

تصویرسازی لرزه‌ای در کمربندهای رورانده با ساختار پیچیده با نشانگرهای جنبشی میدان موج

مهرداد سلیمانی^{۱*}، احسان ادیبی^۲، هاشم شاهسونی^۳ و محمد رضا سکوتی^۲

^۱ دانشگاه صنعتی شاهرود، دانشکده مهندسی معدن، نفت و ژئوفیزیک

^۲ شرکت مدیریت اکتشاف، تهران

^۳ دانشکده مهندسی معدن، دانشگاه سنندج، کردستان

(تاریخ دریافت: ۱۳۹۱/۳/۲۲، تاریخ پذیرش: ۱۳۹۲/۵/۷)

چکیده

در این تحقیق، امکان تهیه مقطع لرزه‌ای با کیفیت زیاد با استفاده از روش نوین برانبارش سطح بازتاب مشترک مورد بررسی قرار می‌گیرد. بدین لحاظ، به منظور برطرف کردن برخی از مشکلات تصویرسازی لرزه‌ای، داده‌های به‌دست آمده در یکی از مناطق جنوب غرب ایران که دارای ساختارهای زمین‌شناسی بسیار پیچیده است، مورد پردازش قرار می‌گیرد. در ابتدا داده‌ها تحت پردازش‌های مرسوم قرار گرفته و برای استفاده از تکنیک‌های تصویرسازی زمانی آماده می‌شود. در ادامه داده‌ها به دو روش متفاوت تحت پردازش قرار خواهند گرفت. نتایج به‌دست آمده از روش پردازش متداول نشان داد که این روش‌ها در تصویرسازی لرزه‌ای از ساختارهای پیچیده دارای ضعف‌های متعددی هستند. به‌منظور برطرف کردن این مشکلات، از روش برانبارش سطح بازتاب مشترک استفاده شد. با این حال بسیاری از روش‌های نوین پردازش نیز مانند روش برانبارش سطح بازتاب مشترک علی‌رغم مزایای بسیار، در برخی مناطق با زمین‌شناسی پیچیده نیز در تصویرسازی لرزه‌ای با مشکل روبه‌رو خواهند شد. به همین دلیل روند جست‌وجوی نشانگرهای جنبشی میدان موج و فرایند بهینه‌سازی آن در روش سطح بازتاب مشترک به گونه‌ای تغییر کرد که بتوان در مناطق بسیار پیچیده نیز تصاویر لرزه‌ای با کیفیت قابل قبول به‌دست آورد. مقطع‌های لرزه‌ای و مقطع‌های نشانگرهای جنبشی میدان موج به‌دست آمده در این روش در مقایسه با مقطع لرزه‌ای به‌دست آمده در روش پردازش متداول نشان داد که می‌توان در تصویرسازی لرزه‌ای در ساختارهای پیچیده، به روش‌های نوین اعتماد کرد.

واژه‌های کلیدی: سطح بازتاب مشترک، ساختار پیچیده، نشانگر جنبشی میدان موج، ناهمگنی جانبی، تصویرسازی لرزه‌ای

Seismic imaging in geologically complex thrust belts by kinematic wavefield attributes

Mehrdad Soleimani^{1*}, Ehsan Adibi², Hashem Shahsavani³ and Mohamad Reza Sokooti²

¹ Faculty of Mining, Petroleum and Geophysics, Shahrood University of Technology, Shahrood

² NIOC, Exploration Directorate, Iran

³ University of Kurdistan, Kurdistan, Iran

(Received: 11 June 2012, accepted: 29 July 2013)

Summary

Structural interpretation in geologically complex structures is a controversial task in the field of seismic interpretation. In recent years, Seismic imaging technology continues to make remarkable progress in imaging of complex structures such as sub-salt, fault-and-thrust areas and mud volcano bearing areas. The latest advances in the areas of migration and velocity estimation are the reverse time migration, pre-stack reverse time-depth migration, common reflection surface stack, partial common reflection surface and common diffraction surface stack methods. The continuous advances in computing facilities make such data-driven approaches feasible which have increasingly gained in relevance in recent years. In these methods, the subsurface structures are imaged without deriving a complete model for the elastic properties of the layers. In this case, just an implicit knowledge of the elastic properties directly derived from data would be sufficient. Common reflection surface stack method is one of the data-based seismic imaging methods which simulate the zero offset section. It has the great advantage that it is independent from the velocity model. By paraxial ray theory, the second order travel-time equation of the common reflection surface would be derived which gives a surface-shape operator that works as the stacking surface. The basic idea of this method is to take the kinematic reflection response of a segment of the reflector with defined curvature and orientation by two hypothetical experiments providing the wavefronts of the so-called eigenwaves. One eigenwave is obtained by placing a point source at the reflector that produces the upgoing normal incidence point wave. An exploding reflector experiment yields the second upgoing eigenwave called the normal wave. The curvature and the raypath of the wavefronts of these waves are known as the parameters of the stacking operator. To simulate the zero offset section, three parameters or kinematic wavefield attributes are needed one of which is related to the emergence angle of the central ray or to the orientation of the reflector segment, while two others are related to the curvature of the reflector. Therefore, the common reflection surface stack method, unlike the common mid-point stack method, is not restricted to a subset of multicoverage data, and it also works on the full data volume. Seismic data from a complex structure in the Southwest of Iran was processed by the common reflection surface stack method to overcome some of the ambiguities of seismic imaging in such regions. In the first step, some preprocessing was done on the data to be prepared for seismic imaging. Then, the data was processed with two imaging methods. The results obtained by the conventional method showed lots of ambiguities in the final seismic section. To solve these problems, the common reflection surface stack method was applied to the data. However, the result was not promising and some sort of optimization on the method was performed. This optimization gave the best kinematic wavefield attributes in complex structures. However, due to large computation time and a large amount of sections that this method gives, the optimized common reflection surface stack was used from the beginning. The result of the latter method proved that using this method in geologically complex regions could be trusted and helpful in obtaining high quality images.

Keywords: Common reflection surface, complex structure, kinematic wavefield attribute, lateral heterogeneity, seismic imaging

۱ مقدمه

تصویرسازی در ساختارهای پیچیده و یا در حضور ناهمگنی جانبی سرعت، از جمله مشکلات عدیده در پردازش داده‌های لرزه‌نگاری بازتابی است. در این گونه ساختارها، معادلات زمان سیر و شرایط تصویرسازی، فرض‌های اولیه خود را برآورده نمی‌کنند و اعتبارشان را تا حدی از دست می‌دهند. به‌همین دلیل استفاده از معادلاتی که برای ساختارهای ساده و همگن به‌کار می‌روند، در این گونه ساختارها جواب قابل قبولی به‌دست نخواهد داد (روبین، ۲۰۱۰). روش‌های پردازش مرسوم در حالت کلی قادر به تهیه تصویری مطلوب از ساختارهای زیرسطحی در مناطق با ساختارهای پیچیده نیستند و یا در بهترین حالت، مقطع به‌دست آمده از این روش قابلیت تفسیر مناسب را نخواهد داشت (ماینه، ۱۹۶۲). لذا استفاده از روش‌هایی که برای مناطق با ناهمگنی جانبی سرعت و یا دارای ساختار نسبتاً پیچیده مناسب هستند، ضروری به‌نظر می‌رسد (سلیمانی و همکاران، ۲۰۰۹). روش برانبارش سطح بازتاب مشترک (Common Reflection Surface-CRS)، از روش‌های نوین پردازش داده‌های لرزه‌نگاری بازتابی است که معادلات آن، حالت کلی‌تر معادلات برانبارش نقطه میانی مشترک را بیان می‌کند (هوبرال، ۱۹۹۹). تجربه نشان داده است که این روش در ساختارهای معمول، جواب بهتری نسبت به روش پردازش مرسوم نقطه میانی مشترک به‌دست خواهد داد (برگلر، ۲۰۰۱؛ هایلمن، ۲۰۰۷؛ مان و همکاران، ۱۹۹۹، سلیمانی و همکاران، ۲۰۱۰ a, b). این روش که در واقع یکی از روش‌های مبتنی بر داده و یا به‌عبارت‌دیگر، مستقل از مدل است، با معرفی سه نشانگر جدید موج، اقدام به تهیه تصویر از ساختارهای زیرسطحی با دقت قابل قبول و در زمان پردازش کوتاه می‌کند. معادلات این روش قادر به تحمل ناهمگنی سرعت به مقدار بیشتری نسبت به روش‌های مرسوم هستند. باوجوداین، اثبات کارایی این

روش در مناطق مختلف با ساختارهای پیچیده، هنوز با دشواری روبه‌رو است (لایته و همکاران، ۲۰۱۰؛ بایکولوف، ۲۰۰۹؛ سلیمانی و همکاران، ۲۰۱۱؛ شاهسونی و همکاران، ۲۰۱۱).

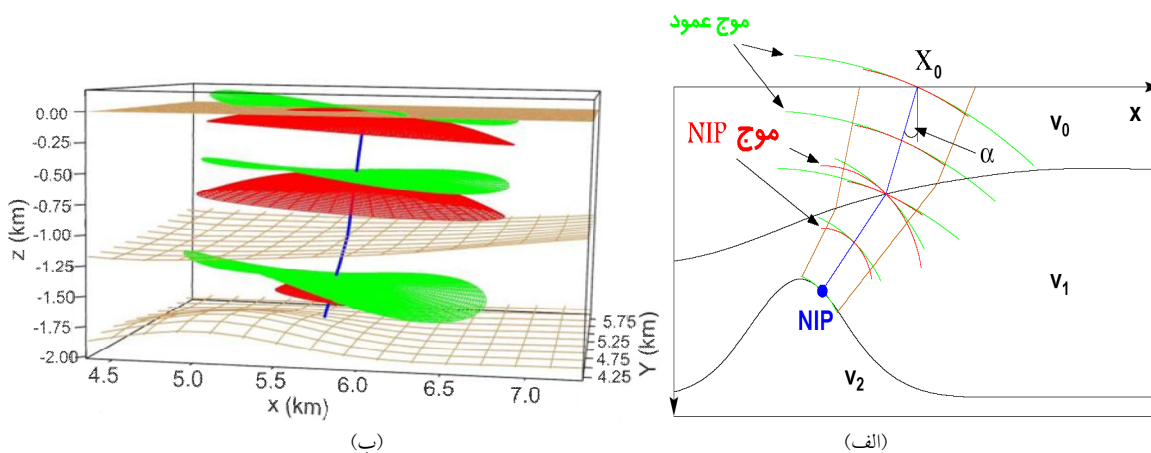
۲ روش تصویرسازی سطح بازتاب مشترک

روش کلاسیک مورد استفاده در پردازش داده‌های لرزه‌نگاری بازتابی، استفاده از مقطع‌های دورآفت صفر در فرایند تصویرسازی از ساختارهای زیر سطحی است. این روش در نوع خود دارای مزایا و معایبی است که علی‌رغم کاربرد زیاد، دارای محدودیت‌ها و هزینه‌های فراوانی است (ایلماز، ۲۰۰۱). روش نوین تصویرسازی برانبارش سطح بازتاب مشترک (CRS) براساس نظریه پرتو استوار است و نسبت به روش‌های انتگرال‌گیری کیرشلف و کوچ به دورآفت صفر، برتری‌های قابل توجهی دارد. این روش در محیط‌های با بازتابنده‌های منحنی شکل که محیط آنها تا حدی ناهمگن است، جایی که سایر روش‌ها با آن مشکل دارند (ریاحی و بازرگانی، ۱۳۸۳)، جواب قابل قبولی به‌دست می‌دهد. همچنین این روش نیازی به داشتن اطلاعاتی از مدل سرعت زیرسطحی ندارد و فقط دانستن مقدار سرعت سطحی برای تعیین عملگر برانبارشی که به‌خوبی بر رخدادها منطبق شود، کافی خواهد بود (هوبرال، ۱۹۸۳). از کاربردهای دیگر این روش می‌توان به تعیین زون فرنل (شلایشر و همکاران، ۱۹۹۷؛ ادیبی و همکاران، ۱۳۸۹)، فاکتور توزیع هندسی و همچنین فرایند معکوس‌سازی در تهیه مدل سرعت (سلیمانی و پیروز، ۲۰۰۷؛ سلیمانی و مان، ۲۰۰۹) اشاره کرد. بزرگ‌ترین مزیتی که این روش به‌همراه دارد، افزایش کیفیت مقطع و همچنین پیوستگی زیاد رخدادها در مقطع‌ها خواهد بود (توره و دی بازلاری، ۱۹۹۱).

