

**KARADENİZ TEKNİK ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

JEOFİZİK MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI

**SİSMİK VERİLERİN YÜKSEK AYRIMLI DEKONVOLÜSYONU VE AKUSTİK
EMPEDANS TERS ÇÖZÜMÜ**

YÜKSEK LİSANS TEZİ

Jeofizik Mühendisi Daniel ODJAM

KASIM 2016

TRABZON



KARADENİZ TEKNİK ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ



Karadeniz Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsünce

Unvanı Verilmesi İçin Kabul Edilen Tezdir.

Tezin Enstitüye Verildiği Tarih : / /

Tezin Savunma Tarihi : / /

Tez Danışmanı :

Trabzon

KARADENİZ TEKNİK ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

JEOFİZİK MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI
Daniel ODJAM Tarafından Hazırlanan

SİSMİK VERİLERİN YÜKSEK AYRIMLI DEKONVOLÜSYONU VE AKUSTİK
EMPEDANS TERS ÇÖZÜMÜ

başlıklı bu çalışma, Enstitü Yönetim Kurulunun 18/ 10 /2016 gün ve 1652 sayılı
kararıyla oluşturulan jüri tarafından yapılan sınavda
YÜKSEK LİSANS TEZİ
olarak kabul edilmiştir.

Jüri Üyeleri

Başkan : Prof. Dr. Hakan KARSLI

Üye : Doç. Dr. Serkan ÖZTÜRK

Üye : Yrd. Doç. Dr. Ali Erden BABACAN



Prof. Dr. Sadettin KORKMAZ

Enstitü Müdürü

ÖNSÖZ

Karadeniz Teknik Üniversitesi Jeofizik Mühendisliği Bölümü'nde bulunduğum ilk günden bugüne danışmanlığımı yapan, vermiş olduğu destek, göstermiş olduğu sabır ve yapmış olduğu rehberlik için Prof. Dr. Hakan KARSLI'ya teşekkür ediyorum. Ters çözüm teorisi hayata bakışıma, düşüncelerime ve fikirlerime yeni ufuklar açmıştır. Bu nedenle benim için yapmış olduklarından dolayı da Prof. Dr. Hakan KARSLI'ya müteşekkirim. Allah şimdi ve her zaman sizi korusun.

Bölümdeki tüm hocalarıma, özellikle bölüm başkanımız Prof. Dr. Nilgün SAYIL'a, bu bölümde kaldığım sürece desteklerinden dolayı derin şükranlarımı ifade etmek istiyorum. Ayrıca, Gülseda VANLI ŞENKAYA'ya, Araş. Gör. Mustafa ŞENKAYA'ya, Araş. Gör. Recep GÜNEY ve Araş. Gör. Kaan Hakan ÇOBAN'a ve bölümdeki tüm diğer araştırma görevlilerine içten destekleri ve teşvikleri için teşekkürler.

Aileme, tüm rehberlikleri ve destekleri için çok teşekkürler. Son olarak, Karadeniz Teknik Üniversitesi'ndeki tüm arkadaşlarıma teşekkür ediyorum.

Daniel ODJAM

Trabzon 2016

TEZ ETİK BEYANNAMESİ

Yüksek Lisans Tezi olarak sunduğum ‘Sismik Verilerin Yüksek Ayrımlı Dekonvolüsyonu ve Akustik Empedans Ters Çözümü’ başlıklı bu çalışmayı baştan sona kadar danışmanım Prof. Dr. Hakan KARSLI’ın sorumluluğunda tamamladığım, verileri kendim topladığımı, analizleri ilgili laboraturalarda yaptığımı, başka kaynaklardan aldığım bilgileri metinde ve kaynakçada eksiksiz olarak gösterdiğimi, çalışma sürecinde bilimsel araştırma ve etik kurallara uygun olarak davrandığımı ve aksinin ortaya çıkması durumunda her türlü yasal sonucu kabul ettiğimi beyan ederim. 04/11/2016

Daniel ODJAM

İÇİNDEKİLER

Sayfa No

ÖNSÖZ	III
TEZ ETİK BEYANNAMESİ.....	IV
İÇİNDEKİLER.....	V
ÖZET.....	VIII
SUMMARY.....	IX
ŞEKİLLER DİZİNİ.....	X
SEMBOLLER DİZİNİ.....	XIII
1. GENEL BİLGİLER	1
1.1. Giriş.....	1
1.2. Yansıtabilirlik ve Empedans.....	6
1.3. Konvolüsyon, Dekonvolüsyon ve Empedans İlişkisi.....	9
1.4. Sismik Ters Çözümünün Faydaları.....	12
1.5. Literatür İncelemesi.....	15
1.6. Tezin Amacı.....	18
1.7. Tez Bölümleri.....	18
2. YÖNTEM.....	19
2.1. Ters Çözüm Problemi	19
2.2. Ayrık Ters Çözüm Teorisi	21
2.2.1. Ayrık Ters Çözümü Teorisinin Sınıflandırılması	21
2.2.1.1. Tam-Tanımlı (Even Determined) Problem.	22
2.2.1.2. Aşırı-Tanımlı (Over Determined) Problem.....	23
2.2.1.3. Eksik-Tanımlı (Under Determined) Problem.....	24
2.2.1.4. Kötü-Yapılı (ill-posed) Problem.....	26
2.3. Quadratik Sınırlamaları	28
2.4. Ağırlıklandırma Fonksiyonu	28

2.4.1.	Ağırlıklandırma Matrislerini Kullanarak Sınırlamaları	29
2.5.	Ayrık Ters Problemin Çözümü	31
2.5.1.	Doğrudan Algoritma.....	31
2.5.2.	Yinelemeli (İteratif) Doğrusal Yöntemler	31
2.5.2.1.	Eşlenlik Gradyan Algoritması	32
2.6.	Yüksek Ayrımlı Quadratik Olmayan Regülarizasyonu.....	34
2.7.	Bayes Teoremi	34
2.7.1.	Bayes Teoremini Kullanarak SEKK Çözümün Türetmesi	35
2.8.	Cauchy Ön-dağılımının MAP Çözümü	38
2.9.	Doğrusal Olmayan Problemin Çözülmesi	42
2.9.1.	YYAEKK ile Doğrusal Olmayan Ters Problemlerin Çözümü	42
2.10.	Yinelemeli ve Bant Sınırlı Empedans (BSEMP) Ters Çözümü Yöntemleri....	47
3.	YAPILAN ÇALIŞMALAR.....	52
3.1.	Tek Boyutlu Sentetik Sismik İz	52
3.1.1	Sismik İzinden Yansıma Katsayılarının Hesaplanması.....	53
3.1.2	Yansıma Kesitlerinden Akustik Empedans Kesitlerinin Hesaplanması	54
3.2.	İki Boyutlu Sentetik Sismik Verileri	54
3.3.	İki Boyutlu Arazi Verisi	54
4.	BULGULAR VE TARTIŞMA.....	56
4.1.	Bulgular	56
4.1.1.	Tek Boyutlu Sentetik Sismik Veriler	56
4.1.1.1.	Dekonvolüsyon ile Yüksek Ayrımlı Yansıma Kesiti	59
4.1.1.2.	Akustik Empedans Ters Çözümü	67
4.1.1.3.	Sönüm Parametresinin Etkisi ve Empedans Doğruluğu	70
4.1.2.	İki Boyutlu Sentetik Sismik Verileri	72
4.1.3.	İki Boyutlu Arazi Sismik Verisi	75
4.1.3.1.	Yüksek Ayrımlı Yansıma Görüntüsü	75
4.1.3.2.	Akustik Empedans Görüntüsü	78
4.2.	Tartışma	80
5.	SONUÇLAR.....	83

6.	KAYNAKLAR.....	84
	ÖZGEÇMİŞ.....	



Yüksek Lisans Tezi

ÖZET

SİSMİK VERİLERİN YÜKSEK AYRIMLI DEKONVOLÜSYONU VE AKUSTİK EMPEDANS TERS ÇÖZÜMÜ

Daniel ODJAM

Karadeniz Teknik Üniversitesi
Fen Bilimleri Enstitüsü
Jeofizik Mühendisliği Anabilim Dalı
Danışman: Prof. Dr. Hakan KARSLI
2016, 89 Sayfa.

Sismik yansıma verilerinin yüksek ayrımlı dekonvolüsyonu ve akustik empedans ters çözümü, yeraltı yapılarının geometrisini ve fiziksel özelliklerini açıklamak için son derece önemlidir. Yüksek ayrımlı dekonvolüsyon sonuçları yerin yansıtma katsayısı serisi olarak göz önüne alınır. Ancak, sismik verilerin gürültü içeriği arttığı zaman en küçük kareler ve kvadratik regülarizasyon yöntemleri gibi ters çözüm yöntemleri çoğunlukla güvenilir olmayan ve düşük kalitede sonuçlara neden olurlar. Bu tez kapsamında, yüksek ayrımlı dekonvolüsyon ve güvenilir akustik empedans sonuçlar üretmek için Cauchy norm regülarizasyon ters çözümü kullanılmıştır. Bu yöntem, yüksek gürültüye karşı etkilidir ve yüksek doğrulukta empedans hesaplayı sağlar. Cauchy olasılık yoğunluk fonksiyonuna bağlı olan Cauchy norm regülarizasyon bir ön bilgi olarak çözüme dahil edilir ve çözümü seyrek olmaya zorlar. Ters çözüm algoritması yinelemeli yeniden ağırlıklandırılmış en küçük kareler çözümüdür ve çözümün kalitesi ters çözüm matrisine başlangıçta Cauchy norm regülarizasyon ön bilgisi (köşegen matris) eklenerek (çözümü kısıtlama yada ön şartlandırma) geliştirilmiştir. Böylece başlangıçta kısıtlanan çözüm, her bir yineleme sonucunda Cauchy norm regülarizasyonun ağırlıklandırılması ile tamamlanır. Yüksek ayrımlı dekonvolüsyon sonuçlarının ardışık ve bant sınırlı integrasyonu akustik empedans yüksek ayrımlı, güvenilir ve doğru empedans izlerinin hesaplanmasını sağlamıştır.

Anahtar Kelimeler: Cauchy norm regülarizasyon, Yüksek ayrımlı dekonvolüsyonu, Akustik empedans ters çözümü, Sismik yansıma verisi, Yansıtma katsayısı serisi

Master Thesis

SUMMARY

**HIGH RESOLUTION DECONVOLUTION AND ACOUSTIC IMPEDANCE
INVERSION OF SEISMIC DATA**

Daniel ODJAM

Karadeniz Technical University
The Graduate School of Natural and Applied Sciences
Geophysics Engineering Department
Supervisor: Prof. Dr. Hakan KARSLI
2016, 89 Pages.

High resolution deconvolution and acoustic impedance inversion of seismic reflection data is extremely important in order to describe the geometry and the physical properties of subsurface structures. High resolution deconvolution results are taken as the reflectivity coefficient series of the earth. However, when the content of the seismic data noise is increased, traditional inversion methods such as the least squares and quadratic regularization methods mostly lead to unreliable and low quality results. In this thesis, in order to produce high resolution deconvolution and reliable acoustic impedance results Cauchy norm regularization inversion method was used. This method, has high anti-noise ability and provides high impedance accuracy. Based on Cauchy probability density function, a prior information was included into the Cauchy norm regularization to enforce sparseness. An iterative re-weighted least squares (IRLS) algorithm was used and the quality of the solution was improved by adding Cauchy norm regularization prior information (diagonal matrix) at the start of the inversion matrix. On every iteration result, the solution was weighted. The respective results of the high resolution deconvolution were transformed into high resolution, reliable and accurate acoustic impedance traces using inversion algorithms.

Key Words: Cauchy norm regularization, High resolution deconvolution, Acoustic impedance inversion, Seismic reflection data, Reflectivity coefficient series

ŞEKİLLER DİZİNİ

Sayfa No

Şekil 1.1. Kara alanında sismik yansımaya çalışması (URL-1).....	1
Şekil 1.2. Deniz alanında sismik yansımaya çalışması (URL-1).....	2
Şekil 1.3. Sismik yansımaya yönteminde (a) Kaynak-alıcı geometrisi ve yansımaya ışın yolları (b) Herbir alıcıda kaydedilen sismik izler	4
Şekil 1.4. Çok atışlı bir düzenden elde edilen (a) Ortak orta nokta kaynak alıcı çiftleri, (b) Herbir alıcıda kaydedilen izler AN _i : Herbir atış (veya kaynak) noktası.....	5
Şekil 1.5. Ortak orta nokta için yığma izinin elde edilme işlemi (a) OON iz ailesinin oluşturulması (b) Normal kayma zamanı (NKZ) düzeltilmesi ile tüm yansımalar normal geliş yoluna indirgenmiştir (c) Aynı yansımaya noktasına ait NKZ düzeltilmiş izler üst üste yığılarak yığma izi elde edilmiştir	6
Şekil 1.6. Bir arayüzeyde normal geliş durumu için yansımaya ve iletim	7
Şekil 1.7. Tabakalı bir yer modeli için yansıtabilirlik serisi ve akustik empedansının temsili gösterimi.....	9
Şekil 1.8. Konvolüsyon, dekonvolüsyon ve empedans ilişkisinin temsili gösterimi	10
Şekil 1.9. Jeolojik formasyonların arasındaki sınırları gösteren sismik yansımaya kesiti.....	13
Şekil 1.10. Jeolojik formasyonlar içinde litolojik birimleri (burada bu birimler kumlar olarak yorumlanmıştır) gösteren empedans kesiti. Kum aralıkları mavi /mor rengi ile gösterilmektedir	14
Şekil 1.11. Akustik empedans kesiti	14
Şekil 2.1. Farklı varyanslara göre Cauchy olasılık dağılım fonksiyonu	45
Şekil 2.2. En küçük kareler, quadratik, ve quadratik olmayan çözümlerin yansımaya serileri	46

Şekil 4.1. (a) Hız modeli (b) yoğunluk modeli (c) Empedans modeli (Hız x yoğunluk) (d) Sentetik sismik modelin yansımaya katsayıları	56
Şekil 4.2. Sıfır ve minimum fazlı Ricker dalgacığı. Merkez frekansı 20 Hz, örnekleme zamanı 4ms'dir.....	57
Şekil 4.3. Giriş sismik izi.....	58
Şekil 4.4. Gelişigüzel gürültü içeren sismik iz (S/G =5)	59
Şekil 4.5. EKK dekonvolüsyon yöntemi ile elde edilen sonuç izi.....	60
Şekil 4.6. L-eğrisi veya regülarizasyon parametre optimizasyon eğrisi	61
Şekil 4.7. Quadratik regülarizasyon yöntemi için yansımaya katsayıları izi.....	62
Şekil 4.8. (a) Yansımaya modeli (b) Cauchy norm regülarizasyonu için yansımaya katsayıları.....	63
Şekil 4.9. Yansımaya katsayısı modelinin genlik spektrumu	64
Şekil 4.10. Gürültüsüz giriş izinin genlik spektrumu	64
Şekil 4.11. Gelişigüzel gürültülü sismik izinin genlik spektrumu	65
Şekil 4.12. En küçük kareler çözümünden elde edilen yansımaya katsayısı izinin genlik spektrumu.....	65
Şekil 4.13. Quadratik regülarizasyon çözümünden elde edilen yansımaya katsayısı izinin genlik spektrumu.....	66
Şekil 4.14. (a) Yansımaya katsayısı modelinin genlik spektrumu (b) Cauchy norm regülarizasyon çözümünden elde edilen yansımaya izinin genlik spektrumu.....	66
Şekil 4.15. En küçük kareler için akustik empedans izi	67
Şekil 4.16. Quadratik regülarizasyon için akustik empedans izi	68
Şekil 4.17. Cauchy norm regülarizasyon için akustik empedans izi	69

Şekil 4.18. (a) Model yansıma katsayıları (b) Giriş sismik izi ve yeniden hesaplanan sismik iz (c) $S/G = 0.9$ olan sismik iz (d) EKK (e) Quadratik regülarizasyon (f) Cauchy norm regülarizasyon ile elde edilen dekonvolüsyon sonuçları.....	70
Şekil 4.19. (a) EKK (b) Quadratik regülarizasyon (c) Cauchy norm regülarizasyon ile elde edilen sismik izlerinden hesaplanan akustik empedans izleri.....	71
Şekil 4.20. (a) Model yansıma katsayıları (b) Giriş sismik izi ve yeniden hesaplanan sismik iz (c) $S/G = 10$ olan sismik iz (d) EKK (e) Quadratik regülarizasyon (f) Cauchy norm regülarizasyon ile elde edilen dekonvolüsyon sonuçları.....	71
Şekil 4.21. (a) EKK (b) Quadratik regülarizasyon (c) Cauchy norm regülarizasyon ile elde edilen sismik izlerinden hesaplanan akustik empedans izleri	72
Şekil 4.22. (a) İki boyutlu sentetik sismik verileri (b) f-k spektrumu	73
Şekil 4.23. (a) EKK dekonvolüsyon sonucu (b) f-k spektrumu	73
Şekil 4.24. (a) Quadratik dekonvolüsyon sonucu (b) f-k spektrumu	74
Şekil 4.25. (a) Cauchy norm regülarizasyon sonucu (b) f-k spektrumu.....	75
Şekil 4.26. (a) 2B arazi sismik yığma verisi (b) EKK (c) Quadratik regülarizasyon (d) Cauchy norm regülarizasyon dekonvolüsyon sonuçları.....	76
Şekil 4.27. (a) 2B arazi sismik yığma verisinin, (b) EKK (c) Quadratik regülarizasyon (d) Cauchy norm regülarizasyon dekonvolüsyon sonuçlarının f-k spektrumları.....	77
Şekil 4.28. (a) Şekil 4.26'daki sismik yığma kesitinin 32 nolu sismik izi (b) Cauchy norm regülarizasyon sonucu (c) Tahmin edilen (d) Giriş ve dekonvolüsyon sonuçlarının karşılaştırılması.....	78
Şekil 4.29. (a) EKK (b) Quadratik regülarizasyon (c) Cauchy norm regülarizasyon ile elde edilen akustik empedans kesitleri.....	79

SEMBOLLER DİZİNİ

A_{in}	: Gelen dalganın genliği
A_{refl}	: Yansıma dalganın genliği
Q_{ii}	: Ana diyagonal matris elemanları
r_{L2}/m_{LS}	: En küçük kareler için yansıma katsayıları
$r_{nq}/m_{nq}/\tilde{m}$: Cauchy regülarizasyon için yansıma katsayıları
r_q/m_q	: Quadratik regülarizasyon için yansıma katsayıları
σ^2	: Gürültülerin varyansı
σ_m^2	: Model parametrelerin varyansı
*	: Konvolüsyon
∇	: Laplace/türevsel operatörü
α	: Oransal
B	: Boyutlu
BSEMP	: Bantsınırlı empedans ters çözümü
d	: Gözlenen sismik verileri
D_1	: Birinci derece quadratik regülarizasyonu
D_2	: İkinci derece quadratik regülarizasyonu
Dip	: Olumsuz yansıma katsayıları
d_k	: Ölçeklenmiş sismik iz
EG	: Eşlenlik gradyan
EKK	: En küçük kareler
EKKEG	: En küçük kareler eşlenik gradyan
F (m)	: Cauchy Regülarizasyon fonksiyonu
FWI	: Tam dalga ters çözümü
G	: Çekirde matrisi

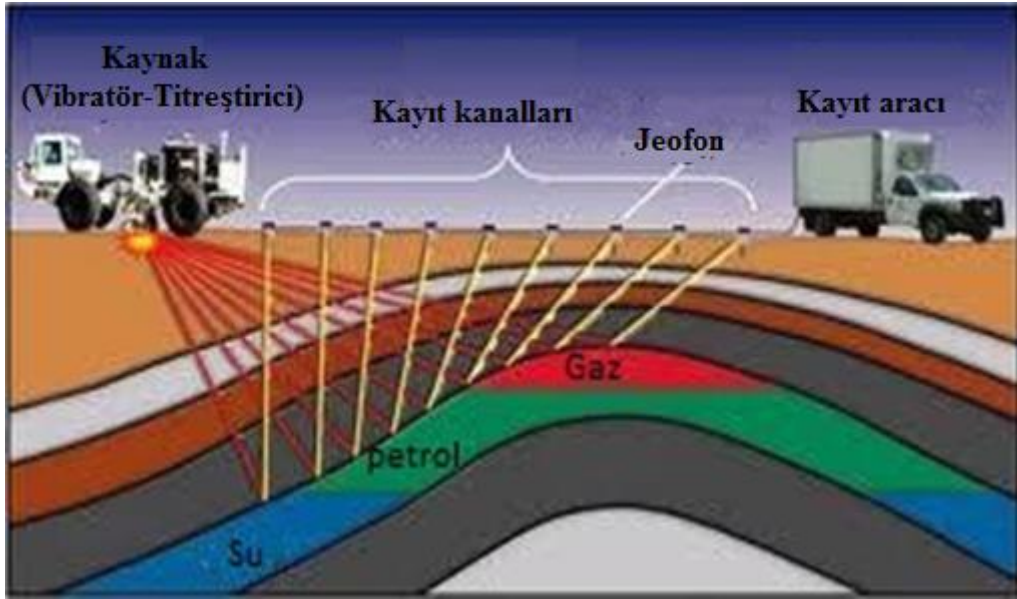
G^{-1}	: Dalga ayrışım operatörü
Hz	: Hertz, frekans ölçüsü
Z	: Akustik Empedans
J(m)	: Amaç/Objektif fonksiyonu
Kg	: Kilogram
L1	: Mutlak hata
L2 norm	: En küçük kareler-EKK-hatası
m	: Metre
MAP	: Maksimum ön tahminci
MatLab	: Matris laboratuvar yazılımı
n	: Gürültü
NKZ	: Normal kayma zamanı
ODN	: Ortak derinlik noktası
ÖŞEG	: Önşartlandırılmış (preconditioned) eşlenik gradyan
OON	: Ortak ortan nokta
P (d)	: Gözlenen verilerin olasılık dağılımı
P (m)	: Model parametrelerin olasılık dağılımı
P (m, d)	: Model ve gözlenen verileri için olabilirlik fonksiyonu
Q	: Diyagonal matrisi
R	: Yansıma katsayıları
r, m	: Yer model parametre/yansıma katsayıları
s	: Saniye
S/G	: Sinyal gürültü oranı
SAIL	: Sismik yaklaşım empedans logu
SEKK	: Sönümlü en küçük kareler çözümü
t	: Zaman vektörü
T	: Transpoz

Tepe	: Olumlu yansıma katsayıları
W	: Ağırlıklandırma matrisi
w(t)	: Dalgacık
YYAEKK	: Yinelemeli yeniden ağırlıklandırılmış en küçük kareler
λ	: Larange çarpanı
v	: Dalga hızı
γ	: Skaler faktörü
μ	: Al-ver/Ağırlıklandırma parametresi
ρ	: Yoğunluk

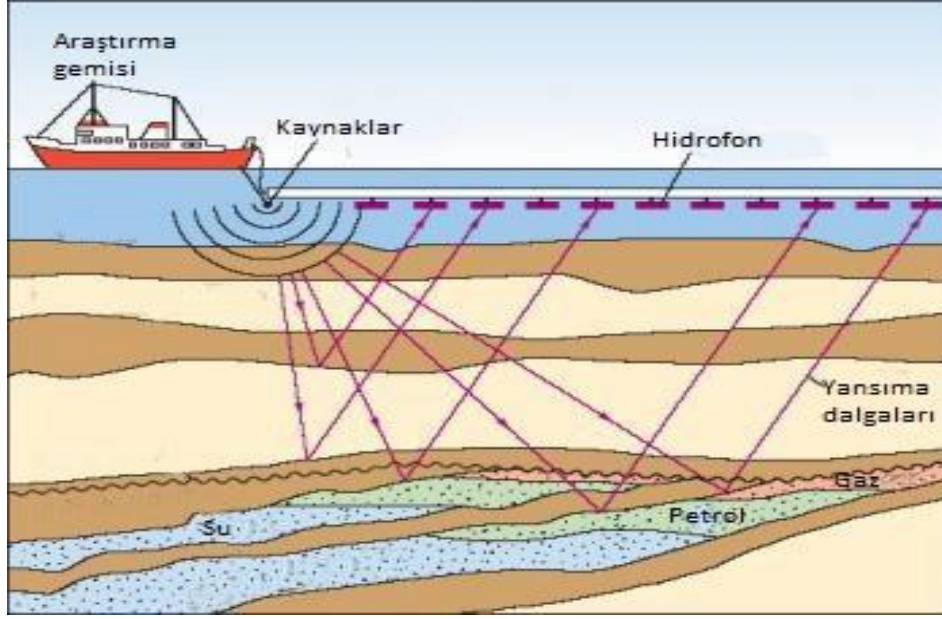
1. GENEL BİLGİLER

1.1. Giriş

Hidrokarbon (petrol ve gaz) içeren yeraltı yapılarının keşfi için sismik ölçüm yöntemleri 1920'li yıllardan beri kullanılmaktadır. Sismik ölçüm yöntemleri, sismik dalgaların tabaka sınırlarındaki kritik kırılma esasına dayanan sismik kırılma ve aynı sınırlardan yansıma esasına dayanan sismik yansıma olmak üzere iki grupta incelenmektedir. Aletsel ve bilgisayar teknolojilerindeki gelişmelere bağlı olarak sismik yansıma yöntemi ile yeraltı yapılarının detaylı incelenmesinde önemli ilerlemeler kaydedilmiş ve günümüzde kara ve deniz alanlarında hidrokarbon aramacılığının vazgeçilmez yöntemi olmuştur. Şekil 1.1'de ve Şekil 1.2'de petrol veya gaz içeren yapıların keşfi için sismik yansıma çalışmaları gösterilmiştir.



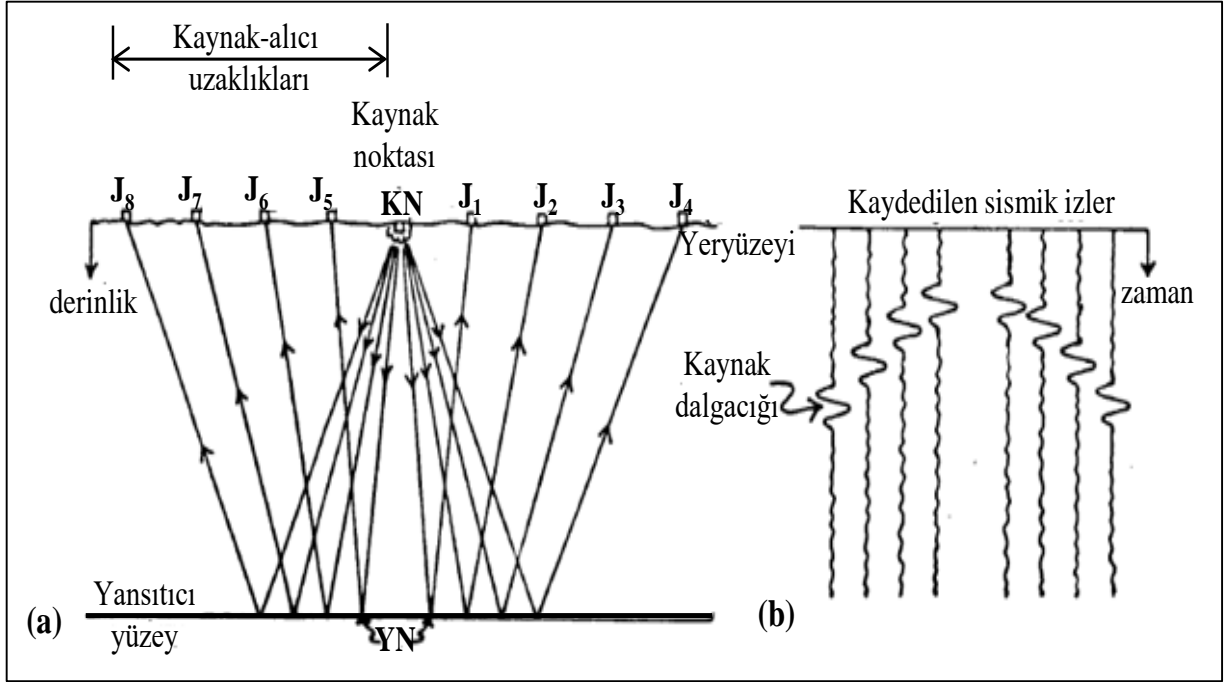
Şekil 1.1. Kara alanında sismik yansıma çalışması (URL-1)



Şekil 1.2. Deniz alanında sismik yansımalar çalışması (URL-1)

Bu ölçümlerde yüzeydeki veya yüzeyin belirli derinliğinden bir kaynak sayesinde üretilen sismik dalgalar (ses dalgaları) kaya ve hidrokarbon içeren tabakalar içerisinde yayılarak yüzeydeki alıcılarda zamanın fonksiyonu olarak kaydedilir. Sismik dalgalar, farklı yoğunluklardaki ve hızlardaki kayaların içinde seyahat eder ve yüzeye geri yansır. Kaydedilen sismik yansımalar dalgalarının kayıt süreleri ve genlikleri incelenerek ölçüm yapılan alanın jeolojik yapısı yorumlanabilir, ancak bu yorumlar yeraltının yapısı hakkında her zaman tam olarak bilgi sağlayamaz ve belirli koşullar (uyumlu ve uyumsuz gürültüler) altında yanıltıcı olabilir. Bununla birlikte, sismik yansımalar verilerinin hem toplanmasında hem de yorumlanmasında en önemli problem yansımalar seviyelerinin ayrılabilirliğidir. Bu, kullanılan sismik kaynağın gücü, frekans bant genişliği ve tabakaların kalınlığı ile doğrudan ilişkilidir ve sismik yansımalar verileri çoğunlukla düşük ayrımlıdır. Yerin tabakalı ortamının sismik tepkisi yansıtma katsayıları ile temsil edilir ve yansıtma katsayıları yansıtıcı seviyenin altındaki ve üstündeki akustik empedansların (hız x yoğunluk) oranı ile ilişkilidir. Hız ve yoğunluk parametreleri bir tabakanın fiziksel özelliklerini gösterir ve büyüklük küçüklüklerine göre tabakanın jeolojik yapısı hakkında yorum yapmaya imkan sağlar (Oldenburg ve Li, 2005).

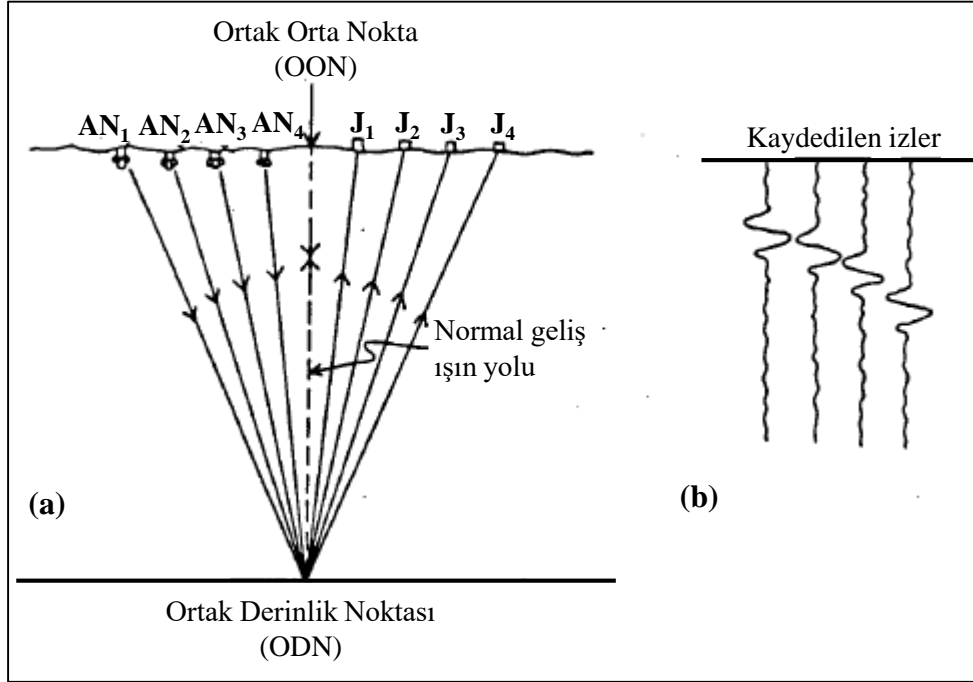
Sismik yansıma yöntemi ve ilişkili terminolojisi hakkında kısa bir bilgilendirme aşağıda verilmiştir. Sismik kaynak enerjisi sismik dalgacık olarak tanımlanır ve yer yüzeyinde eşit aralıklar dizilmiş olan alıcılarda kaydedilen yansıma sinyalleri bu dalgacıkların yansımalarından oluşur. Yansımanın basit kanunlarına (yatay yansıtıcılar) uygun olarak, yansıma noktası (YN) kaynak-alıcı arası mesafenin orta noktasının yansıtıcı üzerindeki izdüşüm noktasındadır (Şekil 1.3a) ve kaydedilen izler eşit aralıklarla dizili olan alıcılarda kaydedilir (Şekil 1.3b). Sabit bir kaynak geometrisi ardısıra atışlar için ilettilerek, farklı kaynak-alıcı uzaklıklarında aynı ortak noktadan yansımalar (Şekil 1.4a) biraraya getirilerek ortak orta nokta (OON; common midpoint-CMP) iz aileleri oluşturulur (Şekil 1.4b). Yatay yansıtıcı durumunda, OON ortak derinlik noktası (ODN, common depth point-CDP) ile eşit uzaklıktadır. OON grubundaki izlerin sayısı katlanma (folding number) sayısı olarak tanımlanır ve sinyal/gürültü (S/G) oranını belirler. OON grubundaki izler üzerindeki aynı yansıtıcıya ait yansımalar arasında farklı uzaklıklardan dolayı zaman farkları vardır ve bu zaman farkları normal kayma zamanı (NKZ, normal moveout-NMO) olarak gözönüne alınır (Şekil 1.5a). Herbir izdeki bu zaman farklılıkları düzeltilerek normal geliş zamanına (arayüzeye dik-gidiş geliş zamanı) eşleştirildikten sonra (Şekil 1.5b), bütün izler S/G oranını artırmak için aritmetik olarak üstüste toplanır veya yığılır (stacked) ve elde edilen yığılma izi kaynak-alıcı orta noktasına yerleştirilir (Şekil 1.5c). Bu şekildeki sismik iz yığılma sonrası (post-stack) iz olarak isimlendirilir ve bu tez kapsamında gözönüne alınacak izi temsil etmektedir.



