

**İSTANBUL TEKNİK ÜNİVERSİTESİ ★ FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

**TABAKA GÖZENEKLİLİĞİ VE AKIŞKAN CİNSİNİN SİSMİK YANSIMA  
GENLİKLERİNİN AÇI İLE DEĞİŞİMİNE ETKİSİ**

**YÜKSEK LİSANS TEZİ**

**Volkan Uğur KARAGÖL**

**Jeofizik Mühendisliği Anabilim Dalı**

**Jeofizik Mühendisliği Programı**

**HAZİRAN 2012**



**İSTANBUL TEKNİK ÜNİVERSİTESİ ★ FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

**TABAKA GÖZENEKLİLİĞİ ve AKIŞKAN CİNSİNİN SİSMİK YANSIMA  
GENLİKLERİNİN AÇI İLE DEĞİŞİMİNE ETKİSİ**

**YÜKSEK LİSANS TEZİ**

**Volkan Uğur KARAGÖL  
(505091417)**

**Jeofizik Mühendisliği Anabilim Dalı**

**Jeofizik Mühendisliği Programı**

**Tez Danışmanı: Doç. Dr. Hülya KURT**

**HAZİRAN 2012**



İTÜ, Fen Bilimleri Enstitüsü'nün 505091417 numaralı Yüksek Lisans Öğrencisi **Volkan Uğur KARAGÖL**, ilgili yönetmeliklerin belirlediği gerekli tüm şartları yerine getirdikten sonra hazırladığı “**TABAKA GÖZENEKLİLİĞİ VE AKIŞKAN CİNSİNİN SİSMİK YANSIMA GENLİKLERİNİN AÇI İLE DEĞİŞİMİNE ETKİSİ**” başlıklı tezini aşağıda imzaları olan jüri önünde başarı ile sunmuştur.

**Tez Danışmanı :**      **Doç. Dr. Hülya KURT**      .....

İstanbul Teknik Üniversitesi

**Jüri Üyeleri :**      **Doç. Dr. Hülya Kurt**      .....

İstanbul Teknik Üniversitesi

**Prof. Dr. Emin DEMİRBAĞ**      .....

İstanbul Teknik Üniversitesi

**Prof. Dr. Bedri ALPAR**      .....

İstanbul Üniversitesi

**Teslim Tarihi :**      **04 Mayıs 2012**

**Savunma Tarihi :**      **04 Haziran 2012**



*Aileme,*





## **ÖNSÖZ**

Bu tez çalışmasının gerçekleşmesinde büyük desteği olan danışmanım Doç. Dr. Hülya KURT'a; tez çalışmam süresince bana çeşitli konularda zaman ayırıp, yardımcı olan hocalarıma ve arkadaşlarıma; hayatım boyunca bana destek olup, aldığım kararlarda beni her koşulda destekleyen aileme teşekkürü bir borç bilirim.

Haziran 2012

Volkan Uğur KARAGÖL  
Jeofizik Mühendisi



## İÇİNDEKİLER

### Sayfa

ÖNSÖZ.....	vii
İÇİNDEKİLER.....	ix
KISALTMALAR.....	xi
ÇİZELGE LİSTESİ .....	xiii
ŞEKİL LİSTESİ .....	xv
ÖZET .....	xvii
SUMMARY.....	xix
<b>1. GİRİŞ.....</b>	<b>1</b>
1.1 Tezin Amacı .....	2
1.2 Literatür Araştırması .....	2
<b>2. KAYAÇ HIZLARI VE HIZLARI ETKİLEYEN DEĞİŞKENLER.....</b>	<b>5</b>
2.1 Sismik Kayaç Hızları.....	5
2.2 Yoğunluk .....	5
2.3 Gözeneklilik .....	6
<b>3. SİSMİK YANSIMA KATSAYILARI .....</b>	<b>9</b>
3.1 Yansıma Genliklerinin Ofset/Açı İle Değişimi Analizi .....	10
3.2 AVO Sınıflandırmaları .....	11
3.2.1 Birinci sınıf AVO eğrileri .....	11
3.2.2 İkinci sınıf AVO eğrileri.....	11
3.2.3 Üçüncü sınıf AVO eğrileri.....	12
3.2.4 Dördüncü sınıf AVO eğrileri .....	13
3.3 Hidrokarbon Kapanı Modelleri .....	14
<b>4. MODELLER, HESAPLAMA YÖNTEMLERİ ve YORUMLAR .....</b>	<b>17</b>
4.1 Sayısal -Hesaplama Yöntemleri .....	17
4.1.1 Zoepritz katsayılarının hesaplanması .....	17
4.1.2 İki boyutlu dalga denklemi ile modelleme .....	18
4.2 Arayüzey Modelleri ve Değişken Değerlerinin Oluşturulması .....	20
4.3 Petrol ve Doğalgaz Kapanı Modelleri .....	23
4.3.1 Şeyl– kireçtaşı modeli.....	23
4.3.2 Şeyl– kumtaşı modeli .....	30
4.3.3 Şeyl– killi kumtaşı modeli .....	34
4.3.4 Model AVA eğrilerinin gözenekliliğe bağlı 3-boyutlu değişimleri .....	40
4.3.4.1 Şeyl-Kireçtaşı 3-boyutlu modeli .....	40
4.3.4.2 Şeyl-kumtaşı 3-boyutlu modeli .....	42
4.3.4.3 Şeyl-killi kumtaşı 3-boyutlu modeli .....	43
<b>5. SONUÇLAR .....</b>	<b>47</b>
<b>KAYNAKLAR.....</b>	<b>49</b>
<b>EKLER .....</b>	<b>51</b>
<b>ÖZGEÇMİŞ.....</b>	<b>61</b>



## **KISALTMALAR**

<b>API</b>	: American Petroleum Institute
<b>AVA</b>	: Amplitude Versus Angle
<b>AVO</b>	: Amplitude Versus Offset
<b>CMP</b>	: Common Mid-point
<b>NMO</b>	: Normal Moveout
<b>SU</b>	: Seismic Unix



## ÇİZELGE LİSTESİ

	<u>Sayfa</u>
Çizelge 4.1 : Modellerde kullanılan tabakaların fiziksel özellikleri .....	21
Çizelge 4.2 : Modellere ait akışkanların fiziksel özellikleri .....	21
Çizelge 4.3 : Denklem (4.6) için gerekli katsayılar. ....	22
Çizelge 4.4 : Şeyl-kumtaşı modelinin fiziksel özellikleri.....	28





## ŞEKİL LİSTESİ

### Sayfa

- Şekil 3.1 :** Yarı sonsuz homojen iki ortamı ayıran yatay bir arayüze P dalgası gelmesi durumunda yansıma ve iletim durumları ..... 10
- Şekil 3.2 :** Rutherford ve Williams'ın (1989) AVO eğrileri sınıflandırması ..... 12
- Şekil 3.3 :** Castagna'nın (1997) geliştirdiği AVO sınıflandırması ..... 13
- Şekil 3.4 :** Yapısal kapan örneği. Noktalı bölge hidrokarbon içeren antiklinal kapanı temsil etmektedir (Sengupta ve Rendleman (1991)'dan değiştirilerek alınmıştır). ..... 15
- Şekil 4.1 :** Dalga yayını modeli için oluşturulan geometri ve kapan modeli ..... 20
- Şekil 4.2 :** Şeyl ve metan içeriğine doymuş kireçtaşı modeli. Siyah kesikli çizgi kireçtaşının laboratuvar ortamında ölçülen özellikleri ile oluşturulan AVA eğrisidir. Mavi, yeşil ve kırmızı eğriler sırası ile %10, %20 ve %30 gözenek oranları ile oluşturulan AVA eğrilerini göstermektedir. 24
- Şekil 4.3 :** Şeyl ve petrol içeriğine doymuş kireçtaşı modeli. Siyah kesikli çizgi kireçtaşının laboratuvar ortamında ölçülen özellikleri ile oluşturulan AVA eğrisidir. Mavi, yeşil ve kırmızı eğriler sırası ile %10, %20 ve %30 gözenek oranları ile oluşturulan AVA eğrilerini göstermektedir. 25
- Şekil 4.4 :** Şeyl ve tuzlu su içeriğine doymuş kireçtaşı modeli. Siyah kesikli çizgi kireçtaşının laboratuvar ortamında ölçülen özellikleri ile oluşturulan AVA eğrisidir. Mavi, yeşil ve kırmızı eğriler sırası ile %10, %20 ve %30 gözenek oranları ile oluşturulan AVA eğrilerini göstermektedir ..... 26
- Şekil 4.5 :** Şeyl-kireçtaşı modelinin metan ve tuzlu su içeriğine doymuş durumlarının gözeneklilik ile hızlarının değişimi ..... 27
- Şekil 4.6 :** Şeyl-kireçtaşı modelinin metan ve tuzlu su içeriğine doymuş durumlarının gözeneklilikle yoğunluklarının değişimi ..... 27
- Şekil 4.7 :** Yoğunluk değişiminin yansıma katsayılarına etkisi ..... 29
- Şekil 4.8 :** P dalga hızı değişiminin yansıma katsayılarına etkisi ..... 30
- Şekil 4.9 :** S dalga hızının yansıma katsayılarına etkisi ..... 31
- Şekil 4.10 :** Şeyl ve metan içeriğine doymuş kumtaşı modeli. Siyah kesikli çizgi kumtaşının laboratuvar ortamında ölçülen özellikleri ile oluşturulan AVA eğrisidir. Mavi, yeşil ve kırmızı eğriler sırası ile %10, %20 ve %30 gözenek oranları ile oluşturulan AVA eğrilerini göstermektedir. 32
- Şekil 4.11 :** Şeyl ve petrol içeriğine doymuş kumtaşı modeli. Siyah kesikli çizgi kumtaşının laboratuvar ortamında ölçülen özellikleri ile oluşturulan AVA eğrisidir. Mavi, yeşil ve kırmızı eğriler sırası ile %10, %20 ve %30 gözenek oranları ile oluşturulan AVA eğrilerini göstermektedir. 33
- Şekil 4.12 :** Şeyl ve tuzlu su içeriğine doymuş kumtaşı modeli. Siyah kesikli çizgi kumtaşının laboratuvar ortamında ölçülen özellikleri ile oluşturulan

	AVA eğrisidir. Mavi, yeşil ve kırmızı eğriler sırası ile %10, %20 ve %30 gözenek oranları ile oluşturulan AVA eğrilerini göstermektedir.	34
<b>Şekil 4.13 :</b>	Şeyl-kumtaşı modelinin metan ve tuzlu su içeriğine doygun halinin gözeneklilik ile hızlarının değişimi.	35
<b>Şekil 4.14 :</b>	Şeyl-kumtaşı modelinin metan ve tuzlu su içeriğine doygun halinin gözeneklilikle yoğunluklarının değişimi.	35
<b>Şekil 4.15 :</b>	Şeyl ve metan içeriğine doygun killi kumtaşı modeli. Siyah kesikli çizgi killi kumtaşının laboratuvar ortamında ölçülen özellikleri ile oluşturulan AVA eğrisidir. Mavi, yeşil ve kırmızı eğriler sırası ile %10, %20 ve %30 gözenek oranları ile oluşturulan AVA eğrilerini göstermektedir.	36
<b>Şekil 4.16 :</b>	Şeyl ve petrol içeriğine doygun killi kumtaşı modeli. Siyah kesikli çizgi killi kumtaşının laboratuvar ortamında ölçülen özellikleri ile oluşturulan AVA eğrisidir. Mavi, yeşil ve kırmızı eğriler sırası ile %10, %20 ve %30 gözenek oranları ile oluşturulan AVA eğrilerini göstermektedir.	37
<b>Şekil 4.17 :</b>	Şeyl ve tuzlu su içeriğine doygun killi kumtaşı modeli. Siyah kesikli çizgi killi kumtaşının laboratuvar ortamında ölçülen özellikleri ile oluşturulan AVA eğrisidir. Mavi, yeşil ve kırmızı eğriler sırası ile %10, %20 ve %30 gözenek oranları ile oluşturulan AVA eğrilerini göstermektedir.	38
<b>Şekil 4.18 :</b>	Şeyl-killi kumtaşı modelinin metan ve tuzlu su içeriğine doygun halinin gözeneklilik ile hızlarının değişimi.	39
<b>Şekil 4.19 :</b>	Şeyl-killi kumtaşı modelinin metan ve tuzlu su içeriğine doygun halinin gözeneklilikle yoğunluklarının değişimi.	39
<b>Şekil 4.20 :</b>	Zoeppritz denklemleri ve 2-boyutlu modelleme sonucunda elde edilen genliklerin yüzde değişimleri.	40
<b>Şekil 4.21 :</b>	Metana doygun kireçtaşı modeli için AVA eğrisinin gözeneklilik oranı ile değişimi.	41
<b>Şekil 4.22 :</b>	Tuzlu suya doygun kireçtaşı modeli için AVA eğrisinin gözeneklilik oranı ile değişimi.	42
<b>Şekil 4.23 :</b>	Metana doygun kumtaşı modeli için AVA eğrisinin gözeneklilik oranı ile değişimi.	43
<b>Şekil 4.24 :</b>	Tuzlu suya doygun kireçtaşı modeli için AVA eğrisinin gözeneklilik oranı ile değişimi.	44
<b>Şekil 4.25 :</b>	Metana doygun killi kireçtaşı modeli için AVA eğrisinin gözeneklilik oranı ile değişimi.	45
<b>Şekil 4.26 :</b>	Tuzlu suya doygun killi kumtaşı modeli için AVA eğrisinin gözeneklilik oranı ile değişimi.	46
<b>Şekil A.1 :</b>	Modelleme sonucu oluşan atış verisi.	52
<b>Şekil A.2 :</b>	Küresel açılım düzeltmesi yapılmış atış verisi.	53
<b>Şekil A.3 :</b>	Ortak orta nokta verisi.	54
<b>Şekil A.4 :</b>	NMO düzeltmesi yapılmış ortak orta nokta verisi.	55
<b>Şekil A.5 :</b>	En büyük ve en küçük genliklerin okunduğu konumlar.	56

## TABAKA GÖZENEKLİLİĞİ VE AKIŞKAN CİNSİNİN SİSMİK YANSIMA GENLİKLERİNİN AÇI İLE DEĞİŞİMİNE ETKİSİ

### ÖZET

Sismik yansıma genliklerinin ofsete veya geliş açısına (Amplitude Versus Offset, AVO; Amplitude Versus Angle, AVA) bağlı değişiminin incelenmesi yeraltı hidrokarbon aramalarında kullanılan en temel yöntemlerden biridir. AVO ve AVA verilerinin analizi, düz ve/veya ters çözüm yaklaşımları ile belirlenen genlik anomalileri bölgeye ait kuyu bilgileri ile ilişkilendirilerek petrol ve doğalgaz alanlarının bulunmasında önemli katkılar sağlar. AVO/AVA verilerinin düz çözüm yaklaşımı ile olası hidrokarbon kapanı içinde ne tür bir akışkan olduğu ve bu akışkanın miktarı hakkında kestirimlerde bulunulabilir. Elde edilen düz çözüm sonuçları ile saha verileri karşılaştırılarak yeraltı hakkında daha detaylı yorumlamalar yapılabilir.

Bu tez çalışmasında AVA verileri ile düz çözüm modellemesi gerçekleştirilmiştir. Bu amaçla petrol ve doğalgaz kapanı oluşturacak şekilde üstte geçirimsiz şeyl tabakası altta da gözenekli çökel kayalardan oluşan hazne kayaç olduğu varsayılmıştır. Oluşturulan üç adet kapan modelinin tümünde üstteki sıfır gözenekliliğe sahip şeyl tabakası sırasıyla kireçtaşı, kumtaşı ve killi kumtaşı tabakası ile yatay bir arayüzey oluşturmuştur. Yatay bir arayüzeye sıfır ve daha büyük açılarla P dalgası gelmesi durumunda arayüzeyde gerçekleşen enerji paylaşımını açıklayan Zoeppritz Denklemleri AVA düz çözümünde matematik model olarak kullanılmıştır. Oluşturulacak düz çözüm modelleri hakkında daha doğru yorum yapabilmek için şeyl-kireçtaşı modeli kullanılarak tabakalara ait yoğunluk, P ve S dalga hızlarının yansıma genlikleri üzerindeki etkileri ayrı ayrı incelenmiştir. Düz çözüm modellemesinde kullanılan yoğunluk ve sismik hızlar kayaç numunelerine laboratuvar ortamında yapılan deneylerle saptanan gerçek değerlerden oluşmaktadır ve tez için yapılan literatür araştırması ile belirlenmiştir. Her modele ait atanan gözeneklilik oranı ve ilişkili akışkan cinsine göre yeni kayaç hızı ve yoğunluk değerleri Gassmann denklemleri kullanılarak hesaplanmıştır.

Zoeppritz denklemlerinin matematik model olarak kullanıldığı bu düz çözüm yaklaşımında seçilen üç kapan modelinde şeyl örtü kayacı ve hazne kayaç arasındaki arayüzeyde yansıyan P dalga genlikleri geliş açısının fonksiyonu olarak hesaplanmış ve grafiklenmiştir. Modellerde arayüzeyin altındaki hazne kayaca %10, %20 ve %30 seviyelerinde olmak üzere farklı gözeneklilik oranları atanmıştır ve hazne kayacın bu gözeneklilik oranlarında doğalgaz, petrol ve tuzlu suya doygun olmalarına göre yansıma genliklerinin açı ile değişimleri incelenmiştir. Bu tez çalışmasında AVA verisi oluşturmak için Zoeppritz denklemleri kullanılmasının yanısıra 2-boyutlu dalga yayılımı yazılımı kullanılarak da yapay sismik veriler oluşturulmuş ve Zoeppritz katsayıları ile karşılaştırmalar yapılmıştır. Modelleme sonuçlarından 2 ve 3 boyutlu yansıma genliği grafikleri oluşturularak hazne kayaç gözenekliliği ve akışkan türünün sismik genlikler üzerindeki etkileri incelenmiştir.

Oluşturulan AVA eğrilerinde yansıma genliklerinin gözenekliliğin artmasıyla birlikte tüm açılarda azaldığı görölmektedir. Her modelde gözeneklilik oranlarındaki değişimin yansıma eğrilerinde belirgin farklar meydana getirebildiği görölmüştür. Modellemeler sonucunda oluşturulan eğrilerin açısı ile değişimini belirlemede kayaç türü ve gözeneklilik oranının, gözenek akışkanına kıyasla daha etkin olduğu görölmüştür. Gözeneklilik oranının artması P dalgası hızlarında ve yoğunluklarda belirgin bir düşüşe neden olarak yansıma genliklerinin azalmasındaki temel nedendir. Örtü ve hazne kayacın sismik dalga hız ve yoğunluk değerleri arasındaki farklarının az olması durumunda yansıma genlikleri çok küçük değerler alabilir ve bu yapılar hidrokarbon içermesine rağmen değerlendirme aşamasında gözden kaçırılabilirler. Kayaç gözeneklerindeki akışkanların türlerinin değişmesi ise sadece yoğunlukta ve S dalgası hızlarında küçük bir değişime neden olabilmüştir. Kayaç gözenekiindeki akışkanların değişmesi P dalgası hızlarında aynı oranda değişime neden olmamıştır.

## **THE EFFECTS OF POROSITY AND FLUID TYPE ON THE ANGLE DEPENDENT REFLECTIVITY**

### **SUMMARY**

Amplitude Versus Offset (AVO) or Amplitude Versus Angle (AVA) approaches are the main methods used in hydrocarbon exploration. The methods study increase or decrease of the reflection amplitudes over offset ranges or angles to predict lithological information of the rocks. The theory of these methods was first studied by German scientist Zoeppritz. Although there were other studies about offset or angle dependent reflectivity, the considerable applications in hydrocarbon exploration have mainly been performed since 1980s. Researches on gas sands show that angle dependent reflectivity could be used to identify hydrocarbons. The results of these studies showed that pre-stack data could be used for interpretation as well as post-stack data. Nowadays the method is used also for understanding the microfracture orientation or stress measuring in shale plays. But the usage of this method on field seismic data itself is not sufficient for interpretation. Forward AVO/AVA modelling approaches of the traps can be encountered in hydrocarbon exploration as well as interpretation of the actual seismic data acquired in the field. Well logs or core samples obtained from other studies or for a specific type of formation can be used to have a better-constrained model data. AVA or AVO analysis studies indicate that exploration studies always include forward modelling using well logs. This forward model can give us insight about the parameters that cannot be estimated from field data like attenuation or porosity. Also it could be used to identify the fluid type of the reservoir.

The parameters required for forward AVO/AVA modeling are P wave velocity, S wave velocity and density. These are the basic physical parameters that effect seismic properties. P and S wave velocity also depend on other elastic parameters such as bulk and shear moduli and also density. Bulk and shear moduli represent the compressibility and rigidity of a rock respectively. P and S wave velocities are directly proportional to these parameters whereas they are indirectly proportional to the density. Therefore using these parameters is a better way to forward modeling. These parameters require the usage of Gassman equations to obtain P and S wave velocities of a saturated rock.

Forward modelling for AVA analysis can be done in two separate ways. First method for forward modelling is an approach by using Zoeppritz equations that give a quick calculation of what the reflection coefficients are. But modelling by Zoeppritz equations applications can only be done for two half-space layers on a horizontal interface. Moreover, Zoeppritz equations do the calculation on the assumption of plane waves whereas the real data acquired in the field is the result of a spherical wave generated by the source. In this thesis matrix form of the Zoeppritz equations are used for modelling. The second method is wavefield-modelling programs. These programs create seismic records that can be seen on a real dataset. Besides, unlike the Zoeppritz equations modelling can be done with various amounts of layers and

interfaces. Thus, a wavefield modelling program can sample subsurface as close to as it can be. However, wavefield modelling requires substantial amount of computational power. Because the modelling time of a model increases with the amount of detail defined in the model. The stability of the program is also an issue for wavefield modelling because it uses numerical methods for calculation. For wavefield modelling the *fledmodc* program is used in this thesis.

In this thesis, amplitude versus angle gathers were created by using the matrix form of the Zoeppritz equations and analysed for possible trap models in hydrocarbon exploration. In this manner, shale – limestone, shale – sandstone and shale – shaly sandstone (sandstone with clay minerals) interfaces were used for modelling. Each interface is modelled with assumption of reservoir rock has porosities of 10%, 20% and 30%. Seismic wave velocities and density of the reservoir rock (limestone) in shale-limestone model are changed one at a time to inspect their effects on reflection amplitudes. These physical parameters are increased and decreased by 10% and 20% to have wide range of values. The resulting reflection amplitudes versus incidence angle graphs are used to interpret the models having different porosity ratios.

Classifications of AVA or AVO anomalies give a certain insight to the interpretation of the reflection data. There are four types of anomalies for interpretation. Class-1 anomalies indicate a well-cemented reservoir rock which starts with strong positive amplitudes and decreases as the incidence angle increases. Amplitudes can change polarity if there is sufficient amount of offset. Class-2 anomalies indicate a reservoir rock that is very similar in physical properties to the overlying seal. This class of anomalies has 2 types of AVA curves. The first type starts with a very small positive amplitude and changes polarity in medium angles and then increases in the negative direction. The second type of anomaly starts with very small negative amplitude and increases in the negative direction with increasing incidence angles. Class-3 anomalies are the most desired anomalies because of their distinctive nature. This class of anomalies starts with high negative amplitudes and increases as the incidence angle increases. After classification of these three classes of anomalies, more studies that are presented Class-4 as anomalies. Class-4 anomalies start with high negative amplitudes like Class-3 but in this case, as the incidence angle increases, the amplitudes decrease. These classes help the interpreter to isolate certain types of anomalies.

To implement different porosity ratios on the velocity values of the rocks, empirical relations for limestone, sandstone and shaly sandstone are used as well as critical porosity equations. Because of the variety of fluids can be found in hydrocarbon traps; gas, oil and brine are used to model the AVA anomalies. The calculations using different porosity values and different fluid types of reservoir rocks have been implemented using Gassmann equations. The rock types that are chosen from core samples have a certain percentage of porosity. To model AVA anomalies at 10%, 20% and 30% porosity of the reservoir rock, empirical relations and Gassmann equations are used in combination. First the bulk and shear moduli of the dry rock (with porosity values from the core sample) is calculated using the velocities and densities of the rocks. After that, using empirical relations and critical porosity formula bulk and shear moduli of the rock in mineral form with no porosity is obtained. These moduli of the mineral are used to form rocks with the porosities of 10%, 20% and 30%. To perform mentioned above, the bulk and shear moduli of the dry rock (porosity 10%, 20% or 30%) are obtained by using the empirical relation

and the critical porosity formula. Finally, the Gassman equations are used to calculate the bulk and shear moduli of the fluid (gas, oil, brine) saturated rock for all the porosity values. These moduli are then used to calculate the velocities that are required for forward modelling.

For a better interpretation of modelling results, P and S wave velocity versus porosity of the reservoir rock and; density versus porosity of the reservoir rock graphs are plotted. Moreover, three dimensional graphs that show the reflection coefficients versus incident angle and porosity are prepared in MATLAB. Thus, a general idea about the effects of porosity on reflection amplitudes is obtained. Wavefield modeling results are only given as reflection amplitude versus angle graphs.

