

تضعیف امواج تکراری در داده‌های CMP با استفاده از تبدیل رادون سهمی

ویدا مینائیان^۱، عبدالرحیم جواهریان^{۲*} و ابوالفضل مسلمی^۳

^۱ کارشناس ارشد مهندسی اکتشاف نفت، دانشکده مهندسی معدن، متالورژی و نفت دانشگاه صنعتی امیرکبیر، تهران، ایران
^۲ استاد بازنشسته، گروه فیزیک زمین، مؤسسه ژئوفیزیک، دانشگاه تهران و استاد دانشکده مهندسی نفت دانشگاه صنعتی امیرکبیر، تهران، ایران
^۳ کارشناس ارشد ژئوفیزیک، شرکت عملیات اکتشاف نفت، تهران، ایران

(دریافت: ۸۸/۸/۲۳، پذیرش نهایی: ۸۸/۱۲/۱۸)

چکیده

هدف اصلی در پردازش داده‌های لرزه‌ای بازتابی، افزایش کیفیت سیگنال‌های واقعی از طریق تضعیف انواع گوناگون نوفه‌ها است. بازتاب‌های تکراری یکی از مهم‌ترین نوفه‌های همدوس در داده‌های لرزه‌ای محسوب می‌شوند که تضعیف آنها در لرزه‌نگاشت‌های بازتابی، همواره مسئله‌ای مهم در ژئوفیزیک اکتشافی بوده است. تبدیل رادون سهمی به‌طور گسترده در پردازش داده‌های لرزه‌ای برای تضعیف رویدادهای تکراری کاربرد دارد. در این روش ابتدا رویدادهای بازتابی هذلولی موجود در داده ورودی به سهمی تبدیل می‌شود و سپس داده‌ها به حوزه‌ای انتقال می‌یابند که در آن بازتاب‌های اولیه و تکراری به نقاطی قابل تفکیک تصویر می‌شوند. گام نهایی در این فرایند شامل تبدیل وارون بخشی از حوزه تبدیل حاوی انرژی تکراری و سپس کسر کردن آن از لرزه‌نگاشت اصلی است. در این مقاله تبدیل رادون سهمی و کاربرد آن در تضعیف امواج تکراری بررسی و براساس این روش برنامه نرم‌افزاری تدوین شده است. برنامه مذکور روی مدل‌های مصنوعی متفاوت شامل انواع گوناگون رویدادهای تکراری که در دورافت‌های متفاوت با رویدادهای اولیه یا با یکدیگر تداخل یافته‌اند، اعمال و نتایج مطلوبی عرضه شده است. همچنین این برنامه روی مجموعه‌ای از داده‌های واقعی نیز به کار گرفته شده است. از راه مقایسه نتایج حاصل از برنامه مورد استفاده با نتایج مربوط به نرم‌افزار Geocluster، کارایی برنامه تدوین شده مورد تأیید قرار گرفت.

واژه‌های کلیدی: تبدیل رادون سهمی، تضعیف امواج تکراری، نوفه همدوس، پردازش داده‌های لرزه‌ای

Multiple suppression in CMP data using parabolic Radon transform

Minaeian, V.¹, Javaherian, A.² and Moslemi, A.³

¹ M.Sc. in Petroleum Exploration Engineering, Faculty of Mining, Metallurgy and Petroleum Engineering, Amir Kabir University of Technology

² Retired Professor, Earth Physics Department, Institute of Geophysics, University of Tehran and presently at the Department of Petroleum Engineering, Amirkabir University of Technology, Tehran, Iran

³ M. Sc. in Geophysics, Oil Exploration Operations Co, Tehran, Iran

(Received: 14 Nov 2009, Accepted: 9 March 2010)

Abstract

Reflection seismic data consist of primary reflections, coherent and incoherent noises. One of the objectives of seismic data processing is to enhance the quality of the real signals by attenuating different kinds of noises. Multiples constitute one of the most troublesome forms of coherent noises in exploration seismology. Multiple reflections often destructively interfere with the desired primary reflections so identification and interpretation of the primary events would be difficult. So, the problem of multiple attenuation in reflection seismograms has always been of great importance. Radon transform that is based on a process which integrates the data along different curved surfaces, is a robust tool for suppressing multiples from seismic data. Like all transform

filter pairs, the Radon transform first forward transforms the data into a model parameter domain where the crossing primaries and multiples would be better separated. In the most common multiple attenuation process, multiples are windowed in the transform domain and reconstructed in the original domain using an inverse Radon transform. Then, the modeled multiples are subtracted from the original data to obtain a gather with primaries only.

Based on the form of the integrating surface, there are three types of Radon transforms: linear, hyperbolic and parabolic. The Parabolic Radon is a common tool in multiple attenuation based on the velocity discrimination. In this method, the first step is to replace hyperbolic events in a CMP gather with parabolas by applying NMO correction using velocities of primaries. Then the parabolic Radon domain is generated by summing the data along a set of parabolic paths, parameterized by a curvature, q , which intersect the zero-offset axis at the time τ . This procedure is repeated for each intercept time sample. Ideally, an approximately parabolic event should map into a point in the parabolic Radon domain. So the primaries and multiples would be separable in the new domain. Due to applying NMO correction using the velocities of primary events, the energy of primaries maps to events at around 0 ms moveout in the transform domain, while under-corrected multiples should map to higher moveouts. For attenuating the multiples, it is necessary to produce a model containing only the multiple events. This is done by filtering the primary energy in the Radon domain and then inverse transforming the remaining part of the Radon domain which contains multiples, back to the offset domain. In the final step the multiples-only gather is subtracted from the original data.

The parabolic Radon has different benefits that make it attractive. It achieves multiple attenuation equally at all offsets. Moreover, it does not require knowing the exact velocities of multiples and primaries and it needs no knowledge of the multiple generation mechanism. The most important limitation of the method is that multiples must have sufficient moveout discrimination in order to be attenuated. Experiences have shown that while in synthetic data very fine discrimination may be modeled, in real data with their variable amplitudes and waveforms and additive noise, at least 30 ms moveout is required for the transform to be effective.

