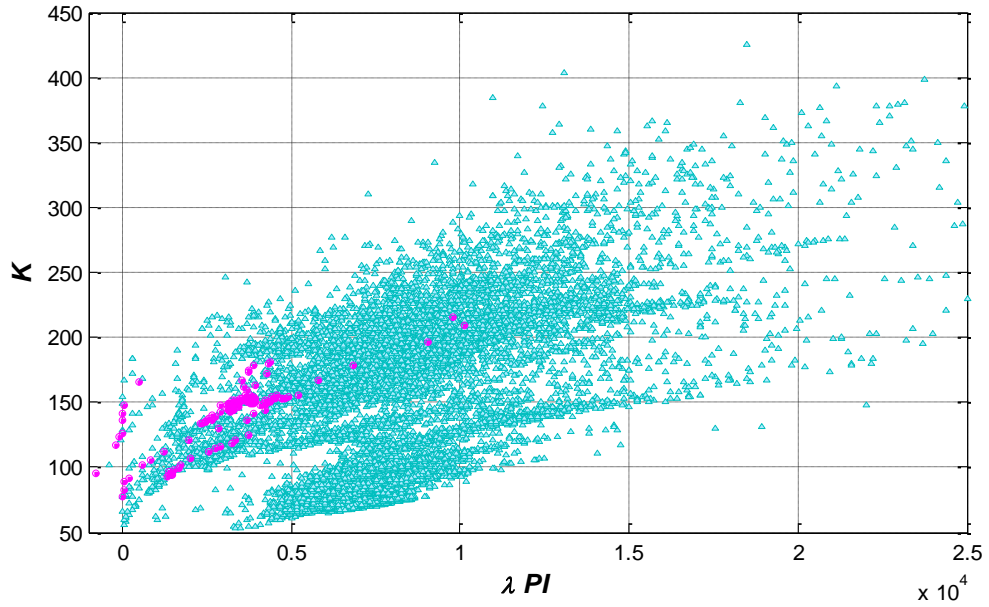


Şekil 6.26 A kuyusu için λPI değerlerinin K ile değişiminin derinlikle dağılımı



Şekil 6.27 A kuyusu için λPI değerlerinin K ile değişiminin derinlikle dağılımı.

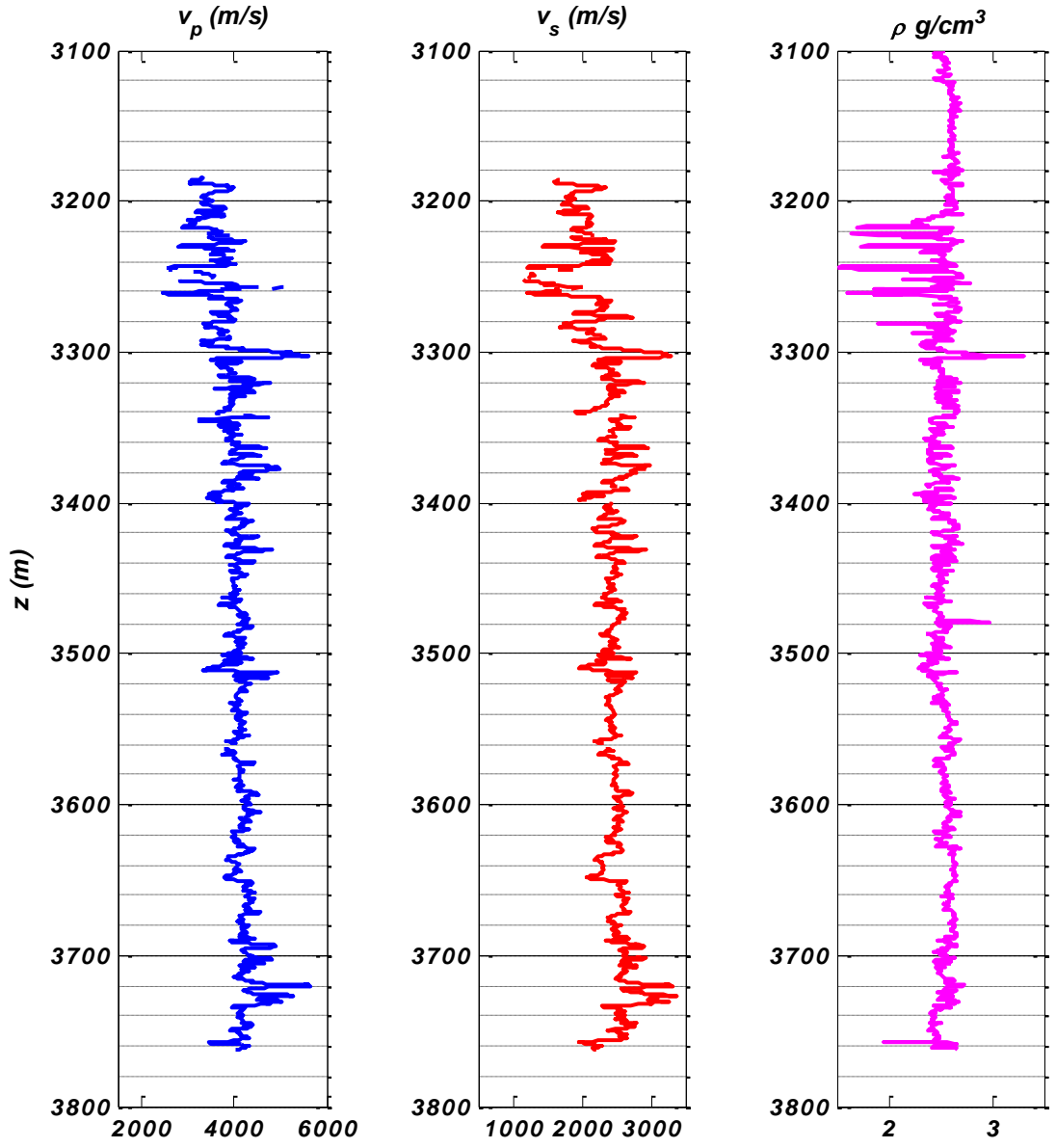
Gazlı hazne birimlerin değerleri macenta rengiyle verilmektedir



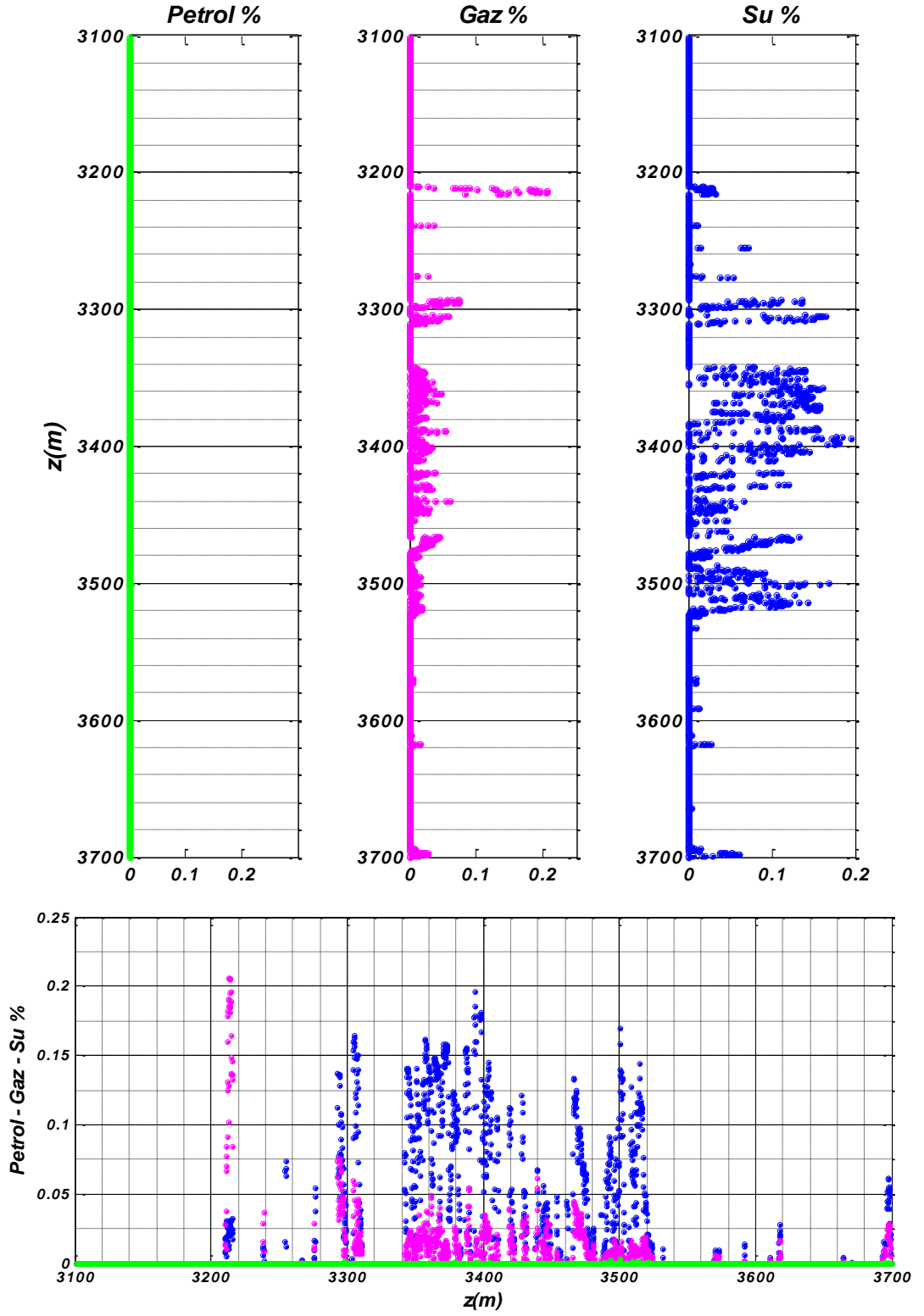
Şekil 6.28 A kuyusu için λPI değerlerinin $K(GPa)$ ile değişiminin derinlikle dağılımı.

Petrollü hazne birimlerin değerleri macenta rengeyle verilmektedir

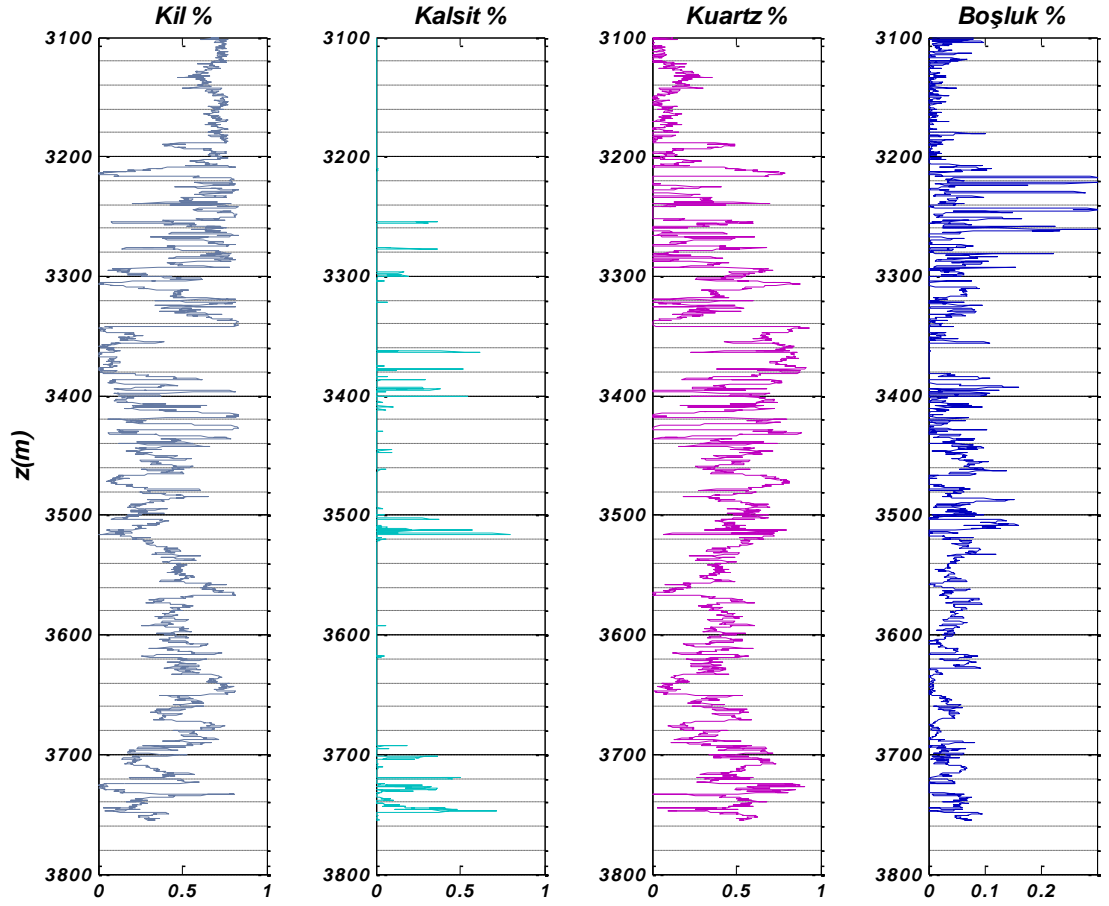
A kuyusu ile B kuyusu arasında yaklaşık 9.6 km'lik bir mesafe bulunmaktadır. B kuyusuna ait veri temin edilirken bu kuyuya ait veri grubundaki V_p , V_s ve ρ değerlerinin sadece 3200 – 3750 m'lik aralık için birlikte bulunduğu gözlenmiştir. Bu nedenle V_p , V_s ve ρ değerleri 3200 – 3750 m için Şekil 6.29'daki gibidir. B kuyusu için jeolojik birimlerdeki boşluklarda birikmiş akışkanların derinlikle yüzdellik değişimi de Şekil 6.30'da verilmektedir. Buna göre gazlı hazne birimlerin yaklaşık 3210 – 3220 m'de gözlenmektedir. Bu aralık için herhangi bir petrollü hazne birime rastlanmamaktadır. Ancak tabii ki su ve gazın birlikte haznelendiği birimlerin de 3300 – 3520 m aralığında bulunduğu ayrı bir bulgudur. Ancak boşluklardaki su oranının gazdan çok daha fazla olması nedeniyle bu aralığa doğrudan odaklanılmayacaktır. Bununla birlikte eldeki kuyu verisinin 3210 – 3220 m'lik aralığı içermesinden dolayı B kuyu verisinin analizinde izlenen yol ile araştırılacaktır. B kuyusu için kaydedilmiş petrofiziksel veri grubunun derinlikle değişimi de Şekil 6.31'deki gibidir.