To have an amplitude versus angle graph in wavefield modeling, multiple shots in a line have been performed. Some processing steps are required on these shots so that the amplitudes of the reflecting interface can be read easily. Indeed, processing for AVA analysis must be done carefully because amplitudes can be effected in a way that can give false anomalies. The first step in processing procedure is defining geometry of the line for source, receiver and common midpoint locations. Also spherical divergence correction is done in common shot gathers to compensate for the energy decrease at far offsets. After that, the shot records are sorted into Common Midpoint Gathers (CMP). Thus CMP gathers are formed as including a range of offsets (or incidence angles) and amplitudes. Finally the common midpoint gather is corrected for Normal Move Out (NMO) because the far offsets arrive later in time than near offsets. After NMO correction, the traces effected from the surface waves are removed from the CMP gather. Normally unwanted surface waves can be removed by f-k filtering and reflections concealed in these traces can be obtained. Unfortunately this approach smears all of the amplitudes in the seismic record this processing step was not applied. NMO correction results in the aligning of the reflections from the same point and allows for an easier reading of the amplitudes of the anomaly. The AVA data produced from the Zoeppritz equations and wavefield modelling are different in scale. Zoeppritz equations give a coefficient of the layers at various angles whereas the modelling programs gives a amplitude value for the angles. To be able to compare the results, amplitudes are normalized by the first reflection in their own data so that both modelling results represent the change of amplitudes with relation to the first reflection amplitude.

Increasing porosity in all the models reduces the amplitudes from positive values to negative values. In shale-limestone model despite the limited range of incidence angles, the effects of critical angle can be seen around 40 degrees. In every trap model increasing porosity ratios change the AVA curve significantly and thus the AVA class type can change especially in shale-sandstone trap model. Lithology and porosity are the main factors effecting on the angle dependent reflectivity in these models. In certain conditions, seismic wave velocities and densities of the seal and the reservoir rock can be similar and reflections can become so weak that even there is hydrocarbon in the trap, the results could be overlooked. However the reservoir rock sometimes can be well-cemented and its physical parameters can be much higher than the seal. The amplitudes from this trap model will be strong and may increase with higher incidence angles, but it will include the effects of critical angle. P wave velocity and density of the saturated rocks are the biggest factors for effecting the amplitudes. Change in the rock fluid type is less effective for the AVA anomalies in these models. Rock fluids mainly effect the density of the rock which occurs as a big decrease from brine saturated models to gas saturated model. In

contrast, S wave velocities are increased by a small amount because of the change from brine to gas. But the fluid change is not as effective on the P wave velocities in these models as they are on S wave velocities and densities.



## 1. GİRİŞ

Sismik yansıma yöntemi petrol ve doğal gaz araştırmalarında en etkili olan ve bu nedenle en çok kullanılan yöntemdir. Sismik yansıma yönteminin sıklıkla kullanılmasında yeraltı yapısının jeolojik yapısını ortaya çıkarmasındaki etkisi oldukça büyüktür. Sismik yöntemin petrol, doğal gaz araştırmalarındaki başarısından dolayı, yöntemi geliştirmek ve daha iyi sonuçlar elde etmek için birçok çalışma yapılmıştır.

Sismik yansıma yönteminde ortak orta nokta yığıma kesitlerinin kullanılmasıyla birlikte petrol ve doğalgaz tespiti için kesitlerde ‘parlak nokta’ oluşumları kullanılmıştır. Ancak kesitlerde görülen ‘parlak noktalar’ petrol veya doğalgazdan kaynaklanabildiği gibi bazalt gibi yüksek hızlı kayaçların varlığından da kaynaklanabilir. Bu nedenle sadece yeraltı jeolojik yapısını gösteren sismik kesitlerin yorumlanması yeterli olmamaktadır. Ostrander (1984), gaz içeren yapıların yansıma katsayılarında büyük değişimlere neden olduğunu ve bu değişimlerin incelenerek kayaç içinde bulunan akışkanla ilgili yorumlar yapılabileceğini belirtmiştir. Bu çalışmanın ardından yansıma genliklerinin açısı ve ofset ile değişimine (Amplitude Versus Angle - AVA, Amplitude Versus Offset - AVO) dair çalışmalar petrol ve doğal gaz araştırmalarının çok önemli bir kısmını oluşturmuştur. Yansıma genliklerinin açısı ve ofsete bağlı değişiminin İngilizce kısaltmaları olan AVA/AVO terimleri Türkçe’de de yaygın kullanıma sahip olduğundan bu tez kapsamında aynı şekilde kullanılacaktır.

Bu tez çalışmasında petrol ve doğal gazın yeraltında bulunabileceği ortamlara ait seçilen yer modellerine ait yansıma katsayıları Zoeppritz Denklemleri (Zoeppritz, 1919) kullanılarak hesaplanmış ve bu değerlerin gözeneklilik ve geliş açısına bağlı değişimleri incelenmiştir. Ayrıca iki boyutlu dalga denklemi kullanılarak oluşturulan sismik verilerde AVA analizi yapılmış ve Zoeppritz Denklemleri’nden türetilen veriler ile karşılaştırmalar yapılmıştır.

## 1.1 Tezin Amacı

Bu tez çalışmasında farklı jeolojik kapanlarda, farklı akışkanlar içeren yapılarda oluşan yansıma genliklerinin Zoeppritz katsayıları ve iki boyutlu dalga denklemi modelleme yazılımı ile oluşturularak, yansıma genliklerinin açı ile değişimi yöntemi ile incelenmesi ve farklılıklarının ortaya konulması amaçlanmıştır.

## 1.2 Literatür Araştırması

Yansıma genliklerinin açı ile değişiminin ilk olarak incelenmesi Zoeppritz tarafından yapılmıştır (Zoeppritz, 1919). Ardından Koefed (1955), belirli sismik hız koşullarının oluşması durumunda yansıma genliklerinin geliş açısı ile artabileceğini göstermiştir. Ancak yöntemin petrol, doğal gaz aramalarında kullanımı Ostrander (1984)'in gaz içeren yapılarda sismik genliklerin açı ile arttığını ortaya koyması ile yaygınlaşmıştır. Böylece parlak yansımaların hidrokarbon içeren tabakalardan kaynaklanıp kaynaklanmadığının ayrımı yapılmaya başlanmıştır. Yu (1985), genliklerin veri işlem aşamalarına karşı olan duyarlılığı üzerinde durmuş ve yanlış yorumlara neden olabilecek yalancı genlik artışları yaratmayacak veri işlem yaklaşımları önermiştir. Shuey (1985), Zoeppritz katsayılarına bir yaklaşımda bulunarak saha çalışmalarında oluşan atış uzaklıkları/geliş açılarını kapsayan daha basit bir denklem oluşturmuştur. Resnick (1987) ise eğimli tabaka durumunda, AVO analizinin yığma öncesi göç ile yansımaların gerçek konumlarına taşınmasının ardından yapılması gerektiğini göstermiştir. Rutherford ve Williams (1989), AVO eğrilerini belli sınıflara ayırarak, eğri tiplerinin daha rahat tanımlanmasını ve tespit edilmesini sağlamışlardır. Ayrıca AVO yöntemi kullanılarak tabakaların gözenekliliği ile ilgili yorumların yapılması da mümkün olmuştur (Chacko, 1989). Sengupta ve Rendleman (1991), soğurulmanın olduğu ortamlarda AVO değişimini incelemiş ve kuyu verilerinden elde edilen kayaçların fiziksel özelliklerini kullanarak yapay modeller oluşturmuşlardır. Oluşan modellerle saha verisindeki AVO değişimlerini inceleyerek ortama ait soğurulma özelliklerini tespit etmişlerdir. Snyder ve Wrolstad (1992) Kuzey Denizi'nde AVO analizi uygulamasında kuyu verilerinden elde ettikleri hız ve gözeneklilik oranlarını kullanarak farklı akışkanlar için düz çözüm modelleri oluşturarak doygunluk oranlarını tespit etmeye çalışmışlardır. Peddy ve diğ. (1995) Oklahoma bölgesinde yaptıkları AVO çalışmasında kuyu verilerini kullanıp, kayaç içindeki akışkanların özelliklerini

değiştirerek oluşturdukları düz çözüm modelleri ile saha verilerini kıyaslamışlardır. Smith ve diğ. (1996) Endonezya'da kuyu verilerinden yararlanarak yaptıkları düz çözüm modelleri ile AVO yöntemini kullanarak litoloji belirlemesi üzerine çalışmışlardır. Castagna (1997), Rutherford ve Williams'ın AVO sınıflandırmasının eksikliğini vurgulayarak yeni bir sınıf AVO eğrisi tanımlamıştır. Yansıma genliklerinin ortak yansıma noktası ortamında incelenmesinin yanısıra, belirli atış uzaklığı grupları oluşturularak bu grupların oluşturduğu yansıma kesitlerinden genliklerdeki farklılıklar da incelenmiştir. Geniş ve tam azimut verilerinin toplanması ile birlikte yansıma genliklerinin açı ile incelenmesine üçüncü bir boyut eklenerek doğrultuya bağlı olarak da genlikler incelenmeye başlanmıştır (Lynn, 1996). Böylece ortamın çatlaklı yapı içermesi durumunda çatlakların doğrultularının belirlenip daha iyi üretim yapılması mümkün olmuştur. Hilterman ve diğ. (2000) Meksika Körfezi'nde yaptıkları AVO çalışmasında saha verilerinin yanından kuyu verilerinden yararlanarak düz çözüm modelleri ile gözenek akışlarını tespit etmeye çalışmışlardır. Sbar (2000) saha verilerinden elde edilen AVO anomalilerini, kuyu verileri kullanarak elde edilen düz çözüm modelleri ile karşılaştırarak üretim riskini azaltmaya yönelik bir çalışma yapmıştır. Eissa (2003) kuyu verilerinden elde ettiği değerleri kullanarak üretken dolomite ve üretken olmayan kireçtaşı arasındaki ayrımı tespit etmiştir.



## 2. KAYAÇ HIZLARI VE HIZLARI ETKİLEYEN DEĞİŞKENLER

### 2.1 Sismik Kayaç Hızları

Sismik enerji kayaçların içinden iki farklı dalga türü olarak geçer: P dalgası ve S dalgası. P dalgasının parçacık hareketi yayının doğrultusuna paralel iken, S dalgasının parçacık hareketi yayının doğrultusuna diktir. Bu nedenle P dalgasının kayaçlar içindeki hızı S dalgasından daha büyüktür. Bu durumu aşağıda verilen kayaç hızı formüllerinden de çıkarabiliriz:

$$V_P = \sqrt{\frac{K + \frac{4}{3}\mu}{\rho}} \quad (2.1)$$

$$V_S = \sqrt{\frac{\mu}{\rho}} \quad (2.2)$$

Yukarıdaki denklemlerden (2.1) P dalgası hızını, (2.2) ise S dalgası hızını vermektedir. Denklemlerde K sıkışmazlık modülü,  $\mu$  kesme modülü,  $\rho$  ise yoğunluğu temsil etmektedir. P dalgası hızının denkleminde kesme modülü ile birlikte sıkışmazlık modülünün de bulunması P dalgası hızının aynı kayaç için S dalgası hızından daha büyük olmasına sebep olmaktadır.

### 2.2 Yoğunluk

Yoğunluk, birim hacim başına düşen kütle miktarı olarak tanımlanır. Yoğunluk ile sismik hızlar arasında doğrudan bir bağlantı vardır. Yoğunlukla birlikte kayaçların sismik hızları da artış göstermektedir. Yoğunluk en genel anlamda kayacın kütesinin, hacmine oranıdır.

$$\rho = \frac{M}{v} \quad (2.3)$$

Bu denklemde, M kayacın kütlesi,  $v$  ise kayacın hacmi olarak tanımlanmaktadır.

Gözenek içermeyen kayaçlarda yoğunluk, kayacı oluşturan mineralin yoğunluğuna eşittir. Ancak, kayaçların gözenek içermesi durumunda kayaçların yoğunlukları, kayacı oluşturan mineralin yoğunluğundan farklılık göstermeye başlayacaktır.

Kayacın gözenekli bir yapıya sahip olması durumunda yoğunluğu (2.4) denklemi ile hesaplanabilir.

$$\rho_g = (1 - \emptyset) * \rho_m + \emptyset * \rho_f \quad (2.4)$$

Bu denklemde,  $\rho_g$  hacimsel yoğunluk,  $\rho_m$  kayacı oluşturan mineralin yoğunluğu,  $\rho_f$  gözenek akışkanı yoğunluğu,  $\emptyset$  gözeneklilik olarak tanımlanmaktadır. Kayacın toplam yoğunluğu gözeneklilik arttıkça ve mineral veya gözenek akışkanının yoğunluğu azaldıkça azalır.

### 2.3 Gözeneklilik

Bir kayacın gözenekliliği, boşluk hacminin toplam hacime oranı olarak ifade edilir. Gözeneklilik (2.5) denklemiyle hesaplanır.

$$\emptyset = \frac{V_f}{V_t} \quad (2.5)$$

Bu denklemde,  $\emptyset$  gözeneklilik,  $V_f$  boşluk veya akışkanın hacmi,  $V_t$  toplam hacim olarak tanımlanmaktadır. En yüksek gözenekliliğe sahip olan kayalar çökel kayalardır. Bu kayalar ilk oluşumları sırasında 0.6 – 0.8 oranında boşluk hacmine sahip olabilirler. İlk oluşumlarındaki bu gözenekliliğe *birincil gözeneklilik* adı verilir. Derinlere gömüldükçe ve üstlerindeki basınç arttıkça bu oran azalır. Ayrıca kayalar derinlere gömüldükçe, üstlerinde basınçlarından dolayı kırıklı ve çatlaklı bir hal alabilirler. Bu tür sonradan gelişen boşluklara *ikincil gözeneklilik* adı verilir.

Kayaçlarda gözeneklerin oluşması yoğunlukla birlikte kayacın P ve S hızlarının azalmasına neden olacaktır. Kayaç içindeki gözeneklerde akışkanların bulunması da kayaç hızını etkileyecek başka bir etkidir. Bu çalışmada gözenekli kayaların P ve S hızlarını bulmak için Gassmann denklemleri kullanılmıştır (Han ve Batzle, 2004). Bu denklemlerde kayacın sıkışmazlık ve kesme modülleri ile birlikte yoğunlukları kullanılarak P ve S hızları hesaplanmaktadır. Gassmann denklemleri (2.6)'da verilmiştir.

$$K_S = K_D + \Delta K_D \quad (2.6a)$$

$$\Delta K_D = \frac{K_0 (1 - \frac{K_D}{K_0})}{1 - \phi - \frac{K_D}{K_0} + \phi \frac{K_0}{K_f}} \quad (2.6b)$$

$$\mu_S = \mu_D \quad (2.6c)$$

Bu denklemde  $K_S$  doygun kayacın sıkışmazlık modülü,  $K_D$  kayaç iskeletinin sıkışmazlık modülü,  $\Delta K_D$  kayaç iskelet modülünde meydana gelen değişim,  $K_0$  kayacı oluşturan mineral yapısının sıkışmazlık modülü,  $K_f$  gözenek akışkanının sıkışmazlık modülü,  $\mu_S$  doygun kayacın kesme modülü,  $\mu_D$  kayaç iskeletinin kesme modülü,  $\phi$  de gözeneklilik olarak tanımlanmıştır.





### 3. SİSMİK YANSIMA KATSAYILARI

Sismik yansımaya yönteminde, yansımaların oluşması için tabakalar arasında yoğunluk ve sismik hız değerlerinde farklılık olması gerekir. Sismik dalgalar hız farkının olduğu tabaka arayüzeylerinden Snell yasasına göre iletilir ve yansıtılırlar. Arayüzeylerde gerçekleşen yansımaya ve iletimler tabakaların akustik empedansı ile ilişkilidir. Akustik empedans, tabakanın sismik dalga hızı ile yoğunluğun çarpımına eşittir ve  $Z$  ile gösterilir. Tabakaların akustik empedanslarındaki farkın büyüklüğü yansımaların daha kuvvetli olmasına neden olur. Akustik empedans, (3.1) ile tanımlanır.

$$Z = \rho * V \quad (3.1)$$

Bu denklemde  $Z$  akustik empedansı,  $\rho$  yoğunluğu,  $V$  ise sismik hızı göstermektedir. Sismik dalganın arayüze dik gidip geldiği durumda yansımaya katsayısı ise tabakaların akustik empedans farklarının, toplamlarına oranından (3.2) kullanılarak hesaplanır.

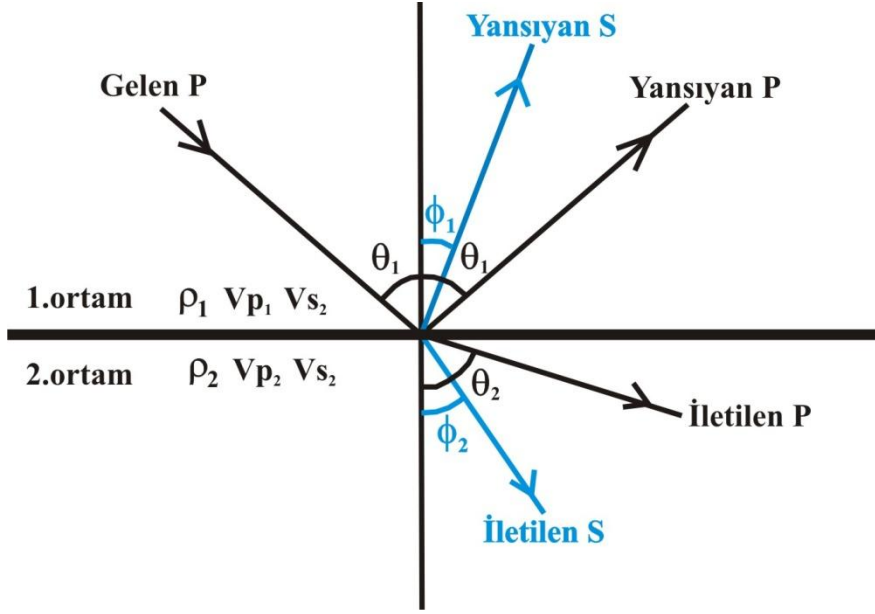
$$R = \frac{Z_2 - Z_1}{Z_2 + Z_1} \quad (3.2)$$

Bu denklemde,  $R$  yansımaya katsayısı,  $Z_1$  ve  $Z_2$  sırasıyla 1. ve 2. ortamın akustik empedanslarıdır.

$P$  dalgasının arayüze düşeyden farklı açılarda gelmesi durumunda yansıyan ve iletilen  $P$  ve  $S$  dalgalarının durumu Şekil 3.1'de verilmektedir.

Yarı sonsuz, homojen iki ortamı ayıran yatay bir arayüze  $P$  dalgasının gelmesi durumunda arayüzeyde gerçekleşen enerji dağılımının hesaplanmasında (3.3)'te verilen Zoeppritz denklemleri kullanılır.

$$\begin{bmatrix} \sin \theta_1 & \cos \phi_1 & -\sin \theta_2 & \cos \phi_2 \\ -\cos \theta_1 & \sin \phi_1 & -\cos \theta_2 & -\sin \phi_2 \\ \sin 2\theta_1 & \frac{V_{P1}}{V_{S1}} \cos 2\phi_1 & \frac{\rho_2 V_{S2}^2 V_{P1}}{\rho_1 V_{S1}^2 V_{P2}} \sin 2\theta_2 & -\frac{\rho_2 V_{S2} V_{P1}}{\rho_1 V_{S1}^2} \cos 2\phi_2 \\ \cos 2\phi_1 & -\frac{V_{S1}}{V_{P1}} \sin 2\phi_1 & -\frac{\rho_2 V_{P2}}{\rho_1 V_{P1}} \sin 2\phi_2 & -\frac{\rho_2 V_{S2}}{\rho_1 V_{P1}} \sin 2\phi_2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} R_P \\ R_S \\ T_P \\ T_S \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -\sin \theta_1 \\ -\cos \theta_1 \\ \sin 2\theta_1 \\ -\cos 2\phi_1 \end{bmatrix} \quad (3.3)$$



**Şekil 3.1 :** Yarı sonsuz homojen iki ortamı ayıran yatay bir arayüze P dalgası gelmesi durumunda yansımaya ve iletim durumları.

Zoeppritz denklemleri katı-katı, katı-sıvı ortamlar için yatay bir arayüzde alt ve üst tabakaları oluşturan kayaçların P, S hızı ve yoğunluk değerlerini kullanarak, alt veya üst tabakadan gelen P ve S dalgaları için yansımaya ve iletim katsayılarını hesaplar. Bu denklemlerde  $\rho$  ortamların yoğunluğu;  $\theta_1$ , P dalgasının sırasıyla geliş ve yansımaya açıları;  $\theta_2$ , P dalgasının iletim açısı;  $\phi_1$  ve  $\phi_2$  ise S dalgasının sırasıyla yansımaya ve iletim açılarıdır.  $R_P$  ve  $R_S$ , P ve S dalgalarının yansımaya genliklerini;  $T_P$  ve  $T_S$ , P ve S dalgalarının iletim katsayılarını temsil etmektedir. Denklemlerin karmaşık yapısından dolayı yansımaya katsayısı değişimlerinin hangi fiziksel özelliklerdeki değişimlerden kaynaklandığını tahmin etmek mümkün değildir. Bu sorun Zoeppritz denklemlerine yapılan yaklaşımlar ile nispeten giderilmiştir. Bortfeld (1961), Aki ve Richards (1980), Schuey (1985) ve Hilterman (1988) tarafından doğrusal olmayan bu denklemler bazı varsayımlarda bulunularak daha yalın hale getirilmiştir. Bu çalışmada yansımaya katsayılarının hesaplanması için Knott-Zoeppritz denklemlerinin düzey hali kullanılmıştır (3.3).

### 3.1 Yansımaya Genliklerinin Ofset/Açı İle Değişimi Analizi

Yansımaya genliklerinin açı ile değişimi ilk olarak Zoeppritz (1919) tarafından incelenmiştir. Oluşan denklemler yansımaya katsayılarının P, S hızı ve yoğunluk değerlerinden etkilenerek, geliş açısı ile nasıl değiştiğini gösterir. Bu kuramın petrol, doğal gaz aramalarında kullanılmaya başlaması 1980'li yıllarda gerçekleşmiştir.

“Ostrander (1984) gaz içeren yapıların yansıma katsayılarının, geliş açısına bağlı olarak farklılıklar gösterdiğini, atış-alıcı mesafelerinin arttığında genliklerinde artış olabildiğini tespit etmiştir.

AVO/AVA çalışmalarına farklı türden çözümler uygulanmaktadır. Yansıma genliklerinin açığa (AVA) veya ofsete (AVO) bağlı incelenmesi başlıca yorumlama yöntemlerinden biridir. Bunların dışında sıfır-ofset verilerinin AVO gradyanına bağlı değişimini gösteren şekiller de oluşturulabilir (Avseth ve diğ., 2001; Eissa ve diğ., 2003) Bir başka yöntem olarak, sınırlı atış uzaklıklarını içeren yığma kesitleri kullanarak AVO analizi gerçekleştirilebilir. Bunun için ortak orta nokta verileri yakın ve uzak atışlar olmak üzere ikiye ayrılır ve bu iki ayrı veri kullanılarak oluşturulan kesitlerle AVO analizi gerçekleştirilir (Avseth ve diğ. 2008).

### **3.2 AVO Sınıflandırmaları**

Rutherford ve Williams (1989) AVO eğrilerinin daha iyi ayrıştırılıp yorumlanabilmesi için eğrileri belli sınıflara ayırmışlardır (Şekil 3.2). Bu sınıflandırmayı gaz içeren kum modelleri kullanarak yapmışlardır. Sınıflandırmının temelinde sıfır geliş açısında oluşan yansıma genliğinin bulunduğu konum vardır.

