



دانشکده معدن، نفت و ژئوفیزیک

پایان نامه کارشناسی ارشد

## تصویرسازی لرزه‌ای ساختارهای پیچیده با استفاده از روش برانبارش سطح بازتاب مشترک با دور افت محدود

مرتضی بالارستاقی

اساتید راهنما

دکتر ایرج پیروز

دکتر مهرداد سلیمانی منفرد

# بسم الله الرحمن الرحيم

سپس خداوندی را که سخنواران از ستایش او عاجزند، و حسابکرمان از شمارش نعمت‌های او ناتوان، پژوهشگران برای ادائی حق او درمانده، خدایی که افکار ثرف نمی‌اندیش، ذات او را دک نمی‌کنند و دست غواصان دریایی علوم به او نخواهد رسید. پروردگاری که برای صفاتش حدی وجود ندارد، برایش وقتی معین و سرآمدی مشخص نمی‌توان تعیین کرد. مخلوقات را با قدرت خود آفرید و بارحمت خود با دهارا به حرکت درآورده و به وسیله کوه‌ها اضطراب و لرزش زمین را به آرامش تبدیل کرد.

علی علیہ السلام - خطبه اول نجح البلاغه (ترجمه محمد دشتی)



دانشکده معدن، نفت و ژئوفیزیک

گروه اکتشاف

## تصویرسازی لرزه‌ای ساختارهای پیچیده با استفاده از روش

### برانبارش سطح بازتاب مشترک با دور افت محدود

دانشجو : مرتضی بالارستاقی

اساتید راهنما :

دکتر ایرج پیروز

دکتر مهرداد سلیمانی منفرد

استاد مشاور:

دکتر هاشم شاهسونی

پایان نامه جهت اخذ درجه کارشناسی ارشد



دکان اسناد  
مدیریت تحصیلات تکمیلی  
فرم شماره (۶)

شماره: ۱۹۳۰۷-۲۰۱۴/۰۶/۰۷  
تاریخ: ۱۳۹۱/۱۲/۰۹  
ویرایش:

### بسمه تعالیٰ

### فرم صورتجلسه دفاع از پایان نامه تحصیلی دوره کارشناسی ارشد

با تأییدات خداوند متعال و با استعانت از حضرت ولی عصر (عج) ارزیابی جلسه دفاع از پایان نامه کارشناسی ارشد آقای مرتضی بالارستاقی رشته ژئوفیزیک گرایش لرزه شناسی تحت عنوان تصویرسازی ساختارهای پیچیده با استفاده از برانبارش سطح بازتاب مشترک با دورافت محدود که در تاریخ ۹۱/۱۱/۲۸ با حضور هیأت محترم داوران در دانشگاه صنعتی شهرورد برگزار گردید به شرح ذیل اعلام می گردد:

<input type="checkbox"/> قبول (با درجه: <b>۱۸/۹۹</b> )	<input checked="" type="checkbox"/> امتیاز <b>۱۷/۹۹</b>	<input type="checkbox"/> دفاع مجدد	<input type="checkbox"/> مردود
--	---	------------------------------------	--------------------------------

۱- عالی (۲۰ - ۱۹) ✓ ۲- بسیار خوب (۱۸ - ۱۷/۹۹)

۳- خوب (۱۷/۹۹ - ۱۶) ۴- قابل قبول (۱۵/۹۹ - ۱۴)

۵- نمره کمتر از ۱۴ غیر قابل قبول

عضو هیأت داوران	نام و نام خانوادگی	مرتبه علمی	امضاء
۱- استادراهنما	دکتر ابرج پیروز	استادیار	
۲- استادراهنما	دکتر مهرداد سلیمانی منفرد	استادیار	
۳- استاد مشاور	دکتر هاشم شاهسونی	استادیار	
۴- نماینده شورای تحصیلات تکمیلی	دکتر ابولقاسم کامکار روحانی	دانشیار	
۵- استاد ممتحن	دکتر امین روشنده کاهو	استادیار	
۶- استاد ممتحن	دکتر علی نجاتی کلاته	استادیار	

رئیس دانشکده:



تعدیم به:

# پرورهاد هرچنان

# تعهد نامه

اینجانب مرتضی بالارستاقی دانشجوی دوره کارشناسی ارشد رشته ژئوفیزیک - لرزه‌شناسی  
دانشکده معدن، نفت و ژئوفیزیک دانشگاه صنعتی شاهرود نویسنده پایان نامه تصویرسازی ساختارهای  
پیچیده با استفاده از برآنبارش سطح بازتاب مشترک با دورافت محدود تحت راهنمائی دکتر ایرج  
پیروز و دکتر مهرداد سلیمانی منفرد متعهد می‌شوم.

- تحقیقات در این پایان نامه توسط اینجانب انجام شده است و از صحت و اصالت برخوردار است.
- در استفاده از نتایج پژوهش‌های محققان دیگر به مرجع مورد استفاده استناد شده است.
- مطالب مندرج در پایان نامه تاکنون توسط خود یا فرد دیگری برای دریافت هیچ نوع مدرک یا امتیازی در هیچ جا ارائه نشده است.
- کلیه حقوق معنوی این اثر متعلق به دانشگاه صنعتی شاهرود می‌باشد و مقالات مستخرج بานام «دانشگاه صنعتی شاهرود» و یا **Shahrood University of Technology** به چاپ خواهد رسید.
- حقوق معنوی تمام افرادی که در به دست آمدن نتایج اصلی پایان نامه تأثیرگذار بوده اند در مقالات مستخرج از پایان نامه رعایت می‌گردد.
- در کلیه مراحل انجام این پایان نامه، در مواردی که از موجود زنده (یا بافتهای آنها) استفاده شده است ضوابط و اصول اخلاقی رعایت شده است.
- در کلیه مراحل انجام این پایان نامه، در مواردی که به حوزه اطلاعات شخصی افراد دسترسی یافته یا استفاده شده است اصل رازداری، ضوابط و اصول اخلاق انسانی رعایت شده است.

## تاریخ

### امضا دانشجو

### مالکیت نتایج و حق نشر

- کلیه حقوق معنوی این اثر و محصولات آن (مقالات مستخرج، کتاب، برنامه‌های رایانه‌ای، نرم افزارها و تجهیزات ساخته شده است) متعلق به دانشگاه صنعتی شاهرود می‌باشد. این مطلب باید به نحو مقتضی در تولیدات علمی مربوطه ذکر شود.

## چکیده

لرزه‌نگاری بازتابی عمومی ترین روش ژئوفیزیکی برای اکتشاف نفت و گاز است. با استفاده از این روش امکان دست یابی به تصویر ساختارهای زیر سطحی با استفاده از اندازه‌گیری‌های غیر مستقیم در سطح، فراهم می‌شود. بطور معمول روش بر انبارش نقطه میانی مشترک همراه با تصحیح بروونراند نرمال و تصحیح بروونراند شیب برای دست یابی به چنین هدفی در پردازش داده‌های لرزه‌ای بکار می‌رود. ولی این روش در محیط‌هایی که با بازتابنده‌های پر شیب یا تغییرات جانبی سرعت مواجه هستیم، قادر به استفاده از تمام داده‌های سهیم در بازتاب از یک نقطه نمی‌باشد. در این گونه موارد استفاده از روش برانبارش سطح بازتاب مشترک(CRS) به دلیل بهره گیری از اطلاعاتی شامل شکل بازتابنده‌ها (از قبیل شیب و انحنای بازتابنده) می‌تواند به عنوان راه حل مشکل مذکور تلقی شود. روش<sup>۱</sup> CRS با جستجوی سه پارامتر بنام نشانگرهای جنبشی میدان موج ( $\alpha$  زاویه ورود،  $R_{NIP}$  شعاع انحنای موج<sup>۲</sup> NIP و  $R_N$  شعاع انحنای موج نرمال) اعمال می‌شود. با این وجود روش CRS نیز در مواجهه با ساختارهای پیچیده با شیب‌های متداخل، به دلیل شرایطی که در مراحل جستجوی پارامترهای برانبارش در این روش وجود دارد، از کارایی مطلوبی برخوردار نیست.

برای بر طرف کردن این مسئله در سال‌های اخیر روش برانبارش سطح پراش مشترک (CDS<sup>۳</sup>) معرفی شد. این روش توانسته با بهره گرفتن ایده‌ی<sup>۴</sup> DMO در راهبرد جستجوی CRS مسئله‌ی شیب‌های متداخل را حل کند. در این روش  $R_{NIP} \equiv R_N \equiv R_{CDS}$  در نظر گرفته می‌شود. اما به علت نوع راهبردی که در این روش وجود دارد نوشهای زمینه و سایر رخدادهای ناخواسته نیز در مقطع نهایی بر جسته‌تر می‌شوند.

<sup>1</sup> Common Reflection Surface

<sup>2</sup> Normal Incident Point

<sup>3</sup><sup>۳</sup> Common Diffraction Surface

<sup>4</sup> Dip Move-out

در این تحقیق بمنظور افزایش کارایی روش برانبارش CDS در مواجه با شیب‌های متداخل، کاهش دادن اثر نوافه‌های زمینه و بهبود بخشیدن پیوستگی بازتابها روش برانبارش CDS با دورافت محدود ( $FO^1$ ) معرفی شده است. برای درک بهتر کارایی روش FO-CDS، این روش بر روی داده‌های واقعی با ساختارهای نیمه پیچیده منطقه‌ای از ایران و همچنین بر روی داده‌های مصنوعی (Sigsbee 2A) که منطقه‌ای با ساختارهای پیچیده را نشان می‌دهد، اعمال شده و با سایر روش‌های برانبارش مقایسه شده است. با اعمال دورافت محدود در برانبارش، نوافه‌های زمینه نیز اثر کمتری در برانبارش خواهند داشت و همچنین با اعمال دورافت محدود در برانبارش، محدوده‌ی ناحیه فرنل نیز برای عمق‌های پایین‌تر کوچکتر در نظر گرفته می‌شود و انرژی‌های بازتابی با دقت بیشتری حفظ می‌شوند. در این صورت انتظار می‌رود در مقاطع کوچ جزئیات بیشتری از ساختارهای زیر سطحی آشکار شود و قدرت تفکیک جانبی رخدادهای بازتابی افزایش یابد. با توجه به نتایج حاصل شده از اعمال عملگر جدید بر روی داده‌های مصنوعی و واقعی، در این تحقیق مشخص شد که روش برانبارش FO-CDS توانسته در مواجهه با شیب‌های متداخل همانند برانبارش CDS کارایی مطلوب و حتی بهتر داشته باشد و همچنین در به تصویر درآوردن نقاط پراش کهایده اصلی بکار رفته در روش برانبارش CDS است، بهتر از این روش عمل کرده است. علاوه بر این روش برانبارش FO-CDS قادر است رخدادهای بازتابی در اعماق پایین‌تر را که سایر روش‌ها در تصویرسازی آن ناتوانند آشکار کند.

**واژه‌های کلیدی:** برانبارش سطح بازتاب مشترک، نشانگرهای میدان موج، برانبارش سطح پراش مشترک، دورافت محدود

---

<sup>1</sup> Finite Offset

## لیست مقالات مستخرج از پایان نامه

- ارائه راهکاری به منظور تعیین نشانگر زاویه ورود پرتو در محل های با تداخل شبیب در روش های تصویر سازی MF ، پانزدهمین کنفرانس ژئوفیزیک ایران.
- **Finite offset CDS stack; a new technique to optimize common diffraction surface stack method,** international geophysical conference and oil & gas exhibition.

## فهرست مطالب

### شماره صفحه

۱.....	مقدمه	۱ فصل اول
۲.....	برداشت داده‌های لرزه‌ای	۱-۱
۴.....	پردازش داده‌های لرزه‌ای	۲-۱
۴.....	پیش پردازش	۱-۲-۱
۴.....	شبیه‌سازی مقطع با دورافت صفر	۲-۲-۱
۵.....	NMO/DMO برانبارش	۱-۲-۲-۱
۶.....	برانبارش سطح بازتاب مشترک (CRS)	۲-۲-۲-۱
۷.....	کوچ	۳-۲-۱
۱۰.....	تفسیر	۳-۱
۱۰.....	ساختمار پایان نامه	۴-۱
۱۲.....	تئوری پرتو	۲ فصل دوم
۱۲.....	مقدمه	۱-۲
۱۳.....	معادله موج الاستودینامیک	۲-۲
۱۴.....	محیط ناهمگن و ناهمسانگرد	۱-۲-۲
۱۵.....	محیط ناهمگن و همسانگرد	۲-۲-۲
۱۶.....	محیط همگن و همسانگرد	۳-۲-۲
۱۷.....	موج‌های فشاری و برشی	۳-۲
۱۹.....	معادله موج آکوستیک	۴-۲

۲۰	تئوری پرتو	۵-۲
۲۱	معادلات انتقال و آیکونال	۱-۵-۲
۲۲	حل معادله ایکونال	۲-۵-۲
۲۵	حل معادله انتقال	۳-۵-۲
۲۷	پرتوهای فیزیکی	۶-۲
۲۹	دبال کردن دینامیکی و موازی محور پرتو	۷-۲
۳۴	روش دبال کردن پرتو در مختصات موضعی کارتزین	۱-۷-۲
۳۷	زمان سیر پرتو موازی محور	۲-۷-۲
۴۰	تقریب پرتوهای موازی محور زون فرنل	۳-۷-۲
۴۲	برانبارش سطح بازتاب مشترک (CRS)	۳ فصل سوم
۴۲	مقدمه	۱-۳
۴۴	روش برانبارش CMP	۲-۳
۴۸	عملگر برانبارش سطح بازتاب مشترک (CRS)	۳-۳
۵۱	تقریب زمان سیر در مختصات نقطه‌ی میانی و نیم دورافت	۱-۳-۳
۵۳	تفسیر فیزیکی پارامترهای برانبارش	۲-۳-۳
۵۷	برانبارش دو بعدی سطح بازتاب مشترک	۳-۳-۳
۶۰	روش انجام برانبارش CRS	۴-۳
۶۳	برخی از کاربردهای دیگر نشانگرهای برانبارش CRS	۵-۳
۶۴	خط سیر CRP	۱-۵-۳

۶۴..... تصویر زون فرنل	۲-۵-۳
<b>۶۵..... مسئله شیب‌های متداخل</b>	<b>۴ فصل چهارم</b>
۶۵..... مقدمه	۱-۴
۶۶..... مسئله شیب‌های متداخل	۲-۴
۶۸..... راهبرد توسعه یافته برانبارش CRS	۳-۴
۷۰ .....(CDS) برانبارش سطح پراش مشترک	۴-۴
۷۱ .....DMO عملگر	۱-۴-۴
۷۲ .....CDS مفهوم تقریب برانبارش	۲-۴-۴
۷۳ .....CDS عملگر برانبارش	۳-۴-۴
۷۴ .....CDS در برانبارش راهبرد جستجوی	۴-۴-۴
<b>Error! Bookmark not defined.</b> محدودیت‌ها	۵-۴-۴
۷۶..... اعمال برانبارش CRS بر روی داده‌های واقعی	۵-۴
۷۷ .....مشخصات برداشت	۱-۵-۴
۸۰ .....CRS پردازش به روش	۲-۵-۴
۸۲ .....CMP برانبارش خودکار	۱-۲-۵-۴
۸۵ .....CRS برانبارش اولیه	۲-۲-۵-۴
۸۸ .....CRS برانبارش بهینه	۳-۲-۵-۴
۹۳ .....CDS پردازش به روش	۶-۴
<b>۱۰۱ .....برانبارش سطح پراش مشترک با دورافت محدود</b>	<b>۵ فصل پنجم</b>

۱۰۱	مقدمه	۱-۵
۱۰۳	شرح مختصری از کوچ	۲-۵
۱۰۶	کوچ کیرشهوف با دامنه واقعی	۱-۲-۵
۱۰۷	اصول کوچ کیرشهوف با دامنه واقعی:	۱-۱-۲-۵
۱۰۹	مفهوم برانبارش CDS با دورافت محدود	۳-۵
۱۱۰	عملگر برانبارش CDS با دورافت محدود	۴-۵
۱۱۲	داده لرزه‌ای مصنوعی	۵-۵
۱۱۸	نتایج برانبارش CDS و FO-CDS	۱-۵-۵
۱۲۷	نتیجه برانبارش FO-CDS بر داده واقعی	۶-۵
۱۳۷	نتایج کوچ	۷-۵
۱۴۸	بحث و نتیجه‌گیری	۶ فصل ششم
۱۵۱	پیوست	
۱۵۵	منابع و مراجع	

## فهرست اشکال

### شماره صفحه

شکل ۱-۱: آرایش‌های متفاوت چشم و گیرنده. چشم با علامت پیکان و گیرنده با مثلث نشان داده شده است. شکل وسط نشان دهنده یک دسته داده لرزه‌ای دارای همپوشانی در محورهای مختصات  $(m, h, t)$  است (هوخت، ۲۰۰۲) ۳.

شکل ۱-۲ : مقایسه وضعیت (a) نقطه میانی مشترک(CMP) و (b) نقطه‌ی بازتاب مشترک(CRP). برای لایه‌های ناهمگن یا لایه‌ای با سرعت‌های جانبی متغیر، در یک دسته CMP پراکندگی نقطه‌ی بازتاب مشاهده می‌شود یعنی بازتابها از یک نقطه‌ی یکسان نیستند (اشپینر، ۲۰۰۷) ۶.

شکل ۱-۳ : محدوده کارکرد کوچ قبل و بعد از برآنبارش عمقی و زمانی (لينير، ۱۹۹۹) ۸.

شکل ۱-۴ : مقایسه مقطع ZO(شکل سمت چپ) قبل و بعد از کوچ زمانی (شکل سمت راست).کوچ سبب: ۱) تغییر موقعیت و شیب بازتابندها و قرارگیری آنها در موقعیت و شیب حقیقی می‌شود ۲) باعث حذف پراش‌ها و سه گانه‌های باز نشده می‌شود (اشپینر، ۲۰۰۷) ۹.

شکل ۱-۵ : سیستم مختصات پرتو. برای یک چشم موج نقطه‌ای S، مختصات پرتو در ناحیه‌ای که میدان موج منظم است بوسیله دو زاویه  $\alpha_1$  و  $\alpha_2$  تعیین می‌شود و آیکونال  $\sigma$  موقعیت نقطه P را روی پرتو مشخص می‌کند. در این مورد می‌توان به جای زمان سیر  $\tau$  از طول قوس  $s$  نیز برای کنترل متغیر  $\beta$  روی پرتو استفاده کرد (اشپینر، ۲۰۰۷) ۲۵.

شکل ۲-۱: طرح شماتیک حجم فرنل (خاکستری رنگ) پرتو بازتاب  $R_s M$ . از برخورد حجم فرنل با سطح مشترک بازتابنده زون فرنل تعیین می‌شود (اشپینر، ۲۰۰۷) ۲۹.

شکل ۲-۲: تصاویر بردارهای کندي  $P_s$  و  $\bar{P}_s$  (اشپینر، ۲۰۰۷) ۳۶.

شکل ۳-۱: هندسه بازتاب لرزه‌ای. شکل های (الف و ج) نشان دهنده ورداشت چشم مشترک و شکل های (ب و د) نشان دهنده ورداشت نقطه میانی مشترک CMP هستند (بايكولوف، ۲۰۰۹) ۴۶.

شکل ۳-۲: نمای شماتیک برآنبارش CMP (بايكولوف، ۲۰۰۹) ۴۸.

شکل ۳-۳ : عملگر برآنبارش CRS در حجم زمان-نقطه میانی-نیم دورافت (اشپینر، ۲۰۰۷) ۵۰.

شکل ۳-۴: خط سیر CRP در حجم زمان- نقطه میانی دورافت (اشپینر، ۲۰۰۷).....	۵۰
شکل ۳-۵: آزمایش موج های NIP و نرمال در یک مدل دو بعدی (من، ۲۰۰۲).....	۵۴
شکل ۳-۶: مشخصه های لازم برای تعیین عملگر برآنبارش سطح بازتاب مشترک (فیت، ۲۰۰۱).....	۵۹
شکل ۳-۷: قسمت پایین، بازتابنده تاقدیسی شکل در حوزه عمق، قسمت بالا، سطح آبی رنگ منحنی های زمانسیر و سطح سبز رنگ نشان دهنده عملگر برآنبارش CRS است (فیت، ۲۰۰۱).....	۶۰
شکل ۳-۸: نمای شماتیک روش اول در جستجوی پارامترهای مشخصه عملگر برآنبارش CRS (اندیس صفر نشان می دهد که این پارامترها اولیه هستند) (بعد از تغییرات یگر، ۱۹۹۹).....	۶۳
شکل ۴-۱: نمای شماتیک ساده مراحل جستجو در برآنبارش CRS (مولر، ۱۹۹۸).....	۶۸
شکل ۴-۲: طیف زاویه که به عنوان تابعی از زاویه ورود $\alpha$ در امتداد یک علمگر خطی در مقطع برآنبارش CMP برای یک نمونه ZO معین محاسبه شده است (من، ۲۰۰۲).....	۶۹
شکل ۴-۳: نمای شماتیک مراحل جستجو در روش برآنبارش توسعه یافته CRS (من، ۲۰۰۱).....	۷۰
شکل ۴-۴: نمایش برخورد شیب های متداخل در مقطع برآنبارش (بنکرافت، ۱۹۹۸).....	۷۲
شکل ۴-۵: (الف) ترکیب تصویر جبهه موج در مسئله معکوس DMO در دورافت ثابت ( $h=200m$ ). (ب) تصویر لحظه ای موج هویگنس DMO در دورافت های مختلف. (من، ۱۹۹۷).....	۷۲
شکل ۴-۶: شکل عملگرهای CDS برای تمام زوایای ممکن (سلیمانی ۱۳۸۸).....	۷۴
شکل ۴-۷: برای یک زاویه ورود $\alpha$ (در این شکل $R_{CDS}$ در محدوده $\alpha = 0$ ) تعیین شده جستجو می شود (شاھسونی، ۱۳۹۰).....	۷۵
شکل ۴-۸: نمای شماتیک ساده راهبرد جدید توسعه یافته (سلیمانی، ۱۳۸۸).....	۷۵
شکل ۴-۹: مقطع برآنبارش بدست آمده به روش برآنبارش CMP (ادبی، ۱۳۸۸).....	۷۹
شکل ۴-۱۰: مقطع تقویت شده (AGC) شکل (۹-۴).....	۸۰
شکل ۴-۱۱: مقطع دورافت صفر حاصل از برآنبارش خودکار CMP در داده های واقعی.....	۸۴
شکل ۴-۱۲: مقطع همدوسی در مرحله ای برآنبارش اتوماتیک در داده های واقعی.....	۸۴

..... ۸۵	شکل ۴-۱۳ : مقطع $v^2_{NMO} \left( \frac{m}{s} \right)$ بدست آمده از پارامتر $q$ در مرحله‌ی اول
..... ۸۵	شکل ۴-۱۴ : تعداد ردلرزهایی که در برانبارش مرحله‌ی اول مشارکت داشته‌اند.
..... ۸۷	شکل ۴-۱۵ : مقطع برانبارش ZO بر مبنای نشانگرهای اولیه CRS مربوط به داده‌های واقعی
..... ۸۷	شکل ۴-۱۶ : مقطع همدوسی برانبارش اولیه ZO مربوط به داده‌های واقعی
..... ۸۸	شکل ۴-۱۷ : مقطع نشانگر اولیه $R_{NIP} (m)$ مربوط به داده‌های واقعی
..... ۸۸	شکل ۴-۱۸ : مقطع نشانگر اولیه $R_N (m)$ مربوط به داده‌های واقعی
..... ۸۹	شکل ۴-۱۹ : مقطع نشانگر اولیه زاویه ورود ( $\alpha$ ) مربوط به داده‌های واقعی
..... ۹۰	شکل ۴-۲۰ : مقطع بهینه نشانگر ( $m$ ) حاصل از پردازش CRS مربوط به داده‌های واقعی
..... ۹۱	شکل ۴-۲۱ : مقطع نشانگر بهینه ( $m$ ) حاصل از پردازش CRS مربوط به داده‌های واقعی
..... ۹۱	شکل ۴-۲۲ : مقطع بهینه نشانگر زاویه ( $\alpha$ ) حاصل از پردازش CRS مربوط به داده‌های واقعی
..... ۹۲	شکل ۴-۲۳ : مقطع همدوسی در برانبارش بهینه CRS مربوط به داده‌های واقعی
..... ۹۲	شکل ۴-۲۴ : مقطع برانبارش دورافت صفر با استفاده از عملگر برانبارش بهینه CRS
..... ۹۳	شکل ۴-۲۵ : مقطع تقویت شده (AGC) شکل (۴-۲۴)
..... ۹۴	شکل ۴-۲۶ : تعداد ردلرزهایی که در برانبارش بهینه مشارکت داشته‌اند.
..... ۹۸	شکل ۴-۲۷ : مقطع برانبارش دورافت صفر حاصل از برانبارش CDS
..... ۹۹	شکل ۴-۲۸ : مقطع تقویت شده (AGC) شکل (۴-۲۷)
..... ۱۰۲	شکل ۱-۵ : سطح برانبارش CRS بادورافت محدود. سطح قرمز رنگ که منطبق بر سطح برانبارش CRS (سطح سبز رنگ) است، نشان دهنده سطح برانبارش CRS با دورافت محدود است. برانبارش دامنه‌ها در محدوده قرمز رنگ صورت می‌گیرد (بايكولوف ۲۰۰۹)
..... ۱۰۲	شکل ۲-۵ : کوچ سبب می‌شود رخدادهای شیب دار در محل صحیح خود قرار گیرند. در قسمت (b) رخداد شیب دار $C'D'$ بعد از اعمال کوچ در محل صحیح خود در $CD$ قرار گرفته است. همانطور که مشاهده می‌شود در قسمت (a) رخداد بازتابی شیب دار به بالای مقطع انتقال داده شده در حالی که طول

بازتابنده کوتاهتر و شیب آن بیشتر شده است(ایلماز، ۲۰۰۱)

شکل ۳-۵ : سطح برانبارش CDS با دورافت محدود. سطح زرد رنگ نشان دهنده سطح برانبارش با دورافت محدود است که بر سطح برانبارش CDS منطبق است. این سطح برای هر نمونه ( $p_0$ ) در مختصات نقطه میانی-زمان در هر بازه دورافت دلخواهی قابل محاسبه است و برانبارش دامنه‌ها تنها در این محدوده انجام می‌شود.

شکل ۴-۵ : نمای شماتیک مراحل برانبارش FO-CDS

شکل ۵-۵ : مقطع برانبارش CRS بهینه داده مصنوعی Sigsbee 2A. بخشی از داده‌های لرزه‌ای که در داخل کادر مستطیلی است برای پردازش انتخاب شده است.

شکل ۶-۵ : برانبارش CRS تقویت شده (AGC) کادر مستطیلی شکل (۴-۵)

شکل ۷-۵ : برانبارش بهینه CRS (من، ۲۰۰۲) تقویت شده (AGC) کادر مستطیلی شکل (۵-۴)

شکل ۸-۵ : مقطع برانبارش CDS تقویت شده (AGC) کادر مستطیلی شکل (۴-۵) (سلیمانی، ۱۳۸۸)

شکل ۹-۵ : مقطع برانبارش FO-CDS تقویت شده (AGC) کادر مستطیلی شکل (۴-۵).

شکل ۱۰-۵ : مقاطع کوچکی از داده‌های برانبارش شده Sigsbee 2A (الف) مقطع برانبارش توسعه یافته CRS. (ب) مقطع برانبارش معمول CRS

شکل ۱۱-۵ : مقاطع کوچکی از داده‌های برانبارش شده Sigsbee 2A (الف) مقطع برانبارش CDS. (ب) مقطع برانبارش FO-CDS

شکل ۱۲-۵ : مقطع کوچکی از برانبارش CRS داده‌های مصنوعی. نحوه‌ی عملکرد برانبارش CRS در مواجهه با شیب‌های متداخل

شکل ۱۳-۵ : مقاطع برانبارش کوچکی از داده‌های Sigsbee 2A به منظور بررسی کارایی روش جدید در مواجهه با شیب‌های متداخل. سمت راست FO-CDS. سمت چپ CDS

شکل ۱۴-۵ : (الف) بخشی از داده‌های مصنوعی. (ب) داده‌های (الف) بعد از اضافه کردن نوفه، نسبت

- سیگنال به نوفه ۲۰ می‌باشد. ۱۲۴
- شکل ۱۵-۵ : مقطع برانبارش CDS بخشی از داده‌های Sigsbee 2A. بدون اضافه کردن نوفه. ۱۲۵
- شکل ۱۶-۵ : مقطع برانبارش CDS بخشی از داده‌های Sigsbee 2A . بعد از اضافه کردن نوفه. ۱۲۵
- شکل ۱۷-۵ : اعمال برانبارش بر بخشی از داده‌های Sigsbee 2A (شکل ۱۴-۵) بعد از اضافه کردن نوفه. نسبت سیگنال به نوفه در این داده‌ها ۲۰ می‌باشد. الف) مقطع برانبارش FO-CDS، گام بازه دورافت در حدود ۱/۸۰ دورافت در نظر گرفته شده در برانبارش CDS است. ب) مقطع برانبارش FO-CDS، گام بازه دورافت در حدود ۱/۲۴۰ دورافت در نظر گرفته شده در برانبارش CDS است. ۱۲۶
- شکل ۱۸-۵ : الف) مقطع کوچکی از برانبارش FO-CDS مربوط به داده‌های واقعی. ب) مقطع کوچکی از برانبارش CDS مربوط به داده‌های واقعی. ۱۲۹
- شکل ۱۹-۵ : مقطع برانبارش FO-CDS مربوط به داده‌ها ی واقعی. گام بازه دورافت در حدود ۱/۸ دورافت در نظر گرفته شده در برانبارش CDS است. ۱۳۰
- شکل ۲۰-۵ : مقطع برانبارش تقویت شده (AGC) شکل (۱۳-۵). ۱۳۱
- شکل ۲۱-۵ : مقایسه مقاطع برانبارش الف) CDS (ب) CRS (ج) NMO (د) FO-CDS در محل مواجهه با مسئله‌ی شبیه‌های متداول. ۱۳۲
- شکل ۲۲-۵ : مقایسه مقاطع برانبارش الف) CRS (ب) CDS (ج) CMP (د) FO-CDS. ۱۳۳
- شکل ۲۳-۵ : مقطع برانبارش FO-CDS مربوط به داده واقعی. گام بازه دورافت در حدود ۱/۲۴۰ دورافت در نظر گرفته شده در برانبارش CDS است. ۱۳۵
- شکل ۲۴-۵ : مقطع تقویت شده (AGC) مربوط به مقطع برانبارش شکل قبل. ۱۳۶
- شکل ۲۵-۵ : مدل سرعت عمیقی به دست آمده برای مرحله‌ی کوچ با استفاده از نرم افزار NIP. ۱۳۷
- شکل ۲۶-۵ : نتیجه اعمال کوچ بر مقطع برانبارش CRS. ۱۳۸
- شکل ۲۷-۵ : نتیجه اعمال کوچ بر مقطع برانبارش CRS بعد از اعمال فیلتر وتابع تقویت (AGC)... ۱۳۹

- شکل ۵-۲۸ : نتیجهِ اعمال کوچ بر مقطع برانبارش CDS ..... ۱۴۰
- شکل ۵-۲۹ : نتیجهِ اعمال کوچ بر مقطع برانبارش CDS بعد از اعمال فیلتر و تابع تقویت (AGC) ..... ۱۴۱
- شکل ۵-۳۰ : نتیجهِ اعمال کوچ مقطع برانبارش FO-CDS. انتخاب گام بازه دورافت محدود ۸/۱ دورافت ..... ۱۴۲
- شکل ۵-۳۱ : نتیجهِ اعمال کوچ مقطع برانبارش FO-CDS. انتخاب گام بازه دورافت محدود ۸/۱ دورافت ..... ۱۴۳
- شکل ۵-۳۲ : نتیجهِ اعمال کوچ مقطع برانبارش FO-CDS. انتخاب گام بازه دورافت محدود ۰/۲۴ دورافت معمول در روش برانبارش ..... ۱۴۴
- شکل ۵-۳۳ : نتیجهِ اعمال کوچ مقطع برانبارش FO-CDS با انتخاب گام بازه دورافت محدود ۰/۲۴ دورافت معمول در روش برانبارش ..... ۱۴۵

## فهرست جداول

### شماره صفحه

جدول ۱-۴ : پارامترهای هندسی برداشت داده‌ها، مربوط به داده‌های واقعی.....	۷۹
جدول ۲-۴ : پارامترهای مورد استفاده در پردازش CRS برای شبیه سازی مقطع دورافت صفر، مربوط به داده واقعی.....	۸۳
جدول ۳-۴ : پارامترهای مورد استفاده در پردازش CDS برای شبیه سازی مقطع دورافت صفر، مربوط به داده واقعی.....	۹۸
جدول ۱-۵ : پارامترهای مورد استفاده در پردازش به روش CRS برای شبیه سازی مقطع دورافت صفر، مربوط به داده‌های Sigsbee2A.....	۱۱۴
جدول ۲-۵ : پارامترهای مورد استفاده در پردازش به روش CDS برای شبیه سازی مقطع دورافت صفر، مربوط به بخشی از داده‌های Sigsbee2A.....	۱۱۸
جدول ۳-۵ : پارامترهای پردازش FO-CDS برای شبیه سازی مقطع دورافت صفرداده‌های واقعی.....	۱۲۸

## عَلَئِمْ وَ اخْتَصَارَات

**AGC** : Automatic Gain Control.

**AVA** : Amplitude Versus Angle.

**AVO** :Amplitude Versus Offset.

**CDP**: Common Depth Point.

**CIG** : Common Image Gather.

**CDS** : Common Diffraction Surface.

**CMP** :Common-Mid-Point.

**CRP**: Common Reflection Point.

**CRS** : Common Reflection Surface.

**DMO** : Dip Move-Out.

**FO-CDS** : Finite Offset- Common Diffraction Surface.

**MZO** : Migration to Zero-Offset.

**NIP** : Normal Incidence Point.

**NMO**: Normal Move-Out.

**PFZ** : Project Fresnel Zone.

**PostSDM**: Post-Stack Depth Migration.

**PreSDM**: Pre-Stack Depth Migration.

**PSPM** : Prestack Partial Migration.

**S/N**: Signal to Noise ratio.

**ZO** : Zero Offset.

# ۱ فصل اول

## مقدمه

از روش‌های متداول در اکتشافات ژئوفیزیکی، لرزه‌نگاری بازتابی است که مزایای آن در اکتشاف ذخایر هیدروکربن از قبیل گازهای طبیعی، نفت یا ذخایر ژئوترمال به اثبات رسیده است. هدف روش لرزه‌نگاری بازتابی به تصویر در آوردن ساختارهای زیرسطحی است. بدین منظور، امواج الستیک<sup>۱</sup> یا آکوستیک<sup>۲</sup> که با چشم‌های مصنوعی ایجاد می‌شوند (انفجار یا ویبراتور<sup>۳</sup> در خشکی و تفنگ بادی<sup>۴</sup> در به درون زمین در منطقه مورد نظر انتشار می‌یابند. این امواج به دلیل اختلاف مقاومت صوتی<sup>۵</sup> (تغییر ناگهانی سرعت یا چگالی یا هر دو) در مرز لایه‌های زیرین به سمت سطح بازتاب می‌شوند و به وسیله‌ی گیرنده‌ها (ژئوفون<sup>۶</sup> در خشکی و هیدروفون<sup>۷</sup> در دریا) ثبت می‌شوند. هریک از ردهای ضبط شده<sup>۸</sup> سری‌های زمانی از سرعت یا شتابِ ذره‌ای در خشکی و یا تغییر فشار در اکتشافات دریایی هستند.

---

<sup>۱</sup>Elastic

<sup>۲</sup>Acoustic

<sup>۳</sup>Source

<sup>۴</sup>Vibrator

<sup>۵</sup>Air gun

<sup>۶</sup>Impedance

<sup>۷</sup>Geophone

<sup>۸</sup>Hydrophone

<sup>۹</sup>Record

روند لرزه‌نگاری بازتابی می‌تواند به سه مرحله تقسیم شود:

- برداشت داده‌ها
- پردازش داده‌ها
- تفسیر

## ۱-۱ برداشت داده‌های لرزه‌ای

در برداشت دو بعدی، گیرنده‌ها و چشم‌های انرژی در امتداد خط مستقیمی که خط لرزه‌ای (خط اندازه‌گیری) نامیده می‌شود، مرتب می‌شوند. با جابجا کردن آرایه چشم و گیرنده در امتداد خط لرزه‌ای دسته داده‌های بازتابی همپوشانی بدست می‌آید. پردازش این دسته داده‌ها به صورت استاندارد صورت می‌گیرد که در پی آن تصویر دو بعدی از زیر سطح بدست می‌آید.

اندازه‌گیری در آرایه‌ای با یک چشم و گیرنده‌های متفاوت، آرایه چشم مشترک<sup>۱</sup> نامیده می‌شود. هر چشم به صورت منفرد یک ورداشت انفجاری چشم مشترک<sup>۲</sup> را ایجاد می‌کند. از کنار هم قرار دادن تمامی این ورداشت‌ها، دسته داده‌های دارای همپوشانی در فضای  $(x_5, t)$  بوجود می‌آید. بطور معمول پردازش داده‌های لرزه‌ای روی محورهای نقطه میانی<sup>۳</sup>  $x_M$  (نقطه میانی بین چشم و گیرنده) و نیم دور افت<sup>۴</sup> (نصف فاصله‌ی بین موقعیت چشم و گیرنده) انجام می‌شود. داده‌ها اغلب به صورت نقطه میانی مشترک<sup>۵</sup> ذخیره می‌شوند بطوریکه هر ردلرزه<sup>۶</sup> در آن به یک نقطه میانی بین چشم و گیرنده اختصاص دارد. در ورداشت نقطه میانی مشترک (CMP) ردلرزه‌ایی که دارای محور نقطه میانی مشترکی هستند در کنار هم جمع می‌شوند. تمامی ورداشت‌های نقطه میانی مشترک در کنار هم، دسته داده‌های دارای همپوشانی را در فضای نقطه میانی، نیم دورافت و زمان  $(h, t)$  ایجاد می‌کنند.

<sup>1</sup>Common-shot(CS)

<sup>2</sup>Common Shot gather

<sup>3</sup>Midpoint

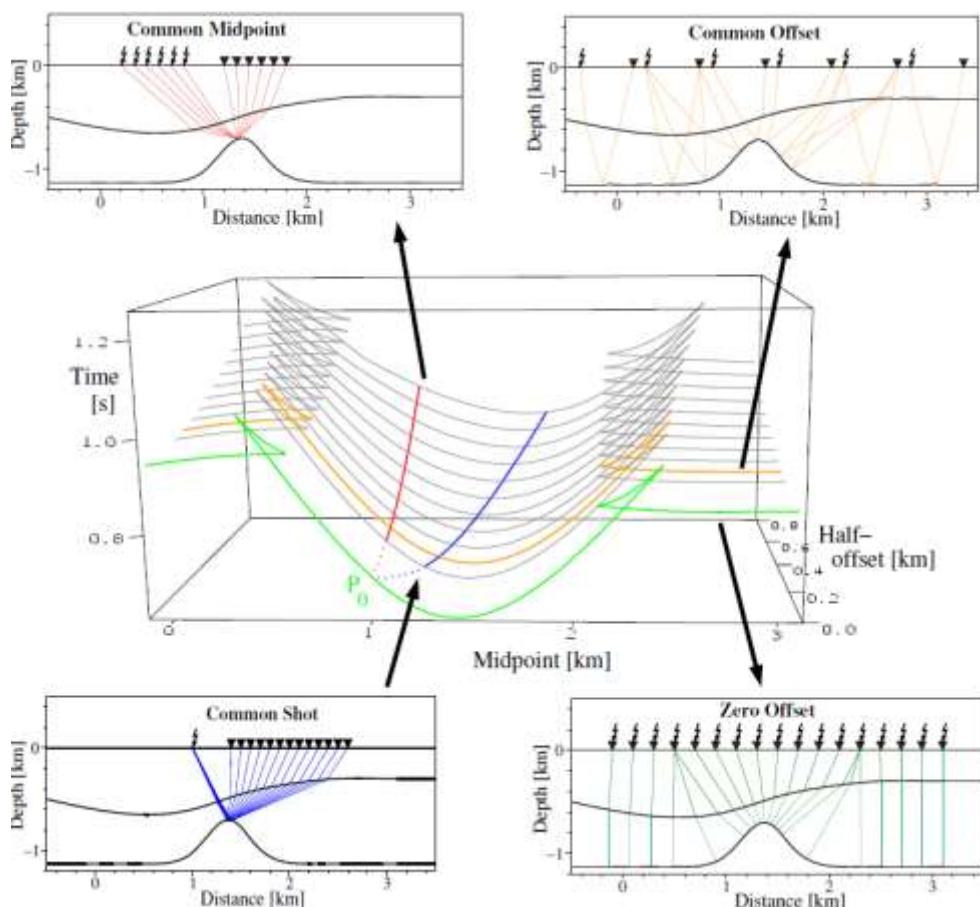
<sup>4</sup>Half-offset

<sup>5</sup>Common-midpoint(CMP)

<sup>6</sup>Trace

آرایه دورافت مشترک<sup>۱</sup> با جابجایی یک جفت چشم-گیرنده با دور افت ثابت در امتداد خط لرزه‌ای توصیف می‌شود. یک مورد خاص و فرضی از مقطع دور افت مشترک، مقطع با دور افت صفر<sup>۲</sup> است بطوری که چشم و گیرنده در موقعیت یکسانی از هم هستند ( $h=0$ ). اگرچه آرایه ZO در عمل چندان قابل درک نیست، اما شبیه‌سازی مقطع ZO یکی از مراحل اصلی در پردازش محسوب می‌شود.

موقعیت‌های قرارگیری متفاوت چشم و گیرنده نسبت به هم و همچنین محورهای نقطه میانی و نیم دورافت که در بالا به آنها اشاره شد، در شکل(۱-۱) دیده می‌شود.



شکل ۱-۱: آرایش‌های متفاوت چشم و گیرنده. چشم با علامت پیکان و گیرنده با مثلث نشان داده است. شکل وسط نشان دهنده یک دسته داده لرزه‌ای دارای همپوشانی در محورهای مختصات ( $m, h, t$ ) است (هوخت<sup>۳</sup>، ۲۰۰۲).

<sup>1</sup>Common-offset(CO)

<sup>2</sup>Zero-offset(ZO)

<sup>3</sup>Höchst

## ۲-۱ پردازش داده‌های لرزه‌ای

هدف از پردازش داده‌های لرزه‌ای بدست آوردن تصویر مناسب زیر سطحی است تا تفسیر دقیق تری از اطلاعات لرزه‌ای فراهم شود.

### ۱-۲-۱ پیش پردازش<sup>۱</sup>

پیش پردازش اصطلاحاً اولین عملیاتی است که بر روی داده بدست آمده انجام می‌شود تا برای مراحل بعدی تصویرسازی آماده شود. اصلی‌ترین مراحل پیش پردازش شامل (ایلماز<sup>۲</sup>، ۲۰۰۱):

- تعیین مختصات چشمی و گیرندها در میان ردلرزه‌ها، و ثبت این مختصات‌ها بهمراه اطلاعات هندسه‌ی برداشت<sup>۳</sup> در فایلی به نام سرآیند<sup>۴</sup> ردلرزه.
- تصحیح استاتیک که بطور معمول بر روی ردلرزه‌ها اعمال می‌شود تا اثر توپوگرافی و تغییرات محلی مربوط به سرعت لایه سطحی را حذف کند. این مرحله فقط بر روی داده‌های بدست آمده از کوهستان اعمال می‌شود.
- اعمال تابع تقویت خودکار برای جبران اثرات ناشی از توزیع هندسی موج کروی.

### ۲-۲-۱ شبیه‌سازی مقطع با دور افت صفر

در طی فرآیند برآنبارش به ازای هر ورداشت نقطه میانی مشترک<sup>۵</sup> یک رد لرزه با دورافت صفر (ZO) بدست می‌آید. در این مرحله نه تنها حجم داده‌ها در مقایسه با دسته داده‌های دارای همپوشانی، کاهش قابل توجهی می‌یابد، بلکه نسبت سیگنال به نویه (S/N) نیز بطور تقریبی با نسبت  $\sqrt{N}$  افزایش می‌یابد (N تعداد ردلرزه‌ها در ورداشت نقطه میانی مشترک است) (ایلماز، ۲۰۰۱). علاوه بر این مقطع دور افت صفر، اولین تصویر کلی از ساختارهای زیر سطحی را به دست می‌دهد. در ادامه بطور خلاصه دو روش برای تهییه

<sup>1</sup>Preprocessing

<sup>2</sup>Yilmaz

<sup>3</sup>Field geometry

<sup>4</sup>Header

<sup>5</sup>CMP gather

مقطع دور افت صفر تشریح می‌شود.

## ۱-۲-۲-۱ برانبارش NMO/DMO

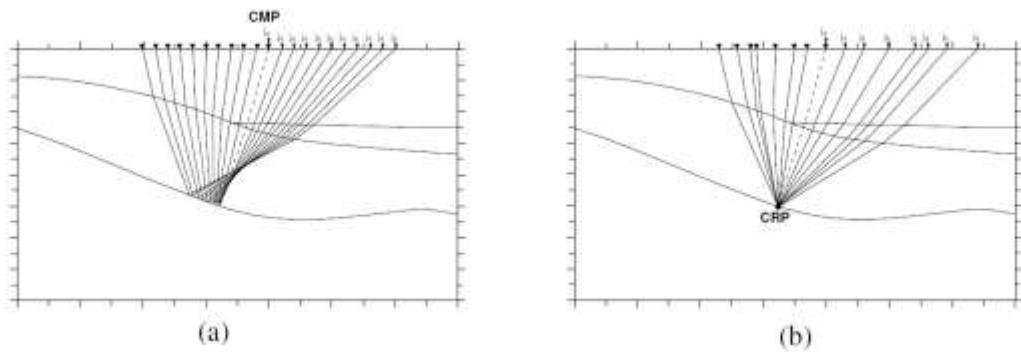
روش برانبارش NMO/DMO روندی است که عموماً بیشترین استفاده را در تهیه مقطع ZO دارد. بعد از برداشت و ثبت اطلاعات، داده‌ها از حالت ورداشت چشم مشترک به صورت ورداشت نقطه میانی مشترک بین موقعیت چشم و گیرنده دسته بندی می‌شوند. در درون این ورداشت‌های نقطه میانی مشترک ردلرزها با توجه به دورافتشار دسته بندی می‌شوند. با نگاهی به یکی از این گروه‌های لرزه نگاشت نقطه میانی مشترک در می‌یابیم که وقایع بازتابی رفتاری شبیه به یک هذلولی از خود نشان می‌دهد. هذلولی بازتاب در نتیجه اثری است که دورافت‌های بزرگ بر انتشار موج در فاصله‌های زیاد بین چشم و گیرنده برجای می‌گذارند. اختلاف زمان سیر ( $\Delta t_{NMO}$ ) بین زمان سیر  $t_h$  برای یک دورافت مشخص و زمان سیر با دور افت صفر  $t_c$  برونزاند نرمال<sup>۱</sup> نامیده می‌شود. اثر دور افت را می‌توان با دانستن سرعت NMO و در طی فرآیندی به نام تصحیح برونزاند نرمال، تصحیح و رخدادهای بازتابی را در یک خط افقی قرار داد. در مناطق با پچیدگی‌های ساختاری یک ورداشت نقطه میانی مشترک حاوی اطلاعاتی از نقاط بازتابی متفاوتی در عمق است در این صورت متحمل مسئله‌ای به نام پراکندگی نقطه‌ی بازتاب<sup>۲</sup> می‌شود. این مسئله موجب بروز خطا در نتایج آنالیز سرعت و در مقیاس کوچکتر، در نتیجه برانبارش می‌شود. اصولاً این اثر را می‌توان با اعمال تصحیح برونزاند شیب<sup>۳</sup> که نقطه میانی مشترک را به نقطه‌ی بازتاب مشترک<sup>۴</sup> تبدیل می‌کند، جبران کرد (شکل ۱-۲).

<sup>1</sup>Normal moveout

<sup>2</sup>Reflection point dispersal

<sup>3</sup>Dip-moveout

<sup>4</sup>Common reflection point(CRP)



شکل ۱-۲: مقایسه وضعیت (a) نقطه میانی مشترک (CMP) و (b) نقطه‌ی بازتاب مشترک (CRP). برای لایه‌های ناهمگن با سرعت‌های جانبی متغیر، در یک دستهٔ CMP پراکندگی نقطه‌ی بازتاب مشاهده می‌شود یعنی بازتاب‌ها از یک نقطه‌ی یکسان نیستند (اشپینر<sup>۱</sup>، ۲۰۰۷).

وقایع بازتابی متعلق به یک نقطه‌ی بازتاب مشترک در روی منحنی به نام خط سیر نقطه بازتاب مشترک<sup>۲</sup> و در حجم نقطه میانی-دورافت-زمان قرار می‌گیرند. در شرایط ایده‌آل فقط اطلاعات در امتداد خط سیر نقطه بازتاب مشترک CRP باید جمع بسته شود. این حالت درست مانند موقعیتی است که فقط اطلاعات مربوط به یک نقطه‌ی عمقی یکسان، در نظر گرفته می‌شود. در عمل تعیین خط سیر نقطه میانی مشترک CRP بدون در اختیار داشتن سرعت و موقعیت دقیق بازتاب‌ها امکان پذیر نیست و در این حالت لازم است که از تصحیح بروونراند شیب (یک سطح برانبارش شامل خط سیر CRP) نیز به عنوان یک عملگر برانبارش استفاده شود (ایلماز، ۲۰۰۱).

## ۲-۲-۲-۱ برانبارش سطح بازتاب مشترک (CRS)

برانبارش سطح بازتاب مشترک<sup>۳</sup> یک روش جاگزین برای برانبارش NMO/DMO است که هدف یکسانی را دنبال می‌کند که منظور از آن، شبیه‌سازی مقطع ZO از داده‌های دارای همپوشانی است. تفاوت روش‌های برانبارش مرسوم با برانبارش CRS در این است که این روش از تمامی داده‌های دارای همپوشانی به منظور انجام عملیات برانبارش استفاده و پارامترهای زمان‌سیر دیگری را به نام نشانگرهای جنبشی میدان موج معرفی می‌کند. نشانگرهای CRS شاید اهمیت بیشتری از خود مقطع ZO داشته باشند. این نشانگرهای

<sup>1</sup>Spinner

<sup>2</sup>Common Reflection Point(CRP) trajectory

<sup>3</sup>Common reflection surface(CRS)

می‌توانند اطلاعات جانبی مفیدی را فراهم کنند تا در حل مسائل مربوط به برانبارش، معکوس سازی و مدل سازی استفاده شوند. در فصل سوم به طور مفصل به‌این روش برانبارش پرداخته خواهد شد.

## کوچ<sup>۱</sup> ۳-۲-۱

کوچ معمولاً آخرین مرحله در تصویرسازی است. بطور کلی کوچ به دو صورت کوچ زمانی و کوچ عمقی انجام می‌گیرد. تصاویر لرزه‌ای بدست آمده از این دو روش متفاوت است. تفاوت این دو تکنیک تنها در حوزه‌ای که منجر به ساخت تصویر می‌شود نیست. در کوچ زمانی، محیط بطور موضعی یک بعدی فرض می‌شود و بنابراین در محیط‌هایی با تغییرات جانبی شدید، ناکارامد می‌شود. اگرچه حوزه عمقی برای تصویر سازی ساختارهای زمین‌شناسی مناسب تر بنظر می‌رسد، اما کوچ زمانی بیشتر مورد استفاده قرار می‌گیرد. این امر بدان علت است که ساختن مدل سرعت ساده‌تر بوده و خطای مدل سرعت تاثیر کمتری برنتیجه کوچ و بویژه بر روی دامنه‌ها دارد (اشپیتر، ۷۰۰۲). مقطع کوچ زمانی را می‌توان براحتی با مقطع زمانی قبل از برانبارش مقایسه کرد. این امر یکی از مزیت‌های کوچ زمانی است در حالیکه در کوچ عمقی مقطع بدست آمده تطبیق قابل قبولی را نسبت به ساختارهای زیرسطحی از خود به نمایش می‌گذارد. برای هر دو کوچ ذکر شده در بالا در اختیار داشتن اطلاعات دقیق سرعت ضروری است. در کوچ زمانی از سرعت<sup>۲</sup> RMS و کوچ عمقی از اختلاف سرعت‌های بازه‌ای که میانگین سرعت‌های واقعی زمین است، استفاده می‌شود. کوچ زمانی را هم، می‌توان مانند کوچ عمقی بر مقطع برانبارش دور افت صفر (کوچ پس از برانبارش<sup>۳</sup>) یا برتمامی دسته داده‌های دارای هم پوشانی (کوچ قبل از برانبارش<sup>۴</sup>) اعمال کرد. در کوچ قبل از برانبارش، فرآیند کوچ بطور جداگانه بر روی هر شبکه دور افت در جایی که دورافت‌ها در یک محدوده معین با هم ترکیب شده تا کافی بودن تعداد ردیزه‌ها تضمین شود، اعمال می‌شود. فرآیند کوچ بعد از برانبارش سریعتر بوده و تصویر با کیفیت بالاتر که ناشی از بهبود نسبت سیگنال به نویه S/N در مقایسه با داده‌های ورودی می‌باشد، را بدست می‌دهد. البته این تکنیک در مناطق با ساختارهای پیچیده کارایی چندانی ندارد (ایلماز، ۱۰۰۰۲).

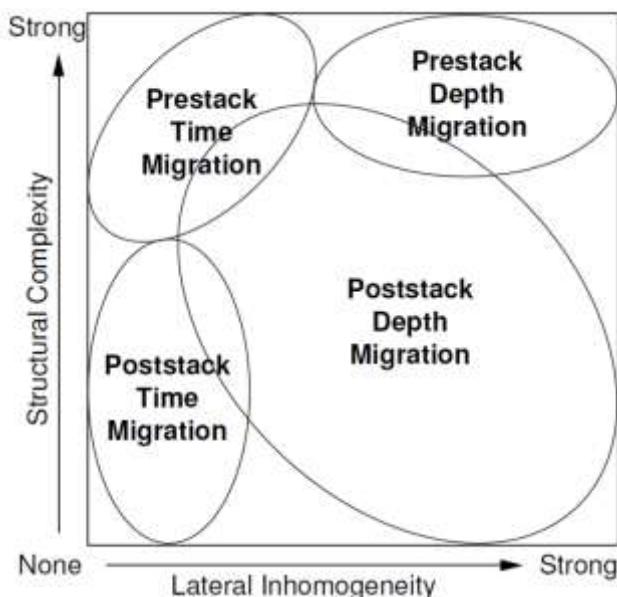
<sup>1</sup>Migration

<sup>2</sup>Root-Mean-Square

<sup>3</sup>Poststack

<sup>4</sup>Prestack

محدوده‌ی عملکرد کوچ قبل و بعد از برانبارش در حوزه زمان و عمق در شکل (۱-۳) نشان داده شده است.



شکل ۱-۳: محدوده کارکرد کوچ قبل و بعد از برانبارش عمقی و زمانی. کوچ زمانی برای محیط‌های با تغییرات ملایم سرعت مناسب تر است و در مناطق با ناهمگونی جانبی شدید نیازمند به اعمال کوچ عمقی می‌باشد. در مناطق با ساختارهای پچیده نظیر کف گنبد‌های نمکی یا در ساختارهایی با شیب‌های متداخل استفاده از کوچ قبل از برانبارش توصیه می‌شود (لینیر<sup>۱</sup>، ۱۹۹۹).

کوچ قبل از برانبارش حاوی اطلاعات تمامی دورافت‌ها است و به همین دلیل فقط در کوچ قبل از برانبارش می‌توان کیفیت مدل سرعت را با تصاویر مجازی که در هر دالان دور افت بدست می‌آید، بررسی کرد. با بیرون کشیدن ردیزه‌های مربوط به یک وضعیت جانبی (افقی) مشترک و به نمایش درآوردن آنها به صورت تابعی از دور افت، دسته تصویر مشترک<sup>۲</sup> حاصل می‌شود. اگر مدل سرعت به کار رفته در کوچ با دسته داده‌ها سازگار باشد، تمامی مقاطع دور افت مشترک از لحاظ جنبشی<sup>۳</sup> هم ارزند و رخدادها در CIG صاف<sup>۴</sup> دیده می‌شوند. در یک برونزاند مثبت، یعنی تصاویر مربوط به دورافت‌های دور در مقایسه با دورافت‌های نزدیکتر در زمان سیرهای کوچک‌تری ظاهر می‌شوند که این امر نشان دهنده‌ی این است که سرعت کوچ، اندک در نظر گرفته شده است و بر عکس. بنابراین می‌توان معیاری برای تعیین درستی مدل

<sup>1</sup>Liner

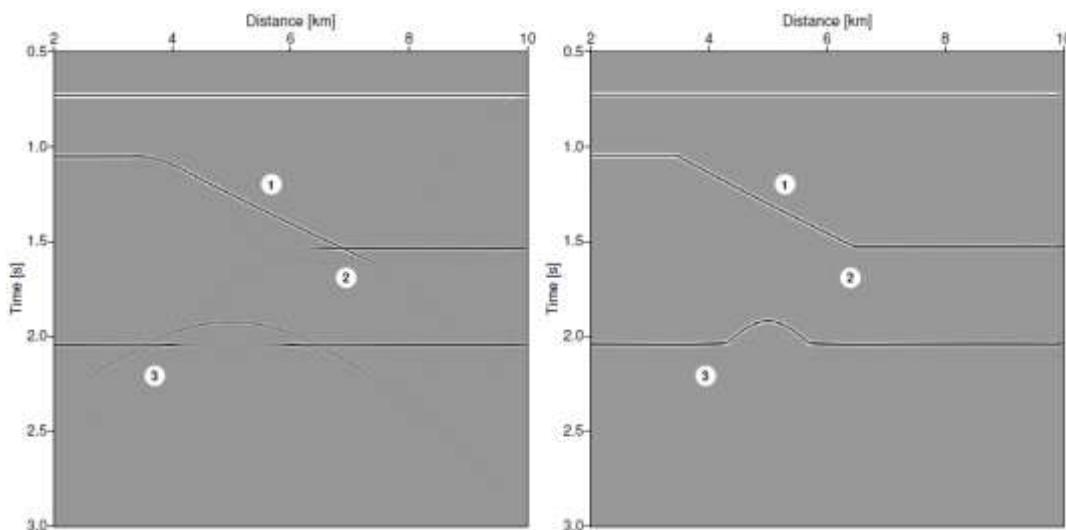
<sup>2</sup>Common-image gather(CIG)

<sup>3</sup>Kinematically

<sup>4</sup>Flat

سرعت و به روز کردن آن ایجاد کرد (اشپینر، ۲۰۰۷).

شکل (۱-۴) نتیجه اعمال کوچ در یک مقطع مصنوعی را نشان می‌دهد. در شکل سمت چپ مقطع دور افت صفر و در شکل سمت راست مقطع کوچ داده شده آن نشان داده شده است. در این مثال دیده می‌شود که در مقطع کوچ داده شده، تصویر بازتابنده با شیب، انحنا و موقعیت صحیح به نمایش در می‌آید و پراش‌ها در محل شکستگی متمرکز و ناپدید می‌شوند.



شکل ۱-۴ : مقایسه مقطع ZO(شکل سمت چپ) قبل و بعد از کوچ زمانی (شکل سمت راست). کوچ سبب: ۱) تغییر موقعیت و شیب بازتابندها و قرارگیری آنها در موقعیت و شیب حقیقی می‌شود ۲) باعث حذف پراش‌ها و سه گانه‌های باز نشده می‌شود (اشپینر، ۲۰۰۷).

با در نظر گرفتن جنبه‌های جنبشی (بر مبنای زمان سیر) و همچنین دینامیکی (بر مبنای دامنه‌های اندازه‌گیری شده‌ی سیگنال)، فرآیند کوچ انجام گرفته را کوچ با دامنه واقعی<sup>۱</sup> می‌نامیم. برای این منظور، اثر هندسی زمین در طی الگوریتم کوچ با اعمال تابع وزنی مناسب جبران می‌شود. دامنه‌هایی که اثر هندسی زمین از آنها حذف شده‌اند، دامنه واقعی نامیده می‌شوند. اگر تمامی دسته داده‌های دارای همپوشانی بوسیله‌ی کوچ با دامنه واقعی، کوچ داده شوند، مشخصه‌های بیشتری از بازتابندها را می‌توان با استفاده از آنالیز<sup>۲</sup> AVO/AVA بدست آورد. واضح است که اگر مقطع شبیه‌سازی شده دور افت صفر با اشکال مواجه

<sup>1</sup>True-amplitude

<sup>2</sup>Amplitude versus offset

باشد، اطلاعات مربوط به دورافتھای دور را از دست خواهیم داد (کیناست<sup>۲</sup>، ۲۰۰۷).

### ۱-۳ تفسیر

هدف تفسیر مقطع لرزهای تعیین ساختارهای با اهمیت زمین‌شناسی از داده‌های لرزهای است. در فرآیند تفسیر، آنالیز های ویژه‌ای صورت می‌گیرد که در پی آن موقعیت مخزن نفت، گاز یا ذخایر ژئوترمال شناخته می‌شود. این آنالیز ها شامل تفسیر ساختاری<sup>۳</sup> و چینه‌شناسی<sup>۴</sup> است. در تفسیر ساختاری، هندسه‌ی بازتابنده‌ها مورد بررسی قرار می‌گیرد و پتانسیل وجود مخزن در این رخدادها ارزیابی می‌شود. تفسیر چینه‌شناسی تعیین کننده واحد چینه‌شناسی زمانی<sup>۵</sup> بازتابنده‌ها است. داده‌های ورودی در هر دو تکنیک، مقطع کوچ به همراه مقطع همتای کوچ داده نشده آن است. در صورت استفاده از کوچ زمانی باید آن را به کوچ عمقی تبدیل کرد. البته اطلاعات تکمیلی دیگری نیز می‌تواند به تفسیر دقیق‌تر کمک کند از قبیل

- اطلاعات مربوط به سایر روش‌های ژئوفیزیکی نظریه گرانی‌سنجدی.
- نقشه‌های زمین‌شناسی منطقه‌ای.
- اطلاعات کمکی حاصل از معکوس سازی AVO/AVA

### ۱-۴ ساختار پایان نامه

همانطور که ملاحظه کردید در فصل اول، بطور خلاصه روند کلی لرزه‌نگاری بازتابی، از برداشت داده‌های لرزهای تا مرحله نهایی یعنی تفسیر داده‌های لرزهای بطور مختصر تشریح شد. در فصل دوم، ابتدا حل معادله موج الاستودینامیک در محیط‌های مختلف نشان داده می‌شود. سپس به روش تئوری پرتو که روشی مبتنی بر تقریب مجانب با فرکانس بالا است و حل معادلات آیکونال و انتقال که نتیجه‌ای از تئوری پرتو هستند پرداخته می‌شود. در فصل سوم، در وحله‌ی اول روش متداول برانبارش داده‌های لرزهای بررسی

<sup>1</sup>Amplitude versus angle

<sup>2</sup>Kienast

<sup>3</sup>Structural analysis

<sup>4</sup>Stratigraphical analysis

<sup>5</sup>Chronostratigraphical

و سپس معادله کلی عملگر برانبارش CRS و نشانگرهای جنبشی میدان موج معرفی می‌شوند. همچنین بطور خلاصه نحوه‌ی به دست آوردن نشانگرهای جنبشی میدان موج و حل معادله CRS شرح داده خواهد شد. و برخی از کاربردهای دیگر نشانگرهای جنبشی میدان موج در سایر مراحل پردازش ذکر می‌شود. در فصل چهارم، به تشریح مسئله شیب‌های متداخل و نحوه‌ی عملکرد روش‌های برانبارش مختلف در اینگونه موارد پرداخته می‌شود. و در ادامه عملگر برانبارش سطح پراش مشترک (CDS) و همچنین مراحل پردازش در این روش توضیح داده می‌شود. و در آخر مقاطع بدست آمده از روش‌های برانبارش CRS، CDS بر روی داده‌های واقعی با ساختار نیمه پیچیده آورده خواهد شد. فصل پنجم، اختصاص به معرفی روش جدیدی به نام برانبارش سطح پراش مشترک با دورافت محدود دارد. در این فصل به منظور بررسی کارکرد این روش ابتداد عملگر مربوطه را بر بخشی از داده‌های مصنوعی که مسئله‌ی شیب‌های متداخل در آن وجود دارد آزمایش می‌شود. برای مقایسه، روش‌های برانبارش CRS و CDS نیز بر این داده‌ها اعمال شده است. در انتهای این فصل این روش بروی داده‌های واقعی ذکر شده در فصل چهارم، اعمال می‌شود و نتایج کوچ عمقی پس از برانبارش مربوط به این داده‌ها آورده شده است. و در انتها، فصل ششم به بحث و نتیجه‌گیری در مورد نتایج بدست آمده از فصل‌های چهارم و پنجم ختم می‌شود.