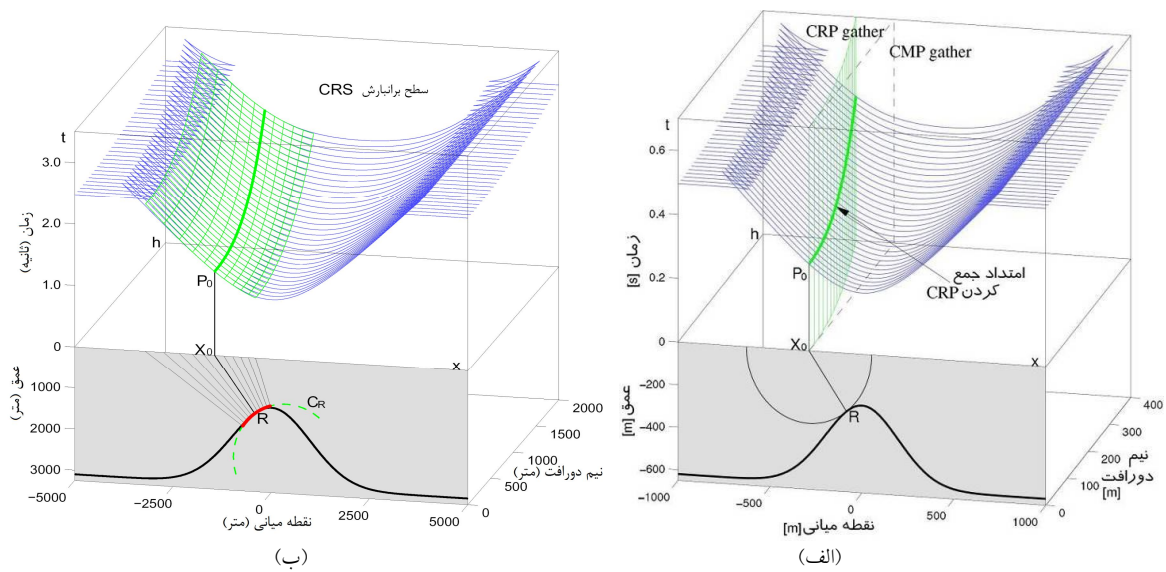
۳ عملگر برانبارش سطح بازتاب مشترک

روش برانبارش سطح بازتاب مشترک، از جمله روش‌های مبتنی بر داده است که مقطع دورآفت صفر را از داده‌های قبل از برانبارش شبیه‌سازی می‌کند. این روش نسبت به روش مرسوم یک مزیت بزرگ دارد و آن اینکه از مدل سرعت مستقل است. مفهوم این روش را ابتدا هوبرال و همکاران (۱۹۹۶) عرضه کردند و مولر (۱۹۹۹) نیز روشن ساخت که عملگر برانبارش نقطه میانی مشترک (CMP) در واقع حالت خاصی از عملگر CRS است. چرونی (۲۰۰۱) به کمک نظریه پرتوهای موازی محور نشان داد که معادله زمان سیر مرتبه دوم CRS، یک عملگر مکانی را به دست می‌دهد که می‌تواند به منزله صفحه برانبارش عمل کند. بسط تیلور مرتبه دو معادله زمان سیر آن نیز، عملگر صفحه‌ای شکلی را به دست خواهد داد که با معادلات به دست آمده به کمک نظریه اپتیک نوری (هوخت، ۱۹۹۸) همخوانی دارد (شاهسونی، ۱۳۹۰). ایده ابتدایی در روش CRS، برآورد پاسخ بازتاب جنبشی برای یک بخش کوچک از یک بازتابنده با خمیدگی و جهت‌یافتگی دلخواه، به کمک دو آزمایش فرضی در شکل ۱ برای یک مدل لایه‌ای همگن، نشان داده شده‌اند

(مان و همکاران، ۱۹۹۹). جبهه موجی که از قرار دادن یک نقطه انفجاری فرضی روی لایه بازتابنده (شکل ۱-الف) ایجاد شده و به سمت بالا حرکت می‌کند، جبهه موج عمود در نقطه ورود (Normal Incidence Point, NIP) گفته می‌شود. در آزمایش دیگر که در همان شکل ۱-الف نشان داده شده است، یک سطح انفجاری در نظر گرفته می‌شود که با رنگ سبز نشان داده می‌شود و موج ۱-الف نشان داده شده است، یک سطح انفجاری در نظر گرفته می‌شود که با رنگ سبز نشان داده می‌شود و موج تشکیل شده به نام موج عمود (Normal, N) شناخته می‌شود که دارای شعاع خمیدگی برابر سطح بازتابنده است. در نقطه x_0 در سطح، شعاع هر دو موج با دایره‌ای برآورد می‌شود که برای مثال برآورد شعاع‌های R_{NIP} با دایره سرخ‌رنگ و R_N با دایره سبز رنگ نشان داده شده است. مسیر حرکت جبهه موج‌ها و خمیدگی آنها در حکم پارامترهای عملگر برانبارش قلمداد می‌شوند. برای شبیه‌سازی مقطع دوبعدی دورآفت صفر، سه پارامتر یا نشانگرهای جنبشی میدان موج نیاز است (فیت، ۲۰۰۱). یک نشانگر مربوط به زاویه ورود پرتوی مرکزی است و بنابراین با جهت‌یافتگی بازتابنده در ارتباط است. نشانگر دیگر R_N است و به خمیدگی سطح بازتابنده بستگی دارد. نشانگر دیگر R_{NIP} است و به نوعی به عمق بازتابنده ارتباط دارد (ژنگ و همکاران، ۲۰۰۱).



شکل ۱. نشانگرهای لازم برای تعیین عملگر برانبارش سطح بازتاب مشترک. (الف) نشانگرهای میدان موج در حالت دوبعدی (با تغییرات از یاگر و همکاران، ۲۰۰۱) و (ب) نشانگرهای میدان موج در حالت سه‌بُعدی (هوبرال و کری، ۱۹۸۰).



شکل ۲. قسمت پایین، بازتابنده تاقدیسی شکل در حوزه عمق و قسمت بالا، سطح آبی رنگ، منحنی‌های زمان سیر و سطح سبز رنگ، عملگر برانبارش برای (الف) روش CMP و (ب) روش CRS را نشان می‌دهد (با تغییرات از یاگر و همکاران، ۲۰۰۱).

۳-۱ بسط تیلور برای پاسخ‌های سطح بازتاب مشترک هوخ (۱۹۹۸) معادلاتی را برای پارامترهای فوق برحسب زاویه ورود پرتوی مرکزی عرضه کرد. در این معادلات، ابتدا بسط تیلور مرتبه اول برای t و سپس مرتبه دوم برای t^2 محاسبه می‌شود که بسط مرتبه اول در برآورد زون فرنل و بسط مرتبه دوم به منزله عملگر برانبارش CRS شناخته می‌شود. بسط مرتبه اول بیانگر یک سهمی با محور تقارن در مقطع دورآفت صفر و بسط مرتبه دوم بیانگر یک هذلولی است (سلیمانی و همکاران، ۱۳۸۹):

۳-۱ بسط تیلور برای پاسخ‌های سطح بازتاب مشترک هوخ (۱۹۹۸) معادلاتی را برای پارامترهای فوق برحسب زاویه ورود پرتوی مرکزی عرضه کرد. در این معادلات، ابتدا بسط تیلور مرتبه اول برای t و سپس مرتبه دوم برای t^2 محاسبه می‌شود که بسط مرتبه اول در برآورد زون فرنل و بسط مرتبه دوم به منزله عملگر برانبارش CRS شناخته می‌شود. بسط مرتبه اول بیانگر یک سهمی با محور تقارن در مقطع دورآفت صفر و بسط مرتبه دوم بیانگر یک هذلولی است (سلیمانی و همکاران، ۱۳۸۹):

$$t_{par}(x_m, h) = t_0 + \frac{2\sin\alpha(x_m - x_0)}{V_0} + \frac{\cos^2\alpha}{V_0} \left[\frac{(x_m - x_0)^2}{R_N} + \frac{h^2}{R_{NIP}} \right], \quad (1-f)$$

$$t_{hyp}^2(x_m, h) = \left[t_0^2 + \frac{2\sin\alpha(x_m - x_0)}{V_0} \right]^2 + \frac{2t_0\cos^2\alpha}{V_0} \left[\frac{(x_m - x_0)^2}{R_N} + \frac{h^2}{R_{NIP}} \right], \quad (1-b)$$

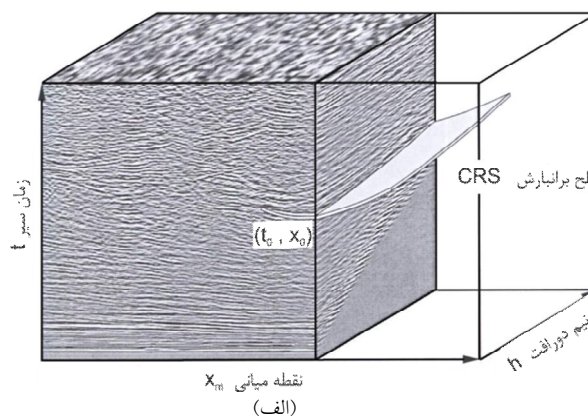
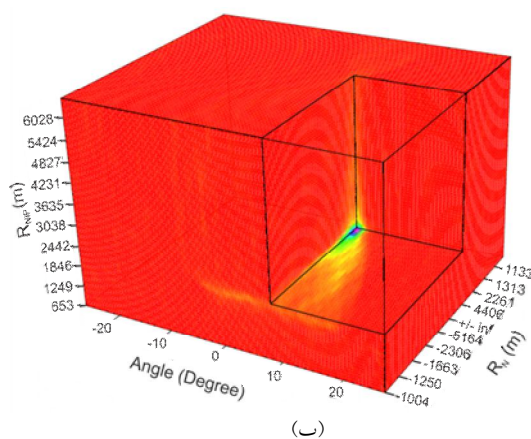
که R_N ، R_{NIP} و α نشانگرهای جنبشی میدان موج در روش CRS هستند که علاوه بر نظریه پرتو، از ماتریس انتشار نیز به دست خواهند آمد، h دورآفت، V_0 سرعت لایه سطحی،

نوفه در برانبارشی که با آن عملگر صورت می‌گیرد، افزایش خواهد داشت (ادیبی و همکاران، ۲۰۱۱b).

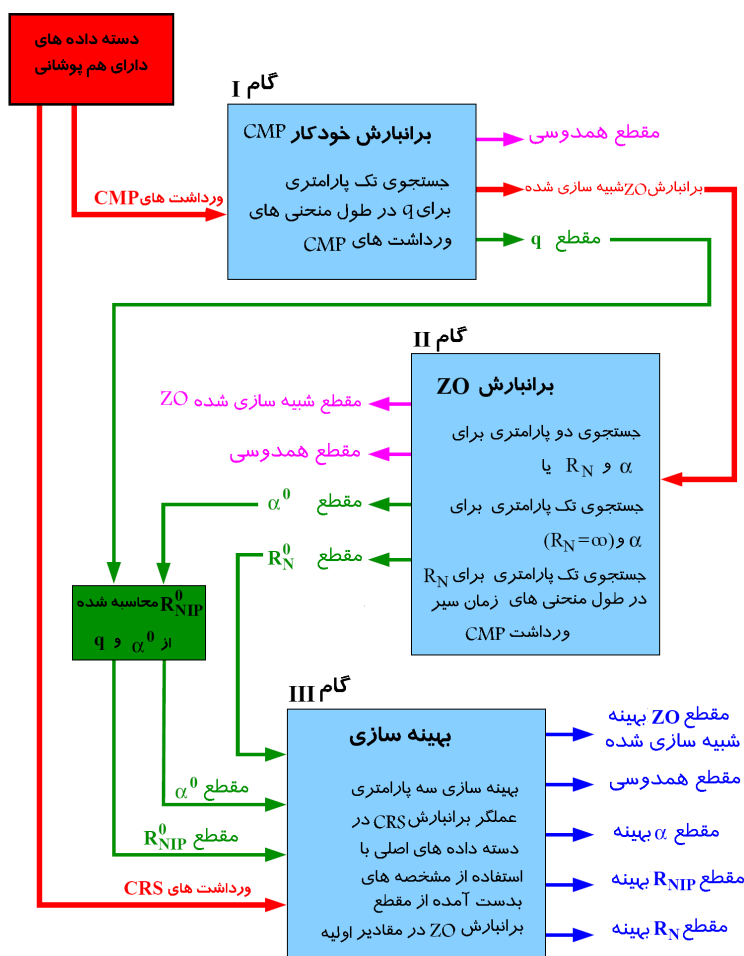
۲-۳ راهکارهای به‌دست آوردن نشانگرها و بهینه‌سازی کلی

همان‌گونه که قبلاً نیز اشاره شد، از برآورد زمان هذلولی برای تعیین عملگر برانبارش CRS استفاده می‌شود. برای هر نقطه $P_0(x_0, t_0)$ که در شکل ۲-ب نشان داده شده است، باید پارامترهای سه‌گانه (R_N, R_{NIP}, α) ، یعنی آن سه‌گانه‌هایی که بهترین انطباق را بر رخدادهای بازتابی سطح زمان سیر دارند، انتخاب شوند. نقطه (x_0, t_0) در مقطع دورآفت صفر شکل ۳-الف، معادل نقطه $P_0(x_0, t_0)$ در شکل ۲-ب است که نتیجه برانبارش روی سطح CRS، که با رنگ خاکستری نشان داده شده، به این نقطه اختصاص داده می‌شود. ساده‌ترین روش، آزمایش همه سه‌گانه‌هایی است که بهترین انطباق و یا در واقع بالاترین میزان هم‌دوسی را دارد. البته لازم به ذکر است که مجموعه این داده‌ها، محدود به یک شبکه سه‌بعدی هستند. ولی از نقطه نظر کاربردی، باید به دنبال راهکاری بود که پارامترهای بهینه سه‌گانه را در زمان و روش موثری به‌دست دهد.