In this paper, the parabolic Radon transform with its application in multiple suppression has been studied and MATLAB programming has been implemented. The code was successfully applied on different synthetic 2D models consisting of various multiple reflections, such as water-bottom multiples, simple multiples and interbed multiples, that interfere with primary reflections at near or far offsets. This code was also examined on a 2D real seismic data set. The validation of the program has been verified by comparing the obtained results with the results of Geocluster software.

Key words: Parabolic Radon transform, multiple attenuation, coherent noise, seismic data processing

۱ مقدمه

لرزه‌نگاری خشکی و هم در عملیات لرزه‌نگاری دریایی بسیار مشکل ساز هستند، به طوری که معمولاً در مقاطع لرزه‌ای ظاهر می‌شوند و در صورت قوی بودن دامنه‌شان ممکن است مانع ظاهر شدن سطوح بازتابنده عمیق‌تر در مقطع شوند. در داده‌های لرزه‌ای بسته به شرایط

امواج تکراری رویدادهایی هستند که بیش از یک بازتاب را پشت سر گذاشته‌اند. بازتاب‌های تکراری بین لایه‌ای یا درون آب (عملیات لرزه‌نگاری دریایی) یکی از مهم‌ترین انواع نوفه‌های همدوس در تحقیقات لرزه‌ای بازتابی اکتشافی محسوب می‌شوند. این نوفه‌ها، هم در عملیات

استفاده قرار داد و سپس تبدیل رادون سهمی را در مختصات کشیده شده محاسبه کرد. ساچی و اولریچ (۱۹۹۵) تبدیل رادون با قدرت تفکیک زیاد را عرضه کردند. آنها از یک الگوریتم بهبودیافته برای افزایش توانایی تبدیل در متمایز ساختن رویدادهای با منحنی برون‌راند مشابه استفاده کردند. کری (۱۹۹۸) نیز الگوریتم مشابه ساچی و اولریچ (۱۹۹۵) را با عرضه تبدیل رادون سهمی گسسته بررسی کرد. همچنین ساچی و پورسانی (۱۹۹۹) راهی برای کاهش هزینه محاسباتی تبدیل رادون با قدرت تفکیک زیاد پیشنهاد کردند.

در این مقاله کاربرد تبدیل رادون سهمی (همپسون، ۱۹۸۶) در تضعیف امواج تکراری مرور شده است و براساس این روش برنامه‌نویسی رایانه‌ای با استفاده از نرم‌افزار مطلب MATLAB صورت گرفته است. این برنامه بر سه مدل مصنوعی متفاوت شامل امواج تکراری مربوط به آب، امواج تکراری ساده و امواج تکراری بین‌لایه‌ای و مجموعه‌ای از داده واقعی اعمال شد و نتایج موافقی به دست داد.

۲. مروری بر تبدیل رادون

تبدیل رادون تابعی است که از یک خصوصیت فیزیکی محیط در امتداد یک مسیر معین مجموع‌یابی می‌کند (کائو و همکاران، ۲۰۰۳). تبدیل رادون پیشرو $u(r, \tau)$ یک تابع پیوسته $d(h, t)$ با رابطه انتگرالی زیر بیان می‌شود (بیلکین، ۱۹۸۷):

$$u(r, \tau) = \int_{-\infty}^{+\infty} d[h, t = \tau + \phi(r, h)] dh, \quad (1)$$

که در آن h و t متغیرهای ورودی و r و τ متغیرهای تبدیل هستند. انتگرال‌گیری در امتداد مسیرهایی که به صورت توابع خطی از زمان سیر t و τ بیان می‌شوند، صورت می‌گیرد. تبدیل رادون وارون با رابطه انتگرالی زیر بیان می‌شود:

ساختارهای زیرزمینی، مقدار و شدت انرژی امواج تکراری ثبت شده ممکن است به قدری زیاد باشد که تفسیر و تشخیص بازتاب‌های اولیه بسیار دشوار شود، زیرا این امواج اغلب با بازتاب‌های اولیه مورد بررسی، به‌طور مخرب تداخل می‌کنند. بنابراین برای بررسی و تعیین یک سطح بازتابنده هدف (مانند سنگ مخزن)، تضعیف امواج تکراری در حین مراحل پردازش امری ضروری است.

روش‌های زیادی برای تضعیف امواج تکراری گسترش یافته است که تبدیل رادون یکی از مهم‌ترین آنها است. تبدیل رادون ابزاری مشهور برای منظم‌سازی و پردازش داده‌های لرزه‌ای پیش از مهاجرت، تحلیل AVO و تفسیر چینه‌شناسی است. این تبدیل کاربردهای زیادی در ژئوفیزیک و به‌ویژه در لرزه‌نگاری بازتابی دارد. معمول‌ترین موارد استفاده از تبدیل رادون شامل تضعیف زمین‌غلت‌ها، نوفه‌های غیرهمدوس و امواج تکراری است. رادون (۱۹۱۷) تبدیل رادون را پایه‌گذاری کرد. چپمن (۱۹۸۱) تبدیل رادون تعمیم‌یافته را تعریف کرد که از داده‌ها در امتداد هر سطح منحنی‌وار انتگرال‌گیری می‌کند. انواع تبدیل رادون عبارت‌اند از: تبدیل خطی، تبدیل هندلولی و تبدیل سهمی. تریتل و همکاران (۱۹۸۲) به بررسی تبدیل رادون خطی (برانبارش مورب یا $\rho - \tau$) پرداختند. خواص اساسی تبدیل رادون را دورانی و بیست (۱۹۸۴) مورد آزمایش قرار دادند. تبدیل رادون هندلولی را اولین بار تورسون و کلربات (۱۹۸۵) برای بهبود نسبت سیگنال به نوفه در ورداشتهای CMP عرضه کردند. همپسون (۱۹۸۶) پیشنهاد کرد که به جای استفاده از تبدیل وابسته به زمان هندلولی، رویدادهای لرزه‌ای هندلولی به‌نحوی به سهمی تبدیل شوند و در نتیجه، تبدیل سهمی به‌کار برده شود. این کار با تصحیح NMO روی ورداشتهای CMP با تابع سرعتی نزدیک به بازتاب‌های اولیه امکانپذیر است. ایلماز (۱۹۸۹) برای تبدیل رویدادهای هندلولی به سهمی، روش کشیدگی t^1 را مورد