## ۲ فصل دوم

### تئوری پرتو<sup>۱</sup>

#### ۱-۲ مقدمه

در لرزه‌نگاری بازتابی، معمولاً انتشار موج در درون زمین به شکل یک رخداد پیوسته توصیف می‌شود. اصلی‌ترین معادله در این زمینه معادله موج الاستودینامیک<sup>۲</sup> است که یک معادله دیفرانسیل درجه دوم می‌باشد. بطور کلی این معادله را نمی‌توان به صورت تجزیه‌ای برای هر محیط پیچیده دلخواه حل کرد. تقریب‌های معمول مبتنی بر حل عددی معادله موج با روش اجزای محدود<sup>۳</sup> یا مبتنی بر تقریب مجانب<sup>۴</sup> یا روش‌های حل تکرار شونده هستند، مانند تئوری پرتو یا روش WKB<sup>۵</sup>. اگر چه روش‌های تقریب، متحمل محدودیت‌هایی از قبیل محدوده‌ی صحت (معتبر بودن) و قابلیت به اجرا در آوردن هستند، با اینحال عموماً از این روش‌ها در مسائل پیشرو و معکوس لرزه‌ای استفاده می‌شود (اشپینر، ۲۰۰۷).

در این فصل ابتدا به دلیل اهمیت موضوع به طور خلاصه به معادلات موج الاستیک و آکوستیک<sup>۶</sup> در محیط‌های مختلف اشاره می‌شود و در ادامه تئوری پرتو که حل معادله موج را بر حسب سری‌های پرتو با

---

<sup>1</sup>Ray theory

<sup>2</sup>Elastodynamic

<sup>3</sup>Finite-difference

<sup>4</sup>Asymptotic

<sup>5</sup>حرروف اول اسم فیزیکدانانی است که بطور مستقل در این زمینه کار کردند.

<sup>6</sup>Acoustic

فرکانس بالا به انجام می رساند، مورد بررسی قرار می گیرد. معمولاً این سری تا آنجایی که آنرا مانند یک تئوری پرتو درجه صفر بشناسیم، ادامه می یابد. به عبارت دیگر طبق شرط اولیه سری پرتو که در بخش های بعدی تشریح خواهد شد، تنها جمله‌ی اول سری پرتو مدنظر است. با فرض یک محیط ملایم (از لحاظ تغییرات جانبی سرعت) روش پرتو می تواند حل تقریبی برای جنبه‌های جنبشی و دینامیکی میدان موج به شکل معادلات آیکونال<sup>۱</sup> و انتقال<sup>۲</sup> فراهم کند. بعد از حل این دو معادله به دو بسط تئوری پرتوی لرزه‌ای دنبال کردن دینامیکی پرتو و دنبال کردن پرتوهای موازی محور<sup>۳</sup> پرداخته خواهد شد. در دنبال کردن پرتوهای موازی محور با استفاده کمیت‌های مربوط به یک پرتوی معین (پرتوی مرکزی) پرتوهای موازی با این پرتو در اطرافش تقریب زده خواهد شد. علاوه بر آن دسته پرتوهای موازی را می‌توان به صورت ردیابی دینامیکی پرتو بسط داد تا کل حوزه زمان سیر را پارامتری کرد و کمیت‌های دینامیکی نظیر فاکتور توزیع هندسی<sup>۴</sup> را بدست آورد (اشپینر، ۲۰۰۷).

## ۲-۲ معادله موج الاستودینامیک

اساس معادله موج الاستودینامیک بر بقاء گشتاور استوار است. با رابطه خطی بین تنش و کرنش یعنی قانون تعمیم یافته‌ی هوک، و به پیش بردن این روابط خطی، به یک معادله دیفرانسیل جزئی درجه دوم دست خواهیم یافت. با دانستن روابط مشتقات زمانی نسبت به مشتقات مکانی در حوزه جابجایی ذره، می‌توان این حوزه را برای شرایط آغازین و شرایط مرزی محاسبه کرد که در پی آن شناسایی توزیع مکانی پارامترهای محیطی را در بر دارد.

جزئیات مربوط به این مشتقات را می‌توان در لی<sup>۵</sup> والاس<sup>۶</sup> (۱۹۹۵)، آکی<sup>۷</sup> و ریچارد<sup>۸</sup> (۱۹۸۰) و چپمن<sup>۹</sup>

<sup>۱</sup>Eikonal

<sup>۲</sup>Transport

<sup>۳</sup>Paraxial ray tracing

<sup>۴</sup>Geometrical spreading factor

<sup>۵</sup>Lay

<sup>۶</sup>Wallace

<sup>۷</sup>Aki

<sup>۸</sup>Richards

<sup>۹</sup>Chapman

(۲۰۰۴) پیدا کرد.

## ۱-۲-۲ محیط ناهمگن و ناهمسانگرد

حرکت یک ذره را در درون یک جسم جامد که دارای رابطه الاستیک خطی است در نظر می‌گیریم. با استفاده از توصیف لاغرانژی حرکت ذره در یک محیط الاستیک، جابجایی ذره را می‌توان نسبت به موقعیت ابتدایی ذره  $(x_1, x_2, x_3) = \vec{x}$  در زمان ابتدایی  $t_0$  توصیف کرد. بنابراین بردار جابجایی وابسته زمانی با  $\vec{u}(t)$  و سرعت و شتاب ذره به ترتیب با  $\partial\vec{u}/\partial t$  و  $\partial^2\vec{u}/\partial t^2$  نشان داده می‌شوند.

با فرض اینکه یک ذره درون یک جسم جامد الاستیک دارای حجم  $V$  و سطح جانبی  $S$  است، با استفاده از قانون دوم نیوتون در مکانیک، رابطه زیر حاصل می‌شود (هر توک<sup>۱</sup>، ۲۰۰۴):

$$\iiint_V \rho \frac{\partial^2 \vec{u}}{\partial t^2} dV = \iiint_V \vec{f} dV + \iint_S \vec{T}(\vec{n}) ds \quad (1-2)$$

در معادله بالا  $\rho$  معرف چگالی و  $\vec{f}$  نشان دهنده چگالی نیروهای خارجی واردہ به ذره است.  $(\vec{T}(\vec{n})$  نیروی واردہ به حجم  $V$  و سطح جانبی محصور کننده  $S$  ذره مورد نظر، در یک جهت معین  $(\vec{n})$  می‌باشد.  $\vec{n}$  بردار یکه نرمال بر سطح جانبی است و جهت آن رو به بیرون سطح می‌باشد. حال با تبدیل انتگرال سطح به انتگرال حجم با استفاده از قضیه گاووسی در معادله بالا می‌توان رابطه زیر را بدست آورد (هر توک، ۲۰۰۴):

$$\rho \frac{\partial^2 \vec{u}}{\partial t^2} = f_i + \frac{\partial \tau_{ij}}{\partial x_i} \quad i, j = 1, 2, 3 \quad (2-2)$$

$x_i$  نشان دهنده مولفه‌های موقعیت بردار  $\vec{x}$  است. شرایط تنش در هر نقطه که با بردار  $\vec{x}$  مشخص می‌شود در محیط با استفاده از تانسور<sup>۲</sup> تنش متقارن  $(\vec{x}, t) \tau$  توصیف می‌شود. مؤلفه‌های قطر اصلی تانسور تنش  $\tau_{ii}$  نشان دهنده تنش نرمال و سایر مؤلفه‌ها ( $j \neq i$ )  $\tau_{ij}$  نشان دهنده تنش برشی هستند. تغییر شکل جسم تحت فشار با استفاده از تانسور متقارن دیگری به نام تانسور کرنش  $(\vec{x}, t) e$  توصیف می‌شود. در واقع تغییر مکانی تانسور تنش  $\tau_{ij}$  را می‌توان با استفاده از معادله حرکت (۲-۲) به صورت تغییر زمانی بردار

---

<sup>1</sup>

<sup>2</sup>Tensor

جابجایی  $\tilde{\tau}$  توصیف کرد. رابطه (۲-۲) را معادله حرکت ذره در یک محیط پیوسته می‌نامند. با در نظر گرفتن رابطه الاستیک خطی در جسم جامد، مشتقات مکانی تانسور تنش در معادله (۲-۲) را می‌توان بر حسب بردار جابجایی و با استفاده از ترکیب رابطه تعمیم یافته قانون هوک بیان کرد (اشپینر، ۲۰۰۷):

$$\tau_{ij} = c_{ijkl} e_{kl}, \quad i, j, k, l = (1, 2, 3) \quad (3-2)$$

$$e_{kl} = \frac{1}{2} \left( \frac{\partial u_k}{\partial x_l} + \frac{\partial u_l}{\partial x_k} \right) = \frac{1}{2} (u_{k,l} + u_{l,k}) \quad (4-2)$$

تانسور درجه چهارم ( $\vec{x}$ ) در معادله (۳-۲) را تانسور الاستیک یا سفتی<sup>۱</sup> و مؤلفه‌های  $c_{ijkl}$  را مدول‌های الاستیک می‌نامند. در نتیجه تقارن تانسورهای تنش و کرنش و با در نظر گرفتن شرایط ترمودینامیکی (با فرض بی‌درو بودن فرآیند تغییر شکل (محیط کاملاً الاستیک باشد)), فقط ۲۱ مؤلفه مستقل از ۸۱ مؤلفه تانسور الاستیک در بیشتر موارد که محیط بی‌درو و ناهمسانگرد است، وجود خواهد داشت. با بازنویسی  $\partial \tau_{ij} / \partial x_i$  مانند رابطه (۵-۲) الف (اشپینر، ۲۰۰۷):

$$\frac{\partial \tau_{ij}}{\partial x_i} = \frac{1}{2} \frac{\partial}{\partial x_i} \left( c_{ijkl} \frac{\partial u_k}{\partial x_l} + c_{ijkl} \frac{\partial u_l}{\partial x_k} \right) \quad (5-2) \text{ الف}$$

$$= \frac{\partial}{\partial x_i} \left( c_{ijkl} \frac{\partial u_k}{\partial x_l} \right) \quad (5-2) \text{ ب}$$

و جایگذاری نتیجه بدست آمده در رابطه (۲-۲)، معادله موج الاستودینامیک برای یک محیط غیرهمگن ناهمسانگرد الاستیک خطی حاصل می‌شود (اشپینر، ۲۰۰۷):

$$\rho \frac{\partial^2 u_j}{\partial t^2} - \frac{\partial}{\partial x_i} \left( c_{ijkl} \frac{\partial u_k}{\partial x_l} \right) = f_j \quad (6-2)$$

## ۲-۲-۲ محیط ناهمنگ و همسانگرد

خواص الاستیک برای بسیاری مواد موجود در زمین مستقل از تعیین جهت است. در این صورت برای محیط‌های همسانگرد مؤلفه‌های تانسور الاستیک به دو مؤلفه به نام پارامترهای لامه ( $\lambda = \lambda(\vec{x})$  و

---

<sup>۱</sup>Stiffness

$\mu = \mu(\vec{x})$  کاهش می‌یابند. به این دو کمیت مدول‌های برشی نیز گفته می‌شود. رابطه پارامترهای لامه با تانسور الاستیک به صورت زیر خواهد بود (هرتوک، ۲۰۰۴):

$$c_{ijkl} = \lambda \delta_{ij} \delta_{kl} + \mu (\delta_{ik} \delta_{jl} + \delta_{il} \delta_{jk}) \quad (7-2)$$

دلتای کرنوکر<sup>۱</sup>  $\delta_{ij}$  به ازای  $j = i$  برابر با یک و به ازای  $j \neq i$  برابر صفر می‌شود.

با استفاده از رابطه (۷-۲) معادله موج محیط‌های همسان‌گرد ناهمگن الاستیک خطی را می‌توان به کمک روابط برداری به صورت زیر بازنویسی کرد (هرتوک، ۲۰۰۴):

$$\rho \frac{\partial^2 \vec{u}}{\partial t^2} - (\lambda + \mu) \vec{\nabla}(\vec{\nabla} \cdot \vec{u}) - \mu \Delta \vec{u} - \vec{\nabla} \lambda (\vec{\nabla} \cdot \vec{u}) - \vec{\nabla} \mu \times (\vec{\nabla} \times \vec{u}) - 2(\vec{\nabla} \mu \cdot \vec{\nabla}) \vec{u} = \vec{f} \quad (8-2)$$

معادله (۸-۲) معادله موج الاستودینامیک برای محیط ناهمگن و همسان‌گرد الاستیک خطی نامیده می‌شود. در معادله بالا به نماد  $\vec{\nabla}$  عملگر نابلا<sup>۲</sup> گفته می‌شود برای مثال  $\vec{\nabla} \Phi$  گرادیان یک تابع اسکالر،  $\vec{\nabla} \vec{\psi}$  آدیورژانس<sup>۳</sup> یک تابع برداری و  $\vec{\nabla} \times \vec{\psi}$  کرل<sup>۴</sup> یک تابع برداری و نماد  $\vec{\nabla} \cdot \vec{u}$  نشان دهنده عملگر لاپلاس است.

### ۳-۲-۲ محیط‌همگن و همسان‌گرد

اگر محیط را همگن در نظر بگیریم،  $\vec{\nabla} \lambda = \vec{0}$  خواهد بود و معادله (۸-۲) به صورت زیر کاهش می‌یابد (هرتوک، ۲۰۰۴):

$$\rho \frac{\partial^2 \vec{u}}{\partial t^2} - (\lambda + \mu) \vec{\nabla}(\vec{\nabla} \cdot \vec{u}) - \mu \Delta \vec{u} = \vec{f} \quad (9-2)$$

این رابطه را معادله موج برای محیط‌های همگن و همسان‌گرد الاستیک خطی می‌نامند.

### ۲-۳ موج‌های فشاری و برشی

مانند آنچه که در مراحل قبل گفته شد، معادله موج، توصیف کننده بسط مکانی و زمانی انرژی در

<sup>1</sup>Kronecker

<sup>2</sup>Nabla

<sup>3</sup>Divergence

<sup>4</sup>Curl

حوزه جابجایی ذره است و جواب هایی به شکل موج های رونده در آن صدق می کند. حل موج صفحه ای<sup>۱</sup> نقش قابل ملاحظه ای را در ریاضی فیزیک بازی می کند که این می تواند ناشی از سادگی در حل باشد و اینکه انواع زیادی از راه حل های دیگر می توانند خود را به عنوان یک جانشین برای موج های صفحه ای معرفی کنند (پوپوف<sup>۲</sup>، ۱۹۹۶)

$$\vec{u}(\vec{x}, t) = A \exp(i[\vec{k} \cdot \vec{x} - \omega t]) \quad (10-2)$$

در رابطه بالا دامنه  $A$  ثابت در نظر گرفته می شود. پارامتر  $\omega$  سرعت زاویه ای است. بردار عدد موج  $\vec{K}$  با مؤلفه های  $k_1, k_2$  و  $k_3$  نشان دهنده جهت انتشار و قدر مطلق  $\vec{K}$  برابر عدد موج است  $k = |\vec{k}|$ . اگر نیروهای حجمی<sup>۳</sup> را نادیده گرفته و آنساتز<sup>۴</sup> موج صفحه ای (۱۰-۲) (این معادله در واقع حالت کلی از جواب های خاصی است که نحوه انتشار امواج تخت و حجمی را در محیط همگن نشان می دهد. علاوه بر این، حالت کلی این معادله شامل جمله هایی از فاز و دامنه بر حسب موقعیت است. بنابراین آنساتز را می توان به عنوان معادله کمکی برای حل معادله اصلی موج در نظر گرفت) در معادله (۹-۲) جایگذاری شود، بعد از چند مرحله عملیات ریاضی، معادله به شکل کلی زیر تبدیل می شود (هر توک، ۲۰۰۴):

$$N\vec{A} = \vec{0} \quad (11-2)$$

ماتریس  $N$  بشکل زیر است:

$$N = \begin{pmatrix} (\lambda + \mu)k_1 k_1 + \Lambda & (\lambda + \mu)k_1 k_2 & (\lambda + \mu)k_1 k_3 \\ (\lambda + \mu)k_2 k_1 & (\lambda + \mu)k_2 k_2 + \Lambda & (\lambda + \mu)k_2 k_3 \\ (\lambda + \mu)k_3 k_1 & (\lambda + \mu)k_3 k_2 & (\lambda + \mu)k_3 k_3 + \Lambda \end{pmatrix} \quad (12-2)$$

$$\Lambda = \mu k^2 - \rho \omega^2 \quad (13-2)$$

واضح است که یک سیستم خطی از دستگاه معادلات همگن مانند (۱۱-۲) دارای جواب غیر صفر (بی

<sup>1</sup>Plane wave

<sup>2</sup>Popov

<sup>3</sup>Body force

<sup>4</sup>Ansatz

نهايت جواب) است اگر و تنها اگر  $\det(N) = 0$  باشد. با توجه به اين رابطه خواهيم داشت(هر توک، ۲۰۰۴):

$$\det(N) = \Lambda^2(\Lambda + (\lambda + \mu)k^2) = 0 \quad (14-2)$$

بنابراین برای حل معادله (۱۴-۲) دو امکان وجود دارد (هر توک، ۲۰۰۴):

الف) جوابی که از رابطه زیر حاصل می شود:

$$\Lambda + (\lambda + \mu)k^2 = (\lambda + 2\mu)k^2 - \rho\omega^2 = 0 \quad (15-2)$$

رابطه‌ی بالا منجر می شود تا ما موج حاصل را موج فشاری یا موج P بنامیم. عدد موج از رابطه زیر بدست می

آید:

$$k^2 = \frac{\rho\omega^2}{\lambda + 2\mu} \quad (16-2)$$

با توجه به رابطه  $k = \omega/v$  می توان نتیجه گرفت که این موج وابسته به سرعت فاز است(هر توک، ۲۰۰۴)

$$v_p = \sqrt{\frac{\lambda + 2\mu}{\rho}} \quad (17-2)$$

در صورتی که  $k^2$  در معادله (۱۱-۲) قابل قبول باشد، قطبش موج با استفاده از بردار ویژه  $\vec{A}_p$  که مطابق با

ساختار معادله (۱۱-۲) است، تعیین می شود. اگر این بردار ویژه را ایجاد کنیم، می توان مشاهده کرد که

و  $\vec{k}$  در یک جهت قرار می گیرند، یعنی قطبش و جهت انتشار موج فشاری در یک راستا قرار می گیرند.

بنابراین به این نوع حرکت موج، طولی<sup>۱</sup> نیز گفته می شود.

ب) اگر رابطه زیر برقرار باشد، نوع دیگری از حرکت موج الاستیک رخ خواهد داد:

$$\Lambda^2 = (\mu k^2 + \rho\omega^2)^2 = 0 \quad (18-2)$$

در اینجا عدد موج با استفاده از رابطه‌ی

$$k^2 = \frac{\rho\omega^2}{\mu} \quad (19-2)$$

---

<sup>۱</sup>Longitudinal

بدست می آید و بار دیگر می توان نتیجه گرفت که موج برشی یا موج S نیز وابسته به سرعت فاز است

$$v_s = \sqrt{\frac{\mu}{\rho}} < v_p \quad (20-2)$$

در صورتی که  $k^2$  در معادله (11-2) قابل قبول باشد، دو بردار ویژه  $\vec{A}_S$  متعامد، مطابق با ساختار معادله (2-

11) وجود خواهد داشت. این موضوع به علت متقارن بودن ماتریس N است. هر دو بردار ویژه عمود بر جهت

انتشار موج هستند ( $\vec{k}$ )، بنابراین این نوع حرکت موج را عرضی<sup>1</sup> می نامند. بردارهای ویژه ممکن است بطور

دلخواه در صفحه عمود بر  $\vec{k}$  انتخاب شود. بنابراین بطور قراردادی یک بردار را در صفحه عمود بر جهت

انتشار، قائم در نظر گرفته و با نماد SV نشان داده می شود و بردار دیگر را افقی و با نماد SH نمایش می

دهیم.

جواب های ارائه شده در اینجا برای موج های الاستیک صفحه ای در شرایط غیر مرزی و در

محیط همگن و همسانگرد است. بنابراین جواب های معادله (14-2) دو نوع موج صفحه ای (موج P و S) را

بدست می دهد که می توانند با توجه به جهت تعیین شده با بردار  $\vec{k}$  در هر جهتی انتشار یابند. در این مورد

موج های P و S به صورت مجزا هستند. می توان بیان کرد که این امواج در مواجه با فصل مشترک دو لایه یا

سطح آزاد رفتارهای پیچیده بیشتری از خود نشان می دهند (هرتوک، ۲۰۰۴).

## ۴-۲ معادله موج آکوستیک<sup>2</sup>

محیط هایی که در آن  $\mu = 0$  باشد، سیال تلقی می شوند. اگر از نیرو های حجمی چشم پوشی شود،

می توان مشاهده کرد که برای این قبیل موارد معادله موج الاستودینامیک (2-۲) به صورت زیر ساده

می شود:

$$\vec{\nabla}(\lambda \vec{\nabla} \cdot \vec{u}) = \rho \frac{\partial^2 \vec{u}}{\partial t^2} \quad (21-2)$$

در این حالت بجای استفاده از بردار جابجایی ( $\vec{x}, t$ )  $\vec{u}$  از پارامتر فشار P استفاده می شود که از رابطه زیر بدست

---

<sup>1</sup>Transversal

<sup>2</sup>Acoustic

می آید:

$$P(\vec{x}, t) = -\lambda \vec{\nabla} \cdot \vec{u}(\vec{x}, t) \quad (22-2)$$

در این صورت معادله (21-2) به صورت زیر اصلاح می شود:

$$\vec{\nabla} \left( \frac{1}{\rho} \vec{\nabla} P \right) = \frac{1}{\lambda} \frac{\partial^2 P}{\partial t^2} \quad (23-2)$$

که به آن معادله موج آکوستیک گفته می شود. برای محیطی با دانسته  $\rho$  ثابت معادله (23-2) به صورت

زیر نوشته می شود:

$$\frac{1}{\nu} \frac{\partial^2 P}{\partial t^2} - \Delta P = 0 \quad , \quad \nu = \sqrt{\frac{\lambda}{\rho}} \quad (24-2)$$

سرعت موج آکوستیک است که نسبت به مکان انتشار، متفاوت می باشد. در محیط های آکوستیک تنها

یک نوع موج می تواند انتشار یابد که همان موج فشاری است.

## ۵-۲ تئوری پرتو

به طور کلی روش های توصیف انتشار امواج لرزه ای در محیط های پیچیده و ناهمگن را می توان به دو

دسته تقسیم کرد:

الف) روش های مبتنی بر حل مستقیم معادله موج، بطور مثال، روش های عددی اجزای محدود.

ب) روش های تقریب مجانب با فرکانس بالا، مانند تئوری پرتو.

تکنیک های موجود در تئوری پرتو ابزاری قدرتمند و تکرار پذیر در بررسی مسائل پیشرو و معکوس لرزه ای است. تئوری پرتو دو مزیت عمده دارد: این تکنیک بینش شهودی و فیزیکی را در مورد پدیده انتشار موج فراهم می کند و کارایی محاسباتی بیشتری نسبت به حل های مستقیم عددی معادله موج دارد. هر چند این مسئله نیز باید ذکر شود که این روش نمی تواند کل میدان موج را توصیف کند و در برخورد با مناطق

کانونی<sup>۱</sup>، که در اصطلاح علمی به آن کائوستیک<sup>۲</sup> گفته می‌شود، با اشکالاتی مواجه می‌شود.

برخی از مبانی اصلی تئوری پرتو در زمینه الاستودینامیک از مدت‌ها قبل در فیزیک شناخته شده بود و یکی از اولین انتشارات حاوی توصیف ریاضی این تئوری پرتو توسط لیونبرگ<sup>۳</sup> (۱۹۶۶) انجام گرفت. پس از این مقالات و کتاب‌های فراوانی در مورد جنبه‌های مهم و کاربردی تئوری پرتو انتشار یافت. که در این میان می‌توان به آکی و ریچارد (۱۹۸۰)، هانیگا<sup>۴</sup> (۱۹۸۴)، کراتسوف<sup>۵</sup> و اورلوف<sup>۶</sup> (۱۹۹۰) و پوپوف (۱۹۹۶) را اشاره کرد. جامع‌ترین توصیف تکنیک پرتو را می‌توان در چرونی<sup>۷</sup> (۲۰۰۱) پیدا کرد.

تئوری پرتو فقط یک تقریب است و تنها وقتی معتبر است که فرکانس امواج به قدر کفايت بالا باشد. این جمله قدری گیج کننده است زیرا در اکتشافات ژئوفیزیکی معمولاً با فرکانس‌های بین  $10 - 100\text{ Hz}$  سروکار داریم. نکته‌ای که باید به آن توجه داشت این است که اصطلاح "فرکانس بالا"<sup>۸</sup> اشاره به مقدار مطلق آن ندارد. آنچه که باید در نظر داشت، رابطه‌ی بین طول موج‌های (یا عدد موج) وابسته به فرکانس در داده‌ها نسبت به ابعاد هندسی محیط انتشار موج (بطور مثال، ضخامت لایه‌ها یا شعاع انحنای بازتاب‌ها) است. برای آنکه شرط فرکانس بالا در معادلات صادق باشد، تنها لازم است که ابعاد محل انتشار موج تنها چندین برابر طول موج مورد نظر باشد. هرچند اگر شرایط فرکانس بالا برقرار نباشد آسیب جدی به تئوری وارد نمی‌شود ولی نارسایی در تئوری پرتو منجر به عدم تخمین درست در دامنه‌ها و افزایش خطای موقعیت بازتاب‌ها یا وقایع بازتابی می‌شود.

## ۱-۵-۲ معادلات انتقال و آیکونال

به دلیل سادگی در حل، در این قسمت برای بدست آوردن معادلات انتقال و آیکونال از معادله موج آکوستیک (۲۴-۲) استفاده می‌شود. این معادله در حوزه فرکانس به صورت زیر نوشته می‌شود:

<sup>1</sup>Focal region

<sup>2</sup>Caustics

<sup>3</sup>Luneburg

<sup>4</sup>Hanyga

<sup>5</sup>Kravtsov

<sup>6</sup>Orlov

<sup>7</sup>Červeny

$$[\Delta + \frac{\omega^2}{v^2(\vec{x})}] \hat{P}(\vec{x}, \omega) = 0 \quad (25-2)$$

در رابطه‌ی بالا  $\vec{P}(\vec{x}, \omega)$  تبدیل فوریه‌ی  $\vec{P}(t)$  است. معادله (۲۵-۲) را معادله هلمهولتز<sup>۱</sup> می‌نامند و عملگر

تعریف شده در داخل کروشه به عملگر هلمهولتز معروف است. بدین ترتیب با استفاده از حل

آزمایشی WKBJ (سری‌های پرتو)، رابطه‌ی زیر را خواهیم داشت (هرتوک، ۲۰۰۴):

$$\hat{P}(\vec{x}, \omega) \propto e^{i\omega\tau(\vec{x})} \sum_{j=0}^{\infty} \frac{A_j(\vec{x})}{(i\omega)^j} \quad (26-2)$$

( $\vec{x}$ )  $\tau$  آیکونال (زمان سیر) است و  $A_j$  پارامترهای فرکانسی مستقل است که نشان دهنده دامنه موج است. با

جایگذاری آنسatz (۲۶-۲) در معادله هلمهولتز معادله زیر حاصل می‌شود:

$$e^{i\omega\tau} \sum_{j=0}^{\infty} \frac{1}{(i\omega)^j} \left[ \omega^2 \left( \frac{1}{v^2} - (\vec{\nabla}\tau)^2 \right) A_j + i\omega (2\vec{\nabla}\tau \cdot \vec{\nabla}A_j + A_j \Delta\tau) + \Delta A_j \right] = 0 \quad (27-2)$$

این معادله باید برای تمام فرکانس‌ها برقرار باشد. بطور کلی انتظار نمی‌رود که با جلو رفتن رابطه‌ی بالا توان

های مختلف  $\omega$  یکدیگر را حذف کنند. بنابراین لازم است که، ضرایب سری بطور مستقل حذف شوند. این

عمل منجر به حاصل شدن معادله‌ایی به نام معادله‌ایکونال، به شکل زیر می‌شود:

$$(\vec{\nabla}\tau(\vec{x}))^2 = \frac{1}{v^2(x)} \quad (28-2)$$

و معادله انتقال نیز به صورت زیر بدست می‌آید:

$$2\vec{\nabla}\tau(\vec{x}) \cdot \vec{\nabla}A_0(\vec{x}) + A_0(\vec{x})\Delta\tau(\vec{x}) = 0 \quad (29-2)$$

بعد از حل این دو معادله، سایر  $A_j$ ‌ها برای  $j > 0$  نیز بدست می‌آید. هر چند عبارت  $\Delta A_j$  در معادله (۲۷-۲)

باقي می‌ماند و هیچ شناسی برای برقراری دقیق این معادله با استفاده از رابطه‌ی (۲۶-۲) وجود ندارد. ولی

در فرکانس‌های بالا می‌توان فرض کرد که  $\Delta A_j$  در مقایسه با سایر عبارات در (۲۷-۲) قابل چشم پوشی

است و معادله موج به بطور موضعی با استفاده از معادلات آیکونال و انتقال تقریب زده می‌شود. اگر شرایط

فرکانس بالا برقرار نباشد یا اگر عبارت  $\Delta A_j$  در امتداد یک پرتو افزایش یابد، این تقریب ممکن است اعتبار

خود را از دست بدهد. با پی بردن به این موضوع، می‌توان عنوان کرد این عبارت می‌تواند به عنوان معیاری

<sup>1</sup>Helmholtz

برای اینکه ایا روش پرتو برای انتشار موج حقیقی تقریب خوبی است یا خیر، در نظر گرفته شود (چرونی، ۲۰۰۱).

پرواضح است نمی‌توان انتظار داشت که جواب نهایی، یک سری (۲-۲۷) همگرا باشد. بلکه انتظار آن می‌رود که نتیجه، فقط به ازای چند عبارت اول یک سری مجانب جوابی دقیق داشته باشد، البته با این شرط که الزاماً<sup>۱</sup> به سمت بی‌نهایت میل کند. در حالیکه سری‌های همگرا برای عبارات بیشتر، نمایش بهتری از یک تابع دارد این جمله بطور کلی برای سری‌های مجانب صادق نیست. سری مجانب معمولاً نمایش بهتری از نتایج سری‌های دقیق دارد زیرا هیچ ضمانتی وجود ندارد که یک نمایش همگرایی، واقعاً بسرعت همگرا شود. در مدل مجانب، عبارت‌های اولیه که نزدیکی بیشتری به مقداری که تابع آنها نمایش می‌دهد، حفظ می‌شوند. ژئوفیزیکدان‌ها معمولاً تئوری پرتو درجه صفر<sup>۲</sup> را که نتیجه‌ای از مدل مجانب است در نظر می‌گیرند که در آن  $A_0$  در نظر گرفته می‌شود. برای مشاهده جزئیات بیشتر در مورد سری‌های مجانب می‌توان به بلیستین<sup>۳</sup> (۱۹۸۶) یا بلیستین و هاندلسمان<sup>۴</sup> (۱۹۸۴) مراجعه کرد.

## ۲-۵-۲ حل معادله‌ی آیکونال

روش‌های حل معادله‌ایکونال (۲-۲۸) را در هر کتابی که با معادلات دیفراسیل جزئی سروکار دارد می‌توان پیدا کرد، برای مثال بلیستین (۱۹۸۴) یا برونستین<sup>۵</sup> و همکاران (۱۹۹۷). تکنیکی که خیلی اوقات ترجیح داده می‌شود روش استفاده از مشخصه‌ها<sup>۶</sup> است. در واقع حل مسئله به شکل حل معادله زیر است:

$$F(\vec{x}, \tau, \vec{p}) = 0 \quad (3-2)$$

$F$  تابعی با هفت پارامتر می‌باشد که وابسته به مختصات‌های فضایی  $\vec{x}$ ، زمان‌سیر (یا آیکونال)  $\tau$ ، و گرادیان زمان‌سیر (کندی)  $\vec{\nabla} \tau = \vec{p}$  است. این تابع ( $F$ ) را می‌توان برای هر مقدار ثابت معین  $\tau$  مانند تعیین کردن

<sup>1</sup>Zero-order ray theory

<sup>2</sup>Bleistein

<sup>3</sup>Handelsman

<sup>4</sup>Bronstien

<sup>5</sup>Characteristic

سطح همتراز<sup>۱</sup> در فضای  $(x_1, x_2, x_3)$  در نظر گرفت. این سطوح همتراز جبهه موج هایی با بردار نرمال  $\vec{p}$  هستند. اکنون می‌توان نتیجه گرفت، یک سیستم با معادلات دیفرانسیل معمولی چطور حرکت از یک جبهه موج با  $\tau = \tau_1$  به جبهه موج دیگری با  $\tau = \tau_2$  را می‌تواند بیان کند. این جواب‌ها در مختصات مکانی توصیف کننده منحنی‌هایی به نام مشخصه‌ها یا در مورد خاص مورد نظر ما، پرتوها هستند. جواب‌ها برای مؤلفه‌های  $\vec{p}$  می‌توانند به ما بگوید که چگونه بردار نرمال در امتداد هر منحنی تغییر می‌کند، در حالیکه جواب به ازای هر  $\tau$ ، تغییر  $\tau$  را در امتداد مشخصه‌ها توصیف می‌کند.

با اعمال روش مشخصه بر معادله آیکونال (۲۸-۲) می‌توان این معادله دیفرانسیل جزئی را به شش معادله دیفرانسیل معمولی بازنویسی کرد، معمولاً به این معادلات، معادلات پرتو یا سیستم دنبال کردن پرتو<sup>۲</sup> گفته می‌شود

$$\frac{d\vec{x}}{d\tau} = v^2 \vec{p}, \quad \frac{d\vec{p}}{d\tau} = -\frac{\vec{\nabla}v}{v} \quad (31-2)$$

در اینجا  $v$  سرعت مکانی متغیر است. همچنین می‌توان از طول قوس  $s$  بجای زمان سیر  $\tau$  با توجه به جابجایی زیر در رابطه‌ی (۳۱-۲) استفاده کرد

$$\frac{d}{d\tau} = \frac{d}{ds} \frac{ds}{d\tau} = v \frac{d}{ds} \quad (32-2)$$

اکنون می‌توان نتیجه معادلات دیفرانسیل معمولی (۳۱-۲) را با توجه به مسئله و دقت مورد نظر با روش‌های متنوعی انتگرال گیری نمود. نکته جالب توجه اینجاست که می‌توان پرتوها را بدون تعیین هیچ زمان سیری در امتداد پرتو حل کرد. برای محاسبه زمان سیر کلی در امتداد پرتو، نیازمند معادله دیگری هستیم تا به شش معادله‌ی قبلی (۳۱-۲) اضافه شود. برای یک پرتو معین، زمان سیر بسادگی با انتگرال گیری از  $ds/v(\vec{x})$  در امتداد هر خم دلخواه پرتو، تعیین می‌شود.

---

<sup>1</sup>Iso-surface

<sup>2</sup>Kinematic ray tracing system

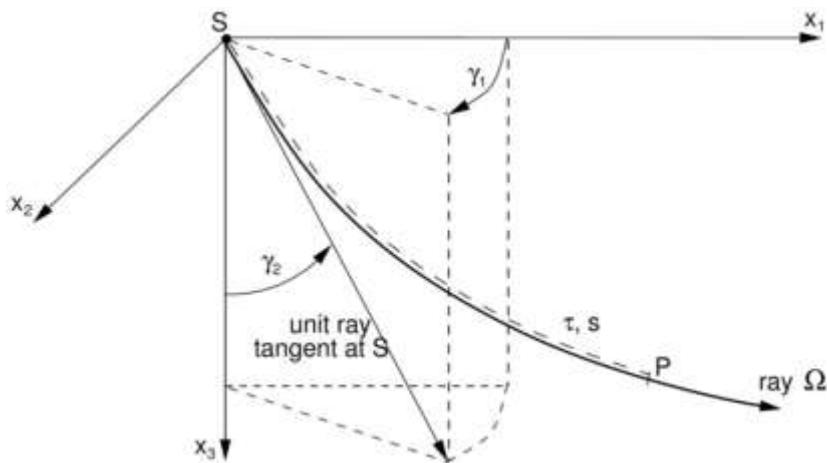
### ۳-۵-۲ حل معادله‌ی انتقال

حل معادله انتقال (۲-۹-۲) قدری مشکل تر است و فقط وقتی می‌تواند انجام شود که معادله‌ایکونال از قبل حل شده باشد. برای سادگی محاسبات مختصات جدیدی به نام مختصات پرتو تعريف می‌شود. این مختصات با دو پارامتر پرتو  $\gamma_1$  و  $\gamma_2$ ، بطور مثال زوایای سیستم مختصات کروی، و پارامتر  $\tau_3$  در امتداد خود پرتو، بطور مثال زمان سیر  $\tau$  یا طول قوس  $S$  تعیین می‌شود. برای چشمۀ نقطه‌ای ثابت  $S$  و زوایای ثابت  $\gamma_1$  و  $\gamma_2$ ، می‌توان یک پرتو را در جبهه موج معین ترسیم کرد و پارامتر (یا  $\tau = \gamma_3$ ) نشان دهنده‌ی موقعیت نقطه‌ی  $P$  در روی این پرتو است. بنابراین هر نقطه‌ی  $P$  در فضای  $\Omega$  که در آن میدان (حوزه) پرتو معین باشد، را می‌توان با مختصات کارتزین  $x_1, x_2, x_3$  یا مختصات پرتو  $\gamma_1, \gamma_2, \gamma_3$  توصیف کرد (شکل ۱-۲).

مؤلفه‌های ماتریس تبدیل  $\hat{Q}^{3 \times 3}$  از مختصات پرتو  $i$  به مختصات کارتزین متداول  $x_i$  به صورت زیر است

$$\hat{Q}_{ij} = \frac{\partial x_i}{\partial \gamma_j} \quad , \quad i, j = 1, 2, 3 \quad (33-2)$$

شکل واقعی ماتریس بستگی به انتخاب  $\gamma_3$  دارد. به کمک ژاکوبین ماتریس تبدیل می‌توان بررسی کرد که ایا میدان (حوزه‌ی) پرتو معین (برقرار) است یا خیر.



شکل ۱-۲ : سیستم مختصات پرتو. برای یک چشمۀ موج نقطه‌ای  $S$ ، مختصات پرتو در ناحیه‌ای که میدان موج منظم است بوسیله دو زاویه  $\gamma_1$  و  $\gamma_2$  تعیین می‌شود و آیکونال  $\tau$  موقعیت نقطه  $P$  را روی پرتو مشخص می‌کند. در این مورد می‌توان به جای زمان سیر  $\tau$  از طول قوس  $s$  نیز برای کنترل متغیر  $\gamma_3$  روی پرتو استفاده کرد (اشپینر، ۲۰۰۷).

$$J^{(\gamma)} = \left| \frac{\partial(x_1, x_2, x_3)}{\partial(\gamma_1, \gamma_2, \gamma_3)} \right| = \det(Q) \quad (34-2)$$

اندیس بالای  $J$  به منظور کنترل متغیر در امتداد پرتو استفاده می‌شود. اگر ژاکوبین  $J^{(\gamma)}$  تعیین شود و برای همهٔ نقاط  $P$  در فضای  $\Omega$  وجود داشته و مخالف صفر باشد، میدان پرتو معین است. بطور معکوس اگر در هر نقطه‌ای  $J^{(\gamma)}$  تعیین نشود یا به صفر برسد، میدان پرتو را منفرد<sup>۱</sup> می‌نامند. اگر  $\gamma_3$  را مساوی  $s$  در نظر بگیریم، ژاکوبین متناظر آن  $J^{(s)} = J$  را ژاکوبین پرتو می‌نامند. در تفسیر هندسی، ژاکوبین پرتو نمایندهٔ عنصری از حجم  $dV$  در سیستم مختصات جدید پرتو است و نشان دهندهٔ چگالی میدان موج است.

با استفاده از معرفی مختصات پرتو در بالا و با در نظر گرفتن  $\tau = \gamma_3$ ، می‌توان معادله دیفرانسیل جزئی  $(29-2)$  را همانند معادله دیفرانسیل معمولی در امتداد یک پرتو بازنویسی کرد:

$$\frac{2}{v^2} \frac{dA_0}{d\tau} + \frac{A_0}{vJ^{(\tau)}} \frac{d}{d\tau} \left( \frac{J^{(\tau)}}{v} \right) = 0 \quad (35-2)$$

اگر  $\gamma_3 = s$  باشد معادلهٔ  $(29-2)$  به صورت زیر تبدیل می‌شود:

$$\frac{2}{v} \frac{dA_0}{ds} + \frac{A_0}{J} \frac{d}{ds} \left( \frac{J}{v} \right) = 0 \quad (36-2)$$

اکنون معادلهٔ  $(36-2)$  یا  $(35-2)$  را می‌توان با تفکیک متغیرها براحتی حل کرد. سرانجام می‌توانیم در یک موقعیت معین عبارت اصلی دامنه را با استفاده از طول قوس در امتداد پرتو بدست آورد

$$A_0(s) = \frac{\sum(\gamma_1, \gamma_2)}{\sqrt{J(s)/v(s)}} = \sqrt{\frac{v(s)J(s_0)}{v(s_0)J(s)}} A_0(s_0) \quad (37-2)$$

ثابت انتگرالی است که تنها وابسته به پارامترهای پرتو است و مقادیر با متغیر مستقل  $s$ ، مشخص کنندهٔ مقادیر اولیه روی یک کرهٔ کوچک، حول نقطهٔ شروع (چشمِ نقطه‌ای) است. نحوی تعیین این نقاط ابتدایی در چرونی (۲۰۰۱) و پوپوف (۱۹۹۶) بحث شده است. اکنون با ساده کردن راه حل معادلهٔ  $(29-2)$  می‌توان ژاکوبین پرتو  $J$  را تعیین کرد. با توجه به اینکه پرتوها و به تبع آن چگالی میدان پرتوها معلوم فرض شده اند، ژاکوبین پرتو  $(J)$  را می‌توان به شکل عددی محاسبه نمود.

---

<sup>۱</sup>Singular

نقاطی از پرتو که ژاکوبین پرتو در آن با اشکال رو برو می شود بطور مثال  $J=0$  نقاط کائوستیک<sup>۱</sup> نامیده می شود. یک نقطه‌ی کائوستیک از درجه‌ی اول، نقطه‌ای است که در آن یکی از شعاع‌های انحنای جبهه موج اصلی، صفر می شود. در اصطلاحات ریاضی، در نقاط کائوستیک درجه اول  $rank(\hat{Q}) = 2$  است. نقاط کائوستیک درجه دوم را نقاط کانونی<sup>۲</sup> می نامند. در اینجا هر دو شعاع جبهه موج اصلی صفر می شود و در  $rank(\hat{Q}) = 1$  است. در نقاط کائوستیک جابجایی فاز رخ می دهد که وابسته به درجه کائوستیک است. در تئوری پرتو، گذار پیوسته‌ی فاز موج از دو طرف نقطه‌ی کائوستیک، بوسیله‌ی پرش فازی ناپیوسته تقریب زده می شود. جابجایی فاز کلی مربوط به نقاط کائوستیک در امتداد پرتو با  $\frac{1}{2}K\pi$  تعیین می شود که  $k$  را به نام اندیس<sup>۳</sup> KMAH می شناسند.

باید در نظر داشت که آنساتز سری‌های پرتو پیرامون کائوستیک معتبر نیست. چنانچه  $J=0$  باشد، دامنه‌ی  $A_0$  به بی نهایت میل می کند که از نظر فیزیک بی معنا می باشد. روشی که بر مسئله‌ی کائوستیک غلبه می کند روش پرتوی گاوی<sup>۴</sup> است. شرح مفصل این روش در چرونی (۲۰۰۱) و پوپوف (۱۹۹۶) آورده شده است. کمیت زیر در تئوری پرتوی لرزه‌ای، فاکتور توزیع هندسی نامیده می شود.

$$L = \sqrt{J} = \sqrt{|J|} e^{-i \frac{\pi}{2} k} \quad (38-2)$$

این فاکتور نقش مهمی را در تصویر سازی با دامنه واقعی<sup>۵</sup> ایفا می کند.

## ۶-۲ پرتوهای فیزیکی<sup>۶</sup>

پرتو لرزه‌ای نیز همانند حل معادله‌ایکوanal یک مفهوم کاملا ریاضی است. پرتو  $\Omega$  که از چشم موج نقطه‌ای  $S$ ، بواسطه‌ی نقطه‌ی بازتاب  $M_R$  به گیرنده نقطه‌ای  $R$  می رسد را می توان مانند خط سیری که در

<sup>۱</sup>Caustic

<sup>۲</sup>Focal point

<sup>۳</sup>اندیس KMAH بوسیله DEschamps و Ziolkwski معرفی شد. به احتمام کسانی که پیش از این روی این مسئله کار کردند نام این اندیس از حرف اول اسمی این افراد گرفته شد. Keller, Maslov, Arnold, Hörmander

<sup>۴</sup>Gaussian beam

<sup>۵</sup>True amplitude imaging

<sup>۶</sup>Physical ray

امتداد بخش فرکانس بالای انرژی موج لرزه‌ای انتشار می‌یابد، تفسیر کرد (شکل ۲-۲). در حقیقت با در نظر گرفتن یک دالان پرتو حول پرتوی مرکزی  $\Omega$  میدان موج ثبت شده در  $R$  بواسطه‌ی بازتاب از  $M_R$ ، نسبت به حالتی که تنها یک پرتو در نظر گرفته شود، تاثیر بیشتری از توزیع سرعت و ساختارهای زیرسطحی می‌پذیرد. این ناحیه حول پرتوی مرکزی که در حقیقت بر میدان موج رسیده به  $R$  موثر است را معمولاً به حجم فرنل نسبت می‌دهند.

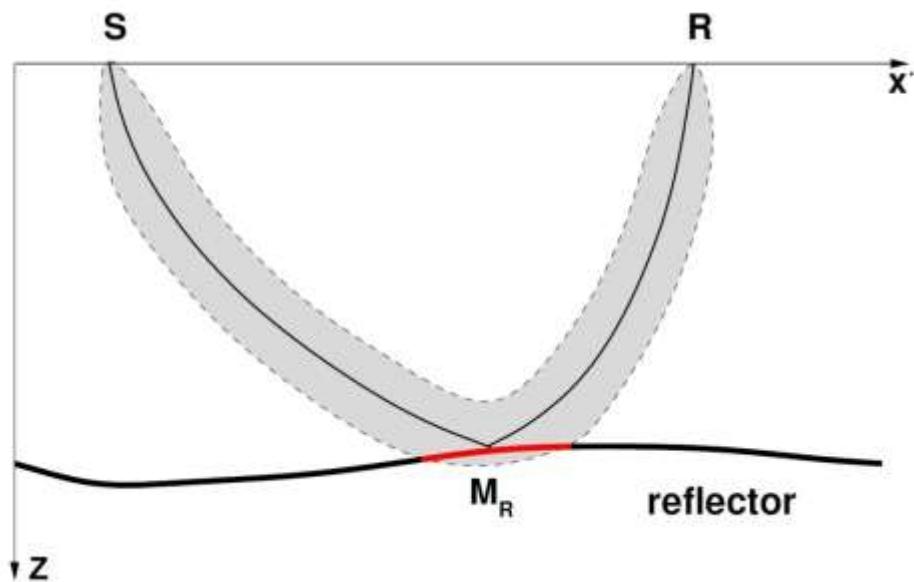
از تقاطع حجم فرنل با فصل مشترک دو لایه معین، سطح مشترک زون فرنل<sup>۱</sup> ایجاد می‌شود که در واقع حدود طبیعی تفکیک پذیری است (شکل ۲-۲). محدوده‌ی زون فرنل بوسیله‌ی پرتوهای موازی محور عمود بر سطح مشترک زون فرنل، در دو طرف پرتوی مرکزی تعیین می‌شود (هوبال و همکاران ۱۹۹۳). عوارض زیرسطحی که کوچکتر از زون فرنل هستند، قابل تفکیک نخواهند بود. بدیهی است که سطح مشترک زون فرنل وابسته به فرکانس است. زون فرنل ایجاد شده از انتشار موج‌های با فرکانس بالا، بهنای کمتری دارد و رزولوشن مکانی بالاتری را فراهم می‌کنند (قدرت تشخیص بین دو نقطه از یک بازتابنده را آسانتر می‌کند). برای یک سیگنال تک فرکانس با دوره تناوب  $T$ ، سطح مشترک زون فرنل شامل تمام نقاط  $\bar{M}$  در محل تقاطع حجم فرنل با مرز دو لایه است به شرطی که در نامساوی زیر صدق کنند (چرونی، ۱۹۹۲):

$$|\tau(S, M, R) - \tau(S, \bar{M}) - \tau(\bar{M}, R)| \leq T/2 \quad (39-2)$$

بطور دقیق می‌توان گفت که رابطه‌ی (۳۹-۲) اندازه اولین زون فرنل را تعیین می‌کند. ابعاد  $n$  امین زون فرنل را می‌توان به سادگی با قرار دادن  $nT/2$  به جای  $T/2$  بدست آورد.

---

<sup>۱</sup>Interface Fresnel zone



شکل ۲-۲ : طرح شماتیک حجم فرنل (خاکستری رنگ) پرتو بازتاب  $SM_R R$  . از برخورد حجم فرنل با سطح مشترک بازتابنده زون فرنل تعیین می شود (اشپینر، ۲۰۰۷).

## ۷-۲ دنبال کردن دینامیکی و موازی محور پرتو

در بخش قبلی مشخص شد که دامنه پرتو را بدون تعیین ژاکوبین پرتو  $J$  نمی توان محاسبه کرد. اصولا  $J$  را می توان با استفاده از آنالیز میدان پرتو محاسبه کرد. در اینجا روش دیگری به نام دنبال کردن دینامیکی پرتو<sup>۱</sup> برای تعیین ژاکوبین پرتو ( $J$ ) و دیگر مشخصه های هندسی میدان پرتو حول یک پرتوی مشخص بررسی می شود. روش دنبال کردن دینامیکی پرتو می تواند به شکل های متفاوت و در سیستم های مختصاتی متنوعی بیان کرد که این امر در حقیقت به منظور ساده سازی شکل مختصات های پرتوی مرکزی تعیین می شود. سیستم مختصات پرتوی مرکزی  $q_1, q_2, q_3$  یک سیستم مختصات با خطوط منحنی و راست گوش است. این سیستم طوری معرفی می شود که خود پرتو نشان دهنده یکی از سه محور سیستم مختصاتی باشد. دو محور مختصاتی دیگر  $q_1$  و  $q_2$  بشکلی هستند که در روی پرتو با دو خط متقارع عمود بر هم متقابل به رأس هستند و الزاماً در صفحه ای که نسبت به پرتو و  $q_3$  عمود است، واقع شده اند. بنابراین صفحه ای با مختصات زیر که در آن  $q_3 = \text{const}$  ثابت بوده، بر جبهه ای موج مماس است و همچنین پرتو

<sup>۱</sup>Dynamic ray tracing

مرکزی<sup>۱</sup> با شرایط  $0 = q_1 = q_2$  تعیین می‌شود. البته لازم به ذکر است که مختصات پرتو مرکزی فقط برای توصیف نقاط R پیرامون یک پرتوی معین مناسب است و این شرط تنها زمانی برقرار است که فقط یک صفحه عمود بر مسیر عبور پرتو از میان R وجود داشته باشد. این مسئله بدان معنی است که ناحیه‌ای که مختصات پرتوی مرکزی در آن معتبر است به انحنای پرتوی مرکزی بستگی دارد. ناحیه اعتبار در انحنای کوچک پرتو، گسترده‌تر و در انحنای‌بزرگ، باریک‌تر خواهد شد (پوپوف و همکاران ۱۹۷۸).

در مختصات پرتوی مرکزی، با استفاده از معادله‌ای آیکونال (۲۸-۲) می‌توان سیستمی با تقریب ساده از معادلات دیفرانسیل معمولی از درجه اول برای پرتوهایی که در پیرامون یک پرتوی مرکزی معین قرار دارند بدست آورد. به این پرتوها، دسته پرتوهای موازی محور و به سیستم مربوطه بنا به اصطلاحات علمی در اپتیک روش دنبال کردن پرتوهای موازی محور<sup>۲</sup> گفته می‌شود. روش دنبال کردن دینامیکی پرتو بطور دقیق می‌تواند پرتوهای موازی محور را توصیف کند. در واقع فرم معادلات دیفرانسیل دو روش یکسان است و تنها کمیت‌های محاسبه شده در دو سیستم معانی فیزیکی متفاوتی دارند. اصطلاح "روش دنبال کردن دینامیکی پرتو" توسط چرونی و هورن<sup>۳</sup> پیشنهاد شد. در این روش می‌توان توزیع هندسی و انحنای جبهه‌های موج را محاسبه کرد. این کمیت‌ها در ارزیابی مشخصه‌های دینامیکی امواج لرزه‌ای نظیر دامنه پرتو اهمیت دارند.

روش دنبال کردن پرتوهای موازی محور در مختصات پرتوی مرکزی می‌تواند به صورت زیر بیان شود

$$\frac{dq_i}{ds} = vp_i^{(q)}, \quad \frac{dp_i^{(q)}}{ds} = -\frac{1}{v^2} q_j \left. \frac{\partial^2 v}{\partial q_i \partial q_j} \right|_{q_1=q_2=0} \quad (40-2)$$

$P_i^{(q)}$  نشان دهنده‌ی تغییرات مؤلفه‌های پرتوی مرکزی از لحاظ کندی<sup>۴</sup> است. باید در نظر داشت که سیستم معادلات (۴۰-۲) تنها یک تقریب است و فقط می‌تواند در مورد پرتوهایی که انحراف قابل توجهی از پرتوی مرکزی نداشته باشند بکار رود. روش دنبال کردن دینامیکی پرتو به ساده‌ترین شکل آن به

<sup>1</sup>Central ray

<sup>2</sup>Paraxial ray-tracing system

<sup>3</sup>Hron

<sup>4</sup>Slowness

صورت زیر نوشه می شود (اشپینر، ۲۰۰۷):

$$\frac{dQ}{ds} = vP \quad , \quad \frac{dP}{ds} = -\frac{1}{v}VQ \quad (41-2)$$

$V$  ماتریس مشتقات درجه دوم سرعت  $v$  نسبت به  $q_i$  در امتدا پرتوی مرکزی می باشد.

$$V_{ij} = \left. \frac{\partial^2 v}{\partial q_i \partial q_j} \right|_{q_1=q_2=0} \quad , \quad i, j = 1, 2 \quad (42-2)$$

با یک نگاه اجمالی می توان دریافت که رابطه نزدیکی بین معادلات (41-2) و (40-2) وجود دارد. ماتریس های  $P$  و  $Q$  ماتریس های تبدیل  $2 \times 2$  با مؤلفه های

$$P_{ij} = \left. \frac{\partial p_i^{(q)}}{\partial \gamma_j} \right|_{q_1=q_2=0} \quad , \quad Q_{ij} = \left. \frac{\partial q_i}{\partial \gamma_j} \right|_{q_1=q_2=0} \quad , \quad i, j = 1, 2 \quad (43-2)$$

هستند. به طریق مشابه می توان از ماتریس تبدیل  $\hat{H}$  در سیستم مختصاتی عمومی کارتزین بجای ماتریس  $\hat{Q}$  بهره گرفت بطوری که

$$d\hat{x} = \hat{H} d\hat{q} \quad , \quad H_{ij} = \frac{\partial x_i}{\partial q_j}. \quad (44-2)$$

با استفاده از این دو ماتریس تبدیل، ژاکوبین پرتو  $J$  را می توان در مختصات پرتوی مرکزی به صورت زیر بیان کرد

$$J = \det(\hat{H}\hat{Q}) = \det \hat{H} \det \hat{Q} \quad (45-2)$$

اگر طول قوس  $S$  بعنوان یکی از سه محور پرتو و سیستم مختصاتی پرتو مرکزی در نظر گرفته شود تعریف ژاکوبین ساده تر خواهد شد. برای نقاط روی پرتو دترمینان ماتریس  $\hat{Q}$  برابر با دترمینان زیر ماتریس  $Q$   $2 \times 2$  بالا و در سمت چپ است و یک ماتریس چرخش با دترمینان یک می باشد. بنابراین ژاکوبین پرتو بطور کلی بوسیله رفتار دالان پرتو<sup>۱</sup> تعیین و به صورت  $J = \det Q$  محاسبه می شود.

سیستم معادلات دیفرانسیل خطی از درجه اول (40-2) دارای چهار جواب مستقل است. ماتریس

---

<sup>۱</sup>Ray tube

پایه‌ای سیستم ( $\Pi$ ) که حاوی این جواب‌های مستقل است را ماتریس انتشار یا ماتریس پرتو<sup>۱</sup> و این روش را، روش دنبال کردن دینامیکی پرتو می‌نامند. تئوری پرتوی موازی محور دلالت بر این دارد که پارامترهای دینامیکی یک نقطه  $R$  روی پرتوی موازی محور در نقطه‌ی ابتدایی  $S$ ، رابطه‌ای خطی با آنها دارد یعنی:

$$\begin{pmatrix} q_1(R) \\ q_2(R) \\ p_1^{(q)}(R) \\ p_2^{(q)}(R) \end{pmatrix} = \Pi(R, S) \begin{pmatrix} q_1(S) \\ q_2(S) \\ p_1^{(q)}(S) \\ p_2^{(q)}(S) \end{pmatrix} \quad (46-2)$$

ماتریس  $\Pi$  در  $S$  روی پرتوی مرکزی، به ماتریس همانی مبدل می‌شود. اگر باز دیگر ماتریس انتشار پرتو از  $S$  به  $R$  در امتداد یک پرتو بررسی شود، جواب روش دنبال کردن دینامیکی پرتو برای هر شرایط ابتدایی در  $S$ ، صرفاً با ضرب ماتریس انتشار پرتو در ماتریس شرایط اولیه بدست می‌آید. بعلاوه، این امکان نیز وجود دارد که فاکتور توزیع هندسی و سایر پارامترهای دینامیکی دیگر در فرآیند انتشار موج را از ماتریس انتشار بدست آوریم. ماتریس انتشار، یک ماتریس<sup>۲</sup> symplectic است که می‌تواند در طول مسیر پرتو، دنبال شود (چرونی، ۲۰۰۱).

ماتریس انتشار پرتوی مرکزی  $\Pi$  یک ماتریس  $4 \times 4$  است که شامل مؤلفه‌های ابتدایی  $S$  (چشم موج نقطه‌ای) و انتهاهای  $R$  (گیرنده‌ی نقطه‌ای) می‌باشد. این ماتریس را می‌توان به صورت زیر نوشت:

$$\Pi(R, S) = \begin{pmatrix} Q_1 & Q_2 \\ P_1 & P_2 \end{pmatrix} \quad (47-2)$$

ماتریس‌های  $P_1, Q_1$  و  $P_2, Q_2$  همگی ماتریس‌های  $2 \times 2$  بوده که با استفاده از حل سیستم معادلات در روش دنبال کردن پرتو (۴۱-۲) می‌توان آنها را برای شرایط ابتدایی خاص تعیین کرد. ماتریس‌های  $Q_1$  و  $P_1$

<sup>1</sup>Ray propagator matrix

<sup>2</sup>ویژگی در ماتریس‌ها است بطوری که اگر  $M$  ماتریسی  $2n \times 2n$  باشد  $M^T \Omega M = \Omega$  را وقتی یک ماتریس symplectic می‌نامند که شرایط زیر برقرار باشد:

$M^T \Omega M = \Omega$  ماتریس  $M$  ترانهاده ماتریس  $\Omega$  است و  $\Omega = \begin{bmatrix} 0 & I_n \\ -I_n & 0 \end{bmatrix}$  ماتریس  $I_n$  می‌باشد. ماتریس همانی  $n \times n$  است. دترمینان  $\Omega^{-1} = \Omega^T = -\Omega$  خواهد بود.

به ازای شرایط ابتدایی زیر تعیین می‌شوند

$$Q(S) = I \quad , \quad P(S) = 0 \quad (48-2)$$

که در ينجا I و 0 به ترتیب ماتریس‌های  $2 \times 2$  همانی و صفر هستند. این حل را همچنین حل موج صفحه‌ای در روش دنبال کردن دینامیکی پرتو می‌نامند. ماتریس‌های  $Q_2$  و  $P_2$  نیز بواسطه‌ی جواب چشمی نقطه‌ای در روش دنبال کردن دینامیکی پرتو با شرایط ابتدایی تعیین می‌شوند

$$Q(S) = 0 \quad , \quad P(S) = I \quad (49-2)$$

باید در نظر داشت که ماتریس انتشار  $\Pi$  برای نقاط ثابت  $S$  و  $P$  متناظر با روش دنبال کردن دینامیکی پرتو در مختصات پرتوی مرکزی وابسته به کنترل متغیر در امتداد پرتو نیست. برای مثال می‌توان از زمان‌سیر  $\tau$  یا از طول قوس  $S$  بدون نیاز به اصلاح ماتریس انتشار  $\Pi$  استفاده کرد.

همچنین فاکتور توزیع هندسی چشمی نقطه‌ای می‌تواند به صورت زیر تعیین شود:

$$L = \sqrt{J} = \sqrt{\det(Q_2)} \quad (50-2)$$

فاکتور هندسی نرمال شده که شرایط موج در چشمی و گیرنده را در نظر می‌گیرد، به صورت زیر می‌باشد:

$$L = \frac{1}{\sqrt{v_s v_r}} \sqrt{\det(Q_2)} \quad (51-2)$$

$v_s$  و  $v_r$  به ترتیب سرعت‌های انتشار موج در چشمی و گیرنده‌ی نقطه‌ای هستند.

برخی مواقع از نوع دیگری از ماتریس انتشار پرتو استفاده می‌شود که به‌این ماتریس در اصطلاح ماتریس انتشار سطح به سطح (T) گفته می‌شود. این ماتریس توسط بورتفلد<sup>۱</sup> (۱۹۸۹) معرفی شد. ماتریس  $4 \times 4$  انتشار T، چگونگی بردار کندی  $\tilde{p}$  و بردار فاصله‌ی  $\tilde{x}$  بین پرتو موازی محور و تغییر پرتوی مرکزی را مانند نتیجه‌ای از انتشار موج در محدوده‌ی شروع پرتوی مرکزی در صفحه‌ی آغازین، و پایان آن در صفحه‌ی انتهایی توصیف می‌کند. زیرماتریس‌های T، ماتریس ۲×۲ B بالا و در سمت راست قرار دارد و متناظر با

---

<sup>1</sup>Bortfeld

<sup>2</sup>Slowness vector

زیرماتریس  $Q_2$  از ماتریس انتشار پرتو مرکزی  $\Pi$  است. ماتریس  $B$  بیان کننده‌ی فاکتور توزیع هندسی موجی است که از یک چشمۀ نقطه‌ای صادر می‌شود.

با استفاده از نمادهای بکار رفته در ماتریس  $T$ ، فاکتور توزیع هندسی نرمال شده برای یک چشمۀ نقطه‌ای را می‌توان به صورت زیر بازنویسی کرد:

$$L = \frac{\sqrt{\cos \alpha_S \cos \alpha_R}}{\sqrt{v_S v_R}} \sqrt{\det(B)} \quad (52-2)$$

$\alpha_S$  زاویه خروج پرتو مرکزی از چشمۀ نقطه‌ای  $S$  و  $\alpha_R$  زاویه ورود پرتوی مرکزی به گیرنده نقطه‌ای  $R$  است. این زوایا نسبت به بردار نرمال های صفحه‌ی آغازین در  $S$  و صفحه‌ی انتهایی در  $R$  سنجیده می‌شوند. پارامترهای  $v_S$  و  $v_R$  مانند قبل به ترتیب سرعت‌های انتشار موج در  $S$  و  $R$  هستند (اسچلیچر و همکاران، ۱۹۹۳).

## ۱-۷-۲ روش دنبال کردن پرتو در مختصات موضعی کارتزین

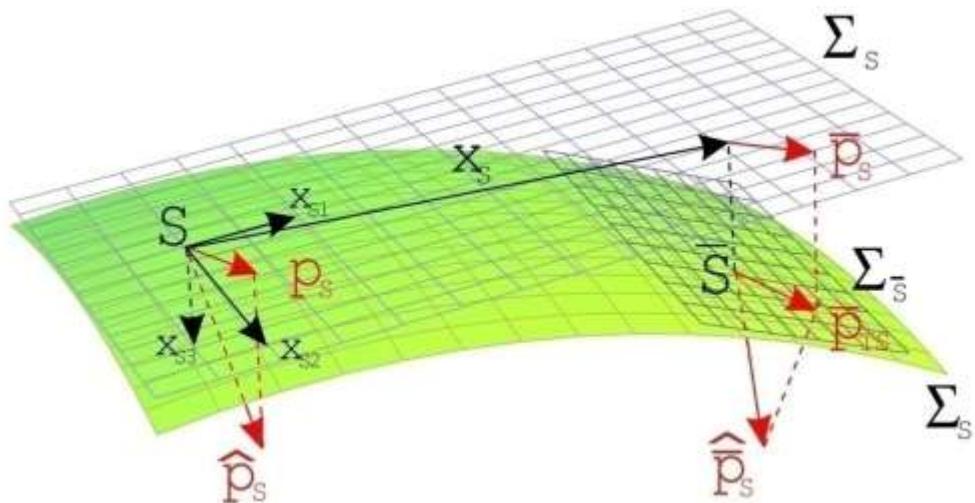
برای معادله‌ی (۴۶-۲) رابطه‌ی جایگزین دیگری توسط بورتفلد (۱۹۸۹) معرفی شد. در اینجا روش دنبال کردن پرتو در مختصات موضعی کارتزین<sup>۱</sup> مرتبط با سطوح شامل نقطه شروع و پایانی پرتوهای موازی محور تعیین می‌شود. این سطوح به صفات آغازین و انتهایی با جهت یافتنی و انحنای اختیاری اشاره دارد. یک پرتو از یک چشمۀ نقطه‌ای  $S$  واقع در سطح آغازین منتشر می‌شود و به سطح انتهایی که گیرنده نقطه‌ای  $R$  در آن واقع است می‌رسد. سیستم های مختصات موضعی کارتزین  $(x_{S1}, x_{S2}, x_{S3})$  و  $(x_{R1}, x_{R2}, x_{R3})$  اشاره به چشمۀ و گیرنده نقطه‌ای دارد و طوری قرار گرفته اند که صفحه‌ی  $x_1 - x_2$  مرتبط با آنها، بصورت صفحه  $\Sigma_{S/R}$  مماس بر سطح مورد نظر باشد. محور  $x_3$  سیستم موضعی عمود بر صفحه  $\Sigma_{S/R}$  است و جهت یافتنی آن طوری است که با بردار کننده پرتو مرکزی زاویه حاده می‌سازد. دو مؤلفه‌ی اول از هر دو سیستم،  $(x_{R1}, x_{R2})$  و  $(x_{S1}, x_{S2})$ ، به ترتیب در سیستم های مختصات موضعی کارتزین دو بعدی در صفحات  $\Sigma_S$  و  $\Sigma_R$  تعیین می‌شوند.

