

معرفی روش مبتنی بر مدل سطح پراش مشترک

هاشم شاهسونی^{۱*}، ایرج پیروز^۲، یورگن مان^۳، پیتر هوبرال^۴

^۱استادیار، عضو هیات علمی دانشگاه کردستان، سنندج، ایران
^۲استادیار، عضو هیات علمی بازنشسته دانشگاه صنعتی شاهرود، شاهرود، ایران
^۳استادیار، عضو هیات علمی انستیتو ژئوفیزیک کارلسروهه، کارلسروهه، آلمان
^۴استاد، عضو هیات علمی انستیتو ژئوفیزیک کارلسروهه، کارلسروهه، آلمان

(تاریخ دریافت: ۱۳۹۳/۰۸/۰۵، تاریخ پذیرش: ۱۳۹۴/۰۳/۰۲)

چکیده

روش برانبارش سطح بازتاب مشترک حادثه‌های لرزه‌ای را با استفاده از تحلیل سرعت به شیوه‌ای کلی‌تر نسبت به روش‌های معمول، برانبارش می‌کند. این روش قادر است فقط یک حادثه لرزه‌ای را که در یک نمونه از مقطع برانبارش شده با شیب‌های متفاوت تداخل کرده است در نظر بگیرد. به این علت نتایج حاصل از این روش ممکن است در مراحل بعدی پردازش، یعنی کوچ بعد از برانبارش، حوادث مصنوعی را ایجاد کند. این مشکل هنگام اجرای کوچ قبل از برانبارش آشکارتر می‌شود. زیرا برای کوچ قبل از برانبارش، مدل سرعت لایه‌های زیرسطحی با دقت زیاد مورد نیاز است که معمولاً در دسترس نیست.

به‌منظور غلبه بر مشکلات روش برانبارش سطح بازتاب مشترک، پیشنهاد شد که برای هر نمونه از مقطع دورافت صفر تعداد محدودی از عملگرهای برانبارش سطح بازتاب مشترک با شیب‌های متفاوت در نظر گرفته شود. به این منظور برای بازه‌ای از شیب‌ها، میزان هم‌دوسی عملگرهای برانبارش سطح بازتاب مشترک در یک نمونه از مقطع دورافت صفر به‌دست آورده می‌شود. حال یک حد آستانه‌ای برای میزان هم‌دوسی در نظر گرفته می‌شود. سپس عملگری که میزان هم‌دوسی آن از این حد آستانه‌ای بیشتر است به‌منظور برانبارش به کار برده می‌شود. این شیوه تا حدی مشکل تداخل حوادث لرزه‌ای با شیب‌های متفاوت، را که در یک نمونه از مقطع دورافت صفر تداخل کرده‌اند، مرتفع کرده است. اما مشکل بزرگ روش پیشنهاد شده در نداشتن یک معیار برای مشخص کردن نمونه‌هایی از مقطع دورافت صفر است که در آنها تداخل شیب اتفاق افتاده باشد. همچنین یکی دیگر از مشکلات روش پیشنهاد شده، نبود امکان تعیین دقیق تعداد حوادث لرزه‌ای است که در یک نمونه از مقطع دورافت صفر شرکت دارند.

اخیراً به‌منظور غلبه بر مشکلات روش برانبارش سطح بازتاب مشترک پیشنهاد شده‌است. این روش تعداد تقریباً پوسسته‌ای از شیب‌ها را در نظر می‌گیرد و آن را روش برانبارش سطح پراش مشترک می‌نامند. این نام به خاطر رابطه این روش با حوادث مربوط به هذلولی‌های پراش انتخاب شده است. این روش به شکل موفقیت آمیزی به‌صورت مبتنی بر داده روی داده‌های لرزه‌ای اجرا شده و مشکل مربوط به تداخل شیب‌ها را تا حد زیادی مرتفع کرده است. زمان بسیار طولانی موردنیاز برای پردازش داده‌های لرزه‌ای، یکی از بزرگ‌ترین مشکلات این روش است به گونه‌ای که می‌توان فقط در مقیاس آزمایشگاهی و پژوهشی از آن استفاده کرد و کاربرد عملی و صنعتی نخواهد داشت.

در این مقاله یک روش مبتنی بر مدل معرفی شده است که فقط نیاز به یک مدل سرعت نه چندان دقیق و صاف شده دارد. در این روش با استفاده از شیوه دنبال کردن پرتو به‌صورت سامان‌مند و دینامیک به شیوه مدل‌سازی پیشرو پارامترهای موردنیاز به‌دست می‌آید. از این راه می‌توان زمان محاسبات را در حد صد برابر کاهش داد. این روش روی داده‌های لرزه‌ای واقعی پیاده‌سازی شده است. سپس داده‌های کوچ داده شده بعد از برانبارش حاصل از این روش، با نتایج حاصل از روش‌های پیشین مقایسه شده‌اند. این نتایج نشان می‌دهد که روش معرفی شده جدید، زمان پردازش بسیار اندکی دارد. با وجود این، نتایج حاصل از این روش حتی در بعضی موارد نسبت به نتایج روش‌های پیشین بهبود نیز یافته است.

واژه‌های کلیدی: برانبارش، سطح پراش مشترک، مبتنی بر مدل، دنبال کردن پرتو، تداخل شیب

۱ مقدمه

این دو موج از سطح زمین بیان کرد (تایگل و همکاران، ۱۹۹۷).

روش برانبارش سطح بازتاب مشترک برای شبیه‌سازی هر نمونه از مقطع دورآفت صفر فقط یک عملگر برانبارش که دارای بیشترین همدوسی با حوادث لرزه‌ای است را به‌منظور برانبارش در نظر می‌گیرد. در صورتی که در یک نمونه از مقطع دورآفت صفر فقط یک حادثه لرزه‌ای شرکت داشته باشد، در نظر گرفتن یک عملگر برانبارش کفایت می‌کند. اما در حضور یک بازتابنده نانتخت و یا یک نقطه پراش در عمق، ممکن است دو یا چند حادثه لرزه‌ای در هم و یا با هم در یک نمونه از مقطع دورآفت صفر شرکت کنند. در چنین حالتی در نظر گرفتن فقط یک عملگر برانبارش برای هر نمونه از مقطع دورآفت صفر به‌منظور شبیه‌سازی این مقطع که شامل همه حوادث لرزه‌ای، بازتابنده‌ها و منحنی‌های پراش باشد دیگر کافی نیست. برای در نظر گرفتن چنین تداخل شیب‌هایی پیشنهاد شد تا به‌جای یک عملگر، تعداد محدودی عملگر به‌منظور برانبارش برای یک نمونه از مقطع دورآفت صفر در نظر گرفته شود (من، ۲۰۰۱، ۲۰۰۲؛ سلیمانی و همکاران، ۱۳۹۲ الف). به‌این ترتیب تا حدودی مشکل تداخل شیب در مقاطع برانبارش شده مرتفع شد. اما مشکل بزرگ روش پیشنهاد شده، نداشتن معیاری برای مشخص کردن نقاط دارای تداخل شیب و همچنین تعیین تعداد حوادث لرزه‌ای دخیل در یک نمونه از مقطع دورآفت صفر است. برای به‌دست آوردن مقطع برانبارش شده‌ای که شامل همه حوادث لرزه‌ای تداخل کرده در یکدیگر، سلیمانی و همکارانش در ۲۰۰۹ با ترکیب مفهوم روش سطح برانبارش بازتاب مشترک و تصحیح برون‌راند شیب (هیل، ۱۹۹۱)، به‌جای در نظر گرفتن صرفاً یک عملگر و یا تعداد

در دهه اخیر روش برانبارش سطح بازتاب مشترک در بسیاری از مقالات علمی منتشر شده مورد بحث قرار گرفته است. بنابراین در ادامه فقط اصول کلی از این روش که در ارتباط با این پژوهش است تشریح می‌شود. روش برانبارش سطح بازتاب مشترک در واقع از مفهوم تحلیل سرعت برانبارش، یعنی تعیین پارامترهای برانبارش به روش تحلیل همدوسی، استفاده می‌کند (من و همکاران، ۱۹۹۹؛ جاگر و همکاران، ۲۰۰۱). در روش‌های معمول، تحلیل سرعت برانبارش فقط روی یک گروه نقطه میانی مشترک پیاده‌سازی می‌شود و تنها پارامتر مورد جست‌وجو، سرعت برانبارش است. در مقابل، روش برانبارش، سطح بازتاب مشترک تعدادی از گروه‌های نقطه میانی مشترک مجاور یکدیگر را به‌منظور تحلیل سرعت برانبارش در نظر می‌گیرد. در واقع روش برانبارش سطح بازتاب مشترک فرض بر آن دارد که حوادث لرزه‌ای به‌جای یک نقطه بازتابنده در ارتباط با یک سطح بازتابنده هستند.

رابطه بین روش تحلیل سرعت برانبارش و روش سطح بازتاب مشترک را هرتوک و همکارانش در ۲۰۰۷ تشریح کردند (هرتوک و همکاران، ۲۰۰۷). آنها برای مشخص کردن شباهت‌های این روش‌ها عملگر برانبارش سطح بازتاب مشترک را برحسب گُندی افقی و دو سرعت تصویرسازی، بیان کردند. روابط ریاضی مشابهی را می‌توان برحسب مشتقات زمان گذر براساس نظریه پرتوی مجاور محور (تایگل و همکاران ۱۹۹۳) و یا براساس مشخصه جبهه‌های موج فرضی یعنی موج نرمال در نقطه فرود، که با یک نقطه پراش در ارتباط است، موج نرمال که با یک سطح منفجر شونده ارتباط دارد و زاویه خروج

(شاهسونی و همکاران، ۲۰۱۲). حال با استفاده از مدل‌ساز پیشرو پارامترهای موردنیاز عملگر برانبارش سطح پراش مشترک را می‌توان به راحتی از روش دنبال کردن پرتو به صورت سامان‌مند و دینامیک به دست آورد. به این ترتیب می‌توان مقطع برانبارش شده بهینه‌تری نسبت به روش برانبارش سطح پراش مشترک مبتنی بر داده تولید به دست آورد که زمان پردازش آن نیز ده‌ها برابر کمتر است.