سطح بازتابنده منحنی شکل را نشان می‌دهد و در بالای شکل، منحنی‌های زمان سیر (خطوط آبی‌رنگ) پرتوهای بازتابنده از این سطح در حوزه مختصات نقطه میانی، نیم دورآفت و زمان (x, h, t) نشان داده شده است. منحنی سرخ‌رنگ روی سطح بازتابنده نیز دایره‌ای است که شعاع بخش پُررنگ آن برابر شعاع سطح بازتابنده در آن قسمت است و از آن با عنوان سطح انفجار در برانبارش CRS یاد می‌شود. همه پرتوهای نشان داده شده بر این بخش سرخ‌رنگ عمود می‌باشند و زمان سیر آنها روی منحنی سبز رنگ نشان داده می‌شود. با افزایش دورآفت، این نقطه روی منحنی‌های زمان سیر حرکت و روند نقطه بازتاب مشترک را ایجاد می‌کند که در هر دو شکل با خط سبز پُررنگ نشان داده شده است. البته در این حالت فقط یک پرتو مورد توجه نیست، بلکه همه پرتوهایی که از سطح سرخ‌رنگ گسیل می‌شوند، مشابه همین روند را در منحنی‌های زمان سیر طی و خود سطحی را ایجاد می‌کنند که با رنگ سبز نشان داده شده است. به این سطح سبز رنگ، عملگر برانبارش سطح بازتاب مشترک CRS می‌گویند (یاگر و همکاران، ۲۰۰۱). هرچه انطباق این عملگر با سطح منحنی‌های زمان سیر بیشتر باشد، در آن صورت عملگر از دقت بیشتری دارد و نسبت سیگنال به



شکل ۳. الف) نقطه (t_0, X_0) که سطح CRS برای آن تعریف می‌شود و ب) مکعب مقادیر هم‌دوسی برای نقطه P_0 (با تغییرات از هرتوک، ۲۰۰۴).



شکل ۴. گام‌های صورت گرفته در طی پردازش به روش CRS. (سلیمانی، ۱۳۸۸).

(سلیمانی، ۱۳۸۸). بدین ترتیب مسئله‌ای که باید حل شود به صورت زیر است؛ انتخاب بیشینه مطلق مقادیر همدوسی که تابعی است از متغیرهای سه گانه مستقل (R_N, R_{NIP}, α) با کمترین حجم محاسبات و زمان ممکن. این مسئله از جمله دغدغه‌های کلی انواع برنامه‌های بهینه‌سازی است که الگوریتم‌های فراوانی نیز برای آن وجود دارد (ادیبی و همکاران، ۲۰۱۱a). با این حال یافتن فرین‌های کلی، از دشوارترین مسائل است که در اینجا کاملاً به تابع همدوسی که در الگوریتم استفاده می‌شود بستگی خواهد داشت. برای مثال، مکعب مقادیر همدوسی برای نشانگرهای جنبشی میدان موج، نقطه موردنظر

(سلیمانی، ۱۳۸۸). بدین ترتیب مسئله‌ای که باید حل شود به صورت زیر است؛ انتخاب بیشینه مطلق مقادیر همدوسی که تابعی است از متغیرهای سه گانه مستقل (R_N, R_{NIP}, α) با کمترین حجم محاسبات و زمان ممکن. این مسئله از جمله دغدغه‌های کلی انواع برنامه‌های بهینه‌سازی است که الگوریتم‌های فراوانی نیز برای آن وجود دارد (ادیبی و همکاران، ۲۰۱۱a). با این حال یافتن فرین‌های کلی، از دشوارترین مسائل است که در اینجا کاملاً به تابع همدوسی که در الگوریتم استفاده می‌شود بستگی خواهد داشت. برای مثال، مکعب مقادیر همدوسی برای نشانگرهای جنبشی میدان موج، نقطه موردنظر

می‌تواند به شکل رفت و برگشتی صورت گیرد. در بخش بهینه‌سازی که موضوع اصلی بررسی در این تحقیق است، نشانگرهای اولیه به دست آمده وارد یک الگوریتم بهینه‌سازی می‌شوند. در این مرحله از الگوریتم چندوجهی قابل انعطاف استفاده می‌شود. در انتهای این گام

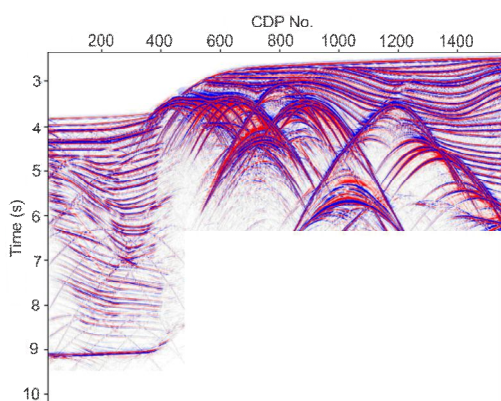
براساس گنبد‌های نمکی خلیج مکزیک است که مدل سرعت آن در شکل ۵-الف نشان داده شده است. در ابتدا این داده به روش‌های مرسوم و CRS تحت پردازش قرار گرفت. مقطع پردازش شده به روش CRS در شکل ۵-ب نشان داده شده است. به منظور کاهش حجم زمان پردازش، بخش سمت راست پایین مقطع از روند پردازش حذف شد. مقطع‌های کوچکی برای مقایسه نتیجه پردازش به روش‌های متفاوت روی این داده مصنوعی آورده شده که نشان‌دهنده چگونگی بهبود تصویرسازی به روش CRS بهینه است. این مناطق مربوط به محلی است که رخدادهای پراش بزرگ ناشی از گنبد‌های نمکی، رخدادهای بازتابی افقی قسمت لایه‌ای شکل را قطع می‌کنند (شکل ۶).

در کنار چپ این مقطع‌ها، رخدادهای بازتابی قوی، انتهای رخدادهای پراش یا به اصطلاح دم آنها را پوشانده‌اند. در مقطع به دست آمده به روش مرسوم (شکل ۶-الف)، بیشتر رخدادهای پراش با رخدادهای بازتابی قوی پوشیده شده‌اند. در مقطع برانبارش شده به روش CRS (شکل ۶-ب)، برخی از رخدادهای بازتابی چنان قوی هستند که در این مقطع نیز رخدادهای پراش را

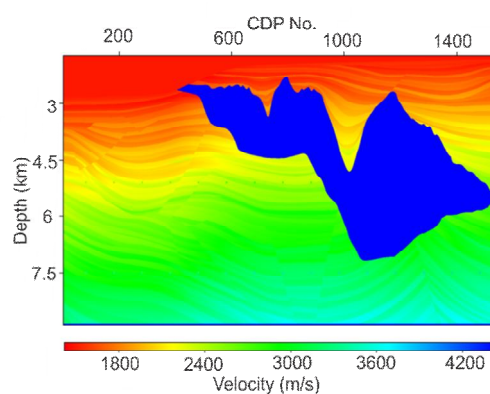
نیز پنج مقطع به دست می‌آید که عبارت‌اند از: مقطع برانبارش CRS یا مقطع نهایی شبیه‌سازی شده دورافت صفر، مقطع همدوسی حداکثر، مقطع α بهینه شده، مقطع R_N بهینه شده و مقطع R_{NIP} بهینه شده (سلیمانی و همکاران، ۲۰۱۱). شکل ۴ تمامی این مراحل را در یک نمودار گردشی نشان می‌دهد. همان‌گونه که در این شکل دیده می‌شود، خروجی هر مرحله از پردازش، ورودی مرحله دیگر را تامین می‌کند. در عین حال در طول این مراحل، نشانگرهای جنبشی میدان موج تعیین می‌شود و در نهایت بهینه‌سازی روی آن نیز صورت خواهد گرفت. در انتها نیز با تعیین نشانگرهای جنبشی بهینه، سطح برانبارش ساخته می‌شود و عملیات برانبارش روی آن سطح صورت می‌گیرد (سلیمانی، ۱۳۸۸).

۴ پردازش داده‌ها به روش CRS

در این بخش، دو دسته داده مورد پردازش قرار خواهد گرفت. به منظور نشان دادن کارایی بخش بهینه‌سازی و روش CRS، ابتدا داده مصنوعی مورد پردازش قرار می‌گیرد و پس از تعیین کارایی روش پیش‌گفته، از این روش روی داده واقعی استفاده می‌شود. داده مصنوعی مورد استفاده در این بخش، یک داده مصنوعی تولید شده

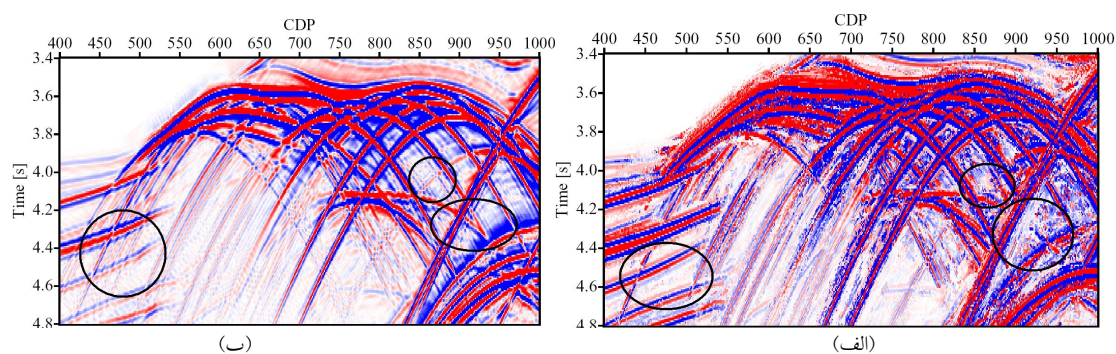


(ب)



(الف)

شکل ۵. (الف) داده مصنوعی استفاده شده و مدل سرعتی آن و (ب) مقطع برانبارش شده بهینه CRS که بخش سمت پایین راست آن به منظور کاهش حجم زمان پردازش حذف شده است.



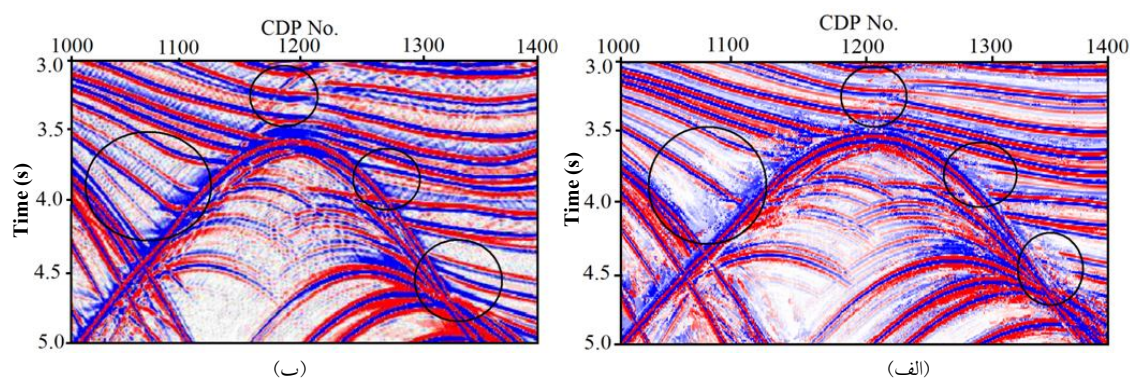
شکل ۶. نتیجه پردازش روی داده مصنوعی. (الف) مقطعی از برنبارش به روش مرسوم و (ب) مقطع کوچکی از برنبارش به روش CRS.

