

شناسایی گسل‌ها در داده‌های لرزه‌نگاری بازتابی به روش سطح پراش مشترک بررسی موردی، منطقه گرابن راین، آلمان

مهرداد سلیمانی منفرد^{۱*}، هاشم شاهسونی^۲ و یورگن مان^۳

^۱ استادیار، دانشکده معدن، نفت و ژئوفیزیک، دانشگاه صنعتی شاهرود، ایران

^۲ استادیار، دانشکده معدن، دانشگاه سنندج، کردستان، ایران

^۳ استادیار، موسسه ژئوفیزیک، دانشگاه کارلسروهه، آلمان

(دریافت: ۹۱/۴/۳، پذیرش نهایی: ۹۲/۷/۱۶)

چکیده

شرایط زمین‌شناسی در منطقه گرابن بزرگ راین در منطقه مرزی بین فرانسه و آلمان به گونه‌ای است که برای بهره‌برداری‌های زمین‌گرمایی مناسب به نظر می‌رسد. در این تحقیق، داده‌های لرزه‌نگاری بازتابی برداشت شده، به روش‌های نوین مورد پردازش قرار گرفت. در این تحقیق، علاوه بر چندین مقطع زمانی برانبارش که به روش‌های مرسوم، روش سطح بازتاب مشترک و روش سطح پراش مشترک تهیه شد، مدل سرعت منطقه نیز به روش توموگرافی موج عمود در نقطه ورود به دست آمد. سپس داده‌های برانبارش شده تحت کوچ عمقی پیش و پس از برانبارش قرار گرفتند. در مقطع کوچ عمقی پس از برانبارش که روی مقطع برانبارش شده به روش سطح پراش مشترک صورت گرفت، روش پیش‌گفته توانست همه ساختارها و گسل‌های ریز را به خوبی آشکار کند. مقایسه این مقطع با مقطع کوچ عمقی پیش از برانبارش و مقطع به دست آمده به روش سطح بازتاب مشترک نشان داد که در این روش، در عین سادگی مدل سرعت، به علت کسب همه انرژی‌های پراشیده شده در اثر برخورد با گسل‌ها، نتیجه کوچ بسیار خوب و قابل مقایسه با نتیجه مقطع حاصل از کوچ عمقی پیش از برانبارش است. در نهایت نتایج تفسیر این مقاطع نشان می‌دهد که بخش انتخاب شده به منظور کاربرد زمین‌گرمایی، دارای گسل‌های متعددی است که باعث انتقال آب از چاه تزریقی به سازند موردنظر می‌شود.

واژه‌های کلیدی: انرژی زمین‌گرمایی، سطح بازتاب مشترک، سطح پراش مشترک، کوچ عمقی، تصویرسازی لرزه‌ای

Fault detection in reflection seismic data by common diffraction surface stack, a case study in Rheine Graben, Germany

Soleimani, M.¹, Shahsavani, H.² and Mann, J.³

¹Assistant Professor, Faculty of Mining, Petroleum and Geophysics, Shahrood University of Technology, Iran

²Assistant Professor, University of Kurdistan, Kurdistan, Iran

³Assistant Professor, Geophysical Institute, Karlsruhe Institute of Technology, Germany

(Received: 23 Jun 2012, Accepted: 08 Oct 2013)

Summary

A seismic survey in a geothermal site near the Karlsruhe city in Rheine river graben in Germany was performed to provide a detail map of structures for geothermal usage of that area. The geothermal site uses the enhanced geothermal system (EGS) for power generation. The EGS system needs a hot dry rock (HDR) in depths with a spread system of faults and cracks. An injection well, injects the surface water to the fractured hot rock and water pass through the fractures and faults and becomes hot. Then two pumping wells will pumps up the hot water to the surface. One of the pumping well in that site did not perform with efficiency that was planned for. The problem might be due to the

impermeable rock between injection well and pumping well in that part of the hot rock. Therefore mapping the faults, major or minor ones, and the boundary of the layers is an important task in that project. It should be mentioned that before the surface seismic project, a vertical seismic profiling (VSP) was performed in that well that due to the high temperature in well, the receiver sounding device was failed and no data was gathered. The second VSP project even with thermal resistant device was also failed. Therefore obtaining a reasonable seismic image of that part was so critical for stopping or continuing the geothermal activities there. Then a surface seismic project was planned with two 2D seismic lines. However, seismic imaging in such faulted regions is among the crucial task by conventional methods. The CMP stack followed by DMO and post stack migration and prestack depth migration (PSDM) were both performed on the data. Result of the conventional post stack time and depth migration was not so ideal that interpreter could trace the minor faults on the final section. PSDM method also needs an accurate velocity model that would be obtained by so much effort. However, the prestack depth migration was carried out and faults could be traced in that section. However, the seismic image has some ambiguities in interpretation and the velocity model was not fully trustable. Therefore it was needed to use new imaging method for seismic imaging in such media. The common reflection surface (CRS) stack is among the new methods for seismic imaging. It has some advantages that make it usable for imaging in such regions. It is also independent from macro velocity model. Therefore, accuracy of the velocity model is not a big concern here. The CRS stack method also gives three kinematic wavefield attributes that could be used for further interpretation. These attributes relates to the dip, curvature and depth of the reflector. The best advantage of the method is that it gives an enhanced section for migration correction. The CRS stack method use a higher order of travelttime equation rather than the CMP stack method. Therefore the CRS stack operator works on a surface in time domain rather than on a trend. These properties make the CMP stack method a special case of the CRS stack method. Moving to a higher order travelttime equation will dramatically increase the signal to noise ratio in the final section. Höcht (1998) derived equations that give the travelttime of ray by kinematic wavefield attributes, known as CRS equation. In his calculation, the second order of travel time for t^2 , is known as CRS stacking operator:

$$t_{hyp}^2(X_m, h) = \left[t_0 + \frac{2\text{Sin}\alpha(X_m - X_0)}{V_0} \right]^2 + \frac{2t_0\text{Cos}^2\alpha}{V_0} \left[\frac{(X_m - X_0)^2}{R_N} + \frac{h^2}{R_{NIP}} \right] \quad (1)$$

where R_{NIP} , R_N and α are CRS attributes, V_0 is the near surface velocity and X_0 is the point of the emergence of the central ray. As it could be seen from the equation, this equation does not need any information about the velocity model of the subsurface, and only knowing the near surface velocity would be enough. Then the CRS stack method was performed on the data. The result of the CRS stack method was comparable to the result of PSDM. It should be noted that in the CRS stack method, an accurate velocity model is not necessary and the final section has better quality. However, in the CRS stack processing chain, mapping the position of faults was difficult due to the problem of conflicting dips that exists at the end points of faults. Therefore a new method was developed here designed especially for imaging the faults or any type of discontinuity in the reflectors, while preserves advantages of the CRS stack method. To achieve this goal, the idea of diffraction stack migration in Kirchhoff migration was used to modify the CRS stack operator. To have an idea about how the CDS operator works, consider a segment of a reflector in a predefined position in zero offset (ZO) section. This segment would be defined by its related wavefield attributes on that point. Now consider a hypothetic diffraction point exactly at the same point (in the middle of the segment). The ray path for diffraction and reflection in that point would be the same for both situation

and the traveltimes and emergence angle are the same, too. In the literature of the CRS stack method; we can see that the parameter R_{NIP} is independent from the curvature of the reflector in the point of imaging. Soleimani and Mann (2008) proved that the Kirchhoff migration operator is a special case of the CRS operator with $R_{NIP}=R_N$. In other words, if the CRS stack operator for an arbitrary reflector segment is known, an approximation of the associated Kirchhoff migration operator is readily available by substituting R_{NIP} for R_N in equation. To perform diffraction stack migration on the CRS stack method, the operator should switch from reflection response to diffraction ones. Therefore the method could be called common diffraction surface (CDS) stack method. The new introduced CDS operator will gather all of the diffracted energy in the data. The CRS stack method gives the priority to the most coherent event for producing the operator in (x_m, t, h) space and will have only one stacking surface, while the CDS stack, does not put any criteria for selecting the surfaces. Otherwise there is a risk to lose a relatively weak diffraction that is masked by strong reflection. Thus, there would be no image of the geological phenomena that was responsible for that lost diffraction in final migrated section. It is the reason of not imaging faults or discontinuity in the layers in most of the seismic imaging method. To preserve all diffraction shown in (x_m, t, h) space, there would be as many as operators according to the number of diffraction in that space. To switch CRS stack traveltimes to the diffraction CDS stack, the following combination between two kinematic wavefield attributes was considered and the new attribute (R_{CDS}) was derived:

$$t^2(x_m, h) = \left(t_0 + \frac{2 \sin \alpha}{v_0} (x_m - x_0) \right)^2 + \frac{2 t_0 \cos^2 \alpha}{v_0 R_{CDS}} ((x_m - x_0)^2 + h^2) \quad (2)$$

where $\frac{1}{R_{CDS}} = \frac{\lambda_x^2}{R_N} + \frac{\lambda_h^2}{R_{NIP}}$. The new introduced method was applied on the data. Like as the

conventional method, the first section obtained in the processing chain was the stacked section by CDS method. In the CDS stacked section, the quality of the section was not improved well. However, as it was mentioned, the advantage of this method would be clearer in the migrated section. In the next step, all the stacked sections obtained by the CMP, CRS and the CDS methods have been migrated by the Kirchhoff post stack depth migration. In the migration section that was obtained by migration correction on the CDS stacked section, more reflection events and more faults were imaged with better quality. In comparison to the post stack time migration on conventional method and CRS stack method, the CDS stack operator even with a smooth velocity model could gather more diffracted energy for imaging than the other migration operators. The final CDS migrated section is of a better quality and contains more detail about the location of the minor faults. The result of this migration is also comparable with the PSDM result. In some cases, the new method could image faults better than the PSDM result. It should be mentioned that the post stack depth migration applied on the CDS stacked section, needs only a smooth velocity model that would be easily obtained. With detail geological interpretation on this section, the results show that the region contains many small faults that transfer the pumped water from injection well through the hot rock to the steam extraction well.

Keywords: Geothermal energy, Common reflection surface, Common diffraction surface, Migration, Seismic imaging

۱ مقدمه

از نام آن نیز برمی‌آید، برانبارش فقط در زیرمجموعه‌ایی از دسته داده‌های پیش از برانبارش عمل می‌کند که به آن

در برخی از روش‌های تصویرسازی مبتنی بر داده، مانند روش برانبارش نقطه میانی مشترک (CMP) همان‌گونه که

دیگری R_N نیز به خمیدگی سطح بازتابنده بستگی دارد و در نهایت R_{NIP} نیز به نوعی به عمق بازتابنده مرتبط است. ارتباط این نشانگرها با ساختارهای زیرسطحی در شکل ۱ نشان داده شده است. برای تعیین سطح عملگر برانبارش CRS، تعیین عددی این سه نشانگر لازم است. در نهایت معادله هذلولوی سطح برانبارش بازتاب مشترک به صورت زیر خواهد بود (سلیمانی و مان، ۲۰۰۸):

$$t_{hyp}^2(x_m, h) = \left[t_0 + \frac{2\text{Sin}\alpha(x_m - x_0)}{v_0} \right]^2 + \frac{2t_0\text{Cos}^2\alpha}{v_0} \left[\frac{(x_m - x_0)^2}{R_N} + \frac{h^2}{R_{NIP}} \right] \quad (1)$$

در این معادلات v_0 برابر سرعت لایه سطحی است که در دست است، α زاویه ورود پرتوی مرکزی است و نقطه‌ای که باید در مقطع دورافت صفر شبیه‌سازی شود با x_0 نشان داده شده که در واقع همان محل ورود پرتوی مرکزی است و h مقدار دورافت است. این نقطه معادل نقطه P_0 در سطح برانبارش بازتاب مشترک حاصل از این مدل است که در شکل ۱-ب با رنگ آبی نشان داده شده است. منحنی سرخ‌رنگ در شکل ۱-ب روی سطح بازتابنده، دایره‌ای است که شعاع آن برابر شعاع سطح بازتابنده در آن قسمت باست و از آن با عنوان سطح انفجار در روش برانبارش CRS یاد می‌شود. همه پرتوهای خارج شده از این سطح و از جمله پرتوی مرکزی که در شکل ۱-الف با رنگ آبی نشان داده شده است، بر این بخش سرخ‌رنگ عمود هستند و زمان سیر آنها در شکل ۱-ب روی سطح مشبک سبز رنگ نشان داده شده است. نقطه P_0 روی منحنی زمان سیر دورافت صفر، مربوط به پرتوی دورافت صفر است که در نقطه m_0 به سطح می‌رسد. با افزایش دورافت، این نقطه روی منحنی‌های زمان سیر حرکت می‌کند و روند نقطه بازتاب مشترک (CRP) را به وجود می‌آورد که در این شکل با خط سرخ پُررنگ نشان داده شده است. به منظور شبیه‌سازی هر نمونه

ورداشت CMP می‌گویند. در این روش، معادله زمان سیر مرتبه دوم به دست آمده از بسط تیلور نیز برای برآورد پاسخ جنبشی بازتابنده استفاده می‌شود (دی بازلاری، ۱۹۸۸). در این معادله، سرعت برانبارش به منزله پارامتر مستقل وجود دارد. برانبارش CMP در حکم روشی مقاوم در تهیه مقطع دورافت صفر (ZO) از داده‌های پس از برانبارش شناخته می‌شود. با این حال این روش دارای محدودیت‌هایی نیز هست که از جمله آنها در صورت وجود شیب‌های متداخل، جایی که دو یا چند رخداد بازتابی همدیگر را در یک نقطه از مقطع دورافت صفر قطع می‌کنند، عملکرد خوبی آشکار نمی‌سازد (مان، ۲۰۰۲؛ مولر، ۱۹۹۸).

۲ برانبارش سطح بازتاب مشترک

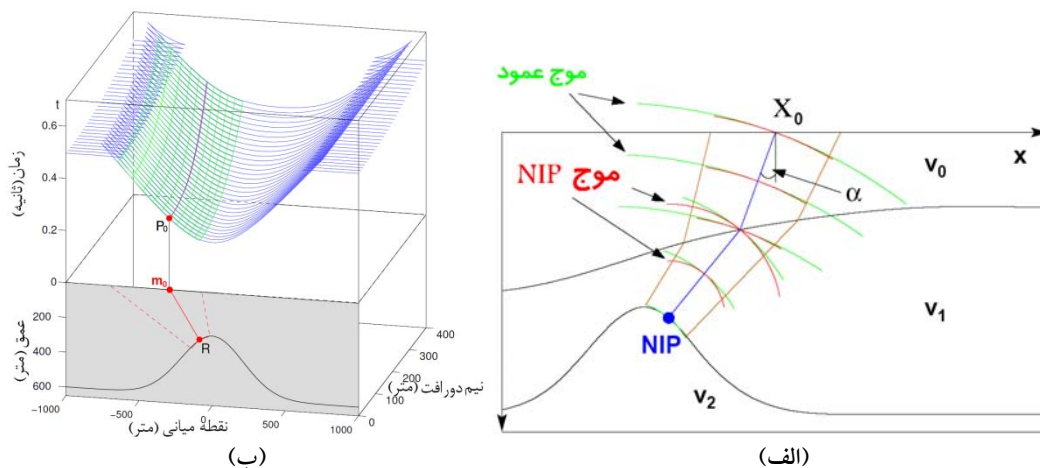
روش برانبارش سطح بازتاب مشترک (Common Reflection Surface-CRS)، از جمله روش‌های مبتنی بر داده است که مقطع دورافت صفر را از داده‌های پیش از برانبارش تهیه می‌کند. این روش نسبت به روش مرسوم برون‌راند نرمال-برون‌راند شیب-برانبارش (NMO-Stack) یک مزیت بزرگ دارد که مستقل از مدل سرعت است (هوبرال، ۱۹۹۹). به لحاظ مفهوم، این روش بیان می‌کند که عملگر برانبارش CMP در واقع حالت خاصی از عملگر CRS است (یاگر، ۱۹۹۹). ایده ابتدایی در روش CRS، برآورد پاسخ بازتاب جنبشی برای یک بخش کوچک از یک بازتابنده با خمیدگی و جهت‌یافتگی دلخواه، به کمک سه نشانگر جنبشی میدان موج است. این سه نشانگر عبارت‌اند از: شعاع جبهه موج عمود در نقطه ورود (Normal Incidence Point, R_{NIP})، شعاع جبهه موج نرمال R_N و زاویه ورود پرتوی مرکزی که با α نشان داده می‌شود. این سه نشانگر جنبشی میدان موج، یکی مربوط به زاویه ورود پرتوی مرکزی است و بنابراین با جهت‌یافتگی بازتابنده در ارتباط است و

