

خطاهای ناشی از جابه‌جایی کنترل‌نشده چشمه و گیرنده، چالشی برای پردازش داده‌های لرزه‌ای کوهستان

سام‌الدین اسماعیلی^۱، علی غلامی^{۲*} و حمیدرضا سیاه کوهی^۳

^۱ گروه علوم زمین، دانشکده علوم پایه، واحد علوم و تحقیقات، دانشگاه آزاد اسلامی، تهران، ایران

^۲ استاد، مؤسسه ژئوفیزیک، دانشگاه تهران، تهران، ایران

^۳ استاد، مؤسسه ژئوفیزیک، دانشگاه تهران، تهران، ایران

(دریافت: ۱۴۰۰/۱۲/۱۱، پذیرش: ۱۴۰۱/۰۴/۲۰)

چکیده

همدوسی در رویدادهای بازتابی موجود در داده‌های لرزه‌ای پیش از برانبارش، عاملی تعیین‌کننده در کیفیت نهایی تصویرسازی زیرسطحی با این داده‌ها محسوب می‌شود. این همدوسی به نسبت پیچیدگی محیط انتشار موج و خطاهای عملیاتی در مرحله برداشت داده‌های لرزه‌ای کاهش می‌یابد که در صورت جبران نشدن اثر آنها، پردازش داده‌های لرزه‌ای را با چالش جدی مواجه خواهد کرد. یکی از خطاهای رایج در برداشت داده‌های لرزه‌ای مناطق کوهستانی، جابه‌جایی بدون ثبت مجدد ایستگاه‌های چشمه لرزه‌ای به دلیل محدودیت‌های عملیاتی است. با توجه به میزان سختی عملیات برداشت، احتمال وقوع این نوع خطا در ایستگاه‌های گیرنده نیز وجود دارد. در صنعت، روش‌هایی برای افزایش همدوسی رویدادهای بازتابی وجود دارد که فرض اولیه آنها، ایستایی ناهمدوسی‌های موجود در بعد زمان و پیش‌بینی‌پذیری آنها در بعد دورافت و در نتیجه، توانایی جبران آنها با روش‌های تصحیح استاتیک و دینامیک متداول است، اما برخی خطاهای عملیاتی و پیچیدگی‌های محیط انتشار موج، موارد نقضی هستند که می‌توانند آن جابه‌جایی‌ها را از حالت پیش‌بینی‌پذیری خارج کنند. جابه‌جایی‌های بدون ثبت مجدد چشمه یا گیرنده موج لرزه‌ای و وجود بی‌هنجاری‌های سرعت محلی در مسیر انتشار امواج لرزه‌ای، که معمولاً در لرزه‌نگاری کوهستان با هم رخ می‌دهند، از جمله این موارد هستند. اثر این گونه عوامل ناهمدوسی‌ساز در داده‌ها و استفاده از روابط رایج تصحیح استاتیک و دینامیک برای آنها، می‌تواند جابه‌جایی‌های ناپایدار در بعد زمان و پیش‌بینی‌ناپذیر در بعد مکان ایجاد کند. در این شرایط تصحیحات استاتیک و دینامیک متداول کارایی لازم را برای جبران ناهمدوسی‌های رویدادهای بازتابی ندارند. این مقاله با تحلیل برخی داده‌های مصنوعی و واقعی سعی در تبیین موضوع دارد و پیشنهاد می‌کند از یک روش تصحیح جابه‌جایی زمانی ناپایدار در داده‌های لرزه‌ای پیش از برانبارش برای جبران این ناهمدوسی‌ها استفاده شود.

واژه‌های کلیدی: عملیات لرزه‌نگاری کوهستان، خطاهای عملیاتی، ناهمدوسی رویدادهای بازتابی، جابه‌جایی زمانی ناپایدار، بی‌هنجاری‌های سرعت،

استاتیک باقیمانده

۱ مقدمه

دو بخش تقسیم می‌شوند. یک دسته مربوط به شرایط زمین‌شناسی و مخزنی یا به عبارت دیگر، چالش‌های مربوط به محیط انتشار امواج لرزه‌ای است که کنترل‌ناپذیر هستند و دسته دیگر، چالش‌های کنترل‌پذیر یا مدیریتی هستند که مربوط به چگونگی اجرای عملیات یا میزان همخوانی پارامترهای واقعی برداشت داده‌های لرزه‌ای با پارامترهای طراحی عملیاتی (operational designing) است. توجه به این نکته لازم است که میزان زیاد پیچیدگی سطح زمین که معمولاً ناشی از توپوگرافی خشن یا شرایط کوهستانی همراه با تنوع در رخنمون‌های مختلف لایه‌های زمین‌شناسی است، چالش‌های هر دو بخش را با هم به همراه دارد.

اغلب هدف اولیه و اصلی پردازش داده‌های لرزه‌ای، تصویرسازی صحیح و دقیق بازتابنده‌های موجود در محیط انتشار امواج لرزه‌ای است. به‌طور کلی رسیدن به این هدف به‌گونه‌ای با همدوسی و به‌صاف‌شدگی رویدادهای بازتابی در دسته‌بندی‌های (sorts) مختلف گره خورده است که در مسیرهای هندسی مشخص پیش‌بینی‌پذیر باشند. مسیرهای هندسی مربوط به رویدادهای بازتابی در مراحل مختلف فرایند پردازش با یکدیگر فرق دارند؛ برای مثال در تجزیه و تحلیل سرعت برانبارش مربوط به یک بازتابنده خاص در نگاشت‌های نقاط میانی مشترک (Common Midpoint, CMP) یا نقاط عمقی مشترک (Common Depth Point, CDP)، فرض بر قرارگیری رویدادهای بازتابی روی یک منحنی مشخص مانند هذلولی یا نزدیک به هذلولی است یا در برخی روش‌های درون‌یابی (interpolation) و برانبارش رویدادهای بازتابی متناظر با یک نقطه عمقی یا بازتابی مشترک (Common Reflection Point, CRP)، فرض بر قرارگیری آنها در یک ردیف افقی برای بیشترین میزان هم‌افزایی سیگنال و تضعیف حداکثری نوفه‌های تصادفی است. اما در عمل

امروزه با کاهش منابع هیدروکربوری و ورود بسیاری از میدان‌های نفتی بزرگ به نیمه دوم عمر خود و در نتیجه، افزایش هزینه‌های استخراج نفت از آنها، شرکت‌های نفتی بر آن شدند که منابع هیدروکربوری موجود در مناطق پیچیده زمین‌ساختی را که اغلب در مناطق کوهستانی و نیمه‌کوهستانی واقع شده‌اند، کشف و در جهت توسعه آنها برنامه‌ریزی کنند. توسعه چنین میدان‌هایی به نسبت پیچیدگی زمین‌شناسی و مخزنی آنها با چالش‌های مختلف در زمینه‌های گوناگون مواجه است. از جمله این چالش‌ها بهره‌برداری و توسعه صنایع پایین‌دستی با هزینه‌های بسیار زیاد، تصویرسازی باورپذیر لایه‌های زیرسطحی با روش‌های ژئوفیزیکی، ارزیابی صحیح حجم ذخیره هیدروکربن درجا، تعیین دقیق موقعیت چاه‌ها و مسیر بهینه حفاری آنها و عملیات حفاری است. بدیهی است اگر تصویر معتبری از لایه‌های زیرسطحی و پارامترهای مخزنی در مرحله مطالعات ژئوفیزیکی به‌دست‌نیاید، چالش‌های پس از آن بسیار جدی‌تر خواهند بود.

شرکت‌های نفتی برای تصویرسازی زیرسطحی میدان‌های مورد مطالعه، بیشتر از روش‌های لرزه‌نگاری دو یا سه بعدی استفاده می‌کنند. در حال حاضر بهترین راه تصویرسازی زیرسطحی در اکتشاف و توسعه میدان‌های نفتی، استفاده از روش‌های لرزه‌نگاری است، اما کسب نتایج مناسب از داده‌های لرزه‌ای همیشه آسان نیست. پروژه‌های لرزه‌نگاری، متناسب با پیچیدگی شرایط سطحی و زیرسطحی منطقه مورد مطالعه، با چالش‌های مختلفی مواجه هستند. این چالش‌ها را می‌توان به دو دسته عمده تقسیم کرد: ۱) چالش‌های مربوط به شرایط عملیات برداشت داده‌های لرزه‌ای یا چالش‌های اجرایی؛ ۲) چالش‌های مربوط به ضعف روش‌های پردازش برای چیره شدن بر اثرهای مختلف چالش‌های دسته اول.

چالش‌های دسته اول، از دیدگاه توانایی کنترل، خود به

هذلولی، برانبارش رویدادهای بازتابی ناهمدوسی و در نهایت، افت کیفیت و کاهش محتوای فرکانسی رویدادهای برانبارش شده و افت تفکیک‌پذیری (resolution) مقطع لرزه‌ای است.

$$T_x^2 = T_0^2 + \frac{X^2}{V_{rms}^2} + C_3 X^4 + C_4 X^6 + \dots + C_j X^{2j-2} \quad (1)$$

$$T_x^2 = T_0^2 + \frac{X^2}{V_{rms}^2} \quad (2)$$

$$T_x^2 = T_0'^2 + \frac{X^2}{V_{mc}^2} \quad (3)$$

در معادلات فوق، X مقدار دورافت نسبت به نقطه میانی و T_x زمان رسید بازتاب‌ها در دورافت X است. V_{mc} سرعت بیشترین همدوسی در زمان دوطرفه (two-way time) T_0' است که به دلیل وابستگی زمان واقعی بازتابنده در دورافت صفر به اینکه کدام هذلولی بیشترین انطباق را بر رویدادهای بازتابی آن بازتابنده دارد، لزوماً با سرعت در زمان دوطرفه T_0 یکسان نیست (الچلی، ۲۰۱۴). سرعت تخمین زده شده در معادله (۳)، که برای برانبارش بازتاب‌های منطبق بر هذلولی متناظر با آن استفاده می‌شود، لزوماً با V_{rms} برابر نیست و فقط در مرحله پردازش کاربرد دارد و می‌توان آن را سرعت برانبارش (stacking velocity) نامید. الچلی (۲۰۱۴) این سرعت را سرعت پردازشی بیشترین همدوسی (maximum coherence pro-velocity) نامیده است.

True Traveltime (non-hyperbolic):

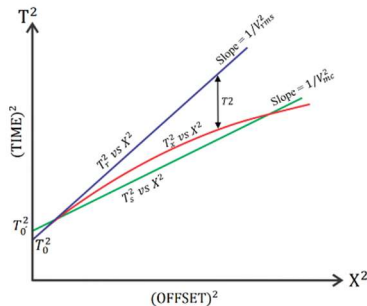
$$T_x^2 = T_0^2 + \frac{X^2}{V_{rms}^2} + C_3 X^4 + C_4 X^6 + C_5 X^8 + \dots$$

Hyperbolic Approximation:

$$T_x^2 = T_0^2 + \frac{X^2}{V_{mc}^2}$$

Hyperbolic Truncation:

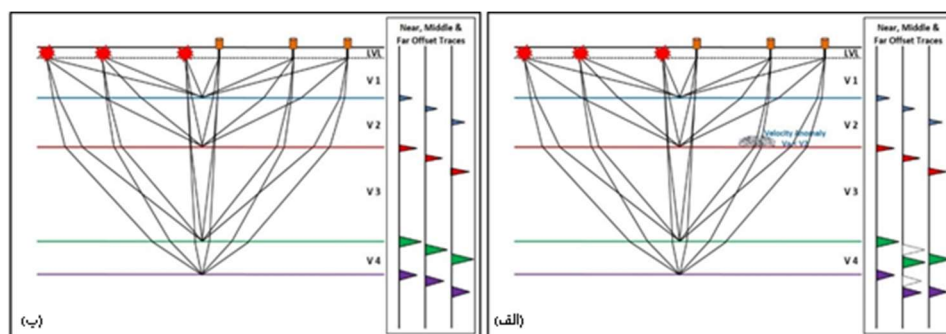
$$T_x^2 = T_0^2 + \frac{X^2}{V_{rms}^2}$$



شکل ۱. اختلاف بین مسیر واقعی و غیرهذلولی گذر موج، سرعت بیشترین همدوسی و سرعت ریشه میانگین مربعات در یک مدل لایه‌ای (الچلی، ۲۰۱۴).

چنین همدوسی کاملی یا به‌صاف‌شدگی هم‌افزایی در رویدادهای بازتابی موجود در داده‌های لرزه‌ای پیش از برانبارش (pre-stack seismic gathers)، جز در ساختارهای زمین‌شناسی ساده با شرایط عملیاتی ایدئال اتفاق نخواهد افتاد.