۲ تقریب زمان گذر

روش برانبارش سطح بازتاب مشترک براساس تقریب تحلیلی از زمان گذر موج تا مرتبه دوم بنا شده است که این تقریب را می‌توان به شیوه‌های گوناگونی نمایش داد. برای مثال می‌توان آن را به صورت پارامتری و یا به صورت بسط سری تیلور زمان گذر و یا توان دوم زمان گذر موج بیان کرد (هوچت و همکاران، ۱۹۹۹). رایج‌ترین شیوه، بسط سری تیلور تا مرتبه دوم است که آن را صورت هندلولی زمان گذر نیز می‌نامند. در برداشت‌های دو بُعدی، که در این مقاله مد نظر است، می‌توان تقریب هندلولی زمان گذر موج در روش برانبارش سطح بازتاب مشترک را به صورت زیر بیان کرد:

$$t^2(x_m, h) = \left[t_0 + \frac{2 \sin \alpha}{v_0} (x_m - x_0) \right]^2 + \frac{2t_0 \cos^2 \alpha}{v_0} \left[\frac{(x_m - x_0)^2}{R_N} + \frac{h^2}{R_{NIP}} \right]. \quad (1)$$

در این رابطه v_0 سرعت موج در سطح زمین، h نیم دورافت، x_0 و t_0 به ترتیب مکان و زمان نمونه دورافت صفر که برانبارش به آن نقطه صورت می‌گیرد، x_m فاصله نسبت به x_0 ، R_N شعاع خمیدگی موج نرمال و R_{NIP} شعاع خمیدگی موج نرمال در نقطه فرود و α زاویه خروج امواج از سطح هستند. از بین این پارامترها، R_N ، R_{NIP} و α پارامترهای برانبارش هستند.

محدودی عملگر برانبارش، بازه پیوسته‌ای از شیب‌ها را به منظور برانبارش برای هر نمونه از مقطع دورافت صفر در نظر گرفتند (سلیمانی و همکاران، ۲۰۰۹ a و b). آنها عملگر برانبارش سطح بازتاب مشترک را به منظور آشکارسازی بیشتر هندلولی‌های پراش، به عملگر برانبارش سطح پراش مشترک که با یک نقطه پراش عمقی در ارتباط است، تبدیل کردند (سلیمانی، ۱۳۸۸). روش برانبارش سطح پراش مشترک به صورت موفقیت‌آمیزی روی داده‌های زمینی پیاده‌سازی شده است (سلیمانی و همکاران، ۱۳۹۲ ب). در این روش برای هر شیب، عملگر برانبارش باید با استفاده از تحلیل همدوسی به شکل مبتنی بر داده در داده‌های قبل از برانبارش به دست آید. این فرایند بسیار زمان‌بر است. به گونه‌ای که این روش را بیشتر تبدیل به روشی آزمایشگاهی و پژوهشی کرده است تا روشی که بتوان عملاً از آن در صنعت استفاده کرد. در ادامه این روش را روش برانبارش سطح پراش مشترک مبتنی بر داده می‌نامیم. به منظور کاربردی کردن روش سطح پراش مشترک مبتنی بر داده، روش سطح پراش مشترک مبتنی بر مدل معرفی شده (شاهسونی ۲۰۱۱، ۲۰۱۱ a و b) و روی داده مصنوعی Sigsbee 2A (فان هولتز، ۲۰۰۱) و داده زمینی در کشور آلمان (شاهسونی، ۲۰۱۱ c) به صورت بسیار موفقیت‌آمیز پیاده‌سازی شده است.

در این مقاله این روش تشریح و روی مجموعه‌ای از داده واقعی در شمال شرق کشور آزمایش شده است. فرض اولیه ما آن است که مدل صاف شده‌ای از سرعت لایه‌های زیرسطحی برای منطقه موردنظر در دسترس است. باید توجه داشت که دقت این مدل در نتایج نهایی تاثیر چندانی ندارد و می‌توان آن را از هر روش مدل‌ساز سرعت که تاکنون پیشنهاد شده است به دست آورد. برای مثال می‌توان از توالی پردازش سطح برانبارش بازتاب مشترک، صاف کردن، دست‌چین کردن خودکار و توموگرافی موج نرمال در نقطه فرود استفاده کرد

۳ مدل‌سازی پیشرو

همان‌طور که در بالا ذکر شد، شعاع خمیدگی موج نرمال در نقطه فرود در ارتباط با یک چشمه نقطه‌ای در نقطه فرود است. خمیدگی جبهه موج فرضی تولید شد با این چشمه نقطه‌ای را می‌توان در امتداد پرتوی عمود تعیین کرد. جبهه موج پیش‌گفته در نهایت با خمیدگی $1/R_{NIP}$ به سطح می‌رسد. بنابراین، اولین گام برای مدل کردن این پارامتر یافتن همه پرتوهای ممکن با استفاده از روش دنبال کردن پرتو به صورت سامان‌مند است. از آنجا که به این پرتوها در یک نقطه مشخص در سطح با یک زاویه خروج مشخص و زمان معین نیاز داریم، ناچاریم روش دنبال کردن سامان‌مند را به صورت پایین‌رو پیاده‌سازی کنیم.

روش سامان‌مند دنبال کردن پرتو شامل محاسبه مشخصه‌های معادله شمایی (آیکونال eikonal) است، یعنی

$$(\nabla T)^2 = \frac{1}{v^2(x, z)}, \quad (3)$$

این معادله، زمان گذر جبهه موج را در یک مدل سرعت دو بُعدی $v(x, z)$ کنترل می‌کند. معادله‌های مشخصه شمایی را می‌توان به صورت زیر بیان کرد (چرونی، ۲۰۰۱):

$$\frac{dx_i}{du} = \frac{\partial H}{\partial p_i}, \quad \frac{dp_i}{du} = -\frac{\partial H}{\partial x_i}, \quad \frac{dT}{du} = p_k \frac{\partial H}{\partial p_k}, \quad i=1,2 \quad (4)$$

در این معادله \vec{x} مختصات فضایی، \vec{p} بردار گندی، u واحد گام‌های دنبال کردن پرتو (برای مثال می‌تواند طول پرتو و یا زمان باشد) و H هامیلتونی است. رابطه هامیلتونی را می‌توان به صورت زیر نوشت:

$$H(\vec{x}, \vec{p}) = n^{-1} \left[(p_i p_i)^n - v^{-n} \right] = 0; i=1,2 \quad (5)$$

برای یک نقطه پراش زیرسطحی، منبع تولید کنند دو موج فرضی نرمال و نرمال در نقطه فرود یکی است، در نتیجه $R_N \equiv R_{NIP}$. از این‌رو برای هذلولی‌های پراش، رابطه (۱) تبدیل به زمان گذر موج در روش برانبارش سطح پراش مشترک است و به صورت زیر بیان می‌شود:

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

در این رابطه $R_{CDS} \equiv R_{NIP} \equiv R_N$ است. برای حوادث حاصل از بازتابنده‌ها عملگر برانبارش سطح بازتاب مشترک، رابطه (۱)، در مقایسه با عملگر برانبارش سطح پراش مشترک، رابطه (۲)، نتایج قابل قبول‌تری به دست می‌دهد؛ زیرا در صورتی که خمیدگی سطح بازتابنده زیاد نباشد آن‌گاه $R_{NIP} \neq R_N$ است (یک پراش را می‌توان یک بازتابنده با خمیدگی بی‌نهایت دانست). با وجود این رابطه (۲) می‌تواند حوادث لرزه‌ای بازتابی را در یک پنجره مناسب به خوبی برآورد کند.

باید توجه داشت معنی R_{CDS} بستگی به شیوه‌ای دارد که این پارامتر برانبارش به دست آورده می‌شود. در روش مدل‌سازی پیشرو که در این مقاله شرح داده خواهد شد این مقدار دقیقاً برابر R_{NIP} در مقطع دورافت صفر و در محل x_0 است. در روش برانبارش سطح بازتاب مشترک R_{NIP} با تحلیل همدوسی در داده‌های قبل از برانبارش در یک پنجره محدود به دست آورده می‌شود. به این ترتیب R_{NIP} در معرض آریبی گسترش طول قرار می‌گیرد (مولر، ۲۰۰۶). در روش برانبارش سطح پراش مشترک مبتنی بر داده، R_{CDS} متأثر از هر دو پارامتر برانبارش یعنی R_N و R_{NIP} است. در این حالت با توجه به بزرگی پنجره استفاده شده R_{CDS} به صورت میانگین وزنی از این دو پارامتر است.

تیلور از تابع فازی زمان گذر موج T در مجاورت پرتوی مرکزی مشق مرتبه دوم از زمان گذر موج عمود بر پرتوی مرکزی را نشان می‌دهد؛ به این ترتیب خواهیم داشت:

$$M(u) = \frac{\partial^2 T(u, n)}{\partial n^2} \Big|_{n=0} \quad (۸)$$

نتایج حاصل از معادلات دیفرانسیل معمولی از نوع ریکاتی در نهایت منتج به دستگاه معادلات دنبال کردن دینامیک پرتو می‌شود. این دستگاه شامل یک جفت معادله دیفرانسیل معمولی مرتبه اول است. برای متغیر انتشار انتخاب شده به وسیله ما یعنی $u \equiv t$ در طول پرتوی مرکزی، این دستگاه را می‌توان به صورت زیر نوشت:

$$\frac{dq}{dt} = v^2 p, \quad \frac{dp}{dt} = -\frac{1}{v} \frac{\partial^2 v}{\partial n} q, \quad (۹)$$