خطی از رویدادهای هذلولی ساده با دامنه ثابت، مدل می‌شود. بخش بزرگی از هزینه محاسباتی این فرایند را می‌توان با شکل هذلولی رابطه برون‌راند مرتبط دانست. تغییر این رابطه به نحوی که به جای هذلولی، از روند سهمی تبعیت کند، سبب ساده شدن دستگاه خطی مورد حل و کاهش هزینه محاسباتی می‌شود. همپسون (۱۹۸۶) پیشنهاد کرد خطاهای برون‌راند پس از اعمال تصحیح NMO، روند تقریباً سهمی دارند و در نتیجه هذلولی‌های موجود در لرزه‌نگاشت ورودی با رویدادهای تقریباً سهمی جایگزین می‌شوند. بنابراین همپسون (۱۹۸۶) لرزه‌نگاشت ورودی را درحکم ترکیبی خطی از سهمی‌ها مدل کرد و از تبدیل رادون سهمی استفاده برد.

در روشی که همپسون (۱۹۸۶) عرضه کرده است ابتدا برداشت CMP ورودی تحت تصحیح NMO قرار می‌گیرد. پس از تصحیح NMO برون‌راند رویدادهای اولیه صفر خواهد بود و برون‌راند باقی‌مانده رویدادهای تکراری از یک روند تقریباً سهمی پیروی خواهد کرد. یک برداشت CMP با یک رویداد اولیه و یک تکراری در زمان برخوردگاه یکسان t_0 در نظر گرفته می‌شود. اگر سرعت رویداد تکراری برابر با v باشد، پس از اعمال تصحیح NMO با استفاده از سرعت رویداد اولیه (v_{NMO}) منحنی زمان سیر رویداد تکراری با رابطه زیر بیان می‌شود (ساجی، ۲۰۰۲):

$$t_n = t_0 + \sqrt{t_0^2 + h^2/v^2} - \sqrt{t_0^2 + h^2/v_{NMO}^2}. \quad (3)$$

با بسط رابطه (۳) در یک سری تیلور (و در نظر گرفتن جملات تا درجه دوم) به دست می‌آید:

$$t_n \approx t_0 + \frac{1}{2t_0 v^2} h^2 - \frac{1}{2t_0 v_{NMO}^2} h^2 = \tau + qh^2, \quad (4)$$

که رابطه (۴) بیان‌کننده معادله یک سهمی است که در آن τ زمان دورافت صفر دوطرفه (t_0) و q پارامتر

$$d(h,t) = \int_{-\infty}^{+\infty} \rho(\tau) * u[r, \tau = t - \phi(r,h)] dr, \quad (2)$$

که شامل هم‌میخت $u(r,\tau)$ با فیلتر $\rho(\tau)$ پیش از انتگرال‌گیری است. برای داده دوبعدی $d(h,t)$ ، فیلتر $\rho(\tau)$ دارای تبدیل فوریه به صورت $\sqrt{\omega} e^{i\pi/4}$ است، که در آن ω بسامد زمانی است. شایان ذکر است که در عمل، داده‌های ورودی داده‌هایی هستند که به صورت گسسته در حوزه زمان-مسافت نمونه‌برداری شده‌اند و توابع پیوسته نیستند. بنابراین انتگرال‌های روابط (۱) و (۲) باید با مجموع‌یابی‌های گسسته جایگزین شوند. سه صورت متفاوت برای تابع $\phi(r,h)$ در رابطه (۱) را می‌توان بررسی و در نتیجه تبدیل رادون گسسته هذلولی، سهمی و خطی را تعریف کرد (ایلماز، ۲۰۰۱).

امواج تکراری در حوزه $\tau-p$ (رادون خطی یا برانبارش مورب) خصوصیت تناوبی دارند و می‌توان از واهمامیختی پیش‌بینی‌شونده برای تضعیف تکراری‌ها در این حوزه استفاده کرد. از تبدیل رادون سهمی و هذلولی می‌توان برای تضعیف رویدادهای تکراری، براساس اختلاف سرعت بهره برد. خطاهای برون‌راند رویدادهای هذلولی موجود در لرزه‌نگاشت، پس از اعمال تصحیح NMO روند تقریباً سهمی دارند و در حوزه رادون سهمی به نقاطی تصویر می‌شوند. تبدیل رادون هذلولی نیز می‌تواند رویدادهای هذلولی را به نقاطی تصویر کند و در نتیجه امواج اولیه و تکراری را از یکدیگر متمایز سازد (کائو و همکاران، ۲۰۰۳).

۳ کاربرد تبدیل رادون سهمی در تضعیف رویدادهای تکراری

برانبارش سرعتی وارون نامی است برای فرایندی که تورسون و کلربات (۱۹۸۵) در مدل‌سازی رویدادهای هذلولی روی رکوردهای لرزه‌ای به کار بردند. در این الگوریتم، نیم‌رخ لرزه‌ای ثبت شده به صورت یک ترکیب

می‌شود. سپس حوزه تبدیل $u(q, \tau)$ از رابطه زیر محاسبه می‌شود:

$$\mathbf{u} = (\mathbf{L}^T \mathbf{L} + \beta I)^{-1} \mathbf{L}^T \mathbf{d}, \quad (8)$$

که برای هر ω_n ، $\mathbf{u}: u(q, \omega_n)$ و $\mathbf{d}: d(h, \omega_n)$ به ترتیب بردارهای مختلطی از q و h می‌باشند. T نشان‌دهنده ترانهاده ماتریس L و علامت ستاره نشان‌دهنده مزدوج مختلط است. برای اجتناب از تکنیکی یا شبه‌تکنیکی در ماتریس $(\mathbf{L}^T \mathbf{L})$ ، راه‌حل با به‌کارگیری یک ضریب میرایی β در رابطه (۸) محدود شده است که I ماتریس واحد است. L ماتریس مختلطی به صورت زیر است:

$$\mathbf{L} = \begin{pmatrix} e^{-i\omega_n q_1 h_1^2} & e^{-i\omega_n q_2 h_1^2} & \dots & e^{-i\omega_n q_n h_1^2} \\ e^{-i\omega_n q_1 h_2^2} & e^{-i\omega_n q_2 h_2^2} & \dots & e^{-i\omega_n q_n h_2^2} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ e^{-i\omega_n q_1 h_m^2} & e^{-i\omega_n q_2 h_m^2} & \dots & e^{-i\omega_n q_n h_m^2} \end{pmatrix}, \quad (9)$$