عوامل مختلفی باعث پیش‌بینی نکردن دقیق رویدادهای بازتابی و در نتیجه، ناهمدوسی در مسیرهای هندسی پیش‌فرض می‌شود. ساده‌ترین آنها وجود لایه‌بندی در محیط انتشار موج است. شکل ۱ تفاوت مسیر واقعی رویدادهای بازتابی را با مسیر منحنی برانبارش مفروض برای حالت لایه‌بندی افقی نشان می‌دهد. با توجه به شکل، اگر محیط انتشار موج لرزه‌ای لایه‌بندی داشته باشد و بتوان از رابطه تر و کوهلر (۱۹۶۹) برای تخمین زمان سیر استفاده کرد (معادله ۱)، رابطه بین مجذور زمان رسید و دورافت گیرنده (T_x^2 و X^2) به دلیل تغییرات سرعت ریشه میانگین مربعات (V_{rms}) در مسیر پرتو لرزه‌ای، از حالت خطی خارج می‌شود و به‌صورت یک منحنی با شیب متغیر در هر نقطه درخواهد آمد که در حالت کوتاه‌شده هذلولی (Hyperbolic truncation) (معادله ۲)، نمودار به‌صورت خطی با شیب ثابت $\frac{1}{V_{rms}^2}$ و برای حالت تقریب هذلولی (Hyperbolic approximation) (معادله ۳)، که بیشتر از این رابطه استفاده می‌شود، به‌صورت خطی با شیب $\frac{1}{V_{mc}^2}$ درخواهد آمد (الچلی، ۲۰۱۴). همچنین این شکل نشان می‌دهد در دورافت‌های نزدیک، سرعت واقعی، سرعت بیشترین همدوسی (V_{mc}) و سرعت ریشه میانگین مربعات (V_{rms}) به هم نزدیک می‌شوند و با افزایش دورافت، اختلاف بین آنها بیشتر می‌شود. در دورافت‌های زیاد، بازتاب‌های مربوط به لایه‌ها، حتی اگر افقی باشند، دیگر از مسیر هذلولی پیروی نمی‌کنند. این موضوع برای حالت واقعی زمین که معمولاً لایه‌هایی با شیب‌های مختلف و بی‌هنجاری‌های سرعتی گوناگون دارد، می‌تواند جدی‌تر باشد. نتیجه منطبق نبودن رویدادهای بازتابی روی مسیر



شکل ۲. مسیر طرح‌واره‌ای پرتوهای لرزه‌ای مربوط به یک نقطه میانی مشترک تشکیل شده از یک هندسه برداشت مشابه در دو حالت (الف) با بی‌هنجاری سرعت و (ب) بدون بی‌هنجاری سرعت. این مسیر از سه جفت چشمه-گیرنده لرزه‌ای روی یک توالی چینه‌ای با یک لایه کم‌سرعت در سطح تشکیل شده است. رویدادهای بازتابی نقطه‌چین در ردلرزه میانی شکل (الف) با حالت بدون بی‌هنجاری در شکل (ب) متناظر است.

دورافت‌های زیاد منحصر نیست و متناسب با عامل (عوامل) ناهمدوس‌ساز می‌تواند در هر دورافتی و در هر زمان رسیدی رخ دهد. مفهوم ایجاد ناهمدوسی در رویدادهای بازتابی در هر زمان رسید یا در هر دورافت، وجود جابه‌جایی‌های پیش‌بینی‌ناپذیر در هر دو بعد زمان و مکان (فاصله) در داده‌های لرزه‌ای پیش از برانبارش در شرایط پیش‌گفته است. شکل ۲ طرح کلی اثر یک بی‌هنجاری سرعت در عمق کم در دورافت میانی را برای یک نقطه میانی مشترک نشان می‌دهد. در شکل ۲-الف مقداری جابه‌جایی نایستا در برخی رویدادهای بازتابی ردلرزه میانی، نسبت به حالت بدون بی‌هنجاری (شکل ۲-ب) دیده می‌شود. چنین بی‌هنجاری‌هایی در داده‌های لرزه‌ای باعث ناهمدوسی رویدادهای بازتابی می‌شوند و از برانبارش آنها تصویر واضحی به دست نمی‌آید. طرح کلی ردلرزه‌های متناظر با دورافت‌های نزدیک، میانی و دور در سمت راست شکل‌های الف و ب آورده شده است.

موضوع ناپایایی (non-stationary) در داده‌های لرزه‌ای، تاکنون بیشتر در پارامترهای فیزیکی محیط انتشار موج یا مبین‌های مختلف لرزه‌ای بررسی شده است. از روش واهمامیخت ناپایا برای افزایش تفکیک‌پذیری داده‌های لرزه‌ای (سید آقامیری و غلامی، ۲۰۱۷) و تخمین

با افزایش شیب لایه‌ها، تغییر جانبی سازندهای زمین‌شناسی (geological formations)، گسل خوردگی لایه‌ها، بی‌هنجاری‌های مختلف سرعت از دید زمین‌شناسی (ریف‌ها، عدسی‌های ماسه‌ای، نمک و...) و مخزنی (سیالات مختلف هیدروکربوری و غیرهیدروکربوری به تله‌افتاده) و غیره، ناهمدوسی رویدادهای بازتابی افزایش و میزان انطباق منحنی برانبارش‌کننده (متناظر با سرعت بیشترین همدوسی) با رویدادهای بازتابی کاهش می‌یابد. این عوامل ناهمدوس‌ساز چه در برداشت داده‌های لرزه‌ای دریایی و چه در خشکی ممکن است وجود داشته باشند، اما معمولاً در لرزه‌نگاری خشکی و در شرایط کوهستانی که لایه‌های زیرسطحی زمین‌ساخت شدیدی را تحمل کرده‌اند، انواع بی‌هنجاری‌های سرعت در مسیر انتشار امواج لرزه‌ای وجود دارند که در ناهمدوسی رویدادهای بازتابی نقش مؤثری دارند؛ لذا می‌توان گفت در صورت پردازش داده‌های لرزه‌ای برداشت‌شده در شرایط کوهستانی، باید علاوه بر عوامل عملیاتی ناهمدوس‌ساز که در این مقاله به آنها پرداخته می‌شود، به‌طور ویژه‌ای به بی‌هنجاری‌های مختلف سرعت نیز توجه شود.

با توجه به عوامل مختلف ایجاد ناهمدوسی، بدیهی است این پدیده به رویدادهای بازتابی واقع در

عملیات داده‌برداری در لرزه‌نگاری برای ایجاد جابه‌جایی‌های ناپایا در حوزه مکان یا زمان مهیا باشد، اجرای الگوریتم‌های پردازشی رایج نمی‌تواند تضمین‌کننده نتایج دقیق و صحیح از چنین داده‌های لرزه‌ای باشد. یادآوری می‌شود که وجود جابه‌جایی‌هایی نایستا (non-static) یا ناپایا در لرزه‌نگاری، مشمول گذر زمان (time-lapse seismic) پذیرفته شده و در واقع اساس روش مذکور بر تجزیه و تحلیل صحیح این جابه‌جایی‌های ناپایا در طول زمان استوار است.

در پردازش داده‌های لرزه‌ای دو مرحله اصلی وابسته به هم وجود دارد که در ایجاد هم‌دوسی بیشتر رویدادهای بازتابی در دسته داده‌های پیش از برانبارش نقش دارند: مرحله تصحیح استاتیک باقیمانده و مرحله تخمین سرعت برونراند یا تصحیح دینامیک که با توجه به نبود توانایی کامل محاسبه سرعت و ضخامت لایه هوازده و منطبق نبودن کامل منحنی برانبارش در دورافت‌های زیاد، بخش‌های باقیمانده هریک از این مراحل را به نام‌های استاتیک باقیمانده و برونراند باقیمانده تصحیح می‌کنند. با توجه به وابستگی این دو به یکدیگر، معمولاً فرایند این تصحیحات تکرار می‌شود. در اینجا دو نکته حائز اهمیت وجود دارد: ۱) فرض بر این است که در داده‌های لرزه‌ای فقط جابه‌جایی‌های استاتیک وجود دارد، آن هم به صورت سازگار با سطح (surface consistent)؛ ۲) با هر بار تکرار فرایند تصحیح استاتیک باقیمانده که شامل روزآمدسازی (update) سرعت برانبارش نیز می‌شود، میزان جابه‌جایی‌های استاتیک برای ردلرزه‌های موجود در داده‌های پیش از برانبارش کم و کمتر می‌شود. علاوه بر اینکه فرض سازگاری سطحی در تصحیح استاتیک می‌تواند در شرایط گوناگون نقض شود (ماردسن، ۱۹۹۳؛ کاکس، ۱۹۹۹ و الفرج و همکاران، ۲۰۲۰)، جابه‌جایی‌های نایستا در شرایط وجود عوامل مختلف ناهم‌دوس ساز (مربوط به محیط انتشار موج و خطاهای

و حذف ضریب کیفیت ثابت در طول ردلرزه (سید آقامیری و غلامی، ۲۰۱۸) استفاده شده است. مادسن و همکاران (۲۰۱۹) تغییرات ناپایای پارامترهای فیزیکی را با استفاده از پنجره‌های زمانی مختلف در وارون‌سازی مقاومت صوتی داده‌های لرزه‌ای مدنظر مطالعه کرده‌اند.

در این مقاله، جابه‌جایی زمانی و مکانی رویدادهای بازتابی همچون یک پارامتر فیزیکی مستتر در داده‌های لرزه‌ای فرض شده است؛ به این معنی که در بعد زمان، اگر جابه‌جایی رویدادهای بازتابی در طول زمان دوطرفه یک ردلرزه ثابت باشد، مشخصه این پارامتر، پایا (stationary) و اگر متغیر با زمان باشد، مشخصه آن ناپایا در نظر گرفته می‌شود. این موضوع برای بعد مکان نیز به این گونه است که اگر جابه‌جایی رویدادها در دورافت‌های مختلف کاملاً پیش‌بینی‌پذیر باشد، شرط پایایی برقرار است و در غیر این صورت، وضعیت ناپایا است. جابه‌جایی‌های زمانی رویدادها با وضعیت پایا در واقع معادل همان جابه‌جایی‌های استاتیک در داده‌های لرزه‌ای هستند. در این حالت تصحیحات استاتیک برای آنها کارا خواهد بود. در صورت پیش‌بینی مسیر رویدادهای بازتابی در دورافت‌های مختلف نیز که ممکن است با استفاده از توانایی روابط مختلف زمان‌سیر انجام شود، جابه‌جایی رویدادها از نوع پایا و تصحیح دینامیک متداول (مرتبه دوم یا چهارم تصحیح برونراند نرمال) برای داده‌های لرزه‌ای مورد نظر مؤثر خواهد بود؛ بنابراین اگر پایایی در موضوع جابه‌جایی‌های زمانی و مکانی رویدادهای بازتابی معادل یکنواختی آنها در بعد زمان و توانایی پیش‌بینی آنها در دورافت‌های مختلف فرض شود، روش‌های متداول پردازش داده‌های لرزه‌ای، نگاهی پایا به مقوله این جابه‌جایی‌ها در هر دو بعد زمان و مکان خواهند داشت، درحالی‌که با توجه به شرایط منطقه مورد مطالعه، این جابه‌جایی‌ها می‌توانند ماهیتی پیش‌بینی‌ناپذیر و ناپایا داشته باشند. بدیهی است اگر شرایط محیط انتشار یا اجرای

عملیاتی) برای همدوسی بیشتر در رویدادهای بازتابی در مرحله تصحیح استاتیک باقیمانده چالش‌های جدی ایجاد خواهند کرد و برعکس. به عبارت دیگر، در این شرایط نه تنها اعمال تصحیح استاتیک باقیمانده کمکی به بهبود همدوسی رویدادها نمی‌کند، بلکه تکرار آن می‌تواند به همدوسی بخش محدودی از رویدادها و به هم‌ریختگی سایر آنها منجر شود.

حال باید به نکته ظریف و در عین حال اثرگذاری اشاره کرد که به فرایند تصحیح استاتیک باقیمانده برمی‌گردد. معمولاً در روش‌های تصحیح استاتیک باقیمانده از الگوریتم‌های شباهت‌سنجی بین ردلرزه‌های نقاط میانی یا عمقی مشترک پس از اعمال تصحیح برونراند نرمال (Normal move-out, NMO) و پیش و پس از فرایند کوچ داده‌ها با روش‌هایی مانند ارزیابی ضریب همبستگی متقاطع (cross correlation coefficient) (کرچیمر، ۱۹۸۳؛ ویگنز و همکاران، ۱۹۷۶؛ جین، ۲۰۰۶؛ فری و همکاران، ۲۰۱۵ و لاو و ترد، ۲۰۱۸)، بیشینه‌سازی توان برانبارش (stack power maximization) (رونن و کلرباوت، ۱۹۸۵)، بیشینه‌سازی تنکی (sparsity) (غلامی، ۲۰۱۳) و کاهش رتبه ماتریس (rank reduction) مربوط به نقطه میانی یا عمقی مشترک (کاظمی، ۲۰۱۴ و الفرج و همکاران، ۲۰۱۸) استفاده می‌شود. در فرایند تصحیح استاتیک باقیمانده با توجه به تضعیف نشدن زیاد دامنه و فرکانس رویدادهای بازتابی مربوط به بازتابنده‌های موجود در عمق‌های کم تا متوسط، تحلیل‌های شباهت‌سنجی تصحیح استاتیک باقیمانده معمولاً بر مبنای به‌صفت‌شدگی چنین رویدادهایی در داده‌های لرزه‌ای پیش از برانبارش عمل می‌کنند. چنین بازتابنده‌هایی را بیشتر قبل از طراحی عملیات لرزه‌نگاری تعیین می‌کنند و برای تصویرسازی آنها، پارامترهای مناسب عملیاتی را در نظر می‌گیرند. این بازتابنده‌ها معمولاً جزء اهداف اصلی در یک پروژه لرزه‌نگاری نیستند، ولی جهت تصویرسازی اهداف اصلی

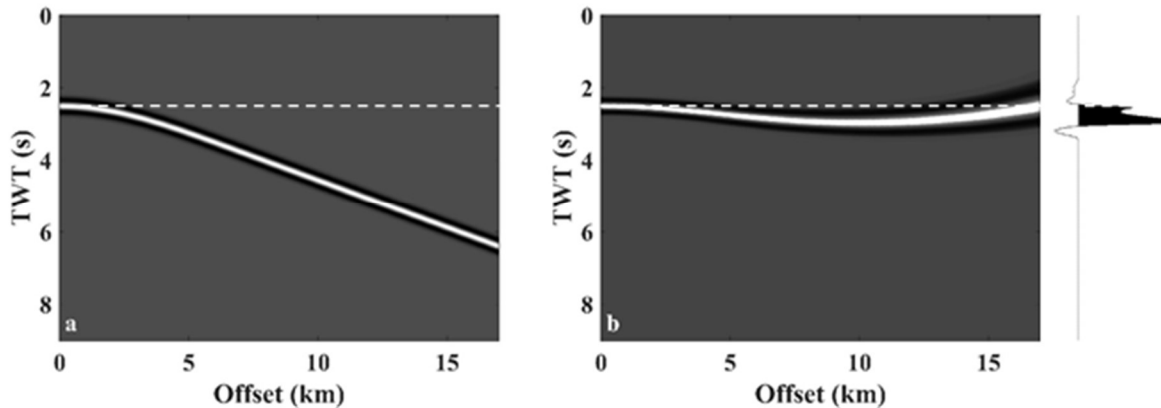
با بهینه‌سازی تصحیح استاتیک به‌کار می‌روند و در مقایسه با بازتابنده‌های عمیق و اهداف اصلی برای تصویرسازی، به آنها بازتابنده یا افق کم‌عمق (کوردسن و همکاران، ۲۰۰۰) گفته می‌شود.