---

<sup>1</sup>Local Cartesian coordinates

پرتو مرکزی بطور کامل بوسیله موقعیت بردارهای  $\vec{x}_{S0}$  در  $S$  و  $\vec{x}_{R0}$  در  $R$  و همچنین بردارهای کنندی  $\vec{P}_S$  و  $\vec{P}_R$  تعیین می‌شود. یک پرتوی موازی محور مرتبط با نقطه  $\bar{S}$  روی سطح آغازین و  $\bar{R}$  روی سطح انتهایی بوسیله‌ی بردارهای جابجایی  $\vec{x}_S$  و  $\vec{x}_R$  که نسبت به  $S$  و  $R$  سنجیده می‌شوند و همچنین انحراف از بردارهای کنندیشان یعنی  $\vec{P}_S$  و  $\vec{P}_R$  در  $\bar{S}$  و  $\bar{R}$  که نسبت به بردارهای کنندی مربوط به پرتو مرکزی تعیین می‌شوند، پارامتری می‌شود.

کمیت‌های سه بعدی  $\vec{x}_S$ ،  $\vec{P}_S$  و  $\vec{P}_R$  که توصیف کننده‌ی پرتو مرکزی و پرتو موازی محور هستند، می‌توانند در سیستم موضعی  $(x_{S1}, x_{S2})$  با دو مؤلفه نشان داده شوند که در این صورت شرایط کاملاً مناسبی را برای توصیف و ترسیم هر دو پرتو فراهم می‌کنند. بردارهای دو بعدی  $x_S$  و  $P_S$  با تصویر کردن بردارهای  $\vec{x}_S$  و  $\vec{P}_S$  در امتداد صفحات عمود بر  $\Sigma$  تعیین می‌شوند. برای دست یافتن به نمایش دو بعدی  $\vec{P}_S$  باید دو تصویرسازی پی در پی انجام شود. بدین منظور باید یک صفحه کمکی  $\bar{\Sigma}$  مماس بر سطح آغازین در  $\bar{S}$  ساخته شود. تصویر  $\vec{P}_S$  بر صفحه‌ی  $\bar{\Sigma}_{TS}$  را بدست می‌دهد، که در ادامه بر صفحه‌ی  $\Sigma_S$  تصویر می‌شود و در نتیجه بردار  $\vec{P}_S$  تعیین می‌شود (شکل ۲-۳). با استفاده از صفحه آغازین و سرعت  $v_S$  در چشمeh موج می‌توان کمیت‌های سه بعدی را از روی تصاویر دو بعدی شان بازسازی کرد. اینگونه بررسی‌ها بطور مشابه برای گیرنده‌های  $R$  و  $\bar{R}$  نیز صورت می‌پذیرد.



شکل ۳-۲: تصاویر بردارهای کنده ای  $P_s$  و  $\bar{P}_s$ . بردار کنده اولیه پرتوی مرکزی  $\hat{P}_s$  بر صفحه ای عمود بر  $\Sigma_s$  تصویر می شود. بردار کنده اولیه پرتوی موازی محور  $\hat{\bar{P}}_s$  ابتدا در صفحه ای  $\bar{\Sigma}$  مماس بر سطح آغارین در  $\bar{S}$  تصویر می شود و نتیجه ای آن یعنی بردار  $\bar{P}_{TS}$  بر صفحه ای  $\Sigma$  تصویر می شود (اشپیزر، ۲۰۰۷).

پارامترهای مشخصه ای پرتو موازی محور، تصویر بردار جابجایی این پرتو و انحراف تصویر بردار کنده آن نسبت به تصویر بردار کنده پرتوی مرکزی است. بوسیله روش دنبال کردن پرتو موازی محور (۴۵-۲) برای بیان آن در مختصات موضعی کارتزین، یک رابطه ای خطی را می توان برقرار کرد که چگونگی تغییر این کمیت ها را مانند نتیجه ای از انتشار موج پیرامون پرتوی مرکزی توصیف کند (بورتفلد، ۱۹۸۹):

$$\begin{pmatrix} \mathbf{x}(R) \\ \bar{P}_{(R)} - P_{(R)} \end{pmatrix} = \hat{T} \begin{pmatrix} \mathbf{x}(S) \\ \bar{P}_{(S)} - P_{(S)} \end{pmatrix} \quad (53-2)$$

ماتریس انتشار  $4 \times 4$  سطح به سطح  $\hat{T}$  به صورت زیر تعیین می شود:

$$\hat{T} = \begin{pmatrix} A & B \\ C & D \end{pmatrix} \quad (54-2)$$

زیر ماتریس های  $A, B, C$  و  $D$  ماتریس های  $2 \times 2$  مشخصه ای پرتو مرکزی اند و می توان با استفاده از آنها خواص دینامیکی میدان موج (برای مثال فاکتور توزیع هندسی که در بخش قبل نشان داده شد) را تعیین کرد.

شرح کامل ماتریس انتشار پرتو سطح به سطح  $\hat{T}$  و رابطه آن با ماتریس انتشار  $\hat{H}$  در هوبرال<sup>۱</sup> و همکاران (۱۹۹۲b) وجود دارد.

## ۲-۷-۲ زمان سیر پرتوی موازی محور

بواسطه معادله (۵۴-۲) که توصیف کننده رابطه بین  $P_S$  و  $P_R$  است می‌توان ثابت کرد که این روابط منجر به ایجاد تقریب زمان سیر درجه دوم برای پرتوی موازی محور می‌شود. با استفاده از معادله همیلتون برای دو نقطه دنبال کردن پرتو (بورتفلد، ۱۹۸۹ و اسچلیچر و همکاران، ۱۹۹۳) اختلاف زمان سیر بین پرتوی مرکزی  $SR$  و پرتوی پاراکسیمال  $\bar{S}\bar{R}$  را می‌توان به صورت زیر بیان کرد:

$$d\tau = \tau(\bar{S}, \bar{R}) - \tau(S, R) = \vec{\bar{P}} \cdot \vec{x}_R - \vec{\bar{P}}_S \cdot \vec{x}_S \quad (55-2)$$

علامت معادله (۵۵-۲) طوری انتخاب می‌شود که جابجایی  $\bar{S}$  در جهت پرتو منجر به کاهش زمان سیر و جابجایی  $\bar{R}$  در جهت پرتو موجب افزایش زمان سیر شود. در ضرب نقطه‌ای  $\vec{\bar{P}}_l \cdot \vec{x}_l$  که  $l = S, R$  است اگر بردارها بر هم عمود باشند حاصلضرب نقطه‌ای مساوی صفر خواهد بود (نشان دهنده این است که مشتق زمان سیر در جهت عمود بر پرتو صفر خواهد بود).

بمنظور استفاده از فرمول پرتو موازی محور، استفاده از تصویر دو بعدی بردارهای جابجایی و کندهی ضروری است. همانند آنچه که بورتفلد (۱۹۸۹) نشان داد، حاصلضرب مؤلفه‌های سوم که از درجه دوم هستند می‌تواند در تقریب پرتوی موازی محور نادیده گرفته شود. بنابراین بازنویسی معادله همیلتون به صورت تابعی از تصویر بردارهای دو بعدی بشکل زیر می‌باشد:

$$d\tau = \bar{P}_R \cdot x_R - \bar{P}_S \cdot x_S \quad (56-2)$$

و  $\bar{P}_R$  را می‌توان مطابق با رابطه (۵۴-۲) به صورت زیر بیان کرد:

---

<sup>۱</sup>Hubral

$$\bar{P}_S = P_S + B^{-1}x_R - B^{-1}Ax_S \quad (57-2)$$

$$\bar{P}_R = P_R + Cx_S + DB^{-1}x_R - DB^{-1}Ax_S \quad (57-2)$$

با جایگذاری روابط (57-2) در معادله (56-2) تقریب سهموی زمان‌سیر در امتداد پرتو  $\bar{SR}$  حاصل می‌شود  
:(اشپینر، ۲۰۰۷)

$$\tau_{par}(x_S, x_R) = \tau_0 + P_R \cdot x_R - P_S \cdot x_S \quad (58-2)$$

$$-x_S \cdot B^{-1}x_R + \frac{1}{2}x_S \cdot B^{-1}Ax_S + \frac{1}{2}x_R \cdot DB^{-1}x_R$$

$\tau_0$  زمان‌سیر در امتداد پرتوی مرکزی است. آخرین مرحله استفاده از خواص symplecticity ماتریس  $\hat{T}$  است.

در این صورت با دانستن اینکه مقادیر ویژه ماتریس انتشار و معکوس ماتریس انتشار برابرند ( $\hat{\tilde{I}} = \hat{\tilde{T}}^{-1}$  و

$\hat{\tilde{I}} = \hat{\tilde{T}}^{-1}$ ) ماتریس معکوس  $\hat{\tilde{T}}$  و  $\hat{\tilde{I}}$  ماتریس همانی  $4 \times 4$  می‌باشد) و بهره گرفتن از خاصیت فوق در

ماتریس انتشار، می‌توان مولفه‌های ماتریس انتشار را تعیین کرد.

تقریب سهموی زمان‌سیر را می‌توان همانند بسط درجه دوم سری تیلور در دو نقطه از زمان‌سیر بین  $S$  و  $R$  تفسیر کرد. بطور مثال می‌توان معادله (58-2) را با استفاده از ضوابط مشتقات درجه اول و دوم زمان‌سیر نسبت به بردارهای جابجایی  $X_R$  و  $X_S$  بیان کرد. بمنظور برقراری ارتباط بین دو ارائه از تقریب زمان‌سیر، بردارهای کنده با رابطه  $\vec{p} = \vec{\tau}$  و زیرماتریس‌های  $\hat{\tilde{T}}$  به صورت ماتریس‌های هسین<sup>1</sup> بیان می‌شوند (اشپینر، ۲۰۰۷) و  $N_S^R, N_R^S$ :

$$N_S^R = \left( \frac{\partial^2 \tau}{\partial x_{Si} \partial x_{Sj}} \right)_{i,j=1,2} = B^{-1}A \quad (59-2)$$

$$N_R^S = \left( \frac{\partial^2 \tau}{\partial x_{Ri} \partial x_{Rj}} \right)_{i,j=1,2} = DB^{-1} \quad (59-2)$$

---

<sup>1</sup>hessian

$$N_{SR} = \left( \frac{\partial^2 \tau}{\partial x_{Si} \partial x_{Rj}} \right)_{i,j=1,2} = B^{-1} \quad (59-2)$$

در رابطه های بالا زیرنویس های S و R به ترتیب نشان دهنده مشتق نسبت به مختصات چشم و گیرنده است در حالیکه بالانویس های S و R نشان دهنده وضعیت چشم و گیرنده در یک مختصات معین است. با استفاده از روابط (59-2) می توان مشتقات مربوط به معادله (58-2) را بدست آورد. لازم بذکر است که

ماتریس های  $N_S^R, N_R^S$  متقارن هستند در حالیکه ماتریس  $N_{SR}$  متقارن نیست.

بسط سهموی زمان سیر به صورت زیر تبدیل می شود (اشپینر، ۲۰۰۷):

$$\tau_{par}(x_S, x_R) = \tau_0 + P_R \cdot x_R - P_S \quad (60-2)$$

$$-x_S \cdot N_{SR} x_R + \frac{1}{2} x_S \cdot N_S^R x_S + \frac{1}{2} x_R \cdot N_R^S x_R$$

در ابتدا بورتفلد (۱۹۸۹) معادله (58-2) را برای مدل هایی با لایه های همگن و مجزا با احنا در فصل مشترک آنها در نظر گرفت. با این وجود تقریب زمان سیر در مناطق نا همگن نیز معتبر است (هوبرال و همکاران، ۱۹۹۲a). در بیشتر مواقع استفاده از تقریب هذلولی زمان سیر برای یک بازنده افقی یا شیب دار با لایه بالایی همگن دقیق تر از تقریب سهموی است. برای دست یابی به رابطه آن می توان با استفاده از توان دوم معادله (58-2) و تنها حفظ عبارات درجه دوم  $X_R$  و  $X_S$  عمل کرد:

$$\tau_{hyp}^2(x_S, x_R) = (\tau_0 + P_R \cdot x_R - P_S \cdot x_S)^2 \quad (61-2)$$

$$+ \tau_0 (-2 x_S \cdot B^{-1} x_R + x_S \cdot B^{-1} A x_S + x_R \cdot D B^{-1} x_R)$$

البته معادله (61-2) را می توان به صورت عباراتی از مشتقات زمان سیر نیز بیان کرد (اشپینر، ۲۰۰۷):

$$\tau_{hyp}^2(x_S, x_R) = (\tau_0 + P_R \cdot x_R - P_S \cdot x_S)^2 \quad (62-2)$$

$$+ \tau_0 (-2 x_S \cdot N_{SR} x_R + x_S \cdot N_S^R x_S + x_R \cdot N_R^S x_R)$$

در محیطی با لایه بندی ساده، فرمول هذلولی زمان سیر توصیف بهتری را برای بازتاب‌های نزدیک قائم از خود نشان می‌دهد (یورسین<sup>۱</sup>، ۱۹۸۲). با اینحال بطور کلی دقت این تقریب‌ها وابسته به مدل مورد نظر است.

### ۳-۷-۲ تقریب پرتوهای موازی محور زون فرنل

یکی دیگر از خواص میدان موج لرزه‌ای که می‌توان با استفاده از ماتریس انتشار سطح به سطح تخمین زد، فصل مشترک زون فرنل است. در اینجا از این واقعیت استفاده می‌شود که ماتریس انتشار پرتوی  $SMR$  (شکل ۲-۲) را می‌توان به ماتریس‌های انتشار سطح به سطح مجزایی که به بخش‌های مختلفی از مسیر پرتو اشاره دارد تقسیم کرد:  $(\hat{T}_1(SM) \hat{T}_2(MR)) = \hat{T}$ . به این رابطه قاعده‌ی زنجیری گفته می‌شود و یکی از ویژگی‌های اساسی ماتریس انتشار است (هوبرال و همکاران، ۱۹۹۲b). بطريق مشابه زیرماتریس‌های ماتریس انتشار پرتو کل  $\hat{T}$  را می‌توان در هر بخش پرتو، به صورت ضوابطی از زیرماتریس‌های ماتریس‌های انتشار دیگری بیان کرد. بمنظور یافتن تقریب زون فرنل، با توجه به رابطه (۳۹-۲) زمان‌سیرهای دو بخش  $(S, \bar{M})$  و  $(\bar{M}, R)$  تقسیم و بوسیله دنبال کردن پرتوی موازی محور محاسبه می‌شوند. در این حالت اگر نقاط چشمی و گیرنده برای پرتوهای مرکزی و موازی محور یکسان در نظر گرفته شود، با استفاده از معادله‌ی (۵۸-۲) روابط زیر حاصل می‌شود (اشپینر، ۲۰۰۷):

$$\tau(S, \bar{M}) = \tau(S, M) + P_M \cdot x_M + \frac{1}{2} x_M \cdot D_1 B_1^{-1} x_M, \quad (63-2)\text{الف}$$

$$\tau(\bar{M}, R) = \tau(M, R) + P_M \cdot x_M + \frac{1}{2} x_M \cdot B_2^{-1} A_2 x_M \quad (63-2)\text{ب}$$

$x_M$  و  $P_M$  بترتیب نمایش دهنده‌ی ارائه دو بعدی بردار جابجایی از  $\bar{M}$  به  $M$  و بردار کنده‌ی پرتو مرکزی در سیستم مختصات موضعی کارتزین مرتبط با سطح مشترک  $M$  است. با قرارگیری معادلات (۶۳-۲) در در تعریف سطح مشترک زون فرنل رابطه (۳۹-۲) نامساوی زیر حاصل می‌شود:

<sup>۱</sup>Ursin

$$|x_M \cdot H_F \cdot x_M| \leq T/2 \quad (64-2)$$

$\hat{T}_1$  ماتریس زون فرنل است. در این حالت می‌توان این ماتریس را به صورت ضوابطی از زیرماتریس‌های  $H_F$  و  $\hat{T}_2$  بیان کرد (اشپینر، ۲۰۰۷):

$$H_F = D_1 B_1^{-1} + B_2^{-1} A_2 = B_2^{-1} B B_1^{-1} \quad (65-2)$$

رابطه (64-2) در صفحه مماس بر سطح مشترک در نقطه  $M$ , که با تقریب دقیقی زون فرنل بوسیله رابطه‌ی (۳۹-۲) تعیین شده، یک بیضی را ایجاد می‌کند.

حجم‌ها و زون‌های فرنل نقش با اهمیتی را در تصویر سازی لرزه‌ای، بویژه در خصوص تحقیق در قدرت تفکیک پذیری مکانی روش‌های لرزه‌ای ایفا می‌کنند (شريف<sup>۱</sup>, ۱۹۸۲). در کوچ کیرشهوف با دور افت محدود نیاز به تصویر سطح مشترک زون فرنل در سطح اندازه‌گیری می‌باشد. زیرا به کمک این تصویر می‌توان مستقیماً قسمتی از داده‌های لرزه‌ای را که عملاً در بازتاب در  $M_R$  مشارکت دارد بدست آورد. مفهوم تصویر زون فرنل توسط هوبرال و همکاران (۱۹۹۳) مطرح شد. تصویر پارامتری شده زون فرنل بر حسب بردار نقطه میانی  $m$  به صورت زیر خواهد بود (اشپینر، ۲۰۰۷):

$$|(m - m_0) \cdot H_P \cdot (m - m_0)| \leq T/2 \quad (66-2)$$

$m_0$  بردار نقطه میانی توصیف شده در پرتو مرکزی است. ماتریس تصویر زون فرنل  $H_P$  در تقریب پرتو موازی محور با استفاده از رابطه‌ی  $H_P = 4B^{-1}$  بدست می‌آید. مشابه با سطح مشترک زون فرنل در بخش ۵-۲ معادله (66-۲) نیز نشان دهنده یک سطح بیضوی در حوزه زمان است.

---

<sup>۱</sup>Sheriff

## ۳ فصل سوم

### برانبارش سطح بازتاب مشترک (CRS)

#### ۱-۳ مقدمه

از مراحل مهم در پردازش داده‌های لرزه‌ای تهیه مقطع دورافت صفر (Zero Offset) از روی داده‌های دارای همپوشانی است که در پی آن یک تصویر ابتدایی از ساختارهای زیر سطحی بدست می‌آید. این مرحله همچنین موجب افزایش نسبت سیگنال به نوفه (S/N) و کاهش حجم داده‌ها برای انجام مراحل بعدی پردازش می‌شود. بمنظور بدست آوردن مقطع ZO با کیفیت بالا، معمولاً از روش‌های متداول برانبارش داده‌های لرزه‌ای به عنوان مثال فرایند برانبارش NMO/DMO استفاده می‌شود. کیفیت تصویرسازی در روش‌های متداول پردازش لرزه‌ای وابستگی زیادی به نسبت سیگنال به نوفه (S/N) در داده‌ها دارد. این روش در مواجه با ساختارهای هموار زیرسطحی کارایی مناسبی دارد اما در شرایطی که داده‌های لرزه‌ای به دلیل نوع برداشت داده‌یا وضعیت توپوگرافی منطقه، کیفیت مناسبی نداشته باشند تصویر واضحی از داده‌های با مقدار چینش<sup>۱</sup> معمول حاصل نخواهد شد. روش برانبارش NMO/DMO تنها یک پارامتر برانبارش فراهم می‌کند. این پارامتر سرعت برانبارش است که به عنوان سرعت لایه بالایی نقطه‌ی بازتاب در نظر گرفته

---

<sup>1</sup>Fold

می شود. این سرعت های برانبارش برای نقاط خاصی تعیین و برای کل منطقه تعمیم داده می شود. در ساختارهای پیچیده نیز به دلیل عدم موفقیت در بدست آوردن مدل سرعت دقیق که ناشی از بروز خطا در کار آنالیز سرعت و انتخاب کردن دستی سرعت ها است، نمی توان تصویرسازی درستی انجام داد. بنابر این برای بهبود تصویر سازی لرزه ای دو راه وجود خواهد داشت، اول اینکه از یک روش جدید که مستقل از مدل سرعت در برانبارش داده های لرزه ای باشد و مقطع ZO حاصله نیز دارای کیفیت قابل قبولی باشد بهره گرفت و یا برداشت داده لرزه ای با مقدار چینش بالا انجام شود که این امر مستلزم صرف وقت و هزینه زیادی است.

در سال های اخیر روش برانبارش سطح بازتاب مشترک (CRS) معرفی شده است که جایگزین مناسبی برای روش های مرسوم برانبارش است. این روش، از روش های مبتنی بر داده ها است و در فرآیند تصویر سازی که به صورت تمام خود کار انجام می شود، مقطع ZO را از روی داده های قبل از برانبارش شبیه سازی می کند. این روش به دلیل مستقل بودن از مدل سرعت در برانبارش برتری قابل توجهی نسبت به روش برانبارش NMO/DMO دارد. بر مبنای بسط درجه دوم زمانسییر، روش برانبارش CRS را می توان بعنوان یک ابزار آنالیز سرعت برانبارش با چگالی بالا تعمیم داد (اشپینر، ۲۰۰۷). این بدان معناست که در مقایسه با روش های برانبارش مرسوم، عملگر برانبارش CRS به صورت مکانی در سرتاسر چندین دسته CMP بسط داده شده و پاسخ های بازتابی را در تمامی نقاط بازتابنده تخمین می زند. در این روش تعداد رد لرزه های شرکت کننده در برانبارش افزایش می یابد و در نتیجه منجر به بهبود نسبت سیگنال به نویه S/N در مقطع شبیه سازی ZO می شود. در همین مرحله دسته پارامترهای برانبارش به نام نشانگرهای جنبشی میدان موج برای هر نمونه ZO شبیه سازی شده، تعیین می شود. بعلاوه در این روش نیازی به اطلاعات مدل سرعت زیر سطحی نیست و تنها با در اختیار داشتن سرعت لایه سطحی می توان عملگر برانبارش را تعیین کرد بطوریکه تطبیق قابل قبولی بر رخدادهای لرزه ای داشته باشد.

مفهوم روش CRS ابتدا توسط هوبرال<sup>۱</sup> و همکاران (۱۹۹۶) ارائه شد و مولر<sup>۲</sup> (۱۹۹۹) نیز نشان داد که

---

1- Hubral  
2- Müller

عملگر برانبارش **CMP** در واقع حالت خاصی از عملگر CRS می‌باشد. به کمک تئوری پرتوهای موازی محور، چرونی<sup>۱</sup> (۲۰۰۱) نشان داد که معادله زمان سیر مرتبه دوم CRS، یک عملگر مکانی را به دست می‌دهد که می‌تواند به عنوان صفحه برانبارش عمل کند. در ضمن با استفاده از نشانگرهای جنبشی میدان موج می‌توان به مدل سرعت توموگرافی دست یافت (دونک<sup>۲</sup>، ۲۰۰۴). از کاربردهای دیگر این نشانگرهای می‌توان به تخمین خودکار کوچ زمانی بدون استفاده از مدل سرعت (من<sup>۳</sup>، ۲۰۰۰)، تصحیح استاتیک باقی مانده (کوگلین<sup>۴</sup> و همکاران، ۲۰۰۳) و کوچ با بازه مینیمم (یگر<sup>۵</sup>، ۲۰۰۵) را برشمرد. سلیمانی (۲۰۰۹) مشکل تداخل شیب‌ها در روش CRS را با معرفی روش سطح پراش مشترک که در واقع روش اصلاح شدهی برانبارش CRS است، برطرف نمود. این روش در فصل چهارم بطور مفصل تشریح خواهد شد. در این فصل به دلیل درک بهتر روش CRS، ابتدا نگاه اجمالی به فرآیند برانبارش به روش متداول می‌شود و در ادامه عملگر برانبارش CRS معرفی خواهد شد و بعد از آن به نشانگرهای جنبشی میدان موج و کاربرد آنها و روش انجام برانبارش CRS پرداخته می‌شود.

## ۲-۳ روش برانبارش **CMP**

همانطور که در فصل یک توضیح داده شد در برداشت‌های دو بعدی لرزه‌ای چشم و گیرنده در امتداد خط لرزه‌ای توزیع می‌شوند (ایلماز، ۲۰۰۱). نقطه میانی مشترک (CMP) نقطه‌ی میانی بین چشم و گیرنده است و موقعیت این نقاط با توجه به موقعیت چشم S و موقعیت گیرنده G به صورت  $S + G / 2$  گیرنده می‌شود. به فاصله بین چشم و گیرنده دورافت گفته می‌شود اما اغلب از نیم دورافت  $h = (G - S) / 2$  در محاسبات استفاده می‌شود.

در آرایش چشم مشترک با در نظر گرفتن یک محیط زیرسطحی با لایه بندی افقی و سرعت ثابت، موج‌های ثبت شده در گیرنده‌های موجود در سطح، حاوی اطلاعاتی از تمامی سطح بازتابنده‌ها می‌باشند.

---

<sup>1</sup> Červeny

<sup>2</sup> Duveneck

<sup>3</sup> Mann

<sup>4</sup> Koglin

<sup>5</sup> Jäger

در واقع از هر نقطه بازتابنده، یک بازتاب رخ داده و در یک گیرنده ثبت شده است (شکل ۱-۳ الف). در صورتی که ورداشت نقطه میانی مشترک شامل تمامی پرتوهایی است که از یک نقطه معین ولی با دورافت های متفاوت بازتاب می‌شوند (شکل ۱-۳ ب). بنابراین ورداشت نقطه میانی مشترک CMP شامل اطلاعات تکراری از یک نقطه‌ی زیر سطحی است. این عبارت ایده‌ی اصلی برای روش برانبارش CMP است<sup>۱</sup>(ماهی نه، ۱۹۶۲). از آنجایی که ردیزه‌ها با دورافت‌های متفاوت حاوی اطلاعات یک نقطه‌ی مشترک از بازتابنده‌ی افقی هستند، این اطلاعات تکراری می‌توانند با هم جمع شوند و باعث ایجاد یک مقطع برانبارش با نسبت سیگنال به نویه (S/N) بالا شوند.

در ورداشت نقطه میانی مشترک(CMP) رخدادهای بازتابی به صورت یک مجموعه پاسخ‌های زمانی در امتداد یک منحنی برونزاند قرار می‌گیرند (ایلمار، ۲۰۰۱). برانبارش مرسوم CMP در واقع جمع بستن بازتاب‌های اولیه در امتداد منحنی‌های برونزاند معینی است که بهترین تقریب را نسبت به منحنی‌های زمان‌سیر بازتابی واقعی دارند. برای دورافت‌های کوچک منحنی زمان‌سیر با استفاده از فرمول هذلولی زیر محاسبه می‌شود:

$$t^2(h, V_{NMO}) = t_0^2 + \frac{4h^2}{V_{NMO}^2} \quad (1-3)$$

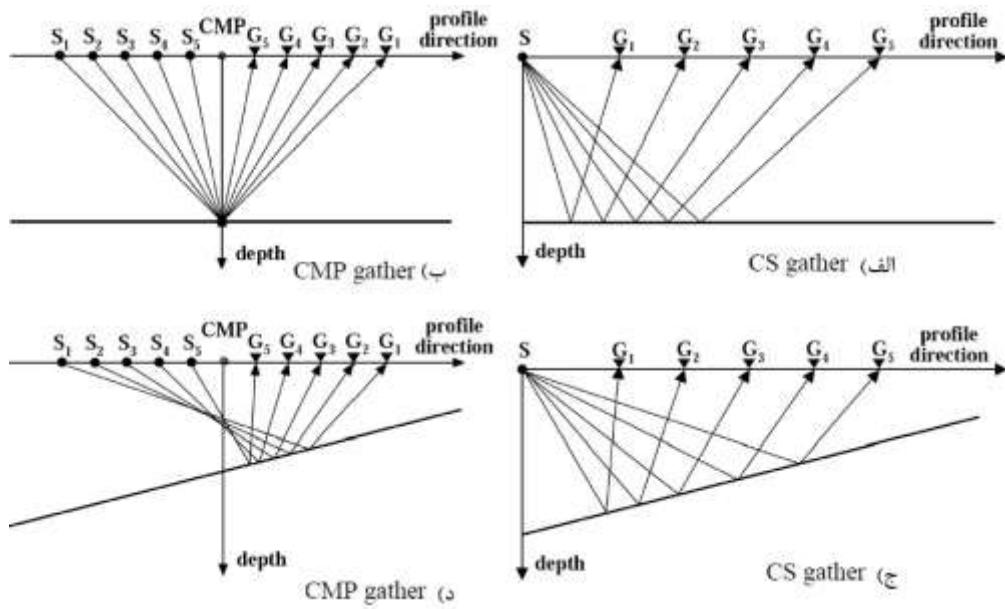
$t$  مدت زمان انتشار موج از چشم‌هه موج تا گیرنده موج،  $h$  نیم دورافت،  $t_0$  زمان‌سیر با دورافت صفر (چشم‌هه و گیرنده در یک موقعیت یکسان هستند) و  $V_{NMO}$  سرعت برونزاند نرمال است. برای یک لایه شیب دار به صورت زیر محاسبه می‌شود (بايكولوف، ۲۰۰۹):

$$V_{NMO} = \frac{V}{\cos \phi} \quad (2-3)$$

$V$  سرعت محیط و  $\phi$  زاویه بازتابنده‌یا لایه نسبت به سطح افق است. برای چندین لایه با شیب‌های متفاوت تعیین سرعت NMO پیچیده‌تر خواهد شد و تعیین آن منوط به پارامترهای مدل، نظیر موقعیت لایه‌ها و سرعت‌های بازه‌ای است.

---

<sup>1</sup>Mayne



شکل ۳-۱: هندسه بازتاب لرزه‌ای. شکل های (الف و ج) نشان دهنده ورداشت چشمی مشترک و شکل های (ب و د) نشان دهنده ورداشت نقطه میانی مشترک CMP هستند. در مدل با لایه بندی افقی و متجانس تمامی پرتوها در یک دسته CMP از یک نقطه‌ی عمقی مشترک بازتاب می‌شوند. اما در مدلی با لایه‌ی شبیدار، بازتاب‌ها در یک دسته CMP مربوط به نتفاوتی از لایه بازتابنده هستند (بايكولوف، ۲۰۰۹)

تقریب هذلولی نشان داده شده در معادله‌ی (۳-۱) را باید از رابطه‌ای که بهترین نتیجه‌ی برانبارش را فراهم می‌کند، متمایز در نظر گرفت:

$$t^2(h, V_{st}) = t_{0st}^2 + \frac{4h^2}{V_{st}^2} \quad (3-3)$$

سرعت برانبارشی است که اجازه می‌دهد بهترین تطابق بین هذلولی رابطه (۳-۳) و منحنی‌های زمان‌سیر در یک ورداشت نقطه میانی مشترک CMP در گستره‌ی طولی ایجاد شود (ایلماز، ۲۰۰۱). هذلولی برانبارش بهینه که در معادله‌ی (۳-۳) توصیف شد لزوماً بسط کوچکی از هذلولی تعیین شده با معادله‌ی (۱-۳) نیست. زمان رفت و برگشت<sup>۱</sup>  $t_{0st}$  مربوط به بهترین تطابق هذلولی، می‌تواند متفاوت از زمان رفت و برگشت با دورافت صفر در معادله‌ی (۱-۳) باشد.

تفاوت بین سرعت برانبارش و سرعت NMO را خطای محدوده‌ی توزیع<sup>۲</sup> می‌نامند (هوبرال و کری، ۱۹۸۰).

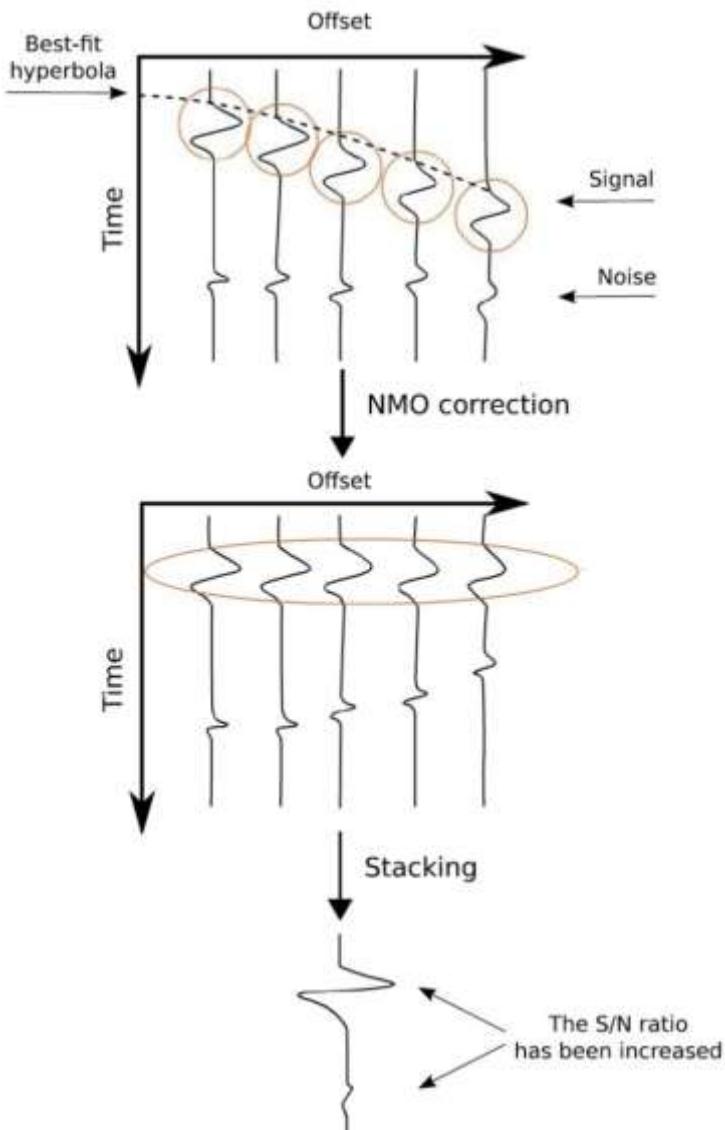
<sup>۱</sup>Two-way time

<sup>۲</sup>Spread-length bias

<sup>۳</sup>Krey

با توجه به معادلات (۳-۱) و (۳-۳) می‌توان دریافت که برای دورافت‌های کوچک تر در یک ورداشت چشمی مشترک، اختلاف بین  $V_{NMO}$  و  $V_{st}$  کم تر خواهد شد. در عمل سرعت برانبارش با استفاده از سرعت NMO مرتبط با هذلولی رابطه‌ی (۳-۱) تقریب زده می‌شود.

در روش برانبارش CMP اعمال تصحیح NMO بروی لرزه نگاشت ضروری است. تصحیح NMO در واقع نگاشت زمان‌سیر با دورافت غیر صفر  $t_0$ ، به زمان‌سیر با دورافت صفر  $t_0$  است. منحنی هذلولی زمان‌سیر که از رابطه‌ی (۳-۱) بدست می‌آید تنها به یک متغیر مجهول  $V_{NMO}$  وابسته است. با استفاده از الگوریتم های آنالیز سرعت می‌توان این سرعت را از روی داده‌های لرزه‌ای ثبت شده بدون نیاز به دانش قبلی (بطور خودکار یا دستی) تخمین زد. آنالیز سرعت استانداردی که در تصحیحات NMO بکار می‌رود بر ورداشت های نقطه میانی مشترک (CMP) در چندین مقدار سرعت متفاوت که در بازه‌ی معینی هستند، اعمال می‌شود و سرعتی را که بهترین بخط شدگی را در بازتاب‌های مقطع برانبارش اولیه‌ایجاد کند انتخاب می‌شود. بعد از اعمال تصحیح NMO و اختصاص سرعت برانبارش، رخدادها در گروه‌های لرزه نگاشت نقطه میانی مشترک (CMP) بخط شده و در این حالت می‌توان آنها را در یک امتداد جمع بست و یک ردلرزه با دورافت صفر در یک مقطع برانبارش CMP ایجاد نمود (شکل ۳-۲). اگر ساختارهای زیر سطحی پیچیده باشند، سرعت بهینه‌ی برانبارش به شکل بازتابندها وابسته می‌شود. شکل های (۳-۱ج) و (۳-۱د) نشان دهنده‌ی مثالی از مدل با لایه شیب دار با سرعت ثابت است. هر جفت چشمی-گیرنده در شکل (۳-۱د) دارای نقطه میانی مشترکی است که نماینده نقطه‌ی بازتاب از یک نقطه‌ی عمقی مشترک، مانند شکل (۳-۱ب) نیستند. نقاط بازتاب در شکل (۳-۱د) متفاوت اند و با افزایش دورافت یک جابجایی در ورداشت نقطه میانی مشترک به سمت بالای شیب اتفاق می‌افتد و در سرتاسر سطح مشترک دو لایه توزیع می‌شود. بنابراین برانبارش CMP در گیر انرژی‌های بازتابی است که از نقاط عمقی مختلفی منشا می‌گیرند و این امر باعث کاهش کیفیت برانبارش می‌شود (ایلماز، ۲۰۰۱). در این صورت اعمال تصحیح دیگری بنام تصحیح DMO ضروری است. برای این منظور باید دسته‌های CMP به دسته‌های CRP تبدیل شوند تا امکان تصحیح شیب سرعت‌های برانبارش فراهم شود (بایکولوف، ۲۰۰۹).



شکل ۳-۲: نمای شماتیک برانبارش CMP. الگوریتم آنالیز سرعت برانبارش برای تعیین هذلولی که بهترین تطابق را بارخدادهای بازتابی دارد که بطور نمونه برگرهوهای لرزه نگاشت نقطه میانی مشترک (CMP) منتخب اعمال شده است. سپس تصحیح NMO بر لرزه نگاشتها اعمال و رخدادهای بازتابی بخط شده و با جمع بستن ردلرزهها، یک ردلرزه برانبارش شده ایجاد می‌شود که باعث تقویت سیگنال و تضعیف نویه شده است (بایکولوف، ۲۰۰۹).

### ۳-۳ عملگر برانبارش سطح بازتاب مشترک (CRS)

ایده کلی روش CRS، توصیف یک رخداد بازتابی در پیرامون یک نمونه با دورافت صفر بوسیله‌ی تقریب درجه دوم زمان سیر مانند معادله‌ی (۲-۵۸) یا (۲-۶۰) است. شکل مناسب عملگر CRS در مختصات نقطه‌ی میانی  $m$  و نیم دورافت  $h$  تعیین می‌شود. این مختصات نه تنها باعث ایجاد یک نمایش ساده‌ی ریاضی از عملگر می‌شود بلکه امکان تفسیر پارامترهای برانبارش را نیز از نظر هندسی (بر حسب

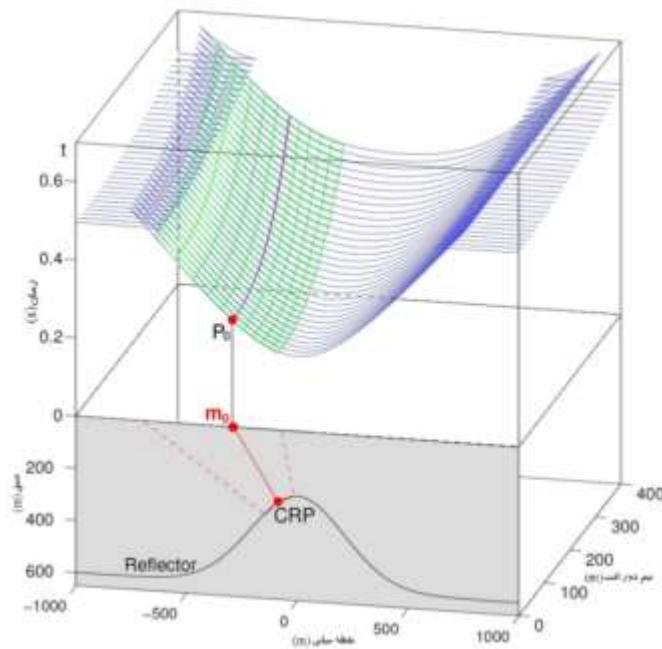
مشخصه‌های جبهه‌ی موج) فراهم می‌کند.

استفاده از یک صفحه‌ی برانبارش که حاوی بیش از یک خط سیر CRP در فضای زمان- نقطه میانی - نیم دورافت است، پیوستگی رخدادهای بازتابی را در مجاورت چندین ورداشت نقطه میانی مشترک ایجاب می‌کند. این نه تنها منجر به تثبیت در تعیین پارامترهای برانبارش می‌شود بلکه مسئله ورداشت‌های نقطه‌ی میانی مشترک (CMP) را که ممکن است حاوی اطلاعاتی بیشتر از یک نقطه در عمق باشند را حل می‌کند. لازم به ذکر است که عملگر مکانی برانبارش بطور ذاتی برای پراکندگی نقطه‌ی بازتاب<sup>۱</sup> محاسبه می‌شود به عبارت دیگر، می‌توان فرض کرد که دست کم قسمت عمدہ‌ای از خط سیر CRP متعلق به یک نمونه با دورافت صفر معین در صفحه برانبارش متناظر قرار گرفته است. در شکل (۳-۳) عملگر برانبارش CRS برای یک مدل ساده‌ی دو بعدی ترسیم شده است. شکل (۴-۳) انحراف خط سیر CRP را از ورداشت نقطه میانی مشترک CMP برای یک بازتابنده‌ی ناهمگن نشان می‌دهد. روابطی که در ادامه خواهید دید بر مبنای رابطه هذلولی زمان‌سیر است زیرا این رابطه در عمل بیشترین کارایی را دارد. در ضمن نتایج مشابهی را می‌توان از رابطه سهموی زمان‌سیر نیز بدست آورد (مولر، ۲۰۰۳ و برگلر<sup>۲</sup>، ۲۰۰۴).

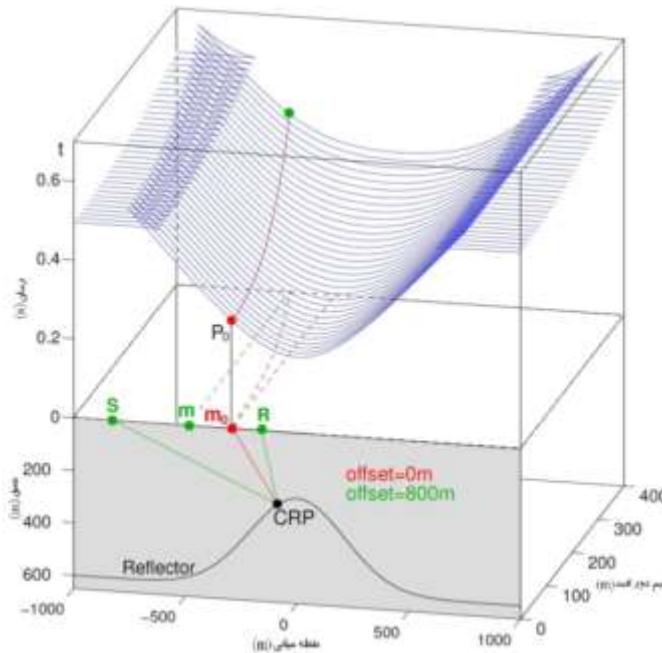
---

<sup>1</sup>Reflection point dispersal

<sup>2</sup>Bergler



شکل ۳-۳ : عملگر برانبارش CRS در حجم زمان- نقطه میانی نیم دورافت. منحنی های آبی در قسمت بالایی ، منحنی های زمان سیر بازتاب در دورافت های ثابت برای یک مدل گنبدی شکل قسمت پایینی هستند. خطوط سبز نشان دهنده عملگر CRS در نمونه ای با دورافت صفر  $P_0$  است که در واقع تقریبی از پاسخ بازتابی بخشی از بازتابنده قرمز رنگ حول نقطه بازتاب مشترک است. (اشپینر، ۲۰۰۷)



شکل ۴-۴: خط سیر CRP در حجم زمان- نقطه میانی-دورافت. منحنی های آبی در قسمت بالایی ، منحنی های زمان سیر بازتاب در دورافت های ثابت برای یک مدل گنبدی شکل قسمت پایینی هستند. خط سیر CRP (بنفش رنگ) تمامی نقاطی را که در حجم زمان- نقطه میانی نیم دورافت از یک نقطه‌ی بازتاب مشترک هستند، به هم وصل می‌کند. برای بازتابنده‌های غیر افقی یا لایه‌های بالایی ناهمگن، خط سیر CRP نسبت به ورداشت نقطه میانی شترک CMP انحراف دارد (اشپینر، ۲۰۰۷).

### ۱-۳-۳ تقریب زمان سیر در مختصات نقطه‌ی میانی و نیم دورافت

به منظور تخمین زمان سیر در مختصات نقطه‌ی میانی و نیم دورافت، یک سطح اندازه‌گیری مسطح که منطبق با صفحه‌ی  $(x, y)$  در سیستم مختصات کارتزین باشد در نظر گرفته می‌شود. چشم‌ها و گیرندهای موج روی این سطح قرار می‌گیرند. به عبارت دیگر صفحات آغازین و انتهایی بر هم منطبق می‌شوند. بنابر این هر نقطه روی سطح اندازه‌گیری، کاملاً با یک بردار دو بعدی توصیف می‌شود. برای یک چشم و گیرندهای موج معین با مختصات  $r_s$  و  $r_R$  مختصات نقطه‌ی میانی  $m$  و نیم دورافت  $h$  به صورت زیر محاسبه می‌شود:

$$m = \frac{1}{2}(r_s + r_R) \quad , \quad h = \frac{1}{2}(r_s - r_R) \quad (4-3)$$

برای بردارهای جابجایی  $x_s$  و  $x_R$  نظیر آنچه که در معادله (۴-۲) به کار رفت، روابط (۴-۳) را نیز می‌توان بر حسب بردارهای جابجایی  $\Delta m$  و  $\Delta h$  بیان کرد:

$$\Delta m = m - m_0 = \frac{1}{2}(x_s + x_R) \quad , \quad \Delta h = h - h_0 = \frac{1}{2}(x_s - x_R) \quad (5-3)$$

-۲ متعلق به پرتو مرکزی می‌باشد. با حل این روابط برای  $x_s$  و  $x_R$  و جایگذاری آنها در معادله (۴-۳) و  $h_0$  می‌توان تقریب زمان سیر برای مختصات نقطه‌ی میانی و نیم دورافت حاصل می‌شود:

$$\tau_{hyp}^2(\Delta m, \Delta h) = (\tau_0 + (P_R - P_S) \cdot \Delta m + (P_R + P_S) \cdot \Delta h)^2 \quad (6-3)$$

$$+ \tau_0(\Delta m \cdot M_M^H \Delta m + 2\Delta m \cdot M_{MH} \Delta h + \Delta h \cdot M_H^M \Delta h)$$

در معادله‌ی بالا  $\tau_0 = \tau(m_0, h_0)$  است و برای ماتریس‌های  $M_{MH}$  و  $M_H^M$  و  $M_M^H$  خواهیم داشت:

$$M_M^H = \left( \frac{\partial^2 \tau}{\partial \Delta m_i \partial \Delta m_j} \right)_{i,j=1,2} = N_S^R + N_R^S + N_{SR} + N_{SR}^T \quad \text{الف (۷-۳)}$$

$$M_H^M = \left( \frac{\partial^2 \tau}{\partial \Delta h_i \partial \Delta h_j} \right)_{i,j=1,2} = N_S^R + N_R^S - N_{SR} - N_{SR}^T \quad \text{ب (۷-۳)}$$

$$M_{MH} = \left( \frac{\partial^2 \tau}{\partial \Delta m_i \partial \Delta h_j} \right)_{i,j=1,2} = -N_S^R + N_R^S + N_{SR} - N_{SR}^T \quad \text{ج (۷-۳)}$$

در روابط (۷-۳) تمامی مشتقات در سطح و در نقطه‌ی  $(m_0, h_0)$  تعیین می‌شوند. معادله‌ی (۶-۳) عملگر برانبارش با دورافت محدود را در مختصات نقطه میانی و نیم دورافت با چهارده پارامتر مستقل تعریف می‌کند (با توجه به اینکه ماتریس‌های  $M_M^M$  و  $M_H^H$  متقارن و ماتریس  $M_{MH}$  نامتقارن است) (اشپیز، ۲۰۰۷).

برای پیدا کردن عملگر برانبارش با دورافت صفر، باید پرتوهای مرکزی را بصوت نرمال در نظر گرفت یعنی پرتوها عمود بر سطح بازتابنده فرود آیند. این پرتوها عمود در نقطه‌ی ورود (NIP)<sup>۱</sup> می‌namند. بنابر تعریف، موج NIP موجی است که از نقطه NIP بر روی سطح بازتابنده آغاز شده و با نصف سرعت محیط در زمان  $t$  به محل انتباق چشم و گیرنده می‌رسد (شکل ۵-۳) (یگر، ۱۹۹۹). در صورتیکه جبهه 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 شرایط موج NIP را موج ویژه گویند. در این حالت همچنین جبهه موج برگشتی با جبهه موج گسیل شده بر هم منطبق خواهند شد. در واقع مسیر حرکت پرتوهای بالا رونده و پایین رونده بر هم منطبق است. به عبارت دیگر  $h_0 = h$  و  $\Delta h = h - h_0$  می‌باشد در نتیجه مشتق روابط (۷-۳) نسبت به  $h$  به صورت زیر تبدیل می‌شود:

$$\frac{\partial \tau}{\partial h} \Big|_{h=0} = 0 \quad , \quad \left( \frac{\partial^2 \tau}{\partial \Delta m \partial h} \right) = \left( \frac{\partial^2 \tau}{\partial h \partial \Delta m} \right) = 0 \quad (8-3)$$

علاوه بر این، کندی در گیرنده  $P_R$  برابر  $P_S$  خواهد بود در این صورت رابطه‌ی زیر معرفی می‌شود:

$$2P_m = \frac{\partial \tau}{\partial \Delta m} = P_R - P_S \quad (9-3)$$

و همچنین تقریب هذلولی زمان سیر با دورافت صفر به صورت زیر نوشته می‌شود:

$$\tau_{hyp}^2(\Delta m, h) = (\tau_0 + 2P_m \cdot \Delta m)^2 + \tau_0(\Delta m \cdot M_M^H \Delta m + h \cdot M_H^M h) \quad (10-3)$$

معادله‌ی (۱۰-۳) در مقایسه با معادله‌ی (۶-۳) تعداد متغیرهای مستقل از چهارده به هشت متغیر کاهش می‌یابد. معادله (۱۰-۳) با فرض اندازه‌گیری در یک سطح افقی و انتباق صفحات آغازین و انتهایی حاصل

---

<sup>۱</sup>Normal-incidence point (NIP)

شده است.

### ۲-۳-۳ تفسیر فیزیکی پارامترهای برانبارش

برای بدست آوردن شکل توصیفی تر عملگر CRS (۳-۱۰) انحرافات زمان سیر بر حسب خواص فیزیکی جبهه‌های موج وابسته به میدان‌های موج ورودی بیان می‌شوند. روابطی که در ادامه بدست می‌آید مستلزم این است که پیرامون موقعیت ورود پرتوی مرکزی ( $m_0, 0$ ) لایه سطحی همگن و سرعت این لایه ثابت باشد.

بردار  $P_m$  مؤلفه افقی بردار کندی پرتو مرکزی را تعیین می‌کند و بنابراین می‌توان آنرا وابسته به جهت ورود پرتوی مرکزی در سطح دانست و به صورت زیر بیان نمود (اشپینر، ۲۰۰۷):

$$P_m = \frac{1}{v_0} \begin{pmatrix} \cos \phi & \sin \alpha \\ \sin \phi & \sin \alpha \end{pmatrix} \quad (3-11)$$

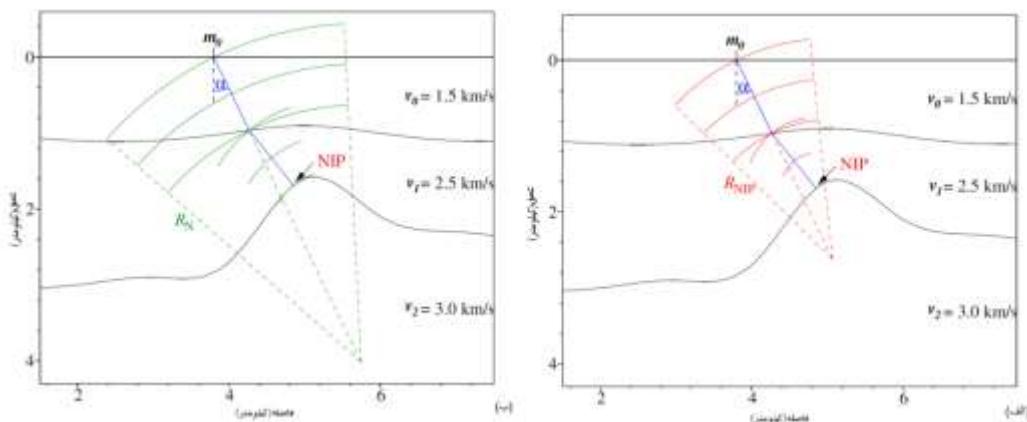
ϕ نشان دهنده‌ی آزمیوت پرتو ورودی اندازه‌گیری شده نسبت به محور  $x$  و α زاویه ورود پرتو نسبت به صفحه‌ی نرمال است.

ماتریس‌های  $M_M^M$  و  $M_H^H$  را می‌توان نسبت به انحنای جبهه‌های موج فرضی به نام‌های موج NIP و نرمال بیان کرد. برای این منظور، دو آزمایش فرضی مطرح شده که برای یک مدل ساده دو بعدی در شکل (۳-۵) ترسیم شده است. موج NIP در واقع شامل پرتوهایی است که از یک چشممه‌ی نقطه‌ای در روی بازتابنده در نقطه NIP آغاز شده و از این نقطه انتشار می‌یابند. جبهه موجی که شامل این پرتوها است جبهه موج NIP نامیده می‌شود. در موقعیت ورود پرتوی مرکزی ( $m_0, 0$ ), جهت انتشار موج NIP با  $P_m$  تعیین می‌شود و انحنای موضعی این جبهه‌ی موج را می‌توان با استفاده از ماتریس انحنای  $K_{NIP}$  که ماتریسی  $2 \times 2$  است بیان کرد. برای بدست آوردن ماتریس انحنای  $K_{NIP}$  با استفاده از ماتریس  $M_H^M$ ، آزمایش NIP برای یک موج ویژه NIP انجام می‌شود. برای این منظور جبهه‌ی موج از نقطه ( $m_0, 0$ ) با انحنای NIP - آغاز و در نقطه NIP متتمرکز می‌شود. هوبال (۱۹۸۳) نشان داد که در تقریب پرتو موازی

محور اگر نقاط بازتاب موافق محور واقعی پرتو مرکزی در NIP پرتو مرکزی باشند، زمان سیرهای مشابه در یک دسته CMP تعیین خواهند شد. بنابراین ماتریس  $M_H^M$  را می‌توان بر حسب ماتریس انحنای موج NIP بیان کرد:

$$M_H^M = \frac{2}{v_0} H K_{NIP} H^T \quad (12-3)$$

در این رابطه  $H$  زیرماتریس  $2 \times 2$  بالا و در سمت چپ ماتریس تبدیل  $\hat{H}$  است که عمل تبدیل سیستم کارتزین پرتو مرکزی را به سیستم کارتزین عمومی انجام می‌دهد و از رابطه (۴۴-۲) بدست می‌آید.



شکل ۵-۳: آزمایش موج های NIP و نرمال در یک مدل دو بعدی. (الف) انفجار یک چشممهی نقطهای در NIP سبب انتشار جبهه‌ی موج NIP در امتداد پرتوی مرکزی که با رنگ آبی نشان داده است می‌شود. در موقعیت ورود پرتوی مرکزی، موج NIP با زاویه‌ی ورود پرتو مرکزی  $\alpha$  و شعاع انحنای  $R_{NIP}$  مشخص می‌شود. (ب) آزمایش سطح انفجاری بر روی بازتابنده NIP موجب انتشار موج نرمال می‌شود این موج در حین ورود به نقطه  $m_0$  با جهت ورود زاویه  $\alpha$  و شعاع انحنای  $R_N$  که در واقع تقریب بخشی از یک دایره است، تعیین می‌شود. (من، ۲۰۰۲)

آزمایش دوم، آزمایش موج نرمال است که در واقع آزمایش سطح انفجار بر روی بازتابنده است که توسط لوونتال<sup>۲</sup> و همکاران (۱۹۷۶) معرفی شد. برای این منظور یک بخش کامل از بازتابنده در پیرامون NIP که با چشممهای نقطهای زیادی پوشش داده شده در نظر گرفته می‌شود. اگر تمامی این چشممهای در یک زمان منفجر شوند موجی با انحنای موضعی معادل انحنای بازتابنده ایجاد می‌شود. پرتوهای متناظر با این موج، عمود بر بازتابنده اند و موج مورد نظر را موج نرمال می‌نمایند. جهت انتشار و انحنای این موج ورودی

<sup>1</sup>Paraxial reflection point (PRP)

<sup>2</sup>Loewenthal

در  $(m_0, 0)$  بهتر تیب با  $P_m$  و ماتریس انحنای  $K_N$  که ماتریسی  $2 \times 2$  است تعیین می‌شود. مانند آزمایش اول، این آزمایش نیز می‌تواند برای برگشت این موج انجام شود بطوریکه در لحظه شروع، موج از نقطه  $(0, m_0)$  با انحنای  $-K_N$  به سمت بازتابنده انتشار می‌یابد و پس از آن بازتاب برگشتی به سطح اندازه‌گیری انجام می‌شود. در صورتی که پرتوها نرمال در نظر گرفته شوند این آزمایش معادل یک آزمایش دورافت صفر است.

رابطه‌ی ماتریس انحنای موج نرمال  $K_N$  و ماتریس  $M_M^H$  به صورت زیر بیان می‌شود:

$$M_M^H = \frac{2}{v_0} H K_N H^T \quad (13-3)$$

زوایای  $\alpha$  و  $\phi$  به همراه شش عنصر مستقل ماتریس‌های متقارن  $K_{NIP}$  و  $K_N$  را نشانگرهای جنبشی میدان موج می‌نامند. برای یک لایه بالایی همگن این نشانگرهای می‌توانند بطور مستقیم مشخصات بازتابنده را بیان کنند. دو زاویه  $\alpha$  و  $\phi$  متناظر با شیب و جهت یافته‌گی بخشی از سطح بازتابنده در NIP هستند. ماتریس  $K_{NIP}$  فقط یک آرایه مستقل دارد و شعاع انحنای موج NIP برابر با  $R_{NIP} = 1/K_{NIP}$  است که در سطح اندازه‌گیری معادل طول پرتو نرمال با دورافت صفر می‌باشد. در صورتی که ماتریس  $K_N$  شامل بیش از سه آرایه مستقل است و شعاع انحنای موج نرمال برابر  $R_N = 1/K_N$  می‌باشد. در یک محیط دلخواه، نسبت بین نشانگرهای جنبشی میدان موج و خواص بازتابنده قدری پیچیده‌تر می‌شود زیرا نشانگرهای تحت تاثیر توزیع سرعت لایه‌ی رویی هستند.

با استفاده از معادلات (11-۳)، (12-۳) و (13-۳) تقریب زمان سیر معادله‌ی (۱۰-۳) را می‌توان به صورت زیر نوشت:

$$\tau_{hyp}^2(\Delta m, h) = (\tau_0 + 2P_m \cdot \Delta m)^2 + \frac{2\tau_0}{v_0} (\Delta m \cdot H K_N H^T \Delta m + h \cdot H K_{NIP} H^T h) \quad (14-3)$$

معادله‌ی (۱۴-۳) شکل نهایی عملگر برانبارش هذلولی است که در تقریب CRS استفاده می‌شود. مشابه با آنالیز سرعت برانبارش به روش معمول، نشانگرهای جنبشی میدان موج بهینه برای هر موقعیت دورافت صفر  $P_0(m_0, 0)$  بطور خودکار با استفاده از آنالیز همدوسی<sup>۱</sup> در داده‌های قبل از برانبارش انجام می‌شود.

---

<sup>۱</sup>Coherence analyses

برای این منظور مقدار همدوسی پارامترهای برانبارش که در محدوده‌ی قابل قبول بطور مستقل تغییر می‌کنند، در امتداد عملگر برانبارش هذلولی (۳-۱۴) برای هر دسته پارامتر تعیین می‌شود. در عمل، معمولاً جستجوی پارامترها به سه جستجوی مستقل در داده‌های قبل از برانبارش شکسته می‌شود. جزئیات مربوط به جستجوی معمول پارامترهای برانبارش توسط مولر (۲۰۰۳) و برگلر (۲۰۰۴) تشریح شده است.

نتایج نهایی برانبارش سه بعدی CRS، شامل حجم کاملی از نشانگرهای میدان موج به همراه همدوسی و حجم برانبارش شده CRS است. مقدار همدوسی معیاری است که به وسیله‌ی آن می‌توان نتیجه گرفت که عملگر برانبارش به ازای چه دسته نشانگرهایی در داده قبل از برانبارش مناسب است. در این صورت تحت شرایطی که تقریب برانبارش CRS معتبر باشد نشانگرهای میدان موج قابل اطمینان، شناسایی می‌شوند. در این خصوص همدوسی پایین نشان دهنده بی اعتبار بودن نشانگرها در این نقاط و یا حتی بی معنی بودن آنها است.

مسئله‌ی مهم در مورد قابل قبول بودن نشانگرهای میدان موج، اندازه‌ی بازه<sup>۱</sup> مورد استفاده در جستجوهای معمولی است. همانطور که در بخش ۳-۲ گفته شد در عمل سرعت‌های برانبارش بدست آمده از آنالیز سرعت با سرعت‌های NMO که در تقریب درجه دوم زمان سیر معادله (۳-۱) تعیین می‌شود منطبق نیستند. انحراف سرعت‌های برانبارش از سرعت‌های NMO (بطور کلی تر انحراف داده‌های بدست آمده از پارامترهای برونزاند بواسطه ضرایب متناظرشان در تقریب درجه دوم زمان سیر) که متناسب با اندازه‌ی بازه جستجو است به عنوان خطای محدوده‌ی توزیع<sup>۲</sup> مصطلح شده است. این اثر بواسطه‌ی آنالیز برانبارش به روش معمول شناسایی می‌شود (هوبرال و کری، ۱۹۷۳ و ال چلابی<sup>۳</sup>). یکی از مهم ترین دلایل این مسئله انحراف منحنی‌های زمان سیر از حالت هذلولی است که این ناشی از ناهمگونی‌های زیرسطحی و استفاده از بازه دورافت محدود در طی آنالیز سرعت است (دونک، ۲۰۰۴). خطای محدوده‌ی توزیع وقتی اهمیت می‌یابد که از پارامترهای برونزاندی که از داده‌های لرزه‌ای بدست می‌آید برای کاربردهای دیگر بطور مثال مسائل

---

<sup>1</sup>Aperture

<sup>2</sup>Sprated-length-bias

<sup>3</sup>Al-Chalabi

معکوس سازی استفاده شود. در اینگونه موارد ماکریم دورافتی که در دسته‌های CMP در نظر گرفته می‌شود را با دقت بیشتری باید انتخاب کرد. برای بیرون کشیدن نشانگرهای جنبشی میدان موج از داده‌های لرزه‌ای لازم است که در مورد کنترل اثرات خطای محدوده‌ی توزیع با دقت بیشتری عمل کرد. در بازه‌های بزرگ، تقریب درجه دوم در مسافت‌های طولانی از اعتبار لازم برخوردار نخواهد بود و نمایشی از یک تقریب درجه دوم ندارد و عملگر بهینه ممکن است بروی رخداد بازتابی انطباق داشته باشد که در موقعیت دورافت صفر مورد نظر قرار نداشته باشد. ولی در دورافت‌های بزرگ می‌توان با انتخاب بازه‌ی جستجوی کوچک قدرت تفکیک حادثه‌ها را افزایش داد و نشانگرهای جنبشی میدان موج را با دقت مناسبی تعیین کرد (دوونک، ۲۰۰۴).