به‌خوبی تصویر شده‌اند. پس از پردازش روی داده مصنوعی، اکنون لازم است که این روش روی داده واقعی با ساختار پیچیده اعمال شود. داده‌های واقعی که در این تحقیق مورد پردازش به روش‌های مرسوم و سطح بازتاب مشترک قرار می‌گیرند، مربوط به یک منطقه با ساختار روراندگی در جنوب غربی کشور است. عملیات برداشت لرزه‌نگاری به‌منظور کسب اطلاع از این ساختار چین‌خورده شدید، با چند خط دوتایی به انجام رسیده است.

وجود روراندگی، چین‌خوردگی شدید و همچنین توپوگرافی شدید منطقه، موجبات مواجهه با یک ساختار پیچیده را در مقطع موردنظر فراهم ساخته است. به‌علت پیچیده بودن ساختار ناحیه پیش‌گفته، طیف سرعت حاصل دارای سرعت‌های متمایز و واضحی که بیانگر لایه‌های بازتابنده باشد، نیست و این امر انتخاب سرعت مناسب را با مشکلات فراوانی مواجه خواهد کرد. اجرای تصحیح برون‌راند نرمال، به انجام رساندن مرحله تصحیح ایستای باقی مانده، تحلیل سرعت مجدد، اجرای دوباره تصحیح برون‌راند نرمال و برنبارش از جمله مراحل بود که به‌منظور حصول مقطع دورآفت صفر با کیفیت مناسب به انجام رسید. شکل ۸ مقطع دورآفت صفر به‌دست آمده از روش پردازش مرسوم را نشان می‌دهد.

پوشانده‌اند، ولی رخدادهای قوی پراش نیز دیده می‌شوند. با قدری افزایش عمق و ضعیف‌تر شدن رخدادهای بازتابی، رخدادهای پراش نیز به‌خوبی آشکار شده‌اند. در سمت راست مقطع (شکل ۶-ب) رخدادهای پراش یکدیگر را قطع و مسئله تداخل شیب‌ها را ایجاد کرده‌اند. دایره‌های رسم شده روی مقطع‌ها، برخی از تفاوت‌های بین دو مقطع را نشان می‌دهند. در مقطع برنبارش شده CRS، انتهای رخدادهای پراش به‌خوبی آشکار شده است. شکل ۷ نیز یکی دیگر از مزایای روش CRS را روی داده مصنوعی نشان می‌دهد. همان‌گونه که در شکل دیده می‌شود، یک رخداد پراش بزرگ با بسیاری از رخدادهای بازتابی در طول مقطع تداخل کرده است. شکل ۷-الف مقطع مربوط به پردازش مرسوم است. در مناطقی که با دایره در این شکل مشخص شده‌اند، مسئله تداخل شیب‌ها برطرف نشده است و به‌همین دلیل رخدادهای در این محل به‌خوبی تصویر نشده‌اند. شکل ۷-ب مقطع مربوط به پردازش CRS را نشان می‌دهد.

همان دایره‌ها در محل‌های قبلی نیز در این مقطع، محل وجود مسئله تداخل شیب‌ها را نشان می‌دهند. مشخصاً این مشکل در مقطع برنبارش مربوط به CRS برطرف شده و مشاهده می‌شود که رخدادهای چگونه



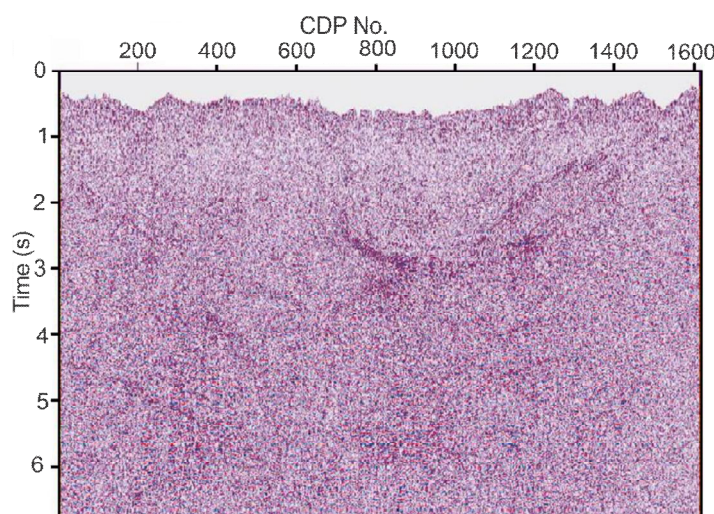
شکل ۷. نتیجه پردازش روی داده مصنوعی. الف) مقطعی از برانبارش به روش مرسوم و ب) مقطع کوچکی از برانبارش به روش CRS.

است. انحنای شیب و چگونگی تشکیل این صفحه، با سه نشانگر جنبشی میدان موج که بهینه نیز شده‌اند، تعیین می‌شود. پس از اجرای عملیات برانبارش روی این صفحه، نتیجه برانبارش به نقطه P_0 اختصاص داده می‌شود. در کنار این شکل، عملگر برانبارش CMP نیز نشان داده شده است که فقط به شکل یک روند منحنی روی برداشت نقطه میانی مشترک است و در امتداد نقطه میانی، توسعه نیافته است. مسئله مهم دیگر در اجرای روش CRS بهینه، در نظر گرفتن پارامترهای بهینه‌سازی است. روش‌های بهینه‌سازی معمولاً در داده‌های با نوفه زیاد و یا داده‌های مربوط به ساختارهای پیچیده، دچار مشکل خواهند شد.

در این گونه مواقع، دست‌یافتن به مقادیر بهینه ممکن است دشوار و در برخی مواقع غیرممکن باشد. در جدول ۱، پارامترهایی برای تعیین مقدار بهینه آورده شده است. این پارامترها در داده‌های با سطح نوفه متوسط نیز کارآمد خواهند بود. در شکل ۳ ب، نشانگرهای جنبشی میدان موج در داده‌ای با سطح نوفه کم به دست آمده‌اند. همان‌گونه که دیده می‌شود، نشانگرها در این حالت بسیار خوب به دست آمده‌اند و می‌توان با استفاده از آنها، عملگر واقعی CRS را تعیین کرد. در عین حال در شکل ۱۰، نوفه زیاد، امکان تعیین نشانگرهای واقعی و در نتیجه عملگر واقعی CRS را نمی‌دهد. البته این مسئله، بدین معنی نیست که در یک داده با نوفه زیاد، در همه نقاطی که عملگر

در کنار روش مرسوم، داده‌ها همچنین تحت پردازش به روش برانبارش بهینه سطح بازتاب مشترک نیز قرار گرفتند. تعیین پارامترهای مناسب برای عملیات جست‌وجو امری بسیار مهم در پردازش به روش CRS است. پردازش داده‌های پیش‌گفته طی سه مرحله صورت گرفت. در این روند، مرحله اول برانبارش خودکار CMP، مرحله دوم جست‌وجوی مقادیر اولیه نشانگرهای جنبشی میدان موج و برانبارش CRS با استفاده از نشانگرهای پیش‌گفته و در نهایت مرحله بهینه‌سازی نشانگرهای حاصل از مرحله دوم به کمک الگوریتم بهینه‌سازی چندوجهی است. پارامترهای تعیین بازه در جدول ۱ و چگونگی تعیین آن در شکل ۹ نشان داده شده است. بازه موردنظر ابتدا در صفحه زمان و دورافت (شکل ۹ ب) و سپس در صفحه زمان و نقطه میانی (شکل ۹ ج) تعیین می‌شود. با در نظر گرفتن پارامتری به نام ابعاد تعمیم بازه، در نهایت شکل بازه CRS در صفحه دورافت - نقطه میانی، به شکل صفحه خاکستری‌رنگ در شکل ۹-الف خواهد شد که حاصل از ترکیب دو بازه در شکل‌های ۹-ب و ۹-ج است. شکل ۹-د، موقعیت بازه CRS را در حجم داده نشان می‌دهد.

صفحه سبز رنگ در این شکل، بازه CRS است که عملیات برانبارش روی این صفحه صورت می‌گیرد. به همین علت، به آن عملگر برانبارش نیز گفته می‌شود. در واقع این عملگر، معادل صفحه سبز رنگ در شکل ۲-ب



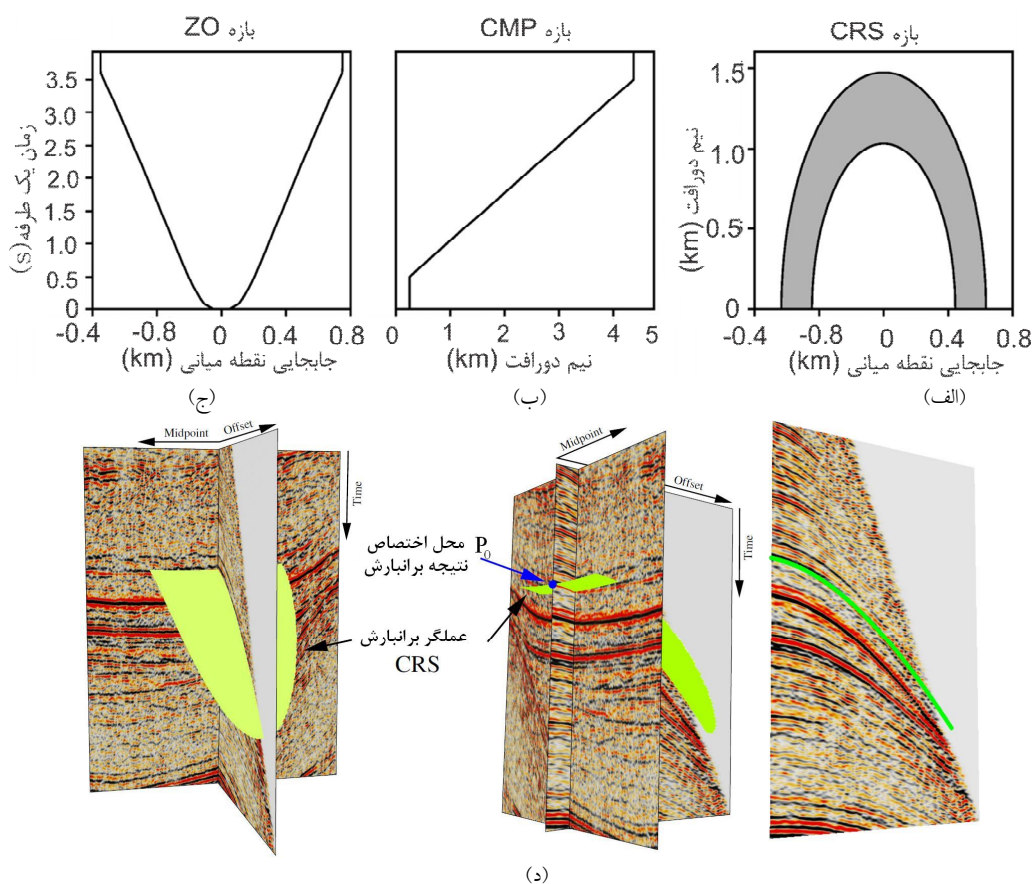
شکل ۸. مقطع دورآفت صفر حاصل از پردازش به روش مرسوم.

برداشت نامنظم است، یا بخشی از برداشت در طول خط به شکل فضای خالی برداشت نشده باقی مانده است، این عملگر به خوبی قادر به شناسایی رخدادها و تهیه تصویر لرزه‌ای مناسب از زیر سطح است. در صورتی که سطح نوفه خیلی بالا باشد، با تغییر نوع عملگر و تغییر روش تعیین عملگر با معرفی یک نشانگر جدید، این مشکل به شکل بسیار قابل قبولی، برطرف خواهد شد (شاهسونی و همکاران، ۲۰۱۱).