اگر در محیط انتشار موج به جای یک بازتابنده کم‌عمق، یک توالی چینه‌ای با رویدادهای بازتابی قوی با محتوای فرکانسی بالا و تفکیک‌پذیری کافی وجود داشته باشد و مبنای تصحیح استاتیک باقیمانده قرار گیرد، فرایند شباهت‌سنجی در این تصحیح، با راحتی بیشتری آن توالی بازتابی را در داده‌های لرزه‌ای پیش از برانبارش به‌صفت خواهد کرد. این موضوع در داده‌های لرزه‌ای پیش از برانبارشی که فقط جابه‌جایی‌های استاتیک و دینامیک پیش‌بینی‌پذیر (جابه‌جایی‌های پایا در بعدهای زمان و مکان) دارند، به همدوسی بیشتر سایر رویدادهای بازتابی و در نتیجه، تصویرسازی بهتر بازتابنده‌های دیگر خواهد انجامید، اما اگر رویدادهای بازتابی در داده‌های لرزه‌ای جابه‌جایی‌های ناپایا داشته باشند، به‌صفت‌شدگی رویدادهای مربوط به بازتابنده کم‌عمق، کمکی به افزایش همدوسی سایر بازتابنده‌ها از جمله بازتابنده‌های اصلی و عمیق نخواهد کرد.

تصویر ۳- الف داده‌های لرزه‌ای مصنوعی حاصل از یک بازتابنده را نشان می‌دهد که در آن بخشی از پرتوهای دریافتی در دورافت‌های میانی و دور، تحت تأثیر یک بی‌هنجاری سرعت با تأخیرهای مختلف در زمان‌های رسید رویدادهای بازتابی قرار گرفته است. همان‌طور که در این شکل مشاهده می‌شود، پس از برونراند نرمال رویدادها (تصویر ۳-ب)، علاوه بر جابه‌جایی در قله موجی‌شکل (waveform) حاصل از برانبارش (ردلرزه سمت راست شکل)، نسبت به ردلرزه با دورافت صفر تغییر شکل موج نیز ایجاد شده است. جابه‌جایی قله موج با خط‌چین در هر دو تصویر ۳-الف و ۳-ب مشخص شده است. جابه‌جایی و تغییر شکل رویداد بازتابی حاصل از

دینامیک متداول به‌شمار می‌رود. بدیهی است چنین تغییراتی در شکل رویدادهای بازتابی و جابه‌جایی موجی شکل‌ها، می‌تواند در صحت مقطع برانبارش چالش جدی ایجاد کند.

برانبارش به دو دلیل اتفاق افتاده است. یکی تصحیح نشدن جابه‌جایی‌های زمانی باقیمانده در رویدادهای بازتابی در دورافت‌های مختلف و دیگری ایجاد پدیده کشیدگی در اثر تصحیح برونراند نرمال که پدیده‌ای رایج در تصحیح



شکل ۳. تصویر (الف) نگاشت نقطه میانی مشترک مصنوعی با یک بازتابنده را نشان می‌دهد که رویدادهای بازتابی آن به دلیل قرارگیری یک بی‌هنجاری سرعت در مسیر امواج پایین‌رونده یا بالارونده در دورافت میانی با تأخیر زمانی مواجه شده‌اند. تصویر (ب) همین داده را پس از اعمال روش رایج برونراند نرمال بر پایه تقریب هذلولی نشان داده است. ردلرزه حاصل از برانبارش رویدادهای بازتابی موجود در تصویر (ب) در سمت راست تصویر ارائه شده است. به تغییر شکل و جابه‌جایی ظاهری موجی شکل حاصل از برانبارش دقت شود. خط‌چین، مرکز موجی شکل رویداد مربوط به دورافت صفر را نشان می‌دهد.

علاوه بر عوامل مربوط به پیچیدگی محیط انتشار موج که خارج از کنترل است، در برخی موارد، ناهم‌دوسی‌ها ناشی از اجرا نکردن یا ممکن نبودن اجرای استانداردهای عملیاتی در برداشت داده‌های لرزه‌ای است. این بخش از خطاها معمولاً با میزان سختی عملیاتی اجرایی و چگونگی کنترل کیفیت پارامترهای عملیاتی متناسب است. از جمله خطاهای رایج در عملیات لرزه‌نگاری مناطق کوهستانی و نیمه‌کوهستانی، که به موضوع جابه‌جایی زمانی رویدادهای بازتابی مربوط است، انطباق نداشتن مختصات، ارتفاع و عمق واقعی چشمه‌های لرزه‌ای با داده‌های لرزه‌ای ثبت شده است؛ برای مثال معمولاً گروه‌های حفاری، متناسب با سختی کار و ممکن نبودن حفاری ایستگاه‌هایی که گروه

در داده‌های واقعی پیش از برانبارش با توجه به شکل بی‌هنجاری‌های سرعت و عمق آنها، بخش‌های مختلفی از رویدادهای بازتابی درگیر جابه‌جایی‌های ناپایا می‌شود. به نسبت میزان جابه‌جایی‌ها و آشفتگی‌ها در رویدادهای بازتابی پیش از برانبارش، تصویر برانبارش شده آنها مبهم و ردیابی بازتابنده‌ها در مقاطع لرزه‌ای به‌دست آمده دشوار خواهد بود که این موضوع کاهش باورپذیری به افق‌های زمین‌شناسی تفسیرشده را در پی خواهد داشت. به‌طور کلی هر نوع تغییر ناگهانی در خصوصیات سنگ‌شناسی، ساختمانی و مخزنی در محیط انتشار موج لرزه‌ای که بتواند به‌طور محلی رویدادهای بازتابی را جابه‌جا کند، نتایجی مشابه شکل‌های ۲ و ۳ ایجاد خواهد کرد.

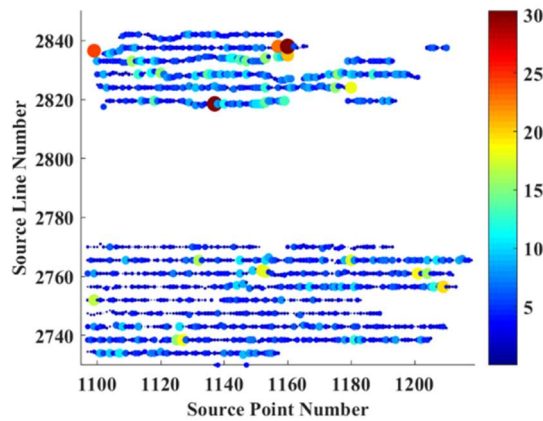
نقشه‌برداری مشخص کرده است، با توجه به تجهیزات سنگین مورد استفاده، به حفاری در نقطه‌ای اقدام می‌کنند که از نقطه مشخص شده فاصله دارد و علاوه بر مختصات، اغلب از نظر ارتفاع نیز با نقطه اصلی ثبت شده تفاوت دارد. در این مقاله سعی شده است به خطاهای ایجاد شده حین عملیات برداشت داده‌های لرزه‌ای و اثر آنها بر مراحل مختلف پردازش و در نهایت کیفیت نتایج پردازش آن داده‌ها پرداخته شود.

۲ جابه‌جایی ایستگاه‌های چشمه لرزه‌ای و مسائل آن

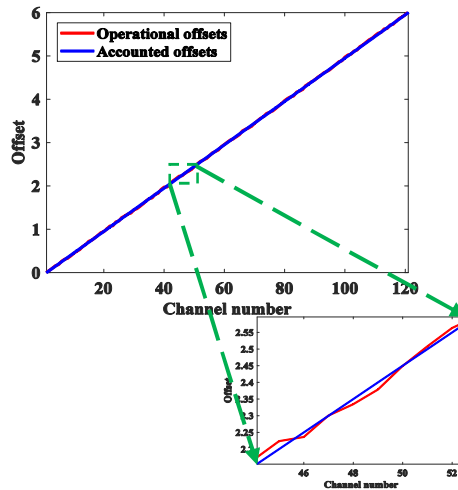
تجربه نشان داده است جابه‌جایی ایستگاه‌های منبع انرژی نسبت به محل اصلی آنها، در شرایط کوهستانی و نیمه‌کوهستانی و مناطقی که محدودیت تردد در آنها وجود دارد، مانند مناطق جنگلی، در بیشتر موارد رخ می‌دهد. این جابه‌جایی‌ها را گروه‌های حفاری انجام می‌دهند و معمولاً بدون اطلاع دادن به گروه نقشه‌برداری و ثبت مجدد مختصات ایستگاه‌های جابه‌جاشده توسط آنها صورت می‌گیرد و مفهوم آن این است که در پایگاه داده‌های مربوطه، این جابه‌جایی‌ها به حساب نیامده است. در این شرایط داده‌های مربوط به مختصات و ارتفاع ایستگاه‌های چشمه و دورافت گیرنده‌ها، صحیح ثبت نشده‌اند. بسیاری از پروژه‌های لرزه‌نگاری اجرا شده در مناطق مذکور چنین خطایی دارند. البته این مسئله به شرایط مذکور منحصر نیست و به دلایل مختلف در مناطق مسکونی، کشاورزی، نظامی، صنعتی و غیره نیز ممکن است در حد زیادی رخ دهد.

خطای یادشده معمولاً به دلیل توپوگرافی منطقه عملیاتی و نبود دسترسی آسان گروه‌های حفاری به

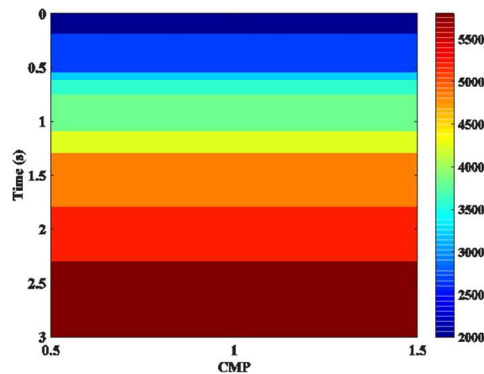
ایستگاه‌های نصب‌شده گروه‌های نقشه‌برداری اتفاق می‌افتد که البته در بیشتر موارد به دلیل استفاده نکردن از امکانات و گروه‌های حفاری مناسب و نبود دقت کافی در بخش کنترل کیفیت پروژه‌های لرزه‌نگاری و همچنین سهل‌انگاری رخ می‌دهد. این مسئله ممکن است در نگاه اول ساده به نظر برسد و بتوان از آن چشم‌پوشی کرد، اما بررسی دقیق اثر آن در مراحل مختلف پردازش، نشان می‌دهد که این مسئله می‌تواند چالشی در پردازش داده‌های لرزه‌ای کوهستان باشد. این جابه‌جایی‌های ثبت‌نشده، به دلایل مختلف البته با احتمال کمتر برای گیرنده‌های لرزه‌ای نیز ممکن است رخ دهد. این موضوع با سخت‌تر شدن شرایط عملیاتی و کوهستانی شدن بیشتر منطقه لرزه‌نگاری، خود را بیشتر نشان خواهد داد. شکل ۴ نمونه‌ای از جابه‌جایی ایستگاه‌های چشمه لرزه‌ای را به صورت واقعی برای بخشی از خطوط چشمه (source lines) در یک پروژه لرزه‌نگاری سه‌بعدی، در شرایط کوهستانی - نیمه‌کوهستانی در غرب ایران نشان می‌دهد. این جابه‌جایی‌ها را گروه‌های حفاری با توجه به شرایط امکانات و سختی کار انجام داده‌اند. اغلب در پروژه‌های لرزه‌نگاری اجرا شده در شرایط کوهستانی یا نیمه‌کوهستانی، این گونه جابه‌جایی‌ها با این استدلال پذیرفته می‌شدند که رویدادهای بازتابی بالاخره مربوط به همان خاک یا اطراف آن در لرزه‌نگاری سه‌بعدی یا همان نقطه مشترک عمقی یا نزدیک به آن در لرزه‌نگاری دوبعدی خواهند بود؛ بنابراین با استدلال مذکور، این جابه‌جایی‌ها معمولاً دوباره ثبت نمی‌شوند و به صورت کاملاً ناشناخته در داده‌های لرزه‌ای باقی می‌مانند و اثر خود را در مراحل مختلف پردازش به جامی گذارند.



شکل ۴. جابه‌جایی بدون ثبت مجدد تعدادی از ایستگاه‌های چشمه لرزه‌ای در یک پروژه لرزه‌نگاری سه‌بعدی واقعی. قطر و رنگ دایره‌ها نشان‌دهنده میزان اختلاف موجود در مختصات ثبت‌شده در داده‌های پشتیبان نگاشت‌های چشمه لرزه‌ای و مختصات واقعی آن چشمه‌ها به متر است. این ایستگاه‌ها در دو بخش کوهستانی (در شش خط منبع انرژی بالا) و نیمه‌کوهستانی (در نه خط منبع انرژی پایین) در حدود ۲ تا ۳۰ متر جابه‌جا شده‌اند. این داده‌ها برای نمونه برداشت مجدد و ثبت شده‌اند که البته با وجود این امکان، داده‌های پشتیبان نگاشت‌های چشمه لرزه‌ای توسط آنها دوباره تصحیح شد.