EGS در منطقه گرابن راین در شکل ۳ نشان داده شده است. در این گونه مناطق لازم است که سامانه درز و شکاف سنگ در بین چاه تزریق و چاه‌های دریافت بخار آب به یکدیگر مرتبط باشند (هرتوک، ۲۰۰۴). در منطقه گرابن راین، بین چاه پمپاژ و چاه تزریق در بخش غربی منطقه، ارتباط خوبی برقرار است و بخار آب به میزان مورد انتظار دریافت از چاه پمپاژ استخراج می‌شود. با این حال این ارتباط در قسمت شرقی منطقه دارای مشکل است و بخار آبی به میزان مورد انتظار از آن دریافت نمی‌شود. از این رو برداشت‌هایی از جمله ژئوفیزیک درون‌چاهی و لرزه‌نگاری بازتابی به منظور تعیین سامانه درز و شکاف در این منطقه صورت گرفت، (دوونک، ۲۰۰۴a). در تلاش به منظور برداشت درون‌چاهی، به علت دمای زیاد چاه در عمق مورد نظر، دستگاه‌های چاه‌پیمایی در قسمت‌های عمق چاه از کار افتاده و امکان برداشت درون‌چاهی ممکن نشد. لذا برداشت‌های سطحی لرزه‌نگاری بازتابی به صورت دو بُعدی و به منظور بررسی دقیق ساختارهای زیرسطحی و جانمایی گسل‌ها تا عمق ۳ کیلومتر برداشت شد.

(T_0, X_0) در مقطع برانبارش یا مقطع دورافت صفر، لازم است که ابتدا پارامترهای سه گانه برانبارش (α, R_{NIP}, R_N) را به نحوی محاسبه کرد که عملگر برانبارش، بهترین انطباق را با رخدادهای بازتابی داشته باشد (مان و همکاران، ۲۰۰۷). شکل ۲ همه مراحل تصویرسازی لرزه‌ای به روش CRS را نشان می‌دهد.

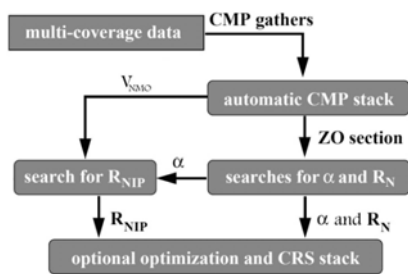
۳ اطلاعات ساختاری و داده‌های لرزه‌ای منطقه

از مناطق مستعد انرژی زمین‌گرمایی، گرابن بزرگ رودخانه راین در منطقه مرزی بین آلمان و فرانسه است که به صورت مشترک از سوی هر دو کشور مورد بررسی و تحقیق وسیع قرار گرفته است (دوونک، ۲۰۰۴b). در منطقه گرابن بزرگ راین، فناوری استفاده از انرژی زمین‌گرمایی به مانند روش‌های معمول که در نواحی زمین‌شناسی دارای نقاط داغ استفاده می‌شود، امکان‌پذیر نخواهد بود. از این فناوری که به سامانه بهبودیافته زمین‌گرمایی (Enhanced Geothermal System, EGS) معروف است، در مناطق دارای سنگ داغ خشک (HDR) استفاده خواهد شد. چگونگی اجرای عملیات



شکل ۱. (الف) نشانگرهای لازم برای تعیین عملگر برانبارش سطح بازتاب مشترک که نشانگرها را در حالت دو بُعدی نشان می‌دهد. در این شکل پرتوی مرکزی با رنگ آبی نشان داده شده است که از نقطه NIP گسیل می‌شود. موج نرمال که با سطح انفجاری ایجاد می‌شود و موج NIP که از چشمه موج نقطه‌ای روی بازتابنده در نقطه NIP تولید شده و (ب) سطح برانبارش CRS (سطح به دست آمده از معادله ۱) که با رنگ سبز روی سطح زمان سیر دورافت مشترک با رنگ آبی نشان داده شده است (سلیمانی منفرد، ۱۳۸۸).

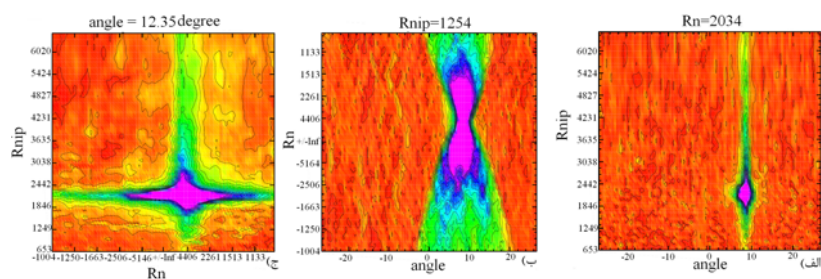
سنگ‌شناسی، کمتر در آن دخالت دارد (روبین، ۲۰۰۳).
 برای رخدادهای ساده افقی، مقدار $\alpha = 0$ بوده و
 بنابراین سرعت برانبارش تقریباً معادل میانگین سرعت
 رولایه بالای بازتابنده است. مقطع بهینه زاویه ورود، α ، در
 شکل ۴-ب نشان داده شده است. کاملاً مشخص است که
 مقادیر صفر در این مقطع، مربوط به رخدادهای افقی
 است. مقادیر منفی و مثبت زاویه ورود نیز مربوط به جهت
 ورود پرتوی مرکزی است. مقادیر غیرواقعی زوایا با رنگ
 خاکستری پوشانده شده است. مقطع بهینه شعاع موج نرمال
 R_N ، در شکل ۵-الف نشان داده شده است. مقدار بهینه R_N
 در ارتباط با شعاع خمیدگی بازتابنده در مقطع دورافت
 صفر در عمق است. برای نشان دادن و تفسیر بهتر مقدار
 شعاع خمیدگی بازتابنده، از مقدار عکس شعاع موج
 نرمال، $1/R_N$ ، استفاده می‌شود. زیرا که مقدار شعاع
 خمیدگی برای بازتابنده‌های مسطح، برابر بی‌نهایت خواهد
 شد. بنابراین مقدار $1/R_N$ برای بازتابنده‌های مسطح، برابر
 صفر می‌شود.