در مرحله اول، بازه‌ایی در محدوده تغییرات نقطه میانی که در این داده به صورت یک بازه خطی از زمان ۰/۱ ثانیه تا ۷ ثانیه است، انتخاب شد (ادیبی و همکاران، ۱۳۸۹). در این مرحله، علاوه بر مقطع برانبارش شده به صورت خودکار، مقطع همدوسی و مقطع سرعت برانبارش نیز به دست می‌آید. در این تحقیق، مدل اولیه‌ایی شامل سرعت اولیه 2000 m/s ، سرعت متوسط 4000 m/s و سرعت نهایی 7000 m/s انتخاب شد. شکل‌های ۱۱-الف و ۱۱-ب به ترتیب مقطع همدوسی مربوط به این مرحله و همچنین مقطع دورآفت صفر حاصل از برانبارش خودکار CMP را نشان می‌دهند. همان‌طور که در تصویر مشاهده می‌شود، آشفتگی و نبود پیوستگی و همچنین واپیچش در

CRS برای آنها تعیین می‌شود، بهینه‌سازی در فرین‌های محلی به تله بیافتند یا هیچ‌وقت به جواب نرسد. بنابراین ابتدا با تعیین معیارهایی، آن نقاطی که عملگر CRS در آنها به شکل واقعی به دست نیامده است، نمایش داده می‌شوند. سپس با اضافه کردن محدودیت‌هایی، آن عملگرهایی که غیرواقعی هستند، حذف خواهند شد. البته لازم به ذکر است که حذف تعدادی از عملگرهای برانبارش برای تعدادی از نقاط، باعث کاهش دقت تصویرسازی لرزه‌ای نخواهد شد.

همان‌گونه که اشاره شد، عملگر CRS برای همه نقاط داده در یک رد لرزه‌ای، برای همه ردهای لرزه‌ای و برای همه CMP ها تعیین می‌شود. برای مثال، در داده‌ای با 2000 CMP ، و هر 360 CMP با 360 CMP رد لرزه‌ای با نمونه برداری ۲ میلی ثانیه و طول ضبط ۷ ثانیه، تعداد دو میلیارد و پانصد بیست میلیون عملگر CRS وجود خواهد داشت. پس در صورتی که این نوفه‌ها در داده پخش باشند، حذف تعدادی از عملگرهای غیرواقعی CRS، هیچ‌گونه مشکلی را در تهیه یک مقطع با کیفیت زیاد ایجاد نمی‌کند. به بیان دیگر، عملگرهای CRS دارای سطح پوشش وسیع و قدرت زیادی هستند که حتی در داده‌هایی که



شکل ۹. (الف) بازه استفاده شده در پردازش CRS بهینه که از روی مقادیر تعیین شده برای بازه در مراحل برانبارش خودکار CMP در شکل (ب) و نقاط تعیین شده در بازه دورآفت صفر در شکل (ج) تعیین می‌شود. (سلیمانی ۱۳۸۸) و (د) شکل نهایی بازه در روش CRS بهینه که با صفحه زرد رنگ نشان داده شده است، (با تغییرات از بایکولوف، ۲۰۰۹).

CMP، با استفاده از داده‌های به دست آمده در این مرحله، به جست‌وجوی پارامترهای سه‌گانه CRS در گام دوم پرداخته می‌شود. این جست‌وجو در دو بخش به انجام خواهد رسید. در بخش اول با توجه به راهبرد جست‌وجوی نشان داده در شکل ۴، مقادیر اولیه‌ای برای این سه پارامتر در نظر گرفته و در بخش دوم به کمک یک الگوریتم بهینه‌سازی، مقادیر بهینه این پارامترها تعیین می‌شود و برانبارش CRS با استفاده از این پارامترها صورت می‌گیرد. شکل ۱۲-الف، مقطع دورآفت صفر حاصل از برانبارش CRS و شکل ۱۲-ب، مقطع دورآفت صفر حاصل از برانبارش بهینه CRS را نشان می‌دهد.

قسمت‌هایی با کمبود انرژی در آن بخش‌ها، از ویژگی‌های بارز این مقطع است. همان‌طور که پیش‌تر به آن اشاره شد، مقطع موردنظر دارای ساختاری پیچیده است که این امر انتخاب سرعت مناسب برای برانبارش را با مشکل مواجه می‌کند. در برانبارش خودکار CMP نیز شرایط بدین‌گونه خواهد بود و سرعت‌های انتخاب شده در این مرحله، صحت و دقت کافی ندارند. نکته قابل توجه در پردازش به روش CRS، بهینه‌سازی پارامترهای به دست آمده از مرحله اول طی گام‌های بعدی است. بنابراین کیفیت کم مقطع حاصل از این مرحله نگران‌کننده نیست و مقطع‌های حاصل از مراحل بعدی، کیفیت بسیار بیشتری را نمایش خواهند داد. پس از مرحله برانبارش خودکار

جدول ۱. پارامترهای پردازش در شبیه‌سازی مقطع دورآفت صفر.

نوع پارامتر	پارامتر پردازش	مقدار
پارامترهای عمومی	بسامد غالب	۳۰ هرتز
	معیار همدوسی	شبیه بودن
	داده‌های مورد استفاده در تحلیل همدوسی	ردلرزه‌های اصلی
	عرض نوار همدوسی	۵۶ میلی ثانیه
سرعت و مرزهای جست‌وجوی سرعت بهینه	سرعت نزدیک سطح	۲۰۰۰ متر بر ثانیه
	سرعت برانبارش تحت جست‌وجو	۲۰۰۰ تا ۷۰۰۰ متر بر ثانیه
منطقه هدف	زمان سیر شبیه‌سازی شده در ZO	۰ تا ۷ ثانیه
	فاصله نمونه‌برداری در شبیه‌سازی	۴ میلی ثانیه
	تعداد ردلرزه‌های شبیه‌سازی شده در ZO	۱۶۱۸
	فاصله بین ردلرزه‌ها در شبیه‌سازی ZO	۱۵ متر
بازه جست‌وجوی بین ردلرزه‌ها	کمینه بازه ZO	۵۰ متر در ۰.۱ ثانیه
	بیشینه بازه ZO	۷۰۰ متر در ۷ ثانیه
	کمینه بازه CMP	۱۵ متر در ۰.۱ ثانیه
	بیشینه بازه CMP	۴۵۰۰ متر در ۷ ثانیه
	ابعاد تعمیم بازه	۳۰٪
برانبارش خودکار CMP	اولین برون‌راند نرمال برای بزرگ‌ترین دورآفت	۴ میلی ثانیه
	تعداد مراتب کاهش ابعاد شبکه	۳
جست‌وجوی خطی ZO	بازه زاویه مورد جست‌وجو	۶۰- تا ۶۰+ درجه
	گام بین زاویه‌های مورد جست‌وجو	۱ درجه
	مراتب تکرار در بهینه کردن جست‌وجو	۳
جست‌وجوی هذلولوی ZO	اولین برون‌راند برای بزرگ‌ترین فاصله ZO	۴ میلی ثانیه
	مراتب تکرار در بهینه کردن جست‌وجو	۳
جست‌وجوی هذلولوی در چشمه مشترک/گیرنده مشترک	اولین برون‌راند نرمال برای بزرگ‌ترین دورآفت	۴ میلی ثانیه
	مراتب تکرار در بهینه کردن جست‌وجو	۳
بهینه‌سازی محلی	آستانه همدوسی برای کمترین زمان سیر	۰/۰۵
	آستانه همدوسی برای بزرگ‌ترین زمان سیر	۰/۰۲
	بیشینه تعداد تکرار در جست‌وجو	۱۰۰
	بیشینه انحراف نسبی برای توقف جست‌وجو	۱۰ ^{-۴}
	تغییرات اولیه در زوایای ورودی	۶ درجه
	تغییرات اولیه برای RNIP	۵٪
	تغییرات اولیه برای RN تبدیل یافته	۶ درجه
	تبدیل شعاع برای RN	۱۰۰ متر

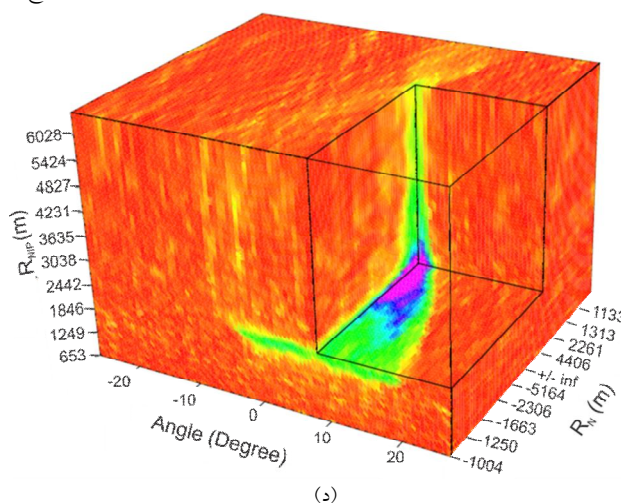
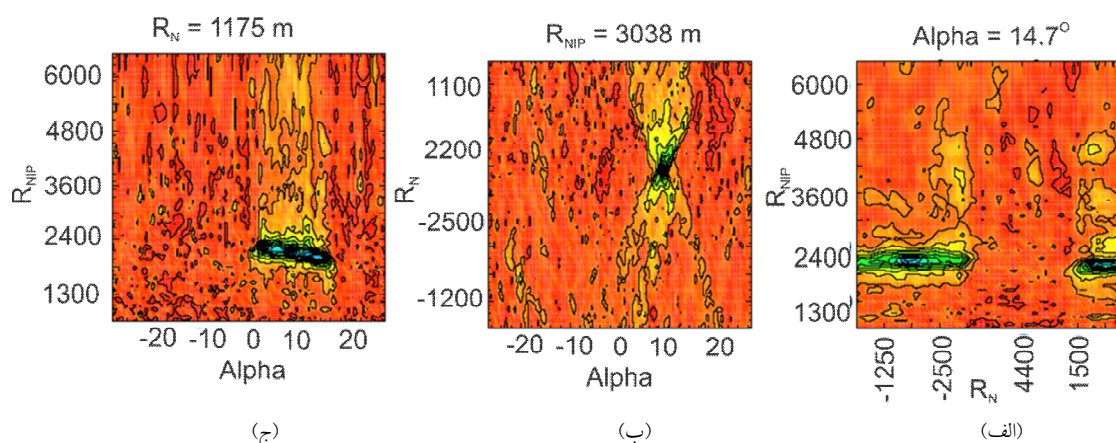
مرحله قبل (شکل ۸)، مقطع دورآفت صفر حاصل از CRS
بهینه به وضوح دارای کیفیت بهتری است. در قسمت

در مقایسه مقطع‌های بهینه با مقطع دورآفت صفر
حاصل از برانبارش و مقطع دورآفت صفر به دست آمده در

مقادیر زیادی از همدوسی را در بر دارد، درحالی که در قسمت‌های پایین روند چین خوردگی، این مقادیر به شدت کاهش می‌یابد. این مقطع شکل لایه‌بندی و سطوح بازتابنده را به خوبی به تصویر کشیده است. به علت وجود مقدار بسیار زیاد نوفه زمینه در این داده‌ها، میزان همدوسی بیشینه در این مقطع بین صفر تا ۰/۰۵ تغییر می‌کند. البته می‌توان بیان کرد که علت کم بودن مقدار همدوسی، پیچیده بودن ساختار پیش گفته و احتمالاً وجود تغییر جانبی سرعت است. البته لازم به ذکر است که نه برای مقادیر متفاوت بازه و نه برای داده‌های گوناگون، مقادیر همدوسی به هیچ عنوان قابل مقایسه با یکدیگر نیستند.

بالایی مقطع، امتداد لایه‌های چین خورده در مقطع CRS پیوستگی بیشتری دارد و تعقیب امتداد لایه‌بندی در آن بسیار آسان‌تر است. همچنین در قسمت‌های پایینی که وقایع بازتابی ضعیفی در مقطع دورآفت CMP دیده می‌شود، در مقطع CRS به شکل واضح‌تر و با پیوستگی بیشتری آشکارسازی شدند. در پردازش به روش CRS علاوه بر مقطع دورآفت صفر، پارامترهای CRS نیز خود دارای مقطع‌هایی هستند که هر کدام به گونه‌ای نمایانگر تصویری از سطوح بازتابی و لایه‌ها هستند.