شکل ۵. توزیع دورافت در یک نگاشت میانی مشترک فرضی. نمودار آبی دورافت محاسبه‌شده در پردازش و نمودار قرمز دورافت واقعی اجراشده در عملیات را نشان می‌دهد. اختلاف دورافت‌های واقعی و دورافت‌های محاسبه‌شده برای ردلرزه‌های موجود در این نقطه میانی مشترک از صفر تا ۲۵ متر است.



شکل ۶. سرعت برانبارش لایه‌های زیر نقطه میانی مشترک فرضی که در شکل ۵ توزیع دورافت ردلرزه‌های آن نشان داده شده است.

آن گیرنده ثبت شده‌اند، خطایی متناسب با میزان اختلاف ارتفاع به حساب نیامده و مقدار سرعت جایگزینی (replacement velocity) در نظر گرفته شده برای فاصله سطح مینا و سطح زمین خواهند داشت. این خطا بخشی از خطای استاتیک باقیمانده در داده‌های لرزه‌ای است.

۴ اثر جابه‌جایی ایستگاه‌های چشمه و گیرنده در تصحیح استاتیک مربوط به لایه هوازده

در شرایطی که ایستگاه‌های چشمه یا گیرنده جابه‌جا شده باشند، محاسبه استاتیک شکست مرزی یا تصحیح استاتیک مربوط به لایه هوازده، با مقداری خطا مواجه می‌شود. ممکن است روش مورد استفاده برای تصحیح استاتیک شکست مرزی از دقت کافی برخوردار باشد، اما با توجه به اینکه مبنای محاسبات در این روش، زمان اولین رسیدها و دورافت گیرنده‌ها است، حتی اگر این محاسبات از نظر ریاضی دقیق انجام شود، مدل سرعت لایه هوازده به‌طور صحیح تخمین زده نمی‌شود و مقادیر استاتیک محاسبه شده به جایگاه‌هایی از ایستگاه‌های گیرنده و چشمه اعمال می‌شود که متعلق به آنها نیست. با توجه به شدت هوازگی و تنوع رخنمون سازندهای زمین‌شناسی، مقادیر خطای استاتیک شکست مرزی ناشی از جابه‌جایی مسطحاتی و ارتفاعی ایستگاه‌های چشمه و گیرنده در حد چند میلی‌ثانیه است که بخشی از خطاهای استاتیک باقیمانده را تشکیل خواهد داد. در مرحله تصحیح استاتیک باقیمانده علاوه بر تخمین و تصحیح خطاهای مربوط به محاسبات و محدودیت‌های متداول روش‌های تصحیح استاتیک اولیه (مربوط به سطح مینا و لایه هوازده)، باید پس از اعمال برونراند نرمال به محاسبه و جبران این نوع خطای استاتیک نیز پرداخته شود.

۵ اثر جابه‌جایی ایستگاه‌های چشمه و گیرنده در تصحیح دینامیک

شکل ۵ مثالی از یک توزیع دورافت در دو حالت به حساب آمده در فرایند پردازش (آنچه که در پایگاه داده‌ها برای هر ردلرزه از نقطه میانی ارائه شده که در شکل با رنگ آبی مشخص شده است) و اجرا شده در واقعیت (آنچه که گروه‌های حفاری چشمه‌ها و گروه‌های چیدمان گیرنده‌ها روی زمین اجرا کرده‌اند که در شکل با رنگ قرمز مشخص شده است) را با اختلاف صفر تا ۲۵ متر برای یک نگاشت نقطه میانی مشترک فرضی نشان داده است. سرعت برانبارش متناظر با لایه‌های زیر نقطه مذکور، در شکل ۶ نشان داده شده است. این مثال فرضی است، اما محدوده خطای آن حین اجرای پروژه‌های لرزه‌نگاری در مناطق کوهستانی کاملاً محتمل است.

در پردازش چنین داده‌هایی، در هر مرحله که به نحوی از مختصات یا ارتفاع چشمه و گیرنده لرزه‌ای استفاده می‌شود، چالشی جدی ایجاد می‌شود. از جمله این مراحل، تصحیح استاتیک ارتفاعی یا استاتیک مربوط به سطح مینا، تصحیح استاتیک شکست مرزی، تضعیف نوفه‌های خطی، تخمین سرعت برانبارش و تصحیح استاتیک باقیمانده است که در ادامه به تفکیک بررسی خواهند شد.

۳ اثر جابه‌جایی ایستگاه‌های چشمه و گیرنده در تصحیح استاتیک ارتفاعی (Elevation static)

در تصحیح استاتیک ارتفاعی مهم‌ترین عاملی که نقش بازی می‌کند، اختلاف ارتفاع ایستگاه‌های چشمه و گیرنده با سطح مبنای (datum) در نظر گرفته شده برای پردازش است. بدیهی است اگر این اختلاف ارتفاع در نقطه‌ای با واقعیت یکی نباشد، مقدار استاتیک محاسبه شده برای آن نقطه صحیح نخواهد بود و تمام ردلرزه‌هایی که مربوط به آن نقطه هستند، با یک مقدار استاتیک ارتفاعی نادرست جابه‌جا می‌شوند. اگر خطا مربوط به یک چشمه لرزه‌ای باشد، تمام گیرنده‌هایی که ردلرزه خود را از آن گرفته‌اند و اگر مربوط به یک گیرنده باشد، تمام ردلرزه‌هایی که در

نکته حائز اهمیت درباره وجود این خطا در تصحیح دینامیک، جابه‌جایی‌های تصادفی رویدادهای بازتابی در داده‌های لرزه‌ای پیش از برانبارش (مثلاً نقاط میانی مشترک) است؛ به این معنی که اگر یک چشمه لرزه‌ای جابه‌جا شده باشد، دورافت تمام گیرنده‌هایی که از آن چشمه لرزه‌ای، ردلرزه خود را دریافت کرده‌اند، خطا خواهد داشت. در این شرایط اگر نگاشت‌های چشمه لرزه‌ای به یکی از انواع دسته‌بندی‌های نقاط مشترک میانی، عمقی یا بازتابی تبدیل شود، جابه‌جایی‌های تصادفی و نایستا در رویدادهای بازتابی متناظر با آن چشمه لرزه‌ای به وجود خواهد آمد؛ زیرا هر ردلرزه در این دسته داده‌ها، متناظر با گسیل موج از آن چشمه لرزه‌ای، دورافتی نادرست دارد.

رابطه (۴) نشان می‌دهد اگر دورافت متناظر با ردلرزه i (x_i) در داده‌های لرزه‌ای پیش از برانبارش، به دلیل جابه‌جایی ثبت‌نشده گیرنده یا چشمه انرژی، مقداری خطا (ε_i) داشته باشد، برای هر زمان برخوردگاه (t_{0j}) مقداری خطای برونراند نرمال ($\Delta t_{(Dyn-error)_{ij}}$) ایجاد می‌شود که با سرعت برونراند در آن زمان (v_{nmoj}) متناسب است:

$$\Delta t_{(Dyn-error)_{ij}} = \sqrt{t_{0j}^2 + (x_i/v_{nmoj})^2} - \sqrt{t_{0j}^2 + ((x_i + \varepsilon_i)/(v_{nmoj} + v_{(nmo-error)_j}))^2} \quad (4)$$

با توجه به تغییرات سرعت برونراند در عمق‌های (زمان‌های

هنگامی که گروه‌های حفاری ایستگاه‌های چشمه را جابه‌جا می‌کنند و گروه نقشه‌برداری مختصات جدید را دوباره ثبت نمی‌کنند، علاوه بر ایجاد مشکل در تصحیح استاتیکی، در تخمین سرعت برانبارش یا تصحیح دینامیک نیز اشکال ایجاد می‌شود. از آنجا که در تخمین سرعت برانبارش، بیشترین همدوسی رویدادهای بازتابی با یک منحنی برانبارش‌کننده مدنظر است، هرگونه ناهمدوسی در رویدادهای بازتابی باعث پخش‌شدگی انرژی برانبارش می‌شود و تخمین سرعت برانبارش را با خطا مواجه می‌کند، چه این ناهمدوسی‌ها از نوع ایستا باشد چه نایستا. بر اساس روابط مختلف زمان سیر (هذلولی یا غیرهذلولی)، در کنار زمان برخوردگاه (intercept time)، دورافت ردلرزه‌ها در تخمین سرعت برانبارش یا همان مقدار برونراند نرمال نقش اصلی دارد. حال اگر این دورافت درج‌شده در داده‌های پشتیبان (support data) به واسطه جابه‌جایی نامشخص ایستگاه‌های چشمه یا گیرنده خطا داشته باشد، دو اشکال به‌وجود می‌آید: ۱) به دلیل تعجیل یا تأخیر محاسبه‌نشده‌ی رویدادهای بازتابی ناشی از نزدیکی یا دوری گیرنده‌ها، همدوسی آنها رخ نمی‌دهد، انرژی برانبارش پخش می‌شود و انطباق یک منحنی برانبارش بر آنها سخت است؛ لذا تخمین سرعت با خطا روبه‌رو می‌شود؛ ۲) مقدار برونراند نرمال برای یک رویداد بازتابی خاص برای دورافتی محاسبه و اعمال شده که در واقعیت، گیرنده‌ای در آنجا داده‌ای ثبت نکرده است.

جدول ۱. میزان خطای ناشی از جابه‌جایی ثبت‌نشده چشمه‌ها و گیرنده‌های لرزه‌ای در تخمین مقدار برونراند نرمال در رویدادهای بازتابی.

دورافت \ سرعت برونراند	کم	متوسط	زیاد
	کم	کم	زیاد
زیاد	کم	کم	متوسط

جدول منظور از میزان خطای کم، خطاهای کمتر از ۵ میلی ثانیه، خطای متوسط، بین ۵ تا ۱۰ میلی ثانیه، خطای زیاد بین ۱۰ تا ۲۰ میلی ثانیه و خطای خیلی زیاد، خطاهای بیش از ۲۰ میلی ثانیه است. این محدوده از خطاها با توجه به میزان سختی عملیات حفاری در لرزه‌نگاری کوهستان و چیدمان گیرنده‌ها و مقدار جابه‌جایی‌های احتمالی چشمه‌های انرژی و گیرنده‌ها، همچنین بر اساس سرعت-های متعارف لایه‌های زمین‌شناسی مختلف ارائه شده است.

مطابق جدول ۱ تغییر سرعت برانبارش، که به‌نحوی نشان‌دهنده تغییرات لایه‌های زمین‌شناسی و محتوای آنها است، در صورت وجود خطای جابه‌جایی ایستگاه‌های چشمه و گیرنده، در به‌هم‌ریختگی رویدادهای بازتابی در دورافت‌های مختلف نقش خواهد داشت. این موضوع می‌تواند راهی برای تجزیه و تحلیل خطاهای احتمالی در حالت‌های مختلف عملیات لرزه‌نگاری در شرایط کوهستانی باشد؛ برای مثال در مناطق کوهستانی که ستون چینه‌شناسی آنها در عمق کم تا متوسط (محدوده ۴۰۰ تا ۲۰۰۰ متر) از لایه‌های کم‌سرعت و ضخیم مانند سازندهای مارلی و شیلی تشکیل شده است، احتمال ناهمدوسی زیادی در داده‌های لرزه‌ای پیش از برانبارش وجود دارد که با روش‌های متداول تصحیح استاتیک نمی‌توان انتظار داشت این به‌هم‌ریختگی رویدادهای بازتابی جبران و همدوسی و برانبارش آنها به‌صورت بهینه انجام شود. البته این‌گونه ناهمدوسی رویدادهای بازتابی به شرایط کوهستانی منحصر نیست و در هر جایی با جابه‌جایی‌های ثبت‌نشده رخ خواهد داد، حتی در مناطق تپه‌ماهوری و دشت. معمولاً این خطاها در این مناطق به دلیل عوارض سطحی و محدودیت‌های دیگر مانند آلودگی‌های جنگی در میدان‌های مرزی رخ می‌دهد. ایجاد ناهمدوسی در مناطقی با سرعت موج زیاد در عمق‌های کم تا متوسط می‌تواند کمتر از حالت قبل باشد؛

دو طرفه ثبت داده‌ها) مختلف برای هر نقطه میانی، عمقی یا بازتابی مشترک، این خطا به‌صورت ناپایا خود را در داده‌های لرزه‌ای پیش از برانبارش نشان خواهد داد. دقت به این موضوع حائز اهمیت است که وجود ناهمدوسی در رویدادهای بازتابی مربوط به یک بازتابنده خاص، خود باعث بروز خطا در تخمین سرعت برونراند نرمال ($v_{(nmo-erro)}$) متناظر با زمان برخوردگاه آن رویدادهای بازتابی خواهد شد که این مسئله باعث افزایش احتمال خطا در مقدار برونراند نرمال می‌شود.

