



دانشکده معدن، نفت و ژئوفیزیک

پایان نامه کارشناسی ارشد

بهبود کیفیت مقاطع کوچ لرزه‌ای بوسیله مدل سرعت لرزه‌ای به
دست آمده از توموگرافی موج نقطه فرود نرمال

مصطفی وحیدهاشمی

اساتید راهنما

دکتر ایرج پیروز

دکتر مهرداد سلیمانی منفرد

بِسْمِ اللَّهِ الرَّحْمَنِ الرَّحِيمِ



دانشکده معدن، نفت و ژئوفیزیک

گروه اکتشاف

بهبود کیفیت مقاطع کوچ لرزه‌ای بوسیله مدل سرعت لرزه‌ای به دست آمده از توموگرافی موج نقطه فرود نرمال

مصطفی وحیدهاشمی

اساتید راهنما :

دکتر ایرج پیروز

دکتر مهرداد سلیمانی منفرد

استاد مشاور:

دکتر هاشم شاهسونی

پایان نامه جهت اخذ درجه کارشناسی ارشد

چکیده

برای تبدیل داده‌های لرزه‌ای بازتابی به یک تصویر ساختاری از زیر سطح زمین، از کوچ لرزه‌ای عمقی^۱ استفاده می‌شود. دقت تصویر حاصل از کوچ لرزه‌ای به شدت به مدل سرعت لرزه‌ای که بیانگر نحوه توزیع سرعت در زیر سطح زمین است، بستگی دارد. طی سال‌ها روش‌های مختلفی برای تهیه چنین مدل سرعتی توسط افراد مختلف ارائه شده است. یکی از پرکاربردترین این روش‌ها، روش توموگرافی بازتابی^۲ است. هر کدام از این روش‌ها دارای مزایا و معایبی هستند که از معایب روش توموگرافی، نحوه تهیه داده‌های ورودی در آن است. برای تهیه داده‌های ورودی در روش توموگرافی، باید رخدادهای بازتابی در داده‌های پیش از برانبارش، به منظور استخراج اطلاعات زمان‌سیر، دستچین^۳ شوند. این فرایند به دلیل پایین بودن نسبت سیگنال به نوفه و تعداد زیاد ردلرزه‌ها در داده‌های پیش از برانبارش، امری دشوار و زمان بر است.

روش توموگرافی همانند اکثر روش‌های تهیه مدل سرعت کوچ، مبتنی بر تکرار می‌باشد. یعنی با استفاده از یک مدل اولیه، سعی می‌شود اطلاعات زمان‌سیر ورودی، مدل سازی شوند؛ سپس با کمینه سازی اختلاف مقادیر مدل سازی شده و مقادیر اندازه‌گیری شده، طی هر تکرار، مدل سرعت اولیه بهبود می‌یابد تا جایی که این اختلاف به کمتر از یک حد مشخص برسد.

در این پایان نامه، از یک روش جدید توموگرافی، معروف به توموگرافی نقطه فرود موج عمود^۴ (دوونک^۵، ۲۰۰۴) برای تهیه مدل سرعت کوچ استفاده شده است. روش مذکور از اطلاعات زمان‌سیر به شکل یک سری نشانگرها به نام نشانگرهای جنبشی میدان موج^۶ برای تهیه مدل سرعت، استفاده

¹ Seismic depth migration

² Reflection Tomography

³ Pick

⁴ Normal Incident Point (NIP) Tomography

⁵ Duveneck

⁶ Kinematic wavefield attributes

می‌کند. این نشانگرها به صورت خودکار از محصولات جانبی فرایند برانبارش سطح بازتاب مشترک^۱ استخراج می‌شوند. استخراج خودکار این نشانگرها، که حاوی اطلاعات زمان‌سیر هستند، یکی از بزرگترین مزیت‌های این روش نسبت به سایر روش‌های توموگرافی می‌باشد. با این حال، هنگام استخراج خودکار نشانگرها، بازتاب‌های چندگانه نیز مورد برداشت قرار می‌گیرند که این امر موجب وارد شدن داده‌های نامعتبر به فرایند توموگرافی می‌شود. بنابراین، در این پایان‌نامه، با اصلاح برنامه رایانه‌ای استخراج نشانگرها، این نقیصه بر طرف گردیده است. همان‌طور که گفته شد، برای شروع روش NIP توموگرافی به یک مدل سرعت اولیه نیاز است؛ در روش ارائه شده توسط دوونک (۲۰۰۴) فرض شده است که سرعت لحظه‌ای با عمق به صورت خطی افزایش می‌یابد. در این پایان‌نامه قصد داریم، انواع مختلف روابطی که نحوه تغییرات سرعت با عمق را نشان می‌دهند، به عنوان مدل سرعت اولیه در روش NIP توموگرافی استفاده کرده و اثر هر یک را روی مدل سرعت نهایی بررسی کنیم. در نهایت، برای آزمایش مدل‌های سرعت، کوچ لرزه‌ای پیش و پس از برانبارش، با استفاده از این مدل‌ها، روی داده‌های لرزه‌ای واقعی اعمال خواهد شد. سپس با مقایسه این مقاطع کوچ، و انتخاب بهترین آنها، بهترین روش برای تهیه مدل سرعت اولیه، معرفی خواهد شد.

¹ Common Reflection Surface

فهرست مطالب

ا	چکیده	.....
ج	فهرست مطالب	.....
هـ	فهرست شکل‌ها	.....
ز	فهرست جدول‌ها	.....
ح	فهرست علائم و اختصارات	.....
۱	۱- مقدمه	.....
۲	۱-۱- تصویر سازی لرزه‌ای انعکاسی:	.....
۲	۱-۱-۱ برداشت داده‌های لرزه‌ای:	.....
۳	۱-۱-۲ پردازش داده‌های لرزه‌ای:	.....
۴	۱-۲- تصویر سازی عمقی و نقش مدل سرعت لرزه‌ای	.....
۵	۱-۳- روشهای تهیه مدل سرعت کوچ لرزه‌ای	.....
۶	۱-۳-۱ تهیه مدل سرعت با استفاده از روش‌های مبتنی بر کوچ	.....
۸	۱-۳-۲ تهیه مدل سرعت به روش معکوس سازی زمان سیر یا توموگرافی	.....
۱۱	۱-۴- روش استفاده شده در این تحقیق برای تهیه مدل سرعت کوچ	.....
۱۴	۲- روش برانبارش سطح بازتاب مشترک	.....
۱۵	۲-۱- اطلاعات موجود در داده‌های لرزه‌ای	.....
۱۷	۲-۲- روش برانبارش نقطه میانی مشترک	.....
۲۲	۲-۳- نشانگرهای جنبشی میدان موج	.....
۲۴	۲-۴- مفاهیم پایه‌ای روش برانبارش سطح بازتاب مشترک (CRS)	.....
۲۸	۲-۵- روش انجام برانبارش CRS	.....
۲۹	۲-۵-۱ برانبارش خودکار CMP	.....
۳۰	۲-۵-۲ برانبارش مقطع ZO	.....
۳۱	۲-۵-۳ برانبارش بهینه CRS	.....
۳۲	۲-۶- بازه در CRS	.....
۳۴	۳- توموگرافی توسط نشانگرهای جنبشی میدان موج	.....
۳۶	۳-۱- مدل تغییرات تدریجی سرعت در برابر مدل سرعت لایه‌ای:	.....
۳۹	۳-۲- موج NIP و تعیین مدل سرعت کوچ لرزه‌ای	.....
۴۱	۳-۳- فرمول بندی کردن توموگرافی توسط نشانگرهای جنبشی میدان موج:	.....
۴۱	۳-۳-۱ پارامترهای مشاهده‌ای	.....

۴۳	.....	۲-۳-۳- پارامترهای مدل
۴۶	.....	۳-۳-۳- مدل سازی مستقیم
۴۶	.....	۴-۳-۳- مسئله معکوس
۴۷	.....	۴-۳- حل مسئله معکوس
۴۹	.....	۱-۴-۳- حل مسئله معکوس به روش حداقل مربعات
۵۰	.....	۲-۴-۳- یکسان سازی یا منظم سازی مدل
۵۲	.....	۵-۳- الگوریتم روش NIP توموگرافی
۵۴	.....	۴- مثال داده‌های لرزه‌ای مصنوعی
۵۵	.....	۱-۴- توموگرافی یک بعدی
۵۵	.....	۱-۱-۴- پارامترهای داده و مدل
۵۶	.....	۲-۱-۴- مثال داده مصنوعی یک بعدی
۶۱	.....	۲-۴- توموگرافی دو بعدی
۶۱	.....	۱-۲-۴- پارامترهای مدل و داده
۶۲	.....	۲-۲-۴- مثال داده مصنوعی دو بعدی
۶۵	.....	۳-۴- تعریف مدل سرعت اولیه
۷۴	.....	۴-۴- مقایسه نتایج
۷۹	.....	۵- مثال داده‌های لرزه‌ای واقعی
۸۰	.....	۱-۵- جنبه‌های عملی
۸۱	.....	۱-۱-۵- برانبارش CRS
۸۲	.....	۲-۱-۵- اصلاح یا نرم کردن نشانگرها
۸۳	.....	۳-۱-۵- دستچین کردن نقاط داده
۸۵	.....	۴-۱-۵- اصلاح نقاط دستچین شده
۸۷	.....	۵-۱-۵- پارامتری کردن مدل سرعت و اعمال محدودیت‌ها روی آن
۸۸	.....	۲-۵- داده لرزه‌ای واقعی ۲ بعدی
۸۸	.....	۱-۲-۵- اطلاعات کلی داده لرزه‌ای مورد استفاده
۸۹	.....	۲-۲-۵- برانبارش CRS:
۹۴	.....	۳-۲-۵- NIP توموگرافی با مدل‌های سرعت اولیه مختلف
۱۰۰	.....	۳-۵- کوچ عمقی
۱۱۶	.....	۶- نتیجه گیری و پیشنهادات
۱۱۹	.....	۷- فهرست منابع؛

فهرست شکل‌ها

- شکل ۱-۱: مفهوم انحراف رخدادها از حالت افقی در یک برداشت تصویر مشترک. ۷.....
- شکل ۲-۱: مراحل تهیه مدل سرعت کوچک لرزه‌ای در روش‌های مبتنی بر کوچ. ۹.....
- شکل ۳-۱: طرح کلی تهیه مدل سرعت کوچ با استفاده از معکوس سازی زمان سیر. ۱۰.....
- شکل ۴-۱ (الف): شمای کلی دو جبهه موج فرضی که در نقطه R_0 در سطح زمین آشکار شده‌اند. ۱۲.....
- شکل ۱-۲: یک برداشت نقطه میانی مشترک از یک داده لرزه‌ای واقعی. ۱۷.....
- شکل ۲-۲ (الف): یک بازتابنده افقی در یک محیط همگن. ۱۸.....
- شکل ۳-۲: آنالیز سرعت برانبارش در یک CMP. ۲۰.....
- شکل ۴-۲: مقطع دو بعدی موج عمود و پرتوهای عمود مرتبط با آزمایش دورافت صفر. ۲۳.....
- شکل ۵-۲: مقطع دوبعدی موج NIP و پرتوهای غیر اسنلی در آزمایش CMP. ۲۳.....
- شکل ۶-۲: نشانگرهای جنبشی میدان موج برای دو مدل یک لایه ای. ۲۴.....
- شکل ۷-۲: عملگر برانبارش CRS برای یک بازتابنده منحنی شکل. ۲۷.....
- شکل ۸-۲: فلوجارت جستجوی پارامترهای مشخصه عملگر برانبارش CRS. ۳۲.....
- شکل ۹-۲: بازه دورافت صفر، بازه نقطه میانی و بازه CRS. ۳۳.....
- شکل ۱-۳: انواع مختلف تعریف مدل سرعت که معمولاً برای تصویر سازی عمقی استفاده می‌شود. ۳۸.....
- شکل ۲-۳ (الف): پرتویی که از یک نقطه بازتاب مشترک (CRP) منعکس شده‌اند. (ب) مسیر. ۳۹.....
- شکل ۳-۳: تعریف پارامترهای مدل و داده در NIP توموگرافی. (دوونک، ۲۰۰۴). ۴۴.....
- شکل ۱-۴، مثال داده مصنوعی یک بعدی. ۵۷.....
- شکل ۲-۴، مثال داده مصنوعی یک بعدی. همگرایی مدل سرعت به یک جواب بهینه. ۵۹.....
- شکل ۳-۴، مثال داده مصنوعی. خطای موجود در پارامترهای مدل. ۶۰.....
- شکل ۴-۴: مثال داده مصنوعی. مقدار تابع هدف S، معادله (۳-۱۶)، در برابر شماره تکرار. ۶۰.....
- شکل ۵-۴: مدل مصنوعی زمین شناسی. دارای ۶ لایه با ضخامت‌ها و سرعت‌های مختلف. ۶۳.....
- شکل ۶-۴: حالت تدریجی شده‌ی شکل (۴-۵). ۶۳.....
- شکل ۷-۴: مقطع برانبارش یافته‌ی لرزه نگاشت‌های حاصل از برداشت مصنوعی. ۶۴.....
- شکل ۸-۴: روابط مختلفی که برای ایجاد مدل سرعت اولیه استفاده می‌شوند. ۶۷.....
- شکل ۹-۴ (الف): مدل سرعت کوچ حاصل از رابطه‌ی کیارلی-سرا به عنوان مدل اولیه. ۶۹.....
- شکل ۱۰-۴ (الف): مدل سرعت کوچ حاصل از رابطه‌ی فاست. ۷۰.....
- شکل ۱۱-۴ (الف): مدل سرعت کوچ حاصل از رابطه‌ی خطی به عنوان مدل اولیه. ۷۱.....
- شکل ۱۲-۴ (الف): مدل سرعت کوچ حاصل از رابطه‌ی چندجمله‌ای به عنوان مدل اولیه. ۷۲.....
- شکل ۱۳-۴ (الف): مدل سرعت کوچ حاصل از سرعت برانبارش به عنوان مدل اولیه. ۷۳.....
- شکل ۱۴-۴: مدل زمین شناسی مصنوعی. برای مقایسه بهتر، شکل شبکه بندی شده است. ۷۵.....
- شکل ۱۵-۴: کوچ عمقی داده‌های لرزه‌ای مصنوعی. استفاده از رابطه کیارلی برای مدل اولیه. ۷۶.....
- شکل ۱۶-۴: کوچ عمقی داده‌های لرزه‌ای مصنوعی. استفاده از رابطه فاست برای مدل اولیه. ۷۶.....
- شکل ۱۷-۴: کوچ عمقی داده‌های لرزه‌ای مصنوعی. استفاده از رابطه خطی برای مدل اولیه. ۷۷.....
- شکل ۱۸-۴: کوچ عمقی داده‌های لرزه‌ای مصنوعی. استفاده از رابطه چندجمله‌ای برای مدل اولیه. ۷۷.....
- شکل ۱۹-۴: کوچ عمقی داده‌های لرزه‌ای مصنوعی. استفاده از سرعت برانبارش برای مدل اولیه. ۷۸.....

- شکل ۵-۱: نمایش اثر نرم کردن نشانگرها روی مقطع برانبارش ۸۳
- شکل ۵-۲: حذف نقاط مربوط به چندگانه‌ها با استفاده از سرعت کمتر چندگانه‌ها ۸۶
- شکل (۵-۳، الف): مقطع برانبارش یافته دورافت صفر به روش برانبارش سطح بازتاب مشترک ۹۰
- شکل (۵-۳، ب): مقطع همدوسی، که از محصولات جانبی برانبارش CRS می‌باشد. ۹۱
- شکل (۵-۳، ج): مقطع زاویه ورود موج NIP به سطح زمین (نسبت به بردار نرمال بر سطح). ۹۲
- شکل (۵-۳، د): مقطع تغییرات شعاع جبهه موج NIP که در سطح زمین ثبت شده است. ۹۳
- شکل ۵-۴: مدل سرعت برانبارش در حوزه زمان، ۹۵
- شکل ۵-۵: اختلاف بین τ_0 اصلی و τ_0 مدل سازی شده طی توموگرافی با استفاده از مدل‌های اولیه مختلف ۹۷
- شکل ۵-۶: اختلاف بین M_{NIP} اصلی و M_{NIP} مدل سازی شده طی توموگرافی ۹۸
- شکل ۵-۷: اختلاف بین $p^{(\xi)}$ اصلی و $p^{(\xi)}$ مدل سازی شده طی توموگرافی ۹۹
- شکل ۵-۸: مدل سرعت کوچک حاصل از NIP توموگرافی با استفاده از رابطه‌ی خطی برای مدل سرعت اولیه. ۱۰۲
- شکل ۵-۹: مقطع کوچک پس از برانبارش (Post-SDM) با استفاده از مدل سرعت شکل (۵-۸) ۱۰۳
- شکل ۵-۱۰: مدل سرعت کوچک حاصل از NIP توموگرافی با استفاده از رابطه‌ی فاست برای مدل اولیه. ۱۰۴
- شکل ۵-۱۱: مقطع کوچک پس از برانبارش (Post-SDM) با استفاده از مدل سرعت شکل (۵-۱۰) ۱۰۵
- شکل ۵-۱۲: مدل سرعت کوچک حاصل از NIP توموگرافی با استفاده از رابطه‌ی کیارلی- سرا برای مدل اولیه. .. ۱۰۶
- شکل ۵-۱۳: مقطع کوچک پس از برانبارش (Post-SDM) با استفاده از مدل سرعت شکل (۵-۱۲) ۱۰۷
- شکل ۵-۱۴: مدل سرعت حاصل از NIP توموگرافی با استفاده از رابطه‌ی چندجمله‌ای برای مدل اولیه ۱۰۸
- شکل ۵-۱۵: مقطع کوچک پس از برانبارش (Post-SDM) با استفاده از مدل سرعت شکل (۵-۱۴) ۱۰۹
- شکل ۵-۱۶: مدل سرعت حاصل از مدل سرعت برانبارش برای تعیین مدل سرعت اولیه ۱۱۰
- شکل ۵-۱۷: مقطع کوچک پس از برانبارش (Post-SDM) با استفاده از مدل سرعت شکل (۵-۱۶) ۱۱۱
- شکل ۵-۱۸: مقطع کوچک عمقی پیش از برانبارش (Pre-SDM) با استفاده از مدل سرعت (۵-۱۶) ۱۱۲
- شکل ۵-۱۹: چند نمونه برداشت تصویر مشترک از ناحیه‌ای که با رنگ زرد در شکل (۵-۱۸) مشخص ۱۱۳
- شکل ۵-۲۰: مقطع کوچک پیش از برانبارش (Pre-SDM) با استفاده از مدل سرعت شکل (۵-۸) ۱۱۴
- شکل ۵-۲۱: چند نمونه برداشت تصویر مشترک از ناحیه‌ای که با رنگ زرد در شکل (۵-۲۰) ۱۱۵

فهرست جدول‌ها

جدول ۱-۵: مقایسه بین خطای باقیمانده در پارامترهای داده پس از انجام توموگرافی ۱۰۰

فهرست علائم و اختصارات

CIG: Common Image Gather	مقطع تصویر مشترک
CMP gather: Common mid-point Gather	گروه لرزه‌نگاشت‌های مربوط به یک نقطه میانی مشترک
PreSDM: Pre-stack Depth Migration	کوچ لرزه‌ای عمقی پیش از برانبارش
ZO section: Zero Offset Section	مقطع دورافت صفر
NMO: Normal Moveout correction	تصحیح برون راند نرمال
CRP: Common Reflection Point	نقطه بازتاب مشترک
CRS: Common Reflection Surface	سطح بازتاب مشترک
RMO: Residual Moveout	برون راند باقیمانده
LSQR solution: Least-Square solution	حل یک مسئله به روش حداقل مربعات
SVD: Singular Value Decomposition	تجزیه نقاط تکین
NIP wave Tomography: Normal Incidence Point wave Tomography	توموگرافی موج عمود در نقطه‌ی فرود
τ	زمان سیر یک طرفه و یکی از پارامترهای داده
M_{NIP}	یکی از پارامترهای داده
$p^{(\xi)}$	بردار کندی و یکی از پارامترهای داده
ξ	مکان، روی سطح برداشت
$(\tau, M_{NIP}, p^{(\xi)}, \xi)$	پارامترهای داده
d_{obs}	بردار داده‌های مشاهده‌ای
$d_{cal} = d_{mod}$	بردار داده‌های مدل سازی شده

گفتار اول

مقدمه

۱-۱- تصویر سازی لرزه‌ای انعکاسی:

روش لرزه‌ای انعکاسی نقش مهمی در اکتشافات منابع هیدروکربوری درون زمین ایفا می‌کند. اساس این روش، به دست آوردن اطلاعات و خصوصیات ساختارهای زمین شناسی زیر سطحی از طریق وارد کردن انرژی الاستیک به درون زمین و ثبت و پردازش میدان موج لرزه‌ای حاصل از چشمه است. این امواج پس از بازتاب از لایه‌های زیرین سطح زمین دوباره به سطح زمین بازگشت کرده و ثبت می‌شوند. امواج لرزه‌ای ثبت شده، امکان به دست آوردن اطلاعات جزئی از محل فضایی لایه‌ها و ساختارهای زمین شناسی را می‌دهند.

۱-۱-۱ برداشت داده‌های لرزه‌ای:

اکتشافات نفت و گاز معمولاً در سنگهای رسوبی با عمق هدف کمتر از ۵ کیلومتر انجام می‌گیرد. برداشت‌های لرزه‌ای شامل تعداد زیادی چشمه لرزه‌ای و یک آرایش از گیرنده‌ها می‌شود. فاصله بین چشمه و هر گیرنده متفاوت است و حداکثر دورافت تا چندین کیلومتر معمولاً استفاده می‌شود. در بین برداشت‌ها، محل چشمه و یا محل کل مجموعه چشمه-گیرنده را به مکان جدید تغییر می‌دهند. این عمل منجر به برداشت چندین باره از ساختارهای زیر سطحی و هم پوشانی چندین برداشت می‌شود و بنابراین اطلاعات زیادی از این ساختارها به دست می‌آید.

در برداشت‌های خشکی، چشمه‌ها معمولاً از نوع انفجاری درون چاله‌های کم عمق و یا از نوع لرزاننده^۱ هستند. لرزاننده‌ها یک سیگنال با فرکانس کنترل شده که فرکانس‌های بالا را به پایین جاروب می‌کند^۲، به درون می‌فرستند در حالی که گیرنده‌های یک یا چند مولفه‌ای، حرکات ذرات را در هنگام ورود امواج الاستیک به آنها، ثبت می‌کنند. بسته به اینکه برداشت لرزه‌ای از نوع دو بعدی یا سه بعدی باشد، گیرنده‌ها در طول یک پروفیل یا در یک آرایش دو بعدی قرار می‌گیرند.

¹ Vibrator

² Sweep signals

۱-۱-۲ - پردازش داده‌های لرزه‌ای:

سیگنال‌های لرزه‌ای ثبت شده، ابتدا شامل مجموعه‌ای از انواع سیگنال‌های مربوط به امواج مستقیم، بازتابی، پراش یافته و چندگانه‌ها و ... می‌باشد. برای تصویر سازی لرزه‌ای انعکاسی معمولاً از سیگنال‌های مربوط به امواج بازتابی اولیه (یعنی امواجی که فقط یک بار در زیر سطح زمین منعکس شده‌اند) استفاده می‌شود که این امواج معمولاً امواج فشارشی (امواج P) هستند، استفاده می‌شود. تمام انواع دیگر موج شامل امواج چندگانه، امواج سطحی، امواج شکسته شده و بازتاب‌های اولیه از حالت‌های دیگر موج، نوفه‌های هم‌دوس در نظر گرفته می‌شوند. با این حال، از امواجی که در مسیرشان تا رسیدن به سطح زمین در محل ناپیوستگی‌ها (مرز لایه‌های زمین شناسی) تبدیل شده‌اند، نیز می‌توان اطلاعاتی درباره زیرسطح زمین به دست آورد. اما در این پایان نامه فرض بر این است که سیگنال‌های مربوط به امواج لرزه‌ای بازتابی، در داده‌های لرزه‌ای، از نوع موج فشارشی هستند.

یکی از اهداف پردازش داده‌های لرزه‌ای انعکاسی حذف امواج ناخواسته و انواع دیگر از نوفه‌های هم‌دوس و ناهم‌دوس از داده‌ها و بالا بردن قدرت سیگنال‌های بازتابی اولیه است. در ادامه‌ی فرایند پردازش، از این سیگنال‌های تقویت شده برای ایجاد یک تصویر ساختاری از زیر سطح زمین توسط فرایندی بنام کوچ لرزه‌ای استفاده می‌شود.

یک توالی معمول برای پردازش داده‌های لرزه‌ای شامل مراحل زیر است (برای مثال، ایلماز^۱ ۱۹۸۷):

الف) پیش پردازش و اعمال فیلترهای یک و دو بعدی روی داده‌ها جهت تضعیف نوفه‌ها و امواج زمین غلت^۲.

ب) حذف اثر چشمه با بکار بردن واهمامیخت برای افزایش وضوح زمانی و همچنین برای تضعیف چندگانه‌ها

ج) مرتب کردن داده‌ها به انباشت‌های نقطه میانی مشترک^۱

^۱ Yilmaz

^۲ Ground roll

د) آنالیز سرعت برانبارش در برداشت‌های نقاط میانی و برانبارش سیگنال‌ها جهت بدست آوردن یک مقطع برانبارش یافته دورافت صفر.

هدف از انجام فرایند برانبارش، حذف نوفه‌های همدوس و ناهمدوس در داده‌ها و همچنین کاهش حجم داده‌ها برای پردازش‌های بعدی است. علاوه بر آن، از سرعت برانبارش می‌توان به عنوان یک مدل اولیه برای ایجاد یک مدل سرعت، که برای مرحله بعدی به ویژه کوچ، در توالی پردازشی مورد نیاز است، استفاده کرد.

۱-۲- تصویر سازی عمقی و نقش مدل سرعت لرزه‌ای

هدف اصلی تصویرسازی لرزه‌ای^۲ بازتابی، به دست آوردن اطلاعات جزئی از ساختارهای زمین شناسی زیر سطحی به شکل یک تصویر عمقی لرزه‌ای است. چنین تصویری را می‌توان از طریق اعمال فرایند کوچ عمقی یا تصویر سازی عمقی روی داده‌های لرزه‌ای پردازش شده به دست آورد. این فرایند را هم می‌توان روی داده‌ی برانبارش شده (کوچ پس از برانبارش) و هم روی داده‌ی پیش از برانبارش (کوچ پیش از برانبارش) اعمال کرد.

الگوریتم‌های مختلفی برای انجام کوچ لرزه‌ای وجود دارد که اساس همه آنها استفاده از معادله موج برای شبیه سازی نحوه‌ی انتشار امواج در داخل زمین می‌باشد. پس از انجام کوچ، اثرهای مختلف زمین بر انتشار موج برطرف می‌گردد. یعنی، انرژی موجود روی رخدادهای پراش در مقطع لرزه‌ای، به یک نقطه متمرکز می‌شود و بازتابنده‌ها نیز در محل واقعی‌شان در زیر سطح قرار می‌گیرند.

روش کوچ عمقی را می‌توان بر پایه‌ی حل انتگرال معادله موج بکار برد که به عنوان کوچ کیرشهف^۳ شناخته می‌شود. رویکرد دیگر برای کوچ لرزه‌ای، بر اساس حل عددی فرایند ادامه درون سوی جبهه

¹ Common Mid-Point (CMP) Gather

² Seismic imaging

³ Kirchhoff migration

موج^۱ در حوزه زمان-مکان یا مکان-فرکانس و یا فرکانس-عدد موج می‌باشد (استوفا و همکاران، ۱۹۹۰؛ کلربوت، ۱۹۸۵؛ گزدگ، ۱۹۷۸).

به هر حال، چون روش‌های کوچ لرزه‌ای بر اساس برون‌یابی میدان موج کار می‌کنند، کاربرد کوچ لرزه‌ای جهت تبدیل داده لرزه‌ای به تصویر ساختارهای زیر سطحی نیازمند مدل سرعت انتشار امواج در درون زمین می‌باشند. چنین مدل سرعتی در ابتدا ناشناخته است و باید با استفاده از داده‌های موجود و همچنین بعضی داده‌های کمکی، آن را به دست آورد.

اگر از یک مدل سرعت ناصحیح برای انجام کوچ استفاده شود، انرژی‌های موجود در داده لرزه‌ای به درستی متمرکز نمی‌شوند و در نتیجه بازتابنده‌ها نیز در محل واقعی‌شان قرار نمی‌گیرند. مدل سرعتی که از داده‌های لرزه‌ای به دست می‌آیند، مدل سرعت کلی^۲ نامیده می‌شوند. زیرا این مدل صرفاً برای انجام کوچ لرزه‌ای بهینه شده است و برای تفسیر ساختارهای ظریف زمین شناسی مناسب نیستند.

۱-۳- روش‌های تهیه مدل سرعت کوچ لرزه‌ای

تهیه یک تصویر لرزه‌ای از زیر سطح زمین با استفاده از داده‌های لرزه‌ای نیازمند یک مدل سرعت لرزه‌ای دقیق است. عموماً، تهیه مدل سرعت انتشار موج در داخل زمین فرایندی بسیار پیچیده است. لذا، تمام این روش‌ها از یک سری فرضیات و ساده‌سازی‌ها درباره زیر سطح زمین برای تهیه مدل سرعت استفاده می‌کنند.

از آنجایی که خصوصیات جنبشی انتشار امواج لرزه‌ای توابعی غیر خطی از سرعت انتشار امواج هستند، تمام روش‌های تهیه مدل سرعت، مبتنی بر تکرارند. یعنی یا با به روز کردن مدل سرعت اولیه در هر تکرار و یا با پیش رفتن به زیر سطح زمین، بصورت لایه به لایه، مدل سرعت تهیه می‌شود. امروزه از روش‌های مختلفی برای تخمین مدل سرعت استفاده می‌شود. همگی این روش‌ها، بر اساس

¹ Downward continuation of wave-fronts

² Macro velocity models

معیار همخوانی با داده‌های لرزه‌ای استوار هستند که تفاوت آنها، در روش‌های اندازه‌گیری این معیار، میزان انحراف مدل از این معیار و چگونگی انجام اصلاحات بر روی آن است. باید عنوان کرد که یک روش تخمین مدل سرعت را نمی‌توان به عنوان راه حلی برای تمامی ساختارهای زیرسطحی ارائه کرد، بلکه هر روشی در ساختارهای خاص خودش، بهترین تخمین را بدست خواهد داد. به عنوان مثال، در ساده‌ترین حالت که شامل بازتابنده‌های افقی در محیطی با تغییرات سرعت قائم (بدون تغییرات سرعت جانبی) است، مقادیر سرعتی که توسط رابطه دیکس^۱ (دیکس، ۱۹۵۵) محاسبه می‌شود، کافی خواهند بود. در محیط‌های با ناهمگنی جانبی، روش‌های پیچیده تری مورد نیاز خواهد بود.

به علت تنوع زیاد روش‌های موجود برای تهیه مدل سرعت، طبقه بندی آنها مشکل است، اما در روش‌های پرکاربرد، می‌توان آنها به صورت زیر دسته بندی کرد. در این پایان نامه صرفاً، درباره‌ی تهیه مدل سرعت کوچ در حوزه عمق بحث خواهد شد.

الف. روش‌های مبتنی بر کوچ

۱. استفاده از انحراف رخداد‌های لرزه‌ای از حالت تخت در برداشت‌های تصویر مشترک^۲

۲. استفاده از خاصیت تمرکز انرژی در فرایند ادامه درونسو^۳

ب. روش‌های مبتنی بر استفاده از اطلاعات وارون سازی‌های مربوط به زمان سیر (توموگرافی)

۱-۳-۱- تهیه مدل سرعت با استفاده از روش‌های مبتنی بر کوچ

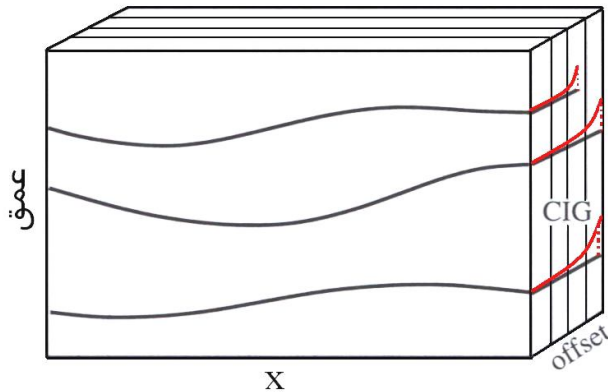
در روش تخمین مدل سرعت بر اساس کوچ قبل از برانبارش، میزان همخوانی مدل با داده‌ها، با نتایج کوچ داده‌های قبل از برانبارش به صورت تابعی از دورافت، ارزیابی می‌شود. در یک مدل

^۱ Dix Relation

^۲ Common Image Gather (CIG)

^۳ Downward Continuation

صحیح، تصاویر عمقی قبل از برانبارش باید مستقل از دورافت باشند، بدین صورت که با افزایش



شکل ۱-۱: در روش آنالیز سرعت مبتنی بر کوچ، نتایج کوچ قبل از برانبارش در برداشتهای تصویر مشترک ارزیابی می‌شود. در مدل سرعت صحیح، نتایج کوچ عمقی قبل از برانبارش باید مستقل از دورافت باشند. بدین صورت، رخدادهای در CIG، افقی خواهند بود (دوونک، ۲۰۰۴ با اعمال تغییرات).

دورافت، رخدادهای مربوطه از حالت افقی خارج نشوند (شکل ۱-۱).

در شکل (۱-۱) انحراف رخدادهای از حالت تخت، به شکل برونراد نرمال در برداشت تصویر دیده می‌شود که با رنگ قرمز نشان داده شده است. برون راند نرمال در این تصاویر را می‌توان همانند تصحیح برونراد نرمال در یک برداشت CMP، تصحیح کرد (روبین^۱، ۲۰۰۳). روند کلی تهیه مدل سرعت به این روش به طور خیلی خلاصه به شرح زیر است:

برای تهیه مدل سرعت کوچ پیش از برانبارش، داده لرزه‌ای پیش پردازش شده، به مقاطع دورافت مشترک تجزیه می‌شوند. در همین زمان باید یک مدل سرعت اولیه برای انجام اولین مرتبه کوچ عمقی تهیه شود. سپس با این مدل سرعت، داده‌ی مذکور کوچ داده می‌شود. از داده‌ی کوچ یافته، چند برداشت تصویر مشترک انتخاب می‌شود. انتخاب محل این برداشتها به عواملی مثل، وجود آنومالی سرعت در آن ناحیه و یا هدف مطالعاتی خاص در آنجا، بستگی دارد. در این مرحله، معمولا

¹ Robein E.

رخدادهای موجود در CIGها تخت نیستند. یعنی دارای برون راند هستند. برای حذف این انحراف از حالت افقی می توان از آنالیز برون راند باقیمانده^۱ استفاده کرد اما در صنعت استفاده از روش معکوس برون راند نرمال^۲ ترجیح داده می شود (روبین، ۲۰۱۰).

در مرحله بعد، CIG مذکور، تحت عمل معکوس برون راند نرمال قرار می گیرد. و همانند روند تهیه مدل سرعت برانبارش، طیف سرعت با استفاده از رابطه‌ی سمبلانس تهیه می شود. سپس، در طیف سرعت بدست آمده، نقاط با حداکثر مقدار همدوسی مشخص می شوند. پس از انتخاب (دستچین) کردن سرعت‌ها، مدل سرعت جدیدی بوجود می آید که با استفاده از این مدل، مجدداً کوچ عمقی روی داده‌ی لرزه‌ای اعمال شده و مقاطع تصویر مشترک جدید استخراج می شوند.

این مراحل ممکن است، تا رسیدن به افقی ترین حالت CIGها، چند بار تکرار شوند و در آخرین تکرار، مدل سرعت به دست آمده را با درون یابی به مدل سرعت نهایی کوچ تبدیل می کنند. شکل (۱-۲) تمام مراحل فوق را به طور شماتیک نشان می دهد.

۱-۳-۲- تهیه مدل سرعت به روش معکوس سازی زمان سیر^۳ یا توموگرافی

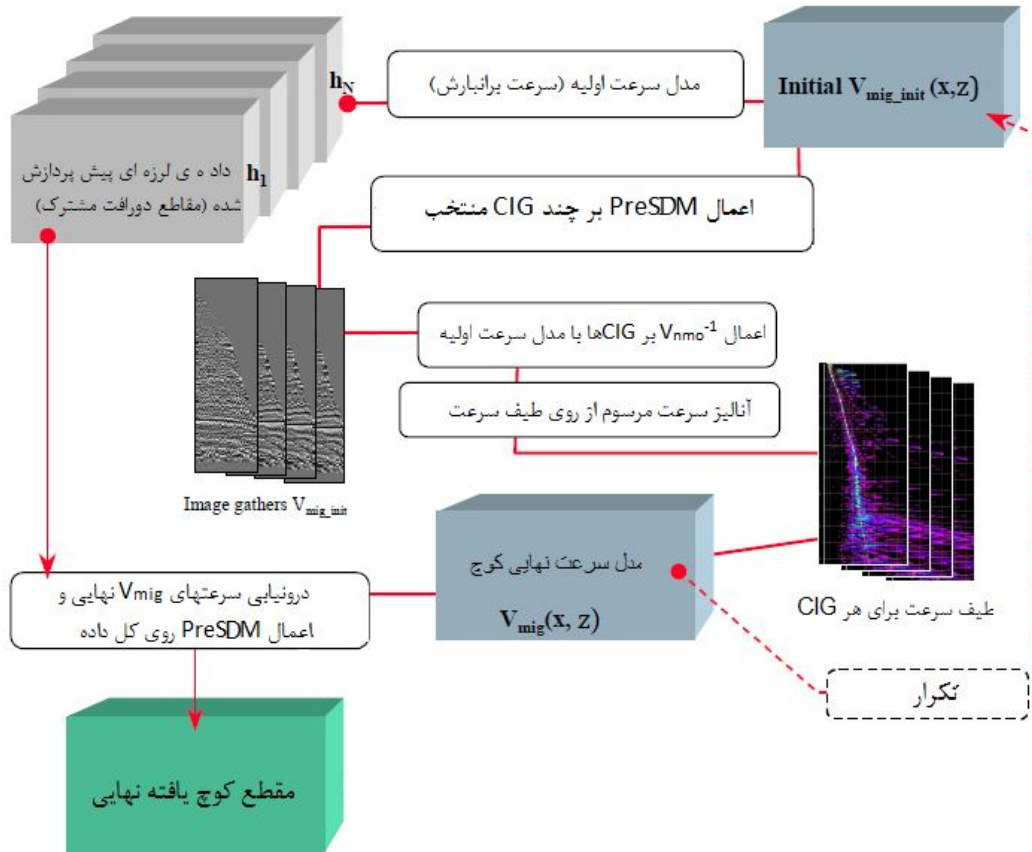
راه دیگر برای ارزیابی همخوانی مدل ایجاد شده نسبت به داده‌های لرزه‌ای، محاسبه زمان سیر رخدادهای بازتابی انتخاب شده است که در داده‌های قبل از برانبارش، دستچین شده‌اند. از مشکلات این روش، تعداد زیاد نقاطی است که برای انجام عمل توموگرافی باید دستچین شوند. این نقاط، به عنوان نقاط تشکیل دهنده بازتابنده در مدل در نظر گرفته می شوند. در سال‌های اخیر، سعی بر ترکیب روش معکوس سازی زمان سیر (توموگرافی) با روش آنالیز سرعت بر اساس کوچ شده است

¹ Residual Moveout (RMO)

² Inverse Normal Moveout

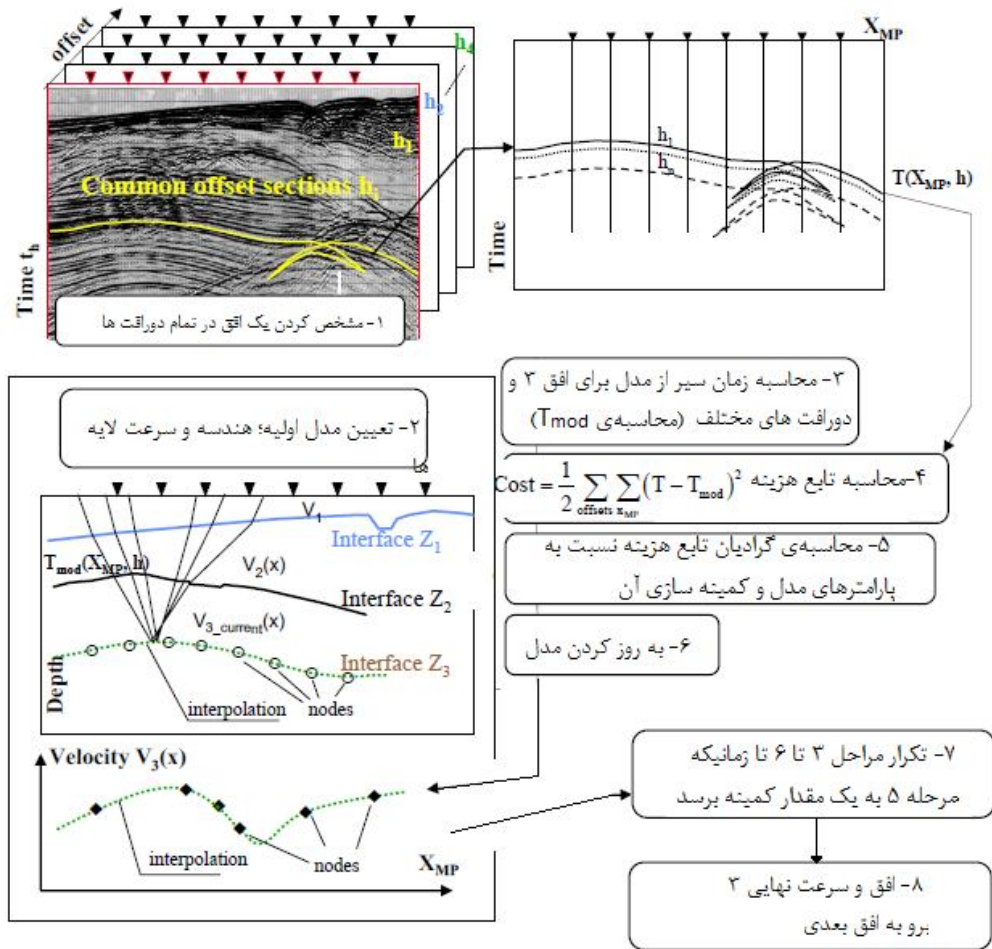
³ Traveltime inversion velocity analysis

(روبین، ۲۰۰۳). در این روش، به دنبال مدلی هستیم که به بهترین وجه زمان سیر رخدادهای بازتابی مشخص شده در داده‌ها را توجیه کند.



شکل ۱-۲: مراحل تهیه مدل سرعت کوچ لرزه‌ای در روش‌های مبتنی بر کوچ (برگرفته از روبین، ۲۰۰۳).

پس از تهیه مدل سرعت اولیه، باید مرزهای مدل، در عمق پارامتری شوند و همچنین سرعت‌های بازه‌ای توسط توابع اسپلاین بر روی گره‌ها مشخص شوند. در این مرحله، مقاطع دورافت مشترک داده‌های پیش پردازش شده تهیه می‌شود. سپس روی این مقاطع، یک رخداد پیوسته، مشخص و دستچین می‌شود. نقاط دستچین شده داده‌های ورودی این روش را تشکیل می‌دهند.



شکل ۱-۳: طرح کلی تهیه مدل سرعت کوچ با استفاده از معکوس سازی زمان سیر (برگرفته از روبین، ۲۰۰۳).

در مرحله بعد، با استفاده از تکنیک دنبال کردن پرتو^۱ روی مدل سرعت اولیه، زمان سیر رخدادها مدل سازی می شوند. زمان سیرهای حاصله را با T_{mod} نشان داده می شود. با کمیته سازی اختلاف بین زمان سیرهای اندازه گیری شده و زمان سیرهای مدل سازی شده، می توان مدل اولیه را بهبود بخشید و پس از چند تکرار به یک مدل سرعت بهینه دست یافت. در این روش، اگر نسبت سیگنال به نوفه در داده ی لرزه ای پایین باشد، مشخص کردن و دستچین کردن زمان سیرها به مشکل بر می خورد و یا حتی غیر ممکن می شود. در این حالت، مدل اولیه نقش مهمی دارد. یعنی اینکه باید مدل اولیه را از

¹ Ray Tracing

منابع اطلاعاتی دیگری مثل نگاره‌های چاه یا ... با میزان دقت قابل قبول تعیین کرد (روبین، ۲۰۰۳). شکل (۱-۳) طرح کلی این روش را نشان می‌دهد. در این شکل فرض شده که مدل سرعت از نوع کیک لایه‌ای است و از استراتژی لایه به لایه جهت برآورد مدل سرعت استفاده شده است.

۱-۴- روش استفاده شده در این تحقیق برای تهیه مدل سرعت کوچ

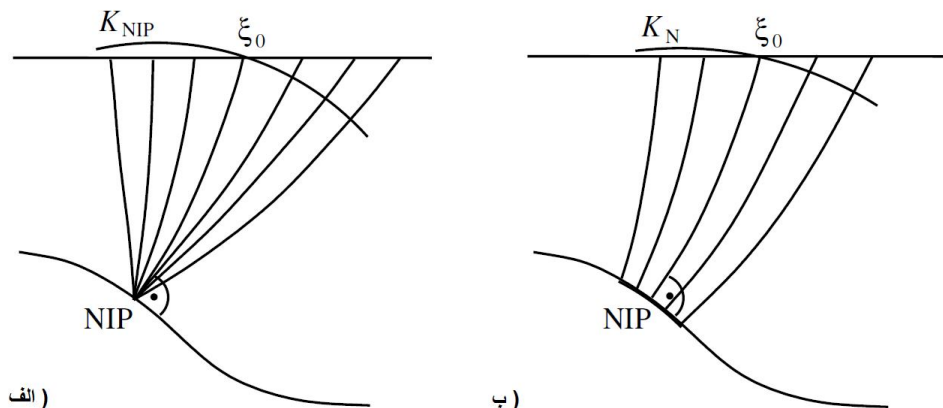
هرکدام از روش‌های فوق الذکر، در عمل دارای محدودیت‌هایی هستند. به عنوان مثال در روش مبتنی بر کوچ لرزه‌ای، لازم است که بعد از هر بار ایجاد مدل، آن را با داده‌های واقعی تطبیق داد، بهینه کرد و مدل را به روز رساند. در روش توموگرافی نیز، نیاز به دستچین کردن نقاط زیادی است که خود مرحله‌ای بسیار وقت گیر و پر خطا می‌باشد. این نقیصه، در مواردی که داده‌ها دارای نسبت سیگنال به نوفه پایین باشند، بسیار دشوار و گاهی غیر ممکن می‌باشد. بنابراین مشکل اصلی در عمل، تخمین زمان سیر در توموگرافی، برای دسته داده‌های با دورافت بالا و نسبت سیگنال به نوفه پایین است.