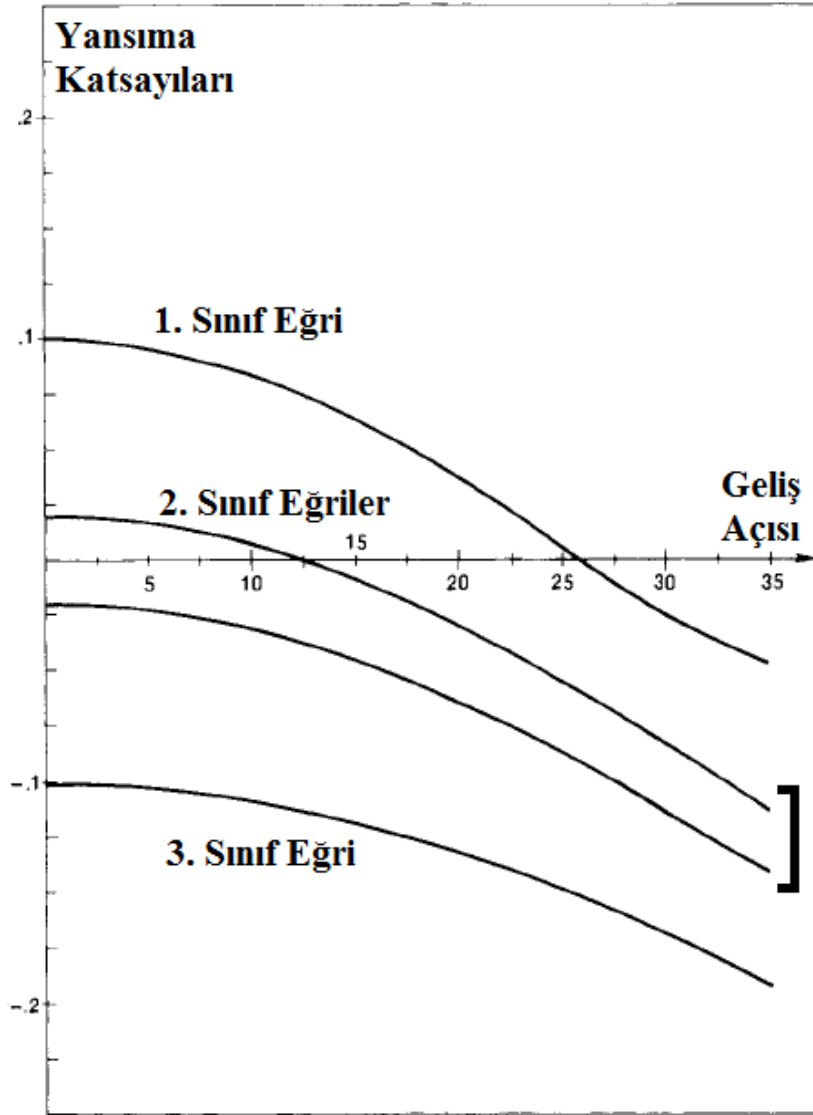
#### **3.2.1 Birinci sınıf AVO eğrileri**

Bu tür eğriler hazne kayaçların üstlerindeki örtü kayaca kıyasla çok daha yüksek hız ve yoğunluklara sahip olduğu durumlarda gözlenir. Hazne kayaç ile örtü kayaç arasındaki bu büyük farktan dolayı yansıma genlikleri sıfırdan büyük değerlerde başlar ve açının artmasıyla azalır (Şekil 3.2). Eğer yeteri kadar atış-alıcı uzaklığına erişilmişse genliklerde polarite değişimi görülebilir.

#### **3.2.2 İkinci sınıf AVO eğrileri**

Bu sınıftaki eğrilerde hazne kayacın hız ve yoğunluk değerleri, örtü kayacın değerlerine oldukça yakındır. Bu nedenle oluşan AVO eğrilerinin sıfır açıdaki yansıma genlikleri oldukça düşüktür (Şekil 3.2). Ayrıca sıfır açıdaki genlikler artı veya eksi değerlerden başlayabilir. Sıfır derecede artı değerden başlayan AVO eğrisinde orta derecede açılara (15-25) ulaşıldığında yansıma genlikleri işaret değiştirir ve bu sefer eksi değerlerde büyüklükleri artmaya başlar. Eksi değerden

başlayan AVO eğrisi ise herhangi bir işaret değişimine uğramaz ve büyüklüğü geliş açısının artması ile artar.



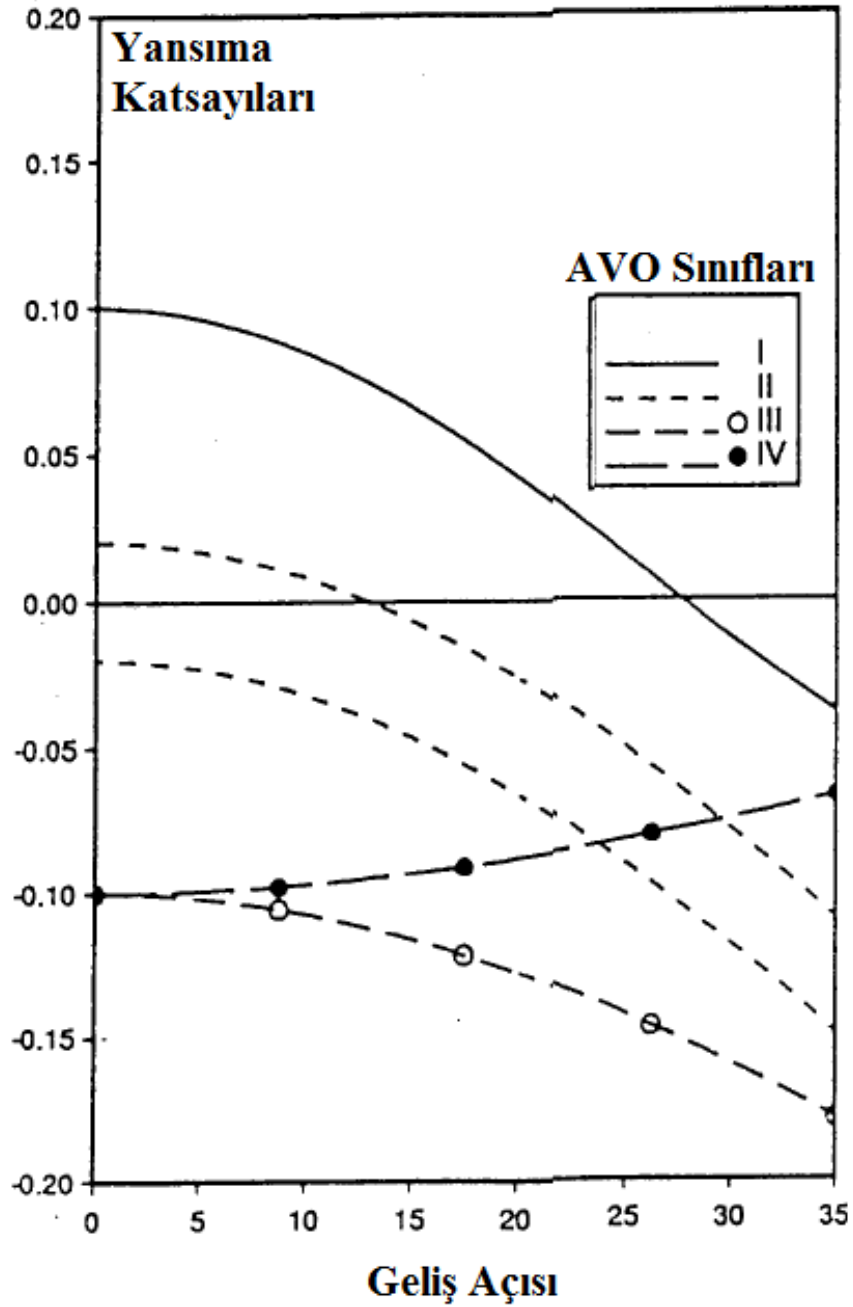
Şekil 3.2 : Rutherford ve Williams'ın (1989) AVO eğrileri sınıflandırması.

### 3.2.3 Üçüncü sınıf AVO eğrileri

Bu sınıftaki eğriler petrol doğal gaz aramalarında kullanılan parlak nokta (bright spot) anomalilerini oluşturan eğrilerdir. Bu eğrileri oluşturan hazne kayacın hız ve yoğunluk değerleri örtü kayaca göre çok daha düşüktür. Bu nedenle de AVO eğrileri sıfır derecede eksi işaretli oldukça büyük genliklerle başlar ve geliş açısının artması ile birlikte bu büyüklük daha da artar.

### 3.2.4 Dördüncü sınıf AVO eğrileri

Castagna (1997), Rutherford ve Williams'ın (1989) sınıflandırmasına ek olarak 4. AVO anomalilerinin varlığını açıklamıştır (Şekil 3.3). Bu sınıftaki eğriler 3. sınıf eğrilere benzer bir şekilde sıfır açıda oldukça düşük genlikte başlamaktadır. Ancak 3. sınıf eğrilerin aksine, geliş açısının artmasıyla birlikte genlik büyüklüklerinde azalma görülür.



Şekil 3.3 : Castagna'nın (1997) geliştirdiği AVO sınıflandırması.

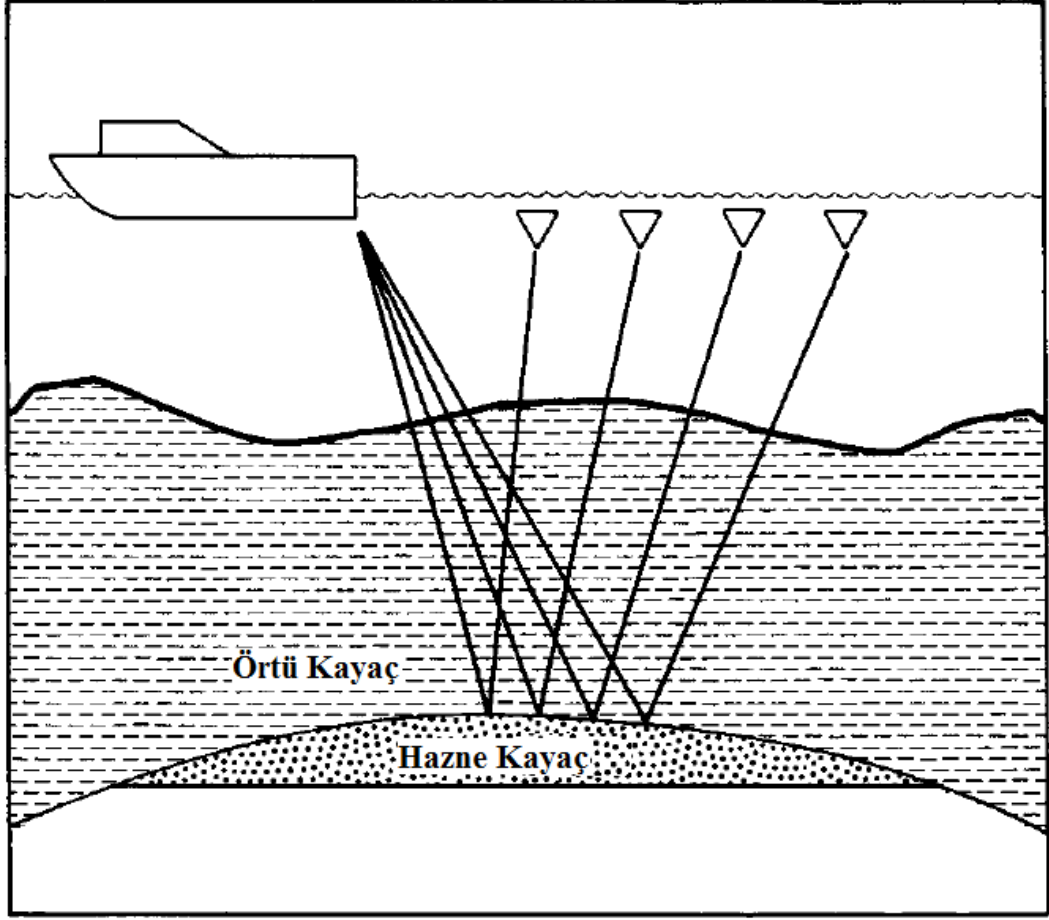
### 3.3 Hidrokarbon Kapanı Modelleri

Petrol hava ile uzun süreli teması sonrasında özelliğini kaybeder. Bu nedenle petrolün özelliğini koruyabilmesi için yer içinin yüksek sıcaklık ve basınç içeren ortamlarında saklanması gerekir. Petrolün yerinde sabit kalabilmesi için ise petrolün birikebileceği gözenek oranı yüksek kayaca (hazne kayaç) ve petrolün yukarı hareketini önleyecek, geçirimsiz bir kayaca (örtü kayaç) ihtiyaç vardır.

Hazne kayaçların büyük bir kısmını kumtaşları oluşturur. Bunun dışında yüksek gözenekliliğe sahip çökel kayaçlar ve karbonatlar petrol için iyi bir hazne kayaç oluşturabilirler. Örtü kayaçlar, yapısal ve çökel olmak üzere ikiye ayrılırlar. Yapısal kapanlar faylanma, kıvrımlanma veya tuz yükselmesi gibi tektonik hareketler sonucu oluşan kapanlardır. Şekil 3.4'te yapısal bir kapan olan antiklinal kapan örneği verilmiştir. Çökel kapanlar ise tektonik olaylardan bağımsız olarak, çökelme sırasına göre oluşmuştur.

Petrolün birikebilmesi için bir diğer koşul da zamandır. Petrolün birikmesini sağlayacak olan kapan yapısının petrol oluşmadan önce meydana gelmesi önemlidir. Aksi takdirde petrol birikebileceği bir alan bulamayacağı için oluştuğu kayacın içinden çıkıp yukarı yönlü hareketine devam edecek, deniz tabanına veya yeryüzüne ulaşip özelliğini kaybedecektir.

Kapan içinde hapsolan petrol her zaman tek başına bulunmayabilir. Petrol ile birlikte gaz, tuzlu su veya her ikisi birden petrolle birlikte bulunabilir. Bundan dolayı bu çalışmada seçilen kapan modellerinde hazne kayacın gözeneklerinin tuzlu su, petrol ve doğal gaza doygun olduğu varsayımı ile ayrı ayrı hesaplanmıştır.



**Şekil 3.4 :** Yapısal kapan örneği. Noktalı bölge hidrokarbon içeren antiklinal kapanı temsil etmektedir (Sengupta ve Rendleman (1991)'dan değiştirilerek alınmıştır).





## 4. MODELLER, HESAPLAMA YÖNTEMLERİ ve YORUMLAR

Bu tez çalışmasında 3 farklı kapan modeli kullanılmıştır. Bunlar şeyl-kireçtaşı, şeyl-kumtaşı ve şeyl-killi kumtaşı arayüzey modelleridir. Oluşturulan modeller için kullanılan sayısal yaklaşımlar Bölüm 4.1'de verilmiştir. Bölüm 4.2'de model değişkenlerinin oluşturulmasındaki yaklaşımlar verilirken Bölüm 4.3'te ise modellere ait yorumlar verilmiştir. Kullanılan üç kapan modelinde de şeyl takabakası üstteki örtü kayacı oluşturmaktadır. Şeyl tabakasının altındaki hazne kayaçlarının kumtaşı ve kireçtaşı olarak seçilmesinin nedeni bu kayaçların yüksek gözeneklilik değerlerine sahip olmaları ve bu nedenle bünyelerinde büyük miktarda hidrokarbon tutabilmeleridir. Modellerin arayüzeyi yatay olarak tanımlanmıştır. Böylece modellerin Zoeppritz Denklemleri ile modellenmesi mümkün olmuştur.

Yansıma katsayılarının hesaplanmasında örtü kayaç olan şeyl tabakası gözeneksiz olarak belirlenmiştir. Hazne kayaçlar için ise gözeneklilik %10, %20 ve %30 olarak belirlenmiştir. Kapan modellerinde hazne kayacın gözenek dolgusu olarak kullanılan akışkanlar metan, 50API petrol ve %20 tuzlu su olarak seçilmiştir. Seçilen iki farklı nitelikte petrol özelliği ile birlikte hem hafif petrol (50 API) hem de ağır petrol (20 API) için yansıma eğrilerinin hesaplanması sağlanmıştır. Her akışkan için bütün gözeneklilik değerlerinde yansıma genlikleri hesaplanmıştır.

Kapan modellerine ait yansıma genliklerinin hesaplanması MATLAB programında Zoeppritz denklemleri ve Linux ortamında iki boyutlu sonlu farklar dalga yayılım yazılımı *fdelmodc* kullanılarak yapılmıştır (Thorbecke ve Draganov, 2011). Oluşturulan açığa bağlı genlik değişim grafikleri sıfır açılışındaki genlik değerine bölünerek normalize edilmiştir.

### 4.1 Sayısal -Hesaplama Yöntemleri

#### 4.1.1 Zoeppritz katsayılarının hesaplanması

Yansıma katsayılarının hesaplanmasında (3.3)'te verilen Zoeppritz denklemleri kullanılmıştır. Denklemden  $R_p$  değerleri elde edilerek açığa bağlı değişimleri

çizdirilmiştir. Yansıma genliklerinin hesaplanmasında kullanılan MATLAB kodu Ek. A'da yer almaktadır. Zoeppritz denklemleri geliş açısını 90 dereceye kadar hesaplamaktadır. Ancak 90 dereceye ulaşan geliş açıları elde etmek arazide toplanan verilerde mümkün değildir. Çok uzun atış uzaklıklarına sahip ve sığ hedefler için elde edilen en büyük geliş açıları 55-60 dereceyi geçmemektedir. Hatta derindeki hedefler için elde edilebilen geliş açıları 30 - 40 dereceyi aşmamaktadır. Bu nedenle yansıma genlikleri 40 dereceye kadar hesaplanmış ve çizdirilmiştir.

#### 4.1.2 İki boyutlu dalga denklemi ile modelleme

İki boyutlu dalga denklemi ile modelleme Linux ortamında iki boyutlu sonlu farklar dalga yayılımı yazılımı *fdelmodc* kullanılarak yapılmıştır (Thorbecke ve Draganov, 2011). Modelleme programı İTÜ Jeofizik Mühendisliği Bölümü'ne ait Hesaplamalı Jeofizik Laboratuvarı'nda çalıştırılmıştır. Açığa bağlı değişimler için oluşturulan modeller yaklaşık 40 dereceye kadar hesaplanmıştır.

Modelleme programı *fdelmodc*, iki boyutlu dalga denkleminin sonlu farklar çözümü uygulayarak sismik dalga yayılımını modellemektedir. Bu programda dalga denkleminin sonlu farklar yaklaşımı ile çözümünde açık yöntemler kullanılmaktadır. Açık yöntemlerle yapılan hesaplamalarda zamanda ve uzamda tutarlı örneklemeler yapılmaz ise dengesizlik ortaya çıkar ve yanlış sonuçlar elde edilir. Bu nedenle açık yöntemler hesaplama sırasında son zaman adımı ile bir sonraki zaman adımı arasındaki sürenin belirli bir sayıdan daha küçük olmasını gerektirmektedir. Bu sınırlamaya *Courant sayısı* adı verilir. Bu modelleme yazılımında kullanılan denklemler için Courant sayısı 0.606'dır. Hesaplamanın kararlılığını sağlayabilmek için,

$$\sqrt{\frac{\lambda+2\mu}{\rho}} \frac{\Delta t}{h} < 0.606 \quad (4.2)$$

koşulunun sağlanması ve bu koşulla beraber,

$$\Delta t < \frac{0.606 \Delta h}{c_{max}} \quad (4.3)$$

koşulunun yerine getirilmesi gerekmektedir. Bu iki denklemde  $\Delta t$  zaman adımı,  $\Delta h$  uzamsal örnekleme aralığı,  $c_{max}$  ise modeldeki en yüksek dalga hızıdır. Ayrıca sonlu farklar yönteminde hesaplamada dalga cephesi ayrılması meydana gelebilir. Bunun önüne geçebilmek için,

$$\Delta h < \frac{\lambda_{\min}}{5} \quad (4.4)$$

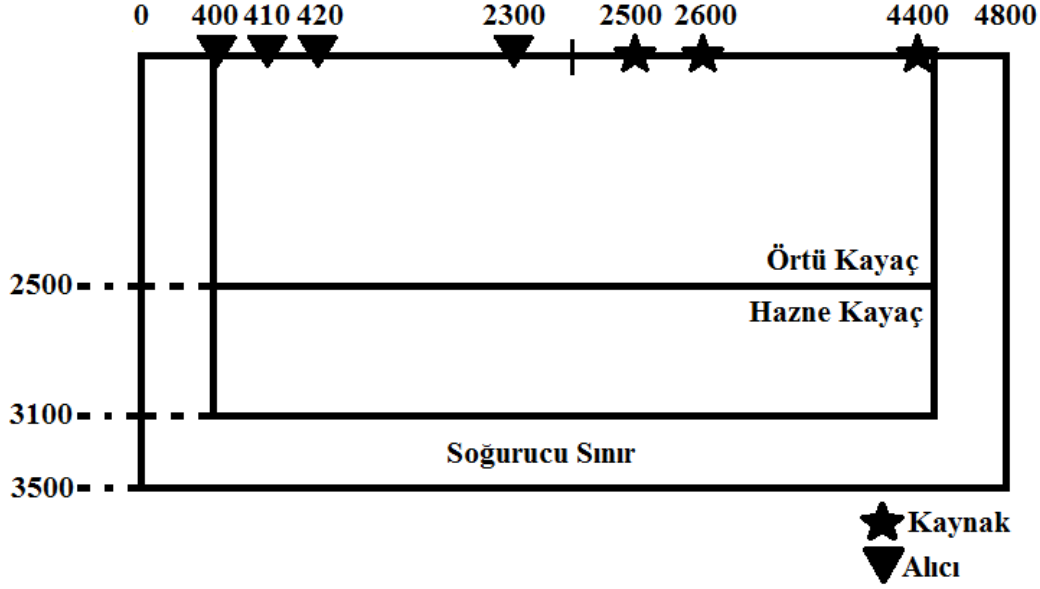
şartının sağlanması gereklidir. Burada  $\lambda_{\min}$  en küçük dalgaboyunu temsil etmektedir. Yazılım, modelleme için 4 farklı ortamda örnekleme yapabilmektedir. Bunlar akustik, visko-akustik, elastik ve visko-elastiktir. Bu çalışmada dalga denklemi ile oluşturulan modeller, Zoeppritz denklemleri ile yapılan modelleme sonuçları kıyaslanabilmesi açısından elastik ortam varsayımı ile oluşturulmuştur.

### **Sismik kayıtların veri işlemi aşamaları ve genliklerin okunması**

Modelleme sonucunda oluşturulan verilerden genliklerin elde edilebilmesi için, kayıtların bazı veri işlem aşamalarından geçirilmesi gerekir. Bu amaçla Linux işletim sisteminde çalışan Seismic Unix (SU) veri işlem yazılımı kullanılmıştır. Dalga denklemi ile modelleme sonucunda oluşan kayıt atış verisidir yani kaynaktan çıkıp bütün alıcılara giden enerjinin kayıdır. Ofsete veya geliş açısına bağlı değişimi görebilmek için bu atış kayıtlarından birkaç tanesinin bir araya gelmesi ve bu verilerin ortak orta nokta verisi haline getirilmesi gerekir. Bunun için belirli bir hattı tarayacak şekilde 20 adet atış verisi oluşturulmuştur (Şekil A.1). Modelleme için oluşturulan yapı ve atış düzeni Şekil 4.1'de verilmiştir. Alıcılar 400 m'den başlayıp 2300 m'ye kadar 10 m aralıklarla dizilmiştir, kaynak konumları ise 2500 m'den 4400 m'ye kadardır. Her atışta alıcı konumları sabit tutulurken, atış noktaları 100 m ileri taşınmıştır. Bu atış düzeni sayesinde en küçük kaynak-alıcı uzaklığı 200 m, en büyük uzaklık ise 4000 m olmuştur.

Modelleme yazılımı atış düzeni geometrisini oluşturduğu kayıtların içine eklediğinden SU'nun bir modülü olan *sushw* kullanılarak kayıtlara geometri bilgisini içeren gerekli başlıklar eklenmiştir. Bundan sonra, ayrı ayrı olan atış verileri tek bir dosya haline getirilerek işlemler bu dosya üzerinden yapılmıştır. Atış kayıtlarında uzak alıcılarda oluşan genlik kayıplarını telafi etmek için *sugain* modülü kullanılarak küresel açılım düzeltmesi uygulanmıştır.

Genlik kazancından sonra atış verileri *susort* modülü kullanılarak ortak orta nokta düzenine geçirilmiştir. Böylece tek bir noktadan yansıyan bütün atış verileri bir araya getirilmiştir (Şekil A.2). Genlik okuması için ortak orta nokta düzeni içindeki en uzun atış uzaklığına veya en büyük geliş açısına sahip veri seçilmiştir (Şekil A.3).



**Şekil 4.1 :** Dalga yayını modellemesi için oluşturulan geometri ve kapan modeli.

Genlik okumasının kolaylaştırılabilmesi için *sunmo* modülü kullanılarak ortak orta nokta verisine NMO düzeltmesi uygulanmıştır. Böylelikle kaynak-alıcı uzaklığı nedeniyle uzak alıcılarda görülen zaman gecikmesi ortadan kaldırılmıştır ve bütün yansımalar aynı zaman seviyesine çekilmiştir (Şekil A.4). NMO düzeltmesi yapılmış veride *supickamp* modülü kullanılarak hedef zaman aralığındaki genlikler ölçülmüştür. Genlik okumasında hedef yansımanın hem en büyük hem de en küçük değerleri ölçülmüştür (Şekil A.5). Okunan aralıkta yüzey dalgalarının baskın olduğu izler sıfırlanarak değerlendirme aşamasında dikkate alınmamıştır. Yüzey dalgaları f-k süzgeçlemesi kullanılarak kaldırılabilir ve bu izlerdeki yansıma genlikleri elde edilebilir. Ancak f-k süzgeçlemesi sismik kayıttaki bütün genlikleri etkilediğinden, f-k süzgeci uygulamasından kaçınılmıştır. Ölçülen genlikler en kısa ofsete sahip yansımanın genliği ile normalize edilerek Zoeppritz denklemlerinden elde edilen sonuçlarla kıyaslanabilir hale getirilmiştir.