که ابعاد $m \times n = n_h \times n_q$ دارد؛ n_h تعداد دورافت‌ها، و n_q تعداد پارامترهای q مورد استفاده در تبدیل است. به علت خصوصیت شبه‌تکین ماتریس مختلط L ، به‌خصوص برای مقادیر کوچک ω_n ، می‌توان از تجزیه تک‌مقداری (singular value decomposition) ماتریس L استفاده کرد. این فرایند L را به حاصل ضرب سه ماتریس تجزیه می‌کند:

$$\mathbf{L} = \mathbf{U} \mathbf{\Lambda} \mathbf{V}^T. \quad (10)$$

۳-۱ مراحل تبدیل رادون سهمی گسسته

با توجه به مطالب فوق، تبدیل رادون سهمی گسسته (همپسون، ۱۹۸۶) را می‌توان طبق مراحل زیر دسته‌بندی کرد (ایلماز، ۲۰۰۱):

تعیین‌کننده انحنای مسیر سهمی و h نصف دورافت است. سهمی حاصل را می‌توان با پارامتر برون‌راند زمانی باقی‌مانده در دورافت دور نیز بیان کرد:

$$t = \tau + q \frac{h^2}{h_{\max}^2}, \quad (5)$$

که در آن پارامتر q برابرست با اختلاف زمانی بین زمان دورافت صفر و زمان دورافت دور.

در مختصات ورداشت تصحیح شده NMO، تبدیل گسسته داده‌های CMP از حوزه دورافت به حوزه رادون و برعکس، به ترتیب با روابط زیر بیان می‌شود (ایلماز، ۲۰۰۱):

$$u(q, \tau) = \sum_h d(h, t_n = \tau + qh^2). \quad (6)$$

و

$$d'(h, t_n) = \sum_q u(q, \tau = t_n - qh^2). \quad (7)$$

که در آن $d(h, t_n)$ ورداشت CMP ورودی تصحیح شده NMO، $u(q, \tau)$ حوزه رادون سهمی و $d'(h, t_n)$ ورداشت CMP مدل شده است. تکرار در تبدیل از حوزه رادون به حوزه دورافت با استفاده از روابط (۶) و (۷) نمی‌تواند داده ورودی اصلی را به‌طور دقیق بازسازی کند. این مسئله نشان می‌دهد که تبدیل‌های گسسته روابط (۶) و (۷) دقیقاً وارون یکدیگر نیستند. برای حل این مشکل از روش حداقل مربعات استفاده می‌شود (تورسون و کلربات، ۱۹۸۵). هدف، برآورد تبدیل $u(q, \tau)$ به گونه‌ای است

که مقدار اختلاف بین ورداشت CMP ورودی تصحیح شده NMO $d(h, t_n)$ و ورداشت مدل شده $d'(h, t_n)$ از نظر حداقل مربعات کمینه شود. برای نیل به این هدف ابتدا تبدیل فوریه در راستای متغیر زمانی بر ورداشت CMP $d(h, t_n)$ اعمال که در نتیجه ω_n جایگزین t_n

همه دورافت‌ها به میزان یکسان صورت می‌گیرد. همچنین نیازی به دانستن سازوکار تولید امواج تکراری و سرعت دقیق امواج اولیه و تکراری وجود ندارد. زیرا اگرچه رویدادهای اولیه باید تصحیح NMO شوند ولی ضرورتی ندارد که این تصحیح کاملاً دقیق باشد. با این روش می‌توان گستره زیادی از امواج تکراری با برون‌راندهای گوناگون را تضعیف کرد. این روش برای ژئومتری‌های غیریکنواخت و متغیر نیز مناسب است.

یکی از مهم‌ترین محدودیت‌های این روش آن است که امواج تکراری باید دارای تفاوت برون‌راند کافی با امواج اولیه باشند تا بتوان آنها را تضعیف کرد. تجربه نشان داده است که درحالی‌که تفاوت برون‌راند کم را می‌توان روی داده‌های مصنوعی مدل کرد، در داده‌های واقعی که تغییر دامنه و تغییرشکل موجک موجود است و نوفه نیز حضور دارد، وجود برون‌راند حداقل ۳۰ میلی‌ثانیه از دورافت نزدیک تا دورافت دور برای مؤثر بودن روش ضروری است. از دیگر محدودیت‌های این روش اثرات مصنوعی است که می‌تواند در ضمن تبدیل ایجاد شود و در نتیجه به دامنه رویدادهای بازسازی شده از حوزه رادون آسیب برساند. این اثرات مصنوعی ممکن است ناشی از قطع‌شدگی داده‌ها، دورافت‌های مفقود شده و دگرنامی باشند (کبیر و مرفورت، ۱۹۹۹؛ کری، ۱۹۹۸؛ هارگریوز و همکاران، ۲۰۰۱). برای غلبه بر مشکلات ناشی از اثرات مصنوعی می‌توان از راه‌حلهایی مانند نرم کردن داده‌ها، وزن‌دهی به داده‌ها، اعمال محدودیت در ضمن انتخاب پارامترهای تبدیل (شونویل و دویجندام، ۲۰۰۱) و تبدیل رادون سهمی با قدرت تفکیک زیاد (ساچی و پورسانی، ۱۹۹۹) استفاده کرد.

۴ مدل‌سازی

در اینجا برای تضعیف امواج تکراری با استفاده از تبدیل رادون سهمی، برنامه‌نویسی رایانه‌ای با نرم‌افزار مطلب

- شروع با یک برداشت CMP، $d(h,t)$ و اعمال تصحیح NMO بر آن، $d(h,t_n)$.