دوونک (۲۰۰۴)، روشی برای تهیه مدل سرعت کوچ معرفی کرد که تا حد زیادی مشکلات روش توموگرافی را رفع می‌کند. در روش مذکور، اطلاعات زمان سیر به شکل یک سری نشانگرها به نام نشانگرهای جنبشی میدان موج^۱ از روی محصولات جانبی برانبارش سطح بازتاب مشترک^۲ (فصل دوم) دستچین می‌شوند. در روش برانبارش CRS از رابطه زمان سیر درجه دو، به عنوان عملگر برانبارش استفاده می‌شود. این رابطه، رخداد‌های بازتابی را به صورت معنا داری، پارامتری می‌کند و حتی در مکان‌هایی با نسبت سیگنال به نوفه پایین، مقادیر دقیقی را برای زمان سیر بدست می‌دهد. این عمل توسط آنالیز همدوسی بر روی داده‌های قبل از برانبارش صورت می‌گیرد. در این روش، برای هر نمونه دورافت صفر، چندین پارامتر به دست می‌آید که به این پارامترها، نشانگرهای جنبشی میدان موج می‌گویند. این نشانگرها، پارامترهایی از دو نوع موج به نام موج عمود (N) و موج عمود در نقطه

¹ Kinematic Wavefield Attributes

² Common Reflection Surface (CRS) stack

ورود^۱ (NIP) را بیان می‌کنند. شکل (۱-۴-الف و ب)، این دو نوع موج فرضی را به طور شماتیک نشان می‌دهد. از آنجایی که فرایند دستچین کردن رخدادهای بازتابی روی مقاطع پس از برانبارش انجام می‌گیرد، تعداد نقاط لازم برای توموگرافی کاهش چشمگیری می‌یابد. نکته مهم‌تر، دستچین کردن نقاط به صورت خودکار، در نقاطی است که در آنالیز همدوسی دارای مقادیر بالایی می‌باشند. در این روش، از خواص موج NIP برای توموگرافی استفاده می‌شود که بدین دلیل، آن را توموگرافی موج عمود در نقطه ورود یا NIP توموگرافی گویند (دوونک، ۲۰۰۴).



شکل ۱-۴-الف) جبهه موج NIP که در نقطه ξ_0 ظهور کرده است. K_{NIP} انحنای جبهه موج NIP می‌باشد. ب) جبهه موج نرمال که در نقطه ξ_0 ظهور کرده است و K_N انحنای جبهه موج نرمال. این موج فرضی بر یک قطعه‌ای از بازتابنده حول نقطه‌ی NIP عمود می‌باشد (من^۲، ۱۹۹۹).

روش NIP توموگرافی نیز، همانند روشهای مرسوم توموگرافی، برای مدل سازی داده‌های اندازه‌گیری شده، نیاز به مدل سرعت اولیه دارد. در روش NIP توموگرافی، برای تهیه مدل سرعت اولیه، فرض می‌شود که سرعت به صورت خطی با عمق و با افزایش یابد. تاکنون مطالعات زیادی روی نحوه‌ی تغییرات سرعت لحظه‌ای با عمق انجام شده است. روبین (۲۰۰۳) با اشاره به این موضوع، تعدادی از پرکاربردترین روابطی که بر اساس آنها تغییرات سرعت لحظه‌ای با عمق نشان داده می‌شود را جمع آوری کرده است. در بخش ۴ به صورت جزئی‌تر درباره‌ی این توابع بحث می‌شود. اما، مشکل این توابع،

¹ Normal (N) and Normal Incidence Point (NIP) wave

² Mann J.

عدم در نظر گرفتن تغییرات جانبی سرعت است. بنابراین، در این پایان نامه، علاوه بر بررسی اثر استفاده از روابط فوق الذکر به عنوان مدل سرعت‌های اولیه‌ی مختلف روی نتایج NIP توموگرافی، از مدل سرعت برانبارش نیز، به عنوان مدل سرعت اولیه، استفاده می‌شود. هدف این پایان نامه، بررسی روابط مختلف برای تهیه مدل سرعت اولیه کوچ و مقایسه مقاطع کوچ حاصل از این مدل‌ها با یکدیگر است. سپس مدل اولیه مربوط به بهترین مقطع کوچ، به عنوان کارآمدترین مدل سرعت اولیه معرفی خواهد شد. همچنین، با اعمال تصحیحات ارائه شده توسط محققان مختلف روی برنامه رایانه‌ای NIP توموگرافی، مثل جلوگیری از دستچین شدن بازتابهای چندگانه، سعی شده است که قابل اعتمادترین نقاط برای انجام توموگرافی از محصولات برانبارش سطح بازتاب مشترک مورد برداشت قرار گیرند.

گفتار دوم

روش برانبارش سطح بازتاب مشترک

در این فصل، روش برانبارش سطح بازتاب مشترک (CRS) (برای مثال، من و همکاران^۱، ۱۹۹۹؛ یگر و همکاران^۲، ۲۰۰۱؛ من، ۲۰۰۲) معرفی خواهد شد. روش برانبارش CRS از اطلاعات اضافی موجود در داده‌های لرزه‌ای برای تهیه مقطع برانبارش شده (در حالت دوبعدی) یا بلوک برانبارش شده (در حالت سه بعدی) استفاده می‌کند. در این روش نسبت سیگنال به نوفه در مقایسه با روش‌های برانبارش مرسوم، افزایش چشم‌گیری دارد. در طی این فرایند، برای هر نمونه دورافت صفر در مقطع برانبارش یافته، اطلاعات زمان‌سیر از داده‌ها به شکل تعدادی پارامتر که در اصطلاح به آنها نشانگرهای جنبشی میدان موج می‌گویند، استخراج می‌شوند. این نشانگرها اساس روش توموگرافی را که در فصل ۳ بحث شده است، تشکیل می‌دهند. برای محاسبه عملگر برانبارش نیاز به سه مشخصه است که عبارتند از α ، زاویه ورود پرتوی مرکزی به سطح زمین؛ R_N ، شعاع انحنای موج عمود و R_{NIP} ، شعاع انحنای موج عمود در نقطه ورود. که همگی در سطح اندازه‌گیری می‌شوند که به این سه مشخصه، نشانگرهای جنبشی میدان موج گویند (من، ۱۹۹۹). با بدست آوردن سه نشانگر جنبشی میدان موج، عمل برانبارش در امتداد سطحی که معادله آن یک معادله دو بعدی زمان بر حسب نیم دورافت و نقطه میانی می‌باشد و به آن سطح برانبارش CRS گویند، انجام می‌پذیرد. از کاربردهای این روش می‌توان به تعیین زون فرسندل، فاکتور توزیع هندسی و همچنین فرایند معکوس سازی اشاره کرد. بزرگترین مزیت این روش، افزایش نسبت سیگنال به نوفه است. و همچنین رخدادها، در مقاطع، دارای پیوستگی بالایی می‌باشند (یگر و همکاران، ۲۰۰۱، ۱۹۹۹).

۲-۱- اطلاعات موجود در داده‌های لرزه‌ای

همانطور که در بخش (۱-۱) بحث شد، داده‌های لرزه‌ای بازتابی معمولاً به گونه‌ای برداشت می‌شوند که یک بخش از بازتابنده در زیر سطح زمین چندین مرتبه و هر بار با دورافت متفاوت مورد

¹ Mann et. al.

² Jager et. al.

برداشت قرار گیرد؛ که موجب حاصل شدن اطلاعات دارای هم پوشانی از ساختارهای زیرسطحی می‌شود. نسبت سیگنال به نوفه (S / N) را می‌توان با جمع (برانبارش) سیگنال‌های مربوط به یک نقطه بازتابی در زیر سطح زمین که با دورافت‌های متفاوتی برداشت شده، بهبود داد. علاوه بر این، از اختلاف زمان سیرهای اندازه‌گیری شده از رخداد‌های بازتابی مربوط به یک نقطه بازتاب در زیر سطح زمین به صورت یک تابع از دورافت می‌توان به چگونگی سرعت‌های لرزه‌ای در لایه‌های زیرین سطح زمین پی برد. در حقیقت، وابستگی زمان سیرهای بازتابی به دورافت، تنها اطلاعات موجود (به غیر از اطلاعات حاصل از گمانه‌ها و اطلاعات اولیه زمین شناسی) برای ساختن مدل سرعت لرزه‌ای است، که از این مدل سرعت برای تبدیل داده‌های اندازه‌گیری شده به یک تصویر ساختاری در حوزه عمق استفاده می‌شود. روش‌های مختلف استفاده از این اطلاعات برای ساختن مدل سرعت در بخش (۱-۳) بحث شد. با این حال، مشکل اینجاست که در ابتدا محل دقیق سیگنال‌های مربوط به یک نقطه بازتابی مشترک در داده‌های لرزه‌ای، ناشناخته است. به منظور رفع این مشکل، یک سری از تقریب‌ها و فرض‌هایی درباره‌ی ساختارهای زیرسطحی در نظر گرفته می‌شوند. معمول ترین روش برانبارش که بر اساس چنین فرضیاتی کار می‌کند، روش برانبارش نقطه میانی مشترک (CMP) (ماینه^۱، ۱۹۶۲) است و در بخش (۲-۲) بحث خواهد شد. برای بحث در مورد برانبارش CMP و بعد از آن برانبارش CRS و تقریب زمان سیر مربوط به آنها، بهتر است از دستگاه مختصات نقطه میانی و نیم-دورافت^۲ $(x, h/2)$ استفاده کرد. در طول این فصل، یک سطح برداشت به گونه‌ای فرض می‌شود که موقعیت نقاط روی آن توسط بردار دو مولفه‌ای ξ مشخص شوند. اگر موقعیت یک چشمه بر روی سطح برداشت را با ξ_s و یک محل یک گیرنده با ξ_g مشخص شوند، آنگاه بردارهای نیم-دورافت h و نقطه میانی ξ_m به صورت زیر تعریف می‌شوند:

¹ Mayne

² Half-offset and Mid-point

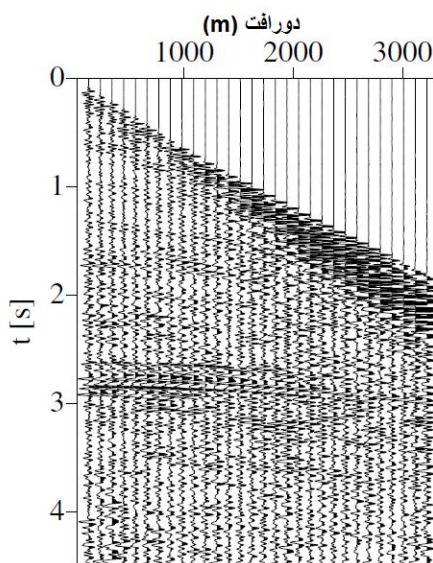
معادله (۱-۲)

$$h = \frac{\xi_g - \xi_s}{2} \quad \text{و} \quad \xi_m = \frac{\xi_g + \xi_s}{2}$$

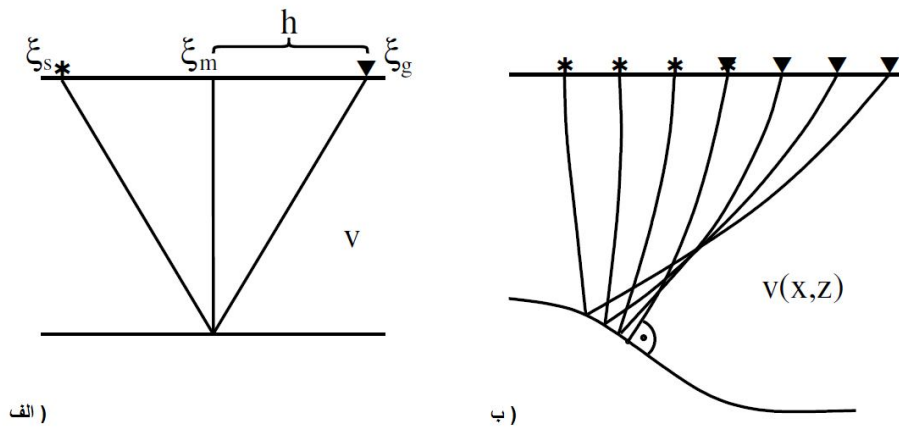
اگر برداشت داده‌های لرزه‌ای به یک خط مستقیم محدود شود (حالت دو بعدی)، این بردارها به اسکالرهای h و ξ کاهش می‌یابند.

۲-۲- روش برانبارش نقطه میانی مشترک

روش برانبارش CMP از اطلاعات موجود در داده‌های لرزه‌ای با در نظر گرفتن ردلرزه‌های مربوط به یک نقطه میانی مشترک اما با دورافت‌های متفاوت برای برانبارش سیگنال‌های بازتابی، استفاده می‌کند. سیگنال‌های مربوط به یک رخداد بازتابی، در یک برداشت CMP (برای مثال، شکل ۱-۲) در جهت دورافت و در طول یک منحنی برانبارش مناسب جمع می‌شوند که این امر موجب افزایش میزان سیگنال به نوفه می‌شود. در نهایت، ردلرزه‌ی حاصل، به نقطه میانی مذکور نسبت داده می‌شود. این روش در ابتدا توسط ماینه (۱۹۶۲) با فرض محیط دارای لایه‌های افقی معرفی شد، که در این صورت، فرض می‌شود، سیگنال‌های مربوط به رخدادهای بازتابی در ردلرزه‌های مختلف در یک برداشت CMP از یک نقطه‌ی بازتاب مشترک در زیر سطح و درست در زیر محل CMP بازتابیده شده‌اند.



شکل ۱-۲: یک برداشت نقطه میانی مشترک از یک داده لرزه‌ای واقعی



شکل ۲-۲، الف) یک بازتابنده افقی در یک محیط همگن. در این حالت زمان سیرهای بازتابی به طور دقیق با رابطه‌ی (۲-۲) به دست می‌آیند. ب) یک بازتابنده‌ی شیب دار و منحنی شکل در یک محیط دارای ناهمگنی جانبی. در این حالت، زمان سیرهای بازتابی را می‌توان با رابطه‌ی (۲-۹) تخمین زد.

چنانچه، یک محیط همگن دارای بازتابنده‌های افقی در در نظر گرفته شود (شکل ۲-۲ الف)، آنگاه زمان سیر یک سیگنال بازتابی $t(h)$ که در یک برداشت CMP اندازه‌گیری شده را می‌توان به صورت

زیر نوشت:

$$t^2(h) = t_0^2 + \frac{4h^2}{v^2} \quad \text{معادله (۲-۲)}$$

که در آن v سرعت ثابت محیط و t_0 زمان سیر رخدادهای بازتابی در دورافت صفر می‌باشد. اگر فرض همگن بودن زیر سطح زمین دیگر برقرار نباشد، اما فرض شود زمین شامل تعدادی لایه‌ی افقی، دارای سرعت ثابت در هر لایه، باشد، از معادله (۲-۲) باز هم می‌توان برای توصیف زمان سیرهای بازتابی در برداشت‌های CMP استفاده کرد. در این صورت، رابطه فوق صرفاً تقریب مرتبه دوم (نسبت به دورافت) منحنی دقیق زمان سیر t^2 می‌باشد (برای مثال، تینر و کهلر^۱، ۱۹۶۹). همچنین، v در رابطه (۲-۲) را باید با سرعت ریشه میانگین مربعات^۲ (RMS) که به صورت زیر تعریف می‌شود، جایگزین کرد:

¹ Taner and Koehler

² Root Mean Square

معادله (۳-۲)

$$v_{RMS}^2 = \frac{1}{t_0} \sum_{i=1}^N v_i^2 \Delta t_i$$

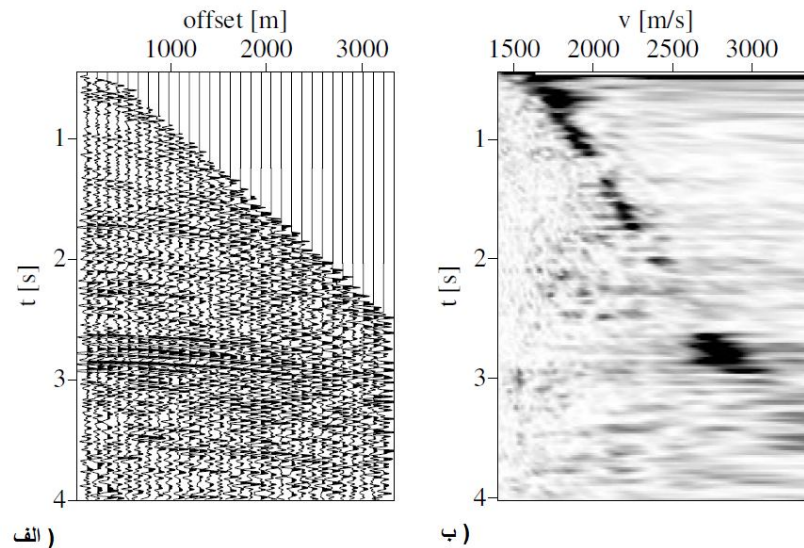
که در آن v_i سرعت بازه‌ای و Δt_i زمان سیر دو طرفه عمودی در لایه i ام است. در حالت کلی تر، بازتابنده‌های شیب دار و دارای انحنا و در یک محیط دارای ناهمگنی جانبی (شکل ۲-۲ ب) و یا در یک مدل متشکل از لایه‌های دارای تغییرات سرعت تدریجی که توسط مرزهای منحنی شکل از هم جدا شده اند، بازهم می‌توان از معادله‌ی (۲-۲) برای توصیف زمان‌سیرهای بازتابی در یک برداشت CMP استفاده کرد:

معادله (۴-۲)

$$t^2(h) = t_0^2 + \frac{4h^2}{v_{NMO}^2}$$

که در آن پارامتر v_{NMO} ، سرعت برون راند نرمال^۱ نامیده می‌شود. نبود یک عبارت خطی در معادله (۴-۲) بیانگر این واقعیت است که زمان سیر با عوض کردن محل چشمه و گیرنده تغییر نمی‌کند. در نتیجه خواهیم داشت: $t(h) = t(-h)$. باید توجه داشت که در حالت کلی، سیگنالهای بازتابی اندازه‌گیری شده در یک CMP الزاما از یک نقطه در زیر سطح زمین بازتاب نمی‌شوند (پراکندگی نقطه بازتاب).

¹ Normal moveout



شکل ۲-۳، آنالیز سرعت برانبارش در یک CMP. الف) یک ورداشت CMP؛ ب) طیف سرعت. مقادیر شباهت، معادله (۲-۵)، در طول منحنی‌هایی که توسط معادله (۳-۴) تعریف می‌شوند، محاسبه می‌شود. نواحی تاریک، مربوط به مقادیر بیشینه شباهت می‌باشد.

به منظور استفاده از معادله (۲-۴) برای برانبارش CMP، باید مقادیر مناسب V_{NMO} برای تمام رخداد‌های بازتابی موجود در CMP تعیین شود. روند تعیین سرعت برون راند نرمال بر اساس معادله (۲-۴)، آنالیز سرعت NMO نامیده می‌شود. معمول ترین ابزاری که برای این منظور استفاده می‌شود، طیف سرعت می‌باشد (برای مثال، ایلماز، ۲۰۰۱؛ تینر و کهلر، ۱۹۶۹). برای بدست آوردن طیف سرعت یک ورداشت CMP، برای هر زمان دورافت صفر t_0 از طریق معادله (۲-۴) با در نظر گرفتن یک بازه سرعت، یک دسته منحنی برای t_0 تشکیل می‌شود. سپس با استفاده از آنالیز شباهت، میزان شباهت بین این منحنی‌ها و منحنی زمان سیر واقعی، سنجیده می‌شود. سرعتی که به ازای آن بیشترین میزان شباهت به دست آید، سرعت برون راند نرمال گفته می‌شود. شکل (۲-۳) یک CMP و طیف سرعت مربوط آن را نشان می‌دهد. با دستچین کردن نقاط دارای مقدار بیشینه روی مقطع طیف سرعت و درون یابی بین آنها، مدل سرعت برون راند نرمال حاصل می‌شود. معمول ترین روش برای انجام آنالیز شباهت، رابطه شباهت^۱ است که به صورت زیر تعریف می‌شود:

^۱ Semblance

$$C_S = \frac{1}{N} \frac{\sum_t (\sum_{i=1}^N f_{i,t(i)})^2}{\sum_t \sum_{i=1}^N f_{i,t(i)}^2} \quad \text{معادله (۵-۲)}$$

در اینجا، $f_{i,t(i)}$ دامنه ردلرزه Δt در زمان سیر دو طرفه $t(i)$ و N تعداد ردلرزه مورد نظر در محاسبه رابطه شباهت است. پس از اینکه سرعت برون راند نرمال به صورت تابعی از t_0 مشخص شد، می توان از آن به عنوان V_{NMO} در معادله (۴-۲) برای اعمال تصحیح برون راند نرمال مطابق رابطه زیر:

$$\Delta t_{NMO} = t_0 \left(\sqrt{1 + \frac{4h^2}{v_{NMO}^2 t_0^2}} - 1 \right) \quad \text{معادله (۶-۲)}$$

بر روی برداشتهای CMP، استفاده کرد. پس از اعمال تصحیح NMO تمام سیگنالهای مربوط به یک نقطه در زیر سطح زمین روی یک خط راست به موازات محور دورافت واقع می شوند و می توان آنها را با هم جمع کرد و ردلرزه‌ی برانبارش یافته را به دست آورد.

در عمل، سرعت برانبارش که با آنالیز سرعت تعیین می شود با سرعت برون راند نرمال V_{NMO} که با تقریب مرتبه دوم زمان سیر (۴-۲) تعریف می شود، یکسان نیستند. (برای مثال، الچلبی^۱، ۱۹۷۳؛ هوبرال و کری^۲، ۱۹۸۰). این اختلاف توسط عوامل مختلفی ایجاد می شود، که برخی از آنها در بخش (۵-۱) معرفی شده است. اما مهم ترین آنها عبارتند از عدم انطباق منحنی زمان سیر بازتابی واقعی با شکل هذلولوی است که به علت ناهمگنیهای جانبی در زیر سطح زمین و بازه‌ی محدود دورافت که در طی آنالیز سرعت به کار می رود، ایجاد شده است.

¹ Al-Chalabi

² Hubral and Krey

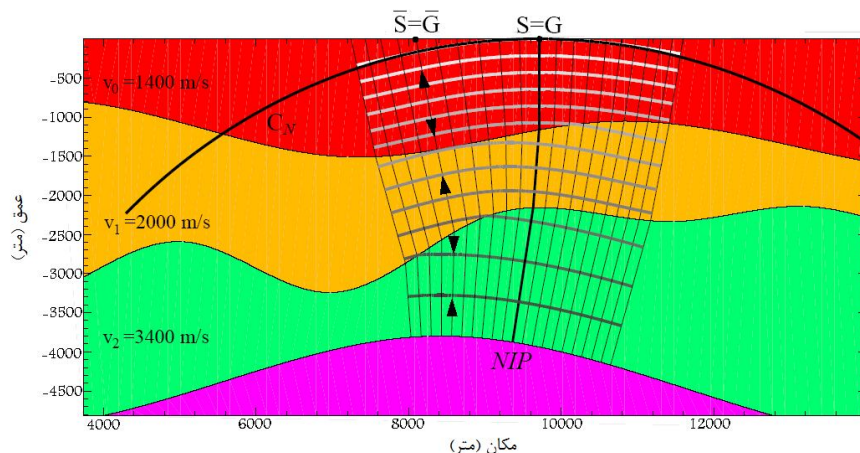
۲-۳- نشانگرهای جنبشی میدان موج

برای محاسبه عملگر برانبارش CRS نیاز به سه نشانگر است که عبارتند از α ، زاویه ورود پرتوی مرکزی به سطح زمین؛ R_N ، شعاع انحنای موج عمود و R_{NIP} ، شعاع انحنای موج عمود در نقطه انتشار^۱. طبق تعریف، جبهه موج عمود جبهه موجی فرضی است که از یک سطح انفجاری (به جای چشمه نقطه‌ای) ناشی شده است و بطور محلی بر پرتوهای دورافت صفر، عمود می‌باشد. به عبارت دیگر موج عمود، موجی است که جبهه اولیه تشکیل دهنده‌ی آن بر سطح بازتاب منطبق بوده، با نصف سرعت محیط به سمت بالا انتشار می‌یابد و در زمان t_0 به نقطه $S=G$ در شکل (۲-۴) به سطح زمین می‌رسد (یگر و همکاران، ۲۰۰۱). موج نرمال را هنگامی موج ویژه^۲ گویند که اگر جبهه موج از سطح از نقطه‌ای که $S=G$ است به سمت پایین حرکت کند، به صورت مشابه به تمام نقاط سطح بازتابنده برخورد می‌کند، سپس به سمت بالا بازتاب شده و جبهه موج برگشتی با جبهه موج گسیل شده منطبق گردد (هوبرال، ۱۹۸۳).

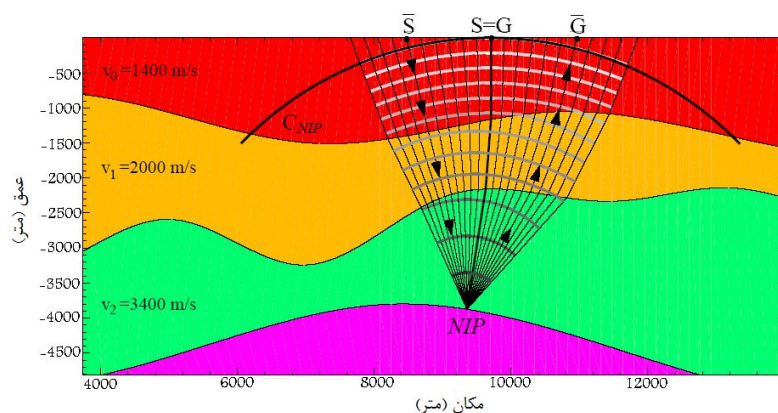
شکل (۲-۴) نحوه گسترش موج نرمال به همراه پرتوهای فرضی آن را نشان می‌دهد. بنابر تعریف، موج NIP موجی است که از نقطه NIP بر روی سطح بازتابنده آغاز شده و با نصف سرعت محیط در زمان t_0 به محل انطباق چشمه و گیرنده می‌رسد، (یگر و همکاران، ۲۰۰۱). موج NIP را هنگامی موج ویژه گویند که اگر جبهه‌ی موجی از سطح به سمت پایین حرکت کند، در نقطه NIP متمرکز شده و پس از بازتاب دوباره به همان محل در سطح باز گردد. در این صورت جبهه موج برگشتی با جبهه موج گسیل شده بر هم منطبق خواهند شد. شکل (۲-۵) نحوه گسترش جبهه موج NIP به همراه پرتوهای فرضی (غیر اسنلی) آن در آزمایش CMP را نشان می‌دهد.

¹ Normal-Incidence-Point (NIP) wave

² Eigenwave

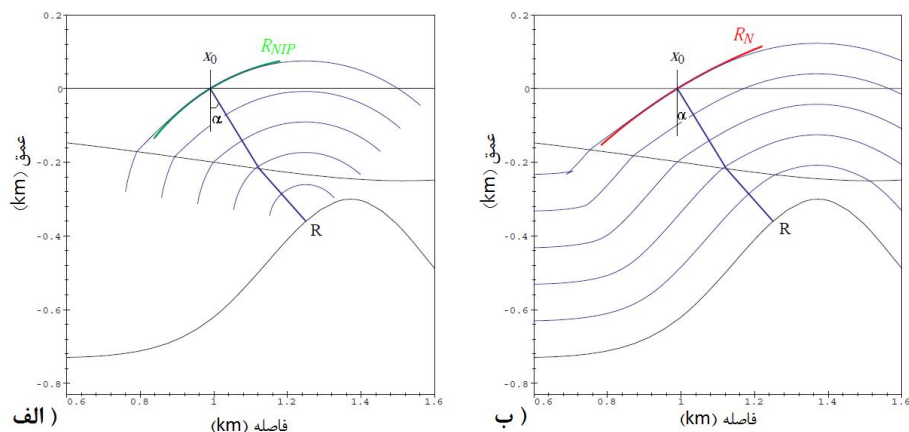


شکل ۲-۴: مقطع دو بعدی موج عمود و پرتوهای عمود مرتبط با آزمایش دورافت صفر. میزان انحنای پرتوی عمود توسط دایره C_N که دارای انحنایی برابر جبهه موج عمود است، در نقطه ایی که $S=G$ است تخمین زده می شود (یگر و همکاران، ۲۰۰۱).



شکل ۲-۵: مقطع دوبعدی موج NIP و پرتوهای غیر اسنلی در آزمایش CMP. شعاع انحنای جبهه موج NIP را می توان توسط دایره C_{NIP} (در حالت سه بعدی به صورت صفحه منحنی) تخمین زد (یگر و همکاران، ۲۰۰۱).

پارامتر R_{NIP} شعاع انحنای جبهه موج NIP و پارامتر R_N شعاع انحنای جبهه موج عمود دریافت شده توسط گیرنده ها در سطح می باشد پارامتر R_N بیانگر میزان تقعر و تحدب سطح مذکور است. در ساختارهای پیچیده تعیین دقیق این دو پارامتر شکل دقیق سطح بازتابی و تصویری درست از این ساختارها را در پی خواهد داشت. در شکل (۲-۶) مفهوم دو موج N و NIP برای یک مدل لایه ای با یکدیگر مقایسه شده است.



شکل ۲-۶: نشانگرهای جنبشی میدان موج برای یک مدل دو لایه‌ای با سرعت v_0 که در آن R_{NIP} شعاع انحنای موج NIP و R_N شعاع انحنای موج نرمال می‌باشد (بایکولوف، ۲۰۰۹).

۲-۴- مفاهیم پایه‌ای روش برانبارش سطح بازتاب مشترک (CRS)

برانبارش CMP که در بخش قبل شرح داده شد، از تقریب مرتبه دوم زمان سیر در مختصات نیم-دورافت به عنوان عملگر برانبارش استفاده می‌کند. مفهوم استفاده از تقریب مرتبه دوم زمان سیر برای برانبارش را می‌توان به حالتی که شامل مختصات نقطه میانی نیز می‌شود، تعمیم داد. عملگر برانبارش برای یک داده‌ی لرزه‌ای دو بعدی از یک خط در دستگاه زمان-نیم دورافت-نقطه میانی به یک سطح سه بعدی در این دستگاه تبدیل می‌شود. سطح مذکور نه تنها در جهت دورافت بلکه در جهت نقطه میانی نیز گسترش یافته است. اگر شبیه برانبارش CMP، از تقریب مرتبه دوم مجذور زمان سیر، حول یک نقطه دورافت صفر (t_0) ، برای توصیف صفحه برانبارش مذکور استفاده شود، می‌توان عملگر برانبارش را به شکل زیر به دست آورد (برای مثال، شلایشر و همکاران^۱، ۱۹۹۳).

$$t^2(x_m, h) = (t_0 + 2p^{(x)}\Delta x)^2 + 2t_0(M_N^{(x)}\Delta x^2 + M_{NIP}^{(x)}h^2) \quad \text{معادله (۲-۷)}$$

¹ Schleicher et al.

که اگر محل آشکار شدن جبهه موج را با x_0 و محل نقطه میانی را با x_m نشان دهیم، آنگاه $\Delta x = x_m - x_0$ می‌باشد. معنای نمادهای $M_N^{(x)}$ و $M_{NIP}^{(x)}$ برای ضرایب مرتبه دوم در معادله (۲-۷) در ادامه این بخش تشریح می‌شود. ارسین^۱ (۱۹۸۲) نشان داد که در محیط‌های ناهمگن، تقریب مرتبه دوم t^2 از تقریب مرتبه دوم t دقیق‌تر است.

مقادیر $p^{(\xi)}$ و $M_N^{(\xi)}$ را می‌توان به عنوان مشتقات اول و دوم مکانی زمان سیر مربوط به جبهه موج ناشی از یک بخش بازتابنده انفجاری که در سطح زمین و در نقطه‌ی x_0 آشکار شده است، دانست (شکل ۲-۶ ب). به علت اینکه تمام پرتوهای مربوط به این موج به طور محلی بر بخش بازتابنده مذکور در زیر سطح زمین عمود هستند، این امواج، به عنوان امواج نرمال شناخته می‌شوند. مقدار $M_{NIP}^{(\xi)}$ را می‌توان به عنوان مشتق دوم زمان سیر مربوط به جبهه‌ی موج ناشی از یک چشمه نقطه‌ای واقع در NIP (شکل ۲-۶ الف)، دانست. موج مذکور به نام موج عمود بر نقطه فرود^۲ یا به اختصار، موج NIP شناخته می‌شود.

به منظور به دست آوردن $M_{NIP}^{(\xi)}$ از مشتق دوم مکانی موج NIP، لازم است قضیه موج NIP (برای مثال، هوبرال، ۱۹۸۳) برقرار باشد. بر اساس این قضیه، حداقل تا تقریب درجه دوم رابطه زمان سیر در مختصات دورافت-نقطه میانی- زمان سیر مربوط به پرتو دورافت صفر در یک CMP با زمان سیر مربوط به پرتوهای دورافت صفر گذرنده از NIP، یکسان هستند.

اگر سرعت نزدیک سطح v_0 در نقطه‌ی x_0 مشخص و بطور محلی ثابت باشد و همچنین ساختارهای زیرسطحی در جهت عمود بر پروفیل لرزه‌ای بدون تغییر باشند، پارامترهای $p^{(\xi)}$ ، $M_N^{(\xi)}$ و $M_{NIP}^{(\xi)}$ در معادله (۲-۷) را می‌توان به طور مستقیم به مقادیری که جبهه موج‌های NIP و نرمال در صفحه قائم توصیف می‌کنند، به صورت زیر ربط داد (دوونک، ۲۰۰۴):

¹ Ursin
² Normal Incidence Point

$$p^{(\xi)} = \frac{\sin \alpha}{v_0}$$

$$M_N^{(\xi)} = \frac{\cos^2 \alpha}{v_0} K_N \quad \text{معادله (۸-۲)}$$

$$M_{NIP}^{(\xi)} = \frac{\cos^2 \alpha}{v_0} K_{NIP}$$

در اینجا، α زاویه ظهور پرتو موج دورافت صفر (نسبت به بردار نرمال بر سطح برداشت) در x_0 است و K_N انحنای جبهه موج مربوط به موج نرمال و K_{NIP} نیز انحنای جبهه موج مربوط به موج NIP در نقطه‌ی x_0 می‌باشد. با وارد کردن رابطه (۸-۲) به معادله (۷-۲) عملگر برانبارش CRS دو بعدی به شکل زیر:

$$t^2(x_m, h) = \left(t_0 + \frac{2 \sin \alpha}{v_0} \Delta x \right)^2 + \frac{2 t_0 \cos^2 \alpha}{v_0} (K_N \Delta x^2 + K_{NIP} h^2) \quad \text{معادله (۹-۲)}$$

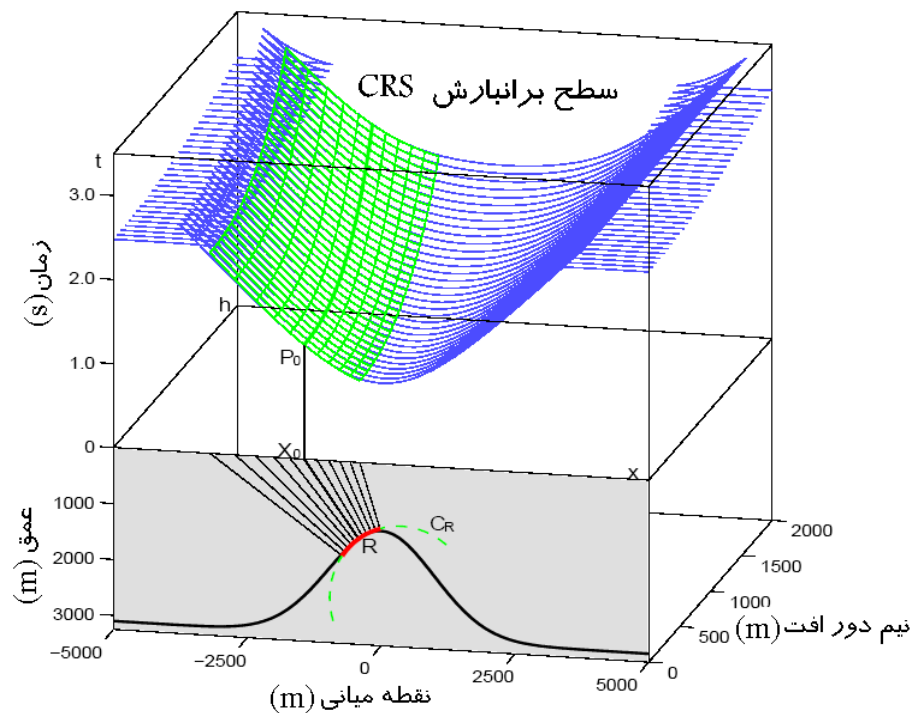
حاصل می‌شود و چنانچه از $K_N = R_N^{-1}$ و $K_{NIP} = R_{NIP}^{-1}$ استفاده شود، رابطه‌ی فوق مشابه معادله ارائه شده توسط من و همکاران (۱۹۹۹) و یگر و همکاران (۲۰۰۱) خواهد شد. در اینجا، R_N و R_{NIP} شعاع انحنای جبهه موج مربوط به موج نرمال و NIP می‌باشند.

همانگونه که در معادله (۹-۲) مشاهده می‌شود عملگر بر انبارش CRS بیانگر یک سطح سه بعدی است که شکل آن با مقادیر مختلف R_N ، R_{NIP} و α تغییر می‌کند. این سطح بر انبارش در شکل (۲-۷) نشان داده شده است.

قسمت پایین شکل (۲-۷)، یک سطح بازتابنده منحنی شکل را نشان می‌دهد و در بالای شکل، منحنی‌های زمان سیر (خطوط آبی رنگ) پرتوهای بازتابیده از این سطح در حوزه مختصات نقطه میانی، نیم دورافت و زمان (t و h و x) نشان داده شده است. منحنی قرمز رنگ بر روی سطح بازتابنده

قسمتی از یک دایره است که انحناى آن، برابر انحناى سطح بازتابنده در آن قسمت بوده و از آن به عنوان سطح انفجار در بر انبارش CRS یاد می‌شود. تمام پرتوهای نشان داده شده بر این بخش قرمز رنگ عمود می‌باشند و زمان سیر آنها بر روی منحنی سبز رنگ نشان داده می‌شود.

نقطه P_0 بر روی منحنی زمان سیر دورافت صفر، مربوط به پرتوی دورافت صفر است که در نقطه X_0 به سطح می‌رسد. همانگونه که در بخش قبل نیز عنوان شد، با افزایش دورافت، این نقطه بر روی منحنی‌های زمان سیر حرکت کرده و روند نقطه بازتاب مشترک¹ را ایجاد می‌کند که در این شکل با خط سبز پیرنگ نشان داده شده است. اما در این حالت تنها با یک پرتو مواجه نمی‌باشیم بلکه تمام پرتوهایی که از سطح قرمز رنگ ساطع می‌شوند، مشابه همین روند را در پرتوهای زمان سیر طی کرده و خود سطحی را ایجاد می‌کنند که با رنگ سبز نشان داده شده است



شکل ۲-۷: قسمت پایین، بازتابنده تاقدیسی شکل در حوزه عمق، قسمت بالا، سطح آبی رنگ منحنی‌های زمان سیر و سطح سبز رنگ نشان دهنده عملگر برانبارش CRS است (بگر و همکاران، ۲۰۰۱).

¹ Common Reflection Point (CRP)

این سطح سبز رنگ، در واقع همان عملگر برانبارش سطح بازتاب مشترک CRS می‌باشد. هر چه انطباق این عملگر با سطح منحنی‌های زمان‌سیر اندازه‌گیری شده بیشتر باشد، در آن صورت عملگر از دقت بیشتری برخوردار بوده و نسبت سیگنال به نوفه در برانبارشی که توسط آن عملگر انجام می‌شود، افزایش خواهد داشت.

۲-۵- روش انجام برانبارش CRS

همانگونه که ذکر شد، در پردازش به روش CRS، برانبارش به جای اینکه در راستای یک منحنی هذلولی انجام بگیرد در راستای مجموعه‌ای از منحنی‌های هذلولی که یک سطح را تشکیل می‌دهند انجام می‌پذیرد که شکل این سطح برانبارش به سه پارامتر به مقادیر R_N ، R_{NIP} و α بستگی دارد. لذا برای انجام برانبارش CRS، ابتدا باید، مقادیر بهینه این سه پارامتر را به گونه‌ای که بهترین همدوسی از برانبارش حاصل شود، تعیین کرد.

در ابتدا این مساله کاملاً ساده به نظر می‌رسد؛ کافی است تمام حالات ممکن برای این سه پارامتر را در نظر گرفت، هر دسته سه تایی از این پارامترها، خود یک سطح برانبارش را در حوزه (x_m, h, t) ایجاد می‌کند. سپس عمل برانبارش را بر روی داده‌های قبل از برانبارش به کمک این صفحه انجام داده و در مرحله بعد آنالیز همدوسی بر روی نتایج صورت می‌گیرد. اکنون هر صفحه‌ای که بیشترین میزان همدوسی را از خود نشان دهد، پارامترهای آن صفحه به عنوان پارامترهای بهینه انتخاب شده و آن صفحه نیز صفحه بهینه عملگر برانبارش CRS می‌باشد. ولی این روش مشکلات زیادی را به همراه دارد. اول اینکه این استراتژی در مورد پیدا کردن پارامتری بهینه، از لحاظ کامپیوتری بسیار زمان بر است. علاوه بر آن مطمئن نمی‌باشیم که نتایج بدست آمده واقعاً بهینه هستند یا خیر. چرا که مقادیر R_N و R_{NIP} بین $-\infty$ و $+\infty$ تغییر می‌کنند. بنابراین این دو پارامتر تنها به بازه مشخص و به صورت جستجو در شبکه‌های با ابعاد مختلف قابل تخمین می‌باشند (من و همکاران، ۱۹۹۹). در این گونه موارد سریع‌ترین و مطمئن‌ترین راه رسیدن به جواب بهینه، پیدا کردن جواب‌های اولیه‌ای است که تا

حد کافی به جواب بهینه کلی نزدیک باشند. در این صورت، مسأله از جستجو برای بهینه کلی، به مسأله جستجو برای بهینه محلی تقلیل پیدا می‌کند. در کنار این کار، می‌توان از معیاری بعنوان حد آستانه نیز استفاده کرد. بنابراین به جای یک جستجوی سه پارامتری در یک گام، معادله CRS به سه بخش تقسیم شده و سه جستجوی تک پارامتری در آن انجام می‌گیرد.

۲-۵-۱- برانبارش خودکار CMP

اولین مرحله از استراتژی مورد نظر، جهت رسیدن به پارامترهای فوق الذکر، تولید مقطع برانبارش شده خودکار CMP می‌باشد. در واقع این مرحله مشابه برانبارش CMP در روش مرسوم پردازش داده‌ها است با این تفاوت که به جای اینکه بهترین سرعت با توجه به بیشترین همدوسی به صورت دستی پیک شود، این عملیات به صورت خودکار به انجام می‌رسد. لذا به این مرحله برانبارش خودکار CMP گویند (من، ۲۰۰۲). این عمل با با قرار دادن مقدار صفر برای Δx در معادله (۲-۹) (یعنی محدود کردن سطح برانبارش CRS به یک CMP) انجام می‌گیرد.

$$t^2(x_m = 0, h) = t_0^2 + \frac{2t_0 \cos^2 \alpha}{v_0} \frac{h^2}{R_{NIP}} \quad \text{معادله (۱۰-۲)}$$

با مقایسه‌ی این معادله با معادله زمان‌سیر در روش برانبارش نقطه میانی مشترک (معادله ۲-۴)، خواهیم داشت:

$$v_{NMO}^2 = \frac{2v_0 R_{NIP}}{t_0 \cos^2 \alpha} \quad \text{معادله (۱۱-۲)}$$

این معادله، رابطه‌ی بین سرعت برون راند نرمال را با نشانگرهای جنبشی میدان موج نشان می‌دهد. از این رابطه در فصل چهارم برای تهیه مدل سرعت اولیه روش توموگرافی استفاده خواهد شد. از معادلات بالا می‌توان دریافت که برانبارش CMP حالت خاصی از برانبارش CRS است که در آن $\Delta x = 0$ می‌باشد و از حداقل تعداد CMP در برانبارش آن استفاده می‌شود.

یکی از مزایای انتخاب دستی سرعت، در روش متداول، حذف پدیده‌های چندگانه، با انتخاب نکردن سرعت آنها می‌باشد. چون چندگانه‌ها سرعتی کمتر یا مساوی وقایع بالایی خود ظاهر می‌شوند، بنابراین با انتخاب نکردن آنها، چندگانه‌ها تضعیف خواهند شد. در الگوریتم برانبارش خودکار CMP این مسئله پیش‌بینی شده و برای جلوگیری از آن، از خطوط راهنمایی استفاده می‌شود که روند افزایش سرعت بر حسب عمق را کنترل کند. در نتیجه انجام این مرحله سه مقطع با عناوین مقطع شبیه سازی شده ZO، مقطع همدوسی و مقطع سرعت V_{NMO} حاصل می‌شود.

۲-۵-۲ - برانبارش مقطع ZO

بعد از بدست آوردن مقطع ZO حاصل از مرحله قبل، در این مرحله از مقطع مذکور استفاده کرده و به جستجوی پارامترهای CRS می‌پردازیم. با قرار دادن $h=0$ رابطه‌ی (۲-۹)، به رابطه‌ای بر حسب α و R_N تبدیل می‌شود.

$$t^2(x_m, 0) = \left(t_0 + \frac{2 \sin \alpha}{v_0} (x_m - x_0) \right)^2 + \frac{2t_0 \cos^2 \alpha}{v_0} \left(\frac{(x_m - x_0)^2}{R_N} \right) \quad \text{معادله (۲-۱۲)}$$

با قرار دادن $R_N = \infty$ یعنی با فرض صاف بودن سطح بازتابنده، رابطه فوق ساده‌تر شده و یک معادله تک پارامتری خواهد شد.

$$t(x_m, 0) = t_0 + \frac{2 \sin \alpha}{v_0} (x_m - x_0) \quad \text{معادله (۲-۱۳)}$$

این رابطه، تنها به زاویه ورودی وابسته می‌باشد. اکنون برای مقطع ZO بدست آمده، زاویه‌های گوناگون را آزمایش کرده و با این جستجوی تک پارامتری زاویه‌ای که بیشترین میزان همدوسی را به دست دهد، به عنوان α اولیه انتخاب می‌شود (یگر و همکاران، ۲۰۰۱).