#### 4.2 Arayüzey Modelleri ve Değişken Değerlerinin Oluşturulması

Modeller için gerekli olan P, S hızı ve yoğunluk değerlerinin belirlenmesinde geniş bir literatür taraması yapılmış, bu konuda yayınlanmış çeşitli akademik makalelerden yararlanılarak hesaplanmış ve Gassmann denklemleri kullanılarak bulunan hızların diğer makalelerle kıyaslanarak kabul edilebilir aralıklarda olmasına dikkat edilmiştir

(Fournier ve diğ, 2009; Han ve diğ, 1986; Al-Tahini ve diğ, 2007, Verwer ve diğ, 2008). Tabakaların ve akışkanların fiziksel özellikleri sırasıyla Çizelge 4.1 ve Çizelge 4.2’de verilmiştir. Kireçtaşı ve kumtaşı için fiziksel özellikler Fournier ve diğ. (2009)’den; killi kumtaşı için fiziksel özellikler Han ve diğ. (1986)’den alınmıştır.

**Çizelge 4.1 :** Modellerde kullanılan tabakaların fiziksel özellikleri.

<b>Tabaka Litolojisi</b>	<b>P Hızı (m/s)</b>	<b>S Hızı (m/s)</b>	<b>Yoğunluk (kg/m<sup>3</sup>)</b>	<b>Gözeneklilik (%)</b>
<b>Şeyl</b>	3750	1900	2350	0
<b>Kireçtaşı</b>	6375	3210	2690	0.44
<b>Kumtaşı</b>	4890	3030	2480	6,94
<b>Killi (%27) Kumtaşı</b>	3830	2030	2350	14.79

**Çizelge 4.2 :** Modellerde ait akışkanların fiziksel özellikleri.

<b>Akışkanlar</b>	<b>P Hızı (m/s)</b>	<b>Yoğunluk (kg/m<sup>3</sup>)</b>
<b>Doğalgaz</b>	644	204
<b>Petrol – 50API</b>	1286	762
<b>Tuzlu Su - %20</b>	1640	1001

Hesaplama da kullanılacak kayaçların fiziksel özelliklerin tespiti için *kritik gözeneklilik* kavramı ve Han ve diğ. (2004)’nin deneysel denklemi kullanılmıştır. Kritik gözeneklilik kavramına göre belirli bir gözeneklilik oranına kadar kayacın kendi ağırlığını taşıyabilen belirli bir iskeleti vardır. Ancak bu kritik gözeneklilik seviyesinin üzerine çıkıldığında kayaç taneleri arasındaki bağlar kopar ve kayaç çözelti halini alır. Bu durumda kayacın ağırlığını akışkan taşımaya başlar. Kritik gözeneklilik kavramına ait denklemler (4.5)’te verilmiştir.

$$K_D = K_0 * \left(1 - \frac{\phi}{\phi_c}\right) \quad (4.5a)$$

$$\mu_D = \mu_0 * (1 - \frac{\phi}{\phi_c}) \quad (4.5b)$$

Kritik gözeneklilik denklemlerinde  $K_D$ , kayaç iskeletinin sıkışmazlık modülü;  $K_0$ , kayacı oluşturan mineral yapısının sıkışmazlık modülü;  $\mu_D$ , kayaç iskeletinin kesme modülü;  $\mu_0$ , kayacı oluşturan mineral yapısının kesme modülü;  $\phi$ , hesaplanmak istenen gözeneklilik oranı;  $\phi_c$ , kayaç türüne ait kritik gözeneklilik oranıdır. Kritik gözeneklilik formüllerinden (4.5b) kesme modülünün hesaplanmasında kullanılmıştır. Han ve diğ. (2004)'nin deneysel denklemi (4.6)'da verilmiştir.

$$K_D = (1 - A \times \phi + B \times \phi^2 - C \times \phi^3) \times K_0 \quad (4.6)$$

Denklemdaki A, B, C katsayıları kayaç türüne bağlı katsayılardır. Bu çalışmada seçilen kayaç türlerine ilişkin katsayılar Çizelge 4.3'te verilmiştir.

**Çizelge 4.3 :** Denklem (4.6) için gerekli katsayılar.

<b>Kayaç Türleri</b>	<b>A</b>	<b>B</b>	<b>C</b>
<b>Kireçtaşı</b>	4.244	5.820	2.605
<b>Kumtaşı</b>	3.206	3.349	1.143
<b>Killi Kumtaşı</b>	3.053	3.070	1.016

Seçilen denklemlere göre yapılacak hesaplamada önce Çizelge 4.1'de verilen gerçek hız ve yoğunluk değerlerinden kayaç iskeletinin (gözeneklilik) sıkışmazlık ( $K_D$ ) ve kesme ( $\mu_D$ ) modülleri hesaplanmıştır. Elde edilen modüllerden kritik gözeneklilik ve (4.6) bağıntısı kullanılarak kayacı oluşturan mineral yapısının (gözeneksiz) sıkışmazlık ( $K_0$ ) ve kesme ( $\mu_0$ ) modülleri elde edilmiştir. Mineral yapısının sıkışmazlık ve kesme modülleri kullanılarak yeni gözeneklilik oranları için kayaç iskeletinin yeni sıkışmazlık ( $K_D$ ) ve kesme ( $\mu_D$ ) modülleri hesaplanmıştır. Ayrıca (2.2) denklemi kullanılarak akışkan içeren doymuş kayacın yoğunluğu da hesaplanmıştır. Kesme ve sıkışmazlık modülleri ile birlikte gözenek akışkanlarının hızları ve yoğunlukları da kullanılarak düz çözüm modellemesinde kullanılacak doymuş kayaca ait hız ve yoğunluk değerleri elde edilmiştir. Böylece hesaplanan yeni

hızlar ve yoğunluklar kullanılarak 3 farklı kapan arayüzey modeli oluşturulmuştur. Modeller iki tabakalı yarı sonsuz ortamlar olarak kabul edilmiştir. Tabakalardan üstte olanı şeyl (örtü kayaç) olarak belirlenmiş, alttaki tabaka ise 3 model için sırasıyla kireçtaşı, kumtaş ve killi kumtaşı olarak seçilmiştir.

### **4.3 Petrol ve Doğalgaz Kapanı Modelleri**

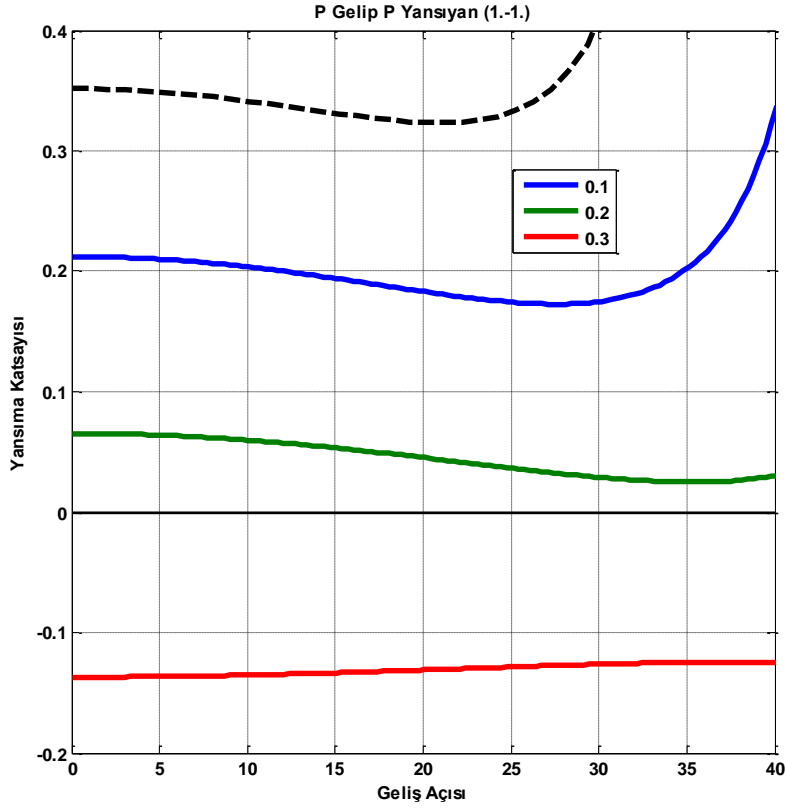
Bölüm 4.2’de verilen yaklaşımlarla hesaplanan ve modellerdeki tabakaları temsil eden yeni hızlar kullanılarak şeyl-kireçtaşı, şeyl-kumtaşı ve şeyl-killi kumtaşı arayüzeyleri olmak üzere 3 farklı kapan arayüzey modeli oluşturulmuştur. İki tabakalı yarı sonsuz ortamları birbirinden yatay olarak ayıran bu arayüzey modelleri ve ilişkili AVA yorumları sırasıyla Bölüm 4.3.1, 4.3.2 ve 4.3.3.’de verilmektedir.

AVA grafiklerinin sunumunda eksen aralıkları modeller arası kıyaslamayı rahat yapabilmek için aynı tutulmaya çalışılmıştır. Ancak şeyl-kireçtaşı modelinde olan artı değerli genlik sıçramalarını verebilmek amacıyla grafiğin düşey ekseninin sınırları diğer iki modelde olan -0.2 ve +0.2 aralığından farklı olarak -0.2 ile 0.4 olarak seçilmiştir. Ayrıca modellere ait tüm AVA grafiklerinde kırmızı renkli kesikli eğri ile hazne kayacın orijinal gözenek oranına sahip olduğu gerçek değerleri verilmiştir. Grafiklerdeki mavi eğriler ise hazne kayacın farklı gözeneklilik oranlarında oluşturduğu AVA eğrilerini vermektedir.

#### **4.3.1 Şeyl – kireçtaşı modeli**

Şeyl-kireçtaşı kapanı için oluşturulan tüm modellerde yansıma genliklerinin %10 ve %20 gözeneklilikler için artı değerli olduğu görülmektedir (Şekil 4.2, 4.3 ve 4.4). Ayrıca yansıma açılarının sınırlı olmasına rağmen %10 gözeneklilik oranında yansıma genliklerinin kritik açıya ulaştığı görülmektedir. Gözenekliliğin en çok arttığı %30 gözeneklilikte ise sadece metan ve hafif petrol içeren modellerde yansıma genliklerinin eksi değerlerde olduğu ve 4. sınıf AVO eğrisi olduğu görülmektedir (Şekil 4.2 ve 4.3). Tuzlu suya doymun modelde de %30 gözeneklilikte eksi değerle başlayan ve büyüklüğü gittikçe azalan, 4. sınıf benzeri bir eğri görülmektedir (Şekil 4.4). Ancak hazne kayacın %30 tuzlu suya doymun olma durumunda genlikler oldukça düşüktür ve bu modelin 4.sınıf AVO eğrisi sınıfına dahil edilmesi uygun değildir. Bu kapan için oluşturulan tüm yansıma genlikleri

eğrilerinde %10 ve %20 gözeneklilik için 1. sınıf, %30 gözeneklilik için doğal gaz ve petrol eğrilerinde 4. sınıf yansıma eğrileri görülmüştür.



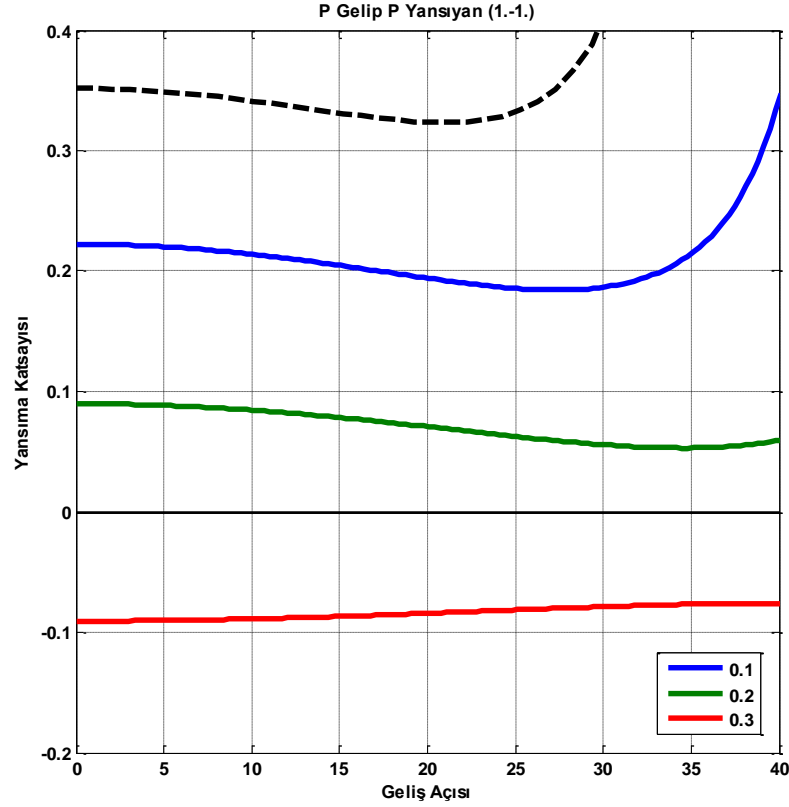
**Şekil 4.2 :** Şeyl ve metan içeriğine doymun kireçtaşı modeli. Siyah kesikli çizgi kireçtaşının laboratuvar ortamında ölçülen özellikleri ile oluşturulan AVA eğrisidir. Mavi, yeşil ve kırmızı eğriler sırası ile %10, %20 ve %30 gözenek oranları ile oluşturulan AVA eğrilerini göstermektedir.

Bu modelde gözenekliliğin artmasına rağmen yansıma genliklerinde kayda değer bir düşüş olmamasının nedeni olarak kireçtaşının yüksek kayaç hızı ve yoğunluğu gösterilebilir (Kireçtaşının P dalgası hızı 6375m/s; şeylin P dalgası hızı 3750m/s'dir). Hızların yüksek olması bu modelde sıvıların yansıma genliklerine olan etkilerini azaltmaktadır.

Şeyl-kireçtaşı modelinde, %30'a kadar olan tüm gözeneklilik değerlerindeki akışkanların P ve S dalga hızlarındaki değişimlerine etkisi Şekil 4.5'teki grafiklerde verilmektedir. Şekilde siyah renk ile P dalgası, mavi renk ile de S dalgası hızını temsil etmek üzere düz eğriler gözeneklerin tuzlu su içerdiği, kesikli çizgiler ise doğal gaz içerdiği durumu göstermektedir. Şekilde her iki durumda da P dalgası



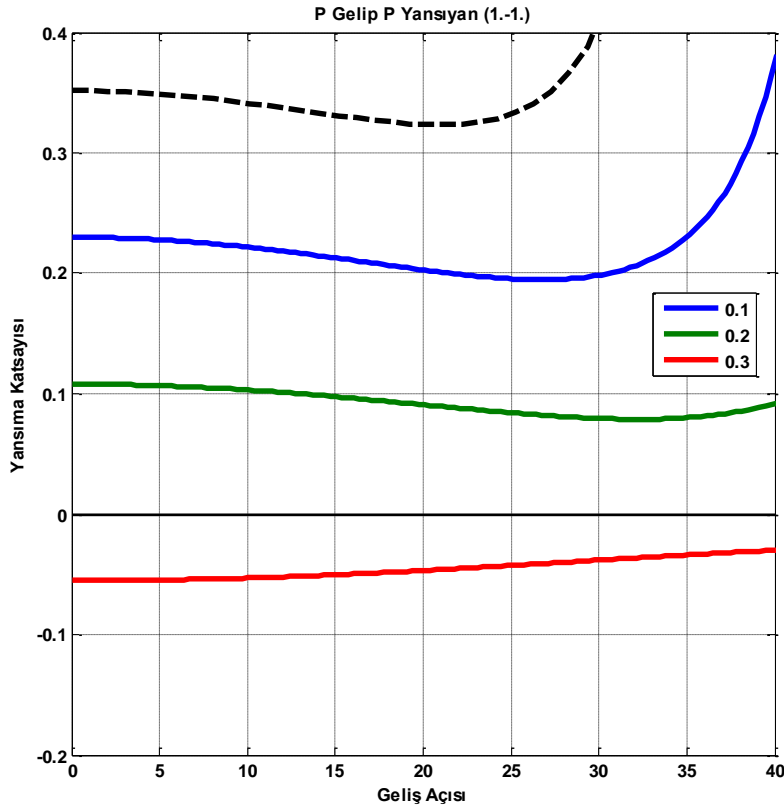
hızının %20 gözenekliliğe kadar, örtü kayacın P dalgası hızından (3750m/s) büyük olduğu görülmektedir. Bu durum yansıma eğrilerindeki düşük açılarda artı değerler alan yansıma katsayılarının oluşmasına neden olmaktadır. Ayrıca gözeneklerde tuzlu suyun yerini doğal gazın alması durumunda P dalga hızının azalmasına rağmen S dalga hızının genel olarak arttığı görülmektedir. Bu da genliklerin açılı arttıkça daha düşük değerler almasına neden olmaktadır.



**Şekil 4.3 :** Şeyl ve petrol içeriğine doymuş kireçtaşı modeli. Siyah kesikli çizgi kireçtaşının laboratuvar ortamında ölçülen özellikleri ile oluşturulan AVA eğrisidir. Mavi, yeşil ve kırmızı eğriler sırası ile %10, %20 ve %30 gözenek oranları ile oluşturulan AVA eğrilerini göstermektedir.

Yoğunlukların tüm gözeneklilik oranlarında farklı akışkanlara doymuş olma durumuna göre değişimi Şekil 4.6'da verilmiştir. Düz çizgi gözeneklerin tuzlu su içerdiği, kesikli çizgi ise doğal gaz içerdiği durumu göstermektedir. Yoğunluk değerleri hem gözenekliliğin artmasıyla hem de tuzlu sudan doğal gaza geçişte düşmektedir. Bu durum da genliklerin genel olarak bütün açılarda azalmasına neden olmaktadır. Modelde akışkan değişimi sırasında yoğunlukta meydana gelen değişim (%12) P ve S hızlarında meydana gelen değişimden (%4) oldukça fazladır. Bu

nedenle akışkan değişimindeki eğri farklılıkları yoğunluğun değişim miktarından kaynaklanmaktadır.



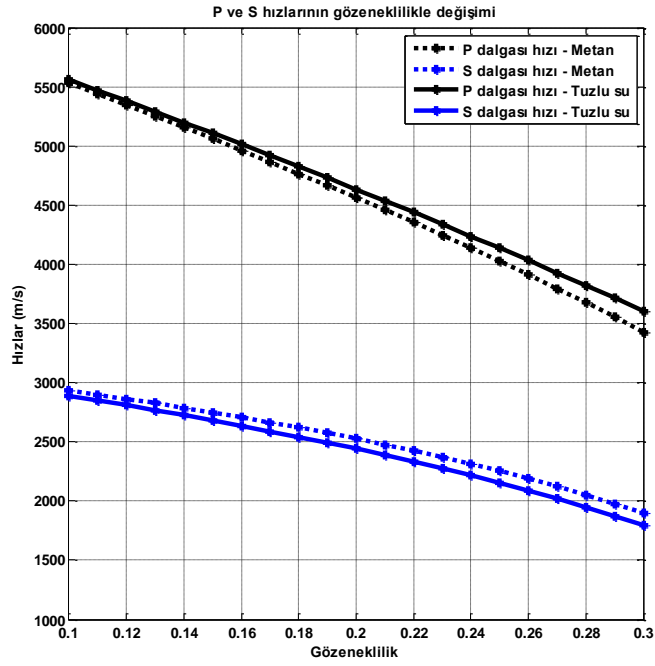
**Şekil 4.4 :** Şeyl ve tuzlu su içeriğine doygun kireçtaşı modeli. Siyah kesikli çizgi kireçtaşının laboratuvar ortamında ölçülen özellikleri ile oluşturulan AVA eğrisidir. Mavi, yeşil ve kırmızı eğriler sırası ile %10, %20 ve %30 gözenek oranları ile oluşturulan AVA eğrilerini göstermektedir.

Bu modelde yansıma genliklerinin daha çok yoğunluğun etkisi altında olduğu görülmektedir. Yansıma genliklerinde gözenekliliğin artması ile genel bir azalma görülürken, eğrilerin büyüklükleri yansıma açısının artmasıyla çok az da olsa azalmaktadır. Bunun nedeni de gözenekliliğin oranının veya akışkanların değişmesinin P ve S dalga hızlarının arasındaki büyüklüğün azalmasını sağlayamamasıdır.

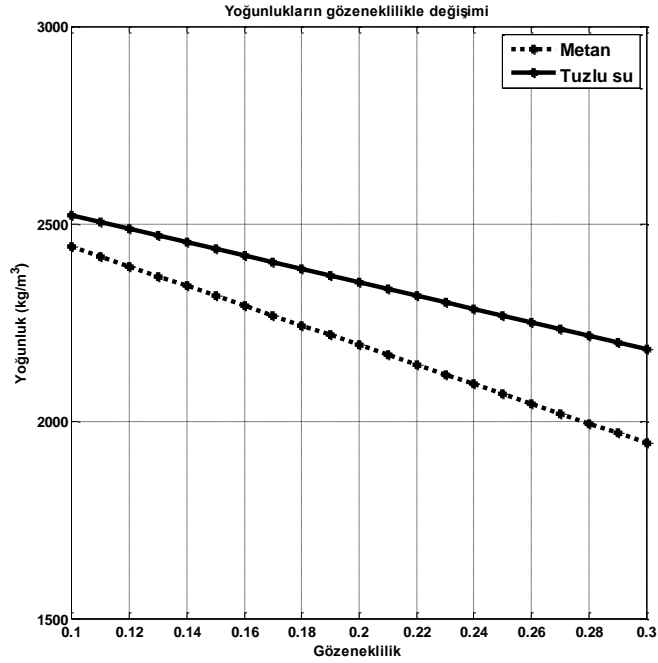
#### **Şeyl-kireçtaşı modelinde hazne kayacın sismik hız ve yoğunluklarının yansıma genlikleri üzerindeki etkisi**

Bu bölümde şeyl - kireçtaşı modelinde sismik hız ve yoğunluk değerleri belirli oranlarda değiştirilerek bu farklılaşmanın yansıma genliklerini nasıl etkilediği araştırılmıştır. Zoeppritz denklemlerinde kullanılan temel değişkenler kayacın

yoğunluğu, P dalga hızı ve S dalga hızıdır. Zoeppritz denklemlerinin karmaşıklığı bu değişlerin yansıma genlikleri üzerindeki etkisinin anlaşılmasının önüne geçmektedir.



Şekil 4.5 : Şeyl-kireçtaşı modelinin metan ve tuzlu su içeriğine doymun durumlarının gözeneklilik ile hızlarının değişimi.



Şekil 4.6 : Şeyl-kireçtaşı modelinin metan ve tuzlu su içeriğine doymun durumlarının gözeneklilikle yoğunluklarının değişimi.

Bu amaçla diğer kayaç değişkenlerini sabit tutarak hazne kayaç için sırasıyla sadece yoğunluğun, P dalga hızının ve S dalga hızının değiştiği grafikler oluşturulmuştur. Değişimler kayaç değişken değerinin yaklaşık %20 altında ve üstündeki aralıkta oluşturulmuştur. Çizelge 4.4'te bu hesaplamalar için kullanılan şeyl-kumtaşı modeline ait kayaç değişkenleri yeniden verilmiştir.

**Çizelge 4.4 : Şeyl-kumtaşı modelinin fiziksel özellikleri.**

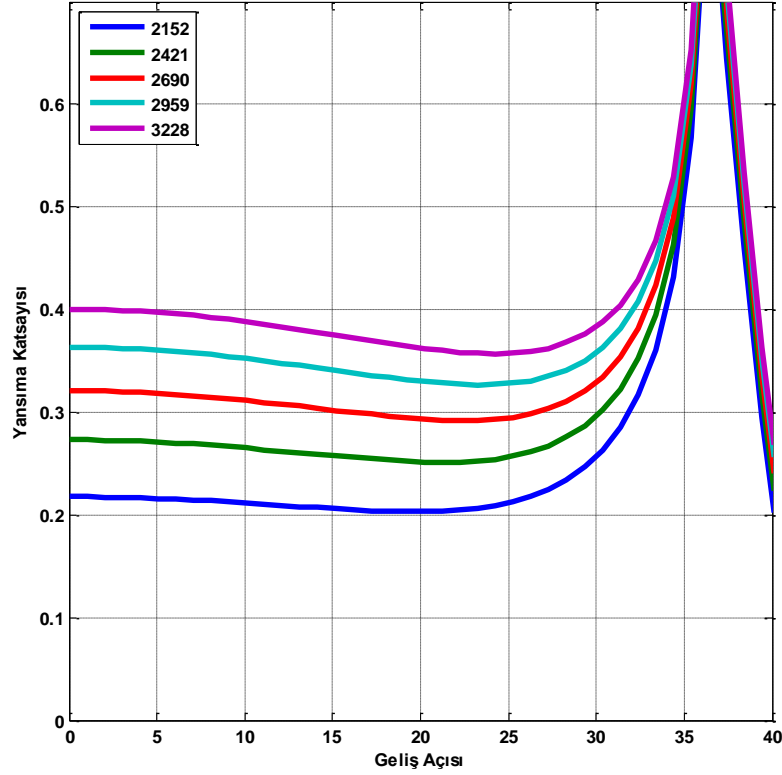
	<b>Yoğunluk (kg/m<sup>3</sup>)</b>	<b>P Dalga Hızı (m/s)</b>	<b>S Dalga Hızı (m/s)</b>
<b>1. Ortam</b>	2350	3750	1900
<b>2. Ortam</b>	2690	6375	3210

#### **Yoğunluğun yansıma genlikleri üzerindeki etkisi**

Şekil 4.7'de sadece yoğunluğun değişmesi durumunda yansıma katsayılarında oluşan değişimler görülmektedir. Kırmızı eğri ilk seçilen yoğunluk değerini göstermektedir (2690 kg/m<sup>3</sup>). Yeşil ve lacivert eğriler sırasıyla yoğunluğun %10 ve %20 daha az olduğu durumu; mavi ve mor eğriler ise sırasıyla %10 ve %20 daha fazla olduğu durumu temsil etmektedir. Başka bir deyişle yoğunluk mavi eğriden mor eğriye gittikçe artmaktadır. Eğrilerden anlaşıldığı üzere yoğunluğun yansıma katsayıları üzerindeki etkisi bütün açılardaki katsayılara genel bir azalma ve artma şeklinde görülmüştür.