Şekil 1.3. Sismik yansıma yönteminde (a) Kaynak-alıcı geometrisi ve yansıma ışın yolları, (b) Herbir alıcıda kaydedilen sismik izler. KN: kaynak (veya) atış noktası, YN: yansıma noktası, J_i : alıcılar (veya jeofonlar). Yansıma dalgalarının arayüze gidiş-gelişi “iki yol” olarak ifade edilir ve bu nedenle genel olarak sismik izlerin çiziminde zaman eksenini “iki yol zamanı (two way time)” olarak belirtilir. Sismik yansıma çalışmalarında “derinlik” birimleri metre (m) veya kilometre (km) ($1\text{km}=1000\text{m}$) ve “zaman” birimleri saniye (s veya sec) veya milisaniye (ms veya msec) ($1\text{s}=1000\text{ms}$) mertebelerinde kullanılır.

Normal geliş sismik izinden böyle bir yansıtabilirlik bilgisinin elde edilmesi birçok kabulü ve ardısıra işlem adımlarını içerir. Kaydedilen bir sismik iz aşağıda sıralanan etkileri içermektedir:

- (1) Geometrik açılım, anelastik soğurma ve tabakalı bir ortamda sınır boyunca geçiş kayıplarından dolayı enerji kayıpları
- (2) Dispersiyon
- (3) Kaynak türü ve kaynak civarı etkileşimi
- (4) Arazi geometrisi ve dizilim tepkileri
- (5) Tekrarlı yansımalar ve uyumlu gürültü
- (6) Sismik izin matematiksel modeli



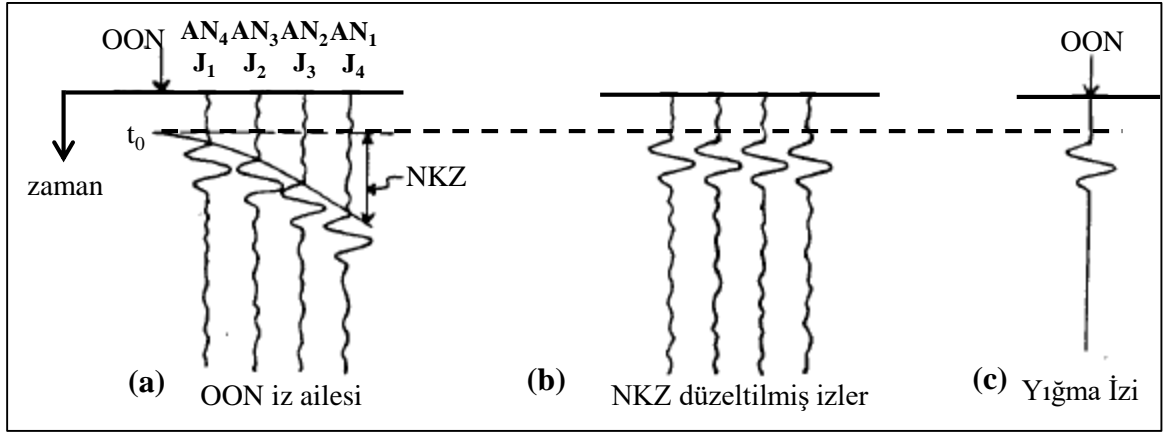
Şekil 1.4. Çok atışlı bir düzenden elde edilen (a) Ortak orta nokta kaynak alıcı çiftleri, (b) Herbir alıcıda kaydedilen izler. AN_i: Herbir atış (veya kaynak) noktası

Bu problemlerin çözümleri bu tez kapsamında değildir. Detaylı analizler ve anlatımlar Yılmaz (2001)'de bulunabilir. Dolayısıyla, sismik verilerin bu etkiler giderilecek şekilde işlendiği ve sismik izin, $d(t)$, tabakalı ortamın yansıtabilirlik serisi, $r(t)$ ile kaynak dalgacığının, $w(t)$, konvolüsyonu ve ilave olarak gelişigüzel gürültüsü, $n(t)$, eklenmiş olarak temsil edildiği kabul edilmiştir. Yani normal geliş sismik izleri, takip eden konvolüsyonal model ile açıklanır:

$$d(t)=r(t)*w(t)+n(t) \quad (1.1)$$

Burada (*) işareti konvolüsyonu gösterir. Denklem (1.1)'e göre sismik verilerden yeraltının yansıtma katsayısı (veya yansıtabilirlik) serisinin, $r(t)$, ve dolayısıyla bu serinin basit anlamda integrali ile empedans değişiminin elde edilmesi işlemi "sismik ters çözüm" olarak isimlendirilir ve bu ters çözüm işleminin başarılı bir şekilde gerçekleştirilmesi yeraltı tabakalı yapısının yüksek doğrulukla elde edilmesini sağlar. Bu nedenle, sismik verilerin ayrımlılığını ve güvenilirliğini artırmak için sismik yansıma verilerinin ters

çözümü yaygın olarak kullanılmaktadır. Bunun ötesinde, sismik ters çözüm, sismik yansıma verilerinden jeolojik yapıyı ve fiziksel parametreleri çıkartan önemli ve dikkat isteyen bir süreçtir (Jing ve diğ., 2009). Carmo ve diğ. (2015)'e göre sismik ters çözüm, yeraltının elastik özelliklerinin elde edilmesini sağlayan çoğunlukla da rezervuar modellemesinde ve karakterizasyonda bir ara adımdır.



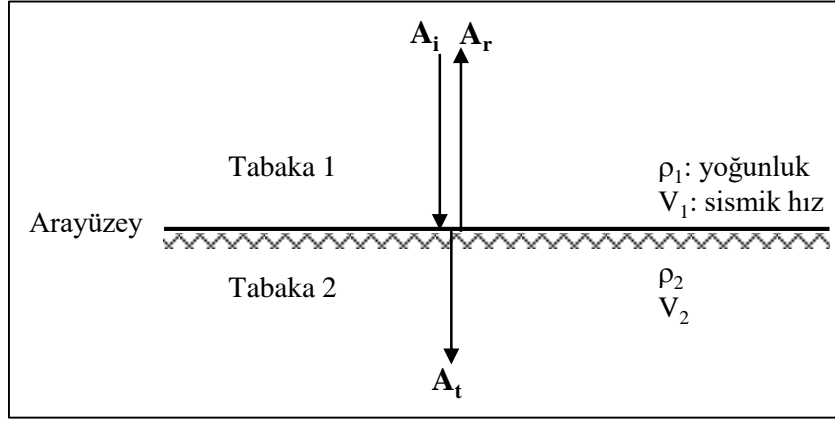
Şekil 1.5. Ortak orta nokta için yığma izinin elde edilme işlemi. (a) OON iz ailesinin oluşturulması, (b) Normal kayma zamanı (NKZ) düzeltmesi ile tüm yansımalar normal geliş yoluna indirgenmiştir. Yani kaynak-alıcı arası uzaklık etkisi giderilmiş ve izler "sıfır ofset" iz haline getirilmiştir, (c) Aynı yansıma noktasına ait NKZ düzeltilmiş izler üst üste yığılarak yığma izi elde edilmiştir. Sıfır ofset zamanı, t₀, kaynak ve alıcının aynı noktada olduğu durumda kaynaktan çıkan dalganın arayüze dik (yüzey normali doğrultusu) gidiş-geliş yolu (normal geliş) üzerindeki toplam süresini gösterir.

1.2. Yansıtabilirlik ve Empedans

Yansıtıcı bir arayüzeyde gelen ve yansıyan dalga genlikleri arayüzeyin yansıtma katsayısı, r, ile ilişkilidir. Arayüzeyin yansıtma katsayısı arayüzeyin altındaki ve üstündeki tabakaların hızları ve yoğunlukları ile ilişkilidir ve aşağıdaki gibi ifade edilir:

$$r = \frac{A_r}{A_i} = \frac{\rho_2 V_2 - \rho_1 V_1}{\rho_2 V_2 + \rho_1 V_1}. \quad (1.2)$$

Burada, A_i , A_r ve A_t sırasıyla gelen, yansıyan ve iletilen dalga genlikleridir (Şekil 1.6). Dolayısıyla yansıtma genliği sadece yansıtma katsayısı etkisinden dolayı, basitçe $A_r=r.A_i$ olarak hesaplanır.



Şekil 1.6. Bir arayüzeyde normal geliş durumu için yansıtma ve iletim

Yoğunluk ve hızın matematiksel olarak çarpımı tabakanın akustik empedansını (acoustic impedance), ($Z_k=\rho_k.V_k$), verir. Bu kavram çok tabakalı ortamlar için genişletilirse, her bir arayüzey için yansıtma katsayısı genlikleri veya yansıtabilirlik serisi izleyen formülle hesaplanabilir:

$$r_k = \frac{\rho_{k+1} V_{k+1} - \rho_k V_k}{\rho_{k+1} V_{k+1} + \rho_k V_k} \quad (k = 1, 2, \dots, N-1), \quad (1.3)$$

denklem (1.3)'de $Z_k=\rho_k.V_k$ yazılır ise,

$$r_k = \frac{Z_{k+1} - Z_k}{Z_{k+1} + Z_k}. \quad (1.4)$$

şeklinde akustik empedanslar cinsinden elde edilebilir. Burada N tabaka sayısını göstermektedir. Görüldüğü üzere yansıtma katsayısı yansıtıcı arayüzeyin altındaki ve üstündeki tabakaların akustik empedanslarının türetilmektedir (Şekil 1.7). Hız ve yoğunluk

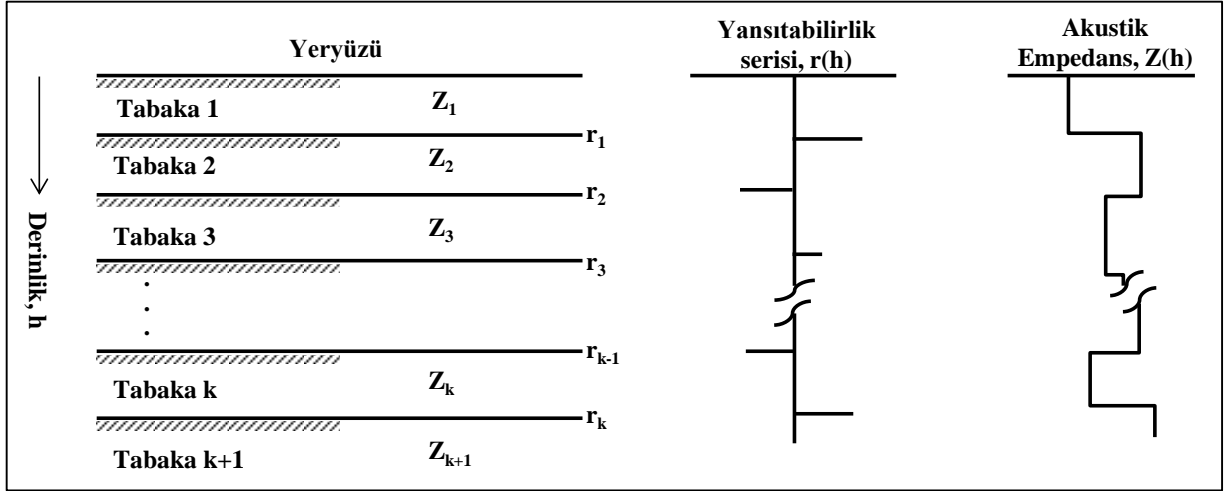
herhangi bir kayacın fiziksel ve doğal olarak jeolojik özelliğinin bir tanımlayıcı olduğundan, akustik empedans aslında tam olarak tabakaların jeolojik korelasyonu sağlayan önemli sismik bilgidir. Denklem (1.3)'de gerekli düzenlemeler yapılır ise, yansıtabilirlik ile akustik empedans arasında,

$$r(t) = \frac{1}{2} \frac{d[Z(t)]}{dt}, \quad (1.5)$$

İlişkisi elde edilir ve böylece akustik empedans yansıtma katsayısı cinsinden basitçe aşağıdaki denklem (1.6) ile elde edilebilir:

$$Z(t) = Z(0) \exp \left[2 \int_0^t r(t) dt \right]. \quad (1.6)$$

Denklem üstel fonksiyon içinde bir integrali gerektirir. Burada t sürekli zaman değişkeni, T toplam sinyal süresini gösterir. Z(0) birinci tabakanın akustik empedansıdır ve çözüme başlangıç değeri olarak kullanılır. Denklem (1.5) ve (1.6) yansıma jeofizikçilerinin ana amaçlarını ifade eder. Dolayısıyla, ilk olarak doğru yansıtabilirlik ölçümünün elde edilmesi gerekmektedir. Sonra bu ölçüm tabakalı ortamın akustik empedansına dönüştürülür. Böylece kayaç türleri ve diğer bilgiler buradan türetilir. Denklem (1.5) ve (1.6) zamanın (t) sürekli fonksiyonu olarak ifade edilmiş olup, bu denklemlerin matematiksel olarak geliştirilme süreçleri hakkında detaylı bilgiler Bölüm 2.11'de verilmiştir.



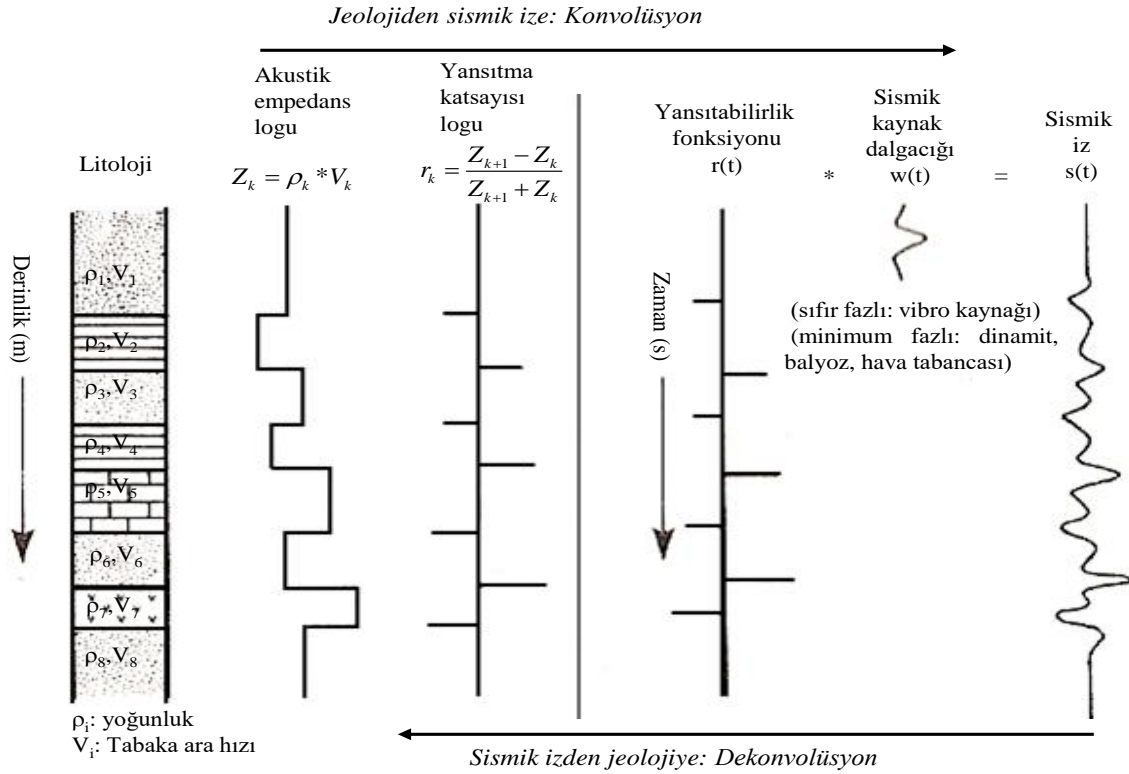
Şekil 1.7. Tabakalı bir yer modeli için yansıtabilirlik serisi ve akustik empedansının temsili gösterimi

Yansıtabilirlik fonksiyonu gerçek anlamda ve yaygın olarak açılmış olan sondaj kuyularında ileri teknoloji sayesinde yapılan sonik log (derinlik/zamanın fonksiyonu olarak sürekli hız ölçümü) ve yoğunluk loglarından yararlanarak elde edilmektedir. Ancak, sismik yansıma çalışmalarının tam olarak örnekleyebilecek sondaj kuyularının açılması maliyetli ve zaman kaybedicidir. Bu nedenle yansıtabilirlik fonksiyonu sismik yansıma verilerin dekonvolüsyonu ile tahmin edilmesi ve yakın civardaki kuyularla korelasyonu en çok tercih edilen yollardan biridir. Dolayısıyla, sismik yansıma verilerinden empedans bilgisinin elde edilmesinin ilk adımı dekonvolüsyon işlemidir.

1.3. Konvolüsyon, Dekonvolüsyon ve Empedans İlişkisi

Denklem (1.1) ile ifade edildiği üzere, konvolüsyon bir sismik çalışmada kaydedilen sismik izi modellemek için yerin yansıtabilirlik serisi ile sismik dalgacığı birleştiren bir matematiksel işlemidir. Yeraltı jeolojisi hakkında bilgiler sismik dalgacıkların genliklerinde ve seyahat zamanlarında saklıdır, yani bunlar yeraltı yansıtma katsayılarını örterler. Bu nedenle sismik iz üzerindeki yansıma dalgacıkları ile yansıtma katsayılarını yerdeğiştirecek bir matematiksel işleme ihtiyaç vardır. Bu işlem dekonvolüsyon işlemi olarak isimlendirilir. Böylece, dekonvolüsyon sismik iz üzerinden

sismik dalgacığın etkisini kaldırmayı sağlayan ve matematiksel olarak konvolüsyon tersi bir ters çözüm işlemdir. Bu özelliği ile dekonvolüsyon aynı zamanda dalgacığı sıkıştırır ve iğneciğe yaklaştırır. Aslında bu işlem sismik izin spektral bant genişliğinin artırılması ile eşdeğerdir. Bir iğnecik sinyalinin spektral bandı en geniştir, yani tüm frekanslarda kullanışlı bilgiye sahiptir. Buna karşılık sismik izler bant sınırlıdır. Böylece, dekonvolüsyon sonrası elde edilen sonuç izler yerin yansıtabilirlik fonksiyonunu temsil ettiği kabul edilir. Dekonvolüsyon sonrası sismik izlerin ayrımlılığı artırılmış olur ve dolayısıyla ince tabaka yansımalarının yorumlanabilirliği de sağlanmış olur. Eğer dekonvolüsyon işlemi başarılı bir şekilde gerçekleştirilirse, buradan denklem (1.6) sayesinde akustik empedans elde edilebilir. Şekil 1.8 konvolüsyon, dekonvolüsyon ve empedans arasındaki ilişkileri açık olarak göstermektedir. Görüldüğü üzere, konvolüsyon jeolojiden sismik izlere bir dönüşüm iken, dekonvolüsyon sismik izden yerin yansıtabilirlik fonksiyonunu elde edilmesini ve ilişkili olarak akustik empedans sayesinde jeolojiye bir dönüşüm olduğunu açıklamaktadır.



Şekil 1.8. Konvolüsyon, dekonvolüsyon ve empedans ilişkisinin temsili gösterimi

Karakteristik olarak dekonvolüsyon ve devamında empedans ters çözümü için en uygun ifade konvolüsyon modelidir:

$$W r+n=d, \quad (1.7)$$

Burada $r=[r_0, r_1, \dots, r_{M-1}]^T$ yansıtma katsayısı vektörünü, $d=[s_0, s_1, \dots, s_{M-1}]^T$ kaydedilen sismik veriyi, n gürültüyü ve W dalgacık fonksiyonu ile ifade edilen $L+1$ uzunluğundaki dalgacık matrisini göstermektedir. T matris transpozunu ve M vektördeki örnek sayısını göstermektedir:

$$W_{(N+L) \times N} = \begin{bmatrix} w_0 & 0 & 0 & 0 & \cdot & 0 \\ w_1 & w_0 & 0 & 0 & \cdot & 0 \\ w_2 & w_1 & w_0 & 0 & \cdot & 0 \\ \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot \\ w_L & w_{L-1} & \dots & w_1 & w_0 & 0 \\ 0 & w_L & w_{L-1} & \dots & w_1 & w_0 \\ 0 & 0 & 0 & w_{L-1} & \dots & w_1 \\ \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot \\ 0 & 0 & 0 & \dots & w_L & w_{L-1} \\ 0 & 0 & 0 & \dots & 0 & w_L \end{bmatrix}. \quad (1.8)$$

Yansıtabilirlik modelini, r , bulmak için en bilinen yaklaşım,

$$r = (W^T W)^{-1} W^T d. \quad (1.9)$$

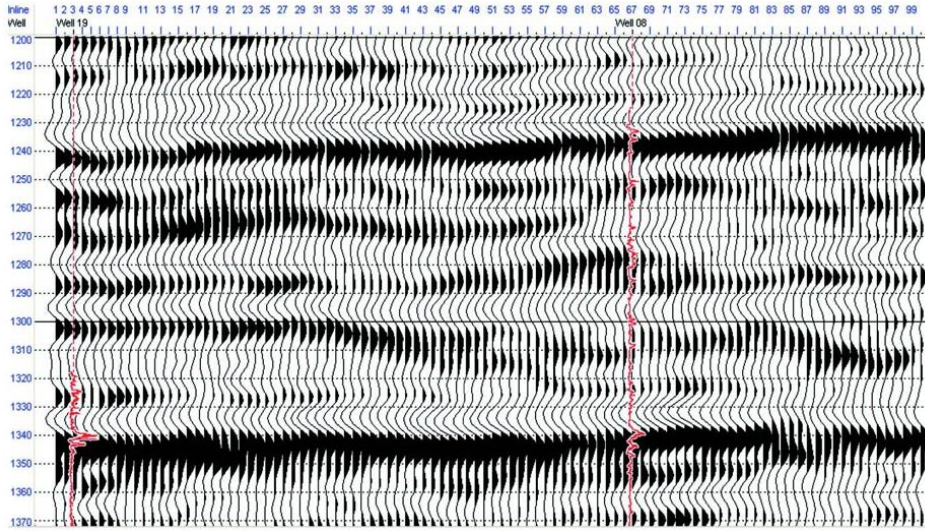
şeklinde ifade edilir. Burada $W^T W$ matrisinin ters çözümünün olabilmesi için iyi tanımlı (well-posed) olması gerekmektedir. Bu matris çoğunlukla iyi tanımlı olmaz (ill-posed), bu nedenle denklem (1.9)'un kararlı ve tekil çözümlerinin sağlanması için birçok regülarizasyon (regularization: ayarlama, düzenleme), ağırlıklandırma (weighting) ve yuvarlatma (smoothing: düzgünleştirme) gibi teknikler kullanılmaktadır (Sacchi ve Ulreyh, 1995; Sacchi, 1997). Bununla birlikte, sismik verilerin bant sınırlı olmalarından dolayı doğrudan ters çözümler yüksek frekans bileşenlerinde olduğu gibi, düşük frekans

bileşenleri üzerinde yetersiz kalabilir (Wang, 2011). Doğru ve güvenilir olarak akustik empedans elde edilmesi, dekonvolüsyon sonuçlarının en geniş spektral bant genişliğine sahip olması ile doğrudan ilişkilidir ve dolayısıyla, yüksek ayrımlı dekonvolüsyon çözümlerine ihtiyaç vardır (Sacchi, 1997). Böylece, empedans ters çözümünün temel teorisi, dalgacık matrisi ve kaydedilen izden türetilen yansıma katsayılarını elde etmek ve verilen başlangıç empedans ve yansıma katsayılarını kullanmaktır. Empedans ters çözümü için birkaç ters çözüm yöntemi literatürde kullanılmaktadır. Bunlardan son zamanlarda sismik veri işlemciler tarafından en yaygın kullanılan ve Bayes teoremi kapsamında ele alınan L_1 (mutlak hata) ve L_2 norm (en küçük kareler-EKK-hatası) tabanlı olasılık-yoğunluk fonksiyonu (probabilistic density function) regülarizasyonu tekniği bu tez kapsamında 2.7’de detaylı olarak açıklanmış ve yüksek ayrımlı dekonvolüsyon sonuçlarını elde etmek için kullanılmıştır.

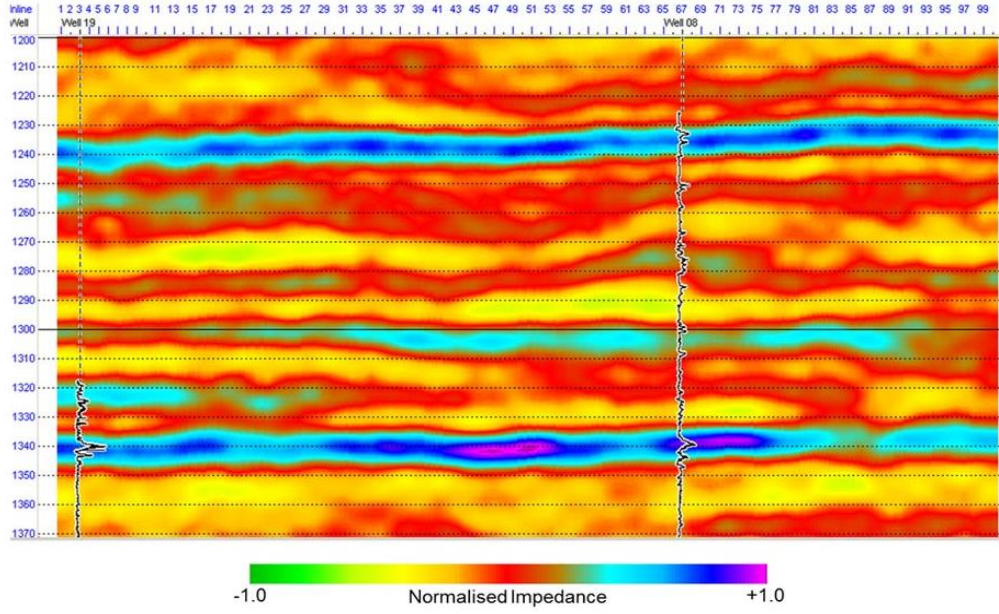
1.4. Sismik Ters Çözümünün Faydaları

Yansıma verisinden yeraltının görüntüsü elde etmek genellikle sismik verilerin işlenmesinden sonra elde edilir ve elde edilen görüntü yığma kesiti veya sismik göç kesitidir. Bu görüntüler yorumlanarak yeraltı yapısı ve stratigrafisi belirlenir ve özellikle hidrokarbon aramalarında sondaj kuyusunun nereye ve hangi derinliğe kadar açılacağına kararı verilir. Bununla birlikte, yüksek ayrımlı dekonvolüsyon kesitleri her zaman kolayca yorumlanmaz ve bazı ayrıntılar gözden kaçırılabilir, ancak türetilen empedans görüntüsünün yorumunda ayrıntılar daha anlamlı olarak elde edilebilir (Pendrel, 2006). Jeolojik formasyonlar (birkaç alt birimi ve/veya tabakayı içeren jeolojik paket) arasındaki sınırlar ile ilişkili güçlü genlikleri içeren bir sismik yansıma kesiti Şekil 1.9’da gösterilmektedir. Bu kesitte yansıma seviyelerinin stratigrafik yorumu çok zor ve yanıltıcı olabilir. Çünkü bu kesitte formasyon içi özellikler açıkça görülemez. Şekil 1.10’da ve Şekil 1.11’de örnek empedans kesitleri gösterilmektedir. Empedans kesitlerindeki genlik değişimleri litoloji türü, gözeneklik, yoğunluk ve hız gibi kayaç özelliklerini açıklanmasını sağlar ve aralarında deneysel ilişkiler geliştirilebilir (Latimer ve diğ., 2000). Şekil 1.11’de görüldüğü üzere empedans kesitindeki jeolojik birimlerin içindeki litoloji türü (kumlar) açıkça görüntülenebilmiştir. Böylece, akustik empedans kesitlerinin elde edilmesindeki gereklilik ve katkıları aşağıda sıralanmıştır:

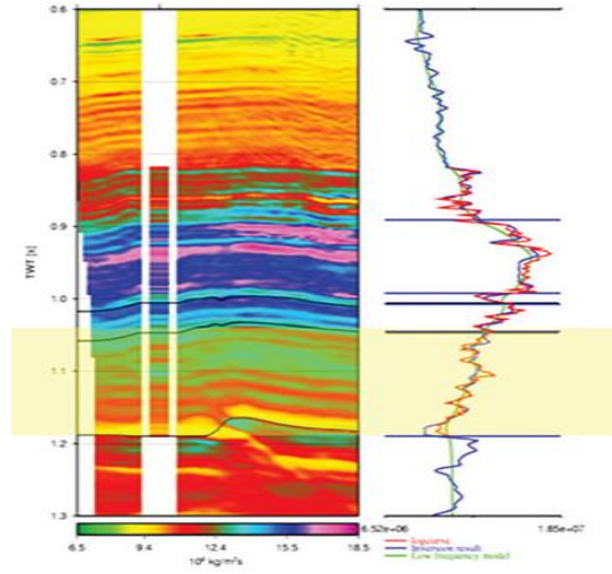
- Çoğu yerbilimci sismik ize göre, empedans ve jeoloji kavramını çok daha iyi anlamakta ve karşılaştırma yapabilmektedirler.
- Çok disiplinli alanlarda çalışan araştırmacılar empedans kavramı üzerinde daha iyi anlayabilmektedirler.
- Sismik empedans en geniş spektral bant genişliğine sahip olduğundan sismik dalgacığın etkileri ihmal edilerek en aza indirgenmiştir. Açılmış ve değerlendirilmesi yapılmış bir kuyunun litolojisi ile olan karşılaştırmasının yapılabilmesini güçlendirir ve kuyular arası bağın kurulmasına yardımcı olur.
- Rezervuar özelliklerini örtü tabakasından ayırır.
- Rezervuar özellikleri hakkında sayısal tahminler sunar.
- Stratigrafik yorumlamayı geliştirebilir.
- Sismik bant genişliğinin ötesine uzanan olasılığın bulunmasına izin verir.
- Empedans kesitlerinin yorumlaması sismik kesitlerin yorumlamasına göre çoğunlukla daha kolaydır.