حال با استفاده از مقطع V_{NMO} حاصل از مرحله اول و قرار دادن α در این مرحله در معادله (۲-۱۱) ، R_{NIP} اولیه بدست می‌آید.

$$R_{NIP} = \frac{V_{NMO}^2 t_0 \cos^2 \alpha}{2V_0} \quad \text{معادله (۲-۱۴)}$$

اکنون دو پارامتر α و R_{NIP} اولیه را در دست داشته و با قرار دادن این دو پارامتر در معادله (۲-۹) و جستجوی تک پارامتری R_N ، به مقادیر اولیه سه نشانگر CRS دست خواهیم یافت.

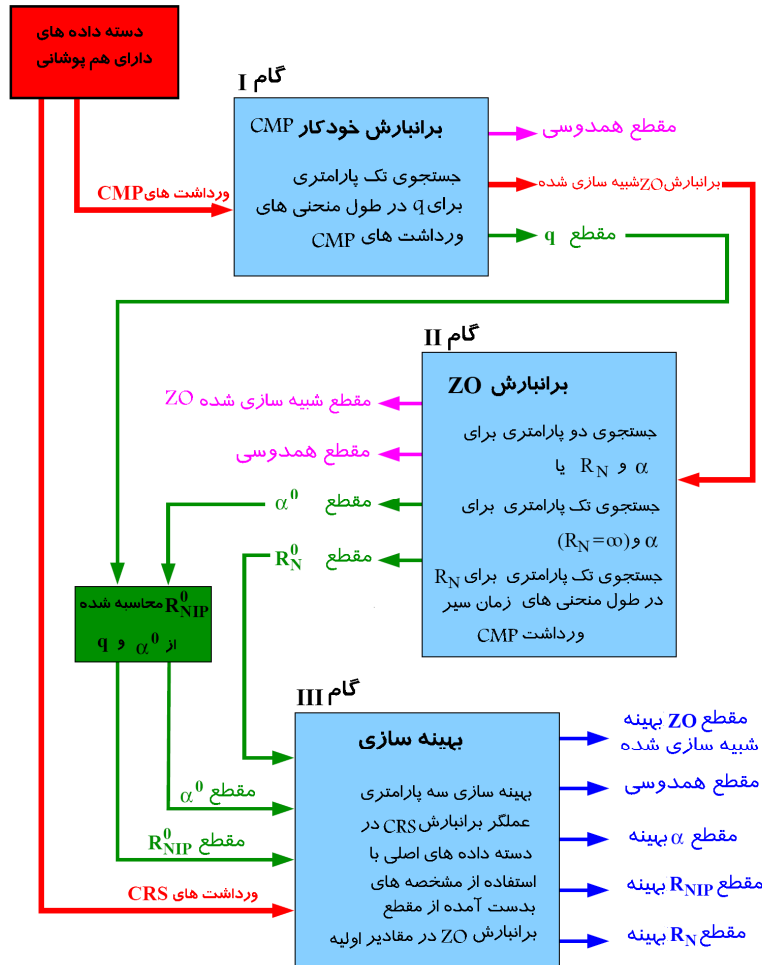
از این مرحله پنج مقطع بدست خواهد آمد که عبارتند از:

مقطع ZO شبیه سازی شده، مقطع همدوسی، مقطع α ، مقطع R_N و مقطع R_{NIP} .

۲-۵-۳ - برانبارش بهینه CRS

در روش حل معادله عملگر برانبارش عنوان شد که یک معادله سه پارامتری به سه معادله تک پارامتری تقسیم می‌شود. لازم به ذکر است که حل سه معادله تک پارامتری، جواب‌ها را با دقت لازمی که از معادله اصلی سه پارامتری بدست خواهد آمد، ارائه نمی‌دهد. با این حال جواب‌های بدست آمده دارای دقت کافی برای استفاده در محاسبات مراحل بعدی می‌باشند (یگر و همکاران، ۲۰۰۱). در این جا فرض بر این است که نشانگرهای تخمین زده شده در نزدیکی محل نشانگرهای واقعی است.

بنابراین در همین جا می‌توان گفت که با انجام یک مرحله بهینه سازی محلی، می‌توان به جواب‌های واقعی بسیار نزدیک شد و اگر فرض ما درست باشد، همان جواب‌هایی را بدست خواهیم آورد که از حل معادله سه پارامتری به آنها می‌رسیم (یگر و همکاران، ۲۰۰۱). برای بهینه سازی از الگوریتم بهینه سازی چند وجهی قابل انعطاف استفاده می‌شود. در انتهای این گام نیز پنج مقطع بدست می‌آید که عبارتند از مقطع برانبارش CRS یا مقطع نهایی شبیه سازی شده ZO، مقطع همدوسی حداکثر، مقطع α بهینه شده، مقطع R_N بهینه شده و مقطع R_{NIP} بهینه شده.



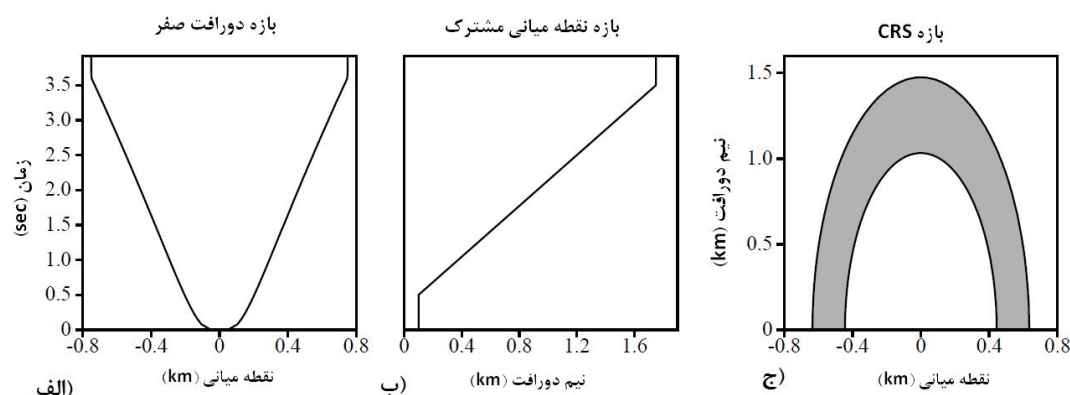
شکل ۲-۸، فلوجارت جستجوی پارامترهای مشخصه عملگر برانبارش CRS، (من، ۱۹۹۹)

۲-۶- بازه^۱ در CRS

عملگر برانبارش CRS تخمین درجه دوم زمان سیر در حوزه نقطه میانی $X_m - X_0$ و دورافت h بوده و این تخمین تنها تا فاصله خاصی از پرتوی مرکزی معتبر می‌باشد. بنابراین در تعیین بازه پردازش این مطلب را باید در نظر داشت، چرا که در غیر این صورت ممکن است محاسبات برای تخمین عملگر برانبارش CRS در محدوده‌ای انجام شود که لحاظ تئوری پرتو معتبر نمی‌باشد (من، ۱۹۹۹) در پردازش CRS، بازه پردازش در دو مرحله به صورت جداگانه در نظر گرفته می‌شود، بدین ترتیب که

¹ Aperture

بازه‌ایی برای مرحله جستجو در ZO و بازه‌ای برای جستجو در CMP به صورت جداگانه در نظر گرفته شده و در نهایت بازه‌ای برای برانبارش CRS تعیین می‌شود. آنالیز همدوسی نسبت به تعداد ردلرزه‌ها در بازه، بسیار حساس بوده و بنابراین بازه CMP در تمام طول پردازش باید یکسان باشد. چگونگی تعیین بازه CMP در شکل (۲-۹) نشان داده شده است. همان گونه که در این شکل دیده می‌شود، بازه ZO به صورت یک منحنی در حوزه نقطه میانی-زمان تعیین می‌شود. در واقع این بازه تعیین کننده اندازه سطح بازتابنده در هر عمق می‌باشد به گونه‌ایی که پرتوی بازتابی از سطح مذکور با تئوری پرتو که پایه و اساس عملگر برانبارش CRS است، قابل توجیه باشد (یگر و همکاران، ۲۰۰۱).



شکل ۲-۹: الف) حداقل بازه دورافت صفر برابر ۵۰ متر و حداکثر آن برابر ۷۵۰ متر قرار داده شده است. ب) در این شکل، بازه CMP توسط نقاط (0.5 s, 0.1 km) و (3.5 s, 1.75 km) تعیین شده است. ج) بازه مکانی CRS که توسط بازه دورافت صفر و CMP در زمان ۳ ثانیه به دست آمده است (من، ۱۹۹۹)

بازه CRS یک سطح بیضوی در حوزه نیم دورافت-نقطه میانی می‌باشد به طوری که یک محور آن توسط بازه CMP و محور دیگر آن توسط بازه ZO تعیین می‌گردد. قطع ناگهانی عملگر برانبارش در مرز بازه باعث رخداد وقایع غیر واقعی در این نواحی خواهد شد. بنابراین استفاده از یک تابع وزن دهنده به نام تابع تعمیم در این مرز باعث حصول نتایجی بهتر خواهد شد.

گفتار سوم

توموگرافی توسط نشانگرهای جنبشی میدان موج

مقدمه

از فرایند برانبارش CRS که در فصل قبل تشریح شد، می‌توان به‌عنوان ابزاری جهت استخراج خودکار اطلاعات زمان‌سیر از داده‌های لرزه‌ای به شکل نشانگرهای جنبشی میدان موج استفاده کرد. اگر زمان‌سیر رخدادهای بازتابی در داده بخوبی توسط روابط مرتبه دوم (۲-۷) تقریب زده شوند، از اطلاعات موجود در این نشانگرها می‌توان برای تهیه مدل سرعت کوچ لرزه‌ای در ساختارهای دارای ناهمگنی جانبی استفاده کرد. در این فصل، درباره روش توموگرافی بر اساس نشانگرهای جنبشی میدان موج بحث خواهد شد. هر چند، استفاده از این نشانگرها جهت تهیه مدل سرعت برای ساختارهای بسیار پیچیده، از اعتبار کمتری برخوردار است، با این حال دارای مزایای عملی زیادی بویژه در مواردی که نسبت سیگنال به نوفه در داده‌ها پایین است، می‌شود. در این قبیل داده‌ها، تشخیص داده‌های بازتابی و مشخص کردن آن‌ها در داده‌های پیش از برانبارش، همان‌طور که در روش‌های مرسوم توموگرافی مورد نیاز است، مشکل و در بعضی موارد غیر ممکن است. از طرف دیگر روابط تقریبی زمان‌سیر مثل معادلات (۲-۷)، امکان انطباق خودکار رخدادهای بازتابی را با تغییر دادن نقطه میانی و دورافت، بین تعداد زیادی ردلرزه فراهم می‌کند. در نتیجه، تشخیص رخدادهای بازتابی و زمان‌سیرشان، حتی در مواردی که نسبت سیگنال به نوفه (S/N) پایین است را ممکن می‌سازد. همچنین، وابستگی زمان‌سیر به دورافت، در نشانگرهای جنبشی میدان موج نیز اعمال می‌شود که این امر باعث کاهش چشم‌گیر تعداد نقاط مشخص شده مورد نیاز برای تهیه نقاط ورودی فرایند توموگرافی می‌شود. فرایند دستچین کردن نقاط را می‌توان بصورت مستقیم روی مقطع برانبارش یافته، با نسبت (S/N) بهبود یافته حاصل از برانبارش CRS، انجام داد.

۳-۱- مدل تغییرات تدریجی سرعت^۱ در برابر مدل سرعت لایه‌ای:

از نکات مهم در هنگام تعیین مدل سرعت برای کوچ عمقی، پارامتری کردن مدل است. پارامتری کردن مدل شامل تعیین پارامترهایی است که بطور کامل مدل مذکور را تعریف کنند. پارامترهایی که یک مدل سرعت را تعریف می‌کنند، به نوع مدل سرعت انتخاب شده بستگی دارند. مطالعات انجام شده توسط جینات و همکاران^۲ (۱۹۸۹) و کلیربوت^۳ (۱۹۸۵) نشان داد که داده‌های لرزه‌ای که در سطح زمین برداشت می‌شوند، حاوی اطلاعات کافی برای تخمین پراکندگی سرعت در زیر سطح زمین نمی‌باشد. یعنی اینکه، در یک برداشت لرزه‌ای، تعداد پارامترهایی که داده‌های برداشت شده (داده‌های مشاهده‌ای) را تعریف می‌کنند، کمتر از تعداد مجهولات آن (در اینجا، نحوه تغییرات سرعت انتشار موج لرزه‌ای در زیر سطح زمین) می‌باشد و اگر قرار باشد این مجهولات به صورت یک مسئله معکوس حل شوند، حالتی بوجود می‌آید که در اصطلاح با آنها، مسائل بد وضع گفته می‌شود. در این قبیل مسائل می‌توان تعداد زیادی جواب (در برخی مواقع بیشمار جواب) برای پارامترهای مجهول بدست آورد و تنها راهکار برای تخمین مدل سرعت، تخمین مدلی است که صرفاً با داده‌ها سازگار باشد. بنابراین، به منظور بدست آوردن یک جواب پایدار برای حل مسئله معکوس، یک سری فرضیات را می‌توان به صورت انتخاب نوع پراکندگی سرعت وارد مسئله کرد. این فرضیات می‌توانند بدین شکل باشند که سرعت در زیر سطح زمین بصورت تدریجی و بر اساس روابطی ساده تغییر می‌کند و یا اینکه سرعت در تعدادی از افق‌های از پیش تعیین شده، ناپیوسته است. بسته به نوع پارامتری کردن مدل، انواع مختلف شرایط و محدودیت‌ها، اعمال می‌شوند که بطور کلی به سه دسته تقسیم بندی می‌شوند (شکل ۳-۱):

¹ Smooth velocity model

² Jeanaut et. al.

³ Claerbout

الف) مدل سرعت بلوکی و یا لایه‌ای^۱؛ که میزان سرعت در هر بلوک و یا هر لایه ثابت است و یا طبق روابط ساده‌ای در جهت افقی یا قائم، تغییر می‌کند. سرعت در مرز بلوک‌ها و یا لایه‌ها ناپیوسته است.

ب) مدل سرعت شبکه‌ای^۲ یا تدریجی؛ این نوع مدل هیچ گونه ناپیوستگی سرعت ندارد. میزان سرعت روی شبکه‌ای متراکم از نقاط در زیر سطح، که بطور تدریجی از یک نقطه به نقطه‌ی دیگر تغییر می‌کند، یا توسط توابع تدریجی در هر نقطه از مدل تعریف می‌شود.

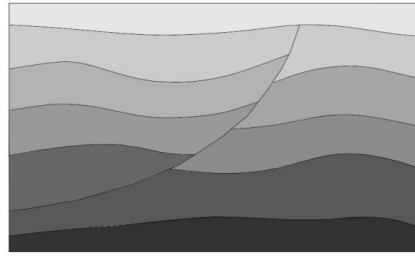
ج) مدل‌های ترکیبی (یا دورگه)^۳ که شامل یک توده با شکل نامنظم و با اختلاف سرعتی بالا در یک زمینه از مدل شبکه‌ای یا نرم قرار دارد.

برای انتخاب مناسب نوع مدل سرعت، چندین فاکتور را باید در نظر داشت. مهم تر از همه، نوع مدل است که باید با محیط زمین شناسی مورد مطالعه هم خوانی داشته باشد. مثلاً در لایه‌های رسوبی با تباین بالای سرعت از یک لایه به لایه‌ی دیگر، مدل لایه‌ای یا بلوکی انتخاب مناسبی است، در حالیکه مدل‌های ترکیبی در مواردی که توده‌های نمکی به داخل لایه‌های رسوبی نفوذ کرده باشند، مناسب تر است. در درجه دوم، انتخاب نوع مدل سرعت، بطور مستقیم به روش برآورد مدل که برای تعیین پارامترهای مدل استفاده می‌شود، مرتبط می‌شود.

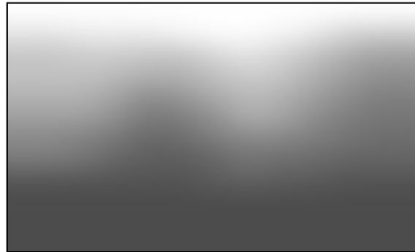
¹ Blocky or Layered

² Grided velocity models

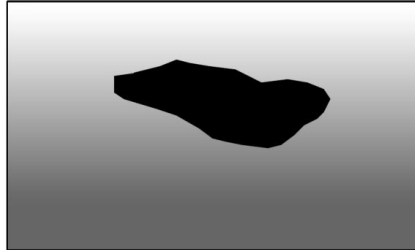
³ Hybrid velocity models



الف)



ب)

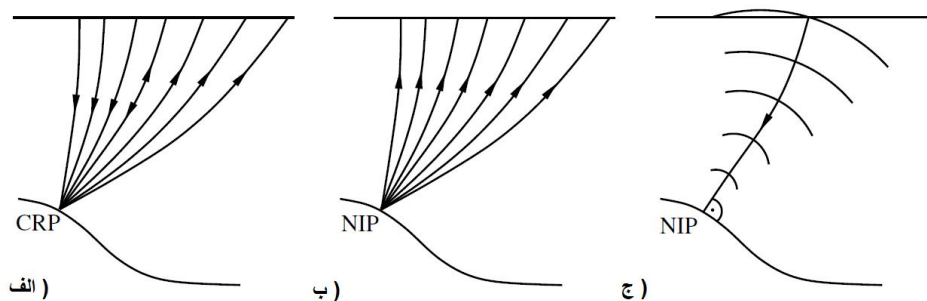


ج)

شکل ۳-۱: انواع مختلف تعریف مدل سرعت که معمولاً برای تصویر سازی عمقی استفاده می‌شود. الف) مدل سرعت بلوکی. ب) مدل سرعت تدریجی یا شبکه‌ای. ج) مدل سرعت ترکیبی (دوونک، ۲۰۰۴). هر روش تخمین سرعت، معمولاً بر پایه‌ی یک نوع مشخص از توصیف مدل، پایه گذاری شده است. برای مثال، در روش‌هایی که از مدل‌های لایه‌ای استفاده می‌کنند، لازم است مرز لایه‌ها در مدل تعریف شوند. در ادامه، فرض می‌شود که شرایط زمین شناسی به گونه‌ای است که تغییرات جانبی سرعت در آن شدید نیست. در چنین شرایطی، استفاده از مدل‌های سرعت نرم یا بلوکی امکان پذیر است. یک نکته مهم که در انتخاب نوع مدل سرعت باید مورد توجه قرار گیرد، اطلاعات موجود در داده‌های لرزه‌ای است. در مدل‌های بلوکی یا لایه‌ای، مرزهای پیوسته مدل باید با رخداد‌های بازتابی در داده‌ی لرزه‌ای هماهنگی داشته باشد. هر چند به دلیل پیچیدگی ساختار بازتابنده‌ها یا بعلا پیچیدگی بودن نسبت سیگنال به نوفه در داده‌های لرزه‌ای، تشخیص رخداد‌های بازتابی که در یک ناحیه وسیعی از مقطع لرزه‌ای پیوسته باشد، مشکل است.

۳-۲- موج NIP و تعیین مدل سرعت کوچ لرزه‌ای

بر اساس اصل سازگاری مدل سرعت با داده‌ی لرزه‌ای در روش‌های آنالیز سرعت مبتنی بر کوچ که در بخش (۱-۳) توصیف شد، می‌توان گفت که در یک مدل سرعت سازگار با داده‌های لرزه‌ای، تمام سیگنال‌های بازتابی مربوط به یک نقطه بازتابی مشترک (CRP) در زیر سطح به یک نقطه کوچ داده می‌شوند. در شکل (۳-۲ الف) تعدادی پرتو که با بازتاب از یک CRP، چشمه و گیرنده را به یکدیگر متصل می‌کنند، نشان داده شده است. از لحاظ هندسی، این امر همانند اینست که یک چشمه‌ی نقطه‌ای در CRP وجود داشته باشد (شکل ۳-۲ ب). این نوع موج در فصل قبل، موج NIP نامیده شد. چرا که CRP مذکور معادل نقطه‌ی فرود موج نرمال (NIP) مربوط به یک پرتو دورافت صفر روی بازتابنده می‌باشد. چنانچه زمان سیر بازتابی در داده‌های لرزه‌ای مربوط به یک CRP با زمان سیر موج NIP تعریف کرد، آنگاه تصویر کردن سیگنال‌های بازتابی مذکور به یک نقطه در مدل، معادل متمرکز شدن انرژی موج NIP در زمان سیر $\tau = 0$ در آن نقطه است (شکل ۳-۲ ج). بنابراین، در یک مدل سرعت سازگار با داده‌ها، تمام امواج NIP، طی فرایند ادامه درونسو در زمان صفر متمرکز می‌شوند. بدین معنی که در یک مدل سرعت کوچ واقعی، سیگنال‌های بازتابی، طی فرایند ادامه درونسو، در زمان صفر متمرکز می‌شود.



شکل ۳-۲: (الف) پرتویی که از یک نقطه بازتاب مشترک (CRP) منعکس شده‌اند. **(ب)** مسیر پرتوهای مربوط به یک موج فرضی ناشی از یک چشمه‌ی نقطه‌ای در NIP. **(ج)** در یک مدل سرعت صحیح، امواج NIP، طی فرایند ادامه درونسو، در زمان صفر و در محل NIP متمرکز می‌شوند (دوونک، ۲۰۰۴).

در فصل دوم نشان داده شد که پارامترهایی که تقریب مرتبه دوم زمان سیر مربوط به جبهه موج NIP را توصیف می‌کنند، می‌توانند از داده‌ی لرزه‌ای با اعمال روش برانبارش CRS تعیین شوند. این پارامترها، نشانگرهای جنبشی میدان موج نامیده شدند. این نشانگرها، جبهه موج NIP فرضی که در سطح آشکار شده است را بر حسب مشتقات اول و دوم زمان سیر- یا چنانچه سرعت نزدیک سطح، معلوم باشد- بر حسب جهت آشکار شدن و میزان انحنای جبهه موج، توصیف می‌کنند. هنگامی که نشانگرهای یک موج NIP و سرعت انتشار موج در نزدیکی سطح زمین حول محل آشکار شدن جبهه موج، مشخص شد آنگاه می‌توان تقریب مرتبه دوم زمان سیر CRP را تعیین کرد (هوخ و همکاران، ۱۹۹۹). هوبرال و کری (۱۹۸۰) از مفهوم متمرکز شدن جبهه موج NIP به چشمه فرضی برای تعیین سرعت بازه‌ای از سرعت برانبارش، استفاده کرده اند. آنها بر اساس این خاصیت موج NIP، الگوریتم‌های نوع دیکس دو بعدی و سه بعدی را برای ساخت مدل‌های دارای لایه‌های هم سرعت که با مرزهای انحنای دار جدا شده اند، ارائه دادند. برای استفاده از الگوریتم‌ها و به منظور ساخت فصل مشترک‌های انحنای دار، سرعت برانبارش و اطلاعات شیب، از رخدادهای بازتابی پیوسته، باید موجود باشد. انحنای جبهه موج NIP با استفاده از رابطه‌ی (۲-۱۱) از سرعت برانبارش محاسبه می‌شود که برای معکوس سازی سه بعدی سرعت برانبارش، مقدار آن تنها در یک آزیموت مورد نیاز است. در حالت یک بعدی، روش ارائه شده توسط هوبرال و کری (۱۹۸۵) به رابطه معکوس سازی دیکس، کاهش می‌یابد.

استفاده از اطلاعات زمان سیر به شکل این نشانگرها باعث ایجاد محدودیت در کاربرد روش NIP توموگرافی، در تخمین مدل سرعت می‌شود. منظور از این محدودیت، کاهش توانایی این روش در ساختن مدل سرعت کوچ در ساختارهای پیچیده است. با این حال، روش مذکور مزایای غیر قابل انکاری مانند دستچین کردن خودکار نقاط داده را دارا می‌باشد. زیرا در این روش عمل دستچین کردن روی مقاطع دورافت صفر که نسبت سیگنال به نوفه بالاتر می‌باشد، انجام می‌شود.

مفهوم تهیه مدل سرعت با استفاده از امواج NIP را می‌توان در مواردی که زمین دارای ناهمگنی تغییرات جانبی سرعت است، نیز تعمیم داد. چون فرایند دستچین کردن نقاط، برای تهیه کردن داده‌های ورودی توموگرافی، روی مقاطع دورافت صفر صورت می‌گیرد در نتیجه می‌توان آنها را مستقل از یکدیگر فرض کرد. این فرض باعث ساده سازی هر چه بیشتر فرایند دستچین کردن نقاط می‌شود. مزیت روش NIP توموگرافی نسبت به سایر روشهای معکوس سازی زمان سیر این است که تهیه مدل سرعت کوچ برای داده‌هایی که نسبت سیگنال به نوفه در آنها پایین است و دنبال کردن یک رخداد بازتابی، بصورت پیوسته، روی آن مشکل است، نیز ممکن می‌باشد. البته در مقاطعی که نسبت سیگنال به نوفه خیلی پایین باشد بطوریکه نتوان مقادیر قابل اعتمادی برای نشانگرها پیدا کرد و یا اینکه چگالی نقاط دستچین شده در طول مقطع پایین باشد، دقت این روش کاهش می‌یابد و یا غیر قابل قبول می‌شود.

۳-۳- فرمول بندی کردن توموگرافی توسط نشانگرهای جنبشی میدان موج:

در این بخش، از نشانگرهای جنبشی میدان موج مربوط به جبهه موج NIP فرضی برای تعیین رابطه فرایند توموگرافی جهت برآورد مدل سرعت تدریجی و همسانگرد، استفاده خواهد شد. در ادامه، این روش برای حالت دو بعدی معرفی خواهد شد.

۳-۳-۱- پارامترهای مشاهده‌ای

موج NIP مربوط به یک نمونه دورافت صفر (t_0, ξ_0) که بر روی یک رخداد بازتابی مشخص شده است، توسط پارامترهای داده مشخص می‌شود. این پارامترها عبارتند از: زمان سیر پرتو نرمال $\tau_0 = t_0/2$ ، مشتق مکانی اول آن (مولفه افقی بردار کندی) که با $p^{(\xi)}$ نشان داده می‌شود و مشتق مکانی دوم زمان سیر که با ماتریس $M_{NIP}^{(\xi)}$ مشخص می‌شود. معمولاً داده‌های مشاهده‌ای (یا پارامترهای داده) را بصورت زیر نشان می‌دهند (دوونک، ۲۰۰۴).

$$\mathbf{d}_{obs} = \left(\tau_0, \underline{M}_{NIP}^{(\xi)}, p^{(\xi)}, \xi_0 \right)_i, \quad i = 1, 2, 3, \dots, n_{data} \quad \text{معادله (۱-۳)}$$

اگر v_0 سرعت نزدیک به سطح زمین باشد، می‌توان این پارامترها را به طور مستقیم از محصولات برانبارش CRS با استفاده از روابط زیر به دست آورد:

$$p = \frac{\sin(\alpha)}{v_0} \quad \text{معادله (۲-۳)}$$

$$M_N = \frac{\cos^2 \alpha}{v_0} \frac{1}{R_N}$$

$$M_{NIP} = \frac{\cos^2 \alpha}{v_0} \frac{1}{R_{NIP}}$$

همانطور که در فصل قبل ذکر شد، α ، زاویه فرود موج NIP نسبت به خط عمود بر سطح زمین می‌باشد و R_N و R_{NIP} به ترتیب، شعاع انحنای موج عمود و موج NIP هستند. این امر با دستچین کردن نمونه‌های دورافت صفر (t_0, X_0) روی رخدادهای بازتابی در مقاطع برانبارش یافته به روش CRS ، و استخراج عناصر $p^{(\xi)}$ و $\underline{M}_{NIP}^{(\xi)}$ از آنها صورت می‌گیرد.

نقاط دستچین شده مستقل از یکدیگر بوده و نیازی به پیوسته بودن رخدادهای بازتابی در بلوک‌های دورافت صفر نیست. یعنی اینکه می‌توان این نقاط را روی رخدادهایی که صرفاً بطور محلی هم‌دوس هستند، دستچین کرد.

یک راه مستقیم برای تهیه یک مدل سرعت تدریجی، انتشار جبهه موج NIP متناظر با هر نقطه داده (۱-۳) به زیر سطح زمین و بررسی متمرکز شدن این جبهه موج پس از زمان τ_0 می‌باشد. متمرکز شدن انرژی جبهه موج بیانگر اینست که شعاع انحنای جبهه موج، R_{NIP} ، در لحظه‌ی $\tau = 0$ ، صفر می‌شود.

جهت اولیه انتشار یک موج NIP متناظر با یک نقطه داده مثل (۳-۱)، توسط مولفه افقی بردار کندی یعنی $p^{(\xi)}$ در محل ξ_0 و همچنین سرعت انتشار موج در نزدیک سطح زمین تعیین می‌شود. و همچنین محلی که اصل متمرکز شدن انرژی موج NIP در آن بررسی می‌شود، با زمان سیر پرتو نرمال τ_0 مشخص می‌شود. هر چند، به علت اینکه مولفه‌های $M_{NIP}^{(\xi)}$ و $p^{(\xi)}$ از طریق آنالیز شباهت از تعداد محدودی ردلرزه در داده‌های لرزه‌ای دارای نوفه تعیین می‌شوند، تمام پارامترهای داده تحت تاثیر نوفه و یا مقدار مشخصی خطا در اندازه‌گیری، قرار می‌گیرند. چون τ_0 از روی یک سیگنال بازتابی با طول محدود روی داده لرزه‌ای، تعیین شده، تحت تاثیر مقداری خطا قرار می‌گیرد. لذا ممکن است τ_0 زمان سیر بازتابی دقیق و صحیح را نشان ندهد. ثابت در نظر گرفتن τ_0 و $p^{(\xi)}$ به معنی چشم پوشی خطاهای اندازه‌گیری از این کمیت‌هاست که ممکن است منجر به ناپایداری فرایند معکوس سازی شود.

در یک مدل سرعت صحیح، تمام پارامترهای داده مربوط به تمام امواج NIP به درستی مدل سازی می‌شوند. درستی پارامترهای به دست آمده از مدل سازی مستقیم را با کمینه سازی اختلاف بین آنها و پارامترهای مشاهده‌ای بررسی می‌کنند. اختلاف مذکور باید به کمتر از یک حد مشخص برسد؛ هدف فرایند معکوس سازی، یافتن چنین مدل بهینه‌ای است.

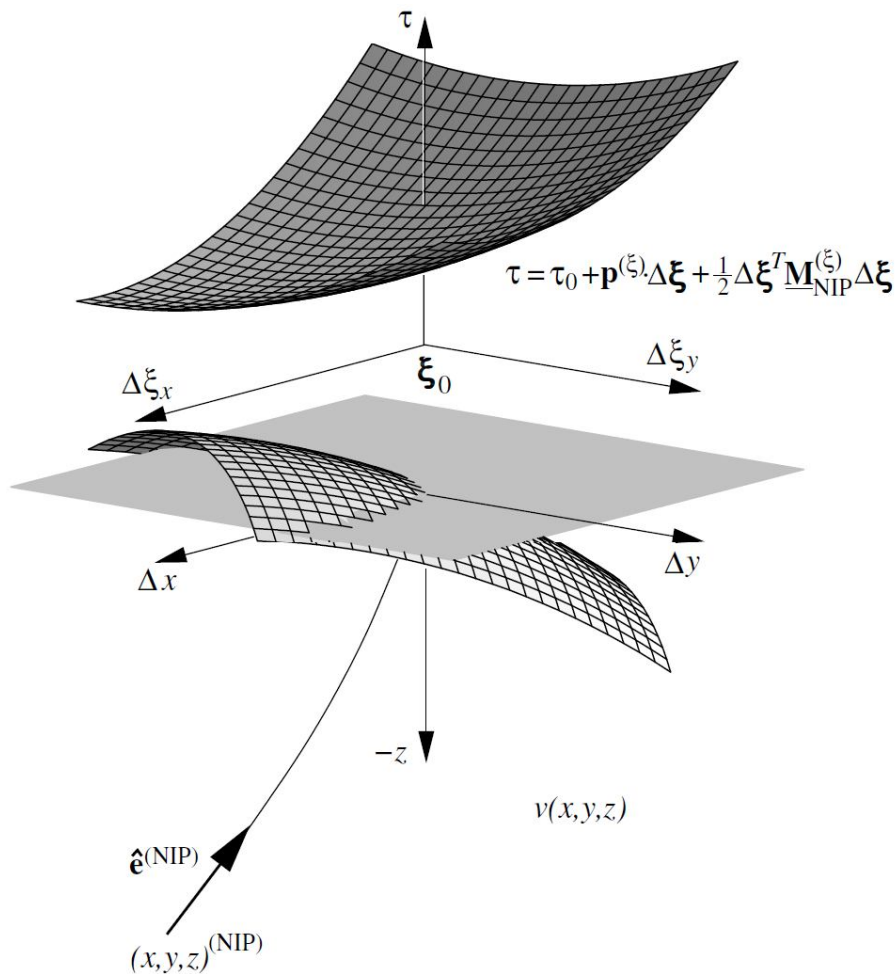
۳-۳-۲ - پارامترهای مدل

موقعیت فضایی NIPها (X, Z) و شیب محلی بازتابنده در محل NIPها، θ ، در ابتدا ناشناخته‌اند. این کمیت‌ها را باید به عنوان پارامترهای اضافی مدل در نظر گرفت که طی فرایند معکوس سازی به همراه نحوه پراکندگی سرعت تعیین می‌شوند. در حالت کلی سه بعدی یک موج NIP در زیر سطح زمین توسط سه پارامتر مربوط به مکان آن و دو پارامتر که شیب محلی بازتابنده را در NIP نشان می‌دهند، مشخص می‌شود. این دو پارامتر را می‌توان به صورت دو مولفه یک بردار یک‌عمود بر بازتابنده در NIP و یا به صورت دو زاویه نشان داد. در این فصل، دستگاه مختصات کارترین را با (X, Y, Z) نشان

داده می‌شود که جهت مثبت محور Z را به سمت بالا، نسبت به سطحی که برداشت داده‌ها روی آن صورت گرفته، در نظر می‌گیریم.

نقاط روی سطح برداشت را با بردار دو مولفه‌ای ξ نشان می‌دهیم. با این طرز نوشتار، کمیت‌هایی که یک NIP را در زیر سطح مشخص می‌کنند به صورت زیر می‌نویسیم:

$$(x, y, z, e_x, e_y)^{(NIP)} \quad \text{معادله (۳-۳)}$$



شکل ۳-۳: تعریف پارامترهای مدل و داده در NIP توموگرافی (دوونک، ۲۰۰۴).

که $x^{(NIP)}$ ، $y^{(NIP)}$ و $z^{(NIP)}$ مختصات فضایی NIP و $e_x^{(NIP)}$ و $e_y^{(NIP)}$ مولفه‌های افقی بردار یکه $\hat{e}_x^{(NIP)}$ هستند که این بردار به طور محلی بر بازتابنده عمود است. باید در نظر داشت که $z^{(NIP)} < 0$ می‌باشد چون تمام NIP ها در زیر سطح اندازه‌گیری قرار دارند. برای تعریف مدل سرعت تدریجی از مفهوم بی‌اسپلین‌ها (دی بور، ۱۹۸۷) استفاده می‌شود. با استفاده از این توابع، اگر یک شبکه سه بعدی تعریف کنیم که محل گره‌های این شبکه مذکور، در جهت‌های مختلف، مطلقاً افزایشی باشد، مدل سرعت را می‌توان به کمک بی‌اسپلین‌ها به صورت زیر نوشت:

$$v(x, z) = \sum_{j=1}^{n_x} \sum_{k=1}^{n_y} \sum_{l=1}^{n_z} v_{jkl} \beta_j(x) \beta_k(y) \beta_l(-z) \quad \text{معادله (۴-۳)}$$

که $\beta_j(x)$ ، $\beta_k(y)$ و $\beta_l(-z)$ توابع پایه‌ای بی‌اسپلین از درجه m و ضرایب v_{jkl} بی‌اسپلین می‌باشند. علامت منفی در این رابطه برای تاکید این امر که جهت مثبت z به سمت بالا است، معرفی شده است.

طی فرایند توموگرافی که در ادامه این فصل شرح داده می‌شود، در هر مرحله برای انجام مدل سازی مستقیم نیاز به کاربرد تکنیک دنبال کردن پرتو داریم، که شرط اعمال این روش وجود یک مدل سرعت تدریجی است. این خصوصیات باعث شده تا از بی‌اسپلین‌ها برای تعریف مدل سرعت در توموگرافی استفاده شود. مدل سرعت لرزه‌ای مطلوب، مدلی است که با کمترین تعداد پارامتر از فرایند معکوس سازی به دست آمده باشد. در این فصل حالت دو بعدی روش NIP توموگرافی بحث می‌شود که برای انجام این امر مدل سرعت باید تا مرتبه ۳ مشتق پذیر و پیوسته باشد. از این رو بی‌اسپلین‌های درجه ۴ برای این حالت استفاده خواهد شد، در حالیکه برای توموگرافی یک بعدی، مدل سرعت با بی‌اسپلین‌های مکعبی ($m=3$) تعریف می‌شوند. در نتیجه، برای حالت دو بعدی می‌توان پارامترهای مدل را به صورت زیر نوشت:

$$m = \left[[x, z, \theta_{NIP}]_{i=1}^N, [v_{i,j}]_{i,j=1,1}^{n_x, n_z} \right] \quad \text{معادله (۳-۵)}$$

۳-۳-۳- مدل سازی مستقیم

مسئله‌ی تخمین مدل سرعت صحیح، به شکل یک مسئله معکوس حل می‌شود (تارانتولا، ۱۹۸۷). برای حل یک مسئله معکوس، ابتدا باید، با استفاده از یک مدل اولیه، پارامترهای مشاهده‌ای (یا پارامترهای داده) را مدل‌سازی کرد. سپس با استفاده از اختلاف بین مقادیر مدل‌سازی شده و مقادیر مشاهده‌ای، یک بردار به نام بردار به روز رسانی مدل به دست می‌آید. با اعمال بردار مذکور روی مدل اولیه، مدل جدید با پارامترهای جدید به وجود می‌آید. این فرایند تا زمانی که اختلاف بین پارامترهای مشاهده‌ای و پارامترهای مدل‌سازی شده به کمتر از یک حد مشخص برسد، ادامه دارد. و زمانی که اختلاف مذکور به یک مقدار کمینه برسد، مدل سرعت نهایی حاصل می‌شود.

فرایند مدل‌سازی پارامترهای مشاهده‌ای، با استفاده از روش دنبال کردن پرتو^۱ صورت می‌گیرد. روش مذکور شامل حل یک دسته معادلات دیفرانسیل می‌باشد. با حل این معادلات، می‌توان پارامترهای (۳-۱) را مدل‌سازی کرد (برای مثال: دوونک، ۲۰۰۴ و چرونی، ۲۰۰۱).

۳-۳-۴- مسئله معکوس :

با استفاده از پارامترهای داده و مدل که در بخش‌های قبل تعریف شد، می‌توان مسئله معکوس را فرمول بندی کرد. که برای حالت کلی ۳ بعدی، به صورت زیر است:

با در دست داشتن تعداد n_{data} نقطه داده:

^۱ Ray tracing

$$\left(\tau_0, \mathbf{M}_{NIP}^{(\xi)}, \mathbf{p}^{(\xi)}, \xi_0 \right)_i^{obs}, \quad i = 1, \dots, n_{data} \quad \text{معادله (۶-۳)}$$

این پارامترها را می‌توان از نتایج روش برآیند CRS به دست آورد، سپس یک مدل از ساختار زمین شناسی زیر سطحی که با پارامترهای زیر مشخص می‌شود، تعریف می‌کنیم:

$$\left(x, y, z, e_x, e_y \right)_i^{(NIP)} \quad i = 1, \dots, n_{data} \quad \text{معادله (۷-۳)}$$

$$v_{jkl} \quad j = 1, \dots, n_x, \quad k = 1, \dots, n_y, \quad l = 1, \dots, n_z,$$

آنگاه، با استفاده از مدل سازی مستقیم، سعی می‌شود پارامترهای مشاهده‌ای را از مدل جاری به دست آورد. پارامترهای مدل سازی شده را به صورت زیر نشان می‌دهیم:

$$\left(\tau_0, \mathbf{M}_{NIP}^{(\xi)}, \mathbf{p}^{(\xi)}, \xi_0 \right)_i^{mod}, \quad i = 1, \dots, n_{data} \quad \text{معادله (۸-۳)}$$

در مرحله بعد، باید تفاوت میان این پارامترها و پارامترهای مشاهده‌ای (۶-۳) کمینه شوند. هدف از کمینه سازی این تفاوت، بهبود پارامترهای مدل می‌باشد. در یک مدل سرعت بهینه، تفاوت میان پارامترهای مدل سازی شده (۸-۳) و پارامترهای مشاهده‌ای (۶-۳) به کمتر از یک حد مشخص می‌رسند. این حد توسط نسبت سیگنال به نوفه در داده‌های لرزه‌ای، الگوریتم مورد استفاده برای حل مسئله معکوس و سایر محدودیت‌ها که در ادامه به آنها اشاره خواهد شد، کنترل می‌شود.

۳-۴ - حل مسئله معکوس

اگر پارامترهای مشاهده‌ای (۶-۳) و پارامترهای مدل (۷-۳)، به ترتیب به صورت بردار داده \mathbf{d} و بردار مدل \mathbf{m} بازنویسی شوند، مسئله معکوس تعیین شده در بخش قبلی را می‌توان به صورت زیر بیان کرد:

طی فرایند معکوس سازی یک بردار مدل \mathbf{m} تعیین می‌شود، به طوریکه اختلاف بین پارامترهای مشاهده‌ای و داده‌های مدل‌سازی شده، $\mathbf{d}_{\text{mod}} = \mathbf{f}(\mathbf{m})$ ، را به یک مقدار کمینه برساند. عملگر غیرخطی \mathbf{f} معرف مدل‌سازی مستقیم با تکنیک دنبال کردن پرتو، جهت به دست آوردن مقادیر (۳-۸) می‌باشد. در روش NIP توموگرافی، برای اندازه‌گیری میزان اختلاف بین پارامترهای مشاهده‌ای و مدل‌سازی شده از نرم حداقل مربعات یا نرم L_2 وزن‌دهی شده (تارانتولا، ۱۹۸۷) استفاده می‌شود که به صورت معادله زیر فرموله می‌شود. و مدل بهینه، با کمینه سازی اختلاف مذکور به دست می‌آید:

$$S(\mathbf{m}) = \frac{1}{2} \|\mathbf{d} - \mathbf{f}(\mathbf{m})\|_D^2 = \frac{1}{2} \|\Delta \mathbf{d}(\mathbf{m})\|_D^2 = \frac{1}{2} \Delta \mathbf{d}^T(\mathbf{m}) \underline{C}_D^{-1} \Delta \mathbf{d}(\mathbf{m}) \quad \text{معادله (۳-۹)}$$

که در آن $\Delta \mathbf{d}(\mathbf{m}) = \mathbf{d} - \mathbf{f}(\mathbf{m})$ و \underline{C}_D یک ماتریس متقارن مثبت است که عناصر آن ضرایب وزنی پارامترهای مختلف داده در هنگام محاسبه S می‌باشند. ماتریس \underline{C}_D به عنوان ماتریس کوواریانس داده تعبیر می‌شود (تارانتولا، ۱۹۸۷) که عناصر قطری آن $(C_D)_{ii} = \sigma_i^2$ ، واریانس پارامترهای مشاهده‌ای و عناصر غیر قطری نیز همبستگی خطا در داده‌ها (نحوه تغییرات میزان خطا در داده‌های مختلف) را نشان می‌دهند.

به علت غیر خطی بودن عملگر مدل‌سازی مستقیم \mathbf{f} (یعنی وابستگی غیرخطی نتایج دنبال کردن دینامیکی پرتو به پارامترهای مدل)، تابع هدف (۳-۹) نیز غیر خطی است و برای حل آن نیاز به استفاده از روش‌های بهینه‌سازی غیرخطی (به عنوان مثال، سن و استوفا^۱، ۱۹۵۵) می‌باشد. اما این روش‌ها از نظر محاسباتی بسیار زمان‌بر و نیازمند سخت افزارهای قوی هستند. بنابراین، برای حل مسئله معکوس فوق، از روش‌های مبتنی بر تکرار استفاده می‌شود. در این قبیل روش‌ها، مسئله معکوس طی هر تکرار، به‌طور محلی خطی سازی می‌شود. این امر مستلزم محاسبه‌ی گرادیان تابع هدف نسبت به پارامترهای مدل، که تحت عنوان مشتقات فریسه^۲ شناخته می‌شوند، می‌باشد. نحوه محاسبه مشتقات فریسه به طور کامل توسط دوونک (۲۰۰۴) توضیح داده شده است. محاسبه‌ی این

¹ Sen and Stoffa

² Frechet derivatives

مشتقات نیازمند تعریف مدل سرعت تدریجی دارای مشتقات تا مرتبه سوم پیوسته، می باشد. بنابراین در روش NIP توموگرافی از توابع بی اسپلاین درجه ۴ برای تعریف مدل سرعت استفاده می شود.