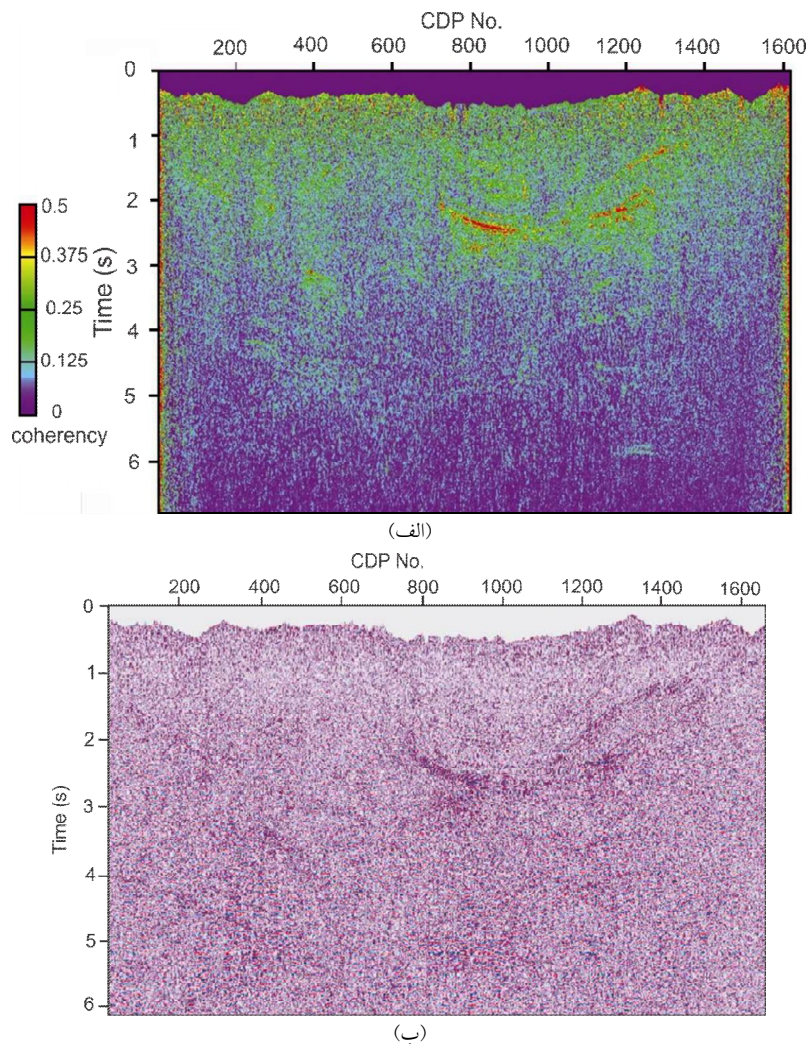
شکل ۱۳-الف نمایانگر مقطع همدوسی CRS است. همان گونه که مشاهده می‌شود، قسمت بالایی مقطع که در آن روند چین خوردگی لایه هدف به چشم می‌خورد،



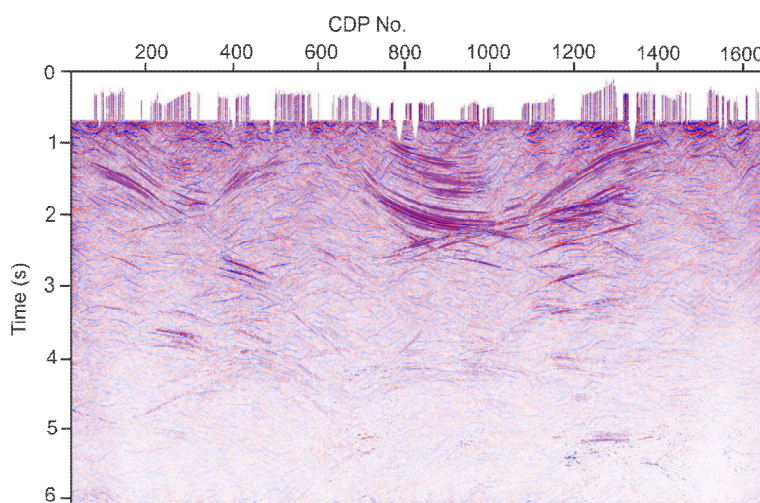
شکل ۱۰. تهیه نشانگرهای بهینه جنبشی میدان موج در بخشی از داده‌های واقعی با سطح نوفه زیاد. (الف) تا (ج)، تعیین پارامترها در صفحه‌های دو بُعدی و (د) مکعب همدوسی پارامترها.

شکل ۱۴-الف بیانگر شعاع خمیدگی جبهه موج عمود در نقطه ورود، R_{NIP} است. به منزله یک اصل، با افزایش زمان سیر یا افزایش عمق، میزان R_{NIP} نیز به صورت پیوسته افزایش پیدا می‌کند. در داده‌های پیش گفته به علت پیچیدگی ساختار، مقادیر R_{NIP} بیانگر عمق واقعی پدیده‌ها نیست. عمق واقعی با اعمال کوچ در حوضه عمق، تصویرسازی خواهد شد (شلایشر و همکاران، ۱۹۹۷). شعاع خمیدگی جبهه موج عمود R_N در شکل ۱۴-ب نشان داده شده است. مقدار بهینه R_N در ارتباط با شعاع خمیدگی بازتابنده در مقطع دورآفت صفر

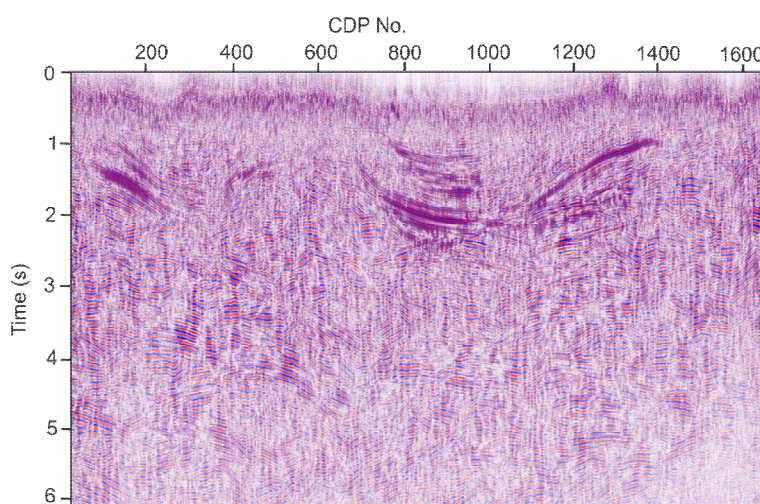
شکل ۱۳-ب نیز مقطع زاویه ورود پرتوی مرکزی را نشان می‌دهد. همان‌گونه که انتظار می‌رود، زاویه ورود برای رخداد‌های افقی برابر صفر درجه است و مقادیر منفی و مثبت در زوایای ورود نشان‌دهنده جهت ورود پرتوی مرکزی به سطح است. با توجه به رابطه مستقیم بین زاویه ورود و شیب رخداد در مقطع دورآفت صفر، همخوانی این مقطع با رخداد‌های بازتابی، به خوبی مشخص می‌شود. روند مثبت و منفی چین‌خوردگی در قسمت بالایی مقطع به خوبی با نشانگر زاویه ورود پرتوی مرکزی تصویرسازی شده است.



شکل ۱۱. (الف) مقطع هم‌دوسی مربوط به داده‌های ساختار پیچیده در مرحله برانبارش خودکار CMP و (ب) مقطع دورآفت صفر حاصل از برانبارش خودکار.



(الف)



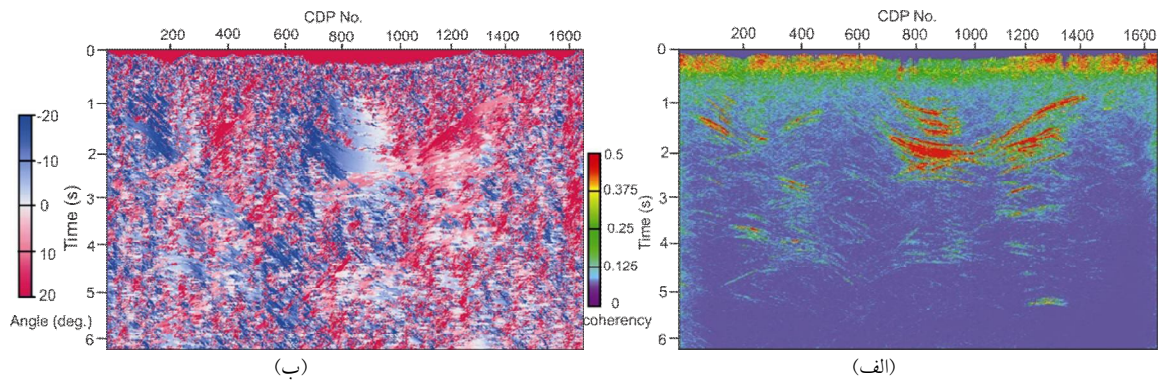
(ب)

شکل ۱۲. (الف) مقطع دورآفت صفر حاصل از برانبارش CRS و (ب) مقطع دورآفت صفر حاصل از برانبارش CRS بهینه.

ارتباط با برآمدگی و فرورفتگی در بازتابنده است. مقطع R_N به خوبی توانسته است شکل بازتابنده‌ها را به تصویر بکشد. همان‌طور که در تصویر مشاهده می‌کنید، تصویر حاصل از چین خوردگی موجود در مقطع برانبارش با همه جزئیات در این مقطع هم قابل مشاهده است. در نهایت شکل ۱۵-الف و ۱۵-ب، تعداد ردهای لرزه‌ای که در دو روش برانبارش CMP و CRS برای به تصویر کشیدن یک نقطه در مقطع دورآفت صفر مورد استفاده قرار گرفته‌اند را نشان می‌دهد. تعداد ردهای لرزه‌ای

در عمق است. برای نمایش و تفسیر بهتر مقدار شعاع خمیدگی بازتابنده، از مقدار عکس شعاع موج عمود، $1/R_N$ استفاده می‌شود.

چراکه مقدار شعاع خمیدگی برای بازتابنده‌های مسطح، برابر بی‌نهایت خواهد شد که طبیعتاً نشان دادن این مقدار در مقطع غیرممکن خواهد بود؛ ولی مقدار عکس آن برابر صفر خواهد شد که برای نمایش در مقطع مناسب‌تر است. بنابراین مقدار $1/R_N$ برای بازتابنده‌های مسطح، برابر صفر است. مقدار مثبت و منفی در این مقطع نیز به ترتیب در

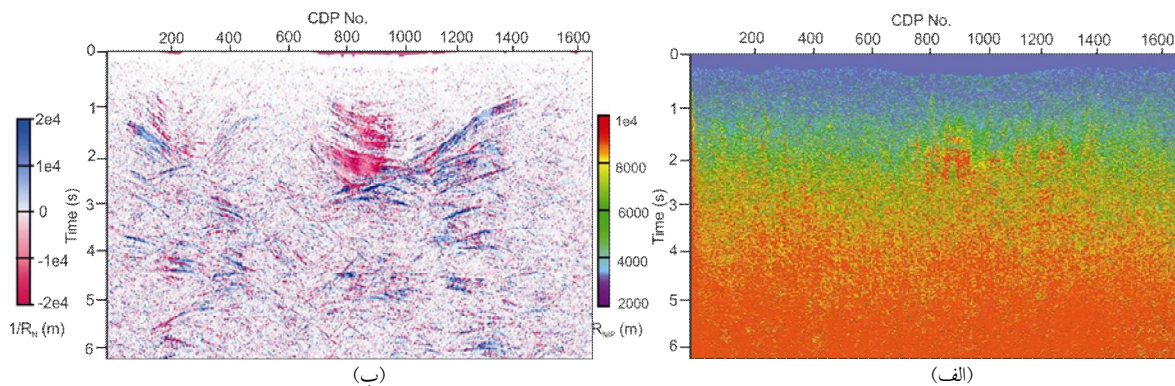


شکل ۱۳. (الف) مقطع همدوسی شباهت CRS بهینه و (ب) مقطع بهینه زاویه ورود پرتوی مرکزی (α) حاصل از پردازش CRS.