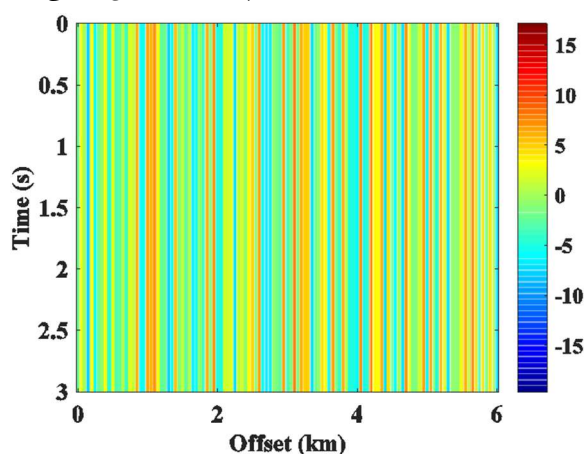
در روش‌های متداول برداشت داده‌های لرزه‌ای که معمولاً دورافت بیشینه، کمتر از ۱۰ کیلومتر فرض می‌شود، با توجه به رابطه زمان سیر مورد استفاده، بر اساس سرعت برانبارش در یک زمان برخوردگاه خاص، محدوده جابه‌جایی نایستا یا ناپایای مربوط به خطای جابه‌جایی ایستگاه‌ها در مناطق کوهستانی، می‌تواند از چند میلی‌ثانیه در دورافت‌های متوسط تا بیش از ده میلی‌ثانیه در دورافت‌های زیاد، برای خطاهای کمتر از ۳۰ متر متغیر باشد. بدیهی است با توجه به امکان ایجاد جابه‌جایی ایستگاه‌ها در هر دو جهت بیشتر شدن دورافت یا کمتر شدن آن، جابه‌جایی رویدادها نسبت به یکدیگر ممکن است تا دو برابر این مقادیر افزایش یابد؛ یعنی اگر یک رویداد بازتابی در اثر خطای عملیاتی ۵ میلی‌ثانیه به سمت بالا جابه‌جا شود و رویداد بازتابی متناظر با آن در ردلرزه کناری، به همان دلیل، ۷ میلی‌ثانیه به سمت پایین کشیده شده باشد، ناهمدوسی ناشی از جابه‌جایی ناپایای این دو رویداد بازتابی نسبت به یکدیگر ۱۲ میلی‌ثانیه خواهد بود. به‌طور کلی می‌توان گفت هرچه سرعت برونراند مربوط به لایه، کم و دورافت بیشتر باشد، اثر خطای ناشی از این بی‌دقتی عملیاتی بیشتر خواهد شد. جدول ۱ به‌صورت ساده و کلی میزان خطای نواحی مختلف یک نقطه میانی، عمقی یا بازتابی مشترک را در صورت جابه‌جایی ثبت‌نشده ایستگاه‌های چشمه و گیرنده نشان داده است. در این

باشد، ترکیب آن با جابه‌جایی استاتیک در آن داده‌ها، دیگر استاتیک نخواهد بود و تصحیح استاتیک باقیمانده برای آن داده‌ها کارا نخواهد بود. در شکل‌های ۷، ۸ و ۹ جهت مقایسه بهتر از نوار مقیاس یکسان استفاده شده است.

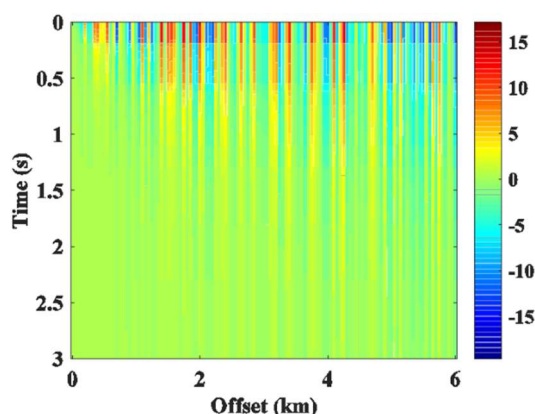
توجه به این نکته ضروری است که خطای ایجادشده در اثر جابه‌جایی بدون ثبت مجدد ایستگاه‌های چشمه و گیرنده، متناسب با افزایش پیچیدگی محیط انتشار موج، بیشتر خواهد شد. به عبارت دیگر، به ازای یک مقدار مشخص از خطا در مختصات ایستگاه‌های چشمه و گیرنده، مقدار ناهمدوسی در رویدادهای بازتابی در مناطق پیچیده زمین‌شناسی - زمین‌ساختی، از جمله مناطق

زیرا خطای ناهمدوسی ناشی از تصحیح دینامیک به واسطه سرعت زیاد، کاهش می‌یابد.

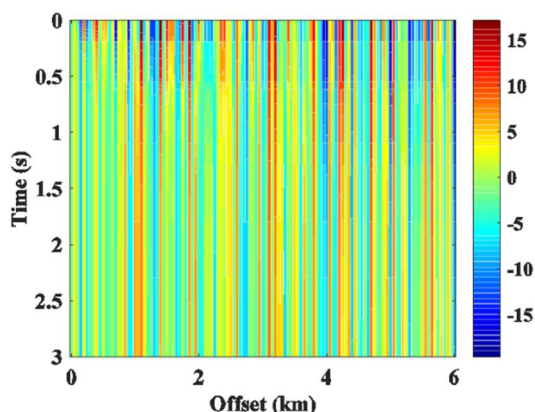
در شکل ۷ خطاهای استاتیک مربوط به جابه‌جایی ثبت‌نشده ایستگاه‌های چشمه در ردلرزه‌های نقطه میانی فرضی شکل ۵ به اندازه صفر تا ۸ میلی‌ثانیه (مثبت و منفی) نشان داده شده است. ترکیب جابه‌جایی‌های ناپایای مربوط به تصحیح دینامیک ناشی از این خطاهای عملیاتی (شکل ۸) و خطای استاتیک مذکور، جابه‌جایی‌های ناپایایی را به رویدادهای بازتابی، در نقطه میانی مشترک مورد نظر تحمیل کرده است (شکل ۹). نکته حائز اهمیت در ترکیب جابه‌جایی‌های پایا و ناپایا این است که هرگاه به هر دلیلی جابه‌جایی ناپایا یا ناپایا در داده‌های لرزه‌ای وجود داشته



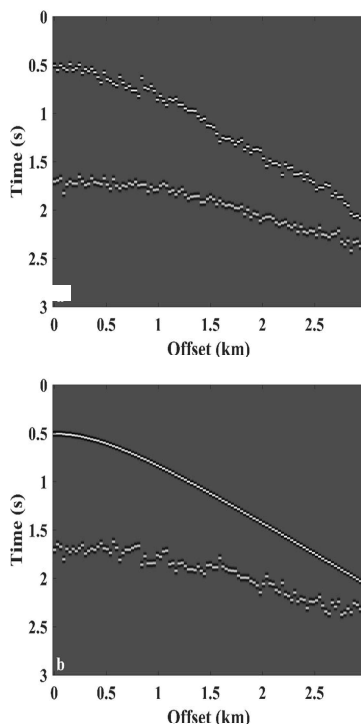
شکل ۷. جابه‌جایی ایستای ردلرزه‌های نقطه میانی مشترک فرضی مربوط به شکل ۵ که ناشی از تغییر محل ثبت‌نشده چشمه‌های انرژی است. این تغییر محل‌ها بدون تصحیح مجدد در داده‌های مربوط به موقعیت ارتفاعی و مسطحاتی موجود در پایگاه داده‌ها انجام شده است.



شکل ۸. جابه‌جایی دینامیک، ناپایا یا ناپایای رویدادهای بازتابی مربوط به نقطه میانی مشترک فرضی مربوط به شکل ۵ که ناشی از تغییر محل ثبت‌نشده چشمه‌های انرژی است. این تغییر محل‌ها بدون تصحیح مجدد در داده‌های مربوط به موقعیت ارتفاعی و مسطحاتی موجود در پایگاه داده‌ها انجام شده است.



شکل ۹. ترکیب جابه‌جایی های ایستا (شکل ۷) و نایستای (شکل ۸) رویدادهای بازتابی مربوط به نقطه میانی مشترک فرضی مربوط به شکل ۵ که ناشی از تغییر محل ثبت‌نشده چشمه‌های انرژی است. ترکیب این دو نوع جابه‌جایی، نایستا یا ناپایا خواهد بود. این تغییر محل‌ها بدون تصحیح مجدد در داده‌های مربوط به موقعیت ارتفاعی و مسطحاتی موجود در پایگاه داده‌ها انجام شده است.



شکل ۱۰. تصویر (الف) نگاشت نقطه میانی مشترک مصنوعی با دو بازتابنده را نشان می‌دهد که رویدادهای بازتابی موجود در آن با خطای ناشی از تغییر محل ثبت چشمه‌ها و گیرنده‌ها در مرحله برداشت داده‌های لرزه‌ای و جابه‌جایی ناشی از بی‌هنجاری سرعت در محیط انتشار، با جابه‌جایی‌های نایستا مواجه شده است. با تصحیح استاتیک باقیمانده در حالت ایدئال، تصویر (ب) به‌دست آمده است. در این تصویر جابه‌جایی‌های ایستا در فرایند تصحیح استاتیک باقیمانده، باعث هم‌دوسی کامل رویدادهای بازتابنده کم‌عمق و ناهم‌دوسی بیشتر رویدادهای بازتابی مربوط به بازتابنده عمیق شده است.

کوهستانی، بیشتر از ناهم‌دوسی در رویدادهای بازتابی در یک توالی چینه‌ای ساده و منظم است. این موضوع به دلیل اختلاف بیشتر مسیر پرتوهای لرزه‌ای در مناطق پیچیده نسبت به مناطق ساده در دو حالت بدون جابه‌جایی ایستگاه‌های چشمه و گیرنده و با جابه‌جایی آنها است.

۶ اثر جابه‌جایی ایستگاه‌های چشمه و گیرنده در تصحیح استاتیک باقیمانده

اگر شرایط برای ایجاد خطاهای عملیاتی، نظیر جابه‌جایی موقعیت چشمه‌ها یا گیرنده‌های لرزه‌ای، بدون ثبت مجدد مختصات آنها فراهم باشد، نه تنها تصحیح استاتیک باقیمانده کمکی به افزایش هم‌دوسی رویدادهای بازتابی عمیق‌تر از لایه یا توالی مبنای استاتیک نمی‌کند، بلکه تلاش برای هم‌دوسی رویدادهای بازتابی این لایه یا توالی چینه‌ای، ناهم‌دوسی بیشتر سایر رویدادهای بازتابی مربوط به بازتابنده‌های دیگر را در پی خواهد داشت.

وجود خطاهای استاتیک باقیمانده می‌تواند بخشی از دلایل به‌هم‌ریختگی رویدادهای بازتابی در نگاشت‌های نقاط میانی یا عمقی مشترک باشد. در صورت وجود مقداری خطای استاتیک که معمولاً به دلیل نشناختن کامل

استاتیک باقیمانده ممکن است باعث بهم‌ریختگی رویدادهای بازتابی در نقطه میانی یا عمقی مشترک و در نتیجه، نبود امکان تصویرسازی واضح بازتابنده‌های مربوط به آنها در مقطع برانبارش شود.

شکل ۱۰- الف رویدادهای بازتابی مربوط به دو بازتابنده را در یک نگاشت نقطه میانی مشترک مصنوعی، در حالتی نشان می‌دهد که تحت تأثیر ترکیبی از جابه‌جایی ایستگاه‌های چشمه و گیرنده و بی‌هنجاری‌های سرعت قرار گرفته‌اند و به‌صورت ناپایا جابه‌جا شده‌اند. در شرایطی که فرض بر همدوس‌سازی بازتابنده کم‌عمق است، اعمال و تکرار تصحیح استاتیک باقیمانده باعث همدوسی رویدادهای بازتابی مربوط به بازتابنده کم‌عمق و ناهمدوسی بیشتر رویدادهای بازتابی بازتابنده عمیق‌تر می‌شود (شکل ۱۰- ب). توجه به این نکته لازم است که اگر همدوسی در بازتابنده عمیق بیشتر شود، عکس حالت فوق اتفاق می‌افتد. البته به دلیل دامنه و فرکانس بالاتر در بازتابنده کم‌عمق، معمولاً در عمل، افزایش همدوسی در بازتابنده(های) کم‌عمق در نظر خواهد بود.

با توجه به پدیده جذب (absorption) انرژی موج صوتی در عبور از لایه‌های مختلف و واگرایی کروی (spherical divergence) جبهه موج با انتشار در زمین، دامنه و فرکانس رویدادهای بازتابی در بازتابنده‌های کم‌عمق نسبت به بازتابنده‌های عمیق بیشتر و در نتیجه، تفکیک‌پذیری بازتابنده‌های کم‌عمق بیشتر است. با توجه به اینکه در فرایند تصحیح استاتیک باقیمانده، افزایش همدوسی رویدادهای بازتابی با جابه‌جایی‌های ایستا انجام می‌شود، در شرایطی که جابه‌جایی‌های نایستا در ردلرزه‌ها وجود دارد، تکرار این فرایند موجب همدوسی بیشتر رویدادهای کم‌عمق با تفکیک‌پذیری و دامنه زیاد و بهم‌ریختگی بیشتر رویدادهای عمیق‌تر با تفکیک‌پذیری و دامنه کم می‌شود. در این شرایط، اگر به جای یک یا چند بازتابنده، یک یا چند توالی از بازتابنده‌ها (reflection

شرایط سطحی و نزدیک به سطح زمین در اطلاعات لرزه‌ای باقیمانده است، نمی‌توان انتظار داشت مدل سرعت برانبارش دقیقی در مرحله تحلیل سرعت به‌دست آید؛ زیرا به‌صاف‌شدگی کامل رویدادهای بازتابی در نگاشت نقاط میانی یا عمقی مشترک رخ نخواهد داد و این مسئله امکان افزایش خطا را، به‌ویژه در شرایط پیچیده زمین‌شناسی بیشتر می‌کند. گفتنی است چون از نتیجه تحلیل سرعت در هر مرحله، برای تصحیح استاتیک باقیمانده استفاده می‌شود، خطای موجود در تخمین سرعت برانبارش می‌تواند تصحیح استاتیک باقیمانده را نیز با خطا مواجه کند. این مسئله در صورت وجود رخنمون سازنده‌های (formation) زمین‌شناسی گوناگون، وجود خطاهای عملیاتی نظیر جابه‌جایی بدون ثبت مجدد ایستگاه‌های چشمه یا گیرنده و پیچیدگی زمین‌شناسی منطقه مورد مطالعه، می‌تواند به ایجاد یک چرخه معیوب در فرایند پردازش منجر شود.