۳-۴-۱- حل مسئله معکوس به روش حداقل مربعات

یک شرط ضروری برای اینکه تابع هزینه S ، معادله (۳-۹)، یک مینیمم داشته باشد اینست که مشتق اول آن نسبت به پارامترهای مدل صفر شود.

$$\nabla_m S = 0 \quad \text{معادله (۳-۱۰)}$$

اگر مشتقات پارامترهای مشاهده‌ای نسبت به پارامترهای مدل با $\underline{\mathbf{F}}$ نشان داده شوند، آنگاه گرادیان تابع هدف، S ، نسبت به بردار مدل \mathbf{m} به صورت زیر است (تارنتولا، ۱۹۸۷):

$$\begin{aligned} \nabla_m S &= -\underline{\mathbf{F}}^T \underline{\mathbf{C}}_D^{-1} \Delta \mathbf{d}(\mathbf{m}) \quad \text{معادله (۳-۱۱)} \\ &= -\underline{\mathbf{F}}^T \underline{\mathbf{C}}_D^{-1} (\mathbf{d} - \mathbf{f}(\mathbf{m})) = -\underline{\mathbf{F}}^T \underline{\mathbf{C}}_D^{-1} (\Delta \mathbf{d}(\mathbf{m}_n) - \underline{\mathbf{F}} \Delta \mathbf{m}) \end{aligned}$$

با قرار دادن $\nabla_m S$ برابر با صفر رابطه زیر بدست می آید.

$$\underline{\mathbf{F}}^T \underline{\mathbf{C}}_D^{-1} \underline{\mathbf{F}} \Delta \mathbf{m} = \underline{\mathbf{F}}^T \underline{\mathbf{C}}_D^{-1} \Delta \mathbf{d}(\mathbf{m}_n) \quad \text{معادله (۳-۱۲)}$$

که با ساده سازی بیشتر خواهیم داشت:

$$\underline{\mathbf{C}}_D^{-1/2} \underline{\mathbf{F}} \Delta \mathbf{m} = \underline{\mathbf{C}}_D^{-1/2} \Delta \mathbf{d}(\mathbf{m}_n) \quad \text{معادله (۳-۱۳)}$$

معادله اخیر را به شرطی که معکوس $\underline{\mathbf{F}}^T \underline{\mathbf{C}}_D^{-1} \underline{\mathbf{F}}$ وجود داشته باشد، می توان برای $(\Delta \mathbf{m})$ حل کرد. برای حل معادله (۳-۱۳)، الگوریتم‌های محاسباتی متعددی وجود دارد، اما دوونک (۲۰۰۴) روش حداقل مربعات را به عنوان کارآمدترین روش معرفی کرده است. مشکل جایی ظهور پیدا می کند که $\underline{\mathbf{F}}^T \underline{\mathbf{C}}_D^{-1} \underline{\mathbf{F}}$ یک نقطه تکین داشته باشد و یا معکوس آن را نتوان محاسبه کرد. این بدان معنی است که سیستم معادلات (۳-۱۳) حاوی اطلاعات کافی برای تعیین دقیق تمام پارامترهای مدل نیست. این

وضع در مسأله توموگرافی به دفعات اتفاق می‌افتد. همانگونه که بحث شد در این حالات برای حل مسأله، نیاز به معرفی شرایط مرزی می‌باشد.

۳-۴-۲ - منظم سازی^۱ مدل

داده‌های موجود برای تعیین جواب یکتا برای تمام پارامترهای مدل، کافی نیستند. یعنی، تعداد پارامترهایی که مدل را تعریف می‌کنند بیشتر از تعداد پارامترهایی است که داده‌های مشاهده‌ای را تعریف می‌کنند. به چنین مسائلی، مسائل بد وضع^۲ گفته می‌شود. راه حل این مشکل، تعریف یک سری محدودیت‌ها روی مدل است. یک روش معمول برای وارد کردن محدودیت‌ها به مدل برای منظم کردن آن اینست که بردار مدل (یا بردار به روز رسانی مدل) حداقل طول را داشته باشد (تارانتولا، ۱۹۸۷). این امر با اضافه کردن یک عبارت اضافی به تابع هزینه صورت می‌گیرد؛ این عبارت اضافی شامل مجذور نرم L_2 بردار مدل ضربدر یک فاکتور میراکننده می‌باشد. اضافه کردن این عبارت اضافی به تابع هزینه، فاکتور میراکننده مذکور را به تمام عناصر قطری ماتریس $\underline{F}^T \underline{C}_D^{-1} \underline{F}$ اضافه می‌کند. از این رو، معکوس پذیری این ماتریس را تضمین می‌کند (منک، ۱۹۸۴). این روش به عنوان روش مارکوآرت-لونبرگ^۳ یا روش حداقل مربعات میرا شده شناخته می‌شود.

با این حال، در روشی که در اینجا بحث می‌شود یک روش ملموس تر برای محدود کردن پارامترهای مدل، استفاده می‌شود. اساس روش مذکور، کمینه سازی مشتق دوم مدل سرعت می‌باشد. مشتق دوم مدل سرعت، میزان انحنای جبهه موج و در نتیجه ناهموازی مدل سرعت را به دست می‌دهد. و به دلیل اینکه طی حل مسأله معکوس، ساده ترین یا نرم ترین مدل بدست می‌آید، کمینه کردن آنها، یک محدودیت منطقی می‌باشد. برای اعمال محدودیت مذکور بر مدل سرعت، یک عبارت که فقط شامل پارامترهای مدل سرعت v_{jkl} است، به تابع هزینه اضافه می‌شود. اگر آن قسمت از بردار مدل که شامل این پارامترها می‌شود را با $\mathbf{m}^{(v)}$ نشان دهیم، خواهیم داشت:

¹ Regularization

² Ill-posed

³ Marquart-Levenberg

$$\mathbf{m} = \begin{pmatrix} m^{(NIP)} \\ m^{(v)} \end{pmatrix} \quad \text{معادله (۱۴-۳)}$$

در نتیجه تابع هزینه با عبارات محدود کننده و منظم کننده به صورت زیر تبدیل می‌شود.

$$S(m) = \frac{1}{2} \Delta d^T(m) \underline{C}_D^{-1} \Delta d(m) + \frac{1}{2} \varepsilon'' m^{(v)T} \underline{D}'' m^{(v)} \quad \text{معادله (۱۵-۳)}$$

در این معادله، $m^{(v)T} \underline{D}'' m^{(v)}$ شامل میزان انحنای مدل سرعت می‌باشد. ضریب وزنی ε'' نیز برای متعادل کردن میزان اثر عبارت خطای داده‌ها، $\Delta d(m)$ ، و عبارت منظم ساز \underline{D}'' روی تابع هدف (۳-۱۵) به معادله فوق اضافه شده است (جزئیات بیشتر در دوونک، ۲۰۰۴).

علاوه بر محدودیت مشتقات دوم کمینه شده‌ی مدل سرعت، محدودیت‌های دیگری نیز باید جهت کاهش ابهامات مسئله معکوس، بر روی مدل سرعت اعمال شود. یک راهکار برای پایداری هرچه بیشتر مسئله معکوس، تهیه داده‌های اضافی است. این داده‌ها می‌توانند به صورت یک مدل اولیه قابل اطمینان باشند که در طی حل مسئله معکوس و در هر تکرار، این مدل بهبود یابد. در این پایان نامه، سعی می‌شود با فراهم کردن داده‌های اضافی به صورت یک مدل سرعت اولیه، علاوه بر پایدار کردن فرایند توموگرافی و صرفه جویی در زمان، قابل اعتمادترین مدل سرعت نهایی را به دست آوریم. چنانچه سرعت واقعی زیر سطح زمین مشخص باشد و یا بتوان در محل‌های مشخصی مقدار آن را تخمین زد، این اطلاعات در فرایند توموگرافی قابل استفاده است. این قبیل اطلاعات را می‌توان یا از طریق اندازه گیری مستقیم سرعت، مثلاً از محل گمانه‌ها یا پیمایش‌های لرزه‌ای شکسته مرزی، و یا از اطلاعات اولیه زمین شناسی بدست آورد و از آنها به عنوان یک قید یا شرط برای حل مسئله معکوس استفاده کرد.

یک نوع دیگر از محدودیت بر مدل سرعت از این فرض ناشی می‌شود که ساختار سرعت باید به طور محلی از ساختار بازتابنده، تبعیت کند. به عبارت دیگر، تغییرات سرعت باید اساساً در جهت عمود بر

بازتابنده رخ دهد. نحوه تعریف این نوع محدودیت، به صورت مفصل توسط دوونک (۲۰۰۴) بحث شده است.

۳-۵- الگوریتم روش NIP توموگرافی

در بخش قبل، مباحث ضروری جهت انجام توموگرافی با استفاده از نشانگرهای جنبشی میدان موج ارائه شد. در ادامه، از ترکیب این بحث‌ها، روندی کلی از فرایند معکوس سازی که برای حالات یک بعدی و دوبعدی معتبر است، را تشریح می‌کند. جنبه‌های مختلف معکوس سازی برای حالات یک و دو بعدی در بخش‌های (۴-۱) و (۴-۲) بحث خواهد شد. در اینجا، فرض بر اینست که پارامترهای داده مربوط به هر حالت از داده لرزه‌ای استخراج شده و آماده استفاده برای فرایند معکوس سازی است.

روند کلی الگوریتم به صورت زیر است:

۱. تهیه یک مدل سرعت اولیه با انتخاب مقادیر بامعنی و به عناصر ماتریس $m^{(v)}$ ضرایب وزنی داده‌ها (عناصر قطری ماتریس C_D) و محدودیت‌های اضافی نیز باید مشخص شوند.
۲. برای هر نقطه داده، یک پرتو به سمت عمق دنبال می‌شود تا زمانی که زمان سیر مربوط به آن نقطه داده به طور کامل مصرف شود. نقطه شروع هر پرتو در سطح زمین ($z=0$) و جهت اولیه آن توسط پارامترهای مربوط به آن تعیین می‌شود. نقطه پایانی پرتو نیز در زیر سطح با $\tau_0 = 0$ تعریف می‌شود. بردار کندی پرتو در NIP، نشان دهنده‌ی بردار نرمال بر بازتابنده در NIP است. با این اطلاعات، می‌توان بردار مدل اولیه NIP، یعنی $m^{(NIP)}$ را تشکیل داد.
۳. مدل سازی مستقیم با استفاده از روش دنبال کردن پرتو در جهت بالاسو انجام می‌شود. هدف انجام این کار به دست آوردن عناصر ماتریس d_{mod} است. و به طور همزمان عناصر ماتریس

\underline{F} (مشتقات فرشه) محاسبه می‌شوند. این امر نیز با استفاده از تئوری اختلال پرتو در طول پرتو نرمال، انجام می‌پذیرد.

۴. محاسبه تابع هزینه (معادله ۳-۱۵) از محاسبه اختلاف d و d_{mod} .
 ۵. سیستم معادلات خطی (۳-۱۳) تشکیل می‌شود و به طریق حداقل مربعات حل می‌شوند و در نهایت بردار به‌روز رسانی مدل Δm حاصل می‌شود.
 ۶. بردار Δm در یک ضریب $1 < \lambda$ ضرب شده و به مدل جاری اضافه می‌شود. سپس، مجدداً مدل سازی مستقیم (با استفاده از روش دنبال کردن پرتو) روی این مدل به‌روز شده انجام می‌شود و پارامترهای داده جدیدی را به وجود می‌آورد. ضریب میرا کننده λ برای کمک به همگرا شدن مدل در این مرحله وارد شده است.
 ۷. تابع هزینه از طریق محاسبه اختلاف d و d_{mod} جدید، محاسبه می‌شود.
 ۸. چنانچه تابع هزینه افزایش یابد، مدل به‌روز شده رد می‌شود و مقدار λ کاهش می‌یابد. سپس مراحل ۶ و ۷ تا زمانی که تابع هزینه کاهش یابد و یا اینکه مقدار λ کمتر از یک حد مشخص شود، تکرار می‌شوند. اگر تابع هزینه کاهش نیافت (حتی برای مقادیر کوچک λ)، نتیجه می‌شود که یک مقدار کمینه برای تابع هزینه به دست آمده است.
 ۹. اگر تابع هزینه کاهش یابد، مدل به‌روز شده قبول می‌شود و ضرایب وزنی برای منظم کردن مدل، ϵ'' ، کاهش می‌یابد و تکرار بعدی روی مدل جدید، با برگشتن به مرحله ۳، شروع می‌شود. روند توموگرافی، زمانی که به حداکثر تعداد تکرار برسد و یا اینکه مقدار تابع هزینه کمتر از یک حد مشخص شود، قطع می‌شود.
- به جز مرحله یک، تمام مراحل توصیف شده، بدون دخالت زیاد انسان و به صورت خودکار صورت می‌گیرد.

گفتار چهارم

مثال داده‌های لرزه‌ای مصنوعی

مقدمه

در فصل قبل، مفهوم کلی تخمین مدل سرعت با استفاده از نشانگرهای جنبشی میدان موج معرفی شد و بر اساس این مفهوم، یک الگوریتم توموگرافی برای تعیین مدل سرعت تدریجی در حالت دو بعدی فرمول بندی شد. همچنین، تا اندازه‌ای درباره اهمیت مدل سرعت اولیه بحث شد. در این فصل، ابتدا به معرفی پارامترهای مدل و داده‌ها برای حالت‌های یک و دو بعدی می‌پردازیم. سپس روند توموگرافی روی یک مدل یک بعدی اعمال می‌شود. و در بخش بعدی، یک مدل ساختاری زمین شناسی تولید می‌شود و روی مدل مذکور، برداشت داده‌های لرزه‌ای انجام می‌شود. پس از آن، روابط مختلفی که برای تهیه مدل سرعت اولیه استفاده می‌شوند، معرفی خواهد شد و اثر هر کدام از این روابط روی مدل سرعت نهایی، بررسی می‌شود.

۴-۱- توموگرافی یک بعدی

اگر توزیع سرعت در زیر سطح بطور جانبی ثابت باشد و بازتابنده‌ها را افقی در نظر بگیریم، مسئله تعیین سرعت در زیر سطح زمین به طور قابل توجهی ساده سازی می‌شود. این شرایط را حالت یک بعدی می‌نامند. برای تهیه مدل سرعت در این حالت کافی است، رابطه معکوس سازی دیکس (۱۹۹۶) را به کار برد.

۴-۱-۱- پارامترهای داده و مدل

در حالت یک بعدی، بردار کندی یک پرتو نرمال، مؤلفه افقی ندارد همچنین زمان سیرهای اندازه گیری شده مستقل از محل آشکار شدن این موج در سطح است. بنابراین، در حالت یک بعدی، هر موج NIP را می‌توان با دو پارامتر تعریف کرد. یعنی در حالت یک بعدی هر نقطه داده شامل دو پارامتر است لذا، تعداد نقاط ورودی برای انجام فرایند معکوس سازی $2 \times n_{data}$ می‌باشد.

$$(\tau_0, M_{NIP})_i \quad i = 1, \dots, n_{data} \quad \text{معادله (۱-۴)}$$

و می‌توان از یک برداشت نقطه میانی مشترک و با استفاده از معادله (۴-۲) رابطه‌ی زیر را استخراج کرد (دوونک، ۲۰۰۴):

$$t^2 = t_0^2 + 2t_0 M_{NIP} h^2 \quad \text{معادله (۲-۴)}$$

محل یک NIP در زیر سطح زمین مربوط به یک نقطه داده به طور کامل با عمق آن نقطه یا با مؤلفه‌ی قائم آن، $Z^{NIP} < 0$ مشخص می‌شود. تابع سرعت یک بعدی، $v(z)$ ، نیز با استفاده از ضرایب بی‌اسپلین به صورت زیر نوشته می‌شود (دوونک، ۲۰۰۴):

$$v(z) = \sum_{k=1}^{n_z} v_k \beta_k(-z) \quad \text{معادله (۳-۴)}$$

که در رابطه بالا $\beta_k(-z)$ تابع بی‌اسپلین از درجه $m=3$ (بی‌اسپلین مکعبی) می‌باشد. علامت منفی برای بیان این حقیقت که جهت مثبت Z به سمت بالا است، در رابطه فوق منظور شده است. پارامترهای مدل که باید طی فرایند معکوس‌سازی تعیین شوند عبارتند از:

$$z_i^{(NIP)} \quad i = 1, \dots, n_{data} \quad \text{معادله (۴-۴)}$$

$$v_k \quad k = 1, \dots, n_z$$

لذا، تعداد کل پارامترهای داده برابر $2 \times n_{data}$ و تعداد کل پارامترهای مدل برابر $n_{data} + n_z$ می‌باشد.

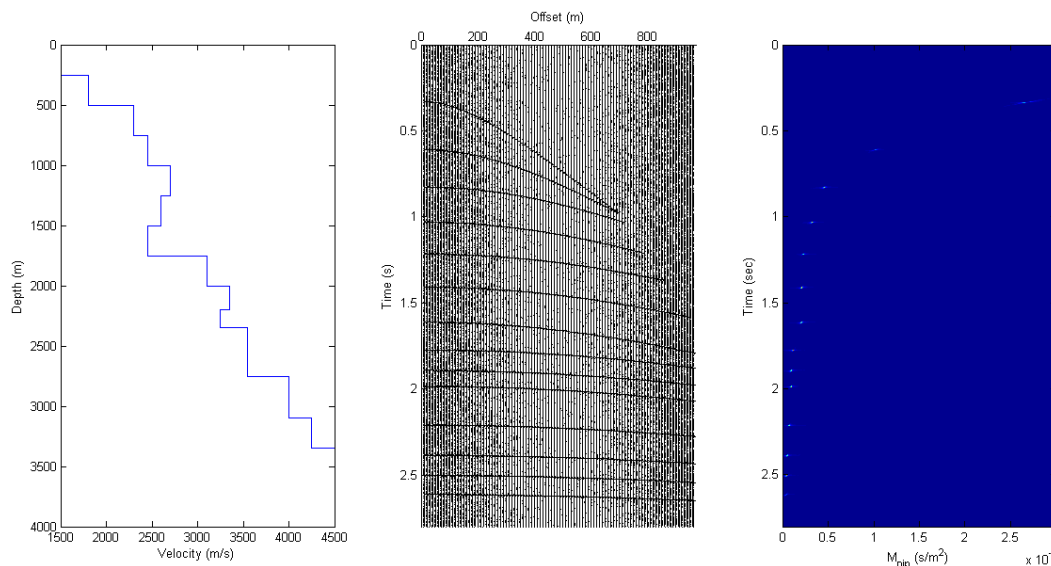
۴-۱-۲- مثال داده مصنوعی یک بعدی

در این بخش، به منظور انجام توموگرافی یک بعدی و ارزیابی عملکرد آن، این روش روی یک داده لرزه‌ای مصنوعی اعمال می‌شود. برای این منظور یک مدل شامل چهارده لایه که میزان سرعت در هر

لایه ثابت است، تعریف می‌کنیم. شکل (۴-۱، ب)، یک برداشت نقطه میانی مشترک که با استفاده از این مدل (شکل ۴-۱، الف) به دست آمده است را نشان می‌دهد.

برای انجام مدلسازی، از موجک ریکر با فاز صفر و فرکانس ۳۰ هرتز و فاصله نمونه برداری دو میلی‌ثانیه استفاده شده است. سپس نوفه سفید گوسی با نسبت سیگنال به نوفه ۲۵ دسی‌بل به رد لرزه‌های حاصله اضافه شده است.

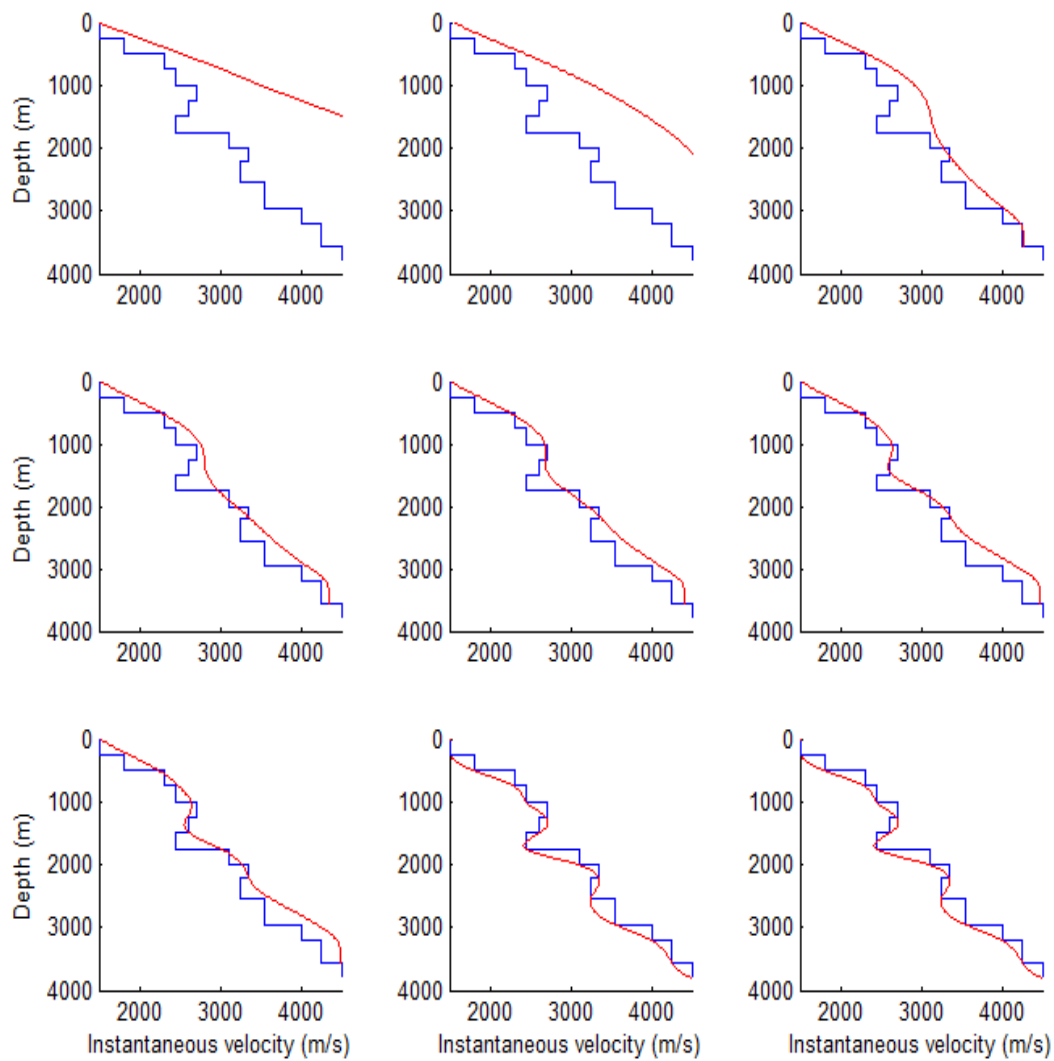
برای هر نمونه دورافت صفر، پارامترهای داده (τ_0 ، M_{NIP}) از طریق آنالیز شباهت در برداشت CMP با استفاده از رابطه زمان سیر (۴-۲) در نرم افزار متلب محاسبه شدند. پس از انجام آنالیز شباهت، سیزده نقطه دستچین می‌شوند که در شکل (۴-۱ ج) نشان داده شده است. این سیزده نقطه داده بعنوان ورودی توموگرافی، با هدف بدست آوردن یک مدل سرعت تدریجی، استفاده می‌شوند. مدل سرعت حاصل باید با حالت تدریجی شده مدل سرعت واقعی، همخوانی داشته باشد.



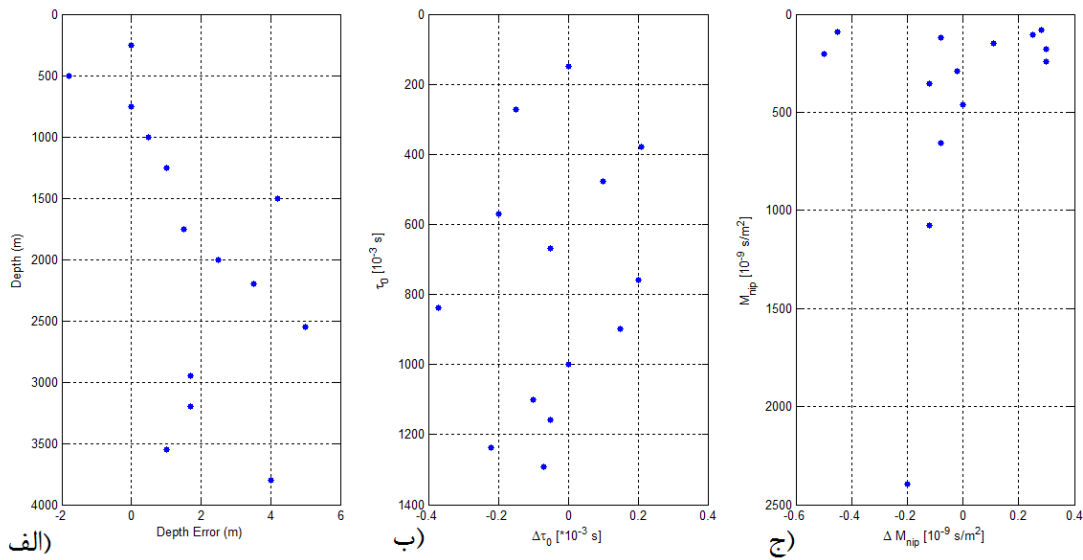
شکل ۴-۱، مثال داده مصنوعی یک بعدی. الف) ساختار سرعت لایه‌ای یک بعدی ب) برداشت CMP مصنوعی که با دنبال کردن پرتو در مدل سرعت (الف) مدل سازی شده است. ج) داده‌های ورودی توموگرافی که از برداشت CMP (ب) با استفاده از معادله (۴-۲) استخراج شده است.

در این مثال، مدلی که باید طی فرایند معکوس‌سازی تعیین شود با پانزده ضریب بی‌اسپلین در محل گره‌هایی با فاصله قائم ۲۰۰ متر تعریف می‌شود. بنابراین بردار مدل شامل ۲۸ عنصر است و بردار داده

شامل ۲۶ عنصر می‌باشد. برای مدل اولیه، سرعت نزدیک سطح ۱۵۰۰ متر بر ثانیه و گرادیان سرعت 2 s⁻¹ استفاده شده است. نتایج معکوس‌سازی در هر تکرار در شکل (۲-۴) به نمایش در آمده است. مدل سرعت تدریجی نهایی پس از ۱۲ تکرار حاصل می‌شود که خیلی نزدیک به مدل واقعی است. خطای بازسازی تعیین عمق بازتابنده پس از ۱۲ تکرار، کمتر از ۵ متر می‌باشد (شکل ۳-۴ الف). با استفاده از این نتایج، استفاده از مدل سرعت فوق قابل قبول می‌باشد. واضح است چنین مدلی این امکان را فراهم می‌کند که عمق بازتابنده را بطور قابل اعتماد تعیین کرد. این فرایند حتی در صورت توزیع ناپیوسته و پیچیده سرعت انتشار امواج لرزه‌ای در زیر سطح نیز امکان پذیر است. شکل (۳-۴ ب و ج) خطای باقیمانده بین پارامترهای مدلسازی شده و پارامترهای دستچین شده ی داده‌های (M_{NIP} ، τ₀) را پس از ۱۲ بار تکرار، نشان می‌دهد. با استفاده از شکل سهمی معادله (۲-۴) مشاهده می‌شود که خطایی در حدود $10^{-9} \frac{s}{m^2}$ برای M_{NIP} متناظر با خطای زمان‌سیر 10⁻³ ثانیه در دورافت ۲۰۰۰ متر، پس از ۱۲ بار تکرار در داده‌ها بوجود می‌آید که این مقدار خطا قابل چشم پوشی است.

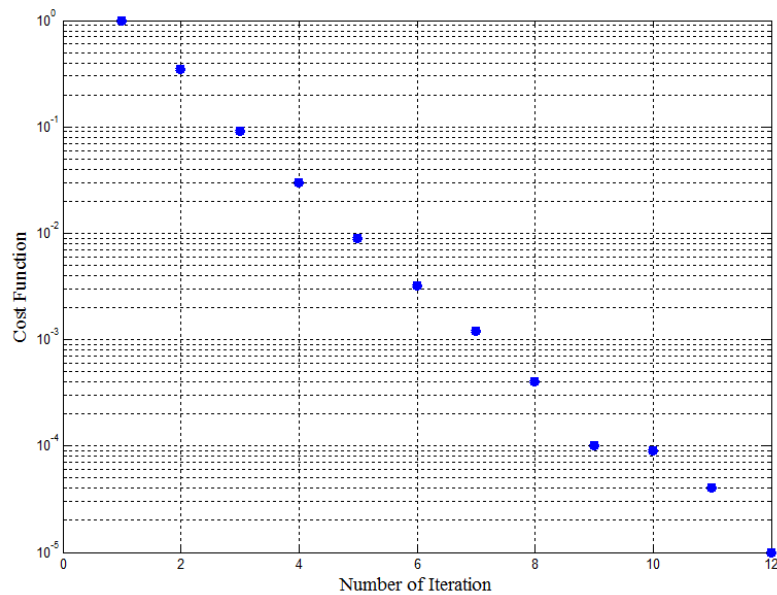


شکل ۴-۲، مثال داده مصنوعی یک بعدی. همگرایی مدل سرعت به یک جواب بهینه. از بالا-چپ به پایین-راست: مدل سرعت پس از صفر (مدل اولیه)، ۱، ۲، ۳، ۴، ۶، ۸، ۱۰ و ۱۲ تکرار (منحنی قرمز). برای مقایسه، مدل سرعت لایه‌ای واقعی نیز رسم شده است (خطوط آبی).



شکل ۴-۳، مثال داده مصنوعی. الف) اختلاف بین عمق بازتابنده در مدل واقعی (محل پله‌ها در شکل ۴-۱ الف)) و مقادیر مدل سازی شده طی توموگرافی. ب) خطای باقیمانده در پارامتر τ_0 پس از ۱۲ تکرار. ج) خطای باقیمانده در M_{np} پس از ۱۲ تکرار.

برای مشاهده همگرایی مدل سرعت طی فرایند معکوس سازی، مقدار تابع هزینه S بصورت تابعی از شماره تکرار در شکل (۴-۴) نمایش داده شده است.



شکل ۴-۴: مثال داده مصنوعی. مقدار تابع هدف S ، معادله (۳-۸)، در برابر شماره تکرار. فرایند معکوس سازی پس از ۱۲ تکرار همگرا می‌شود.

۲-۴ - توموگرافی دو بعدی

در حالت دو بعدی فرض می‌شود، ساختارهای زیر سطحی و میزان سرعت به‌طور جانبی نیز دارای تغییرات باشند. اطلاعات جنبشی برای تعیین مدل سرعت را می‌توان از داده‌های لرزه‌ای با استفاده از روش برانبارش سطح بازتاب مشترک (CRS) تعیین کرد.

۱-۲-۴ - پارامترهای مدل و داده

پارامترهایی که زمان سیر مرتبه دوم مربوط به جبهه موج (NIP) در صفحه قائم را تعریف می‌کند عبارتند از زمان سیر پرتو نرمال $\tau_0 = \frac{t_0}{2}$ و مشتقات اول و دوم زمان سیر یعنی p و M در نقطه x_0 . بنابراین داده‌های مورد نیاز برای انجام توموگرافی دو بعدی شامل نقطه داده‌های زیر می‌شود:

$$\left(\tau_0, M_{NIP}^{(\xi)}, p^{(\xi)}, \xi_0 \right)_i \quad i = 1, \dots, n_{data} \quad \text{معادله (۵-۴)}$$

نقطه داده‌های فوق از محصولات روش برانبارش (CRS) استخراج می‌شوند. هر کدام از این نقطه داده‌ها مربوط به یک NIP در زیر سطح است که با محل فضایی (x, z) آن نقطه و شیب محلی بازتابنده در آن نقطه $(\theta^{(NIP)})$ مشخص می‌شوند.

مدل سرعت دو بعدی توسط توابع بی‌اسپلاین از درجه چهار ($m=4$) توصیف می‌شود (دوونک، ۲۰۰۴).

$$v(x, z) = \sum_{j=1}^{n_x} \sum_{k=1}^{n_z} v_{jk} \beta_j(x) \beta_k(-z) \quad \text{معادله (۶-۴)}$$

که v_{jk} پارامترهای مدل سرعت هستند که باید تعیین شوند، تعداد این پارامترها برابر $n_x n_z$ می‌باشد برای توموگرافی، پارامترهای مدل به صورت زیر تعریف می‌شوند:

$$(x, z, \theta)_i^{(NIP)} \quad i = 1, \dots, n_{data} \quad \text{معادله (۷-۴)}$$

$$v_{jk} \quad j = 1, \dots, n_x, \quad k = 1, \dots, n_z$$

لذا تعداد کل پارامترهای داده $4n_{data}$ و پارامترهای مدل $(3n_{data} + n_x n_z)$ است. اگر محدودیت‌های اضافی بر مدل سرعت، همانطور که در بخش (۳-۴-۲) به‌طور مختصر معرفی شد، همراه با پارامترهای داده (۴-۵) در فرایند معکوس‌سازی استفاده شوند، این محدودیت‌ها به عنوان داده‌های اضافی به حساب می‌آیند. معرفی اطلاعات سرعت اولیه در محل n_{vdata} در مدل باعث بوجود آمدن نقطه داده‌های اضافی می‌گردد.

$$v(x_i, z_i) \quad i = 1, \dots, n_{vdata} \quad \text{معادله (۴-۸)}$$

در NIP توموگرافی، یکی از محدودیت‌هایی که بر مدل سرعت اعمال می‌شود اینست که ساختار سرعت باید به طور محلی از ساختار بازتابنده در محل NIP تبعیت کند که موجب بوجود آمدن n_{data} نقطه داده می‌شود.

$$|\nabla_q v|_{(x,z)_i}^{(NIP)} = 0 \quad i = 1, \dots, n_{data} \quad \text{معادله (۴-۹)}$$

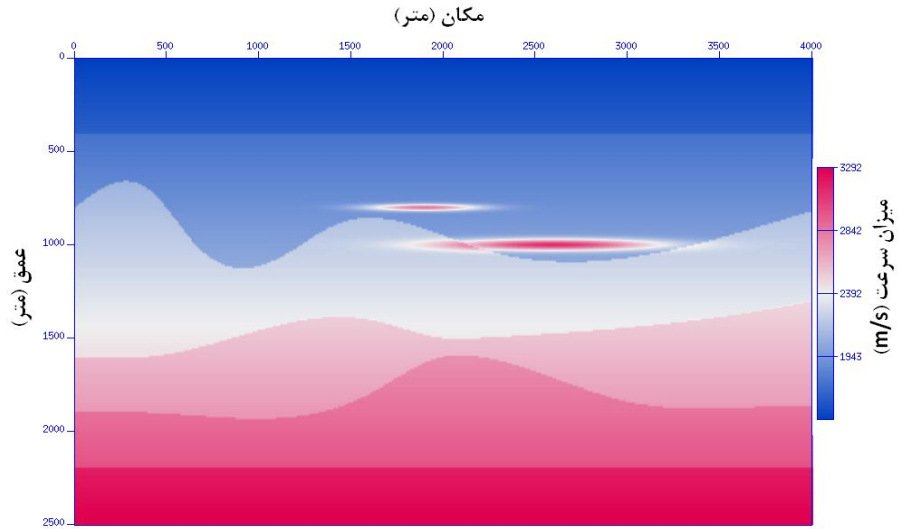
که $|\nabla_q v|$ ، مقدار گرادیان سرعت را در طول بازتابنده، در اطراف یک NIP با موقعیت (x, z) را نشان می‌دهد.

با به حساب آوردن این محدودیت‌ها تعداد کل پارامترهای داده برابر $n_{vdata} + 5n_{data}$ و تعداد پارامترهای مدل $3n_{data} + n_x n_z$ خواهد شد.

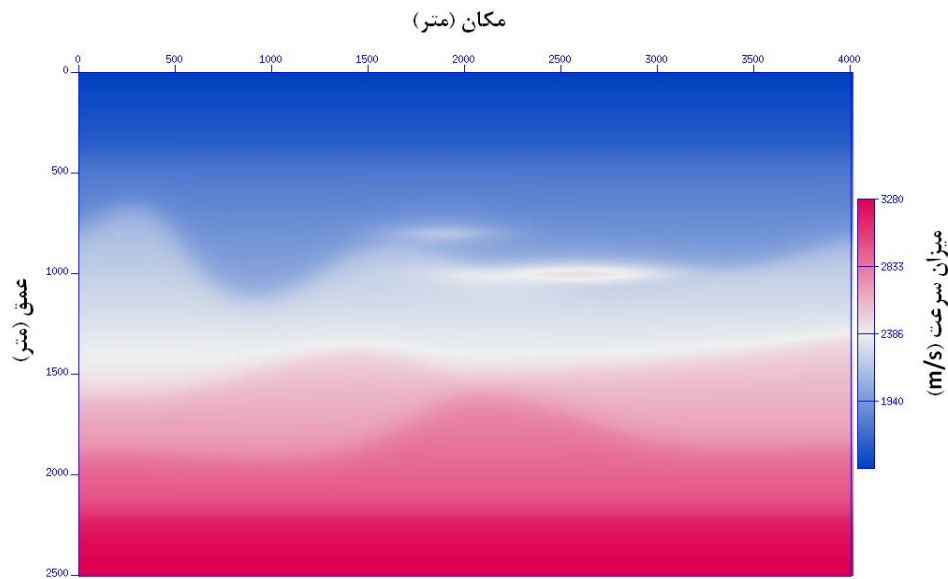
۴-۲-۲- مثال داده مصنوعی دو بعدی

به منظور ایجاد داده‌های ورودی به منظور انجام فرایند توموگرافی، یک مدل سرعت دو بعدی که بطور جانبی ناهمگن است، با استفاده از نرم‌افزار *seismic unix* تعریف می‌شود. این مدل، همانطور که در شکل (۴-۵) مشاهده می‌شود، شامل ۶ لایه دارای سرعت‌های ثابت می‌باشد؛ که در لایه دوم دو آنومالی سرعت لنزی شکل با اندازه‌ها و سرعت‌های مختلف وجود دارد. قبل از برداشت داده‌های

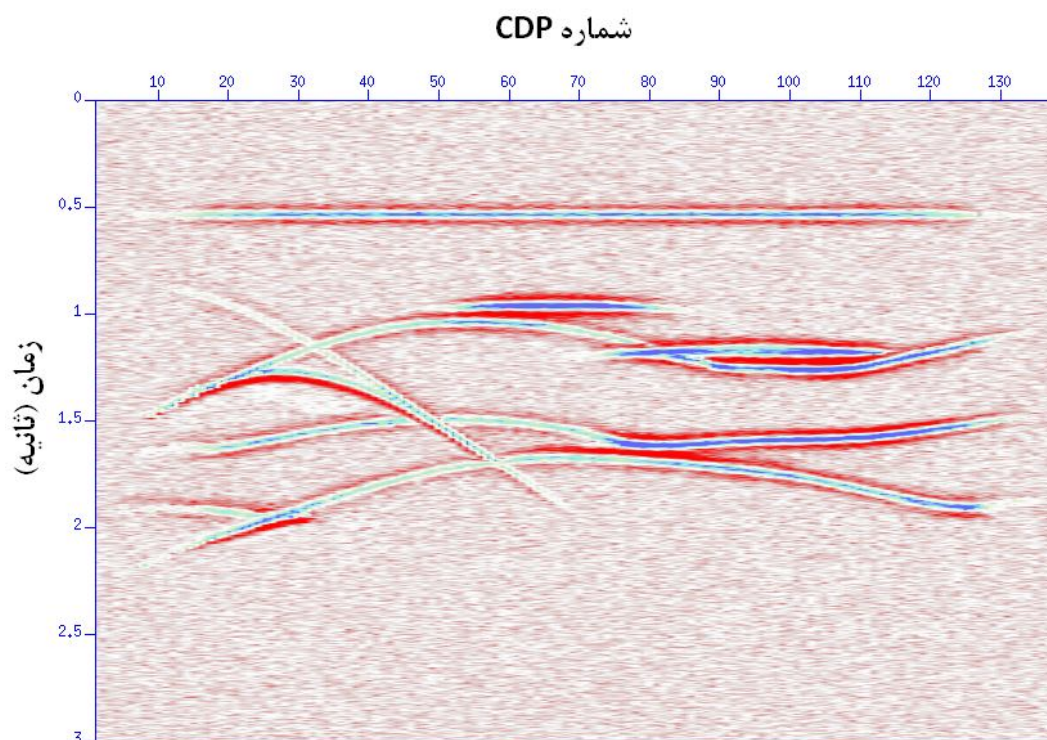
لرزه‌ای مصنوعی، مدل مذکور باید به مدل سرعت تدریجی تبدیل شود. هدف این بخش، بررسی اثر مدل سرعت اولیه روی مدل سرعت نهایی به دست آمده از *NIP* توموگرافی روی این مدل می‌باشد. شکل (۴-۶) حالت تدریجی شده‌ی مدل اصلی را نشان می‌دهد.



شکل ۴-۵: مدل مصنوعی زمین شناسی. دارای ۶ لایه با ضخامت‌ها و سرعت‌های مختلف و دارای دو لنز پر سرعت.



شکل ۴-۶: حالت تدریجی شده‌ی شکل (۴-۵)



شکل ۴-۷: مقطع برانبارش یافته‌ی لرزه نگاشت‌های حاصل از برداشت مصنوعی روی مدل زمین شناسی شکل (۴-۵)

با استفاده از این مدل، یک لرزه‌نگاشت مصنوعی که از ۴۰ چشمه با فاصله ۵۰ متر و ۹۶ گیرنده (به ازای هر چشمه) با فاصله ۵۰ متر تهیه شد و با اضافه کردن نوفه سفید گوسی به داده‌های لرزه‌ای مصنوعی، نسبت سیگنال به نوفه را به ۱۰ دسی‌بل کاهش دادیم. سپس از لرزه‌نگاشت مصنوعی حاصله، با استفاده از فرایند برانبارش *CRS* که در فصل دوم به آن اشاره شد، مقاطع نشانگرهای جنبشی میدان موج (فصل سوم) را استخراج کردیم. شکل (۴-۷) مقطع برانبارش یافته‌ی حاصل از این مدل مصنوعی را نشان می‌دهد. در مرحله بعد، پارامترهای مشاهده‌ای (۴-۱) را از مقاطع مذکور توسط برنامه رایانه‌ای استخراج نشانگرها، تهیه کردیم. در نهایت، تعداد ۶۷۰ نقطه روی مقاطع دریافت صفر نشانگرهای میدان موج دستچین شد. از آنجایی که هر نقطه حاوی چهار پارامتر است، تعداد کل پارامترهای مشاهده‌ای 4×670 عدد می‌باشد.

۴-۳- تعریف مدل سرعت اولیه

در روش NIP توموگرافی، دقت مدل سرعت نهایی به تعداد، تراکم و دقت نقاط دستچین شده از مقاطع برانبارش CRS بستگی دارد. چنانچه به هر دلیلی در قسمتی از مقاطع نشانگرها نسبت سیگنال به نوفه پایین باشد، بطوریکه تعداد کمی نقطه از این محلها دستچین شود و یا دقت نقاط دستچین شده پایین باشد، اثرات نامطلوبی روی مدل سرعت نهایی خواهد داشت. چرا که از این نواحی تعداد کمی نقطه داده برداشت شده و طبیعتاً سرعتی هم که برای این نواحی تعیین می‌شود، خطای بیشتری دارد. در چنین شرایطی، برای تهیه یک مدل سرعت نهایی کوچک، مدل سرعت اولیه نقش پررنگ‌تری دارد. مدل اولیه مطلوب، مدلی است که بتواند تغییرات کلی سرعت را چه در جهت قائم و چه در جهت افقی نشان دهد. ساده‌ترین راه تهیه مدل اولیه، استفاده از رابطه‌ی خطی تغییرات سرعت لحظه‌ای با عمق است (روبین، ۲۰۰۳). یعنی:

$$v_{inst} = v_0 + k \cdot z \quad \text{معادله (۴-۱۰)}$$

این رابطه، نحوه افزایش سرعت با عمق را با استفاده از ۲ پارامتر نشان می‌دهد.

v_0 : سرعت لحظه‌ای انتشار موج در نزدیک سطح زمین

k : گرادیان تراکم، که به صورت یک ضریب، نرخ افزایش سرعت با عمق را تعیین می‌کند.

علاوه بر این رابطه، با استفاده از تعداد محدودی پارامتر به ازای هر لایه، توابع سرعت استاندارد توسط افراد مختلف ارائه شده است که می‌توان از آنها برای توصیف نحوه‌ی تغییرات سرعت لحظه‌ای با عمق استفاده کرد. از بین این مدل‌ها می‌توان به موارد زیر اشاره کرد.

$$v_{inst}(z) = v_0(1 + a \cdot z)^b \quad \text{معادله (۴-۱۱، الف) تابع چندجمله‌ای^۱}$$

^۱ Polynomial function

$$v_{inst}(z) = v_0 e^{k.z} \quad \text{معادله (۴-۱۱، ب) قانون کیارلی-سرا^۱}$$

$$\frac{1}{v_{inst}(z)} = \frac{1}{v_{mat}} + \left(\frac{1}{v_0} - \frac{1}{v_{mat}} \right) \cdot e^{-k.z} \quad \text{معادله (۴-۱۱، ج) قانون بیوفورت^۲}$$

$$v_{inst}(z) = a \cdot z^b, \quad b \approx 1.6 \quad \text{معادله (۴-۱۱، د) قانون فاست^۳}$$

این توابع، ما را قادر می‌سازد که فرضیات کلی افزایش سرعت با عمق ناشی از تراکم رسوبات را در نظر بگیریم. با این حال، ملاحظاتی در استفاده از این روابط وجود دارد که باید هنگام استفاده از آنها در نظر داشت. در سه رابطه اول فرض می‌شود که سرعت انتشار موج در نزدیکی سطح زمین مشخص است. اما می‌توان از این روابط برای هر عمق مرجعی استفاده کرد. رابطه‌ی فاست (فاست، ۱۹۵۱ و ۱۹۵۳)، بر اساس اندازه‌گیری‌هایی از ۵۰۰ پیمایش بررسی چشمه^۴ به دست آمده است. در ابتدا این رابطه برای به حساب آوردن اثر عمق بر سرعت لحظه‌ای و به دست آوردن سرعت بازه‌ای به صورت تابعی از عمق لایه ارائه شد. در کارهای عملی می‌توان از این رابطه به عنوان تابع سرعت لحظه‌ای استفاده کرد.