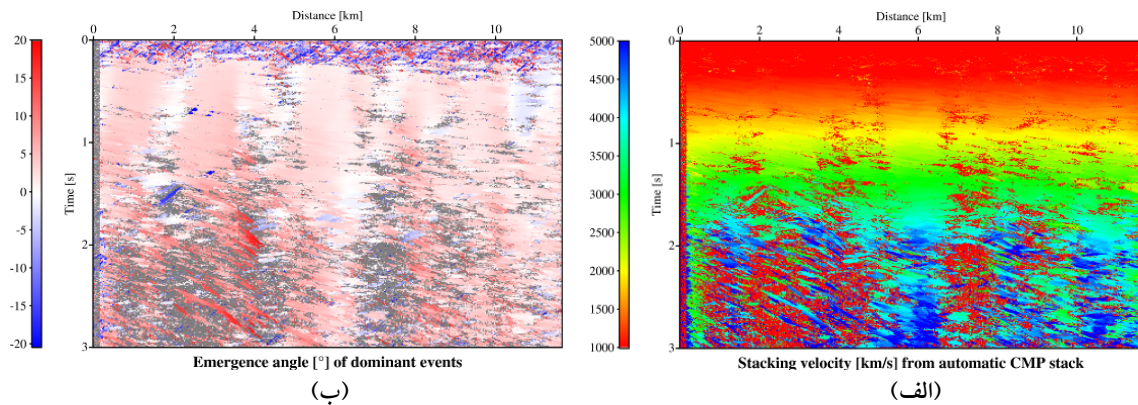
شکل ۲. مراحل تهیه تصویر لرزه‌ای در روش CRS (مان و همکاران، ۱۹۹۹).

۴ پردازش داده‌ها به روش سطح بازتاب مشترک
 پیش‌پردازش‌های مرسوم روی داده‌ها صورت گرفته است
 که عبارت‌اند از تعیین هندسه ردها، ویرایش ردها،
 واهمامیخت، تصحیح توزیع هندسی، تصحیح استاتیک و
 فیلتر کردن داده‌ها (سلیمانی منفرد، ۱۳۸۸). در پردازش به
 روش سطح بازتاب مشترک (CRS)، به علت وجود مسئله
 تداخل شیب‌ها و حالت هموارکنندگی این روش، تعیین
 کردن محل دقیق گسل‌ها و لایه‌های گسل‌خورده با قدری
 دشواری همراه است (هایلمن، ۲۰۰۷). نمونه‌ای از نتایج
 بهینه‌سازی در مورد تعیین نشانگرهای میدان موج در شکل
 ۳ نشان داده شده است. در این شکل‌ها دیده می‌شود که
 در برخی مواقع، تعیین مقدار بهینه سه نشانگر میدان موج به
 سادگی امکان پذیر است، ولی با افزایش نوفه و پیچیده
 شدن ساختار زمین‌شناسی منطقه، امکان به تله افتادن
 الگوریتم جست‌وجو در اکستریم‌های محلی افزایش
 می‌یابد.

مقطع سرعت برانبارش به دست آمده از گام اول در
 حل سه مرحله‌ای معادله ۱، در شکل ۴-الف نشان داده
 شده است. این سرعت به صورت تدریجی با افزایش عمق،
 افزایش است. البته در قسمت‌های کوچکی از مقطع،
 ناهمگونی‌هایی در سرعت دیده می‌شود. با این حال به نظر
 می‌رسد که این ناهمگونی‌ها ناشی از توزیع کمتر انرژی
 در آن مناطق هستند که ناهمگونی‌های جانبی



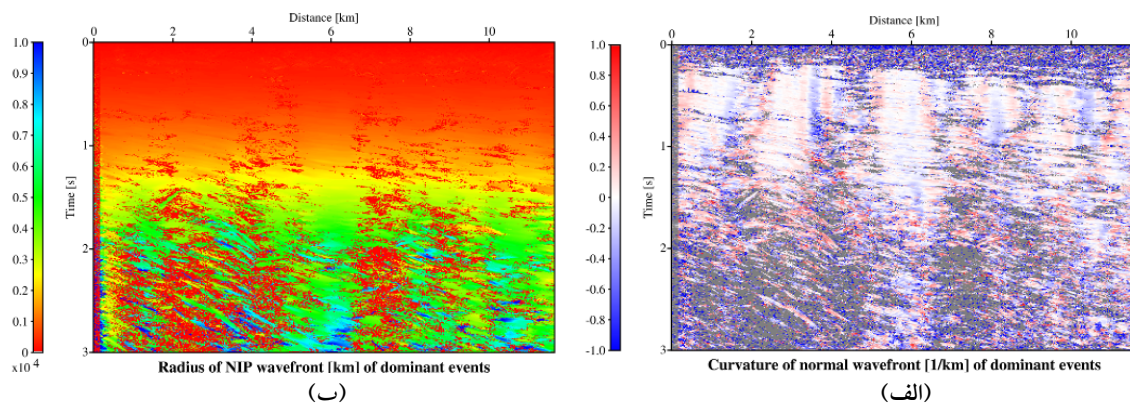
شکل ۳. نشانگرهای سه‌گانه جنبشی میدان موج در روش برانبارش CRS برای یک نقطه مانند p_0 در مقطع دورافت صفر. (الف) مقدار بهینه R_N ، (ب) مقدار بهینه R_{nip} و (ج) مقدار بهینه زاویه ورود پرتوی مرکزی.



شکل ۴. (الف) مقطع سرعت برانبارش به‌دست آمده در پردازش داده واقعی زمینی در برانبارش خودکار CMP و (ب) مقطع بهینه زاویه ورود پرتوی مرکزی مربوط به رخدادهای اصلی به‌دست آمده در برانبارش CRS.

به‌دست آمده از پردازش CRS، مقطع بهینه برانبارش شده است که در شکل ۷ نشان داده شده است. سه رخداد اصلی و بسیار واضح که در سرتاسر مقطع نیز دیده می‌شود، در زمان‌های ۰/۵، ۰/۷۵ و ۱/۳ از محور زمان در فاصله صفر آغاز می‌شود. با دنبال کردن این رخدادها در طول مقطع، یک گسل بسیار بزرگ و یک گسل بزرگ در فاصله قدری کمتر از ۲ کیلومتر و قدری بیشتر از ۲ کیلومتر به ترتیب در فواصل زمانی ۰/۲ ثانیه تا نزدیک ۱/۵ ثانیه دیده می‌شود. گسل بزرگ دیگر در فاصله ۶/۳ کیلومتری و در زمان ۱/۵ ثانیه دیده می‌شود که بر بیشتر رخدادها اثر گذاشته است.

مقدار مثبت و منفی در این مقطع نیز به ترتیب در ارتباط با برآمدگی و فرورفتگی در بازتابنده است. مقادیر غیر واقعی نیز با رنگ خاکستری پوشیده شده است. شکل ۵-ب مقطع بهینه شعاع موج عمود در نقطه ورود R_{NIP} را نشان می‌دهد. مقادیر کوچک R_{NIP} برای رخدادهای نزدیک سطح، و مقادیر بزرگ‌تر R_{NIP} در ارتباط با رخدادهای عمیق‌تر است. در نهایت مقطع هم‌دوسی در شکل ۶ آورده شده است. هرچه مقدار هم‌دوسی برای یک نمونه در مقطع دورافت صفر بیشتر باشد، در آن صورت مقادیر نشانگرهای جنبشی میدان موج به‌دست آمده برای آن نقطه نیز معتبرتر خواهند بود. مقطع نهایی



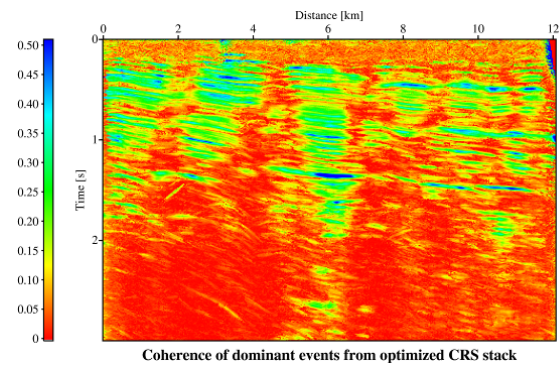
شکل ۵. (الف) مقطع بهینه شعاع موج نرمال مربوط به رخدادهای اصلی به‌دست آمده در برانبارش CRS و (ب) مقطع بهینه شعاع موج NIP مربوط به رخدادهای اصلی به‌دست آمده در برانبارش CRS.