پارامترهای p و q به منظور تبدیل از یک مختصات به مختصات دیگر مورد استفاده قرار می‌گیرند. دستگاه معادلات (۹) را می‌توان به صورت عددی و هم‌زمان با دستگاه معادلات مربوط به دنبال کردن پرتو به صورت سامان‌مند حل کرد. نسبت پارامترهای p و q برابر مشتق توان دوم زمان گذر موج عمود بر پرتو، یعنی رابطه (۸) است (چرونی، ۲۰۰۱) که به صورت زیر بیان می‌شود:

$$M(u) = \frac{p(u)}{q(u)}, \quad (۱۰)$$

برای یک چشمه نقطه‌ای $M(u_0)$ در نقطه خروج از سطح زمین متناسب است با عکس مقدار R_{CDS} که می‌توان این تناسب را به صورت زیر نوشت:

$$\frac{1}{R_{CDS}} = v_0 M(u_0) = v_0 \frac{p(u_0)}{q(u_0)}. \quad (۱۱)$$

که در آن n یک عدد حقیقی است. در صورتی که n را به سمت صفر میل دهیم، هامیلتونی به صورت زیر در خواهد آمد:

$$H(\vec{x}, \vec{p}) = \frac{1}{2} Ln(p_i p_i) + Lnv = \frac{1}{2} Ln(v^2 p_i p_i); i = 1, 2 \quad (۶)$$

در این حالت آخرین مشخصه در معادله (۴) $\frac{dt}{du} = 1$ خواهد شد. به عبارت دیگر واحد گام‌های دنبال کردن پرتو زمان گذر است. به این ترتیب می‌توان روش دنبال کردن پرتو را به شکل مستقیم برای هر نمونه از مقطع دورافت صفر پیاده‌سازی کرد. در نهایت دستگاه معادلات دنبال کردن سامان‌مند پرتو به دست آورده می‌شود. این دستگاه در دو بُعد شامل چهار معادله دیفرانسیل معمولی است که باید هم‌زمان با هم حل شوند. این دستگاه به صورت زیر بیان می‌شود:

$$\frac{dx}{dT} = (p_k p_k)^{-1} p_i, \quad \frac{dp_i}{dT} = -\frac{\partial Lnv}{\partial x_i}; i = 1, 2 \quad (۷)$$

دستگاه معادلات دیفرانسیل در رابطه (۷) را باید با استفاده از روش‌های عددی حل کرد. طول گام، در حل عددی برابر با آهنگ نمونه‌برداری داده‌های لرزه‌ای است. به این ترتیب، هر نمونه در طول پرتو به طور مستقیم در ارتباط با یک نمونه از مقطع دورافت صفر است.

برای تعیین R_{NIP} علاوه بر دنبال کردن پرتو به صورت سامان‌مند، باید از دنبال کردن پرتو به صورت دینامیک نیز در طول مسیر پرتو استفاده کرد. دستگاه معادلات دیفرانسیل دنبال کردن پرتو به صورت دینامیک نیز از معادله شمایی استخراج می‌شود. این معادلات در دستگاه مختصات پرتو-مرکز (s, n) بیان می‌شود که در آن محور S مماس بر پرتو و محور n عمود بر پرتو است. بسط

ماتریس انتشار را می‌توان در طول پرتو برای هر محل u با دو شرط اولیه برای محل آغاز u_0 به دست آورد. ماتریس انتشار پرتوی $\Pi(u, u_0)$ به راحتی تبدیل به ماتریس انتشار وارون $\Pi^b(u_0, u)$ می‌شود. این ماتریس مقادیر دینامیکی پرتو در جهت عکس انتشار پرتو را توصیف می‌کند و آن را می‌توان به صورت زیر نشان داد:

$$\Pi(u_0, u) = \begin{pmatrix} p_2 & q_2 \\ p_1 & q_1 \end{pmatrix}. \quad (13)$$

ستون اول ماتریس انتشار وارون Π^b مربوط به شرط اولیه موج تخت و ستون دوم آن مربوط به چشمه نقطه‌ای است. اما این بار این شرط در ارتباط با نقطه u روی پرتو است. با توجه به مطالب پیش گفته هنگامی که ماتریس انتشار Π در طول پرتوی پایین‌رونده برای همه نقاط u روی پرتو محاسبه شوند، ماتریس انتشار وارون نیز به راحتی قابل محاسبه است. به این ترتیب مقدار R_{CDS} برای هر نقطه u روی پرتو با استفاده از رابطه زیر به دست می‌آید:

$$\frac{1}{R_{CDS}(u)} = v_0 \frac{q_2(u)}{q_1(u)}. \quad (14)$$

4 نحوه اجرا

در روش‌های مبتنی بر داده اندازه پنجره جست‌وجو و برابری در جهت محور نقطه میانی مشترک، معمولاً براساس اندازه تصویر اولین ناحیه فرنل تعیین می‌شود. علاوه بر این برای یک نمونه از مقطع دورآفت صفر، باید اندازه پنجره ثابت باشد. علت این است که مقدار همدوسی به تعداد لرزه‌نگاشت‌هایی که مورد استفاده قرار می‌گیرند بسیار حساس است و ممکن است مقدار همدوسی را با خطا روبه‌رو سازد (من، 2002). در روش مبتنی بر مدل معرفی شده در این مقاله، تحلیل همدوسی

در این رابطه v_0 سرعت موج در سطح است و فرض بر آن است که این مقدار در دسترس است.

به منظور به دست آوردن R_{CDS} برای یک نقطه پراش در عمق، ساده‌ترین شیوه‌ای که به نظر می‌رسد این است که دستگاه معادلات دنبال کردن دینامیک پرتو در امتداد پرتو به سمت بالا (تا رسیدن به سطح) با شرط اولیه یک چشمه نقطه‌ای یعنی $p=1$ و $q=0$ حل شود. این نقاط عمقی، که روی مسیر پرتو قرار دارند، از قبل به روش دنبال کردن سامان‌مند پرتو به صورت پایین‌رونده مشخص شده‌اند.

چنین شیوه‌ای به دو علت بسیار ناکاراست

- دنبال کردن پرتو برای صدها و شاید هزاران بار در امتداد هر پرتو باید تکرار شود.
- باید کل مسیر پرتو پایین‌رونده در حافظه رایانه نگه داشته شود، یا باید دنبال کردن سامان‌مند پرتو به سمت بالا دوباره تکرار شود.

در عوض، دنبال کردن پرتو به صورت دینامیک در امتداد پرتو پایین‌رونده بسیار کارآمدتر است. اما در این حالت نمی‌توان شرط اولیه را در نقطه برخورد عمود کنترل کرد. زیرا در این حالت شرط اولیه در سطح زمین تعریف می‌شود نه در نقطه برخورد عمود که در عمق قرار دارد. این مشکل با حل دستگاه معادلات دنبال کردن دینامیک پرتو برای دو شرط اولیه که بر هم عمود هستند قابل حل است. برای این منظور یک چشمه نقطه‌ای و یک موج تخت در نقطه شروع در نظر گرفته می‌شود. برای موج تخت، شرط اولیه $p=0$ و $q=1$ است. در صورتی که اندیس یک برای شرط اولیه موج تخت و اندیس دو برای شرط اولیه چشمه نقطه‌ای در نظر گرفته شود می‌توان ماتریس انتشار پرتو را به صورت زیر نوشت (چرونی، 2001):

$$\Pi(u; u_0) = \begin{pmatrix} q_1 & q_2 \\ p_1 & p_2 \end{pmatrix}. \quad (12)$$

قسمت از پردازش در شکل ۱ به رنگ آبی نشان داده شده است.

۵ بررسی موردی

به منظور نشان دادن توانایی‌های روش مبتنی بر مدل نسبت به روش‌های پیشین، یعنی روش برانبارش سطح بازتاب مشترک و روش برانبارش سطح پراش مشترک مبتنی بر داده، این سه روش روی مجموعه‌ای از داده لرزه‌ای واقعی که از شمال شرق کشور ایران برداشت شده‌اند پیاده‌سازی و نتایج آنها با یکدیگر مقایسه شده است. این داده‌ها شامل ۴۷۹ گروه هم‌انفجار، با فاصله انفجار ۷۰ متر، تعداد ژئوفون‌ها در هر برداشت تا ۹۶ عدد با فاصله ۳۴ متر، فاصله نمونه‌برداری‌ها برابر ۲ میلی ثانیه، تعداد نمونه در هر لرزه‌نگاشت ۱۸۷۵ عدد و بازه دورافت از ۱۴۰ متر تا ۳۴۵۷ متر است. مدل سرعت مورد استفاده در این مقاله با استفاده از روش وارون‌سازی توموگرافی موج نرمال در نقطه فرود به دست آمده است. این مدل در شکل ۲ نشان داده شده است.

دنبال کردن پرتو به صورت سامان‌مند و دینامیک برای هر بلوک نقطه میانی مشترک که دارای فاصله ۱۸ متر هستند، با فاصله زمانی ۰/۸ میلی ثانیه صورت گرفته است. در اینجا پرتوهایی که به سمت بالا منحرف می‌شوند مورد استفاده قرار نگرفته‌اند. هرچند در صورت پیچیده بودن ساختارهای زیرسطحی می‌توان از این پرتوها نیز استفاده کرد. پرتوها از سطح در بازه $\pm 30^\circ$ درجه و با اختلاف یک درجه از سطح شلیک شده‌اند. پنجره انتخاب شده در امتداد مختصات نقطه میانی مشترک برابر ۳۰۰ متر انتخاب شده است. پنجره انتخاب شده در جهت مختصات دورافت برای زمان صفر، ۲۰۰ متر و برای زمان ۷/۵ ثانیه، ۳۴۵۰ متر انتخاب شده است. مقطع برانبارش شده سطح پراش مشترک مبتنی بر مدل در شکل ۳ نشان داده شده است. این مقطع با مقطع برانبارش شده حاصل از سطح