Şekil 6.29 B kuyusunun V_P , V_S ve ρ değerlerini 3100 – 3800 m için derinliğe göre değişimi

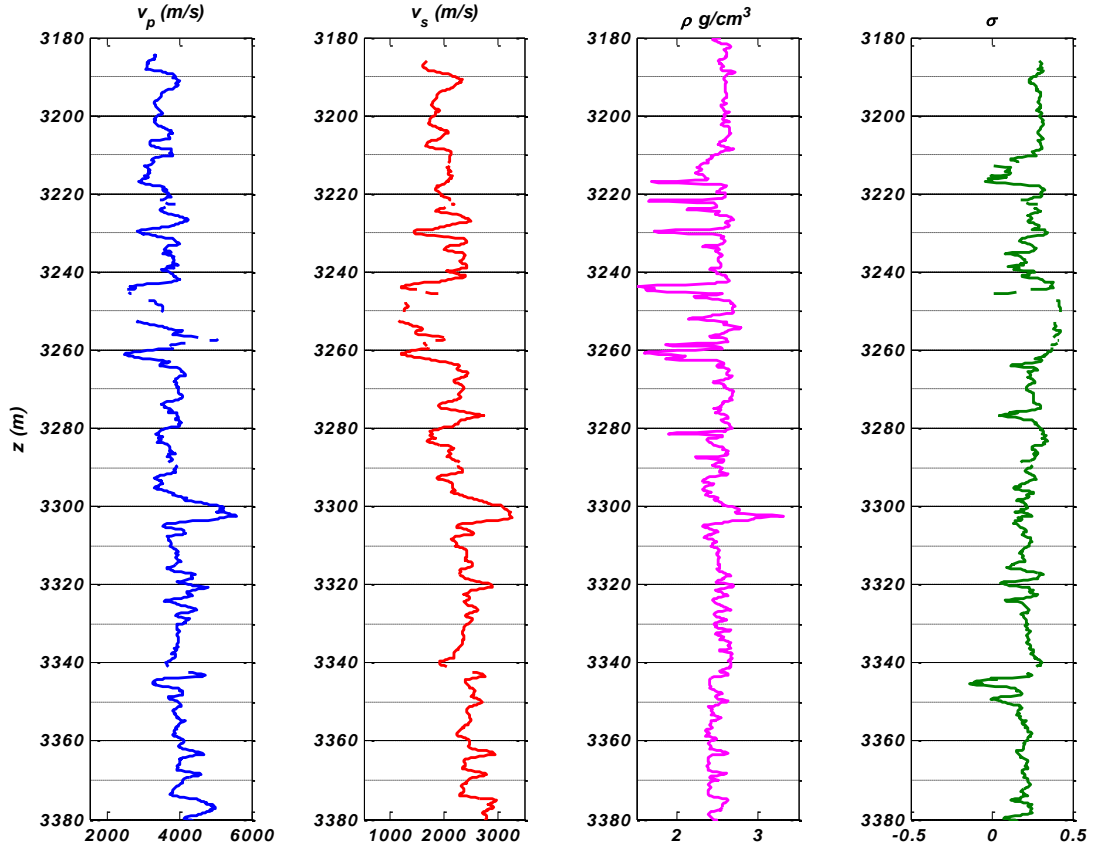


Şekil 6.30 B kuyusunun jeolojik birimlerdeki boşluklarda birikmiş akışkanların derinlikle yüzdelik değişimi

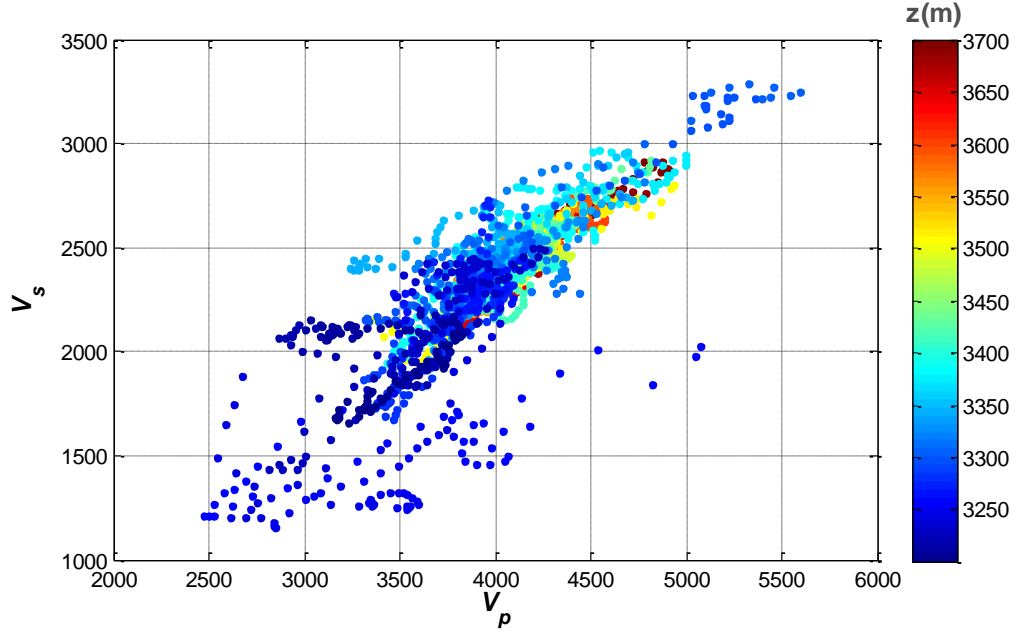


Şekil 6.31 B kuyusu için kaydedilmiş petrofiziksel veri grubunun derinlikle değişimi

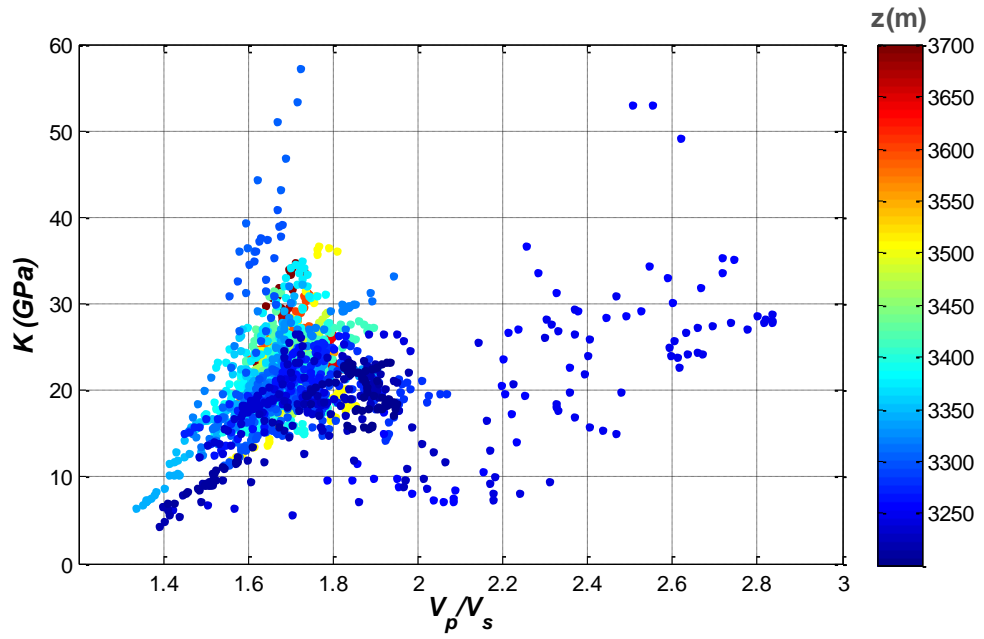
Şekil 6.30'daki gaz içeren hazne birimler göz önüne alınarak Şekil 6.29'da verilen kuyu loglarını daha hassas yorumlamak adına, gazlı hazne birimlerin bulunduğu derinlik değerleri büyütülerek Şekil 6.32'de verilmektedir. Aynı zamanda B kuyusu için σ oranı da hesaplanarak üçüncül bir değişken olarak aynı şekil üzerinde verilmektedir. Şekil 6.32'ye bakıldığında, V_S dışındaki bütün elastik parametrelerdeki ani düşüş yaklaşık 3210 m'de gözlenmektedir ve yaklaşık 3220 m'den sonra aniden artış gözlenmektedir. Bunun yanı sıra, Şekil 6.31'de verilen petrofiziksel veriye bakıldığında, yaklaşık 3210 – 3220 m aralığında, kuartz ve boşluk oranında ani bir artış gözlenirken, kil değerlerinde ani bir düşüş gözlenmektedir ve bu durum tam bir gaz haznesi için elverişlidir. Bu aşamadan sonra B kuyusu için hesaplanmış elastik sabitlerin ve sismik nitelendiricilerin birbirine göre değişimleri grafiklenerek Şekil 6.33-6.44 'de verilmektedir.



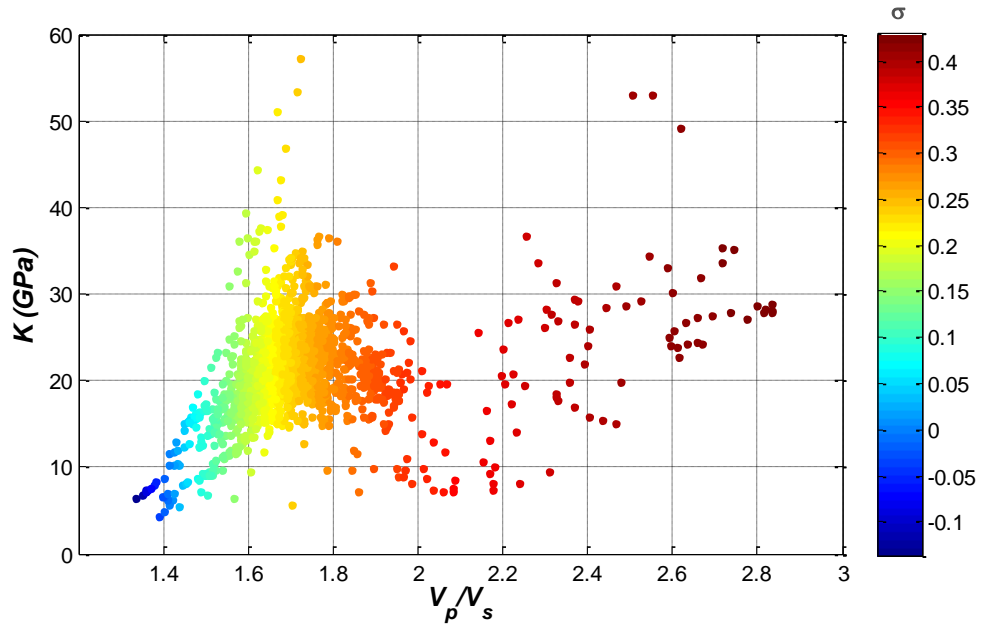
Şekil 6.32 B kuyusu için gazlı birimlerin V_p , V_s , ρ ve σ oranı değerlerinin derinlike değişimi (3200 – 3210 m için)



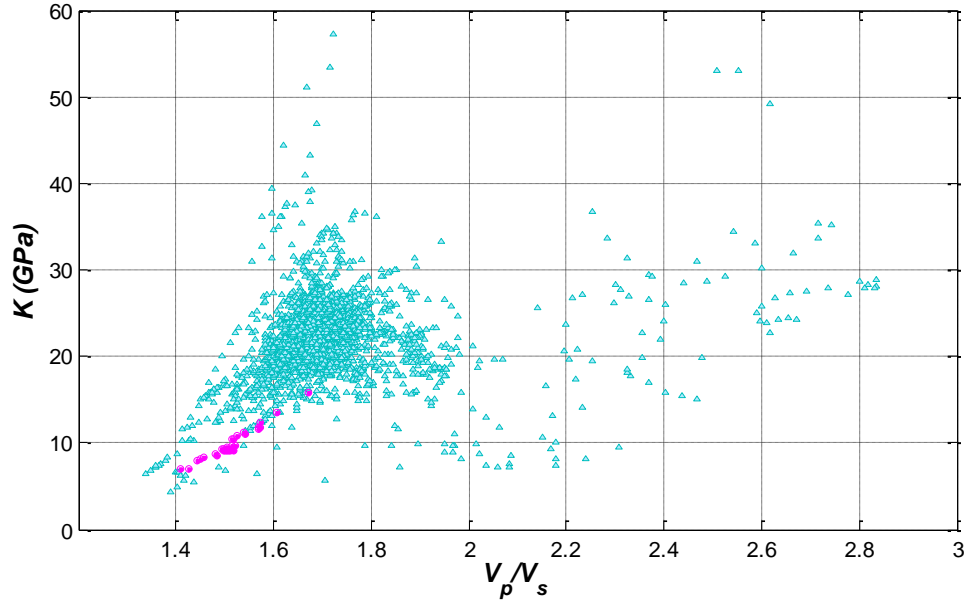
Şekil 6.33 B kuyusu için V_p , V_s değerlerinin 3200 – 3700 m için değişimi



Şekil 6.34 B kuyusu için V_p , V_s oranının K ile 3200 – 3700 m için değişiminin derinlikle dağılımı

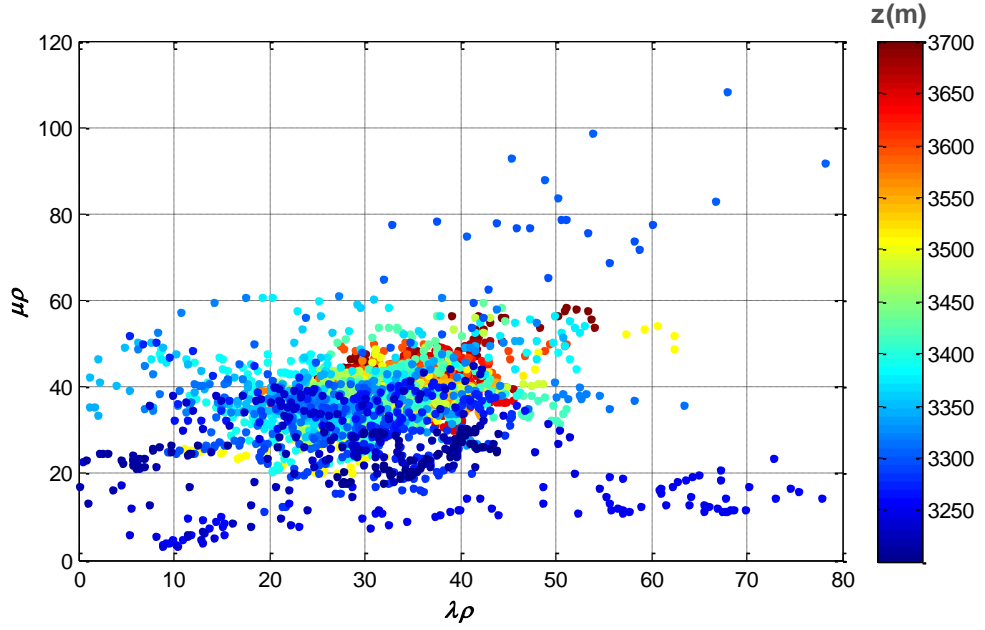


Şekil 6.35 B kuyusu için V_p , V_s oranının K ile 3200 – 3700 m için değişiminin σ oranı dağılımı

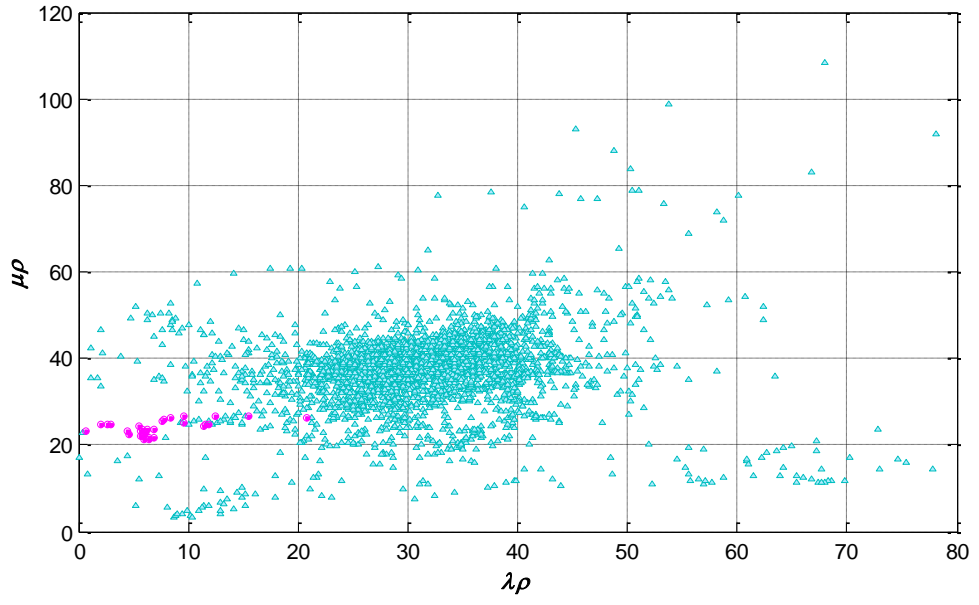


Şekil 6.36 B kuyusu için V_p , V_s oranının K ile değişimi.