#### **P dalga hızının yansıma genlikleri üzerindeki etkisi**

Şekil 4.8'de P dalga hızının etkisinin yoğunluğa kıyasla daha büyük olduğu görülmektedir. Kırmızı eğri ilk seçilen P dalga hızı değerine ait yansıma eğrisidir. Yeşil ve lacivert eğriler sırasıyla P dalga hızının %10 ve %20 daha az olduğu durumu; mavi ve mor eğriler ise sırasıyla %10 ve %20 daha fazla olduğu durumu temsil etmektedir. Yoğunluk eğrilerinde olduğu gibi mavi eğriden mor eğriye gittikçe P dalga hızı artmaktadır. P dalga hızı eğrilerde görüldüğü gibi hem genel olarak tüm açılardaki genliklere hem de açı arttıkça eğrinin şekline etki etmektedir. P dalga hızı oldukça yüksek iken (mor eğri – 7650m/s) yansımaların açısı ile arttığı görülmektedir. Ancak hız azaldıkça (mavi eğri – 5100m/s) hem düşük açılardaki genlikler azalmış, hem de yansıma genlikleri açının artması ile azalmıştır.



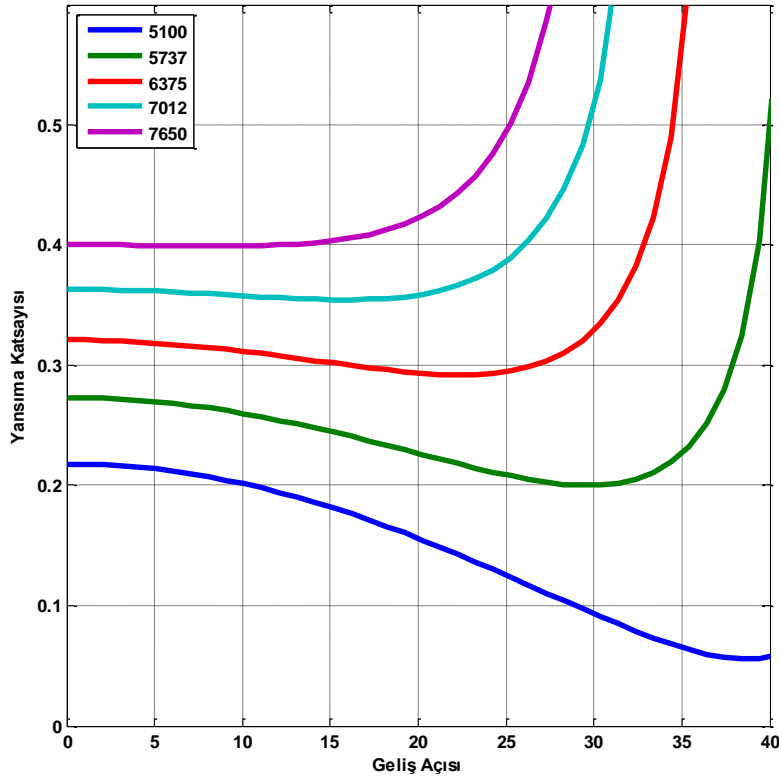
Şekil 4.7 : Yoğunluk değişiminin yansımaya katsayılarına etkisi.

#### S dalga hızının yansımaya genlikleri üzerindeki etkisi

Şekil 4.9’te S dalga hızının etkisinin yoğunluk ve P dalga hızına kıyasla daha farklı etkileri olduğu görülmektedir. Kırmızı eğri ilk seçilen S dalga hızı değerine ait yansımaya eğrisidir. Yeşil ve lacivert eğriler sırasıyla P dalga hızının %10 ve %20 daha az olduğu durumu; mavi ve mor eğriler ise sırasıyla %10 ve %20 daha fazla olduğu durumu temsil etmektedir. Yoğunluk eğrilerinde olduğu gibi mavi eğriden mor eğriye gittikçe S dalga hızı artmaktadır. Yoğunluk ve P dalga hızının değerleri büyüdükçe yansımaya genliklerinde de genel (bütün açılarda) veya açının artışına bağlı büyüme görülmektedir. Ancak S dalga hızı arttıkça yansımaya katsayılarında genel bir artış olmasa da S dalga hızı arttıkça yansımaya katsayılarında açığa bağlı bir azalma gözlenmektedir.

Bu üç değişkenin etkilerini özetleyecek olursak; yoğunluğun değişimi bütün yansımaya açılarındaki genliklerin azalmasına veya artmasına; P dalgası hızı hem bütün açılarındaki katsayıların azalmasına veya artmasına, hem de yansımaya eğrisinin açığa bağlı olarak azalma veya artış göstermesine; S dalgası hızının değişimi de sadece

eğrinin açıyla azalmasına veya artmasına neden olmaktadır. Bu etkilerin sonucu olarak yansıma katsayılarına en büyük etkiyi P dalgası hızının yaptığı, yoğunluk ve S dalgası hızının etkilerinin daha az olduğu görülmektedir. Dikkati çeken bir nokta ise yoğunluğun tüm açılarda genel bir azalma veya artma yaratması ancak hızların eğrilerin açıyla birlikte yaptığı değişimlere etki etmesidir. Bunun sebebi de P ve S dalgası hızlarının arasındaki büyüklüğün açılması veya azalmasıdır. P dalga hızının azalması veya S dalga hızının artması yansıma eğrilerinde açıyla birlikte azalmaya neden olmaktadır. P dalga hızının artması veya S dalga hızının azalması ise yansıma eğrilerinde açıyla birlikte artmaya neden olmaktadır.

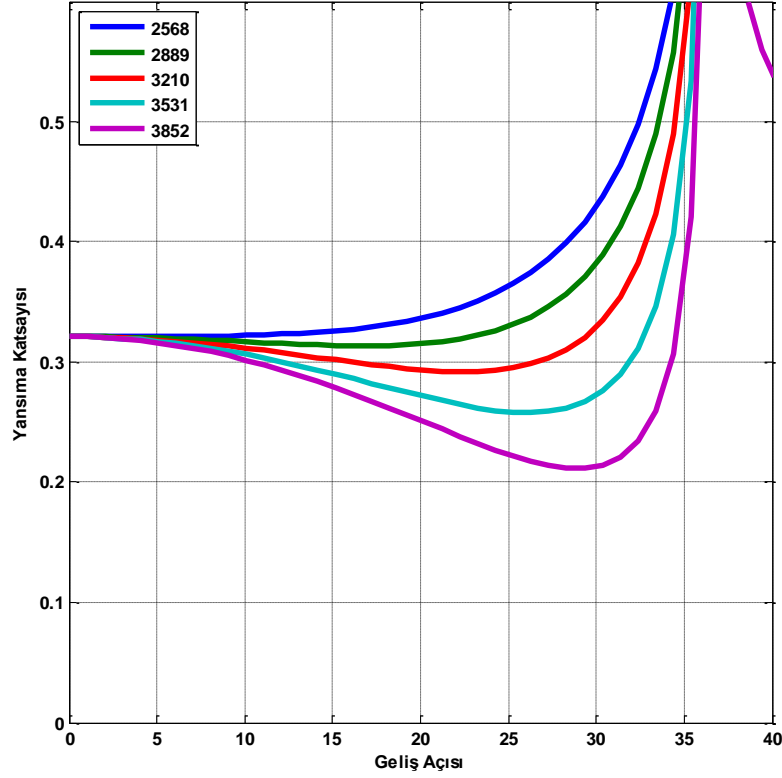


Şekil 4.8 : P dalga hızı değişiminin yansıma katsayılarına etkisi.

#### 4.3.2 Şeyl – kumtaşı modeli

Bu modelde yansıma genliklerinin kireçtaşı modellerine kıyasla daha düşük olduğu görülmektedir (Şekil 4.10, 4.11 ve 4.12). Bu duruma sebep olarak yine hızların ve yoğunlukların daha düşük olması gösterilebilir. Ayrıca eğrilerin eğimlerinde kireçtaşı modeline kıyasla bir artış görülmektedir. Gözenekliliğin artmasıyla en büyük değişimler yine metan içeren kapan modelinde görülmektedir (Şekil 4.10). %10

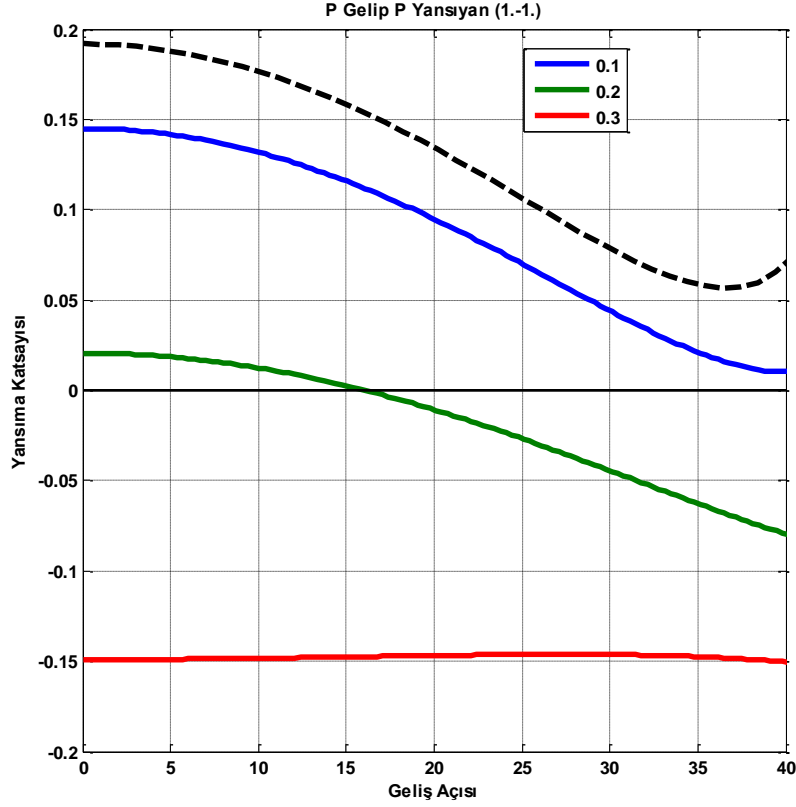
gözeneklilik için tüm akışkan cinsleri için 1. sınıf, %20 gözeneklilik değerleri için 2. sınıf yansıma eğrileri görülürken, %30 gözeneklilikte ise tüm akışkanlar için yansıma eğrilerinde yatay bir seyir görülmektedir.



**Şekil 4.9 :** S dalga hızının yansıma katsayılarına etkisi.

Doğaz gaz içeriğine doymuş modelde genliklerin petrol ve tuzlu suya kıyasla oldukça düşük olduğu görülmektedir. %10 gözeneklilikte 1. sınıf eğri görülmektedir. Bu durumda hazne kayacın hızı ve yoğunluğu hala yüksek olduğu ve genliklerin artı değerlerde olmasından dolayı hidrokarbon varlığına dair yorum yapmak kolay değildir. Ancak %20 ve %30 gözeneklilik için sırasıyla oluşan 2. ve 4. sınıf eğriler yorumlama için daha dikkat çekicidir. %20 gözeneklilikte açının artmasıyla daha genliklerin daha da eksi değerlere gitmesi ve %30 gözeneklilikte de genliklerin eksi eksende büyük değerde başlayıp azalmaması hidrokarbon varlığına dair gösterge olarak değerlendirilebilir.

Petrol içeriğine doymuş model için de benzer bir durum geçerlidir. %10 gözenekliliğe sahip modelde yorumda bulunmak zor iken, %20 ve %30 gözenekliliğe sahip modelin eğrileri yorumlama açısından daha ilgi çekicidir.



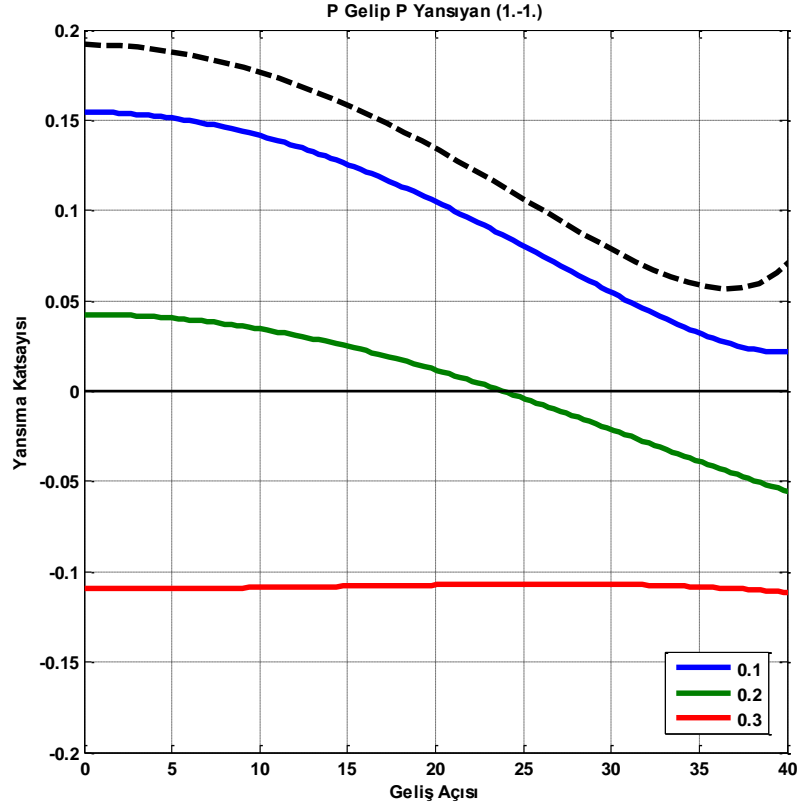
**Şekil 4.10 :** Şeyl ve metan içeriğine doymuş kumtaşı modeli. Siyah kesikli çizgi kumtaşının laboratuvar ortamında ölçülen özellikleri ile oluşturulan AVA eğrisidir. Mavi, yeşil ve kırmızı eğriler sırası ile %10, %20 ve %30 gözenek oranları ile oluşturulan AVA eğrilerini göstermektedir.

Tuzlu su modelinde de, doğaz gaz ve petrolle oluşturulan kumtaşı modellerine benzer yapıda eğriler oluştuğu görülmektedir. Ancak eğrilerin şekli benzer de olsa genliklerinde, doğal gaz ve petrol modellerine kıyasla azalma olduğu görülmektedir. Bu modelde %10 ve %20 gözeneklilikte eğri türleri benzer iken, %30 gözeneklilikte eğrinin farklılaşp, açının artmasıyla birlikte genliklerin neredeyse değişmediği görülmektedir.

Şekil 4.13 kumtaşına ait modelin P ve S hızlarının tüm gözeneklilik oranlarında farklı gözenek akışkanına sahip olması durumuna göre değişimini göstermektedir. Burada dikkat çekici kısım gözenekliliğin artması sonucunda P dalgası hızlarının azalması ancak akışkan türünün değişmesinden neredeyse hiç etkilenmemesidir. S dalgası hızında ise yine tuzlu sudan doğal gaza geçişte bir miktar artış gözlenmiştir. Benzer şekilde Şekil 4.14'te verilen grafiklerde yoğunluğun gözeneklilikle değişimi



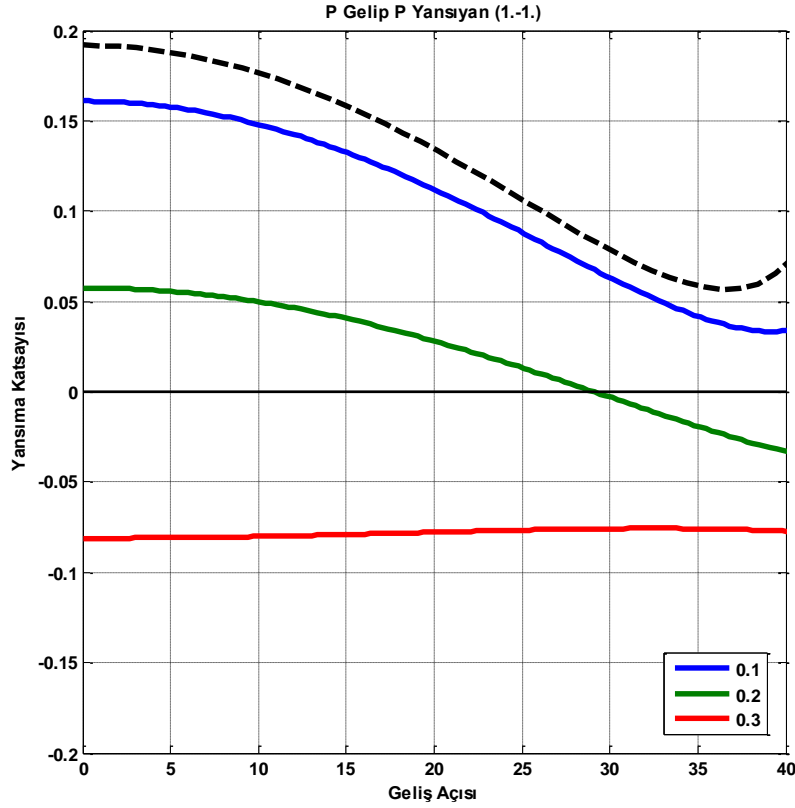
incelendiğinde yine gözenekliliğin artması ile yoğunluğun azaldığı, ayrıca tuzlu sudan doğal gaza geçişin de yoğunluğu oldukça azalttığı görülmektedir. Akışkan değişiminde P ve S hızlarındaki düşük değişim ve yoğunlukta meydana gelen büyük azalma, yoğunluğun akışkan değişimlerinde daha etkili olduğunu göstermektedir.



**Şekil 4.11 :** Şeyl ve petrol içeriğine doymun kumtaşı modeli. Siyah kesikli çizgi kumtaşının laboratuvar ortamında ölçülen özellikleri ile oluşturulan AVA eğrisidir. Mavi, yeşil ve kırmızı eğriler sırası ile %10, %20 ve %30 gözenek oranları ile oluşturulan AVA eğrilerini göstermektedir.

P dalgası hızında belirgin bir değişikliğin olmaması, bu modeldeki yansıma genliklerinin daha çok yoğunluktan etkilendiğinin göstergesidir. Yoğunluğun gözeneklilik ile artışı genliklerde genel olarak azalmaya sebep olmuştur. Ayrıca üç akışkan türünün %10 ve %20 gözeneklilik eğrilerinde görülen açının artması ile azalma bu oranlarda P ve S dalgası arasındaki büyüklüğün az olduğunu ancak %30 gözenekliliğe ulaşıldığında ise açının artmasına rağmen eğrinin yatay olarak devam etmesinin de P ve S dalgası hızları arasındaki farkın açıldığını göstermektedir. Hazne

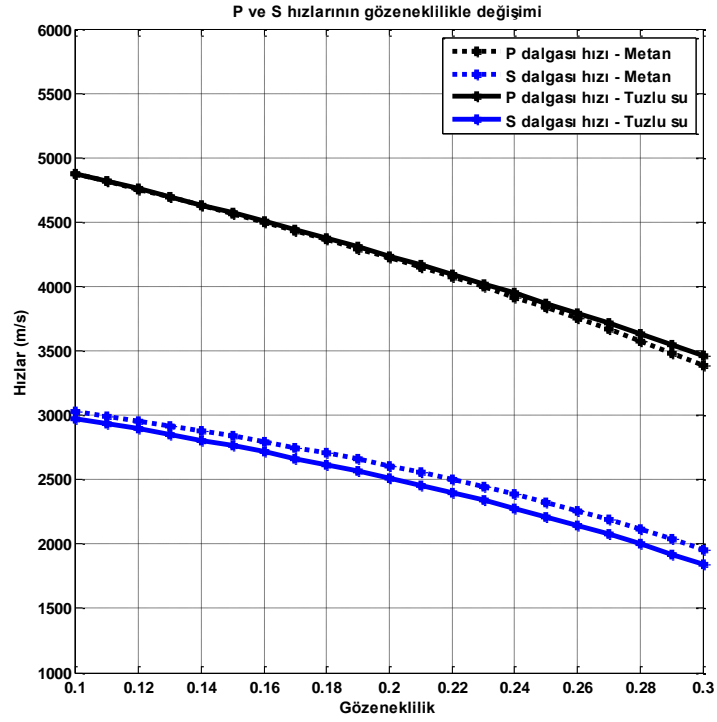
kayacın tuzlu suya doygun olma durumunda genlik değerlerinin açının artması ile azalması hızlar arasındaki artışın daha fazla olduğunu göstermektedir.



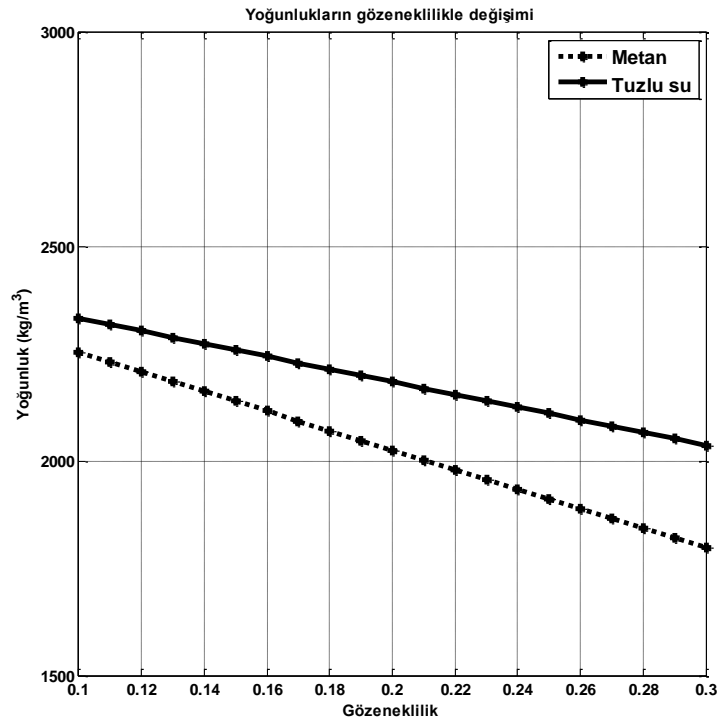
**Şekil 4.12 :** Şeyl ve tuzlu su içeriğine doygun kumtaşı modeli. Siyah kesikli çizgi kumtaşının laboratuvar ortamında ölçülen özellikleri ile oluşturulan AVA eğrisidir. Mavi, yeşil ve kırmızı eğriler sırası ile %10, %20 ve %30 gözenek oranları ile oluşturulan AVA eğrilerini göstermektedir.

#### 4.3.3 Şeyl – killi kumtaşı modeli

Üçüncü model olan şeyl-kumtaşı modelinde hazne kayacın kil içerdiği durum incelenmiştir. Bu modelde kumtaşının %27 oranında kil içerdiği varsayılmıştır. Oluşturulan eğrilerde yansıma genliklerinin oldukça düşük olduğu görülmüştür (Şekil 4.15, 4.16 ve 4.17). Ancak bu kapan için tüm modellerde %10 ve %20 gözeneklilik oranında yansıma genliklerinde açıyla birlikte kayda değer bir değişim gözlenememiştir. Sadece %30 gözeneklilikte 4. Sınıf yansıma eğrileri görülmüştür ve özellikle doğal gaz ile oluşturulan modelde genliklerin açının artması ile birlikte oldukça çabuk azaldığı görülmektedir.