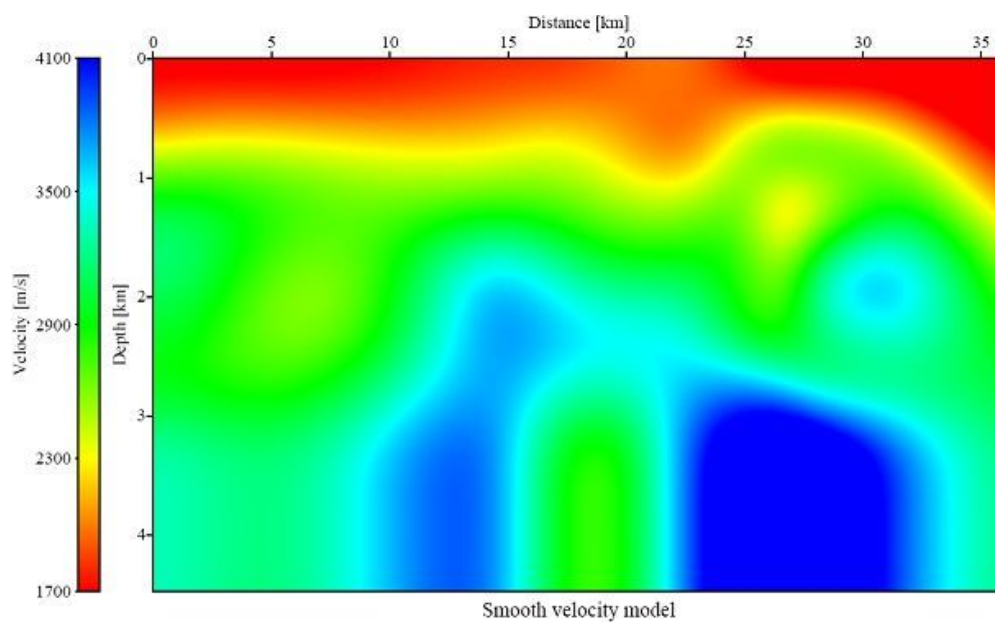
مورد استفاده نیست. بنابراین استفاده از یک پنجره با اندازه ثابت اجباری نخواهد بود. علاوه بر این اندازه پنجره در جهت محور نقطه میانی مشترک باید مقداری کوچک‌تر، نسبت به روش‌های مبتنی بر داده، انتخاب شود. زیرا با بزرگ‌تر شدن پنجره در روش برانبارش سطح پراش مشترک مبتنی بر مدل تقریب $R_{CDS} \equiv R_{NIP}$ برای حوادث بازتابی دیگر برقرار نیست. بنابراین در این مقاله پیشنهاد می‌شود که پنجره کوچک‌تری در امتداد مسیر نقطه بازتاب مشترک انتخاب شود. در امتداد این مسیر عملگر برانبارش روش سطح بازتاب مشترک و روش سطح پراش مشترک بر حوادث لرزه‌ای مماس است. مسیر نقطه بازتاب مشترک، پاسخ لرزه‌ای ناشی شده از یک نقطه بازتابنده را توصیف می‌کند. تصویر چنین مسیری روی افق به صورت زیر بیان می‌شود (هوچت و همکاران، ۱۹۹۹):

$$x_m(h) = x_0 + r_T \left(\sqrt{\frac{h^2}{r_T^2} + 1} - 1 \right) \text{ with} \quad (15)$$

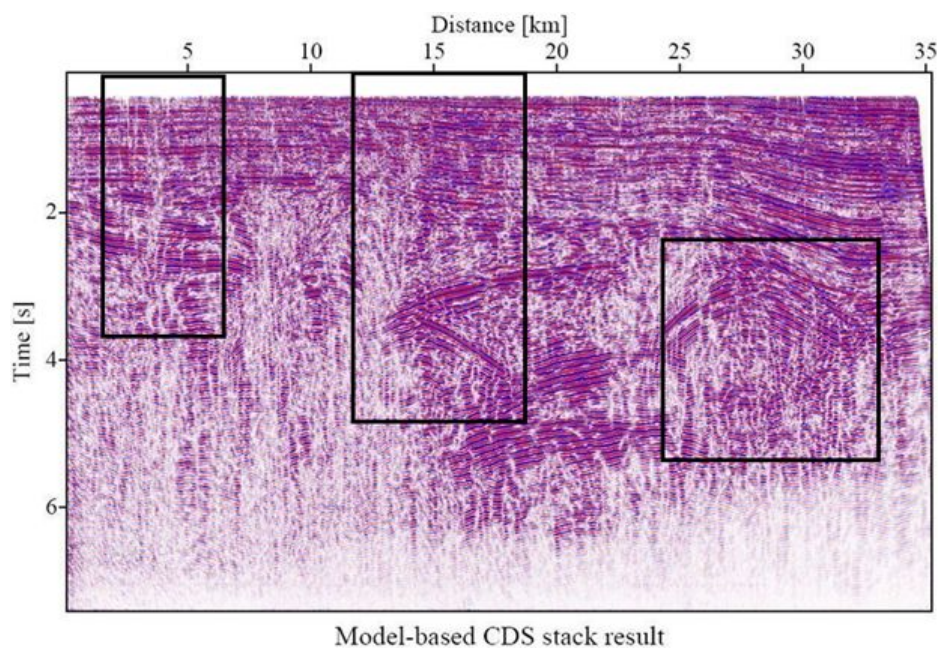
$$r_T = \frac{R_{NIP}}{2 \sin \alpha}$$

این رابطه مسیر پنجره برانبارش در هر نیم دورافت را مشخص می‌کند. واضح است که همه پارامترهای مورد نیاز در رابطه (۱۵) با استفاده از دنبال کردن پرتو به صورت دینامیک در دسترس است.

نمودار گردشی روش پیشنهادی در شکل ۱ آمده است. پارامتر برانبارش یعنی R_{CDS} ، برای یک مدل صاف شده با تغییر زاویه خروج تغییر اندکی دارد. از این رو می‌توان روش دنبال کردن پرتو را برای زاویه‌های خروج موج با فاصله‌های بزرگ، در اینجا یک درجه، پیاده‌سازی کرد. این قسمت از پردازش در شکل ۱ به رنگ سبز نشان داده شده است. در عوض برانبارش و محاسبه همدوسی با درون‌یابی بین پرتوهای مجاور در فواصل کوچک‌تری، در اینجا یک پنجم فواصل بزرگ، صورت می‌گیرد. این



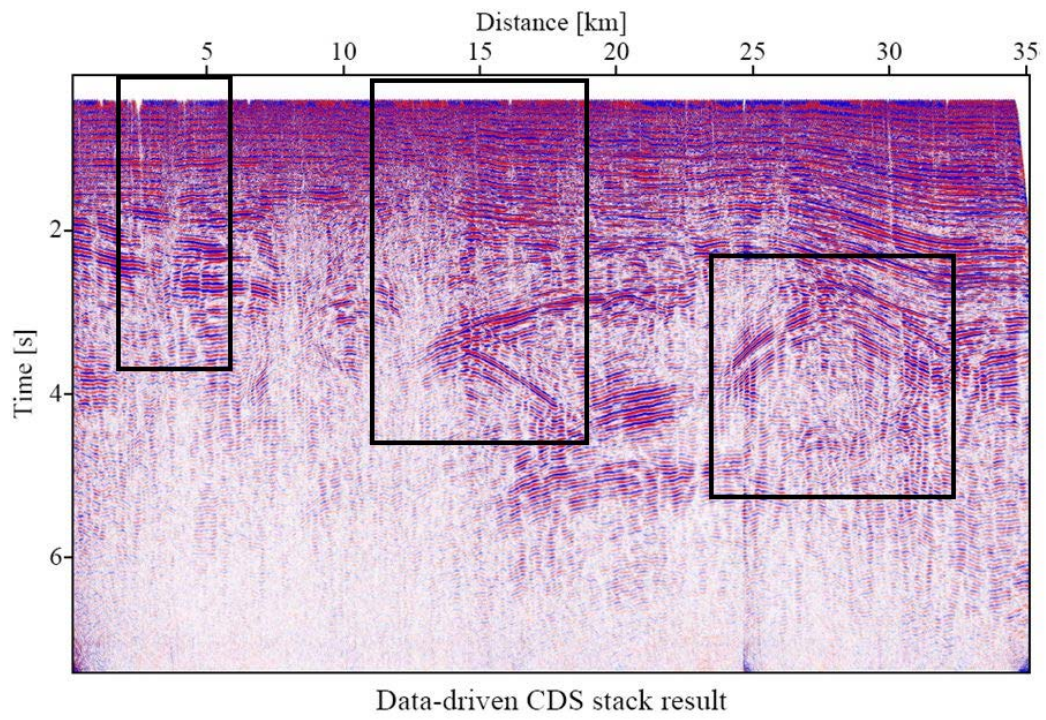
شکل ۲. مدل صاف شده منطقه موردنظر که با استفاده از روش وارون‌سازی توموگرافی موج نرمال در نقطه فرود به‌دست آمده است.



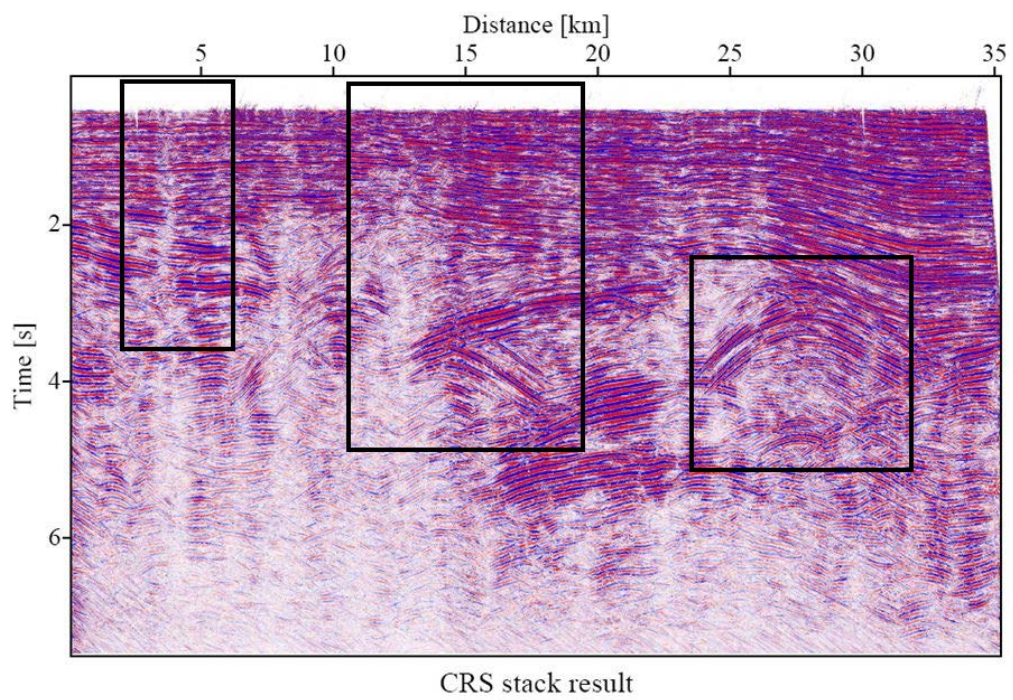
شکل ۳. مقطع برانبارش شده حاصل از روش برانبارش سطح پراش مشترک مبتنی بر مدل.