Gazlı hazne birimlerin değerleri macenta rengeyle verilmektedir

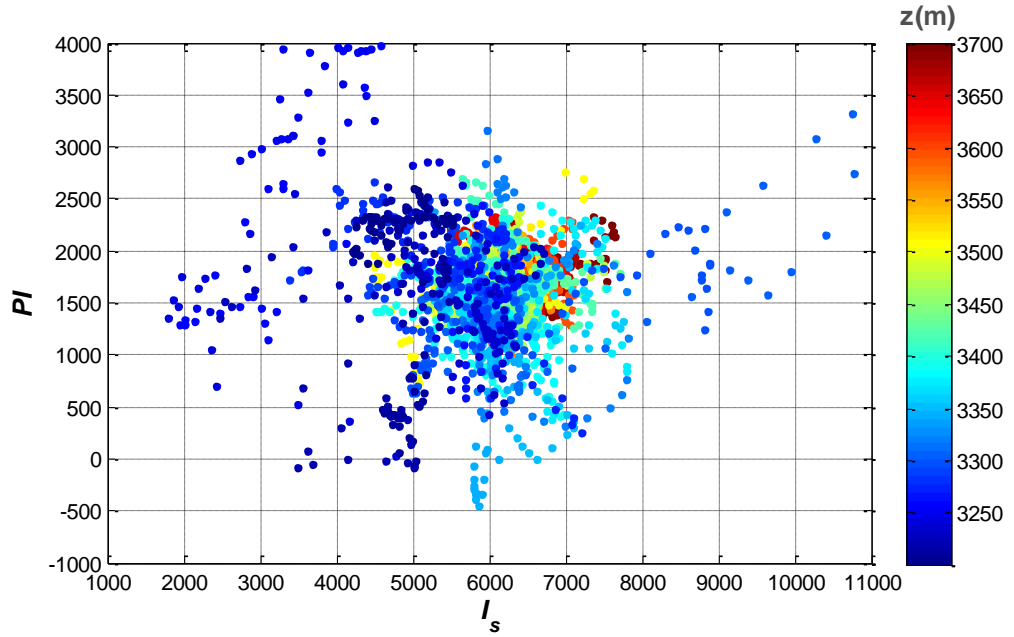


Şekil 6.37 B kuyusu için $\lambda\rho - \mu\rho$ değişiminin derinlikle dağılımı

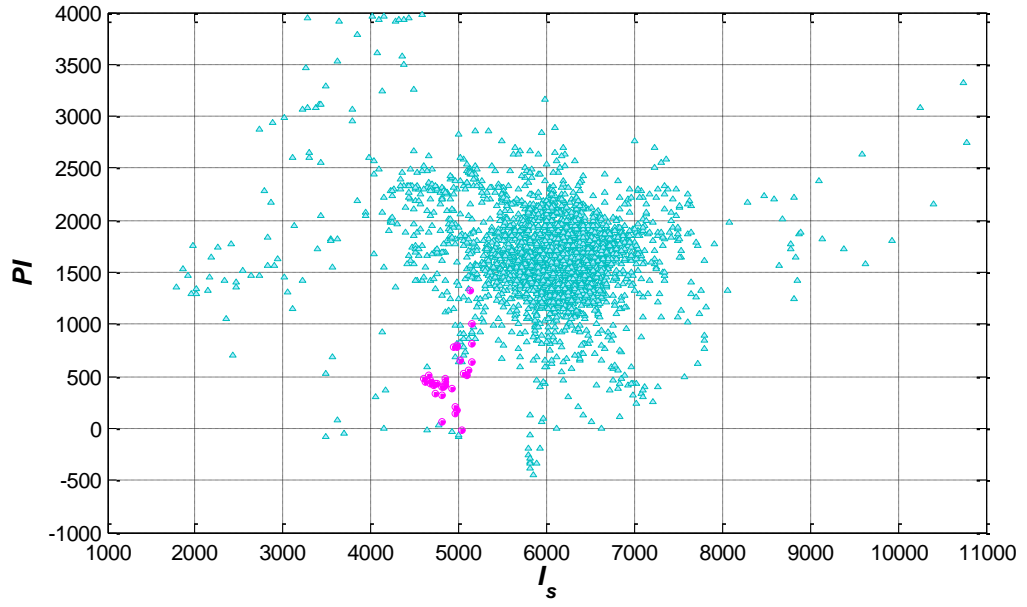


Şekil 6.38 B kuyusu için $\lambda\rho - \mu\rho$ değişiminin derinlikle dağılımı.

Gazlı hazne birimlerin değerleri macenta rengeyle verilmektedir

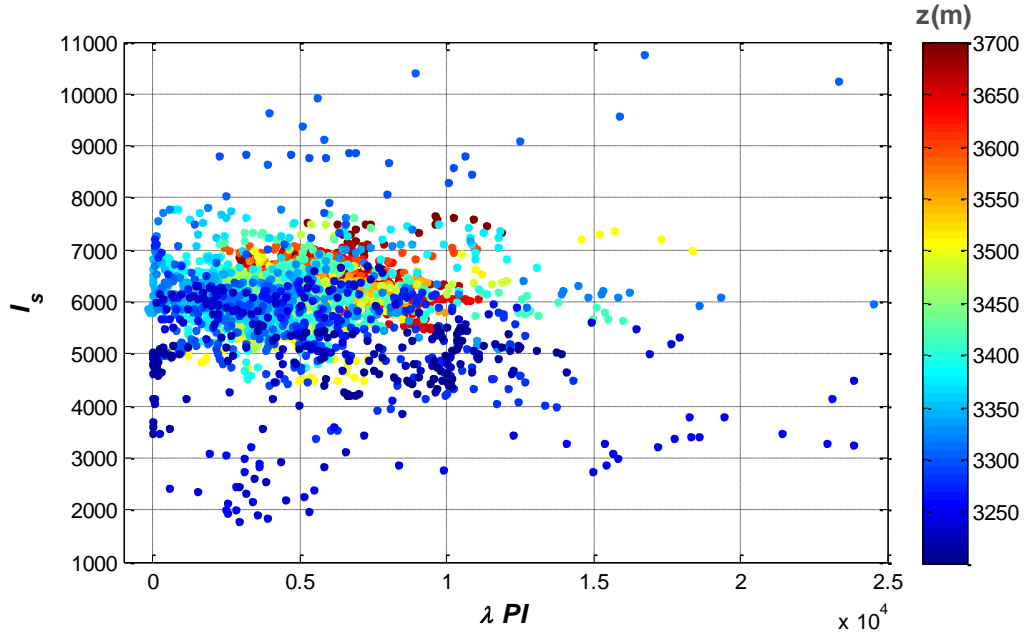


Şekil 6.39 B kuyusu için $PI - I_s$ değişiminin derinlikle dağılımı

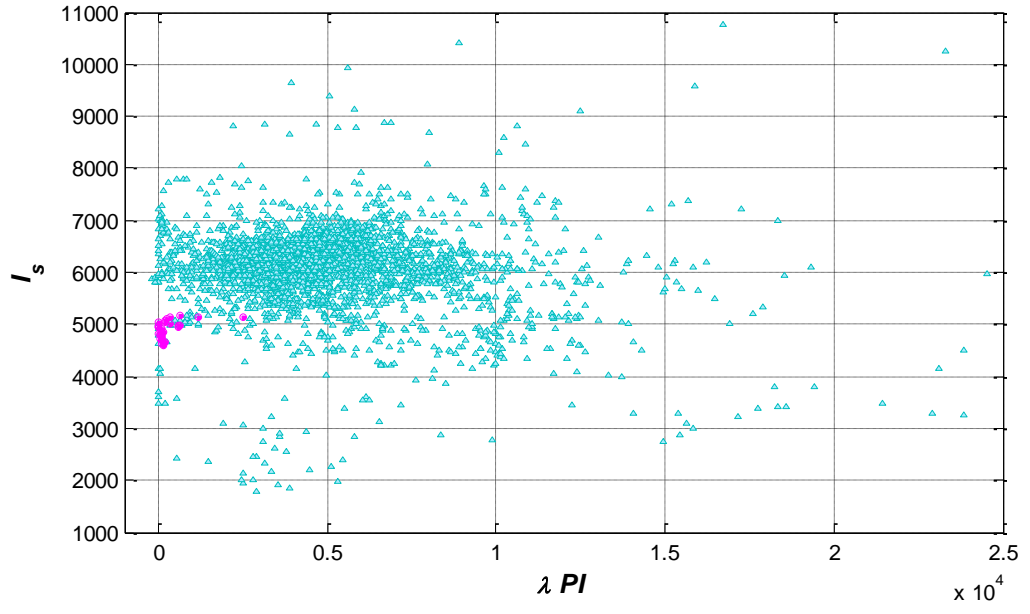


Şekil 6.40 B kuyusu için $PI - I_s$ değişiminin derinlikle dağılımı.

Gazlı hazne birimlerin değerleri macenta rengeyle verilmektedir

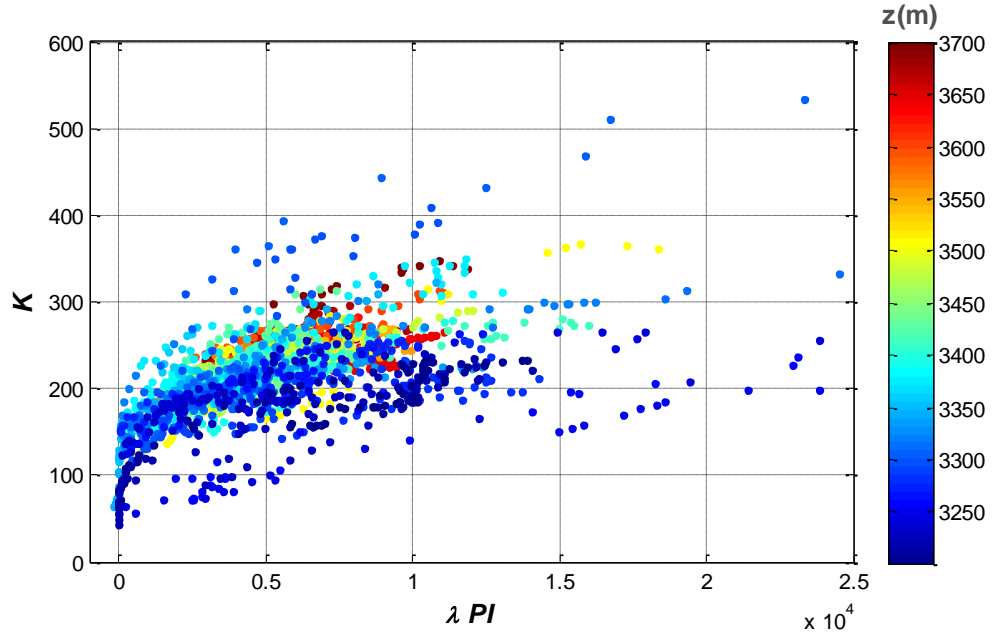


Şekil 6.41 B kuyusu için λPI değerlerinin I_s ile değişiminin derinlikle dağılımı

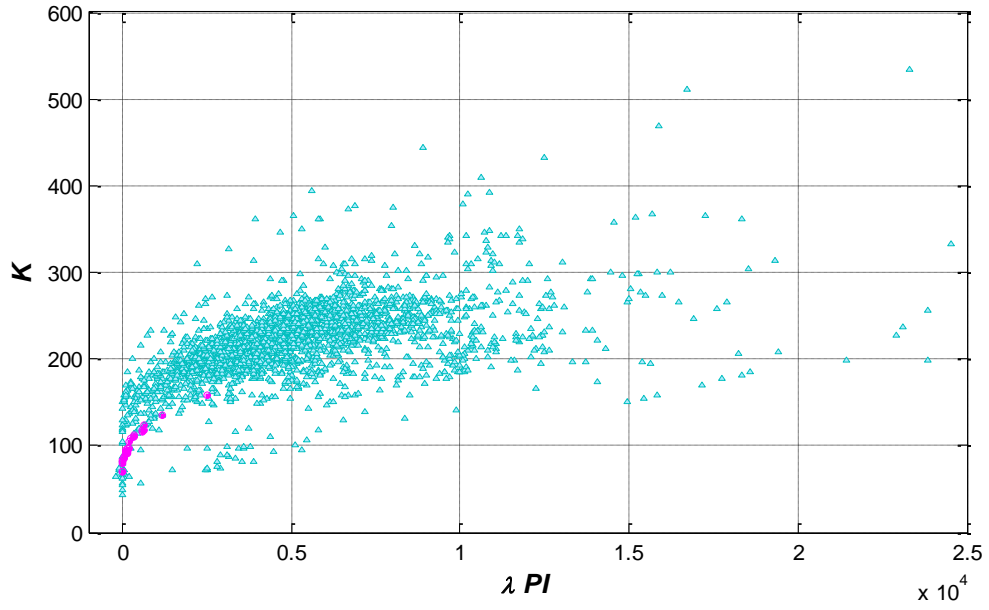


Şekil 6.42 B kuyusu için λPI değerlerinin I_s ile değişiminin derinlikle dağılımı.

Gazlı hazne birimlerin değerleri macenta rengeyle verilmektedir



Şekil 6.43 B kuyusu için λPI değerlerinin K ile değişiminin derinlikle dağılımı



Şekil 6.44 B kuyusu için λPI değerlerinin K ile değişiminin derinlikle dağılımı.