به هر حال برای ارزیابی دقیق انحنای جبهه موج‌های NIP و نرمال، بازه جستجوی نشانگرهای جنبشی میدان موج باید بقدر کافی بزرگ باشد. مولر در سال ۲۰۰۶ تقریبی را برای تصحیح محدوده خطای توزیع ارائه داده که پرداختن به آن از حوصله‌ی این تحقیق خارج است. در عمل برای استفاده از برانبارش CRS، نقطه میانی و بازه‌ی دورافت را باید به دقت انتخاب کرد تا موازنی‌ای بین این شرایط متناقض برقرار شود (اشپینر، ۲۰۰۷).

### ۳-۳-۳ برانبارش دو بعدی سطح بازتاب مشترک

در هندسه برداشت دو بعدی، داده‌های لرزه‌ای در امتداد یک خط که معمولاً عنوان محور  $x$  سیستم کلی مختصات کارتزین است، برداشت می‌شود. جهت این محور معمولاً به جهت خط لرزه‌ای<sup>۱</sup> اشاره دارد. در حالیکه محور مختصاتی  $y$ ، تعیین کننده‌ی جهت عمود بر خط لرزه‌ای<sup>۲</sup> است. اگر پارامترهای زیرسطحی در امتداد عمود بر خط لرزه‌ای تغییری نکند، تمامی پرتوها در صفحه‌ی مشاهده‌ای قائم که بوسیله‌ی خط برداشت تعیین می‌شود، باقی می‌مانند. این وضعیت معمولاً مناسب به هندسه‌ی دو و نیم بعدی است زیرا موج به صورت سه بعدی در مدلی با تغییرات دو بعدی انتشار می‌یابد.

<sup>1</sup>Inline

<sup>2</sup>Crossline

در شرایط هندسه‌ی دو و نیم بعدی، مختصات نقطه‌ی میانی و نیم دورافت به اسکالر تبدیل می‌شوند و تقریب زمان‌سیر (۱۰-۳) را می‌توان بر حسب مشتقات درجه اول و دوم زمان‌سیر بیان کرد:

$$\tau_{hyp}^2(\Delta m, h) = (\tau_0 + \frac{\partial \tau}{\partial m} \Delta m)^2 + \tau_0 \left( \frac{1}{2} \frac{\partial^2 \tau}{\partial m^2} \Delta m^2 + \frac{1}{2} \frac{\partial^2 \tau}{\partial h^2} h^2 \right) \quad (15-3)$$

به طریق مشابه در مورد هندسه‌ی سه بعدی نیز، با استفاده از معادلات (۱۱-۳)، (۱۲-۳) و (۱۳-۳) می‌توان رابطه‌ی بین مشتقات زمان‌سیر و خواص فیزیکی زیرسطحی را بیان نمود. بعلت تغییر ناپذیری مدل در جهت آزمیوت  $\phi$  برابر صفر است. بنابراین رابطه‌ی (۱۱-۳) به صورت زیر کاهش می‌یابد (اشپینر، ۲۰۰۷):

$$\frac{1}{2} \frac{\partial \tau}{\partial m} = \frac{\sin \alpha}{v_0} \quad (16-3)$$

مشتقات دوم زمان‌سیر نسبت به مختصات نقطه‌ی میانی و دورافت به صورت زیر است:

$$\frac{\partial^2 \tau}{\partial m^2} = \frac{2 \cos \alpha}{v_0} K_N \quad (17-3)$$

$$\frac{\partial^2 \tau}{\partial h^2} = \frac{2 \cos \alpha}{v_0} K_{NIP} \quad (18-3)$$

با توجه به معادلات (۱۶-۳)، (۱۷-۳) و (۱۸-۳) شکل نهایی عملگر دو بعدی CRS به صورت زیر نوشته می‌شود (اشپینر، ۲۰۰۷):

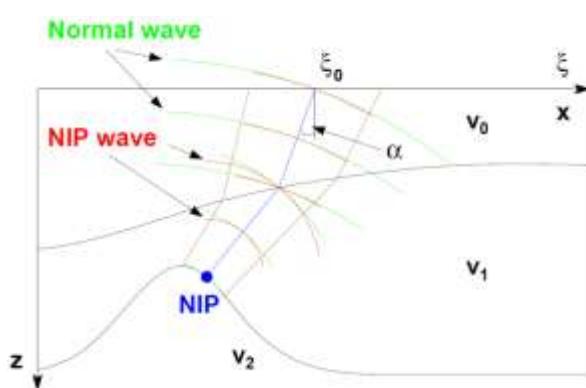
$$\tau_{hyp}^2(\Delta m, h) = (\tau_0 + 2 \frac{\sin \alpha}{v_0} \Delta m)^2 + \frac{2 \tau_0 \cos^2 \alpha}{v_0} (K_N \Delta m^2 + K_{NIP} h^2). \quad (19-3)$$

و معادله عملگر برآنبارش تقریب سهموی زمان‌سیر به صورت زیر خواهد بود:

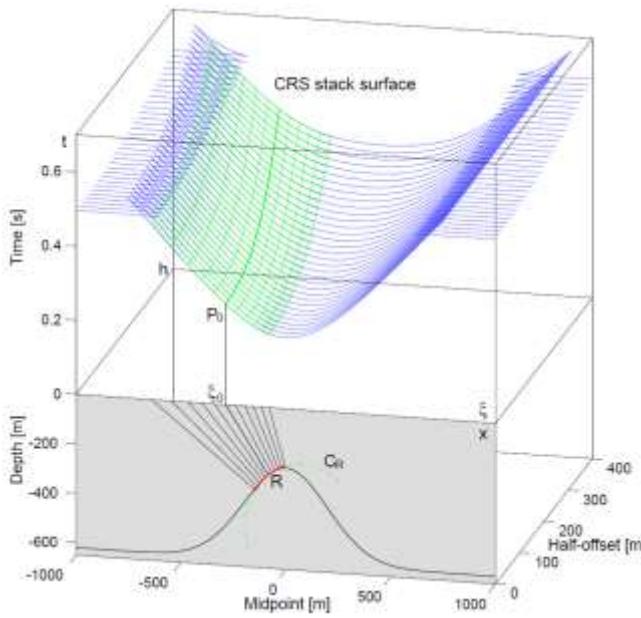
$$\tau_{par}^2(\Delta m, h) = (\tau_0 + 2 \frac{\sin \alpha}{v_0} \Delta m) + \frac{\cos^2 \alpha}{v_0} (K_N \Delta m^2 + K_{NIP} h^2). \quad (20-3)$$

برای محاسبه عملگر برآنبارش نیاز به سه نشانگر است که عبارتند از زاویه ورود  $\alpha$ ، شعاع انحنای موج عمود  $R_N$  و شعاع انحنای موج عمود در نقطه‌ی ورود  $R_{NIP}$  (من، ۱۹۹۹). شکل (۶-۳) نشانگرهای مورد استفاده در معادلات (۱۹-۳) و (۲۰-۳) را نشان می‌دهد. در این معادلات  $v_0$  برابر سرعت لایه سطحی،  $\alpha$  زاویه ورود پرتوی مرکزی است و نقطه‌ای که باید در مقطع ZO شبیه سازی شود با  $\theta$  نشان داده شده که در حقیقت

موقعیت محل ورود پرتو مرکزی است. با توجه به شکل (۷-۳) می‌توان مشاهده کرد که نقطه  $P_0$  نماینده‌ی این نقطه در سطح برانبارش بازتاب مشترک است. در شکل (۷-۳)، منحنی‌های زمان‌سیر در حوزه مختصات نقطه میانی، نیم دورافت و زمان  $(x, h, t)$  که با خطوط آبی رنگ نشان داده شده، مبین پرتوهای بازتاب شده‌ای هستند که از روی سطح بازتابنده منحنی شکل در عمق، انعکاس یافته‌اند. بخش قرمز رنگ در سطح بازتابنده در واقع بخشی از دایره‌ای است که منطبق بر سطح بازتابنده است و در برانبارش CRS بعنوان سطح انفجار در نظر گرفته می‌شود. پرتوهای ساطع شده از سطح انفجار بر این سطح عمود بوده و زمان سیرهای آنها در منحنی‌های سبز رنگ نشان داده می‌شود. نقطه  $P_0$  بر روی منحنی زمان سیر دورافت صفر، نماینده‌ی پرتو دورافت صفری است که در نقطه  $\xi_0$  به سطح می‌رسد. با افزایش دورافت این نقطه بر روی منحنی زمان سیر جابجا می‌شود و فرآیند نقطه‌ی بازتاب مشترک (CRP) را تکمیل می‌کند (منحنی سبز پر رنگ). در واقع برای تمامی پرتوهای ساطع شده از سطح انفجار قرمز رنگ این موضوع صادق است. در این صورت مجموعه‌این منحنی‌های سبز رنگ در کنار هم سطحی را ایجاد می‌کنند که به این سطح سبز رنگ، عملگر برانبارش سطح بازتاب مشترک (CRS) می‌گویند. هر چه انطباق این سطح برانبارش با سطح منحنی‌های زمان سیر بیشتر باشد، عملگر برانبارش از دقت بیشتری برخوردار بوده و نسبت سیگنال به نوفه در برانبارشی که توسط این عملگر انجام می‌شود، افزایش می‌یابد.



شکل ۳-۶ : مشخصه‌های لازم برای تعیین عملگر برانبارش سطح بازتاب مشترک (فیت، ۲۰۰۱).



شکل ۷-۳ : قسمت پایین، بازتابنده تاقدیسی شکل در حوزه عمق، قسمت بالا، سطح آبی رنگ منحنی‌های زمان سیر و سطح سیز رنگ نشان دهنده عملگر برانبارش CRS است (فیت، ۲۰۰۱)

### ۴-۳ روش انجام برانبارش CRS

با توجه به مطالبی که گفته شد، در روش CRS بجای برانبارش در راستای یک خط سیر CRP، برانبارش روی سطحی که شامل چندین خط سیر CRP است (سطح برانبارش) انجام می‌شود. برای تعیین این سطح برانبارش باید نشانگرهای CRS که بهترین سطح زمان سیر را برای شبیه‌سازی نقطه‌ی  $P_0$  ایجاد می‌کنند پیدا کرد. این روند برای هر نقطه بطور مشابه انجام می‌شود که این امر مستلزم صرف وقت و هزینه زیادی است. در این صورت باید به دنبال راهی بود تا این پارامترهای بهینه در زمان کم تری بدست آیند. مسئله‌ی مهم اینجاست که هیچ پیش شرط اولیه‌ای برای تعیین این پارامترهای بهینه وجود ندارد. تنها راه جستجوی هر نشانگر در یک محدوده معین است که توسط کاربر تعیین می‌شود و سپس از آنالیز همدوسی برای بیرون کشیدن نقاط با همدوسی بالا بعنوان بهترین مقادیر استفاده شود (فیت، ۲۰۰۱). البته برای بدست آوردن مقادیر مطلوب معمولاً این محدوده را نسبتاً بزرگ در نظر می‌گیرند. با این حال همه پارامترهای CRS را نمی‌توان در یک مقطع همدوسی جستجو کرد زیرا اتلاف هزینه و زمان بیش از حد خواهد بود. بدلیل اینکه مقادیر  $R_{NIP}$  و  $R_N$  بین  $+\infty$  و  $-\infty$  تغییر می‌کند و با توجه به مشکلاتی که در بالا

اشاره شد و عدم اطمینان از اینکه نتایج بدست آمده نتایج مطلوب است یا خیر، باید به دنبال راه جدیدی برای حل این مسئله بود. یگر (۱۹۹۹) و مَن (۱۹۹۹) روشی را برای حل این مسئله معرفی کردند بدین صورت که هر یک از پارامترها با در نظر گرفتن مقادیر سه گانه اولیه‌ای که بقدر کافی به مقدار بهینه نزدیک باشند، به صورت جداگانه حل شوند. در این صورت مسئله از جستجو برای بهینه کلی، به مسئله جستجو برای بهینه محلی تقلیل پیدا می‌کند. 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.

**گام اول:** اولین مرحله از استراتژی مورد نظر جهت رسیدن به پارامترها، تولید مقطع برانبارش خودکار می‌باشد. این عمل با محدود کردن سطح برانبارش CRS به یک CMP با قرار دادن  $m = m_0$  در معادله (۱۹-۳) انجام می‌گیرد.

$$\tau_{hyp}^2(0, h) = \tau_0^2 + \frac{2\tau_0 \cos^2 \alpha}{v_0} K_{NIP} h^2. \quad (21-3)$$

وابستگی به  $\alpha$  و  $R_{NIP}$  را می‌توان به صورت ترکیبی و با پارامتر  $q$  نمایش داد:

$$q = \cos^2 \alpha R_{NIP}^{-1} \quad (22-3)$$

با توجه به رابطه (۱-۳) سرعت NMO را می‌توان نسبت به پارامتر  $q$  بیان کرد (هوبرال و کری، ۱۹۸۰):

$$v_{NMO}^2 = \frac{2v_0 R_{NIP}}{\tau_0 \cos^2 \alpha} = \frac{2v_0}{\tau_0} q^{-1} \quad (23-3)$$

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 همدوسي به صورت دستی پیک شود، این عملیات به صورت خودکار به انجام می‌رسد. لذا به این مرحله برانبارش خودکار CMP می‌گویند (مَن، ۲۰۰۲).

بعد از بدست آوردن مقطع ZO، در این مرحله از مقطع مذکور استفاده کرده و به جستجوی پارامترهای CRS پرداخته می‌شود. با قرار دادن  $h = 0$  رابطه CRS با حسب  $a$  و  $R_N$  خواهد شد. با قرار دادن

یعنی با فرض صاف بودن سطح مورد نظر(تخت بودن موج)، رابطه ساده‌تر شده و به یک معادله  $R_N = +\infty$

تک پارامتری تبدیل خواهد شد:

$$\tau_{hyp}(\Delta m, 0) = \tau_0 + 2 \frac{\sin \alpha}{v_0} \Delta m. \quad (24-3)$$

حال با قراردادن زاویه‌ی  $\alpha$  در رابطه‌ی (۲۱-۳) مقدار  $R_{NIP}$  تعیین می‌شود.

**گام دوم:** با در اختیار داشتن  $\alpha$  و جایگذاری  $h = 0$  در معادله‌ی (۱۹-۳) می‌توان  $R_N$  را تعیین کرد.

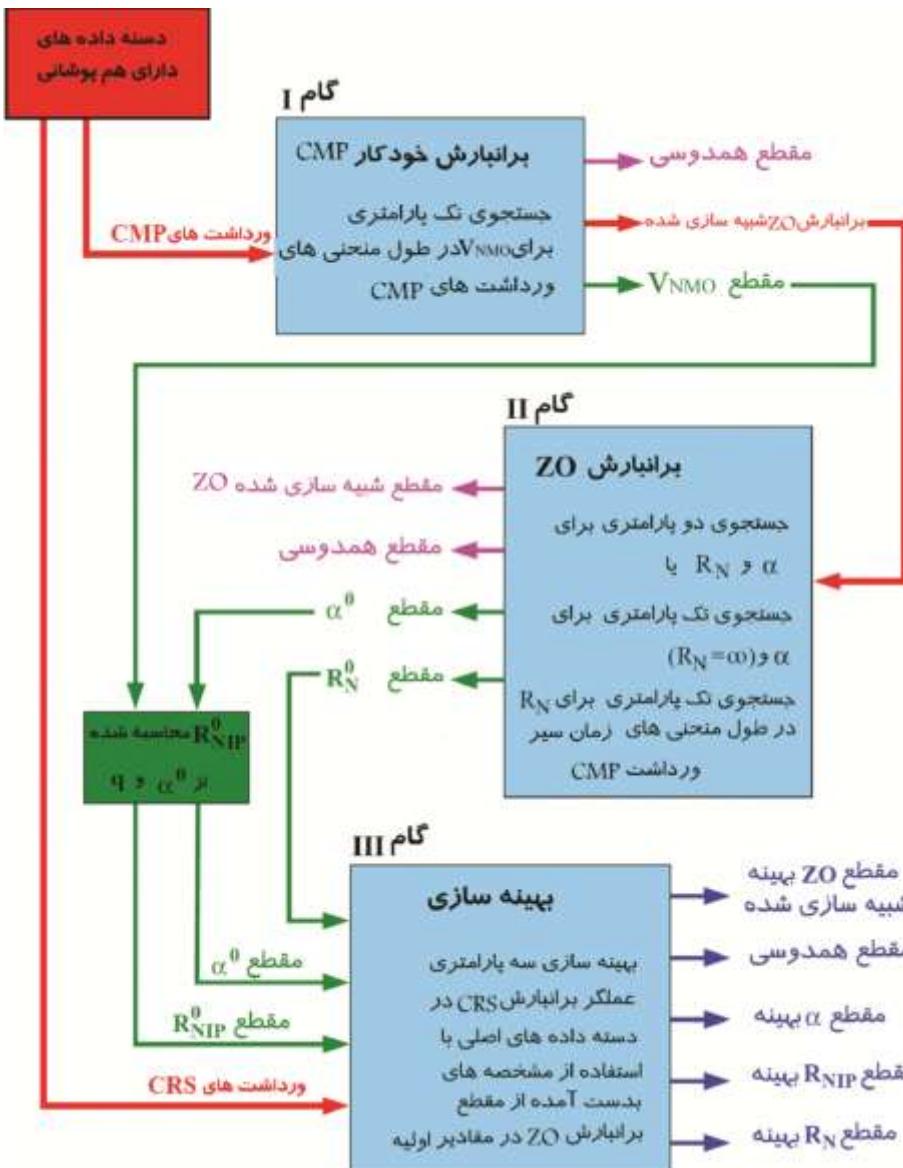
$$\tau_{hyp}^2(\Delta m, 0) = (\tau_0 + 2 \frac{\sin \alpha}{v_0} \Delta m)^2 + \frac{2\tau_0 \cos^2 \alpha}{v_0} (K_N \Delta m^2). \quad (25-3)$$

**گام سوم:** از این مرحله پنج مقطع شامل مقاطع، ZO شبیه سازی شده، همدوسی حداکثر،  $R_N^0$  و  $\alpha^0$  و

(بالانویس صفر نشان می‌دهد که این پارامترها اولیه هستند) بدست می‌آید. البته حل این مسئله به صورت سه معادله‌ی تک پارامتری دقیق‌تر کمتری را نسبت به حل معادله‌ی اصلی سه پارامتری دارد. با این حال به دلیل اینکه فرض بر این بوده که نشانگرهای اولیه بدست آمده خیلی نزدیک نشانگرهای بهینه هستند و هیچ ماقریم موضعی دیگری در آن محدوده نباشد، این جواب‌ها را می‌توان برای مراحل بعدی محاسبات بکار برد و به جواب‌های واقعی نزدیک شد و اگر فرض ما درست باشد به همان جوابی دست خواهیم یافت که معادله‌ی اصلی سه پارامتری رسیده است (یگر، ۱۹۹۹). مقطع برانبارش بدست آمده بوسیله‌ی این نشانگرهای اولیه را نیز مقطع برانبارش اولیه می‌نامند. برای بهینه سازی از الگوریتم بهینه سازی چند وجهی قابل انعطاف استفاده می‌شود (نلدر<sup>۱</sup> و مید<sup>۲</sup>، ۱۹۶۵). مقاطع بدست آمده در این مرحله عبارتند از مقطع CRS یا مقطع نهایی شبیه سازی شده ZO، مقطع همدوسی حداکثر، مقطع  $a$  بهینه شده، مقطع  $R_N$  بهینه شده و مقطع  $R_{NIP}$  بهینه شده. در شکل (۸-۳) مراحل برانبارش CRS در روش اول به طور خلاصه آورده شده است.

---

<sup>1</sup>Nelder  
<sup>2</sup>Mead



شکل ۸-۳: نمای شماتیک روش اول در جستجوی پارامترهای مشخصه عملگر برانبارش CRS (اندیس صفر نشان می دهد که این پارامترها اولیه هستند) (با تغییرات بعد از یگر، ۱۹۹۹).

### ۳-۵ برخی از کاربردهای دیگر نشانگرهای برانبارش CRS

نشانگرهای برانبارش CRS از مشخصه‌های جبهه‌ی موج هستند. در نتیجه این نشانگرهای وابسته به فرآیند فیزیکی انتشار موج در محیطی آزمایشی هستند که رفتارهای دینامیکی و جنبشی آن قابل پیش‌بینی است. بنابراین در صورتی که خواص دینامیکی و جنبشی موج بوسیله‌ی نشانگرهای برانبارش CRS توصیف شود امکان استفاده از این نشانگرهای پردازش داده‌های لرزه‌ای وجود خواهد داشت (فیت، ۲۰۰۱).

## ۱-۵-۳ خط سیر CRP

هوخت<sup>۱</sup> و همکاران (۱۹۹۹) تقریب درجه دوم دو بعدی خط سیر CRP را با توجه به هندسه برداشت بر حسب نشانگرهای CRS بدست آورند. تصویر خط سیر CRP بر صفحه‌ی نقطه‌ی میانی- نیم دورافت به صورت زیر است:

$$m(h) = m_0 + r_T (\sqrt{h^2/r_T^2 + 1} - 1), \quad r_T = \frac{R_{NIP}}{2 \sin \alpha} \quad (26-3)$$

به ازای  $0 \rightarrow \alpha$ ,  $m(h) = m_0$  خواهد بود. معادله‌ی (۲۶-۳) در محیط‌های همگن که رابطه‌ی  $R_{NIP} = \tau_0 v_0 / 2$  صدق کند توصیف تحلیلی دقیقی از خط سیر CRP ارائه می‌دهد.

## ۲-۵-۳ تصویر زون فرنل<sup>۲</sup>

فصل مشترک حجم فرنل با بازتابنده را سطح مشترک زون فرنل می‌نامند. دو نقطه‌ی بازتاب در سطح مشترک زون فرنل را نمی‌توان از هم تمیز داد. نقطه‌ی مقابل سطح مشترک زون فرنل در حوزه‌ی زمان، تصویر زون فرنل در حوزه عمق است. مورد اخیر توسط هوبرال در سال ۱۹۸۳ معرفی شد. وی با در نظر گرفتن هندسه برداشت داده لرزه‌ای و تصویر کردن حدود سطح مشترک زون فرنل در سطح روش اندازه‌گیری آنرا تعیین کرد. تقریب کلی برای تخمین PFZ از روی زمان سیر توسط اسچلیچر و همکاران، (۱۹۹۷) بدست آمد. با استفاده از رابطه‌ی زیر می‌توان اندازه PFZ در دورافت صفر را بر حسب نشانگرهای CRS بدست آورد:

$$\frac{W_F}{2} = |m - m_0| = \frac{1}{\cos \alpha} \sqrt{\frac{v_0 T}{2} \left| \frac{1}{R_N} - \frac{1}{R_{NIP}} \right|}. \quad (27-3)$$

$v_0$  سرعت لایه سطحی است. دوره تناوب  $T$  از روی اندازه طول موج تعیین می‌شود.

<sup>1</sup>Höcht

<sup>2</sup>Projected Fresnel zone (PFZ)

## ۴ فصل چهارم

### مسئله شیب‌های متداخل

#### ۱-۴ مقدمه

در روش‌های تصویر سازی لرزه‌ای همواره ابهاماتی وجود دارد که بطور کامل قابل حل نیستند. بطور مثال هنگامی که امواج لرزه‌ای در مواجه با ساختارهای پیچیده‌یا نیمه پیچیده با شیب‌های متداخل که انحنای بعضی از نقاط در آن برابر یا کوچکتر از طول موج لرزه‌ای باشد، اصل انعکاس یا انکسار موج در این نقاط دیگر معتبر نخواهد بود. این در حالی است که در این نقاط امواج پراشیده می‌شوند (سلیمانی، ۱۳۸۸). بر طبق تئوری پرتو وضعیت شیب‌های متداخل در صورتی رخ می‌دهد که چندین پرتو در آشکار سازی یک نمونه ZO مشارکت داشته باشند. بیشتر مواقع در جوانب گنبد‌های نمکی یا تاقدیس‌ها که منتهی به لاشه زیرین این ساختارها می‌باشند و همچنین برخورد صفحه گسلی با لاشه‌های اطرافش، مسئله‌ی شیب‌های متداخل مطرح می‌شود.

ابهام در تصویرسازی شیب‌های متداخل از دیر باز دغدغه بسیاری از ژئوفیزیکدان‌ها بوده است.

دوهرتی<sup>۱</sup> (۱۹۷۵) برای اولین بار معادلات برونيابی موج را در دورافت‌های غیر صفر برای حل این مسئله مطرح کرد و ايلماز و كلاربوت<sup>۲</sup> (۱۹۸۰) روش کوچ جزئی قبل از برانبارش<sup>۳</sup> را برای غلبه بر مسئله‌ی شيب‌های متداخل پیشنهاد کردند. آنها دریافتند که تصحیح DMO در حقیقت فرآیند کوچ جزئی است که بر داده‌های تصحیح شده برونزاند در دورافت مشترک اعمال می‌شود. هیل<sup>۴</sup> (۱۹۸۴) روش DMO را در حوزه f-k فرمولبندی کرد. این روش در سرعت‌های ثابت دقیق است و می‌تواند برای تمام شيب‌ها و دورافت‌ها بکار رود و در صورتی که گرادیان سرعت قائم هموار باشد از دقت قابل قبولی برخوردار است. مَن (۲۰۰۱) راه حل دیگری را در روش برانبارش CRS که تا حدودی در حل این مشکل موثر بود معرفی کرد. اخیراً روش جدیدی به نام برانبارش سطح پراش مشترک<sup>۵</sup> که در واقع روش اصلاح شده‌ی برانبارش CRS است، توسط سليماني (۲۰۰۹) ارائه شد. این روش تا حد زیادی توانسته است مسئله‌ی متداخل شيب‌ها را حل کند.

در این فصل به بررسی مسئله متداخل شيب‌ها و نحوه‌ی رفتار روش‌های برانبارش DMO و CRS و CDS در اينگونه موارد پرداخته می‌شود. سپس شرح مختصري از روش برانبارش سطح پراش مشترک و نحوه‌ی عملکرد اين عملگر در مواجه با شيب‌های متداخل توضیح داده می‌شود و در فصل بعدی روش برانبارش سطح پراش مشترک با دور افت محدود<sup>۶</sup> بمنظور کارايی بيشتر در مواجه با شيب‌های متداخل و بهبود تصوير سازی در آن معرفی می‌شود. نتایج مربوط به اعمال اين عملگرها بروی داده‌های لرزه‌ای واقعی با ساختار نيمه پيچيده، در انتهای اين فصل آورده شده است.

## ۲-۴ مسئله شيب‌های متداخل

بررسی شيب‌های متداخل در شبیه‌سازی مقطع دور افت صفر بسیار با اهمیت است زیرا کمبود انرژی همدوسي در امتداد وقایع بازتابی ممکن است باعث ایجاد ناحیه سایه (shadow zones) در نتایج کوچ شود.

---

<sup>1</sup>Doherty

<sup>2</sup>Claerbout

<sup>3</sup>Prestack partial migration (PSPM)

<sup>4</sup>Hale

<sup>5</sup>Common Diffraction Surface(CDS) stack

<sup>6</sup>Finite-Offset CDS stack

با توجه به رابطه‌ی (۳-۲) می‌توان دریافت سرعت برانبارش وابسته به شیب لایه است و به عبارت دیگر در اینگونه موارد سرعت برانبارش باید بزرگتر از سرعت لایه رویی در نظر گرفته شود. در صورت مواجه با تغییرات جانبی سرعت بطور مثال برخورد صفحه‌ی گسلی با لایه‌های افقی اطرافش، چالش واقعی برای پردازشگر آغاز می‌شود زیرا باید تصمیم بگیرد که کدام یک از رخدادها باید پردازش شود. با انتخاب یکی از این رخدادها در فرآیند آنالیز سرعت ناگزیر یکی از بازتاب‌ها نادیده گرفته می‌شود. در این صورت در مقاطع برانبارش یکی از رخدادها با کیفیت مناسب و شیب متداخل دیگر ضعیف برانبارش می‌شود. در نتیجه فرآیند تصویر سازی بطور ناقص صورت می‌گیرد. در این صورت در نواحی که تغییرات جانبی شدید سرعت وجود دارد DMO قادر به حل مسئله تداخل شیب‌ها نخواهد بود (بنکرافت<sup>۱</sup>، ۱۹۹۸).

در تقریب برانبارش CRS برای هر نمونه ZO شبیه‌سازی شده تنها یک عملگر برانبارش در نظر گرفته می‌شود. در این روش وقایع بازتابی به صورت موضعی، پارامتری می‌شوند. بازتاب‌هایی که متقاطع هستند، فقط یک شیب، ترجیحاً بازتابی که همدوسی بالاتری داشته باشد در جستجوی پارامترهای برانبارش در نظر گرفته می‌شود. برای تخمین این قبیل موارد باید رویه دیگری در جستجوی پارامترهای CRS در نظر گرفته شود. بر طبق معادله (۳-۲۳) سرعت برانبارش،  $V_{NMO}$ ، حساسیت زیادی نسبت به زاویه‌ی ورودی  $\alpha$  ندارد. بنابراین انتکای زیادی به گام اول، در فرآیند جستجوی پارامترهای CRS نمی‌توان داشت. به عبارت دیگر در برانبارش خودکار CMP رخدادهای بازتابی با توجه به زاویه ورودشان تفکیک می‌شوند زیرا سرعت‌های متناظر آنها ممکن است مشابه یا حتی معادل هم باشند (شاهسونی، ۱۳۹۰). فرآیند برانبارش CRS اساساً شامل اندازه‌گیری میزان همدوسی داده‌های دارای همپوشانی در امتداد همه‌ی عملگرهایی است که برای هر دسته نشانگرهای سه گانه در یک محدوده‌ی معین، تعیین می‌شوند. معمولاً تمامی وقایع بازتابی در مراحل جستجوی پارامترهای برانبارش شرکت نمی‌کنند از این‌رو نتایج مقاطع برانبارش و نشانگرهای برانبارش ناقص هستند و نماینده تمامی داده‌های دارای همپوشانی نمی‌باشد. در بدترین حالت تنها رخداد بازتابی غالب، پارامتری و برای شبیه‌سازی نمونه ZO در مقاطع برانبارش استفاده می‌شود. نمای شماتیک ساده

---

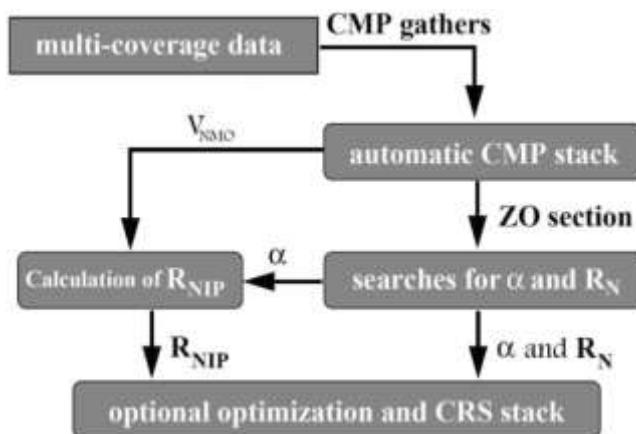
<sup>۱</sup>Bancroft

شدهی مراحل جستجو در برانبارش CRS در شکل (۴-۱) نشان داده شده است.

### ۴-۳ راهبرد توسعه یافته برانبارش CRS

من (۲۰۰۱) توانست با اضافه کردن مرحله‌ی جدیدی در فرآیند جستجوی پارامترهای برانبارش و با معرفی روش توسعه یافته CRS مسئله‌ی شبیه‌سازی مقطع ZO کافی نبوده، پیشنهاد کرد چنین شرایطی استفاده از تنها یک عملگر برانبارش برای شبیه‌سازی مقطع ZO کافی نبوده، پیشنهاد کرد که برای هر رخداد بازتابی که در یک نقطه تلاقی دارند عملگرهای جداگانه‌ای تعیین شود. بنابراین برای یک نقطه از محدوده‌ی شبیه‌های متداخل بیش از یک دسته پارامتر ( $R_N, R_{NIP}, \alpha$ ) حاصل می‌شود. در این صورت برانبارش نهایی با بیش از یک سطح برانبارش را می‌توان مانند انطباق تمامی این صفات برای یک نمونه در مقطع برانبارش در نظر گرفت.

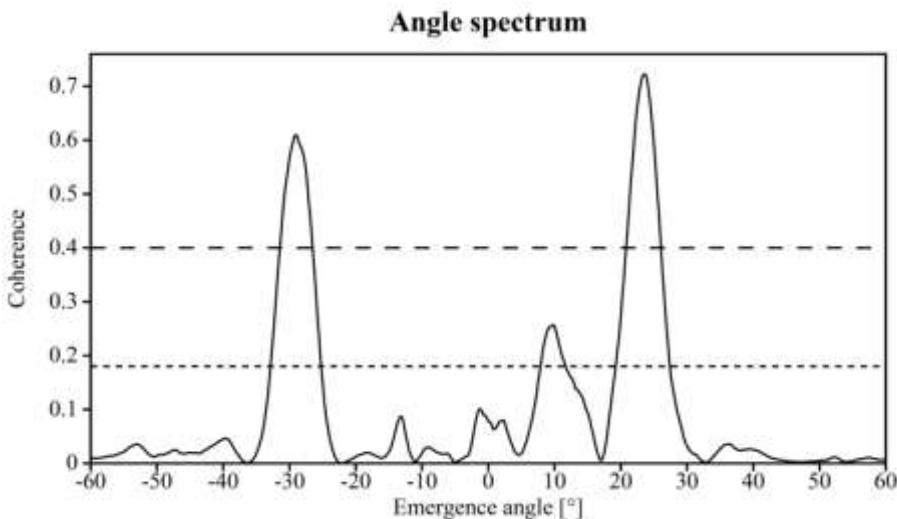
در روش توسعه یافته من (۲۰۰۱) مسئله‌ی مهم تعیین نمونه‌هایی است که در آنها تداخل شبیه رخداده است. برای این منظور طیف زاویه‌ای که بعنوانتابع همدوسی زاویه ورودی در امتداد عملگر خطی مقطع برانبارش CMP است، باید محاسبه شود.



شکل (۴-۱): نمای شماتیک مراحل جستجو در برانبارش CRS (مولر، ۱۹۹۸).

شکل (۴-۲) نشان دهنده طیف زاویه مربوط به یک نمونه ZO در یک رخداد واقعی است. سه نقطه‌ی ماقزیم بارز در شکل (۴-۲) دیده می‌شود که دو نقطه در ارتباط با رخداد پراش و ماقزیم سوم متعلق

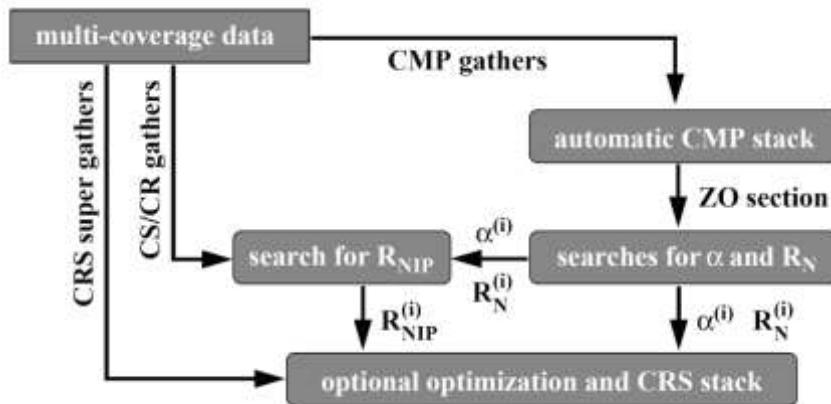
به یک رخداد بازتابی می‌باشد که در یک موقعیت نمونه ZO مقطع هستند. در این مثال ماکریمم‌های موضعی دیگری هم مشاهده می‌شود که به نظر می‌رسد متعلق به هیچ رویداد آشکاری نمی‌باشند.



شکل ۲-۴ : طیف زاویه که به عنوان تابعی از زاویه ورود  $\alpha$  در امتداد یک علمگر خطی در مقطع برانبارش CMP برای یک نمونه ZO معین محاسبه شده است. خطوط نقطه چین بزرگ، مقدار حد آستانه مطلق برای تعیین ماکریمم کلی و خطوط نقطه چین کوتاه، حد آستانه محلی را برای تعیین ماکریمم محلی نشان می‌دهد. زوایای  $-30^\circ$  و  $25^\circ$  مربوط به دو رویداد پراش و زاویه  $12^\circ$  مربوط به یک رخداد بازتابی ضعیف می‌باشد (من، ۲۰۰۲).

بعد از مشخص کردن نمونه‌ای که مسئله شبکهای متداخل در آن وجود دارد، جستجوی خطی برای هر زاویه ورود مجازی  $\alpha^{(i)}$  (نمایش دهنده رخدادهای متفاوت است) که در مرحله قبل تعیین شده اند صورت می‌گیرد. پس از آن، جستجوی هذلولی ZO بار دیگر به صورت جداگانه برای هر رویداد تعیین شده انجام و شعاع انحنای  $R_N^{(i)}$  برای هر شبکه دخیل در یک نمونه ZO محاسبه می‌شود. در روند جستجوی پارامترهای CRS،  $R_{NIP}$  بوسیله رابطه‌ی بین  $V_{NMO}$ ، که در گام اول تعیین می‌شود و زاویه ورود  $\alpha$  بدست می‌آید. به هر حال محاسبه‌ی  $R_{NIP}$  بواسطه‌ی  $\alpha$  و  $V_{NMO}$  طبق معادله‌ی (۳-۲۳) مناسب نیست زیرا بطور کلی بیش از یک زاویه ورود شناسایی می‌شود و تنها یک سرعت برانبارش در نظر گرفته می‌شود. با توجه به عملگر برانبارش معادله‌ی (۳-۱۹)  $R_{NIP}$  تاثیری بر مقطع ZO ندارد و نمی‌توان آن را در یک ورداشت نقطه میانی مشترک مستقل از  $\alpha$  در نظر گرفت. بنابراین  $R_{NIP}$  را نمی‌توان در مقطع برانبارش CMP یا در ورداشت نقطه میانی مشترک اولیه تعیین کرد. من (۲۰۰۱) برای حل این مشکل پیشنهاد کرد که جستجوی دیگری برای

در دسته مجموعه داده‌های دارای همپوشانی دیگر، برای مثال ورداشت‌های چشم مشترک یا گیرنده  $R_{NIP}$  مشترک که در آنها  $(x_m - x_0)^2 \approx h^2$  است، به مراحل قبل اضافه شود. در نتیجه در این مرحله‌ی الحقیقی برای هر زاویه  $\alpha^{(i)}$  و هر  $R_N$ ، یک جستجو برای تعیین  $R_{NIP}^{(i)}$  متناظر با آنها صورت می‌گیرد. شکل (۴-۴) نمای شماتیک برانبارش CRS توسعه‌یافته را نشان می‌دهد.



شکل ۴-۳: نمای شماتیک ساده مراحل جستجو در روش برانبارش توسعه‌یافته‌ی CRS (من، ۲۰۰۱).

نکته‌ی قابل توجه در اینجا این است که اگر بازه جستجویی که توسط کاربر تعیین می‌شود خیلی کوچک باشد رویدادهای ساختگی زیادی به عنوان رخداد بازتابی تلقی می‌شود و زمان پردازش نیز افزایش می‌یابد. در مقابل اگر بازه جستجو خیلی بزرگ در نظر گرفته شود رخدادهای بازتابی ضعیفت تراز دست خواهد رفت. در عمل بازه جستجو را طوری باید تعیین کرد که بین دو مسئله‌ی بالا تعادلی برقرار شود. مشکل اصلی در این تقریب تشخیص موقعیت‌هایی است که درگیر شیب‌های متداخل هستند و اینکه چه تعداد از این شیب‌ها باید در نظر گرفته شود.

#### ۴-۴ برانبارش سطح پراش مشترک (CDS)

برای تعیین مقطع برانبارشی که شامل تمامی رخدادهای متقطع باشد، سلیمانی (۱۳۸۸) پیشنهاد کرد که استراتژی معمول CRS را با استفاده از ادغام مفهوم تصحیح DMO (هیل، ۱۹۹۱) و تقریب CRS تطبیق داده شود. در این صورت بجای تنها یک عملگر برانبارش برای هر نمونه، محدوده‌ی پیوسته‌ای از شیب‌ها

برای هر نمونه در نظر گرفته می‌شود.

## ۱-۴-۴ عملگر DMO

کوچ در دورافت صفر<sup>۱</sup> را می‌توان به دو مرحله‌ی تصحیح NMO و تصحیح DMO تقسیم کرد. تصحیح NMO اثر دورافت در بازتابنده‌های افقی و تصحیح DMO بروونراند ناشی از شیب بازتابنده‌ها را حذف می‌کند. در راهبرد معمول CRS یک زاویه و در راهبرد توسعه‌یافته‌ی مَن (۲۰۰۲) نیز تنها تعداد معدودی از زوایای ممکن برای شبیه‌سازی یک نمونه ZO، به عنوان زاویه بهینه ورودی در نظر گرفته می‌شود. با این حال به دلیل اینکه معیار قابل اطمینانی در تعیین این زوایای ورودی بهینه برای هر موقعیت ZO وجود ندارد، این طرح ریزی‌ها در مواجه با ساختارهای پیچیده قادر به حفظ پیوستگی بازتاب‌ها نخواهد بود. برای مقابله با اشکالات موجود در راهبردهای قبلی سلیمانی (۱۳۸۸) از ایده‌ی عملگر DMO بهره گرفت.

در گوسکی<sup>۲</sup> و روشا<sup>۳</sup> (۱۹۸۱) پاسخ ضربه<sup>۴</sup> عملگر DMO را در حوزه زمان توصیف کردند. در محیط دو بعدی همگن پاسخ ضربه برای دورافت‌های صفر به صورت نیم دایره و برای دورافت‌های غیر صفر بیضی می‌باشد. هر نقطه روی عملگر DMO متناظر با یک شیب بخصوص در روی بازتابنده است. به عبارت دیگر تمامی شیب‌های روی نیم دایره ( $h=0$ ) یا بیضی ( $h \neq 0$ ) عملگر DMO را تشکیل می‌دهند. در شکل (۷-۴) تصویر موج‌های هویگنس متفاوت DMO برای دورافت‌های مختلف نشان داده شده است. یکی از این تصاویر موج در دورافت ثابت ۲۰۰ متر برای اعمال فرآیند DMO در نظر گرفته شده است. نتیجه اعمال فرآیند DMO بر روی تصویر جبهه موج در شکل (۴-۵) با استفاده از منحنی آبی رنگ در دورافت ثابت ( $h=200$ ) ترسیم شده است. این شکل نشان می‌دهد که عملگر DMO بروونراند جانبی را برای هر شیب روی بازتابنده فراهم می‌کند. از آنجایکه این عملگر همه‌ی بازتابنده‌های دارای شیب‌های متفاوت را در نظر می‌گیرد، فرآیند DMO قادر است مسئله تداخل شیب‌ها را حل کند (مَن، ۱۹۹۷). البته این در شرایطی است

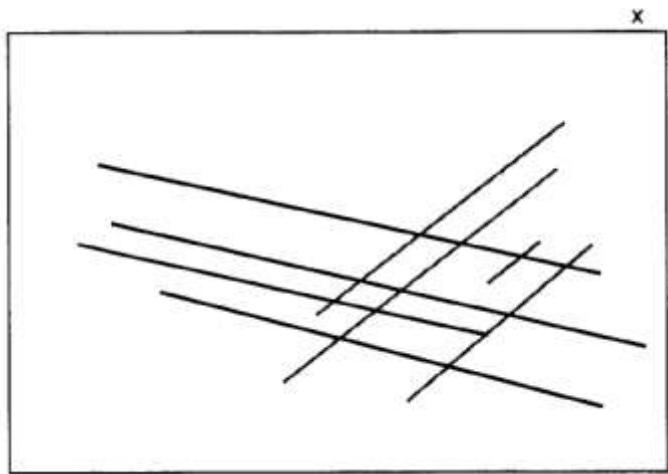
<sup>1</sup>Migration to Zero-Offset (MZO)

<sup>2</sup>Deregowski

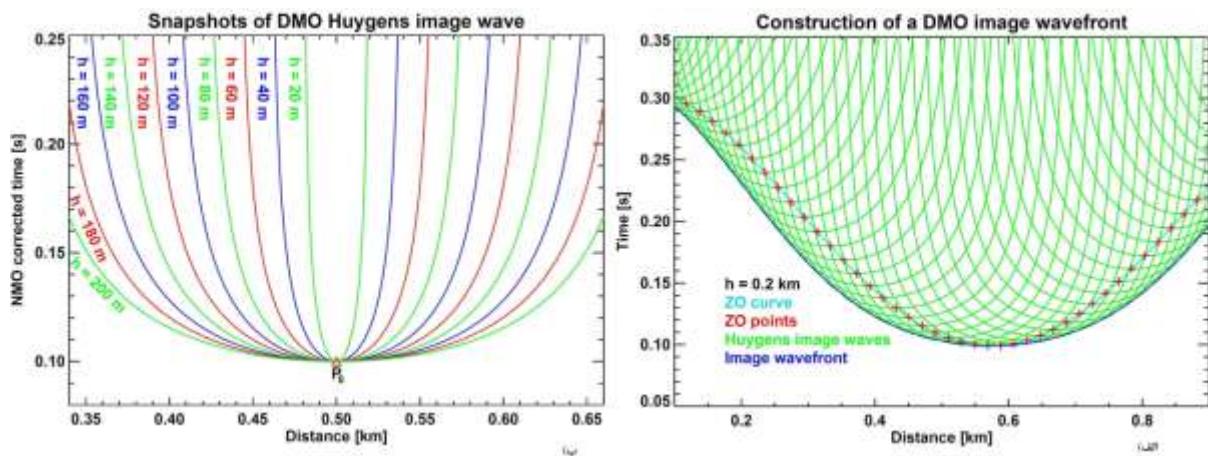
<sup>3</sup>Rocca

<sup>4</sup>Impulse response

که محیط‌همگن یا تغییرات جانبی سرعت محیط ناچیز در نظر گرفته شود.



شکل ۴-۴: نمایش برخورد شیب‌های متداخل در مقطع برانبارش(بنکرافت، ۱۹۹۸).



شکل ۴-۵ : (الف) ترکیب تصویر جبهه موج در مسئله معکوس DMO در دورافت ثابت ( $h=200m$ ). (ب) تصویر لحظه‌ای موج هویگنس DMO در دورافتهای مختلف. (من، ۱۹۹۷).

## ۲-۴-۴ مفهوم تقریب برانبارش CDS

در راهبرد معمول CRS، تنها زوایای ورود رخدادهای بازتابی اصلی که دارای بیشترین میزان همدوسی هستند به عنوان نشانگر بهینه در نظر گرفته می‌شوند. بنابراین مساله تداخل شیب‌ها از لحاظ تئوری معادل وجود زوایای ورود متفاوت است که میزان همدوسی بالایی را نشان می‌دهند (سلیمانی، ۱۳۸۸). در روش برانبارش CDS به دلیل مشکلات موجود در راهبردهای قبلی در مواجه با شیب‌های متداخل از ایده‌ی مشابهی نظریه تصحیح برووناند شیب استفاده می‌شود. در این روش بجای بهره گرفتن از چند زاویه‌ی محدود

برای هر نمونه ZO (شکل ۴-۲) از تمامی زوایای ممکن ساطع شده از یک نقطه‌ی پراش بدون در نظر گرفتن میزان همدوسی آنها بهره گرفته می‌شود. محدوده‌ی زوایای مورد نظر توسط کاربر به صورت  $\alpha_{\text{m}}$ ،  $\alpha$  تعیین و گام‌هایی برای نمونه برداری از طیف زاویه ( $d\alpha$ ) نیز مشخص می‌شود (انتخاب بازه جستجوی زاویه ورود  $\alpha$  بصورت کیفی بوده و با توجه به پیچیدگی‌های زیرسطحی انتخاب می‌شود). بنابراین تمامی رخدادهای ضعیفی که نسبت سیگنال به نویه در آنها ضعیف است و بازتاب‌هایی که در یک نقطه متقطع هستند به تصویر در خواهند آمد. لازم به ذکر است که در راهبرد جدید به دلیل اینکه طیف گسترده‌ای از زوایای ممکن در نظر گرفته می‌شود، افزایش نویه در مقطع نهایی اجتناب ناپذیر است. بنابراین برروی داده‌های ورودی در این روش شایسته است که پیش پردازش با دقت بیشتری صورت گیرد تا میزان نویه‌ها به حداقل میزان ممکن برسد. در مقطع دورافت صفر، همواره تداخل رخدادهای بازتابی و رخدادهای پراش مشاهده می‌شود (شکل ۴-۴). حل مساله تداخل شیبها با استفاده از این روش، باعث تقویت رخدادهای ضعیف پراش در مقطع برانبارش نهایی خواهد شد. بنابراین چون این راهبرد جدید تمرکز بیشتری بر روی رخدادهای پراش دارد تا رخدادهای بازتابی، لذا می‌توان آن را برانبارش سطح پراش مشترک (CDS) نامید. البته با در نظر گرفتن یک بازه‌ی مناسب برانبارش رخدادهای بازتابی نیز بخوبی آشکار می‌شوند (سلیمانی ۱۳۸۸).

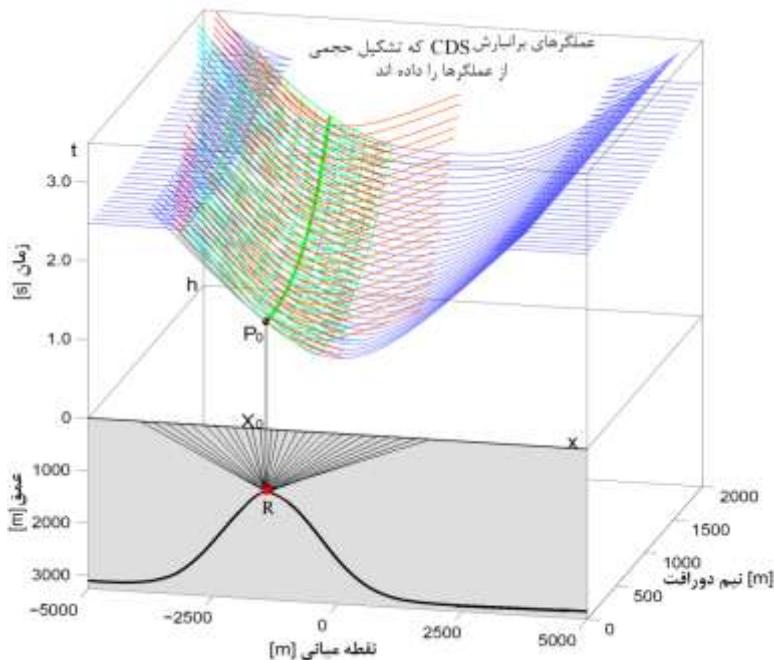
### ۳-۴-۴ عملگر برانبارش CDS

در یک نقطه‌ی پراش در زیر سطح، آزمایش موج NIP و موج نرمال بر هم منطبق خواهند بود در نتیجه مقدار شعاع موج N معادل هم Hستند؛  $R_N \equiv R_{NIP}$ . بنابراین برای رخدادهای پراش معادله زمان‌سیر CRS (۳-۹) به صورت تقریب زمان‌سیر CDS کاهش می‌یابد (سلیمانی، ۱۳۸۸):

$$\tau_{hyp}^2(\Delta m, h) = \left( \tau_0 + \frac{2 \sin \alpha}{v_0} \Delta m \right)^2 + \frac{2 \tau_0 \cos^2 \alpha}{v_0 R_{CDS}} (\Delta m^2 + h^2) \quad (1-4)$$

در رابطه‌ی بالا  $R_{CDS} \equiv R_{NIP} \equiv R_N$ . در واقع طبق اصل هویگنس با در نظر گرفتن چشممه‌های ثانویه بیشمار در کنار هم و تشکیل سطحی از نقاط پراش در روی بازتابنده شرایط آزمایش دوم فراهم می‌شود و

شعاع انحنای نرمال ( $R_N$ ) بدست می‌آید. این در صورتی است که پرتوی NIP به دلیل اینکه هر یک از نقاط پراش یک چشمۀ ثانویه در نظر گرفته می‌شود، در هر یک از این نقاط پراش وجود دارد. در این صورت شعاع انحنای موج NIP و نرمال را می‌توان تقریباً معادل هم و برابر یک شعاع انحنا در نظر گرفت و با نماد  $R_{CDS}$  نشان داد.

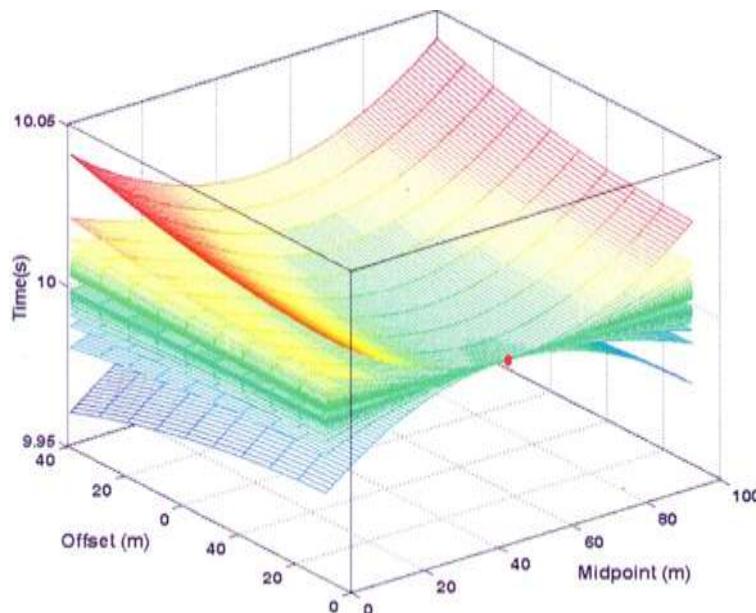


شکل ۶-۴: شکل عملگرهای برانبارش CDS برای تمام زوایای ممکن (سلیمانی ۱۳۸۸).

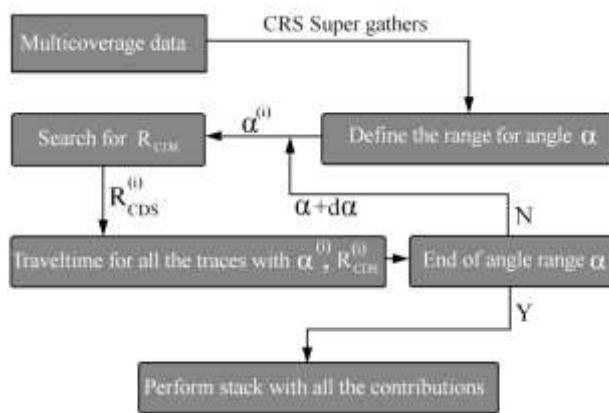
#### ۶-۴-۴ راهبرد جستجوی در برانبارش CDS

تنها نشانگر میدان موج در رابطه‌ی (۱-۴)  $R_{CDS}$  است. همانطوریکه در شکل (۷-۷) نشان داده شده است برای یک زاویه ورودی ثابت  $\alpha^{(i)}$  در محدوده‌ی تعیین شده توسط کاربر جستجو می‌شود و مقدار همدوسی در امتداد تمامی عملگرهایی که بوسیله‌ی  $R_{CDS}^{(i)}$  بدست آمده، محاسبه می‌شود.  $R_{CDS}^{(i)}$  مطلوب مربوط به عملگری است که بیشترین میزان همدوسی را نسبت به سایر عملگرها از خود نشان می‌دهد. این فرآیند برای تمامی زوایای مشخص شده انجام می‌شود. در نتیجه به ازای تمامی زوایای ممکن در معادله‌ی (۱-۴) یک دسته از عملگرهای وزنی، حجمی از سطوح برانبارش را بجای یک سطح برانبارش

برای شبیه‌سازی یک نمونه ZO استفاده می‌کند. این روش می‌تواند رخدادهای ضعیف بازتابی و پراش را که در راهبردهای پیشین به دلیل حضور وقایع با همدوسي بالا نادیده گرفته شده اند بخوبی نمایش دهد. در شکل (۴-۸) نمای ساده شده‌ی طرح ریزی CDS ترسیم شده است.



شکل ۴-۷: برای یک زاویه ورود  $\alpha$  (در این شکل  $R_{CDS} = 0$ ) تعیین شده جستجو می‌شود (شاھسونی، ۱۳۹۰).



شکل ۴-۸ : نمای شماتیک ساده راهبرد جدید توسعه یافته (سلیمانی، ۱۳۸۸).

## محدودیت‌ها

## ۵-۴-۴

نوفه‌های زمینه تاثیر زیادی بر کیفیت مقطع خروجی در فرآیند برانبارش CDS دارند. در این روش به

ازای هر زاویه یک سطح برانبارش وجود دارد که ممکن است مربوط به یک رخداد ساختگی باشد، در نتیجه تقریب برانبارش CRS مقدار نوفدها را در مقایسه با برانبارش CRS در مقطع برانبارش نهایی آشکار تر می‌کند (سلیمانی، ۱۳۸۸).

لازم به ذکر است که تقریب برانبارش CDS کارایی مناسبی در مواجه با ساختارهای پیچیده دارد که این مستلزم صرف زمان پردازش بیشتری نسبت به سایر روش‌ها است. زیرا عملگرهای برانبارش مجزایی باید برای شبیه‌سازی هر نمونه برانبارش تعیین شود. آنالیز همدوسی نیز برای هر کدام از سطوح برانبارش به منظور تعیین  $R_{CDS}$  مورد نظر صورت می‌گیرد که این امر نیز باعث افزایش زمان محاسبات خواهد شد. با گستردگی ترکیب محدوده‌ی زوایا و یا کوچک‌تر کردن گام افزایش زاویه در این محدوده، زمان محاسبه و به تبع آن زمان انجام پردازش افزایش خواهد یافت (سلیمانی، ۱۳۸۸).

#### ۴-۵ اعمال برانبارش CRS بر روی داده‌های واقعی

داده‌های لرزه‌ای با ساختارهای پیچیده و نیمه پیچیده که به روش‌های متداول برداشت و پردازش می‌شوند، اغلب در بخش‌هایی از مقاطع بدست آمده ابهاماتی وجود دارد. تصمیم گیری در این گونه موارد برای مفسران چالش برانگیز خواهد بود. نوع برداشت داده لرزه‌ای و شرایط توپوگرافی در سطح و همچنین نوع ساختارهای زیرسطحی در مجموع عواملی هستند که منجر به کاهش نسبت سیگنال به نوفه و در پی آن تصویرسازی نامطلوب می‌شود. همانطور که قبلاً گفته شد در مواجه با چنین شرایطی دو راهکار وجود دارد اول اینکه روش برداشت داده لرزه‌ای را در این مناطق تغییر داد و داده‌هایی با چینش بالاتری برداشت نمود که این مستلزم صرف وقت و هزینه زیادی است و راهکار دوم استفاده از روش پردازش جدیدی است که در این گونه موارد قادر به تصویرسازی قابل قبولی باشد. به همین منظور در این بخش پردازش به روش‌های سطح بازتاب مشترک و سطح پراش مشترک بر داده لرزه‌ای با ساختارهای نیمه پیچیده در منطقه‌ای از شمال شرق ایران اعمال می‌شود و کارکرد این روش‌ها با روش متداول مقایسه و بررسی می‌شود. لازم به ذکر است که روش‌های برانبارش CRS و CDS یک بار توسط ادبی (۱۳۸۸) بر روی این داده‌ها انجام شده است. در

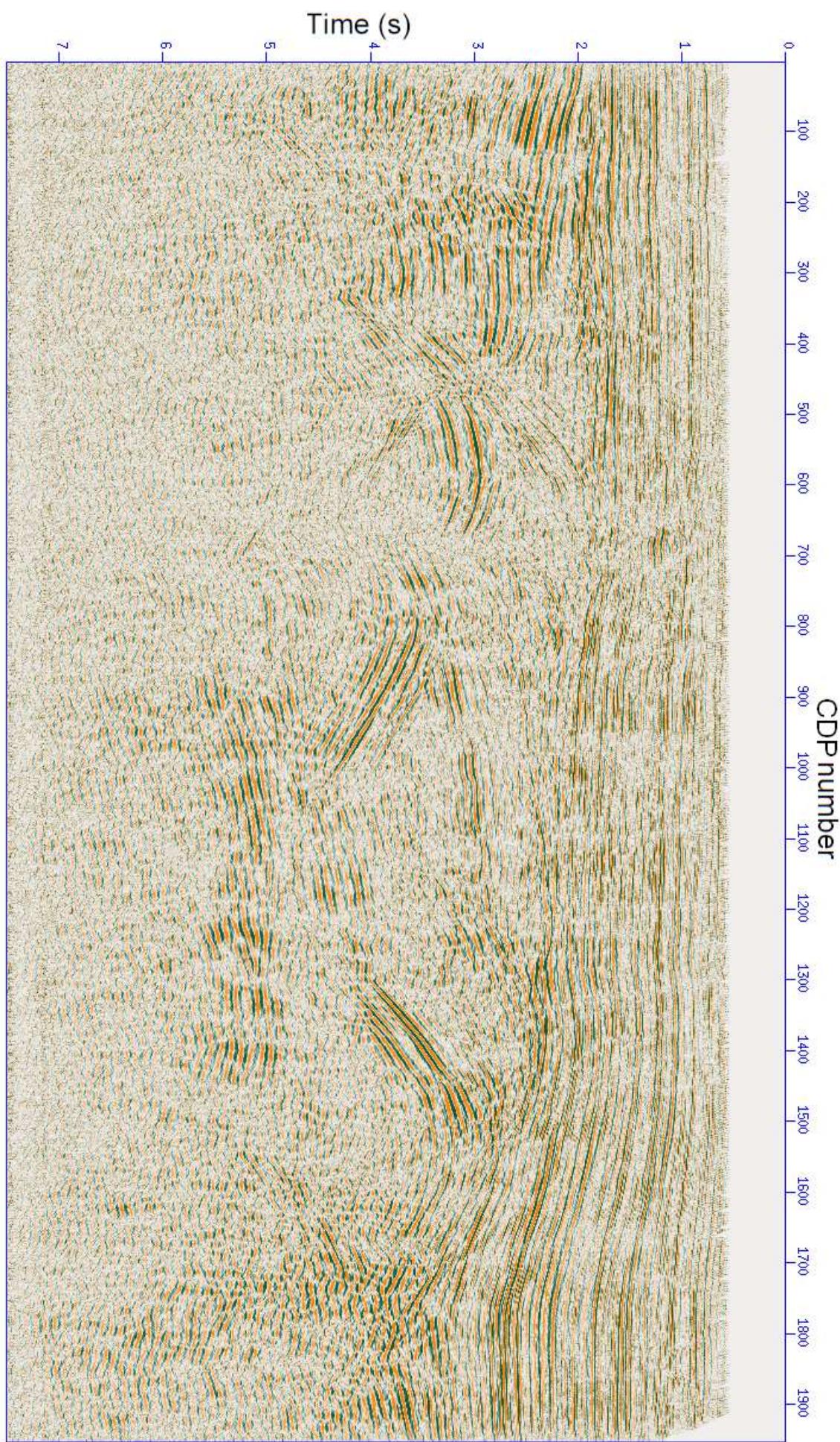
این تحقیق بار دیگر مراحل پردازش در روش‌های فوق به منظور مقایسه با روش برانبارش سطح پراش مشترک با دورافت محدود (FO-CDS) انجام می‌شود.