هر زاویه روی این طیف ناپیوسته، بدون در نظر گرفتن مقدار همدوسی، برای هر زاویه یک سطح برانبارش تشکیل خواهد شد (مان، ۲۰۰۲). بنابراین برای یک زاویه ورود مشخص α ، تنها نشانگری که باید محاسبه شود، ترکیبی از شعاع انحنای R_N و R_{NIP} است که می‌توان آن را R_{CDS} نام‌گذاری کرد. لذا معادله ۱ در این حالت، به شکل زیر در خواهد آمد (سلیمانی و همکاران، ۲۰۰۹):

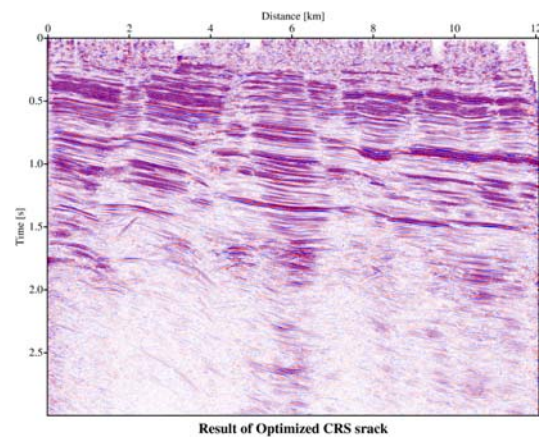
$$t_{hyp}^2(x_m, h) = \left(t_0 + \frac{2\text{Sin}\alpha}{v_0}(x_m - x_0) \right)^2 + \frac{2t_0 \text{Cos}^2\alpha}{v_0 R_{CDS}} \left((x_m - x_0)^2 + h^2 \right) \quad (2)$$

که به نام عملگر برانبارش سطح برانبارش مشترک (Common Diffraction Surface, CDS) خوانده می‌شود. با در نظر گرفتن همه زوایای ممکن در معادله ۲، گروهی از عملگرها، به‌جای یک عملگر تکی در حوزه زمان، تشکیل یک حجم با ضرایب وزنی متفاوت از عملگرها، برای نمونه موجود در مقطع دورافت صفر می‌دهند. این عمل باعث تقویت هر رخداد بازتابی یا پراش ضعیف موجود در هر نمونه در مقطع برانبارش می‌شود که در روش‌های دیگر با سایر رخدادهای قوی‌تر پوشیده می‌شود (سلیمانی و همکاران، ۲۰۱۱). شکل ۸ نمودار گردشی پردازش به روش CDS را نشان می‌دهد.

به‌منظور نشان دادن توانایی روش CDS در مقابل روش CRS در گرفتن همه پراش‌های موجود در مقطع برانبارش و به دنبال آن نشان دادن همه عوامل تولیدکننده پراش مانند گسل‌ها و نقاط پراش، این روش در ابتدا روی یک داده مصنوعی آزمایش شد. داده Sigsbee 2A در یک بخش دارای لایه‌های تقریباً افقی ولی گسلیده و دارای نقاط پراش فراوان است. در صورتی که روش CDS بتواند تعداد پراش بیشتری را نسبت به روش CRS نشان دهد، در آن صورت می‌توان گفت که روش موردنظر، کارایی لازم را آشکار ساخته است. همچنین این مطلب را



شکل ۶. مقطع همدوسی مربوط به برانبارش نهایی به روش برانبارش CRS.

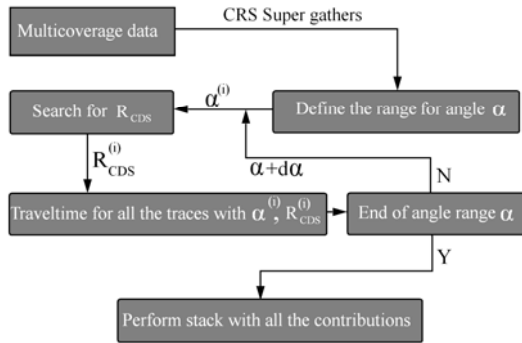


شکل ۷. مقطع برانبارش شده به‌دست آمده به روش برانبارش CRS.

۵ پردازش داده‌ها به روش سطح پراش مشترک

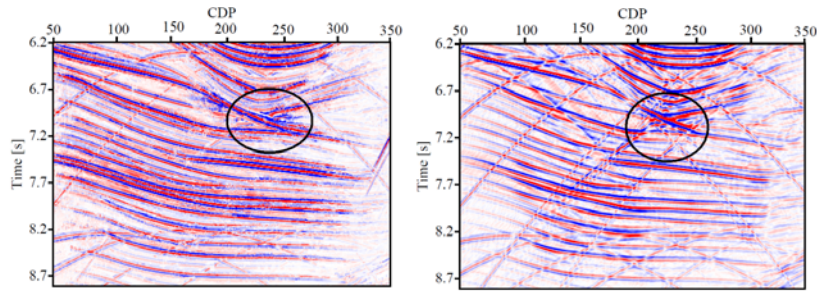
در روش معمول CRS، از ایده مشابه کوچ کیرشهوف با نقاط پراش برای حل مسئله تداخل شیب‌ها استفاده شده است. در این روش، همه عملگرهای ممکن برانبارش CRS برای هر شیب و مربوط به هر رخدادی در نمونه که در برانبارش دخالت می‌کند، در نظر گرفته شد. این ایده مشابه آن است که در طیف زاویه‌ی مربوط به هر نمونه در مقطع دورافت صفر، حدود آستانه مطلق و محلی حذف و یک بازه برای زاویه ورود پرتوی مرکزی (α_{min} , α_{max}) از ابتدا تعیین شود و گام‌هایی برای نمونه‌برداری از طیف زاویه ($d\alpha$) نیز مشخص می‌شود. بنابراین با در نظر گرفتن

در مقطع برانبارش شده به روش CRS (شکل ۷) کیفیت مقطع بهتر است، به گونه‌ایی که به راحتی می‌توان رخدادها را در آن مقطع دنبال کنیم. با این حال در نقاط زیادی مسئله تداخل شیب‌ها، رخدادها را دچار تغییر می‌کند.



شکل ۸. نمودار گردش پردازش به روش سطح پراش مشترک CDS. (سلیمانی و همکاران، ۲۰۱۱).

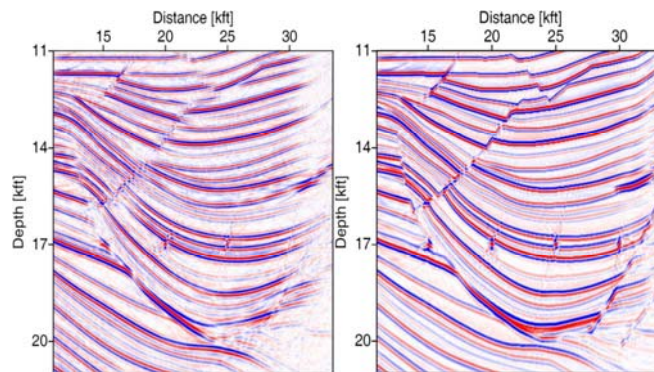
می‌توان به کمک مقطع کوچ نیز بررسی کرد. شکل ۹ و شکل ۱۰ کاربرد روش‌های CRS و CDS در به دست آوردن مقاطع برانبارش شده و کوچ یافته را روی داده‌های پیش گفته نشان می‌دهد. همان‌گونه که در شکل‌ها دیده می‌شود، مقطع CDS توانسته است تعداد پراش‌های بیشتری را به تصویر درآورد و به همین ترتیب در مقطع کوچ نیز، تصویر با جزئیات بیشتر و با کیفیت بهتری را نشان می‌دهد. با اثبات کارایی روش CDS، در گام بعدی این روش روی داده‌های واقعی منطقه مورد بررسی، اعمال شد. شکل ۱۱ نتیجه برانبارش به روش CDS روی داده‌ها را نشان می‌دهد. همان‌گونه که مشاهده می‌شود، رخدادهای پراش بهتر آشکار شده‌اند و همچنین اثر گسل‌ها روی رخدادها بهتر دیده می‌شوند. در مقام مقایسه،



(ب)

(الف)

شکل ۹. داده مصنوعی Sigsbee 2A، (الف) مقطع کوچکی از برانبارش به روش CDS و (ب) مقطع کوچکی از برانبارش به روش CRS.