طبق رابطه فاست، مقدار سرعت در سطح زمین ($Z=0$) برابر صفر است؛ که فرضی اشتباه است. لذا، برای استفاده از این رابطه باید آن را به یک حداقل عمقی محدود کرد. در تمام توابع مذکور به جز تابع بیوفورت (بیوفورت، ۱۹۹۲)، میزان سرعت با افزایش عمق به سمت بی‌نهایت میل می‌کنند که یک ویژگی غیر واقعی است. در نتیجه، باید برای استفاده از این توابع، یک حداکثر عمق در نظر گرفته می‌شود. عبارت سوم در تابع بیوفورت، برای حل چنین مشکلی معرفی شده است. در نتیجه میزان سرعت تا حد مشخصی که با V_{mat} نشان داده می‌شود، افزایش می‌یابد. V_{mat} بیان کننده میزان سرعت انتشار موج در ماتریکس کاملاً تراکم یافته‌ی سنگ (مثلاً V_{quartz} در مورد یک ماسه سنگ)، است. روابط مختلف سرعت که در بالا ذکر شد، در شکل (۶-۳) در برابر عمق رسم شده‌اند. در تمام

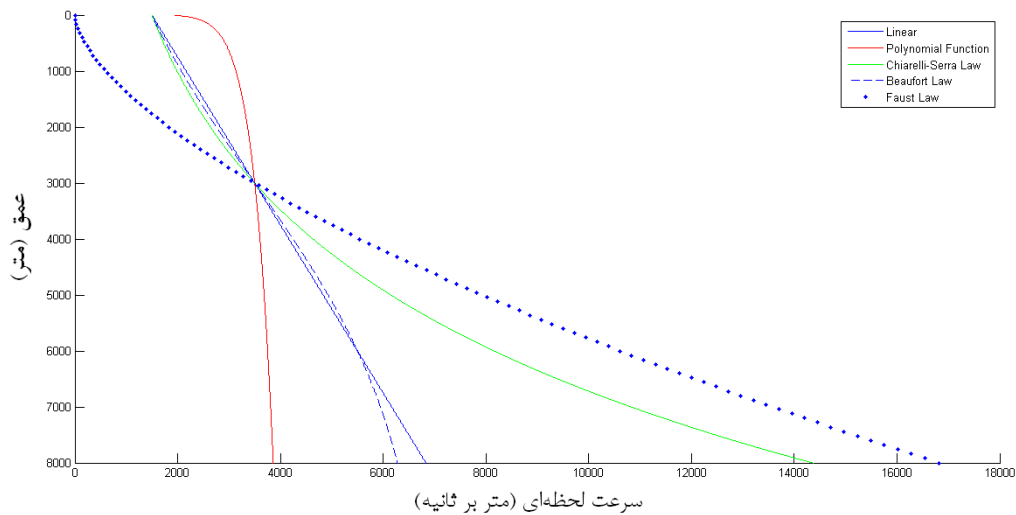
¹ Chiarelli-Serra Law

² Beaufort Law

³ Faust Law

⁴ Checkshot

موارد میزان سرعت در نزدیک سطح $v_0=1500$ m/s فرض شده است (به جز رابطه‌ی فاست). و همچنین فرض شده که در عمق ۳۰۰۰ متر میزان سرعت لحظه‌ای برابر ۳۵۰۰ متر بر ثانیه باشد.



شکل ۴-۸: روابط مختلفی که برای ایجاد مدل سرعت اولیه استفاده می‌شوند، در برابر عمق رسم شده‌اند. همانطور که مشاهده می‌شود تابع بیوفورت (خط چین) و تابع خطی (خط آبی پر) تغییرات مشابهی را نشان می‌دهند. در تابع کیارلی-سرا (منحنی سبز) فرض بر اینست که تغییرات سرعت لحظه‌ای در عمق‌های بیشتر بسیار شدیدتر از قسمت‌های سطحی است. اما در تابع چندجمله‌ای (منحنی قرمز) عکس این حالت وجود دارد.

همانطور که در بخش قبل نیز گفته شد، بهترین مدل سرعت اولیه، برای انجام توموگرافی، مدلی است که بتواند تغییرات کلی سرعت (لحظه‌ای، بازه‌ای یا ...) را در طول پروفیل لرزه‌ای نشان دهد. در این زمینه، سرعت برانبارش می‌تواند گزینه‌ی مناسبی باشد. این سرعت را می‌توان در حالت کلی معادل سرعت RMS، که آن هم به نوبه‌ی خود وابسته به سرعت بازه‌ای در لایه‌های زمین شناسی است، دانست. منظور از تغییرات کلی سرعت اینست که اگر در قسمتی از پروفیل لرزه‌ای به دلیل نفوذ یک توده مثل نمک یا شیل نرم به لایه‌های فوقانی، یک آنومالی سرعتی ایجاد شده است، این حالت در مدل اولیه نیز تا حدودی مشاهده شود. به عبارت دیگر تغییرات جانبی سرعت (در صورت وجود) در این مدل اولیه اعمال شده باشد. در روابطی که در بالا ذکر گردید، صرفاً تغییرات قائم سرعت که بر اساس یک رابطه‌ی ریاضی تعریف می‌شود، در نظر گرفته می‌شوند.

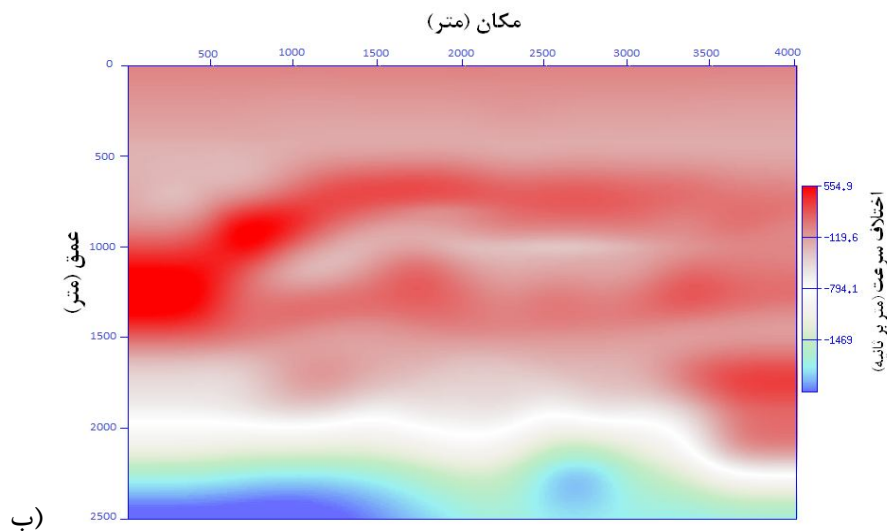
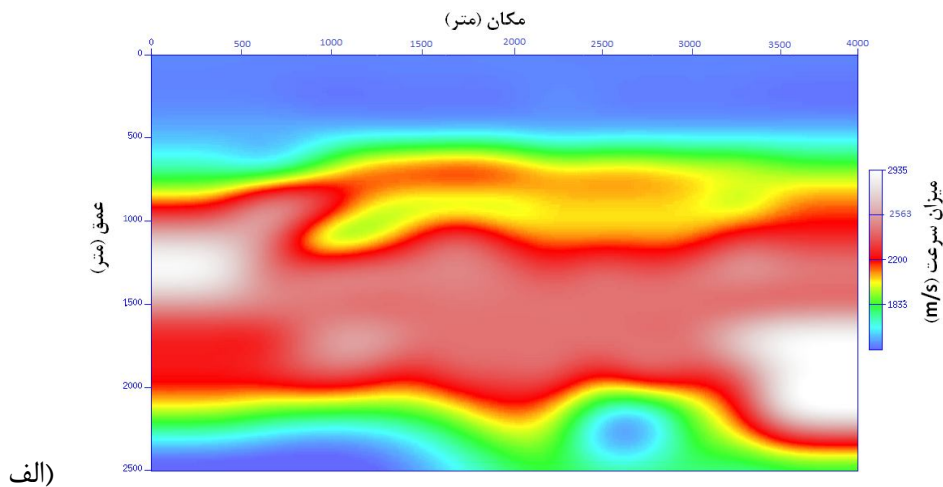
روش مرسوم برای تهیه مدل سرعت برانبارش، استفاده از رابطه شباهت و تهیه طیف سرعت برای هر CMP است. سپس نقاط دارای مقادیر بیشینه روی این طیف‌ها، دستچین می‌شوند. با کنار هم قرار دادن این نقاط و درون یابی بین آنها، مدل سرعت برانبارش تهیه می‌شود. در عمل، این کار به دلیل تعداد زیاد CMPها و یا در برخی موارد، پایین بودن نسبت سیگنال به نوفه، امری وقت گیر و طاقت فرسا است. از طرفی، در بخش (۲-۵-۱)، رابطه‌ی بین سرعت برانبارش با نشانگرهای میدان موج α و R_{nip} معرفی شد (معادله ۲-۱۱). بنابراین، در این پایان نامه، برای تهیه مدل سرعت برانبارش، علاوه بر روابط ذکر شده در این بخش، از این رابطه نیز استفاده شده است. پس از انجام برانبارش CRS مقاطع α و R_{nip} ، به دست می‌آید. سپس با استفاده از رابطه‌ی (۲-۱۱) مقطع سرعت برانبارش حاصل می‌شود.

نکته‌ای که در اینجا باید به آن اشاره کرد، اینست که این مقطع در حوزه زمان می‌باشد و برای انجام کوچ زمانی می‌توان مستقیماً از آن استفاده کرد. اما اگر مقصود ما کوچ عمقی باشد، باید این مقطع را به مقطع عمقی تبدیل کنیم. برای این منظور، از الگوریتم معکوس سازی دیکس (۱۹۵۵)، استفاده شده است.

در مرحله بعد، قصد داریم با استفاده از مدل سرعت‌های اولیه مختلف، که در بالا ذکر شد، در روش NIP توموگرافی، مدل سرعت‌های نهایی را به دست آوریم. سپس با محاسبه اختلاف بین هر کدام از مدل‌های نهایی و مدل سرعت واقعی (شکل ۴-۵)، کم خطاترین مدل سرعت نهایی را به دست آوریم. حالت تغییرات تدریجی سرعت در مدل سرعت واقعی نیز در شکل (۴-۶) نشان داده شده است. و مدل سرعت‌های حاصل از مدل‌های اولیه‌ی مختلف را به همراه اختلاف آنها با مدل واقعی در شکل‌های (۴-۹) تا (۴-۱۳) به نمایش درآمده است.

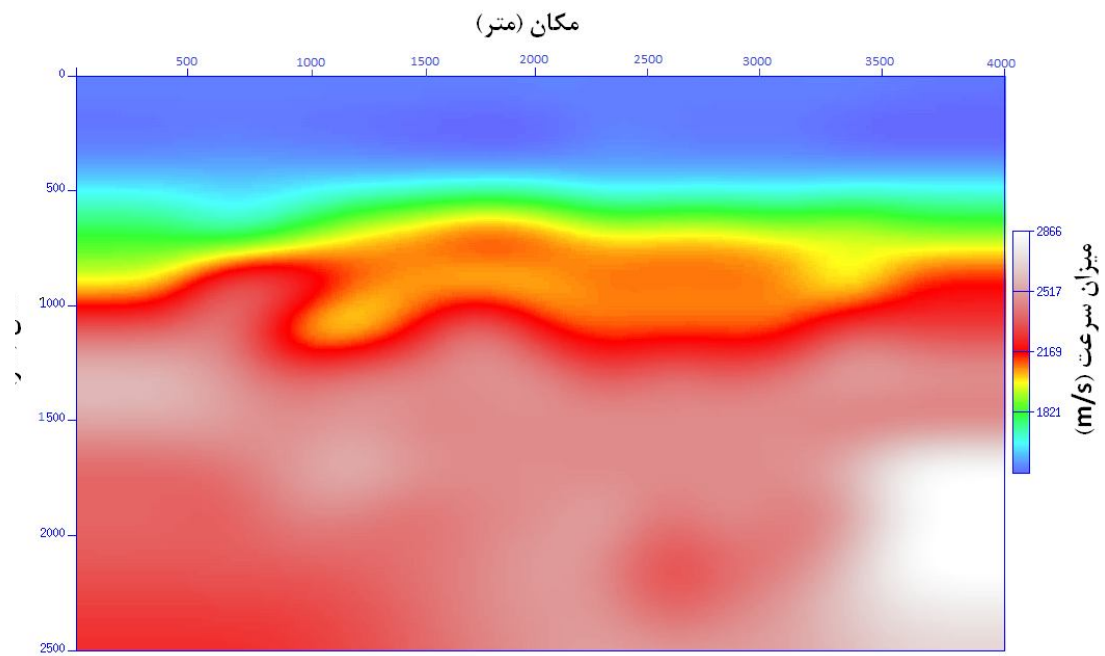
معکوس سازی

برای فرایند معکوس سازی، یک مدل سرعت اولیه با سرعت نزدیک سطح ۱۵۰۰ متر بر ثانیه و گرادیان قائم سرعت $0.6 s^{-1}$ (برای رابطه‌ی ۵-۲۱) تعریف می‌شود. مطابق روند معکوس سازی که در بخش (۳-۵) توصیف شد، پارامترهای مدل، از طریق تکنیک دنبال کردن پرتو، برای همه نقاط داده حاصل می‌شود.

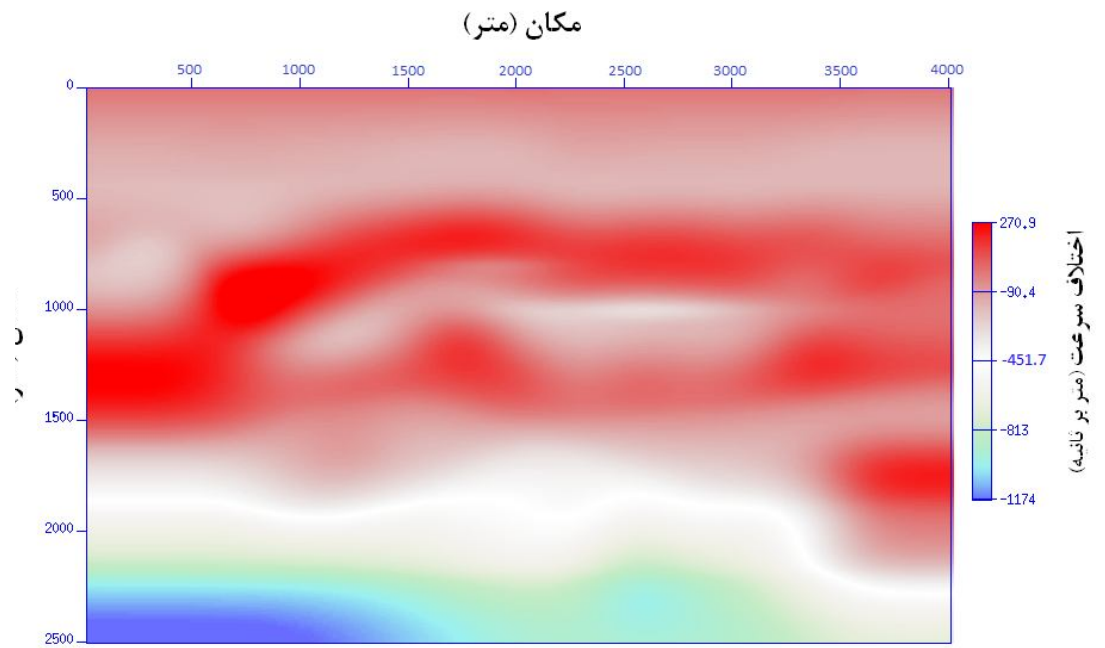


شکل ۴-۹: (الف) مدل سرعت کوچ حاصل از *NIP* توموگرافی با استفاده از رابطه‌ی کیارلی-سرا به عنوان مدل اولیه.

(ب) تفاضل مدل سرعت مذکور با مدل سرعت واقعی (شکل ۴-۶)



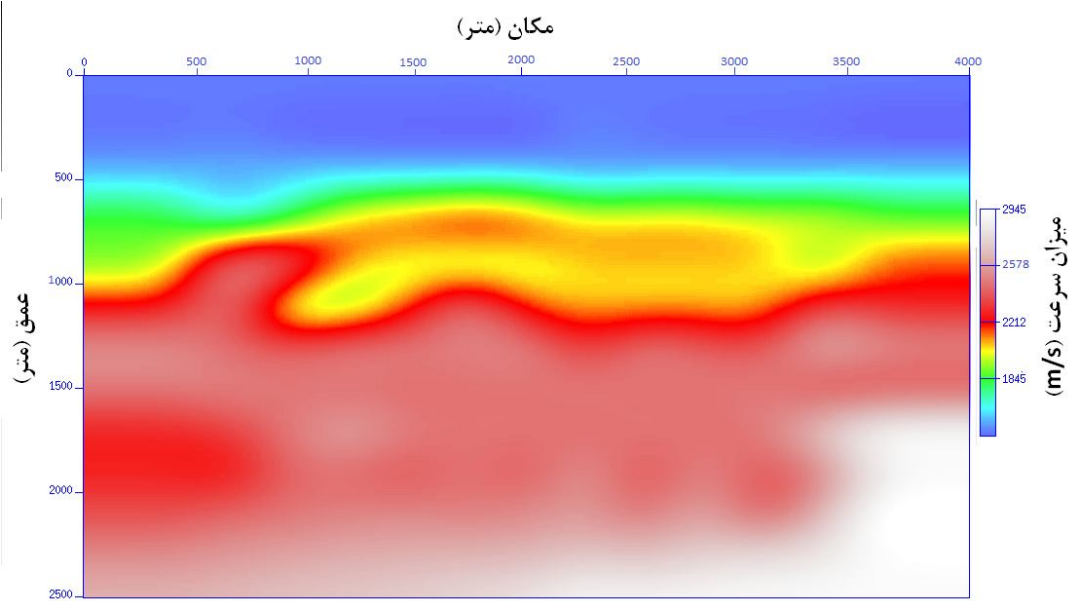
(الف)



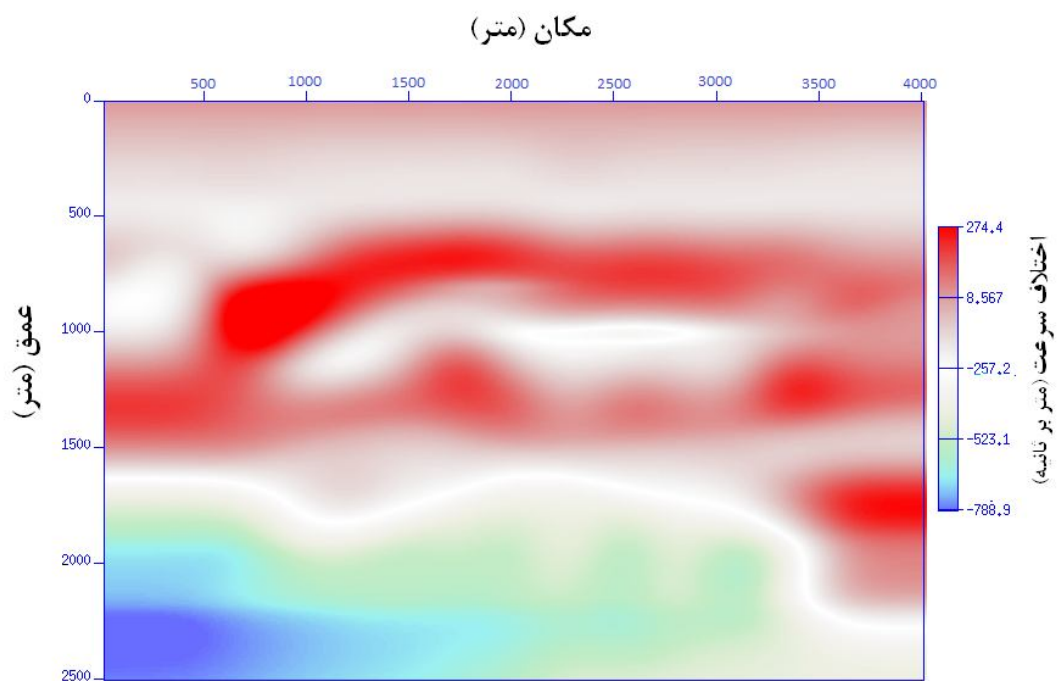
(ب)

شکل ۴-۱۰: الف) مدل سرعت کوچ حاصل از *NIP* توموگرافی با استفاده از رابطه‌ی فاست به عنوان مدل اولیه. ب)

تفاضل مدل سرعت مذکور با مدل سرعت واقعی (شکل ۴-۶)



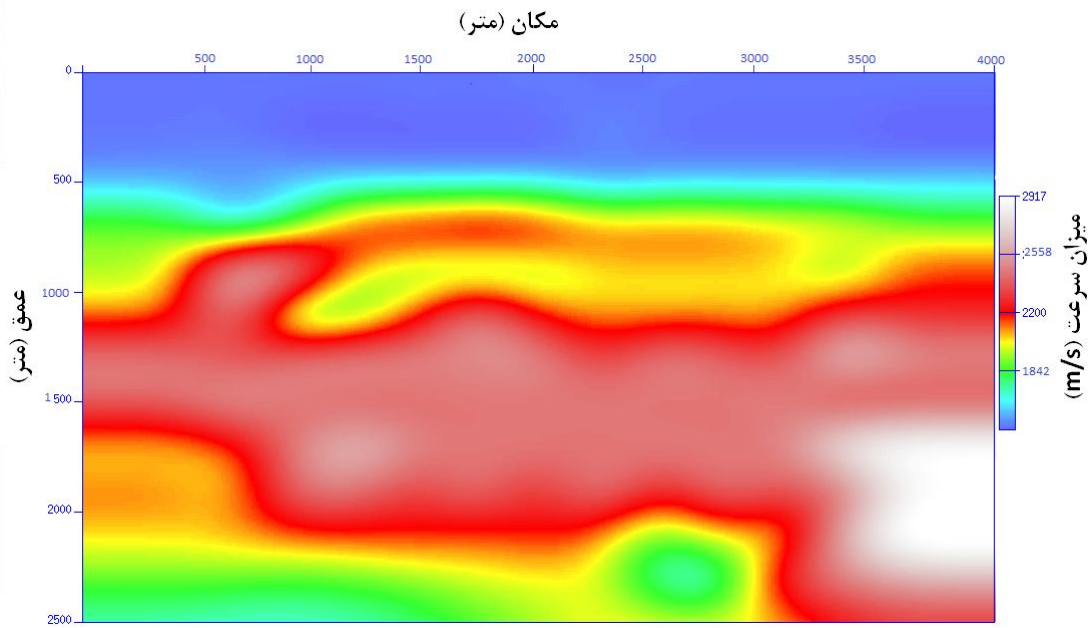
(الف)



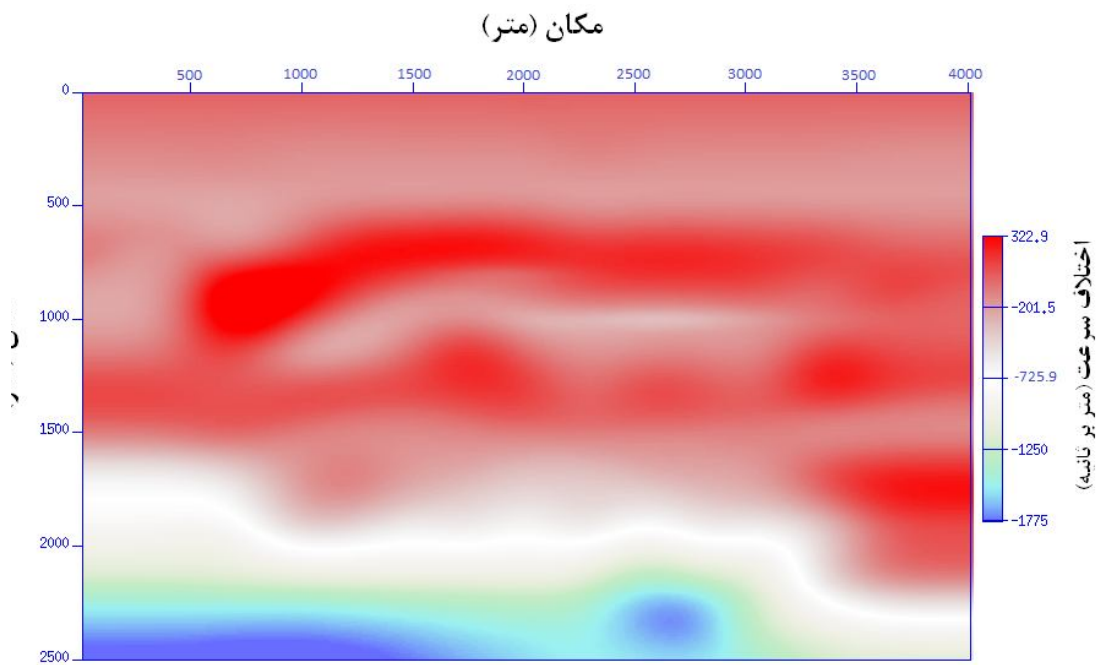
(ب)

شکل ۴-۱۱: الف) مدل سرعت کوچ حاصل از *NIP* توموگرافی با استفاده از رابطه‌ی خطی به عنوان مدل اولیه. ب)

تفاضل مدل سرعت مذکور با مدل سرعت واقعی (شکل ۴-۶)



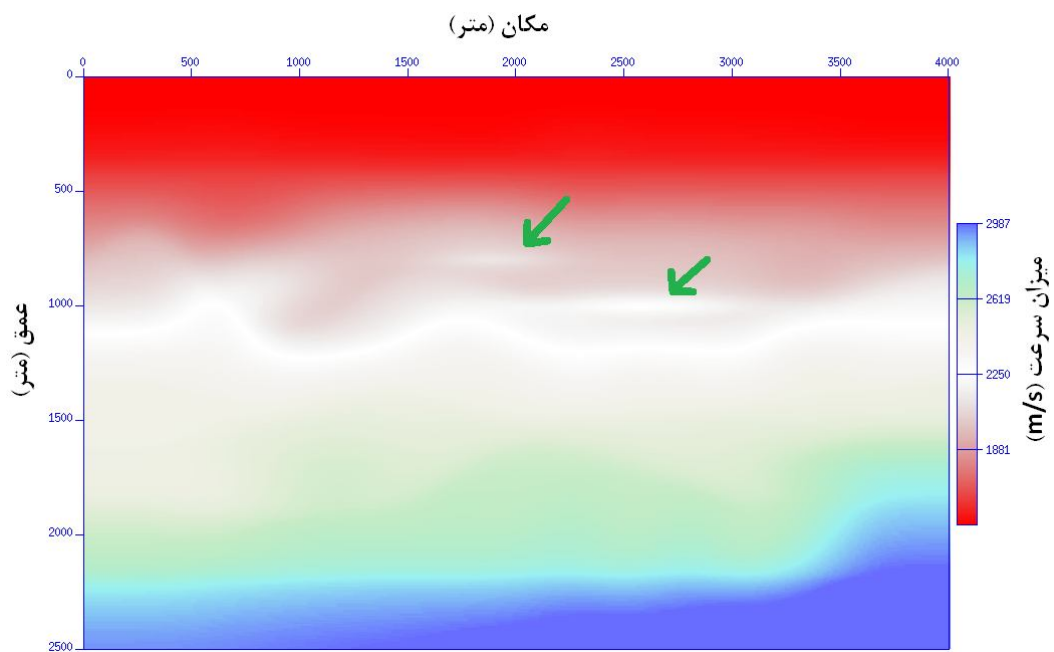
(الف)



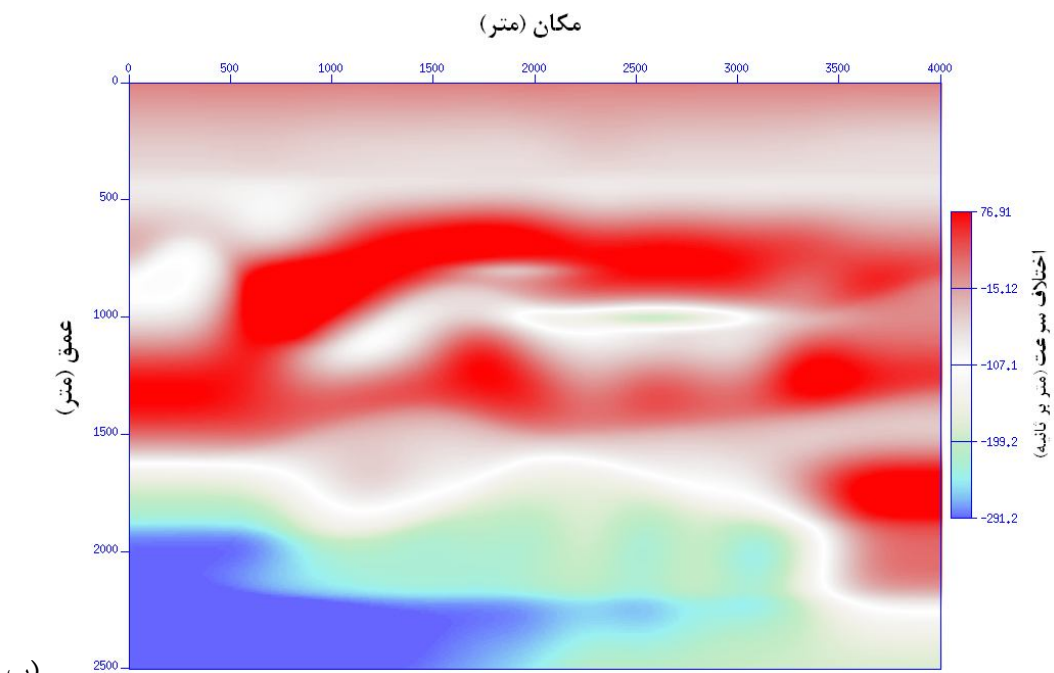
(ب)

شکل ۴-۱۲: الف) مدل سرعت کوچ حاصل از *NIP* توموگرافی با استفاده از رابطه‌ی چندجمله‌ای به عنوان مدل اولیه.

ب) تفاضل مدل سرعت مذکور با مدل سرعت واقعی (شکل ۴-۶)



(الف)



(ب)

شکل ۴-۱۳: الف) مدل سرعت کوچک حاصل از *NIP* توموگرافی با استفاده از سرعت برانبارش به عنوان مدل اولیه.

ب) تفاضل مدل سرعت مذکور با مدل سرعت واقعی (شکل ۴-۶)

تعداد ۱۲ تکرار برای معکوس‌سازی غیرخطی این مدل مصنوعی، انجام گرفت هر کدام از این تکرارها شامل حل سیستم خطی (۳-۱۴) به روش حداقل مربعات می‌باشد که این روش هم به نوبه خود یک روش مبتنی بر تکرار محسوب می‌شود.

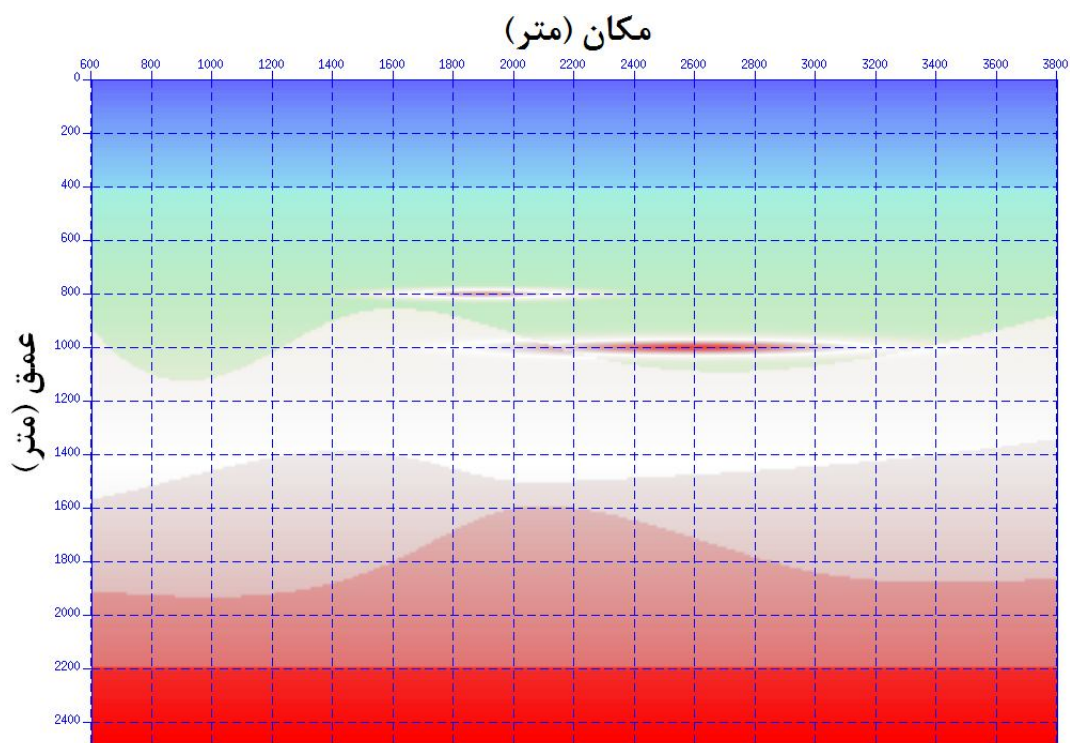
۴-۴- مقایسه نتایج

تصاویر مربوط به اختلاف بین مدل سرعت واقعی و مدل‌های نهایی سرعت حاصل از مدل‌های اولیه مختلف (شکل‌های ۴-۹ تا ۴-۱۳)، نشان می‌دهد که روابط ریاضی مشخص برای تعریف مدل‌های سرعت اولیه، برای انجام *NIP* توموگرافی، تفاوتی چندانی روی مدل سرعت نهایی نخواهد داشت. اما استفاده از مدل سرعت برانبارش به عنوان مدل اولیه، نتیجه‌ی بسیار نزدیکتری به مدل واقعی به وجود می‌آورد. در همه مدل سرعت‌هایی که مدل اولیه‌ی آنها روابط (۴-۱۰) و (۴-۱۱) هستند، دو آنومالی سرعت موجود در مدل واقعی (عمق‌های تقریبی ۸۰۰ و ۱۰۰۰ متر و محل‌های ۱۸۰۰ و ۲۵۰۰ متر) به صورت یک آنومالی واحد و به طور خفیفی به نمایش درآمده‌اند. اما، استفاده از سرعت برانبارش به عنوان مدل سرعت اولیه، این دو آنومالی سرعت را بطور مجزا بازسازی کرده است. علاوه بر این، در محل وجود سه‌گانه‌های باز نشده^۱ (در مقطع برانبارش، شماره *CDP* های ۱۰ تا ۶۰ و بین زمان‌های ۱ تا ۲ ثانیه)، مشاهده می‌شود که مقدار سرعت در این ناحیه تفاوت زیادی نسبت به همان ناحیه در مدل واقعی دارد. یعنی اینکه برای این محل یک آنومالی سرعت کاذب بوجود آمده است که این مشکل نیز در حالت استفاده از سرعت برانبارش تا حدودی بهبود یافته است. این امر را می‌توان از روی تصاویر مربوط به اختلاف بین مدل واقعی و مدل حاصل از *NIP* توموگرافی، مشاهده کرد. این تفاوت به علت به وجود آمدن مقادیر غیر واقعی برای نشانگرهای جنبشی در محل سه‌گانه‌ها و پراش‌ها بوجود آمده است.

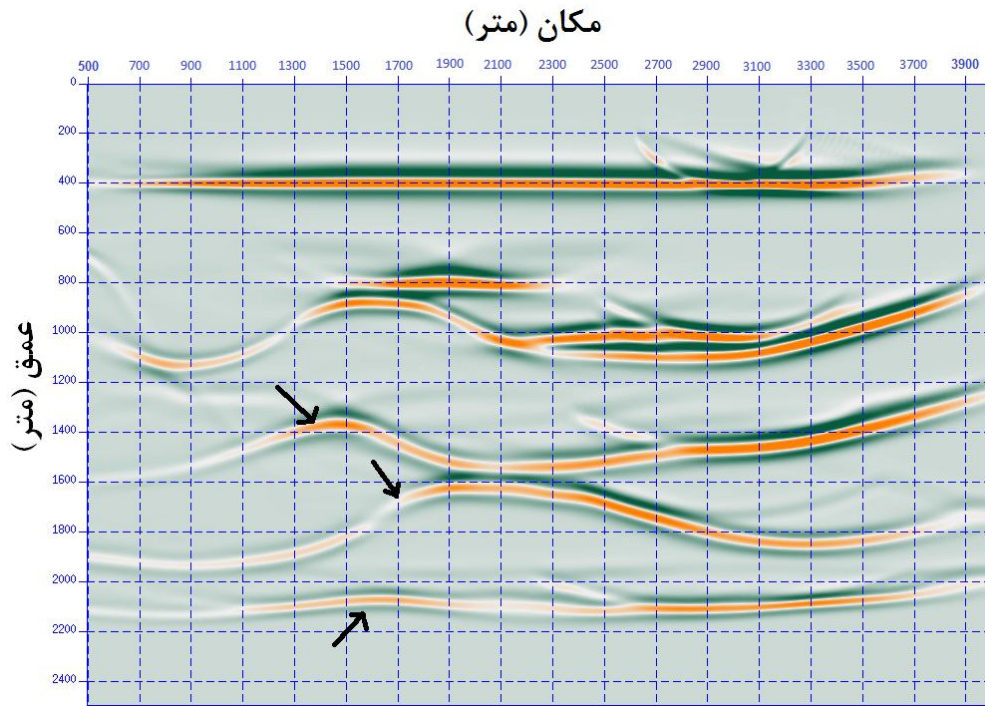
¹ Triplication

همچنین، با مقایسه تصاویر مربوط به اختلاف بین مدل‌های نهایی و مدل واقعی، مشاهده می‌شود که بیشترین اختلاف سرعت در قسمت‌هایی وجود دارد که به علت پایین بودن میزان همدوسی در مقاطع نشانگرها، نقاط کمتری دستچین شده و در نتیجه پرتوهای کمتری از آن نواحی عبور کرده‌اند.

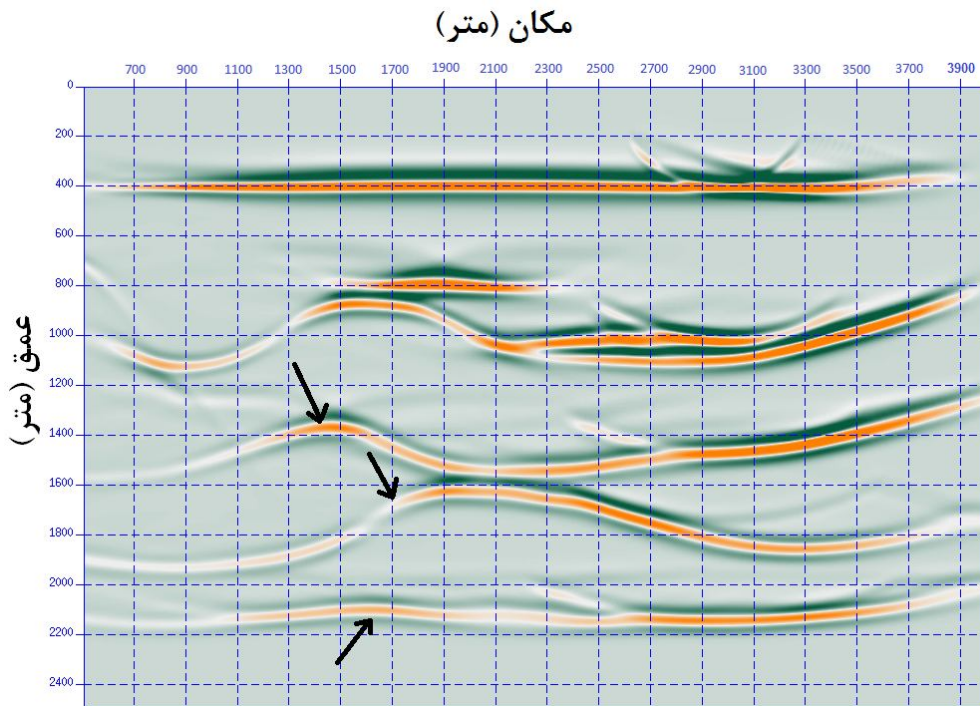
برای آزمایش این مدل‌ها و بررسی تاثیر آنها در نتایج کوچ لرزه‌ای، با استفاده از این مدل‌های سرعت کوچ عمقی روی داده‌های لرزه‌ای مصنوعی اعمال می‌شود که نتایج آن در شکل‌های ۴-۱۵ تا ۴-۱۹ آمده است. با مقایسه مقاطع کوچ مشاهده می‌شود در محلی که به علت وجود یک سه‌گانه (شکل ۴-۷)، پس از توموگرافی در آن محل آنومالی سرعت بدست آمده بود، باعث بالآآمدگی بازتابنده‌های زیرین شده است. اما وقتی از سرعت برانبارش بعنوان مدل اولیه استفاده شده است، مشاهده می‌شود این نقص برطرف شده است همچنین در این حالت، عمیق‌ترین بازتابنده نیز نسبت به بقیه مدل‌های اولیه خطای عمقی کمتری دارد.



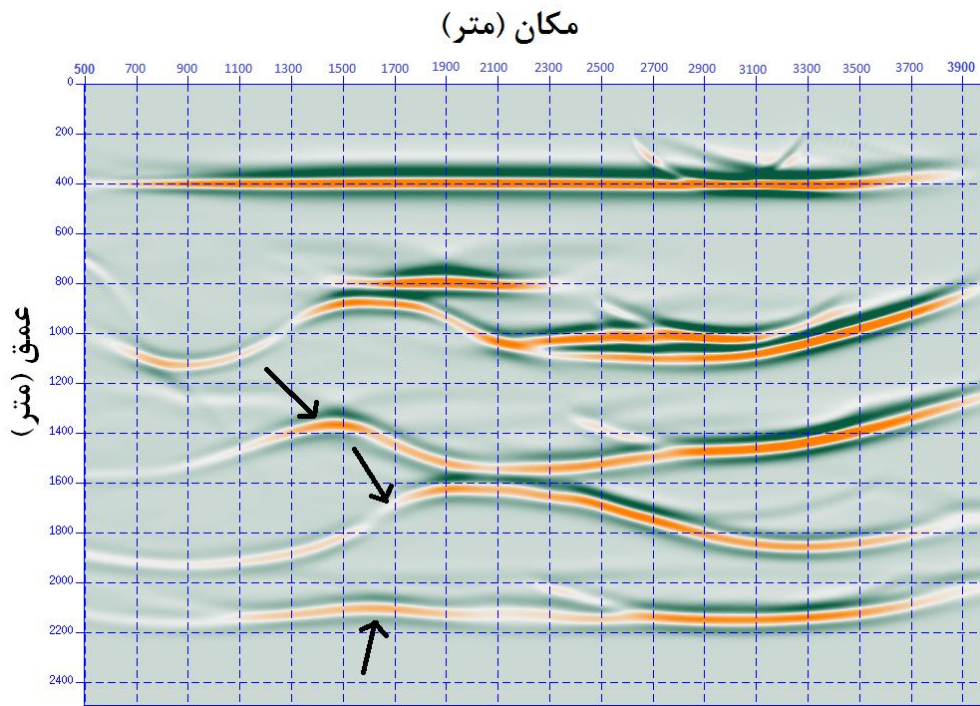
شکل ۴-۱۴: مدل زمین شناسی مصنوعی. برای مقایسه بهتر، شکل شبکه بندی شده است.



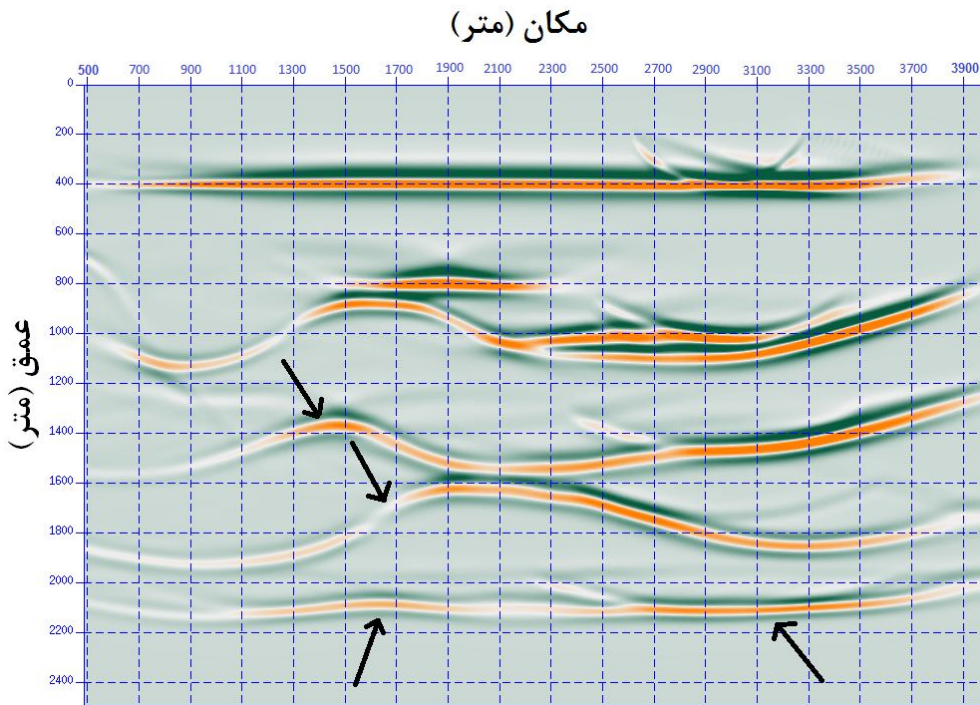
شکل ۴-۱۵: کوچ عمقی داده‌های لرزه‌ای مصنوعی با استفاده از مدل سرعت حاصل از *NIP* توموگرافی با مدل اولیه رابطه کیارلی (شکل ۴-۹)



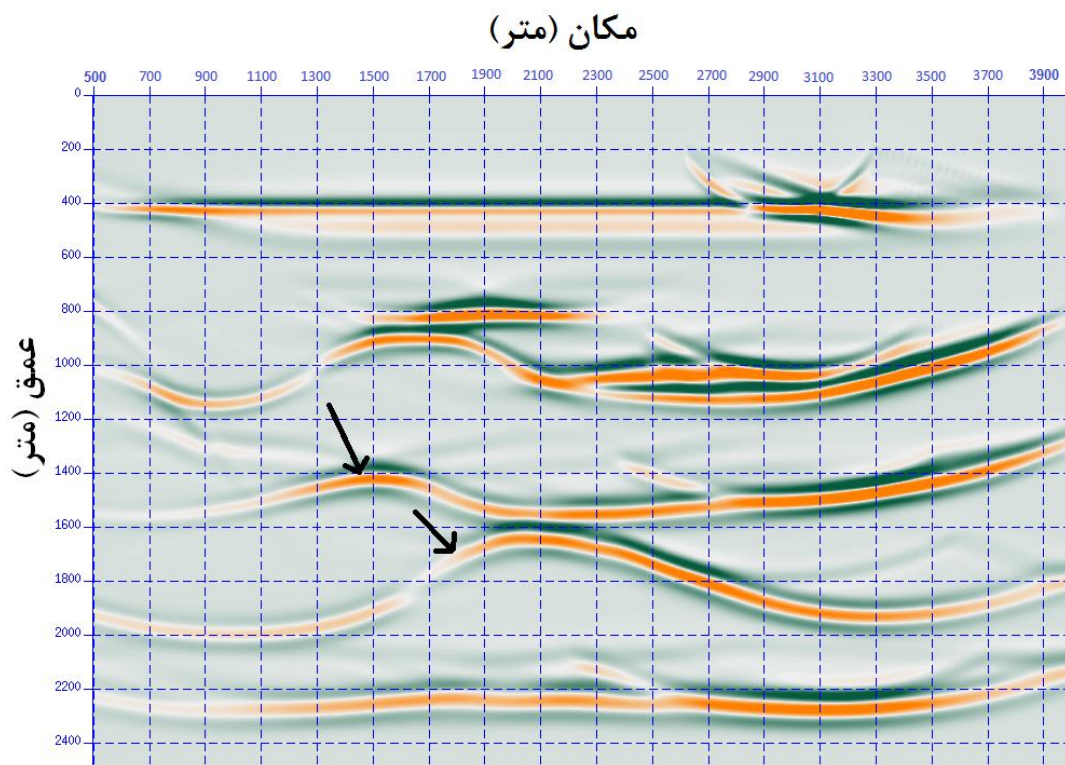
شکل ۴-۱۶: کوچ عمقی داده‌های لرزه‌ای مصنوعی با استفاده از مدل سرعت حاصل از *NIP* توموگرافی با مدل اولیه رابطه فاست (شکل ۴-۱۰)



شکل ۴-۱۷: کوچ عمقی داده‌های لرزه‌ای مصنوعی با استفاده از مدل سرعت حاصل از *NIP* توموگرافی با مدل اولیه رابطه خطی (شکل ۴-۱۱)



شکل ۴-۱۸: کوچ عمقی داده‌های لرزه‌ای مصنوعی با استفاده از مدل سرعت حاصل از *NIP* توموگرافی با مدل اولیه رابطه چندجمله‌ای (شکل ۴-۱۲)



شکل ۴-۱۹: کوچ عمقی داده‌های لرزه‌ای مصنوعی با استفاده از مدل سرعت حاصل از *NIP* توموگرافی با مدل اولیه سرعت برانبارش (شکل ۴-۱۳)

گفتار پنجم

مثال داده‌های لرنزهای واقعی

در فصل ۳ به طور خلاصه تئوری روش NIP توموگرافی بحث شد. داده‌های ورودی برای انجام این روش از داده‌های لرزه‌ای به وسیله روش برانبارش سطح بازتاب مشترک (CRS) و در پی آن استخراج نشانگرهای جنبشی میدان موج از مقاطع حاصل از برانبارش CRS به دست می‌آیند. در این فصل، جنبه‌های عملی این روش توموگرافی با تکیه بر مسائل مربوط به استخراج داده‌های ورودی قابل اعتماد بحث خواهد شد. سپس تمام فرایند معکوس سازی، یعنی از داده‌های لرزه‌ای پیش از برانبارش تا مدل سرعت نهایی کوچ روی داده‌های لرزه‌ای دو بعدی واقعی (بخش ۵-۲)، اعمال خواهد شد.