- تبدیل فوریه در راستای t_n ، $d(h,\omega_n)$.

- برای هر ω_n ، تشکیل دادن ماتریس L (رابطه (۹)) و حل آن برای u از رابطه (۸) با استفاده از تجزیه تک‌مقداری.

- تبدیل فوریه معکوس برای رسیدن به تبدیل رادون سهمی، $u(q,\tau)$.

- اجرای یک عملگر دلخواه، مانند حذف منطقه بازتاب‌های اولیه یا تکراری، در حوزه رادون سهمی. از آنجا که مدل ورودی تحت تصحیح برون‌راند نرمال قرار گرفته است، می‌توان انتظار داشت که انرژی اولیه در حوزه تبدیل به نزدیکی برون‌راند صفر تصویر شود، درحالی‌که تکراری‌ها کمتر از حد تصحیح شده‌اند و در نتیجه به برون‌راندهای بالاتر تصویر می‌شوند. برای تضعیف امواج تکراری باید بتوان مدلی ایجاد کرد که فقط شامل انرژی تکراری باشد. این کار با فیلتر کردن یا صفر کردن بخش مربوط به امواج اولیه (که در نزدیکی برون‌راند صفر تصویر شده‌اند) صورت می‌گیرد.

- اجرای تصویرسازی وارون به حوزه دورافت برای رسیدن به برداشت CMP مدل شده تصحیح شده NMO، $d'(h,t_n)$. در ضمن این تصویرسازی وارون، بازتاب‌های تکراری، بازتاب‌های اولیه یا همه رویدادهای هذلولی را می‌توان بازسازی کرد.

- بازگرداندن تصحیح برون‌راند برای رسیدن به برداشت CMP مدل شده، $d'(h,t)$. برای تضعیف امواج تکراری مدلی که تنها انرژی تکراری را شامل می‌شود از داده اصلی کسر می‌شود.

۲-۳ مزایا و محدودیت‌های تبدیل رادون سهمی

از خصوصیات مهم تبدیل رادون سهمی می‌توان به این مسئله اشاره کرد که در آن تضعیف امواج تکراری در

۰/۸ ثانیه، با فواصل ۵ میلی‌ثانیه در محاسبه حوزه رادون استفاده شده است. سپس بخش‌های مربوط به رویدادهای اولیه فیلتر شده است و رویدادهای تکراری باقی‌مانده به حوزه دورافت بازگردانده و در شکل ۱-د نمایش داده شده است. به‌منظور تضعیف امواج تکراری، شکل ۱-د از شکل ۱-ب کسر شده است (شکل ۱-ه).

در مدل دوم بازتاب‌های تکراری ساده مربوط به دو بازتابنده وجود دارد که در دورافت‌های نزدیک و دور، رویدادهای اولیه و همچنین یکدیگر را قطع کرده‌اند. برداشت CMP ورودی در شکل ۲-الف ملاحظه می‌شود. P1 تا P7 بیانگر بازتاب‌های اولیه، P1-M1 تا P1-M6 بیانگر بازتاب‌های تکراری ساده ناشی از اولین بازتابنده، و P3-M1 و P3-M2 بیانگر بازتاب‌های تکراری ساده ناشی از سومین بازتابنده هستند. طول رکورد ۳ ثانیه و فاصله نمونه‌برداری و دورافت‌ها مانند مدل قبل است. شکل ۲-ب نتیجه اعمال تصحیح NMO بر این مدل را نشان می‌دهد. شکل ۲-ج تصویرسازی داده‌ها به حوزه رادون را، با استفاده از پارامترهای q بین $0/4-$ تا $0/5+$ ثانیه، با فواصل ۴ میلی‌ثانیه، نمایش می‌دهد. در شکل ۲-د رویدادهای تکراری مدل شده مشاهده می‌شود. با کسر کردن این شکل از شکل ۲-ب، شکل ۲-ه به دست می‌آید که در آن بازتاب‌های تکراری به خوبی تضعیف شده‌اند.