## ۱-۵-۴ مشخصات برداشت

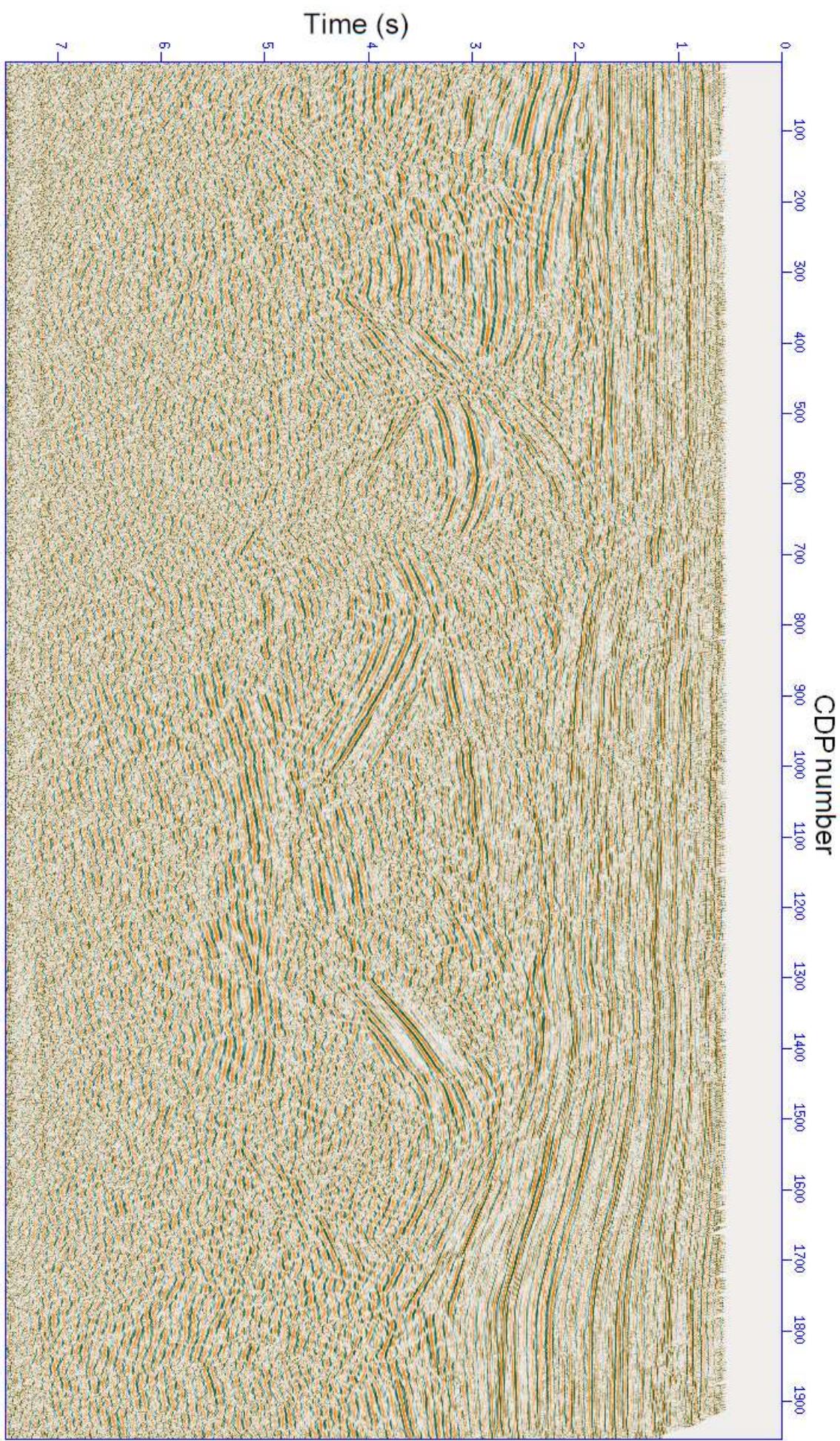
در این قسمت یکی از خطوط برداشت لرزه‌ای که در طی عملیات برداشت داده لرزه‌ای در ناحیه‌ی مرزی شمال شرق ایران صورت گرفته بمنظور پردازش انتخاب شده است. این خط لرزه‌ای در نزدیکی یک گلفشنان برداشت شده و هدف از انجام عملیات لرزه‌ای در این منطقه کشف مخازن گازی بوده است. طول این خط برداشت ۳۵ کیلومتر می‌باشد و ۴۶۵ چشمۀ انفجاری در امتداد این خط وجود داشته که هر چشمۀ انفجاری بوسیله‌ی ۹۶ کانال گیرنده به ثبت رسیده است. کم ترین دورافت ۱۴۰ متر و بیشترین دورافت ۳۴۵۸ متر می‌باشد. فاصله گیرنده‌ها از هم در امتداد خط مذکور ۳۵ متر و فاصله‌ی چشمۀ‌های انفجاری از هم ۷ متر بوده است. ماکریم مقدار چینش در طول خط برداشت با ۱۹۵۲ نقطه میانی مشترک برابر جدول (۱-۴) هندسه برداشت این خط برداشت به اختصار نشان می‌دهد. در طی ویرایش مجدد و بین بندی داده‌ها تعداد گروه‌های لرزه نگاشت نقطه‌ی میانی مشترک به ۲۰۱۰ افزایش یافته است. برانبارش به روش CRS و همچنین روش FO-CDS که در فصل بعدی بدان پرداخته می‌شود بر روی داده‌های ویرایش شده صورت می‌گیرد. شکل (۹-۴) مقطع برانبارش بدست آمده از روش برانبارش CMP بر روی داده‌های واقعی است که برای مقایسه با روش‌های برانبارش CRS و CDS آورده شده است.

جدول ۱-۴ : پارامترهای هندسی برداشت داده، مربوط به داده واقعی

هندسه نقطه میانی و دورافت		هندسه چشمۀ و گیرنده	
۱۹۵۲	CMP	۴۶۵	تعداد چشمۀ‌ها
۲۴	CMP	۷۰	فاصله چشمۀ‌ها
۱۷/۵	CMP	۹۹۷	تعداد گیرنده‌ها
۱۴۰-۳۴۵۸	بازه دورافت	۳۵	فاصله گیرنده‌ها
محتوای فرکانس		پارامترهای ثبت	
۸ تا ۱۰۰ هرتز	فرکانس	۷ ثانیه	زمان ثبت
۲۰ هرتز	فرکانس غالب	۴ میلی ثانیه	فاصله نمونه برداری



شکل ۹-۴ : مقطع برانبارش بدست آمده به روش برانبارش CMP (ادیبی، ۱۳۸۸).



شكل ١٠-٤ : مقطع تقويت شده (AGC) شكل (٩-٤)

## ۲-۵-۴ پردازش به روش CRS

با توجه به معادله‌ی (۳-۱۹) در پردازش به روش CRS ابتدا باید نشانگرهای جنبشی میدان موج (جستجو شوند. با در نظر گرفتن اینکه راهبرد جستجوی این نشانگرهای سه گانه در راهبرد  $(R_{NIP}, R_N, \alpha)$  اولیه بسیار زمان بر و پر هزینه است در این بخش برای جستجوی این سه پارامتر از راهبرد سه جستجوی تک پارامتری (من ۱۰۰۲) استفاده می‌شود. لازم به ذکر است که تعیین پارامترهای مناسب برای جستجوی این نشانگرها از اهمیت زیادی برخوردار می‌باشد. یکی از این پارامترها تعیین بازه CRS است. بطور کلی انتخاب بازه مناسب مستلزم در نظر گرفتن نسبت سیگنال به نویه است. برای تعیین این بازه استفاده از تصویر زون فرنل می‌تواند مفید باشد. اگر بازه تعیین شده نسبت به اندازه تصویر زون فرنل بیش از حد بزرگ باشد ممکن است رخدادهای زیادی از دست بروд و اطلاعات خارج از محدوده‌این زون در نظر گرفته شود. در صورتی که اندازه بازه خیلی کوچک در نظر گرفته شود علاوه بر اینکه زمان پردازش افزایش می‌یابد رخدادهای ساختگی در مقطع برانبارش ایجاد می‌شود (من، ۱۰۰۲). در این صورت می‌توان با توجه به نسبت سیگنال به نویه داده‌ها، بازه CRS را معادل اندازه تصویر زون اول یا دوم فرنل در نظر گرفت. در این بخش برای پردازش داده‌ها بازه ۳۰۰۰ متر انتخاب شده که تقریباً  $1/8$  برابر اندازه اولین تصویر زون فرنل است.

جدول ۲-۴ : پارامترهای مورد استفاده در پردازش CRS برای شبیه سازی مقطع دورافت صفر، مربوط به داده واقعی.

نوع پارامتر	پارامتر پردازش	مقدار
پارامترهای کلی	فرکانس غالب	۲۰ هرتز
	معیار همدوسوی	شباهت
	داده های مورد استفاده در آنالیز همدوسوی	ردلرزهای اصلی
	پهنهای زمانی نوار همدوسوی	۵۶ میلی ثانیه
	سرعت لایهی سطحی	۱۵۰۰ متر بر ثانیه
	سرعت های برانبارش در جستجو	۲۰۰۰ تا ۵۰۰۰ متر بر ثانیه
منطقه هدف	ZO شبیه سازی شده	زمان سیرهای ۰ تا ۷ ثانیه
	فاصله نمونه برداری زمانی در شبیه سازی	۴ میلی ثانیه
	ZO شبیه سازی شده	تعداد ردلرزهای ۲۰۱۰
	ZO در شبیه سازی	فاصله بین ردلرزهای ۱۷/۵ متر
	ZO	حداقل بازه ۱۰۰ متر در ۰/۴ ثانیه
	ZO	حداکثر بازه ۳۰۰۰ متر در ۷ ثانیه
تعیین بازه جستجوی	CMP	حداقل بازه ۱۴۰ متر در ۰/۰ ثانیه
	CMP	حداکثر بازه ۳۴۵۸ متر در ۷ ثانیه
	ابعاد تعمیم بازه	%۳۰
	برانبارش خودکار ZO	اولین افزایش بروونرند برای بزرگترین دورافت ۴ میلی ثانیه
	برانبارش خطی ZO	تعداد مراتب جستجو ۳
	برانبارش هذلولوی ZO	بازه زاویه مورد جستجو -۶۰ تا +۶۰ درجه
برانبارش هذلولوی در CS/CR	مقدار افزایش گام زاویه های مورد جستجو ۱ درجه	۱ درجه
	مراتب تکرار در بهینه کردن جستجو ۳	مراتب تکرار در بهینه کردن جستجو
	اولین بروونرند برای بزرگترین فاصله ZO ۴ میلی ثانیه	اولین بروونرند برای بزرگترین زمان سیر ۰/۰۵
	مراتب تکرار در بهینه کردن جستجو ۳	آستانه همدوسوی برای کمترین زمان سیر ۰/۰۲
	اولین بروونرند نرمال برای بزرگترین دورافت ۴ میلی ثانیه	آستانه همدوسوی برای بزرگترین زمان سیر ۱۰۰
	مراتب تکرار در بهینه کردن جستجو ۳	حداکثر تعداد تکرار در جستجو
بهینه سازی محلی	حداکثر انحراف نسبی برای توقف جستجو ۱۰ <sup>-۴</sup>	۱۰ <sup>-۴</sup>
	تغییرات اولیه در زوایای ورودی ۶ درجه	۶ درجه
	R <sub>NIP</sub> تغییرات اولیه برای ٪۵	٪۵
	R <sub>N</sub> تغییرات اولیه برای تبدیل یافته ۶ درجه	۶ درجه
	R <sub>N</sub> تبدیل شعاع برای ۱۰۰ متر	۱۰۰ متر

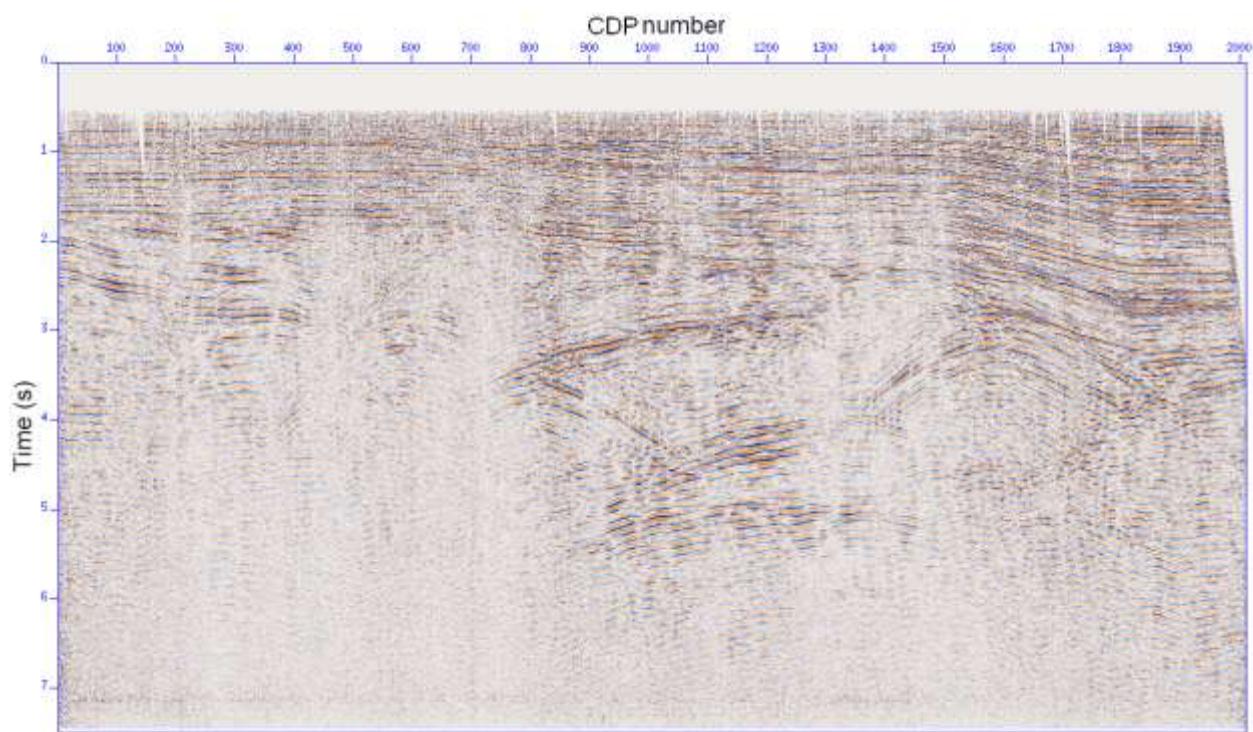
## ۱-۲-۵-۴ بربانبارش خودکار CMP

با تقسیم کردن جستجوی سه پارامتر در مسئله بهینه سازی به صورت جستجوی تک پارامتری (مَن، داده ورودی به دسته‌های معینی محدود می‌شود. در این صورت نشانگرهای ابتدایی که به عنوان اولین تخمین در فرآیند بهینه سازی هستند، بدست می‌آیند. اولین دسته‌ای که جستجو در آن صورت می‌گیرد ورداشت نقطه میانی مشترک با  $\Delta m = 0$  خواهد بود. در نتیجه همانطور که در فصل قبل بیان شد معادله‌ی (۱۹-۳) به معادله‌ی (۲۱-۳) کاهش می‌یابد. رابطه‌ی (۲۱-۳) تداعی کننده‌ی تقریب هذلولی

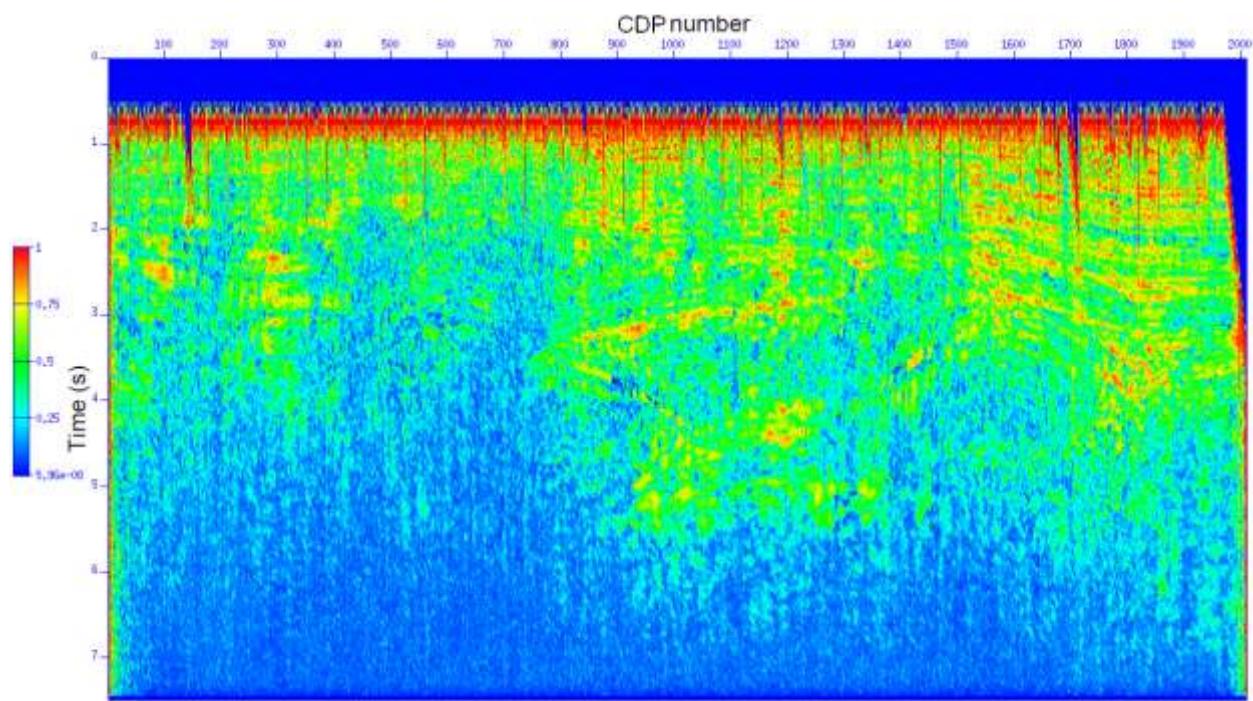
بربانبارش CMP (۱-۳) است. بنابراین سرعت NMO به صورت  $v_{NMO}^2 = \frac{2v_0 R_{NIP}}{\tau_0 \cos^2 \alpha}$  خواهد بود. در این

مرحله برای بدست آوردن سرعت بربانبارش CMP از پارامتر  $q = \frac{\cos^2 \alpha}{R_{NIP}}$  به صورت ترکیبی از نشانگرهای جنبشی میدان موج  $R_{NIP}$  و  $\alpha$  و با توجه به رابطه‌ی  $v_{NMO}^2 = 2v_0^2 / \tau_0 q$  استفاده می‌شود. مقطع مجازی سرعت NMO در شکل (۱۳-۴) نشان داده شده است.

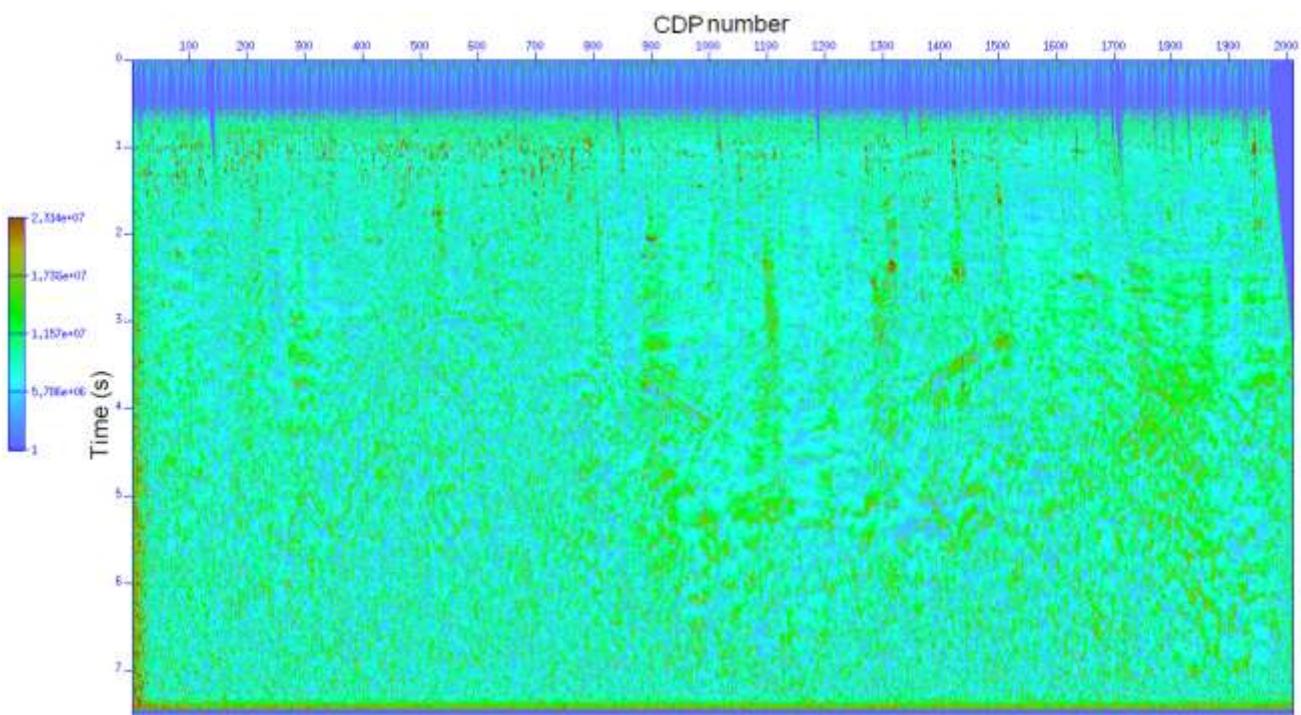
در شبیه‌سازی هر نمونه، یک جستجوی تک پارامتری  $q$  در ورداشت نقطه‌ی میانی مشترک مربوطه انجام می‌شود. این جستجو برای تمامی مقادیر  $q$  در امتداد هذلولی‌هایی که از معادله‌ی (۲۱-۳) بدست می‌آید انجام می‌شود. برای یک زاویه ورود معین از پارامتر  $q$  می‌توان برای بدست آوردن  $R_{NIP}$  بهره گرفت. در این مرحله علاوه بر مقطع سرعت NMO سه مقطع دیگر به نام‌های CMPcoher، CMPtraces و CMPstack ایجاد می‌شود که هر یک به ترتیب نشان دهنده‌ی تعداد ردیفهای شرکت کرده در شبیه‌سازی ZO، مقادیر همدوسی و مقطع شبیه‌سازی شده‌ی CRS است که مقطع اخیر برای گام بعدی بربانبارش مقطع ZO، مقادیر همدوسی و مقطع شبیه‌سازی شده‌ی CRS است. با استفاده از مقطع همدوسی مقادیر بالای همدوسی به عنوان رخدادهای اولیه انتخاب می‌شوند و سایر مقادیر در بربانبارش نادیده گرفته می‌شوند. شکل‌های (۱۱-۴)، (۱۲-۴)، (۱۳-۴) و (۱۴-۴) نشان دهنده‌ی مقاطع حاصل از گام اول هستند.



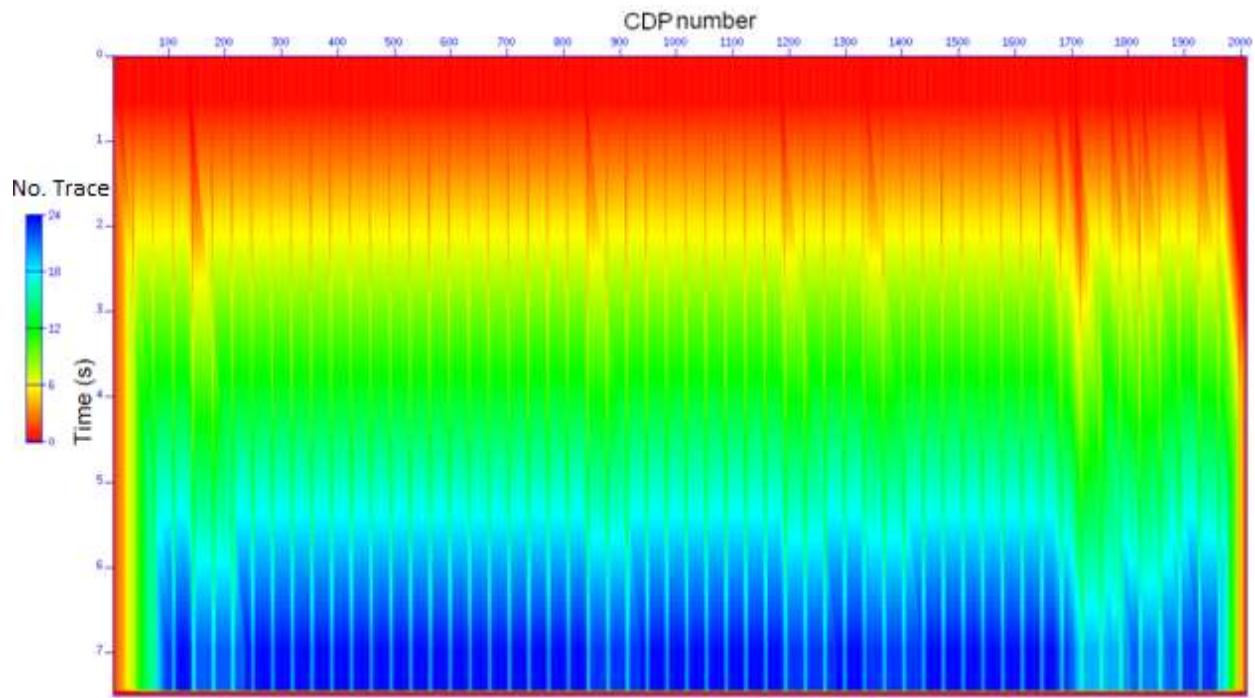
شکل ۱۱-۴: مقطع دورافت صفر حاصل از برآنبارش خودکار CMP در داده‌های واقعی



شکل ۱۲-۴ : مقطع همدوسی در مرحله‌ی برآنبارش اتوماتیک در داده‌های واقعی



شکل ۱۳-۴ : مقطع  $v_{NMO}^2 \frac{m}{s}$  بدست آمده از پارامتر  $q$  در مرحله‌ی اول



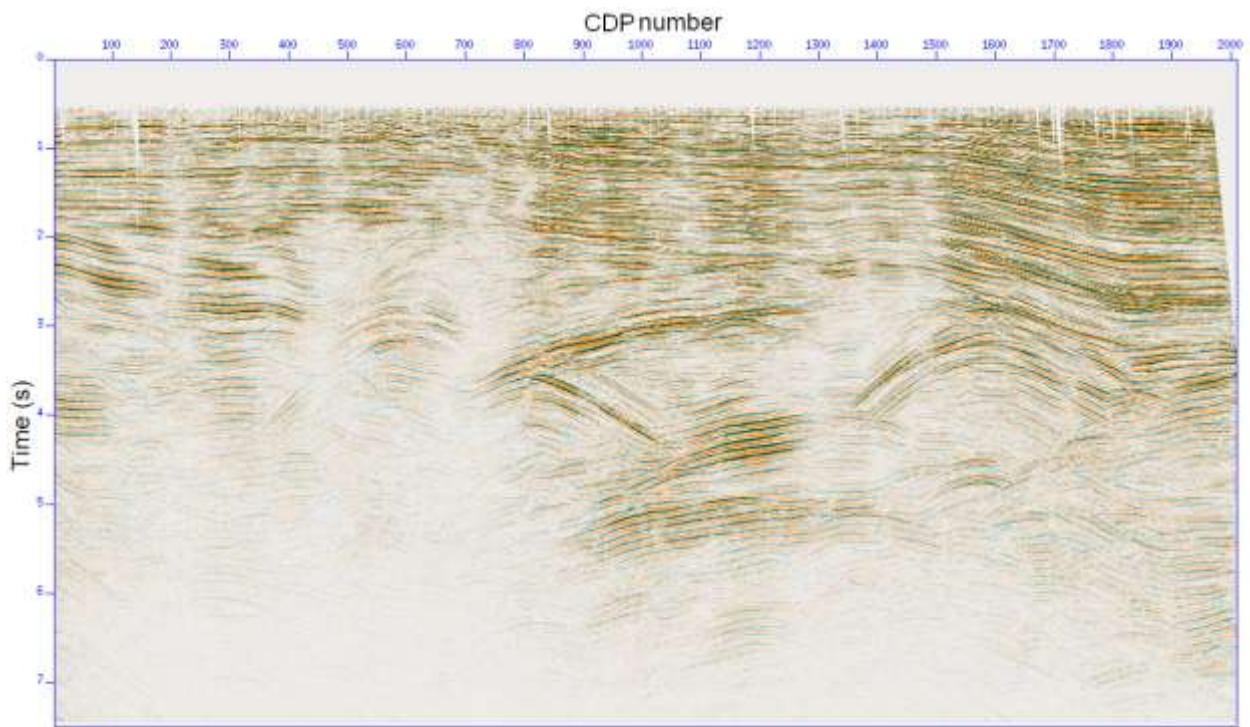
شکل ۱۴-۱: تعداد ردلرزه‌هایی که در برآنبارش مرحله‌ی اول مشارکت داشته‌اند.

در این مرحله با در نظر گرفتن حل تک پارامتری مَن (۲۰۰۲)، از تقاطع عملگر برآنبارش CRS با مقطع شبیه‌سازی شده از مرحله‌ی قبل (مقطع برآنبارش خودکار CMP) یعنی با در نظر گرفتن  $h = 0$  در رابطه‌ی

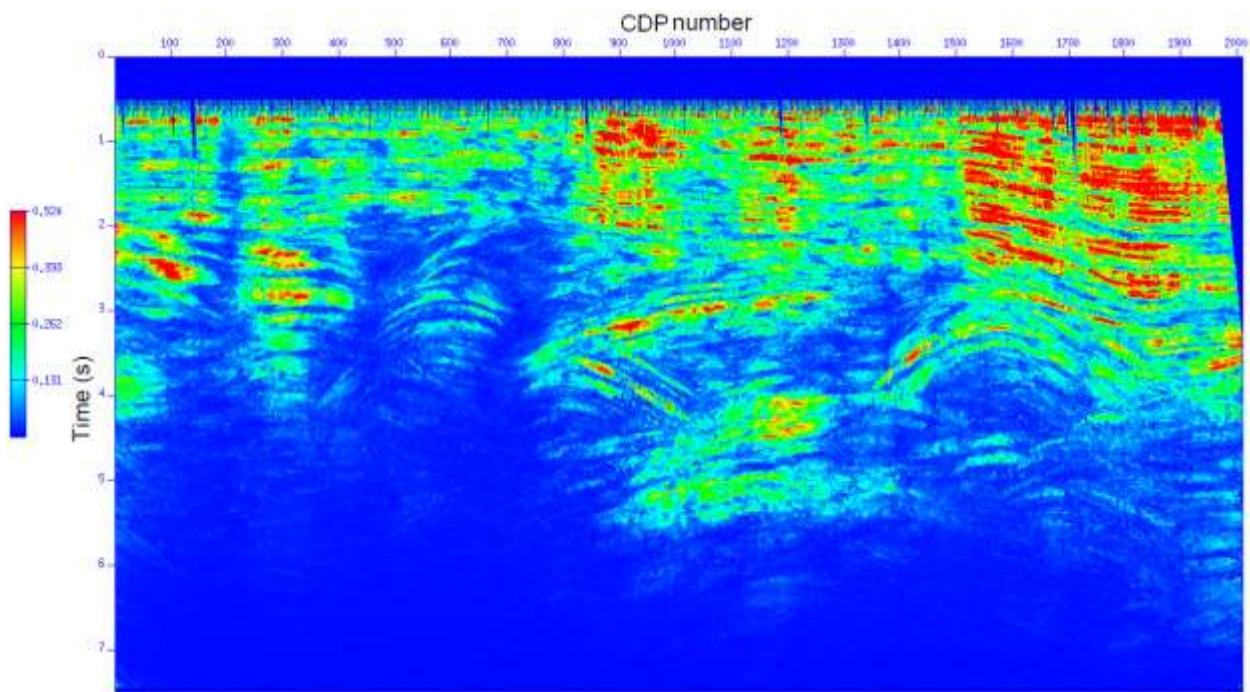
(۱۹-۳) رابطه‌ای بر حسب  $\alpha$  و  $R_N$  حاصل می‌شود. برای اینکه رابطه‌ی بدهست آمده رابطه‌ای تک پارامتری بر حسب  $\alpha$  باشد فرض بر این است که جبهه‌ی موج رسیده به گیرنده‌ها در سطح، تخت خواهد بود. برای این منظور در هر مرحله از محاسبات بازه کوچکی از دورافت صفر در نظر گرفته می‌شود. با در اختیار داشتن زاویه ورود شعاع انحنای  $R_{NIP}$  در این مرحله بدهست خواهد آمد. در نتیجه با دانستن دو نشانگر از سه نشانگر CRS جنبشی میدان موج نشانگر سوم یعنی  $R_N$  با جایگذاری دو نشانگر دیگر در معادله‌ی درجه دوم عملگر (۱۹-۳) و در بازه بزرگ‌تری از مقطع دورافت صفر محاسبه می‌شود. در این صورت هر سه نشانگر اولیه میدان موج بدهست می‌آید. در این مرحله شیب‌های متداخل در نظر گرفته نمی‌شوند زیرا ممکن است رخدادهای متفاوت در ورداشت نقطه‌ی میانی مشترک، برونزاند مشابهی داشته باشند. در نتیجه محاسبه‌ی شعاع انحنای  $R_{NIP}$  با استفاده از سرعت برانبارش و زاویه ورود  $\alpha$  اهمیت چندانی در شرایط شیب‌های متداخل ندارد (مَن، ۲۰۰۲).

#### ۲-۴-۵-۴ برانبارش اولیه CRS

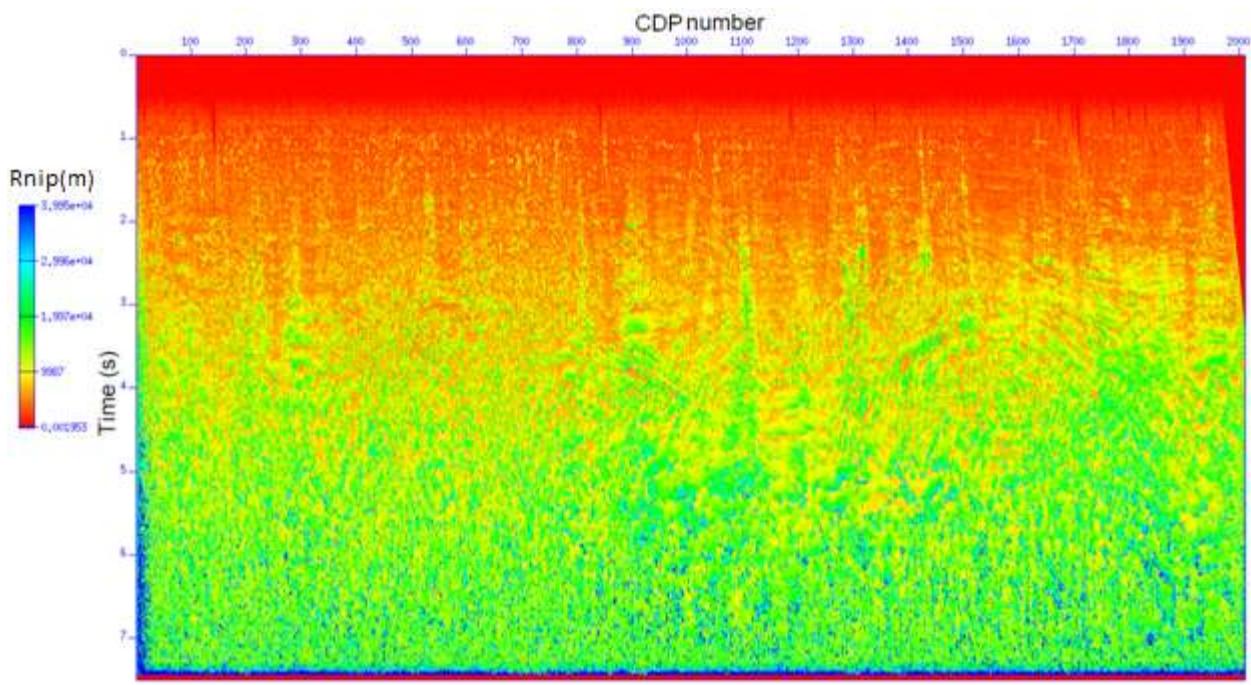
در این مرحله با استفاده از نشانگرهای جنبشی میدان موج اولیه و معادله‌ی عملگر برانبارش دو بُعدی CRS عمل برانبارش بر کل داده‌ها ی لرزه‌ای اعمال می‌شود. این فرآیند، برانبارش اولیه CRS نامیده می‌شود. شکل (۱۵-۴) مقطع برانبارش شده CRS بر اساس نشانگرهای اولیه و شکل (۱۶-۴) مقطع همدوسی مربوط به آن را نشان می‌دهد. مقطع برانبارش شده بدهست آمده، نسبت سیگنال به نوفه بالاتری را نسبت به نتایج برانبارش خودکار نقطه‌ی میانی مشترک از خود نشان می‌دهد. همچنین مقطع همدوسی مربوطه نیز رخدادها را با کیفیت بهتری نسبت به مقطع همدوسی بدهست آمده در مراحل قبلی ارائه می‌دهد. در واقع می‌توان گفت چون در این مرحله از ردیزه‌های بیشتری در هر نمونه شبیه سازی شده دورافت صفر بهره گرفته می‌شود، در نتیجه کیفیت مقاطع بدهست آمده نیز بالاتر خواهد بود. مشخصه‌های اولیه میدان موج در این مرحله در شکل‌های (۱۷-۴) تا (۱۹-۴) نشان داده شده اند. از این مقاطع برای بهینه سازی در مرحله بعد استفاده می‌شود.



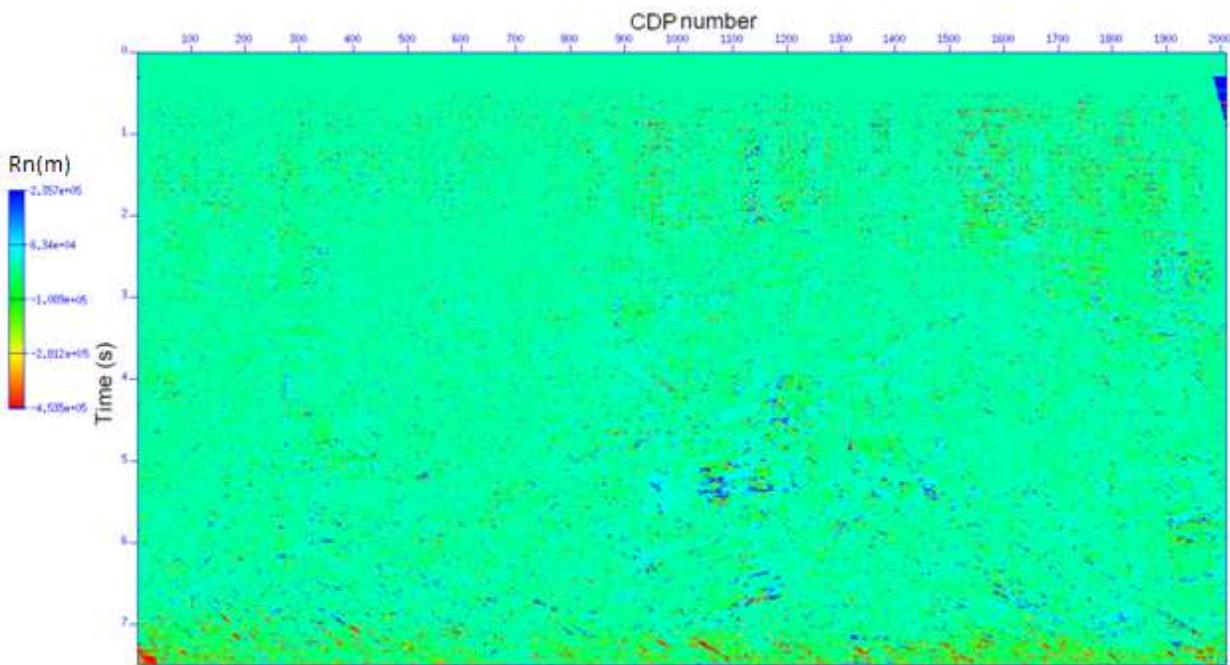
شکل ۱۵-۴ : مقطع برآنبارش ZO بر مبنای نشانگرهای اولیه CRS مربوط به داده‌های واقعی



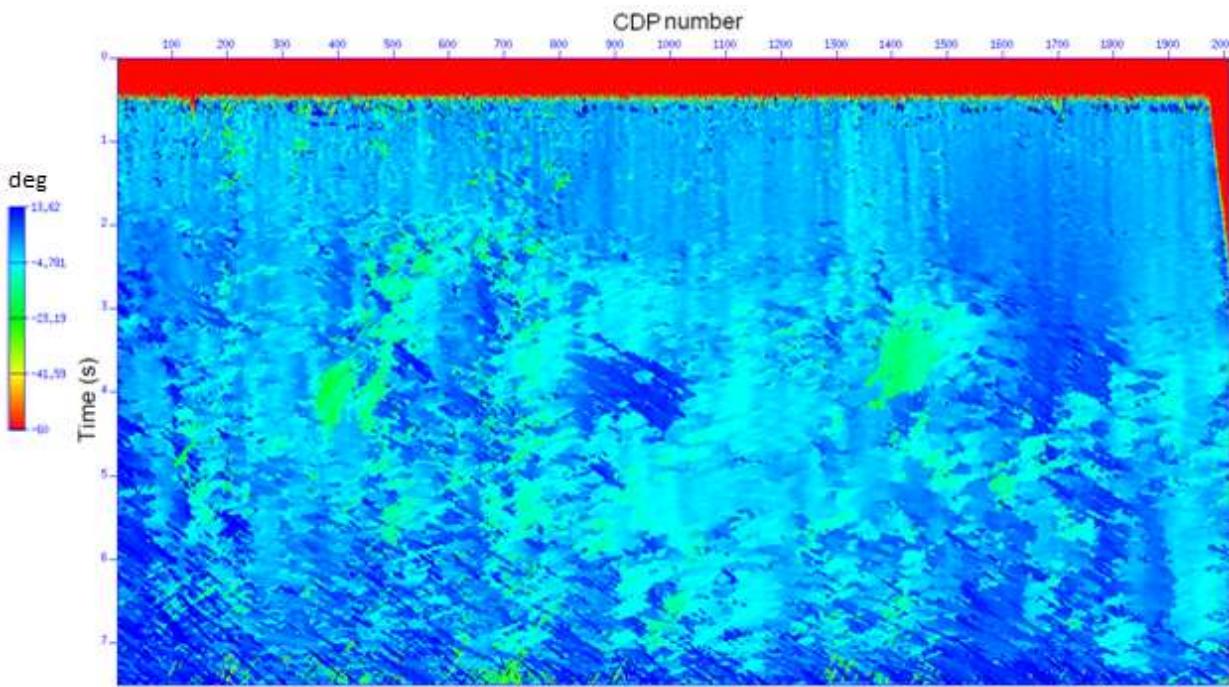
شکل ۱۶-۴ : مقطع همدوسی برآنبارش اولیه ZO مربوط به داده‌های واقعی



شکل ۱۷-۴ : مقطع نشانگر اولیه ( $R_{NIP}$ ) (m) مربوط به داده‌های واقعی



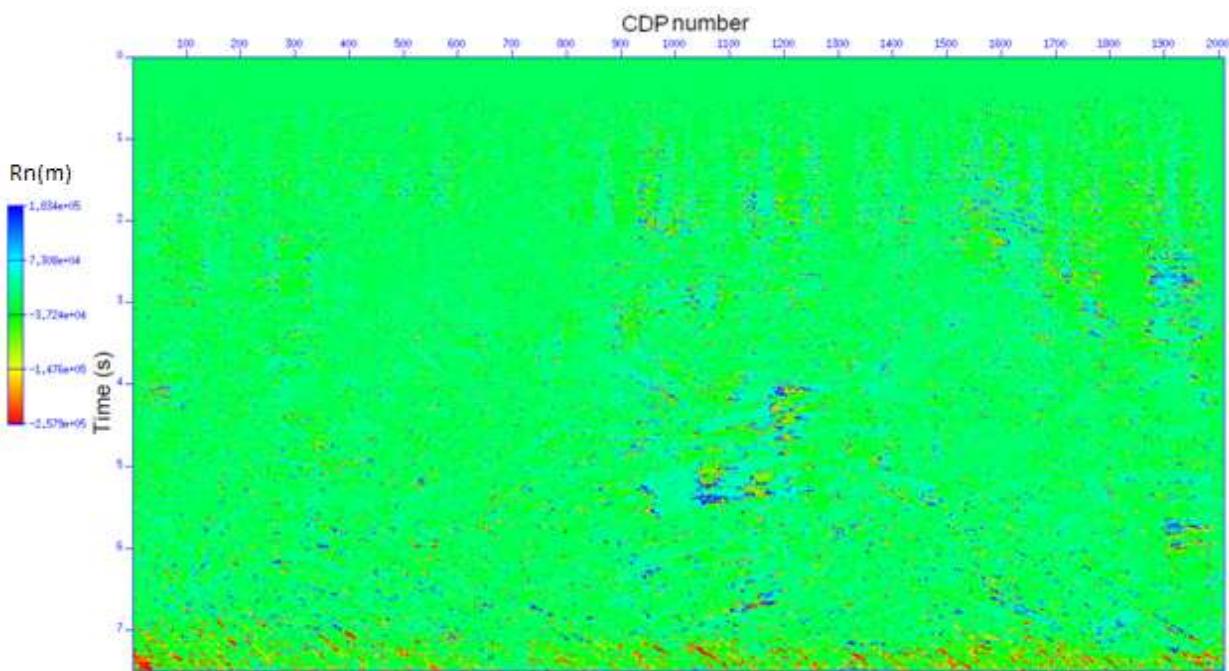
شکل ۱۸-۴ : مقطع نشانگر اولیه ( $R_N$ ) (m) مربوط به داده‌های واقعی



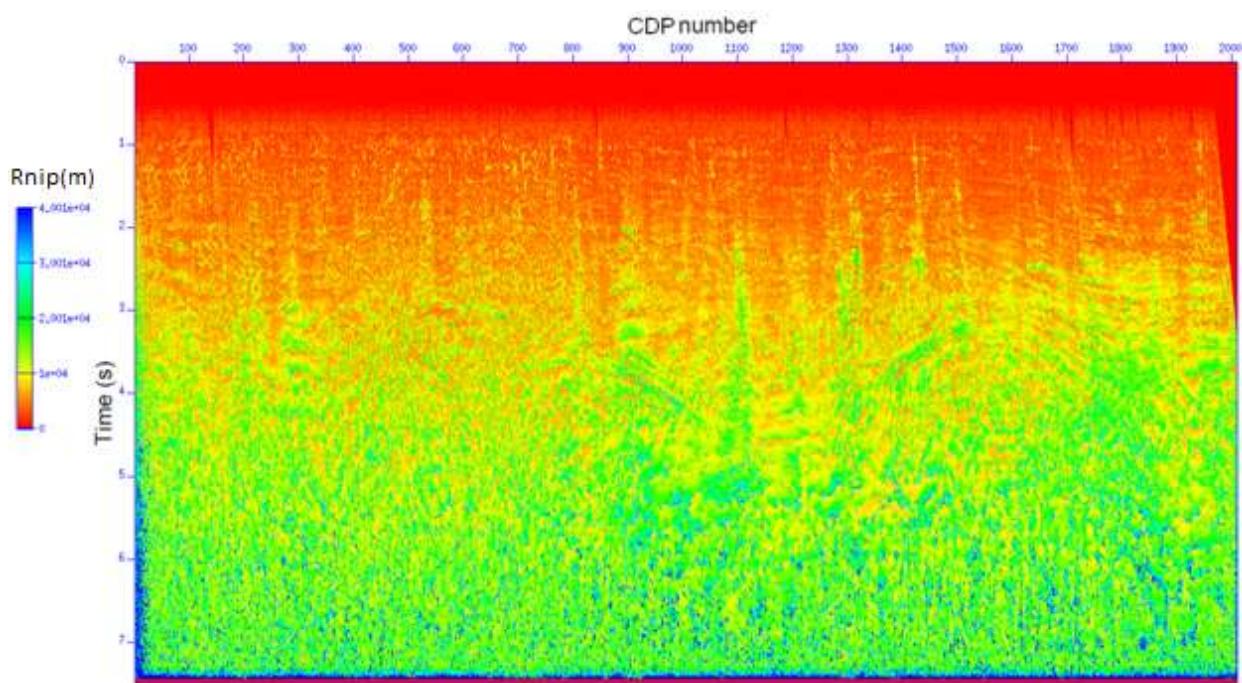
شکل ۱۹-۴ : مقطع نشانگر اولیه زاویه ورود ( $\alpha$ ) مربوط به داده‌های واقعی

### ۳-۲-۵-۴ برانبارش بهینه CRS

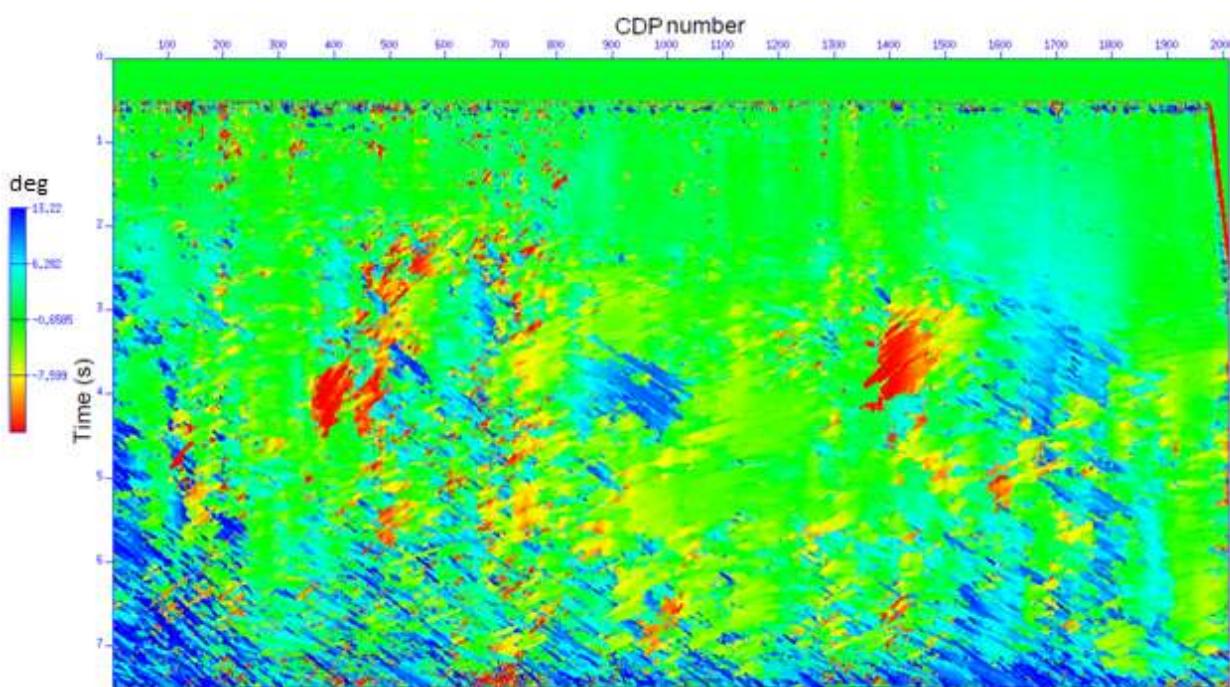
در روش حل معادلات تک پارامتری باید این نکته را مد نظر داشت که جواب‌های بدست آمده از دقت کمتری نسبت به روش حل یک معادله سه پارامتری برخوردار است. با این حال در این روش فرض بر این است که نشانگرهای اولیه تخمین زده شده نزدیک به نشانگرهای اصلی هستند (یگر، ۱۹۹۹). برای برطرف کردن این مسئله می‌توان فرآیند بهینه سازی موضعی را در خصوص این جواب‌ها اعمال کرد تا بقدر کافی به جواب‌های اصلی نزدیک شوند. در این صورت اگر فرض ما درست باشد به همان جواب‌هایی دست خواهیم یافت که حل معادله سه پارامتری به آن می‌رسد (یگر، ۱۹۹۹). برای بهینه سازی از الگوریتم بهینه سازی چندوجهی قابل انعطاف استفاده می‌شود. شکل‌های (۲۰-۴) تا (۲۴-۴) مقاطع بهینه نشانگرها را نشان می‌دهند. در مقایسه با مقاطع بدست آمده در مراحل قبلی، رخدادها از پیوستگی قابل ملاحظه ای برخوردار هستند و نسبت سیگنال به نویه نیز افزایش یافته است.



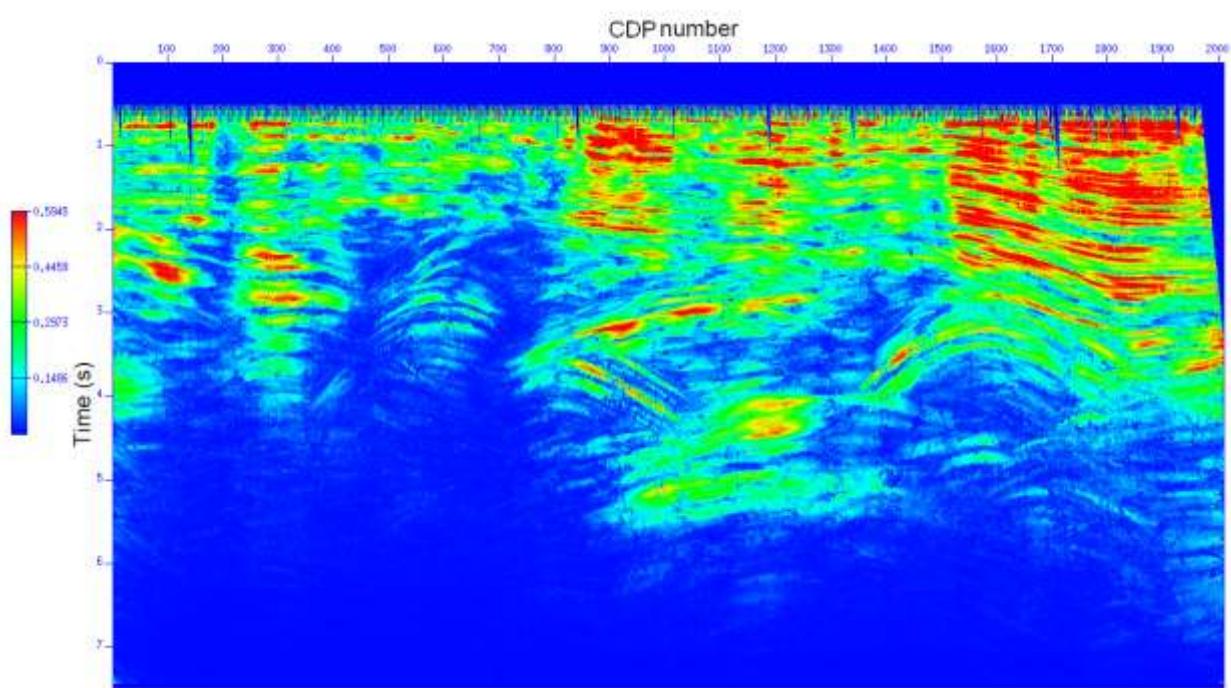
شکل ۲۰-۴ : مقطع بهینه نشانگر ( $R_N$ ) حاصل از پردازش CRS مربوط به داده‌های واقعی



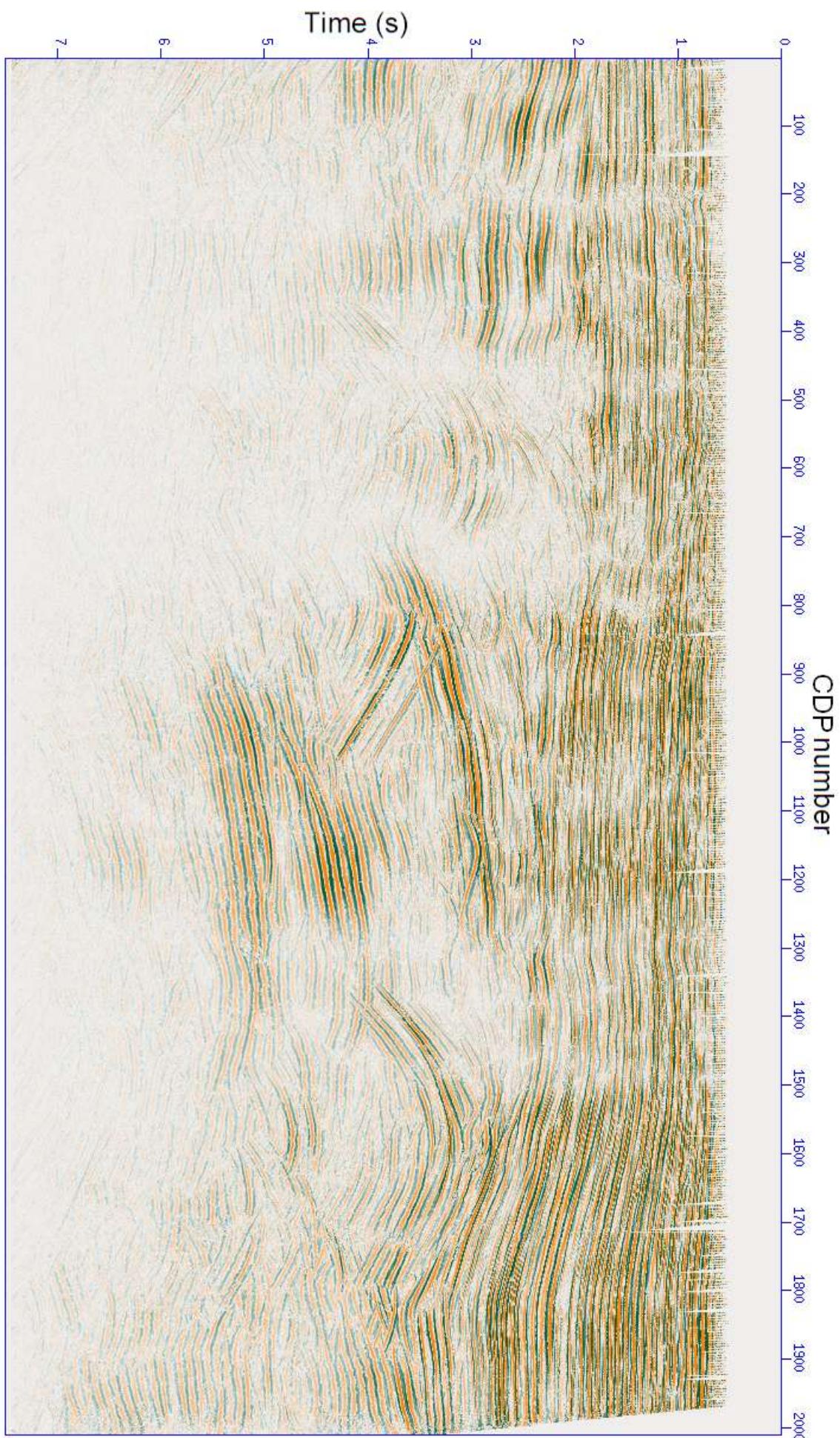
شکل ۲۱-۴ : مقطع نشانگر بهینه ( $R_{NLP}$ ) حاصل از پردازش CRS مربوط به داده‌های واقعی



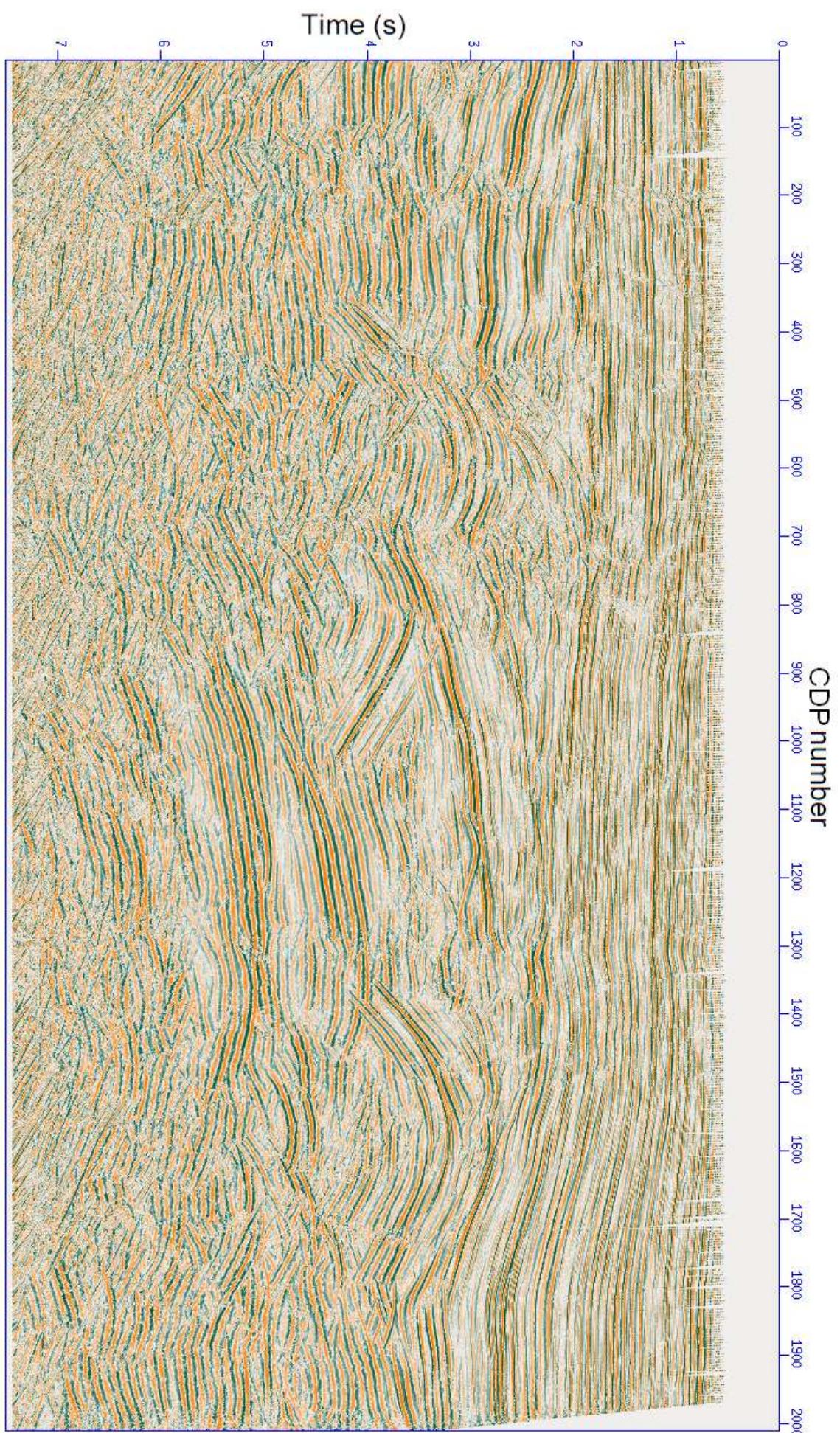
شکل ۲۲-۴ : مقطع بهینه نشانگر زاویه ( $\alpha$ ) حاصل از پردازش CRS مربوط به داده‌های واقعی



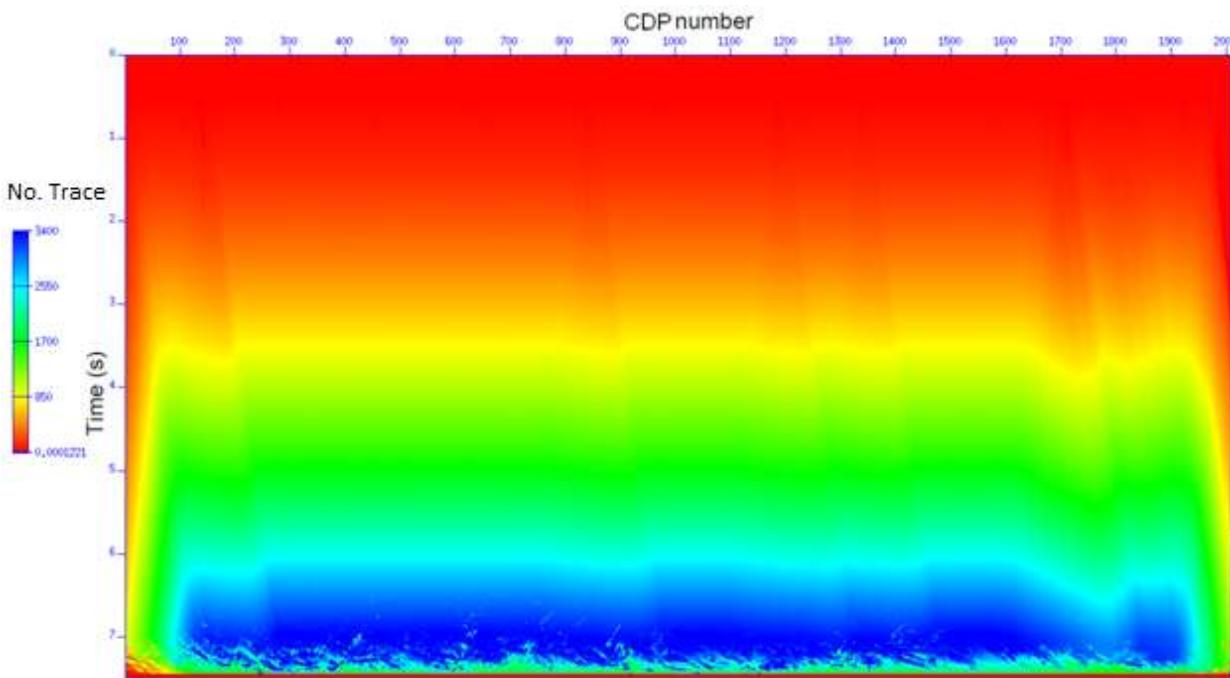
شکل ۲۳-۴ : مقطع همدوسی در برانبارش بهینه CRS مربوط به داده‌های واقعی



شکل ۲۴-۴ : مقطع برانبارش دورافت صفر با استفاده از عملگر برانبارش بهینه CRS



شكل ٢٥-٤: مقطع تقويت شده (AGC) شكل (٢٤-٤)



شکل ۴-۲۶ : تعداد ردیزهایی که در برانبارش بهینه مشارکت داشته اند.

با مقایسه شکل های (۱۰-۴) و (۲۵-۴) به خوبی می توان دریافت که بازتابها در مقطع بدست آمده از روش CRS، بویژه در اعمق پایین تر از پیوستگی بهتری برخوردار است. کماین به دلیل نسبت سیگنال به نویه بالاتر در روش برانبارش CRS نسبت به روش برانبارش CMP می باشد.