در بسیاری از روش‌های تصحیح استاتیک باقیمانده، مشاهده می‌شود که پس از هر مرحله تحلیل سرعت، یک سری استاتیک باقیمانده را می‌توان محاسبه کرد و این مقادیر در مراحل مختلف تفاوت‌های معناداری دارند؛ به این معنی که چون این تصحیحات به‌صورت ایستا انجام می‌شود، در هر مرحله از تحلیل سرعت که بخشی از بازتاب‌ها به‌صاف‌شدگی بهتر و در نتیجه، انرژی برانبارش بیشتری دارند، نقش بیشتری در میزان همبستگی در فرایند شباهت‌سنجی ردلرزه‌ها ایفا می‌کند و چه بسا در بازتابنده‌هایی با ضخامت و دامنه کم که معمولاً از اهمیت اکتشافی یا توسعه‌ای بیشتری برخوردار هستند، به‌صاف‌شدگی خوبی رخ نداده باشد؛ لذا معمولاً با تکرار تصحیح استاتیک باقیمانده، به‌صاف‌شدگی بازتابنده‌هایی بهتر می‌شود که با دامنه قوی و شاخص، در بیشتر مواقع در عمق کم تا متوسط قرار دارند. درباره دیگر بازتابنده‌ها نه تنها تأثیر مشابهی وجود ندارد، بلکه تکرار زیاد تصحیح

خود را ازدست خواهند داد. در این حالت فرایندهای تضعیف نوفه خطی دیگر کارایی ایدئال خود را نخواهند داشت. شایان ذکر است اگر بخشی از رویدادهای بازتابی در اثر خطاهای عملیاتی به صورت ناپایا جابه‌جا شوند، قبل از همدوس‌سازی آنها ماهیتی ناهمدوس و شبیه به نوفه تصادفی پیدا خواهند کرد؛ لذا استفاده از روش‌های تضعیف نوفه تصادفی ممکن است باعث تضعیف بخشی از آنها شود.

۸ یک پیشنهاد برای کاهش جابه‌جایی‌های زمانی ناپایا در رویدادهای بازتابی

هنگامی که احتمال ایجاد جابه‌جایی‌های زمانی ناپایا در داده‌های لرزه‌ای وجود دارد، این مقاله پیشنهاد می‌کند به جای تصحیح استاتیک باقیمانده که خود می‌تواند باعث افزایش ناهمدوسی در رویدادهای بازتابی اصلی و عمیق در داده‌های لرزه‌ای پیش از برانبارش شود، تصحیح همه جابه‌جایی‌های زمانی موجود به صورت ناپایا انجام شود (اسماعیلی و همکاران، ۲۰۲۰). در این روش به جای آنکه مقدار استاتیک لازم برای جابه‌جایی هر ردلرزه بر مبنای تحلیل‌های شباهت‌سنجی بین ردلرزه‌های نقطه میانی یا عمقی مشترک به دست آید، سعی می‌شود با اجرای یک فرایند شباهت‌سنجی در پنجره‌های زمانی با همپوشانی کافی در داده‌های پیش از برانبارش، تا حدودی از ناهمدوسی بر اثر جابه‌جایی‌های ناپایای ناشی از خطاهای عملیاتی یا بی‌هنجاری‌های سرعت موجود در محیط انتشار موج جلوگیری شود. در واقع اگر فرض شود سرعت برانبارش تخمینی برای انجام دادن برونراند نرمال داده‌های پیش از برانبارش، دقیق‌ترین سرعت برانبارشی است که بتوان تخمین زد، پیشنهاد می‌شود جابه‌جایی‌های زمانی هر ردلرزه بر اساس بیشترین ضریب همبستگی آن با موجی‌شکل مبنای (reference waveform) محصور در هر پنجره زمانی مربوط به زمان برخوردگاه به صورت ایستا

(sequences) در عمق کم وجود داشته باشد، که به‌طور معمول محدوده زمانی آنها مبنای شباهت‌سنجی در تصحیح استاتیک باقیمانده قرار می‌گیرد، تکرار این تصحیح می‌تواند باعث به‌صاف‌شدگی بهتر آن توالی کم-عمق در داده‌های پیش از برانبارش و در نتیجه، وضوح بیشتر بازتابنده‌های مربوط به آنها در مقطع برانبارش شود، ولی در بازتابنده‌های عمیق‌تر، عکس آن رخ خواهد داد؛ زیرا علاوه بر جابه‌جایی‌های ناپایای ایجادشده در اثر خطاهای عملیاتی و عوامل مربوط به محیط انتشار در آنها، جابه‌جایی‌های ناپایا در توالی کم‌عمق نیز به آنها اضافه خواهد شد، مانند آنچه که در شکل ۱۰-ب نشان داده شده است.

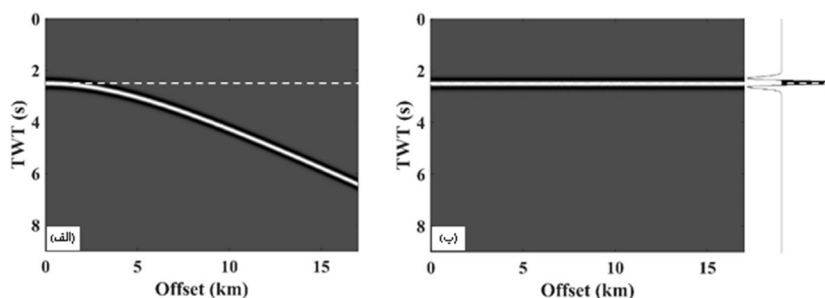
۷ اثر جابه‌جایی ایستگاه‌های چشمه در تضعیف نوفه

در داده‌های لرزه‌ای برداشت‌شده در شرایط کوهستانی که احتمال وقوع جابه‌جایی ایستگاه‌های چشمه توسط گروه‌های حفاری در آن زیاد بوده است، اگر بتوان از جابه‌جایی ایستگاه‌های گیرنده چشم‌پوشی کرد، بهتر است تا جایی که امکان دارد از فرایندهای تضعیف نوفه در حوزه نگاشت چشمه مشترک به جای حوزه نقطه میانی، عمقی یا بازتابی مشترک استفاده کرد؛ زیرا مقدار خطای دورافت ناشی از جابه‌جایی نقطه چشمه برای همه گیرنده‌های فعال برای یک نگاشت چشمه، یکسان و امکان حفظ نوفه‌های خطی و رویدادهای بازتابی به صورت همدوس وجود دارد. این همدوسی می‌تواند به کارایی بیشتر روش‌های حذف نوفه‌های خطی (مانند فیلترهای شیب-سرعت) آنها کمک کند. همان‌طور که رویدادهای بازتابی در حوزه نقطه میانی یا عمقی مشترک به دلیل خطاهای مستتر در دورافت به صورت ناهمدوس درخواهند آمد، نوفه‌های خطی نیز تحت تأثیر خطای جابه‌جایی ایستگاه‌های مختلف چشمه، همدوسی اولیه

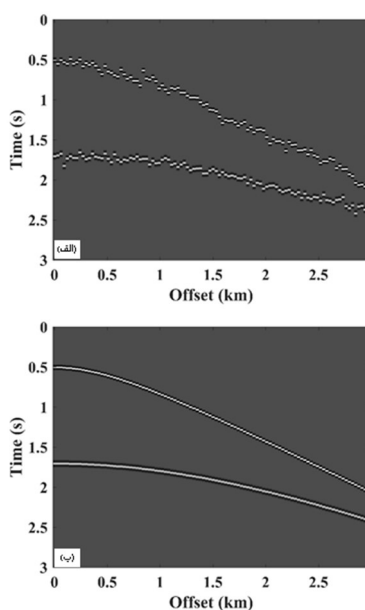
موجی شکل‌ها به جای جابه‌جایی دینامیک نمونه‌های موجود در ردلرزه‌ها عمل می‌کند، موجی شکل‌های جابه‌جاشده در دورافت‌های مختلف دچار پدیده کشیدگی (stretch) نخواهند شد. این موضوع باعث نیاز نداشتن به برش (mute) رویدادهای بازتابی در برخی ردلرزه‌ها می‌شود، کاری که اغلب پس از اعمال برونراند نرمال برای جلوگیری از صدمه ناشی از برانبارش بخش‌های کشیده‌شده ردلرزه‌های میانی تا دور، به‌اجبار انجام می‌شود. شکل ۱۱-الف نتیجه تصحیح جابه‌جایی‌های زمانی ناپایای رویدادهای بازتابی نقطه میانی مشترک مصنوعی متناظر با شکل ۳-الف را نشان می‌دهد. در سمت راست شکل ۱۱، ردلرزه حاصل از برانبارش رویدادهای بازتابی پس از اعمال برونراند نرمال (شکل ۱۱-ب) نشان داده شده است. نبود تغییر شکل و جابه‌جایی ظاهری در موجی شکل برانبارش، از یک طرف مربوط به تصحیح جابه‌جایی‌های ناپایای رویدادهای بازتابی و از طرفی دیگر، حاصل نبود پدیده کشیدگی رویدادهای موجود در ردلرزه‌ها پس از برونراند (شکل ۱۱-ب) است.

شکل ۱۲-الف همان رویدادهای بازتابی مربوط به شکل ۱۰-الف را نشان داده است که تحت تأثیر ترکیبی از خطاهای عملیاتی مربوط به تغییر موقعیت ایستگاه‌های چشمه و گیرنده و بی‌هنجاری سرعت در محیط انتشار موج قرار گرفته و به‌صورت ناپایا جابه‌جا شده بودند. در شکل ۱۲-ب نتیجه تصحیح جابه‌جایی‌های ناپایای موجود در رویدادهای بازتابی شکل ۱۲-الف ارائه شده است. در این شکل هم‌دوسی کامل در رویدادهای بازتابی مربوط به بازتابنده‌های کم‌عمق و عمیق ایجاد شده است که امکان برانبارش هم‌افزای رویدادها را در هر دو بازتابنده فراهم ساخته است.

انجام شود سپس پنجره‌های زمانی مختلف حاوی موجی شکل‌های به‌صاف‌شده در تمام ردلرزه‌ها را جمع و با اعمال فرایند برانبارش یا عکس برونراند نرمال، ردلرزه حاصل از برانبارش برای تشکیل مقطع برانبارش یا داده پیش از برانبارش تصحیح‌شده و آماده برای تجزیه و تحلیل‌های بعدی، مانند تحلیل تغییرات دامنه با دورافت (Amplitude Variation versus Offset, AVO) به‌دست‌آید، اما در اغلب موارد در چنین شرایطی به دلیل وجود جابه‌جایی‌های زمانی مختلف در داده‌های پیش از برانبارش و ناهم‌دوسی ناشی از آنها، سرعت برانبارش باورپذیری در مرحله تحلیل سرعت به‌دست‌نمی‌آید؛ بنابراین پیشنهاد می‌شود برای هر پنجره زمانی، سرعت برانبارش نیز بهینه شود. این کار به‌صورت تکراری برای یک محدوده سرعت برانبارش انجام می‌شود و هر بار میزان جابه‌جایی‌های لازم برای ایجاد حداکثر هم‌دوسی در پنجره زمانی مورد نظر، محاسبه و گرادیان خطای استفاده از هر یک از سرعت‌های برانبارش آن محدوده تعیین و در انتها سرعت برانبارش بهینه با گرادیان جابه‌جایی‌های زمانی باقیمانده صفر برای پنجره زمانی مورد نظر انتخاب می‌شود. در این روش برای هر پنجره زمانی، بهترین سرعت برانبارش به‌گونه‌ای تخمین زده می‌شود که مجموع مربعات جابه‌جایی‌های زمانی ایستا و نایستای باقیمانده کمترین مقدار باشد. مزیت بهینه‌سازی سرعت برانبارش، علاوه بر افزایش دقت و صحت مقاطع لرزه‌ای، توانایی استفاده مستقیم از آن در تحلیل‌های تفسیر کمی داده‌های لرزه‌ای پیش از برانبارش مانند تحلیل تغییرات دامنه با دورافت یا وارون‌سازی پیش از برانبارش (pre-stack inversion)، البته بر پایه جابه‌جایی موجی شکل‌ها به جای نمونه‌ها (samples) است. از آنجاکه این روش بر پایه جابه‌جایی استاتیک



شکل ۱۱. تصویر (الف) نگاشت نقطه میانی مشترک مصنوعی متناظر با شکل (۳-الف) که تصحیح جابه‌جایی زمانی ناپایا روی آن انجام شده است. تصویر (ب) همین داده را پس از اعمال روش برونراند نرمال بر پایه تقریب هذلولی و جابه‌جایی موجی شکل‌ها نشان داده است. ردلرزه حاصل از برانبارش رویدادهای بازتابی موجود در تصویر (ب) در سمت راست تصویر ارائه شده است. به شکل موجی شکل حاصل از برانبارش و هم‌زمانی آن با موجی شکل اصلی دقت شود. خط‌چین، مرکز موجی شکل رویداد مربوط به دورافت صفر را نشان می‌دهد.



شکل ۱۲. تصویر (الف) نگاشت نقطه میانی مشترک مصنوعی با دو بازتابنده را نشان می‌دهد که رویدادهای بازتابی موجود در آن با خطای ناشی از تغییر موقعیت بدون ثبت مجدد چشمه‌ها و گیرنده‌ها در مرحله برداشت داده‌های لرزه‌ای و جابه‌جایی ناشی از بی‌هنجاری سرعت در محیط انتشار، با جابه‌جایی‌های ناپایستا مواجه شده است. با تصحیح جابه‌جایی‌های زمانی ناپایای رویدادهای بازتابی، همدوسی کامل در هر دو بازتابنده ایجاد شده است که در تصویر (ب) دیده می‌شود.