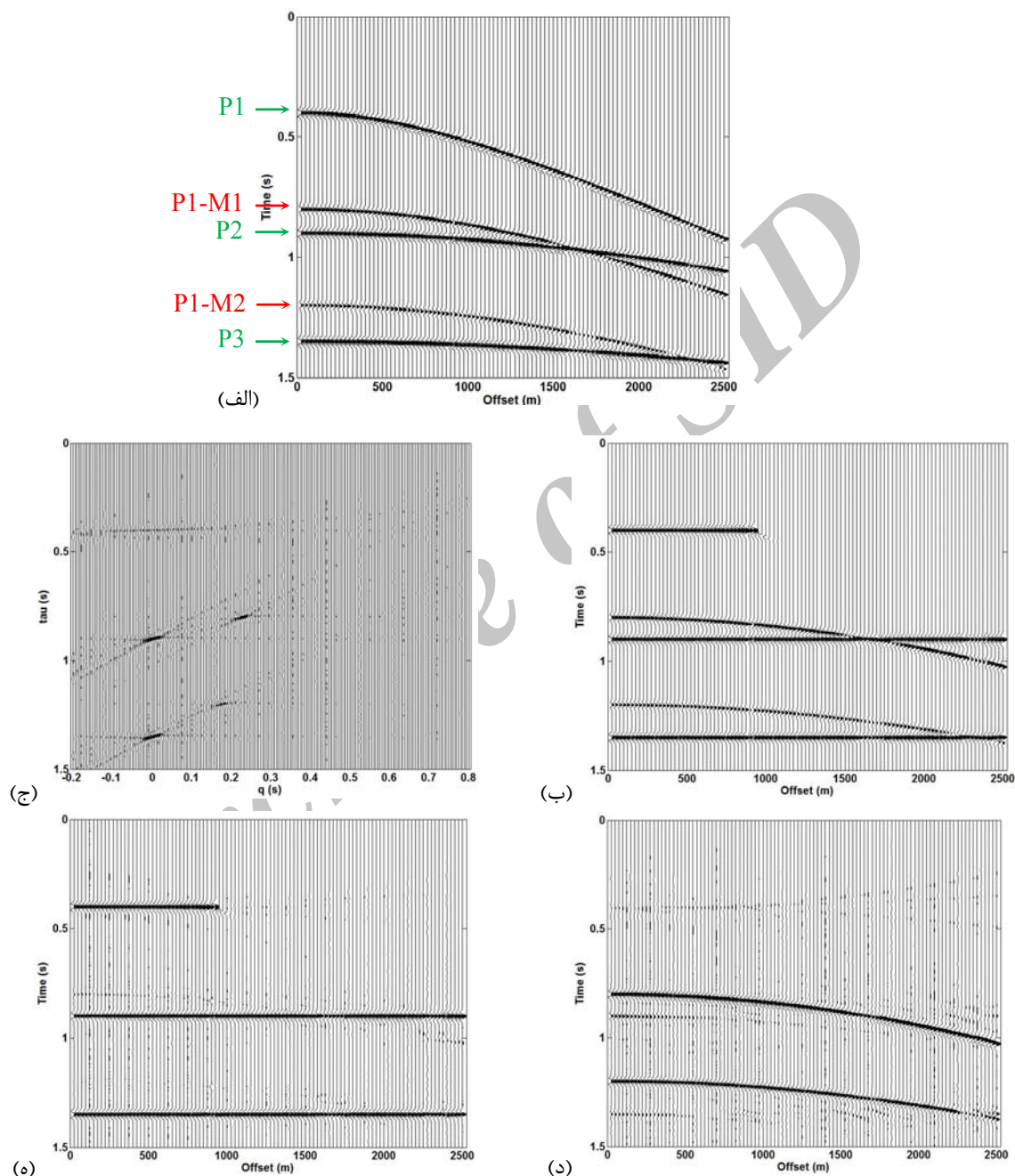
مدل سوم دارای دو نوع بازتاب تکراری درون لایه آب و بین لایه‌ای است (شکل ۳). این مدل شامل بازتابنده کف دریا، WB و چهار بازتاب اولیه P1 تا P4 است. در این مدل همچنین تکراری‌های درون لایه آب مرتبه اول تا چهارم مربوط به WB، WB-M1 تا WB-M4 و تکراری‌های بین لایه‌ای مربوط به بازتابنده سوم، P3-M1 تا P3-M3، که بین بازتابنده دوم و سوم بازتاب تکراری کرده‌اند، وجود دارد (شکل ۳-الف). طول رکورد، فاصله نمونه‌برداری و دورافت‌ها مانند مدل قبل است. در شکل ۳-ب تصحیح NMO بر شکل ۳-الف اعمال شده است.

صورت گرفته است و نتیجه اعمال برنامه بر مدل‌های مصنوعی گوناگون، عرضه شده است. مدل‌های مصنوعی به صورت برداشت‌های CMP هستند و با نرم‌افزار Promax تولید شده‌اند و سپس تحت تصحیح NMO قرار گرفته‌اند. برای اعمال تصحیح NMO از سرعت رویدادهای اولیه استفاده شده است. به این ترتیب، پس از تصحیح NMO رویدادهای اولیه به خط می‌شوند، درحالی‌که رویدادهای تکراری کمتر از حد تصحیح می‌شوند. بنابراین در حوزه رادون سهمی، بازتاب‌های اولیه به حوالی $q=0$ ، و بازتاب‌های تکراری به مقادیر q بالاتر تصویر می‌شوند. پس از وارد کردن داده‌ها به برنامه ابتدا تبدیل فوریه در جهت زمان بر داده‌ها اعمال می‌شود، سپس داده‌ها به حوزه رادون انتقال می‌یابند و از آنها تبدیل فوریه وارون گرفته می‌شود. در مرحله بعد بخش دربردارنده بازتاب‌های اولیه در حوزه رادون فیلتر می‌شود و بقیه نقاط که مربوط به انرژی تکراری است به حوزه X-t بازگردانده می‌شود. در نهایت مدل شامل رویدادهای تکراری از داده اولیه کسر می‌شود.