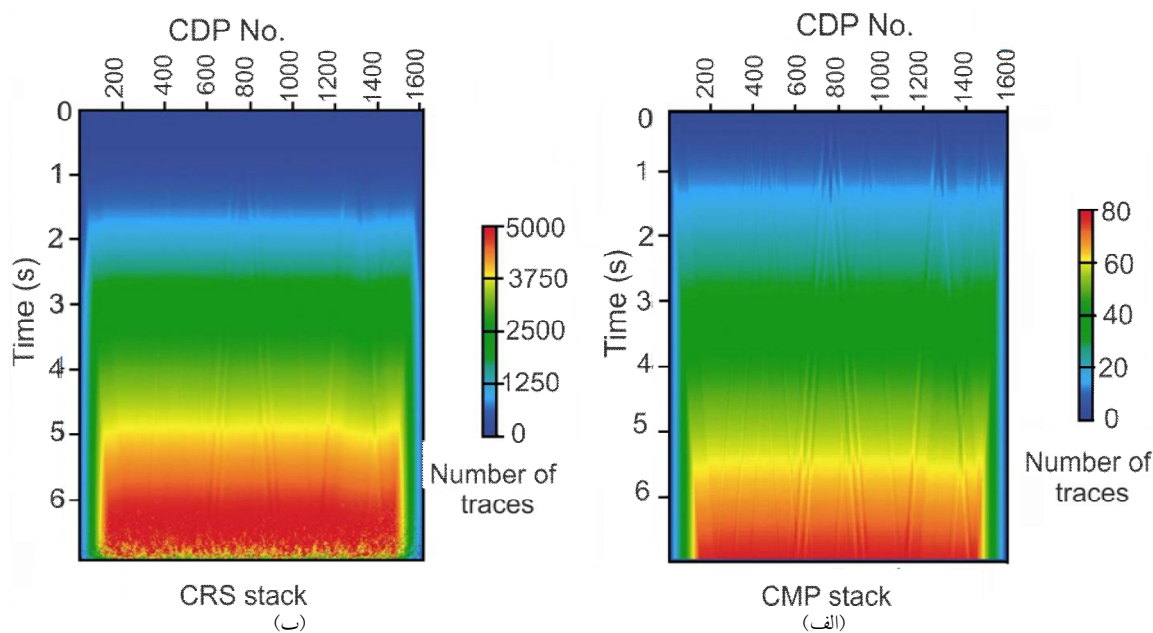
مشاهده کرد. در شکل ۱۶ این امر به خوبی نشان داده شده است. از دیگر مزایای روش تصویرسازی CRS، به نمایش درآوردن بازتابنده‌ها در زمان سیرها و عمق‌های بیشتر است. روش CRS با خاصیت افزایش کیفیت مقطع، بازتابنده‌هایی را که در زمان‌های بالا بین سایر رخدادها و غیرواقعی پنهان هستند و شفاف نیستند را با وضوح و کیفیت بیشتری تصویرسازی می‌کند.

شکل‌های ۱۷ و ۱۸ پدیده‌ای را در بین زمان‌های ۴/۵ تا ۵/۵ ثانیه برای مقطع‌های مربوط به ساختار پیچیده پیش‌گفته نشان می‌دهد که به روش CRS با کیفیت و پیوستگی بیشتری به تصویر درآمده است. علاوه بر آن روش CRS به غیر از مقطع برانبارش دارای خروجی‌هایی

استفاده شده در مقطع حاصل از روش CRS برای زمان‌های انتهایی نزدیک به ۱۰۰ برابر تعداد ردهای لرزه‌ای استفاده شده در روش مرسوم است که این امر منجر به افزایش کیفیت مقطع در روش CRS بهینه می‌شود. با مقایسه مقطع‌های به دست آمده در دو روش متفاوت، افزایش کیفیت مقطع در روش CRS نسبت به روش CMP به خوبی قابل تشخیص است. دربرخی از قسمت‌هایی که در مقطع به دست آمده به روش مرسوم، بازتابنده‌ای مشاهده نمی‌شود، در مقطع CRS نیز چیزی به چشم نمی‌خورد. با این حال با نگاهی دقیق‌تر در سطوح بازتابی موجود بین زمان‌های ۱ تا ۲/۵ ثانیه که چین‌خوردگی‌ها را به تصویر کشیده است، می‌توان پیوستگی بیشتر بین پدیده‌ها را به وضوح در مقطع CRS



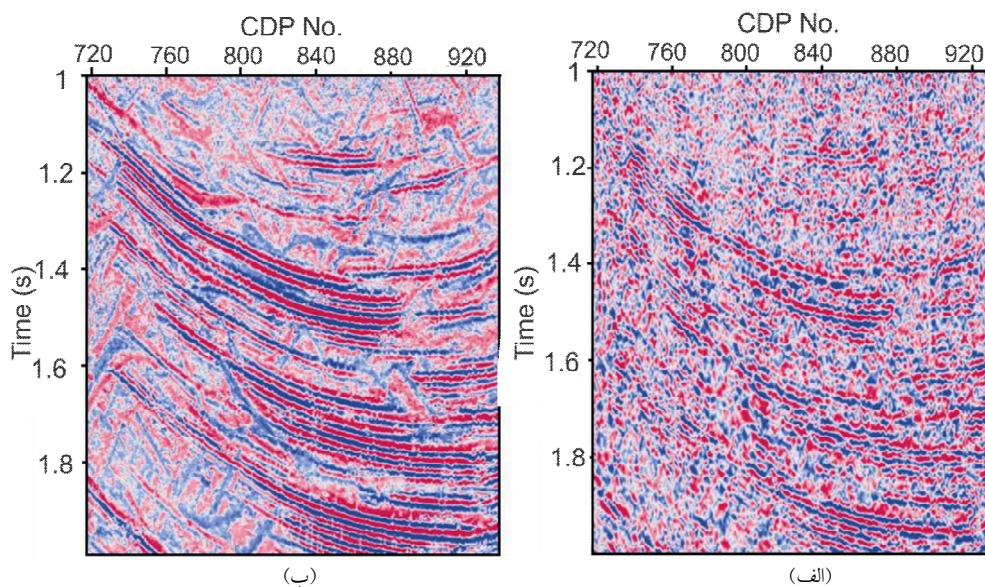
شکل ۱۴. (الف) مقطع بهینه شعاع خمیدگی عمود در نقطه ورود R_{NIP} و (ب) مقطع بهینه شعاع خمیدگی عمود R_N .



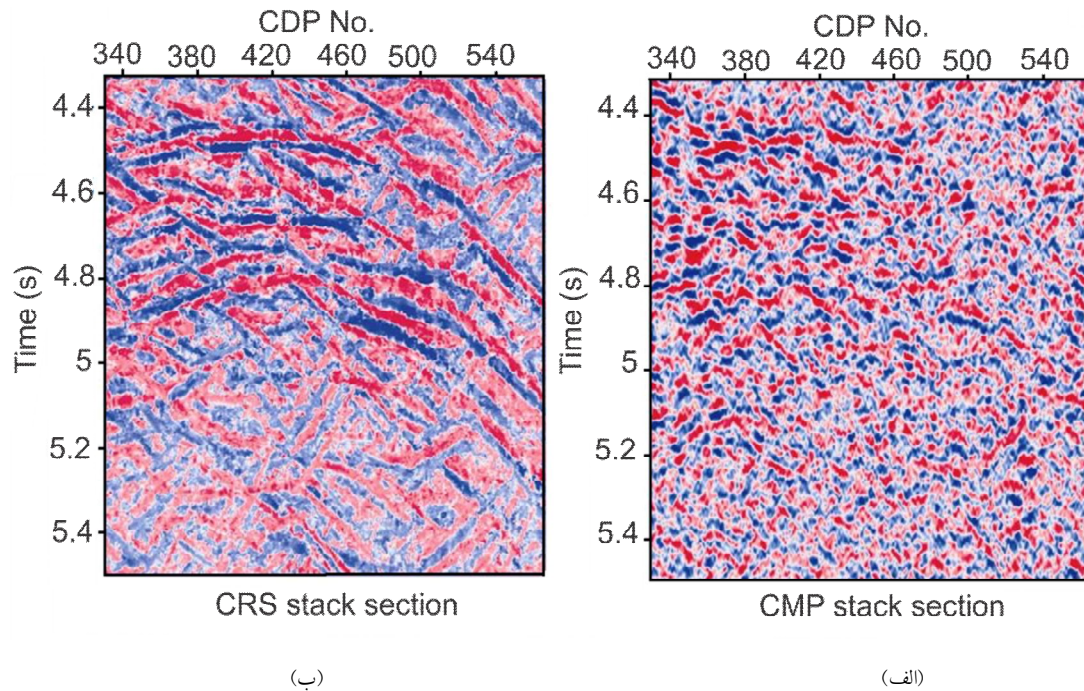
شکل ۱۵. (الف) تعداد ردهای لرزه‌ای که در روش برانبارش CMP و (ب) تعداد ردهای لرزه‌ای که در روش برانبارش CRS برای به تصویر کشیدن یک نقطه در مقطع دورآفت صفر مورد استفاده قرار گرفته‌اند.

در شکل ۱۸ مقطع‌ها R_N و هم‌دوسی CRS به دست آمده برای پدیده موجود در شکل ۱۷ نشان داده شده است. این دو مقطع به خوبی روند و امتداد پدیده پیش گفته را به تصویر کشیده‌اند. لذا تصویرسازی در حوزه زمان با

از سه نشانگر میدان موج و مقطع هم‌دوسی است که هر کدام به‌نوعی قادر به آشکارسازی پدیده‌های لرزه‌ای هستند که در مراحل تفسیر در حکم اطلاعات جانبی، بسیار حائز اهمیت خواهند بود.



شکل ۱۶. (الف) بخشی از مقطع داده واقعی که به روش CMP به دست آمده و (ب) بخشی از مقطع داده واقعی که به روش CRS به دست آمده.



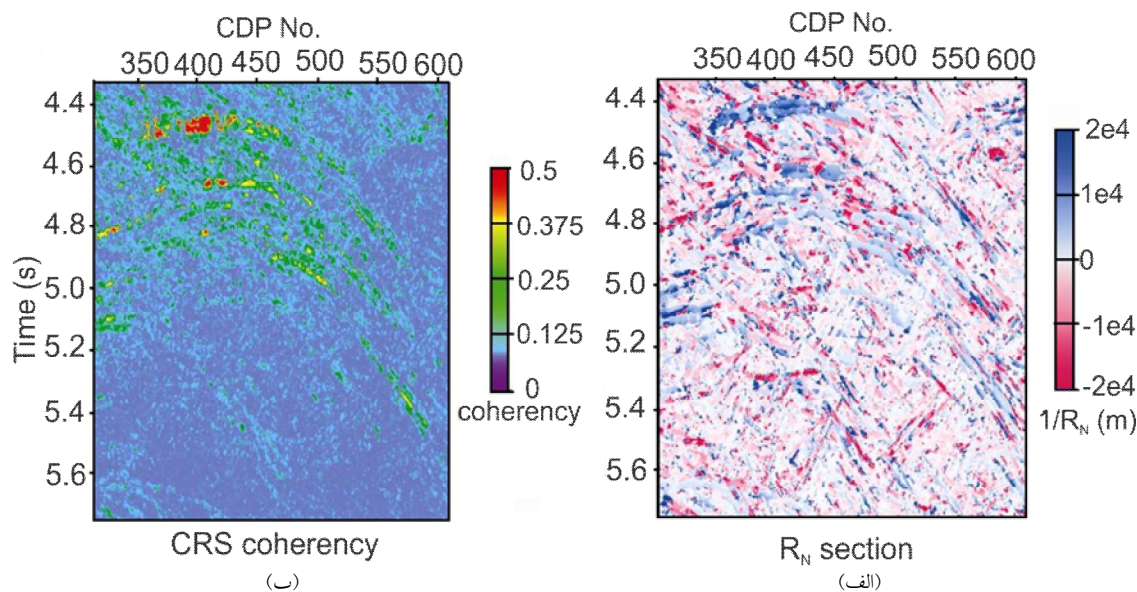
شکل ۱۷. مقایسه دو مقطع CRS و CMP. (الف) بخشی از مقطع داده واقعی که به روش CMP به دست آمده و (ب) بخشی از مقطع داده واقعی که به روش CRS به دست آمده.

بردن حجم عملیات برداشت، قدرت افزایش نسبت سیگنال به نوفه را داشته باشد و همچنین تصویری قابل قبول در مقایسه با روش‌های مرسوم از لایه‌های زیرسطحی حاصل کند، در پردازش داده‌های لرزه‌ای امری ضروری است. روش برانبارش سطح بازتاب مشترک به‌منزله روش‌نوین تصویرسازی مستقل از مدل سرعت است که توانایی افزایش نسبت سیگنال به نوفه را دارد. در این تحقیق، مراحل گوناگون و نتایج حاصل از پردازش به روش CRS روی داده‌های مصنوعی و همچنین یک خط برداشت دو بُعدی مربوط به روراندگی در چین‌خوردگی‌های شدید در جنوب غربی ایران نشان داده شد. مهم‌ترین خصوصیتی که در نتایج حاصل از پردازش به روش CRS در منطقه ذکر شده مشاهده شد، افزایش نسبت سیگنال به نوفه و کیفیت مقطع در مقایسه با مقطع‌های حاصل از روش متداول پردازش داده‌های لرزه‌ای است. با مقایسه بین مقطع‌های به دست آمده از

نشانگرهای جنبشی میدان موج را می‌توان از دیگر مزیت‌های استفاده از روش CRS در پردازش داده‌های لرزه‌ای عنوان کرد.