جدول ۱. مقایسه زمان پردازش داده‌های لرزه‌ای (برگرفته از شاهسونی و همکاران، ۲۰۱۴).

مشخصات پردازشگر	زمان پردازش (ساعت)	روش
CPU:Core2Duo@2GHz 2GB RAM	۶۶۹/۵۶	روش مبتنی بر داده
CPU:Core2Duo@2GHz 2GB RAM	۳/۹۲	روش مبتنی بر مدل



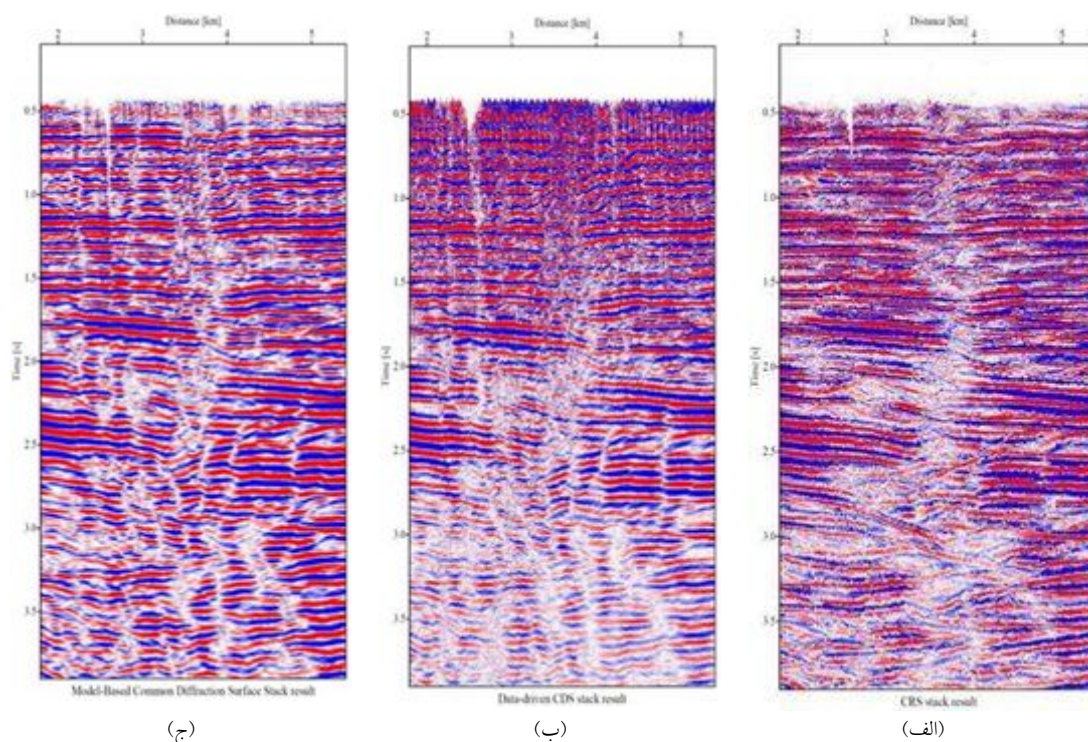
شکل ۴. مقطع برانبارش شده حاصل از روش سطح پراش مشترک مبتنی بر داده.



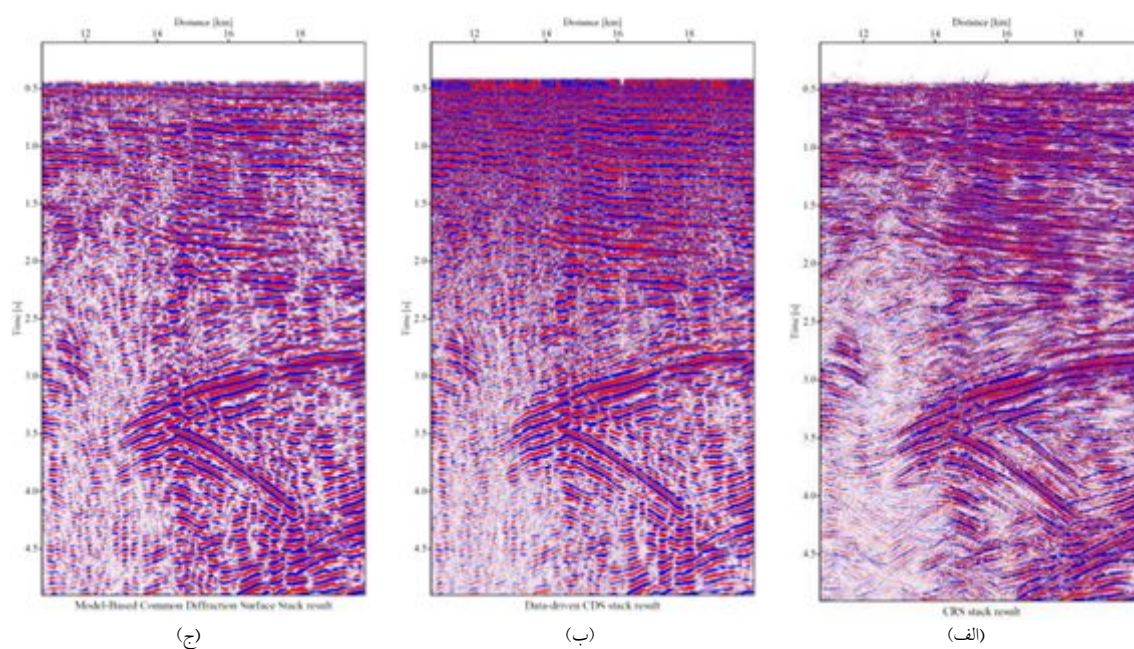
شکل ۵. مقطع برانبارش شده حاصل از روش سطح بازتاب مشترک.

شده مبتنی بر مدل، شکل ۶-ج نسبت به نتایج مبتنی بر داده، شکل ۶-ب، بهبود نیز یافته است اما همانطور که اشاره شد، تفاوت اصلی در زمان پردازش و بسیار کمتر است، جدول ۱ را ببینید. شکل ۷ نمایی نزدیک تر از بخش میانی شکل های ۳، ۴ و ۵ را که با یک مستطیل مشخص شده است، نمایش می دهد. همانطور که در شکل های ۷-ب و ۷-ج مشاهده می شود، مشکل تداخل شیب ها به خوبی مرتفع شده است و منحنی های پراش که با هم تداخل کرده اند به خوبی آشکار شده اند. این در حالی است که در مقطع برانبارش شده سطح بازتاب مشترک که در شکل ۷-الف نشان داده شده است، قسمت انتهایی منحنی های پراش با حوادث بازتابی که دارای انرژی بیشتری هستند (همدوسی بیشتری با داده های لرزه ای قبل از برانبارش دارند) پوشیده شده است.

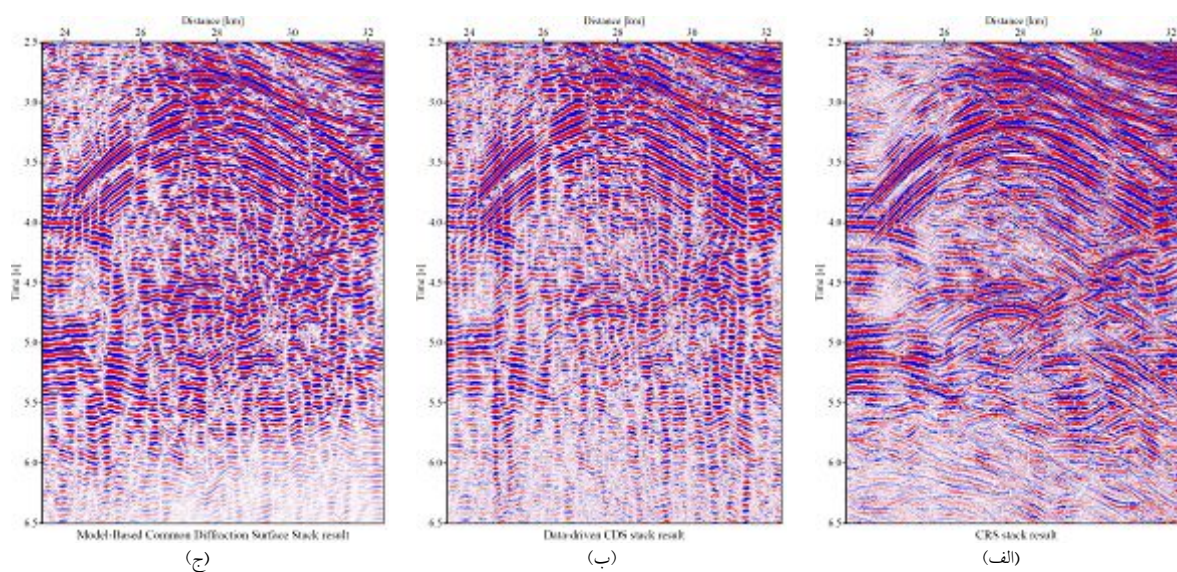
با مقایسه مقطع حاصل از روش برانبارش، پراش مشترک مبتنی بر مدل و روش سطح بازتاب مشترک که در شکل ۵ نشان داده شده است، قابلیت روش معرفی شده آشکار می شود. همانطور که در شکل ۴ نشان داده شده است پیوستگی حوادث در مقطع برانبارش سطح پراش مشترک، بیشتر حفظ شده است و ناپیوستگی ها به صورت تندتر و دقیق تری مشخص شده اند. این موضوع برای ناپیوستگی هایی که در شکل های ۳، ۴ و ۵ با یک مستطیل در سمت چپ مشخص شده است مشهودتر است. شکل ۶ نمایی نزدیک تر از بخش سمت چپ شکل های ۳، ۴ و ۵ را که با یک مستطیل مشخص شده است، نمایش می دهد. بسیاری از حوادث در این ناحیه آشکار سازی شده اند و مرز ناپیوستگی حوادث به خوبی نمایان شده است؛ شکل ۶-الف را با شکل ۶-ب مقایسه کنید. مقاطع برانبارش



شکل ۶. مقاطع برانبارش شده مستطیل سمت چپ شکل های ۳، ۴ و ۵. (الف) روش برانبارش سطح بازتاب مشترک، (ب) روش برانبارش سطح پراش مشترک مبتنی بر داده و (ج) روش برانبارش سطح پراش مشترک مبتنی بر مدل.