Şekil 1.9. Jeolojik formasyonların arasındaki sınırları gösteren sismik yansımalar kesiti (Ashley, 2014)



Şekil 1.10. Jeolojik formasyonlar içinde litolojik birimleri (burada bu birimler kumlar olarak yorumlanmıştır) gösteren empedans kesiti. Kum aralıklar mavi /mor rengi ile gösterilmektedir (Ashely, 2014)



Şekil 1.11. Akustik empedans kesiti (Ashley, 2014)

1.5. Literatür İncelemesi

Akustik empedans sismik hız ve yoğunluk ürünü olarak tanımlanmaktadır. Kayanın temel fiziksel özelliğidir. Litolojiden kaya yapısı ve değişiklikleri hakkında önemli bilgiler sağlar (Becquey ve diğ., 1979). Sismik araştırmalar, genellikle yüksek gözeneklilikli hazne kayaç olma özelliğine sahip ve hidrokarbonları içeren kayaçların araştırılması üzerine yoğunlaşmıştır (Wagner ve diğ., 2012). Hidrokarbon dolu kayaçlar benzer kayaçlara göre daha düşük empedans üretme eğilimindedir. Hidrokarbon aramacılığı açısından yeraltında nerede daha düşük empedans tespit edilebilmişse, orada hidrokarbonların bulunma ihtimalinin yüksek olduğu düşünülür. Günümüzde, kuyu loglarıyla yeraltında kaya özelliklerini doğrudan ölçmek mümkündür. Bu ölçümler sadece açılan bir kuyu için yapılabilir ve kuyuya yakın yerlerin kayaç özellikleri hakkında fikir verir. Geniş alanların yeraltı yapısı hakkında bilgi elde edebilme açısından sondaj kuyuları yetersiz kalabilmektedir. Dolayısıyla, yeraltının kayaç özelliklerinin görüntüsünü üretmek için empedans ters çözümü gerekmektedir. Geçtiğimiz 30 yıl boyunca, birçok farklı ters çözümü teknikleri geliştirilmiştir. Yığma öncesi (prestack) verilerin ters çözümünden yığma sonrası (poststack) verilerin ters çözümüne, sismik ayrımlı ters çözümünden kuyu logu ayrımlı ters çözümü, geleneksel konvolüsyon modeli ters çözümünden tam dalga denklemi ters çözüm yöntemlerine geçiş yapılmıştır.

Akustik empedans ters çözümünde en önemli sorun düşük frekansların eksikliğidir ve bu konuda ilk çalışma Lindseth (1972) tarafından, bu problemin çözümü için sismik verideki düşük frekansların yerine kuyu loglarındaki düşük frekansları yerleştirerek empedans için bir çözüm üretilmiştir. Lindseth (1979) daha sonra kuyudan elde edilmiş empedans loguna alçak geçişli süzgeç uygulamış ve elde ettiği sonucu dekonvolüsyon uygulanmış sismik izin denklem (1.6)'ı ile integre edilmiş sonucuna eklemiştir. Bu işlem her bir sismik iz için tahmini bir empedans logu elde etmeyi sağlamıştır. Buna karşılık Lavergne (1975) ve Galbraith ve Millington (1978) sismik verideki düşük frekansların yerine yerleştirmek için yığma hız bilgisini kullanmayı önermiştir. Benzer şekilde, Becquey ve diğ., (1979) yansıma normal kayma zamanı hız bilgisini düşük frekanslar yerine kullanmıştır. Gardner ve diğ., (1974) kuyulardan elde edilen hız ve yoğunluk bilgilerini kullanarak empedans hesaplamalarını gerçekleştirmiştir.

Empedansı elde etmek için 1980'li yılların başından itibaren farklı birçok yığma sonrası ters çözüm tekniği geliştirilmiştir. Örneğin, Burg kestirim süzgeçlerini kullanan autoregressive yöntem (Oldenburg ve diğ., 1983) ve doğrusal empedans ters çözüm yöntemleri (Cooke ve Schneider, 1983). Bununla birlikte, denklem (1.9)'un çözümüne yönelik olarak sönümlü en küçük kare ters çözümü yöntemi (Marquardt, 1963) ve eşlenik gradyan ters çözümü yöntemi (Hestenes ve Stiefel, 1952) gibi doğrusal ters çözümler kullanılmıştır. Buna karşılık, doğrusal olmayan ters çözümler, benzetimli sağlamaştırma (simulating annealing) (Metropolis ve diğ., 1953; Kirkpatrick, 1984), yapay sinir ağı (Beasley ve diğ., 1993) ve vektör destekli makine (Vapnik, 1995; Goodway ve diğ., 1997) ters çözümlerini içermektedir. Ancak, bu yöntemler sismik verideki gürültüye duyarlıdır ve S/G oranı düşük sismik veriler hatalı ters çözüm sonuçlarına neden olabilirler. Guitton ve Symes (2003), Huber normu / fonksiyonu kullanılarak sismik verilerin hızlı ve güvenilir ters çözümünü bir eşlenik gradyan algoritması ile gerçekleştirmişlerdir.

Waters (1978) tarafından frekans ortamında sismik verilerle akustik empedans logları birleştirilerek sismik verilerin eksik düşük frekanslarını çözüme dahil eden 'SAIL' (Seismic Approximate Impedance Log) olarak adlandırılan bir ters çözüm yöntemi. Ferguson ve Margrave (1996), Waters (1978)'in ters çözüm yöntemini güncelleyerek 'BLIMP' (BandLimited IMPedance) olarak isimlendirilen ters çözüm algoritmasını geliştirmişlerdir. Bu yöntem, ilk olarak süzgeçlemeden önce akustik empedans logundan doğrusal trendi çıkartır. Aynı zamanda integre edilmiş sismik izin genliklerini artırmak için bir çarpan hesaplar. Bu yöntem, kullanılabilir göreceli genliklere izin verir ve böylece ters çözümün kararlılığını sağlar. Çıkarılan doğrusal trend daha sonra elde edilen empedans sonuç izine tekrar eklenir.

Doğrusal ve doğrusal olmayan ters çözüm yöntemlerinden farklı olarak dalga şeklinin modellenmesine dayanan tam dalga şekli ters çözümü (Full Waveform Inversion-FWI) 1980'lerde, Lailly (1983) ve Tarantola (1984) tarafından tanıtılmıştır. FWI yöntemi bir başlangıç hız ve yoğunluk modelinin yinelemeli olarak hesaplanıp her adımda hata fonksiyonunun (gerçek veri-modellenen veri) en küçüklenmesi ile gerçekleştirilir. Burada elde edilen sonuç yansıtılabilirlik izlerini oluşturmaksızın empedans görüntüsünü verir. FWI yönteminin başarısı, sismik verideki düşük frekansları karşılayacak bir başlangıç modelin tam olarak tanımlanmasına, kaydedilen veriyi tam olarak bir dalga denklemi ile

gerçekleyebilmeye ve mükemmel hesaplama ekipmanlarına (bilgisayar ve yazılım) ihtiyaç duyar. Anlaşıldığı üzere tam dalga şekli ters çözümünün bazı sorunları vardır. Mesela, dalga denklemi algoritmalarının yapısı karmaşıktır ve gürültü içeren veriler olduğunda kararlı çözüm elde etmek zordur (Liu ve diğ., 2015). Ayrıca, tam dalga şekli ters çözümü kapasiteli, hızlı hesaplayıcılara ihtiyaç duyar ve maliyeti çok fazladır. Bu nedenle tam olarak kullanıldığında mükemmel sonuçlar üretmesine rağmen, FWI yöntemi empedans ters çözümünde yaygın bir kullanıma sahip değildir.

Empedans görüntüsünün yüksek ayrırlılığı, yansıtabilirlik izinin yüksek ayrırlı olarak elde edilmesi ile sağlanabilir. Dolayısıyla empedans ters çözümü için daha çok yüksek ayrırlı dekonvolüsyon çözümleri üzerine yoğunlaşmaktadır. Bu kapsamda, son yıllarda, seyrek sınırlamaları (sparse constraint) ile Radon dönüşümü ters çözümü kullanılarak yüksek ayrırlı sismik görüntüleri elde edilmektedir (Sacchi ve Ulrych, 1995; Sacchi, 1997). Schoepp ve Magrave (2008), durağan olmayan dekonvolüsyon yöntemini kullanarak sismik ayrırlığını geliştirmiştir. Schoepp ve Magrave (2008) tarafından zaman değişken spektral ters çözüm işleme tekniğini kullanılmışlar ve dekonvolüsyon ve Q-ters çözüm süzgeçlemeyi birleştirerek sismik verilerdeki elastik olmayan özellik, soğurma ve kaynak etkileri giderilerek yüksek ayrırlı yansıtabilirlik izleri elde edilmiştir. Debeye ve van Riel (1990) L_p -norm dekonvolüsyonu kullanılarak iyi yüksek ayrırlı sismik görüntüler elde edebilmiştir.

Seyrek ters çözümün en önemli problemi sismik verilerdeki gürültüler ve hatalı düz çözüm modellemesinden kaynaklı kararsızlıktır. Wang ve Sacchi (2008) bu problemin çözümü için uzaysal düzgünlük kısıtlamaları (spatial smoothing constraint) kullanmışlardır. Sacchi (1997) ve Wang ve Sacchi (2005), Cauchy ihtimal yoğunluk fonksiyonu, Huber normu gibi seyrek regülarizasyon önbilgilerini (priori veya prior information) kullanılarak yüksek ayrırlı dekonvolüsyon çözümlerini başarmışlardır. Liu ve diğ. (2015) L_1 norm regülarizasyonu ile gürültü varlığında dahil yüksek ayrırlı dekonvolüsyon sonuçlarını elde etmiş ve böylece güvenilir ve doğru empedans ters çözüm sonuçlarına ulaşabilmiştir. Hua-wei ve diğ. (2001) sismik verilerin yüksek ayrırlı çözümü için tanımlı dekonvolüsyon tekniğini önermişlerdir.

1.6. Tezin Amacı

Bu tezin amacı, sismik verilerden yüksek ayrımlı dekonvolüsyon kesitlerini elde etmek ve aynı kesitlerin akustik empedans kesitlerini oluşturmaktır. Bu kapsamda sönümsüz, sönümlü doğrusal ve Cauchy norm regülarizasyon içeren doğrusal olmayan genelleştirilmiş ters çözüm teknikleri kullanılmıştır. Herbiri için gerekli algoritmalar MatLab yazılım dilinde sayısal ortama aktarılmıştır. Algoritmaların yetenekleri sentetik veriler üzerinde test edilmiş ve yığma sonrası gerçek sismik yansıma verilerine uygulanarak gerekli karşılaştırmalar yapılmış, zayıflık ve üstünlükler değerlendirilmiştir.

1.7. Tez Bölümleri

Bu tez 6 bölümden oluşmaktadır. Bölüm 1 genel bilgileri, konvolüsyon, dekonvolüsyon ve empedans kavramlarının tanıtımını, literatür bilgilerini ve tezin amacını içermektedir.

Bölüm 2’de, ayırık ters çözüm teorisi, quadratik, quadratik olmayan kısıtlamalarla ters çözüm, yinelemeli ve bant-sınırlı ters çözüm teorilerini tanıtılmıştır. Bu tanıtımlardan sonra tezde kullanılan yöntem açıklanmış ve algoritması geliştirilmiştir.

Bölüm 3 geliştirilen algoritmanın yapay veriler üzerinde detaylı testlerini ve arazi verisine uygulamaları içermektedir.

Bölüm 4’de uygulama sonuçları sunulmuştur ve tartışılmıştır.

Bölüm 5 çalışmanın sonuçlarını ve Bölüm 6 tez çalışması süresince yararlanılan kaynakların sunumunu içermektedir.

2. YÖNTEM

Sismik veri işlem aşamaları bir dizi düzenleyici ve sayısal işlem adımdan oluşur. Örneğin, kaynak-alıcı konumlandırma, bozuk izlerin atılması, düzensizliklerin giderilmesi, genlik zayıflamaların dengelemesi, uyumlu (yüzey dalgası, tekrarlı, kırılma dalgaları, saçılmalar, v.b.) ve uyumsuz (gelişigüzel gürültüler) gürültülerin bant geçişli ve f-k süzgeçleri ile süzgeçlenmesi, S/G oranını artırmak için CMP yığılması ve ayrırlılığın artırılması olarak sıralanabilir. Bu işlemlerden sonra ters çözüm teknikleri ile yüksek ayrımlı sismik veriler empedans kesitine dönüştürülür. Böylece, bu kesitlerden sismik dalgalarının yeryüzüne geri yansıtılmalarına neden olan yeraltındaki yansıtıcılar hakkında tahminler yapılabilir. Akustik empedans ters çözüm tekniğinin nasıl çalıştığını anlamak için, genel olarak ters çözüm teorisinin detaylı bir şekilde açıklanması gerekir.

2.1. Ters Çözüm Problemi

Jeofizikte pek çok problem, bir ters çözüm problemi olarak temsil edilebilmektedir. Sismik ölçümler veya veriler, \mathbf{d} , yer için hesaplanacak parametreler \mathbf{m} ile temsil edilirse, \mathbf{d} verisi aşağıdaki gibi yazılabilir:

$$\mathbf{Gm} = \mathbf{d} \quad (2.1)$$

\mathbf{m} fiziksel özelliklerin dağılımı için genel semboldür ve sismik verileri için yansıtma katasayısı vektörünü gösterir, \mathbf{d} gözlenen verileri yani kaydedilen sismik izi temsil etmektedir ve \mathbf{G} ölçü tasarımı ve ilgili fiziksel denklem ayrıntılarını içeren bir ileri modelleme operatörüdür ve model uzayı ile veri uzayı arasındaki bağlantıyı sağlayan bir operatör olup, ters çözüm terminolojisinde çekirdek (kernel) matris olarakta isimlendirilir. \mathbf{G} matrisi problemin şartlarına göre integral ve diferansiyel operatör olarak şekillenir. Mesela basit en küçük kareler doğru uydurma probleminde polinom katsayılarını içeren matrisi olurken, yansıma ters çözümünde dalgacık ve/veya ters çözülecek giriş verisinin özilişki elemanlarını içeren bir matris olmaktadır. Bu nedenle, denklem (2.1) tek bir denkleme değil, denklemlerin bir takımını temsil etmektedir. Yani değişken parametre \mathbf{m} 'e

göre ölçülen veri **d**'nin alacağı değerler kümesi bu denklem takımlarını oluşturur. Bu aslında tam olarak ileri çözüm (forward modeling) veya modelleme problemini tanımlamaktadır. Yani, verilen bir örnek model **m** ile teorik gözlenen verilerin hesaplaması mümkündür. O zaman ters çözüm problemi en basit tanımı ile, **m**'nin, **G** ve **d**'den elde edilme işlemidir ve şu şekilde yazılır:

$$\mathbf{m} = \mathbf{G}^{-1}\mathbf{d} \quad (2.2)$$

Bu işlem **G** matrisinin tersinin alınmasını gerektirir ki, bu matris tersi işleminin hesaplanma tekniklerine göre ters çözüm yöntemlerinin bir sınıflaması yapılabilmektedir (Lines ve Treitel, 1984; Menke, 1989).

Şekil 1.8'de de açıklandığı gibi, sismik iz, yansıma katsayıları ile giriş dalgacığının bir konvolüsyon olarak modellenmektedir. Buna karşılık yansıtma katsayıları dekonvolüsyon işlemi ile sismik izden (bilinen) elde edilebilmektedir. Daha sonra, jeolojik kesiti temsil eden akustik empedans logu yansıma katsayı logunun bir intergrasyonundan (ve /veya ters çözümünden) elde edilebilir.

Gerçek dünyada ölçümler her zaman hatalar içerir. Bunlar ölçüm hataları, dış kaynaklardan gürültüler veya verilerin işlenmesi sırasında oluşan hatalar (artifacts) olabilir. Bunların dışında, **G** matrisi için kabul edilen formla ilişkili hatalar olabilir. Örneğin, bir sismik problem için, fiziksel kabullere göre ortamın elastik, izotropik olduğu ve ortamda saçılma ve soğurma olmadığı kabul edilirken, gerçek yer ortamlarının elastik olmadığı, anizotropik, saçıcı ve soğurucu özelliklere sahip olduğu bilinmektedir. İleri modellemede bu ihmaller gürültünün bir türü olarak kabul edilebilir. Böylece, gerçekten çözülmesi gereken sorun göz önüne alındığında **m**'yi ancak verilen **G** ve **d**'den ayırık ters çözüm teorisi kullanarak bulmak mümkündür. Buna göre gürültüyü içeren model denklem aşağıdaki gibi ifade edilir,

$$\mathbf{d} = \mathbf{G}\mathbf{m} + \mathbf{n} \quad (2.3)$$

burada **n** ölçümlerdeki hataları/gürültüleri temsil eder.

2.2. Ayrık Ters Çözüm Teorisi

Jeofizik ayrık ters çözüm teorisi, doğrusal ters problemini çözmek için sayısal tekniklerinin kullanılması ile ilgilidir. Doğrusal ters problemin çözümü ölçülen veriler \mathbf{d} ve modellenmiş veriler, \mathbf{Gm} arasındaki farkın en küçüklenmesi ile sağlanır. Ölçülen veriler ve modellenen veriler arasındaki hata en küçük kareler hata olarak incelenir ve L_2 norm olarak tanımlanır. Bu hataların tanımı çözümün istenilen karakteristiklerinin ifadesi olan matematiksel amaç (veya maliyet- objective veya cost function) fonksiyonunda gerçekleştirilir. Çözümler üzerinde kısıtlamalar da regülarizasyon terimleri olarak bilinen amaç fonksiyonunu ile çözüme dahil edilir. Çoğu jeofizik problemler kötü-tanımlı (ill-posed) problemler kategorisinde yer alır. Bunlar kararlı ve tekil çözüm elde etmek için yer özellikleri üzerinde kısıtlamaları gerektirir. En yaygın kısıtlama çözümü bir düzgün çözüme (smooth) zorlamadır (Constable ve diğ., 1987; Duquet ve diğ., 2000).

Ayrık ters probleminin çözümü hem doğrudan hem de dolaylı hesaplama ile elde edilebilir (Strang, 1986). Doğrudan hesaplama doğrusal ters çözüm yöntemleri ile ilişkili değildir ve sayısal bir çözüm bulmak için matrisin ters çözümünü içerir. Bu yöntem, matris formunda olabilecek ayrık operatörlere ihtiyaç duyar. Dolaylı hesaplama yinelemeli (iteratif) anlamda çözüm sağlar ve matris veya alt programlardaki operatörler ile çalışır. Dolaylı yöntem hesapsal avantajlarından dolayı geniş jeofiziksel ters çözüm problemlerini çözmek için en yaygın tekniktir.

2.2.1. Ayrık Ters Çözümü Teorisinin Sınıflandırılması

Ters çözüm probleminin sınıflandırılması bilinen veri sayısı N ve bilinmeyen model parametrelerin sayısı M 'ye bağlıdır (Menke, 1989). Ters çözüm probleminin basit bir örneği $\mathbf{d} = [d_1, d_2, d_3, d_4, \dots, d_N]^T$ veri noktalarından geçecek en uygun doğrunun ($\mathbf{d} = \mathbf{m}_1 \mathbf{X} + \mathbf{m}_2$) elde edilmesidir. X ölçümün değişken parametresini gösterir. Böyle bir problem için elde edilmesi gereken model parametre vektörü, $\mathbf{m} = [m_1, m_2]^T$ olarak tanımlanır. Burada m_1 ve m_2 sırasıyla doğrunun eğimi ve sabit terimlerini (intercept) temsil ederler. Böylece ayrık ters-çözüm problemi

$$d_i = \sum_{j=1}^M G_{ij} m_j \quad i = 1, 2, 3, \dots, N \quad (2.4)$$

denklemleri ile tanımlanabilir. Burada G_{ij} , \mathbf{G} matris operatörünün i ve j elemanlarıdır. Bu matris operatörü doğrusal olarak veri ve model uzayı ile ilgilidir. Böylece bir ters problemin çözümü ölçüm ve parametre sayılarının birbirine göre eşitliği ($N=M$), büyüklüğü ($N>M$) ve küçüklüğü ($N<M$) durumlarına göre geliştirilir. Yani bilinmeyen parametre sayısı kadar denklemin olup olmaması esas alınır.

2.2.1.1. Tam-Tanımlı (Even Determined) Problem

Bu tür problemlerde ters problem tam olarak yeterli bilginin olduğu zaman bir tanımlı çözüme sahiptir. Bir doğruya uydurma durumunda, bu gürültüsüz iki veri noktasının olduğu zaman, $N=M$, gerçekleşir. Ancak böyle bir durum, gürültüsüz veri toplamak mümkün olmadığından ve yer içindeki materyal özellikleri yerden yere değişkenlik gösterdiğinden jeofizik ters çözüm problemlerinde asla oluşmaz.

Denklem (2.1)'de \mathbf{m} 'yi çözmek için \mathbf{G} ve \mathbf{d} bilinmelidir. Burada, \mathbf{m} (bilinmeyen), M uzunluğunda sütun vektörüdür, \mathbf{d} (bilinen) N uzunlukta sütun vektörüdür, ve \mathbf{G} , N satır ve M sütunlu, yani $N \times M$ boyutlu matrisidir. Böylece denklem (2.1) M bilinmeyenli N doğrusal denklem sistemini temsil eder. Eğer $M=N$ ise, \mathbf{G} kare matristir, ve denklem sayısı bilinmeyen sayısına eşittir. Bu tam-tanımlı bir problemdir ve aşağıda tanımlandığı gibi bir çözümü vardır:

$$\mathbf{m} = \mathbf{G}^{-1}\mathbf{d} \quad (2.5)$$

\mathbf{G} matrisinin tersi hesaplanabildiği sürece, problemin çözümü için yeterli bilgi varsa problemin tek bir çözümü vardır. Ancak, jeofizikteki birçok ters-çözüm problemlerinde, $N \neq M$ dir. Bu durumda, \mathbf{G} dikdörtgen matristir, ve \mathbf{G} çok çözümlüdür.

2.2.1.2. Aşırı-Tanımlı (Over Determined) Problem

Aşırı tanımlı problem veri sayısının bilinmeyen veya elde edilecek parametre sayısından daha fazla olduğu zaman oluşur ($N > M$). Bu durumda model denklemlerin sayısı parametre sayısından fazladır. Ancak tüm denklemler bağımsız ise, bu denklemlerin uygun bir çözümü olmayabilir. Doğrusal problem aynı doğru üzerinde bulunmayan üç veya daha fazla noktadan oluştuğu düşünülebilir. Böyle bir problemin hiçbir kesin çözümü yoktur ve bu yüzden ters çözüm teorisi bu tür problemler için en uygun bir çözümü bulmak için kullanılmaktadır. Bilinmeyen model parametresi, \mathbf{m} çözülebilmesi için ölçülen ve model veriler arasındaki fark bulunmalıdır. “En küçük kareler (EKK) yöntemi” adı verilen bu yöntemde çözüm hatanın en az (minimizasyon) olması sağlanır. EKK yönteminde ölçülen ve modellenen (veya hesaplanan, tahmin edilen, kuramsal) verileri arasındaki toplama hata fonksiyonu (amaç veya maliyet) aşağıdaki gibi ifade edilir ve bu L_2 normu olarak bilinir.

$$J(m) = \sum_{i=1}^N \|d_i^{obs} - d_i^{pred}\|^2 \quad (2.6)$$

d_i^{obs} = ölçülen veri, d ve $d_i^{pred} = Gm$ = tahmin veya modellenen veri

Denklem (2.6) hataların karelerinin bir toplamını tanımlar ve bir vektörün kendisiyle transpozunun çarpımına eşittir. Böylece denklem (2.6) yeniden aşağıdaki gibi düzenlenebilir,

$$J(m) = (d - Gm)^T (d - Gm) \quad (2.7)$$

Minimum hata amaç fonksiyonunun bilinmeyenlere göre türevlerinin sıfıra eşitlenmesi ile sağlanır. Buna göre denklem (2.7) için cebirsel işlemler yapıp, $\partial J(m)/\partial m$ kısmi (partial) türevi gerçekleştirilir:

$$J(m) = (d^T - m^T G^T)(d - Gm)$$

$$J(m) = d^T d - d^T Gm - m^T G^T d + m^T G^T Gm$$

$$\left. \begin{array}{l} m^T = m \\ d^T G = G^T d \\ m^T G^T G = G^T Gm \end{array} \right\} \text{vektör ve matris eşitlikleri}$$

$$J(m) = d^T d - G^T dm - G^T dm + G^T Gm^2$$

$$\nabla J(m) = \frac{\partial J(m)}{\partial m} = 0 - G^T d - G^T d + 2mG^T G = 0$$

$$2G^T d = 2mG^T G$$

ve gerekli düzenlemeler yapılır ve $m_{LS}=m$ eşitlenir ise, aşağıdaki EKK çözümü elde edilmiş olur:

$$m_{LS} = (G^T G)^{-1} G^T d \quad (2.8)$$

m_{LS} değerleri ölçümlere en uygun doğrunun parametrelerini içerir. Burada m_{LS} en küçük kareler (least square) anlamındadır. Bölüm 4'de açıklanacağı üzere, sismik sinyallerin dekonvolüsyonunda, $(G^T G)$ giriş dalgacığının öz ilişkisini ve $(G^T d)$ ise giriş verisi ile giriş dalgacığı arasındaki çapraz korelasyonu temsil eder.

2.2.1.3. Eksik-Tanımlı (Under Determined) Problem

Veri sayısının bilinmeyen parametre sayısından ($N < M$) daha az olduğu problemler eksik-tanımlı problemler olarak ifade edilirler. Bu tür problemin en karakteristik örneği, tek veri noktasına bir doğru uydurulmasıdır. Böyle bir problemin

sonsuz çözümler vardır. Ancak, bu çözümler parametreler hakkında ön bilgiler tanımlanarak sınırlandırılabilir. Ters-çözüm hesaplamasının sonucu ileri/düz modeline bağlıdır ve bu modelin yanıtı ölçülen veriler ile eşleşmeli ve hata en küçüklemesi için uygun bir hata kriteri seçilmelidir. Bu nedenle, maliyet fonksiyonunun içine, ilave bir terim, yani regülerizasyon terimi eklenerek, problemin çoklu çözümü tekil olmaya doğru zorlanır veya kısıtlanır. Popüler bir kısıtlama olarak, minimum norm çözümü veya minimum Euclidean uzunluğu uygulanmaktadır. Böylece, bir modeli bulmak için veri kısıtlamalarına bağlı olarak maliyet fonksiyonu minimum yapılmaya çalışılır. Bu noktada, $Gm-d=0$ eşitliği sağlansın diye, verinin gürültüsüz ve hatasız olduğu kabul edilir. Bu durumda maliyet fonksiyonu,

$$J(m) = m^T m + \lambda^T (d - Gm), \quad (2.9)$$

$\lambda^T = \text{Larange çarpanlarının vektörü}$

olarak tanımlanır. Lagrange çarpanları yöntemine göre, L_2 (kuadratik) formunun ve kısıtlama terimlerin toplamı en küçüklenecek, bir kuadratik form en küçüklenebilir (Claerbout, 1985). Her kısıtlama terimi, kısıtlama denklemi ile Lagrange çarpanı çarpımıdır (Claerbout, 1985). Kavram, sadece toplama ile integrasyon yaklaştırmayı matrislere dönüştürür. Bu sebeple, toplam ve m , λ ile ilgili $J(m)$ 'nin kısmi türevi alınmaktadır. Sıfıra yaklaşma ve yerine koyma yoluyla sonuç eşitlenirse, denklem (2.9) aşağıdaki gibi çözülebilir.

$$m = G^T (GG^T)^{-1} d \quad (2.10)$$

Denklem (2.10) en küçük kareler minimum norm çözümü olarak adlandırılır.

2.2.1.4. Kötü-Yapılı (ill-posed) Problem

Bir çok jeofizik problem kötü yapılandırılmıştır ve bu tip problemler ne tam olarak eksik ne de tam olarak aşırı tanımlı problemlerdir. Karakteristik olarak bilinmeyenlerden daha fazla veri vardır, fakat veriler doğrusal olarak bağımsız değildir. Bu nedenle ters çözüm problemi kararsızlık gösterir. Yani, verilerde küçük hatalar sonuçlar üzerinde büyük hatalara neden olabilir. Bu nedenle, ters çözüm probleminin çok çözümlü ve kararsız olması kötü yapılı bir problem olduğu anlamına gelir (Tikhonov ve Arsenin, 1977). Verilerin gürültü ve hatalar içermesi durumunda ters-çözüm problemi aşağıdaki bağıntıyla temsil edilir:

$$d = Gm + n \quad (2.11)$$

Burada n Gauss tipi (normal dağılımlı) gelişigüzel gürültüyü temsil eder.

Kötü-yapılı problemin amaç fonksiyonu veri hata terimi veya normunu (data misfit term or norm) ve sınırlama veya normunu (constraint or norm) içerir. Bu denklemde, hatanın L_2 normu seçilir ve sınırlama minimum norm çözümdür:

$$J(m) = (d - Gm)^T(d - Gm) + \mu m^T m \quad (2.12)$$

Burada μ parametresi veri hata terimine karşılık minimum norm çözüm sınırlamasını sağlamak için önceden belirlenen bir ön bilgi veya bir miktar ağırlıklandırmayı tanımlar. Bu nedenle bu parametre uygun olarak ağırlıklandırma (weighting), sönüm, regülarizasyon parametresi veya al-ver (trade off) olarak isimlendirilir. Amaç fonksiyonundaki birinci terim veri hata terimi, ikinci terim regülarizasyon terimi olarak isimlendirilir. Bu terim mükemmel olarak sağlanamaz, dolayısıyla en iyi çözüm veri hataları ve model norm arasında belirli tavizlerle yani bir uyumla gerçekleştirilir. Denklem (2.12) norm isimlendirmeleri ile aşağıdaki gibi yeniden ifade edilebilir:

$$J(m) = \text{Hata normu} + \mu(\text{Model norm}) \quad (2.13)$$

Ağırlıklandırma parametresi ters çözümünün sonuçlarını iyileştirerek ve yakınsama hızını artıran çok önemli bir rol parametredir.

Optimum ağırlık/trade-off parametresi her ters-çözüm problemi için farklıdır. Bununla birlikte, veri hatası ve sınırlama terimi gerçekçi bir çözüm üretmek için belirli bir değerde olması sağlanmalıdır. Eğer ağırlıklandırma parametresi, μ sıfıra eşitse ($\mu=0$), çözüm tam olarak ölçümlere (veri+gürültü) uyacaktır. Dolayısıyla minimum norm sınırlaması tam olarak ihmal edilecektir.

Tersine ağırlıklandırma parametresi sonsuza yaklaşırsa, bütün uğraşlar model normu en küçüklemeyi sağlamak içindir. Bu veri ile uyumlu olmayan boş bir çözüm oluşturur. Büyük ağırlıklandırma parametreleri aynı zamanda daha düzgünleşmiş (smoother) çözüm üretir, çünkü daha fazla gayret sıfıra yakın değerleri bir arada tutmak içindir.

Böylece, ağırlıklandırma parametresi, μ 'yü seçilebilmek için, amaç fonksiyonunun iki terimine eşit ağırlığın verilmesi gerektiği anlaşılmaktadır.

Hansen (1999)'da tartışıldığı gibi, en uygun ağırlık parametresini belirlemek için, yaygın bir uygulama veri hataları ile model norm arasındaki L-eğrisi belirlemektir. Bu eğri, ağırlıklandırma parametresinin bir dizi değeri için, model norm ve veri hataları arasındaki logaritmik (log-log) grafiğidir. Eğrinin şekili 'L' harfine benzer ve köşesinde bulunan μ değeri en uygun ağırlıklandırma parametresi olarak seçilir, çünkü μ veri hataları ile ve model normu arasındaki bir dengedir.

Denklem (2.12) aşağıdaki gibi daha da genişletilebilir,

$$J(m) = (d^T d - d^T G m - G^T m^T d + G^T m^T G m + \mu m^T m) \quad (2.14)$$

Amaç fonksiyonunun minimumunu bulmak için, model parametresine göre fonksiyonun kısmi türevi sıfıra eşitlenir. $m^T = m$, $d^T G = G^T d$ eşitliklerine göre denklem (2.14) düzenlenir ise, aşağıdaki denklem elde edilir,

$$\nabla J(m) = 2G^T G m - 2G^T d + \mu 2m = 0 \quad (2.15)$$

ve böylece,

$$m_q = (G^T G + \mu I)^{-1} G^T d \quad (2.16)$$

Denklem (2.16) minimum norm quadratik çözüm veya sönümlü en küçük kareler çözümü (SEKK) olarak isimlendirilir (Claerbout, 1992). Genelde, kötü-yapılı problemler için $G^T G$ matrisinin tersi yoktur (Strang, 1986). Bu nedenle matrisin diagonal elemanlarına belirli ağırlıkta sabit eklenerek matrisin kararlı şekilde tersinin alınması sağlanır. Bunun için $G^T G$ matrisinin boyutları kadar bir birim diagonal matris, I , çözüme eklenir ve μ ile ağırlıklandırılır. Bu ekleme sönümlenme veya ön beyazlatma (sismik dekonvolüsyonda) olarak bilinmektedir (Claerbout, 1992). Yansıtma katsayılarının dekonvolüsyonunda SEKK çözümü veya quadratik norm regülarizasyon çözümü bölüm 4'te detaylı olarak anlatılacaktır.