(ب)

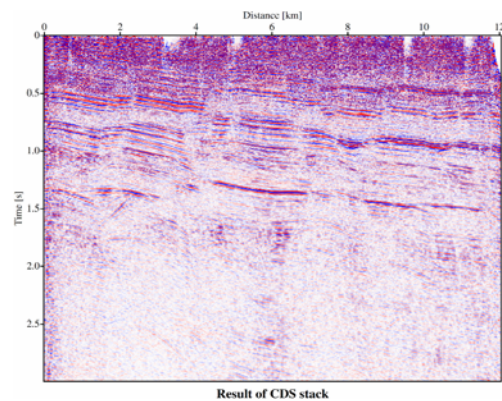
(الف)

شکل ۱۰. داده مصنوعی Sigsbee 2A، (الف) بخش کوچکی از مقطع کوچ روی مقطع برانبارش شده به روش CDS و (ب) بخش کوچکی از مقطع کوچ روی مقطع برانبارش شده به روش CRS.

نقاط و برآورد مدل سرعت (پراسمن و همکاران، ۲۰۰۸، دوونک، ۲۰۰۴a). نتیجه پردازش NIP توموگرافی روی این داده ها، مدل سرعت نرم، $v(x,z)$ است که در شکل ۱۲ نشان داده شده. هیچ گونه تغییرات بزرگ جانبی سرعت در مدل دیده نمی شود. میزان جابه جایی لایه ها در دو طرف گسل نیز چندان زیاد نیست که تغییرات جانبی سرعت بزرگی در مدل ایجاد کند. در ادامه از مدل سرعت $v(x,z)$ که به روش NIP توموگرافی به دست می آید، برای عملی ساختن کوچ استفاده شد.

۷ کوچ پیش و پس از برانبارش

همواره تبدیل یک مقطع زمانی به عمقی به کمک مدل سرعت کوچ، در ساختارهای پیچیده و مواقعی که با تغییرات ناگهانی سرعت روبه رو هستیم، خالی از خطا نخواهد بود (یانگ و همکاران، ۲۰۱۲). بنابراین لزوم ایجاد یک مدل سرعت دقیق پیش از اجرای فرایند کوچ، کاملاً آشکار می شود. در حالت کلی، هر نوع روش کوچ، به یک مدل سرعت $v(x,z)$ نیازمند است (ریاحی و بازرگانی، ۱۳۸۳). کوچ پس از برانبارش، از مقطع برانبارش شده دورافت صفر در حکم ورودی استفاده می کند. بنابراین می توان گفت که کیفیت کوچ پس از برانبارش بستگی به نوع مقطع برانبارش شده در حکم ورودی دارد (سلیمانی و همکاران، ۲۰۱۰). برای اجرای کوچ، جدول تابع های گرین نیز به کمک برنامه حل معادله آیکونال به دست آمد و عملیات کوچ نیز به کمک برنامه Uni 3D صورت گرفت (اسپینر، ۲۰۰۷). با در اختیار داشتن مدل سرعت، کوچ عمقی پس از برانبارش و همچنین کوچ عمقی پیش از برانبارش روی داده ها صورت گرفت. روش کوچ مورد استفاده در همه روش ها، کوچ کیرشهوف است. شکل ۱۳ نتیجه اجرای کوچ عمقی پس از برانبارش روی مقطع برانبارش شده به روش پردازش مرسوم را نشان می دهد.

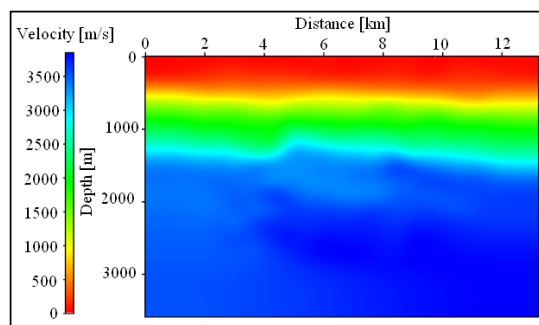


شکل ۱۱. مقطع برانبارش شده بهینه به دست آمده به روش برانبارش CDS.

رخدادهای زیرسطحی تا حد زیادی تحت تاثیر گسل ها قرار گرفته اند که با دنبال کردن قسمت های مخدوش شده رخدادهای، می توان آنها را مشاهده کرد. در بین آنها، یک رخداد بسیار بارز در بین زمان های $1/3$ تا $1/4$ ثانیه که در سراسر طول مقطع امتداد دارد، به آسانی دیده می شود. در فواصلی مانند ۱ کیلومتر، ۴ کیلومتر و ۸ کیلومتر، ناپیوستگی هایی در این رخداد به چشم می خورد که در این نقاط می توان انتظار وجود مسئله تداخل شیبها را داشت. به این علت، فرایند کوچ پس از برانبارش روی داده ها صورت گرفت تا تفاوتها بهتر دیده شود.

۶ تهیه مدل سرعت به روش توموگرافی NIP

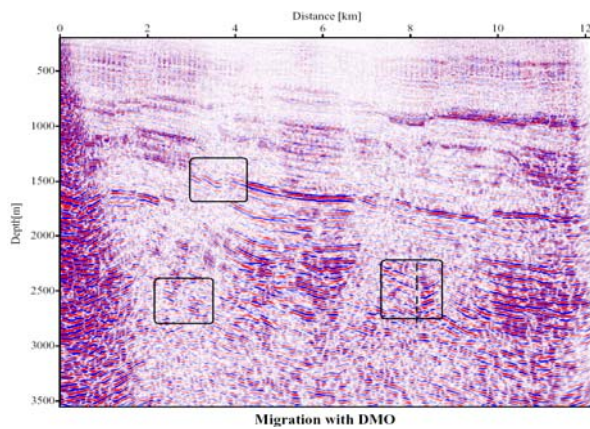
روش توموگرافی موج ورود عمود (NIP Tomography) از نظریه امواج NIP و همچنین نشانگرهای R_{NIP} و α به منظور معکوس سازی و تهیه مدل سرعت استفاده می کند. یکی از بزرگ ترین مزیت های این روش آن است که به علت در دسترس بودن مقطع همدوسی، می توان انتخاب نقاط به منظور فرایند توموگرافی را به صورت کاملاً خودکار اجرا کرد (شاهسونی، ۱۳۹۰، سلیمانی و پیروز، ۲۰۰۷). تهیه مدل سرعت بدین روش در پنج گام صورت می گیرد. تهیه نشانگرهای جنبشی میدان موج، هموار کردن نشانگرها، دستچین کردن نقاط، ویرایش کردن



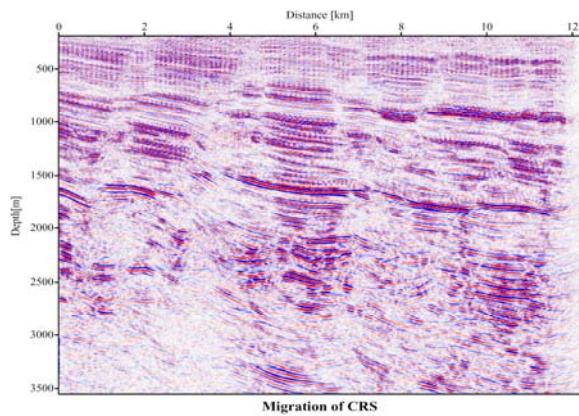
شکل ۱۲. مدل همواره شده سرعت $v(x,z)$ به دست آمده از روش NIP توموگرافی معکوس براساس نشانگرهای جنبشی میدان موج حاصل از برانبارش CRS.