۹ تجزیه و تحلیل اثر جابه‌جایی ایستگاه‌های

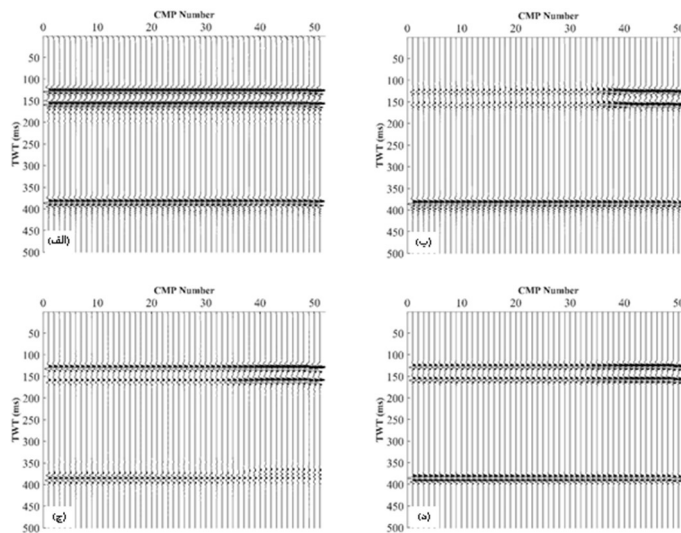
چشمه و گیرنده در مقاطع لرزه‌ای

از آنجاکه یک مقطع لرزه‌ای از برونراند نرمال و برانبارش ردلرزه‌های پردازش‌شده در نقاط میانی، عمقی یا بازتابی مشترک ایجاد می‌شود، هرگونه ناهمدوسی در رویدادهای بازتابی برانبارش‌شده، به هر دلیلی، از جمله جابه‌جایی ایستگاه‌های چشمه و گیرنده در عملیات برداشت داده‌ها،

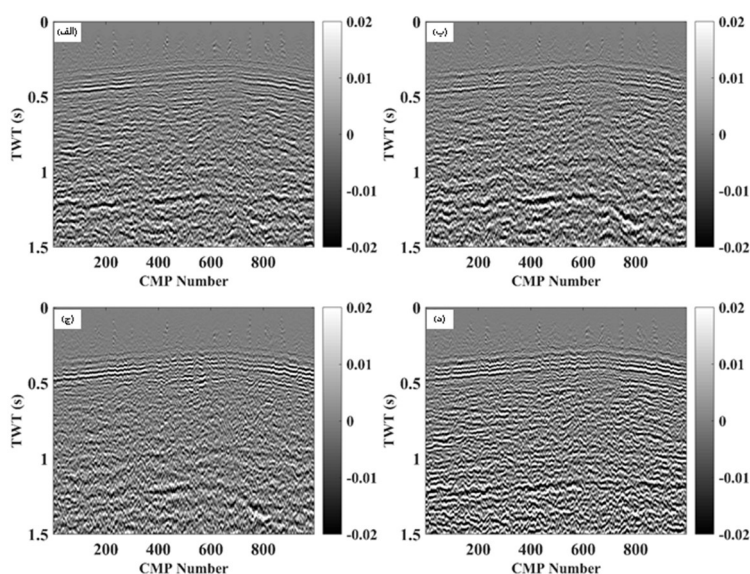
باعث کاهش محتوای فرکانسی، تضعیف یا محوشدگی تصویر بازتابنده مورد نظر در مقطع لرزه‌ای می‌شود. در ادامه، تأثیر جابه‌جایی بدون ثبت مجدد ایستگاه‌های چشمه و گیرنده و خطای ایجادشده در دورافت ردلرزه‌ها، در یک مدل ساده سه لایه و یک مقطع لرزه‌ای واقعی بررسی شده است. شکل ۱۳ یک مقطع لرزه‌ای مصنوعی با سه بازتابنده افقی را در چهار حالت مختلف نشان داده است.

می‌شود، اما عکس این حالت برای بازتابنده عمیق رخ داده است. در این تصویر رویدادهای بازتابی در حوزه پیش از برانبارش که مربوط به بازتابنده عمیق هستند، با جابه‌جایی‌های استاتیک بر اساس بیشینه‌سازی همبستگی در بازتابنده‌های کم‌عمق، هم‌دوسی تقریبی خود را از دست داده‌اند و در نتیجه، برانبارش آنها موجب تضعیف محسوس دامنه و محتوای فرکانسی در آن شده است. با استفاده از روش جابه‌جایی زمانی ناپایا، هم‌دوسی در هر دسته از رویدادهای بازتابی متناظر با هر یک از بازتابنده‌ها، به‌صورت جداگانه تقویت شده است. در تصویر ۱۳-د، بهبود دامنه، محتوای فرکانسی و در نتیجه، تفکیک‌پذیری بازتابنده‌ها را پس از اعمال روش جابه‌جایی زمانی ناپایا نسبت به تصاویر ۱۳-ب و ۱۳-ج می‌توان مشاهده کرد. در این مثال تعداد ردلرزه‌های موجود در نقاط میانی مشترک □ و مقدار بیشترین دورافت □ (maximum offset) از سمت چپ به راست افزایش یافته است؛ لذا در تصویر ۱۳-ب، دامنه برانبارش بازتابنده‌های کم‌عمق از چپ به راست تقویت شده است. در این حالت، افزایش دورافت و تعداد ردلرزه‌ها در تصحیح استاتیک باقیمانده

تصویر ۱۳-الف از برانبارش ردلرزه‌های با دورافت نزدیک و بدون هیچ‌گونه خطا در دورافت آنها ایجاد شده است. این مقطع را می‌توان مبنای مقایسه با حالت وجود خطا در دورافت‌ها و میزان تأثیر یا تصحیح این خطا در نظر گرفت. تصویر ۱۳-ب مقطع لرزه‌ای متناظر با تصویر ۱۳-الف را در حالتی نشان داده است که دورافت ردلرزه‌های موجود در نقاط میانی مشترک، خطایی در محدوده ۰ تا ۳۰ متر دارد. در این تصویر، با توجه به وجود خطای دورافت و ایجاد ناهم‌دوسی بیشتر در عمق کم، متناسب با تعداد ردلرزه‌های برانبارش شده در هر نقطه میانی مشترک، دامنه برانبارش بازتابنده‌های کم‌عمق، بیشتر تضعیف شده است. تصاویر ۱۳-ج و ۱۳-د نیز مقاطع متناظر با تصویر ۱۳-ب را به ترتیب پس از تصحیح استاتیک باقیمانده و پس از تصحیح جابه‌جایی زمانی ناپایا نشان داده است. در تصویر ۱۳-ج به دلیل جابه‌جایی استاتیک ردلرزه‌های موجود در نقاط میانی مشترک، که بر مبنای بیشینه‌سازی همبستگی ردلرزه‌ها در پنجره زمانی اطراف بازتابنده کم‌عمق انجام شده است، دامنه رویدادهای برانبارش شده در بازتابنده‌های کم‌عمق تقویت



شکل ۱۳. الف) مقطع لرزه‌ای دورافت نزدیک در یک مدل سه لایه مصنوعی (ب) نتیجه برانبارش پس از ایجاد خطای تصادفی در حد ۰ تا ۳۰ متر در دورافت ردلرزه‌های پیش از برانبارش (ج: د) مقاطع لرزه‌ای مصنوعی پس از اعمال روش تصحیح استاتیک باقیمانده و جابه‌جایی زمانی ناپایا.



شکل ۱۴. تصویر (الف) بخشی از مقطع لرزه‌ای پردازش شده با یک نرم‌افزار صنعتی را نشان می‌دهد که مربوط به منطقه‌ای نیمه‌کوهستانی در غرب ایران است و از داده‌های پیش از برانبارش آن پس از تصحیح خطاهای مربوط به جابه‌جایی ایستگاه‌های چشمه و گیرنده در داده‌های پشتیبان (با نقشه‌برداری مجدد) استفاده شده است. تصویر (ب) نتیجه برانبارش همین داده‌ها را قبل از تصحیح خطاهای موجود در داده‌های پشتیبان نشان داده است. تصاویر (ج) و (د) نیز مقاطع برانبارش این داده‌های لرزه‌ای را به ترتیب پس از اعمال روش تصحیح استاتیک باقیمانده و روش جابه‌جایی زمانی ناپایا نشان می‌دهد.

گیرنده در داده‌های پشتیبان تصحیح شده است. در این تصویر، توالی بازتابنده‌های کم‌عمق در محدوده ۰/۳ تا ۰/۶ ثانیه و بخش‌هایی از چند بازتابنده عمیق‌تر و یک بازتابنده مشخص را در زمان تقریبی ۱/۲۵ ثانیه می‌توان مشاهده کرد. تصویر ۱۴- ب مقطع لرزه‌ای برانبارش شده این داده‌ها را در حالی نشان داده است که خطای مربوط به جابه‌جایی ایستگاه‌های چشمه و گیرنده در داده‌های پشتیبان وجود داشته است. در این مقطع مشاهده می‌شود که پیوستگی بازتابنده‌ها به‌ویژه بازتابنده‌های کم‌عمق و نیمه‌عمیق تضعیف شده است.

توجه به این نکته حائز اهمیت است که در عملیات برداشت داده‌های لرزه‌ای برای تصحیح خطاهای احتمالی مربوط به جابه‌جایی‌های ایستگاه‌های چشمه و گیرنده، معمولاً نقشه‌برداری مجدد انجام نمی‌شود؛ بنابراین هرچه احتمال و مقدار این خطاها بیشتر باشد، تصویر بازتابنده‌ها در مقاطع لرزه‌ای به‌دست آمده بیشتر مخدوش و تضعیف

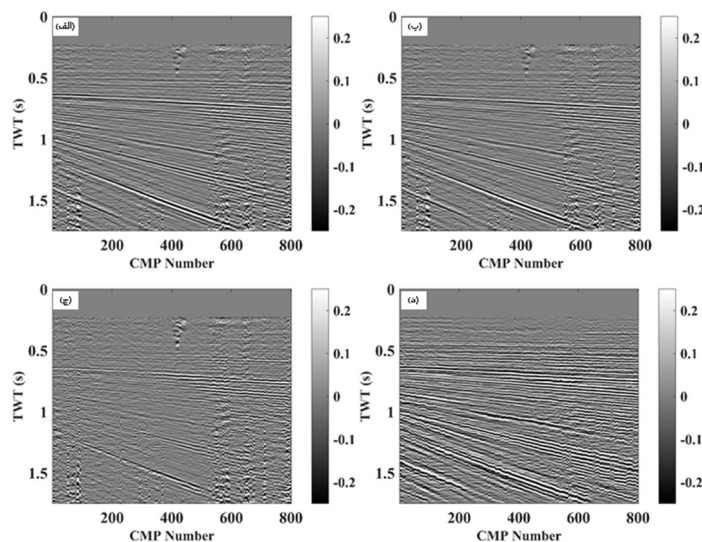
برای هم‌دوسی تعداد بیشتری از رویدادهای بازتابی کم‌عمق و در نتیجه، تقویت بیشتر دامنه برانبارش آنها مزیت بوده است، لیکن با جابه‌جایی استاتیک و به‌صاف‌شدگی آن رویدادها، ناهم‌دوسی رویدادهای بازتابی عمیق‌تر شده و دامنه و محتوای فرکانسی آنها بیشتر کاهش یافته است. حالتی که در تصویر ۱۳- ج در رد لرزه‌های برانبارش شده ۳۵ تا ۵۰ می‌توان مشاهده کرد.

در شکل ۱۴ بخشی از یک مقطع لرزه‌ای واقعی بررسی شده است. این مقطع لرزه‌ای در یک منطقه نیمه‌کوهستانی برداشت شده که در عمق‌های کم، یک توالی چینه‌ای نازک‌لایه از سازند گچساران داشته است. هنگام برداشت داده‌های لرزه‌ای در این منطقه، محل چشمه‌ها و گیرنده‌ها خطایی بین ۰/۵ تا ۳۰ متر داشتند که البته پس از نقشه‌برداری مجدد به‌طور واقعی تصحیح شدند. شکل ۱۴- الف مقطع لرزه‌ای برانبارش شده این داده‌ها را در حالی نشان می‌دهد که خطای جابه‌جایی ایستگاه‌های چشمه و

به همین داده‌ها پس از تصحیح جابه‌جایی‌های زمانی ناپایا نشان داده شده است. در این تصویر مشاهده می‌شود علاوه بر وضوح بیشتر بازتابنده‌های کم‌عمق، بازتابنده‌های عمیق‌تر نیز تا حدودی خوب به تصویر درآمده‌اند. این مقطع که نتیجه پردازش داده‌های لرزه‌ای با خطای عملیاتی (جابه‌جایی بدون ثبت مجدد ایستگاه‌های چشمه و گیرنده) است، در برخی بخش‌ها حتی بهتر از حالت بدون خطا در داده‌ها (تصویر ۱۴-الف)، لایه‌های زیرزمینی را به تصویر کشیده است که دلیل آن، بهینه‌سازی سرعت برانبارش و استفاده از جابه‌جایی استاتیک موجی شکل‌ها و حذف پدیده کشیدگی در برونراند است.