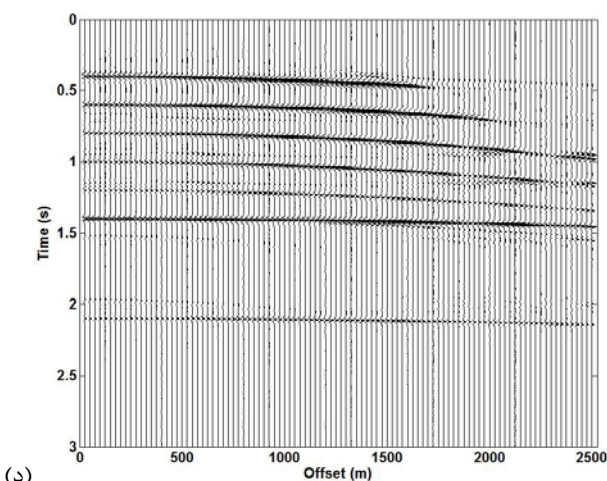
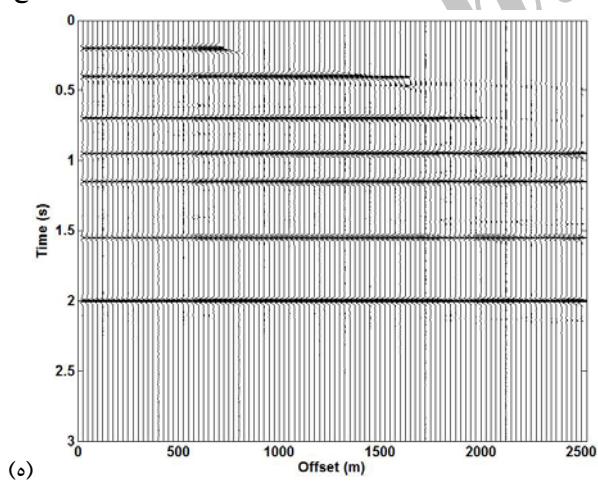
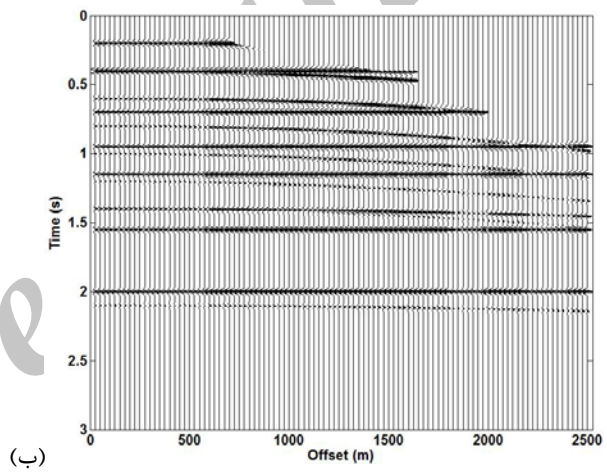
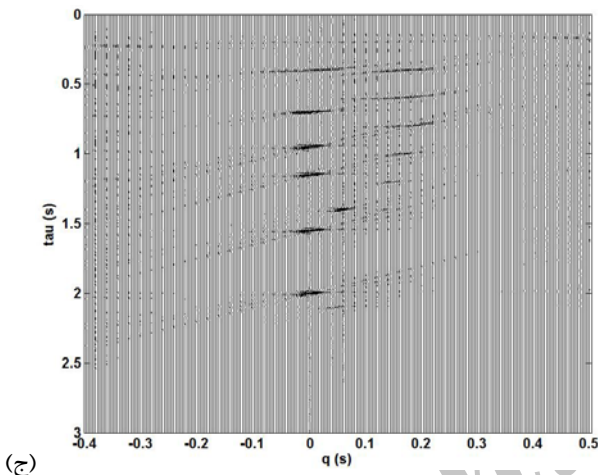
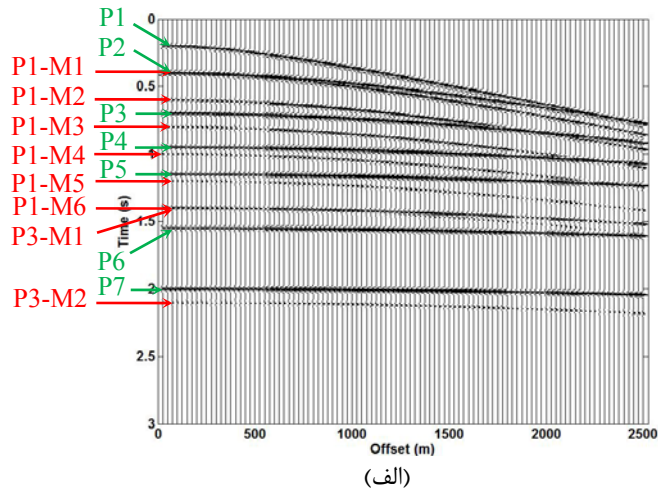
اولین مدل (شکل ۱) شامل سه بازتاب اولیه P1، P2 و P3 و دو بازتاب تکراری ساده مرتبه اول و دوم P1-M1 و P1-M2 ناشی از اولین بازتابنده است که با دو بازتابنده دیگر متقاطع‌اند. در این مدل بازتاب‌های تکراری در دو دورافت متفاوت (متوسط و دور) با رویدادهای اولیه متقاطع‌اند. داده ورودی در شکل ۱-الف در حوزه دورافت رسم شده است. طول رکورد، ۱/۵ ثانیه و فاصله نمونه‌برداری ۴ میلی‌ثانیه است. دورافت نزدیک و فاصله بین دورافت‌ها برابر با ۲۵ متر است. در شکل ۱-ب تصحیح NMO بر داده ورودی صورت گرفته است. بخش‌هایی از رویدادها در اثر صامت کردن قسمت‌های کشیده شده پس از اعمال تصحیح NMO از بین رفته‌اند. در شکل ۱-ج نتیجه تبدیل رادون سهمی داده‌های شکل ۱-ب مشاهده می‌شود. از تعداد ۲۰۱ پارامتر q ، از ۰/۲ تا

شکل ۳-د به حوزه $x-t$ تصویر شده‌اند. شکل ۳-ه از تفریق این شکل از شکل ۳-ب به دست آمده است که هر دو دسته رویداد تکراری در آن به میزان مناسبی تضعیف شده‌اند.