Gazlı hazne birimlerin değerleri macenta rengeyle verilmektedir

Şekil 6.5'te ve Şekil 6.6'da kuyu konumları verilen A ve B kuyularından elde edilen kuyu verileri ile hazne kayaçtaki akışkanın modellenmesi kayaça elastik parametrelerine kullanımı ve sismik niteleyicilerle gerçekleştirilmiştir. Bu bölümdeki amaçlanan hedef, bölüm 5.1 ve bölüm 5.3'den elde edilen sonuçların sahadan toplanmış kuyu verileriyle ilişkilendirilebilirliğini göstermektir. Bu amaçla öncelikle A kuyusunun V_P , V_S ve ρ değerlerinin derinlikle değişimine bakılmıştır (Şekil 6.7). Aynı zamanda A kuyusu için haznedeki boşluklarda birikmiş akışkan türlerinin yüzdelik değişimleri de verilerek hedef derinliğe bir yaklaşım sağlanmıştır (Şekil 6.8). Buna göre A kuyusunda odaklanılan derinlik aralığı öncelikle 1986 – 1998 m ve 2630 – 2675 m olarak belirlenmiştir. Bu derinlik seviyeleri için kabaca çift yol seyahat zamanı başlangıçlar da sırasıyla 1905 ms ve 2335 ms olarak hesaplanmıştır. Öncelikle A kuyusuna ait veri grubunu V_P , V_S değerleri birbirine göre grafiklenerek derinlik ortamındaki değişimleri araştırılmıştır (Şekil 6.12). Beklenildiği üzere derinliğin artışı ile sismik hızlar da artmakta ve aralarında doğrusal bir ilişki bulunmaktadır. Şekil 6.13'te ise V_P/V_S oranının K 'ya göre değişimi verilerek derinlikle değişimine bakılmıştır. Bu kuyu için hedef derinlik seviyeleri göz önüne alındığında grafiğin sol alanında düşük V_P/V_S oranlarında ortaya çıkmaktadır. Şekil 6.10'dan ve Şekil 6.11'den hatırlanacak olursa, buradaki hesaplanan V_P , V_S oranlarındaki

ani düşüşün σ oranında da gözlemlendiği görülmüştü. Bu nedenle aynı şekilde yine V_p/V_s oranının K 'ya göre değişimi üzerinde σ oranının değişimi araştırılmıştır ki düşük V_p/V_s oranlarında, σ oranı da giderek azalmaktadır. Hedeflenen derinlik seviyeleri ayrı ayrı hem gaz hem de petrolü hazne birimler için aynı grafik üzerinde gösterilmiştir (Şekil 6.15-6.16). Bu birimlerin toplandığı alanda V_p/V_s oranları düşük, aynı zamanda da σ oranı da düşük değerlerdedir. Bu durum anlamlıdır, bölüm 5.1 ve bölüm 6.3'deki aynı parametre değerlerinin değişim grafikleri göz önüne alındığında (Şekil 5.4, Şekil 5.26). Bir sonraki adımda veri grubunun $\lambda\rho - \mu\rho$ niteleyicisine gösterdiği hassasiyeti araştırmak için yine gazlı ve petrolü hazne birimlerin bu niteleyicideki konumları araştırılmıştır (Şekil 6.18-6.19). Şekil 5.5 ve Şekil 5.27 hatırlanacak olursa, gazlı ve petrolü birimler düşük $\lambda\rho$ değerlerinde toplanmaktaydı ki yine benzer bu durum A kuyusu için de geçerlidir. Aynı seviyelerin PI değerleri de hesaplanarak I_s ile grafiklendiğinde gazlı ve petrolü birimlerin ortaya çıktığı alanların düşük PI değerlerine karşılık geldiği gözlenmektedir (Şekil 6.20-6.22). Yine bu durum Şekil 5.7-5.10 ve Şekil 5.28-5.31 ile ilişkilendirildiğinde benzer sonuçlar gözlenmektedir. Son olarak hesaplanan λPI değerlerinin I_s ve K ile değişimi de grafiklenerek Şekil 6.23'te ve Şekil 6.26'da verilmektedir. Hedef derinlik seviyeleri için gazlı ve petrolü hazne birimlere denk gelen λPI değerleri her iki grafikte de çok küçük değerlerde ortaya çıkmaktadır. Yine bu durum Şekil 5.11-5.14 ve Şekil 5.32-5.33'deki sonuçlarla uyumlu ve beklendiği gibidir. Bununla birlikte B kuyu verilerinin de elastik parametrelere ve sismik niteleyicilere gösterdiği hassasiyeti araştırmak için A kuyusu için çizdirilen değişim grafikleri B kuyusu için de çizdirilmiştir. Ancak B kuyusunda sadece 3200 – 3750 m'deki V_p , V_s ve ρ değerlerinin bulunmasından dolayı, sadece bu aralık için elastik parametre ve sismik niteleyiciler hesaplanmıştır. 3210 – 3220 m'deki gazlı hazne birimin bu aralığa denk gelmektedir. Bu derinlik seviyeleri için kabaca çift yol seyahat zamanı başlangıcı da yaklaşık 2940 ms olarak hesaplanmıştır. B kuyu verilerinin elastik parametre ve sismik niteleyicilerdeki değişimi gerek A kuyu verileriyle, gerekse bölüm 5.1 ve bölüm 5.3 ile ilişkilendirildiğinde, aralarında başarılı bir uyum gözlenmektedir.

7. SONUÇLAR

Bu tez çalışmasında, hazne kayacın içerisindeki akışkanın ve litolojinin ne şekilde belirlenebileceği üç temel aşamada ortaya konmuştur. Birinci aşamada sismik genliklerin akışkan kestirimindeki kullanımı gösterilmiştir. Bu doğrultuda Zeoppritz eşitlikleri ile yansıma ve iletim katsayılarının farklı varış açılarındaki değerlerinin elde edilebileceği gösterilmiştir. Buna göre endüstride kabul görmüş hazne modellerine ait yansıma ve iletim katsayıları hesaplanmıştır. Yansıma ve iletim katsayıları ile belirlenen bir kaynak dalgacığının evrişiminden de 1B'li AVA kesitleri elde edilmiştir. Seçilen hazne modellerinde akışkan türü olarak gaz ve tuzlu suyun sismik genlik analiziyle ayrımlılığı araştırılmış, buna göre AVO'nun ya da AVA'nın ekonomik açıdan değerli hidrokarbonun, tuzlu sudan ayrımlılığında başarılı olduğu sonucuna varılmıştır.

Bir sonraki adımda, hazne kayaçtaki hidrokarbon doygunluğunun sismik genliklere etkisini araştırmak adına yapay bir jeolojik hazne modelinin AVA kesitleri farklı hidrokarbon doygunluğu için modellenmiştir. Bu doğrultuda şu sonuca varılmıştır; hazne kayaçta biriken az miktardaki gaz doygunluğu *P*- dalga hızını yavaşlatmaktadır bununla birlikte hazne kayaçtaki artan gaz doygunluğu *P*- dalga hızını belirgin biçimde arttırmamaktadır. Buna göre *P*- dalga hızındaki bu ani düşüşün hazne kayaçtaki gaz doygunluğunun bir ölçütü olmadığı görülmüştür. Bir diğer önemli bulgu ise farklı hidrokarbon doygunlukları için elde edilmiş AVA kesitlerinin birbirine çok benzer olduğudur. Bu doğrultuda ekonomik açıdan değerli hidrokarbon doygunluğunun ayrımlılığında sismik genliklerin sınırlandığı sonucuna varılmıştır. Sonuç olarak AVO'nun yorumdaki başarısı, haznenin akışkan türü, kayaç özellikleri ve bulunduğu ortam ile sınırlanmaktadır.

İkinci aşamada, sismik niteleyici ve kayaç elastik parametrelerinin, farklı hidrokarbon doygunlukları için AVO'nun sınırlandığı noktada çözüm amaçlı kullanılabileceği gösterilmiştir. Bu bağlamda endüstride kabul görmüş üç sismik niteleyici kullanılmıştır: $\lambda\rho$, PI ve ΔF . Kullanılan sismik niteleyicilerin haznenin sismik empedansları ile doğrudan ilişkili olduğu sonucuna varılmıştır. Bu sismik niteleyicilerin gerek litoloji gerekse akışkan kestiriminde elverişli olduğu, doğrudan hidrokarbon belirteci olarak

kullanılabileceği kanısına varılmıştır. Kullanılan sismik niteleyicilere ek olarak tez kapsamında $\lambda\rho$ ve PI kullanılarak türetilen yeni bir yaklaşım verilmiştir: λPI . Bu yeni sismik niteleyicinin de gerek akışkan kestiriminde ve hidrokarbon doygunluğunun belirlenmesinde gerekse litoloji tayininde kullanılabileceği gösterilmiştir.

Üçüncü aşamada kayaç elastik parametreleri ile sismik niteleyicilerin birlikte kullanımının farklı akışkan türlerinin ayrımlılığı ve litoloji tayinine etkisi gösterilmiştir. Buradan çıkan sonuç ise, kayaç elastik parametrelerinin hem ekonomik gaz doygunluğunun hem de ekonomik olmayan gaz doygunluğunun ayırt edilmesinde başarılı olduğu şeklindedir. Bunun yanı sıra farklı akışkan türlerinin ayrımlılığında gösterdiği başarı da gösterilmiştir. Kayaç elastik sabitlerinin farklı akışkan türlerine gösterdiği hassasiyet doğrultusunda, S-dalgasının P- dalgasına oranla akışkan hakkında daha anlamlı bilgi içerdiği görülmüştür. Buna göre, S-dalga hızının doğrudan kullanıldığı elastik sabitlerin hazne kayaçtaki akışkanın bir ölçütü olduğu bir diğer önemli sonuca varılmıştır. Özellikle kullanılan elastik sabitlerden, λ , K ve σ oranının akışkan hakkında anlamlı bilgi içerdiği sonucuna varılmıştır. Bununla birlikte normal varış yansıma katsayısının (R_{P_0}, R_{S_0}) akışkan kestiriminde doğrudan kullanılabileceği, ayrıca V_P/V_S oranının akışkan hakkında anlamlı bilgi içerdiği gösterilmiştir.

Sonuç olarak sismik niteleyicilerin ve kayaç elastik parametrelerin birlikte kullanımı hidrokarbon içeren havzalarda, sahadan kaydedilmiş kuyu verileri ile test edilerek, hazne kayaçtaki farklı akışkan türlerinin ayrımlanabildiği, farklı doygunluk oranındaki hidrokarbonun ayrımlılığında kullanılabileceği ve litolojinin de belirlenebileceği ortaya koyulmuştur. Sismik genlik yorumunun sınırlandığı noktada, kayaç elastik parametrelerin ve sismik niteleyicilerin daha etkin olduğu gösterilmiştir. Sismik niteleyicilerin kullanımı ile ekonomik gaz doygunluğunun ekonomik olmayan gaz doygunluklarından ayırt edilebildiği ortaya konulmuştur. Ayrıca tez kapsamında ortaya koyulan λPI niteleyicisinin, PI 'dan daha etkin ayrımlılık sağlamış olması da tezin özgünlüğünü artırmıştır.

KAYNAKLAR

- Aki, K. and Richards, P.G. 1980. Quantitative seismology: theory and methods: W.H. Freeman and Co.
- Aki, K. and Richards, P.G. 2002. Quantitative seismology: second edition: University Science Books.
- Allen, J.L. and Peddy, C.P. 1993. Amplitude variation with offset / Gulf Coast Case histories: Soc. Expl. Geophys.
- Batzle, M. L. and Wang, Z. 1992. Seismic properties of pore fluids: Geophysics, 64, 1396-1408.
- Berkhout, A. J. 1997. Pushing the limits of seismic imaging, part II: Integration of prestack migration, velocity, estimation, and AVO analysis: Geophysics, 62, 954-969.
- Best, A.I. McCann, C. and Sothcott, J. 1994. The relationships between the velocities, attenuations and petrophysical properties of reservoir sedimentary rocks. Geophysical Prospecting 42, 151-178.
- Best, A.I. and Sams, M.S. 1997. Compressional wave velocity and attenuation at ultrasonic and sonic frequencies in near-surface sedimentary rocks. Geophysical Prospecting 45, 327-344.
- Biot, M. A. 1941. General theory of three-dimensional consolidation, Journal of Applied Physics, 12, 155-164 Borse G.J. 1997 Numerical methods with MATLAB: PWS Publishing company.
- Biot, M. A. 1956. Theory of propagation of elastic waves in a fluid-saturated porous solid. I. Low-frequency range: Journal of the coustical Society of America, 28, 168-178.
- Bortfeld, R. 1961. Approximation to the reflection and transmission coefficients of planelongitudinal and transverse waves: Geophys. Prosp., 9, 485-503.
- Bortfeld, R. 1962. Exact solution of the reflection and refraction of arbitrary spherical compressional waves at liquid-liquid interfaces and at solid-solid interfaces with equal shear velocities and equal densities: Geophys. Prosp., 10, 35-67.
- Brown, A. R., 2011, Interpretation of three-dimensional seismic data, 7th ed.:AAPG Memoir 42 and SEG Investigations in Geophysics No. 9.
- Castagna, J.P. Batzle, M.L. Eastwood, R.L. 1985. Relationships between compressional-wave and shear wave velocities in clastic silicate rocks: Geophysics, 50, 571-581.

- Castagna, J.P. and Backus, M.M. 1993. AVO analysis-tutorial and review in Castagna, J. and Backus, M.M. eds, Offset-dependent reflectivity. Theory and practice of AVO analysis: Soc. Expl. Geophys., 3-37.
- Castagna, J.P. Batzle, M.L. and Kan, T.K. 1993. Rock Physics .The link between rock properties and AVO response, in Castagna, J.P., and Backus, M. M., Eds., Offset-dependent reflectivity.theory and practice of AVO analysis: Soc. Expl. Geophys., 135-171.
- Castagna, J. P. and Swan, H.W. 1997. Principles of AVO crossplotting: The Leading Edge, 16, no. 04, 337-342.
- Carazzone, J.J. and Srnka, L.J. 1993. Elastic inversion of Gulf of Mexico data in Castagna, J.P., and Backus, M. M., Eds., Offset-dependent reflectivity theory and practice of AVO analysis: Soc. Expl. Geophys., 303-313.
- Christiansson, P. Faleide, J.I. Berge, A.M. 2000. Crustal structure in the northern North Sea; an integrated geophysical study, Dynamics of the Norwegian margin, 167; pp. 15-40. Geological Society of London, London, United Kingdom.
- Domenico, S. N. 1976. Effect of brine-gas mixture on velocity in an unconsolidated sand reservoir: Geophysics, 41, 882-894.
- Eberhart-Phillips, D. Han, D.H. and Zoback, M.D. 1989. Empirical relationships among seismic velocity, effective pressure, porosity, and clay content in sandstone. Geophysics 54, 82-89.
- Fatti, J.L. Smith, G.C. Vail, P.J. Strauss, P.J. and Levitt, P.R. 1994. Detection of gas in sandstone reservoirs using AVO analysis: A 3-D seismic case history using the Geostack technique: Geophysics, 59, 1362-1376.
- Feng, J. and Sacchi, M.D. 2004. High-resolution regularized least squares AVA Kirchhoff Migration, 74th Ann. Internat. Mtg.: Soc. of Expl. Geophys.
- Freund, D. 1992. Ultrasonic compressional and shear velocities in dry clastic rocks as a function of porosity, clay content, and confining pressure. Geophysical Journal International 108, 125-135.
- Gardner, G. H. F. Gardner, L.W. and Gregory, A. R. 1974. Formation velocity and density - The diagnostic basics for stratigraphic traps: Geophysics, 39, 770-780.
- Gassmann, F. 1951. Uber die elastizitat poroser medien. vier der natur. Gesellschaft in Zurich, 96, 1-23.
- Gidlow, P.M. Smith, G. C. and Vail, P. J. 1992. Hydrocarbon detection using fluid factor traces, a case study: How useful is AVO analysis?: Joint SEG/EAEG summer research workshop, Technical Program and Abstracts, 78-89.