شکل های (۱۴-۴) و (۲۶-۴) به ترتیب نشان دهنده تعداد ردیزهایی به کار رفته در مرحله اول برانبارش (برانبارش خودکار CMP) و مرحله آخر برانبارش CRS می باشند. همانطور که ملاحظه می شود در مرحله ای انتها (شکل ۴-۲۶) تعداد ردیزهایی که در برانبارش بهینه بکار رفته، افزایش یافته است.

#### ۶-۴ پردازش به روش CDS

با توجه به آنچه که در این فصل گفته شد اساس برانبارش CRS بر مبنای آشکارسازی رخدادهای اولیه است در این صورت هر رخداد دیگری از جمله پراشها و نویهها بشدت تضعیف می شوند. در این صورت تعیین کردن مرزهای گسلی که سبب ایجاد رخدادهای پراش می شوند با اشکال مواجه می شود. در واقع با توجه به اینکه در راهبرد این روش، همدوسی رخدادهای بازتابی به عنوان معیار در انتخاب بازتابها در

تصویرسازی در نظر گرفته می‌شود، چالش واقعی در تعیین شیب‌های متداخل برای پردازشگر بوجود می‌آید. در این صورت این راهبرد در مواجه با شیب‌های متداخل رخداد شیب داری که بالاترین میزان همدوسی را دارد انتخاب و دیگر رخدادهای با انرژی کمتر نادیده گرفته می‌شود. در نتیجه تعیین شیب‌های متداخل در این روش غیر ممکن به نظر می‌رسد. از طرف دیگر روش توسعه‌یافته CRS نیز بخوبی نتوانسته مسئله‌ی شیب‌های متداخل را حل کند. بنابراین برای حل مسئله‌ی شیب‌های متداخل در داده لرزه‌ای واقعی با ساختارهای نیمه پیچیده از روش برانبارش CDS بهره گرفته شده است. با توجه به نوع راهبرد جستجو در این روش، تمامی رخدادهای در بازه جستجو، آشکارسازی می‌شود که این می‌تواند هم نقطه‌ی قوت این روش باشد و هم نقطه‌ی ضعف آن. در مورد نقطه‌ی ضعف این روش می‌توان گفت، در صورتی که اگر در داده مورد پردازش پیش پردازش مناسبی صورت نگرفته باشد، نویفه‌ها نیز به همراه سایر رخدادها بر جسته‌تر می‌شود و اصطلاحاً مقطع برانبارش کیفیت بنظر می‌رسد که این امر در مرحله‌ی کوچ مشکل ساز خواهد بود و باعث ایجاد اثرات تصنیعی در مقطع کوچ داده شده خواهد شد. البته داده استفاده شده در این مرحله و پردازش‌های پیشین از کیفیت مناسبی برخوردار است. پیش پردازش بر روی این داده توسط ادبی و همکاران (۱۳۸۸) انجام شده است.

خروجی حاصل از پردازش CDS با توجه به نوع راهبرد آن دو مقطع خواهد بود که یکی مقطع برانبارش و مقطع دیگر نشان دهنده تعداد ردلرزهای استفاده شده در شبیه‌سازی است. در این صورت تنها مقاطع برانبارش روشهای CRS و CDS قابل مقایسه خواهند بود. با توجه به راهبرد جستجو در روش برانبارش CDS انتظار می‌رود که رخدادهای پراش در مقطع برانبارش بخوبی نمایان شود و جزئیات بیشتری از بازنده‌ها در مقطع برانبارش نسبت به مقاطع برانبارش بدست آمده از سایر روشهای نشان داده شود.

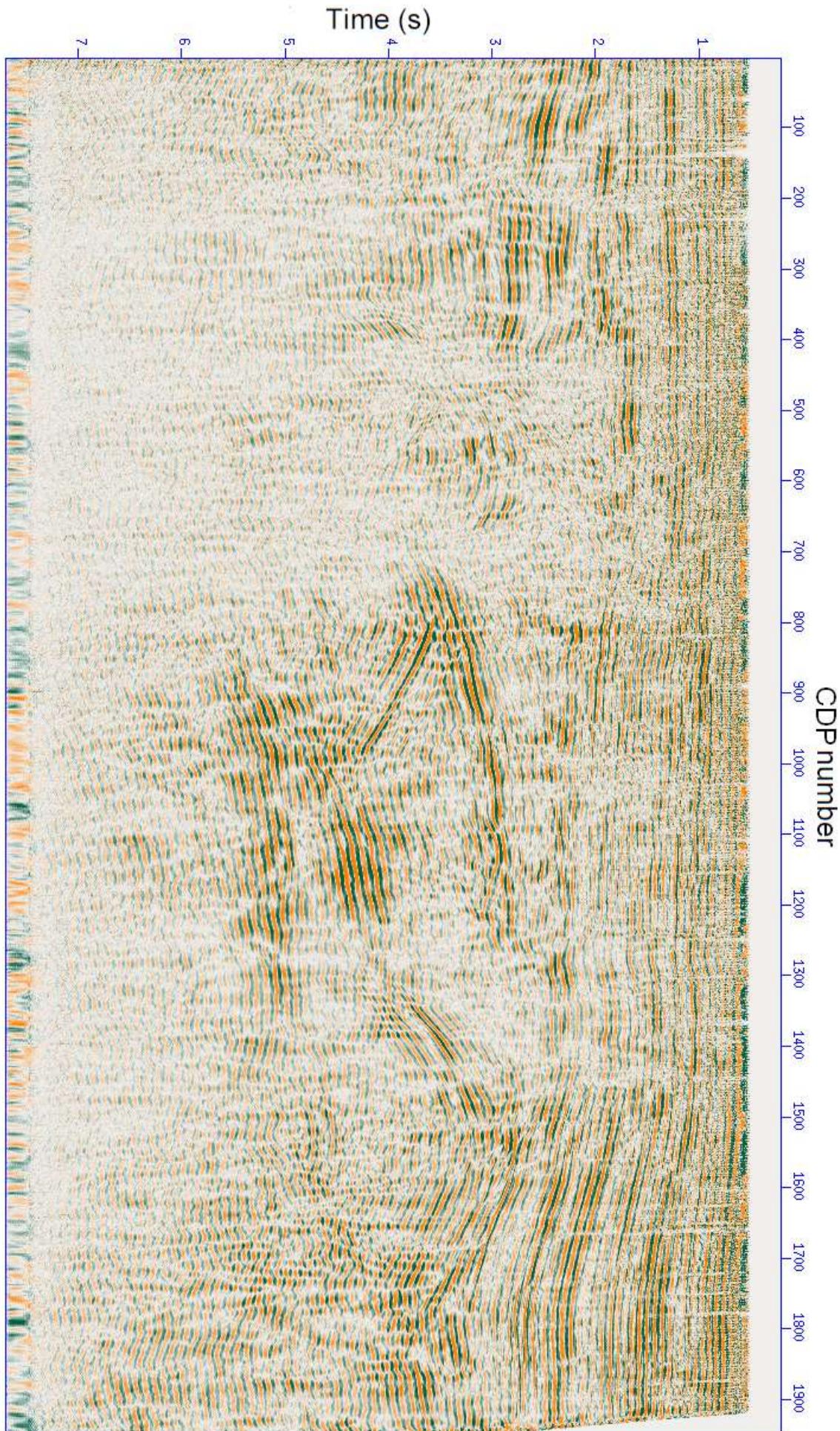
در پردازش CDS در این داده بازه‌ی زاویه انتخاب شده از  $-20^{\circ}$  تا  $+20^{\circ}$  درجه بوده و گام افزایش زاویه یک درجه تعیین شده است. سایر پارامترهای استفاده شده مشابه پردازش CRS است. جدول (۴-۳) پارامترهای بکار رفته در این پردازش را نشان می‌دهد. در این جدول به دلیل تفاوت در نوع راهبرد جستجو

با روش CRS پارامترهای مربوط به برانبارش خودکار CMP و برانبارش اولیه ZO وجود نخواهد داشت.

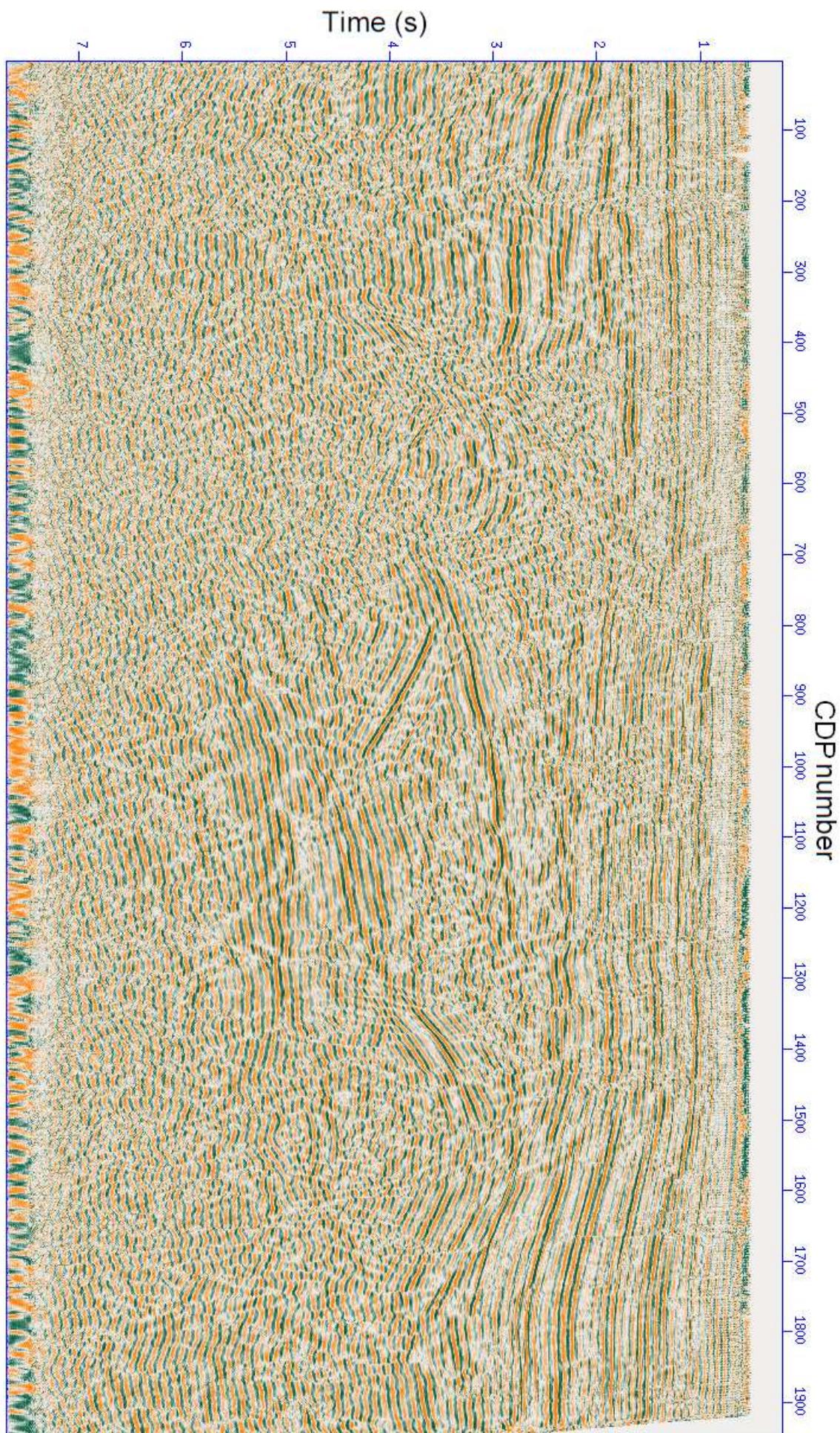
شکل (۴-۲۷) نشان دهنده‌ی نتیجه‌ی برانبارش CDS بر داده واقعی است. همانطور که در شکل مشاهده می‌شود در مقایسه با مقطع CRS پیوستگی بازتابها قابل قبول است و رخدادهای پراش بهتر آشکار شده اند و همچنین اثر گسلها بر روی رخدادها بهتر دیده می‌شود. مناطق سفیدی که در زمان سیرهای کم در برخی از نقاط در مقطع دیده می‌شوند به دلیل کمبود پوشش انرژی در آن مناطق است. البته اظهار نظر دقیق‌تر در موارد ساختارهای زیر سطحی در مقطع کوچ داده شده‌ی آن از اعتبار بیشتری برخوردار می‌باشد. مقاطع برانبارش و مقاطع کوچ عمقی آنها در روش‌های برانبارش متفاوت در فصل بعد بررسی و مقایسه می‌شوند.

جدول ۳-۴ : پارامترهای مورد استفاده در پردازش CDS برای شبیه سازی مقطع دورافت صفر، مربوط به داده های واقعی

نوع پارامتر	پارامتر پردازش	مقدار
پارامترهای عمومی	فرکانس غالب	۲۰ هرتز
	معیار همدوسى	شباهت
	داده های مورد استفاده در آنالیز	ردلرزهای اصلی
	عرض نوار همدوسى	۵۶ میلی ثانیه
سرعت و مرزهای	سرعت نزدیک سطح	۱۵۰۰ متر بر ثانیه
	سرعت برانبارش تحت جستجو	۱۵۰۰ تا ۵۵۰۰ متر بر ثانیه
جستجوی سرعت بهینه	زمان سیر شبیه سازی شده در ZO	۰ تا ۷ ثانیه
	فاصله نمونه برداری در شبیه سازی	۴ میلی ثانیه
	تعداد ردهای شبیه سازی شده در	۱۹۴۸
	فاصله بین ردها در شبیه سازی ZO	۱۷/۵ متر
منطقه هدف	حداقل بازه ZO	۱۰۰ متر در ۰/۴ ثانیه
	حداکثر بازه ZO	۲۵۰۰ متر در ۷ ثانیه
	حداقل بازه CMP	۱۴۰ متر در ۰/۴ ثانیه
	حداکثر بازه CMP	۳۴۵۰ متر در ۷ ثانیه
بازه جستجوی بین ردها	ابعاد تعمیم بازه	%۳۰
	مراتب تکرار در بهینه کردن جستجو	۳
	بازه زاویه مورد جستجو	-۲۰ تا +۲۰ درجه
	گام افزایش زاویه های مورد جستجو	۱ درجه
پارامترهای CDS	فرکانس جستجو در ورداشت انفجاری	۲ میلی ثانیه
	زمان پردازش	۲۴۰ ساعت



شکل ۲۷-۴ : مقطع برانبارش دورافت صفر حاصل از برانبارش CDS



شكل ٢٨-٤ : مقطع تقويت شده (AGC) شكل (٢٧-٤)

## ۵ فصل پنجم

### برانبارش سطح پراش مشترک با دورافت محدود<sup>۱</sup>

#### ۱-۵ مقدمه

کیفیت داده‌های بازتابی در تصویرسازی لرزمای از اهمیت زیادی برخودار است که وابسته به عوامل متعددی می‌باشد. به عنوان مثال، شرایط توپوگرافی سطح زمین، پیچیدگی‌های ساختاری در زیر سطح و یا وجود عوامل طبیعی یا موانع ساخت دست بشر ممکن است در نحوه برداشت داده لرزمای و به تبع آن در کیفیت داده‌ها موثر باشد. برداشت داده لرزمای در محیط‌های ناهمنگن زیر سطحی نظیر ساختارهای گسل خورده و یا تغییرات جانبی شدید سرعت نظیر جواب گنبد‌های نمکی سبب کاهش نسبت سیگنال به نویفه در مقطع لرزمای می‌شود.

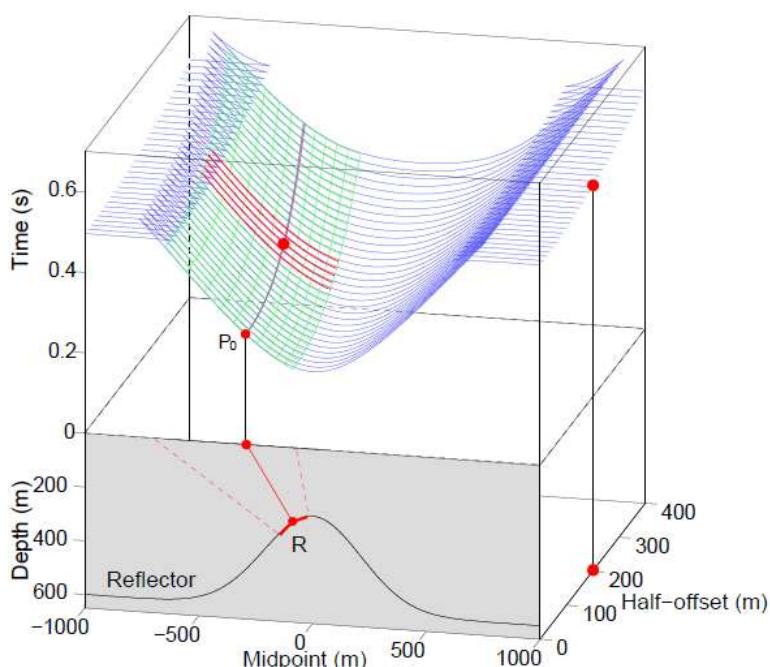
در بیشتر مواقع تمامی داده‌های لرزمای قدیمی به دلیل کوچک بودن دورافت ماکزیمم، برداشت نامنظم داده و چینش پایین نیاز به پردازش مجدد دارند. برای جبران نواقص ذکر شده و قرار دادن داده‌های جایگزین در شکاف‌های موجود در لرزم نگاشت نیاز به مراحل پیچیده‌ای است تا آنالیز سرعت، تهیه مدل سرعت و دیگر مراحل پردازش بخوبی انجام گیرد. در این گونه موارد کیفیت مقاطع کوچ زمانی و عمقی پس از برانبارش پایین است. علاوه بر این ورداشت نقطه میانی مشترک در داده‌های قبل از برانبارش نیز به دلیل

---

<sup>۱</sup>Finite Offset Common Diffraction Surface (FO-CDS) stack

کم پشت بودن لرزه نگاشتهایی که بطور نامنظم در محدوده‌ی دورافت کوچک قرار گرفته اند با اشکال مواجه می‌شود. برای منظم کردن لرزه نگاشت و پر کردن شکافهایی که در اثر کمبود اطلاعات حاصل می‌شود، معمولاً از تکنیکهای بین<sup>۱</sup> بندی متفاوت و درونیابی استفاده می‌شود (ایلماز، ۲۰۰۱).

بایکولوف (۲۰۰۹) برای حل مسائل بالا و افزایش کیفیت مقطع برانبارش در روش CRS روش برانبارش CRS با دورافت محدود<sup>۲</sup> را معرفی کرد. عملگر برانبارش CRS با دورافت محدود حول نقطه‌ی معینی ( $p_0$ ) با مختصات زمان سیر، دورافت و نقطه‌ی میانی مشخص محاسبه و برانبارش در امتداد این سطح اعمال می‌شود. شکل (۵-۱) این عملگر را در حجم زمان-نقطه میانی-نیم دورافت به صورت سطح قرمز رنگ نشان می‌دهد.



شکل ۱-۵ : سطح برانبارش CRS با دورافت محدود. سطح قرمز رنگ که منطبق بر سطح برانبارش CRS (سطح سیز رنگ) است، نشان دهنده سطح برانبارش CRS با دورافت محدود است. برانبارش دامنه‌ها در محدوده قرمز رنگ صورت می‌گیرد (بایکولوف، ۲۰۰۹).

در این فصل بمنظور عملکرد بهتر در مواجه با شیوه‌های متداخل که در فصل قبل مطرح شد و به

<sup>1</sup>Bin

<sup>2</sup>Finite Offset CRS

عبارت دیگر جبران کمبود انرژی در مناطقی نظیر برخورد انتهای گنبدهای نمکی با لایه‌های اطرافش و همچنین پوشش دادن دورافت‌هایی که در آنها اطلاعات به دلایل ذکر شده از دست رفته اند، روش برانبارش سطح پراش مشترک با دورافت محدود معرفی می‌شود. از آنجایی که برانبارش در دورافت محدود انجام می‌شود، این روش در مواجه با نوافه‌های غیر همدوس بهتر از روش برانبارش CDS عمل می‌کند. در انتهای این فصل مقطع برانبارش بدست آمده از این روش مربوط به داده واقعی و مقطع کوچ داده شده آن به همراه مقاطع کوچ داده شده روش‌های برانبارش CRS و CDS که در فصل چهارم نشان داده شد آورده شده است.

## ۲-۵ شرح مختصری از کوچ

کوچ بطور معمول بخشی از فرآیند پردازش داده‌های لرزه‌ای است که طی آن این داده‌ها به ساختارهای زیر سطحی قابل تفسیر تبدیل می‌شوند. کوچ سبب حذف اثر انتشار موج از داده‌های ضبط شده و قرار گرفتن بازتابها در محل واقعی و همچنین موجب بالا رفتن قدرت تفکیک جانبی در مقطع نهایی می‌شود. کوچ بازتابهای شیب دار را به موقعیت صحیحشان در زیر سطح انتقال می‌دهد و باعث حذف پراش‌ها (تبدیل پراش به یک نقطه) می‌شود در این صورت قدرت تفکیک حادثه‌ها افزایش و یک تصویر لرزه‌ای زیرسطحی حاصل می‌شود. زاویه شیب واقعی مربوط به لایه‌های بازتابنده به کمک روابط هذلولی قابل محاسبه است، در حالیکه محل دقیق قرارگیری لایه شیب دار، اینگونه قابل محاسبه نیست. برای برطرف کردن این مسئله و کوچ داده‌ها به مکان واقعی خود، یک روش ترسیمی ساده وجود دارد. در این روش برای هر نقطه یک نیم دایره با شعاع زمان رفت و برگشت موج در حالت دورافت صفر ( $t_0$ ) کشیده می‌شود. محل قرارگیری درست نقطه بازتابی، جایی در روی این نیم دایره خواهد بود، خط مماس بر تمام نیم دایره‌های مذکور بیانگر محل واقعی نقاط بازتابی است (شکل ۲-۵).

برای حذف پراش‌ها نیز می‌توان از روش ترسیمی بهره گرفت. در این صورت اگر برای هر نقطه با مرکزیت  $t_0$  نیم دایره‌ای رسم شود در نوک قله پراش تمام این نیم دایره‌ها هم‌دیگر را قطع خواهند کرد

که این نقطه، همان نقطه پراشیده شده است. همانطور که در شکل (۵-۲) مشاهده می‌شود کوچ رخدادهای شبیب را به بالا انتقال می‌دهد. بنابراین با حذف پراش‌ها و قرار گیری بازتاب‌ها در محل واقعی خود این امکان فراهم می‌شود که گسل‌ها به تصویر کشیده شوند در حالی که بازتاب‌های افقی در جای خود باقی می‌مانند.

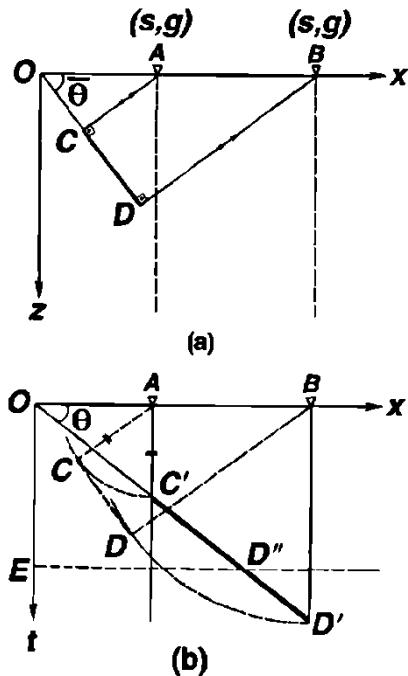
کوچ به دو صورت زمانی و عمقی انجام می‌شود. در بیشتر مواقع همانطور که در فصل اول مختصری در مورد کوچ توضیح داده شد، کوچ زمانی به دلیل حساسیت کمتری که به مدل سرعت دارد بیشتر استفاده می‌شود از طرف دیگر مفسر ترجیح می‌دهد مقطع کوچ را با مقطع برانبارش مقایسه کند که این در کوچ زمانی میسر می‌شود. اما در صورت مواجه با ساختارهای پیچیده و ناهمگن، کوچ زمانی دیگر قادر به تصویرسازی مطلوبی نخواهد بود. در اینگونه موارد از کوچ عمقی بهره گرفته می‌شود. در این صورت به دلیل حساسیت بیشتر این روش به مدل سرعت باید مدل سرعتی دقیق تهیه شود. در شکل (۳-۱) محدوده‌ی کارکرد کوچ زمانی و عمقی نشان داده شده است. در عمل برای انجام کوچ مراحل زیر باید در نظر گرفته شود که به آن طرح ریزی کوچ گفته می‌شود (ایلماز، ۲۰۰۱):

الف) اختصاص یک استراتژی مناسب

ب) انتخاب الگوریتم کوچ مناسب با استراتژی در نظر گرفته شده

ج) اختصاص پارامترهای الگوریتم

د) تعیین سرعت کوچ



شکل ۵-۲ : کوچ سبب می شود رخدادهای شیب دار در محل صحیح خود قرار گیرند. در قسمت (b) رخداد شیب دار  $CD'$  بعد از اعمال کوچ در محل صحیح خود در  $CD$  قرار گرفته است. همانطور که مشاهده می شود در قسمت (a) رخداد بازتابی شیب دار به بالای مقطع انتقال داده شده در حالی که طول بازتابنده کوتاهتر و شیب آن بیشتر شده است (ایلماز، ۲۰۰۱).

برای انتخاب یک استراتژی مناسب در نظر گرفتن مواردی از قبیل اینکه کوچ دو بعدی است یا سه بعدی، کوچ پیش از برآنبارش است یا پس از برآنبارش و در آخر کوچ زمانی مد نظر است یا عمقی الزامی است.

الگوریتم های متفاوتی برای کوچ وجود دارد که بر اساس نحوه عملکرد آنها به سه دسته تقسیم می شوند (ایلماز، ۲۰۰۱):

الف) روش های بر مبنای حل انتگرالی معادله هی حرکت موج (کیرشهوف)

ب) روش های بر مبنای حل اجزای محدود معادله هی حرکت موج

ج) روش های حوزه فرکانس - عدد موج

در انتخاب الگوریتم مناسب کوچ مواردی از قبیل اینکه الگوریتم مورد نظر در مواجه با رخدادهای پرسیب دقت خوبی داشته باشد، در صورتی که تغییرات جانبی یا قائم سرعت وجود داشته باشد قابل اطمینان باشد و سهولت انجام کوچ نیز لحاظ می شود. الگوریتمی که در این تحقیق از آن برای کوچ بهره گرفته شده

الگوریتم کیرشهوف است.

روش‌های متنوع کوچ دارای خصوصیات متفاوتی بوده و در دقت عمل و نوع مدل سرعت مورد نیاز در لحاظ کردن تغییرات قائم سرعت، در نظر گرفتن تغییرات جانبی سرعت، تصحیح شیب و محاسبات زمان با یکدیگر تفاوت دارند. در برخی از روش‌ها فقط از یک مدل سرعت برای تمام داده‌ها استفاده می‌شود در حالی که در برخی دیگر از مدل پیچیده‌ای که دارای تغییرات سرعت جانبی و قائم در قسمت‌های مختلف است استفاده می‌شود.

بطور کلی می‌توان گفت، یک ساختار پیچیده در زیر زمین به یک مدل سرعت پیچیده‌تر نیازمند است. در کوچ زمانی از سرعت<sup>۱</sup> RMS و کوچ عمقی از اختلاف سرعت‌های بازه‌ای که میانگین سرعت‌های واقعی زمین است، استفاده می‌شود. باید این مسئله را در نظر داشت که از سرعت برآنبارش نمی‌توان در کوچ استفاده کرد زیرا در برآنبارش همیشه سرعت برآنبارش برای جبران شیب بازتاب‌ها قدری بزرگتر از سرعت RMS است. به عبارت دیگر سرعت برآنبارش شامل سرعت لایه بالایی بازتابنده است که بر کسینوس شیب بازتابنده تقسیم می‌شود در حالیکه سرعت کوچ همان سرعت محیط است. در این صورت سرعت برآنبارش را می‌توان وابسته به شیب بازتابنده دانست در حالیکه سرعت کوچ اینگونه نیست (ایلماز، ۲۰۰۱). بنابراین تغییر این مدل امری ضروری است. وقتی سرعت انتخابی خیلی کوچک باشد، حذف پدیده پراش و تقلیل آن به یک نقطه امکانپذیر نخواهد بود. در این حالت اصطلاحاً داده‌ها را کم کوچانده می‌نامند و وقتی سرعت انتخابی خیلی زیاد باشد، داده‌ها را بیش کوچانده می‌نامند.

## ۱-۲-۵ کوچ کیرشهوف با دامنه واقعی

اگر در فرآیند کوچ جنبه‌های دینامیکی نیز مانند جنبه‌های جنبشی بخوبی لحاظ شود کوچ حاصل را می‌توان کوچ با دامنه واقعی نامید. در کوچ با دامنه واقعی اثر توزیع هندسی مربوط به انتشار موج از دامنه‌ها حذف می‌شود بنابراین اندازه‌گیری دامنه‌ها تنها وابسته به زاویه ورود است که به صورت ضرایب بازتاب

<sup>۱</sup>Root-Mean-Square

وابسته به زاویه در نظر گرفته می‌شود. داده‌هایی که تحت فرآیند کوچ با دامنه واقعی قرار گرفته اند در تعیین خصیات فیزیکی و زمین‌شناسی بازتاب‌ها بوسیله آنالیز‌های AVO/AVA که در تشخیص مخازن هیدروکربنی بکار می‌رود، مفید خواهند بود. در این بخش تنها به توضیح مختصراً در مورد کوچ کیرشهوف با دامنه‌ی واقعی پرداخته می‌شود برای مطالعه جزئیات بیشتر در این باره می‌توان به هرتوک (۲۰۰۴) مراجعه کرد. در این تحقیق تنها کوچ عمیقی کیرشهوف با دامنه واقعی پس از برانبارش بر مقاطع برانبارش روش‌های CRS، CDS و FO-CDS اعمال خواهد شد و نتایج آنها بررسی و مقایسه می‌شوند.

همانند تمامی روش‌های کوچ، در کوچ کیرشهوف نیز دانستن توزیع سرعت ضرورت دارد. بنابراین اختصاص یافتن مدل سرعت ماکرو<sup>۱</sup> (مدل سرعت ماکرو به‌این معنی است که تغییرات سرعت نسبت به افزایش عمق در مقایس بزرگ ملایم یا به نرمی خواهد بود) الزامی است. مدل سرعت عمیقی مورد نیاز برای کوچ مقاطع مورد نظر با استفاده از نرم افزار توموگرافی در نقطه‌ی فرود نرمال<sup>۲</sup> بدست می‌آید. روش بدست آوردن مدل سرعت با استفاده از این نرم افزار را می‌توان در دوونک (۲۰۰۴) پیدا کرد. در این قسمت به دلیل استفاده از این استراتژی کوچ، مختصراً اصول اولیه کوچ کیرشهوف با دامنه‌ی واقعی شرح داده می‌شود.

### ۱-۲-۵ اصول کوچ کیرشهوف با دامنه‌ی واقعی:

در این قسمت فرض بر این است که سطح اندازه‌گیری ( $z=0$ ) بوسیله‌ی جفت چشمه‌ها و گیرنده‌ها (S,R)، پوشیده شده باشد. به کمک روابط زیر می‌توان وضعیت بردارهای دو بعدی مربوط به چشمه‌ها و گیرنده‌ها را بیان کرد. (هرتوک، ۲۰۰۴):

$$\vec{r}_S(\vec{\xi}) = \vec{r}_{S0} + \Gamma_S \vec{\xi} \quad 1-5(\text{الف})$$

$$\vec{r}_R(\vec{\xi}) = \vec{r}_{R0} + \Gamma_R \vec{\xi} \quad 1-5(\text{ب})$$

---

<sup>1</sup>Macro-velocity

<sup>2</sup>NIP Tomography

بردار  $\vec{r}_s$  نشان دهنده موقعیت چشم و گیرنده است که در سطح  $z = 0$  متفاوت باشد. بردارهای  $\vec{r}_{R_0}$  و  $\vec{r}_s$  ثابت و وابسته به نقطه‌ای ابتدایی در صفحه  $\vec{\xi}$  هستند.  $\Gamma_s$  و  $\Gamma_R$  ماتریس‌های  $2 \times 2$  هستند که برای آرایش‌های متفاوت چشم-گیرنده محاسبه می‌شوند. در آرایش چشم مشترک ماتریس‌ها به صورت  $\Gamma_R = I$  و  $\Gamma_s = I$  خواهد بود که  $0$  ماتریس‌های  $2 \times 2$  واحد و صفر هستند. برای آرایش دورافت مشترک این ماتریس‌ها به صورت  $\Gamma_s = I$  و  $\Gamma_R = I$  می‌باشند. بردار  $\vec{\xi}$  برای تمامی جفت چشم-گیرنده‌ها در محدوده‌ای به نام بازه<sup>۱</sup>  $A$  قرار می‌گیرد. درون بازه  $A$  موقعیت ردلرزه‌های متناظر با یک جفت چشم-گیرنده با استفاده از رابطه‌ی  $U(S, R, t) = U(\vec{\xi}, R(\vec{\xi}), t) = U(\vec{\xi}, t)$  مشخص می‌شود. اکنون می‌توان هر نقطه‌ای را در حوزه‌ی زمان با استفاده از مختصاتش  $(t, \xi_1, \xi_2)$  به صورت  $N = N(\vec{\xi}, t)$  توصیف کرد. این نقاط در حوزه‌ی عمق بوسیله‌ی  $(r_1, r_2, z)$  توصیف و به صورت  $M = M(\vec{r}, z)$  مشخص می‌شوند. علاوه بر این نقاط روی بازتابنده نیز با  $M_R = M_R(\vec{r}, z)$  نمایش داده می‌شوند. در واقع بازتابنده‌ها به صورت  $z = z(\vec{r})$  پارامتری می‌شوند.

یک ردلرزه ثبت شده شامل بازتاب‌های اولیه  $(\vec{\xi}, t)$  است (در واقع بیانگر جابجایی ذره در امتداد پرتوی ورودی است). برای اینکه بتوان جابجایی فازی بازتاب‌های اولیه که ناشی از نقاط کائوستیک<sup>۲</sup> هستند را بخوبی محاسبه کرد بهتر است از ردلرزه‌های تحلیلی استفاده کرد. ردلرزه‌های تحلیلی با اضافه کردن تبدیل هیلبرت<sup>۳</sup> ردلرزه بعنوان قسمت موهومی به ردلرزه اولیه حاصل می‌شود. برای یک بازتاب اولیه مؤلفه‌ی مختلط جابجایی ذره می‌تواند به صورت تئوری پرتو درجه صفر بیان شود (چرونی، ۲۰۰۱):

$$U(\vec{\xi}, t) = U_0(\vec{\xi}) F(t - \tau_R) = \bar{R} \frac{\mathcal{A}}{L} F(t - \tau_R) \quad (2-5)$$

$F(t)$  نشان دهنده‌ی موجک تحلیلی چشم نقطه‌ای می‌باشد که برای تمامی  $f(t) = f(t) + i H[f(t)]$  چشم‌های نقطه‌ای قابل تعمیم فرض شده است. عملگر  $H$  نشان دهنده‌ی تبدیل هیلبرت می‌باشد. ( $f(t)$ )

<sup>1</sup>Apertuer

<sup>2</sup>Caustic

<sup>3</sup>Hilbert

موجک چشمی نقطه‌ای و  $\tau$  زمان سیر بازتاب در امتداد پرتو  $SM_R$  است. دامنه پرتو  $(\bar{\zeta}(U_0))$  را می‌توان با استفاده از پارامترهای  $\bar{R}$  (ضریب بازتاب موج صفحه‌ای) و  $L$  (فاکتور توزیع هندسی چشمی نقطه‌ای) بیان کرد. این فاکتور برای محاسبه تغییرات دامنه در امتداد زمان سیر پرتو به دلیل کشیدگی یا تمرکز جبهه‌ی موج، وابسته به انحنای بازتابنده و مدل سرعت می‌باشد. فاکتورهای دیگر که بر دامنه تاثیر می‌گذارند نظیر اتلاف انرژی در امتداد انتقال پرتو در فاکتور  $\bar{A}$  قرار می‌گیرند.

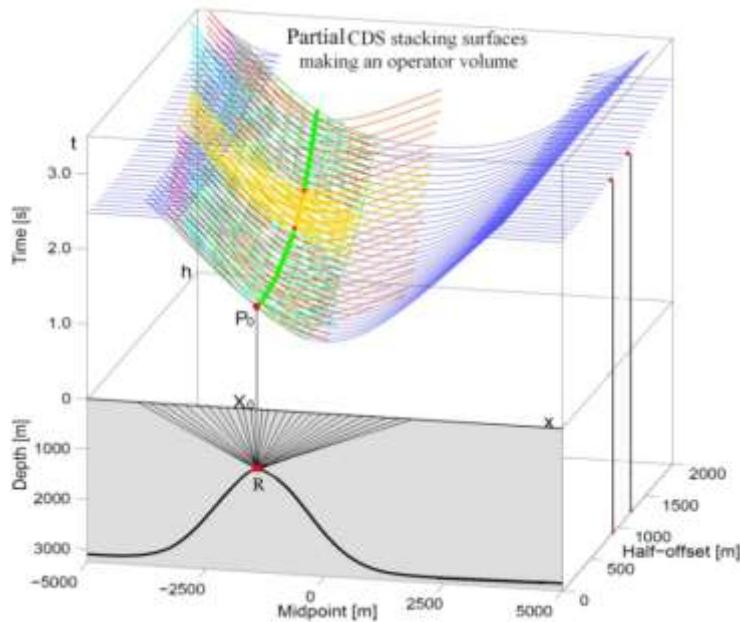
برای دست یابی به دامنه‌ی واقعی باید تمامی فاکتورهای موثر بر دامنه در طی فرآیند کوچ حذف شود. بنابراین اثر توزیع هندسی با اعمال یکتابع وزنی از روی دامنه‌ها برداشته می‌شود (برای جزئیات بیشتر می‌توانید به هرتونک (۲۰۰۷) یا اشپینر (۲۰۰۴) مراجعه نمایید). فاکتور  $\bar{A}$  را به دلیل اینکه اطلاعاتی از مشخصه‌های زیرسطحی در دست نیست، نمی‌توان حذف کرد. با این وجود می‌توان تغییرات این فاکتور را برای همه‌ی دامنه‌ها یکسان در نظر گرفت (و یا اینکه تغییرات آن نسبت به  $L$  و  $\bar{R}$  به کندی انجام می‌شود) و این فاکتور را نادیده گرفت. با حذف اثر فاکتور توزیع هندسی، دامنه واقعی را می‌توان با استفاده از ضرایب بازتاب وابسته به زاویه بدست آورد.

در نقاطی از مقطع برانبارش، اگر بنا به دلایلی پوشش انرژی کافی نباشد نظیر گسل‌ها، عملگر کوچ دیگر قادر نخواهد بود در این نقاط تصویرسازی مطلوبی انجام دهد و این نقاط به صورت فضاهای خالی در مقطع کوچ مشاهده می‌شود. برای جبران پوشش انرژی در مقطع کوچ، این تحقیق روش برانبارش-FO-CDS را برای کوچ عمیقی پس از برانبارش معرفی می‌کند.

### ۳-۵ مفهوم برانبارش CDS با دورافت محدود

در برانبارش CDS با دورافت محدود مجموعه‌ای از سطوح برانبارش در هر نمونه و در محدوده‌ی دورافت مشخص، حجمی از سطوح برانبارش را ایجاد می‌کنند. این سطوح حول نقطه‌ی معینی روی منحنی زمان سیر در مختصات نقطه میانی و زمان  $(p_0)$  در هر محدوده‌ی دورافت دلخواه قابل محاسبه می‌باشد. و برانبارش داده‌ها در امتداد این حجم برانبارش صورت می‌گیرد. نتیجه‌ی برانبارش نمونه‌ای با دورافت صفر در

مختصات نقطه میانی و زمان است. در شکل (۳-۵) سطح برانبارش زرد رنگ نشان دهنده سطح برانبارش سطح پراش مشترک با دورافت محدود (FO-CDS) است. این سطح از سطح برانبارش CDS کوچکتر و بر این سطح منطبق است.



شکل ۳-۵ : سطح برانبارش CDS با دورافت محدود. سطح زرد رنگ نشان دهنده سطح برانبارش با دورافت محدود است که بر سطح برانبارش CDS منطبق است. این سطح برای هر نمونه ( $p_0$ ) در مختصات نقطه میانی-زمان در هر بازه دورافت دلخواهی قابل محاسبه است و برانبارش دامنه‌ها تنها در این محدوده انجام می‌شود.

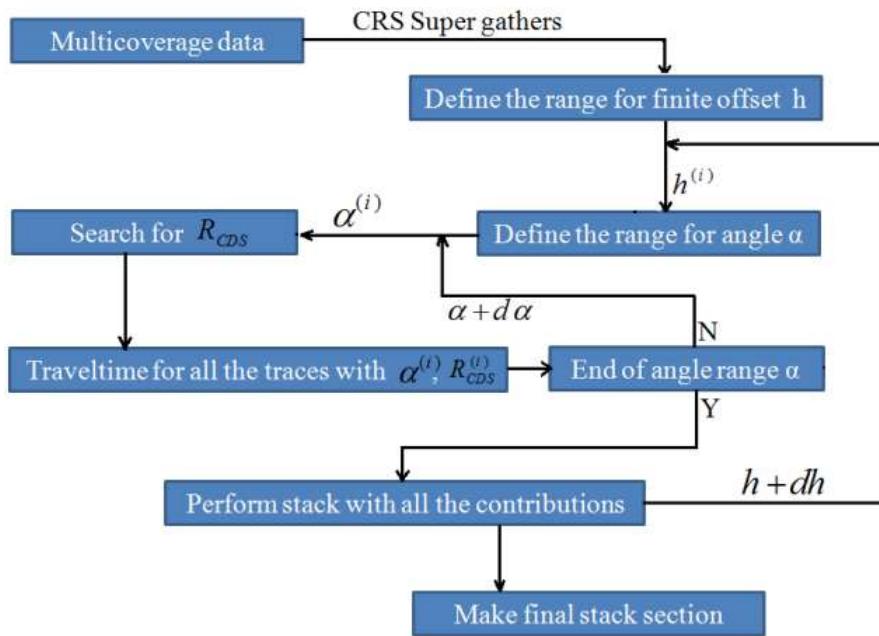
#### ۴-۵ عملگر برانبارش CDS با دورافت محدود

عملگر برانبارش در این روش همانند عملگر برانبارش CDS است با این تفاوت که در این روش عملگر برانبارش در دورافت محدود طبق رابطه‌ی  $dh = d - c < dh < bt_0 + d$  محدوده‌ی دورافت است. پارامتر  $b$  در رابطه‌ی بالا تغییرات محدوده‌ی دورافت را در مقابل زمان یا عمق بازتابنده کنترل می‌کند. پارامترهای  $c$  و  $d$  اندازه بهینه و موقعیت بازه دورافت را برای هر نمونه  $p_0$  تعیین می‌کنند. معادله‌ی زیر نشان دهنده عملگر FO-CDS در یک دورافت دلخواه می‌باشد.

$$\tau_{hyp}^2 (\Delta m, dh) = \left( \tau_0 + \frac{2 \sin \alpha}{v_0} \Delta m \right)^2 + \frac{2 \tau_0 \cos^2 \alpha}{v_0 R_{cds}} (\Delta m^2 + (dh)^2) \quad (3-5)$$

نکته مهم در این روش که تفاوت آن با روش CDS می‌باشد، انتخاب گام افزایش دورافت است. در واقع اگر گام افزایش ( $dh$ ) خیلی بزرگ انتخاب شود این روش از کارایی لازم برخوردار نخواهد بود و مقطع بدست آمده تفاوت چندانی با مقطع CDS نخواهد داشت در صورتی که با انتخاب گام‌های افزایش کوچک‌تر، زمان پردازش کاهش خواهد یافت و همچنین پیوستگی بازتاب‌ها در عمق‌های پایین‌تر بهبود خواهد یافت. با توجه به‌اینکه در برانبارش CDS تمامی رخدادهای ضعیف تقویت می‌شوند، این امر موجب آشکارتر شدن نوفه‌های زمینه در مقطع برانبارش خواهد شد. بنابراین با انتخاب مناسب گام افزایش دورافت با توجه به نوع داده لرزه‌ای، اثر نوفه‌ها طی عملیات برانبارش کاهش می‌یابد. شکل‌های (۱۶-۵) و (۱۷-۵) رابطه‌ی بین کاهش گام  $dh$  و نوفه‌ها را در یک مقطع مصنوعی لرزه‌ای بهتر بیان می‌کند. شعاع انحنای  $R_{cds}$  بدست آمده در رابطه‌ی (۱-۵) نیز به دلیل اینکه‌این عملگر در دورافت محدود انجام می‌شود، دارای دقت بیشتری نسبت به  $NIP$  بدست آمده از رابطه‌ی (۱-۴) است. در واقع در دورافت محدود انتظام جبهه موج‌های نرمال و  $R_{CDS}$  بهتر صورت می‌گیرد و در نتیجه رابطه  $R_{cds} \equiv R_{NIP} \equiv R_N$  از دقت بالاتری برخوردار است. از طرف دیگر با توجه به‌اینکه عمل جمع بستن دامنه‌ها روی محور دورافت صورت می‌گیرد با محدود کردن دورافت، پهنای زون فرنل نیز محدود می‌شود، بنابراین انرژی دریافتی از عمق‌های پایینی با دقت بیشتری در مقطع برانبارش حفظ می‌شوند و در نتیجه تصویر سازی بهتری در اعماق پایین‌تر در فرآیند کوچ صورت می‌گیرد.

شکل (۵-۵) نشان دهنده تمامی مراحل برانبارش FO-CDS است. با توجه به‌این شکل تمامی مراحل جستجوی پارامتر در روش CDS در یک دورافت محدود صورت می‌گیرد و برانبارش در امتداد سطح محدود ایجاد شده (شکل ۳-۵) انجام می‌شود و در نهایت تمامی این مقاطع برانبارش در کنار هم قرار می‌گیرد و مقطع برانبارش نهایی را تشکیل می‌دهند.



شکل ۵-۴ : نمای شماتیک مراحل برانبارش .FO-CDS

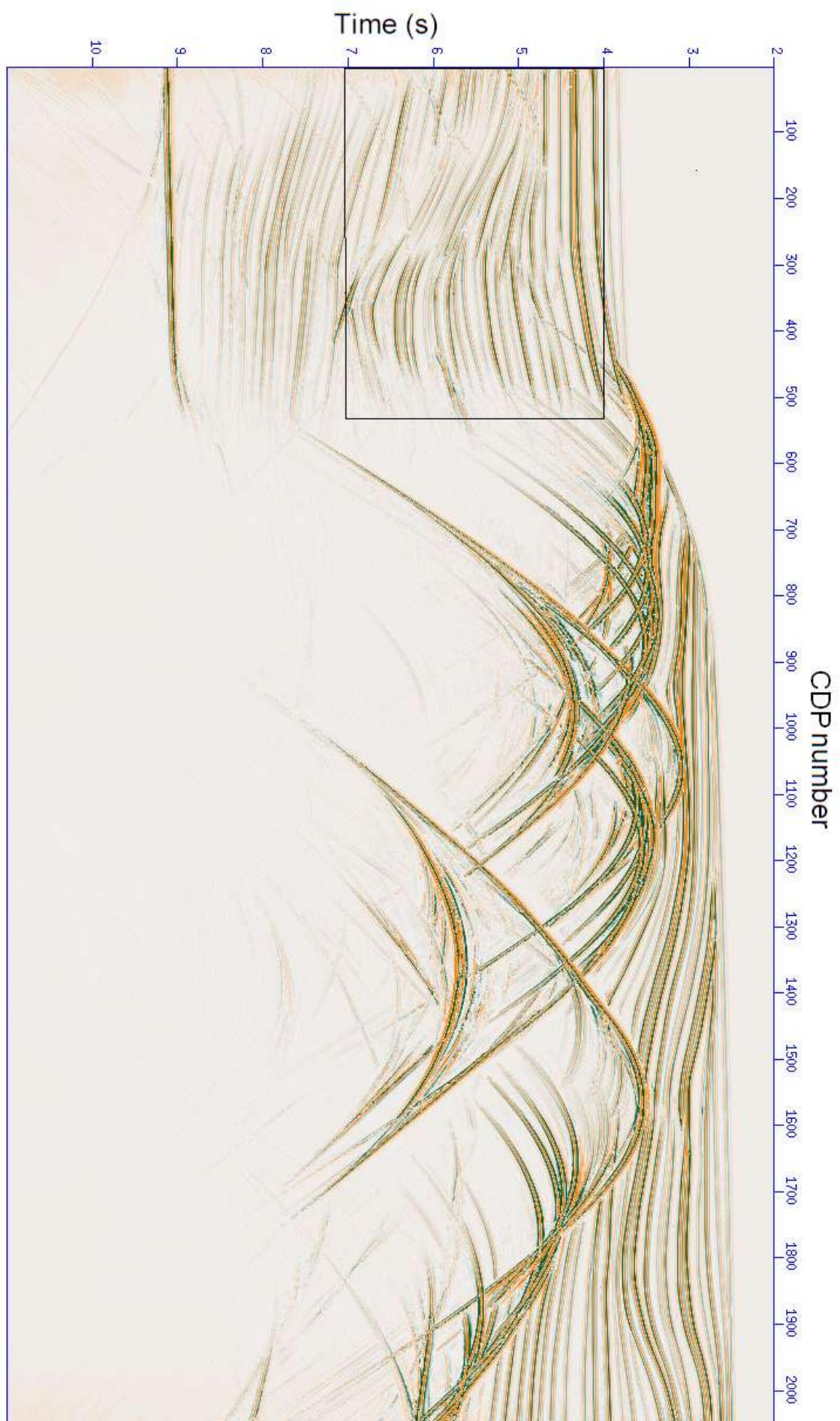
## ۵- داده‌های لرزه‌ای مصنوعی

برای آزمایش عملکرد روش برانبارش FO-CDS، ابتدا عملگر برانبارش بر قسمتی از داده‌های مصنوعی Sigsbee 2A اعمال می‌شود. در طراحی این داده در قسمت راست، گنبد نمکی قرار دارد بنابراین مسئله‌ی تصویرسازی در جوانب گنبد نمکی و کف گنبد نمکی مطرح می‌شود. در قسمت چپ این داده‌ها، گسل‌های متعددی گنجانده شده‌اند، در این صورت انتظار می‌رود رخدادهای پراش فراوانی در این ناحیه وجود داشته باشد در نتیجه می‌توان تصور نمود که در مقطع دورافت صفر شیب‌های متداخل متعددی وجود خواهد داشت. بنابراین برای بررسی عملکرد روش برانبارش FO-CDS این قسمت از داده‌های مصنوعی در نظر گرفته شده است. در شکل (۵-۵) مقطع کامل این داده مصنوعی که عملگر برانبارش CRS بر آن اعمال شده نشان داده شده است. همانطور که در این شکل مشاهده می‌شود، مقطع برانبارش شده دارای رخدادهای پراش فراوانی می‌باشد که رخدادهای دیگر را قطع کرده است. رخدادهای پراش قوی در مرکز و در قسمت راست مقطع مربوط به تاقدیس‌ها و رخدادهای پراش ضعیف‌تر در قسمت لایه ایی شکل مربوط به گسل‌ها و همچنین نقاط پراشی است که در مدل طراحی شده است. بنابراین همانطور که انتظار می‌رفت در اغلب نقاط در مقطع دورافت صفر شیب‌های متداخل وجود دارد. در مورد شیب‌های متداخل می‌توان گفت

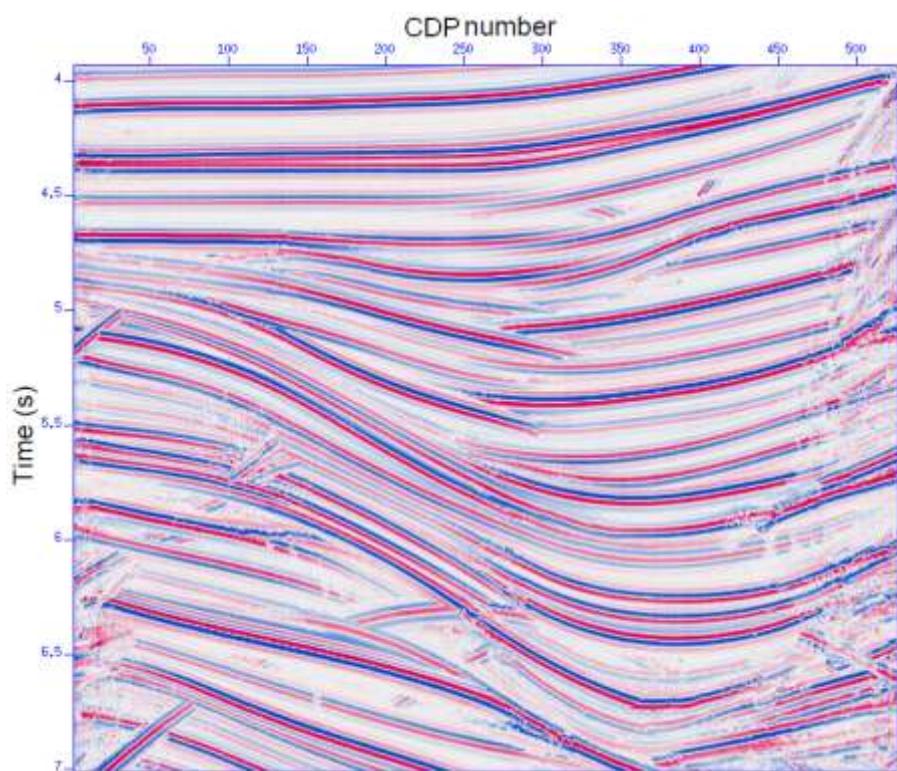
که در یک نقطه شبیه سازی شده در مقطع دورافت صفر، بیش از یک رخداد وجود داشته است. بنابراین حتی با در دست داشتن یک مدل سرعت دقیق، در مقطع کوچ داده شده‌ای که از چنین مقطع دورافت صفری بدست آید، در محل تقاطع این شبیه‌ها تصویرسازی مطلوبی رخ نخواهد داد و در مرحله تفسیر برای مفسر ایجاد مشکل خواهد کرد. بنابراین در این تحقیق سعی بر این است که با اصلاح روش برانبارش CDS، حفظ انرژی‌های بازتابی با دقت بیشتری صورت گیرد و در نتیجه تصویر سازی مطلوب تری در مواجه با شبیه‌های متداخل داشته باشیم. در این قسمت به دلیل اینکه تنها از مقطع نهایی برانبارش بهینه به منظور مقایسه با مقاطع برانبارش بدست آمده از روش‌های CDS و FO-CDS استفاده می‌شود از نشان دادن مقاطع بدست آمده در مراحل میانی برانبارش CRS خودداری می‌شود. جدول (۱-۵) پارامترهای به کار رفته در برانبارش CRS توسعه یافته (من، ۲۰۰۲) بر داده مصنوعی Sigsbee 2A را نشان می‌دهد. در برانبارش به روش معمول CRS نیز از این پارامترها استفاده می‌شود.

جدول ۱-۵ : پارامترهای مورد استفاده در پردازش به روش CRS برای شبیه‌سازی مقطع دورافت صفر، مربوط به داده‌های Sigsbee2A (مَن، ۲۰۰۲)

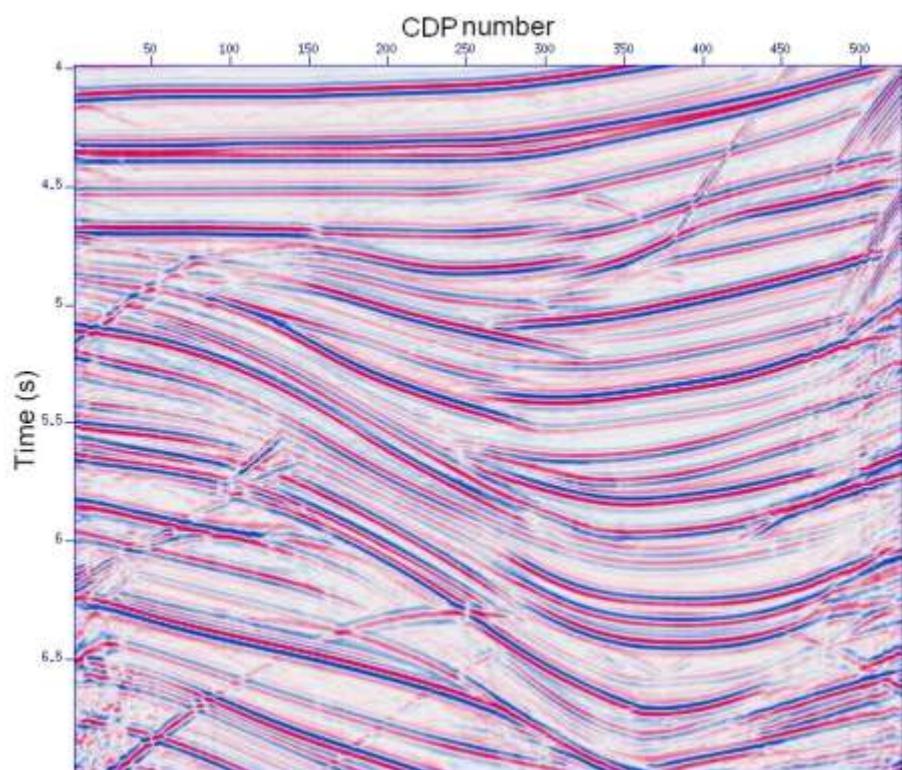
نوع پارامتر	پارامتر	مقدار
پارامترهای کلی	فرکانس غالب	۲۰ هرتز
	معیار همدوسي	شباهت
	داده‌های مورد استفاده در آنالیز همدوسي	ردلرزهای اصلی
	پهنهای زمانی نوار همدوسي	۵۶ میلی ثانیه
	سرعت لایه‌ی سطحی	۴۹۲۰ فوت بر ثانیه
سرعت و محدوده‌ی جستجوی آن	سرعت‌های برانبارش در جستجو	۴۵۰۰ تا ۲۰۰۰۰ فوت بر ثانیه
	زمان سیرهای ZO شبیه سازی شده	۴ تا ۷ ثانیه
	فاصله نمونه برداری زمانی در شبیه سازی	۴ میلی ثانیه
	تعداد ردلرزهای ZO شبیه سازی شده	۲۰۵۳
	فاصله بین ردلرزهای ZO در شبیه‌سازی	۳۷/۵ فوت
منطقه هدف	ZO	حداقل بازه ۱۷۰۰ فوت در ۲ ثانیه
	ZO	حداکثر بازه ۵۸۳۰ فوت در ۱۱ ثانیه
	CMP	حداقل بازه ۶۰۰۰ فوت در ۲/۳ ثانیه
	CMP	حداکثر بازه ۲۵۰۰ فوت در ۱۱ ثانیه
	ابعاد تعمیم بازه	%۳۰
تعیین بازه جستجوی	اولين افزایش برونزاند برای بزرگترین دورافت	۱۶ میلی ثانیه
	تعداد مراتب جستجو	۳
	باشه زاویه مورد جستجو	-۶۰ تا +۶۰ درجه
	مقدار افزایش گامزاویه‌های مورد جستجو	۱ درجه
	مراتب تکرار در بهینه کردن جستجو	۳
برانبارش خودکار ZO	اولين برونزاند برای بزرگترین فاصله ZO	۸ میلی ثانیه
	مراتب تکرار در بهینه کردن جستجو	۳
	اولين برونزاند نرمال برای بزرگترین دورافت	۸ میلی ثانیه
	مراتب تکرار در بهینه کردن جستجو	۳
	آستانه همدوسي برای کمترین زمان سیر	۰/۰۵
برانبارش هذلولوي در CS/CR	آستانه همدوسي برای بزرگترین زمان سیر	۰/۰۲
	حداکثر تعداد تکرار در جستجو	۱۰۰
	حداکثر انحراف نسبی برای توقف جستجو	۱۰ <sup>-۴</sup>
	تغییرات اولیه در زوایای ورودی	۶ درجه
	R <sub>NIP</sub> برای تغییرات اولیه	%۵
بهینه سازی محلی	R <sub>N</sub> تبدیل یافته برای تغییرات اولیه	۶ درجه
	R <sub>N</sub> تبدیل شعاع برای تغییرات اولیه	۳۵۰ فوت



شکل ۵-۵ : مقطع برانبارش CRS بهینه داده مصنوعی Sigsbee 2A. بخشی از داده های لرزه ای که در داخل کادر مستطیلی است برای پردازش انتخاب شده است.



شکل ۶-۵ : برانبارش CRS تقویت شده (AGC) کادر مستطیلی شکل (۴-۵)



شکل ۷-۵ : برانبارش بهینه CRS (من، ۲۰۰۲) تقویت شده (AGC) کادر مستطیلی شکل (۴-۵)

در این بخش مقاطع برانبارش CRS و CDS مربوط به این داده مصنوعی برای مقایسه با کارایی روش جدید، نشان داده شده اند. در برانبارش FO-CDS همانند روش CDS تنها یک مقطع برانبارش و یک مقطع از تعداد ردلرزهای استفاده شده در برانبارش، ایجاد خواهد شد. در این صورت تنها مقاطع برانبارش قابل مقایسه هستند. در روش برانبارش CRS که در سه مرحله انجام می‌شود نتایج مراحل میانی قابل مشاهده اند در صورتی که در راهبرد جدید ارائه شده همانند راهبرد CDS بطور مستقیم از حجم داده‌های پیش از برانبارش استفاده می‌شود و احتیاجی به مقاطع مربوط به مراحل میانی نیست.

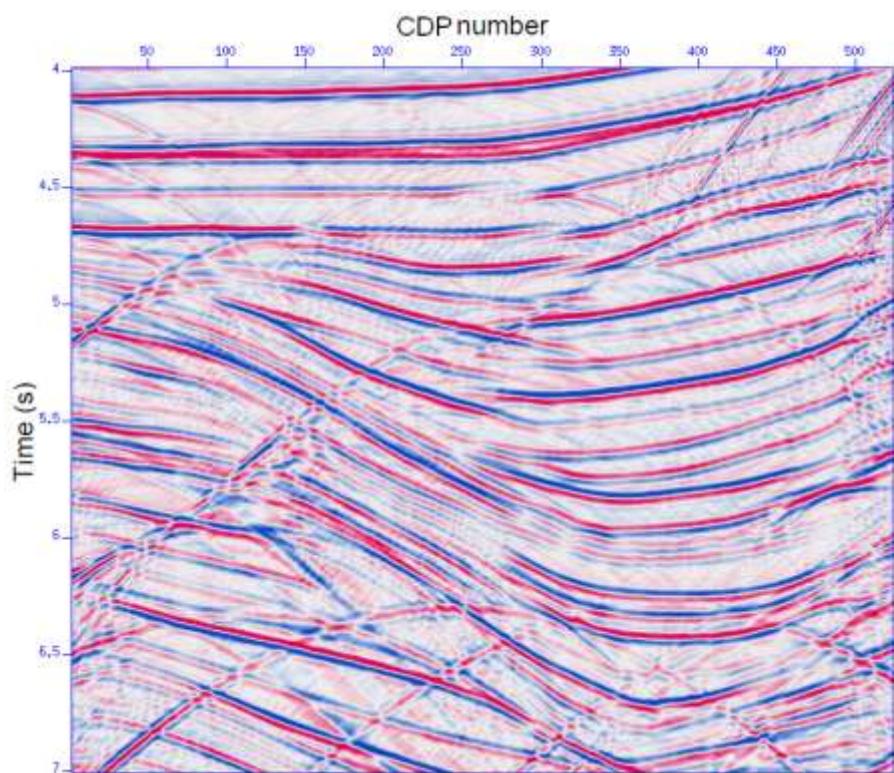
در برانبارش به روش FO-CDS بر روی داده‌های قبل از برانبارش Sigsbee 2A از بخشی از پارامترهایی که در پردازش CRS آن استفاده شده است، بهره گرفته می‌شود (جدول ۲-۵). به دلیل راهبرد متفاوت در پردازش CDS پارامترهای استفاده شده مربوط به مراحل برانبارش خودکار CMP، برانبارش دورافت صفر و مرحله‌ی بهینه سازی در نظر گرفته نمی‌شود. مقدار بازه همانند برانبارش CRS انتخاب شده است. پارامترهای مهم در این روش همانند برانبارش CDS تعیین بازه زاویه و گام افزایش زاویه می‌باشد در این صورت با افزایش بازه جستجو و کاهش گام افزایش زاویه، زمان پردازش افزایش خواهد یافت. با توجه به این که زمان پردازش در روش جدید بیشتر از پردازش به روش CRS است، تنها بخشی از داده مصنوعی مورد نظر که مسئله‌ی شبیه‌های متداخل در آن قسمت وجود دارد برای پردازش در نظر گرفته شده است. داده‌های انتخاب شده از سمت چپ مقطع اصلی و از CDP شماره ۲۵ تا CDP شماره ۵۵۰ و در محور زمان از زمان ۴ ثانیه تا ۷ ثانیه برای پردازش تعیین شده است(شکل ۵-۵). در انتهای مقطع بدست آمده با مقاطع حاصل شده از سایر روش‌ها مقایسه خواهد شد. همانطور که در بخش قبل گفته شد، مسئله‌ی مهمی که در این روش وجود دارد و تنها وجه تمایز آن با روش CDS است انتخاب گام افزایش دورافت است که در این مورد به دلیل زمان بر بودن پردازش، تنها برای یک گام دورافت بمنظور پردازش در قسمتی از داده مصنوعی (شکل ۵-۵) در نظر گرفته شده است. برای بررسی عملکرد روش جدید در گام‌های دیگر تنها از بخش ابتدایی این قسمت از داده مصنوعی استفاده می‌شود. در این پردازش بازه زاویه از  $-60^{\circ}$  تا  $+60^{\circ}$  درجه و گام افزایش یک درجه می‌باشد.