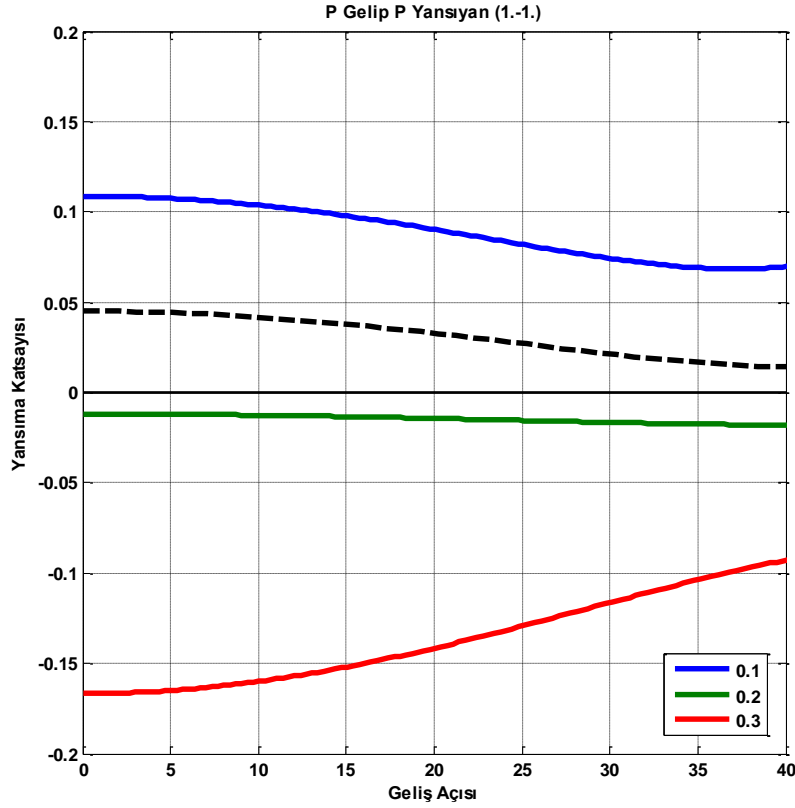


Şekil 4.13 : Şeyl-kumtaşı modelinin metan ve tuzlu su içeriğine doymun halinin gözeneklilik ile hızlarının değişimi.



Şekil 4.14 : Şeyl-kumtaşı modelinin metan ve tuzlu su içeriğine doymun halinin gözeneklilikle yoğunluklarının değişimi.

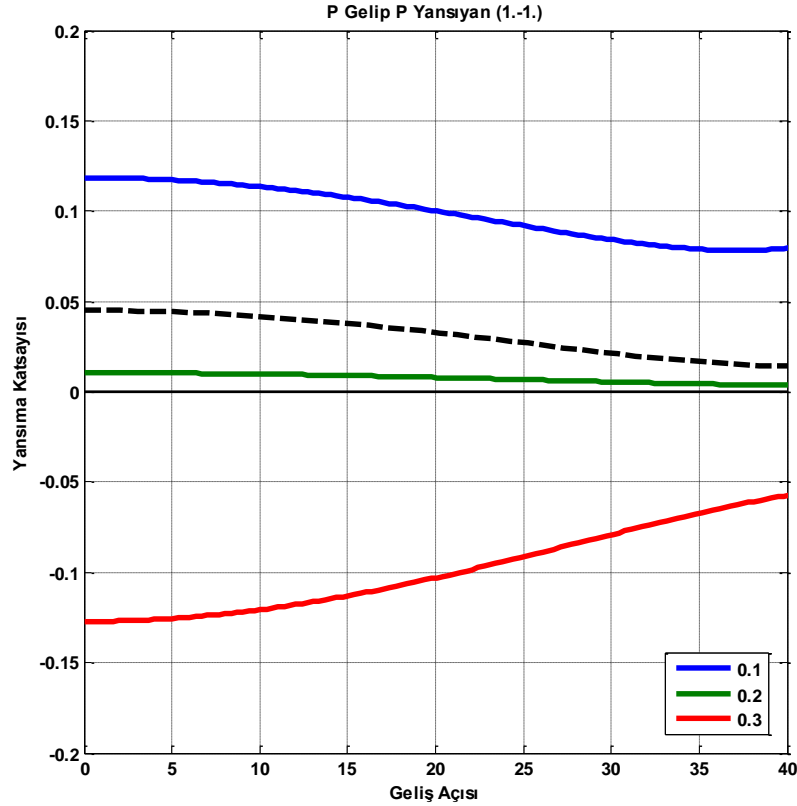
Doğaz gaz ile oluşturulan ile modelde genliklerin oldukça düşük olduğu görülmektedir. Genlikler %10 ve %20 gözeneklilikte oldukça düşüktür ve ayrıca genliklerde de dikkate değer bir azalma görülememektedir. Ancak %30 gözeneklilikte durum oldukça farklıdır ve genliklerin düşük açıda oldukça büyük olduğu ve açının artmasıyla birlikte genliklerin belirgin bir şekilde azaldığı görülmektedir. Böylece hidrokarbon varlığına dair yorum yapmak mümkün olur.



**Şekil 4.15 :** Şeyl ve metan içeriğine doymuş killi kumtaşı modeli. Siyah kesikli çizgi killi kumtaşının laboratuvar ortamında ölçülen özellikleri ile oluşturulan AVA eğrisidir. Mavi, yeşil ve kırmızı eğriler sırası ile %10, %20 ve %30 gözenek oranları ile oluşturulan AVA eğrilerini göstermektedir.

Petrol içeriğine doymuş killi kumtaşı durumu doğal gaz ile paralellik göstermektedir. Gözenekliliğin %10 ve %20 olduğu durumlarda belirgin bir anomaliden bahsetmek mümkün değildir. Ayrıca %20 gözeneklilikte genliklerin bütün açılarda sıfıra oldukça yakın olduğu görülmektedir. Bu tarz bir eğri yığılma kesitlerinde çok düşük genlikli bir sınır oluşturacak ve bu nedenle de yorumlama esnasında göz ardı edilebilecektir. Ancak %30 gözeneklilikte, düşük açıda yüksek genlikle başlayıp aç

arttıkça belirgin bir biçimde azalan genlikler bize hidrokarbon varlığına dair ipucu vermektedir.

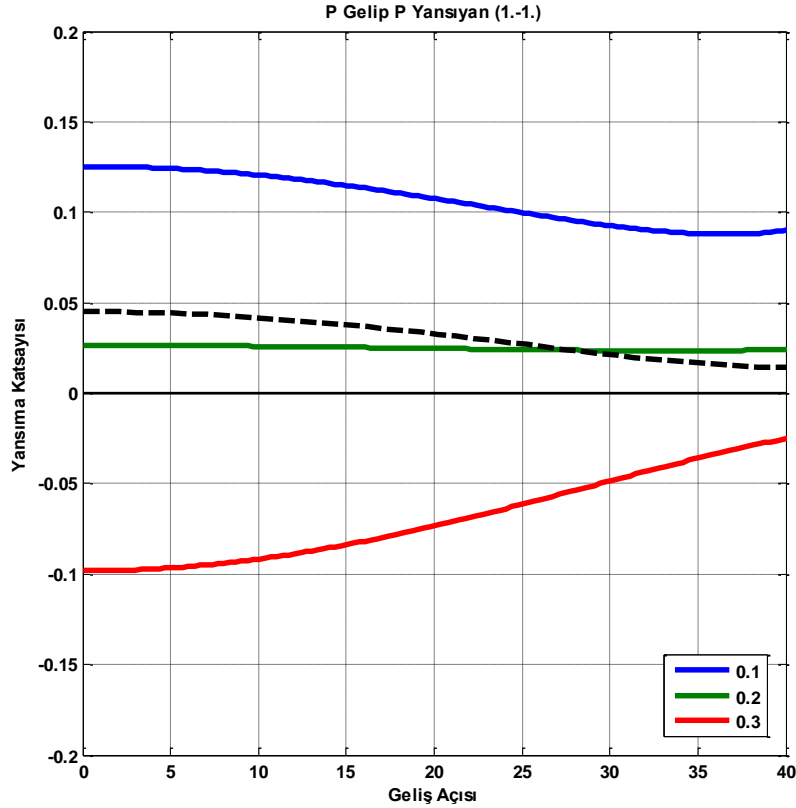


**Şekil 4.16 :** Şeyl ve petrol içeriğine doymun killi kumtaşı modeli. Siyah kesikli çizgi killi kumtaşının laboratuvar ortamında ölçülen özellikleri ile oluşturulan AVA eğrisidir. Mavi, yeşil ve kırmızı eğriler sırası ile %10, %20 ve %30 gözenek oranları ile oluşturulan AVA eğrilerini göstermektedir.

Tuzlu su içeren killi kumtaşı da temiz kumtaşı modeli ile benzer özellikler göstermektedir. Tuzlu suyun hız ve yoğunluk değerlerinin daha yüksek olması ile birlikte, oluşan genliklerin büyüklüğünde azalma görülmektedir. Bu akışkan modelinde de yine %30 gözeneklilikte açının artması ile genliklerde azalma gözlenmektedir. Ancak genlik büyüklüklerinin düşük olması bu eğrinin yorumlamada gözden kaçırılmasına neden olabilir.

Şeyl-killi kumtaşı modelinde kayaç hızlarının tüm gözeneklerdeki farklı gözenek akışkanına bağlı değişimlerini incelediğimizde temiz kumtaşına benzer şekilde P dalga hızlarında tuzlu sudan doğal gaza geçişte azalma olsa da kayda değer bir fark görülememektedir (Şekil 4.18). Ancak S dalgası hızında yine tuzlu sudan doğal gaza

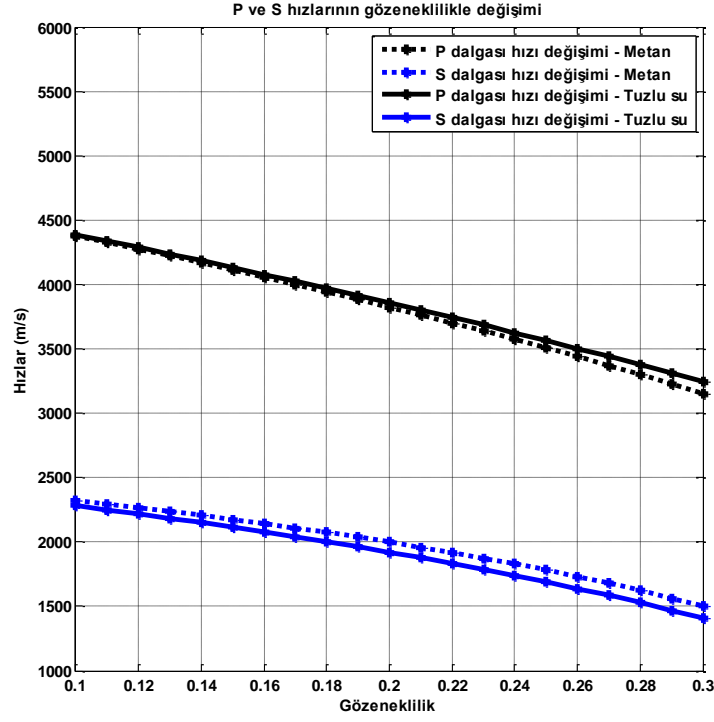
geçişte hızlarda bir miktar artış gözlenmiştir. Ayrıca P ve S dalgası hızlarındaki azalışın temiz kumtaşı örneğinde olduğu gibi neredeyse aynı eğime sahip olduğu görülmektedir. Kayaç yoğunluğundaki azalış (Şekil 4.19) ise yine beklendiği gibi doğrusaldır ancak diğer modellere kıyasla yoğunluklardaki azalma miktarı daha düşüktür. Yine bu modelde de akışkan değişiminde yoğunluk değişiminin, hızlara kıyasla daha büyük olması yansıma katsayılarındaki farklılığı oluşturmuştur.



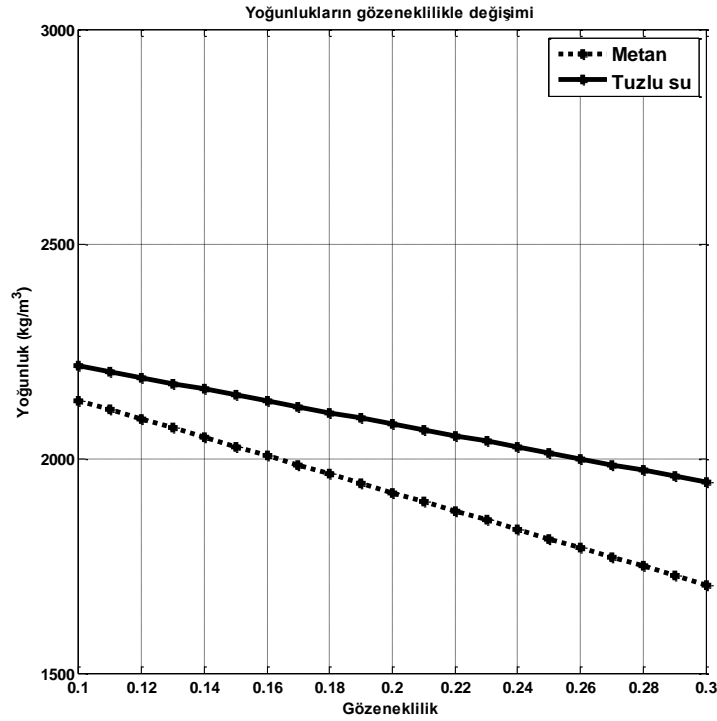
**Şekil 4.17 :** Şeyl ve tuzlu su içeriğine doymuş killi kumtaşı modeli. Siyah kesikli çizgi killi kumtaşının laboratuvar ortamında ölçülen özellikleri ile oluşturulan AVA eğrisidir. Mavi, yeşil ve kırmızı eğriler sırası ile %10, %20 ve %30 gözenek oranları ile oluşturulan AVA eğrilerini göstermektedir.

#### Zoeppritz denklemleri-2B dalga yayılımı modellemesi kıyaslaması

Bu modelde Zoeppritz katsayıları ve 2-boyutlu dalga yayılımı modellemesinden elde edilen sonuçlar kıyaslanmıştır. Modelleme sonucunda oluşan genlikler ilk yansıma genlikleri ile normalize edilerek iki hesaplama sonucundan elde edilen genliklerin yüzde değişimleri elde edilmiştir (Şekil 4.20). Zoeppritz katsayıları ile dalga yayılımı modellemesi sonucunda elde edilen eğlerin oluşturulan yatay arayüzey modeli için

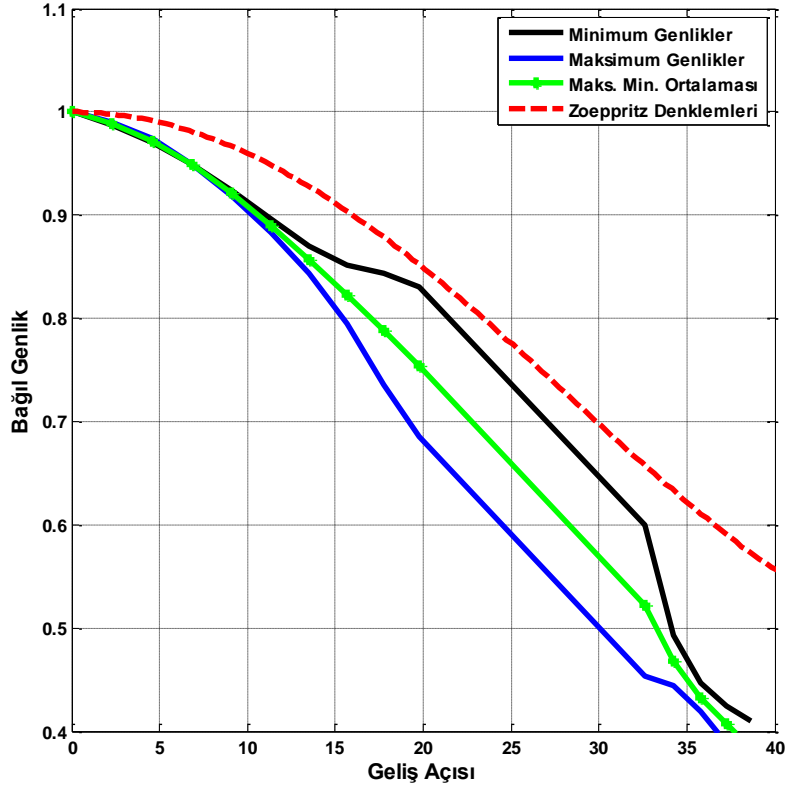


Şekil 4.18 : Şeyl-killi kumtaşı modelinin metan ve tuzlu su içeriğine doymun halinin gözeneklilik ile hızlarının değişimi.



Şekil 4.19 : Şeyl-killi kumtaşı modelinin metan ve tuzlu su içeriğine doymun halinin gözeneklilikle yoğunluklarının değişimi.

oldukça benzer olduğu görülmektedir. Ancak arayüzeyin yatay olmaması durumunda veya tabaka sayısının artması durumunda iki hesaplama yöntemi arasında daha belirgin farklar ortaya çıkabilir.



**Şekil 4.20 :** Zoeppritz denklemleri ve 2-boyutlu modelleme sonucunda elde edilen genliklerin yüzde değişimleri.

#### 4.3.4 Model AVA eğrilerinin gözenekliliğe bağlı 3-boyutlu değişimleri

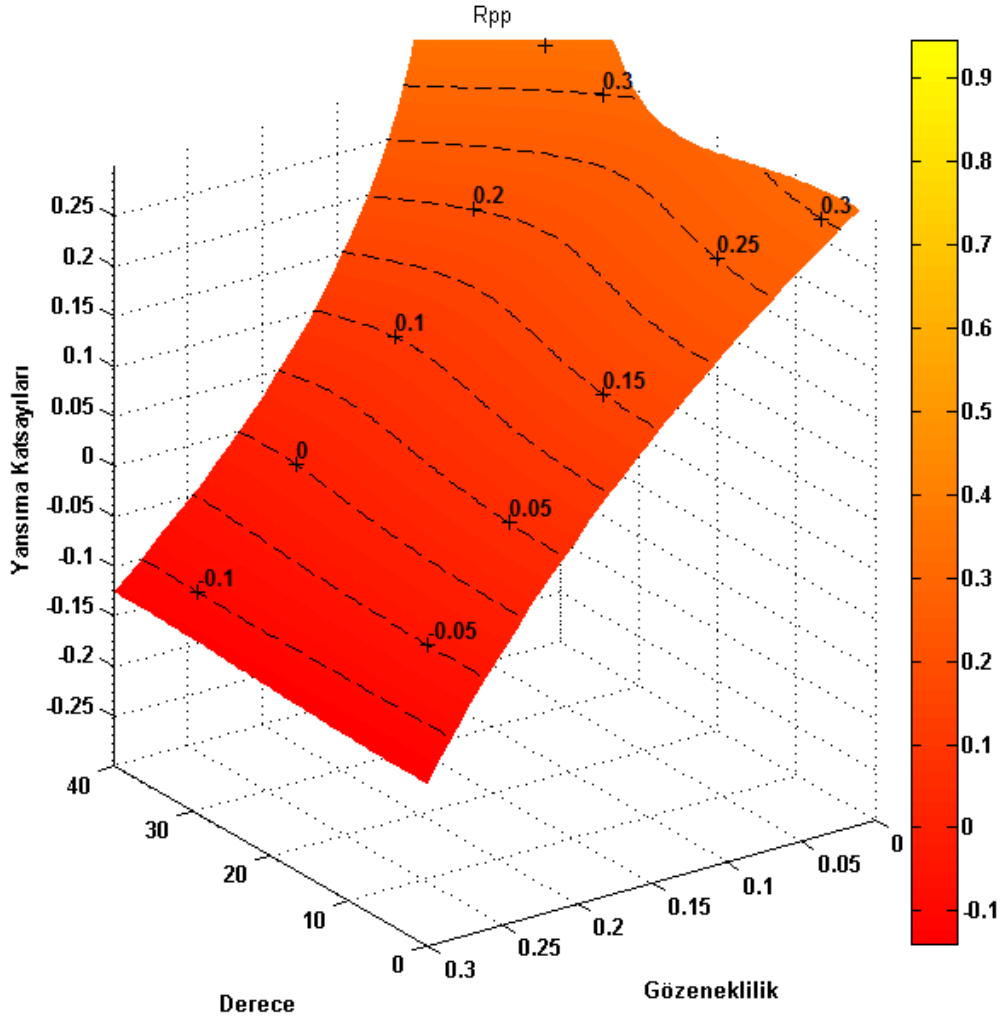
Bu bölümde bütün kapan modellerinin doğal gaz ve tuzlu içerikleri için oluşturulmuş üç boyutlu grafikleri verilmektedir. Grafiklerde Zoeppritz denklemleri ile hesaplanan katsayılarının açığa ve gözenekliliğe bağlı değişimleri verilmiştir.

##### 4.3.4.1 Şeyl-Kireçtaşı 3-boyutlu modeli

Kireçtaşının, şeyle kıyasla daha yüksek olan fiziksel özellikleri düşük gözeneklilikte ve 40 dereceye yakın açılarda kritik açı oluşumuna sebep olmaktadır (Şekil 4.21). Gözenekliliğin genlikler üzerindeki genel etkisi bu şekilde daha iyi görülebilmektedir. Oluşturulan şeyl-kireçtaşı modelinde gözeneklerde doğal gaz olması durumunda genliklerin yaklaşık %20 gözeneklilik oranından itibaren eksi

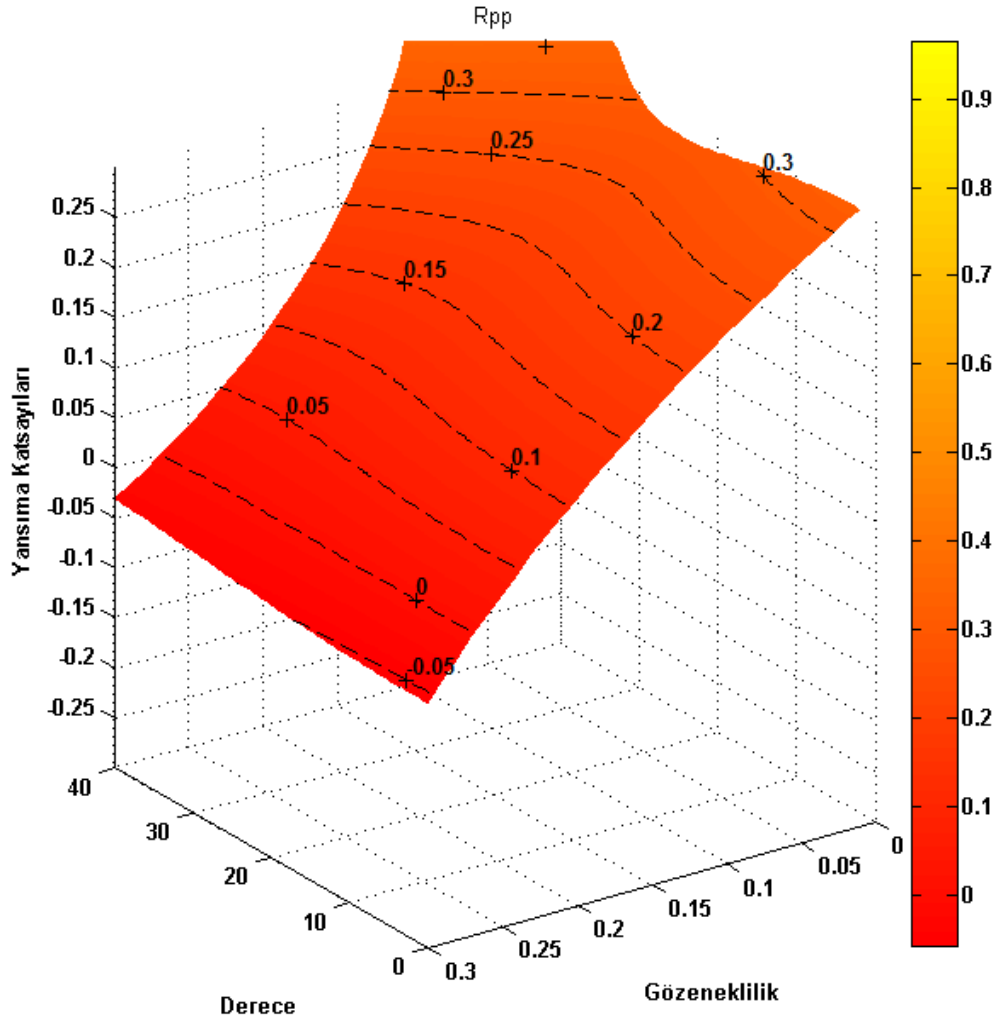


değerler aldığı görülmektedir. Bu gözeneklilik oranından itibaren artık daha yüksek olan bütün gözeneklilik oranlarında hazne kayacın hız ve yoğunluk değerleri, örtü kayaçtan daha düşüktür.



**Şekil 4.21 :** Metana doymun kireçtaşı modeli için AVA eğrisinin gözeneklilik oranı ile değişimi.

Gözeneklerin tuzlu su ile dolu olduğu durumda genliklerin daha yüksek değerler aldığı görülmektedir (Şekil 4.22). Kritik açı oluşumunun doğalgaza kıyasla daha düşük açılarda ve daha yüksek gözenekliliklerde meydana geldiği görülmektedir (Şekil 4.22). Genliklerin eksi değerler alması ise gözenekliliğin neredeyse %30'a ulaşması ile mümkün olmuştur.