- Goodway, B. Chen, T. and Downton, J. 1997, Improved AVO fluid detection and lithology discrimination using Lamé petrophysical parameters: 67th Annual International SEG meeting, Expanded Abstracts, 183-186.
- Gonzalez, Ezequiel F. Tapan, Mukerji. Gary, Mavko. and Reinaldo, J. Michelena. 2003. Far offset P-to-S “elastic impedance” for lithology and partial gas saturation (fizz water) identification: Applications with well logs. SEG Technical Program Expanded Abstracts 2003: pp. 1446-1449
- Greenberg, M. L. and Castagna, J. P. 1992. Shear-wave velocity estimation in porous rocks: Theoretical formulation, preliminary verification and applications: Geophys. Prosp., 40, 195-210.
- Han, D. H. 1986. Effects of porosity and clay content on acoustic properties of sandstones and unconsolidated sediments: Ph. D. Thesis, Stanford University.
- Han, D. H. Nur, A. and Morgan, D. 1986. Effects of porosity and clay content on wave velocities in sandstones: Geophysics, 51, 2093-2107.
- Han, D. H. and Batzle, M. 2002. Fizz water and low gas saturated reservoirs: The Leading Edge, 21, 395-398, 2005.
- Hedlin, K. 2000. Pore space modulus and extraction using AVO: 70th Ann. Internat. Mtg., Soc. Expl. Geophys., Expanded Abstracts, 170-173.
- Hedlin, K. 2000. Pore space Modulus and extraction using AVO: Extended Abstracts, Soc. Expl. Geophys., 70th Annual Meeting, Calgary.
- Hill, R. 1952. The elastic behavior of a crystalline aggregate: Proc. Phys. Soc. London Ser. A, 65, 349-354.
- Hilterman, F. J. 2001. SEG Distinguished Instructor Short Course Monograp.
- Hilterman, F.J. and Liang, L. 2003. Linking rock-property trends and AVO equations to GOM deep-water reservoirs, 73rd Ann. Internat. Mtg., Soc. Expl. Geophys., Expanded Abstracts, 211-214.
- Keys, R. G. and Foster, D. J. 1998. Comparison of seismic inversion methods on a single real data set: Society of Exploration Geophysicists, Tulsa.
- Klimentos, T. and McCann, C. 1990. Relationships among compressional wave attenuation, porosity, clay content, and permeability in sandstones. Geophysics 55, 998-1014.
- Klimentos, T. 1991. The effects of porosity-permeability-clay content on the velocity of compressional waves. Geophysics 56, 1930-1939.

- Koefoed, O. 1955. On the effect of Poisson's ratios of rock strata on the reflection coefficients of plane waves: *Geophys. Prosp.*, 3, 381-387.
- Lumley, D.E. 2001. Time lapse seismic reservoir monitoring. *Geophysics*, v. 66, pp.50-53.
- Mavko, G. Mukerji, T. and Dvorkin, J. I. 2009. *The Rock Physics Handbook*: Cambridge University Press.
- Miller, S.L M. and Stewart, R.R. 1990. Effects of lithology, porosity and shaliness on P- and S-wave velocities from sonic logs. *Canadian Journal of Exploration Geophysics* 26, 94-103.
- Ryseth, A. 2001. Sedimentology and palaeogeography of the Statfjord Formation (Rhaetian-Sinemurian), North Sea. In: O.J. Martinsen, T. Dreyer (Eds.), *Sedimentary Environments Offshore Norway - Palaeoioic to Recent*, 10, NPF Special Publications (Ed. by O.J. Martinsen, T. Dreyer), pp. 67-85. Elsevier Science B.V., Amsterdam.
- Russell, B. R. Hedlin, K. Hilterman, F. J. and Lines, L. R. 2000. Fluid-property discrimination with AVO: A Biot-Gassmann perspective: *Geophysics*, 68, 29-39.
- Ostrander, W. J. 1982. Method for interpretation of seismic records to yield indication of gaseous hydrocarbons: United States Patent No. 4,316,268
- Ostrander, W. J. 1984. Plane-wave reflection coefficients for gas sands at nonnormal angles-of-incidence: *Geophysics*, 49, 1637-1648.
- Quakenbush, M. Shang, B. and Tuttle, C. 2006. Poisson impedance; *The Leading Edge*, 25, 128-138.
- Pickett, G.R. 1963. Acoustic character logs and their application in formation evaluation. *Journal of Petroleum technology* 15, 658-667.
- Richards, T. C. 1961. Motion of the ground on arrival of reflected longitudinal and transverse waves at wide-angle reflection distances: *Geophysics*, 26, 277-297.
- Rutherford, S.R. and Williams, R.H. 1989. Amplitude-versus-offset variations in gas sands: *Geophysics*, 54, 680-688.
- Sandıkçı, E. 2010. Hazne kayaçtaki gaz, su ve çözünmüş gaz içeren suyun AVA ve LMR analizleri ile ayırt edilmesi; Türkiye 19. Uluslararası Jeofizik Kongre ve Sergisi 2010, Ankara.
- Shuey, R.T. 1985. A simplification of the Zoeppritz equations: *Geophysics*, 50, 609-614.

- Smith, G.C. and Gidlow, P.M. 1987. Weighted stacking for rock property estimation and detection of gas: *Geophysical Prospecting*, 35, 993-1014.
- Smith, G. and Gidlow, P. 2003. The fluid factor angle and the crossplot angle: 73rd Ann. Internat. Mtg.: Soc. of Expl. Geophys., 185-188.
- Swan, H. W. 1993. Properties of direct AVO hydrocarbon indicators, in Castagna, J.P., and Backus, M.M., Eds., *Offset-dependent reflectivity: theory and practice of AVO analysis*: Soc. Expl. Geophys., 78-92.
- Swan, H. W. 2001. Velocities from amplitude variations with offset: *Geophysics*, 66, 1735-1743.
- Thomsen, L. 1988. "Reflection seismology over azimuthally anisotropic media." *Reflection seismology over azimuthally anisotropic media*, *Geophysics*, 53(3), 304-313.
- Todd, T. and Simmons, G. 1972. Effect of pore pressure on the velocity of compressional waves in low-porosity rocks. *Journal of Geophysical Research* 77, 3731-3743.
- Wang, Z. 2001. Fundamentals of seismic rock physics: *Geophysics*, 66, 398-412.
- Verm, R. and Hilterman, F. 1995. Lithology color-coded seismic sections: The calibration of AVO crossplotting to rock properties: *The Leading Edge*, Vol. 14, p 847-853.
- Wiggins, R. G. S. Kenny, and C. D. McClure, 1983. A method for determining and displaying the shear-velocity reflectivities of a geologic formation: *European Patent Application* 0113944.
- Wyllie, M.R.J. Gregory, A.R. and Gardner, L.W. 1956. Elastic wave velocities in heterogeneous and porous media. *Geophysics* 21, 41-70.
- Wyllie, M.R.J. Gregory, A.R. and Gardner, G.H.F. 1958. An experimental investigation of factors affecting elastic wave velocities in porous media. *Geophysics* 23, 459-493.
- Yilmaz, O. 2001. *Seismic data analysis: Processing, inversion, and interpretation of seismic data*: SEG Investigations in Geophysics No. 10.
- Zhu, X. and McMechan, G. A. 1990. Direct estimation of the bulk modulus of the frame in fluid saturated elastic medium by Biot theory: 60th Ann. Internat. Mtg., Soc. Expl. Geophys., Expanded Abstract, 787-790.
- Zoeppritz, K. 1919. Erdbebenwellen VIII B, On the reflection and propagation of seismic waves: *Gottinger Nachrichten*, I, 66-84.

EKLER

EK 1 ZOEPPRITZ EŞİTLİKLERİNE YAPILAN DOĞRUSAL YAKLAŞIMLAR	107
EK 2 TABAKALI MODEL İÇİN ZOEPPRITZ HESABI	116
EK 3 HAN (1986) VERİ GRUBU DENEYSEL ÇALIŞMASI.....	121

EK 1 ZOEPPRITZ EŞİTLİKLERİNE YAPILAN DOĞRUSAL YAKLAŞIMLAR

Tek bir sınır ara yüzey için Zoeppritz eşitliklerinin kullanılmasıyla elde edilen (2.1) düzey denklemi doğrusal değildir. Dizeylerden 4 x 4 formdaki birinci düzeyin tersinin alınacağına ve düzey çarpımlarının sonucunda çözüme gidileceği görülmektedir. Bunun yanı sıra farklı fiziksel özelliklere sahip kayaçlar için doğrusal olmayan formdaki Zoeppritz eşitlikleri, sınır ara yüzeydeki enerji paylaşımının genlik bilgisine olan etkisini ortaya koymaya olanak sağlamamaktadır. Bu nedenle Zoeppritz eşitliklerine birçok doğrusal yaklaşım yapılarak bu duruma çözüm üretilmeye çalışılmıştır.

1. *P – SV* Dalgalarının Aki ve Richards Dizey Formu

Şekil 2.1'deki yarı sonsuz iki elastik ortam için yoğunluk, *P*- dalga ve *S*- dalga hızları ρ , α , β olmak üzere, sınır ara yüzeye çarpan bir *P*- veya yansıyan *SV*- düzlem dalganın yansıma ve iletim katsayıları eşitlik (2.1)'de verilen Zoeppritz eşitliklerinden hesaplanabilmektedir. *P*- ve *SV*- dalgalarının dizey formu, Aki ve Richards (1980) tarafından izleyen eşitlikteki gibi verilmiştir.

$$L^{-1}C = Z \quad (1)$$

Bu denklemde eşitliğin sol tarafı aşağıdaki gibidir:

$$L^{-1}C = \begin{bmatrix} \dot{P}_1 \dot{P}_1 & \dot{S}_1 \dot{P}_1 & \dot{P}_2 \dot{P}_1 & \dot{S}_2 \dot{P}_1 \\ \dot{P}_1 \dot{S}_1 & \dot{S}_1 \dot{S}_1 & \dot{P}_2 \dot{S}_1 & \dot{S}_2 \dot{S}_1 \\ \dot{P}_1 \dot{P}_2 & \dot{S}_1 \dot{P}_2 & \dot{P}_2 \dot{P}_2 & \dot{S}_2 \dot{P}_2 \\ \dot{P}_1 \dot{S}_2 & \dot{S}_1 \dot{S}_2 & \dot{P}_2 \dot{S}_2 & \dot{S}_2 \dot{S}_2 \end{bmatrix} \quad (2)$$

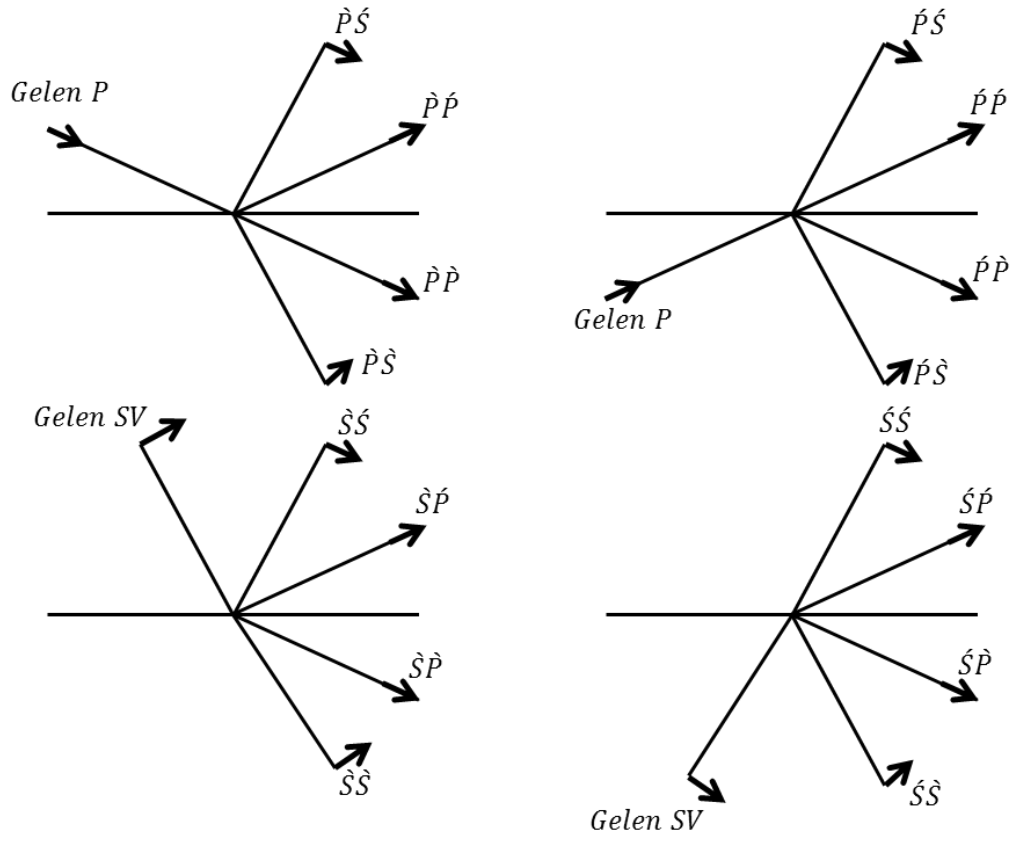
L ve C dizeyleri ise aşağıdaki gibi tanımlanmıştır:

$$L = \begin{bmatrix} -\alpha_1 p & -\sqrt{1-p^2\beta_1^2} & \alpha_2 p & \sqrt{1-p^2\beta_2^2} \\ \sqrt{1-p^2\alpha_1^2} & -\beta_1 p & \sqrt{1-p^2\alpha_2^2} & -\beta_2 p \\ 2\rho_1\beta_1^2 p\sqrt{1-p^2\alpha_1^2} & \rho_1\beta_1(1-2p^2\beta_1^2) & 2\rho_2\beta_2^2 p\sqrt{1-p^2\alpha_2^2} & \rho_2\beta_2(1-2p^2\beta_2^2) \\ -\rho_1\alpha_1(1-2\beta_1^2 p^2) & 2\rho_1\beta_1^2 p\sqrt{1-p^2\beta_1^2} & \rho_2\alpha_2(1-2\beta_2^2 p^2) & -2\rho_2\beta_2^2 p\sqrt{1-p^2\beta_2^2} \end{bmatrix} \quad (3)$$

$$C = \begin{bmatrix} \alpha_1 p & \sqrt{1-p^2\beta_1^2} & -\alpha_2 p & -\sqrt{1-p^2\beta_2^2} \\ \sqrt{1-p^2\alpha_1^2} & -\beta_1 p & \sqrt{1-p^2\alpha_2^2} & -\beta_2 p \\ 2\rho_1\beta_1^2 p\sqrt{1-p^2\alpha_1^2} & \rho_1\beta_1(1-2p^2\beta_1^2) & 2\rho_2\beta_2^2 p\sqrt{1-p^2\alpha_2^2} & \rho_2\beta_2(1-2p^2\beta_2^2) \\ \rho_1\alpha_1(1-2\beta_1^2 p^2) & -2\rho_1\beta_1^2 p\sqrt{1-p^2\beta_1^2} & -\rho_2\alpha_2(1-2\beta_2^2 p^2) & 2\rho_2\beta_2^2 p\sqrt{1-p^2\beta_2^2} \end{bmatrix} \quad (4)$$

Eşitlik (1)'deki düzeyde P - ve SV - dalgalarının yansıyan ya da iletilen olduğu üzerlerindeki vurgulardan anlaşılmaktadır. Örneğin, \hat{S}_1 yansıyan iken \hat{S}_1 iletilen dalga formunu işaret etmektedir. Diğer yandan, $\hat{P}_1\hat{P}_1$ belirli bir açıya gelen P - dalgasının sınır ara yüzeyden yansıyan P - dalgasının göreceli genliği olduğunu belirtirken, $\hat{S}_1\hat{S}_2$ ise sınır ara yüzeyden iletilen SV - dalgasının göreceli genliği olup ikinci ortamda ilerlediğini belirtmektedir. Verilen düzeyde P - ve SV - dalgaları için toplamda on altı olası yansıma ve iletim katsayıları olduğu görülmektedir (Şekil 1). Yansıma ve iletim katsayıları ise p , yatay yavaşlamanın birer fonksiyonu olarak tanımlanmaktadır.