شکل ۷. مقاطع برانبارش شده مستطیل مرکزی شکل‌های ۳، ۴ و ۵. (الف) روش برانبارش سطح بازتاب مشترک، (ب) روش برانبارش سطح پراش مشترک مبتنی بر داده و (ج) روش برانبارش سطح پراش مشترک مبتنی بر مدل.



شکل ۸: مقاطع برانبارش شده مستطیل سمت راست شکل‌های ۳، ۴ و ۵. (الف) روش برانبارش سطح بازتاب مشترک، (ب) روش برانبارش سطح پراش مشترک مبتنی بر داده و (ج) روش برانبارش سطح پراش مشترک مبتنی بر مدل.

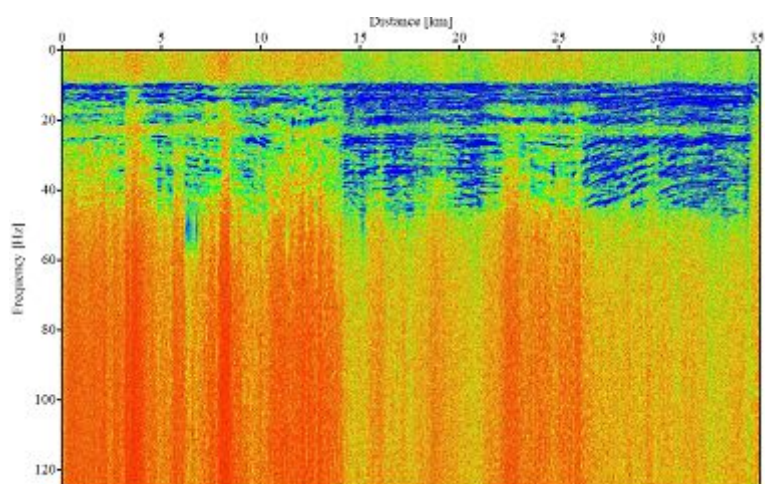
جدول ۲. مقایسه نسبت سیگنال به نوفه در روش‌های گوناگون.

نسبت سیگنال (dB)	روش برانبارش
۲۰/۷۷	برانبارش سطح بازتاب مشترک
۱۸/۹۴	برانبارش سطح پراش مشترک مبتنی بر داده
۳۱/۴۳	برانبارش سطح پراش مشترک مبتنی بر مدل

به منظور مقایسه بهتر مقاطع برانبارش شده حاصل از روش‌های پیش‌گفته، طیف بسامد هر مقطع محاسبه شده است. در شکل ۹-الف طیف بسامد حاصل از مقطع برانبارش شده روش سطح بازتاب مشترک نشان داده شده است. همان‌طور که مشاهده می‌شود، اگرچه بسامد بیشتر امواج (سیگنال‌ها) در بازه ۱۰ تا ۴۰ هرتز قرار دارد اما امواج با بسامد (نوفه) بیشتر از ۸۰ هرتز نیز در مقطع برانبارش شده حضور دارند. طیف بسامد حاصل از مقطع برانبارش شده روش سطح پراش مشترک مبتنی بر داده در شکل ۹-ب نشان داده شده است. در این مقطع بسامدهای بیشتر امواج در بازه صفر تا ۶۰ هرتز قرار دارد. امواج با بسامد (نوفه) زیاد در این مقطع تقریباً وجود ندارد. این موضوع نیز روش سطح بازتاب مشترک است. این موضوع، مقایسه نسبت سیگنال به نوفه این دو مقطع که در جدول ۲ آورده شده است را تأیید می‌کند. در شکل ۹-ج طیف حاصل از روش سطح پراش مشترک مبتنی بر داده نشان داده شده است و همان‌گونه که انتظار می‌رفت امواج با بسامد (نوفه) زیاد در این مقطع تقریباً وجود ندارد. این موضوع نیز بزرگ‌تر بودن نسبت سیگنال به نوفه در مقطع برانبارش سطح پراش مشترک مبتنی بر مدل، نسبت به دو روش پیشین را که در جدول ۲ با یک‌دیگر مقایسه شده‌اند، تأیید می‌کند.

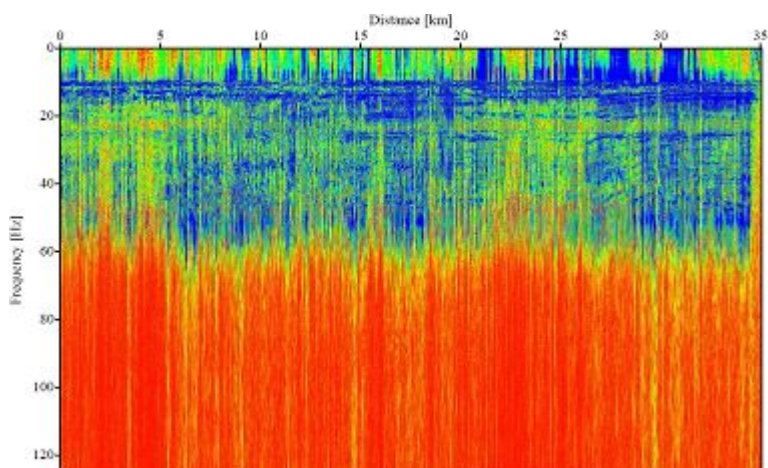
توانایی روش مبتنی بر مدل در حل مشکل تداخل شیب‌ها در مقاطع کوچ داده‌شده آشکارتر می‌شود. از این رو مقاطع برانبارش‌شده حاصل از روش‌های پیش‌گفته، کوچ بعد از برانبارش داده شدند. مدل سرعت مورد استفاده به منظور کوچ بعد از برانبارش، همان مدل سرعتی است که با استفاده از روش وارون‌سازی توموگرافی موج نرمال در نقطه فرود به دست آمده است و البته به منظور پیاده‌سازی روش برانبارش سطح پراش مشترک مبتنی بر مدل از آن استفاده شده است (شکل ۲ را ببینید).

شکل ۸ نمایی نزدیک‌تر از بخش سمت راست شکل‌های ۳، ۴ و ۵ را که با یک مربع مشخص شده است، نمایش می‌دهد. همان‌طور که در شکل ۸-ب نشان داده شده است، حوادث لرزه‌ای تا اندازه زیادی آشکارسازی شده‌اند و این در حالی است که در مقطع برانبارش سطح بازتاب مشترک شکل ۸-الف، این حوادث بدون داشتن معنای خاصی در هم آمیخته‌اند. همان‌طور که قبلاً نیز ذکر شد، مقطع برانبارش شده حاصل از روش سطح پراش مشترک مبتنی بر مدل با مقطع برانبارش مبتنی بر داده آن که در شکل ۸-ج نشان داده شده است تفاوت چندانی ندارد و تفاوت اصلی در زمان پردازش است. در جدول ۲ نسبت سیگنال به نوفه مقاطع گوناگون با یک‌دیگر مقایسه شده است. این مقدار برای مقطع برانبارش شده سطح بازتاب مشترک نسبت به مقطع برانبارش شده روش سطح پراش مشترک مبتنی بر داده، مقدار بیشتری دارد. زیرا در روش برانبارش سطح بازتاب مشترک برای هر نمونه از مقطع دورآفت صفر فقط یک عملگر به منظور برانبارش در نظر گرفته می‌شود و البته دقیقاً به همین علت است که این روش توانایی حل مشکل تداخل شیب‌ها را ندارد. این در حالی است که در روش برانبارش سطح پراش مشترک مبتنی بر داده برای یک نمونه از مقطع دورآفت صفر چندین عملگر، در این جا ۶۰ عملگر، به منظور برانبارش به کار برده می‌شود و طبیعی است که این تعداد عملگر مقداری نوفه را با خود به مقطع دورآفت صفر منتقل کنند. باین حال نسبت سیگنال به نوفه در روش معرفی شده، از دو روش پیشین بیشتر است. در این روش هر چند چندین عملگر به منظور برانبارش به یک نمونه از مقطع دورآفت صفر در نظر گرفته شده است اما به علت کوچک‌تر بودن پنجره برانبارش که در امتداد مسیر نقطه میانی مشترک در نظر گرفته شده است، مقدار زیادی نوفه به مقطع دورآفت صفر منتقل نمی‌شود.



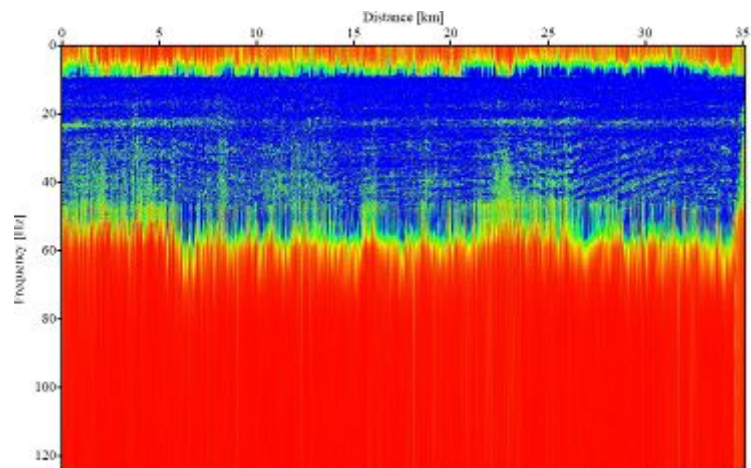
Spectrum of CRS stacked result

(الف)



Spectrum of data-driven CDS stacked result

(ب)



Spectrum of model-based CDS stacked result

(ج)

شکل ۹. طیف بسامد مقاطع برانبارش شده گوناگون: (الف) طیف بسامد حاصل از مقطع برانبارش شده روش سطح بازتاب مشترک، (ب) طیف بسامد حاصل از مقطع برانبارش شده روش سطح پراش مشترک مبتنی بر مدل. (ج) طیف بسامد حاصل از مقطع برانبارش شده روش سطح پراش مشترک مبتنی بر مدل.