۵-۱- جنبه‌های عملی

پایه و اساس روش NIP توموگرافی بر این ایده استوار است که اطلاعات زمان سیر مرتبه دوم برای تهیه یک مدل سرعت به منظور تصویر سازی عمقی حتی برای محیط‌های دارای ناهمگنی جانبی، کافی است. البته تجربه نشان داده که این فرض، تا زمانی که تغییرات جانبی سرعت خیلی شدید نباشد، اعتبار دارد. همان طور که در فصل ۳ نیز عنوان شد، استفاده از تقریب مرتبه دوم زمان سیر برای توصیف رخداد‌های انعکاسی در یک داده لرزه‌ای، به طور چشم‌گیری موجب ساده‌تر شدن فرایند استخراج نشانگرهای جنبشی میدان موج از داده‌ی پیش از برانبارش می‌شود. این نشانگرها برای تمام نمونه‌های دورافت صفر، صرف نظر از اینکه متعلق به یک رخداد واقعی باشد یا خیر، تعیین می‌شوند. سپس نقاط داده‌ی مورد نیاز برای روش NIP توموگرافی از مقاطع حاصل از روش برانبارش CRS به صورت خودکار استخراج می‌شوند. خودکار بودن فرایند استخراج نقاط یا دستچین کردن آنها، از بزرگترین مزیت‌های این روش نسبت به سایر روش‌های توموگرافی است. در فرایند دستچین کردن نقاط، ضروری نیست که حتما این نقاط یک رخداد بازتابی پیوسته را دنبال کنند. با این حال، استفاده و اعمال بیش از حد تقریب‌ها روی پدیده‌های واقعی، منجر به محدودیت

کاربرد این روش می‌شود. بنابراین لازم است یک محدوده ی اعتبار برای استفاده از تقریب مرتبه دوم زمان‌سیر تعریف کرد و این امر در هنگام استفاده از روش برانبارش CRS، برای به دست آوردن نشانگرهای قابل اعتماد، در نظر گرفته خواهد شد. همچنین فرایند دستچین کردن نقاط در تمام روش‌های توموگرافی، عامل ایجاد خطا در فرایند توموگرافی است. در ادامه، جنبه‌های عملی که باید در مراحل مختلف توموگرافی در نظر گرفت شود، بحث خواهد شد.

۵-۱-۱- برانبارش CRS

هدف از برانبارش CRS در تخمین مدل سرعت، استخراج اطلاعات زمان‌سیر قابل اعتماد به شکل نشانگرهای جنبشی میدان موج برای هر نمونه دورافت صفر، با استفاده از رابطه (۲-۹)، می‌باشد. کیفیت و دقت این نشانگرها به عوامل مختلفی بستگی دارد. همانطور که گفته شد، در روش برانبارش CRS، فرض می‌شود که معادله (۲-۷) به طور کامل زمان‌سیر سیگنال‌های بازتابی موجود در یک داده لرزه‌ای واقعی را توصیف کند. اما در دنیای واقعی، زمین یک جسم ناهمسانگرد و ناهمگن می‌باشد و طبیعی است که نمی‌توان با یک رابطه ریاضی رفتار آن را توصیف کرد. بنابراین، نشانگرهایی که توسط روش CRS تعیین می‌شوند تحت تاثیر مقداری خطا نیز هستند. عوامل مختلفی بر میزان خطا در این نشانگرها دخالت دارد که مهم‌ترین آنها، انحراف زمان‌سیر رخدادهای بازتابی واقعی از تقریب مرتبه دوم زمان‌سیر (معادله ۲-۷) می‌باشد. به منظور کاهش اثر انحراف رخدادهای انعکاسی از تقریب (۲-۷) باید در هنگام اعمال روش CRS، مقدار مناسبی برای بازه‌ی جستجو در نظر گرفت.

از عوامل مختلفی که بر روی دقت و کیفیت نشانگرها تاثیر گذارند، می‌توان به موارد زیر اشاره کرد.

- طول پروفیل لرزه‌ای (بازه‌ی دورافت و نقطه میانی)
- تعداد ردلرزه به ازای هر CMP (فولد)
- نسبت سیگنال به نوفه در داده ی لرزه‌ای
- طول پنجره زمانی برای آنالیز همدوسی

- نرخ نمونه برداری از سرعت
- نحوه محاسبه‌ی همدوسی
- انحراف رخدادهای بازتابی از حالت هذلولوی

از عوامل مذکور، انحراف رخدادهای بازتابی از حالت هذلولوی به عنوان مهم‌ترین مورد شناخته می‌شود. چنانچه این انحراف خیلی بزرگ باشد، که نشان دهنده‌ی پیچیدگی بسیار زیاد ساختارهای زیر سطحی است، تعیین دقیق نشانگرهای میدان موج غیر ممکن خواهد بود؛ بنابراین، نتایج توموگرافی بر اساس این نشانگرها دور از واقعیت می‌باشد. برای بررسی اینکه آیا این مشکل در یک داده لرزه‌ای وجود دارد یا نه، کفایت تعدادی CMP در داده را بررسی کنیم، که حداکثر تا چه دورافتی رخدادهای انعکاسی تقریباً به شکل هذلولوی می‌باشند. کارهای تجربی نشان داده است که برای عمق هدف ۳ تا ۴ کیلومتر، حداکثر دورافت ۲ تا ۲.۵ کیلومتر، برای این بررسی کافی می‌باشد (من، ۱۹۹۹).

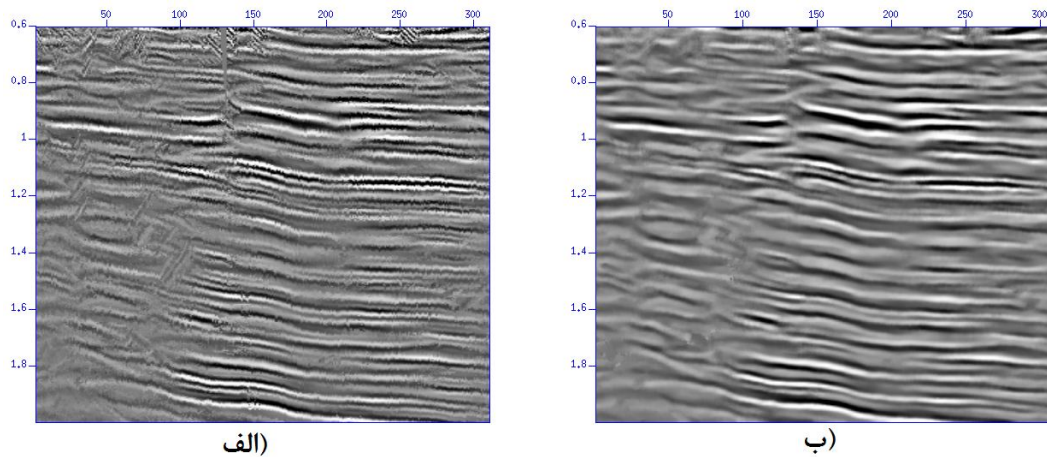
هندریانا^۱ (۲۰۱۰)، طی مقاله‌ای به تحلیل پایداری NIP توموگرافی نسبت به دقت پارامترهای مختلف دخیل در NIP توموگرافی، مثل پارامترهای انجام برانبارش CRS و ... پرداخته است. بر اساس مطالعات ایشان، دقت مدل سرعت نهایی به شدت به پارامتر بازه‌ی CRS وابسته می‌باشد و باید در انتخاب مناسب بازه‌ی CRS دقت کرد. بنابراین در این پایان نامه، برای فراهم کردن قابل اعتمادترین شرایط جهت دستچین کردن نقاط داده از محصولات برانبارش CRS، ابتدا آزمون بازه‌ی CRS روی داده‌ی لرزه‌ای واقعی انجام شده و سپس با مطمئن ترین بازه، اقدام به انجام برانبارش می‌کنیم.

۵-۱-۲- اصلاح یا نرم کردن نشانگرها

طی فرایند برانبارش CRS، نشانگرهای میدان موج برای هر نمونه دورافت صفر به طور جداگانه تعیین می‌شود. اگر چه این امر سبب ایجاد مزایای متعددی مثل به دست آمدن نشانگرهای با

¹ Hendriyana, A.

کیفیت بالا و رفع مشکل کشیدگی سیگنال‌ها، (که یک مشکل در آنالیز سرعت برون راند نرمال است)، می‌شود، اما از آنجایی که این نقاط مستقل از یکدیگرند، ممکن است نوسانات غیرفیزیکی در نشانگرهای در طول رخداد بازتابی بوجود آید. این نوسانات را می‌توان با استفاده از الگوریتم ارائه شده توسط دوونک (۲۰۰۴) از بین برد.



شکل ۵-۱: الف) قسمتی از یک داده لرزه‌ای واقعی برانبارش یافته. ب) همان قسمت ، پس از انجام فرایند نرم کردن نشانگرها

شکل (۵-۱) اثر اصلاح نشانگرها را روی مقطع برانبارش یافته نشان می‌دهد. همچنین با اصلاح نشانگرها با الگوریتم مذکور می‌توان نقاطی را که روی رخدادهای غیر واقعی یا رخدادهای چندگانه قرار گرفته اند، حذف کرد. حذف این نقاط باعث اطمینان هر چه بیشتر از پایداری فرایند توموگرافی می‌شود. کارایی این الگوریتم به میزان نوفه در داده‌ها بستگی دارد. همچنین این فرایند نمی‌تواند مشکل برون راندهای غیر هذلولوی را حل کند.

۵-۱-۳ - دستچین کردن نقاط داده

پس از انجام برانبارش CRS و اصلاح نشانگرهای حاصل از این عمل، برای هر نشانگر، یک مقطع حاصل می‌شود. سپس نوبت به دستچین کردن نقاط داده از روی این مقاطع دورافت صفر می‌رسد. نقاطی که در این مرحله دستچین می‌شوند بعنوان ورودی روش NIP توموگرافی استفاده خواهند شد.

همانطور که قبلا نیز ذکر شد، محل نقاط دستچین شده، مستقل از یکدیگر می‌باشند و نیازی نیست که روی یک افق پیوسته دنبال کنند. البته لازم به ذکر است که این نقاط تا حد امکان لازم است روی رخدادهای واقعی قرار گیرند. عمل دستچین کردن را می‌توان مستقیماً روی مقطع دورافت صفر و یا روی مقطع همدوسی حاصل از برانبارش CRS انجام داد. استفاده از مقطع همدوسی CRS امکان تشخیص مستقیم رخدادهای، که با همدوسی بالا مشخص می‌شوند، فراهم می‌شود و بنابراین نشانگرهای قابل اعتمادتری حاصل می‌شود. اگر در یک داده لرزه‌ای، چندگانه‌ها حذف شده باشند، عمل دستچین کردن نقاط داده ورودی برای انجام توموگرافی را می‌توان انجام داد. برای این منظور، کافیست نقاطی که بر روی مقطع همدوسی دارای مقادیر بیشینه هستند را با در نظر گرفتن یک حد آستانه‌ای برای مقدار همدوسی و همچنین یک فاصله مکانی و زمانی بین نقاط، دستچین کرد. همچنین باید طی این فرایند محدودیت‌هایی روی مقادیر نشانگرهای جنبشی اعمال شود تا از ورود آن دسته نشانگرهایی که دارای مقادیری بیشتر یا کمتر از یک حد آستانه‌ای هستند، به مرحله معکوس‌سازی جلوگیری شود. فاصله مکانی و زمانی پیک‌ها (نقاط دستچین شده) به نحوه پارامتری کردن مدل سرعت یعنی به فاصله‌ی افقی و عمودی گره‌های بی‌اسپلین‌ها بستگی دارد. در جهت افقی باید حداقل دو نقطه روی رخداد بازتابی در فاصله بین دو گره متوالی وجود داشته باشد. این حالت را می‌توان بصورت یک قانون کلی نوشت که تعداد نقطه داده‌ها باید از تعداد پارامترهای مدل بیشتر باشد. در غیراینصورت، ضرایب وزنی مورد استفاده برای منظم‌سازی فرایند معکوس‌سازی باید طی هر تکرار افزایش یابند که موجب وجود آمدن یک مدل سرعت تدریجی غیرواقعی می‌شود. هر چه تعداد نقاط داده بیشتر باشد، پایداری فرایند معکوس‌سازی بهبود می‌یابد، اما زمان محاسبه بصورت خطی با آن افزایش می‌یابد. با این حال، برای محاسبه‌ی تفاوت بین داده‌های اصلی و داده‌های مدل‌سازی شده از نرم L_2 ، رابطه (۳-۹)، استفاده می‌شود که خیلی به داده‌های غیرمطمئن، که باعث ایجاد تفاوت بسیار زیاد داده‌های اصلی و مدل‌سازی شده می‌شود، حساس است. بنابراین برای ممانعت از تاثیر منفی این داده‌ها بر روند توموگرافی، نقاط داده باید بسیار با دقت انتخاب شوند.

در جهت محور زمان، حداقل فاصله بین نقاط دستچین شده، باید از طول سیگنال مربوط به یک رخداد انعکاسی بیشتر باشد. در این صورت اطمینان حاصل می‌شود که دو نقطه‌ی دستچین شده در یک مکان مشخص، در حقیقت مربوط به رخداد‌های بازتابی مجزایی هستند.

۵-۱-۴- اصلاح نقاط دستچین شده

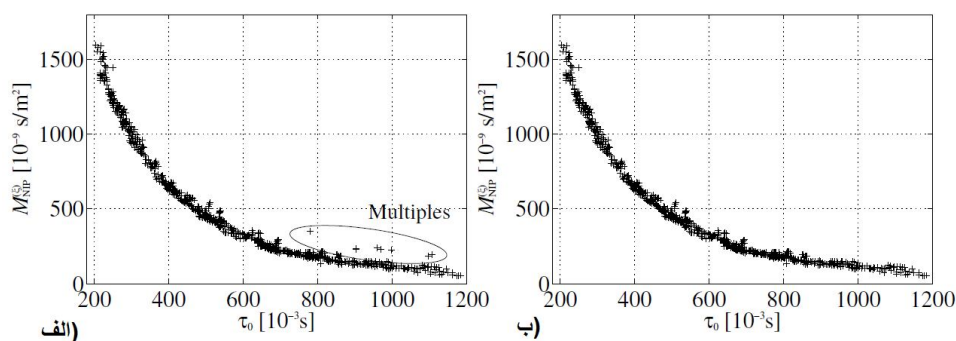
پس از انجام فرایند دستچین کردن نقاط و استخراج نشانگرهای مختلف میدان موج از مقاطع نشانگرهای CRS، نقاط داده حاصل باید نسبت به صحت و دقت آن‌ها بررسی شوند و در صورت نیاز اصلاح گردند. طی این مرحله اصلاح، نقاط داده غیر قابل اعتماد و همچنین نقاط که مربوط به بازتاب‌های چندگانه می‌شوند، شناسایی شده و حذف می‌گردند. این داده‌های غیرقابل اعتماد را می‌توان با رسم پارامترهای مختلف داده در برابر مختصات مکانی آنها (x) شناسایی کرد. از نظر تئوری، نشانگرهای جنبشی میدان موج باید به نرمی در طول رخداد بازتابی تغییر کنند. بنابراین، پارامترهای داده مربوط به نقاطی که روی یک رخداد بازتابی مشترک واقع‌اند، الزاماً باید پیوستگی مشخصی از خود نشان دهند. شکل (۵-۱) بحث اصلاح نقاط دستچین شده را در مورد یک داده واقعی نشان می‌دهد.

در مجموع، نقاط داده با مقادیر $M_{NIP}^{(x)}$ بسیار بالا (بسیار بیشتر از $\frac{s}{m^2} \times 10^{-9} \times 2000$) باید حذف شوند. چرا که این مقادیر باعث کاهش پایداری فرایند معکوس‌سازی می‌شود. مقادیر بالای $M_{NIP}^{(x)}$ مربوط به رخداد‌های انعکاسی کم عمق (زمان‌سیرهای کم) می‌باشد. مسئله مهم در توموگرافی، حذف نقاط داده مربوط به انعکاس‌های چندگانه است. اگر ساختار زمین شناسی زیر سطحی نسبتاً ساده باشد، این نقاط داده را می‌توان به طریقی مشابه روش آنالیز سرعت مرسوم شناسایی کرد (برای مثال، ایلماز، ۲۰۰۱). بر اساس روابط (۲-۸) و (۲-۱۰) می‌توان $M_{NIP}^{(x)}$ را به سرعت برون‌راند نرمال v_{nmo} به صورت زیر، مرتبط کرد.

معادله (۱-۵)

$$M_{NIP}^{(x)} = \frac{2}{t \cdot v_{nmo}^2}$$

از آنجایی که بازتاب‌های چندگانه دارای سرعت‌هایی پایین‌تر (یا مساوی) از بازتاب اصلی هستند، بنابراین $M_{NIP}^{(x)}$ مربوط به چندگانه‌ها بیشتر از مقادیر مربوط به بازتاب اصلی باشد. چنانچه مقادیر $M_{NIP}^{(x)}$ را در برابر زمان سیر یک طرفه $\tau_0 = \frac{t_0}{2}$ رسم شوند (شکل ۲-۵ الف) نقاط داده مربوط به بازتاب‌های چندگانه در بالا و تقریباً موازی روند عمومی نقاط قرار می‌گیرند که به سادگی می‌توان آنها را حذف کرد (شکل ۲-۵ ب).



شکل ۲-۵: حذف نقاط مربوط به چندگانه‌ها با استفاده از سرعت کمتر چندگانه‌ها در برابر بازتابنده‌های واقعی (دوونک، ۲۰۰۴)

در شرایطی که ساختار زمین شناسی زیر سطحی پیچیده باشد، این روش دیگر قابل اعتماد نبوده و روشهای دیگری برای حل مشکل بازتاب‌های چندگانه باید پیدا کرد.

فرایند برانبارش CRS تفاوتی بین بازتاب‌های اولیه و چندگانه‌ها قائل نمی‌شود، بدین معنی که، طی برانبارش CRS با بازتاب‌های چندگانه همانند بازتاب‌های اولیه رفتار می‌شود و برای این سیگنال‌ها همانند سیگنال‌های اولیه نشانگرهای جبهه موج تعریف می‌شود. بنابراین، در داده‌ای که دارای بازتاب‌های چندگانه باشد، در هنگام دستچین کردن نقاط، این بازتابها نیز مورد برداشت قرار می‌گیرند. مقدار نشانگر R_{NIP} برای بازتاب‌های چندگانه مربوط به یک بازتاب اولیه همواره کمتر یا مساوی مقدار

R_{NIP} آن بازتاب اولیه است (دومونگ و گایفسکی^۱، ۲۰۰۸). از این اصل می‌توان برای حذف بازتاب‌های چندگانه از مقطع برانبارش یافته به روش CRS استفاده کرد. در این پایان نامه، به جای حذف چندگانه‌ها، سعی می‌شود که این بازتاب‌های چندگانه مورد برداشت و دستچین قرار نگیرند. از این رو با وارد کردن یک شرط به برنامه‌ی رایانه‌ای دستچین کردن نقاط داده، حالتی را بوجود آورده‌ایم که صرفاً بازتابنده‌هایی که مقدار نشانگر R_{NIP} آنها از مقادیر بازتابنده‌های فوقانی بیشتر باشد، مورد برداشت نقاط قرار گیرند.

۵-۱-۵ - پارامتری کردن مدل سرعت و اعمال محدودیت‌ها روی آن

قبل از شروع فرایند توموگرافی، بایستی مدل سرعت تعریف شود. این امر شامل انتخاب مناسب سری گره‌های بی‌اسپلین‌ها در جهت‌های افقی و چندگانه و مشخص کردن مدل سرعت اولیه می‌باشد. انتخاب مناسب فاصله افقی و قائم بین گره‌های بی‌اسپلین‌ها به میزان پیچیدگی ساختار سرعت انتشار امواج لرزه‌ای در زیر زمین بستگی دارد. همانطور که قبلاً نیز ذکر شد، این فرض که مقادیر $M_{NIP}^{(x)}$ که از داده لرزه‌ای توسط روش برانبارش CRS بدست آمده را می‌توان به مقادیر مدل سازی شده توسط روش دنبال کردن دینامیکی پرتو مرتبط دانست، مستلزم یک مدل سرعت با نرمی مشخص در جهت افقی است. برای اهداف اکتشافی با عمق ۲ تا ۴ کیلومتر، چنانچه بازه‌ی دورافت ۲ کیلومتر یا بیشتر برای برانبارش CRS استفاده شود، فاصله بی‌اسپلین‌های افقی باید حداقل ۵۰۰ متر باشد. اگر چه، الزامی نیست که فاصله‌ی بین گره‌های بی‌اسپلین ثابت باشد، اما هیچ دلیل عملی وجود ندارد که فاصله افقی گره‌ها متغیر در نظر گرفته شوند (دوونک، ۲۰۰۴). با این وجود، در جهت قائم فاصله‌ی بین گره‌های بی‌اسپلین را می‌توان متغیر در نظر گرفت. در اغلب شرایط، قسمت‌های کم عمق محدوده‌ی اکتشافی شامل رخدادهای بازتابی فراوانی می‌شود، در حالیکه رخدادهای بازتابی

¹ Dummong S., Gajewsky D. (2008)

محدودی در زمان سیرهای زیاد قابل مشاهده هستند. بنابراین، برای قسمت‌های کم عمق، فاصله‌ی بین گره‌ها در جهت قائم کمتر از نواحی عمیق‌تر در نظر گرفته می‌شوند. در مجموع، فاصله قائم بین گره‌ها بین ۱۰۰ تا ۵۰۰ متر معقول هستند.

یک نکته مهم در انجام فرایند NIP توموگرافی، تعیین ضرایب وزنی برای کمک به همگرا شدن مدل سرعت طی هر تکرار می‌باشد. دوونک (۲۰۰۴) به تفصیل درباره‌ی این ضرایب بحث کرده است و برای تولید تمام مدل‌های سرعت موجود در این پایان نامه، از مقادیر پیش فرض آنها استفاده شده است.

۵-۲- داده لرزه‌ای واقعی ۲ بعدی

در این بخش، روند کامل فرایند تخمین مدل سرعت بر اساس توموگرافی مبتنی بر نشانگرها (NIP توموگرافی) روی یک داده‌ی لرزه‌ای واقعی اعمال خواهد شد.

۵-۲-۱- اطلاعات کلی داده لرزه‌ای مورد استفاده

مشخصات داده لرزه‌ایی که قرار است مدل سرعت کوچ لرزه‌ایی آن با استفاده از نشانگرهای جنبشی میدان موج تخمین زده شود به صورت زیر است:

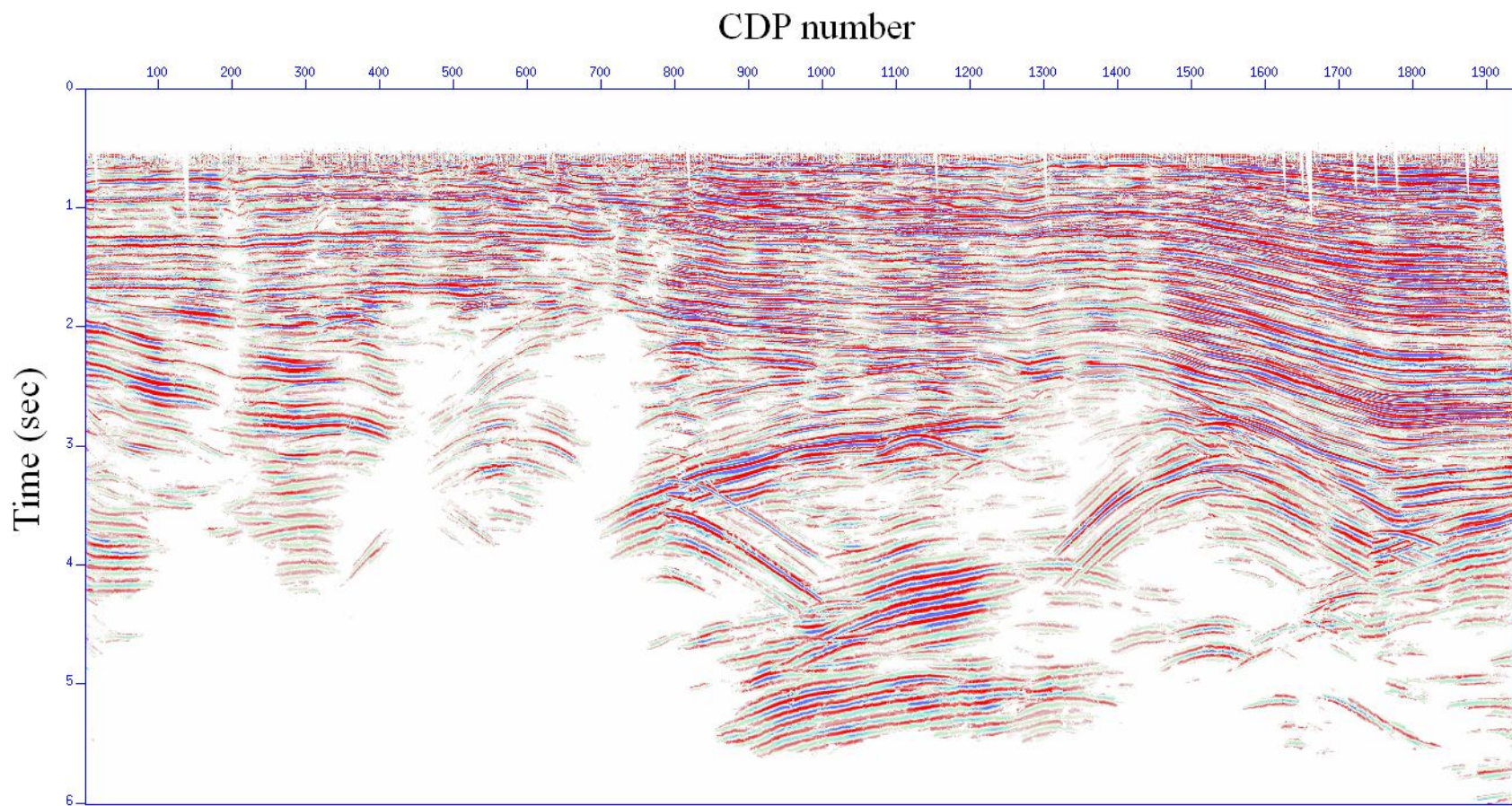
این داده لرزه‌ای شامل ۴۷۹ چشمه با حداکثر تعداد ۹۶ گیرنده به ازای هر چشمه است. فاصله چشمه‌ها ۷۰ متر و فاصله گروه گیرنده‌ها ۳۵ متر می‌باشد. تعداد نقاط میان مشترک (CMP) ۱۹۴۸ برداشت بوده و حداکثر فولد این نقاط برابر ۹۶ است. فاصله‌ی CMPها نیز ۱۸ متر می‌باشد. این داده با نرخ نمونه برداری ۴ میلی ثانیه و طول کل زمانی مقطع ۷.۵ ثانیه برداشت شده است. چشمه لرزه‌ای از نوع دینامیت بوده و حداکثر دورافت بین چشمه و گیرنده نیز ۳۵۰۰ متر می‌باشد. تمام مراحل پیش پردازش مثل تصحیح دامنه، تصحیح استاتیک، واهمامیخت و فیلتر کردن داده، قبلا انجام شده است و در این پایان نامه از داده‌ی پیش از برانبارش پیش پردازش شده استفاده شده است.

۵-۲-۲- برانبارش CRS:

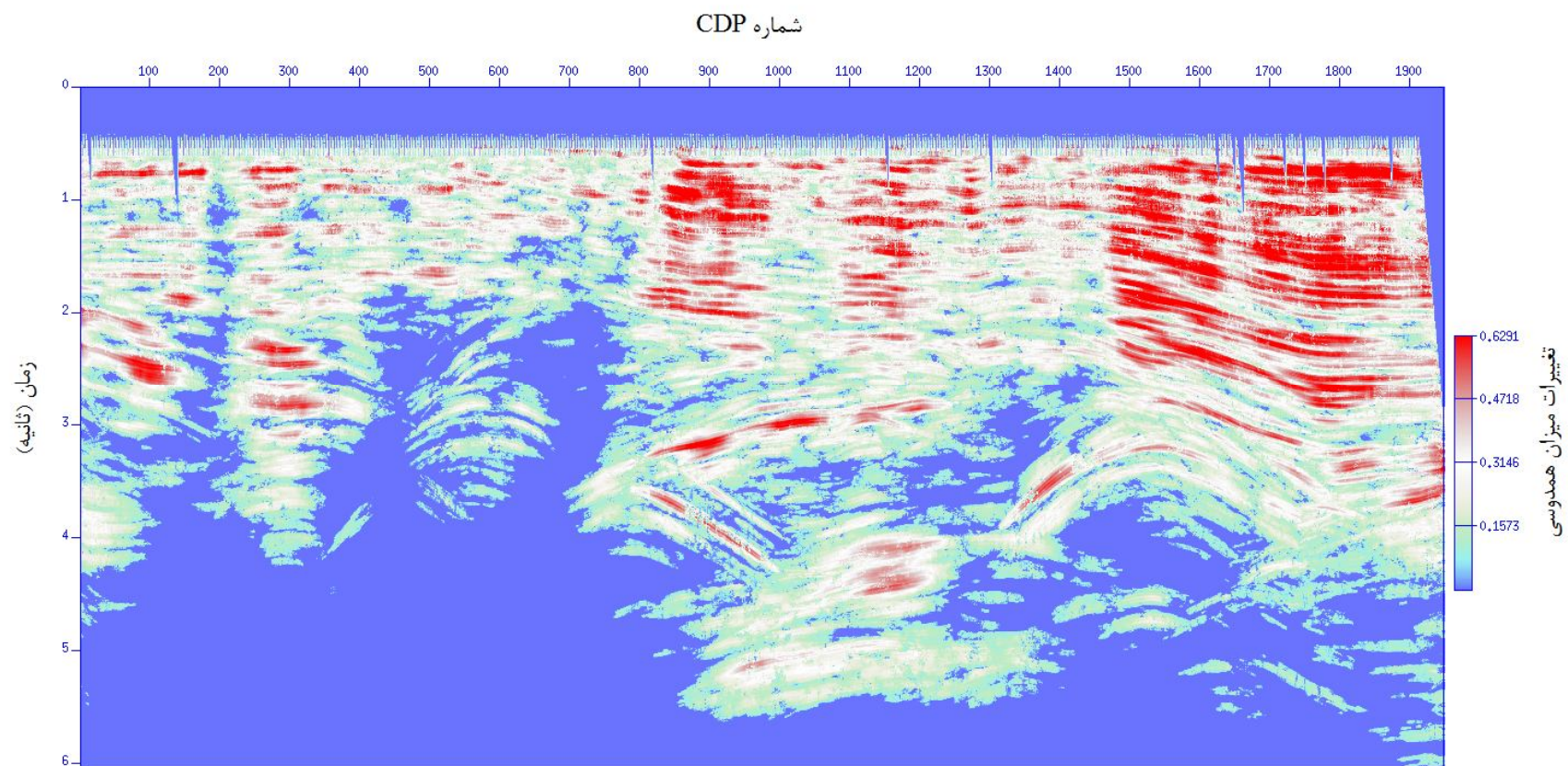
از داده لرزه‌ای prestack پیش پردازش شده مستقیماً برای نقطه شروع تعیین مدل سرعت کوچ با استفاده از روش NIP توموگرافی استفاده می‌شود. قدم اول، انجام برانبارش CRS است. پارامترهایی که به این منظور استفاده شده است بصورت زیر می‌باشد.

بازه‌ی دورافت در برانبارش CRS بطور خطی از دورافت ۲۰۰ متر در زمان ۰.۲ ثانیه تا دورافت ۲۰۰۰ متر در زمان ۱.۲ ثانیه در نظر گرفته شده است. بازه‌ی مربوط به نقطه میانی نیز حداقل ۲۰۰ متر در زمان صفر تا ۵۰۰ متر در زمان‌های دیگر می‌باشد. در این اینجا برای انجام برانبارش CRS از الگوریتم ارائه شده توسط (مان^۱، ۲۰۰۲) به صورت زاویه فرود جبهه موج α و شعاع انحنای جبهه موج R_N, R_{NIP} (رابطه ۲-۹) استفاده شده است. بر اساس اطلاعات موجود، سرعت نزدیک به سطح زمین ۱۸۰۰ متر بر ثانیه استفاده شده است. الگوریتم مذکور شامل ۳ مرحله جستجوی یک پارامتری است. بدین معنی طی هر مرحله یک پارامتر تعیین می‌شود و در مرحله بعد با استفاده از این پارامتر، پارامتر دیگری تعیین خواهد شد. پس از انجام برانبارش CRS، مقاطع زاویه فرود موج، α و شعاع انحنای جبهه موج R_{NIP} نرم می‌شوند. نتایج نهایی برانبارش CRS که برای ورودی روش NIP توموگرافی استفاده می‌شوند، در شکل (۵-۳) آمده‌اند.

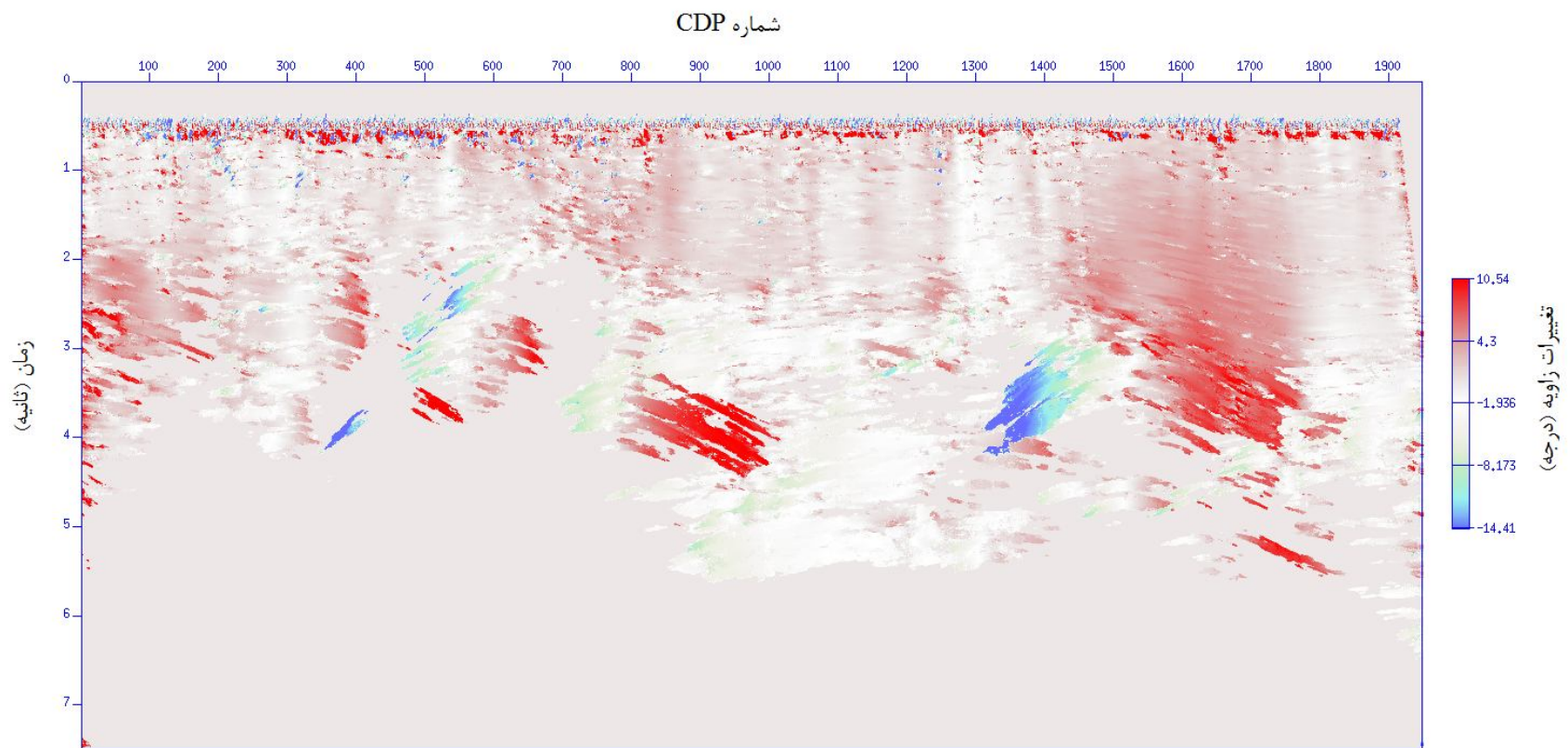
¹¹ Mann J. (2002)



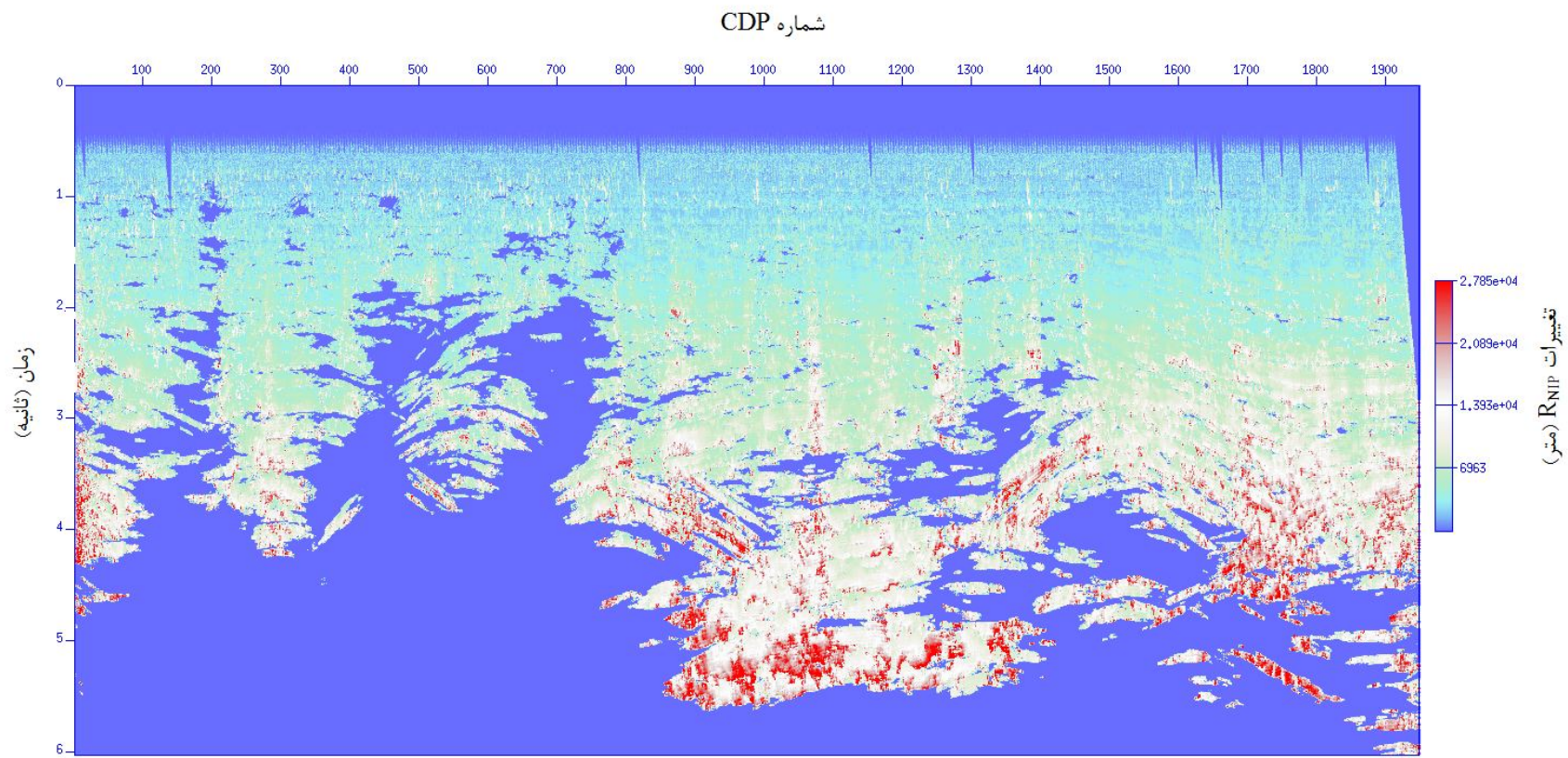
شکل ۳-۵، الف: مقطع برانبارش یافته دورافت صفر به روش برانبارش سطح بازتاب مشترک



شکل ۳-۵، ب: مقطع همدموسی، که از محصولات جانبی برانبارش CRS می‌باشد. محل نقاط داده برای دستچین کردن پارامترهای RNIP و α ، روی این مقطع مشخص می‌شوند.



شکل ۳-۵، ج: مقطع زاویه ورود موج NIP به سطح زمین (نسبت به بردار نرمال بر سطح).



شکل ۳-۵، د: مقطع تغییرات شعاع جبهه موج NIP که در سطح زمین ثبت شده است.

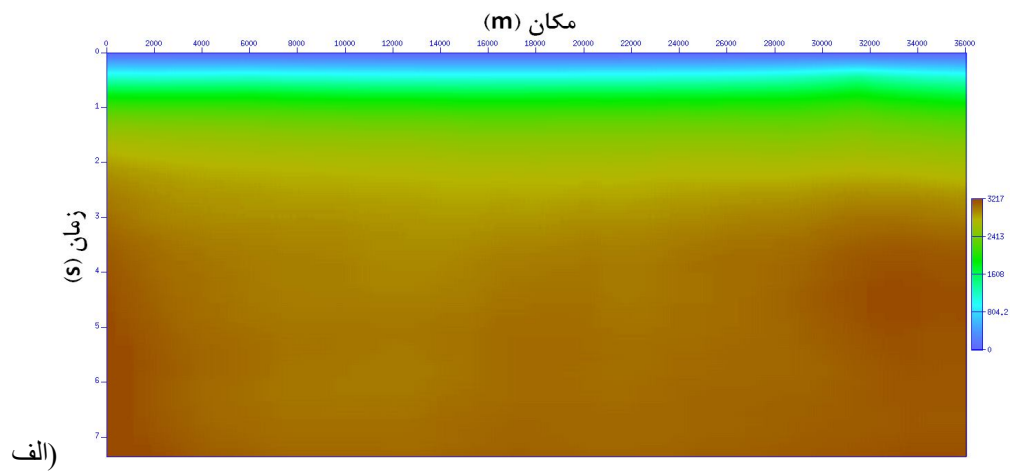
۵-۲-۳- NIP توموگرافی با مدل‌های سرعت اولیه مختلف

پس از بدست آوردن نتایج برآیند CRS، داده‌های ورودی روش NIP توموگرافی را می‌توان از آنها بدست آورد. برای این منظور، از روی مقطع شباهت CRS (شکل ۵-۳، ب)، با در نظر گرفتن یک فاصله‌ی زمانی و مکانی، نقاطی که دارای بیشترین شباهت هستند دستچین می‌شوند. سپس با استفاده از مختصات این نقاط، از روی مقاطع نشانگرها (شکل ۵-۳، ج، د)، داده‌های ورودی مورد نیاز برای انجام توموگرافی استخراج می‌شوند. پس از اصلاح این نقاط و حذف آن نقاطی که روی بازتاب‌های چندگانه قرار گرفته‌اند. تعداد کل ۱۲۲۱۷ نقطه داده دستچین شده‌اند. مدل سرعتی که قرار است تعیین شود را روی یک شبکه دارای $n_x \times n_z = 50 \times 40$ گره بی‌اسپلین با فاصله افقی ثابت ۷۰۰ متر و فاصله قائم ۲۰۰ متر تعریف می‌کنیم. لذا، محل گره‌های مربوط به ضرایب بی‌اسپلین از $x = 0$ متر تا $x = 34300$ متر در جهت افقی و از عمق $z = 0$ تا $z = 7800$ متر در جهت قائم می‌باشد.