2.3. Quadratik Sınırlamalar

Amaç fonksiyonunda, çözüm üzerindeki sınırlamalar regülarizasyon terimleri olarak ifade edilir. Burada belirtilen sınırlamalar quadratik amaç fonksiyonu olarak sonuçlanır ve böylece bu bir ters doğrusal ters çözüm problemidir. Jeofizik ters çözüm problemlerinde, sınırlamanın en yaygın türü düzgünleştirmeyi (smoothness) zorlayan sınırlamalardır. Bu yer tabakalarının özelliklerinin çoğunlukla derinlikte sürekli bir değişiminden dolayıdır. Ayrıca, minimum değişimli bir çözüm en basit olandır. Bu aynı zamanda çok karmaşık yapılardan kaçınmak için kullanılan bir çözümdür (Constable ve diğ., 1987). Minimum norm regülarizasyon terimi çözümü sıfır civarında kümelenmeye zorlar. Bu şekilde, sönüm terimi bir düzgünleştirme operatörü olarak davranır. Sınırlamalar ayrık EKK çözümü içinde bir ağırlıklandırma fonksiyonu olarak uygulanır.

2.4. Ağırlıklandırma Fonksiyonu

Verideki gürültülerin ve hataların azaltılması için sinyallerin ön bilgileri gereklidir (Yuan ve Wang, 2013). Bu nedenle, genellikle, regülarizasyon fonksiyonları ağırlıklandırma fonksiyonu olarak sunulur ve ağırlıklandırma fonksiyonu çözümdeki ön

bilgileri içermektedir. Çözüm veya ölçüm hakkında ön bilgi olduğu zaman, diğerlerinden daha çok belirli ölçümler için daha fazla güvence arzu edilebilir. Yaygın olarak fazla miktarda hata veya gürültü içeren veriler çözümde daha az ağırlıklanır. Bu amaç fonksiyonundaki bir ağırlıklandırma matrisi içinde ifade edilir. Bu durumda yeni amaç fonksiyonu aşağıdaki gibi verilir,

$$J(m) = (d - Gm)^T(d - Gm) + \mu(Wm)^T(Wm) \quad (2.17)$$

Burada W model parametresindeki ağırlıklandırma matrisidir. W birinci ya da ikinci dereceden türevinin bir matrisi olabilir. Elde edilen çözümü aşağıdaki gibi olur,

$$m = (G^T G + \mu W^T W)^{-1} G^T d \quad (2.18)$$

Denklem (2.18)'e en küçük kareler ağırlıklandırılmış minimum norm çözümü denir.

Ağırlıklandırma matrisi verilerin kovaryans matrisinin tersine eşdeğerdir. Kaydedilmiş verilerin varyansı kovaryans matrisinin köşegene karşılık gelir. Bu nedenle, büyük varyansa veya sınırlı doğruluğa sahip değerler çok az ağırlıklandırılır ve küçük varyansa veya daha fazla doğruluğa sahip değerler daha fazla ağırlıklandırılır. Model ağırlıklandırma terimleri ön model parametrelerinin kovaryansı ile aynı şekilde ilişkilidir.

2.4.1. Ağırlıklandırma Matrislerini Kullanarak Sınırlamalar

Düzgün yüzeyli veya pürüzsüz çözümleri uygulamak için ağırlıklandırma matrisleri kullanılabilir. Model normun birinci kısmi türevleri komşu parametreler arasındaki çok küçük değişime sahip bir çözüm oluşturur ve bu düz (flat) çözümdür. Aynı şekilde, model normun ikinci kısmi türevi parametreler arasında minimum ani değişimlere sahip çözüm üretir ve bu düzgün yüzeyli (pürüzsüz, düzgünleşmiş, smooth) çözüm olarak isimlendirilir. Bu sınırlamaların ikisi de çözümdeki değişimi kısıtlar ve basit yer modelini yapılandırır. Kararlı, düz veya pürüzsüz model normlu tipik ağırlıklandırmalar,

düzenleyiciler veya sınırlamalar vardır. Bunlar sıfır derece quadratik ağırlıklandırma (çözümü kararlı olmaya zorlayan model normu), birinci derece quadratik ağırlıklandırma (çözümü düz olmaya zorlayan model normu) ve ikinci derece quadratik ağırlıklandırma (çözümü pürüzsüz olmaya zorlayan model normu) olarak bilinir. Sıfır derece quadratik ağırlıklandırma basit bir birim matrisidir. Diğerleri birinci ve ikinci türev matrisleri olarak yazılabilir. Ağırlıklandırıcı birinci ve ikinci türev matrisleri sonlu farklar yaklaşımı kullanılarak oluşturulur, ve aşağıda gibi tanımlanabilirle:

$$I = \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix}$$

$$D_1 = \begin{pmatrix} 1 & -1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & -1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & -1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & -1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & -1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & -1 \end{pmatrix}$$

$$D_2 = \begin{pmatrix} 1 & -2 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & -2 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & -2 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & -2 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & -2 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & -2 & 1 \end{pmatrix}$$

I = Sıfır derece quadratik ağırlıklandırma (regülerizasyon)

D₁ = Birinci derece quadratik ağırlıklandırma

D₂ = İkinci derece quadratik ağırlıklandırma

Düz çözüm için denklem (2.16) yeniden yazılırsa, amaç fonksiyonu,

$$m = (G^T G + \mu D_1^T D_1)^{-1} G^T d \quad (2.19)$$

ve pürüzsüz çözüm için ise aşağıdaki gibi yazılabilir.

$$m = (G^T G + \mu D_2^T D_2)^{-1} G^T d \quad (2.20)$$

2.5. Ayrık Ters Problemin Çözümü

2.5.1. Doğrudan Algoritma

Ters-çözüm problemi çözmek için doğrudan yaklaşım iki adımdan oluşur. Birincisi, amaç fonksiyonunu en küçüklemek için analitik çözüm bulunur. Bu tahmin edilen model parametreler için aşağıdaki gibi bir ifade verir.

$$m = (G^T G + \mu I)^{-1} G^T d \quad (2.21)$$

İkincisi, $(G^T G + \mu I)$ matrisinin tersi alınarak yapılan sayısal çözümdür. Bu matris tersi Gauss eliminasyonu, tekil değer ayrıştırma (singular value decomposition-SVD), Newton-Rapson, Eşlenik gradient (conjugate gradient-CG) gibi, bir çok sayısal hesaplama tekniği ile yapılabilir. Eğer bir matrisin boyutları büyük ve seyrek (bol sıfırlı matris) ise bu matrisin doğrudan tersini hesaplamak çok etkili bir yol değildir. Her iki durumda da daha az zaman harcayan yöntemler vardır ve bunlar iteratif doğrusal yöntemler olarak bilinmektedir.

2.5.2. Yinelemeli (İteratif) Doğrusal Yöntemler

Yinelemeli yöntemler, doğrusal sistemin çözümüne bir yaklaşımdır ve bir başlangıç kabulü ile başlar (Scales ve Smith, 1997). Bu tür çözümler kabul edilebilir bir durdurma kriterine kadar yinelenir (Scales ve Smith, 1997). Çoğu yinelemeli yöntemler açıkça tanımlanmış bir matrisi gerektirmez.

Sönümlü en küçük kareler çözümü ile ilişkili amaç fonksiyonu

$$J(m) = (d - Gm)^T (d - Gm) + \mu m^T m \quad (2.22)$$

bir kvadratik denklem örneğidir. Doğrudan yöntemler ile çözümü bulmak yerine, yinelemeli doğrusal yöntemleri kullanılarak amaç fonksiyonu en küçüklenebilir. Yinelemeli yöntemlere örnekler- Jacobi, Gauss-Seidel, gevşetme (Relaxation), en dik iniş

(steepest descent) ve eşlenik gradyan yöntemleri şeklinde verilebilir. Scales ve Smith'e (1997) göre eşlenik gradyan, büyük boyutlu doğrusal sistemleri çözmek için günümüzde en yaygın kullanılan yinelemeli yöntemdir.

2.5.2.1. Eşlenik Gradyan Algoritması

Eşlenik gradyan (EG) yöntemi, güçlü ve kolay uygulanabilen bir matris tersi hesaplama tekniğidir. EG algoritması göre çok hızlı bir şekilde minimuma ulaşır. Eşlenik gradyanın hesaplama maliyeti ve kapasite gereksinimleri her zaman diğer tekniklere göre çok daha azdır (Brown, 2002). EG algoritması hızla çözüme doğru ilerlerken ve herhangi bir zamanda durdurulabilir. Bu durumda, çözümün minimuma doğru yönlendirilmesi, eşlenik gradyan amaç fonksiyonunun gradyanına bağlıdır. Aslında, EG algoritması Hestenes ve Stiefel (1952) tarafından önerilmiştir. Orijinal EG algoritması (Hestenes ve Steifel, 1952) aşağıdaki gibi geliştirilebilir:

$$\mathbf{Ax} = \mathbf{b} \quad (2.23)$$

\mathbf{A} pozitif-tanımlı simetrik matristir, \mathbf{x} model veya parametre vektörü ve \mathbf{b} veri vektörüdür. Ancak, tipik sismik ters çözüm problemlerinde sıklıkla karşılan problem az-tanımlı olan bir dikdörtgen sistemin çözümüdür. Buna göre (2.23) denklemini yeniden aşağıdaki gibi ifade edilirse,

$$\mathbf{Gm} = \mathbf{d} \quad (2.24)$$

standart EG algoritması için, son yazılan denklem yeniden formüle edilebilir:

$$\mathbf{G}^T \mathbf{Gm} = \mathbf{G}^T \mathbf{d} \quad (2.25)$$

$\mathbf{G}^T \mathbf{G}$ simetrik matristir ve pozitif-tanımlı olduğu kabul edilir. En küçük kareler eşlenik gradyan (EKKEG) olarak adlandırılan modifiye EG algoritması (Scales, 1987), $\mathbf{G}^T \mathbf{G}$ olmaksızın problemi çözebilir. EKKEG algoritmasını uygulamak için, sistem genişletilmiş bir matris şeklinde ifade edilebilir.

İlk olarak, sıfıra eşit bir model ve veri vektörü ile çözüm başlatılır, yani $m_0=0$. İki ek model vektörleri eşlenik işlemi ile aşağıdaki gibi hesaplanır:

EKKEG altprogramı

Başlatma

$$s_0 = d - Gm_0$$

$$r_0 = p_0 = G^T(d - Gm_0)$$

r_0 = rezidüeldir p_0 = model uzayındaki değişimdir

$$q_0 = Gp_0$$

for $k = 0, 1, \dots$

$$alpha_{k+1} = (r_k^T r_k) / (q_k^T q_k), \quad \# \text{ adım boyunu belirlemek için}$$

$$m_{k+1} = m_k + alpha_{k+1} p_k,$$

gradyan doğrultu hareket ettirerek modeli uzayda yeni noktaya, m_{k+1} varmaktadır

$$s_{k+1} = s_k - alpha_{k+1} q_k,$$

$$r_{k+1} = G^T s_{k+1}, \quad \# \text{ rezidüel güncellenmesi}$$

$$beta_{k+1} = (r_{k+1}^T r_{k+1}) / (r_k^T r_k),$$

$$p_{k+1} = r_{k+1} + beta_{k+1} p_k,$$

p_{k+1} doğrultu önceki doğrultulara orthogonal güncellenme

$$q_{k+1} = Gp_{k+1}.$$

end

EG çözümünde tüm önceki adımlar ortogonal doğrultu boyunca ilerler. Her adım, önceki adımdan daha iyileşmiş bir tahmin verir. Böylece, EG tekniği daha kısa zamanda minimum ilerler.

Çözüme yaklaşmanın oranı veya yineleme işleminin hızlandırılması ve matrisin ön şartlandırılması yoluyla, çok hızlı bir şekilde kesin çözüm bulunabilir. Bu teknik matrisin yapısını değiştirerek çalışır, bu nedenle yöntemin çözüme yaklaşma oranı hızlanır. Bunun için EG'nin değiştirilmiş algoritması kullanılmaktadır. Değiştirilmiş EG algoritmasının adı önşartlandırılmış (preconditioned) eşlenik gradyan (ÖEG)

algoritmasıdır. Çoğunlukla, giriş verileri fazla miktarda gelişigüzel gürültüler içerdiği zaman en küçük kareler çözümü (denklem (2.8)) ve quadratik norm regülarizasyonu (denklem (2.16)) başarısız olmaktadır. Bu yöntemler gürültülere karşı çok hassastırlar. Böylece, sismik ters çözümü için, bu yöntemlerin ayrımlılıkları yetersizdir. Karlı ve diğ. (2012)'de tartışıldığı gibi, yüksek ayrımlı sismik görüntüleri elde etmek için quadratik olmayan regülarizasyon yöntemlerinin kullanması gerekmektedir. Quadratik olmayan yöntemler, en küçük kareler ve quadratik regülarizasyon stratejileri ile sağlanamayan yüksek ayrımlı ve kararlı çözümler gerçekleştirilebilir.

2.6. Yüksek Ayrımlı Quadratik Olmayan Regülarizasyon

Tetyukhina ve diğ (2010)'a göre, sismik verilerin yüksek ayrımlı ters çözümü için, amaç fonksiyonuna yüksek ayrımlı sınırlamalar sağlayacak norm modellerinin eklenmesi gerekmektedir. Bu kapsamda, ters çözüm problemi için yapılandırılan amaç fonksiyonuna çözümü regülarizasyon terimi eklenir. Quadratik olmayan regülarizasyon yöntemleri doğrusal olmayan ters-çözüm problemi kapsamında değerlendirilir. Bu nedenle bu tür ters çözüm problemleri yinelemeli teknikler yoluyla çözebilir. Doğrusal olmayan ters-çözüm yöntemleri konvolüsyon modeline dayanır ve sismik gürültüden etkilenirler (Zhang, 2002).

Ters-çözüm problemini kararlı yapmak için yüksek ayrımlı ön-bilgi sınırlamaları kullanılır. Bu ön-bilgilerden son yıllarda en ilgi çekenlerinden biri Cauchy olasılık yoğunluk fonksiyonudur (Sacchi, 1997) ve sismik ters çözümde quadratik olmayan (non-quadratik) regülarizasyon terimi olarak kullanılmaktadır. Bu bölümde, yüksek ayrımlı sınırlamaları çözüme dahil edebilmek için, Bayes kuralı çerçevesindeki Cauchy olasılık yoğunluk fonksiyonları anlatılacaktır.

2.7. Bayes Teoremi

İhtimal dağılımları olarak ifade edilen Bayes teoremi elde edilen model hakkında kararlar vermek için, modelin ön bilgisini ve veriyi birleştirir (Scales ve Smith, 1994). Bayes teoremi aşağıdaki gibi belirtir

$$P(m, d) = \frac{P(m)P(d, m)}{P(d)} \quad (2.26)$$

$\mathbf{P}(\mathbf{m})$, toplanan veriler için bilinen ön bilgi olan model parametrelerin, \mathbf{m} olasılık dağılımını temsil eder. \mathbf{m} 'in ön-dağılımı olarak adlandırılır. İhtimal fonksiyonu, $\mathbf{P}(\mathbf{m}, \mathbf{d})$ veri bilgisinin ön-bilgiyine kadar değiştirdiğini açıklar. Verilerin dağılımı, bir ölçekleme fonksiyonunu rolündedir. Son olarak, geri kalan dağılım terimi $\mathbf{P}(\mathbf{m}, \mathbf{d})$, ölçülen verilerle sağlanan bilgi ile model parametreler hakkında hangi bilginin verildiğini gösterir (Box ve Tiao, 1992). Başka bir deyişle, verilerin doğruluğuna göre modelin doğru olduğu ihtimal dahilindedir (Ulrych ve diğ., 2001). Normalizasyon faktörü olmadan Bayes teoremi yaygın olarak aşağıdaki gibi ifade edilir

$$P(m, d) \propto P(m)P(d, m) \quad (2.27)$$

2.7.1. Bayes Teoremini Kullanarak SEKK Çözümün Türetmesi

Gürültülü verilerin durumunda,

$$Gm - d = n \quad (2.28)$$

Burada \mathbf{n} gürültü vektörüdür. İhtimal fonksiyonu gürültünün dağılımı olarak belirlenir.

$$P(m, d) = P(n) \quad (2.29)$$

Gürültünün Gauss dağılımına sahip olduğunu kabul edilir; ortalama değeri \bar{n} ve varyansı σ^2 . Bu durumda, olasılık fonksiyonu aşağıdaki gibidir:

$$P(n_i) = \frac{1}{\sqrt{2\pi\sigma^2}} \exp \left[\frac{-1}{2\sigma^2} (n_i - \bar{n})^2 \right] \quad (2.30)$$

Farz edelim ki, gürültünün ortalama değeri \bar{n} sıfırdır ve dolayısıyla bu terim ihmal edilebilir. Eğer gürültü ilişkili değilse ve her bir gürültü örneğinin varyansı sabit ise, gürültü vektörünün toplam olasılığı aşağıdaki gibi ifade edilir:

$$P(\mathbf{n}) = P(n_1)P(n_2)P(n_3) \dots P(n_N) \quad (2.31)$$

$$P(n) = \frac{1}{(2\pi\sigma^2)^{\frac{N}{2}}} \exp\left(\frac{-1}{2\sigma^2} \sum_{i=1}^N n_i^2\right) \quad (2.32)$$

$$P(n) = K_1 \exp\left(\frac{-1}{2\sigma^2} \mathbf{n}^T \mathbf{n}\right) \quad (2.33)$$

Model parametreler \mathbf{m}_i , $i = 1, 2, \dots, M$ elemanlardan oluşan vektör ile temsil edilmektedir. Aynı zamanda, bu parametreler ilişkili olmayan, σ_m^2 varyans (standart sapmanın karesi) ve sıfır ortalamaya sahip Gauss dağılımına sahip olduğu farz edilir (Sacchi, 1997). Veriden bağımsız olduğu için gürültünün varyansı skaler bir terim σ_m olarak kullanılabilir (Sacchi, 1997). Bu nedenle, varyansı σ_m^2 ve ortalaması sıfır olan, ön-olasılık aşağıdaki gibi ifade edilebilir:

$$P(m) = \frac{1}{(2\pi\sigma_m^2)^{M/2}} \exp\left(\frac{-1}{2\sigma_m^2} \mathbf{m}^T \mathbf{m}\right) \quad (2.34)$$

$$P(m) = K_2 \exp\left(\frac{-1}{2\sigma^2} \mathbf{m}^T \mathbf{m}\right) \quad (2.35)$$

İhtimal fonksiyonu gürültünün olasılığına ayarlanmıştır. O zaman, (2.33) ihtimal ve (2.35) ön-dağılımlar, Bayes'in kuralı denklem (2.27) de yerine yazılır ise, sonraki dağılım aşağıdaki gibi olur:

$$P(m, d) \propto K_1 K_2 \exp\left(\frac{-1}{2\sigma_m^2} \mathbf{m}^T \mathbf{m}\right) \exp\left(\frac{-1}{2\sigma^2} \mathbf{n}^T \mathbf{n}\right) \quad (2.36)$$

$\mathbf{n} = \mathbf{G}\mathbf{m} - \mathbf{d}$ ilişkisi kullanılır ise,

$$P(\mathbf{m}, \mathbf{d}) \propto K_1 K_2 \exp\left(\frac{-1}{2\sigma_m^2} \mathbf{m}^T \mathbf{m}\right) \exp\left(\frac{-1}{2\sigma^2} (\mathbf{G}\mathbf{m} - \mathbf{d})^T (\mathbf{G}\mathbf{m} - \mathbf{d})\right) \quad (2.37)$$

denklemini elde edilir.

Bir çözüm belirlemenin bir yolu, model parametrelerin bir grubunu bulmaktır, öyle ki $P(\mathbf{m}, \mathbf{d})$ en büyük olsun. Bu çözüm maksimum ön tahminci (maximum a posteriori estimator-MAP) olarak bilinir. Posterior fonksiyonun en büyüklenmesi, aşağıdaki denklemin minimumunun bulunması ile aynıdır.

$$-\ln P(\mathbf{m}, \mathbf{d}) \propto -\ln K_1 K_2 + \frac{1}{2\sigma_m^2} \mathbf{m}^T \mathbf{m} + \frac{1}{2\sigma^2} (\mathbf{G}\mathbf{m} - \mathbf{d})^T (\mathbf{G}\mathbf{m} - \mathbf{d}) \quad (2.38)$$

$-\ln K_1 K_2$ terimi sabittir ve $-\ln P(\mathbf{m}, \mathbf{d})$ ifadesini en küçükleyen çözümü değiştirmez. O zaman, aşağıdaki denklem en küçüklenecek çözümü bulunur.

$$(\mathbf{G}\mathbf{m} - \mathbf{d})^T (\mathbf{G}\mathbf{m} - \mathbf{d}) + \frac{\sigma^2}{\sigma_m^2} \mathbf{m}^T \mathbf{m} \quad (2.39)$$

Denklem aşağıdaki amaç fonksiyonunun şeklini alır,

$$J(\mathbf{m}) = (\mathbf{G}\mathbf{m} - \mathbf{d})^T (\mathbf{G}\mathbf{m} - \mathbf{d}) + \mu \mathbf{m}^T \mathbf{m} \quad (2.40)$$

Burada ağırlıklandırma parametresi verilerin ve model parametrelerin varyansı ile tanımlanır.

$$\mu = \frac{\sigma^2}{\sigma_m^2} \quad (2.41)$$

Bayes MAP çözümü SEKK çözümüne neden olan minimum norm problemi (denklem (2.10)) ile aynı maliyet fonksiyonunu indirger. Bu yüzden, Bayes ters çözümü aynı probleme başka bir bakış açısı sağlar. Burada, en küçükleme ve model parametrelerinin L_2 normu Gauss ön-olasılık dağılımına karşılık gelmektedir.

Daha önce ele alındığı gibi, ters-cözüm problemini dengelemek için uygulanan sınırlamalar ön-bilgiler olarak kabul edilebilir. Ön-olasılık dağılımlarını görüntüleyerek, çözüme yerleştirilen sınırlamalar mantıksaldır. Seyrekliği zorlama amacıyla, amaç fonksiyonu minimize edilebilir (Youzwishen, 2001). Gauss ön-olasılık dağılım fonksiyonu, üstel ön-olasılık dağılım fonksiyonu ve Cauchy ön-olasılık dağılım fonksiyonu ön-olasılık dağılımları olarak kullanılmaktadır. Cauchy fonksiyonunun seyrekliği uygulaması çok etkilidir. Cauchy olasılık fonksiyonu tepe noktasına doğru dar bir dağılım eğridir. Yavaş yavaş ortalamadan sifira yaklaşır. Sinyal bilgisini korumada, eş zamanlı olarak gürültü indirgemedede çok başarılıdır.

2.8. Cauchy Ön-dağılımının MAP Çözümü

Ön dağılım sıfır ortalamalı bir Cauchy dağılımı olarak belirlenir ve bu durumda ihtimal dağılımı Gaussian olarak kalır. Buna göre parametreler için Cauchy olasılık dağılım fonksiyonu,

$$P_{Cauchy}(\mathbf{m}) = \frac{1}{(\pi\sigma_m)^M} \prod_{i=1}^M \left[\frac{1}{1 + (m_i - \bar{m})^2/\sigma_m^2} \right] \quad (2.42)$$

şeklinde ifade edilir. Daha önce açıklandığı gibi, ihtimal fonksiyonu $P(\mathbf{m}, \mathbf{d})$ gürültünün (n) olasılığına eşittir: $\mathbf{n}=\mathbf{Gm}-\mathbf{d}$ alındığında bu olasılık ifadesi,

$$\mathbf{P}(\mathbf{d}, \mathbf{m}) = \mathbf{P}(\mathbf{n}) = K_1 \exp \frac{-1}{2\sigma^2} (\mathbf{Gm} - \mathbf{d})^T (\mathbf{Gm} - \mathbf{d}) \quad (2.43)$$

Şeklinde düzenlenebilir. Cauchy olasılık dağılımı (2.42) sıfır ortalama $\bar{m} = 0$, için düzenlenirse,

$$P_{Cauchy}(\mathbf{m}) = K_2 \left[\prod_{i=1}^M \left(\frac{1}{1 + m_i^2/\sigma_m^2} \right) \right] \quad (2.44)$$

ifadesine indirgenir. “Posterior” terimi denklem (2.43) ve (2.45) birleştiren bir ifadeye dönüşür. Buna göre,

$$P(m, d) \propto K_1 K_2 \left[\prod_{i=1}^M \left(\frac{1}{1 + \frac{m_i^2}{\sigma_m^2}} \right) \right] \times \exp \left(\frac{-1}{2\sigma^2} (Gm - d)^T (Gm - d) \right) \quad (2.45)$$

denklemini yazılabilir. Burada $\frac{1}{a} = \exp \left(\ln \left(\frac{1}{a} \right) \right) = \exp(-\ln(a))$ kullanılarak, posterior dağılımı aşağıdaki gibi düzenlenebilir:

$$P(m, d) = K_1 K_2 \exp \left(\sum_{i=1}^M -\ln \left(1 + \frac{m_i^2}{\sigma_m^2} \right) \right) \times \exp \left(\frac{-1}{2\sigma^2} (Gm - d)^T (Gm - d) \right) \quad (2.46)$$

Posterior fonksiyonunun maksimum olması aşağıdaki denklemin minimum olmasına eşdeğerdir:

$$\frac{1}{2\sigma^2} (Gm - d)^T (Gm - d) + \sum_{i=1}^M \ln \left(1 + \frac{m_i^2}{\sigma_m^2} \right) \quad (2.47)$$

Böylece, quadratik olmayan Cauchy normunu içeren amaç fonksiyonu

$$J(\mathbf{m}) = (G\mathbf{m} - \mathbf{d})^T (G\mathbf{m} - \mathbf{d}) + \mu F(\mathbf{m}) \quad (2.48)$$

Şeklinde yazılabilir. Bu durumda $F(\mathbf{m})$ ağırlıklandırma ve/veya regülarizasyon terimi olarak aşağıdaki gibi tanımlanır:

$$F(\mathbf{m}) = \sum_{i=1}^M \ln \left(1 + \frac{m_i^2}{\sigma_m^2} \right) \quad (2.49)$$

$F(\mathbf{m})$ fonksiyonun bilinmeyen \mathbf{m} parametresine göre kısmi türevi,

$$\frac{\partial}{\partial m_k} F(\mathbf{m}) = \frac{2}{\sigma_m^2} m_k \frac{1}{\left(1 + \frac{m_k^2}{\sigma_m^2} \right)} \quad (2.50)$$

şeklinde elde edilebilir. Sabit terim, $\frac{1}{\sigma_m^2}$ ağırlıklandırma parametresi μ 'nün içine dahil edilirse, regülarizasyon gradyanı aşağıdaki sütun vektör şeklinde ifade edilebilir:

$$\nabla F(\mathbf{m}) = \begin{pmatrix} \frac{\partial F(\mathbf{m})}{\partial m_1} \\ \frac{\partial F(\mathbf{m})}{\partial m_2} \\ \frac{\partial F(\mathbf{m})}{\partial m_3} \\ \vdots \\ \vdots \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 2m_1 \frac{1}{1 + \frac{m_1^2}{\sigma_m^2}} \\ 2m_2 \frac{1}{1 + \frac{m_2^2}{\sigma_m^2}} \\ 2m_3 \frac{1}{1 + \frac{m_3^2}{\sigma_m^2}} \\ \vdots \\ \vdots \end{pmatrix} \quad (2.51)$$

Denklem (2.51) yeniden düzenlediği zaman aşağıdaki gibi olacak:

$$\nabla F(\mathbf{m}) = 2 \begin{pmatrix} \frac{1}{1 + \frac{m_1^2}{\sigma_m^2}} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & \frac{1}{1 + \frac{m_2^2}{\sigma_m^2}} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & \frac{1}{1 + \frac{m_3^2}{\sigma_m^2}} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & \ddots \end{pmatrix} \begin{pmatrix} m_1 \\ m_2 \\ m_3 \\ \vdots \end{pmatrix} \quad (2.52)$$

Sonuç olarak bu aşamalı matematiksel işlem ve düzenlemelerden sonra, regülarizasyon teriminin gradyanı,

$$\nabla F(\mathbf{m}) = 2\mathbf{Q}\mathbf{m} \quad (2.53)$$

Şeklinde basitleştirilerek yazılabilir. \mathbf{Q} bir köşegen matrisidir ve aşağıdaki gibi tanımlanır:

$$Q_{ii} = \frac{1}{1 + m_i^2/\sigma_m^2} \quad (2.54)$$

Bu şekildeki tanımlama seyrek regülarizasyon (sparse regularization) olarak bilinir ve “doğrusal olmayan problem (nonlinear inverse problem)” çözümlerinde yaygın olarak kullanılır. Yansıtabilirlik serisi bol sıfırlı, yani seyrek, bir vektör olduğundan, dekonvolüsyon ve dolayısıyla ters çözüm işlemleri için Cauchy regülarizasyon terimi son derece yararlıdır:

$$\mathbf{G}^T \mathbf{G}\mathbf{m} - \mathbf{G}^T \mathbf{d} + \mu \mathbf{Q}\mathbf{m} = 0 \quad (2.55)$$

2.9. Doğrusal Olmayan Problemin Çözülmesi

Tanımlanan tüm seyrek regülarizasyon terimleri doğrusal olmayan ifadelerle ilişkilidir. Bir problemde doğrusal olmamanın derecesi en iyi çözüm yöntemini belirleyen ana unsurdur. Doğrusal olmayan problemin çözümü için dört genel teknik vardır (Tarantola, 1987). Birincisi, sistematik araştırma veya ayrıntılı arama tekniği olarak bilinir. Bu çözümü bulmak için sistematik olarak model parametrelerinin tüm kombinasyonlarının denemesinden ibarettir. Ancak bu tür çözümler, son derece zaman alıcıdır, çok gerçekçi değildir ve çok küçük problemler haricinde tavsiye edilmez.

Doğrusal olmayan problemleri çözmek için ikinci sınıfı algoritmalar olasılık tabanlı (stochastic) ve/veya istatistikidir, yani kesin bir çözüm değildir. Bunlar güçlü şekilde doğrusal olmayan problemler için kullanılırlar. Bu problemlerde amaç fonksiyonları çoklu moda (multimode) sahiptir ve model uzayının geniş bir alanı araştırılır. Monte Carlo teknikleri ve benzetimli sağlamaştırma (Simulated Annealing) (Kirkpatrick ve diğ., 1983) ve Kalıtsal algoritmalar (Genetic algorithms) (Scale ve Smith, 1994) bu kategoride yer alır.

Gradyan yöntemler yarı doğrusal problemleri çözmek için en uygun olanlardır. Adından da anlaşılacağı gibi, bu teknikler minimumu aramak için amaç fonksiyonunun gradyanını kullanılır. Newton yöntemi ve onun farklı türleri, en dik iniş ve eşlenik gradyan yöntemleri bu grupta yer alırlar. Bu yöntemler, bütün doğrusal olmayan problemlerin çözümünde kullanılabilir. Son olarak, eğer doğrusal olmayan problem yarı doğrusal ise, bu doğrusal bir probleme yaklaştırılabilir ve yinelemeli olarak çözülebilir. Bu yöntem yinelemeli yeniden ağırlıklandırılmış en küçük kareler (YYAEKK) (iteratively re-weighted least square-IRLS) çözümü olarak bilinmektedir. Bu tez kapsamında da bu yöntem kullanılacaktır. Yöntemin esasları Scales ve Smith (1994) ve Sacchi (1997)'ye göre anlatılacaktır.