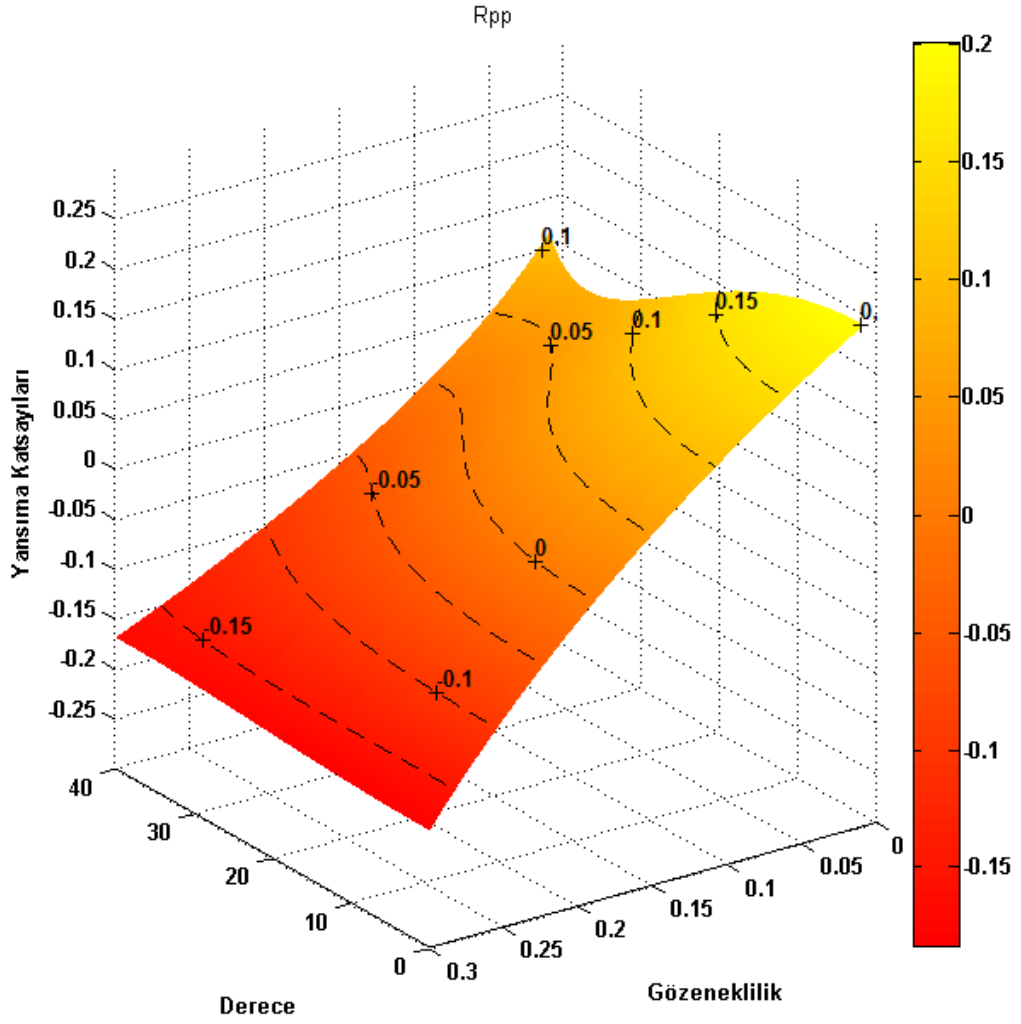
**Şekil 4.22 :** Tuzlu suya doymun kireçtaşı modeli için AVA eğrisinin gözeneklilik oranı ile değişimi.

#### 4.3.4.2 Şeyl-kumtaşı 3-boyutlu modeli

Şeyl – kumtaşı modelinin doğal gaz içeren modelinde genliklerin genel olarak azaldığını görülmektedir. Gözenekliliğin artmasının etkisi kireçtaşına göre daha büyüktür. Doğal gazın da etkisiyle büyük açılarda yaklaşık %10 gözeneklilikte, düşük açılarda ise %15'e yakın gözeneklilik oranlarında yansıma genliklerinin eksi değerler aldığı görülmektedir (Şekil 4.23). Açılı arttıkça gözenekliliğin genlikler üzerinde daha etkili olduğu görülmektedir.

Gözeneklerin tuzlu suya doymun olduğu durumda ise genliklerin doğal gaza göre arttığı görülmektedir. Düşük gözeneklilik oranlarında belirgin bir fark görülemezken, gözeneklilik arttıkça genliklerin doğal gaza kıyasla yine daha büyük genliklere

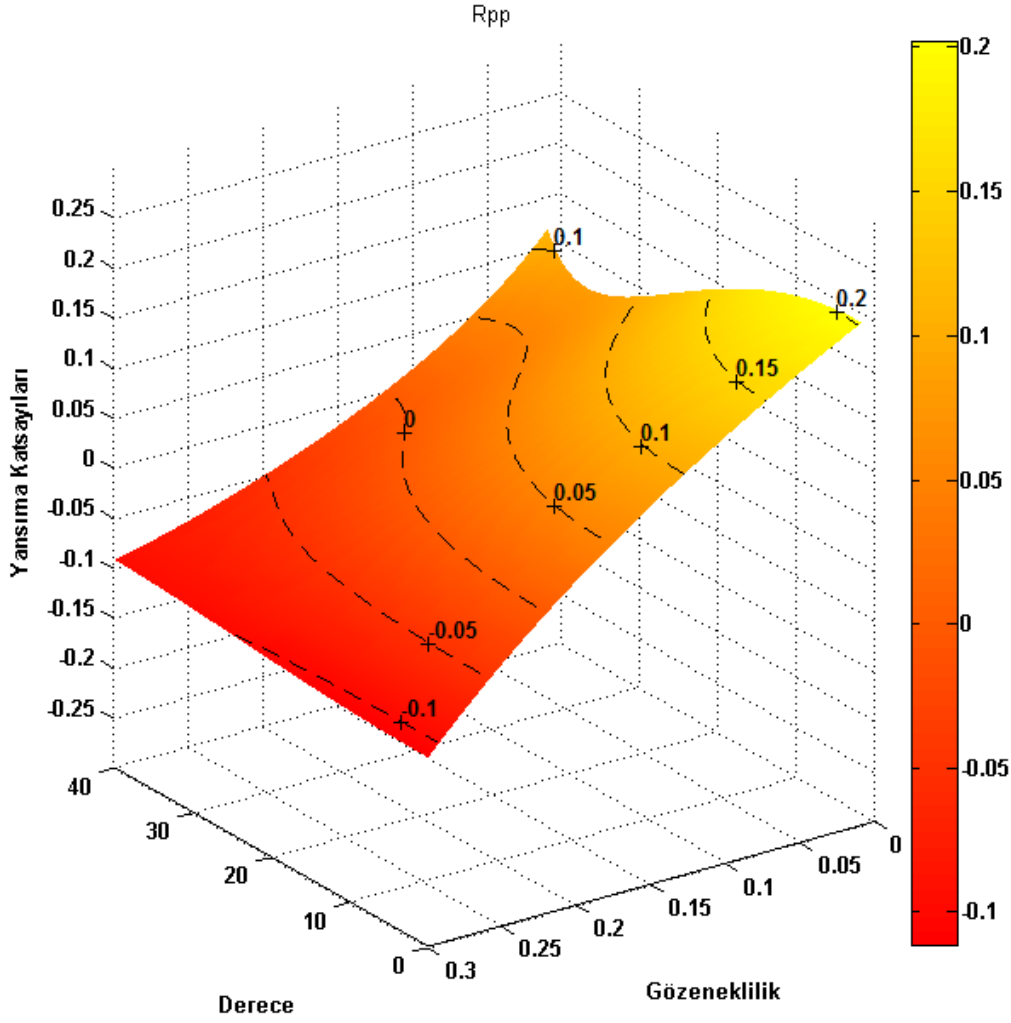
ulaştığı görülmektedir (Şekil 4.24). Tuzlu su durumunda da gözeneklilik %10-15 arasında ekşi değerlere ulaşırken düşük açılarda bu oran %20 seviyelerindedir.



Şekil 4.23 : Metana doymun kumtaşı modeli için AVA eğrisinin gözeneklilik oranı ile değişimi.

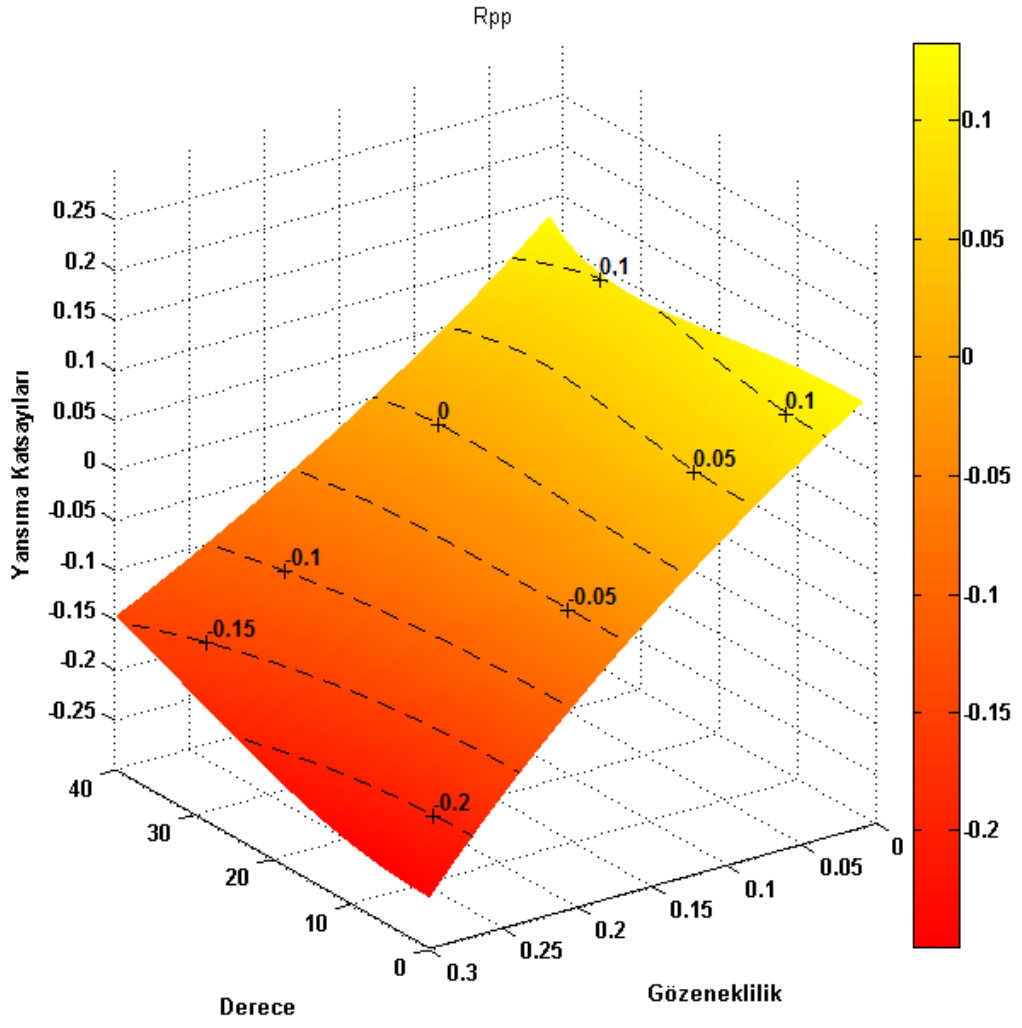
#### 4.3.4.3 Şeyl-killi kumtaşı 3-boyutlu modeli

Killi kumtaşı modelinde genliklerin genel olarak daha farklı olduğu görülmektedir. Kritik açı oluşumları görölmezken, yüksek gözeneklilikte genliklerin açıyla belirgin bir şekilde azaldığı görülmektedir (Şekil 4.25). Temiz kumtaşı modelinde gözeneklilik büyük açılarda daha etkili olsa killi kumtaşı modelinde bu durum gözlenmemektedir.

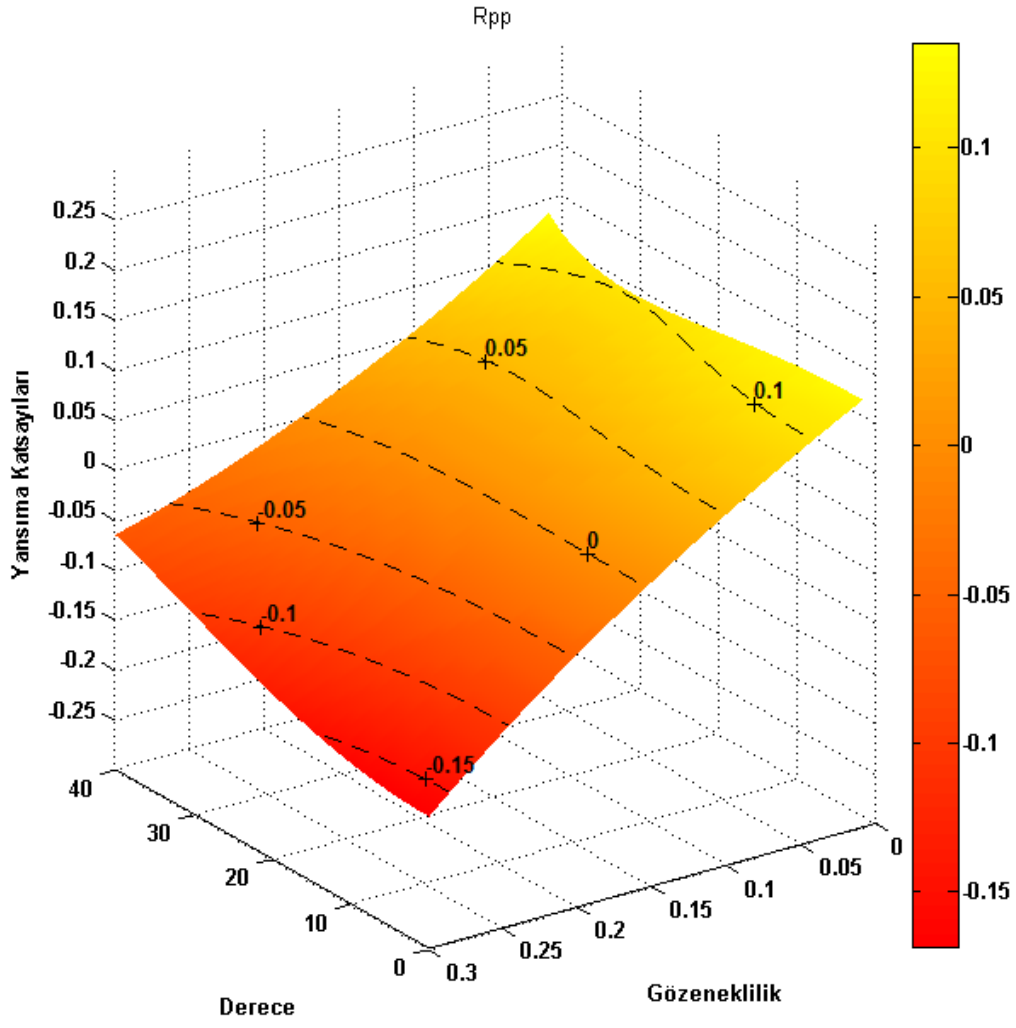


**Şekil 4.24 :** Tuzlu suya doymun kireçtaşı modeli için AVA eğrisinin gözeneklilik oranı ile değişimi.

Gözeneklerin tuzlu suya doymun olduğu durumda genlikler daha büyük değerler almaktadır. Ayrıca bu modelde gözenekliliğin büyük açılarda etkisinin terse döndüğü görülmektedir. Genliklerin eksi değerler alması %15 gözeneklilik oranında gözlenirken, yüksek açılarda bu oran %15-20 seviyelerine çıkmaktadır (Şekil 4.26).



Şekil 4.25 : Metana doymun killi kireçtaşı modeli için AVA eğrisinin gözeneklilik oranı ile değişimi.



**Şekil 4.26 :** Tuzlu suya doymun killi kumtaşı modeli için AVA eğrisinin gözeneklilik oranı ile değişimi.

## 5. SONUÇLAR

Şeyl-kireçtaşı, şeyl-kumtaşı ve şeyl-killi kumtaşı arayüzeylerine ait üç adet kapan modelinde hazne kayacın %30'a kadar artırılan gözenek oranlarında farklı akışkanlara doygun olma durumlarının yansıma genliklerinin açılı ile değişimi (AVA) üzerindeki etkileri incelenmiştir. Modellerde yansıma genliklerinde gözlenen anomaliler tabakalar arasındaki sismik hız kontrastları arttıkça belirginleşmektedir. Tabaka gözenekliliği hiç hesaba katılmaksızın bakıldığında en büyük sismik hız farkına sahip şeyl-kireçtaşı arayüzey modelinde genliklerin sıfır açılı değerinde 0.35'lerden başlayıp artan açılı ile arttığı gözlenmektedir. Hazne kayacın gözenek oranları değiştirildiğinde genel olarak gözeneklilik arttıkça P yansıma genliklerinde tüm açılarda sürekli bir azalma olduğu gözlenmektedir. Modellerde alttaki tabakayı oluşturan hazne kayacın hızı şeylden büyük oldukça kritik açılı oluşumu gerçekleşmektedir. Kritik açılı civarında yansıma genliklerinde kuvvetli anomaliler gözlemek mümkündür. Kireçtaşı modelinde %10 oranında gözenekli kayacın AVA eğrisinde kritik açılı oluşumuna bağlı kuvvetli genlik anomalileri gözlenmektedir. Bu modellerde kritik açılının gözlenmesinin nedeni hazne kayaç sismik hızlarının örtü kayaca kıyasla gözeneklilik artsa dahi hala yüksek olması ve gözeneklerde bulunan akışkanların toplam kayaç hızını çok fazla düşürmemesinden kaynaklanır.

Oluşturulan modellerde gözenekliliğin artması ile birlikte en değişken yansıma katsayıları doğalgaz içeren durumlarda görülmüştür. Doğal gazın petrole ve tuzlu suya kıyasla çok düşük olan yoğunluk ve hız değerleri bu durumun oluşmasındaki temel nedendir. Tuzlu su içeren modellerde ise gözeneklilikle birlikte yansıma eğrilerinde daha az değişimler olduğu görülmüştür. Ayrıca gözenek içeriklerinde tuzlu sudan doğalgaza geçişte P dalgası hızlarında azalma gözlenirken, doğalgaza geçişte S dalgası hızlarında artış olduğu görülmüştür. S dalgası hızındaki artışın nedeni kayaç gözenegindeki akışkanın değişmesine rağmen kesme modülünün değerinin değişmemesi ancak akışkana bağlı olarak doygun kayaç yoğunluğunun azalması veya artmasıdır. S dalgası hızı doygun kayacın yoğunluğunun akışkana bağlı olarak azaldığı bir durumda artacaktır.

Gözeneklilik oranı arttıkça yansıma genliklerinin tüm akışkan modelleri için genel olarak artı değerlerden eksi değerlere geçiş yaptığı görülmüştür. Gözenekliliğin yükselmesi ve kayaç akışkanının yoğunluğunun düşük olması genliklerin azalmasında büyük pay sahibidir. Böylece artan gözeneklilikle birlikte yansıma eğrilerinin farklı AVA sınıflandırma bölgelerinde yer alabilmektedir.

Seçilen kayaç örnekleri kıyaslandığında AVA eğri türlerinin farklılığına kayaç türünün ve kayaç gözenekliliğinin daha fazla etki ettiği görülmektedir. Gözenekliliğin AVA eğri türünü değiştirmedeki en büyük etkisi daha çok kumtaşı modelinde görülmektedir. Şeyl-kumtaşı modelinde gözenekliliğin %10 olduğu durumda 1. sınıf, %20 olduğu durumda 2. sınıf AVA eğrileri görülürken; %30 gözeneklilikte ise AVA sınıflandırılmasında yer almayan ve geliş açısının artmasıyla yansıma genliklerinin değişmediği bir eğri türü görülmüştür.

Gözenek akışkanının farklılığı, gözenek oranlarındaki farklılığın genlikler üzerinde yarattığı kadar bir değişiklik yaratmamaktadır. Akışkanların genliklere etkileri genel olarak tüm açılardaki değerlerin mutlak değerce azalması veya artması yönünde olmuştur.

Akışkanların oluşturulan modellerin yansıma eğrileri üzerinde belirgin farklar gösterememesi düz çözüm modellerinin oluşturulmasının önemini vurgulamıştır. Kuyu verilerinden elde edilecek bilgilerle düz çözüm modellerinin oluşturulması, benzer eğriler verebilen ancak farklı akışkanlar içeren yapıların ayırt edilmesine olanak tanır. Böylece, yapılan modellemeler ile saha verileri karşılaştırılarak akışkan tespiti mümkün olabilmektedir. Ayrıca kayaç türlerinin değişimi sonucu ortaya çıkan eğri türlerindeki farklılıklar AVO yönteminin litolojiye yönelik yorumlama yetisini ortaya çıkarmaktadır.



## KAYNAKLAR

- Al-Tahini, A. M., Sondergeld, C. H. ve Rai, C. S.,** (2007). Effect of cementation on ultrasonic velocities in sandstones, *Geophysics*, **72**, E53–E58.
- Avseth, P., Mukerji, T., Mavko, G. ve Tyssekvam, J. A.,** (2001). Rock physics and AVO analysis for lithofacies and pore fluid prediction in a North Sea oil field, *The Leading Edge*, **20**, 429-434.
- Avseth, P., Draege, A., van Wijngaarden, A., Johansen, T. A. ve Jørstad, A.,** (2008). Shale rock physics and implications for AVO analysis: A North Sea demonstration, *The Leading Edge*, **27**, 788-797.
- Bjørlykke, K.,** (2010). Petroleum Geoscience: From Sedimentary Environments to Rock Physics 1st Edition, Berlin, Springer.
- Castagna, J. P. ve Backus M. M.,** (1993). Offset-Dependent Reflectivity: Theory And Practice Of AVO, Vol.8 Of Investigations In Geophysics Series, Society of Exploration Geophysicists, Tulsa.
- Castagna, J. P. ve Swan H. W.,** (1997). Principles of AVO crossplotting, *The Leading Edge*, **16**, 337-344
- Chacko, S.,** (1989). Porosity identification using amplitude variations with offset: Examples from South Sumatra, *Geophysics*, **54**, 942-951.
- Eissa, M. A., Castagna, J. P., Leaver, A.,** (2003). AVO detection of gas-producing dolomite trends in nonproducing limestone, *The Leading Edge*, **22**, 462-468.
- Han, D., Nur, A. Ve Morgan, D.,** (1986). Effects of porosity and clay content on wave velocities in sandstones, *Geophysics*, **51**, 2093-2107.
- Han, D. ve Batzle, M. L.,** (2004). Gassmann's equation and fluid-saturation effects on seismic velocities, *Geophysics*, **69**, 398-405.
- Gassmann, F.,** (1951). Elastic Waves Through a Packing of Spheres, *Geophysics*, **16**, 673-685.
- Hilterman, F., Schuyver, C. V., ve Sbar, M.,** (2000). AVO examples of long-offset 2-D data in the Gulf of Mexico, *The Leading Edge*, **19**, 1200-1213.
- Koefoed, O.,** (1955). On the effect of Poisson's ratios of rock strata on the reflection coefficients of plane waves, *Geophysical Prospecting*, **3**, 381-387.
- Lynn, H. B. ve Simon, K. M., Bates C. R., Van Dok, R.,** (1996). Azimuthal anisotropy in P-wave 3-D (multiazimuth) data, *The Leading Edge*, **15**, 923-928.
- Nur, A., Mavko, G., Dvorkin, J. ve Galmudi, D.,** (1998). Critical porosity: A key to relating physical properties to porosity in rocks, *The Leading Edge*, **17**, 357-362.