برانبارش شده، مسئله تداخل شیب‌ها وجود داشته باشد. محل این تفاوت‌ها با پیکان در شکل ۱۵ نشان داده شده است. بیشترین تفاوت‌ها در فواصل بین ۱۵۰۰ متری تا ۲۰۰۰ متری در عمق و در طول نیم‌رخ از صفر تا ۱۲ کیلومتر دیده می‌شود. این بازتابنده در نقاط زیادی دستخوش تغییر شده‌اند. این بخش‌ها که در آن بازتابنده‌ها با نوفه‌های عملگر کوچک، نوفه‌های ناهمدوس و یا هر علت دیگری مخدوش شده‌اند، در دو مقطع کوچک صورت گرفته روی مقاطع برانبارش شده CRS و پردازش مرسوم، به خوبی آشکار نشده‌است. در شکل ۱۳، مناطقی با مربع-هایی نشان داده شده است که در آنها بازتابنده‌ها به شکل نامتعارفی خم شده‌اند. جدای از اینکه این بازتابنده‌ها در این مقطع به منزله نوفه عملگر شناخته می‌شوند یا خیر، این بازتابنده‌ها در مقطع کوچک صورت گرفته روی برانبارش CDS به خوبی دیده می‌شوند؛ درحالی که در مقطع کوچک برانبارش CRS و یا در مقطع برانبارش شده روی نتیجه پردازش مرسوم، به خوبی تصویر نشده‌اند. بخش‌های دیگر نیز در واقع همین حالت را نشان می‌دهند، با این تفاوت که این محل‌ها در دو مقطع دیگر به صورت قطع‌شدگی ناگهانی بازتابنده دیده می‌شوند. برای آنکه بتوان این تفاوت‌ها را بهتر مشاهده کرد، مقاطع کوچک‌تری از آنها برای مقایسه استخراج شده است. شکل ۱۶ مقاطع کوچک حاصل از دو نتیجه کوچک را نشان

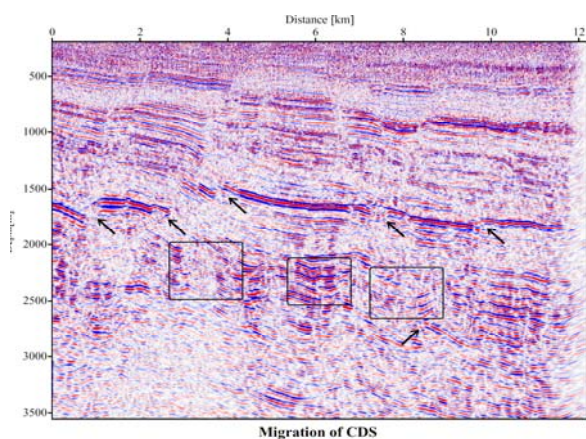
شکل ۱۴ نیز نتیجه همین روش کوچک ولی روی مقطع به دست آمده به روش برانبارش CRS و در نهایت شکل ۱۵ نتیجه کوچک روی مقطع برانبارش شده به روش CDS را نشان می‌دهد. در ابتدا دیده می‌شود که نتایج کوچک روی مقاطع به دست آمده از هر دو روش CRS و CDS، کیفیت بالاتری در مقایسه با نتیجه کوچک روی مقطع به دست آمده از پردازش مرسوم دارند. در این دو مقطع (شکل‌های ۱۴ و ۱۵)، پیوستگی بازتابنده‌ها و همچنین جانمایی محل گسل‌ها با کیفیت بهتری نسبت به مقطع شکل ۱۳ صورت گرفته است. اثر مرزی در مقطع کوچک داده شده شایع است. این اثر در هر سه مقطع به مقداری در نزدیکی محور چپ مقطع دیده می‌شود ولی در مقطع کوچک به روش مرسوم با شدت بیشتری حضور دارد. در واقع این اثر به علت کامل نبودن دهانه کوچک در بخش‌های کناری داده‌ها رخ می‌دهد. به همین ترتیب نیز با افزایش عمق، شعاع ایزوکرون دورافت صفر نیز افزایش می‌یابد که به همین علت این اثرهای مرزی در عمق بیشتر، بزرگ‌تر دیده می‌شوند. شعاع ایزوکرون، (فاصله‌ای از سطح تا نقطه‌ای که قرار است کوچیده شود و روی دایره‌ای با این شعاع قرار گیرد) الزاماً در امتداد یک خط راست نیست و جهت‌یابی آن براساس مدل سرعت تعیین می‌شود. انتظار می‌رود که بیشترین اختلاف در مقاطع به دست آمده به روش‌های متفاوت در محل‌هایی مشاهده شود که در مقطع



شکل ۱۳. نتیجه کوچ روی مقطع دورافت صفر به دست آمده به روش برانبارش مرسوم.

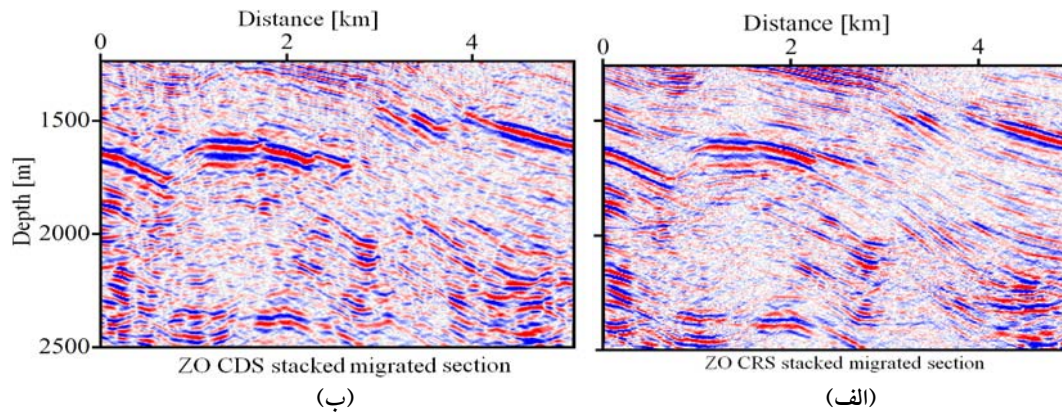


شکل ۱۴. نتیجه کوچ روی مقطع دورافت صفر به دست آمده به روش برانبارش CRS.

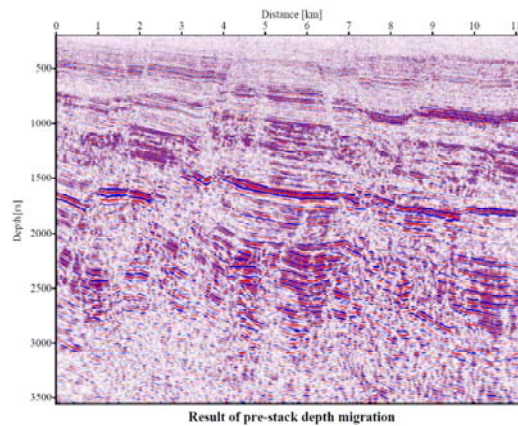


شکل ۱۵. نتیجه کوچ روی مقطع دورافت صفر به دست آمده به روش برانبارش CDS.