2.9.1. YYAEKK ile Doğrusal Olmayan Ters Problemlerin Çözümü

Doğrusal olmayan seyrek regülarizasyon terimi içeren bir amaç fonksiyonu için çözüm aşağıdaki denklem ile verilir:

$$\tilde{\mathbf{m}} = (\mathbf{G}^T \mathbf{G} + \mu \mathbf{Q})^{-1} \mathbf{G}^T \mathbf{d} \quad (2.56)$$

\mathbf{Q} matrisi \mathbf{m} vektörü sayesinde tanımlanan bir köşegen matrisdir. Cauchy olasılık dağılımı için ağırlıklandırma matrisinin tanımı daha önceki bölümlerde türetilmiş olduğundan, burada sadece yinelemeli olarak çözüm verilecektir:

$$\tilde{\mathbf{m}}^k = [\mathbf{G}^T \mathbf{G} + \mu \mathbf{Q}^{k-1}]^{-1} \mathbf{G}^T \mathbf{d} \quad (2.57)$$

$$\mathbf{Q}^{k-1} = \mathbf{Q}(\mathbf{m}^{k-1})$$

İndis \mathbf{k} iterasyon sayısını göstermektedir. Algoritma Sacchi (1997)'de açıklandığı gibi aşağıdaki listelenen adımların takipini içerir:

1. Model parametrelerinin başlangıç vektörü \mathbf{m} olarak alınır ve herhangi bir başlangıç bilgisi yok ise, \mathbf{m} vektörü sıfıra eşitlenir, $\mathbf{m}=[0, \dots, 0, \dots]$ Skaler σ_m parametresi belirlenir.
2. Mesela, $\sigma_m=0.01$ gibi. İstenirse her bir k iterasyonda hesaplanan parametrelerin maksimum değerleri ile ilişkilendirilir yeni uyurlanabilir (adaptation)
3. Ağırlıklandırma (trade-off) parametresinin, μ seçilmesi.
4. $\mathbf{G}^T \mathbf{G}$ matrisinin ve model parametrelerin başlangıç vektöründen \mathbf{Q}^0 değerini değerinin hesaplanması.
5. Yinelemeli olarak doğrusal olmayan denklem (2.57)'in çözülmesi.
6. Çözüm aşağıdaki durdurma veya tolerans kriteri sağlanana kadar devam ettirilir. Burada J^k k iterasyonda değerlendirilen amaç fonksiyonudur.

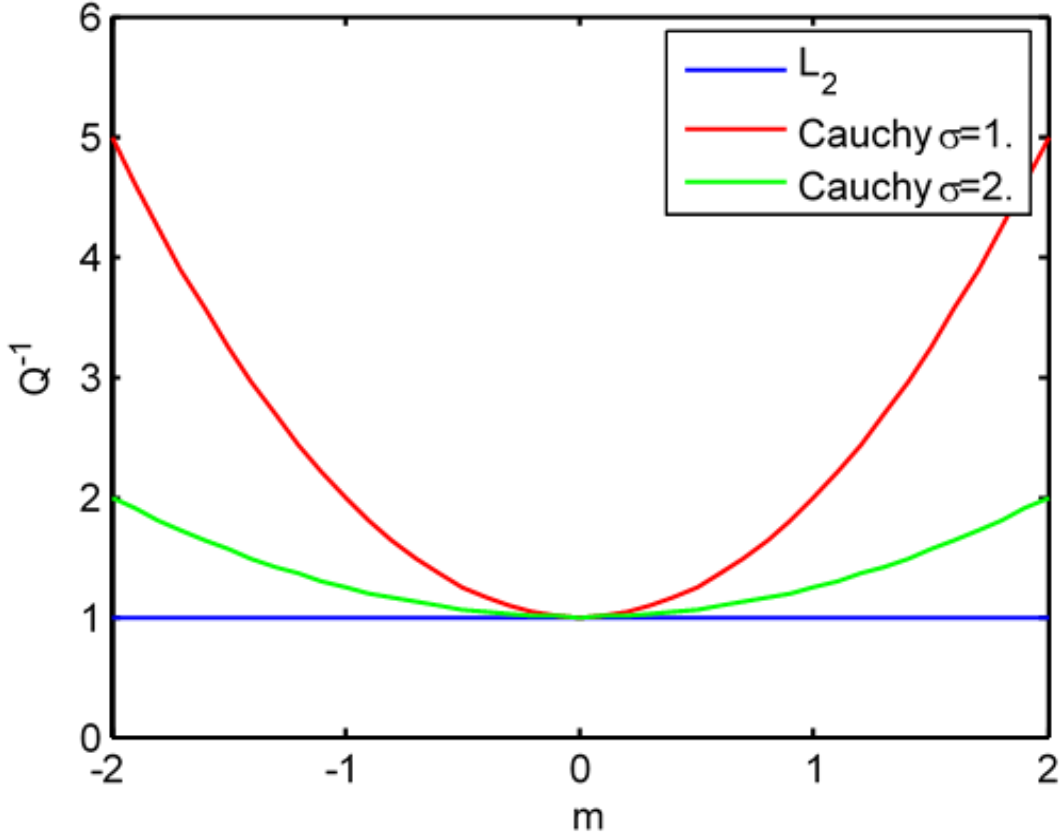
$$\frac{|J^k - J^{k-1}|}{(|J^k| + |J^{k-1}|)/2} \leq \text{Tolerans} \quad (2.58)$$

7. Ağırlıklandırma parametresini ayarlayabilmek için veri hatalarını kullanan χ^2 (Ki-Kare) kriteri değerlendirilir.

Ağırlıklandırma katsayısı veya trade-off parametresini $\mu = \frac{\sigma^2}{\sigma_m^2}$ belirlemek için, parametrelerin bir seçimi kullanılır. Sacchi'ye (1997) göre, sadece bir bağımsız parametre, σ_m belirlemelidir, çünkü gürültünün varyansı, σ^2 , bilindiği kabul edilir. Gürültünün normal dağıtıldığı kabul edilirse, o zaman veriye Pearson Ki-kare testi (χ^2) uygulanır. Bu testin sonuçları skaler parametresini σ_m hesaplamak için kullanılabilir ve sonuç olarak, ağırlıklandırma parametresi μ belirlenebilir.

Anlaşıldığı üzere, yinelemeli çözümler ağırlıklandırılmış en küçük kareler çözümlere benzerler. Ağırlıklandırılma matrisi \mathbf{Q} güncellenir ve dolayısıyla çözüm her iterasyonda yeniden ağırlıklandırılır. Böylece, her iterasyonda ters çözülecek yeni matris oluşur. Bu matrisin EG ters çözümü hızlı ve kararlı bir şekilde gerçekleştirilir. Her iterasyonda, doğrusal olmayan yapının minimumu ya da fazla seyrekliği bir çözüm üretir ve bu çözüm seyrek yansıtma katsayıları serisi varsayımı ile uyumludur (Sacchi, 1997).

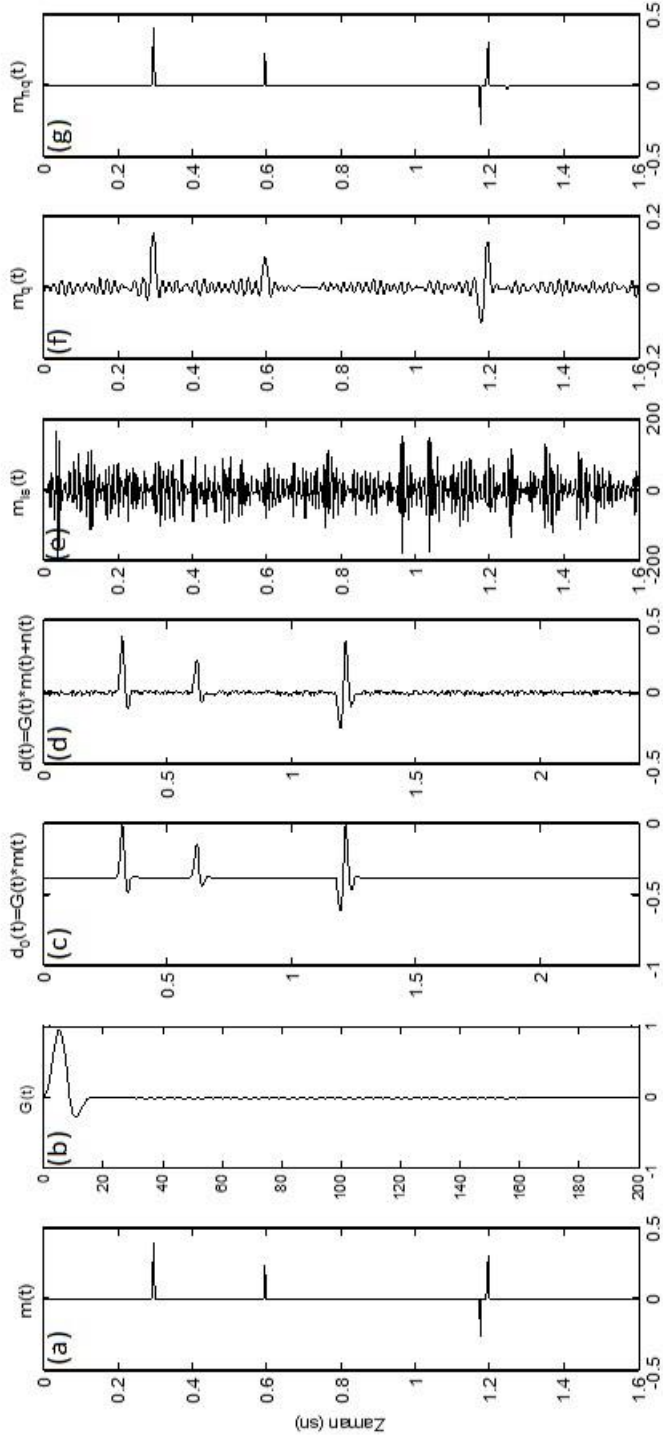
Şekil 2.1 L_2 norm ve Cauchy norm için olasılık dağılım fonksiyonlarını gösterir. Cauchy olasılık fonksiyonu tepe noktasına doğru dar dağılımlı bir eğridir. Yavaş yavaş ortalamadan sıfıra yaklaşır. Sinyal bilgisini korumada, eş zamanlı olarak gürültü indirgemede çok başarılıdır. Bu eğri bir m vektörü için Cauchy olasılık dağılım fonksiyonunun değişimini göstermektedir (denklem (2.54)). Şekilden görüldüğü üzere maksimum seyreklik düşük değişinti (varyans), σ , ile elde edilebilir. Ağırlıklandırma değerleri Cauchy norm modeline bağlı olduğu açıkça Şekil 2.1'den görülmektedir. Bu çözümün seyrek olmasını sağlar.



Şekil 2.1. Farklı varyanslara göre Cauchy olasılık dağılım fonksiyonu (Sacchi, 2006)

Denklem (2.56)'da görüldüğü gibi, Cauchy norm quadratik olmayan çözüm bir sismik iz \mathbf{d} 'den en iyi bir yansıtma fonksiyonu, \mathbf{m} 'in tahmini sağlayacaktır. Bu sonuçlar daha sonra, en küçük kare çözümü (denklem 2.8) ve quadratik norm regülarizasyon çözümü veya SEKK çözümü (denklem 2.16) ile karşılaştırılacaktır.

Teorik olarak, sismik ters çözüm işlemlerinde, bu üç çözüm karşılaştırıldığında, Şekil 2.2'de gösterildiği gibi, yansıtma katsayısı serisinin hangisinde en iyi elde edilebileceği açıkça görülmektedir. Bu şekilde, elde edilen \mathbf{m} yerin yansıtma katsayısı serisini temsil eder, \mathbf{G} dalgacı, \mathbf{d}_0 gürültüsüz sismik izi ve \mathbf{d} gürültülü sismik izi temsil eder. Sismik iz, yansıtma katsayısı serisi ile dalgacığın konvolüsyon işleminden hesaplanmaktadır. Şekil üzerinde, en küçük kareler, quadratik ve quadratik olmayan ters çözüm sonuçları sırasıyla \mathbf{m}_l , \mathbf{m}_q ve \mathbf{m}_{nq} olarak gösterilmiştir



Şekil 2.2. En küçük kareler, quadratik, ve quadratik olmayan çözümlerin yansima serileri

2.10. Yinelemeli ve Bant Sınırlı Empedans (BSEMP) Ters Çözümü Yöntemleri

Tabakalar arasında akustik empedans kontrastı olduğunda sismik yansıma oluşmaktadır. Yansıtılan enerjinin miktarı sınır boyunca empedans büyüklüğünün bir fonksiyonudur. Empedansda küçük bir değişiklik olduğunda yansıyan enerjinin miktarında küçük bir değişim; empedans sonuçlarında büyük bir değişim olduğunda yansıyan enerjide büyük bir miktar değişim olacaktır. Empedansdaki artış pozitif yansıma katsayılarına neden olur, buna karşılık empedansdaki azalma negatif yansıma katsayılarına neden olur. Bu olay yansıma genliklerinin polaritelerini tanımlar. Sonuç olarak, yansıtıcı boyunca genlik değişimleri (veya akustik empedans değişiklikleri) tabakaların özelliklerindeki değişimleri gösterir. Yansıma genliklerindeki değişimler kayaların gözenekleri içerisindeki sıvı değişimleriyle ilişkili olabilir, bu doğrudan hidrokarbon varlığının bir göstergesidir (Onajite, 2014).

Snell yasasına göre, yansıyan ve kırılan (iletlen) dalgalar iki farklı ortam arasındaki sınırlarda oluşur (Beck, 1991). Gelen dalga bir sınıra ulaştığı zaman, enerjisi yansıyan ve kırılan dalga enerjilerine dönüşür. Her dalganın enerjisinin büyüklüğü kendi genliklerine göre gösterilir ve bu sınırın altındaki ve üstündeki tabakaların özelliklerine göre değişen kontrasta bağlıdır. Yüksek empedansa sahip sınırlar çok az enerji iletir ve neredeyse her şeyi yansıtır. Mesela hava ve bir katı materyal arayüzeyine bir dalga geldiğinde yaklaşık olarak aynı genlikte geri yansıtacaktır.

Normal geliş açısıyla (kaynak ve alıcı aynı pozisyonda), yani arayüze dik gelen bir sismik sıkışma dalgası (P-dalgası) farklı hız ve yoğunluğa sahip tabakaların arayüzeyine geldiğinde hiçbir şekilde yansıyan veya kırılan kayma veya kesme (shear) dalgasına (S-dalgası) dönüşmez. Bu durumda geliş açısı etkisi yoktur ve gelen, yansıyan ve iletilen dalga tek türdür. Buna göre 2B'lu bir yer ortamında farklı akustik empedans sahip iki tabakayı ayıran bir sınıra gelen dalganın yansıma dalgasına oranı yansıtma katsayısı olarak tanımlanır:

$$\frac{A_{refl}}{A_{in}} = \frac{\rho_2 v_2 - \rho_1 v_1}{\rho_2 v_2 + \rho_1 v_1} \quad (2.59)$$

Buna göre iki tabakalı bir ortam için yansıtma katsayısı akustik empedans $Z = \rho v$ ilişkisinden yararlanarak,

$$R = \frac{Z_2 - Z_1}{Z_2 + Z_1} \quad (2.60)$$

şeklinde yazılabilir. Jeofizikte, yer içi yaygın olarak katmanlı veya tabakalı yer modeli ile temsil edilir. ρ_j ve v_j , j , tabakanın yoğunluğunu ve hızını temsil etmektedir. Ferguson ve Margrave (1996) tarafından anlatıldığı gibi, normal geliş dalgası kabulüne göre her tabakanın akustik empedansına bağlı olarak yansıtma katsayısı aşağıdaki denklem ile ifade edilir:

$$r_j = \frac{Z_{j+1} - Z_j}{Z_{j+1} + Z_j} \quad (2.61)$$

r_j = Sismik yansıtma katsayısı, Z_j = akustik empedans

Z_{j+1} için denklem (2.61) çözülür ve düzenlenirse,

$$r_j Z_{j+1} + r_j Z_j = Z_{j+1} - Z_j \quad (2.62)$$

$$Z_{j+1}(1 - r_j) = Z_j(1 + r_j) \quad (2.63)$$

$$Z_{j+1} = Z_j \left(\frac{1 + r_j}{1 - r_j} \right) \quad (2.64)$$

$$Z_n = Z_1 \left[\left(\frac{1 + r_1}{1 - r_1} \right) \left(\frac{1 + r_2}{1 - r_2} \right) \dots \left(\frac{1 + r_{n-1}}{1 - r_{n-1}} \right) \right] \quad (2.65)$$

$$\Rightarrow Z_{j+1} = Z_1 \prod_{k=1}^j \left(\frac{1+r_k}{1-r_k} \right) \quad (2.66)$$

sonucu elde edilir. $|r(t)| < 1$ 'dir. Denklem (2.66)'nin doğal logaritmasını alır ve Taylor serisine açılır ise,

$$\Rightarrow \ln \left(\frac{Z_{j+1}}{Z_1} \right) = \sum_{k=1}^j \ln \left(\frac{1+r_k}{1-r_k} \right) \quad (2.67)$$

elde edilir. Burada,

$$\ln \left(\frac{1+x}{1-x} \right) \approx 2x.$$

Eşitliği dikkate alınarak aşağıdaki denklem elde edilir:

$$\Rightarrow \ln \left(\frac{Z_{j+1}}{Z_1} \right) \approx 2 \sum_{k=1}^j r_k \quad (2.68)$$

Burada, Z_{j+1} için çözüm yapılır ise,

$$Z_{j+1} = Z_1 \exp \left(2 \sum_{k=1}^j r_k \right) \quad (2.69)$$

üstel ifade içinde yansıtma katsayılarının bir ayrık toplamı ile bir başlangıç empedans değerine göre (Z_1) ardışık tabakaların akustik empedans değerleri hesaplanabileceği bir formül elde edilmiş olur. Eğer yansıtma katsayısı ölçeklenmiş bir sismik iz olarak

düşünülür ise, yani $d_k = \frac{2r_k}{\gamma}$ tanımlanır ve denklem (2.69)'da yerine yazılır ise, o zaman denklem (2.69) yeniden pratik amaçlar için aşağıdaki şekilde olur.

$$Z_{j+1} = Z_1 \exp \left(\gamma \sum_{k=1}^j d_k \right) \quad (2.70)$$

Denklem (2.69)'in türetilmesi aşağıda özetlenmiştir.

$$r_j = \frac{Z_{j+1} - Z_j}{Z_{j+1} + Z_j} \approx \frac{Z(\Delta j)}{2Z(j)} \approx \frac{dZ(j)}{2Z(j)} \approx \frac{\partial \ln[Z(j)]}{\partial j} \frac{1}{2} \quad (2.71)$$

$$\ln \frac{Z(j)}{Z(j_0)} = \int_{j_0}^j 2r(k) dk \quad (2.72)$$

$j_0 = 0$ kabul edilirse,

$$Z(j) = Z(0) \exp \left[2 \int_{j_0}^j r(k) dk \right], \quad (2.73)$$

Burada, $Z(0)$ başlangıç empedans değeridir ve bu integral formu basitçe denklem (2.70)'deki ayrık form şeklinde yazılabilir.

Yukarıda gösterildiği gibi, üç farklı denklem akustik empedans hesaplamasında kullanılabilir. Her birinin kendi avantajları ve dezavantajları vardır. Denklem (2.66) yinelemeli olarak yansıma katsayısı serisinden akustik empedansı hesaplar. Denklem (2.66) algoritması kullanması daha doğrudur, ancak algoritma yavaş çözüm gerçekleştirir. Denklem (2.69) yansıma vektörünü üstel integrasyona tabi tutarak empedansı hesaplar.

Denklem (2.69) algoritma kullanması daha hızlıdır, ancak denklem (2.69) yöntemine göre daha az doğrulukla hesaplama yapar. Denklem (2.66) ve (2.69), yinelemeli ters çözüm yöntemleri olarak isimlendirilir.

Örnekleme aralığı, $dt=4ms$ olan tipik bir sismik veri yaklaşık 10 Hz-80 Hz frekans bandı aralığına sahiptir. Çoğu araştırmacılar sismik verinin 0-10 Hz arası frekans bandını ihmal ederler, çünkü bu kısımda çoğunlukla düşük frekanslı uyumlu gürültüler (mesela yüzey dalgası gürültüleri) yer alırlar ve ön işlemlerle veriden atılırlar. Ancak bu spektral boşluğun iğneciğe yaklaşmak ve dolayısıyla empedans çözümü için doldurulması gerekmektedir (Galbraith ve Millington, 1978). Yinelemeli ters çözüm yöntemleri ile empedans tahminleri, yansıma verisindeki bu spektral boşluk nedeniyle çoğunlukla başarısız olur. Bu nedenle, yansıma serisinden mutlak bir empedans sonucu bulunamaz. Bant-sınırlı frekansa (10-80 Hz) ek olarak düşük frekans bileşenini geri kazanılmasının bir yolu denklem (2.70)'i kullanmaktır. Bu Bant Sınırlı EMPedans (BSEMP) ters çözüm algoritması olarak adlandırılır. Bu yöntemi kullanmanın avantajı her zaman çözümün sınırlı bant genişliğinin ötesine uzanan bir çözüm üretmesidir. Yani, düşük frekanslar çözüme dahil edilir. Denklem (2.70)'de sismik izin integrali alınır ve daha sonra üst alınarak empedans iz oluşturulur. BSEMP algoritmasında, empedans tahminleri ön şartlandırılmıştır, sismik iz ölçeklenmiştir ve ters çözüm gerçekleştirilmiştir.

3. YAPILAN ÇALIŞMALAR

Bu bölüm, yüksek ayrımlı dekonvolüsyon ve akustik empedans ters çözümü elde etmek için Bölüm 2’de açıklanan ayrık ters çözüm teorisi sentetik veriler üzerinde test edilecek ve sonra bir arazi sismik verisine uygulanacaktır. Bir sismik izden yüksek ayrımlı yansıma izleri elde etmek için, EKK, quadratik, Cauchy norm regülarizasyon çözümleri için sırasıyla denklem (2.8), denklem (2.16), ve denklem (2.56)’ya bağlı MatLab algoritmaları geliştirilerek kullanılmıştır. Bununla birlikte, denklem (2.66) ve denklem (2.73)’e bağlı olarak sırasıyla ardışık ve bant sınırlı empedans ters çözüm algoritmaları Matlab ortamında yansıma kesitlerinden akustik empedans kesitlerini elde etmek için geliştirilerek kullanılmıştır.

3.1. Tek Boyutlu Sentetik Sismik İz

Sismik iz modellemesi (veya sentetik iz) bir yansıtma katsayısı modeli ve bir dalgacık modelinin konvolüsyonu ile gerçekleştirilmiştir. Bu sentetik model akustik empedans ters çözümünün güvenilirliği ve doğruluğu açısından, en küçük kareler, quadratik regülarizasyon ve Cauchy norm regülarizasyon teknikleri ile değerlendirilmiştir. Tabakalı yer modeli farklı hız ve yoğunluk değerleri kullanılarak yapılandırılmıştır. Bu kapsamda denklem (2.61) kullanarak yansıtma katsayıları hesaplanmış ve Şekil 4.1’de gösterilmiştir.

Sentetik iz modellemesi için hakim frekansı 20 Hz ve örnekleme aralığı 0.004 s olan sıfır fazlı Ricker dalgacığının minimum fazlı eşdeğeri kullanılmıştır (Şekil 4.2). Minimum fazlı eşdeğere dönüştürme işlemi logaritmik genlik spektrumunun üstel (exponential) değerlerinin ters Fourier dönüşümü olan Kolmogoroff faktörizasyon tekniği ile gerçekleştirilmiştir. Hesaplanan sentetik sismik iz Şekil 4.3’de ve bu ize S/G=5 olacak şekilde gelişigüzel gürültü eklenmiş durumu Şekil 4.4’de görüntülenmiştir.

Bu model sismik izden yansıtma katsayılarını tekrar elde etmek için sismik ize dekonvolüsyon uygulanarak temel işlemdir. Aslında bu işlem tam olarak dalgacığın etkisinin sismik üzerinden kaldırılmasıdır. Buna tersine modelleme de denilmektedir.

Sismik izden yansıma katsayılarının kestirimi için üç farklı yöntem kullanılmıştır. Bunlar sırasıyla en küçük kareler yöntemi, quadratik regülarizasyon ve Cauchy norm regülarizasyon yöntemleridir. Kullanılan algoritmanın testi ve dekonvolüsyon işlemi ile eş zamanlı olarak gürültünün bastırılması için uygulamalar Bölüm 4'de anlatılmıştır.

3.1.1. Sismik İzden Yansıma Katsayılarının Hesaplanması

Denklem (2.8) ile verilen en küçük kareler ters çözüm yöntemi ve eşlenik gradyan tekniği yardımı ile, yansıma katsayılarının hesaplanması gerçekleştirilmiş ve Şekil 4.5'de sunulmuştur. Denklem 2.13'de verilen amaç fonksiyonu model norm ($m^T m$) ve hata normu $[(d-Gm)^T(d-Gm)]$ arasındaki dengeyi sağlayan uygun bir ağırlandırma parametresinin seçilmesi için kullanılmıştır. Elde edilen norm değerlerinin çizimi L- eğrisini verir ve eğrinin köşesine en yakın değer ağırlıklandırma parametresi, μ , olarak kullanılır. Bu parametrenin en önemli özelliği hem model normu hem de hata normunu dengelemesidir. Şekil 4.6'da gösterildiği gibi en iyi ağırlıklandırma parametresi $\mu=0.016572$ olduğu bulunmuştur. Sismik izden yansıma katsayılarının hesaplanması denklem (2.16) ile verilen quadratik regülarizasyonu ters çözüm yaklaşımı ile de hesaplanmıştır. Bu çözüm için $\mu=0.016572$ kullanılmıştır. Elde edilen sonuç Şekil 4.7'de gösterilmiştir.

Sismik izinden yansıtma katsayılarını yüksek doğruluk ve güvenilirlikte elde etmek için denklemini (2.57) ile tanımlanan Cauchy norm regülarizasyon yöntemi uygulanmıştır. Denklemin 2.54 yardımıyla, ağırlık parametresi, $\mu=0.01$, skaler/ölçek faktörü $\sigma_m=0.01$ olarak kullanılmış ve Q matrisi oluşturulmuştur. Dolayısıyla, denklem (2.57)'de verilen ön-şartlandırılmış eşlenik gradyan çözücü (ÖŞEG) ile 15 iterasyonu sonucunda arzu edilen sonuca ulaşılmıştır (Şekil 4.8). Bununla birlikte, sismik izin genlik spektrumu ve elde edilen tüm sonuçların genlik spektrumları sırasıyla Şekil 4.9, Şekil 4.10, Şekil 4.11, Şekil 4.12, Şekil 4.13, ve Şekil 4.14 gösterilmiştir.

3.1.2. Yansıma Kesitlerinden Akustik Empedans Kesitlerinin Hesaplanması

Akustik empedans ters çözümünün amacı yansıma katsayılarından yararlanarak yer stratigrafik modelinin oluşturulmasıdır. Bu daha önce verilen denklem (2.67)'in kullanımı ile yinelemeli ters çözüm yöntemini kullanarak elde edilebilir. Akustik empedans ters çözümü için ardışık (recursive) versiyonu olan denklem (2.67), MatLab ortamında programlanarak kullanılmıştır. Bu algoritma ile empedans izinin hesaplanması için birinci tabakanın akustik empedans değeri ön bilgi olarak verilir ve yansıma katsayıları ardışık olarak hesaplanır. Dekonvolüsyon sonuçları sırasıyla Şekil 4.5'te, Şekil 4.7'de ve Şekil 4.8'de, sunulmuştur. Denklem (2.67) kullanarak hesaplanan empedanslar Şekil 4.15, Şekil 4.16 ve Şekil 4.17'da gösterilmiştir.

3.2. İki Boyutlu Sentetik Sismik Verileri

Benzer şekilde, iki boyutlu (2B) sentetik sismik veri (Şekil 4.22 gösterilmiştir) oluşturulmuştur. Bu kesit sıfır ofset kesit olup, 50 alıcı noktasında hesaplanmıştır. Yansıma katsayıları serisi gelişigüzel zaman değerlerinde ve genlikleri (-1,1) arasında değişen yansıma katsayısı modeli ile belirlenmiştir. Bu 2B'lu sismik veriye Denklemler (2.8), (2.16) ve (2.57)'ye en küçük karelerin yöntemi, quadratik regülarizasyon ve Cauchy norm regülarizasyon teknikleri uygulanarak yansıma katsayısı kesitleri elde edilmiştir. Yansıma katsayısı kesitleri ve bunlara karşılık gelen frekans-dalgasayısı (f-k) spektrumları Şekil 4.23, Şekil 4.24 ve Şekil 4.25'de gösterilmiştir.

3.3. İki Boyutlu Arazi Verisi

Bu bölümde, sentetikler üzerinde test edilmiş olan en küçük kareler, quadratik regülarizasyon ve Cauchy norm regülarizasyon algoritmaları gerçek bir yığma kesitine uygulanmıştır. Verideki izlerin sayısı 64, zaman örnekleme aralığı 0.004 s ve OON iz aralıkları 10 m'dir. Giriş sismik arazi verisi Şekil 4.26 (a)'da gösterilmektedir. Sonuçlar Şekil 4.26 (b), Şekil 4.26 (c) ve Şekil 4.26 (d) gösterilmiştir ve bunlara karşılık gelen genlik spektrumları da sırasıyla Şekil 4.27 (a), Şekil 4.27 (b), Şekil 4.27 (c) ve Şekil 4.27

(d) gösterilmiştir. Bu kesitlerden yararlanarak empedans kesitleri hesaplanmış ve Şekil 4.29 (a), Şekil 4.29 (b), Şekil 4.29 (c)'de gösterilmiştir. Şekil 4.28'de gösterilen dalgacığın kestirimi için sismik verinin yuvarlatılmış ortalama güç spektrumunun ters Fourier dönüşümünden sıfır fazlı olarak elde edilmiş ve sonrasında minimum faz eşdeğeri kullanılmıştır.



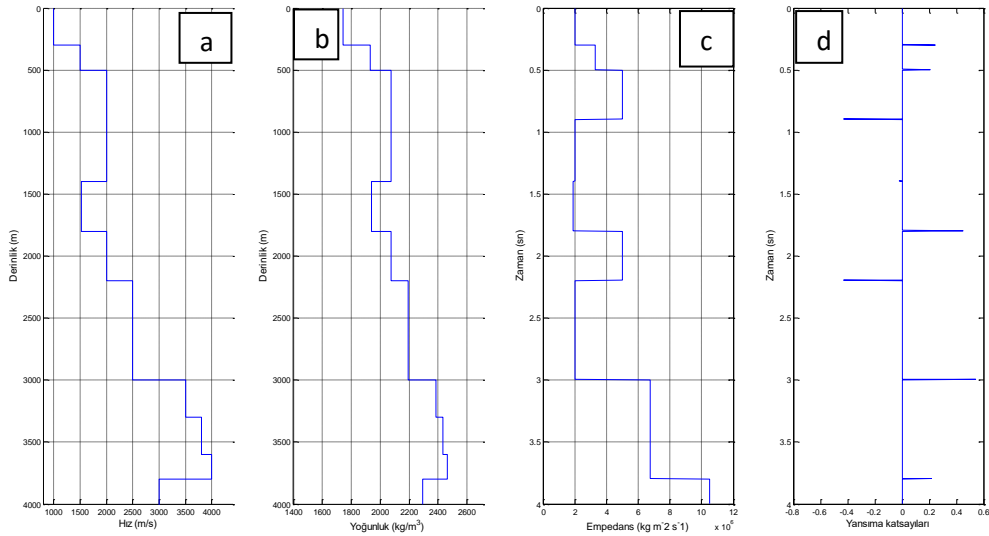
4. BULGULAR VE TARTIŞMA

4.1. Bulgular

Bu tez çalışmasının temel amacı, sismik verilerin yüksek ayrımlı dekonvolüsyon sonuçlarını hesaplamak ve bu sonuçları kullanarak akustik empedans iz ve kesitlerini yüksek uyumluluk ve doğrulukta hesaplamaktır. Dolayısıyla, çalışmanın ana ağırlığı sismik verilerin yüksek ayrımlı dekonvolüsyon sonuçlarını elde etmektir. Bunun nedenle Cauchy norm dekonvolüsyon metodolojisinin matematiksel esasları açıklanmış, test edilmiş ve arazi verilerinin incelenmesinde kullanılmıştır. Ancak yöntemden elde edilen sonuçları nicelik ve nitelik açısından karşılaştırma amaçları için, aynı sismik verinin EKK ve quadratik regülarizasyon çözümleride elde edilmiştir. Geliştirilen algoritmalar, 1B, 2B sentetik ve bir tane de 2B arazi verisine uygulanmıştır. Elde edilen tüm sonuçlar aşağıda sırasıyla sunulmuştur.