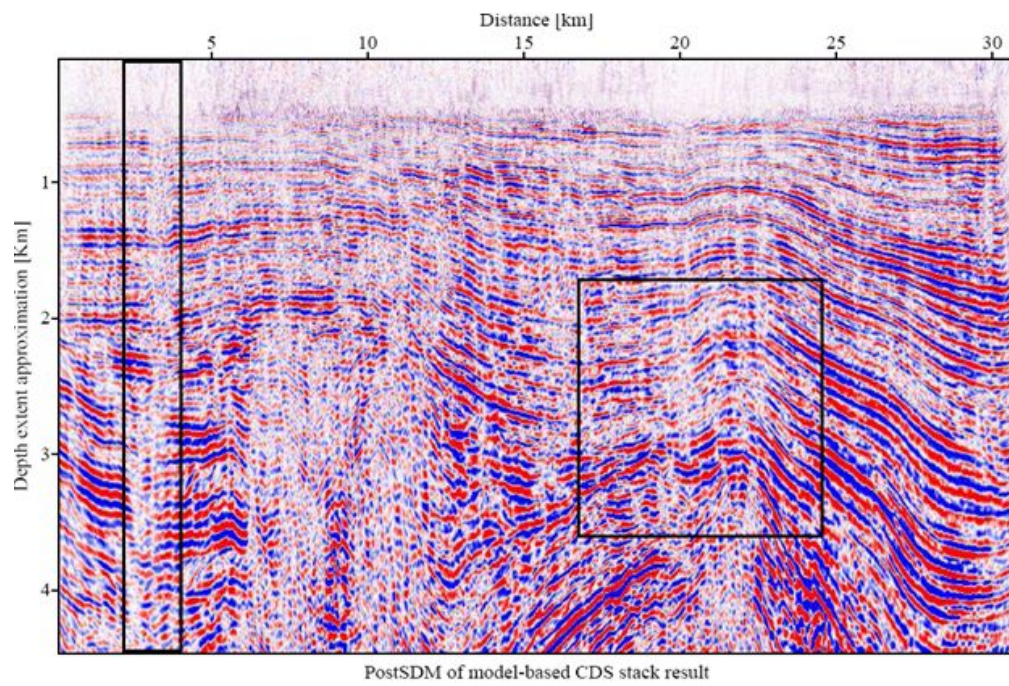
شکل ۱۳-الف مشاهده می‌شود، ناپیوستگی بین حوادث لرزه‌ای از سطح تا عمق گسترش یافته است. این ناپیوستگی‌ها در مقطع حاصل از روش برانبارش سطح پراش مشترک مبتنی بر مدل که در شکل ۱۳-ب نشان داده شده است، به‌خوبی تصویرسازی و آشکار شده‌اند.

۶ نتیجه‌گیری

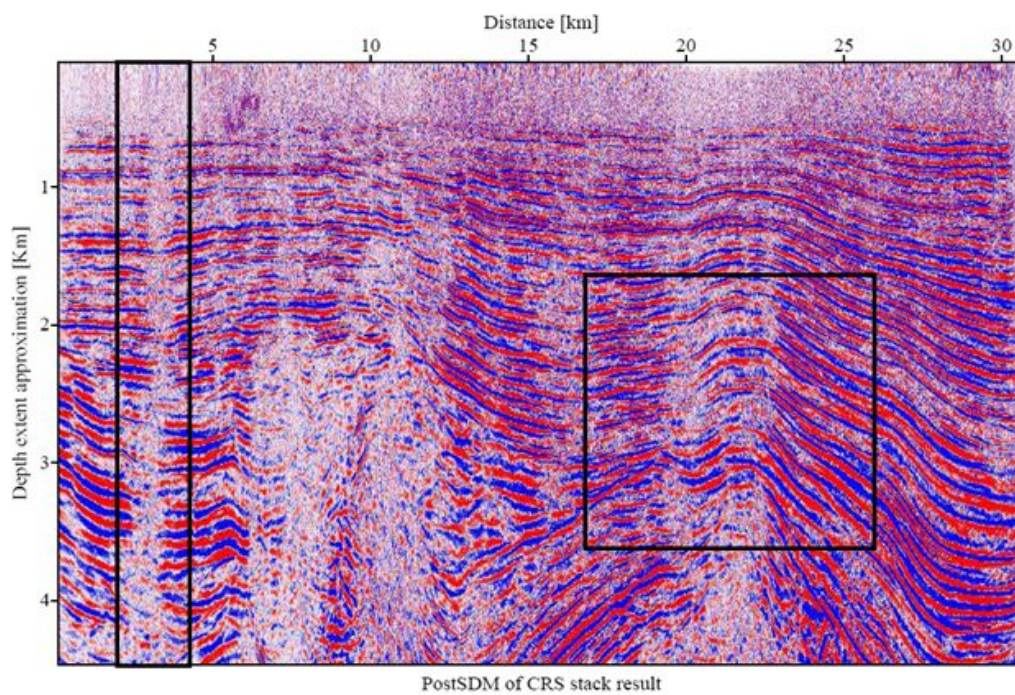
در این مقاله روش برانبارش سطح پراش مشترک مبتنی بر مدل تشریح و به کار رفته است. این روش به‌منظور حل مشکل تداخل شیب‌ها که در مقاطع لرزه‌ای پیچیده در اثر تداخل حوادث بازتابی و یا منحنی‌های پراش در هم و یا باهم به‌وجود می‌آید، توسعه داده شده است. این روش مبتنی بر مدل در مقایسه با روش سطح پراش مشترک مبتنی بر داده بسیار کاربردی‌تر و عملی‌تر است. مدل سرعت موردنیاز این روش را می‌توان از هر روش وارون‌سازی به‌دست آورد؛ زیرا این روش نیاز به مدل سرعت دقیقی ندارد. یکی از این روش‌ها روش وارون‌سازی توموگرافی موج نرمال در نقطه فرود است. مدل سرعت موردنیاز در این مقاله با استفاده از این روش به‌دست آمده و از همان مدل به‌منظور کوچ بعد از برانبارش داده‌ها استفاده شده است.

روش برانبارش سطح پراش مشترک روشی کارا به‌منظور بهینه ساختن مقطع برانبارشی است که در مراحل بعد کوچ داده می‌شود. این روش هنگامی که مدل سرعت دقیقی به‌منظور کوچ قبل از برانبارش در دسترس نیست بسیار مناسب است. روش مبتنی بر مدل معرفی شده در این مقاله نتایج مشابه و حتی در برخی موارد نتایج بهتری نسبت به روش مبتنی بر داده به‌دست داده است. البته مهم‌ترین مزیت روش معرفی شده زمان پردازش بسیار کم آن نسبت به روش مبتنی بر داده است.

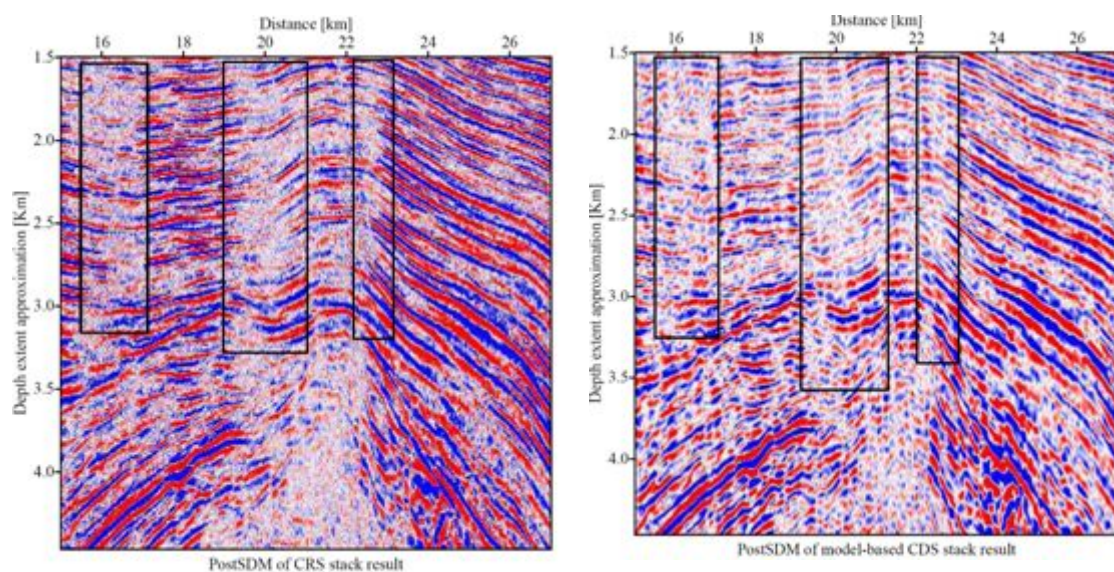
نتایج حاصل از کوچ عمقی بعد از برانبارش کیرشهوف مربوط به مقطع برانبارش شده به روش سطح پراش مشترک مبتنی بر مدل در شکل ۱۰ نشان داده شده است. در مقایسه با نتایج حاصل از کوچ عمقی مقطع برانبارش سطح بازتاب مشترک که در شکل ۱۱ نشان داده شده است بسیاری از حوادث آشکارسازی شده‌اند. همچنین بسیاری از حوادث که در مجاورت ناپیوستگی‌ها قرار دارند، نمایان شده‌اند و محل ناپیوستگی و همچنین مرز آن در مقطع کوچ داده شده سطح پراش مشترک به‌خوبی آشکار شده است. این موضوع یعنی آشکارسازی حوادث در مجاورت ناپیوستگی‌ها، مثل گسل که باعث به‌وجود آمدن حوادث پراش در مقطع لرزه‌ای می‌شوند، از توانایی‌های روش سطح پراش مشترک است. زیرا این روش به‌خوبی منحنی‌های پراش را در مقطع برانبارش آشکار می‌سازد و از این راه در مقطع کوچ داده شده، نقاط ایجادکننده پراش به‌خوبی نمایان می‌شوند. مقطع کوچ داده‌شده برانبارش سطح پراش مشترک مبتنی بر داده با مقطع مبتنی بر مدل تفاوت چندانی ندارد و از این رو در ادامه نشان داده نشده است. در شکل ۱۲ قسمت میانی مقطع کوچ داده شده حاصل از داده‌های برانبارش شده سطح پراش مشترک مبتنی بر مدل و روش سطح بازتاب مشترک که با یک مربع در شکل‌های ۱۰ و ۱۱ مشخص شده است، با هم مقایسه شده‌اند. بسیاری از ناپیوستگی‌های روی این تاقدیس که در مقطع برانبارش سطح بازتاب مشترک، شکل ۱۲-ب، آشکارسازی نشده است در مقطع سطح پراش مشترک مبتنی بر مدل نمایان و به‌خوبی تصویرسازی شده‌اند (شکل ۱۲-الف را ببینید). همچنین ناپیوستگی‌هایی که در امتداد یال تاقدیس در سه مستطیل مشخص شده مشاهده می‌شود، به‌خوبی در روش سطح پراش مشترک مبتنی بر مدل نمایان شده است. شکل ۱۳ بخش سمت چپ شکل‌های ۱۰ و ۱۱ را که با یک مستطیل مشخص شده‌اند، نمایش می‌دهد. همان‌طور که در