۵ بحث و نتیجه‌گیری

در روش متداول پردازش داده‌های لرزه‌ای بازتابی، داده‌های مربوط به هر نقطه میانی مشترک، دسته‌بندی و بعد از اجرای مراحل تحلیل سرعت و برانبارش، به یک رد لرزه‌ای دورآفت صفر تبدیل می‌شود. همان‌طور که در این تحقیق اشاره شد، نسبت سیگنال به نوفه به تعداد ردهای لرزه‌ای برداشت شده از هر نقطه میانی مشترک بستگی دارد. لذا به‌منظور بالا بردن نسبت سیگنال به نوفه، لازم است تعداد و حجم برداشت از یک منطقه در عملیات لرزه‌نگاری افزایش داده شود که این امر مستلزم صرف هزینه زیادی است. از این رو استفاده از یک روش پردازش که بدون بالا



شکل ۱۸. مقایسه دو مقطع (الف) R_N و (ب) همدوسی که در شکل ۱۷ نشان داده شده است. همان‌طور که مشاهده می‌کنید پدیده بازتابی موجود، با دو مقطع R_N و همدوسی نیز به‌خوبی به تصویر کشیده شده است.

زاویه قرارگیری سطح بازتابنده) و همچنین مقطع همدوسی CRS است. وجود یک بازتابنده در مقطع، موجبات پیوستگی در روند هر یک از نشانگرهای جنبشی میدان موج را فراهم می‌سازد. لذا مقطع‌های مربوط به نشانگرهای جنبشی میدان موج می‌توانند بیانگر تصویری از سطوح بازتابی در زیر زمین باشند. این امر به‌خوبی در مقطع‌های نشانگرهای جنبشی میدان موج (R_N ، R_{NIP} ، α) و همدوسی CRS مربوط به داده‌های پیش‌گفته در این تحقیق، قابل مشاهده بود. تغییر شیب بازتابنده‌ها همچنین به‌خوبی با مقطع زاویه ورود پرتوی مرکزی (α) به تصویر کشیده شده است. پیوستگی در نشانگر شعاع جبهه موج عمود (R_N)، شکل و روند بازتابنده‌ها را به تصویر کشیده است. از دیگر پارامترهای مهم در پردازش به روش CRS، بازه دورآفت صفر است. برای تعیین این پارامتر در داده‌های مربوط به ساختار پیچیده، به‌صورت عملی بازه‌های گوناگون مورد آزمایش قرار گرفت. پردازش با بازه‌های متفاوت و بررسی نتایج حاصل نشان داد که افزایش بازه، افزایش نسبت سیگنال به نوفه و همچنین

روش‌های CRS و CMP مشاهده شد که پدیده‌های بازتابی موجود در زمان‌های کمتر از ۳ ثانیه، دارای پیوستگی بیشتری هستند و تشخیص امتداد لایه‌بندی و تعقیب لایه‌ها در این مقطع‌ها نسبت به مقطع‌های به‌دست آمده از روش CMP ساده‌تر است. این خصوصیت در تصویرسازی نواحی هدف با عمق زیاد مشهودتر است. در مقطع‌های دورآفت صفر حاصل از برانبارش CRS مربوط به ساختار پیچیده پیش‌گفته، در زمان‌های بیشتر از ۳ ثانیه پدیده‌هایی مشاهده شد که در مقطع‌های CMP به‌علت نسبت سیگنال به نوفه کم یا قابل تشخیص نبودند یا به سختی تشخیص داده می‌شدند. بنابراین به‌علت وجود پیوستگی زیاد در تصویرسازی لرزه‌ای از بازتابنده‌ها در مقطع‌های CRS، می‌توان از این روش در حکم روشی موثر در دنبال کردن امتداد لایه‌ها یاد کرد.

روش برانبارش CRS علاوه بر خروجی مقطع برانبارش شده دورآفت صفر، دارای خروجی‌های دیگری همچون مقطع R_N (بیانگر کاوی سطح بازتابنده)، مقطع R_{NIP} (بیانگر عمق قرارگیری سطح بازتابنده)، مقطع α (بیانگر

سلیمانی، م.، ۱۳۸۸، برانبارش سطح پراش مشترک، ارائه یک روش نوین در حل مسئله تداخل شیب‌ها: پایان‌نامه دکتری، دانشگاه صنعتی شاهرود.

سلیمانی، م.، ادیبی، ا.، سکوتی، م. ر.، و پیروز، ا.، ۱۳۸۹، افزایش کیفیت مقطع برانبارش شده CRS و برطرف کردن مسئله تداخل شیب‌ها به کمک روش برانبارش CDS؛ مطالعه موردی در ایران، چهاردهمین کنفرانس ژئوفیزیک ایران، تهران.

شاهسونی، ه.، ۱۳۹۰، ارائه روش تصویرسازی مبتنی بر مدل به منظور بهبود کارکرد روش برانبارش سطح پراش مشترک: رساله دکتری، دانشگاه صنعتی شاهرود.

Adibi, E., Soleimani, M., Mann, J., and Sokooti, M. R., 2011a, Optimizing the common diffraction surface stack method by an offset limited approach: Presented at the IAMG Conference, Salzburg, Austria. DOI: 10.5242/iamg.2011.0123

Adibi, E., Soleimani, M., Mann, J., and Sokooti, M. R., 2011b, Event enhancement by applying post stack time migration on CRS Stacked section: Presented at the IAMG Conference, Salzburg, Austria. DOI: 10.5242/iamg.2011.0123

Baykulov, M., 2009, Seismic Imaging in Complex Media with the Common Reflection Surface Stack: Ph. D Thesis, Hamburg University.

Bergler, S., 2001, The Common-Reflection-Surface Stack for Common Offset - Theory and Application: M.Sc. thesis, University of Karlsruhe.

Cerveny, V., 2001, Seismic Ray Theory: Cambridge University Press, Cambridge.

Heilmann, Z., 2007, CRS-stack-based seismic reflection imaging for land data in time and depth domain: Logos Verlag, Berlin.

Hertweck, T., 2004, True-amplitude Kirchhoff Migration: Analytical and Geometrical Considerations: Logos Verlag, Berlin.

Höcht, G., 1998, The Common Reflection Surface Stack: M.Sc. thesis, University of Karlsruhe.

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

Hubral, P., Schleicher, J., and Tygel, M., 1996, A unified approach to 3-D seismic reflection

افزایش پیوستگی رخدادها را در پی خواهد داشت. همچنین با افزایش بازه انرژی مربوط به پدیده‌های پراش متمایزتر و پیوسته‌تر می‌شود که این امر منجر به کیفیت بهتر تصویر بعد از اعمال کوچ خواهد شد. از طرف دیگر، افزایش بیش‌ازحد بازه زمان پردازش داده‌ها را بسیار زیاد می‌کند و همچنین کیفیت جانبی را کاهش می‌دهد و موجب حذف رخدادهایی با گستردگی کوتاه می‌شود. در این تحقیق برای داده‌های پیش‌گفته بازه ۷۰۰ متر، بازه مناسب تشخیص داده شد که تقریباً ۱/۵ برابر اولین زون فرنل برای زمان انتهایی داده‌ها است و با اعمال تابع تعمیم بر بازه CRS به گونه‌ای که دومین زون فرنل نیز پوشش داده شود، به‌صورت عملی این نتیجه حاصل شد که با انتخاب بازه به‌نحوی که زون اول و دوم فرنل، برای همه داده‌ها پوشش داده شود، بهترین کیفیت تصویر حاصل خواهد شد. بنابراین می‌توان نتیجه گرفت در مقطع‌هایی که به‌علت پیچیدگی با ابهام مواجه هستیم، دیگر خروجی‌های روش CRS همچون مقطع‌های نشانگرهای جنبشی میدان موج (R_{NIP} , R_N , α) و همدوسی نیز می‌توانند درحکم راه‌گشایی فراروی این ابهامات در اختیار مفسران قرار گیرند.

منابع

ادیبی، ا.، سلیمانی، م.، سکوتی، م. ر.، و پیروز، ا.، ۱۳۸۹، انتخاب بازه بهینه به منظور افزایش نسبت سیگنال به نوفه و پیوستگی پدیده‌ها در روشهای پردازش CRS و CDS: چهاردهمین کنفرانس ژئوفیزیک ایران، تهران.
ریاحی، م.، و بازرگانی، ف.، ۱۳۸۳، بررسی کارایی روش مهاجرت PSPC در پردازش داده‌های لرزه‌ای به‌دست آمده از محیط‌های دارای تغییرات جانبی سرعت، مجله فیزیک زمین و فضا، ۳۰(۲)، ۷۹-۹۱.

- P., 2011, A model-based approach to the Common-Diffraction-Surface stack - theory and synthetic case study: *Journal of Seismic Exploration*, **20**(3), 289-308.
- Soleimani, M., and Piruz, I., 2007, NIP tomography inversion, a new improved method for velocity model estimation; synthetic data example: Presented at the 19th ASEG, Australia, Perth.
- Soleimani, M., Piruz, I., Mann, J., and Hubral, P., 2009, Common-Reflection-Surface stack: accounting for conflicting dip situations by considering all possible dips: *Journal of Seismic Exploration*, **18**(2), 271-288.
- Soleimani, M., and Mann, J., 2009, Merging aspects of DMO correction and CRS stack to account for conflicting dip situation: 12th Wave Inversion Technology (WIT) Meeting, Hamburg, Germany.
- Soleimani, M., Mann, J., Adibi, E., Shahsavani, M., and Piruz, I., 2010a, Applying the CRS stack method to solve the problem of imaging of complex structures in the Zagros overthrust, south west Iran: In extended abstract, 72nd EAGE, Spain, P556.
- Soleimani, M., Mann, J., Adibi, E., and Piruz, I., 2010b, Improving the seismic image quality in semi-complex structures in north east Iran by the CDS stack method: Presented at the 72th EAGE, Barcelona.
- Soleimani, M., Adibi, E., and Juergen Mann, 2011, Imaging in complex structures by post-stack time migration and CRS stack: 12th International Congress of the Brazilian Geophysical Society (SBGf).
- Thore, P., de Bazelaire, E., 1991, Analysis of the common midpoint gather by decomposition into elementary wave fronts: *Geophysical Prospecting*, **39**(4), 453-471.
- Vieth, K., U., 2001, Kinematic Wavefield Attributes in Seismic Imaging: Logos Verlag, Berlin.
- Yilmaz, Ö., 2001, Seismic Data Analysis, Vols. 1 and 2. SEG, Tulsa.
- Zhang, Y., Bergler, S., and Hubral, P., 2001, Common-reflection-surface (CRS) stack for common offset: *Geophysical Prospecting*, **49**(4), 709-718.
- imaging, Part I: Basic concepts: *Geophysics*, **61**(3), 742-758.
- Hubral, P., 1999, Special Issue on Macro-Model Independent Seismic Reflection Imaging: *J. Appl. Geophys.*, **42**, Amsterdam. Elsevier.
- Hubral, P., Krey, T., 1980, Interval velocities from seismic reflection traveltimes measurements: *Soc. Expl. Geophys.*, Tulsa.
- Jäger, R., 1999, The Common Reflection Surface Stack - Theory and Application: M.Sc. thesis, University of Karlsruhe.
- Jäger, R., Mann, J., Höcht, G., and Hubral, P., 2001, Common-reflection-surface stack: Image and attributes: *Geophysics*, **66**(2), 97-109. DOI:10.1190/1.1444927.
- Leite, L. W. B., Lima, H. M., Heilmann, B. Z., and Mann, J., 2010, CRS-based Seismic Imaging in Complex Marine Geology, 72nd EAGE meeting, Barcelona, Extended abstracts, P396.
- Mann, J., Jäger, R., Müller, T., Höcht, G., and Hubral, P., 1999, Common-reflection-surface stack: a real data example: *J. Appl. Geophys.* **42**(4), 301-318.
- 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 EAGE, P077.
- Mayne, W. H., 1962, Common reflection point horizontal data stacking techniques: *Geophysics*, **27**(6), 927-938.
- Müller, T., 1999, The Common Reflection Surface stack method - seismic imaging without explicit knowledge of the velocity model: Der Andere Verlag, Bad Iburg.
- Robein, E., 2003, Velocities, time imaging and depth imaging in reflection seismic, principles and methods: EAGE Press, Netherlands.
- Robein, E., 2010, Seismic Imaging: EAGE Press. Netherlands.
- 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.
- Shahsavani, H., Mann, J., Piruz, I., and Hubral,