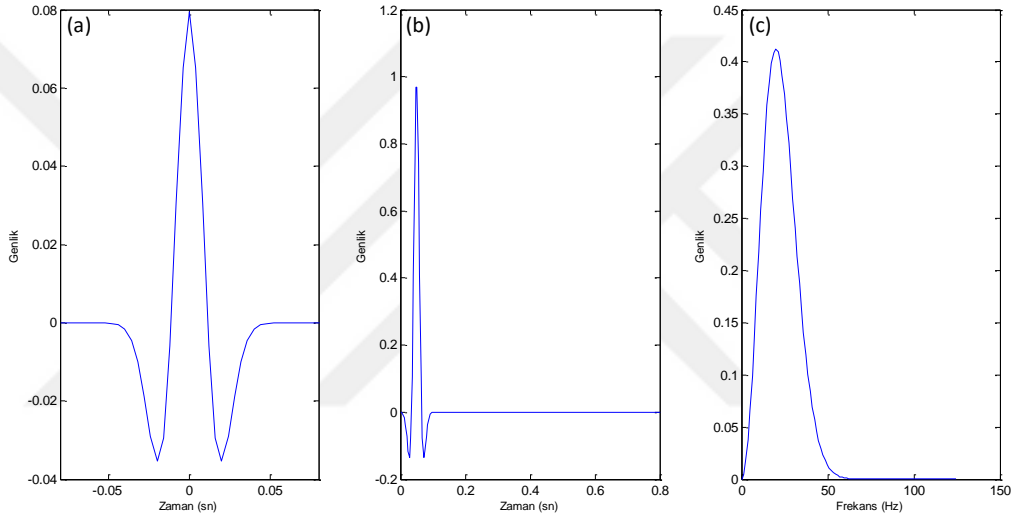
4.1.1. Tek Boyutlu Sentetik Sismik Veriler

1B'lu boyutlu sentetik sismik veri hesaplamak için hız modeli, yoğunluk modeli empedans modeli ve yansıtma katsayısı serisi modeli Şekil 4.1'de gösterilmiştir.



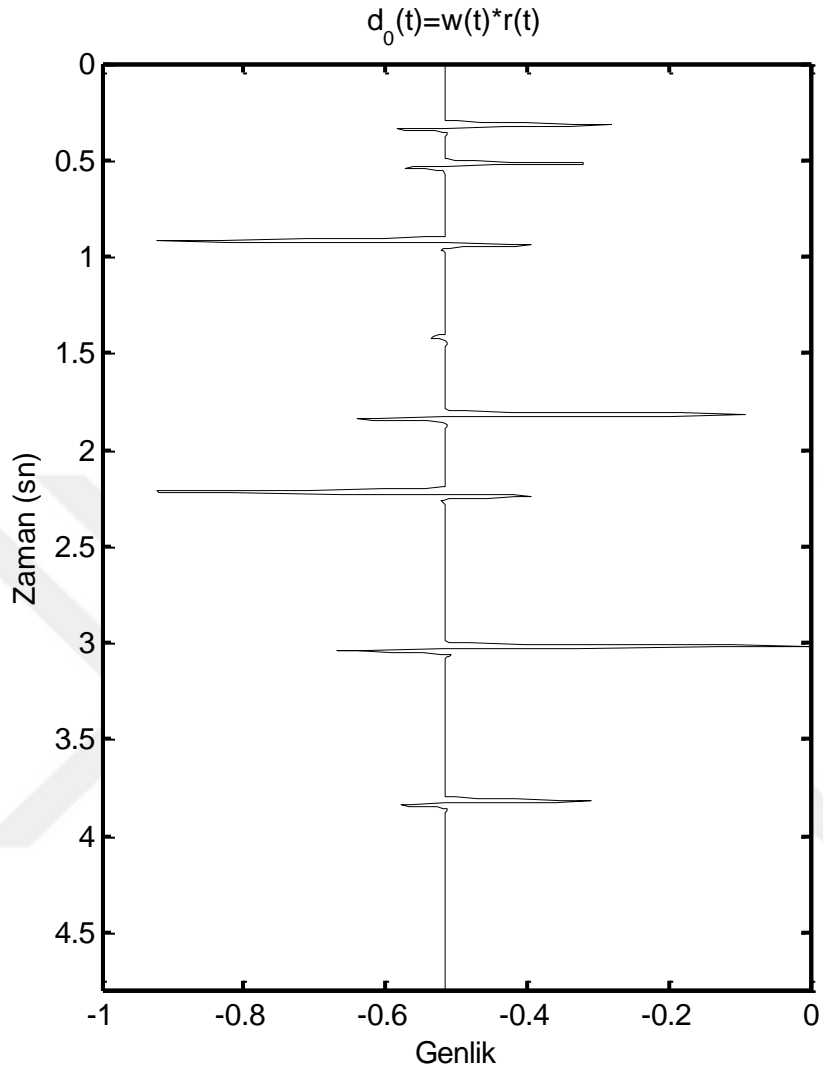
Şekil 4.1. (a) Hız modeli, (b) Yoğunluk modeli (c) Empedans modeli (Hız x yoğunluk), (d) Sentetik sismik modelin yansıtma katsayıları

Şekil 4.1'deki yansıma modeli, 5 pozitif polariteli ve 3 negatif polariteli yansımaları içermektedir (Şekil 4.1d). Yansımaların genlikleri (-0.6, 0.6) aralığında değişmektedir. Yansımalar farklı zaman aralıklarında gerçekleşmiştir. Örneğin, ilk pozitif yansıma 0.3s'de kaydedilmiş ve ilk negatif yansıma 0.8s'de kaydedilmiştir. Minimum faz dalgacığına dönüştürülen Ricker dalgacığı Şekil 4.2'de gösterilmiştir. Dalgacığın maksimum genlik (tepe) frekansı 20 Hz ve örnekleme zamanı 0.004s'dir.



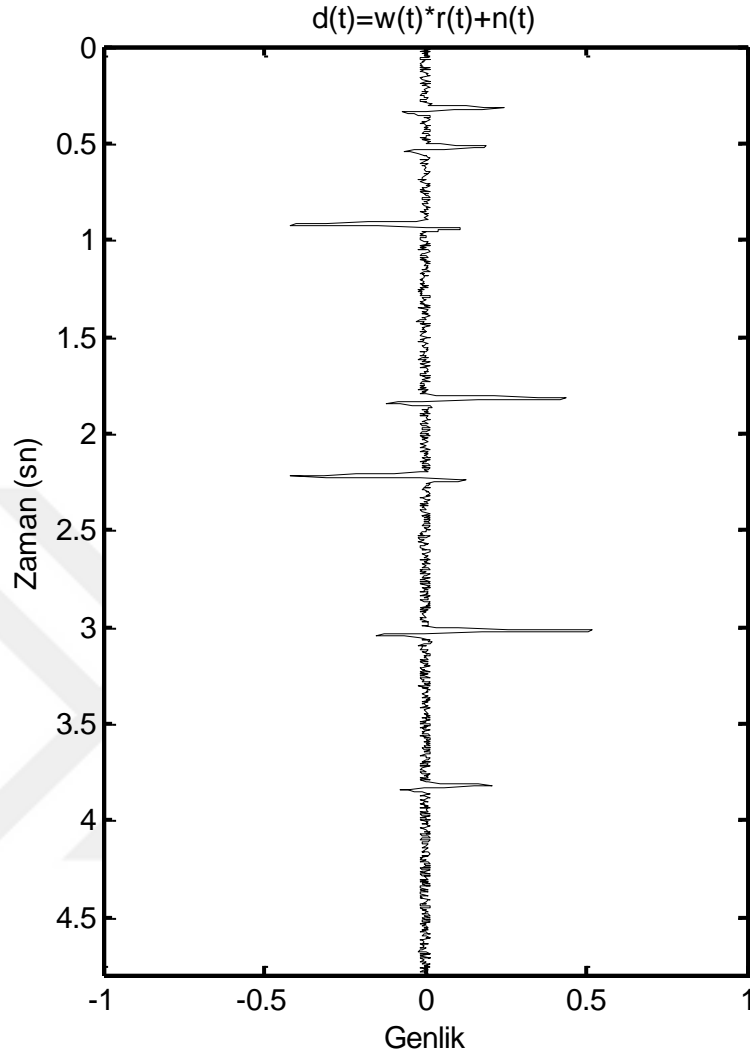
Şekil 4.2.(a) Sıfır fazlı Ricker dalgacığı (b) Minimum fazlı Ricker dalgacığı
 (c) Genlik spektrumu, tepe frekansı 20 Hz, örnekleme zamanı 4ms'dir

Yansıma katsayısı modeli (Şekil 4.1d) ile Ricker dalgacığının (Şekil 4.2b) konvolüsyonel sismik izi hesaplanarak Şekil 4.3'de sunulmuştur.



Şekil 4.3. Giriş sismik izi

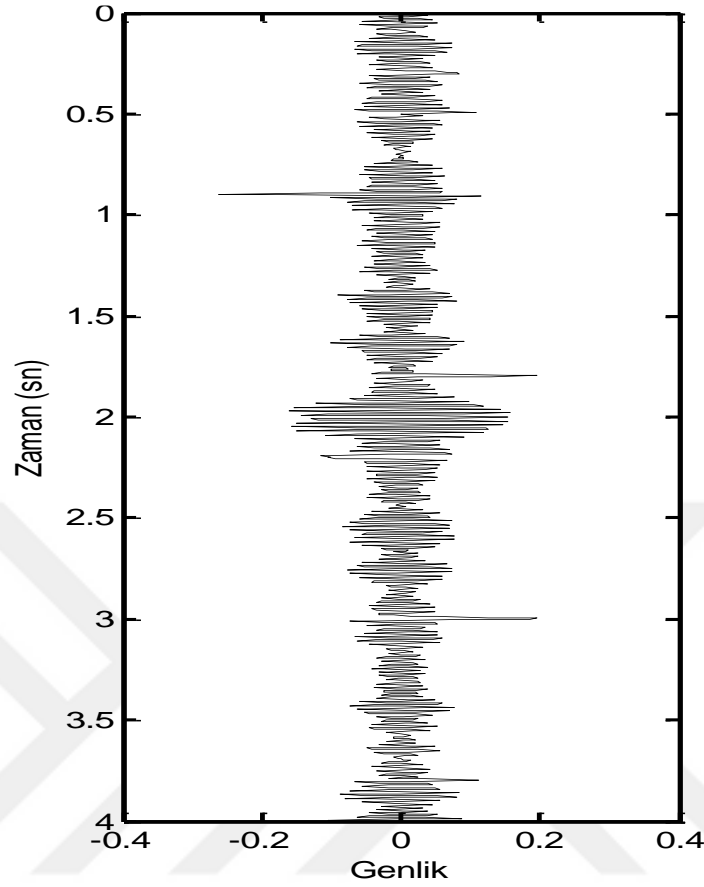
Şekil 4.3'te, giriş iz gösterilmektedir. Sismik iz $S/G=5$ olacak şekilde gelişgüzel gürültü eklenerek elde edilen gürültülü sismik iz Şekil 4.4 'de gösterilmiştir. Şekil 4.4'teki gürültülü sismik izden yüksek ayrımlı dekonvolüsyon için gürültünün ters çözüm içinde minimize edilmesi gerekmektedir.



Şekil 4.4. Gelişigüzel gürültü içeren sismik iz (S/G=5)

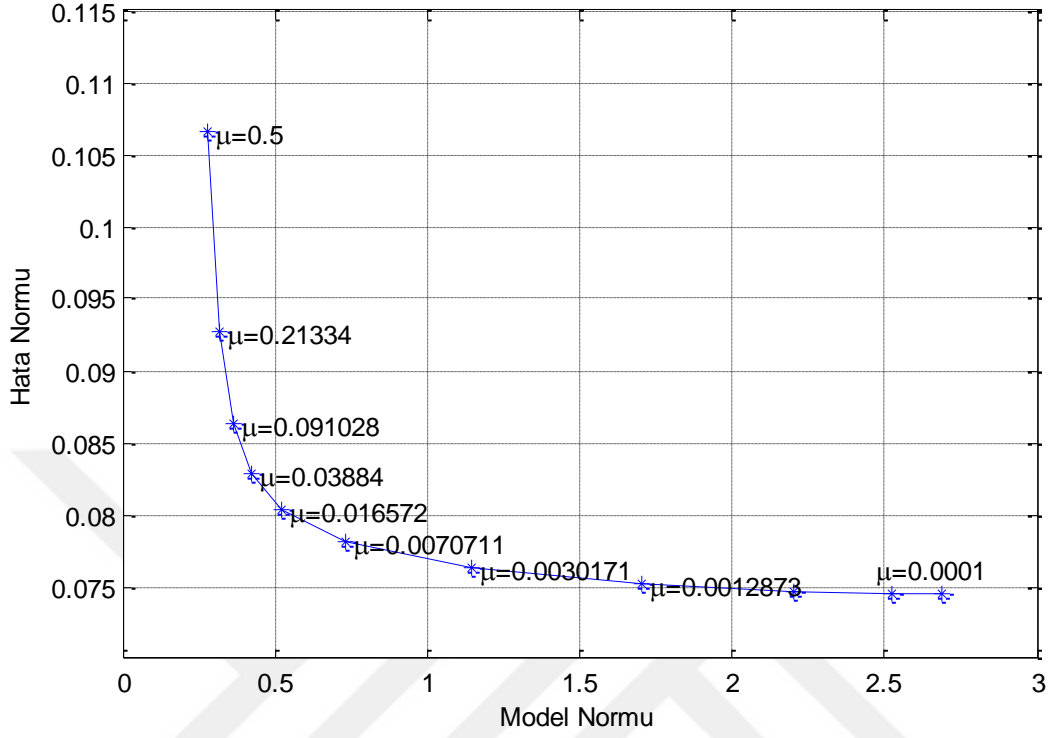
4.1.1.1. Dekonvolüsyon ile Yüksek Ayrımlı Yansıma Kesiti

Yansıma katsayılarını sismik izden (Şekil 4.4) tekrar geri elde etmek için, Şekil 4.4'e dekonvolüsyon uygulanmıştır. Bu işlem, Şekil 4.4'ün ayrımlılığını artırmak ve yansıma katsayılarını genlik, polarite ve pozisyon açısından tekrar elde edebilmek için uygulanmıştır. Bölüm 3'te açıklandığı üzere, gürültülü sismik ize önce, en küçük kareler dekonvolüsyon yöntemi uygulanmış ve elde edilen yansıma katsayıları izi Şekil 4.5'te gösterilmiştir.



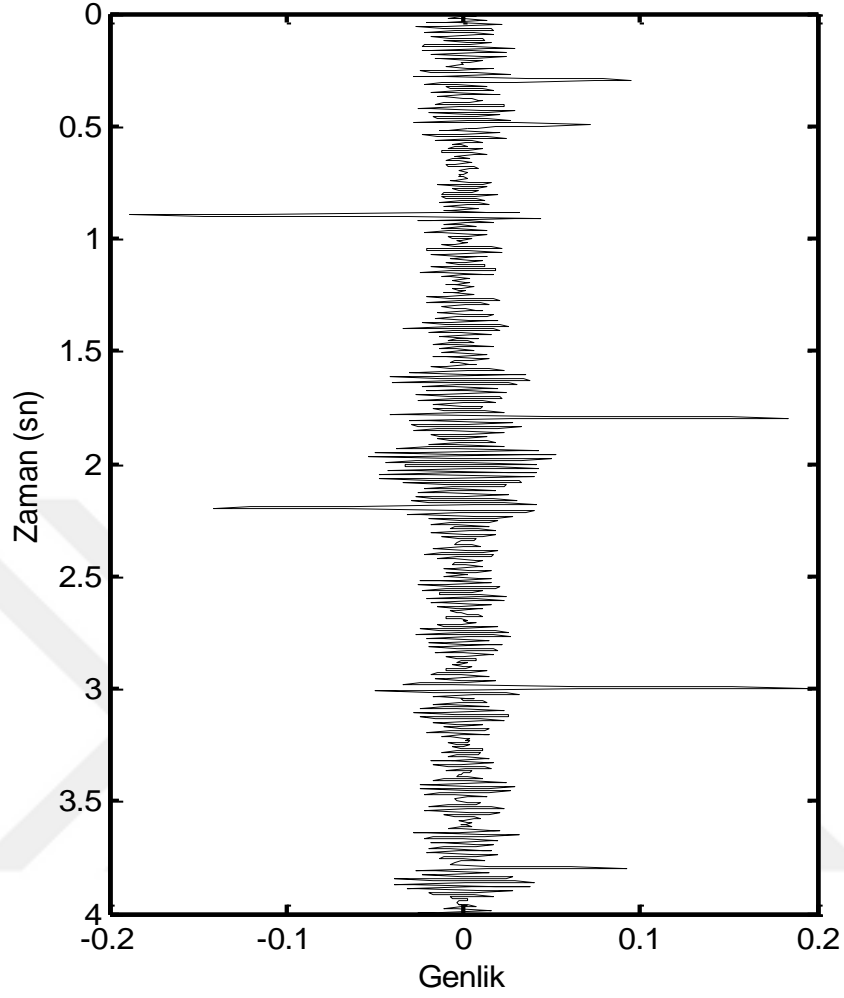
Şekil 4.5. EKK dekonvolüsyon yöntemi ile elde edilen sonuç izi

Dekonvolüsyon sonrası sismik izlerin yansıtma katsayısı serisini temsil ettiği kabul edilir. Bu kapsamda değerlendirildiğinde elde edilen sonucun düşük ayrımlı hem de gürültü etkisinin halen daha kalmış olduğu açıkça görülmektedir. Bununla birlikte, gürültü genlikleri çok güçlenmiş ve bu nedenle düşük genlikli yansımalar maskelenmiştir. Böyle bir sonuç arzu edilmez ve aynı zamanda da iyi bir yorumu zorlaştırır. Bu nedenle gürültü bileşenini sönmölemek için sönmö terimi içeren quadratik regölarizasyon dekonvolüsyon yöntemi Şekil 4.4'deki sismik ize uygulanmıştır. Bunun için gerekli olan ağırlıklandırma katsayısı L-eğrisinden belirlenmiştir (Şekil 4.6). Şekil 4.6 göröldüğü üzere, en uygun ağırlıklandırma katsayısı, $\mu=0.016572$ olarak belirlenmiştir. Bu değer L eğrisinin köşesine en yakın değerdir. Çünkü bu noktada hem hata normu hem de model norm en küçük değerindedir.



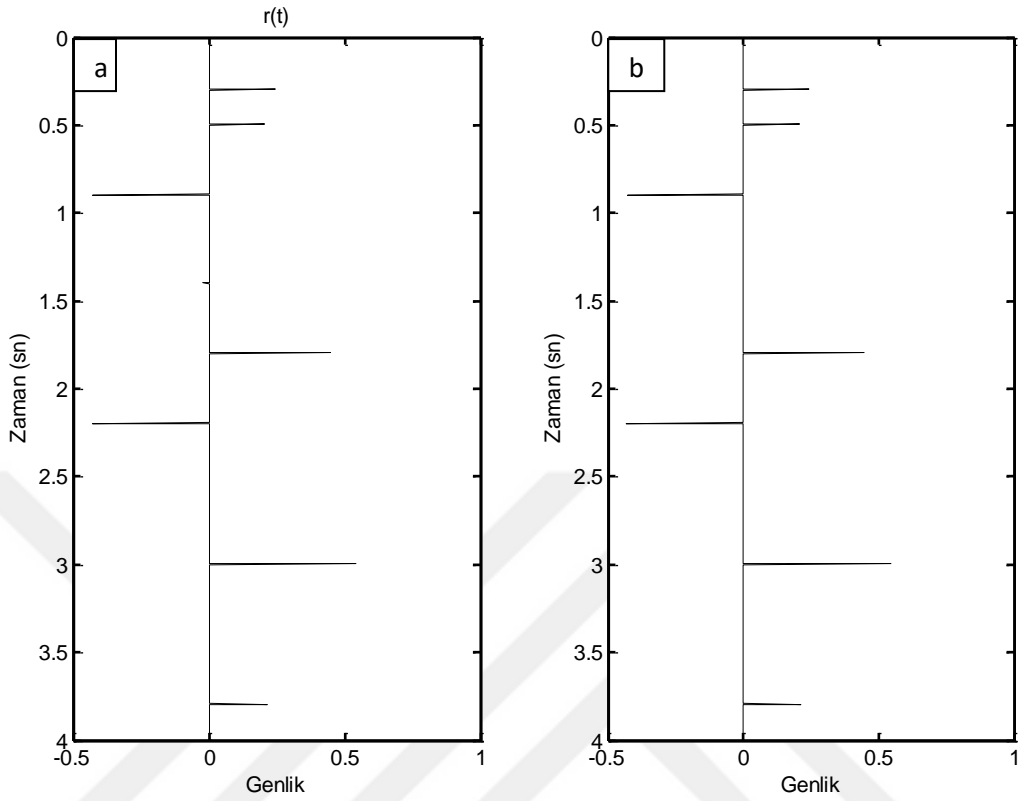
Şekil 4.6. L-eğrisi veya regülarizasyon parametre optimizasyon eğrisi

Ağırlıklandırma değeri quadraik regülarizasyon denkleminde kullanılmış ve elde edilen dekonvolüsyon sonucu Şekil 4.7’de görüntülenmiştir.



Şekil 4.7. Quadratik regülarizasyon yöntemi için yansıma katsayıları izi

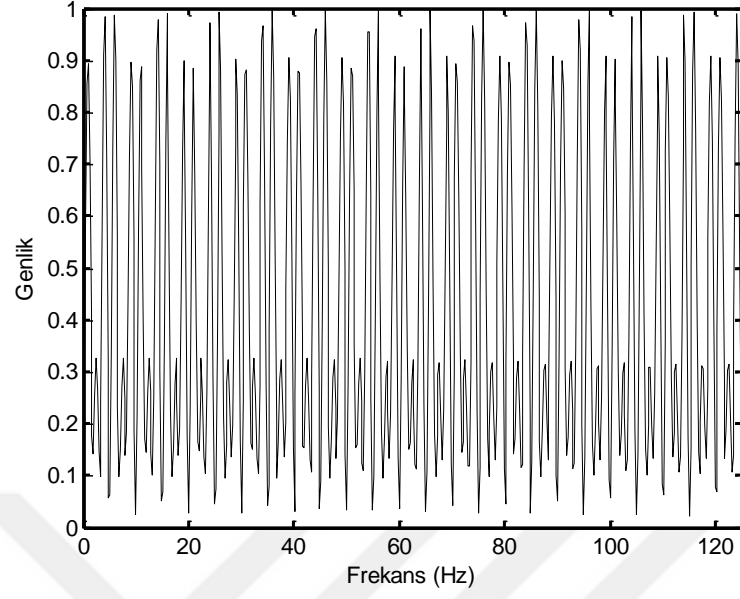
Şekil 4.7'de görüldüğü üzere, Şekil 4.5'deki sonuca göre gürültü bir miktar zayıflatılmış ve yansımaların hemen hepsi görülebilir olmuştur. Ancak bu halen istenilen sonuç değildir. Son olarak, Cauchy norm regülarizasyon dekonvolüsyon tekniği Şekil 4.4'deki gürültülü sismik ize uygulanmıştır. Cauchy norm denkleminde, skaler parametresi $\sigma=0.01$ ve ağırlıklandırma parametresi $\mu=0.01$ olarak kullanılmıştır. Elde edilen dekonvolüsyon sonucu Şekil 4.8'de gösterilmiştir.



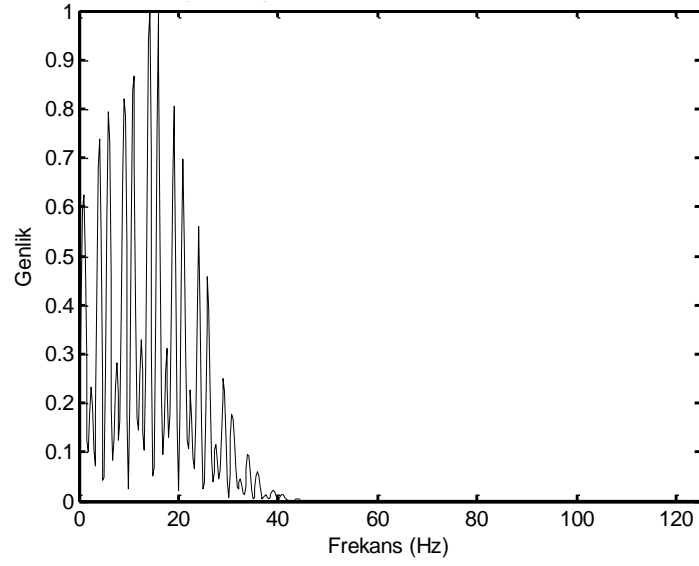
Şekil 4.8. (a) Yansıtma modeli (b) Cauchy norm regülarizasyonu için yansıtma katsayıları

Çok açık şekilde görüldüğü üzere, gürültülerin etkisi tamamen kaldırılmıştır ve yansıtma izi yüksek ayrımlı olmuştur. Yani yansıtma katsayısı serisi elde edilmiştir. Şekil 4.1 ile karşılaştırıldığında genlik, polarite ve pozisyon açısından tam bir uyum olduğu görülmektedir.

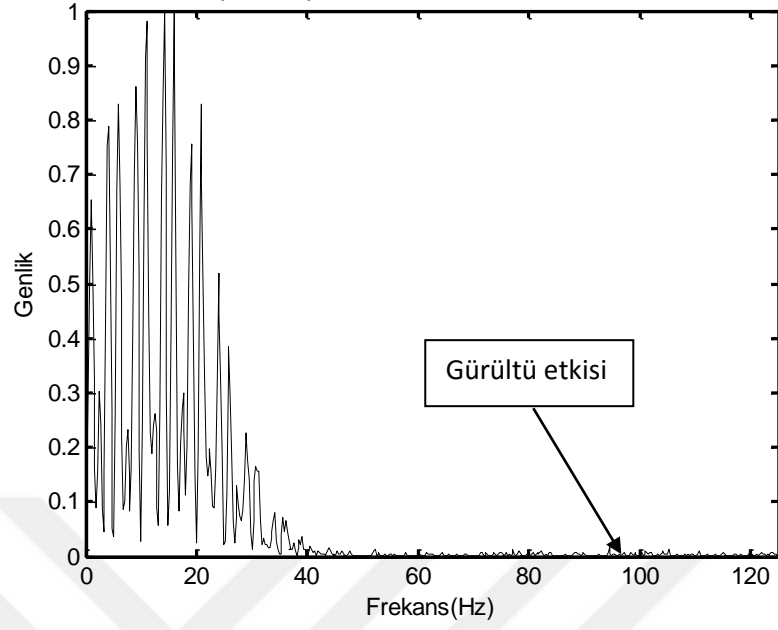
Giriş ve çıkış izlerinin genlik spektrumları Fourier dönüşümü ile hesaplanmış ve izleyen şekillerde gösterilmiştir. Genlikler maksimum genlik değerlerine göre normalize edilmiştir.



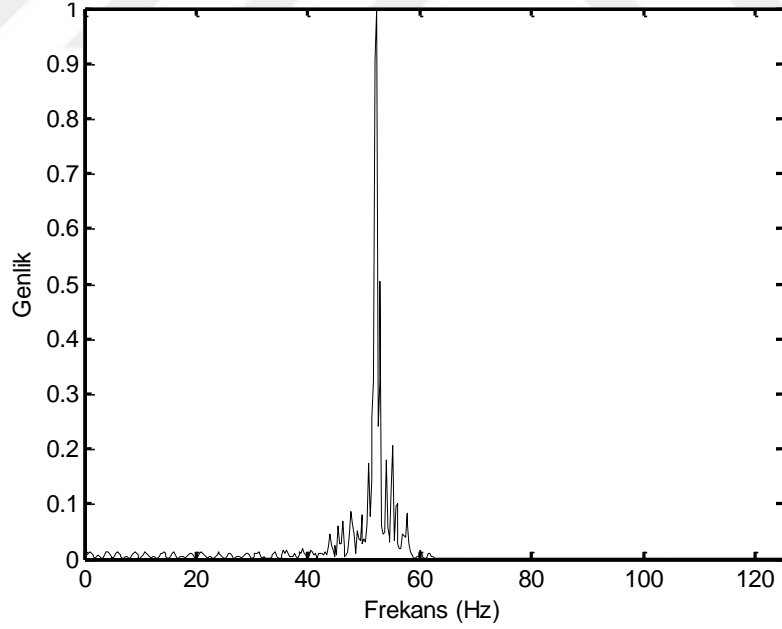
Şekil 4.9. Yansımaya katsayısı modelinin genlik spektrumu



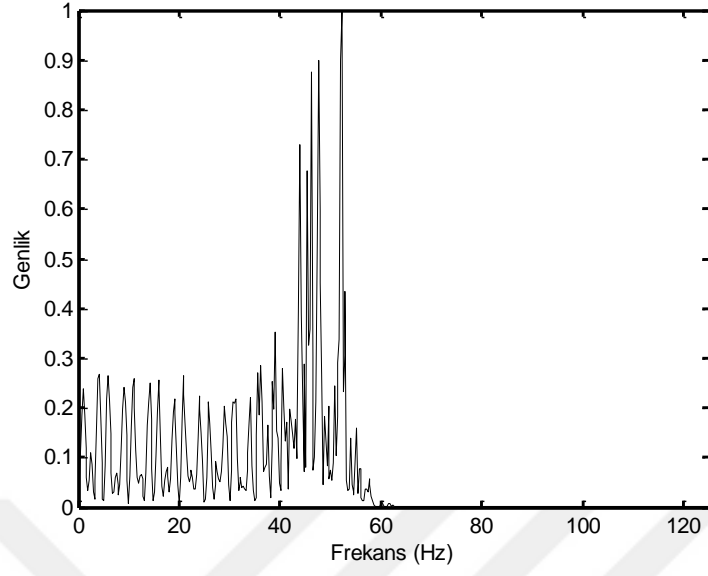
Şekil 4.10. Gürültüsüz giriş izinin genlik spektrumu



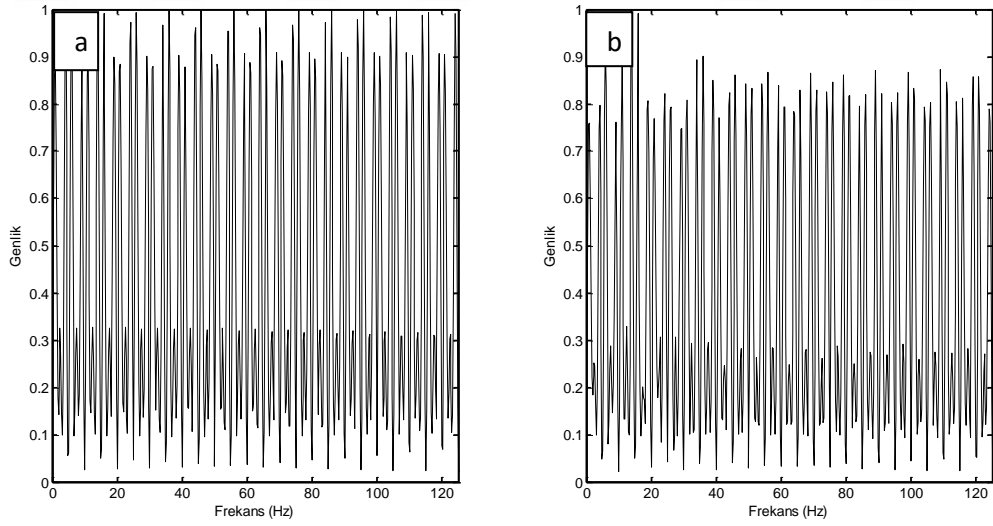
Şekil 4.11. Gelişigüzel gürültülü sismik izin genlik spektrumu



Şekil 4.12. En küçük kareler çözümünden elde edilen yansımaya katsayısı izin genlik spektrumu