Bu tez çalışması kapsamında, $\hat{P}\hat{P}$ ve $\hat{P}\hat{S}$ yansıma katsayıları, yapay oluşturulmuş jeolojik modellerin genlik değerlerinin hesaplanmasında kullanılacaktır. Yapay jeolojik modeller araştırmanın amacına göre yön-bağımsız kabul edilmiştir. Ancak bu durum bir zorunluluktan ileri gelmemektedir. Örneğin; Thomsen (1988) yön-bağımlı elastik ortam için açılıma bağlı genlik değişimini ortaya koymuştur.



Şekil 1 Farklı fiziksel özellikteki iki elastik ortamdaki P - ve SV - dalgaları için on altı olası yansıma ve iletim katsayıları.

Kısa oklar parçacık hareketlerinin doğrultusunu göstermektedir (Aki ve Richards 1980'den alınmıştır).

2. Bortfeld Yaklaşımı

İlk yaklaşım Bortfeld (1961) tarafından yapılmıştır. Zoeppritz'in PP - yansıma genliğini izleyen eşitlikle vermiştir:

$$R(\theta_1) = \frac{1}{2} \ln \left(\frac{V_{P2} \rho_2 \cos \theta_2}{V_{P1} \rho_1 \cos \theta_1} \right) + \left[2 + \frac{\ln \frac{\rho_2}{\rho_1}}{\ln \frac{V_{P2}}{V_{P1}} - \ln \frac{V_{P2} V_{S1}}{V_{P1} V_{S2}}} \right] \frac{V_{S1}^2 - V_{S2}^2}{V_{P1}^2} \sin^2 \theta_1 \quad (5)$$

Eşitlikte V_{P1} ve V_{S1} üst ortamın P - dalga, S - dalga hız değerleriyken , V_{P2} ve V_{S2} alt ortamın P - dalga, S - dalga hız değerleridir. ρ_1 ve ρ_2 üst ve alt ortamın yoğunluk değerleridir.

Eşitliğin ilk yaklaşım olmasının yanı sıra en önemli özelliği, açılıma bağlı genlik değişiminin kayacın fiziksel özelliklerine bağımlı bir fonksiyon olduğunu göstermesidir. Buna rağmen, eşitlikte genlik değişiminin açığa bağımlılığı açıkça ortaya koyulmadığından dolayı AVO analizi için pratikte kullanılmamaktadır.

3. Aki – Richards – Frasier Yaklaşımı

Aki ve Richards (1980, s.144) Zoeppritz'in $\dot{P}\dot{P}$ ve $\dot{P}\dot{S}$ yansıma genliklerini izleyen eşitliklerle vermiştir;

$$R_{\dot{P}\dot{P}} = \left[\left(b \frac{\cos \theta_1}{V_{P1}} - c \frac{\cos \theta_2}{V_{P2}} \right) F - \left(a + d \frac{\cos \theta_1 \cos \theta_2}{V_{P1} V_{S2}} \right) H p^2 \right] / D \quad (6)$$

$$R_{\dot{P}\dot{S}} = \left[-2 \frac{\cos \theta_1}{V_{P1}} \left(ab + cd \frac{\cos \theta_2 \cos \theta_2}{V_{P2} V_{S2}} \right) p V_{P1} \right] / (V_{S1} D) \quad (7)$$

$$a = \rho_2 (1 - 2 \sin^2 \theta_2) - \rho_1 (1 - \sin^2 \theta_1) \quad (8)$$

$$b = \rho_2(1 - \sin^2\theta_2) - 2\rho_1\sin^2\theta_1 \quad (9)$$

$$c = \rho_1(1 - \sin^2\theta_1) + 2\rho_2\sin^2\theta_2 \quad (10)$$

$$d = 2(\rho_2V_{S2}^2 - \rho_1V_{S1}^2) \quad (11)$$

$$D = EF + GHp^2 = (\det M)/(V_{P1}V_{P2}V_{S1}V_{S2}) \quad (12)$$

$$E = b \frac{\cos\theta_1}{V_{P1}} + c \frac{\cos\theta_2}{V_{P2}} \quad (13)$$

$$F = b \frac{\cos\theta_1}{V_{S1}} + c \frac{\cos\theta_2}{V_{S2}} \quad (14)$$

$$G = a - d \frac{\cos\theta_1}{V_{P1}} \frac{\cos\theta_2}{V_{S2}} \quad (15)$$

$$H = a - d \frac{\cos\theta_2}{V_{P2}} \frac{\cos\theta_1}{V_{S1}} \quad (16)$$

Aki ve Richards (1980, p.148) yaklaşımı, ilk terim P - dalga hızı, ikinci terim yoğunluk ve üçüncü terim S - hızı olmak üzere üç terimde düzenleyerek izleyen eşitliklerle yeniden vermiştir;

$$R_{pp} \approx \frac{1}{2}(1 - 4p^2 V_S^2) \frac{\Delta\rho}{\rho} + \frac{1}{2\cos^2\theta} \frac{\Delta V_P}{V_P} - 4p^2 V_S^2 \frac{\Delta V_S}{V_S} \quad (17)$$

$$R_{\hat{p}\hat{s}} \approx \frac{-pV_P}{2\cos\emptyset} \left[\left(1 - 2V_S^2 p^2 + 2V_S^2 \frac{\cos\theta \cos\emptyset}{V_P V_S} \right) \frac{\Delta\rho}{\rho} - \left(4V_S^2 p^2 - 4V_S^2 \frac{\cos\theta \cos\emptyset}{V_P V_S} \right) \frac{\Delta V_S}{V_S} \right] \quad (18)$$

$$p = \frac{\sin\theta_1}{V_{P1}} \quad (19)$$

$$\Delta\rho = \rho_2 - \rho_1 \quad (20)$$

$$\theta = (\theta_2 - \theta_1)/2 \quad (21)$$

$$\rho = (\rho_2 + \rho_1)/2 \quad (22)$$

$$\Delta V_P = V_{P2} - V_{P1} \quad (23)$$

$$\Delta V_S = V_{S2} - V_{S1} \quad (24)$$

$$V_P = (V_{P2} + V_{P1})/2 \quad (25)$$

$$V_S = (V_{S2} + V_{S1})/2 \quad (26)$$

$$R_{\hat{p}\hat{s}} \approx R_{P0} + B \sin^2\theta + C[\tan^2\theta - \sin^2\theta] \quad (27)$$

R_{P0} , normal varış yansıma katsayısını, B , orta açılımdaki varışları, C , ise kritik açığa yakın uzak açılımları temsil etmektedir.

Eşitlik (27) izleyen eşitlikle de ifade edilebilmektedir;

$$R_{\dot{p}\dot{p}} \approx \left[\frac{1}{2} \left(\frac{\Delta V_P}{V_P} + \frac{\Delta \rho}{\rho} \right) \right] \left[\frac{1}{2} \frac{\Delta V_P}{V_P} - 4 \frac{V_S^2}{V_P^2} \frac{\Delta V_S}{V_S} - 2 \frac{V_S^2}{V_P^2} \frac{\Delta \rho}{\rho} \right] \sin^2 \theta + \left[\frac{1}{2} \frac{\Delta V_P}{V_P} \right] (\tan^2 \theta \sin^2 \theta) \quad (28)$$

4. Shuey Yaklaşımı

Shuey (1985) eşitlik (28)'de V_S , yerine Poisson sabitini kullanarak eşitliği izleyen şekilde yeniden yazmıştır;

$$R(\theta) = \left[\frac{1}{2} \left(\frac{\Delta V_P}{V_P} + \frac{\Delta \rho}{\rho} \right) \right] + \left[\frac{1}{2} \frac{\Delta V_P}{V_P} \left(2 \frac{\Delta V_P}{V_P} + \frac{\Delta \rho}{\rho} \right) \left(\frac{1-2\sigma}{1-\sigma} \right) + \left(\frac{\Delta \sigma}{(1-\sigma)^2} \right) \right] \sin^2 \theta + \frac{\Delta V_P}{2V_P} (\tan^2 \theta - \sin^2 \theta) \quad (29)$$

Eşitlik (29)'da $V_S/V_P = 0.5$ olarak yazılır ve varış açısı 30° 'den küçük olduğu durumda üçüncü terim eşitlikten çıkarılırsa;

$$R(\theta) = \left[\frac{1}{2} \left(\frac{\Delta V_P}{V_P} + \frac{\Delta \rho}{\rho} \right) \right] + \left[\frac{1}{2} \frac{\Delta V_P}{V_P} - \frac{\Delta V_S}{V_S} - \frac{1}{2} \frac{\Delta \rho}{\rho} \right] \sin^2 \theta \quad (30)$$

$$R_P \cong \frac{1}{2} \left(\frac{\Delta V_P}{V_P} + \frac{\Delta \rho}{\rho} \right) \quad (31)$$

$$R_S \cong \frac{1}{2} \left(\frac{\Delta V_S}{V_S} + \frac{\Delta \rho}{\rho} \right) \quad (32)$$

Eşitlik (31) ve (32) kullanılarak eşitlik (30) yeniden düzenlendiğinde;

$$R(\theta) = R_P + (R_P - 2R_S) \sin^2 \theta \quad (33)$$

$$R(\theta) = R_p + G \sin^2 \theta \quad (34)$$

$$R_s = (R_p - G)/2 \quad (35)$$

elde edilir.

5. Smith ve Gidlow Yaklaşımı

Smith ve Gidlow (1987), Aki ve Richards'ın yaklaşımını izleyen eşitlikle vermiştir;

$$R(\theta) = \left[\frac{1}{2} \left(\frac{\Delta V_p}{V_p} + \frac{\Delta \rho}{\rho} \right) \right] - 2 \frac{V_s^2}{V_p^2} \left[2 \frac{\Delta V_s}{V_s} + \frac{\Delta \rho}{\rho} \right] \sin^2 \theta + \frac{1}{2} \frac{\Delta V_p}{V_p} \tan^2 \theta \quad (36)$$

Eşitlik (36)'yı yeniden düzenlemek için Gardner'ın (37)'deki eşitliğinden yararlanılmışlardır.

$$\rho = a V_p^{1/4} \quad (37)$$

Eşitlik (37) 'nin türevi alınıp yeniden yazılırsa:

$$\frac{\Delta \rho}{\rho} = \frac{1}{4} \frac{\Delta V_p}{V_p} \quad (38)$$

Eşitlik (38) , eşitlik (36)'da yerine yazılıp düzenlenirse:

$$R(\theta) = c \frac{\Delta V_p}{V_p} + d \frac{\Delta V_s}{V_s} \quad (39)$$

elde edilir. Burada c ve d aşağıdaki gibi tanımlanmıştır:

$$c = 5/8 - 1/2(V_s^2/V_p^2) \sin^2 \theta + 1/2 \tan^2 \theta \quad (40)$$

$$d = -4(V_s^2/V_p^2) \sin^2 \theta \quad (41)$$

6. Fatti Yaklaşımı

Fatti (1994), Aki – Richards yaklaşımını izleyen eşitlikteki gibi düzenlemiştir;

$$R(\theta) = \frac{1}{2} [1 + \tan^2 \theta] \frac{\Delta I_P}{I_P} + 4 \frac{V_S^2}{V_P^2} \sin^2 \theta \frac{\Delta I_S}{I_S} - \left[\frac{1}{2} \tan^2 \theta - 2 \frac{V_S^2}{V_P^2} \sin^2 \theta \right] \frac{\Delta \rho}{\rho} \quad (42)$$

Eşitlik (42) varış açısı 30° 'den küçük olduğu durumlar üçüncü terim eşitlikten atılır ve izleyen eşitlikteki gibi düzenlenebilir;

$$R(\theta) = \frac{1}{2} [1 + \tan^2 \theta] \frac{\Delta I_P}{I_P} + 4 \frac{V_S^2}{V_P^2} \sin^2 \theta \frac{\Delta I_S}{I_S} \quad (43)$$

7. Verm ve Hilterman Yaklaşımı

Zoeppritz eşitliklerini tekrar hatırlayacak olursak, yansıma ve iletim katsayıları ile elastik kayaç özellikleri arasındaki ilişkinin belirgin biçimde ortaya koymadığından bahsedilmişti. Verm ve Hilterman (1995), Shuey'in yaklaşımını yeniden düzenleyerek kayaç elastik parametrelerinin AVO analizinde kullanımına kolaylık getirmesi amacıyla aşağıdaki eşitlikleri önermişlerdir:

$$RC(\theta) \approx NI \cos^2 \theta + PR \sin^2 \theta \quad (44)$$

$$NI = (\rho_2 V_{P2} - \rho_1 V_{P1}) / (\rho_2 V_{P2} + \rho_1 V_{P1}) \quad (45)$$

$$PR = (\sigma_2 - \sigma_1) / (1 - \sigma_{avr})^2 \quad (46)$$

$$\sigma_{avr} = (\sigma_2 + \sigma_1) / 2 \quad (47)$$

Eşitlik (44)'te NI olarak verilen sabit normal yansıma katsayısı iken PR olarak verilen sabit ise Poisson yansıma katsayısı olarak tanımlanmaktadır.

EK 2 TABAKALI MODEL İÇİN ZOEPPRITZ HESABI

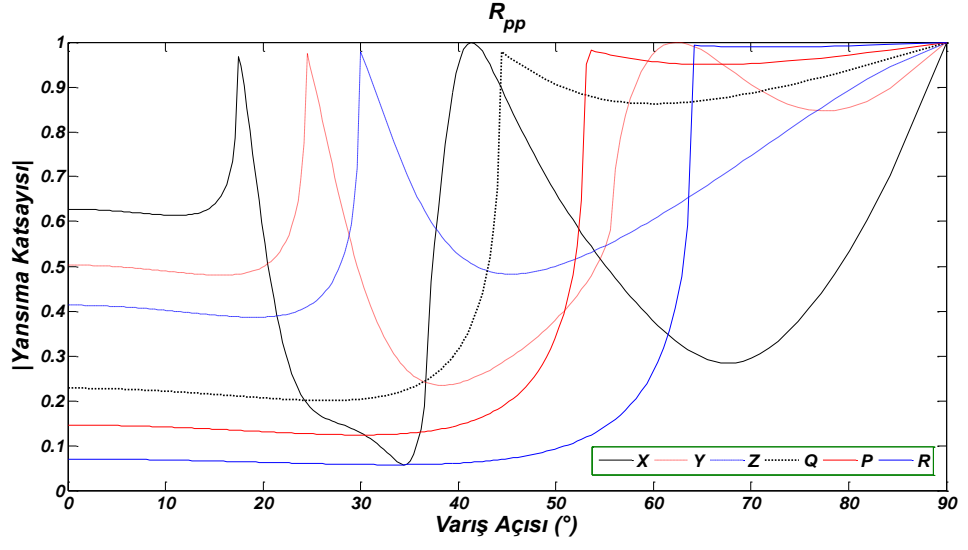
Bu bölümde farklı yapay jeolojik modeller için Zeoppritz eşitliklerinin ne şekilde yorumlanabileceği gösterilecektir. Bu amaçla Richards (1961)'ın Batı Kanada'daki Palezoik döneme ait kireçtaşları için verdiği model parametreleri kullanılarak yansıma katsayılarının değişimi $R_{\hat{p}\hat{p}}$, $R_{\hat{p}\hat{s}}$, $T_{\hat{p}\hat{p}}$, $T_{\hat{p}\hat{s}}$ için modellenecektir. Katsayıların hesabında eşitlik (6) ve (7) kullanılmıştır. Model parametreleri çizelge 1'deki gibidir.