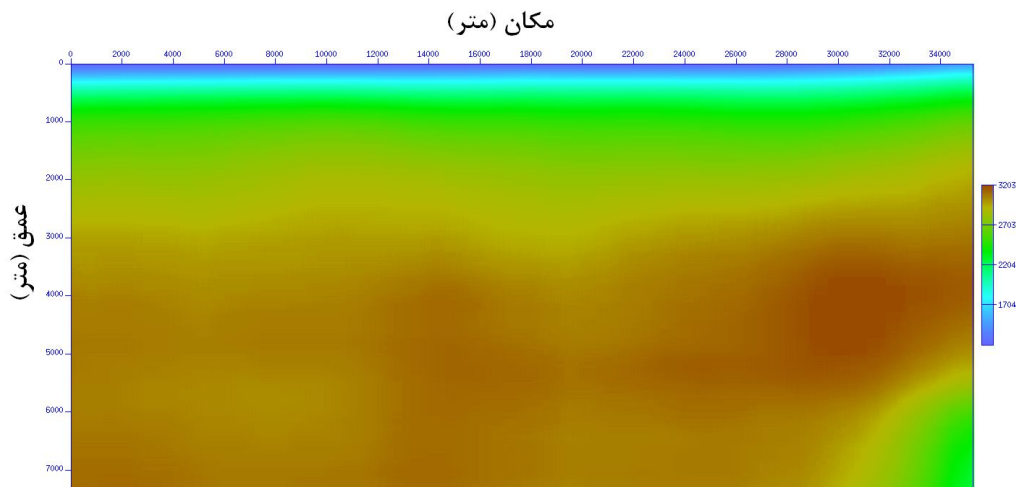
طی انجام فرایند توموگرافی، انواع مختلف محدودیت‌ها که در بخش (۳-۴-۲) به صورت خیلی خلاصه معرفی شدند، روی داده‌های ورودی اعمال می‌شوند. به منظور جلوگیری از ایجاد نوسانات غیرواقعی سرعت در قسمت‌های کم عمق مدل که به علت هم‌دوسی پایین، هیچ نقطه‌ای در آن نواحی دستچین نشده‌اند، باید سرعت نزدیک به سطح برای مدل تعریف کرد که در اینجا به اساس اطلاعات موجود، سرعت نزدیک به سطح ۱۸۰۰ متر بر ثانیه انتخاب شده است. تعیین سرعت نزدیک به سطح به‌عنوان داده‌های اضافی تلقی می‌شوند که باید یک ضریب وزنی روی آنها اعمال شود و همانطور که قبلاً ذکر گردید، برای این ضریب نیز از مقدار پیش فرض آن استفاده می‌شود.

برای شروع فرایند NIP توموگرافی، نیاز به مشخص کردن یک مدل سرعت اولیه است. این مدل اولیه طی هر تکرار به روز رسانی می‌شود تا جایی که با داده‌ی لرزه‌ای ورودی هم‌خوانی نسبی پیدا کند. بدین معنی که میزان خطای بین پارامترهای داده که با استفاده از تکنیک دنبال کردن پرتو روی مدل

نهایی مدل سازی می شوند و پارامترهای اصلی داده به کمتر از یک حد مشخص برسد. برای تهیه مدل سرعت اولیه، از روابط (۴-۱۰) و (۴-۱۱) استفاده می شود. همچنین با استفاده از مقاطع نشانگرهای بهینه شده ی CRS و با استفاده از معادله (۲-۱۱)، مقطع سرعت برانبارش را بوجود آوردیم. برای این منظور، یک برنامه رایانه ای به زبان ++C در محیط لینوکس نوشته شد. مدل سرعت برانبارش برای داده های لرزه ای این فصل در شکل (۵-۴) نشان داده شده است.



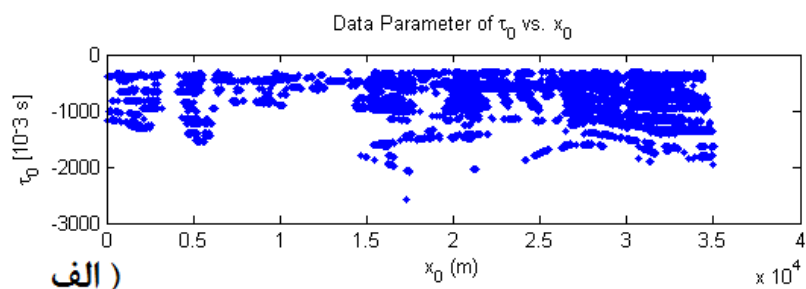
(الف)



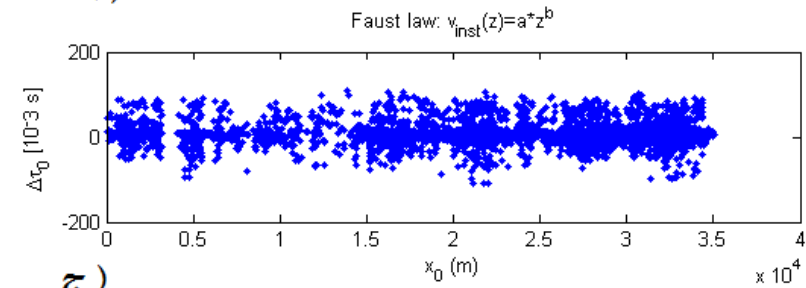
شکل ۵-۴: بالا) مدل سرعت برانبارش در حوزه زمان، به دست آمده از نشانگرهای جنبشی میدان موج. از این مدل در بخش بعد به عنوان یک مدل سرعت اولیه برای توموگرافی استفاده خواهد شد. پایین): مدل سرعت برانبارش شکل ۵-۵، در حوزه عمق

در نهایت، مدل سرعت نهایی که از هر مدل اولیه به دست آمده، در شکل‌های (۵-۸ و ۵-۱۰ و ۵-۱۲ و ۵-۱۴ و ۵-۱۶) نشان داده شده است. در این شکل‌ها سعی شده که از یک مقیاس برای نشان دادن آنها استفاده شود. با این حال ممکن است بعضی جزئیات در آنها، به علت شدت بیشتر رنگ‌های اطراف، به چشم نیایند. همانطور که در بخش‌های قبل نیز اشاره شد، بهترین مدل سرعت، مدلی است که اختلاف بین پارامترهای داده اصلی و پارامترهای داده مدل‌سازی شده نهایی به کمترین حد خود برسد. از اینرو، خطای باقیمانده در داده‌ها برای رابطه‌های مختلف مدل سرعت اولیه و پس از همگرا شدن مدل، در برابر (x_0) در شکل‌های (۵-۵ تا ۵-۷) رسم شده‌اند. شکل (۵-۶ الف) پارامتر τ_0 مشاهده‌ای (که از مقاطع CRS دستچین شده) را نشان می‌دهد. خطای باقیمانده در τ_0 پس از انجام توموگرافی با مدل‌های سرعت اولیه کیارلی-سرا، فاست، سرعت برانبارش، رابطه‌ی خطی و رابطه چند جمله‌ای به ترتیب، در شکل‌های (۵-۵ ب، ج، د، ه و و) نشان داده شده است. با مقایسه این شکل‌ها در نگاه اول، خطای زیادی در τ_0 برای مدل اولیه‌ی فاست مشاهده می‌شود. از طرفی، میزان خطای کمتر و قابل قبول‌تری در استفاده از سرعت برانبارش و رابطه‌ی چند جمله‌ای به عنوان مدل سرعت اولیه، دیده می‌شود. در شکل (۵-۶) نیز خطای باقیمانده در M_{NIP} مدل‌سازی شده در طی توموگرافی، برای هر مدل اولیه، نشان داده شده است. در این شکل نیز همانطور که مشاهده می‌شود، استفاده از سرعت برانبارش و رابطه‌ی چندجمله‌ای برای مدل اولیه، خطای کمتری در پی خواهد داشت. در نهایت، شکل (۵-۷) مقایسه خطای باقیمانده در پارامتر $p^{(x)}$ را برای هر مدل سرعت اولیه، نشان می‌دهد.

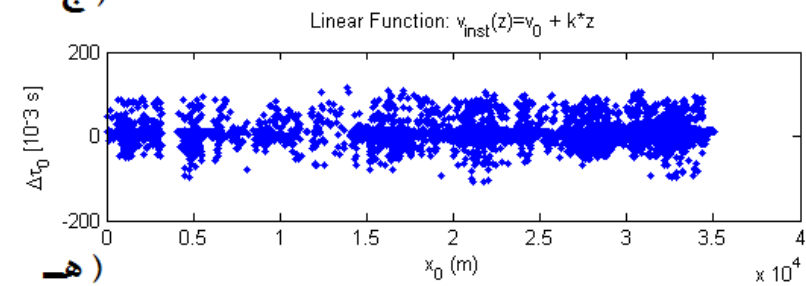
در جدول ۱، برای مقایسه‌ی آماری بین مدل‌های اولیه، میانگین مربعات خطای باقیمانده برای هر مدل اولیه و همچنین تعداد تکرار برای به دست آوردن مدل سرعت نهایی، آورده شده است.



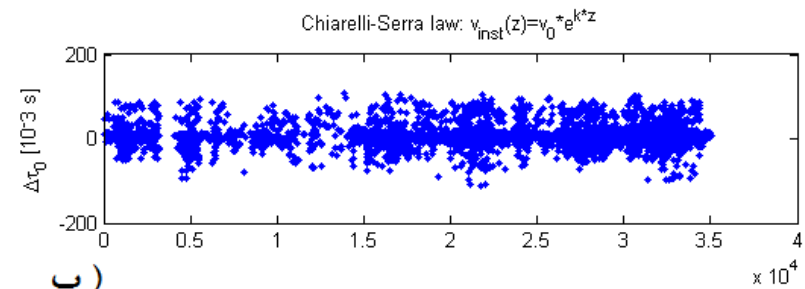
الف)



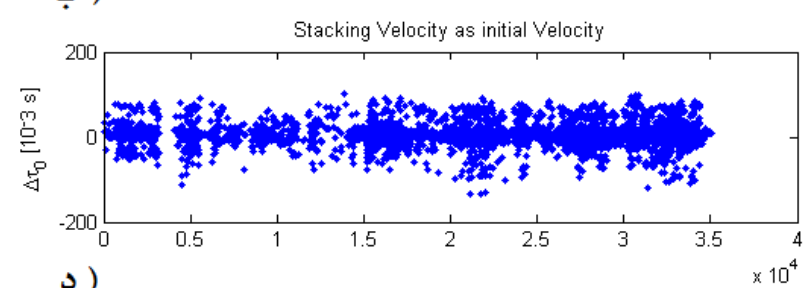
ج)



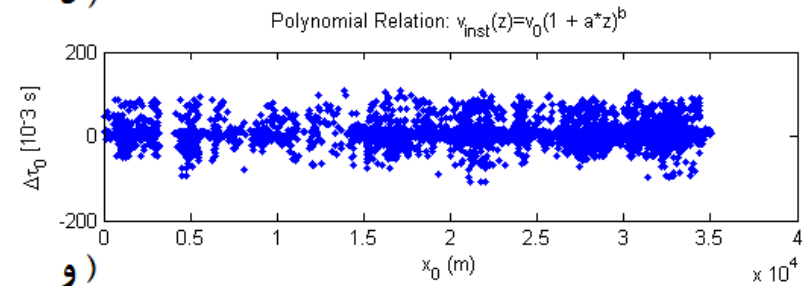
ه)



ب)

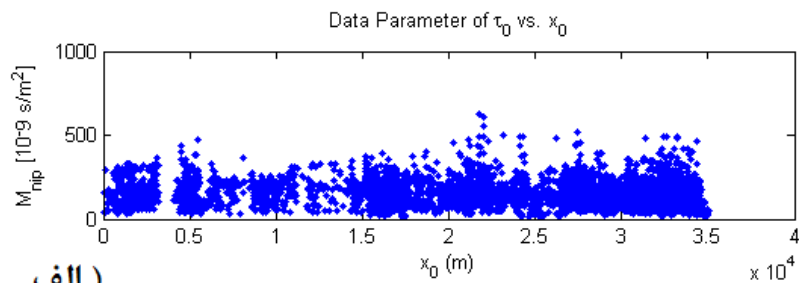


د)

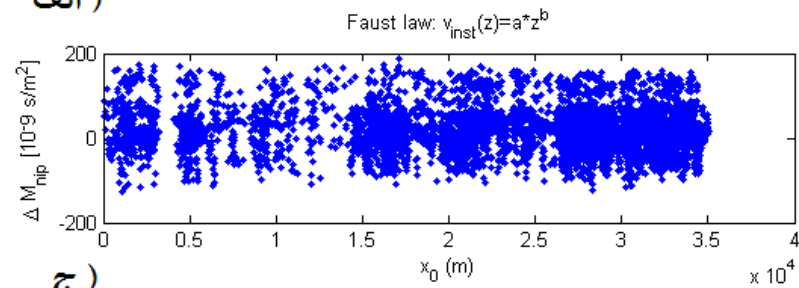


و)

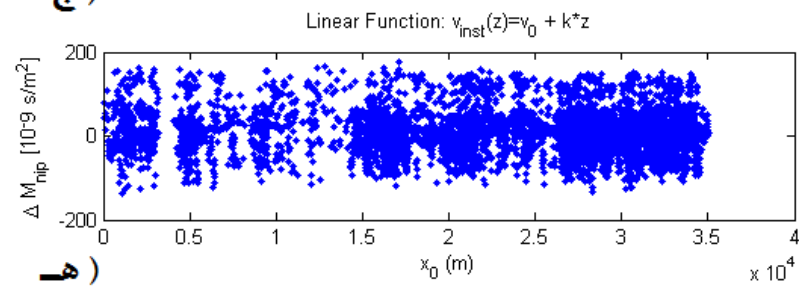
شکل ۵-۵: الف) پارامتر داده τ_0 که از داده‌ها استخراج شده، در برابر X_0 رسم شده است. اختلاف بین τ_0 اصلی و τ_0 مدل سازی شده طی توموگرافی با استفاده از: ب) تابع کیارلی - سرا به عنوان مدل سرعت اولیه و پس از ۱۲ تکرار. ج) تابع فاست به عنوان مدل سرعت اولیه و پس از ۱۲ تکرار؛ د) مدل سرعت برانبارش به عنوان مدل سرعت اولیه و پس از ۸ تکرار؛ ه) تابع خطی به عنوان مدل سرعت اولیه و پس از ۱۱ تکرار؛ و) تابع چند جمله‌ای به عنوان مدل سرعت اولیه و پس از ۱۲ تکرار



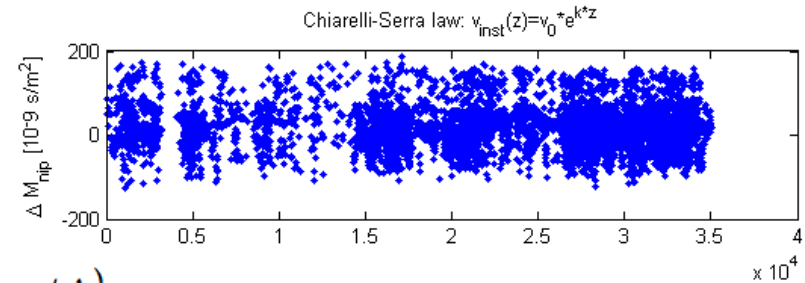
الف)



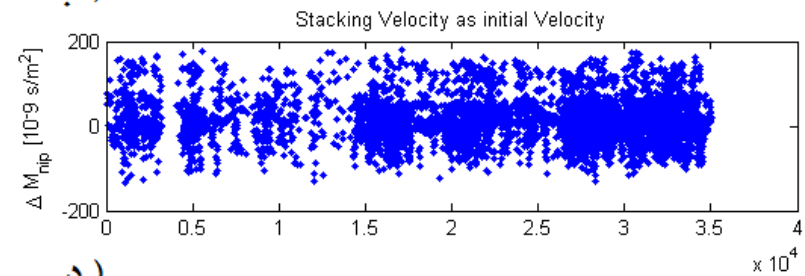
ب)



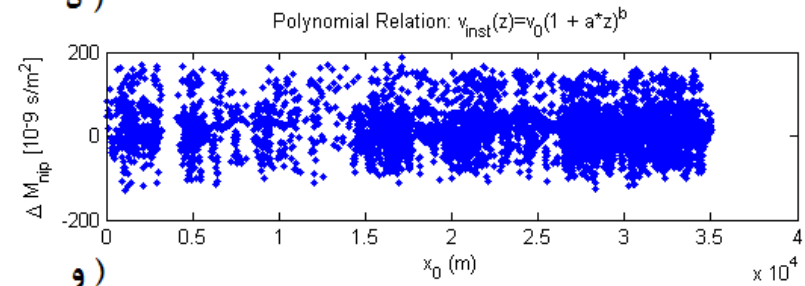
ج)



د)

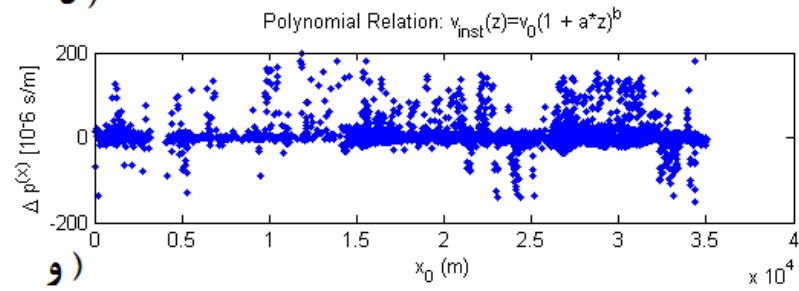
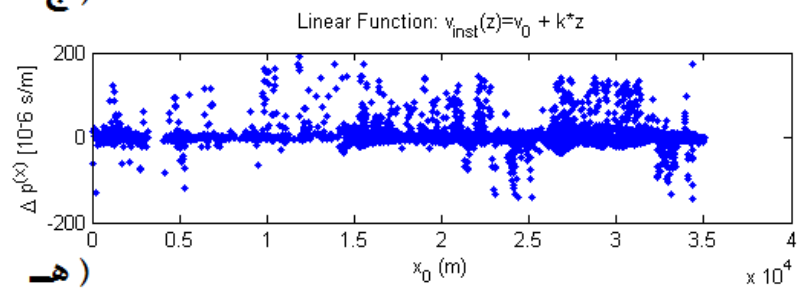
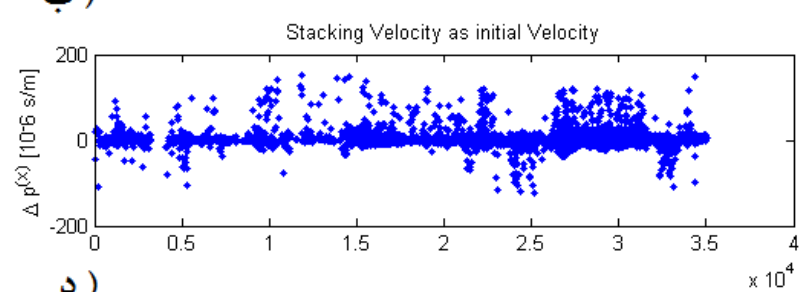
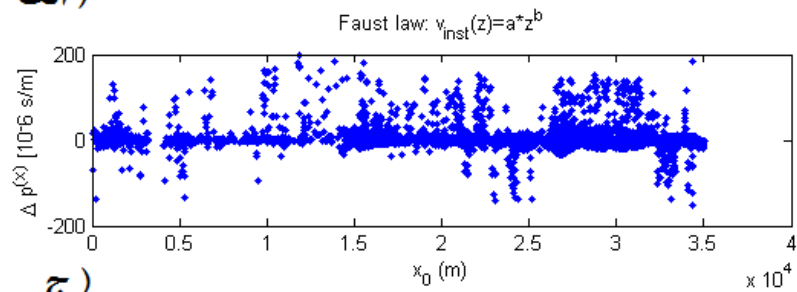
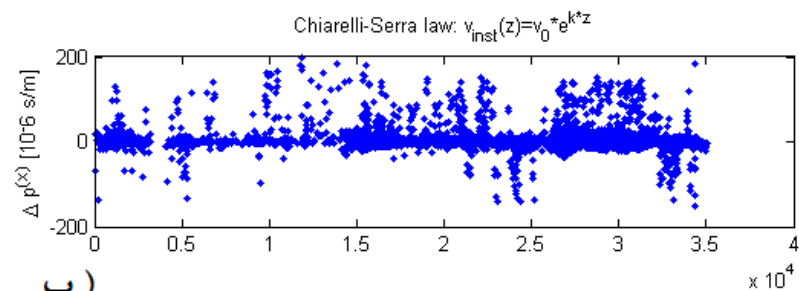
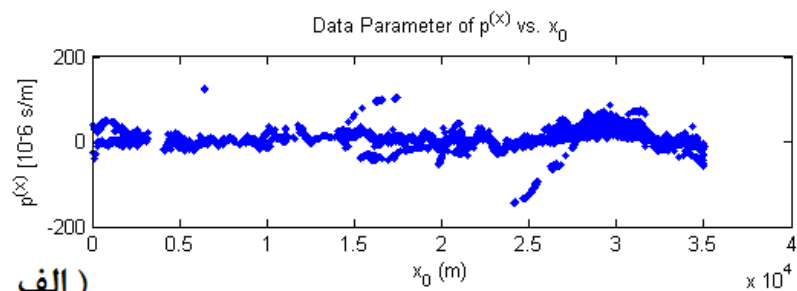


ه)



و)

شکل ۵-۶: الف) پارامتر داده M_{NIP} که از داده‌ها استخراج شده، در برابر X_0 رسم شده است. اختلاف بین M_{NIP} اصلی و مدل سازی شده طی توموگرافی با استفاده از: ب) تابع کیارلی- سرا به عنوان مدل سرعت اولیه و پس از ۱۲ تکرار. ج) تابع فاست به عنوان مدل سرعت اولیه و پس از ۱۲ تکرار؛ د) مدل سرعت برانبارش به عنوان مدل سرعت اولیه و پس از ۸ تکرار؛ ه) تابع خطی به عنوان مدل سرعت اولیه و پس از ۱۱ تکرار؛ و) تابع چند جمله‌ای به عنوان مدل سرعت اولیه و پس از ۱۲ تکرار



شکل ۵-۷: الف) پارامتر داده $p^{(x)}$ که از داده‌ها استخراج شده، در برابر X_0 رسم شده است. اختلاف بین $p^{(x)}$ اصلی و $p^{(x)}$ مدل سازی شده طی توموگرافی با استفاده از: ب) تابع کیارلی- سرا به عنوان مدل سرعت اولیه و پس از ۱۲ تکرار. ج) تابع فاست به عنوان مدل سرعت اولیه و پس از ۱۲ تکرار؛ د) مدل سرعت برانبارش به عنوان مدل سرعت اولیه و پس از ۸ تکرار؛ ه) تابع خطی به عنوان مدل سرعت اولیه و پس از ۱۱ تکرار؛ و) تابع چند جمله‌ای به عنوان مدل سرعت اولیه و پس از ۱۲ تکرار

جدول ۵-۱: مقایسه بین خطای باقیمانده در پارامترهای داده پس از انجام توموگرافی با استفاده از میانگین مربعات خطا. همانطور که مشاهده می‌شود، استفاده از مدل سرعت برانبارش به عنوان مدل اولیه‌ی NIP توموگرافی، خطای کمتری در پی خواهد داشت. علاوه بر آن، در تعداد تکرار کمتری مدل سرعت نهایی همگرا شده است که موجب کاهش زمان پردازش می‌شود.

تعداد تکرار	میانگین مربعات خطای $\Delta p^{(6)}$ ($\times 10^{-3} \frac{s}{m}$)	میانگین مربعات خطای ΔM_{NIP} ($\times 10^{-6} \frac{s}{m^2}$)	میانگین مربعات خطای $\Delta \tau$ ($\times 10^{-3} s$)	
۱۱	۴۶۱ / ۷۸	۲ / ۱۶	۵۱۲ / ۰۲۱	مدل اولیه خطی
۱۲	۵۴۴ / ۴۵	۲ / ۴۲	۴۹۲ / ۰۹	مدل اولیه فاست
۱۲	۵۴۷ / ۵۵	۲ / ۴۳	۴۹۰ / ۴۰۳	مدل اولیه کبارلی- سرا
۱۲	۵۲۲ / ۷۲	۲ / ۳۳	۴۹۴ / ۲۷۴	مدل اولیه چندجمله‌ای
۸	۳۲۳ / ۴	۲ / ۱۶	۴۱۷ / ۲	مدل سرعت برانبارش

۵-۳- کوچ عمقی

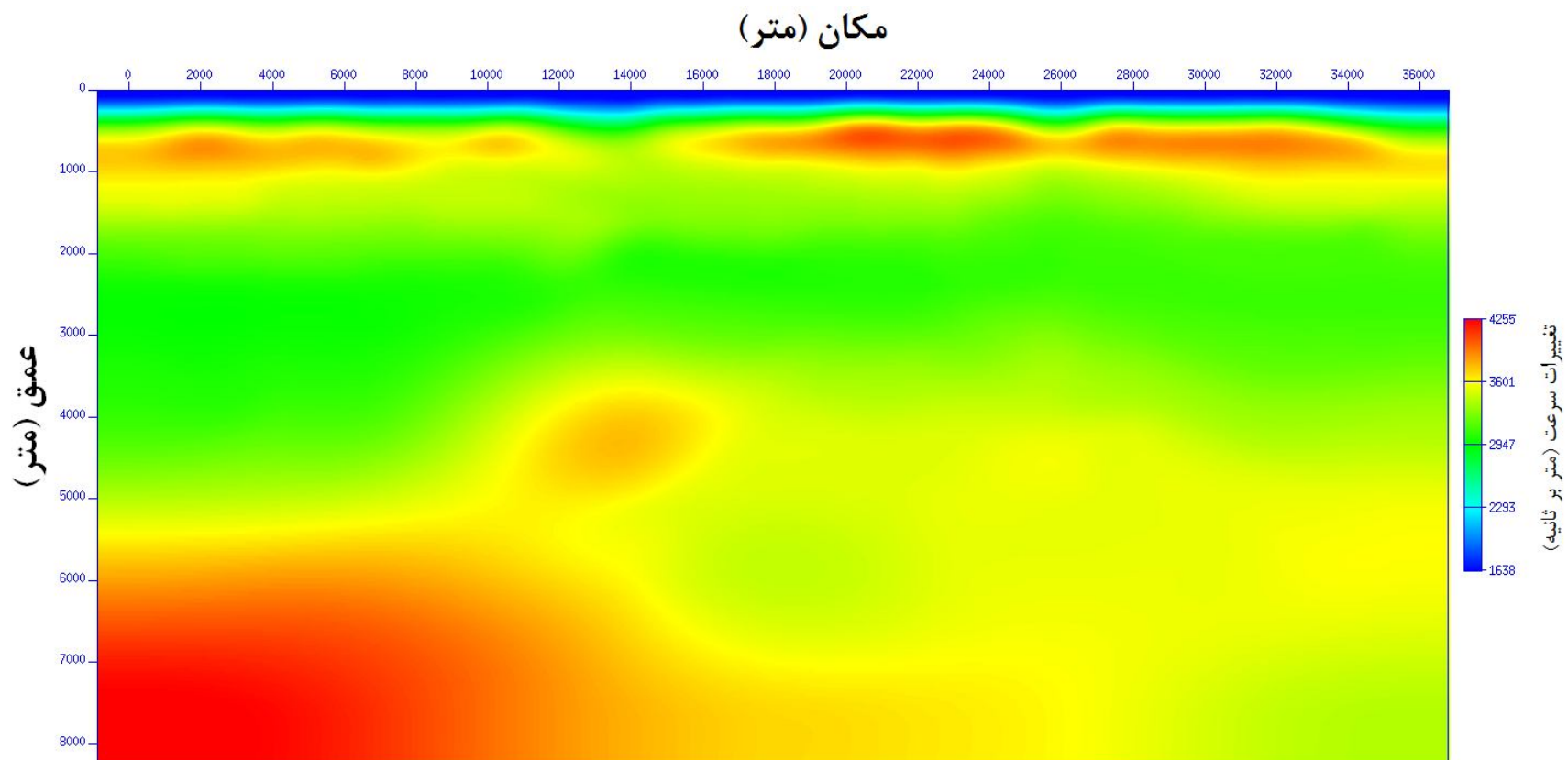
طی فرایند کوچ لرزه‌ای، شیب‌های موجود در داده‌های لرزه‌ای به محل واقعیشان در زیر سطح زمین منتقل می‌شوند. همچنین، انرژی سیگنال‌های پراش یافته به نقطه‌ای که از آن ناشی شده‌اند، متمرکز می‌شوند. برای تبدیل داده‌های لرزه‌ای به یک تصویر ساختاری از زیر سطح زمین، از کوچ پیش از برانبارش عمقی استفاده می‌شود. دقت تصویر حاصله به شدت به دقت مدل سرعت کوچ وابسته است. بهترین مدل سرعت کوچ، مدلی است که بهترین نتیجه را از یک الگوریتم کوچ لرزه‌ای به وجود آورد (روبین، ۲۰۰۳). در این مرحله، کارآمدی مدل‌های سرعت به دست آمده، برای انجام کوچ عمقی مورد بررسی قرار خواهند گرفت. در شکل‌های (۵-۹، ۱۱، ۱۳، ۱۵ و ۱۷) کوچ عمقی پس از برانبارش (Post-SDM) حاصل از مدل‌های سرعت به دست آمده از مدل‌های اولیه مختلف را نشان می‌دهد.

برای انجام کوچ عمقی از الگوریتم کوچ کیرشهف دامنه صحیح^۱ (هرتوک^۲، ۲۰۰۴) استفاده شده است. با مقایسه مقاطع کوچ، مشاهده می‌شود که در قسمت‌هایی که ساختار پیچیده‌تری را شامل می‌شوند (دایره‌های زرد)، استفاده از مدل سرعت برانبارش به عنوان مدل اولیه، بهترین نتیجه را نسبت به بقیه مدل‌ها به وجود آورده است.

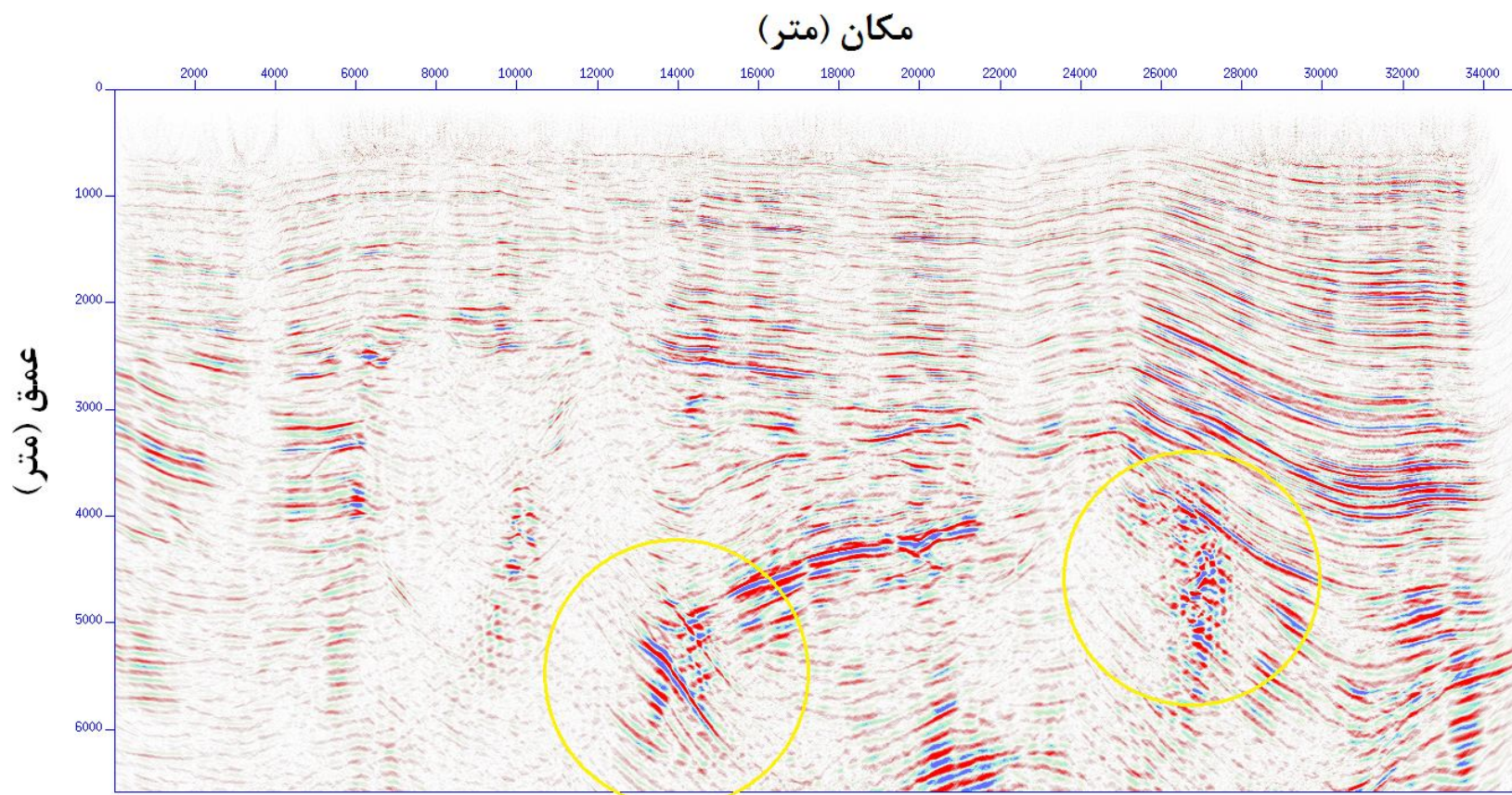
همچنین، با استفاده از مدل‌های سرعت در شکل‌های (۵-۸)، رابطه خطی به عنوان مدل اولیه) و (۵-۱۶، سرعت برانبارش به عنوان مدل اولیه)، کوچ عمقی پیش از برانبارش (Pre-SDM) انجام شده است و به ترتیب در شکل‌های (۵-۱۸) و (۵-۲۰) نشان داده شده است. برای مقایسه، چند نمونه برداشت تصویر مشترک از هر دو مقطع کوچ در شکل‌های (۵-۱۹) و (۵-۲۱) نشان داده شده است. با مقایسه CIGها با هم، مشاهده می‌شود که در CIG مربوط به مدل سرعت حاصل از سرعت برانبارش، رخداد‌های بازتابی در عمق‌های بین ۴۰۰۰ تا ۵۰۰۰ متری خیلی بهتر به حالت افقی درآمده‌اند. به عبارت دیگر مقدار سرعت در این نواحی، دقیقتر از مدل سرعت حاصل از رابطه‌ی خطی می‌باشند.

¹ True amplitude Kirchhoff migration

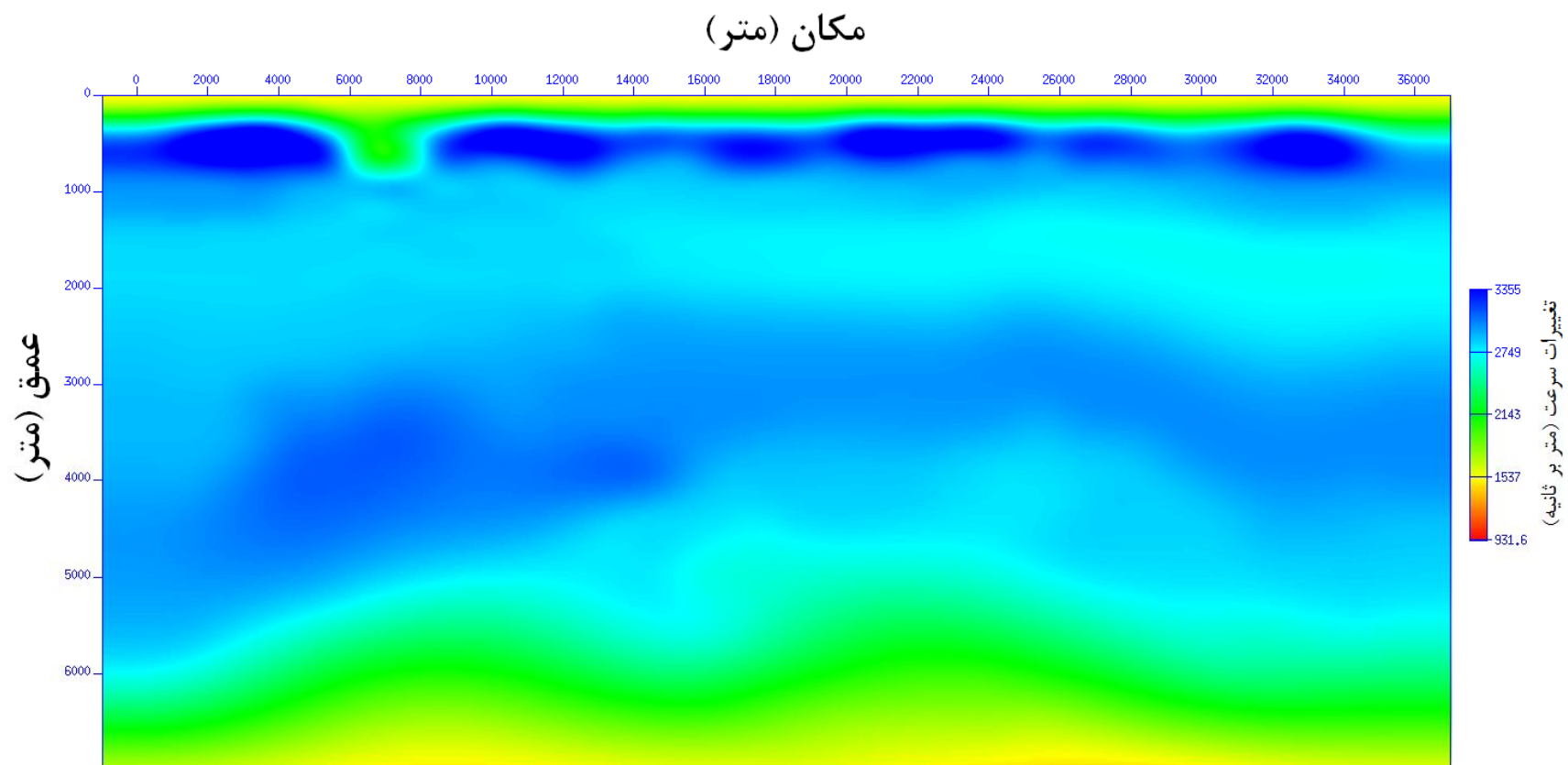
² Hertweck



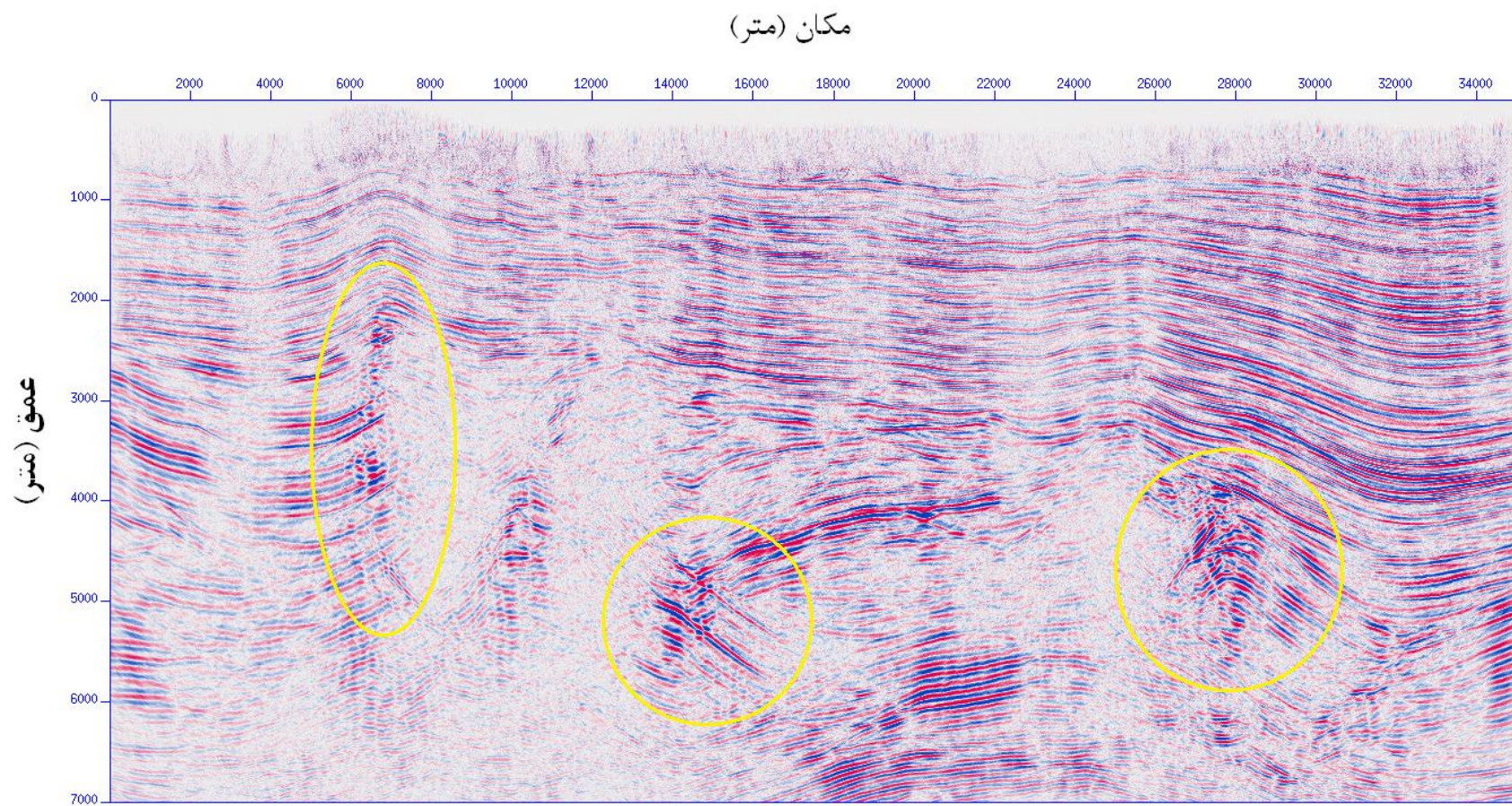
شکل ۵-۸: مدل سرعت کوچ حاصل از NIP توموگرافی با استفاده از رابطی خطی برای تعیین مدل سرعت اولیه.



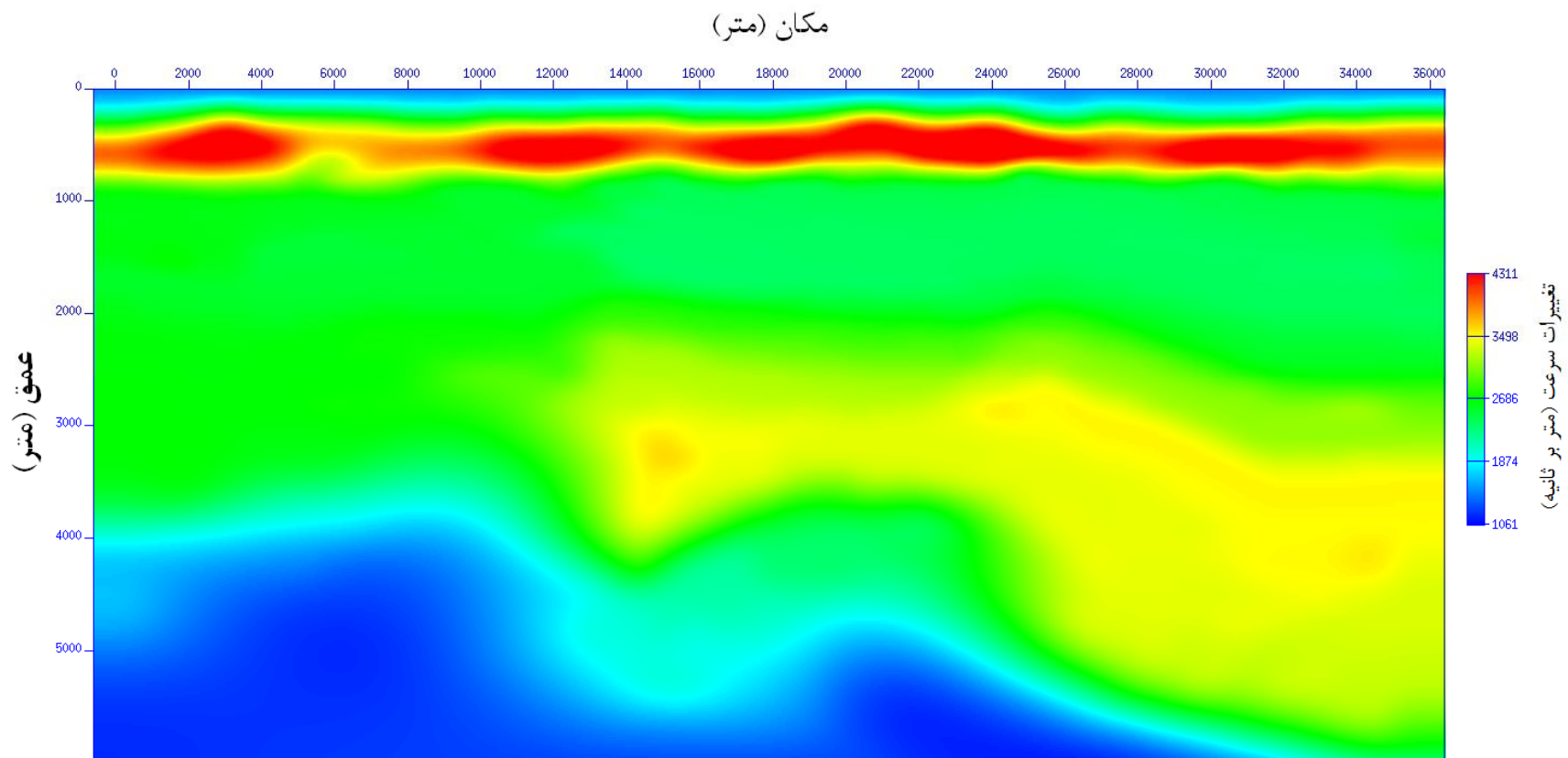
شکل ۵-۹: مقطع کوچ پس از برانبارش (Post-SDM) با استفاده از مدل سرعت شکل (۵-۸)



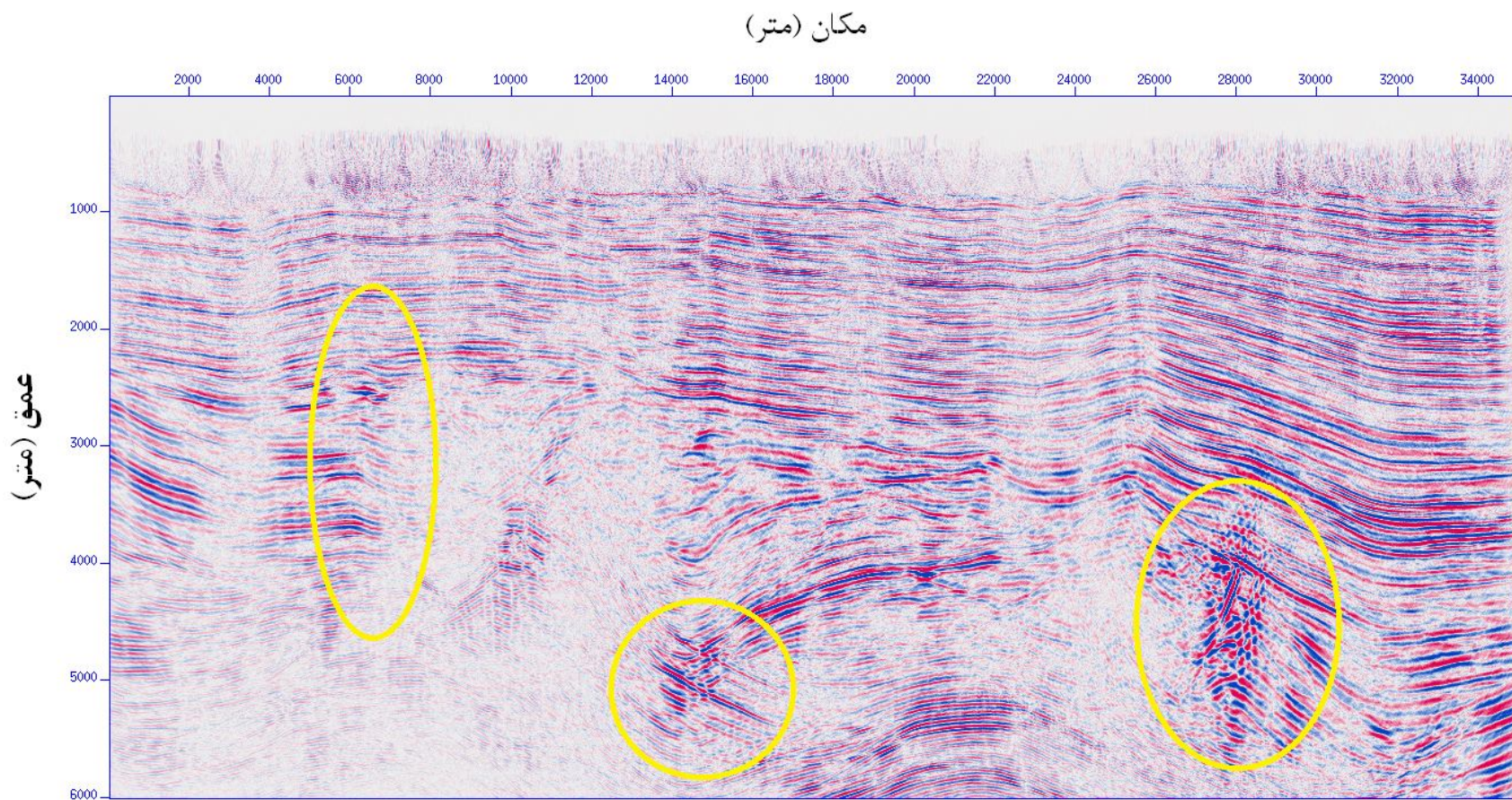
شکل ۱۰-۵: مدل سرعت کوچ حاصل از NIP توموگرافی با استفاده از رابطه‌ی فاست برای تعیین مدل سرعت اولیه.