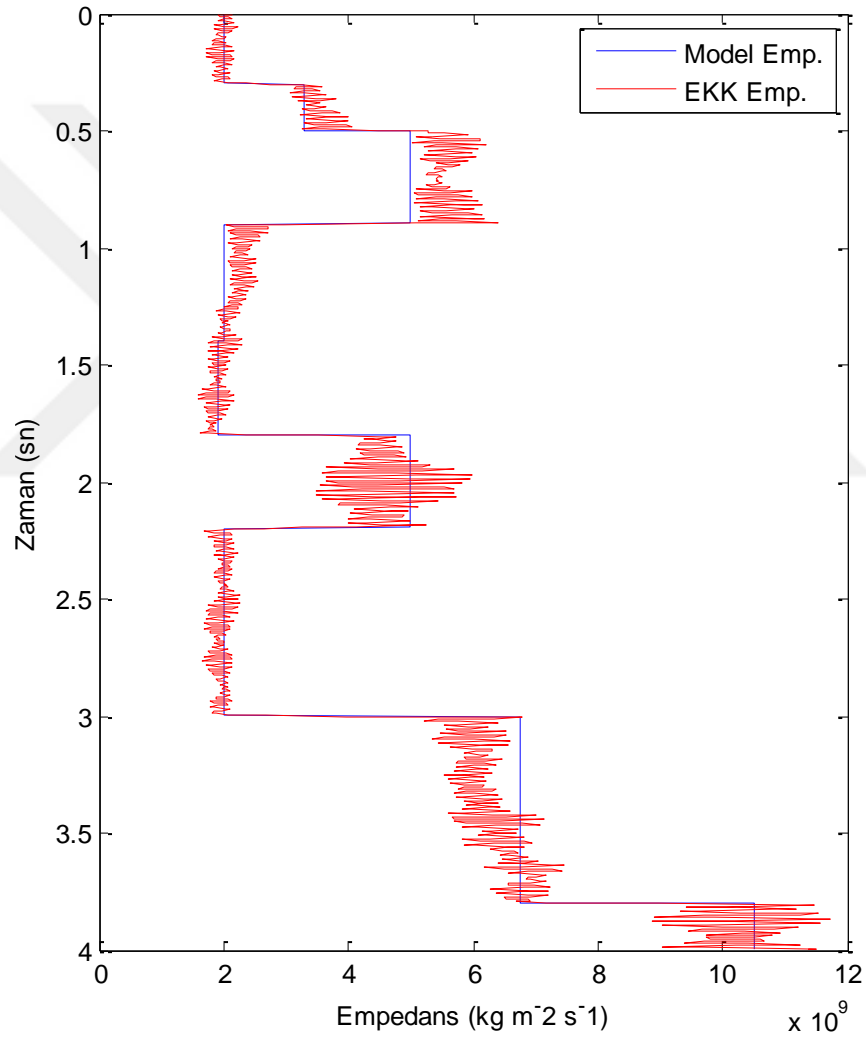
Şekil 4.13. Quadratik regülarizasyon çözümünden elde edilen yansıma katsayısı izinin genlik spektrumu



Şekil 4.14. (a) Yansıma katsayısı modelinin genlik spektrumu (b) Cauchy norm regülarizasyon çözümünden elde edilen yansıma izinin genlik spektrum

4.1.1.2. Akustik Empedans Ters Çözümü

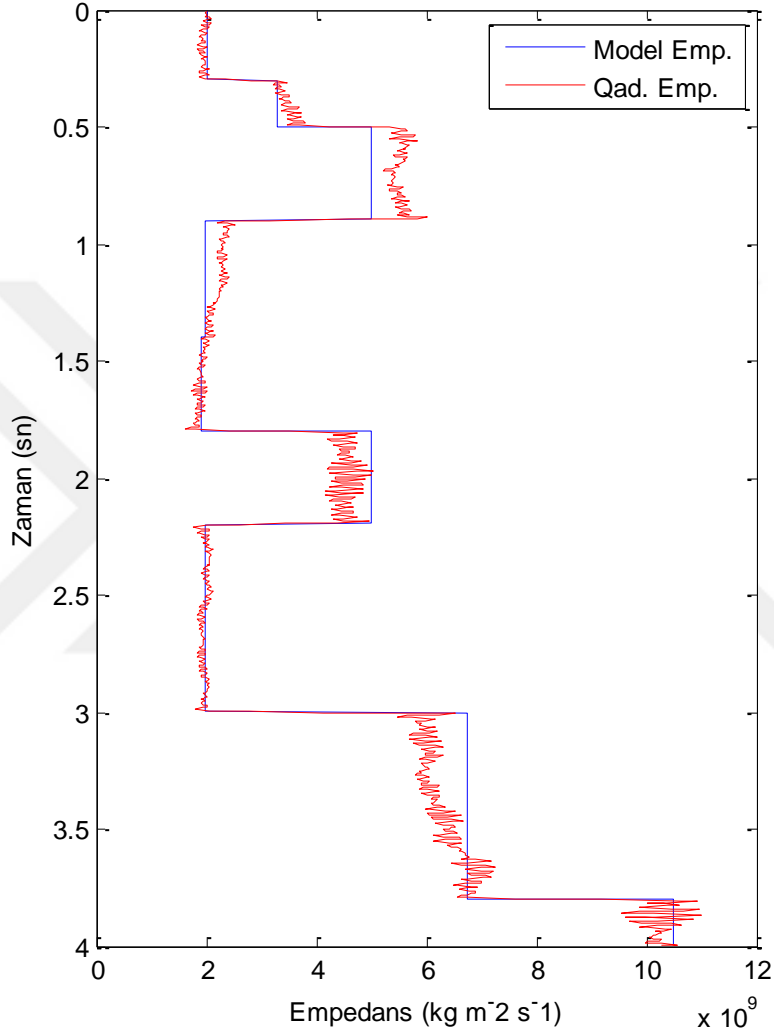
Yüksek ayrımlı deknvolüsyon ile elde edilen yansıma katsayısı serisi (Şekil 4.8) denklem (2.69) ile akustik empedans izlerine dönüştürülmüştür. İlk olarak, en küçük kareler ters çözümünden sonuçlar elde edilerek giriş empedans izi ile karşılaştırmalı olarak Şekil 4.15'te gösterilmiştir.



Şekil 4.15. En küçük kareler için akustik empedans izi

Şekil 4.15'te, en küçük kareler akustik empedans izi (kırmızı rengi) model empedans (mavi rengi) izine genel olarak uyumlu olmakla birlikte, önemli miktarda gürültü

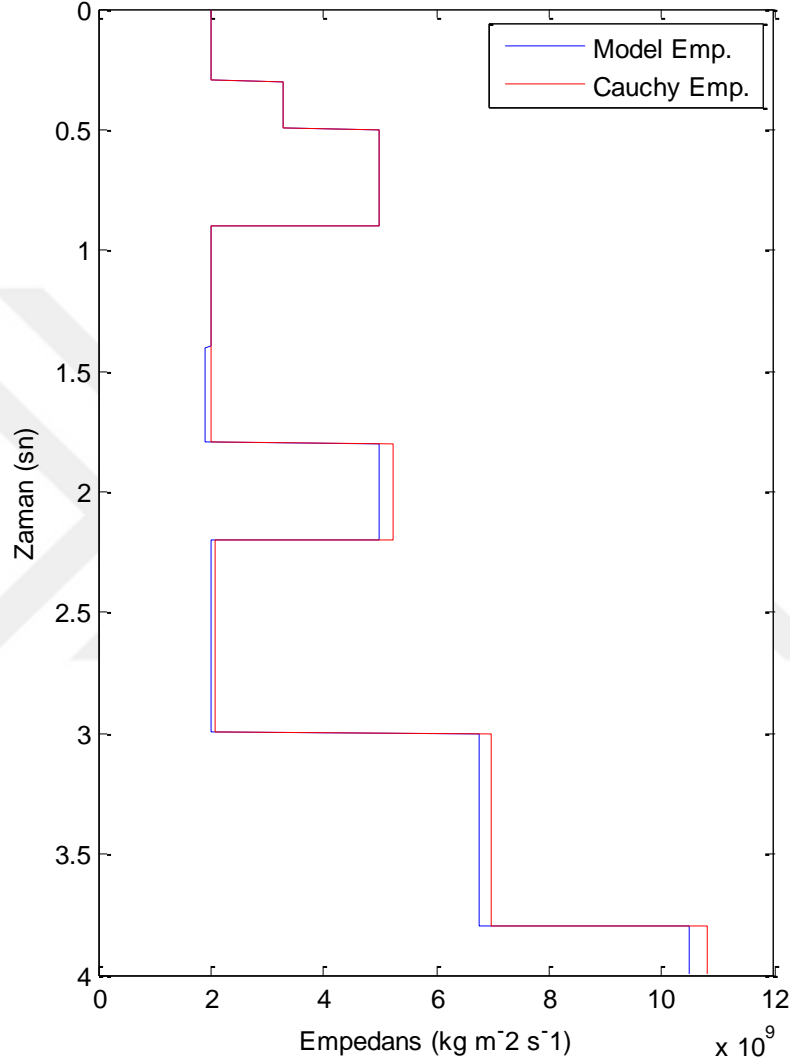
içermektedir. İkinci olarak, quadratik regülarizasyon tekniği ile elde edilen dekonvolüsyon izi akustik empedans izine dönüştürülmüş ve Şekil 4.16'da görüntülenmiştir.



Şekil 4.16. Quadratik regülarizasyon için akustik empedans izi

Şekil 4.16'da görüldüğü gibi, rastgele gürültüler önemli oranda bastırılmıştır. Ancak henüz istenilen yüksek ayrımlı sonuca ulaşılamamıştır. Ayrıca, hesaplanan empedans (kırmızı rengi) ile model empedans (mavi rengi) genel olarak bir uyum içerisinde olmasına karşılık istenilen sonuç elde edilememiştir. Son olarak, Cauchy norm regülarizasyon

dekonvolüsyon sonucu akustik empedans izine dönüştürülmüş ve Şekil 4.17'de gösterilmiştir.

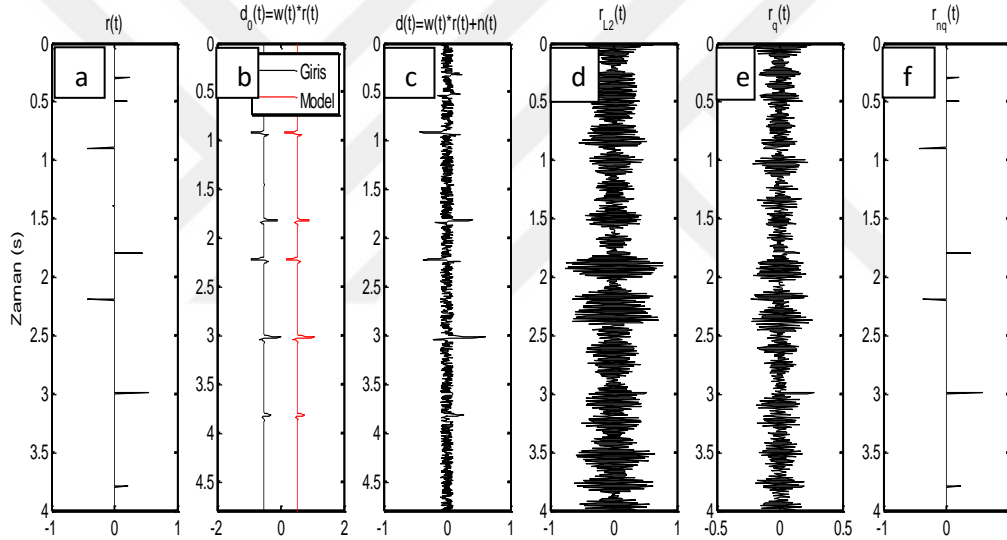


Şekil 4.17. Cauchy norm regülarizasyon için akustik empedans izi

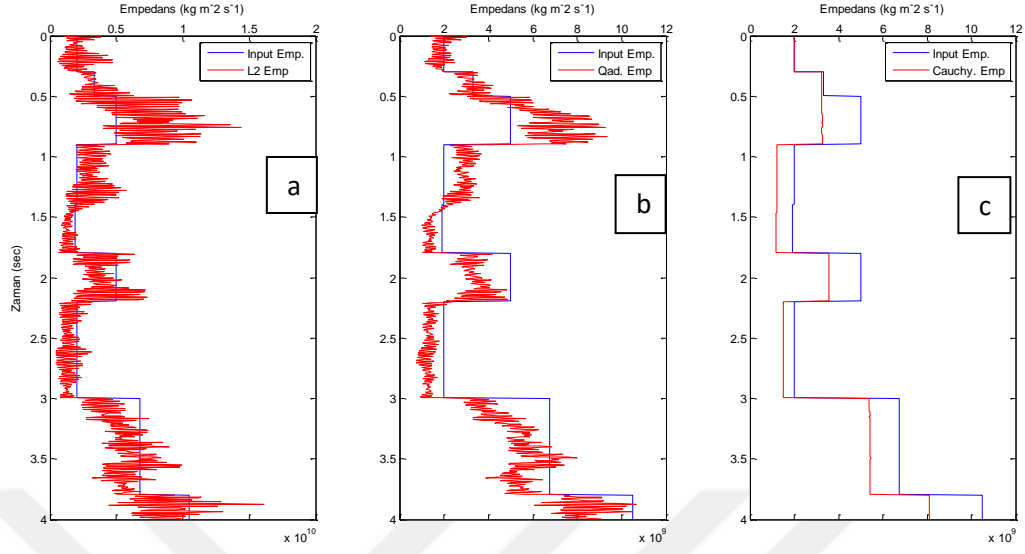
Şekil 4.17'de görüldüğü gibi, gelişigüzel gürültüler hemen hemen bastırılmıştır. Bununla birlikte, Cauchy norm empedans izi (kırmızı rengi) ile model empedans (mavi rengi) iz arasında ihmal edilecek bir hata oranında çok iyi bir uyum vardır. Böylece, Cauchy norm empedansı yüksek ayrımlılığa ve doğruluğa sahip olduğu için yorumlanması da daha kolay, güvenilir ve tutarlı olacaktır.

4.1.1.3. Sönüm Parametresinin Etkisi ve Empedans Doğruluğu

Sismik verideki gelişigüzel gürültülere karşı, en küçük kareler, quadratik regülarizasyon ve Cauchy norm dekonvolüsyon tekniklerinin duyarlılıkları ve yetenekleri test edilmiştir. Bu nedenle Şekil 4.3'deki sismik izi daha fazla gürültülü yapmak için sismik ize $S/G=0.9$ oranında gelişigüzel gürültü eklenmiştir. EKK, quadratik ve Cauchy norm dekonvolüsyon sonuçları hesaplanmış ve elde edilen sonuçlar 4.18'de görüntülenmiştir. Herbiri için karşılık gelen akustik empedans izleri giriş empedans izi ile karşılaştırmalı olarak Şekil 4.19'da gösterilmiştir.

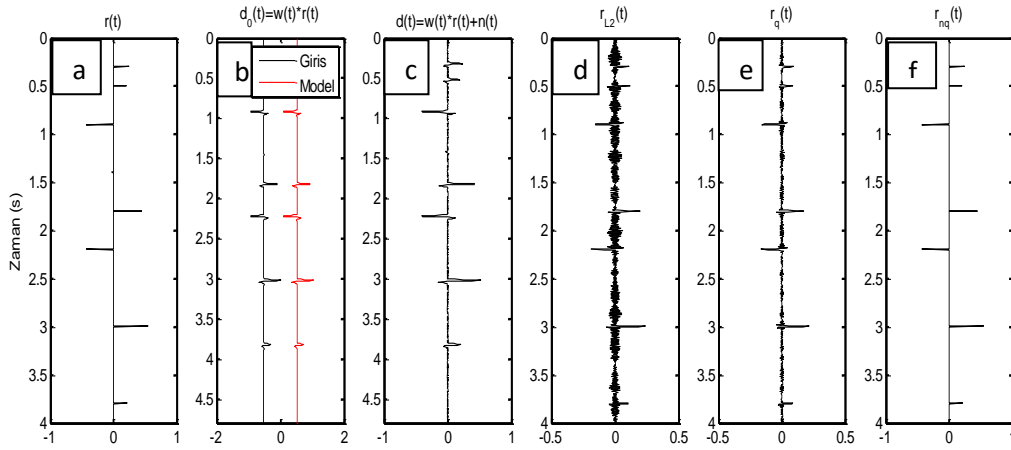


Şekil 4.18. (a) Model yansıma katsayıları (b) Giriş sismik izi ve yeniden hesaplanan sismik iz (c) $S/G=0.9$ olan sismik iz (d) EKK (e) Quadratik regülarizasyon (f) Cauchy norm regülarizasyon ile elde edilen dekonvolüsyon sonuçları

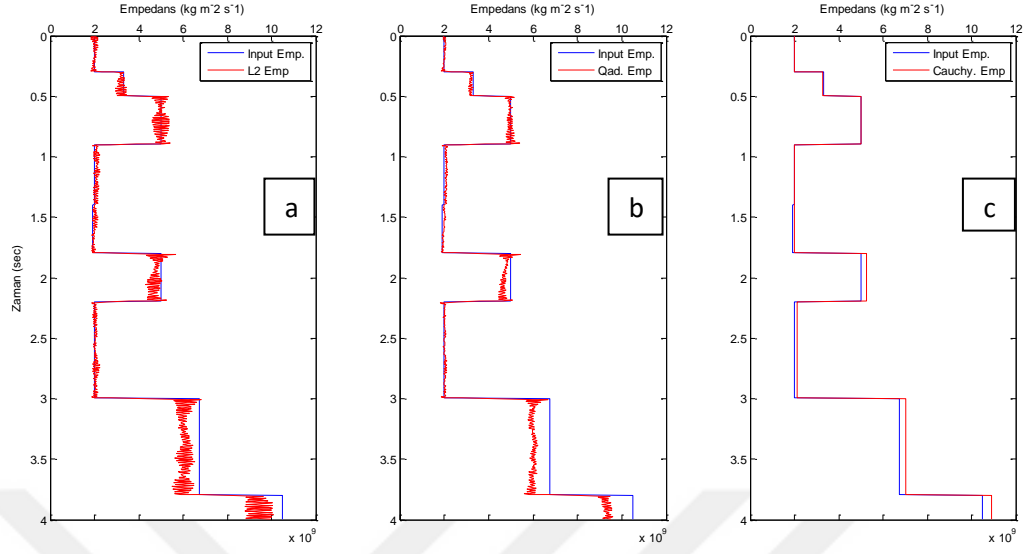


Şekil 4.19. (a) EKK (b) Quadratik regülarizasyon (c) Cauchy norm regülarizasyon ile elde edilen sismik izlerinden hesaplanan akustik empedans izleri

Şekil 4.20 ve Şekil 4.21 $S/G=10$ için sırasıyla dekonvolüsyon ve akustik empedans uygulama sonuçlarını göstermektedir.



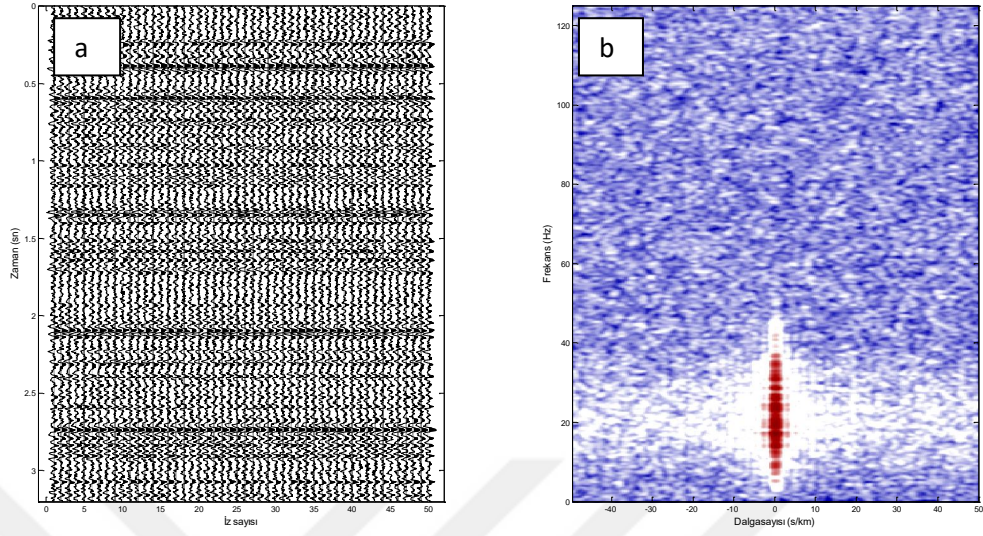
Şekil 4.20 (a) Model yansıma katsayıları, (b) Giriş sismik izi ve yeniden hesaplanan sismik iz, (c) $S/G=10$ olan sismik iz (d) EKK (e) Quadratik regülarizasyon, (f) Cauchy norm regülarizasyon ile elde edilen dekonvolüsyon sonuçları



Şekil 4.21. (a) EKK (b) Quadratik regülarizasyon (c) Cauchy norm regülarizasyon ile elde edilen sismik izlerinden hesaplanan akustik empedans izleri

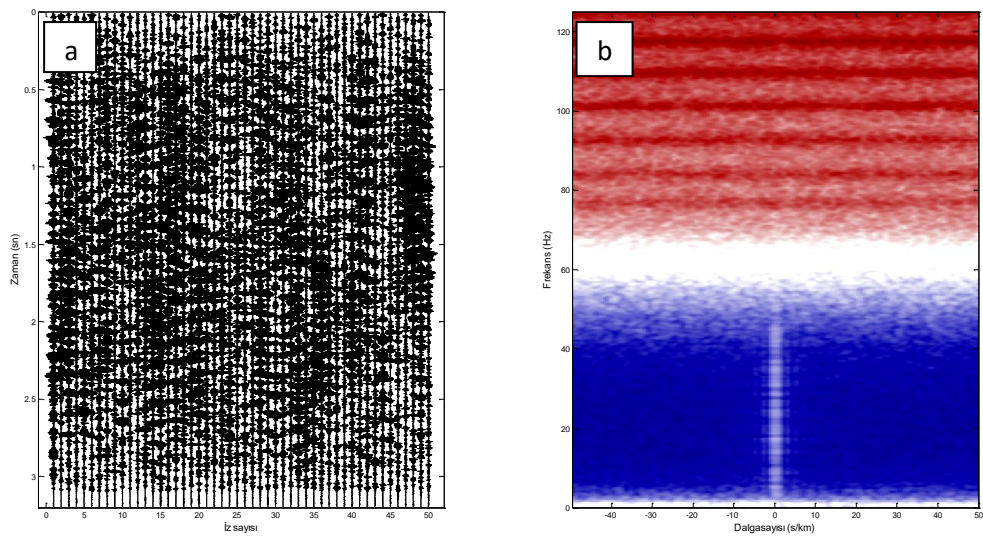
4.1.2. İki Boyutlu Sentetik Sismik Verileri

Benzer şekilde, en küçük kareler, quadratik ve Cauchy norm dekonvolüsyon teknikleri iki boyutlu sentetik sismik veriler üzerinde test edilmiştir. Hesaplanan sismik kesit ve f-k spektrumu (2B'lu Fourier dönüşümü ile hesaplanan frekans-dalgasayısı spektrumu) sırasıyla Şekil 4.22a ve Şekil 4.22b'de gösterilmiştir. Şekil 4.22'deki veriye ilk olarak iz EKK dekonvolüsyonu uygulanmış ve elde edilen sonuçlar Şekil 4.23'te gösterilmiştir.



Şekil 4.22. (a) İki boyutlu sentetik sismik veri (b) f-k spektrumu

Şekil 4.23'teki sonuçlar üzerinde görüldüğü üzere EKK dekonvolüsyon tekniği spektral bant içeriğini (Şekil 4.23b) bir miktar genişletmiştir ancak gürültüleri bastırmak yerine aksine güçlendirmiştir (Şekil 4.23a). Bu nedenle, sismik verinin görüntü ayrırlılığı çok iyi değildir. Bununla birlikte, daha önce açıklandığı gibi, S/G oranı çok düşük olduğundan EKK dekonvolüsyonu gürültülü veriler üzerinde iyi çalışmamaktadır.

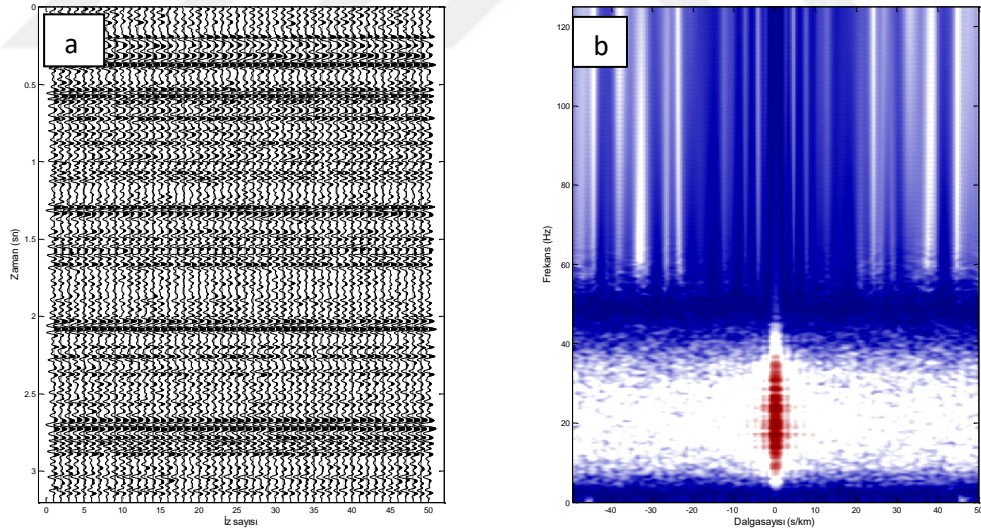


Şekil 4.23.(a) EKK dekonvolüsyon sonucu (b) f-k spektrumu

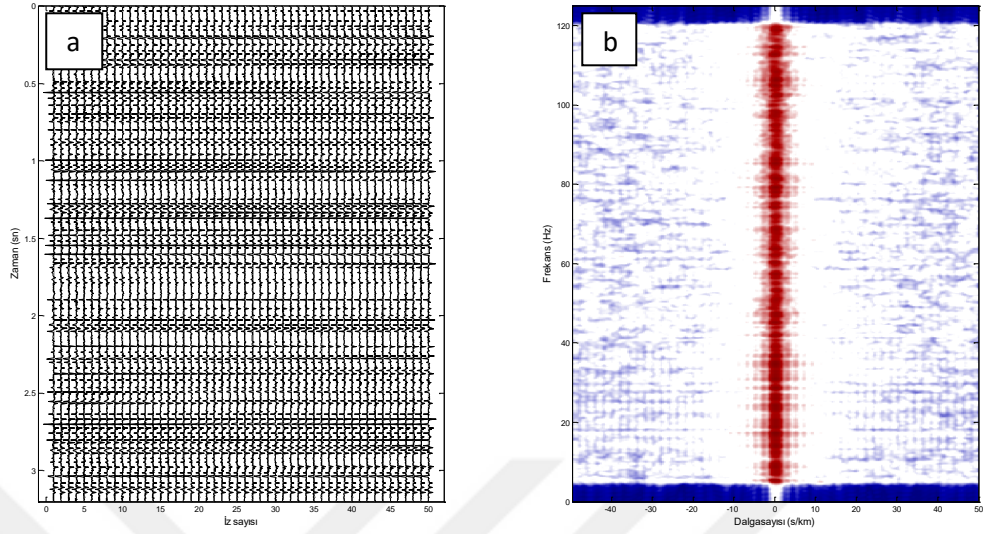
Quadratik regülarizasyon dekonvolüsyon yöntemi kullanılarak elde edilen sonuçlar Şekil 4.24'te gösterilmektedir. Sönüm etkisinden dolayı, sismik verinin spektral bant içeriğide daralmıştır (Şekil 4.24b). Ancak, gürültü etkisi önemli oranda azalmış ve yansıma seviyelerinin yanal yöndeki devamlılıkları izlenebilmektedir (Şekil 4.24a)

Şekil 4.25 Cauchy norm regülarizasyon dekonvolüsyonun sonuçlarını göstermektedir. Çok açık olarak hem yansıma seviyelerinin düşey ve yanal yöndeki ayrımlılıkları artırılmış (Şekil 4.25a) hem de spektral bant genişliği genişletilmiştir (Şekil 4.25b).

Elde edilen tüm sonuçlar karşılaştırıldığında Cauchy norm dekonvolüsyonun sonuçlarının diğerlerine göre hem nicelik hem de nitelik olarak daha iyi olduğu açıkça görülmektedir. Öyle ki, gelişigüzel gürültüler önemli derecede indirgenmiş ve kesitlerin görüntü ve spektral ayrımlılığı artmıştır. Bu nedenle, yansıma sınırları açıkça görülebilir hale getirilmiştir. Bu gerçek verilerin ince tabaka yorumu için son derece önemlidir.



Şekil 4.24. (a) Quadratik regülarizasyon sonucu (b) f-k spektrumu



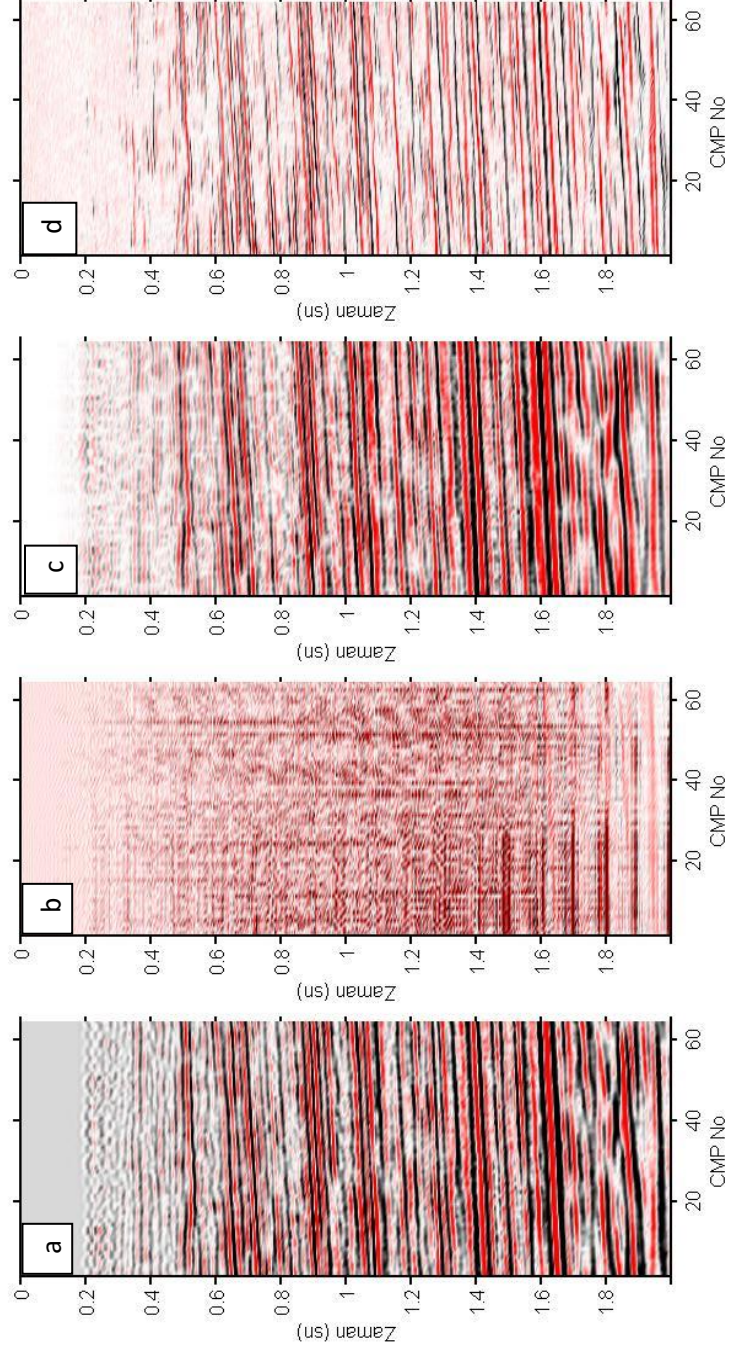
Şekil 4.25. (a) Cauchy norm regülarizasyon sonucu (b) f-k spektrumu

4.1.3. İki Boyutlu Arazi Sismik Verisi

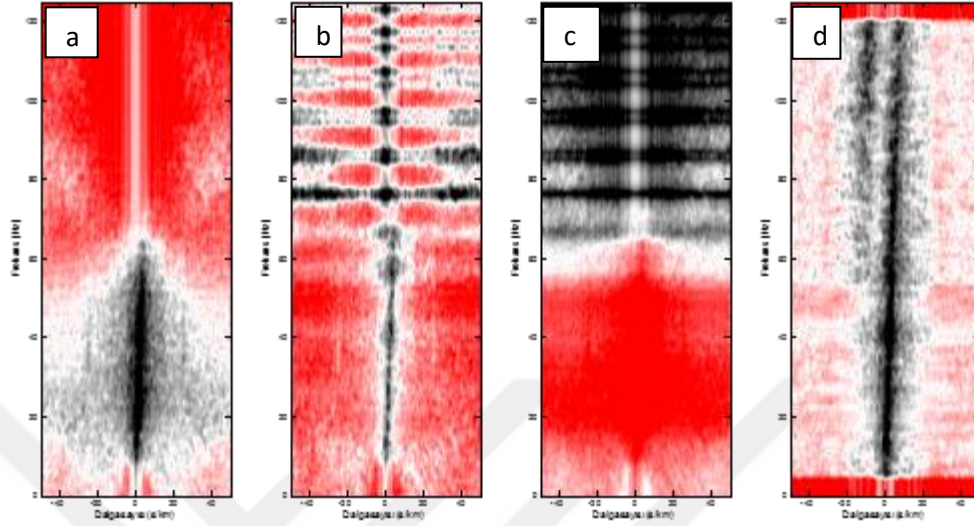
Bu bölümde bir yığma verisi EKK, quadratik ve Cauchy norm dekonvolüsyon teknikleri ile değerlendirilmiştir.