Çizelge 1 Batı Kanada'daki Palezoik döneme ait kireçtaşları için jeolojik model parametreleri

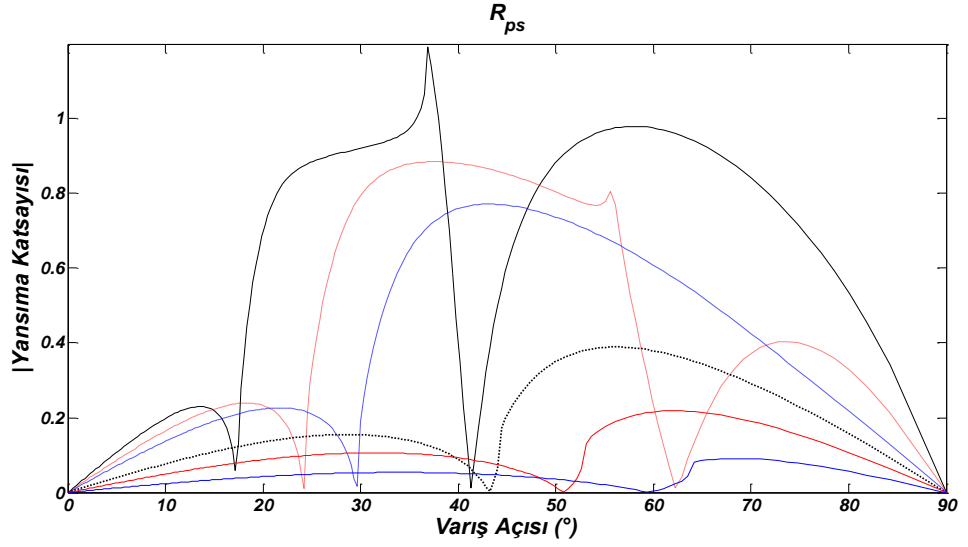
	X	Y	Z	Q	P	R	Temel Kayaç
V_p (m/s)	1829	2521	3048	4267	4877	5486	6096
V_s (m/s)	914	1260	1524	2133	2438	2743	3048
ρ (gm/cc)	2.02	2.12	2.20	2.38	2.47	2.56	2.65

Çizelge 1'de verilen X, Y, Z, Q, P, R, örtü katmanları olup temel kayaç parametresi her seferinde sabit tutulmuştur. Bütün katmanlar için $V_p/V_s = 2$ olduğu gözlenmektedir. Parametreleri verilen modeller için $R_{\hat{p}\hat{p}}$, $R_{\hat{p}\hat{s}}$, $T_{\hat{p}\hat{p}}$, $T_{\hat{p}\hat{s}}$ katsayıları sınır arayüze herhangi bir geliş açısı için tam Zoeppritz eşitliklerinden hesaplanabilmektedir. Ancak unutulmamalıdır ki bir hazne kayacın V_p , V_s ve ρ parametreleri, ortamların boşluk oranı, akışkan içeriği, basınç ve sıcaklık gibi fiziksel parametrelere bağlıdır ve doğrudan değişim göstermektedir.

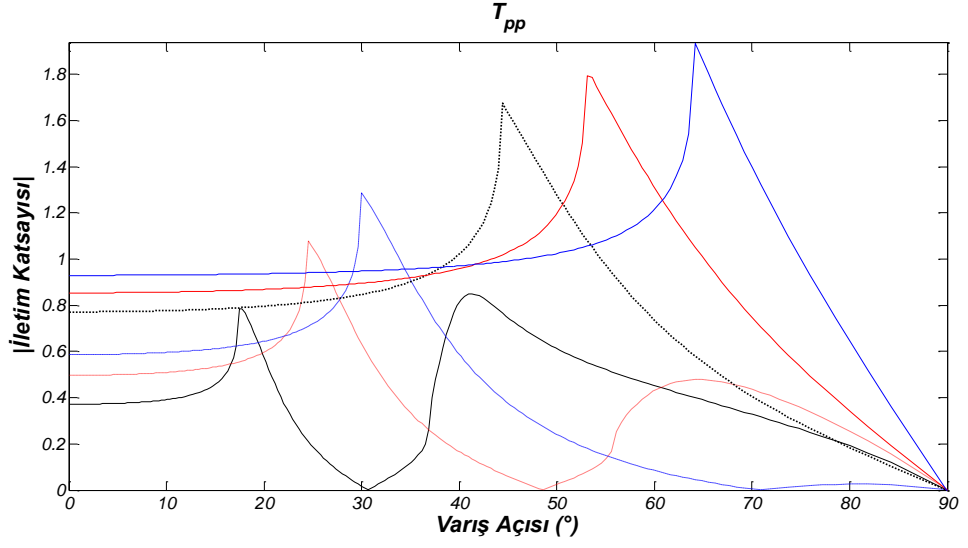
Şekil 1-4 'te mümkün olan tüm varış açılarındaki yansıma ve iletim katsayıları hesaplanmıştır. Ancak pratikte yapılan sismik araştırmalardaki ortak kanı uzak açılımın 30° civarında veya daha az olduğudur (Castagna ve Backus 1993).



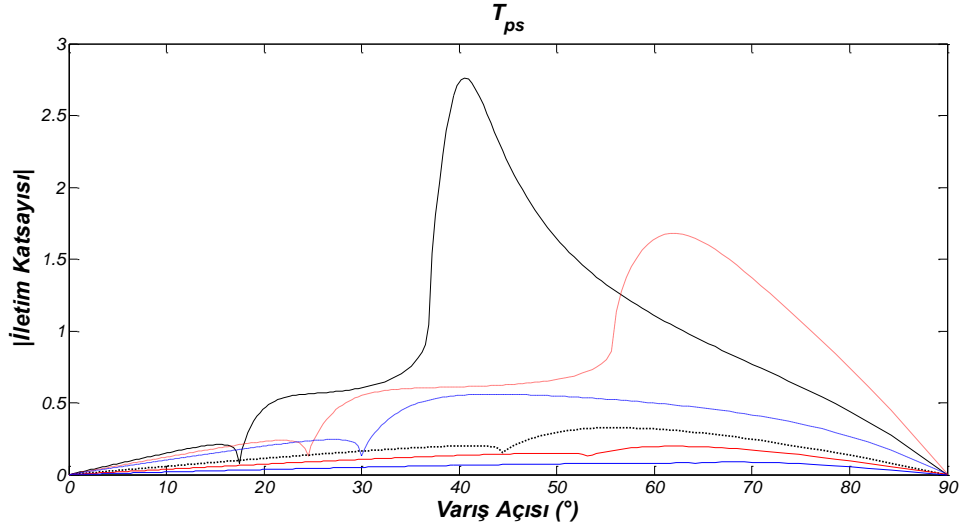
Şekil 1 Çizelge 1’de verilen altı model için $R_{\hat{p}\hat{p}}$, yansıma katsayılarının sınır ara yüzeye varış açlarına göre değişimi



Şekil 2 Çizelge 1’de verilen altı model için $R_{\hat{p}\hat{s}}$, yansıma katsayılarının sınır ara yüzeye varış açlarına göre değişimi



Şekil 3 Çizelge 1’de verilen altı model için $T_{\hat{p}\hat{p}}$, iletim katsayılarının sınır ara yüzeye varış açılarına göre değişimi



Şekil 4 Çizelge 1’de verilen altı model için $T_{\hat{p}\hat{s}}$, iletim katsayılarının sınır ara yüzeye varış açılarına göre değişimi

Şekil 1'deki AVA eğrileri için Castagna ve Backus (1993)'un yapmış olduğu gözlemler şu şekildedir:

- 1) Yansıyan P - dalgası genliklerinin yerel maksimuma ulaştığı noktalar, normal varışta, ilk kritik açıda ve mümkün olan yakın S -dalgası kritik açıdadır.
- 2) Yansıma katsayılarındaki değişim, düşük açı değerlerinde küçüktür.
- 3) İlk kritik açı izleyen eşitlikteki gibidir:

$$\sin \theta_{C1} = V_{P1}/V_{P2} \quad (1)$$

Elastik katmanlar için, yansıyan P - dalgası enerjisi, sınır ara yüzeyde yansıyan ve iletilen S -dalga hızına dönüşümü esnasında azalacak ve bu durumdan kaynaklanan ikinci bir kritik açıya sebep olacak ki bu eşitlik izleyen şekildedir:

$$\sin \theta_{C2} = V_{P1}/V_{S2} \quad (2)$$

Bu ikincil kritik açıya kadar, iletilen bir S -dalgası yoktur. Şu da unutulmamalıdır ki V_{P1} 'in V_{S2} 'den daha büyük olduğu durumda ilk kritik açı olmayacak ve P -dalgası her zaman için ikinci ortama iletilecektir.

- 4) Normal varışta, R_{PP} , açının artımı ile azalacaktır. Bu genel davranıştaki sapma, sınır ara yüzey boyunca V_P/V_S oranının değişiminin bir sonucudur.

V_P/V_S oranının pratikte AVA analizinde kullanılabileceğini ilk ortaya koyan Koefoed (1955) oldu ve çalışmalarında sınır ara yüzey boyunca Poisson oranının (σ) değişimini araştırdı. Poisson oranının V_P/V_S oranı ile ilişkisi izleyen eşitlikteki gibidir:

$$\sigma = \frac{0.5 \left(\frac{V_P}{V_S}\right)^2 - 1}{\left(\frac{V_P}{V_S}\right)^2 - 1} \quad (3)$$

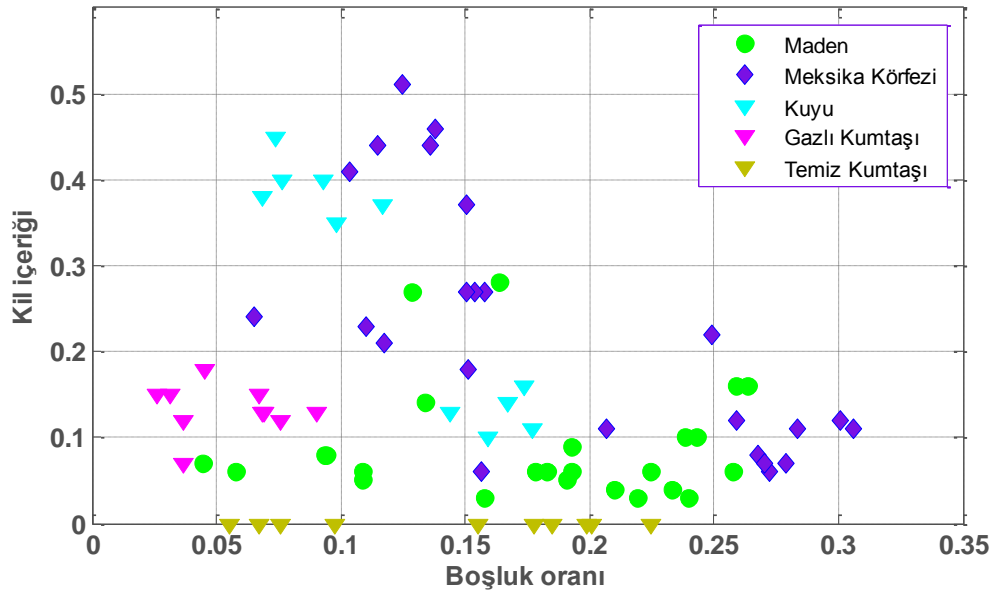
$$\frac{V_S}{V_P} = \sqrt{\frac{\frac{1}{2} - \sigma}{1 - \sigma}} \quad (4)$$

Eşitlik (3)'te verilen Poisson oranının doğrudan V_S ile olan ilişkisi açıkça görülmektedir. Bu nedenle Poisson oranı akışkanlığın bir ölçütü olarak da nitelendirilebilmektedir.

EK 3 HAN (1986) VERİ GRUBU DENEYSEL ÇALIŞMASI

Bu bölüm içerisinde, bu parametrelerin hazne kayaç hız ve yoğunlukları ile ilişkisi sayısal olarak deneysel bir çalışma ile araştırılacaktır. Model veri grubu için Han vd. (1986)'nin veri grubu kullanılacak ve beşinci bölümde tanıtılan sismik nitelendiriciler, veri grubu için hesaplanarak olası sonuçları modellenecektir.

Han'ın veri grubu, basınçları 5 – 40 MPa, kil içeriği % 0 – 50 ve boşluk oranı % 2 – 30 arasında değişen 80 adet kumtaşı modelinin ultrasonik V_p ve V_s dalga hızlarını içermektedir. Veri grubunun 10 örneği % 0 kil içeriğine sahiptir. Geri kalan 70 örnek ise maden ocaklarından veya kuyu örneklerinden gelen kumtaşlarından oluşmaktadır. Veri grubunun 10'u çok düşük boşluk oranına sahip gazlı kumtaşı örneklerinden, 24'ü zayıf pekişmiş olup Meksika Körfezi'nden gelen kumtaşı örneklerinden, 11'i iyi pekişmiş olup kuyudan gelen kumtaşı örneklerinden, 25'i iyi pekişmiş olup maden ocaklarından gelen kumtaşı örneklerinden ve 10'u %1'den az boşluk oranına sahip olup yine maden ocaklarından gelen temiz kumtaşı örneklerinden oluşmaktadır (Şekil 1).



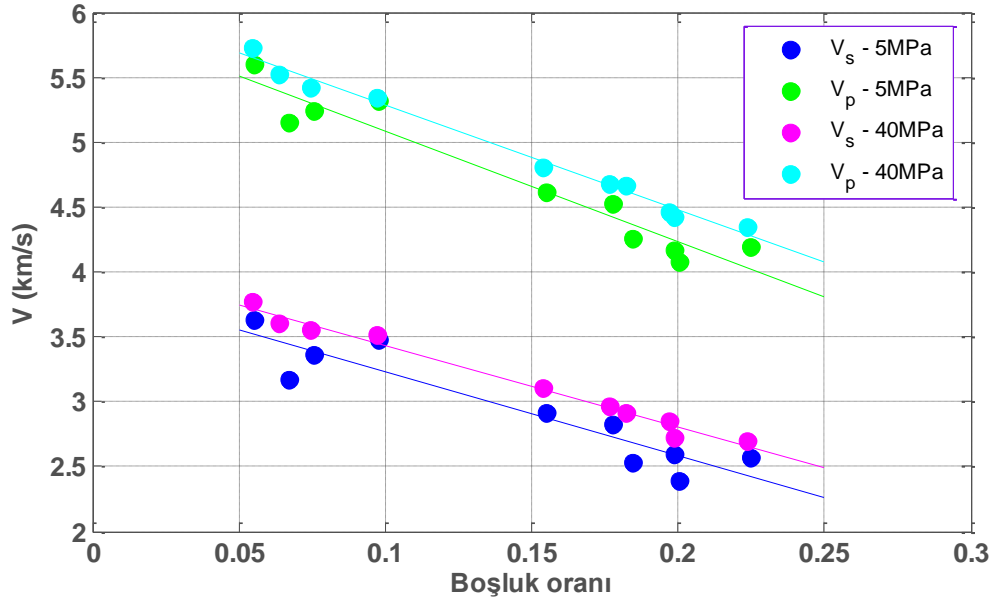
Şekil 1 Veri grubunun boşluk oranına göre kil içeriğinin değişimi (Han vd. 1986)

Han vd. (1986)'in verisinin tez kapsamında kullanılmasının en önemli nedeni, veri grubu olarak kullandığı kumtaşlarının öncelikle mükemmel bir hazne kayaç konumunda olması, ikincil olarak da belirli bir boşluk oranına sahip veri grubunun içerdiği kil oranının elastik dalga hızlarını nasıl etkilediğini ortaya koymasıdır. Bunun yanı sıra elastik dalga hızlarının farklı basınç değerleri (5 – 10 – 20 – 30 – 40 MPa) altında ölçülmüş olması da elastik sabitlerin basınçla değişimini araştırmaya olanak sağlamasından dolayı ayrı bir önem taşımaktadır. Han vd. (1986)'in yapmış olduğu çalışmaya benzer çalışmalar başka araştırmacılar tarafından da yapılmış ve sonuçları yayınlanmıştır (Klimentos ve McCann 1990, Klimentos 1991, Freund 1992, Best vd. 1994).