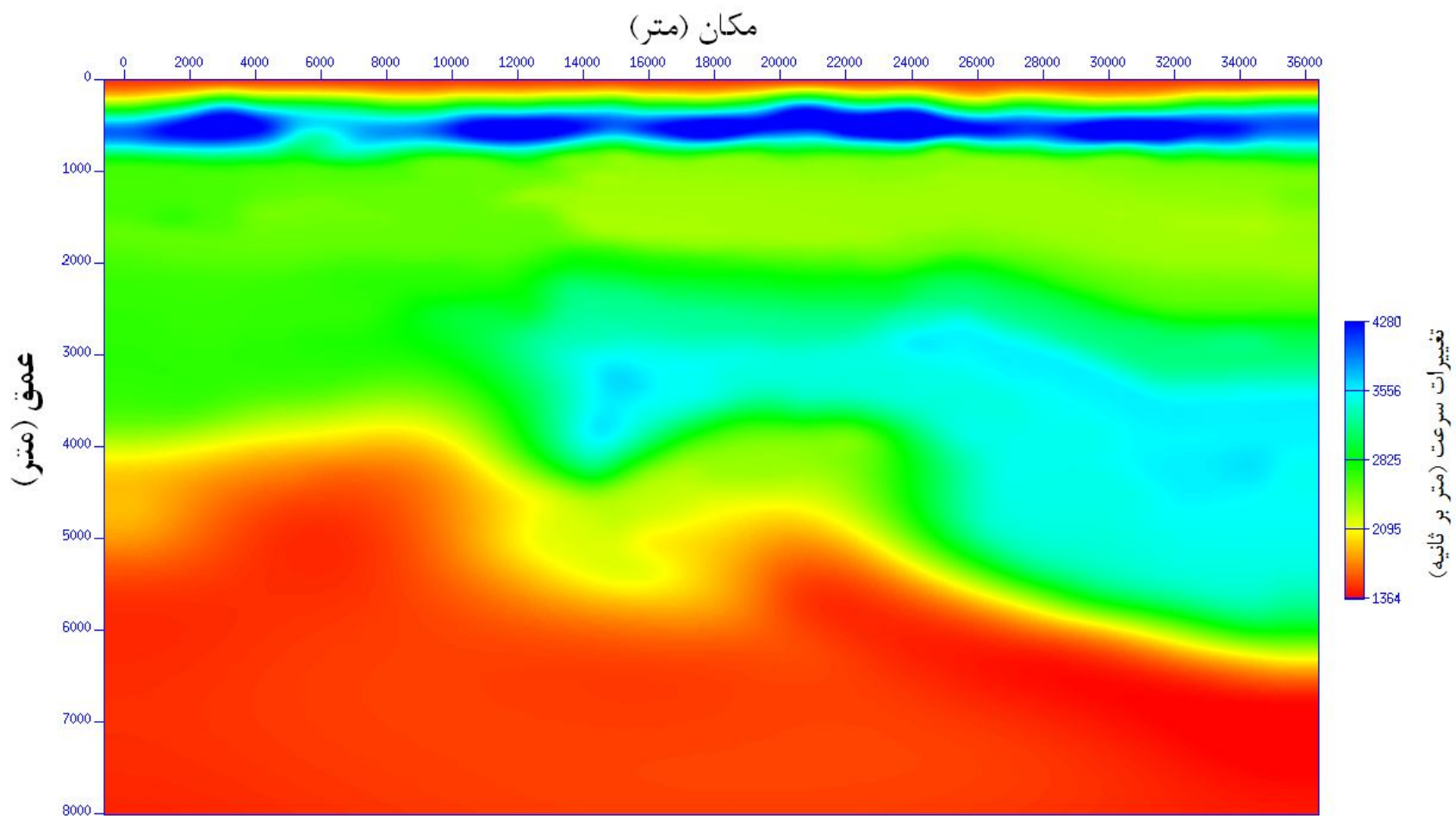
شکل ۵-۱۱: مقطع کوچ پس از برانبارش (Post-SDM) با استفاده از مدل سرعت شکل (۵-۱۰)



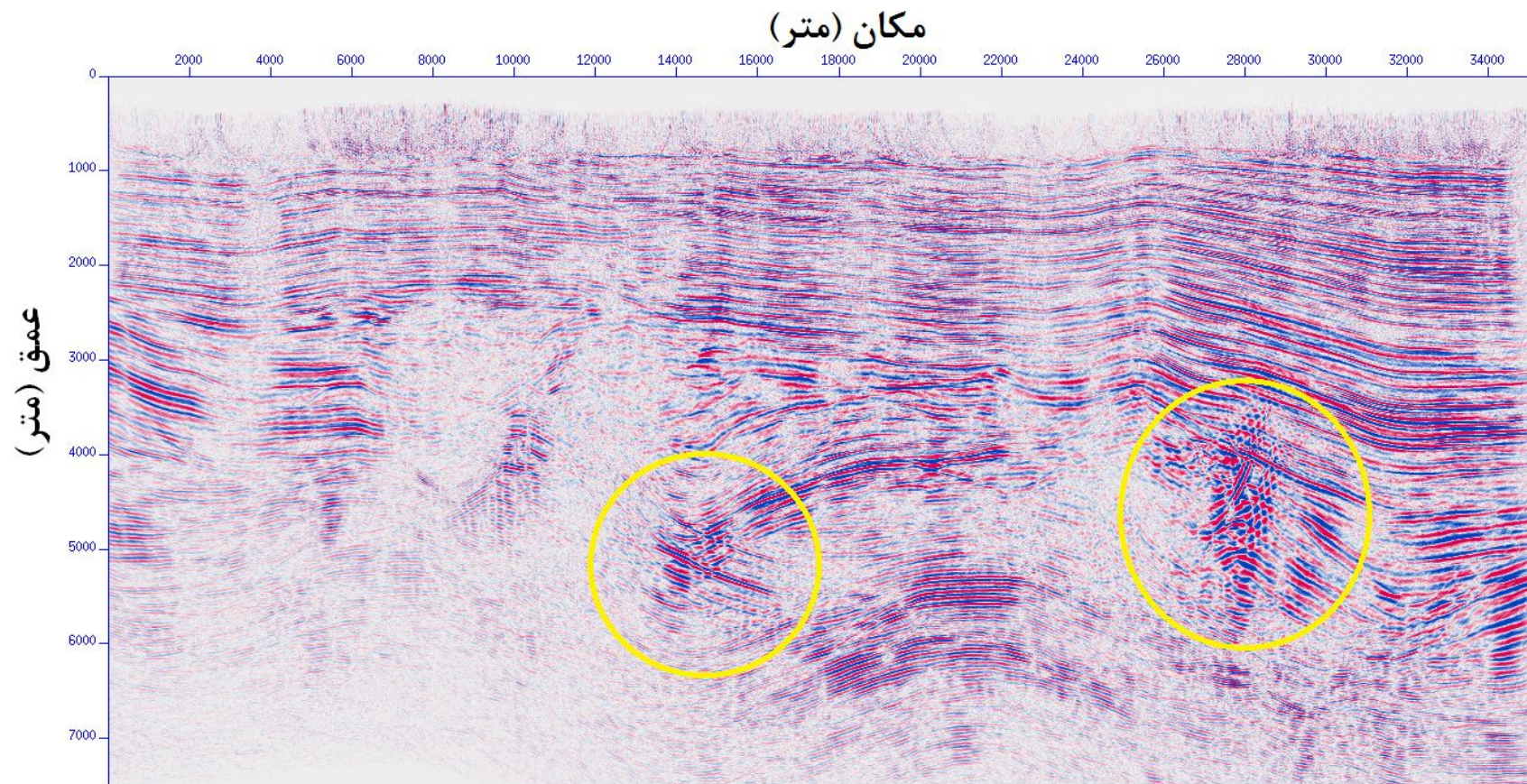
شکل ۵-۱۲: مدل سرعت کوچ حاصل از NIP توموگرافی با استفاده از رابطه‌ی کبارلی-سرا برای تعیین مدل سرعت اولیه.



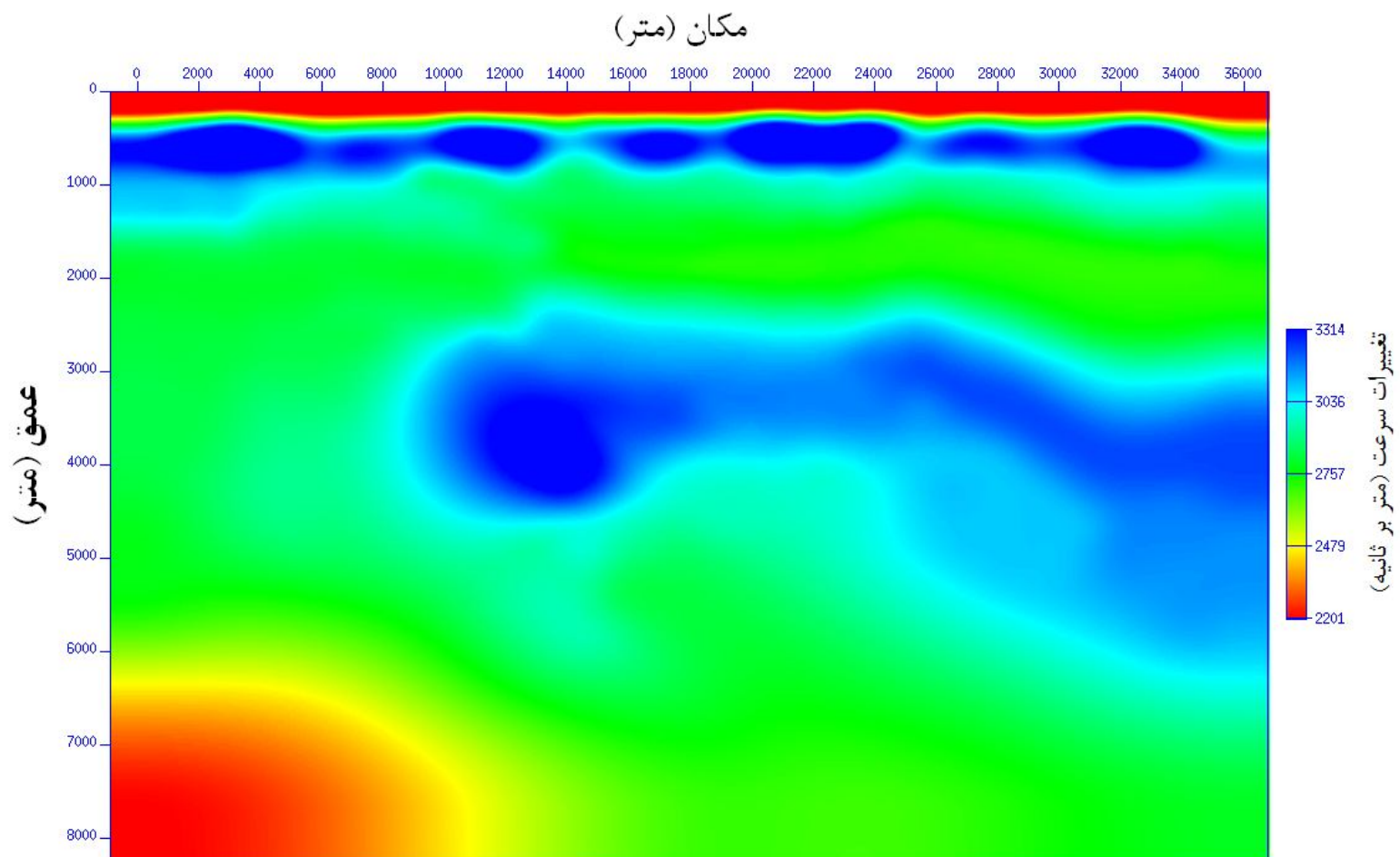
شکل ۵-۱۳: مقطع کوچ پس از برانبارش (Post-SDM) با استفاده از مدل سرعت شکل (۵-۱۲)



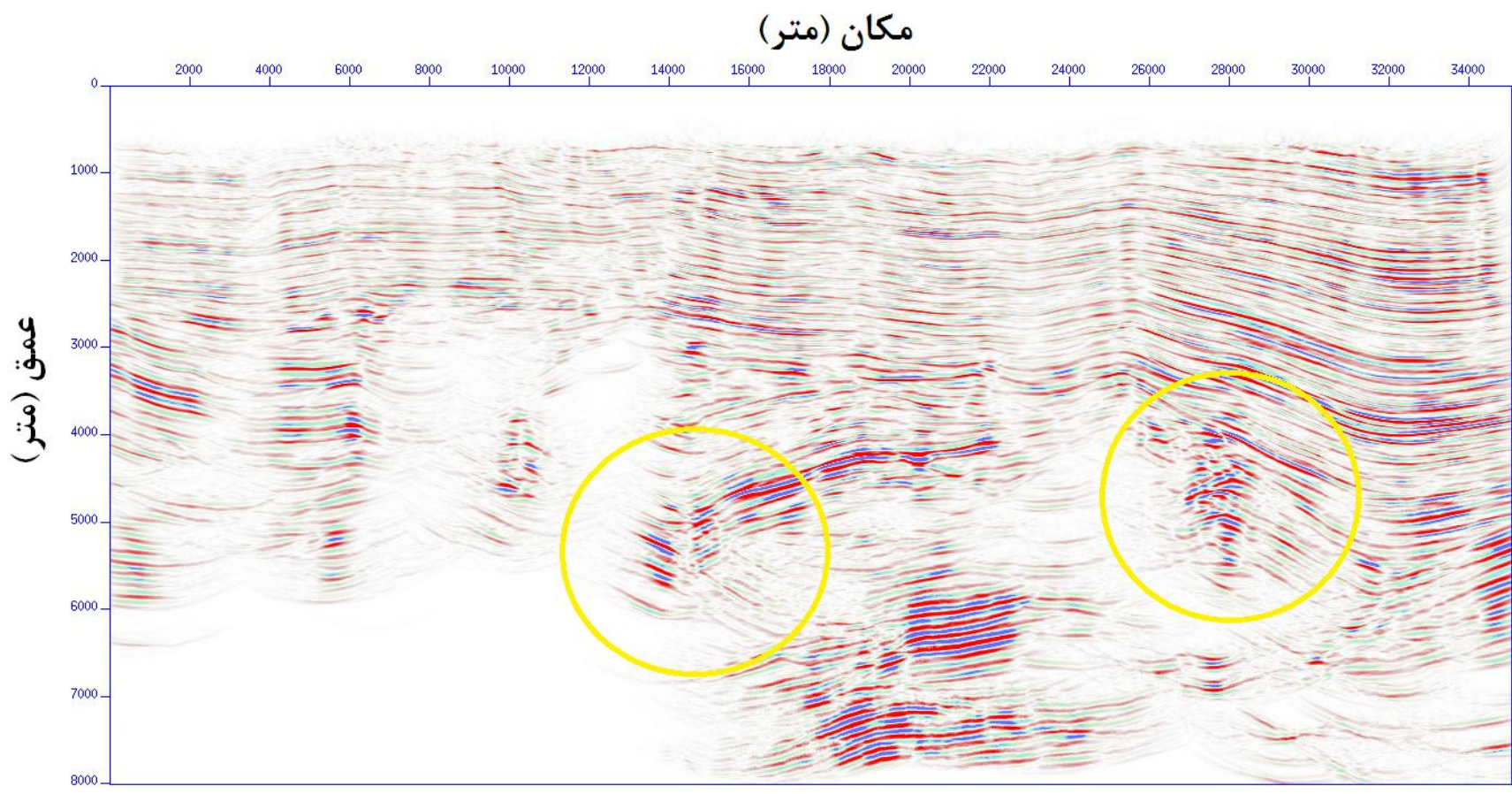
شکل ۵-۱۴: مدل سرعت کوچ حاصل از NIP توموگرافی با استفاده از رابطه‌ی چندجمله‌ای برای تعیین مدل سرعت اولیه



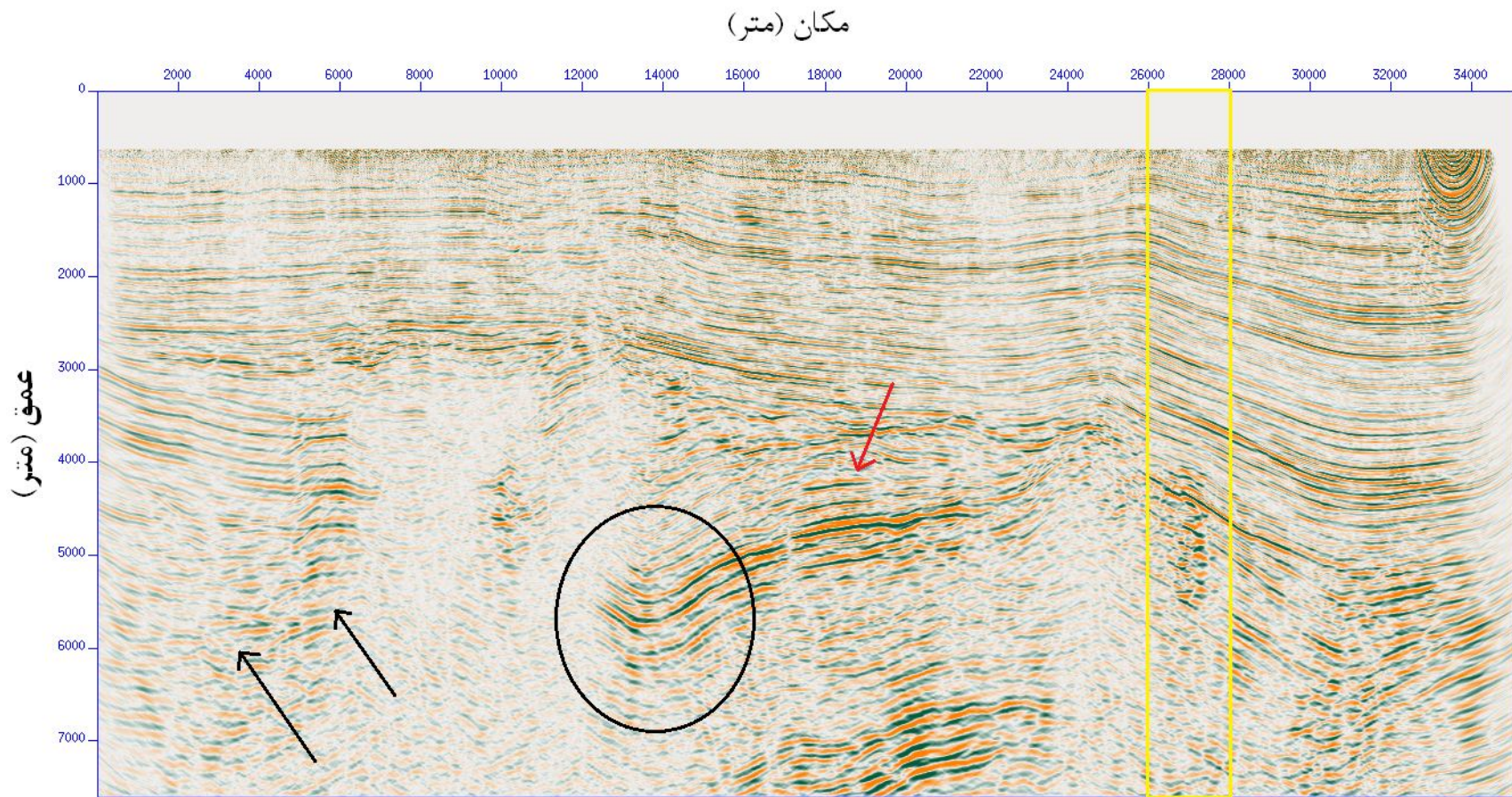
شکل ۵-۱۵: مقطع کوچ پس از برانبارش (Post-SDM) با استفاده از مدل سرعت شکل (۵-۱۴)



شکل ۵-۱۶: مدل سرعت کوچ حاصل از NIP توموگرافی با استفاده از مدل سرعت برانبارش برای تعیین مدل سرعت اولیه

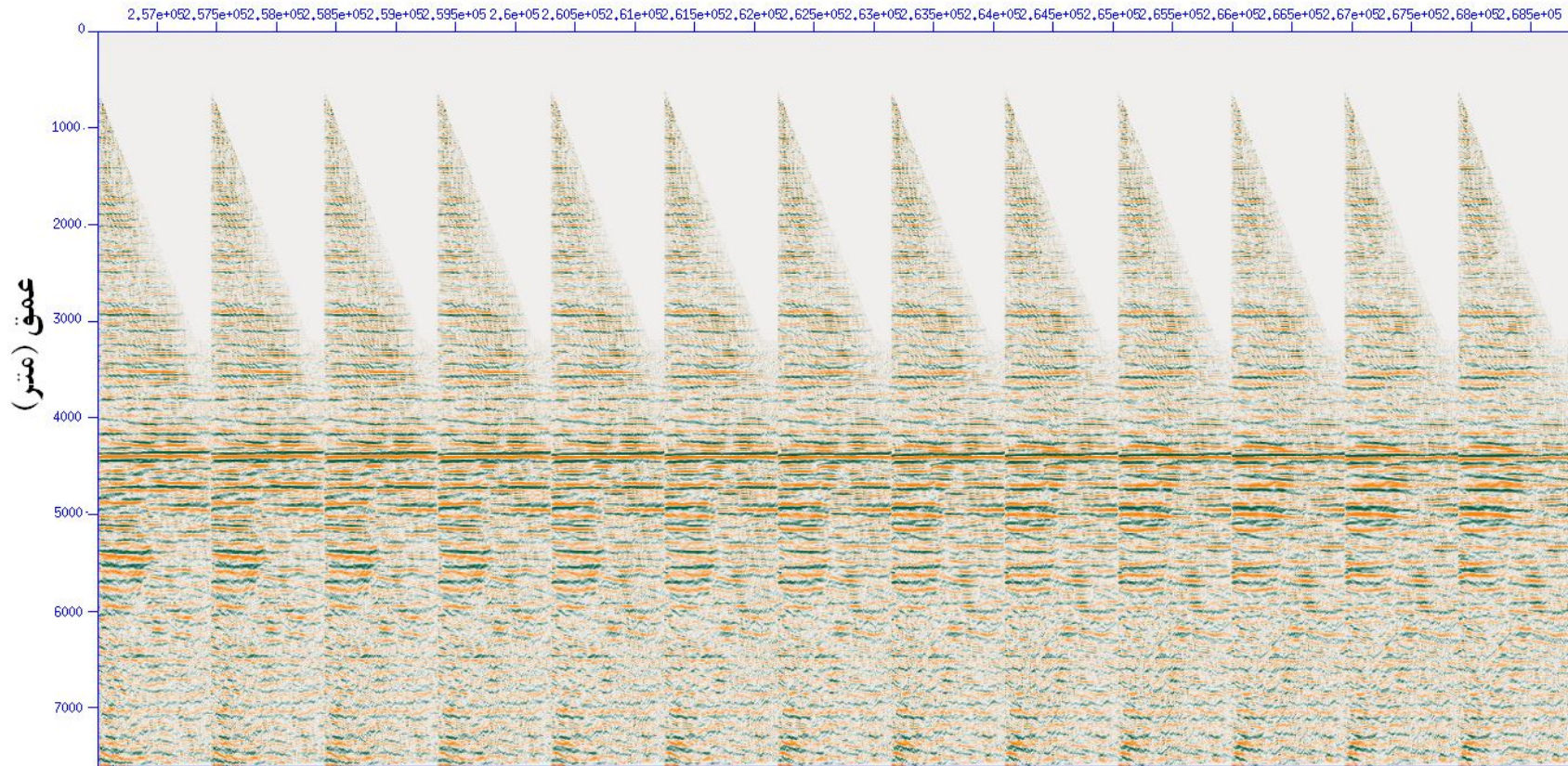


شکل ۵-۱۷: مقطع کوچ پس از برانبارش (Post-SDM) با استفاده از مدل سرعت شکل (۵-۱۶)

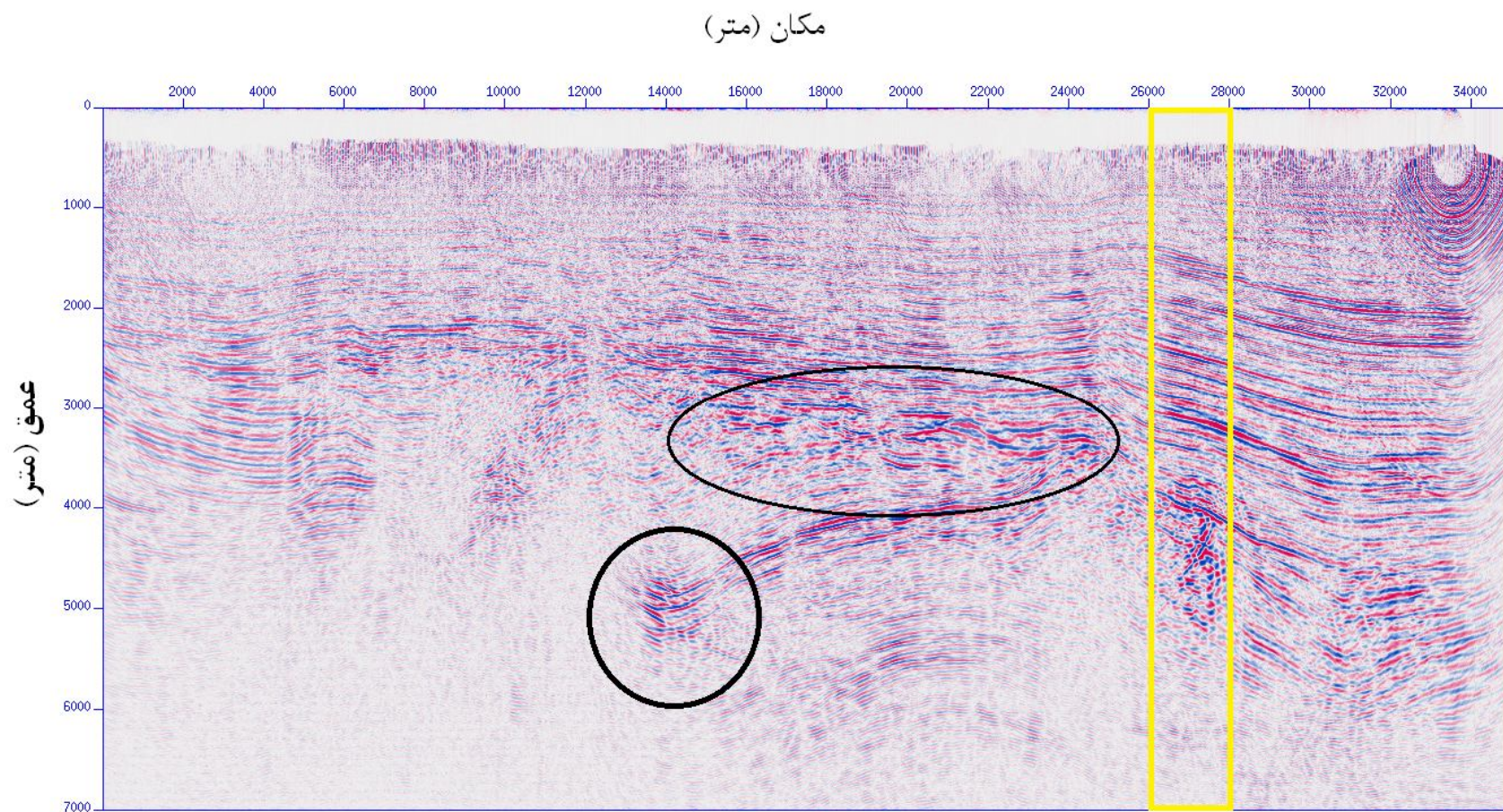


شکل ۵-۱۸: مقطع کوچ عمقی پیش از برانبارش (Pre-SDM) با استفاده از مدل سرعت (۵-۱۶) و استفاده از سرعت برانبارش برای مدل اولیه

شماره ردلرزه

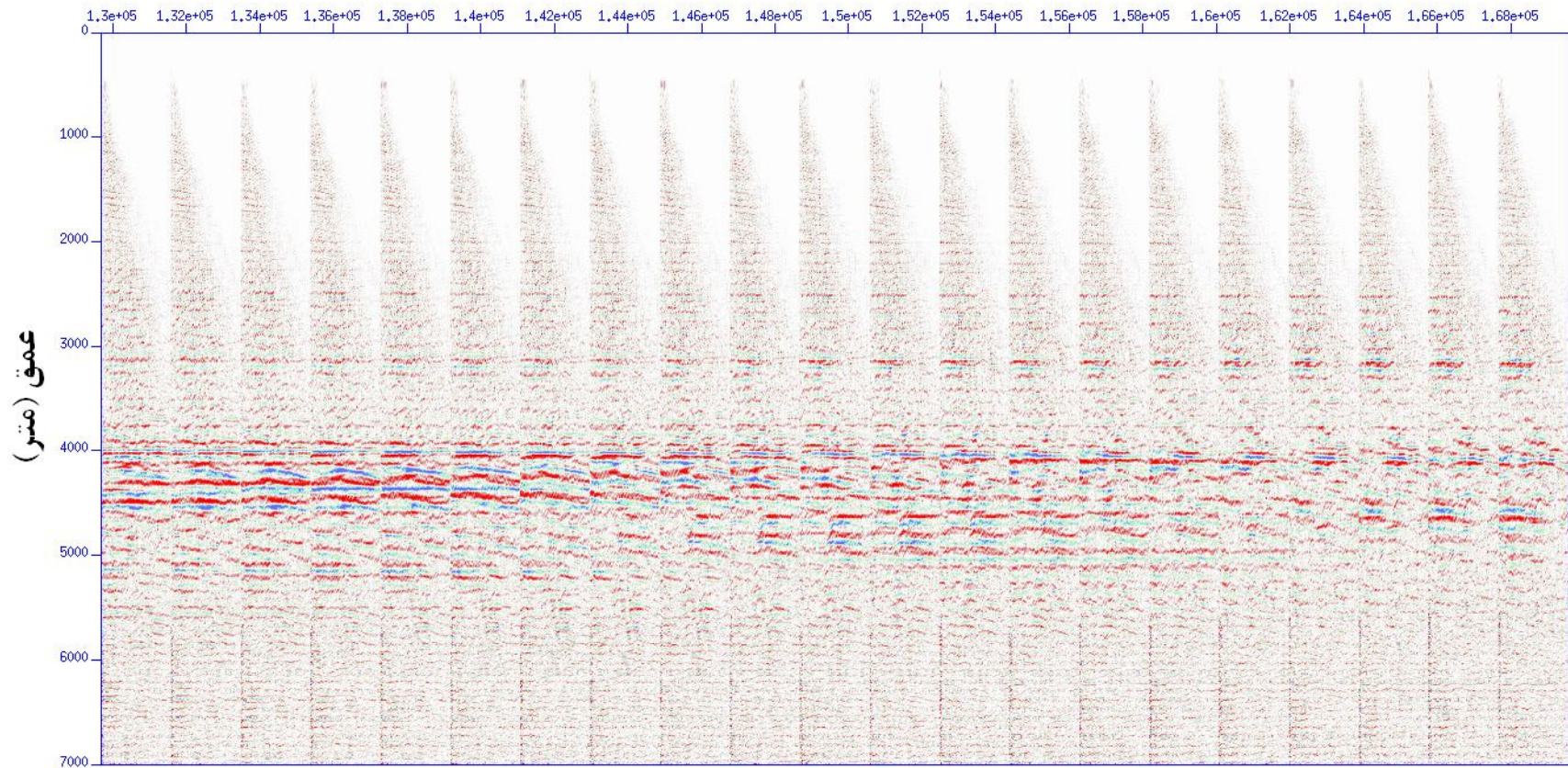


شکل ۵-۱۹: چند نمونه برداشت تصویر مشترک از ناحیه‌ای که با رنگ زرد در شکل (۵-۱۸) مشخص شده است.



شکل ۵-۲۰: مقطع کوچ پیش از برانبارش (Pre-SDM) با استفاده از مدل سرعت شکل (۵-۸) که از مدل اولیه خطی به دست آمده است.

شماره ردلرزه



شکل ۲۱-۵: چند نمونه برداشت تصویر مشترک از ناحیه‌ای که با رنگ زرد در شکل (۲۰-۵) مشخص شده است.

گفتار هفتم

نتیجه گیری و پیشنهادات

داده‌های ورودی روش NIP توموگرافی از روی مقاطع نشانگرهای میدان موج که از محصولات برانبارش CRS می‌باشند، به دست می‌آید. دستچین کردن نقاط از روی این مقاطع بر اساس میزان همدوسی انجام می‌شود. بدین معنی که، رخدادهای بازتابی دارای مقدار همدوسی بیشتر از یک حد مشخص، دستچین می‌شوند. چنانچه در قسمت‌هایی از مقطع همدوسی، مقدار آن به هر دلیلی پایین باشد، نقاط داده‌ی کمی از آن قسمت‌ها دستچین می‌شود و یا مقادیر نقاط دستچین شده قابل اعتماد نخواهد بود. بنابراین، در مدل سرعت نهایی مقدار سرعت در این قسمت‌ها نیز قابل اعتماد نمی‌باشد. در این حالت دقت مدل سرعت اولیه از اهمیت ویژه‌ای برخوردار است. یعنی هرچه مدل سرعت اولیه به مدل سرعت نهایی نزدیک‌تر باشد، علاوه بر کمتر شدن زمان معکوس سازی، دقت مدل سرعت نهایی در قسمت‌های مذکور، بهبود خواهد یافت. در روش NIP توموگرافی فرض شده که سرعت لحظه‌ای یک تابع خطی از عمق است.

در این پایان نامه، علاوه بر استفاده از رابطه‌ی خطی، از روابط مختلفی برای تهیه مدل سرعت اولیه استفاده شده است. اما تمامی این روابط، صرفاً تغییرات عمقی سرعت را شامل می‌شوند و تغییرات جانبی سرعت در آنها اعمال نمی‌شود. بنابراین، در اینجا، از سرعت برانبارش به عنوان مدل سرعت اولیه استفاده شده است. در نهایت برای بررسی کارآمدی مدل سرعت حاصل از هر مدل اولیه‌ای، کوچ لرزه‌ای پس از برانبارش روی یک داده واقعی انجام شده است. با مقایسه مقاطع کوچ پس از برانبارش مشاهده شد که استفاده از رابطه‌ی خطی و سرعت برانبارش به عنوان مدل اولیه، مقاطع کوچ دقیق‌تری نسبت به بقیه روابط، به وجود آورده است. بنابراین با استفاده از این دو مدل سرعت، کوچ عمقی پس از برانبارش روی داده‌ی مذکور اعمال شد. با مقایسه مقاطع حاصل مشاهده می‌شود که استفاده از سرعت برانبارش به عنوان مدل سرعت اولیه در روش NIP توموگرافی بهترین مدل سرعت را به وجود می‌آورد.

در این پایان نامه، موارد زیر را می‌توان به عنوان پیشنهادات برای تحقیقات آینده در این زمینه مطرح کرد:

الف) یکی از نقاط ضعف روش برانبارش CRS در شرایطی است که در داده‌های لرزه‌ای، سه گانه‌های باز نشده¹ و یا پدیده‌های پراش (مخصوصاً در نزدیکی رخدادهای انعکاسی) وجود داشته باشد. در این نواحی مقادیر نامطمئنی برای نشانگرهای میدان موج به دست می‌آید که تاثیر مخربی روی نتیجه روش NIP توموگرافی دارد. بنابراین، پیشنهاد می‌شود قبل از انجام برانبارش CRS، کوچ زمانی پیش از برانبارش بر داده‌های لرزه‌ای اعمال شود تا سیگنال‌های پراش یافته به یک نقطه متمرکز شده و سه گانه‌ها نیز به شکل واقعی‌شان تبدیل شوند.

ب) تمام مدل‌های اولیه‌ی استفاده شده در این پایان نامه، یا از یک رابطه ریاضی مشخص به دست آمده و یا صرفاً از داده‌ها استخراج شده است. بنابراین، پیشنهاد می‌شود از داده‌های چاه نگاری که در آنها سرعت بازه‌ای با دقت بسیار بالایی تعیین می‌شود، در کنار مدل‌های اولیه مذکور استفاده شود.

¹ Triplications

فهرست منابع؛

Al-Chalabi, M. (1973) "Series approximation in velocity and travelttime computations" *Geophysical Prospecting*, 21, pp 783-795.

Al-Yahya, K. (1989). "Velocity analysis by iterative profile migration" *Geophysics*, 54(6), pp 718-729.

Bishop, T., Bube, K., Cutler, R., Langan, R., Love, P., Resnick, J., Shuey, R., Spindler, D., and Wyld, H. (1985). "Tomographic determination of velocity and depth in laterally varying media" *Geophysics*, 50(1), pp 903-923.

Cerveny, V. (2001). "*Seismic Ray Theory*" Cambridge University Press.

Chernyak, V. S. and Gritsenko, S. A. (1979). "Interpretation of the effective common-depth-point parameters for a three-dimensional system of homogeneous layers with curvilinear boundaries" *Geologiya i Geofizika*, 20(12), pp 112-120.

Claerbout, J. F. (1985). "*Imaging the earth's interior*", Blackwell Scientific Publications.

de Boor, C. (1978). "*A practical guide to splines*", Springer-Verlag.

Dix, C. H. (1955). "Seismic velocities from surface measurements." *Geophysics*, 20(1), pp 68-86.

Duveneck, E. (2004). "*Tomographic determination of seismic velocity models with kinematic wavefield attributes*". Logos Verlag Berlin.

Farra, V. and Madariaga, R. (1988). "Non-linear refraction tomography". *Geophys. J.*, 95, pp 135-147.

Gamboa F., Filpo E., Tygel M. (2003). "Multiple attenuation using Common-Reflection-Surface attributes", *Brasilian Geof.* 21(1)

Gazdag, J. (1978). "Wave-equation migration by phase shift", *Geophysics*, (76), pp 43-49.

Hendriyana, A., Sule R., Bahar A. (2010), “*Stability Analysis of NIP-Wave Tomographic Inversion: Synthetic Case Study*”,

Hertweck, T. (2004). “*True-amplitude Kirchhoff migration: analytical and theoretical considerations*”. Logos Verlag Berlin. Journal of Indonesian Geophysicists.

Höcht, G. (2002). PhD thesis, “Traveltime approximations for 2D and 3D media and kinematic wavefield attribute”. University of Karlsruhe.

Hubral, P. (1983). “Computing true amplitude reflections in a laterally inhomogeneous earth”. *Geophysics*, 48(8), pp 1051-1062.

Hubral, P. and Krey, T. (1980). “Interval velocities from seismic reflection traveltime measurements”. *Soc. Expl. Geophys.*

Jäger, R., Mann, J., Höcht, G., and Hubral, P. (2001). “Common-reflection-surface stack: Image and attributes”. *Geophysics*, 66(1), pp 97-109.

Lafond, C. F. and Levander, A. R. (1993). “Migration moveout analysis and depth focusing”. *Geophysics*, 58(1), pp 91-100.

Lines, L. R. and Treitel, S. (1984). “Tutorial: A review of least-squares inversion and its application to geophysical problems”. *Geophys. Prosp.*, 32, pp 159-186.

Liu, Z. (1997). “An analytical approach to migration velocity analysis”. *Geophysics*, 62(4), pp 1238-1249.

Mann, J. (2002). “*Extensions and Applications of the Common-Reflection-Surface Stack Method*”. Logos Verlag Berlin.

Mayne, W. H. (1962). “Common-reflection-point horizontal data stacking techniques”. *Geophysics*, 27, pp 927-938.

Menke, W. (1984). “*Geophysical Data Analysis: Discrete Inverse Theory*”. Academic Press.

Paige, C. C. and Saunders, M. A. (1982a). “Algorithm 583. LSQR: Sparse linear equations and least squares problems”. *ACM Trans. Math. Softw.*, 8(2), pp 195-209.

Paige, C. C. and Saunders, M. A. (1982b). "LSQR: An algorithm for sparse linear equations and sparse least squares". *ACM Trans. Math. Softw.*, 8(1), pp 43-71

Popov, M. M. (2002). "Ray theory and Gaussian Beam method for Geophysicists". Editora da Universidade Federal da Bahia.

Robbein, E. (2003). "Velocities, time imaging and depth imaging in reflection seismics-Principles and methods". EAGE publications.

Robbein, E. (2010). "Seismic imaging. A review of the techniques, their principles, merits and limitations". EAGE publications.

Sen, M. and Stoffa, P. L. (1995). "Global Optimization Methods in Geophysical Inversion". Elsevier, Amsterdam.

Taner, M. T. and Koehler, F. (1969). "Velocity spectra - digital computer derivation and applications of velocity functions". *Geophysics*, 34(06), pp 859-881.

Tarantola, A. (1987). "Inverse Problem Theory: Methods for Data Fitting and Model Parameter Estimation". Elsevier, Amsterdam.

Ursin, B. (1982). "Quadratic wavefront and travelttime approximations in inhomogeneous layered media with curved interfaces". *Geophysics*, 47(07), pp 1012-1021.

Yilmaz, Ö. (2001). "Seismic Data Analysis, Vols. 1 and 2". Soc. Expl. Geophys.

Yilmaz, Ö. and Chambers, R. (1984). "Migration velocity analysis by wavefield extrapolation". *Geophysics*, 49(10), pp 1664 - 1674.



Shahrood university of Technology
Faculty of Mining and Petroleum Engineering and Geophysics

**Improving the quality of seismic migration results by velocity
model derived from Normal-Incidence-Point (NIP) Tomography**

Mostafa Vahidhashemi

Supervisors:

Dr. Iradj Pirooz

Dr. Mehrdad Soleimani

January 2013

Abstract

Velocity model building is a crucial step for the construction of a seismic image of the subsurface by any depth imaging method. A wide variety of different velocity model building methods is available. Reflection tomography is one of these methods, which is widely used in industry. One of the drawbacks of that method is, however, that it requires picking of reflection events in the seismic prestack data to provide the traveltimes information for the tomographic inversion. This picking is extremely time-consuming, especially in 3D seismic data, and can become difficult or even impossible if the signal-to-noise ratio in the data is low.

In this thesis a version of tomography called *NIP wave tomography* introduced by Duveneck (2004) is used for construction of imaging velocity model. This technique makes use of traveltimes information in the form of kinematic wavefield attributes. These attributes are the coefficients of second-order traveltimes approximations in the midpoint and offset coordinates and can be extracted from the seismic prestack data by means of common-reflection-surface (CRS) stack method. The required input data for the tomographic inversion are taken from the CRS stack results at a number of pick locations in the CRS-stacked simulated zero-offset section. The picking process is done on post-stack sections and locations of the points do not need to follow continuous horizons in the stacked section. The problem of estimating the velocity model tomography is addressed in terms of an inverse problem (Tarantola, 1987). This problem is solved in an iterative manner. During each iteration the difference of observed and modeled data is minimized and the model is updated. This procedure would continue until the misfit falls below a specified value. Modeling the observed data for the first time requires an initial velocity model. Initial velocity model in NIP-tomography contains a constant near surface velocity which increases linearly with depth.

In the present thesis, after some introductory discussions, I firstly use some other functions instead of linear function, to produce initial velocity models and check the effect of each of them on NIP-tomography results. In addition to simple mathematical relations, the stacking velocity derived from kinematic wavefield attributes is used in NIP-tomography, as initial velocity model. In the end of the thesis, I evaluate the accuracy and validity of the velocity models derived from various initial velocity models by using them in migration of a real

seismic land data and comparing the migrated sections. Finally, the velocity model which leads to best migrated section, would introduce as best velocity model. This velocity model, in turn, obtained from best initial velocity model.

Keywords: Velocity model building, Reflection tomography, Common reflection surface, Normal Incidence Point (NIP) tomography