4.1.3.1. Yüksek Ayrımlı Yansıma Görüntüsü

2B arazi sismik yığma verisine (Şekil 4.26a) EKK (Şekil 4.26b), quadratik regülarizasyon (Şekil 4.26c) ve Cauchy norm regülarizasyon (Şekil 4.26d) dekonvolüsyon teknikleri uygulanmıştır. Giriş verisi ve sonuçların f-k spektrumları Şekil 4.27'de sunulmuştur. Cauchy norm regülarizasyon tekniği ile uygulanan dekonvolüsyonun diğerlerine göre hem ayrımlılık hemde spektral içeriğinin zenginleşmesi açısından önemli katkı sağladığı açıkça görülmüştür.



Şekil 4.26 (a) 2B arazi sismik yığıma verisi (b) EKK (c) Quadratik regularizasyon, (d) Cauchy norm regularizasyon dekonvolüsyon sonuçları

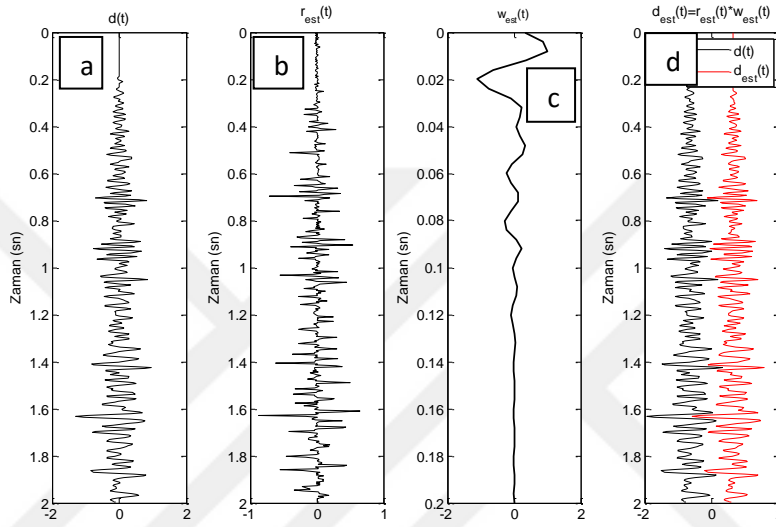


Şekil 4.27 (a) 2B arazi sismik yığma verisinin, (b) EKK (c) Quadratik regülarizasyon (d) Cauchy norm regülarizasyon dekonvolüsyon sonuçlarının f-k spektrumları

Uygulamada ihtiyaç olan sismik dalgacık tüm kesitin yuvarlatılmış ortalama güç spektrumundan yararlanarak sıfır fazlı olarak tahmin edilmiş ve Kolmogoroff tekniği ile minimum faz eşdeğeri hesaplanarak kullanılmıştır. Şekil 4.27'deki siyah renkler çoğunlukla yansıma enerjilerini ve kırmızı renkler gelişigüzel gürültü enerjilerini temsil eder. Şekil 4.27 (d)'de gelişigüzel gürültülerin başarılı bir şekilde sinyal enerjileri koruyarak ve spektral içeriği genişleterek bastırıldığı görülmektedir. Şekil 4.26a ve Şekil 4.26d karşılaştırıldığında, sismik yığma verisinin düşey ayrırlılığının ve yanal yöndeki sürekliliğinin arttığı ve ince tabaka yorumunun yapılabilmesinin sağlandığı görülmektedir.

Cauchy norm regülarizasyon sismik yığma kesitinin orta izi (32 nolu iz) için giriş ve çıkışlar Şekil 4.28'de gösterilmiştir. Şekil 4.28b'deki sonuç izinin hemen bir iğnecik serisi olduğu ve bunun yerin yansıma katsayısı serisini temsil ettiği açıkça görülmektedir. Normal olarak iğnecik yapısı en yüksek ayrırlılığın bir göstergesidir. Dolayısıyla sismik yansıma izi (Şekil 4.28a) Cauchy norm regülarizasyon dekonvolüsyonu sonrası yüksek ayrırlılığa sahiptir. Dekonvolüsyon için gerekli olan ve sismik veriden kestirilen sismik

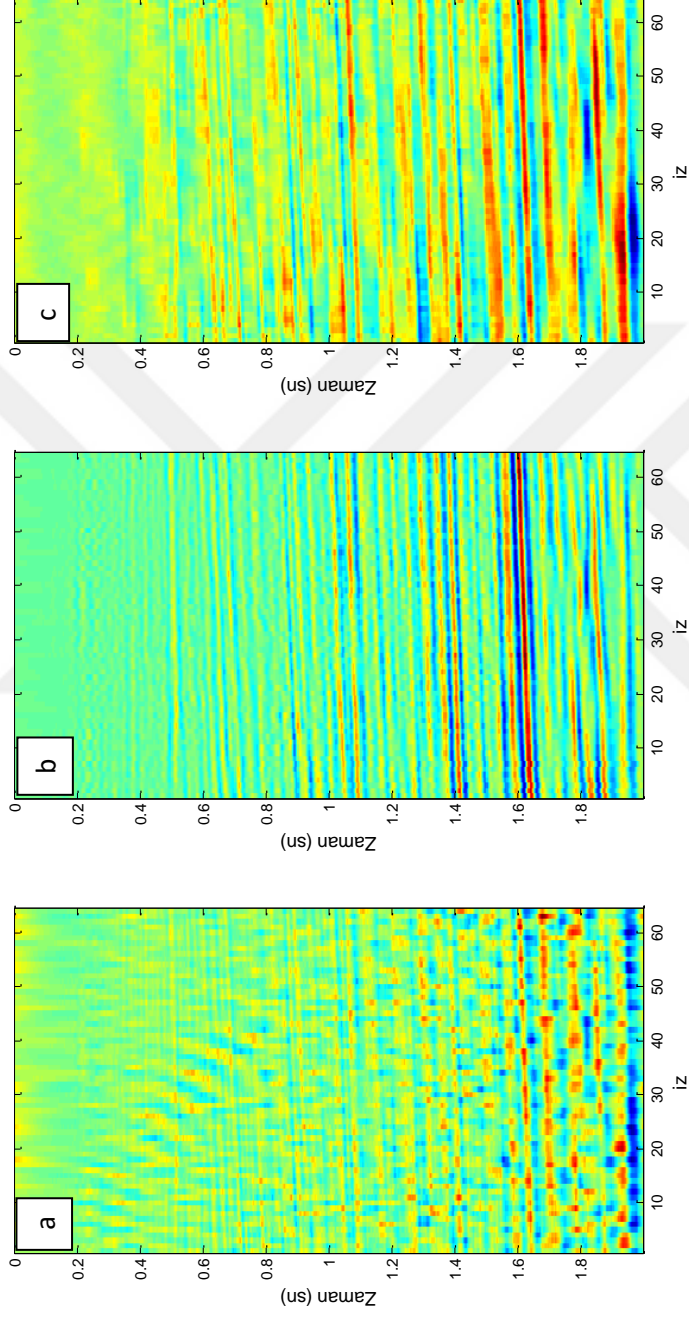
dalgacığın minimum faz eşdeğeri Şekil 4.28c'de gösterilmiştir. Şekil 4.28(d)'deki siyah renkli iz giriş sismik izini, kırmızı renkli iz, Şekil 4.28b'deki dekonvolüsyon sonucu ile Şekil 4.28c'deki dalgacığın konvolüsyonu ile hesaplanmış izi göstermektedir. Giriş ve hesaplanmış izlerin mükemmel uyumlu olduğu görülmektedir.



Şekil 4.28 (a) Şekil 4.26'daki sismik yığma kesitinin 32 nolu sismik izi
 (b) Cauchy norm regülarizasyon dekonvolüsyon sonucu, (c) Tahmin edilen (d) Giriş ve dekonvolüsyon sonuçlarının karşılaştırılması

4.1.3.2. Akustik Empedans Görüntüsü

Şekil 4.26'da elde edilen dekonvolüsyon sonuçları denklem (2.73) kullanılarak akustik empedans kesitlerine dönüştürülmüştür (Şekil 4.29). Akustik empedans görüntüleri tam olarak yeri için yanal ve düşey yöndeki fiziksel değişimlerini açıklamaktadır. Bu fiziksel değişim yoğunlukla karşılaştırıldığında çoğunlukla sismik hız bağımlıdır. Dolayısıyla, düşük ve yüksek akustik empedans değişimleri sismik hızın artması veya azalması ile doğrudan ilişkili olup, bu değişimler aynı zamanda ortamındaki litoloji ile tam olarak ilişkilidir. Akustik empedans değişiminin yanal yöndeki değişimi aynı litolojik birim içindeki farklılığın (akışkan içeriği, sıklık, katılık, gözeneklilik, ve diğ.) göstericidirler. Bu farklılıklar yorum açısından önemlidir.



Şekil 4.29. (a) EKK, (b) Quadratik regularizasyon (c) Cauchy norm regularizasyon ile ede edilen akustik empedans kesitleri

4.2. Tartışma

Açıklanan yinelemeli yeniden ağırlıklandırılmış en küçük kareler (YYAEKK) yöntemiyle yüksek ayrımlı çözümler elde edilmiştir. Bunu başarmak için dekonvolüsyon problemi Cauchy norm regülarizasyonu çözülmüştür. Bu şekilde probleme seyreklik sınırlandırılması getirilmiştir. Şekil 4.4'de olduğu gibi sismik veriler gelişigüzel gürültüler içerdiğinde, YYAEKK yöntemi yansıtma katsayısı serisini elde etmeyi sağlamıştır (Şekil 4.8). Yöntemin uygulamada, başlangıç regülarizasyon matrisi (diagonal matris) sıfırdır, ancak her bir iterasyonda yeniden ağırlıklandırılmış ve güncellenmiştir. Diagonal regülarizasyon matrisinin özelliği çözümü tekil ve kararlı yapmaktadır. Dolayısıyla, YYAEKK yöntemi en küçük kareler ve quadratik çözümlerle ilişkili kararsızlıkların üstesinden gelmiştir. Bununla birlikte, matris ters çözümü için önşartlandırılmış eşlenik gradyan (ÖEG) algoritması kullanılarak YYAEKK yöntem çözümünün daha hızlı yakınsamasını sağlamıştır. Regülarizasyon parametresi $\mu=0.01$ ağırlıklandırmanın genliğini kontrol edilmiştir ve aynı zamanda, verideki gelişigüzel gürültüler önemli derecede indirgenmiş ve arzu edilen sonuçlar elde edilebilmiştir.

Ters-çözüm probleminin (denklem 2.3) en küçük kareler çözümü (denklem 2.8) kararsızdır ve tekil değildir. Bu durum gürültülü ve düşük ayrımlı sentetik iz modelleri ile karakterize edilmiştir (Şekil 4.5). Bununla birlikte, Şekil 4.15'te görüldüğü gibi, EKK dekonvolüsyonu sonucundan elde edilen akustik empedans izi orijinal empedans izi ile oldukça uyumsuzdur. Bunun en önemli nedeninin sismik izin içermiş olduğu gelişigüzel gürültüler olduğu açıktır. Dolayısıyla bu sonuç, sismik izin nitel yorumunda yanıltıcı olabilir. Anlaşıldığı üzere EKK çözümünde amaç fonksiyonunun minimizasyonu (denklem 2.7) oldukça etkisiz ve giriş ile hesaplanan sismik iz arasındaki hatanın fazla olduğu anlamına gelmektedir. Şekil 4.18 (d)' de ve Şekil 4.19 (a)'da görüldüğü gibi, oldukça düşük sinyal-gürültü oranı ($S/G=0.9$) sismik ize eklediği zaman, EKK dekonvolüsyonu oldukça yetersizdir. Ancak, sinyal gürültü oranı 10 'a yükseltildiği zaman (Şekil 4.20(d) ve Şekil 4.21(a)) EKK dekonvolüsyonun gözle görülebilir şekilde başarılı olduğunu göstermektedir.

Ters-cözüm probleminin (denklem 2.3) quadratik regülarizasyon çözümünde (denklem 2.16) amaç fonksiyonunun içine regülarizasyon terimi/sınırlama (denklem 2.12) eklenmiştir. Bu sınırlamanın amacı gürültü etkisini zayıflatmaktır (Şekil 4.5). Bu tür sınırlamalar çözüme birim matrisin ağırlıklandırması olarak eklenir. Çözümde bu değer L-eğrisinden yararlanarak 0.016572 bulunmuş ve kullanılmıştır. Bu değer model norm ile hata normu arasındaki dengeyi sağlamaktadır. Diğer bir deyişle, hataları azaltırken beklenen sonucu elde etmeyi sağlamaktadır (Şekil 4.1 (d)). Şekil 4.7 ve Şekil 4.16 gösterildiği gibi, quadratik yöntem sonuçları gürültünün indirgenmesi açısından Şekil 4.5'e ve Şekil 4.15'deki EKK sonuçlarından daha iyi, ancak ayrımlılık açısından iyi değildir. Ayrıca, quadratik çözüm sonucunda "ringing" etkileri de zayıflamıştır. Şekil 4.18 (e) 'de ve Şekil 4.19 (b)'da gösterildiği gibi, S/G oranı 0.9'a düşürüldüğü zaman quadratik çözüm sonucu halen daha gürültülerin etkisi altındadır. Bununla birlikte S/G=10 olduğu zaman quadratik çözüm sonuçlarının kalitesi de artmıştır (Şekil 4.20(e) ve Şekil 4.21(b)). Yani, sinyal gürültü oranı yüksek olduğunda quadratik çözüm iyi çalışmaktadır. Ancak, sinyal gürültü oranı düşük olduğunda, hem EKK hem de quadratik çözümler yeterince başarılı değildir.

Cauchy norm regülarizasyon dekonvolüsyon yöntemi kullanılması durumunda Şekil 4.4'deki yansıma izinden yansıtma katsayısı serisi yüksek ayrımlılıkla ve gürültü etkisi hemen hemen zayıflatılmış olarak elde edilmiştir (Şekil 4.8). Ayrıca, elde edilen yansıtma katsayısı serisinin orijinal yansıtma katsayısı serisi (Şekil 4.1) ile karşılaştırıldığında genlik, konum ve polarite açısından tam olarak uyum içinde olduğu görülmektedir. Cauchy norm dekonvolüsyondan daha kararlı ve iyi sonuçlar vermesine rağmen, bazı durumlarda çok zayıf olayları korumada çok başarılı olmayabilir. Bununla birlikte diğer dekonvolüsyon uygulamalarından elde edilen sonuçlarla (Şekil 4.5 ve Şekil 4.7) karşılaştırıldığında Şekil 4.8'deki sonucun kalitesi açıkça görülmektedir.

Cauchy norm dekonvolüsyon ile elde edilen sonuçların kalitesi, Cauchy olasılık yoğunluk fonksiyonunun bir ön bilgi olması ile doğrudan ilişkilidir. Çünkü, bu ön bilgi çözümü daha başlangıçta yansıma enerjisinin yoğun olduğu değerlere ve seyrek olmaya doğru yönlendirmiş ve eş zamanlı olarak gürültü seviyesini indirmişdir. Böylece, çözümün en iyilenmesi bu ön bilginin sağladığı regülarizasyon ve/veya kısıtlar ile

sağlanmıştır. Aslında kullanılan regülarizasyon çözüme iki temel katkıya sağlamıştır; (1) Cauchy ön olasılık dağılım fonksiyonu (denklem 2.42) kullanılarak amaç fonksiyondaki (denklem 2.40) hatalar (gürültüler) en aza indirilmiştir, (2) amaç fonksiyonuna eklenen regülarizasyon terimi (denklem 2.54) seyrekliği zorlamış ve yüksek ayrırlılığı sağlamıştır.

Şekil 4.17 akustik empedansın yüksek doğrulukta hesaplandığını göstermektedir. Cauchy norm regülarizasyon ile elde edilen empedansın kalitesi (Şekil 4.17) EKK (Şekil 4.15) quadratik regülarizasyon (Şekil 4.16) ile elde edilen empedans sonuçları ile karşılaştırıldığında açıkça görülmektedir. Bu Şekil 4.17’de gösterilen empedansın giriş empedansı ile tam bir uyum içinde olduğunu açıklamaktadır. Yani, gürültüler azaltılırken sinyaller (yansımalar) korunmuştur. Böylece, yansımalara neden olan tabakaların veya kayaçların özellikleri açıklanabilir.

Tek boyutlu sentetik sismik veriler gibi, iki boyutlu sentetik sismik veriler üzerinde yapılan uygulamalar da benzer sonuçlar üretmiştir. Görüldüğü gibi, Cauchy norm regülarizasyon sayesinde hem gelişigüzel gürültüler etkin olarak indirgenmiş, hem de zamansal ayrırlılık ve uzaysal süreklilik artırılmıştır ve böylece sismik kesitlerin yorumlanabilirlikleri de kolaylaşmıştır.

2B’lu gerçek sismik yığma verileri üzerinde gerçekleştirilen uygulamadan elde edilen sonuçlar da Cauchy norm regülarizasyon yönteminin etkinliğini ve diğerlerine göre üstünlüğünü açıkça göstermiştir. Cauchy norm regülarizasyon sayesinde gelişigüzel gürültüler bastırılırken yüksek ayrırlı sismik görüntü elde edilebilmiştir. Bu yüksek ayrırlı dekonvolüsyon sayesinde yansıtma katsayılarının iyi bir tahmini ile sağlanmıştır.

Bunlara ek olarak, Şekil 4.29(c)’de görüldüğü üzere, Cauchy norm regülarizasyon ile 2B akustik empedans görüntüsünün güvenilir ve doğru sonuçlar ürettiği görülmüştür. Böylece yansıma seviyeleri doğrulukla tahmin edilebilir. Böylece, Cauchy norm regülarizasyon dekonvolüsyonun 1B ve 2B boyutlu sentetik ve gerçek sismik verilerin zamansal ayrırlılığını ve yanal sürekliliğini artırarak güvenilir ve yüksek doğrulukta izler/kesitler üretmeyi sağladığı görülmektedir. Bu durumun sismik yorum kalitesini artıracığı açıktır.

5. SONUÇLAR

Bu tezin ana amacı, sismik verilerin yüksek ayrımlı dekonvolüsyonu ve akustik empedans ters çözümünü yapmaktır. Sismik verilerden yüksek ayrımlı yansıma görüntüsü elde etmek için Cauchy norm regülarizasyon dekonvolüsyonu yöntemi kullanılarak meydana getirilmiştir. Yöntem Cauchy olasılık dağılım fonksiyonu kullanılarak amaç fonksiyonunun en küçüklenmesi ve ön-bilgilerin kullanması temeline dayanmaktadır. Çözümü regülarize etmek için Cauchy norm dekonvolüsyon yöntemi içinde olası modeli hakkındaki ön-bilgiler tanıtılmıştır. Amaç fonksiyonuna yansıtma katsayısı serisinin doğasından kaynaklanan seyreklik Cauchy norm regülarizasyon terimi ile sağlanmıştır. Regülarizasyon terimi her bir yinelemede güncellenmiş ve dolayısıyla çözüm yeniden ağırlıklandırılmıştır. Her bir güncellemede elde edilen regülarizasyon matrisi diagonal yapıdadır. Çözüm süresince ağırlıklandırılmış çekirdek matrisin tersi yinelemeli olarak, eşenlik gradyan algoritması ile gerçekleştirilmiştir. Cauchy norm regülarizasyon kullanılarak elde edilen yansıma görüntüsü, ardışık ve bantsınırlı ters çözüm algoritması kullanarak akustik empedans görüntüne dönüştürülmüştür. Cauchy norm regülarizasyon ters çözümün sonuçları en küçük kareler ve quadratik regülarizasyon ters çözüm sonuçları ile karşılaştırılmıştır. Bu karşılaştırmalar ve elde edilen tüm sonuçlar, yüksek ayrımlı sismik veriler sağlaması açısından Cauchy norm regülarizasyon dekonvolüsyonun güçlü potansiyele sahip olduğunu açıkça göstermektedir.

6. KAYNAKLAR

- Ashley, F., 2014. A simple guide to seismic inversion: Earth works, 10, 14.
- Beasley, D., Bull, D. R. ve Martin, R. R., 1993. An overview of genetic inversion methods: part 1, fundamentals. University Computing, 15, 58-69.
- Beck, A. E., 1991. Physical Principles of Exploration Methods: Wuerz Publishing Ltd.
- Becquey, M., Lavergne, M. ve Willm, C., 1979. Acoustic impedance logs computed from seismic traces: Geophysics, 44, 1485-1501.
- Box, G. E. ve Tiao, G. C., 1992. Bayesian inference in statistical analysis: Addison-Wesley Pub. Co.
- Brown, M., 2002. Conjugate gradient total least-square in geophysical optimization problems: A Short Note: Stanford Exploration Project, 112, 16-171.
- Carmo, S., Azevedo, L. ve Soares, A., 2015. Seismic inversion for non-stationary environment: A methodology benchmark: Society of Exploration Geophysics Technical Program Expanded Abstracts, 2738-2742.
- Claerbout, J. F., 1976. Fundamentals of Geophysical Data Processing, McGraw-Hill Inc., US.
- Claerbout, J. F., 1985. Fundamentals of Geophysical Data Processing with Applications to Petroleum Prospecting: Blackwell Scientific Publications.
- Claerbout, J. F., 1992. Earth sounding analysis: Processing versus inversion: Blackwell Scientific Publications.
- Constable, S. C., Parker, R. L. ve Constable, C. G., 1987. Occam's inversion: A practical algorithm for generating smooth models from electromagnetic sounding data: Geophysics, 52, 289-300.
- Cooke, D. A. ve Schneider, W. A., 1983. Generalized linear inversion of reflection seismic data: Geophysics, 48, 665-679.
- Debeye, H. W. J. ve Riel, P., 1990. L_P-norm deconvolution. Geophysics Prospecting, 38, 381-404.

- Duquet, B., Marfurt, K., ve Dellinger, J., 2000. Kirchhoff modeling, inversion for reflectivity, and subsurface illumination: Geophysics, 65, 1195-1209.
- Ferguson, R. J. ve Margrave, G. F., 1996. A simple algorithm for band-limited impedance inversion: CREWES Project Research Report, 8, 21-1 - 21-10.
- Galbraith, J. M. ve Millington, G. F., 1978. Low frequency recovery in the inversion of seismograms: C.S.E.G National Convention, Calgary-Kanada.
- Gardner, G. H. F., Gardner, L. W. ve Gregory, A. R., 1974. Formation velocity and density-the diagnostic basics for stratigraphic traps: Geophysics, 39, 770-780.
- Goodway, W., Chen, T. ve Downton, J., 1997. Improved AVO fluid detection and lithology discrimination using Lama petrophysical parameters from P and S inversion. Expanded Abstracts of 68th Annual International SEG Meeting, 183-186.
- Guitton, A. ve Symes, W. W., 2003. Robust inversion of seismic data using the Huber norm: Geophysics, 68, 1310-1319.
- Hansen, P.C., 1999. The L-curve and its use in the numerical treatment of inverse problems. IMM, Department of Mathematical Modelling, Technical University of Denmark.
- Hestenes, M. R. ve Stiefel, E., 1952. Methods of conjugate gradients for solving linear systems: J. Res. Natl. Bur.Stand., 49, 403-436.
- Hua-wei, Z., Al-Rufaii, K., ve Joongmoo, B., 2001. Retrieval of high-resolution components by deterministic deconvolution: A field example. SEG Int'l Exposition and Annual Meeting, ABD.
- Jing, W., Yang, L., Zhe, S., Hong, T., Hua, S., Qianhua, Z. ve Yingyu, L., 2009. Acoustic impedance inversion of zero-offset VSP data: Applied Geophysics, 6, 150-158.
- Karşlı, H., Recep, G. ve Şenkaya, M., 2012. High resolution deconvolution by combining FX filtering and Cauchy Regularization: European Association of Geoscientists and Engineers (EAGE) Conference, Saint Petersburg, Rusya.
- Kirkpatrick, S., 1984. Optimization by simulated annealing: quantitative studies: J. Stat. Phys., 34, 975-986.

- Kirkpatrick, S., Gelatt, C. D. J. ve Vecchi, M. P., 1983. Optimization by simulated annealing: Science, 220, 671-680.
- Lailly, P., 1983. The seismic inverse problem as a sequence of before stack migrations: Conference on Inverse Scattering, Theory and Application, Society of Industrial and Applied Mathematics, Expanded Abstracts, 206-220.
- Latimer, R. B., Davidson, R., ve van Riel, P., 2000. An interpreter's guide to understanding and working with seismic-derived acoustic impedance data: The Leading Edge, 19, 242-256.
- Lavergne, M., 1975. Pseudo diagraphies' de vitesse en offshore profond: Geophysical Prospecting, 23, 695-711.
- Lindseth, R. O., 1972. Approximation of acoustic logs from seismic traces: Journal of Canadian Well Logging Society, 5, 13-26.
- Lindseth, R. O., 1979. Synthetic sonic logs – a process for stratigraphic interpretation: Geophysics, 44, 3-15.
- Lines, L. R. ve Treitel, S., 1984. A review of least-squares inversion and its application to geophysical problems: Geophysical Prospecting, 32, 159-186.
- Liu, C., Song, C., Qi, L., Liu, Y., Feng, X. ve Gao, Y., 2015. Impedance inversion based on L1 norm regularization: Journal of Applied Geophysics, 120, 7-13.
- Margrave, G. F., 1995. <https://www.crewes.org/>
- Marquardt, D.W., 1963. An inversion method for least square estimation of nonlinear parameters: SIAM J., 11, 431-441.
- Menke, W., 1989. Geophysical data analysis: Discrete inverse theory: Academic Press, Inc.
- Metropolis, N., Rosenbluth, A., Rosenbluth, M. ve diğ., 1953. Equations of state calculation by fast computing machines: J. Chem. Phys., 21, 1087-1092.
- Oldenburg, D. W. ve Li, Y., 2005. Inversion for Applied Geophysics: A Tutorial: University of British Columbia, Kanada, 2-100.

- Oldenburg, D. W., Scheuer, T. ve Levy, S., 1983. Recovery of the acoustic impedance from reflection seismograms: Geophysics, 48, 1318-1337.
- Onajite, E., 2014. Seismic Data Analysis Techniques in Hydrocarbon Exploration, Elsevier's Science and Technology, ABD.
- Pendrel, J., 2006. Seismic Inversion – Still the best tool for reservoir characterization: CSEG Recorder.
- Sacchi, M. D., 1997. Reweighting strategies in seismic deconvolution: Geophys. J. Int., 129, 651- 656.
- Sacchi, M. D., 2006. Short Course:-Regularization methods for the solution of Inverse problems- Deconvolution, AVO, LS Migration, University of Alberta, Kanada.
- Sacchi, M. D., 2008. Signal Analysis and Imaging Group:
<http://www.geo.phys.ualberta.ca/saig/SeismicLab>
- Sacchi, M. D. ve Ulrych, T. J., 1995. High-resolution velocity gathers and offset space reconstruction. Geophysics, 60, 1169-1177.
- Sacchi, M.D. ve Ulrych, T.J., 2005, Information-based inversion and processing with applications, Handbook of Geophysical Exploration-Seismic Expolarition, Vol. 36, First Edition, Elsevier, Netherlands.
- Scales, J. A., 1987. Tomographic inversion via the conjugate gradient methods: Geophysics, 52, 179-185.
- Scales, J. A. ve Smith, M. L., 1994. Introductory Geophysical Inverse Theory: Samizdat Press.
- Schoepp, A. R. ve Margrave, G. F., 1998. Improving seismic resolution with nonstationary deconvolution. 68th Annual International Meeting of SEG Expanded Abstracts, 1096-1099.
- Strang, G., 1986. Introduction to Applied Mathematics: Wellesley-Cambridge Press.
- Tarantola, A., 1984. Inversion of seismic reflection data in the acoustic approximation: Geophysics, 49, 1259 -1256.
- Tarantola, A., 1987. Inverse problem theory: Methods for data fitting and model parameter estimation: Elsevier Science Publishing Company Inc.

- Tetyukhina, D., Vliet, L. J., van, Luthi, S. M. ve Wapenaar, K., 2010. High-resolution reservoir characterization by an acoustic impedance inversion of a Tertiary deltaic clinoform system in the North Sea: Geophysics, 75, 57- 67.
- Tikhonov, A. N. ve Arsenin, V. Y., 1977. Solutions of Ill-Posed Problems: New York, Winston.
- Ulrych, T. J., Sacchi, M. D. ve Woodbury, A., 2001. Tutorial: A Bayes tour of inversion: Geophysics, 66, 55-69.
- URL-1 <http://energy-talk.empowernetwork.com/blog/seismic-survey> 17 Aralık 2015 .
- Vapnik, V., 1995. The Nature of Statistical Learning Theory. Springer-Ver-lag. New York, 111-289.
- Wagner, C., Gonzalez, A., Agarwal, V., Koesoemadinata, A., Ng, D., Trares, S.ve Biles, N., 2012. Quantitative application of poststack acoustic impedance inversion to subsalt reservoir development: The Leading Edge, 31,528–37.
- Wang, Y., 2011. Seismic impedance inversion uisng l_1 -norm regularization and gradient descent methods: J. Inv. Ill-Posed Problems, 18, 823-833.
- Wang, J. ve Sacchi, M. D., 2008. Structure-and-Amplitude Preserving Multi-Channel Deconvolution, CSPG CSEG CWLS Convention, Kanada.
- Wang, J. ve Sacchi, M. D., 2005. Sparse regularization for least-squares AVP migration. CSPG National convention, Kanada
- Wang, Y., Seismic impedance inversion using l_1 -norm regularization and gradient descent methods, J. Inv. Ill Posed Problems, 18, 823-838.
- Waters, K. H., 1978. Reflection seismology: John Wiley and Sons.
- Yılmaz, Ö., 2001. Seismic Data Analysis: Processing, Inversion and Interpretation of Seismic Data. Society of Exploration Geophysicists, ABD.
- Youzwishen, C. F., 2001. Non-linear sparse and blocky constraints for seismic inverse problems. MSc. thesis, University of Alberta, Kanada.

- Yuan, S. ve Wang, S., 2013. Edge-preserving noise reduction based on Bayesian inversion with directional difference constraints: Journal of Geophysics and Engineering, 10, 1-10.
- Zhang, Y. G., 2002. The present and future of wave impedance inversion: Geophysical Prospecting for Petroleum, 41, 385-390.



ÖZGEÇMİŞ

Daniel ODJAM, Gana'nın Akra bölgesinde 14 Şubat 1987 tarihinde doğdu. İlk ve daha sonra orta öğrenimi tamamlandıktan sonra, ODJAM Ganada, Kwame Nkrumah Fen ve Teknoloji Üniversitesinde Fizik diplomasını başarı ile aldı. Mezun olduğu üniversitesinde araştırma görevlisi olarak ve daha sonra Faith Montessori okulunda lise fizik öğretmeni olarak çalıştı. Jeofizik mühendisliği yüksek lisans diplomasını sürdürmek için Türkiye'de Karadeniz Teknik Üniversitesi'ne gitti. ODJAM İngilizce dili, Türk dili ve Gana yerel dili konuşuyor.