جدول ۲-۵: پارامترهای مورد استفاده در پردازش به روش CDS برای شبیه‌سازی مقطع دورافت صفر، مربوط به بخشی از داده‌های Sigsbee2A

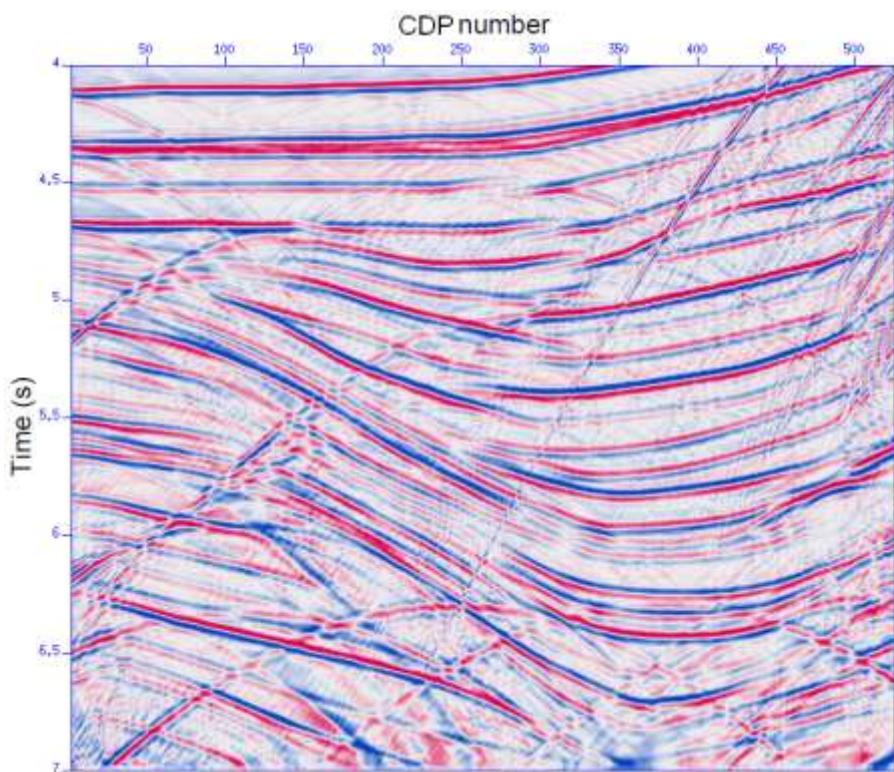
نوع پارامتر	پارامتر پردازش	مقدار
پارامترهای عمومی	فرکانس غالب	۲۰ هرتز
	معیار همدوسی	شباهت
	داده‌های مورد استفاده در آنالیز	ردلرزهای اصلی
	عرض نوار همدوسی	۵۶ میلی ثانیه
	سرعت نزدیک سطح	۴۹۲۰ فوت بر ثانیه
	سرعت برانبارش تحت جستجو	۴۰۰۰ تا ۲۰۰۰۰ فوت بر ثانیه
	زمان سیر شبیه سازی شده در ZO	۴ تا ۷ ثانیه
	فاصله نمونه برداری در شبیه سازی	۸ میلی ثانیه
	تعداد ردهای شبیه سازی شده در ZO	۵۲۶
	فاصله بین ردها در شبیه سازی ZO	۳۷/۵ فوت
منطقه هدف	ZO	حداقل بازه ۴۰۰ فوت در ۴ ثانیه
	ZO	حداکثر بازه ۱۰۰۰۰ فوت در ۷ ثانیه
	CMP	حداقل بازه ۱۰/۴ فوت در ۷ ثانیه
	CMP	حداکثر بازه ۲۵۸۷۵ فوت در ۷ ثانیه
	ابعاد تعیین بازه	٪۳۰
	مراقب تکرار در بهینه کردن جستجو	۳
	بازه زاویه مورد جستجو	۶۰- تا ۶۰+ درجه
	گام افزایش زاویه‌های مورد جستجو	۱ درجه
	فرکانس جستجو در ورداشت انفجاری	۲ میلی ثانیه
	زمان پردازش	۳۳۶ ساعت
پارامترهای CDS	نیم دورافت اولیه در پردازش به روش CDS می‌باشد. مقطع برانبارش نهایی در شکل (۹-۵) نشان داده شده است.	۱۰۵ تا ۵۵۰ مورد پردازش قرار گرفت. محدودهٔ دورافت تعیین شده در این پردازش هشت برابر کوچکتر از قسمت چپ و بالای داده Sigsbee 2A در محدودهٔ زمانی بین ۴ ثانیه تا ۷ ثانیه و در بازه CDP بین

## ۱-۵-۵ نتایج برانبارش CDS و FO-CDS

نیم دورافت اولیه در پردازش به روش CDS می‌باشد. مقطع برانبارش نهایی در شکل (۹-۵) نشان داده شده است. ۲۵ تا ۵۵۰ مورد پردازش قرار گرفت. محدودهٔ دورافت تعیین شده در این پردازش هشت برابر کوچکتر از قسمت چپ و بالای داده Sigsbee 2A در محدودهٔ زمانی بین ۴ ثانیه تا ۷ ثانیه و در بازه CDP بین



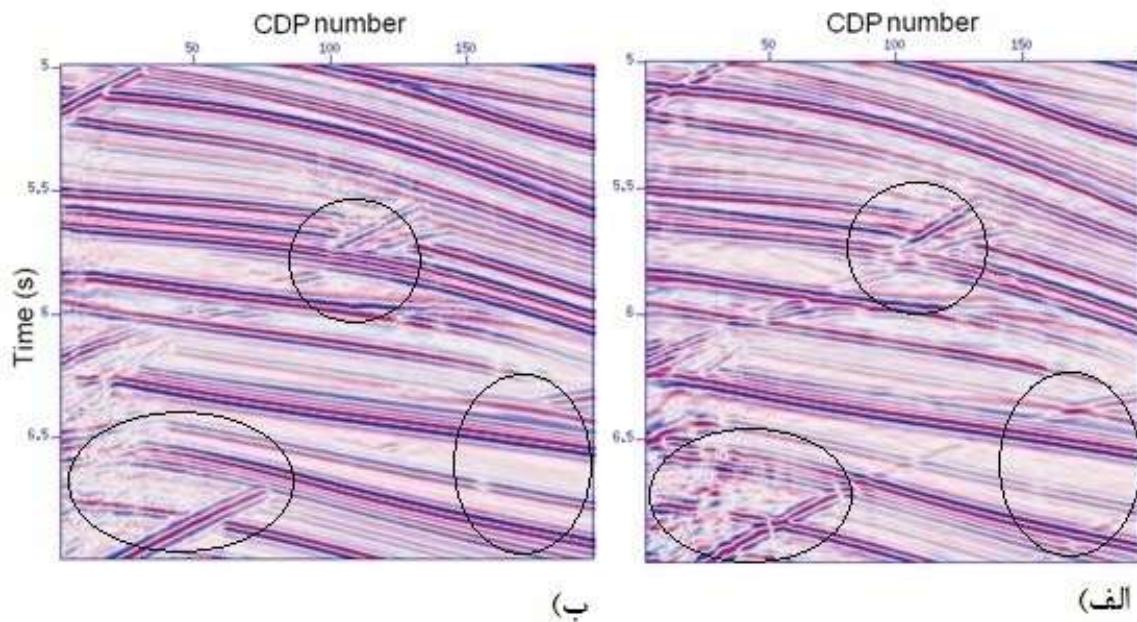
شکل ۸-۵ : مقطع برانبارش CDS تقویت شده (AGC) کادر مستطیلی شکل (۴-۵) (سلیمانی، ۱۳۸۸).



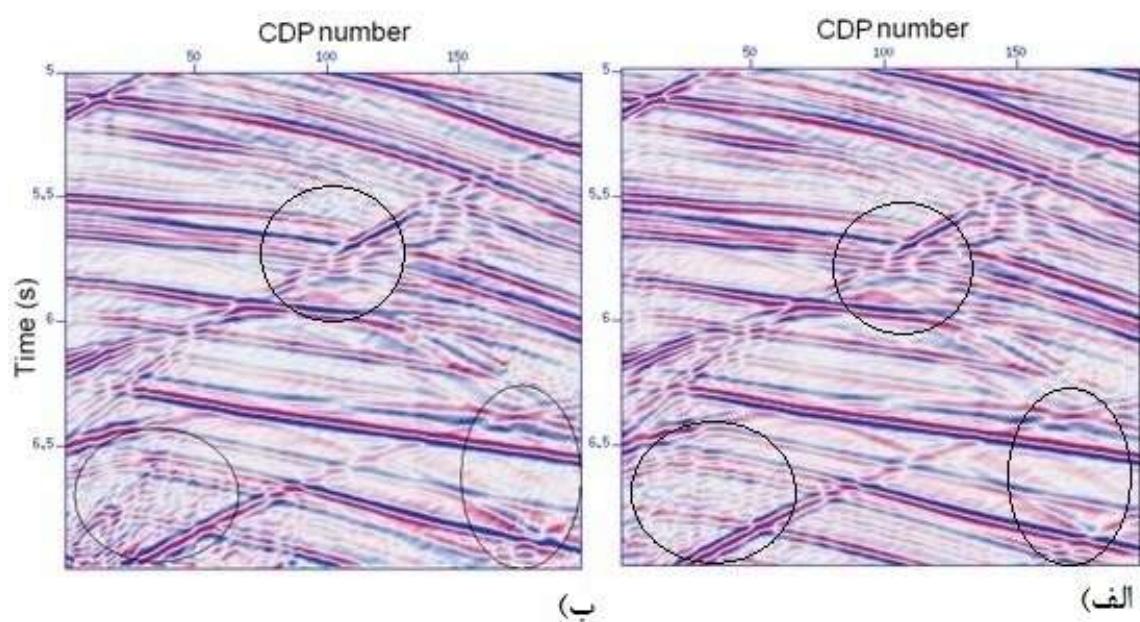
شکل ۹-۵ : مقطع برانبارش FO-CDS تقویت شده (AGC) کادر مستطیلی شکل (۴-۵).

همانطور که مشاهده می شود پیوستگی بازتابها همانند برانبارش CDS بخوبی حفظ شده است و جزئیات بیشتری از بازتابها را نسبت به برانبارش CDS نمایش می دهد. در این مورد برای آشکار کردن تفاوت عملکرد راهبرد برانبارش FO-CDS نسبت به برانبارش CDS با بیرون کشیدن مقاطع کوچکتر از مقاطع اصلی و با نمایش بوسیله دو رنگ متفاوت، سعی می شود درک بهتری از عملکرد روش جدید فراهم شود. با این وجود آنچه که در شکل های (۸-۵) و (۹-۵) مشخص است این است که هر دو روش در آشکارسازی پراشها که توسط بازتابهای قوی پوشانده شده اند، از روش برانبارش CRS شکل (۶-۵) قوی تر عمل کرده اند. آنچه که در شکل (۹-۵) بارزتر است، پراشها سمت راست و بالای مقطع می باشد که در واقع ادامه ی پراشها گنبد نمکی در شکل (۵-۵) است. دنباله بعضی از این پراشها تا انتهای مقطع یعنی تا زمان ۷ ثانیه ادامه دارد. در صورتی که این پراشها در شکل (۸-۵) پنهان بوده اند. در این صورت روش بهبود یافته، عملکرد مناسب تری در آشکارسازی پراشها که در واقع اساس روش برانبارش CDS است دارد و در نتیجه می توان تصور نمود که با حفظ انرژی این نقاط پراش در مقطع برانبارش، در صورت إعمال کوچ کیرشهف این نقاط بخوبی تصویر خواهند شد. شکل (۱۰-۵) نشان دهنده ی بخشی از مقطع بدست آمده از روش برانبارش توسعه یافته CRS (من، ۲۰۰۲) و برانبارش به روش معمول CRS است. همانطور که در این شکل مشاهده می شود، روش برانبارش توسعه یافته ی CRS توانسته در به تصویر درآوردن پراشها و همچنین در مواجه با شبیه های متداخل از روش معمول CRS بهتر عمل کند.

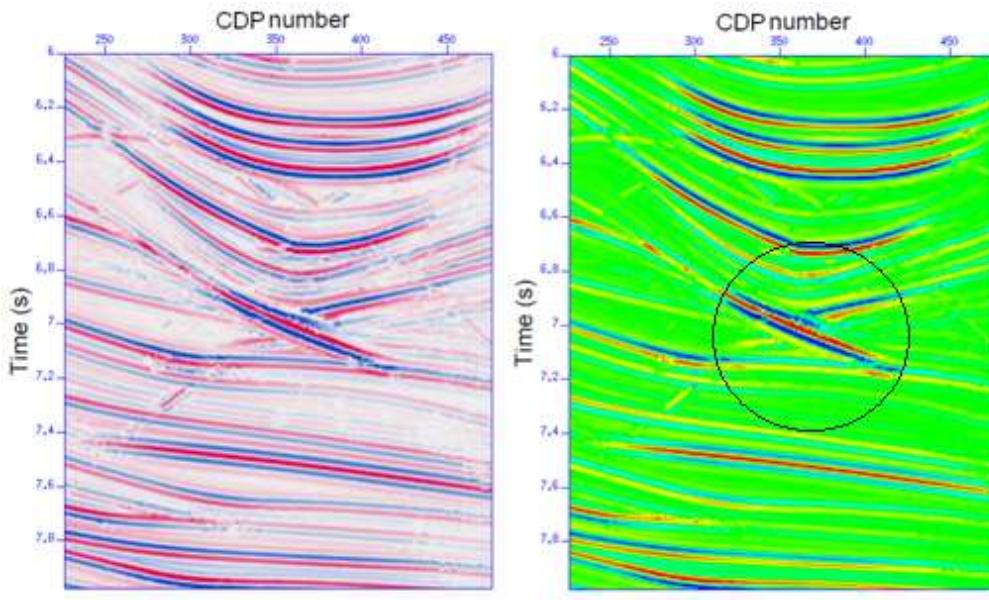
در شکل (۱۱-۵) به جزء بخش های انتهایی تصویر در قسمت (ب) که مربوط به برانبارش بهبود یافته ی CRS است تصاویر بدست آمده تفاوت چندانی ندارند. اعوجاج های بوجود آمده در بخش پایینی سمت چپ تصویر (ب) به دلیل آشکار شدن دنباله پراشها قسمت بالایی داده Sigsbee 2A است.



شکل ۱۰-۵ : مقاطع کوچکی از داده‌های برانبارش شده Sigsbee 2A (الف) مقطع برانبارش توسعه یافته CRS. ب) مقطع برانبارش معمول CRS

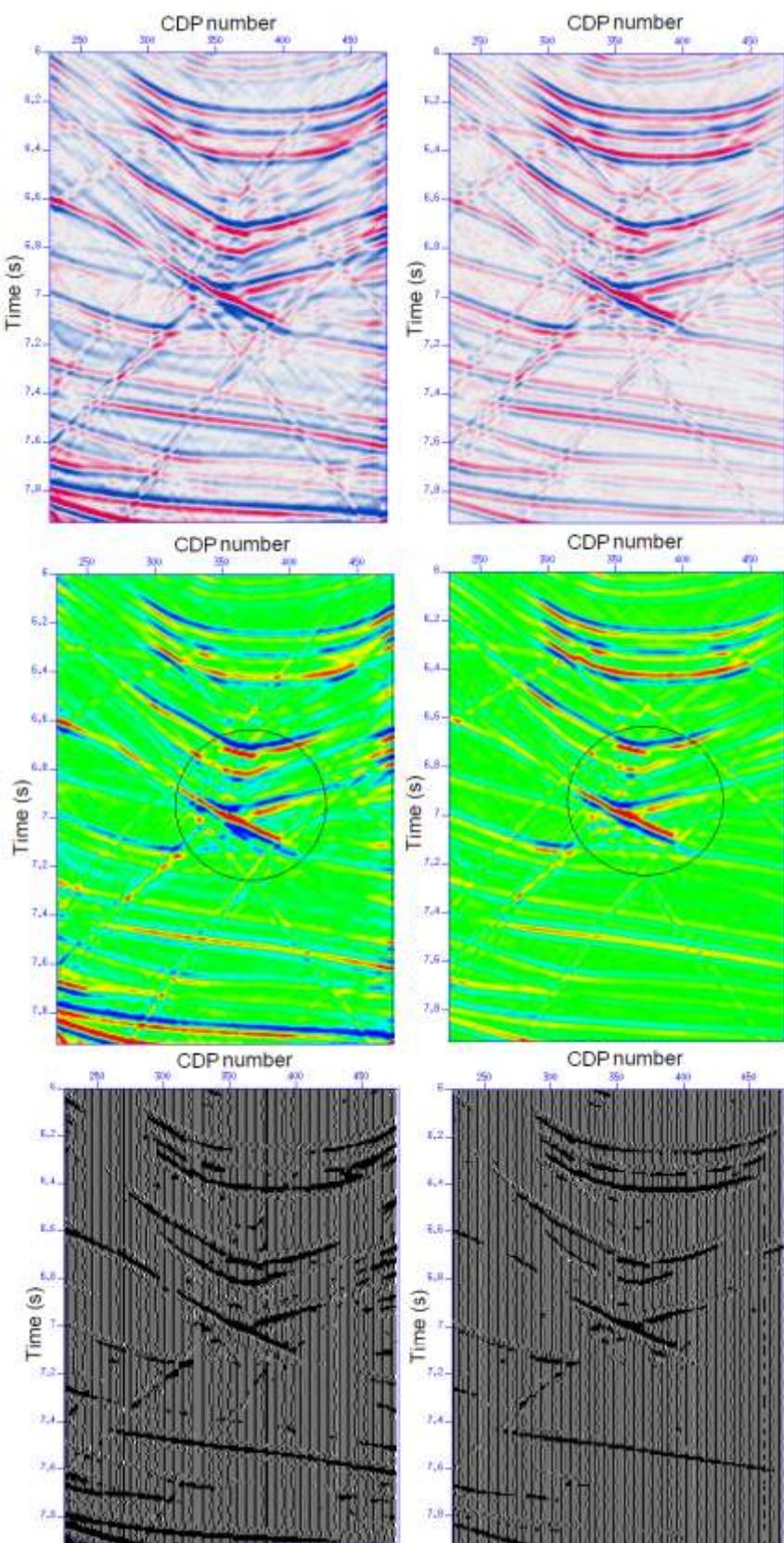


شکل ۱۱-۵ : مقاطع کوچکی از داده‌های برانبارش شده Sigsbee 2A (الف) مقطع برانبارش CDS. ب) مقطع برانبارش .CDS



شکل ۱۲-۵ : مقطع کوچکی از برانبارش CRS داده‌های مصنوعی. نحوه عملکرد برانبارش CRS در مواجهه با شیب‌های متداخل.

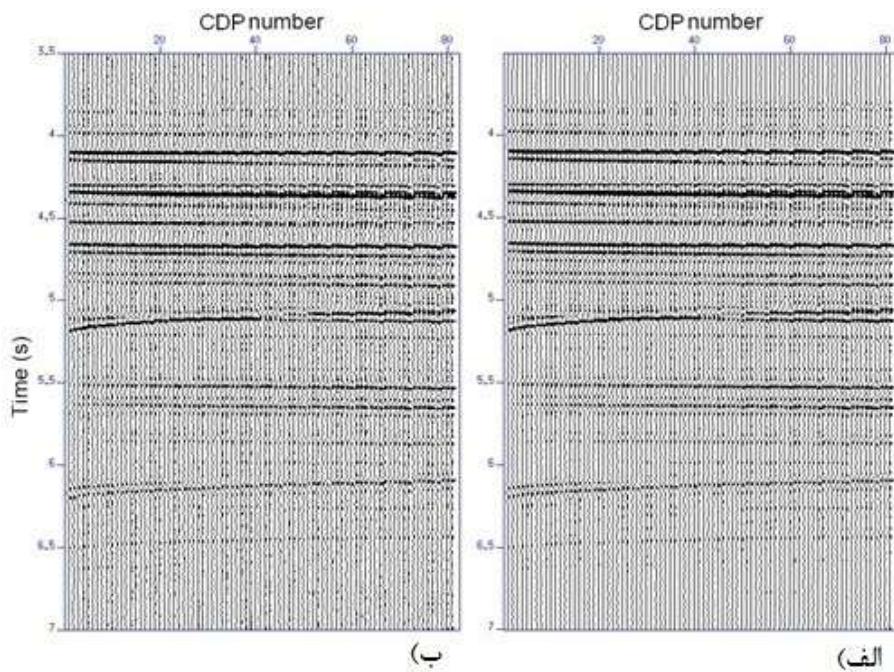
شکل (۱۳-۵) عملکرد راهبرد جدید را بهتر بیان می‌کند. این قسمت از داده‌ی Sigsbee 2A به منظور بررسی عملکرد روش جدید در مقایسه با روش برانبارش CDS در مواجهه با شیب‌های متداخل در نظر گرفته شده است. مقطع کوچک برانبارش FO-CDS موجود در این شکل با اندازه دورافت بسیار کوچکتر از مقطع اصلی در شکل (۹-۵) به دست آمده است. محدوده دورافت  $1/240$  نیم دورافت بکارفته در برانبارش CDS است و محدوده زاویه بین  $-40^\circ$  تا  $+40^\circ$  درجه انتخاب شده است. به منظور درک بهتر عملکرد روش جدید نسبت روش برانبارش CDS از تصاویر رنگی متفاوتی بهره گرفته شده است. با مقایسه شکل های (۱۲-۵) و (۱۳-۵) در می‌یابیم که روش‌های برانبارش CDS و FO-CDS توانسته اند مسئله‌ی شیب‌های متداخل را در برانبارش CRS حل کنند، این در حالی است که پیوستگی بازتابها نیز در شکل (۱۳-۵) در مقایسه با شکل (۱۲-۵) بخوبی حفظ شده اند. با مقایسه‌ی تصاویر میانی شکل (۱۳-۵) مشاهده می‌شود که در تصویرمربوط به برانبارش بهبود یافته CDS جزئیات بیشتری از بازتابها مشخص شده است که این می‌تواند به دلیل انتخاب بازه دورافت کوچک باشد که در نتیجه آن برانبارش دامنه‌ها بخوبی صورت گرفته است. همانطور که در این تصویر دیده می‌شود در روش بهبود یافته در حواشی مقطع، بازتابها بخوبی نشان داده شده اند در حالی که در تصویرمربوط به برانبارش CDS



شکل ۱۳-۵ : مقاطع برانبارش کوچک از داده‌های Sigsbee 2A به منظور بررسی کارایی روش جدید در مواجهه با شیوه‌های متداخل. سمت چپ) FO-CDS . سمت راست) CDS.

بازتاب‌ها به سختی دیده می‌شوند بطور مثال بازتابی که ثانیه‌ی ۷/۸ در تصویر مربوط به راهبرد جدید بسیار برجسته‌تر از تصویر مربوط به برانبارش CDS است.

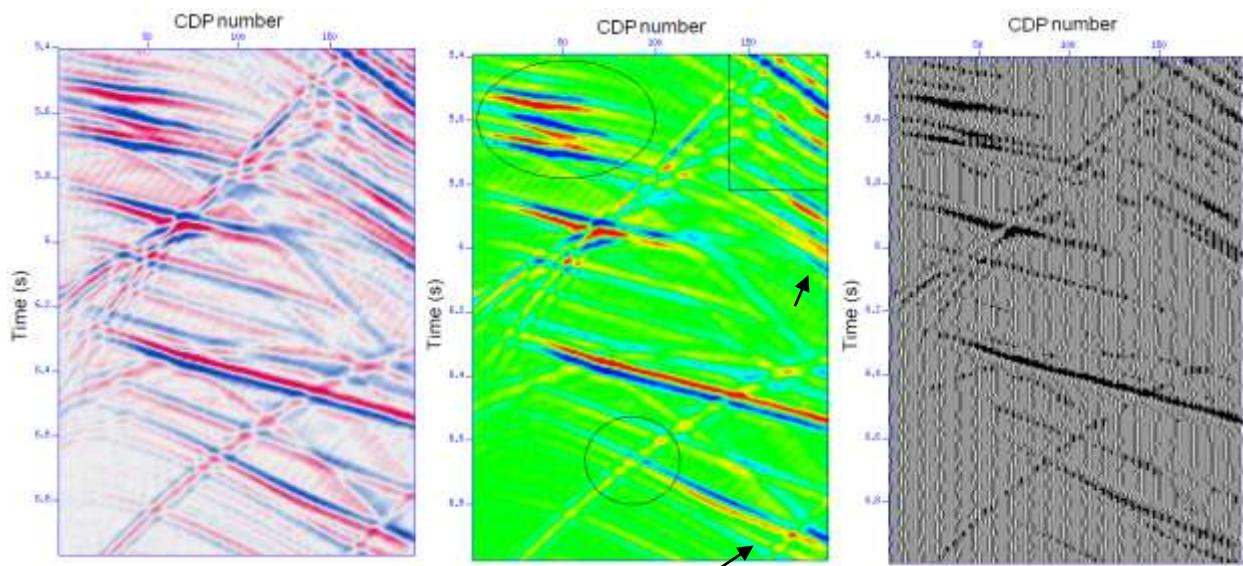
در ادامه با اضافه کردن نوفه از نوع گاووسی<sup>۱</sup> دربخشی از داده‌های Sigsbee 2A بطوری که نسبت سیگنال به نوفه‌ی در داده‌ها برابر ۲۰ باشد و با اعمال عملگر برانبارش FO-CDS بر این قسمت از داده‌ها، چگونگی عملکرد این روش در دورافت‌های محدود متفاوت و نحوه‌ی رفتار آن در مواجه با نوفه‌ها در این دورافت‌ها بررسی می‌شود. شکل (۱۴-۵) بخش در نظر گرفته شده از داده مصنوعی را نشان می‌دهد که به آن نوفه اضافه شده است.



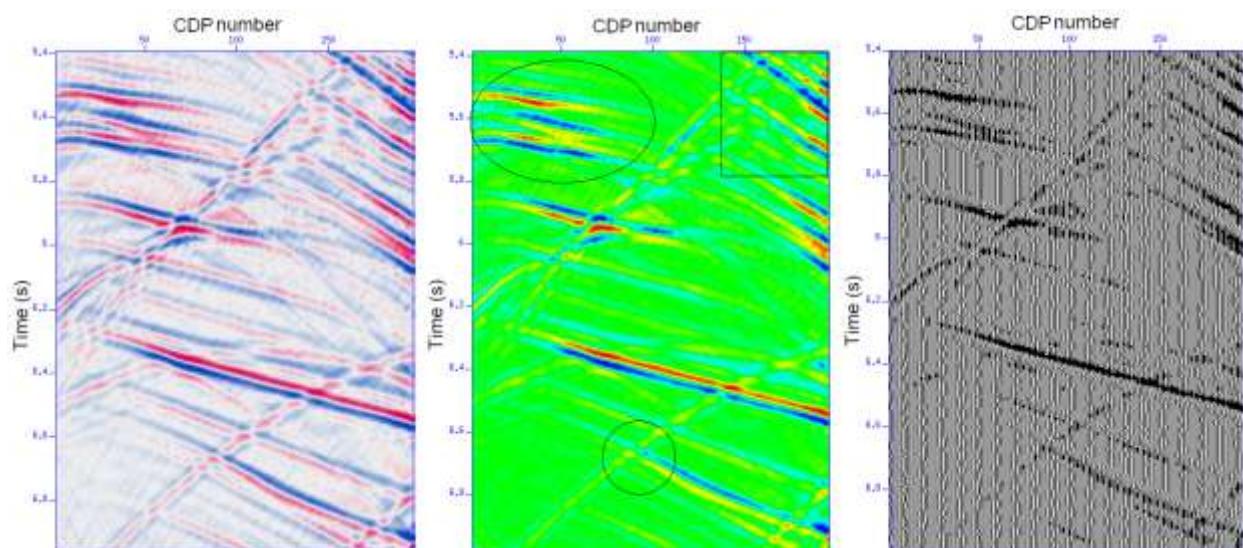
شکل ۱۴-۵ : (الف) بخشی از داده‌های مصنوعی. (ب) داده (الف) بعد از اضافه کردن نوفه، نسبت سیگنال به نوفه ۲۰ می‌باشد. با مقایسه مقطع برانبارش CDS بخشی از داده‌ی مصنوعی (شکل ۱۵-۵) بدون حضور نوفه با مقطع برانبارش CDS آن، در حضور نوفه بطوریکه نسبت سیگنال به نوفه در داده مورد پردازش ۲۰ باشد (شکل ۱۶-۵) درمی‌یابیم که اگر داده مورد پردازش قدری نوفه بهمراه داشته باشد چگونه بر کارایی روش برانبارش CDS تاثیر می‌گذارد و مانع از تصویر سازی مطلوب در این روش می‌شود. همانطور که در شکل (۱۶-۵)

<sup>۱</sup>Gaussian

مشاهده می شود رخدادهای بازتابی برجستگی مورد نظر را در برانبارش CDS به دلیل حضور نوفه از دست داده اند و رخدادهای پراش نیز در شکل (۱۶-۵) نسبت به مقطع برانبارش داده های بدون نوفه شکل (۵-۱۵) از آشکار سازی مطلوبی برخوردار نمی باشند.



شکل ۱۵-۵: مقطع برانبارش CDS بخشی از داده های Sigsbee 2A. بدون اضافه کردن نوفه.

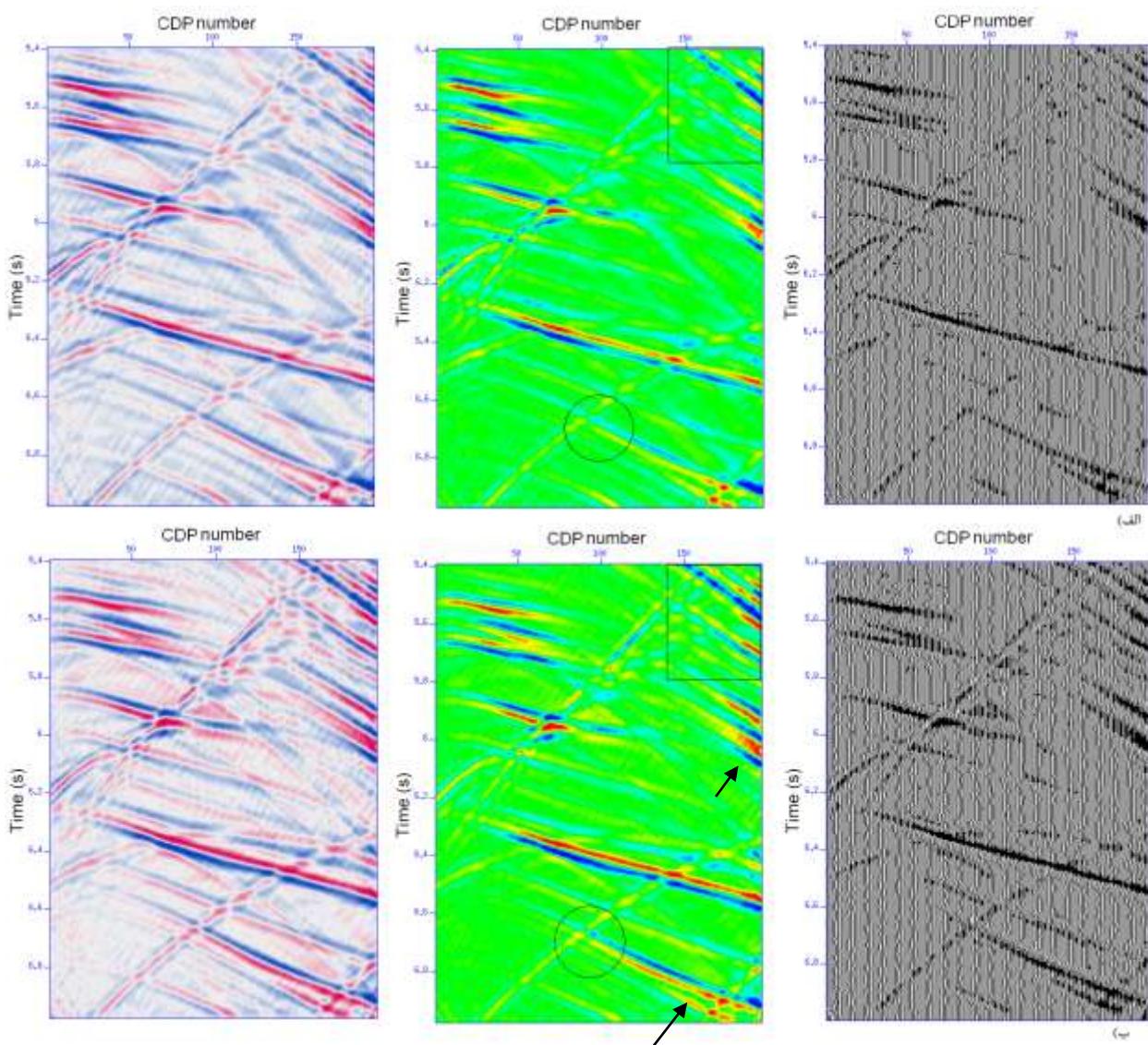


شکل ۱۶-۵ : مقطع برانبارش CDS بخشی از داده های Sigsbee 2A . بعد از اضافه کردن نوفه.

حال با در نظر گرفتن شرایط ایجاد شده در مقطع برانبارش CDS به دلیل حضور نوفه در داده های لرزه ای به بررسی این شرایط در روش برانبارش FO-CDS خواهیم پرداخت. بنابراین با آزمایش محدوده دورافت

های کوچکتر عملکرد عملگر برانبارش جدید را بر داده‌های مصنوعی Sigsbee 2A ارزیابی خواهیم کرد.

در شکل (۱۷-۵) محدوده دورافت های ۸۰ و ۲۴۰ برابر کوچکتر از نیم دورافت برانبارش CDS، برای برانبارش FO-CDS در این پردازش انتخاب شده است. همانطور که در شکل (۱۶-۵) مشاهده می‌شود هر چه بازه دورافت برانبارش کوچکتر انتخاب شود اثر نویه‌ها در برانبارش کمتر و در پی آن آشکار سازی رخدادهای پراش بهتر صورت گرفته و همچنین جزئیات بیشتری از وقایع بازتابی به تصویر در خواهد آمد.



شکل ۱۷-۵: اعمال برانبارش بر بخشی از داده‌های Sigsbee 2A (شکل ۱۶-۵) بعد از اضافه کردن نویه. نسبت سیگنال به نویه در این داده‌ها ۲۰ می‌باشد. الف) مقطع برانبارش FO-CDS، گام بازه دورافت در حدود ۱/۸۰ دورافت در نظر گرفته شده در برانبارش CDS است. ب) مقطع برانبارش FO-CDS، گام بازه دورافت در حدود ۱/۲۴۰ دورافت در نظر گرفته شده در برانبارش CDS است.

با مقایسه شکل (۱۷-۵) و شکل (۱۵-۵) در می یابیم که با انتخاب بازه دورافت مناسب مقطع برانبارش دورافت محدود در داده‌هایی که آغشته به نوفه است تفاوت چندانی با مقطع برانبارش CDS آن که عاری از نوفه بوده ندارد و حتی در بعضی از نواحی که با پیکان نشان داده شده، نسبت به برانبارش CDS بهتر عمل کرده است.

## ۶-۵ نتیجه برانبارش FO-CDS بر داده واقعی

برای پردازش در این مرحله از داده‌های ویرایش شده‌ی آن که مجدداً بین بندی شده استفاده شده است. با در نظر گرفتن طول خط برداشت طولانی داده لرزه‌ای، در حدود ۳۵ کیلومتر و زمان ضبط داده که ۷ ثانیه بوده است و اینکه در تمامی محدوده‌ی زمانی می‌بایستی پردازش انجام می‌شد، زمان پردازش بسیار افزایش می‌یافتد به همین دلیل ابتدا داده به دو بخش تقسیم شد و سپس پردازش به صورت مجزا بر هر قسمت از داده صورت گرفت. بخش اول از نقطه‌ی عمقی مشترک ابتدایی تا نقطه‌ی عمقی مشترک شماره ۱۰۰۰ ختم می‌شود و بخش دوم نیز شامل نقاط عمقی مشترک بین شماره ۱۰۰۱ تا ۲۰۱۰ می‌باشد.

محدوده‌ی جستجوی زاویه برای این پردازش بین  $60^{\circ}$ - $60^{\circ}$  درجه تا  $60^{\circ}$ + می‌باشد. بازه افزایش زاویه همانند پردازش متناظرش در روش برانبارش CDS یک درجه انتخاب شده است. بازه دورافت محدود در این پردازش نیز مانند پردازش داده‌ی Sigsbee 2A در حدود هشت برابر کوچکتر از نیم دورافت اولیه بکار رفته در پردازش CDS می‌باشد. سایر پارامترهای برانبارش در جدول (۳-۵) آورده شده است. این داده در مقایسه با داده‌ی Sigsbee 2A از پیچیدگی ساختاری کمتری برخوردار است و نسبت به بخشی از داده Sigsbee 2A که برای پردازش به روش برانبارش FO-CDS در نظر گرفته شده، از تعداد پراش‌های کمتری برخوردار است. همانطور که انتظار می‌رفت در مقطع برانبارش خروجی این پردازش شکل (۱۹-۵)، همانند همتای آن در برانبارش CDS (شکل ۴-۲۹)، رخدادهای پراش در مقایسه با مقطع بدست آمده از روش برانبارش به روش CRS (شکل ۴-۲۶) بخوبی آشکار شده‌اند. وجود گسل‌های متعدد در لایه‌های سطحی و در پی آن پراش انرژی در این نواحی سبب شده برانبارش CRS به دلیل نوع راهبرد جستجو این روش در مسئله‌ی

شیب‌های متداخل، برخلاف روش‌های برنبارش CDS و FO-CDS در آشکارسازی گسل‌ها و همچنین در مواجه با شیب‌های متداخل در این مناطق به خوبی عمل نکند. علاوه بر این با وجود اینکه نسبت سیگنال به نویفه مقطع برانبارش بدست آمده در این روش نسبت به برانبارش CRS کمتر است، بازتاب‌ها نیز در مقایسه با برانبارش CRS دارای پیوستگی خوبی هستند.

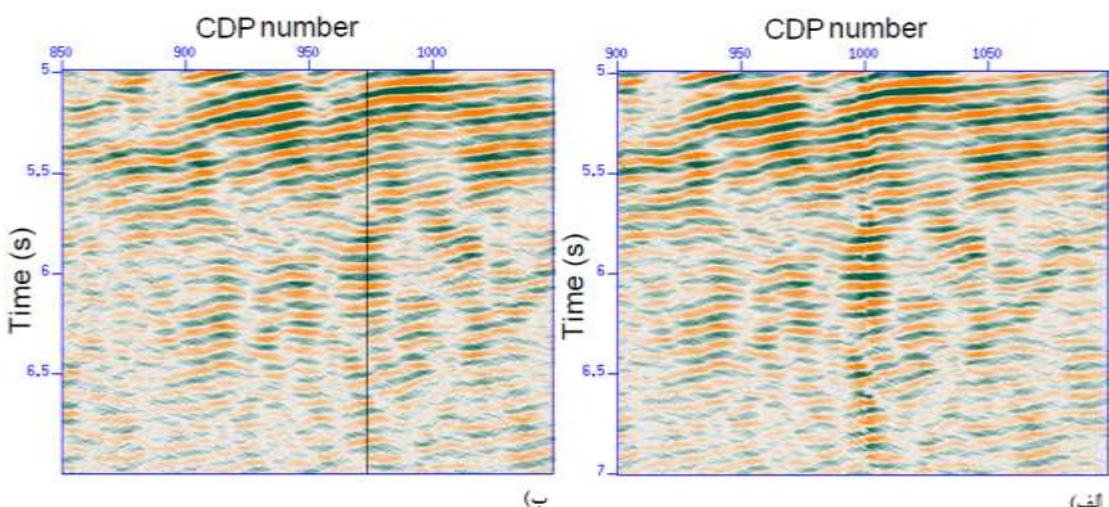
جدول ۳-۵ : پارامترهای پردازش FO-CDS برای شبیه سازی مقطع دورافت صفر مربوط به داده‌های واقعی

نوع پارامتر	پارامتر پردازش	مقدار
پارامترهای عمومی	فرکانس غالب	۲۰ هرتز
	معیار همدوسی	شباهت
	داده‌های مورد استفاده در آنالیز	ردلرزهای اصلی
	عرض نوار همدوسی	۵۶ میلی ثانیه
سرعت و مرزهای جستجوی سرعت بهینه	سرعت نزدیک سطح	۱۵۰۰ متر بر ثانیه
	سرعت برانبارش تحت جستجو	۲۰۰۰ تا ۵۰۰۰ متر بر ثانیه
منطقه هدف	زمان سیر شبیه سازی شده در ZO	۰ تا ۷ ثانیه
	فاصله نمونه برداری در شبیه سازی	۴ میلی ثانیه
	تعداد ردۀای شبیه سازی شده در	۲۰۱۰
	فاصله بین ردۀا در شبیه سازی ZO	۱۷/۵ متر
بازه جستجوی بین ردۀا	ZO	۱۰۰ متر در ۰/۴ ثانیه
	ZO	۲۵۰۰ متر در ۷ ثانیه
	CMP	۱۴۰ متر در ۰/۵ ثانیه
	CMP	۳۴۵۰ متر در ۷ ثانیه
	ابعاد تعمیم بازه	%۳۰
	مراتب تکرار در بهینه کردن جستجو	۳
پارامترهای CDS	بازه زاویه مورد جستجو	-۶۰ تا +۶۰ درجه
	گام افزایش زاویه‌های مورد جستجو	۱ درجه
	فرکانس جستجو در ورداشت انفجاری	۲ میلی ثانیه
	زمان پردازش	۲۴۰ ساعت

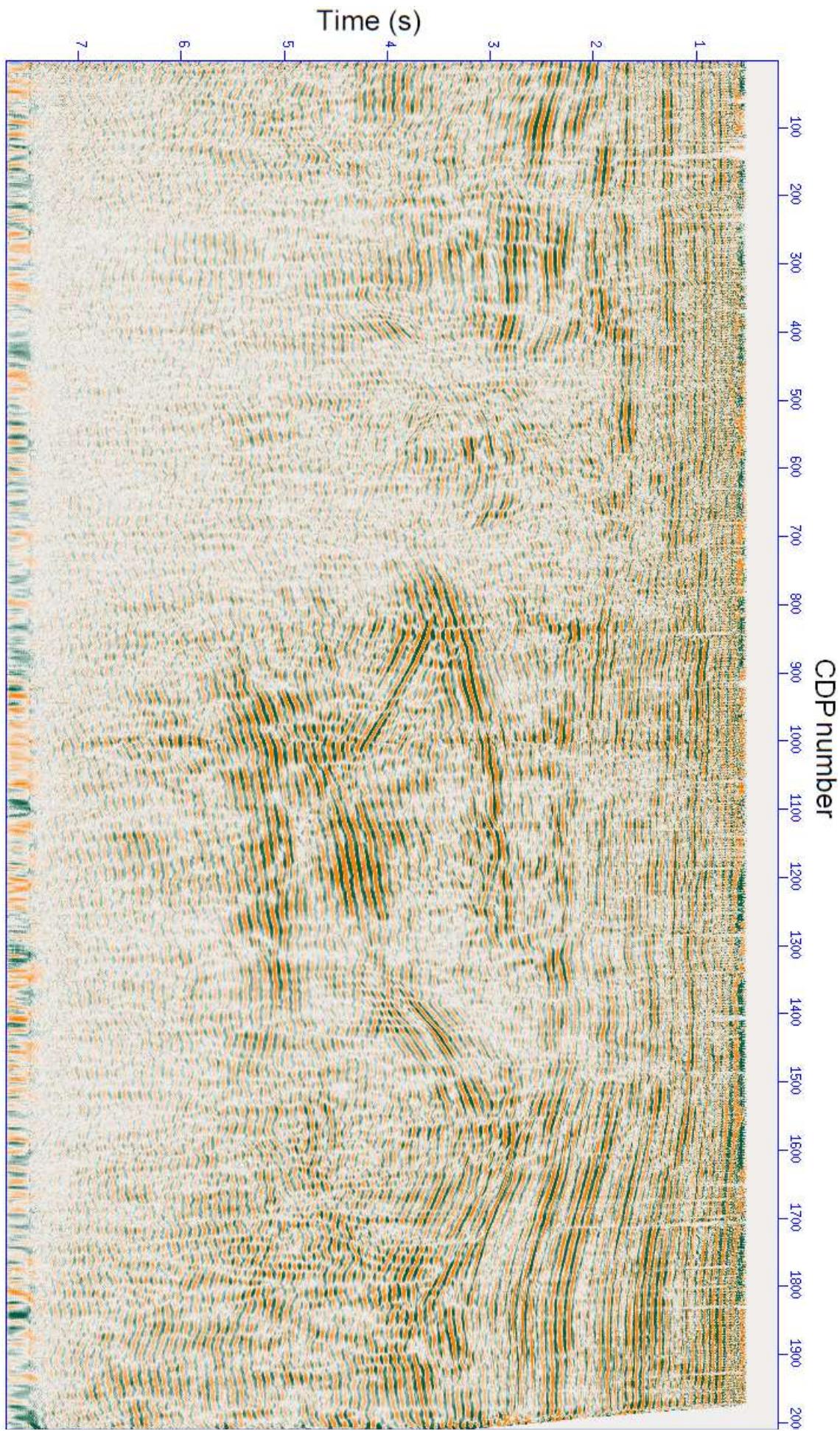
در محل اتصال دو قسمت از مقطع برانبارش که به صورت جداگانه پردازش شده در نقطه‌ی عمقی مشترک شماره ۱۰۰۰ در شکل (۱۹-۵)، ملاحظه می‌شود که بازتاب‌ها نسبت به برانبارش CDS آن که به صورت یکپارچه پردازش شده از برجستگی و پیوستگی بهتری برخوردارند. برای بررسی علت این موضوع می‌توان به شکل (۱۳-۵) مراجعه کرد. زیرا همانطور که در این شکل مشاهده می‌شود، روش جدید در نقاط عمقی مشترک ابتدایی و انتهایی مقطع عملکرد بهتری از روش برانبارش CDS داشته است. شکل (۱۸-۵) مقطع کوچکی از محل اتصال دو قسمت از داده که به صورت مجزا پردازش شده اند را نشان می‌دهد.

الف) مقطع کوچکی از محل اتصال دو قسمت از داده که به صورت مجزا پردازش شده اند را نشان می‌دهد.

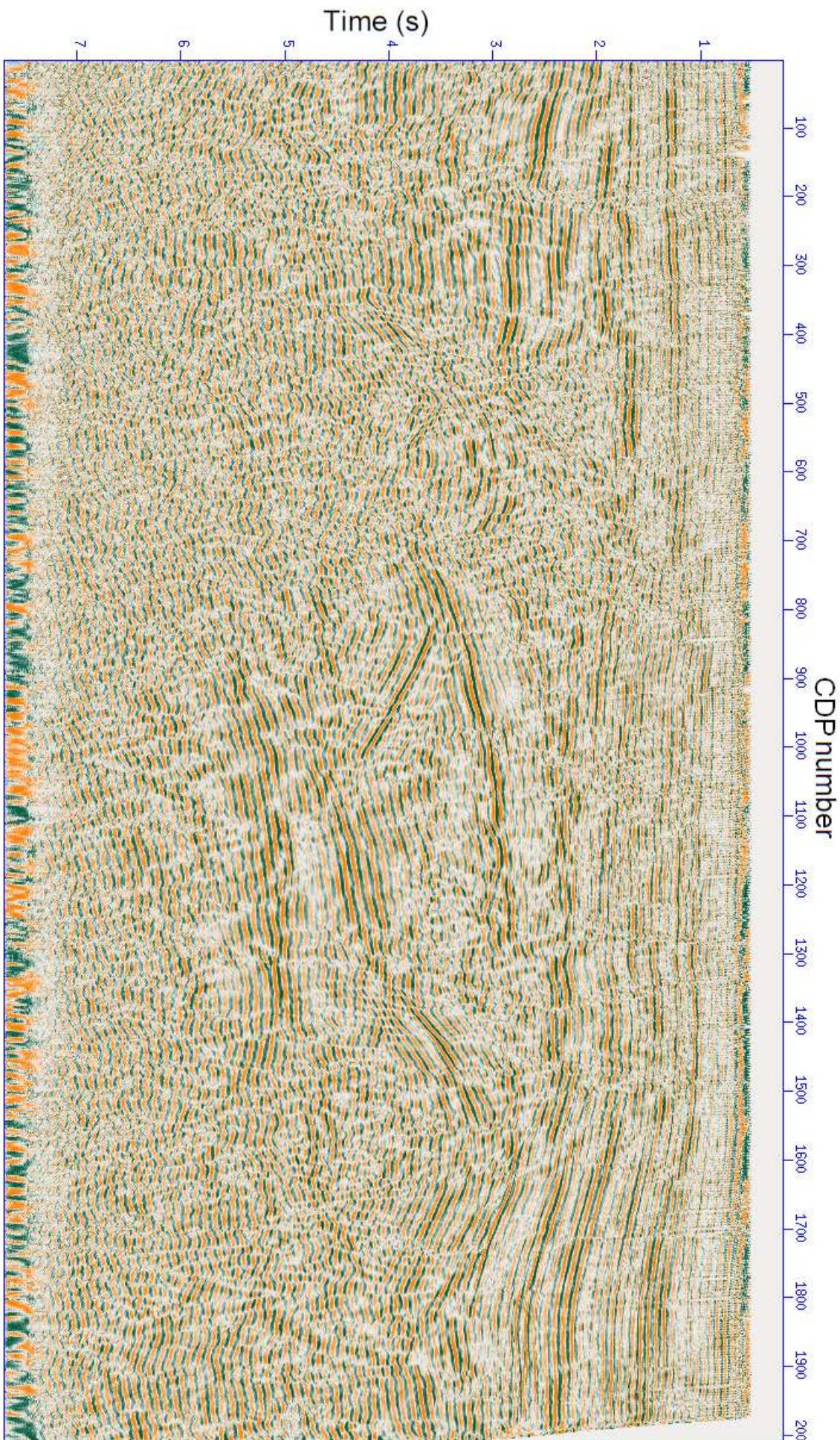
شکل (۱۸-۵ ب) از مقطع برانبارش به روش CDS برای مقایسه با این محدوده آورده شده است. محل اتصال این دو قسمت در داده‌ی قدیمی که به روش CDS پردازش شده، بوسیله‌ی یک خط در شکل (۱۸-۵ ب) مشخص شده است.



شکل ۱۸-۵ : الف) مقطع کوچکی از برانبارش FO-CDS مربوط به داده‌های واقعی. ب) مقطع کوچکی از برانبارش CDS مربوط به داده‌های واقعی.



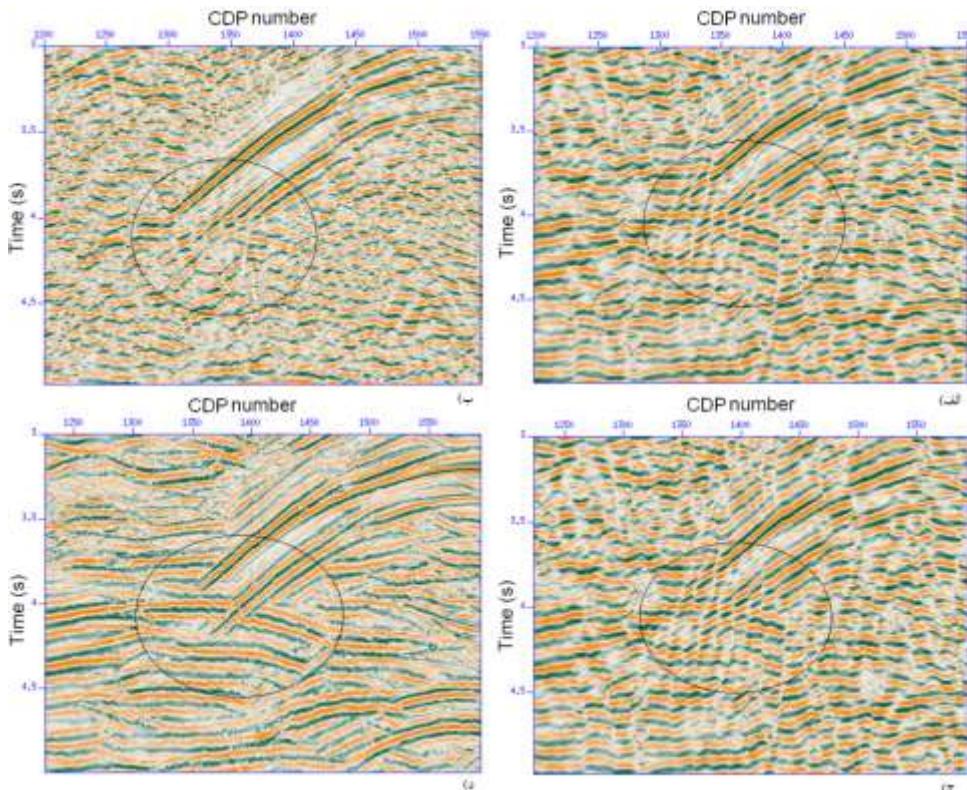
۱۹-۵ : مقطع برانبارش FO-CDS مربوط به داده های واقعی. گام بازه دورافت در حدود  $1/8$  دورافت در نظر گرفته شده  
د. دان. ش. CDS است.



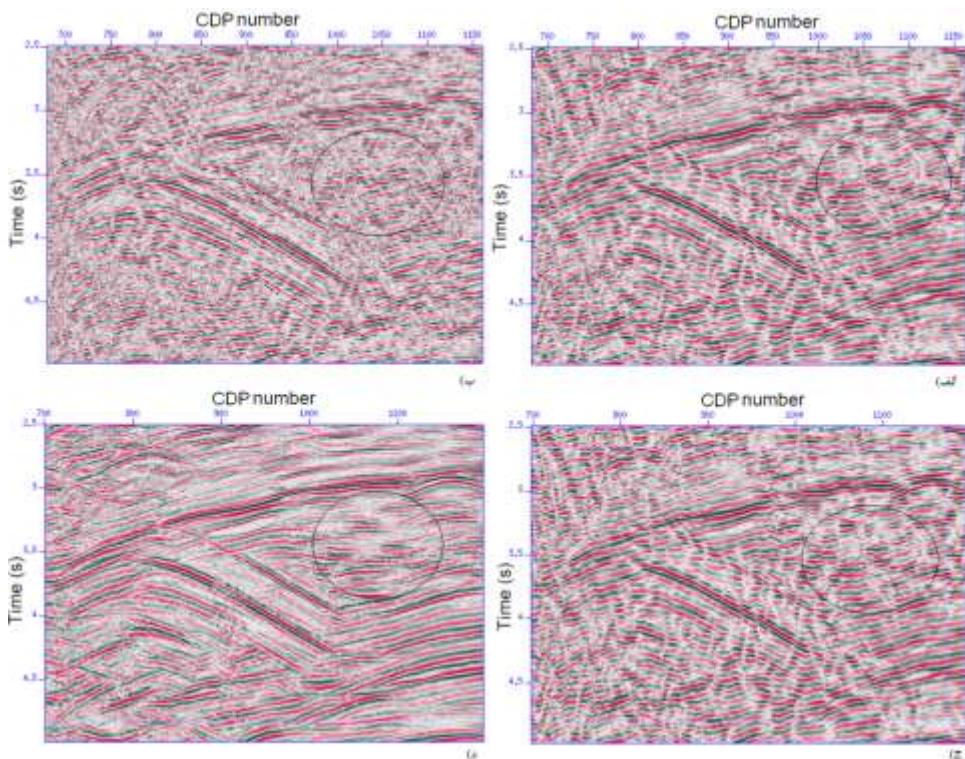
٢٠-٥ : مقطع برانبارش تقویت شده (AGC) شکل (١٣-٥).

با نگاه کلی به شکل (۱۹-۵) می‌توان مطالب زیر را عنوان کرد:

لایه‌های سطحی تا زمان  $1/8$  ثانیه تقریباً افقی بوده و از CDP شماره ۱۵۵۰ به بعد با شبکه ملايم رو به پایین مواجه می‌شوند. در این لایه‌ها به جزء گسل‌های کم عمق که می‌توان در نقاطی که بازتاب‌ها مخدوش شده اند آنها را جستجو کرد، ساختار زمین‌شناسی خاصی مشاهده نمی‌شود. به دلیل پراش انرژی بوسیله‌ی گسل‌های کم عمق و همچنین کمبود پوشش انرژی در بعضی از نقاط در این نواحی، لکه‌های سفید مشاهد می‌شود. پراش‌های مشخصی در محدوده‌های نقاط عمقی مشترک بین ۸۰۰ تا ۱۱۰۰ و ۱۳۵۰ تا ۱۴۵۰ در بازه‌ی زمانی  $3/5$  تا  $4/5$  ثانیه قابل مشاهده است. در نواحی زیر  $4/5$  ثانیه به جزء محدوده CDP شماره ۸۵۰ تا ۱۴۰۰ داده‌ها قادر پوشش انرژی لازم بوده و رخداد بارزی به چشم نمی‌خورد. بین CDP شماره ۱۳۰۰ تا ۱۷۰۰ چین خوردنگی از نوع تاقدیس مشاهده می‌شود که در اثر نیرویی که از زیر این ناحیه به آن وارد شده بوجود آمده است.



شکل ۲۱-۵ : مقایسه مقاطع برانبارش (الف) CRS (ب) FO-CDS (ج) NMO (د) در محل مواجهه با مسئله‌ی تداخل شبکه‌ها.

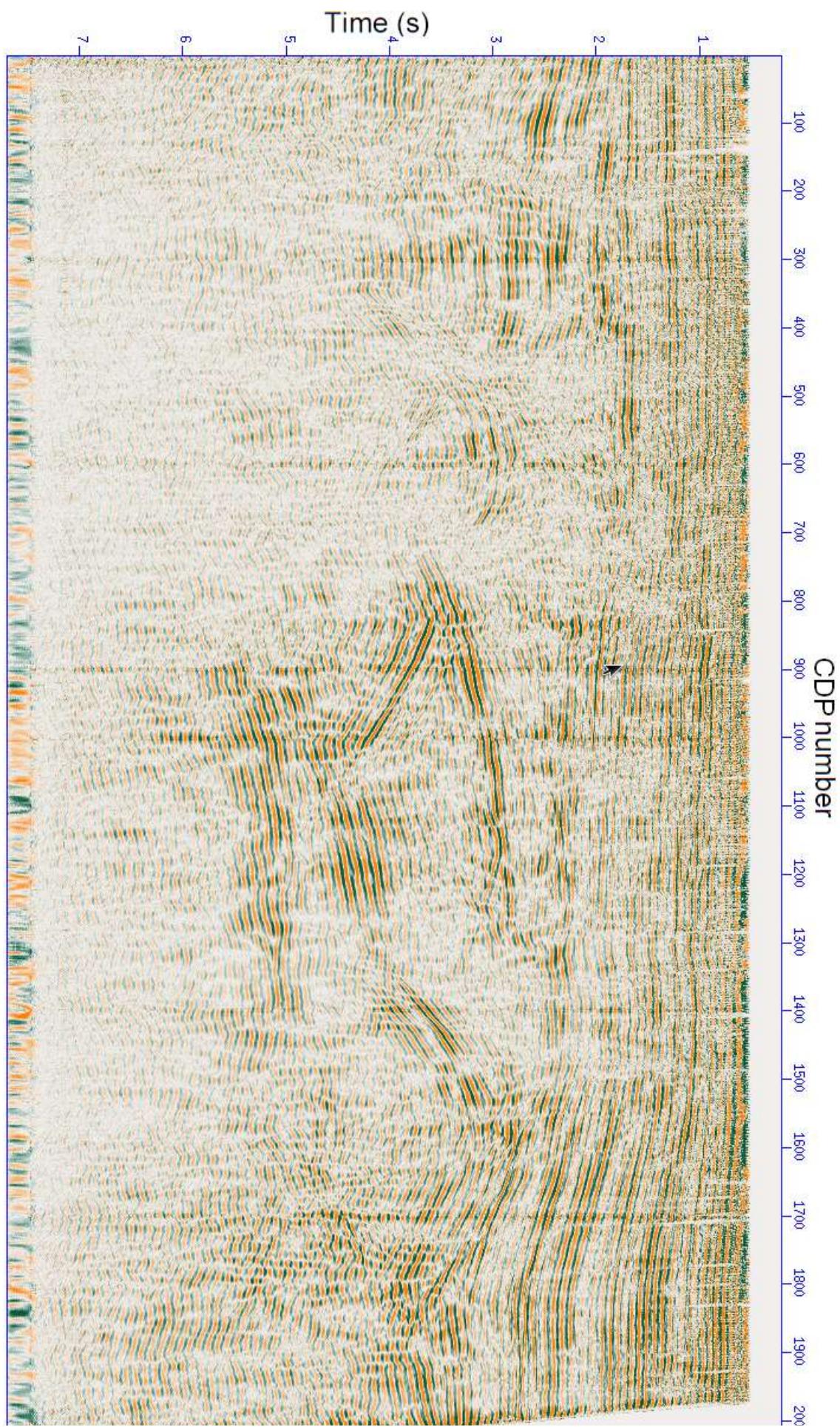


شکل ۲۲-۵ : مقایسه مقاطع برانبارش (الف) CRS (ب) CDS (ج) FO-CDS (د) CMP

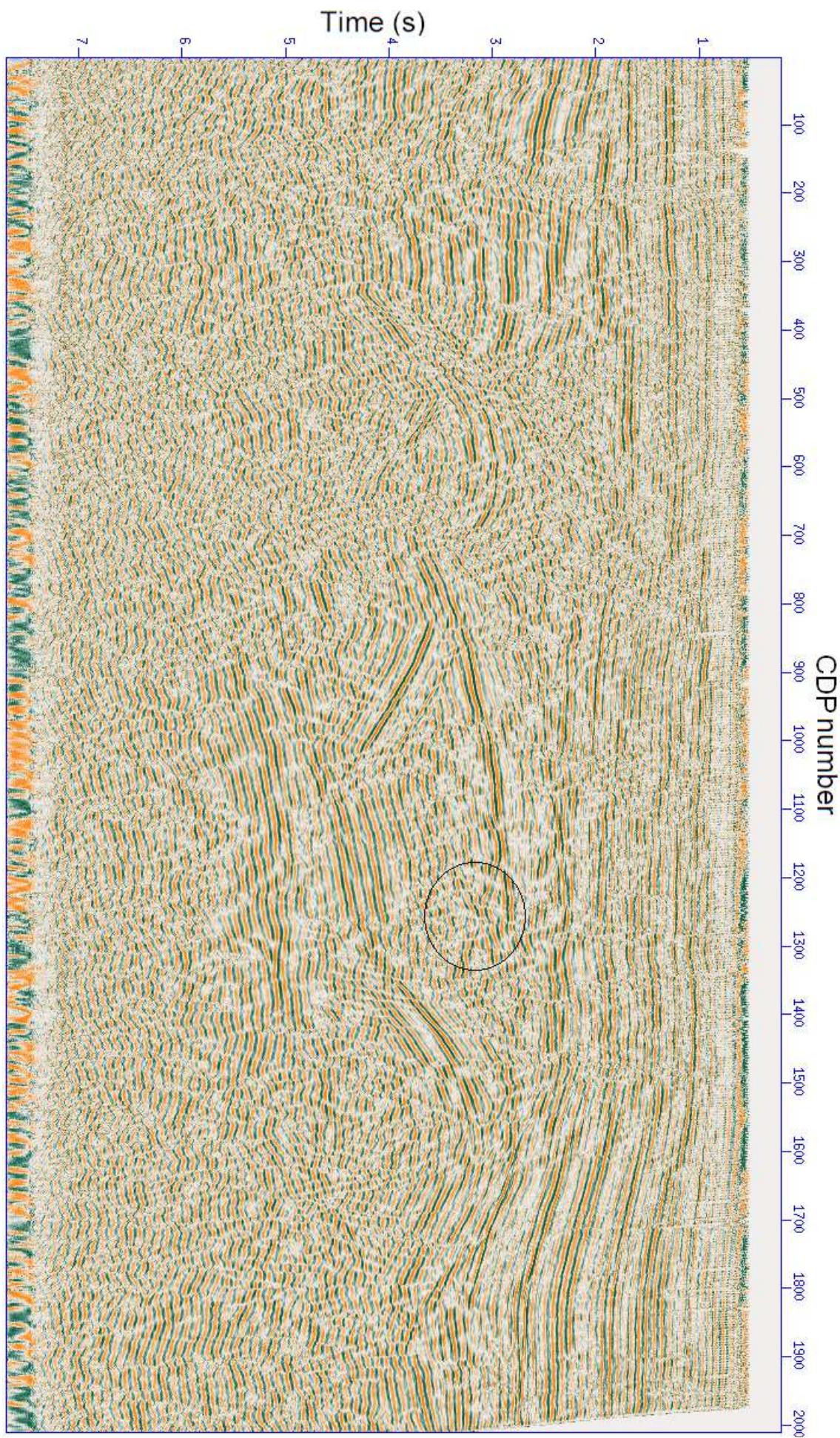
شکل های (۲۱-۵) و (۲۲-۵) تفاوت عملکرد روش های مختلف برانبارش را در مواجه با شیب های متداخل و همچنین پیوستگی بازتاب ها در داده واقعی بهتر بیان می کنند. همانطور که در این شکل ها مشاهده می شود، روش های برانبارش CDS و FO-CDS در مواجه با شیب های متداخل عملکرد مناسب تری از روش های برانبارش CRS و CMP از خود نشان داده اند. در روش برانبارش CMP با اینکه در مواجه با شیب های متداخل بهتر از روش برانبارش CRS عمل کرده است، اما به دلیل نوع راهبرد برانبارش در این روش که در پی آن نمی تواند از تمامی ردیزه های موجود بهره ببرد، در مقطع برانبارش نسبت سیگنال به نویه پایین آمده و پیوستگی بازتاب ها مطلوب نمی باشد. این در حالی است که پیوستگی بازتاب ها در مقاطع برانبارش CDS و FO-CDS در مقایسه با روش CRS قابل قبول می باشد.