می‌دهد. هموارشدگی بازتابنده‌ها در مقطع کوچ روی مقطع CRS به خوبی دیده می‌شود. در جاهایی که بازتابنده‌ها گسلیده شده‌اند، امتداد بازتابنده را در مقطع کوچ صورت گرفته روی مقطع برانبارش شده CDS، بهتر می‌توان دنبال کرد. یکی دیگر از مقاطعی که می‌توان آن را با مقطع کوچ نهایی مقایسه کرد، مقطع کوچ عمقی پیش از برانبارش است. این مقطع در شکل ۱۷ نشان داده شده است. تفاوت‌های این مقطع و مقطع به دست آمده از کوچ عمقی پس از برانبارش روی نتایج برانبارش CDS را می‌توان در نقاطی که بازتابنده‌ها گسلیده شده‌اند، دنبال کرد. به علت آنکه تنها تفاوت‌های کوچکی بین این دو مقطع دیده می‌شود، در نگاه اول نمی‌توان عنوان کرد که کدام مقطع بهتر است. برخی از تفاوت‌هایی که بین این دو مقطع دیده می‌شود، در طول محل گسل‌ها است. بازتابنده‌ها در مقطع پیش از برانبارش، نرم شده‌اند در حالی که در مقطع پس از برانبارش، بازتابنده‌ها تندتر تغییر شیب داده‌اند. مزیت دیگر این روش این است که در تهیه مقطع کوچ عمقی پس از برانبارش که روی نتایج به دست آمده از برانبارش CDS حاصل شده است، از یک مدل هموارشده و ساده سرعت استفاده شد. بنابراین هیچگونه نیازی به داشتن یک مدل سرعت با دقت زیاد و به روزرسانی چندباره آن وجود نخواهد داشت. لایه‌های موجود بین عمق‌های ۷۰۰ تا ۱۰۰۰ متر و در فاصله ۴ کیلومتر نیز با یک گسل قائم دستخوش تغییر شده‌اند. بازتابنده بارز بین عمق ۱۵۰۰ تا ۲۰۰۰ متر که در سراسر طول مقطع نیز کشیده شده است، در نقاط زیادی گسلیده شده است که بدین ترتیب می‌توان به راحتی اغلب گسل‌ها را تا عمق ۲۰۰۰ متری دنبال کرد. تعداد زیادی گسل کوچک تا عمق نزدیک ۲۰۰۰ متری دیده می‌شوند که در نزدیک سطح، شیب تندی به سمت راست دارند و برخی از آنها در عمق حالت قائم پیدا می‌کنند.



شکل ۱۶. مقاطع کوچک از نتایج کوچ عمقی (الف) روی مقطع برانبارش شده به روش برانبارش CRS و (ب) به روش برانبارش CDS و به روش معمول.



شکل ۱۷. مقطع کوچ عمقی پیش از برانبارش. بازتابنده‌ها در این مقطع قدری نسبت به بازتابنده‌ها در شکل ۱۵، هموارتر هستند.

۸ نتیجه‌گیری

ساده سرعت استفاده شده است، درحالی‌که برای تهیه مقطع کوچ عمقی/زمانی پیش از برانبارش، به زمان و دقت بسیاری برای به‌دست آوردن یک مدل سرعت دقیق نیاز است. همه این مزایا نشان‌دهنده آن است که از این روش به خوبی می‌توان در مناطق با ساختار پیچیده، استفاده کرد.

تشکر و قدردانی

نویسندگان در اینجا از کنسرسیوم معکوس‌سازی موج (WIT) آلمان به‌خاطر حمایت نرم‌افزاری و همچنین شرکت Hot Rock به‌سبب در اختیار قرار دادن داده‌ها و اجازه نشر آنها تشکر می‌کنند.

روش‌های مرسوم پردازش روشن ساخته‌اند که در برخی مواقع، قادر به آشکارسازی رخدادها در شرایطی که منطقه بسیار گسله است، نیستند. در این مقاله داده‌ها تحت پردازش به روش CRS قرار گرفتند. با این حال نتایج حاصل از این پردازش نیز محل گسل‌ها را به خوبی نشان نداد. بدین‌منظور داده‌ها تحت پردازش به روش CDS قرار گرفتند. نتایج به‌دست آمده نشان داد که این روش به خوبی قادر به آشکارسازی گسل‌ها و رخدادهایی است که دارای تداخل شیب هستند. همچنین در اجرای فرایند کوچ روی مقطع به‌دست آمده به روش CDS، تنها از یک مدل

- CRS stacking; a simplified explanation, EAGE 69th Conference & Technical Exhibition - London, UK.
- Müller, T., 1998, Common reflection surface stack versus NMO/stack and NMO/DMO/stack, Extended abstracts, 60th Conf. Eur. Assn. Geosci. Eng. Session 1-20.
- Pruessmann, J., Frehers, S., Ballesteros, R., Caballero, A. and Clemente, G., 2008, CRS based depth model building and imaging of 3D seismic data from the Gulf of Mexico Coast, *Geophysics*, DOI:10.1190/1.2968691., **73**, 303-311.
- Robein, E., 2003, Velocities, time imaging and depth imaging in reflection seismic, EAGE Publications.
- Soleimani, M. and Piruz, I., 2007, NIP tomography inversion, a new improved method for velocity model estimation; synthetic data example. The 19th International Geophysical Conference & Exhibition of Australian Society of Exploration Geophysicists (ASEG), Australia, Perth.
- Soleimani, M. and Mann, J., 2008, Merging aspects of DMO correction and CRS stack to account for conflicting dip situations, Annual WIT Report 2008, 159-166.
- 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**, 271-288.
- Soleimani, M., Mann, J., Adibi, E., Shahsavani, M. and Piruz, I., 2010, Applying the CRS stack method to solve the problem of imaging of complex structures in the Zagros overthrust, south west Iran, 72nd EAGE Conference & Exhibition. Barcelona, Spain, P556.
- Soleimani, M., Adibi, E. and Mann, J., 2011, Imaging in complex structures by post-stack time migration and CRS stack, 12th International Congress of the Brazilian Geophysical Society (SBGf).
- Spinner, M. E. T., 2007, CRS-based minimum-aperture Kirchhoff migration in the time domain, Ph. D. dissertation, Karlsruhe Institute of Technology, (KIT), Germany.
- Yang, K., Bao-shu Chen, B. S., Wang, X., J., Yang, X., J. and Liu, J. R., 2012, Handling dip discrimination phenomenon in common-reflection-surface stack via combination of output-imaging-scheme and migration/demigration, *Geophysical Prospecting*, **60**, 255-269.
- مراجعه
- ریاحی، م. و بازرگانی، ف.، ۱۳۸۳، بررسی کارایی روش کوچ PSPC در پردازش داده‌های لرزه‌ای به دست آمده از محیط‌های دارای تغییرات جانبی سرعت، م. فیزیک زمین و فضا، ۳۰(۲)، ۷۹-۹۱.
- سلیمانی منفرد، م.، ۱۳۸۸، برانبارش سطح پراش مشترک، ارائه یک روش نوین در حل مسئله تداخل شیب‌ها، پایان‌نامه دکتری، دانشگاه صنعتی شاهرود.
- شاهسونی، ه.، ۱۳۹۰، ارائه روش تصویرسازی مبتنی بر مدل به‌منظور بهبود کارکرد روش برانبارش سطح پراش مشترک، پایان‌نامه دکتری، دانشگاه صنعتی شاهرود.
- De Bazelaire E., 1988, Normal moveout revisited - inhomogeneous media and curved interfaces, *Geophysics*, **53**, 143-157.
- Duveneck, E., 2004a, Tomographic determination of seismic velocity models with kinematic wavefield attributes. Logos Verlag, Berlin.
- Duveneck E., 2004b, Velocity model estimation with data-derived wavefront attributes. *Geophysics*, DOI: 10.1190/1.1649394., **69**, 265-274.
- 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, Master's thesis, University of Karlsruhe.
- Hubral, P., 1999, Macro-model independent seismic reflection imaging, *Journal of Applied Geophysics*, **42**, 137-146.
- Jäger, R., 1999, The common reflection surface stack: theory and application, Diploma thesis, University of Karlsruhe.
- Mann, J., Jäger, R., Müller, T., Höcht, G. and Hubral, P., 1999, Common-reflection-surface stack: a real data example, *Journal of Applied Geophysics*, **42**, 301-318.
- Mann, J., 2002, Extensions and applications of the common-reflection-surface stack method, Logos Verlag, Berlin.
- Mann, J., Schleicher, J. and Hertweck, T., 2007,