شکل ۱۵ یک مقطع واقعی لرزه‌ای برداشت شده در شرایط دشت و بیشترین دورافت حدود ۳۶۰۰ متر را نشان می‌دهد که بازتابنده‌های آن با وضوح مناسبی به تصویر کشیده شده‌اند. با توجه به اینکه اطلاعاتی مبنی بر جابه‌جایی ایستگاه‌های چشمه یا گیرنده در این داده‌ها در دست نبود، در مرحله اول، داده‌های اولیه مختصات ایستگاه‌های چشمه و گیرنده، ایدئال فرض شد و بر اساس

می‌شود. به عبارت دیگر، نتایج اجرای مراحل مختلف پردازش تا پیش از تصحیح استاتیک باقیمانده، در واقعیت، مقطعی با شرایط حاکم بر تصویر ۱۴-ب ارائه می‌دهد نه با شرایط ۱۴-الف. تصویر ۱۴-ج مقطع لرزه‌ای برانبارش شده همین داده‌ها را پس از اعمال تصحیح استاتیک باقیمانده نشان داده است. پیوستگی و وضوح بازتابنده‌های مربوط به توالی کم‌عمق گچساران بهتر شده است، اما بازتابنده‌های عمیق‌تر وضوح تصویر خود را از دست داده‌اند. در تصحیح استاتیک باقیمانده از روش بیشترین همبستگی متقاطع (maximum cross correlation) بین ردلرزه‌های داده‌های پیش از برانبارش و ردلرزه مبنی با پنجره‌ای در محدوده رویدادهای بازتابی کم‌عمق استفاده شده است. در این فرایند با جابه‌جایی استاتیک ردلرزه‌های مختلف، هم‌دوسی در رویدادهای بازتابی کم‌عمق بیشتر شده است، اما رویدادهای عمیق‌تر هم‌دوسی خود را از دست داده‌اند و برانبارش رویدادهای ناهم‌دوس تصویری تشخیص‌دانی از بازتابنده‌های عمیق ایجاد نکرده است. در تصویر ۱۴-د مقطع لرزه‌ای مربوط



شکل ۱۵. تصویر (الف) بخشی از یک مقطع لرزه‌ای پردازش شده با یک نرم‌افزار صنعتی را نشان می‌دهد که مربوط به منطقه‌ای با شرایط مناسب دشت و تپه‌ماهوری است و از داده‌های پیش از برانبارش آن بدون خطای دورافت ناشی از جابه‌جایی ایستگاه‌های چشمه و گیرنده استفاده شده است. تصویر (ب) نتیجه برانبارش همین داده‌ها را پس از ایجاد مقداری جابه‌جایی تصادفی عمدی (در محدوده ۰ تا ۳۰ متر) در ایستگاه‌های چشمه و گیرنده نشان داده است. تصاویر (ج) و (د) نیز مقاطع برانبارش این داده‌های لرزه‌ای را به ترتیب پس از اعمال روش تصحیح استاتیک باقیمانده و روش جابه‌جایی زمانی ناپایا نشان می‌دهد.

بهتری دارد که دلیل آن، بهینه‌سازی اندک سرعت برانبارش و حذف پدیده کشیدگی در رویدادهای بازتابی پس از اعمال برونراند نرمال بوده است.

۱۰ نتیجه‌گیری

از آنجا که اغلب، دلیل اجرای عملیات لرزه‌نگاری در مناطق مختلف، ناشناخته بودن شرایط زیرسطحی است، وجود هرگونه شرایط ناهمدوس‌ساز مانند پیچیدگی‌های زمین‌ساختی یا بی‌هنجاری‌های محلی زمین‌شناسی و مخزنی در محیط انتشار امواج لرزه‌ای دور از انتظار نیست. همچنین اگر شرایط سطح زمین به گونه‌ای باشد که خطاهای عملیاتی وجود داشته باشند (مانند مغایرت مختصات و ارتفاع واقعی چشمه یا گیرنده با آنچه که در داده‌های پشتیبان ارائه شده است)، علاوه بر وجود جابه‌جایی‌های استاتیک باقیمانده ناشی از خطاهای مرحله تصحیح استاتیک، رویدادهای بازتابی دچار جابه‌جایی‌های ناپایا نیز خواهند شد که ترکیب این دو نوع جابه‌جایی، دیگر استاتیک نیست و می‌تواند داده‌های لرزه‌ای پیش از برانبارش را به صورت ناپایا ناهمدوس کند. در چنین شرایطی با اعمال تصحیح استاتیک باقیمانده، تلاش برای همدوسی رویدادهای بازتابی ممکن است باعث همدوسی بیشتر در برخی رویدادهای بازتابی شود که از دامنه و محتوای فرکانسی خوبی برخوردار هستند، اما می‌تواند به ناهمدوسی بیشتر در سایر رویدادهای بازتابی به‌ویژه مربوط به بازتابنده‌های هدف و عمیق نیز منجر شود؛ بنابراین با توجه به ناشناخته بودن شرایط زیرسطحی و عوامل ناهمدوس‌ساز سطحی از جمله عملیات برداشت داده‌ها در شرایط کوهستانی، پیشنهاد می‌شود قبل از استفاده از تصحیح استاتیک باقیمانده، وضعیت زمین‌ساختی زمین مورد مطالعه و شرایط عملیاتی برداشت داده‌ها بررسی دقیق شود و در صورت محرز نبودن فرض‌های پایایی جابه‌جایی رویدادها در بعدهای زمان و

آن، چینش ردلرزه‌ها در نقاط میانی مشترک انجام شد سپس با تحلیل سرعت برانبارش، یک مقطع لرزه‌ای ایدئال بدون اجرای مرحله کوچ به‌دست‌آمد. این مقطع لرزه‌ای در تصویر ۱۵- الف نشان داده شده است که مبنای مناسبی برای مقایسه با حالت‌های دیگر است. در مرحله بعد، مقداری خطا به مختصات ایستگاه‌های چشمه و گیرنده در داده‌های پشتیبان افزوده شد سپس مراحل پردازش مشابه حالت اول انجام شد و مقطع لرزه‌ای ۱۵- ب به‌دست‌آمد. همان‌طور که در تصویر ۱۵- ب مشاهده می‌شود، بازتابنده‌های موجود در عمق‌های کم مقدار کمی از وضوح خود را نسبت به حالت ایدئال از دست داده‌اند. تفاوت اندک تصاویر ۱۵- الف و ۱۵- ب به دلیل کم بودن نسبی مقدار دورافت بیشینه است. تصویر ۱۴- ج مقطع برانبارش ردلرزه‌های نقاط میانی مشترک متناظر با تصویر ۱۵- ب را پس از اعمال تصحیح استاتیک باقیمانده با روش بیشینه‌سازی همبستگی متقاطع نشان داده است. در این مقطع، پیوستگی و وضوح بازتابنده‌ها به‌ویژه در زمان بیشتر از ۱ ثانیه کاهش نسبی داشته است. این کاهش کیفیت نتیجه جابه‌جایی ایستای رویدادهای بازتابی با جابه‌جایی ناپایا (به دلیل جابه‌جایی‌های ایستگاه‌های چشمه و گیرنده) در نقاط میانی مشترک و سپس برانبارش ردلرزه‌های جابه‌جا شده است که البته این جابه‌جایی‌ها برای افزایش همبستگی رویدادها در محدوده کم‌عمق اعمال شده است. در تصویر ۱۵- د مقطع برانبارش داده‌های متناظر با تصویر ۱۵- ب، پس از اعمال تصحیح جابه‌جایی زمانی ناپایا مشاهده می‌شود. در این مقطع وضوح و پیوستگی اکثر بازتابنده‌ها، در مقایسه با نتیجه تصحیح استاتیک باقیمانده (تصویر ۱۵- ج) بیشتر شده و به نتیجه برانبارش ایدئال (تصویر ۱۵- الف) بدون خطای دورافت نزدیک‌تر است. البته نتیجه تصحیح جابه‌جایی زمانی ناپایا (تصویر ۱۵- د) در برخی جاها حتی از نتیجه برانبارش در شرایط ایدئال (تصویر ۱۵- الف) نیز کیفیت

- pre- and post-stack time-lapse analysis: *Journal of Indian Geophysical Union*, **24**(4), 1-10.
- Frei, W., Bauer, R., Corboz, Ph., and Martin, D., 2015, Pitfalls in processing near-surface reflection-seismic data: Beware of static corrections and migration: *The Leading Edge*, **34**(11), 1382–1385.
- Gholami, A., 2013, Residual statics estimation by sparsity maximization: *Geophysics*, **78**(1), V11–V19.
- Jin, S., 2006, Two-stage inversion for large surface-consistent residual statics: 76th Annual International Meeting, SEG, Expanded Abstracts, 2802–2806.
- Kazemi, N., 2014, Statics Preserving Sparse Radon Transform: FOCUS, *GeoConvention 2014*.
- Kirchheimer, F., 1986, Robust residual statics by means of inter trace lag estimates: 46th Annual Meeting, Society of Exploration Geophysicists, Expanded Abstracts, 15.2.
- Law, B. K., and Trad, D., 2018, Robust refraction statics solution and near-surface velocity model building using feedback from reflection data: *Geophysics*, **83**(6), 63–77.
- Madsen, R. B., Hansen, T. M., and More, H., 2019, Estimation of a non-stationary prior covariance from seismic data: *Geophysical Prospecting*, **68**, 393-410.
- Marsden, D., 1993, Static corrections-a review, Part III, March 1993: *The Leading Edge*, 210-215.
- Ronen, J., and Claerbout, J., 1985, Surface-consistent residual statics estimation by stack-power maximization: *Geophysics*, **50**, 2759-2767.
- Seyed Aghamiry, S. H., and Gholami, A., 2017, Non-stationary deconvolution in presence of Gaussian and spike-like noises using projected Gabor deconvolution: *Journal of Research on Applied Geophysics*, **3**, 15-27.
- Seyed Aghamiry, S. H., and Gholami, A., 2018, Constant Q estimation from a seismic trace and its removal by non-stationary مکان، از این تصحیح برای افزایش همدوسی و به‌صاف‌شدگی رویدادهای بازتابی در داده‌های لرزه‌ای پیش از برانبارش استفاده نشود. راه حل این مقاله در چنین شرایطی تصحیح ناپایای تمام جابه‌جایی‌های موجود در داده‌های لرزه‌ای پیش از برانبارش، همراه با بهینه‌سازی سرعت برانبارش آنها است که در آن سعی می‌شود برای هر یک از بازتابنده‌ها به‌طور مستقل جابه‌جایی‌های ناپایا تخمین و سپس تصحیح شود. پیش از تصحیح جابه‌جایی‌های ناپایا باید در استفاده از روش‌های مختلف تضعیف نوفه‌های خطی و تصادفی احتیاط کرد؛ زیرا به همان دلیلی که ناهمدوسی در رویدادهای بازتابی ایجاد شده است، نوفه‌های خطی نیز همدوسی کامل خود را از دست داده‌اند. پس از یک طرف، کارایی روش‌های حذف نوفه خطی کم می‌شود و از طرفی دیگر، برخورد با نوفه‌های ناهمدوس شده (جابه‌جاشده به‌صورت ناپایا) با روش‌های تضعیف نوفه تصادفی، ممکن است باعث تضعیف بخشی از رویدادهای بازتابی ناهمدوس شود.
- منابع**
- Chalabi, M., 2014, Principles of Seismic Velocities and Time-to-Depth Conversion: EAGE.
- Alfaraj, A. M., Kumar, R., and Herrmann, F. J., 2018, Automatic statics and residual statics correction with low-rank approximation: 80th EAGE Conference and Exhibition, **2018**, 1-5.
- Alfaraj, A. M., Verschuur, E., and Herrmann, F. J., 2020, Non-surface-consistent short-wavelength statics correction for dense and subsampled data: A rank-based approach: SEG Technical Program Expanded.
- Cordson, A., Galbraith, M., and Peirce, J., 2000, Planning Land 3-D Seismic Surveys: SEG.
- Cox, M. J. G., 1999, Static Corrections for Seismic Reflection Surveys: Society of Exploration Geophysicists.
- Esmacili, S., Siahkoohi, H. R., and Gholami, A., 2020, Non-stationary time shifts correction in

34, 859–881.
Wiggins, R. A., Larner, K. L., and Wisecup, R. D., 1976, Residual statics analysis as a general linear inverse problem: *Geophysics*, **41**, 922–938.

deconvolution: *Journal of Research on Applied Geophysics*, **4**, 57-170.
Taner, M. T., and Koehler, F., 1969, Velocity spectra digital computer derivation and applications of velocity functions: *Geophysics*,

Errors due to undetectable displacements of receiver and source; a challenge for processing mountainous seismic data

Sameddin Esmacili¹, Ali Gholami^{2*} and Hamid Reza Siahkoochi³

¹ Department of Geoscience, College of Science, Tehran Science and Research Branch, Islamic Azad University, Tehran, Iran

² Professor, Institute of Geophysics, University of Tehran, Tehran, Iran

³ Professor, Institute of Geophysics, University of Tehran, Tehran, Iran

(Received: 02 March 2022, Accepted: 11 July 2023)

Summary

A determinant factor in generating qualified seismic images of subsurface layers is the coherency of reflection events in pre-stack seismic data. Accordingly, this level of coherency could be reduced due to the complexity of propagation media or operational errors during seismic acquisition. It will be challenging to process acquired data if these incoherencies are not compensated for. In mountainous seismic acquisition projects, displacement of the source is one of the more common causes of errors. Such displacement could be happened for receiver points as well, due to the access or operational difficulties in seismic acquisition. In the processing stage, there are some methods for improving coherency based on the assumption that incoherencies are stationary both in time and offset. In particular, it is assumed that all reflection events shifts are static in the time domain and predictable in the offset domain. Thus, they can be compensated by conventional static and dynamic corrections. Nevertheless, there are some violent circumstances where the shifts will no longer be predictable. The displacement of source or receiver stations without resurveying of them and the presence of velocity anomalies in wave propagation media are some examples. These often occur simultaneously in mountainous seismic terrain. Conventional static and dynamic corrections cannot properly rectify such non-stationary inconsistencies in the mentioned circumstances. Although applying the residual static correction to compensate for such incoherencies can improve coherency for some reflector's events, especially those with good amplitude and frequency content, for the others it can actually make it worse, especially for deep reflectors. For precise seismic reflection imaging, the magnitude of non-stationary shifts plays a key role. Small shifts will result in a reduction of the frequency content of the final stack section. For bigger size of these shifts, the quality of stacked reflections will be reduced and then can be eliminated, consequently. As a well-known fact, in seismic operations, logically increasing frequency content in order to get a better resolution usually involves spending significant time and money. However, with the mentioned operational errors, this is essentially wasteful. To avoid such operational errors, the activities of different crews of the seismic project should be thoroughly checked, in particular, the survey and drilling crews for the accuracy of elevation and coordinates of the shot points. Using both synthetic and real data, this paper attempted to explain how reflection event incoherencies frequently occur during mountainous seismic acquisition, and then proposed an algorithm for compensating those incoherencies with a non-stationary time shift correction in pre-stack seismic data

Keywords: Mountainous seismic operation, operational errors, incoherency of reflection events, non-stationary time shifts, velocity anomalies, residual static