با مقایسه مقاطع برانبارش CDS و FO-CDS در داده های واقعی می توان دریافت که این مقاطع ظاهر اتفاوت چندانی در به تصویر در آوردن رخدادهای بازتابی و پراش ندارند. البته اظهار نظر قطعی برای عملکرد این روش ها در مقاطع کوچ داده شدهی عمقی آنها در بخش بعدی صورت خواهد گرفت. به همین دلیل بار

دیگر پردازش به روش FO-CDS بر داده‌ی واقعی با انتخاب گام دورافت محدود کوچکتر اعمال شد که نتیجه آن در شکل های (۲۳-۵) و (۲۴-۵) نشان داده شده است. با توجه به اینکه انتخاب بازه کوچکتر، همانطور که در داده‌ی مصنوعی مشاهده شد، باعث حفظ انرژی بیشتری از داده‌ها می‌شود، بازه دورافت در نظر گرفته شده، این بار، کوچکتر و در حدود ۲۴۰ برابر کوچکتر از نیم دورافت بکار رفته در برانبارش CDS انتخاب شده است. سایر پارامترهای برانبارش همانند پردازش در مرحله قبل در جدول (۳-۵) قابل مشاهده است. کل زمان پردازش حدود ۵۳ ساعت بوده که نسبت به پردازش قبلی کاهش چشمگیری یافته و به ۱/۵ کاهش یافت. برای این پردازش ابتدا داده را بر حسب تعداد CDP به تکه‌های کوچکتر تقسیم کرده و بعد از اعمال پردازش تکه‌های برانبارش شده به هم وصل شدند. یکی از محل‌های اتصال در شکل (۲۳-۵) بوسیله‌ی پیکان نشان داده شده است. نتایج کوچ بر هریک از این مقاطع برانبارش در بخش بعدی نشان داده می‌شود و عملکرد هر یک در مقطع کوچ داده شده آنها بررسی می‌شود.



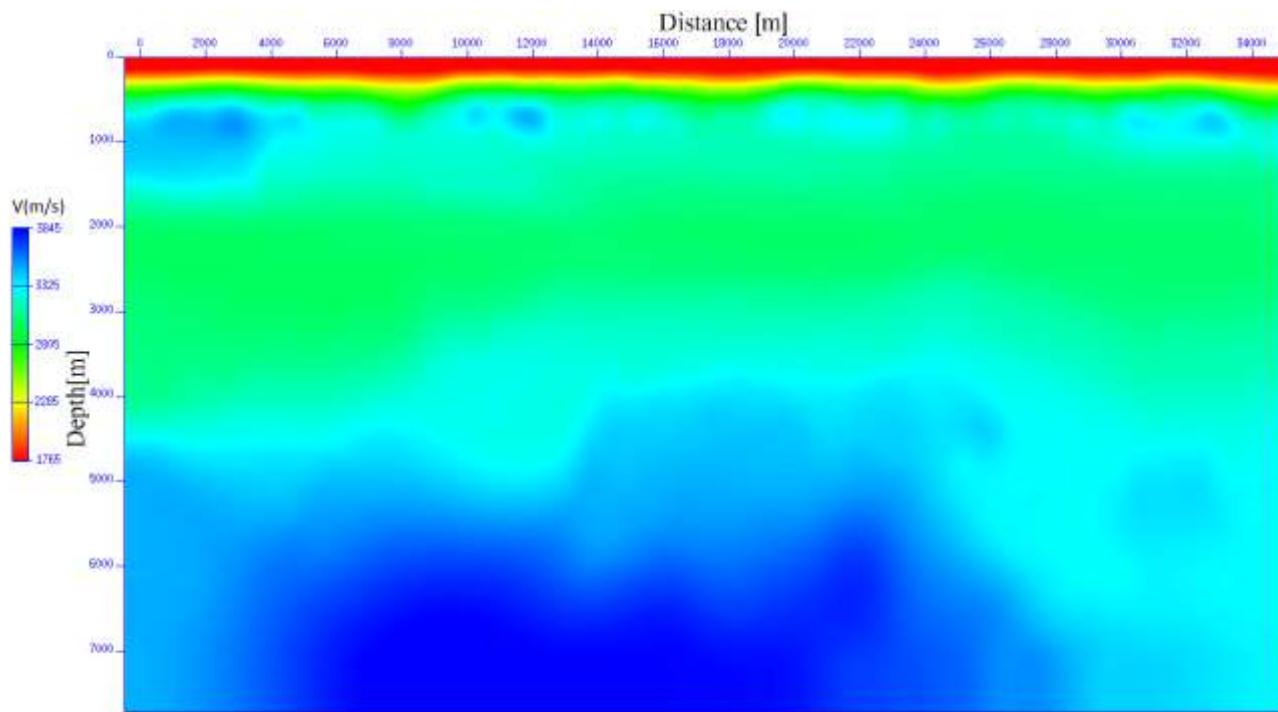
شکل ۲۳-۵ : مقطع برانبارش FO-CDS مربوط به داده های واقعی. گام بازه دورافت در حدود ۱/۲۴۰ دورافت در نظر گرفته شده در برانبارش CDS است.



شكل ٢٤-٥ : مقطع تقويت شده (AGC) مربوط به مقطع برانبارش شكل قبل.

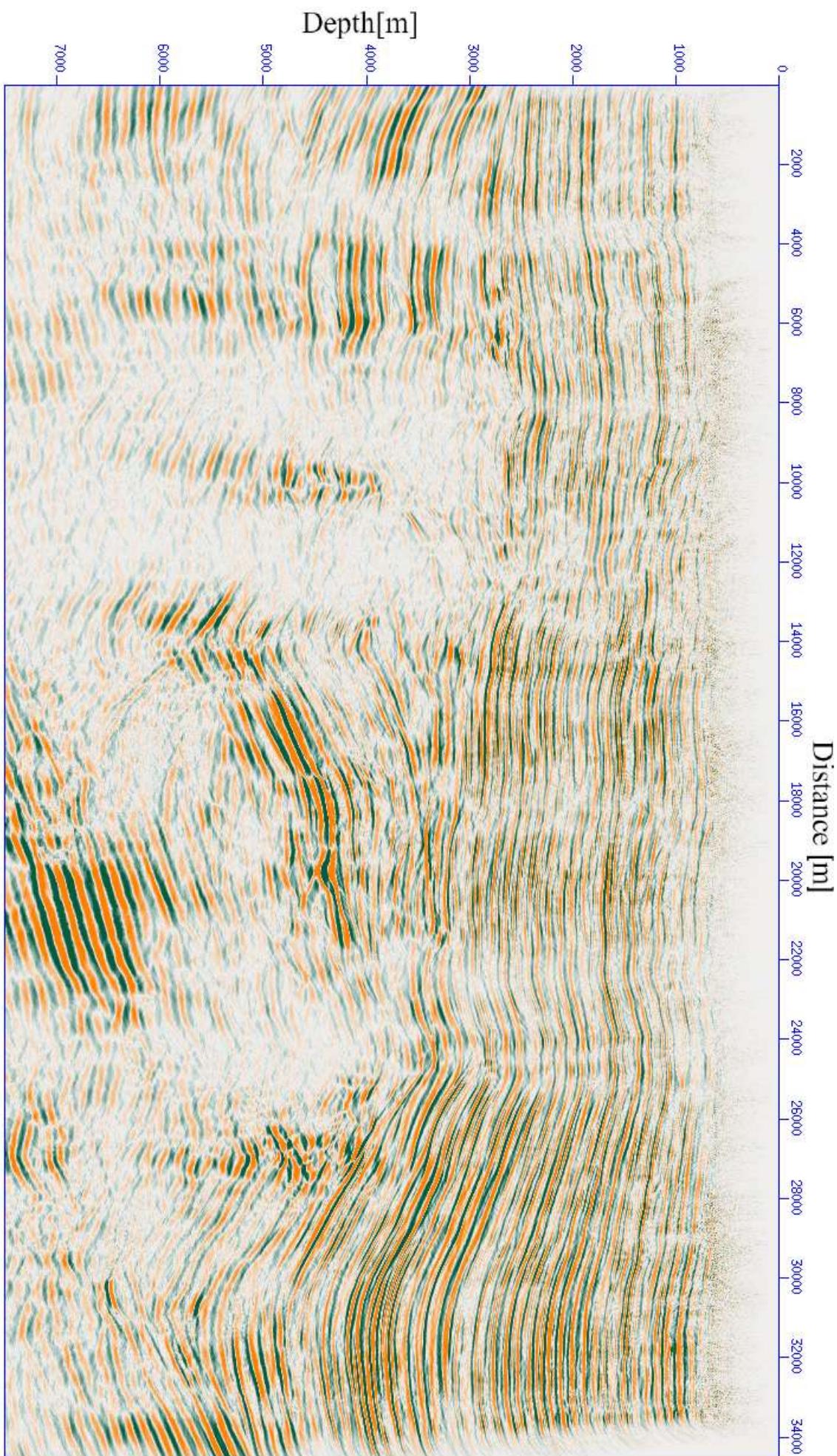
## ۷-۵ نتایج کوچ

در این قسمت تنها کوچ عمقی پس از برانبارش کیرشهوف با دامنه‌ی واقعی<sup>۱</sup> بر مقاطع برانبارش خروجی از روش‌های برانبارش CRS، CDS و FO-CDS اعمال می‌شود در این صورت هر جا صحبت از کوچ شده، منظور کوچ عمقی است. قبل اعمال کوچ مدل سرعت آن با استفاده از نرم افزار NIP Tomography تهیه شد. برای جستجوی جزئیات بیشتر در مورد نحوه‌ی بدست آوردن مدل سرعت می‌توان به دوونک (۲۰۰۴) مراجعه کرد. شکل (۲۵-۵) مدل سرعت بدست آمده را نشان می‌دهد. به منظور مقایسه بهتر، کوچ در شرایط یکسانی برای مقاطع برانبارش اعمال شده است. شکل‌های (۲۶-۵) تا (۳۳-۵) مقاطع کوچ مذکور را نشان می‌دهند. شکل‌های (۳۰-۵) تا (۳۳-۵) مقاطع کوچ داده شده‌ی برانبارش FO-CDS هستند که در دو گام دورافت متفاوت برانبارش شده‌اند. با مقایسه‌این شکل‌ها می‌توان فهمید که انتخاب گام دورافت محدود در برانبارش FO-CDS، چقدر می‌تواند با اهمیت باشد.

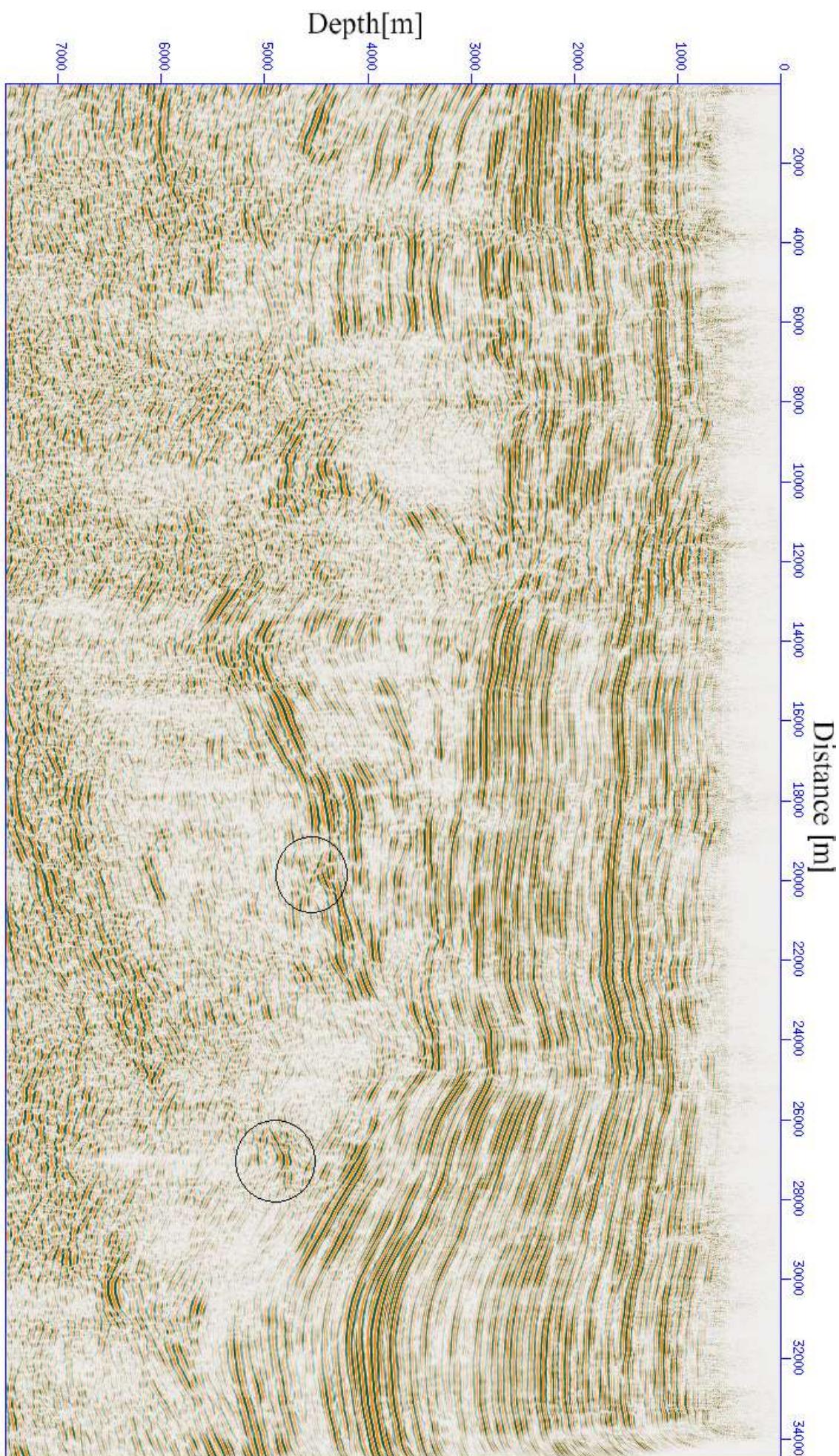


شکل ۲۵-۵ : مدل سرعت عمقی به دست آمده برای مرحله‌ی کوچ، با استفاده از نرم افزار NIP Tomography

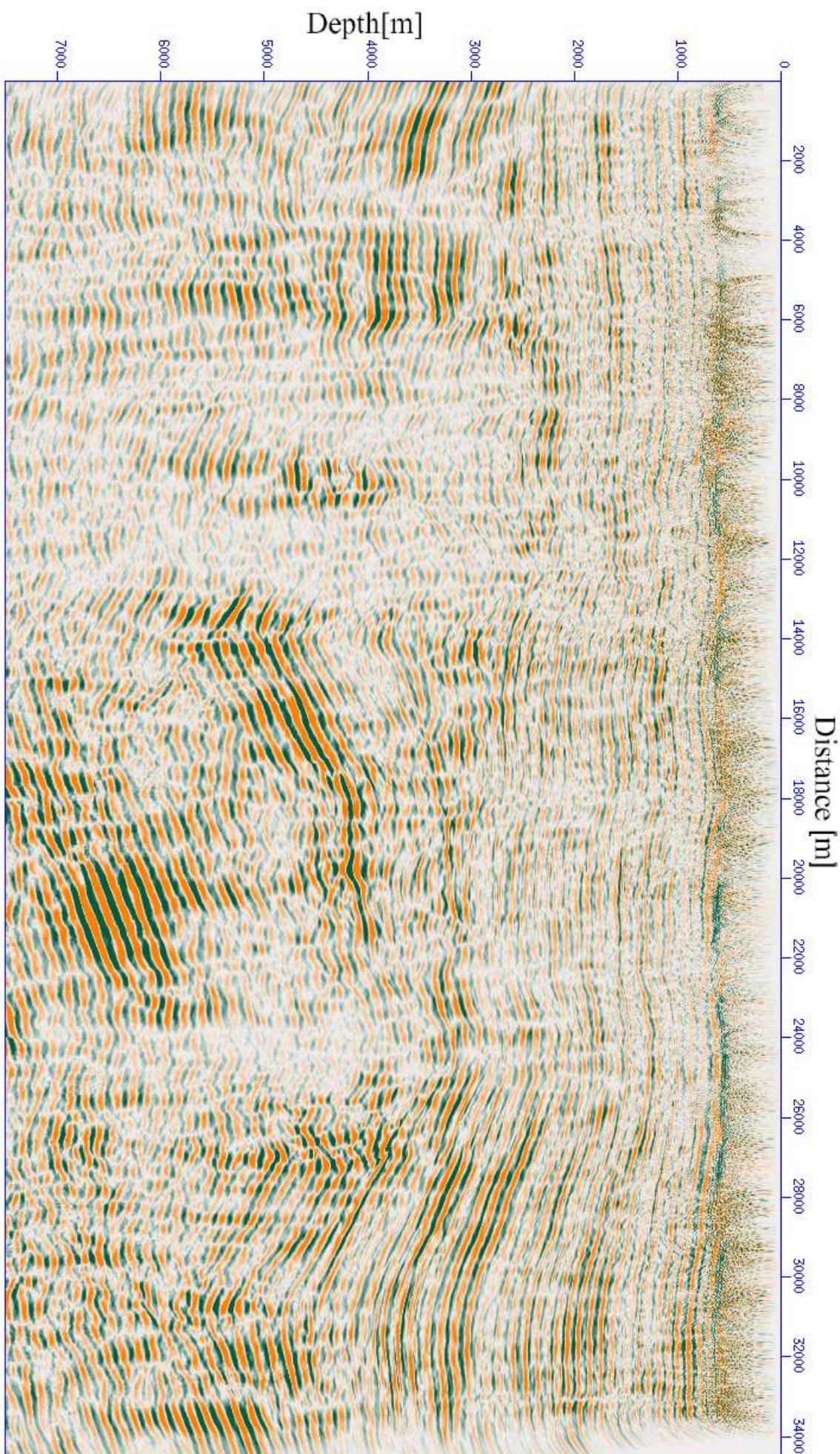
<sup>1</sup>True Amplitude Kirchhoff migration



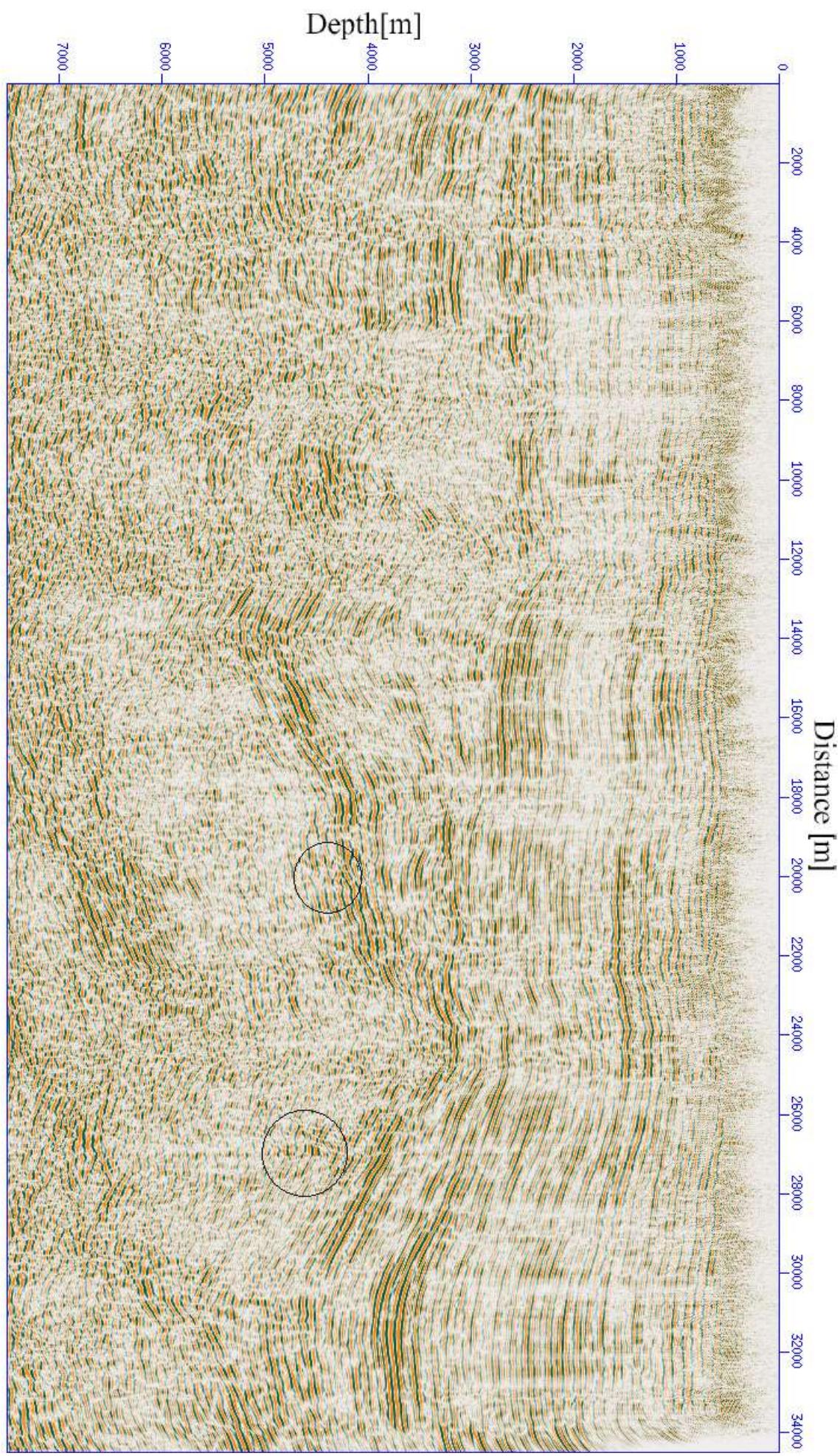
شكل ٢٦-٥ : نتیجه إعمال كوج بر مقطع برانبارش CRS.



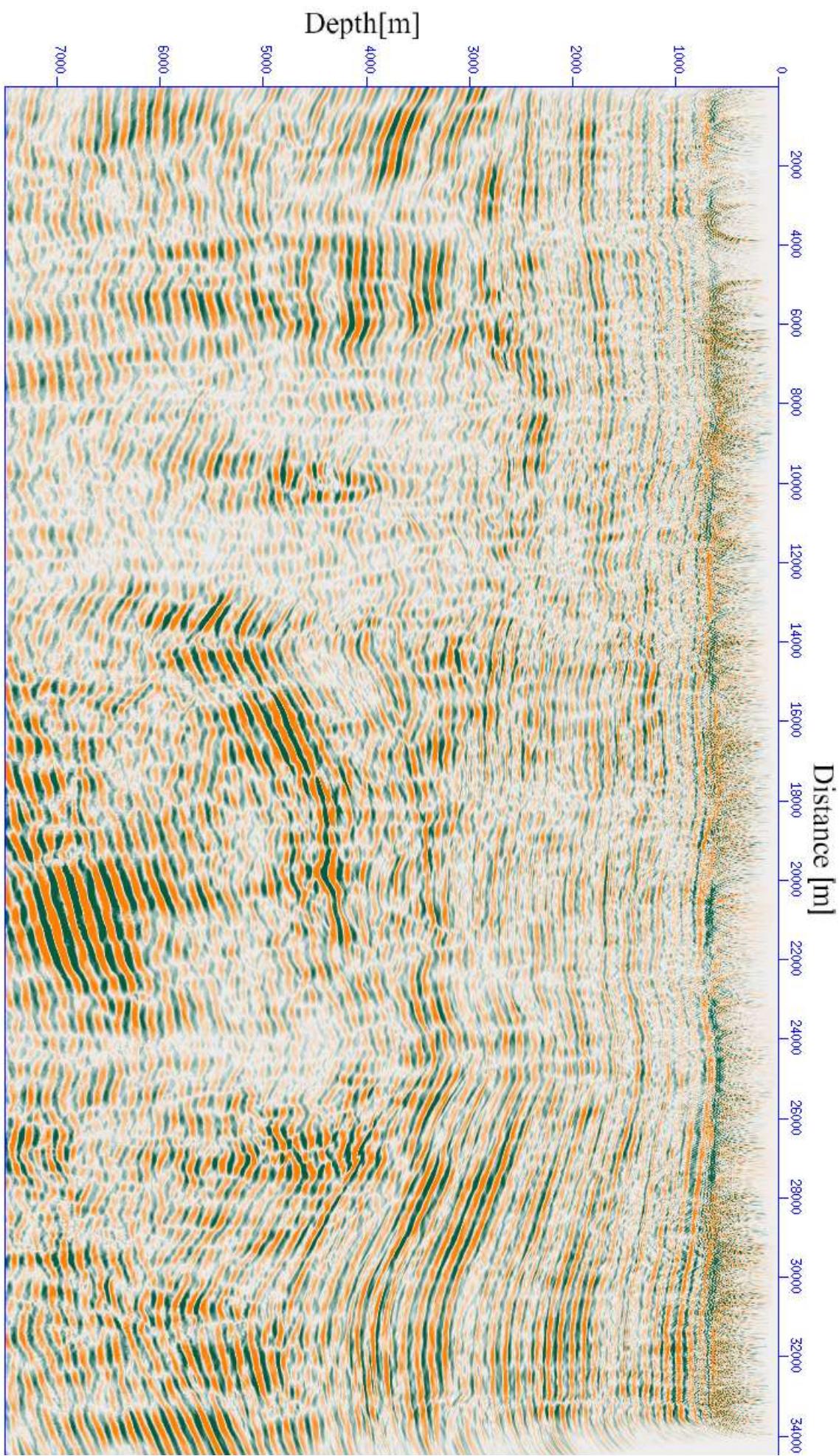
شکل ۲۷-۵ : نتیجه اعمال کوچ بر مقطع برانبارش CRS بعد از اعمال فیلتر و تابع تقویت (AGC).



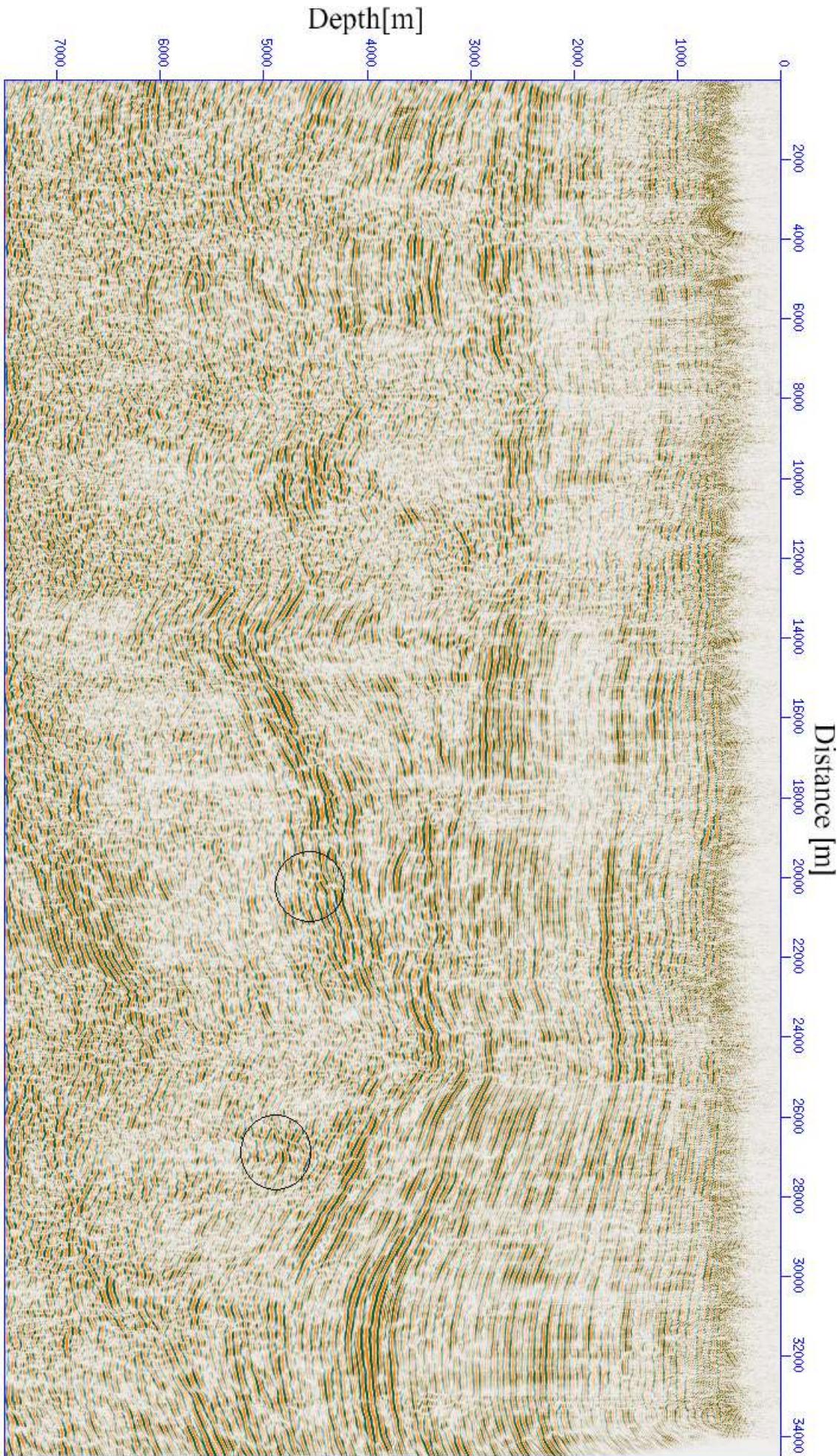
شكل ٢٨-٥: نتیجه اعمال کوچ بر مقطع برانبارش .CDS



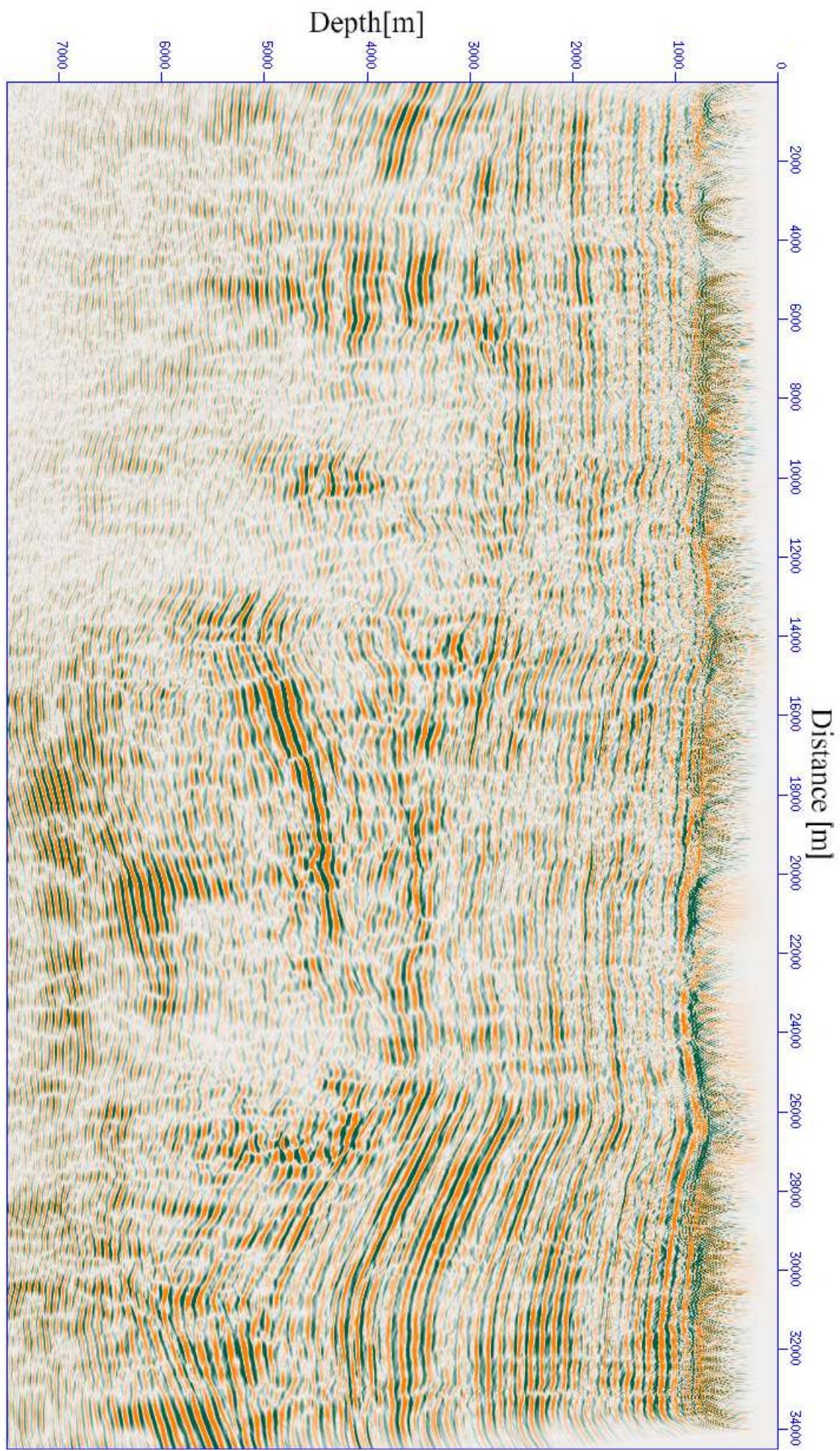
شکل ۲۹-۵ : نتیجه اعمال کوچ بر مقطع برانبارش CDS بعد از اعمال فیلتر وتابع تقویت (AGC).



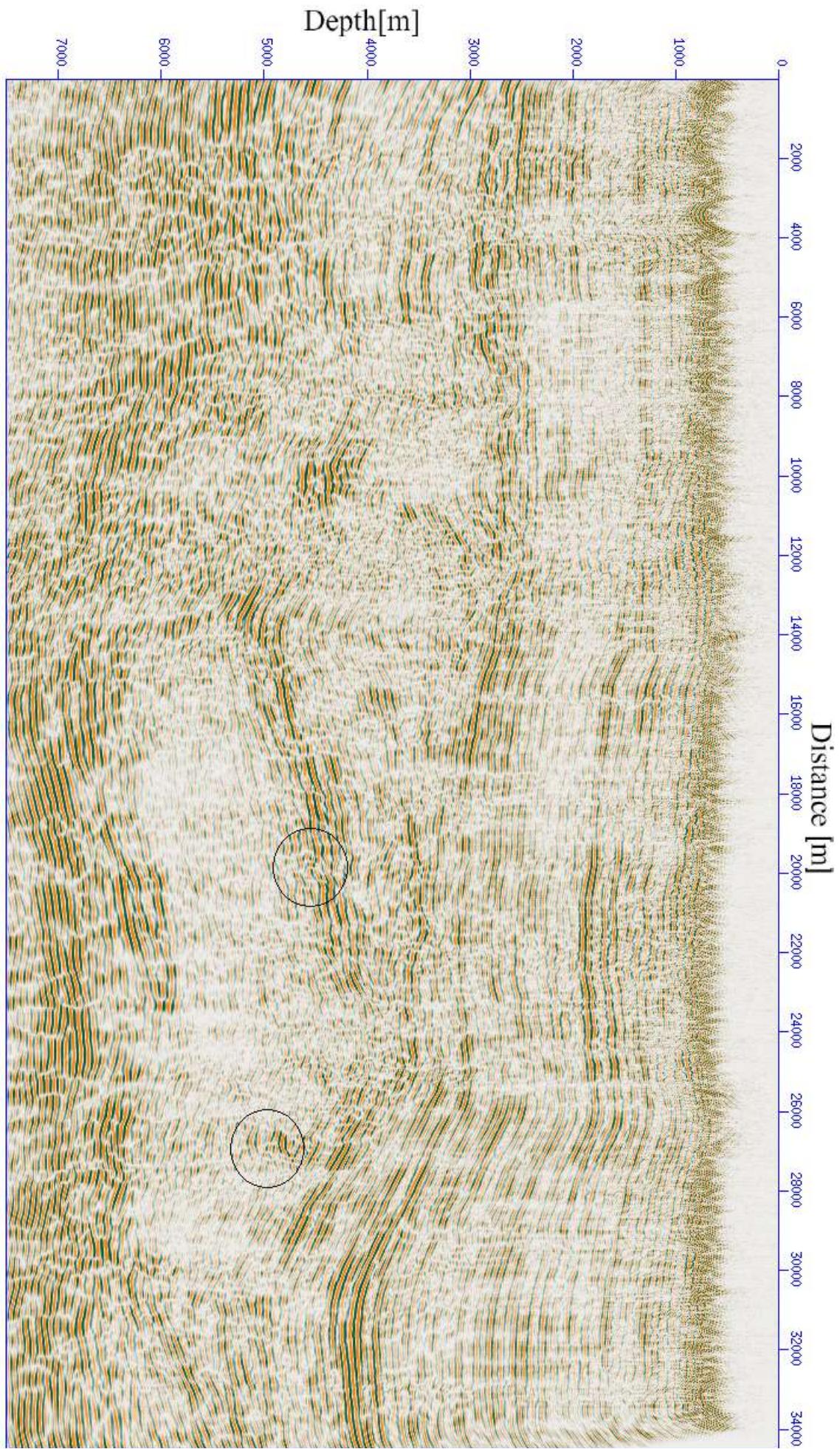
شکل ۳۰-۵ : نتیجه اعمال کوچ مقطع برانبارش FO-CDS. انتخاب گام بازه دورافت محدود ۸/۱ دورافت معمول در روش برانبارش CDS.



شکل ۳۱-۵ : نتیجه اعمال کوچ مقطع برانبارش FO-CDS. انتخاب گام بازه دورافت محدود ۸/۱ دورافت معمول در روش برانبارش CDS، بعد از اعمال فیلتر و تابع تقویت (AGC).



شکل ۳۲-۵ : نتیجهِ اعمال کوچ مقطع برانبارش FO-CDS. انتخاب گام بازه دورافت محدود ۱/۲۴۰ دورافت معمول در روش برانبارش CDS.



شکل ۳۳-۵ : نتیجه اعمال کوچ مقطع برانبارش FO-CDS با انتخاب گام بازه دورافت محدود ۱/۲۴۰ دورافت معمول در روش برانبارش CDS. بعد از اعمال فیلتر و تابع تقویت (AGC).

شکل های (۲۶-۵) تا (۳۳-۵) به ترتیب نشان دهنده نتایج کوچ بر روی مقاطع برانبارش CRS، CDS، FO-CDS با انتخاب گام بازه‌ی دورافت محدود  $1/8$  نیم دورافت برانبارش CDS و FO-CDS با انتخاب گام بازه‌ی دورافت محدود  $1/240$  نیم دورافت برانبارش CDS است. در تمامی مقاطع کوچ شرایط اعمال فیلتر (فیلتر انتخاب شده از نوع میانگذر بوده و فرکانس های بین ۱۵-۳۵ حفظ شده است) وتابع تقویت (از نوع AGC) یکسان بوده است. در شکل (۲۷-۵) دو محدوده برای مقایسه عملکرد روش‌های برانبارش انتخاب شده است. با مقایسه مقاطع کوچ به سادگی مشخص می‌شود که کوچ عمیق مقطع برانبارش در روش-FO (شکل ۳۳-۵) در اعمق پایین‌تر از ۴۰۰۰ متر، نسبت سیگنال به نویه بالاتر و در نتیجه لایه‌ها از پیوستگی بهتری نسبت به سایر مقاطع کوچ داده شده برخوردارند و می‌توان لایه‌ها را از ابتدا تا انتهای مقطع کوچ داده شده دنبال کرد. در بعضی نواحی که این لایه‌ها با خطوط سفید رنگی که عمود بر امتداد لایه‌ها هستند قطع می‌شود. این مسئله نشان دهنده بوجود آمدن اختلال در دریافت انرژی از این اعماق بوده است. با در نظر گرفتن اینکه این داده لرزه‌ای در مجاورت یک گلفشان برداشت شده، احتمالا دلیل کمبود انرژی می‌تواند ناشی از نشت گاز از اعماق پایین‌تر در این لایه‌ها باشد. برای درک بهتر از نحوه عملکرد کوچ در مقاطع برانبارش حاصل از روش‌های مذکور، بخش‌های کوچکی از مقاطع کوچ برای مقایسه کردن، علامت گذاری شده است. با توجه به شواهد موجود (bow tie) در مقطع برانبارش (شکل ۲۴-۵) که بوسیله‌ی دایره مشخص شده است محدوده مشخص شده، نشان دهنده‌ی یک ناویس کوچک در مقاطع کوچ خواهد بود. همانطور که در شکل (۲۷-۵) ملاحظه می‌شود این ناویس کوچک در کوچ مقطع برانبارش روش CRS بخوبی تصویر نشده است این در حالی است که در مقطع کوچ مربوط به روش CDS (شکل ۵-۵) پراش‌های بجا مانده در مقطع کوچ برانبارش CRS حذف شده‌اند. با این وجود این روش نیز همانند CRS قدرت تفکیک جانبی مناسبی نداشته و در به تصویر کشیدن این ناویس کوچک ناتوان بوده است. حال با مشاهده‌ی این ناحیه در شکل (۳۳-۵) مقطع کوچ مربوط به برانبارش FO-CDS با انتخاب گام کوچک برای دورافت محدود، می‌توان دید که این روش بسیار بهتر از سایر روش‌های نامبرده در به تصویر درآوردن این ناویس کوچک عمل کرده است.

ناحیه دیگری که در سمت راست مقاطع کوچ مشخص شده، نشان دهنده یک پراش در مقاطع برانبارش می‌باشد. با مقایسه این ناحیه در مقاطع کوچ، می‌توان دریافت که در برانبارش FO-CDS، انرژی این پراش بخوبی جمع شده و فرآیند تصویرسازی بخوبی صورت گرفته است. در این صورت بار دیگر قدرت تصویرسازی روش برانبارش CDS با دورافت محدود نسبت به سایر روش‌ها اثبات می‌شود.

## ۶ فصل ششم

### بحث و نتیجه‌گیری

در تصویرسازی لرزه‌ای به روش‌های متداول در برخی اوقات مسائلی بوجود می‌آید که تلاش‌های زیادی در برطرف کردن آنها صورت می‌گیرد. به عنوان مثال مواردی از قبیل پایین بودن نسبت سیگنال به نوفه و یا مواجه شدن با شبکه‌های متداخل، مسائلی هستند که اغلب پردازشگرهای با آن روبرو می‌شوند. برای حل مسائل بالا در سال‌های اخیر روش‌های جدیدی تحت عنوان برانبارش سطح بازتاب مشترک (CRS) و برانبارش سطح پراش مشترک (CDS) معرفی شده‌اند. هریک از روش‌های فوق مزایا و معایبی دارند که در این تحقیق بدان پرداخته شد.

روش برانبارش CRS در بالا بردن نسبت سیگنال به نوفه در مقطع برانبارش، در داده‌ی اولیه با نسبت سیگنال به نوفه پایین، بهبود قابل توجهی در فرآیند تصویرسازی ایجاد کرده است. اما این روش به دلیل نوع راهبرد در جستجوی پارامترهای برانبارش، کارایی لازم را در مواجه با شبکه‌های متداخل را ندارد. از این‌رو روش برانبارش CDS برای بر طرف کردن مسئله‌ی اخیر معرفی شد. این روش توانسته مسئله شبکه‌های متداخل را بخوبی حل کند. اما همانطور که در فصل چهارم اشاره شد و در فصل پنجم نیز در مقاطع کوچک بدست آمده از داده مصنوعی ملاحظه گردید، این روش در مقابل داده اولیه با نسبت سیگنال به نوفه‌ی

پایین، به دلیل نوع راهبرد برانبارش با اشکال مواجه می‌شود. بطوری که نوفه‌های زمینه نیز به همراه رخدادهای بازتابی برجسته‌تر می‌شوند و باعث می‌شود که این روش کارایی مطلوب مورد انتظار را هم در مواجه با شبیه‌های متداخل (تصویرسازی رخدادهای پراش) و هم در تصویرسازی بازتابهای اولیه نداشته باشد.

در این تحقیق سعی بر این بوده تا با برطرف کردن نقطه‌ی ضعف روش سطح پراش مشترک در مواجه با نوفه‌های زمینه و همچنین بهبود این روش در مواجه با شبیه‌های متداخل، هم کمبود پوشش انرژی را در مواجه با شبیه‌های متداخل جبران نماید و همچنین اثر نوفه‌های زمینه را در مقطع برانبارش کاهش دهد. در نتیجه این امر، افزایش کیفیت تصویرسازی را در پی خواهد داشت. همانطور که در نتایج بدست آمده از فصل پنجم ملاحظه شد، بعد از اضافه کردن نوفه به داده مصنوعی و اعمال برانبارش CDS بر این داده، مشاهده شد که روش برانبارش CDS در صورت مواجهه با داده‌هایی که آغشته به نوفه زمینه است، کارایی مطلوب خود را از دست خواهد داد (شکل های ۱۵-۵ و ۱۶-۵). در مرحله‌ی بعد همین داده آلوده به نوفه زمینه بوسیله روش برانبارش FO-CDS با گام‌های دورافت متفاوت مورد پردازش قرار گرفت. نتایج بدست آمده در مقطع برانبارش در گام با محدوده‌ی دورافت کوچکتر همانند مقطع همتای برانبارش CDS آن (بدون حضور نوفه) می‌باشد. این در حالی است که در برخی از نواحی این مقطع برانبارش کارایی بهتری در تصویر سازی نسبت به مقطع برانبارش CDS داشته است (شکل ۱۷-۵). در نتیجه، این روش توانسته مشکل روش برانبارش CDS را در مواجه با نوفه‌های زمینه در حد قابل ملاحظه‌ای بر طرف کند.

در مقطع کوچک دیگری که به منظور بررسی عملکرد روش برانبارش FO-CDS در مواجه با شبیه‌های متداخل تهیه شده (شکل ۱۳-۵)، ملاحظه گردید که روش جدید در حفظ انرژی‌های بازتابی بسیار بهتر از روش CDS عمل کرده است. علاوه بر این، روش جدید در ابتدا و انتهای مقطع برانبارش در به تصویر درآوردن رخدادهای بازتابی موثر تر از روش CDS بوده است. در نتیجه انتظار می‌رود در مقطع کوچ عمیقی پس از برانبارش کیرشهوف با دامنه‌ی واقعی جزئیات بیشتری از رخدادهای بازتابی به تصویر درآید.

همانطور که انتظار می رفت در مقطع کوچ عمقی پس از برانبارش مربوط به برانبارش FO-CDS با گام دورافت کوچک که بر داده واقعی صورت گرفت، لایه های اعمق پایین تر به دلیل اینکه انرژی بازتابها از این اعماق با دقت بیشتری حفظ شده اند، بخوبی به تصویر درآمده اند و نسبت سیگنال به نوفه در این نواحی حتی از مقطع کوچ عمقی بدست آمده از روش CRS بالاتر بوده است. این روش همچنین در به تصویر درآوردن جزئیات بیشتر از رخدادهای بازتابی از سایر روش های فوق الذکر موفق تر بوده است.

مسئله‌ی مهم دیگر، زمان پردازش روش برانبارش CDS می‌باشد که در صورت افزایش پیچیدگی ساختارهای زیر سطحی، این زمان افزایش چشمگیری می‌یابد. ولی در روش FO-CDS زمان پردازش، کاهش قابل ملاحظه‌ای می‌یابد و دست کم به  $1/5$  زمان پردازش CDS کاهش می‌یابد.

در روش های تصویر سازی مرسوم در داده های مربوط به ساختارهای پیچیده که نسبت سیگنال به نوفه پایینی دارند، در اغلب موارد منطقه هدف که در عمق های پایینی قرار دارد، به خوبی به تصویر کشیده نمی شود. بنابراین به دلیل قدرت بالای تصویر سازی روش برانبارش FO-CDS در مواجه با شیوه های متداخل، حفظ بیشتر انرژی های بازتابی و همچنین عملکرد آن در خصوص نوفه های زمینه، توصیه می شود. از این روش برای تصویر سازی در اینگونه داده ها استفاده شود.

## پیوست

```
//////////  
// fo-cdsstack.c :           //  
//////////  
  
/// by Juergen Mann - Juergen.Mnn@gpi.uni-karlsruhe.de ///  
/// modified after by - Mehrdad Soleimani ///  
/// modified after by - Morteza Balarostaghi ///  
. . .  
  
// Loop over all traveltimes in target trace  
  
for (j=0; j<Tns; j++) {  
  
    t = Ttmin + Tdt*float(j);  
    t2 = t*t;  
    stack = 0.f;  
  
    MCtraces = MCG->ProvCRSarray (t);  
  
    // Define default output samples  
    CDSstack->trace[j] = 0.f;  
  
    // Any traces in aperture?  
    if (MCG->first) {  
  
        //      my modify      ////////////  
        hmax2 = MCG->aper->offrange2;  
        float L = hmax2 / 8.f;  
        float min = 0.f;  
        float hmax;  
        float sum1 = 0.f;  
        float sum2 = 0.f;  
        float k1;  
        float k2;  
        for (int i=0;i<8;i++){  
            hmax = min + L;  
            hmax2 = hmax;  
            min = hmax;  
  
            // Provide minimum stacking velocity  
            if (ref) vmin = Refvel->GetSample(t);  
  
            // define the offset and xrange  
            //////////move to up //////////hmax2 = MCG->aper->offrange2;  
            //xrange2 = (MCG->aper->xrange2+MCG->aper->offrange2)/2.f;  
            //xrange = sqrt(xrange2);  
  
            // Calculate extremal moveouts  
            if (vvar) {
```

```

// Account for velocity reference and variation
tmax = sqrt(t2+4.f*hmax2/vmin/vmin/vvar);
tmin = t2+4.f*hmax2/vmin/vmin/vvarup;
} else {

    // Constrain moveouts with boundaries for vnmo
    tmax = sqrt(t2+4.f*hmax2/vmin/vmin);
    tmin = t2+4.f*hmax2/vmax;
}

// Clip to temporal range of data and calculate no. of samples
tmin = (tmin<0.f) ? mint : mymax(mint,(float)sqrt(tmin));
tmax = mymin(tmax,maxt);
sts = int((tmax-tmin)/Inidt)+1;

// Loop over the angles
for (m=0; m<size; m++) {
    angle = minangle+dangle*float(m);
    fac = 2.f*sinf(angle)/vel;

    // Search for Rnip for curves in moveout range
    if (sts>0) {

        // Calculate factors
        fac1 = 2.f*fac*t;
        fac2 = 2.f*fac*t/xrange;

        // Loop over travelttime moveouts
        indmax=0;
        cohmax=-FLT_MAX;
        indmax=0;
        for (k=0; k<sts; k++) {
            tfac = (mysqr(tmin+Inidt*(float)k)-t*t)/hmax2;
            for (ctr=MCG->first; ctr<MCG->last; ctr++) {
                tt = mysqr(t+fac*ctr->xm)+(ctr->h*ctr->h+ctr->xm*ctr-
>xm)*tfac;
                ctr->tt = (tt<0.f) ? -1.f : sqrt(tt);      // that's safe
            }
            coher = (Coh.*Coh.Cohер) (MCG->first,MCG->last);
            if (coher>cohmax) {
                cohmax = coher;
                indmax = k;
            }
        }

        // Iterative refinement of the maximum
        cdt=Inidt;
        tom = float(indmax)*Inidt+tmin;      // time of initial maxi-
mum
        for (k=0; k<iter-1; k++) {
            tmax = mymin(maxt,tom+cdt*.9f);
            tmin = mymax(mint,tom-cdt*.9f);
            cdt /= 10.f; // refinement factor
            for (tref=tmin; tref<tmax; tref+=cdt) { // loop over
moveouts

```

```

        tfac = (mysqr(tmin+Inidt*(float) k)-t*t)/hmax2;
        for (ctr=MCG->first; ctr<MCG->last; ctr++) {
            tt=mysqr(t+fac*ctr->xm)+(ctr->h*ctr->h+ctr->xm*ctr-
>xm)*tfac;
            ctr->tt = (tt<0.f) ? -1.f : sqrt(tt);
        }
        coh = (Coh.*Coh.Coh) (MCG->first,MCG->last);
        if (coh > cohmax) { // trace maximum
            cohmax = coh;
            tom = tref;
        }
    }
}
tfac = (tom*tom-t2)/hmax2;

// Calculate Rcds from tfac and angle
Rnip = 1.f/(tfac*vel*0.5f/t/mysqr(cosf(angle)));
//warn << nl << Rnip << "\t " << angle << "\t " << sts <<
"\t "
//      << tfac;
//float temp = angle*RTOD;
//fwrite (&temp, 4, 1, debug);
//fwrite (&Rnip, 4, 1, debug);
//fwrite (&cohmax, 4, 1, debug);

} // End of search for Rnip

// Calculate traveltimes
//fac1 = 2.f*sinf(angle)/vel;
//fac2 = 2.f*mysqr(cosf(angle))/vel;
for (ctr=MCG->first; ctr!=MCG->last; ctr++) { // Loop over
traces
    tt = mysqr(t+fac*ctr->xm)+(ctr->h*ctr->h+ctr->xm*ctr-
>xm)*tfac;
    ctr->tt = (tt>0.f) ? sqrt(tt) : -1.f;
}
sample = Coh.TaperedSum (MCG->first, MCG->last);
MCG->aper->Recover();
stack += sample;

} // End of angle loop
CDSstack->trace[j] = stack;
CDSap->trace[j] = MCtraces;
sum1 += CDSstack->trace[j];
k1 = sum1;
CDSstack->trace[j]=k1;
sum2 += CDSap->trace[j];
k2 = sum2;
CDSap->trace[j] = k2;

}
///////////////
} // end of time loop

// Write current traces to output files
CDSstack->PutTrace (xi, cdpno);

```

```
CDSap->PutTrace (xi, cdpno);

// Advance to next CDP
MCG->NextCDP ();
} // End of midpoint loop

// Force deallocation of last aperture
if ((trico = MCG->ProvCRSgather (xi, cdpno)))
    error << nl << myname << "Deallocation error - "
        << trico << " remaining traces." << ex;

delete CDSstack;
delete CDSap;

info << nl << "CDS stack completed. " ;
}
```

## مراجع

ادیبی، ا.، ۱۳۸۸، پردازش داده‌های لرزه‌نگاری بازتابی به روش برانبارش CRS ، پایان‌نامه کارشناسی ارشد، دانشگاه صنعتی شاهروд.

سلیمانی منفرد، م.، ۱۳۸۸، برانبارش سطح پراش مشترک، ارائه یک روش نوین در حل مساله تداخل شیب‌ها، پایان نامه دکتری، دانشگاه صنعتی شاهرود.

شاهسونی، ۵، ۱۳۹۰، تهیه مدل اولیه در روش برانبارش سطح پراش مشترک، پایان نامه دکتری، دانشگاه صنعتی شاهرود (به انگلیسی).

Al-Chalabi, M. (1973). Series approximation in velocity and traveltimes computations. *Geophys. Prosp.* 21:783–795.

Bancroft, J. (1998). *A Practical Understanding of Pre and Poststack Migrations Voll Poststack*. SEG publication.

Baykulov,M (2009) . *Seismic imaging in complex media with the Common Reflection Surface stack*. PhD thesis , University of Hamburg

Bergler, S. (2004). *On the determination and use of kinematic wavefield attributes for 3D seismic imaging*. Logos Verlag, Berlin.

Bortfeld, R. (1989). *Geometrical ray theory: rays and traveltimes in seismic systems (second-order approximations of the traveltimes)*. *Geophysics*, 54(3):342–349.

Červený, V. and Soares, J. (1992). *Fresnel volume ray tracing*. *Geophysics*, 57:902–915.

Červený, V. (2001). *Seismic ray theory*. Cambridge University Press, Cambridge.

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

Hale, D. (1991). *Dip moveout processing*. Society of Exploration Geophysics, Tulsa.

Haniga, A. (1984). *Seismic Wave Propagation in the Earth*. In Haniga, A., editor, *Physics and Evolution of the Earth's Interior 2*. Elsevier, Amsterdam.

Hertweck, T., (2004),*True-amplitude Kirchhoff-Migration: analytical and geometrical consideration*: Ph.D. thesis, University of Karlsruhe, Germany.

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

Hubral, P. (1983). *Computing true amplitude reflections in a laterally inhomogeneous earth*. Geophysics, 48(8):1051–1062

Hubral, P., Schleicher, J., Tygel, M., and Hanitzsch, C., (1993), *Determination of Fresnel zones from traveltime measurements*: Geophysics, 58, no. 5, 703–712.

Hubral, P., Schleicher, S., and Tygel, M. (1992a). *Three-dimensional Paraxial Ray Properties. Part I: Basic Relations*. J. Seis. Expl., 1:265–279.

Hubral, P., Schleicher, S., and Tygel, M. (1992b). *Three-dimensional Paraxial Ray Properties. Part II: Applications*. J. Seis. Expl., 1:347–362.

Höcht, G. (2002). *Travelttime approximations for 2D and 3D media and kinematic wavefield attributes*. PhD thesis, University of Karlsruhe.

Höcht, G., de Bazeilair, E., Majer, P., and Hubral, P. (1999). *Seismics and optics: hyperbolae and curvatures*. J. Appl. Geophys., 42(3,4):261–281.

Jäger, R., (1999), *The Common Reflection Surface Stack - Theory and Application*: Master's thesis, University of Karlsruhe, Germany.

Jäger, C. (2005). *Minimum-aperture Kirchhoff\_ migration with CRS stack attributes*. Logos Verlag, Berlin.

Kienast, M., (2007), *CRS stack based limited-apertuer Kirchhoff migration-application and comparison in time and depth domain*: Master's thesis, University of Karlsruhe, Germany.

Kravtsov, Y. and Orlov, Y. (1990). *Geometrical Optics of Inhomogeneous Media*. Springer Verlag, New York.

Koglin, I. and Ewig, E. (2003). *Residual static correction by means of CRS attributes*. In *Expanded Abstracts*, 73th Ann. Internat. Mtg. Soc. Expl. Geophys. Session SP 1.4.

Liner, L. (1999). *Concepts of normal and dip moveout*. Geophysics, 64:1637–1647.

Loewenthal, D., Lu, L., Robertson, R., and Sherwood, J. (1976). *The wave equation applied to migration*. Geophys. Prosp., 24(2):380–399.

Luneburg, R. (1966). *Mathmatical Theory of Optics*. Univ. of California Press, Berkeley.

Mann, J. (1997) *Image Wave Theory and its application to seismic reflection data*. Logos Verlag, Berlin.

Mann, J. (2001). *Common-Reflection-Surface stack and conflicting dips*. In Extended abstracts, 63rd Conf. Eur. Assn. Geosci. Eng. Session P077.

Mann, J. (2002). *Extensions and applications of the Common-Reflection-Surface Stack*

*method*. Logos Verlag, Berlin.

Mann, J., Höcht, G., Jäger, R., and Hubral, P. (1999). *Common Reflection Surface stack – an attribute analysis*. In Extended abstracts, 61st Conf. Eur. Assn. Geosci. Eng. Session P140.

Mayne, W., (1962), *Common-reflection-point horizontal data stacking techniques*: Geophysics, 27, 927–938.

Müller, A. (2003). *The 3D Common-Reflection-Surface stack – theory and application*. Maser's thesis, University of Karlsruhe.

Müller, N.-A. (2006). *Elimination of the spread-length bias in the common-reflection-surface stack*. In Expanded abstracts, 76th Annual Meeting. Soc. Expl. Geophys.

Müller, T. (1998). *Common Reflection Surface stack versus NMO/stack and NMO/DMO/stack*. In *Extended abstracts, 60th Conf. Eur. Assn. Geosci. Eng. Session 1-20*.

Nelder, J. A., and Mead, R.,( 1965), *A simple method for function minimization*: Computer Journal, 7, 308–313.

Popov, M., (1996), *Ray Theory and Gaussian Beam Method for Geophysicists*: Universidade Federal da Bahia.

Popov, M and Psencik, I. (1978). *Computation of ray amplitudes in inhomogeneous media with curve interfaces*. Studia geoph. Et geod., 22:248-258

Schleicher, J., Hubral, P., Tygel, M., and Jaya, M. S. (1997). *Minimum apertures and Fresnel zones in migration and demigration*. Geophysics, 62(1):183–194.

Schleicher, J., Tygel, M., and Hubral, P. (1993). *3-D true-amplitude finite-offset migration*. Geophysics, 58(8):1112–1126.

Sheriff, R. (1995). *Exploration Seismology*, Cambridge University Press. New York.

Spinner, E.T. (2007). *CRS-based minimum-aperture Kirchhoff – migration in the time domain*: PH.D. thesis, University of Karlsruhe, Germany.

Ursin, B. (1982). *Quadratic wavefront and traveltime approximations in inhomogeneous layered media with curved interfaces*. Geophysics, 47(7):1012–1021.

Vieth, K-U., (2001), *Kinematic wavefield attributes in seismic imaging*: Ph.D. thesis, University of Karlsruhe, Germany.

Yilmaz, Ö. (2001). *Seismic data analysis*, vols. 1 and 2. Soc. Expl. Geophys., Tulsa.

## Abstract

Reflection seismic is one of the most commonly used geophysical method for oil and gas exploration. The CMP stack method usually employ for seismic imaging. Conventional seismic imaging method based on the CMP stacking does not use the full potential of the dataset due to reflection point dispersal in the presence of dipping reflectors or laterally inhomogeneous media. Application of the CRS stack technique is advantageous in complex areas, since it involves information about the shape of seismic reflectors, i.e., dip and curvature, into processing. Moreover, a multiparameter formula allows to sum up more traces during the stack. Each one of together, this leads to better imaging results, especially to an improvement of the signal-to-noise (S/N) ratio. Reflection events in the CRS stack sections appear clearer and more continuous compared to conventional CMP stack sections.

But the CRS stack method encounter in situations where exist conflicting dips at one sample in ZO section, not efficient to deliver consistent high quality images in such cases. The reason for this problem is the search strategy for CRS attributes ( $R_{NIP}, R_N, \alpha$ ). In this strategy at the conflicting dips situations, only one reflection event selected that strongest event at that sample with respect to the higher coherency along the CRS operator. The coherency analyses along various test stacking operators are performed for each particular ZO sample to be simulated.

Common diffraction surface (CDS) stack method recently introduced for solving the conflicting dips problem. This method by means of DMO idea within CRS strategy resolved this problem. In this case, the number of conflicting dips in each sample is not worried. Therefore any reflection or diffraction event will contribute to the stack for a same sample. For each sample, a coherency analysis is done in a range of angles. Solving the problem of conflicting dips will enhance the usually weak diffraction events in the stacked section. Consequently, noises and other unwanted events disclose similar reflection or diffraction events and make dirty ZO section.

In this thesis, we introduce a new method namely Finite-Offset CDS stack. A new offset on the common-diffraction-surface (CDS) stack method was developed to enhance the quality of the structures that have problem of conflicting dips. For this purpose, the new idea applied on CDS travel time formula in defined offset range for each time and target zone to compute finite offset stacked CDS volume. For defining the offset range that used in CDS Operator, for each  $t_0$ , a linear function designed that varies with time. Results of using new operator on the synthetic and real seismic data examples display the good performance of the FO-CDS stack method in comparison with other stack methods.

**Keyword:** Common Reflection Surface (CRS) stack, Common Diffraction Surface (CDS) stack, Finite-Offset CDS stack, wavefield attributes



Shahrood University of Technology  
Faculty of mining, Petroleum and Geophysics Engineering

**Seismic imaging of complex structures by finite offset  
Common Reflection Surface (CRS) stack method**

Morteza Balarostaghi

**Supervisors**

Dr.Iraj Pirooz

Dr.Mehrdad Soleimani Monfared

February 2013