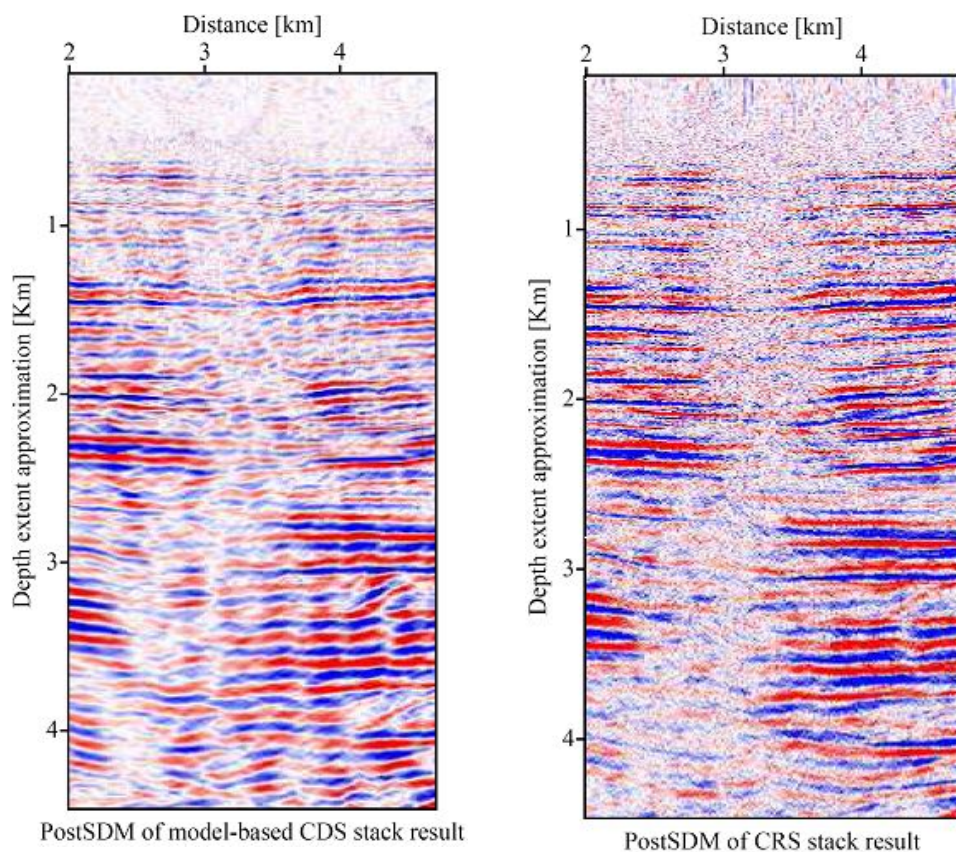
شکل ۱۰. مقطع کوچ عمقی بعد از برانبارش داده‌های حاصل از روش سطح پراش مشترک مبتنی بر مدل.



شکل ۱۱. مقطع کوچ عمقی بعد از برانبارش داده‌های حاصل از روش سطح بازتاب مشترک.



شکل ۱۲. مقطع کوچ عمقی بعد از برانبارش نشان داده شده در مستطیل سمت راست شکل‌های ۱۰ و ۱۱. (الف) مقطع کوچ داده شده داده‌های حاصل از روش برانبارش سطح پراش مشترک، (ب) مقطع کوچ داده شده داده‌های حاصل از برانبارش سطح بازتاب مشترک.



شکل ۱۳. مقطع کوچ عمقی بعد از برانبارش نشان داده شده در مستطیل سمت چپ شکل‌های ۱۰ و ۱۱. (الف) مقطع کوچ داده شده داده‌های حاصل از روش برانبارش سطح پراش مشترک، (ب) مقطع کوچ داده شده داده‌های حاصل از برانبارش سطح بازتاب مشترک.

- Pfaffenholz, J., 2001, Sigsbee2 synthetic subsalt data set: image quality as function of migration algorithm and velocity model error: In Workshop on velocity model independent imaging for complex media, Extended abstracts. Soc. Expl. Geophys. Session W5-5.
- Shahsavani, H., 2011, A Model-based Approach to the Common-Diffraction-Surface Stack: PhD Thesis, Shahrood University of Technology.
- Shahsavani, H., Mann, J., Piruz, I., Hubral, P., 2011a, A model-based approach to the Common-Diffraction-Surface stack—theory and synthetic case study: J. Seis. Expl., 20(3), 289–308.
- Shahsavani, H., Mann, J., Piruz, I., Hubral, P., 2011b, A model-based approach to the Common-Diffraction-Surface stack method – a synthetic case study: SBGf conference, Brazil.
- Shahsavani, H., Mann, J., Piruz, I., Hubral, P., 2011c, A model-based approach to the Common-Diffraction-Surface stack: 75th EAGE Conference. Session P074.
- Shahsavani, H., Mann, J., Hubral, P., Piruz, I., 2014, A model-based approach to the common-diffraction-surface stack to solving the problem of conflicting dips - a real case: 16th Iranian Geophysics Conference.
- Shahsavani, H., Mann, J., Soleimani, M., M., Sokooti, R., Vahid Hashemi, M., 2012, Seismic velocity model building by NIP tomography inversion – a case study in Iran: Istanbul International Geophysical Conference and Oil & Gas Exhibition. Istanbul, Turkey.
- Soleimani, M., Piruz, I., Mann, J., and Hubral, P., 2009a, Common-Reflection-Surface stack: Accounting for conflicting dip situations by considering all possible dips: J. Seis. Expl., 18(3), 271–288.
- Soleimani, M., Piruz, I., Mann, J., and Hubral, P., 2009b, Solving the problem of conflicting dips in Common-Reflection-Surface stack: In Extended Abstracts, 1st Internat. Conf. & Exhib., Shiraz, Iran. Eur. Assn. Geosci. Eng.
- Tygel, M., Schleicher, J., and Hubral, P., 1993, Parabolic and hyperbolic paraxial two-point traveltimes in 3D media: Geophys. Prosp., 41(4), 495–514.
- Tygel, M., Müller, T., Hubral, P., and Schleicher, J., 1997, Eigenwave based multiparameter traveltimes expansions: In Expanded abstracts, 67th Ann. Internat. Mtg., Soc. Expl. Geophys., 1770–1773.
- منابع
 سلیمانی منفرد، م.، ۱۳۸۸، برانبارش سطح پراش مشترک، ارائه یک روش نوین در حل مسئله تداخل شیب‌ها: رساله دکتری، دانشگاه صنعتی شاهرود.
 سلیمانی منفرد، م.، ادیبی، ا.، شاهسونی، ه.، سکوتی، م.ر.، ۱۳۹۲ الف، تصویرسازی لرزه‌ای در کمربندهای روانده با ساختار پیچیده با نشانگرهای جنبشی میدان موج: م. ژئوفیزیک ایران، ۷(۴)، ۹۵–۱۱۶.
 سلیمانی منفرد، م.، شاهسونی، ه.، مان، ی.، ۱۳۹۲ ب، شناسایی گسل‌ها در داده‌های لرزه نگاری بازتابی به روش سطح پراش مشترک بررسی موردی منطقه گرابن راین آلمان: م. فیزیک زمین و فضا، ۳۹(۴)، ۳۱–۴۴.
 Cerveny, V., 2001, Seismic Ray Theory: Cambridge University Press, Cambridge.
 Hale, D., 1991, Dip Moveout Processing: Soc. Expl. Geophys., Tulsa.
 Hertweck, T., Schleicher, J., and Mann, J., 2007, Data-stacking beyond CMP: The Leading Edge, 26(7), 818–827.
 Höcht, G., de Bazelaire, E., Majer, P., and Hubral, P., 1999, Seismics and optics: Hyperbolae and curvatures: J. Appl. Geophys., 42(3,4), 261–281.
 Jäger, R., Mann, J., Höcht, G., and Hubral, P., 2001, Common-Reflection-Surface stack: Image and attributes: Geophysics, 66(1), 97–109.
 Mann, J., 2001, Common-Reflection-Surface stack and conflicting dips: In Extended abstracts, 63th EAGE Conference, Session P077.
 Mann, J., 2002, Extensions and applications of the Common-Reflection-Surface Stack method: Logos Verlag, Berlin.
 Mann, J., Jäger, R., Müller, T., Höcht, G., and Hubral, P., 1999, Common-Reflection-Surface stack – a real data example: J. Appl. Geophys., 42(3,4), 301–318.
 Müller, N.-A., 2006, Elimination of the spread-length bias in the Common-Reflection-Surface stack: In Expanded Abstracts, 76th Ann. Internat. Mtg., Soc. Expl. Geophys. 3006–3010.