- Ostrander, W. J.**, (1984). Plane-Wave Reflection Coefficients For Gas Sands At Nonnormal Angles Of Incidence, *Geophysics*, **49**, 1637-1648.
- Peddy, C. P. ve Sengupta, M. K., Fasnacht, T. L.**, (1995). AVO analysis in high-impedance sandstone reservoirs, *The Leading Edge*, **14**, 871-877
- PetroSkills, LLC**, (2003). AVO and Seismic Attributes: Principles and Applications BP Explorations Turkiye BV-Turkey Branch.
- Resnick, J. R., Patrick, N. Ve Larner, K.**, (1987). Amplitude Versus ofset analysis in the presence of dip, *Soc. Expl. Geopys., Expanded Abstracts 6*, S 10.2- S 10.4.
- Rutherford, S. R. Ve Williams R. H.**, (1989). Amplitu-versus-offset variations in gas sands, *Geophysics*, **54**, 680-688.
- Sbar, M. L.**, (2000). Exploration risk reduction: An AVO analysis in the offshore Middle Miocene, Central Gulf of Mexico, *The Leading Edge*, **19**, 20-27.
- Sengupta, M. K. Ve Rendleman C. A.**, (1991). Case Study: The importance of gas leakage in interpreting amplitude-versus-offset (AVO) analysis, *Geophysics*, **56**, 1886-1895.
- Shuey, R.T.** (1985). A simplification of the Zoeppritz equations, *Geophysics*, **50**, 609-614.
- Smith, S. W., Danahey, L., Himawan, R., Harmoni, W. E., Gilmore H. L. ve Armon J. W., Bowman, T. L., Smith, W.**, (1996). An example of 3-D AVO for lithology discrimination in Widuri Field, Asri Basin, Indonesia, *The Leading Edge*, **15**, 283-288.
- Snyder, A. G. ve Wrolstad, K. H.**, (1992). Direct detection using AVO, Central Graben, North Sea, *Geophysics*, **57**, 313-325.
- Thorbecke, J. ve Draganov, D.**, (2011). Finite-difference modelling experiments for seismic interferometry, *Geophysics*, **76**, H1-H18.
- Verwer, K., Braaksma, H. ve Kenter, J. A. M.**, (2008). Acoustic properties of carbonates: Effects of rock texture and implications for fluid substitution, *Geophysics*, **73**, B51–B65.
- Yu, G.**, (1985). Offset-amplitude variation and controlled-amplitude processing, *Geophysics*, **50**, 2697-2708.
- Zoeppritz, K.**, (1919). Erdbebenwellen VIII B, On The Reflection and Penetration of Seismic Waves Through Unstable Layers, *Goettinger Nachr.*, 66-84.

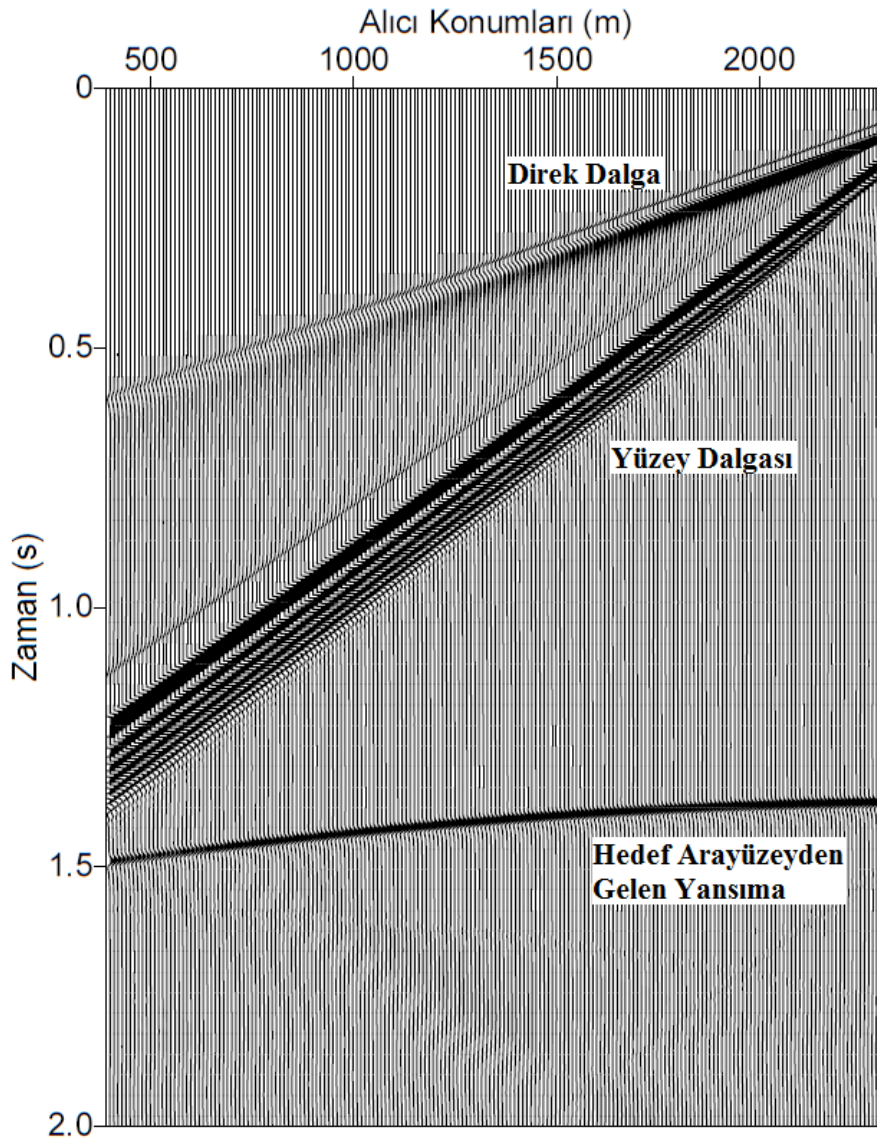
<http://www.crewes.org/ResearchLinks/ExplorerPrograms/FIPProp/FluidProp.htm>

## **EKLER**

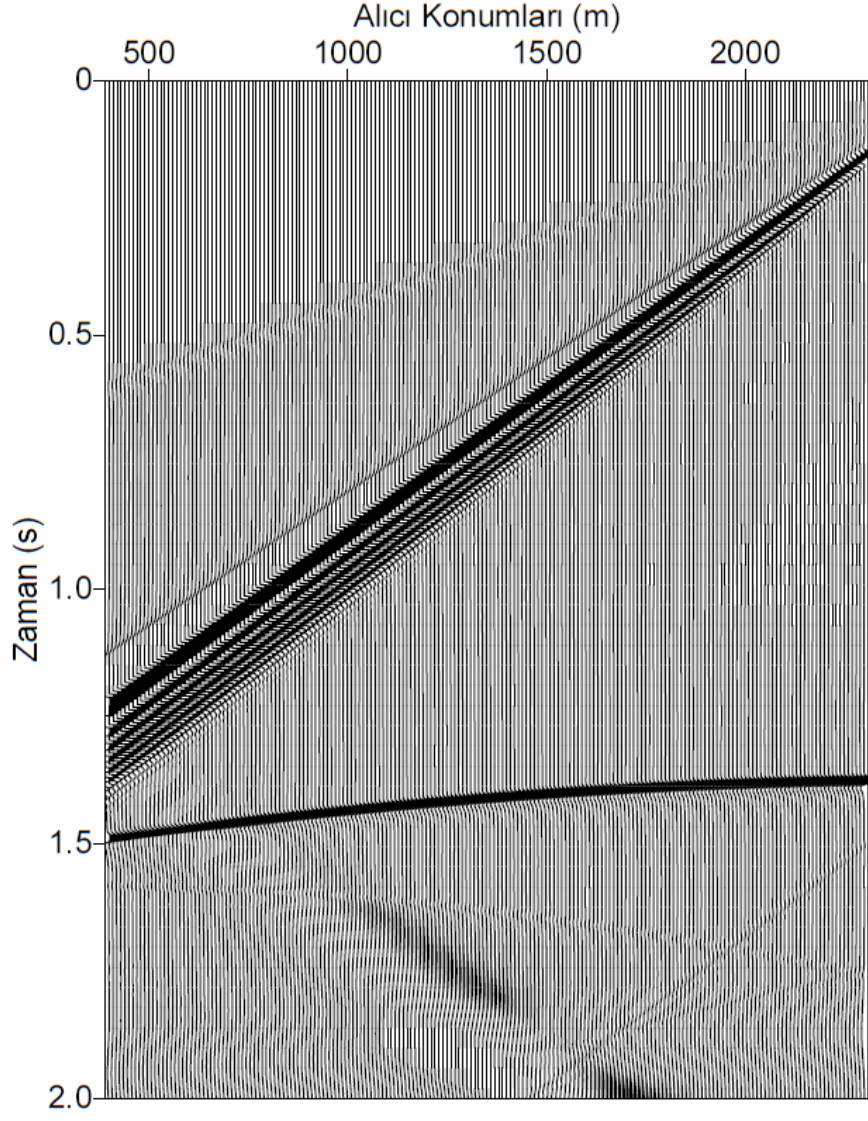
**EK A:** Seismix Unix’de gerekleştirilen veri işlem aşamaları

**EK B:** Yansıma Genliklerinin hesaplanmasıda kullanılan MATLAB kodu

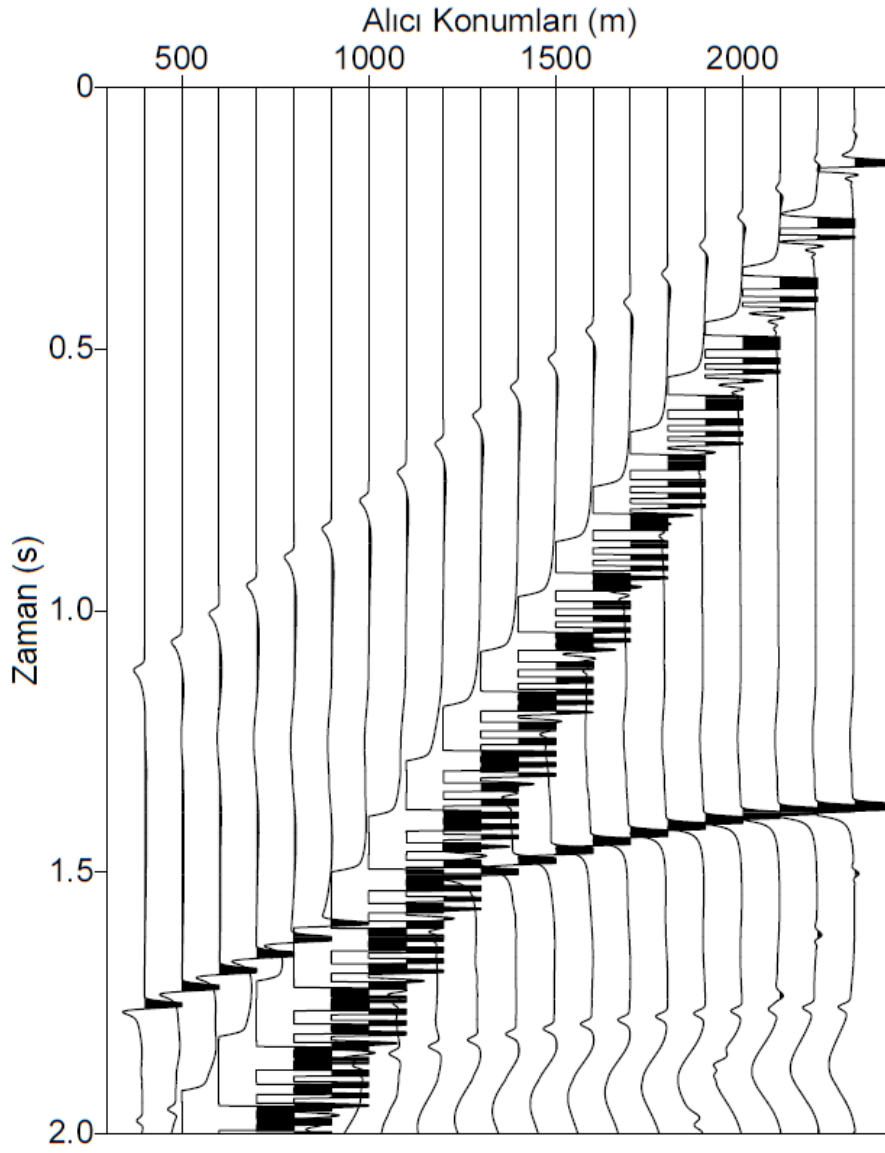
**EK A**



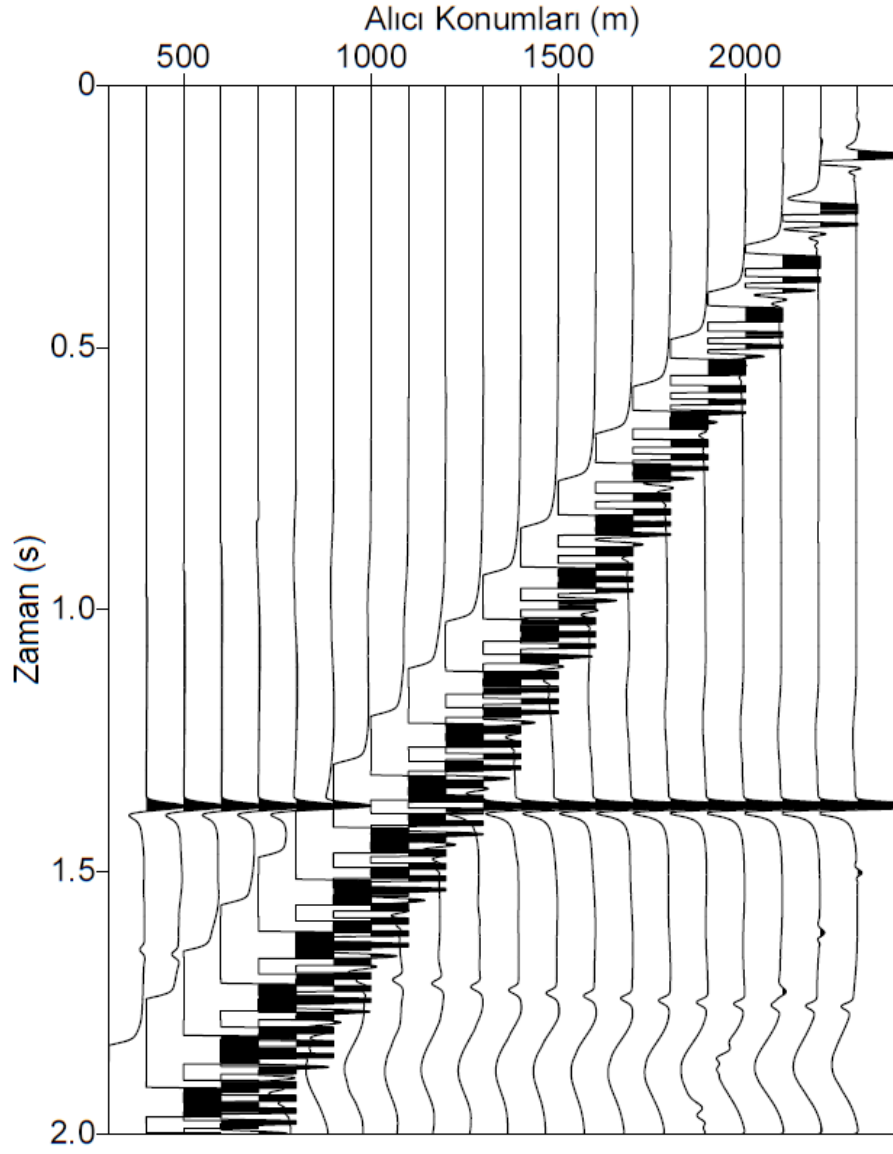
**Şekil A.1 :** Modelleme sonucu oluşan atış verisi.



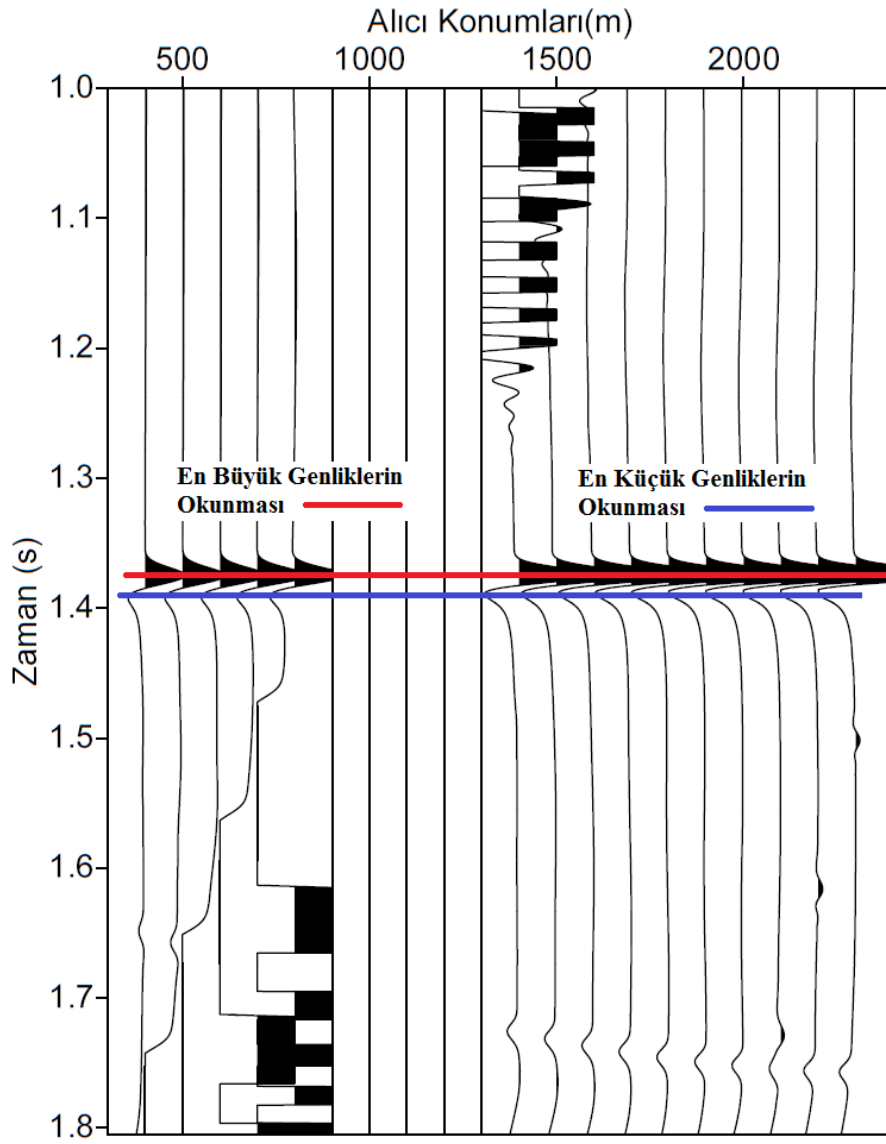
Şekil A.2 : Küresel açılım düzeltmesi yapılmış atış verisi.



Şekil A.3 : Ortak orta nokta verisi.



Şekil A.4 : NMO düzeltmesi yapılmış ortak orta nokta verisi.



Şekil A.5 : En büyük ve en küçük genliklerin okunduğu konumlar.



## EK B

% Yansıma Katsayılarını Hesaplayıp Çizen (Rp) Fonk

```
function [Port1, vp1, vs1, vp2, vs2, yog1, yog2] = yanskat_g(teta)
```

```
vp1 = 3750; vs1 = 1900; yog1 = 2350;
```

```
vp2m = 3830;  
vs2m = 2030;  
yog2m = 2350;  
por2 = 0.1479;  
yog2f = 204;  
vf2 = 644;  
por_cri = 0.4;  
yog2m = yog2m / (1 - por2);
```

```
M_dry = yog2m*(vs2m^2); %İskelet Kesme Kodülü  
K_dry = yog2m*(vp2m^2) - ((4/3)*(M_dry)); %İskelet Sıkışmazlık Modülü
```

```
A = 3.053;  
B = 3.070;  
C = 1.016;
```

```
K_min = K_dry / (1 - (A*por2) + (B * ((por2)^2)) - (C * ((por2)^3))); %  
Mineral Sıkışmazlık Modülü
```

```
K_flu = ((vf2)^2)*yog2f; % Gözenek Akışkanı Sıkışmaz Modülü  
M_min = M_dry / (1 - (por2/por_cri)); % Mineral Kesme Modülü
```

```
clear por2;  
por2 = 0.10:0.10:0.30;
```

```
for i=1:length(por2)
```

```
M_Dry = M_min * (1 - ((por2(i)) / por_cri)); % Kritik gözeneklilik modeli,  
modified voigt average  
K_Dry = K_min * (1 - (A * (por2(i))) + (B * ((por2(i))^2)) - (C * ((por2(i))^3)  
)); % Han ve Batzle 2004  
dK_Dry = (K_min * ((1 - (K_Dry/K_min))^2)) / (1 - por2(i) - (K_Dry/K_min)  
+ ((por2(i)) * K_min/K_flu)); % Han ve Batzle 2004  
K_sat = K_Dry + dK_Dry; % Han ve Batzle 2004
```

```
yog_sat = ((1 - por2(i)) * yog2m) + ((por2(i)) * yog2f)  
vp_sat = sqrt((K_sat + ((4/3)*M_Dry)) / yog_sat)  
vs_sat = sqrt(M_Dry/yog_sat)
```

```
poi1 = (((vp_sat/vs_sat)^2) - 2);  
poi2 = 2*(((vp_sat/vs_sat)^2) - 1);  
poi = poi1/poi2
```

```

vp2=vp_sat;
vs2=vs_sat;
yog2=yog_sat;

teta1 = teta; % P dalgası geliş açıları
teta2 = asin((sin(teta1).*vp2)./vp1); % iletilen p dalgasının açıları
fi1 = asin((sin(teta1).*vs1)./vp1); % yansıyan s dalgasının açıları
fi2 = asin((sin(teta1).*vs2)./vp1); % iletilen s dalgasının açıları
tekrar = length(teta1);

% P Dizeyi
p11 = -sin(teta1);
p12 = -cos(fi1);
p13 = sin(teta2);
p14 = cos(fi2);

p21 = cos(teta1);
p22 = -sin(fi1);
p23 = cos(teta2);
p24 = -sin(fi2);

p31 = 2.*yog1.*vs1.*sin(fi1).*cos(teta1);
p32 = yog1.*vs1.*(1 - 2.*((sin(fi1)).^2));
p33 = 2.*yog2.*vs2.*sin(fi2).*cos(teta2);
p34 = yog2.*vs2.*(1 - 2.*((sin(fi2)).^2));

p41 = -yog1.*vp1.*(1 - 2.*((sin(fi1)).^2));
p42 = yog1.*vs1.*sin(2.*fi1);
p43 = yog2.*vp2.*(1 - 2.*((sin(fi2)).^2));
p44 = -yog2.*vs2.*sin(2.*fi2);

% R Dizeyi
r11 = sin(teta1);
r12 = cos(fi1);
r13 = -sin(teta2);
r14 = -cos(fi2);

r21 = cos(teta1);
r22 = -sin(fi1);
r23 = cos(teta2);
r24 = -sin(fi2);

r31 = 2.*yog1.*vs1.*sin(fi1).*cos(teta1);
r32 = yog1.*vs1.*(1 - 2.*((sin(fi1)).^2));
r33 = 2.*yog2.*vs2.*sin(fi2).*cos(teta2);
r34 = yog2.*vs2.*(1 - 2.*((sin(fi2)).^2));

r41 = yog1.*vp1.*(1 - 2.*((sin(fi1)).^2));
r42 = -yog1.*vs1.*sin(2.*fi1);

```

```

r43 = -yog2.*vp2.*(1 - 2.*((sin(fi2)).^2));
r44 = yog2.*vs2.*sin(2.*fi2);

P=[p11 p12 p13 p14; ...
  p21 p22 p23 p24; ...
  p31 p32 p33 p34; ...
  p41 p42 p43 p44];

R=[r11 r12 r13 r14; ...
  r21 r22 r23 r24; ...
  r31 r32 r33 r34; ...
  r41 r42 r43 r44];

for a = 1:length(teta1)

    Q = [P(:,a) P(:,a + tekrar) P(:,a + 2.*tekrar) P(:,a + 3.*tekrar)] \ ...
        [R(:,a) R(:,a + tekrar) R(:,a + 2.*tekrar) R(:,a + 3.*tekrar)]; % Saçılma
    Dizeyi Q = inv(P)*R
    Port1(:,a) = Q(:,1); % Q değerindeki ilk sütunda bütün satırları her adımda
    yanına ekler

end

derece = (teta.*180)./pi;
kritik = asin(vp1/vp2);
kritik = (kritik.*180)./pi;

figure(1) % 1. Ortamdan P olarak gelen dalganın yansıma katsayıları
plot(derece,Port1(1,:), 'LineWidth',3);axis([0 40 -0.3 0.3]);hold on;grid on;
title('P Gelip P Yansıyan (1.-1.)','FontWeight','bold');
ylabel('Yansıma Katsayısı','FontWeight','bold');
xlabel('Geliş Açısı','FontWeight','bold');
plot([0 90], [0 0], '-k','LineWidth',2);
end

GG=Port1(1,:);
G=[derece',GG'];
dlmwrite('Zoep.txt',G,'delimiter','\t')
end

```



## ÖZGEÇMİŞ



**Ad Soyad: Volkan Uğur KARAGÖL**

**Doğum Yeri ve Tarihi: Kadıköy, 20.11.1986**

**Adres: Bostancı Mahallesi Camedevler Sokak Şeref Apt. No:4 D:2  
Kadıköy/İstanbul**

**E-Posta: vukaragol@gmail.com**

**Lisans: İstanbul Teknik Üniversitesi**

### **TEZDEN TÜRETİLEN YAYINLAR/SUNUMLAR:**

- **Karagöl, V. U., Kurt, H., 2011. Tabaka Gözenekliliğinin Sismik Yansıma Genliklerinin Açık İle Değişimine Etkisi, Türkiye 18. Uluslararası Petrol ve Doğalgaz Kongresi ve Sergisi, IPETGAZ, Ankara, Türkiye, 11-13 Mayıs 2011**