1. Temiz Kumtaşları

1.1 Boşluk Oranı ve Kil İçeriğinin Sismik Hızlara Etkisi

Elastik kayaç boşluk oranının artışı ile temiz ve suya doymuş kumtaşları için dalga hızları (V_P , V_S) boşlukların sıkışabilirliğinden dolayı azalmaktadır (Wyllie vd. 1956, Pickett 1963). Veri grubunun 10'unun %1'den az boşluk oranına sahip olup maden ocaklarından gelen ve kil içermeyen temiz kumtaşı örneklerinden oluşmaktadır. 5 ve 40 MPa basınç altındaki dalga hızlarının kayaç boşluk oranıyla değişimi Şekil 2'de verilmektedir. Grafikteki hız değişimlerine bakıldığında, boşluk oranıyla ters orantılı bir ilişki gözlenmektedir. Bununla birlikte artan basıncın etkisindeki elastik kayaç partiküllerinin sıkışması bulk sabitinin göreceli değişimine neden olacak ki bu da dalga hızlarının değişimiyle sonuçlanacaktır. Şekil 2' de 5 ve 40 MPa basınç altındaki veri grubu kayaçlarının dalga hızlarındaki değişime bakıldığında, basıncın artışıyla dalga hızlarındaki artış gözlenmektedir. Han (1986), temiz kumtaşı veri grubu için boşluk oranıyla dalga hızları arasındaki doğrusal ilişkiyi eşitlik (1) ve (2) ile tanımlamıştır.



Şekil 2 Veri grubunun boşluk oranına (ϕ) göre sismik hız değişimi (Han vd. 1986)

$$V_p(km/s) = 6.08 - 8.06 \phi \quad (1)$$

$$V_s(km/s) = 4.06 - 6.28 \phi \quad (2)$$

Eşitlik (1) ve (2)'de boşluk oranı sıfır olduğunda, $V_{P_0} = 6.08$ ve $V_{S_0} = 4.06$ olduğu görülmektedir. Bu hız değerlerinin kayacı oluşturan minerallerin bütününe ait olduğunu unutmamak gerekir. Bunun yanı sıra hız değerlerinin kuartz mineralinin hızına eşit olduğu görülmektedir (Han vd. 1986, Robert 1982). Bu koşuldaki dalga hız oranı:

$$V_{P_0} / V_{S_0} = 1.498 \quad (3)$$

Eşitlik (1) ve (2)'de boşluk oranı % 50 olduğunda dalga hızları oranı:

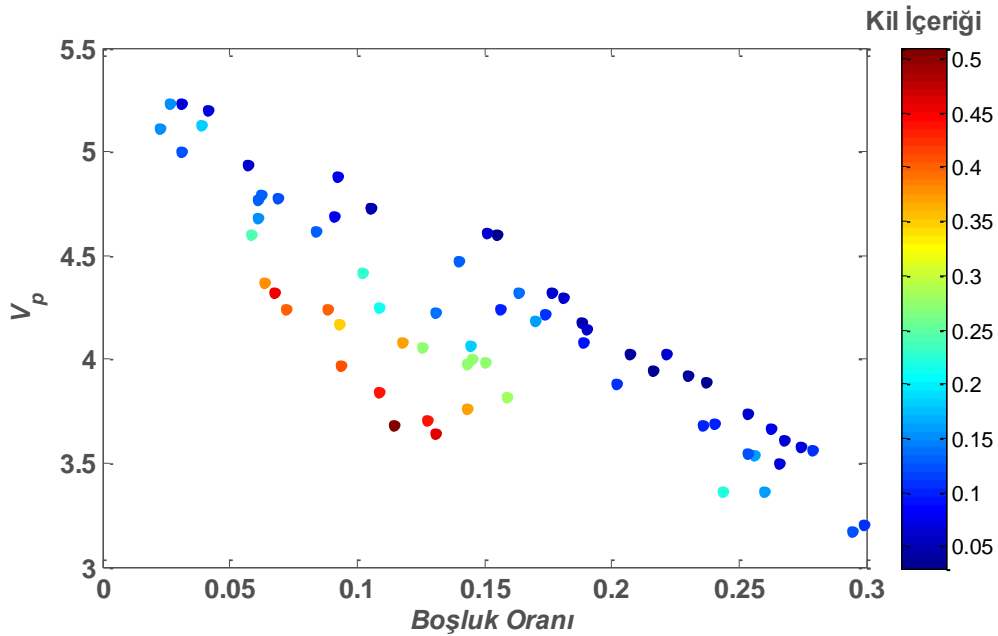
$$V_{P_{50}} / V_{S_{50}} = 1.280 \quad (4)$$

Eşitlik (3) ve (4)'ten elde edilen değerlere bakılarak kayaç boşluk oranının V_p 'ye oranla V_s 'yi daha çok etkilediği gözlenmektedir.

2. Killi Kumtaşları

2.1 Boşluk Oranı ve Kil İçeriğinin Sismik Hızlara Etkisi

Çoğunlukla hazne kum ve kumtaşları kil minerali içermektedir (Wang 2001). Hazne kumtaşları üzerinde yapılmış olan araştırmalar, kil mineralinin kayaç taneleri arasındaki bağı zayıflattığı ve bulk sabitini düşürerek, kayaç dalga hızlarını azalttığını göstermektedir (Castagna vd. 1985, Miller ve Stewart 1990). Han vd. (1986) kumtaşları için boşluk oranı ve kil içeriğinin dalga hızları üzerindeki etkisini tek bir eşitlikte birleştirdi. Han vd. (1986) veri grubunun kil içeriği % 0 – 50 ve boşluk oranı % 2 – 30 arasında değiştiği belirtilmişti. Temiz kumtaşlarının dışında 70 kumtaşı örneği kil minerali içermektedir.



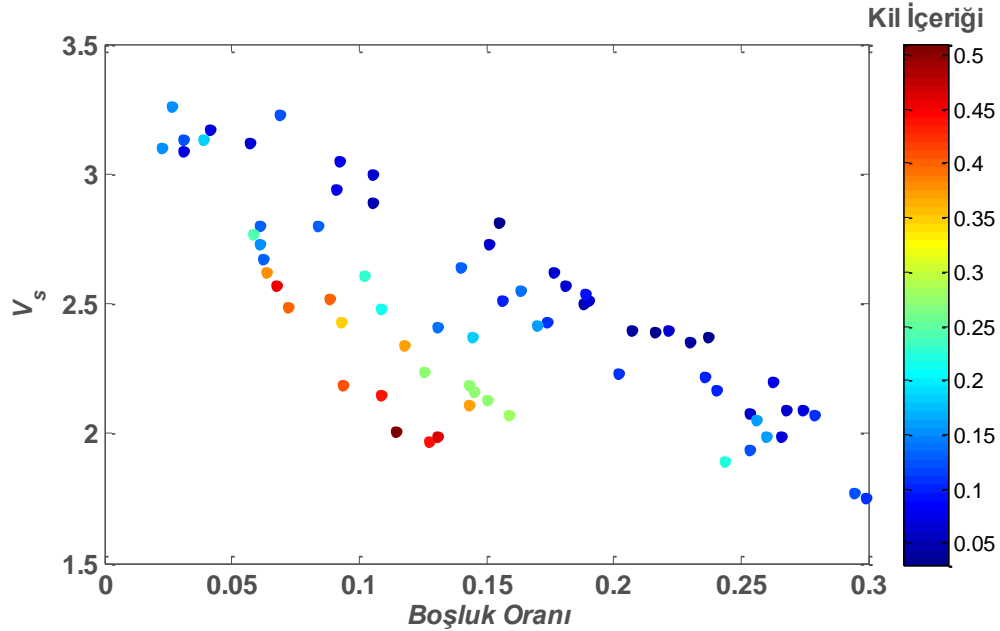
Şekil 3 Veri grubunun 40MPa basınç altında ve 1 MPa boşluk basıncındaki boşluk oranına (ϕ) göre V_p değişimi (Han vd. 1986).

Aynı zamanda veri grubunun kil içeriği de renkli kodlanarak grafik parametreleriyle ilişkilendirilmiştir

Şekil 3’de ve Şekil 4’te açıkça gözlenmektedir ki her iki dalga hızı da kayaç boşluk oranının ve kil içeriğinin artışı ile azalmaktadır. Han vd. (1986), bu ilişkiyi eşitlik (5) ve (6)’daki gibi vermiştir.

$$V_P(km/s) = 5.59 - 6.93 \phi - 2.18C \quad (5)$$

$$V_S(km/s) = 3.52 - 4.91 \phi - 1.89C \quad (6)$$



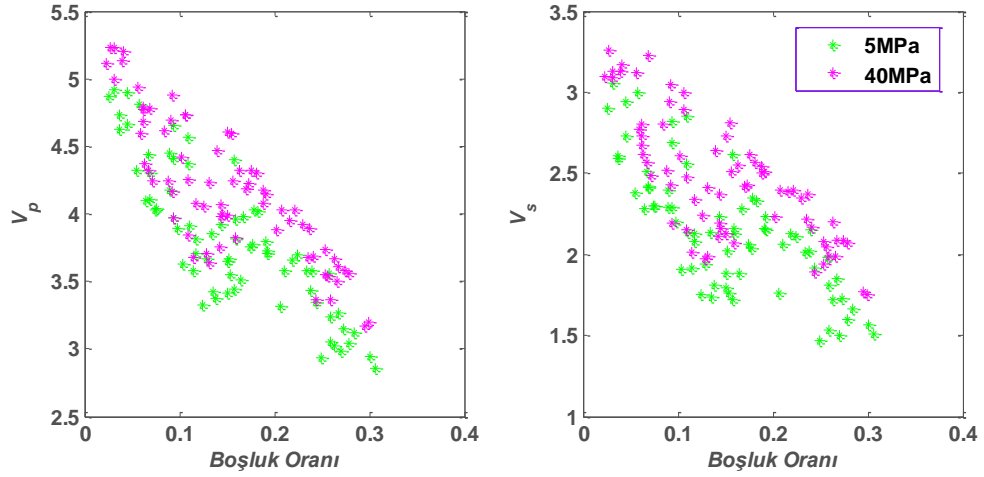
Şekil 4 Veri grubunun 40MPa basınç altında ve 1 MPa boşluk basıncındaki boşluk oranına (ϕ) göre V_S değişimi (Han vd. 1986).

Aynı zamanda veri grubunun kil içeriği de renkli kodlanarak grafik parametreleriyle ilişkilendirilmiştir

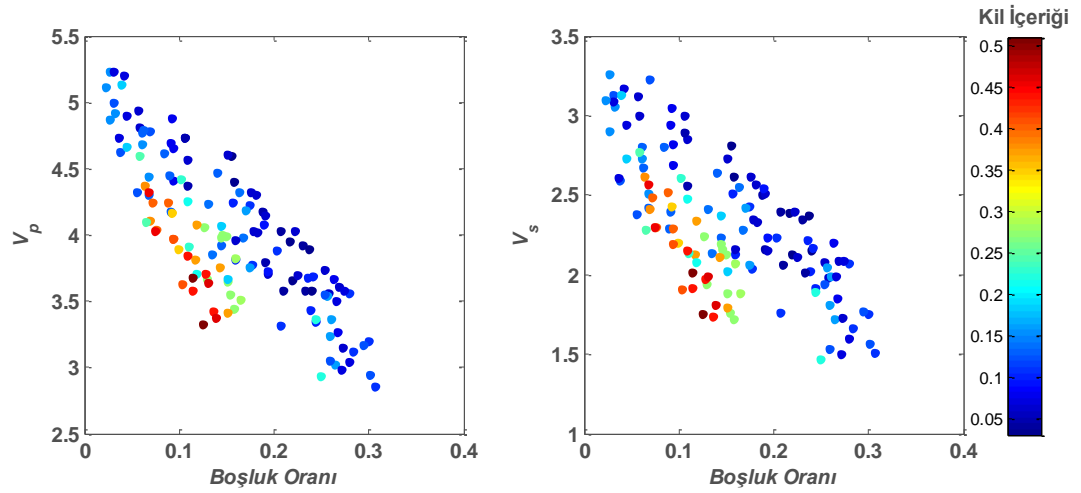
2.2 Basıncın Sismik Hızlara Etkisi

Kayaca uygulanan basınç ile kayaç boşluk basınç arasındaki farkın artışı, her iki dalga hızının (V_P , V_S) da artışına sebep olmaktadır (Wylie vd. 1958, Todd ve Simmons 1972, Han vd. 1986, Eberhart-Phillips vd. 1989, Best 1997). Örnek olarak Han vd. (1986) veri grubunda aynı kil içeriğine sahip 70 kumtaşı örneğinin 5 ve 40 MPa basınç altında ve 1MPa boşluk basıncı için V_P ve V_S hız değerlerinin boşluk oranıyla değişimi Şekil 5'te verilmektedir. Şekil 5'e bakıldığında sismik hız değerlerinin aynı kil içeriğine sahip kumtaşı örnekleri için uygulanan basınçla arttığı, aynı zamanda boşluk oranıyla da azaldığı gözlenmektedir. Aynı veri grubu için kumtaşı örneklerinin kil oranları da üçüncü bir niteleyici olarak renkli kodlanıp Şekil 6'da verilmektedir.

Şekil 6.6'ya bakıldığında ise yine bir kez daha kil oranının ve boşluk oranının artışı ile sismik hızların azaldığı gözlenmektedir.



Şekil 5 Aynı kil içeriğine sahip 70 kumtaşı örneğinin 5 ve 40 MPa basınç altında ve 1MPa boşluk basıncı için V_p ve V_s hız değerlerinin boşluk oranıyla değişimi (Han ve diğ, 1986)



Şekil 6 Şekil 5'te verilen V_p , V_s ve boşluk oranı değişim grafiklerinin üçüncü bir niteleyici olan kumtaşı kil içeriği ile ilişkilendirilmesi (Han vd. 1986)

ÖZGEÇMİŞ

Adı Soyadı : Engin SANDIKCI
Doğum Yeri : Ankara
Doğum Tarihi : 22.08.1986
Medeni Hali : Bekar
Yabancı Dili : İngilizce, Lehçe

Eğitim Durumu (Kurum ve Yıl)

Lise : 75 Yıl Yabancı Dil Ağırlıklı Lisesi, 2004.
Lisans : Karadeniz Teknik Üniversitesi, Mühendislik Fak., Jeofizik Müh.
Bölümü, 2009.
Yüksek Lisans : Ankara Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Jeofizik Müh. ABD,
2015.

Çalıştığı Kurum/Kurumlar ve Yıl

Viking Geophysical Services, 2010 - 2014
Petroleum Geo-Services, 2014 -

Yayımları

Sandıkçı, E. Özer, Z. 2008. Farklı jeolojik modellerin AVO davranışları ve duyarlılıkları;
Türkiye 18. Uluslararası Jeofizik Kongre ve Sergisi 2008, Ankara.

Sandıkçı, E. 2010. Hazne kayaçtaki gaz, su ve çözünmüş gaz içeren suyun AVA ve LMR
analizleri ile ayırt edilmesi; Türkiye 19. Uluslararası Jeofizik Kongre ve Sergisi
2010, Ankara.