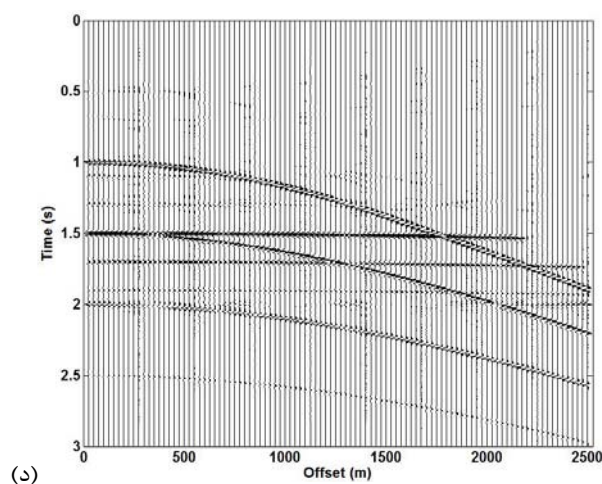
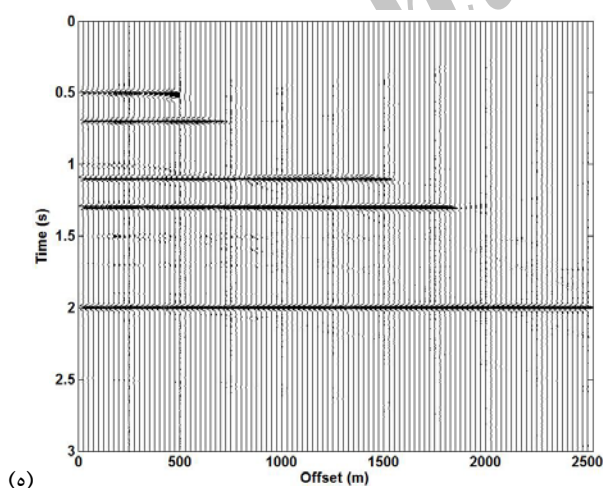
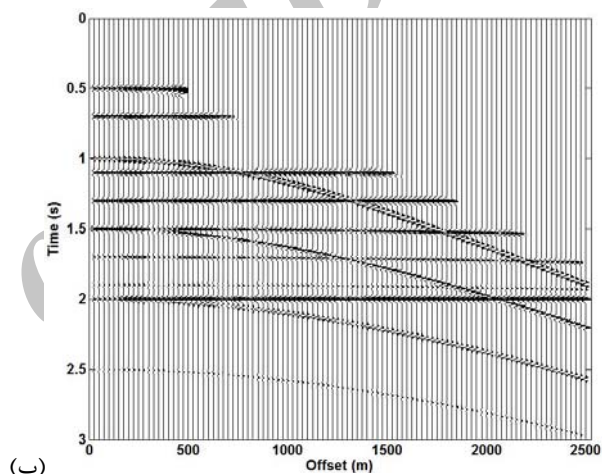
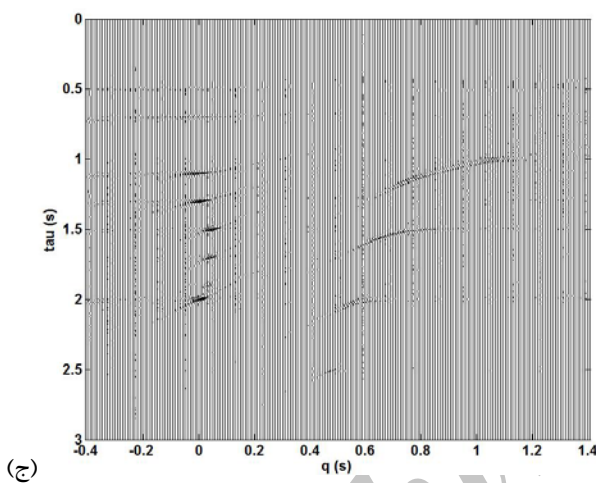
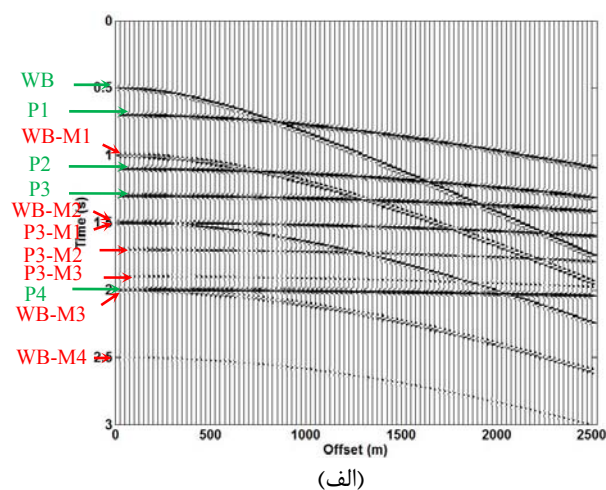
در شکل ۳-ج داده‌ها به حوزه رادون سهمی انتقال داده شده‌اند. از تعداد ۲۰۱ پارامتر q ، از $-۰/۴$ تا $۱/۴$ ثانیه، با فواصل ۹ میلی ثانیه استفاده شده است. رویدادهای تکراری حاصل از صامت کردن انرژی اولیه در حوزه رادون، در



شکل ۱. فرایند تضعیف امواج تکراری در مدل شماره یک با استفاده از برنامه تدوین شده: (الف) ورداشت CMP ورودی: P1، P2 و P3 بازتاب‌های اولیه و P1-M2 و P1-M1 دو بازتاب تکراری ساده مرتبه اول و دوم ناشی از اولین بازتابنده‌اند، (ب) نتیجه اعمال تصحیح NMO بر (الف)، (ج) حوزه رادون سهمی (ب)، (د) رویدادهای تکراری مدل شده و (ه) ورداشت CMP شامل رویدادهای اولیه مدل شماره یک که حاصل تفریق کردن (د) از (ب) است (مینائیان، ۱۳۸۷).



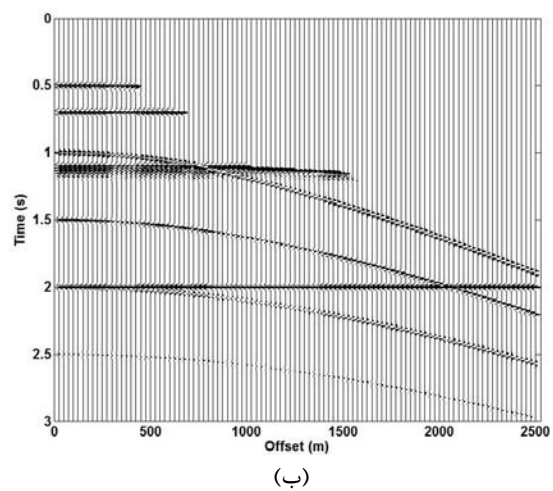
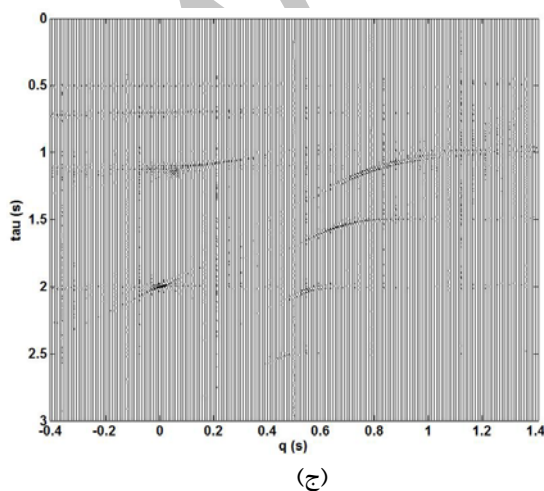
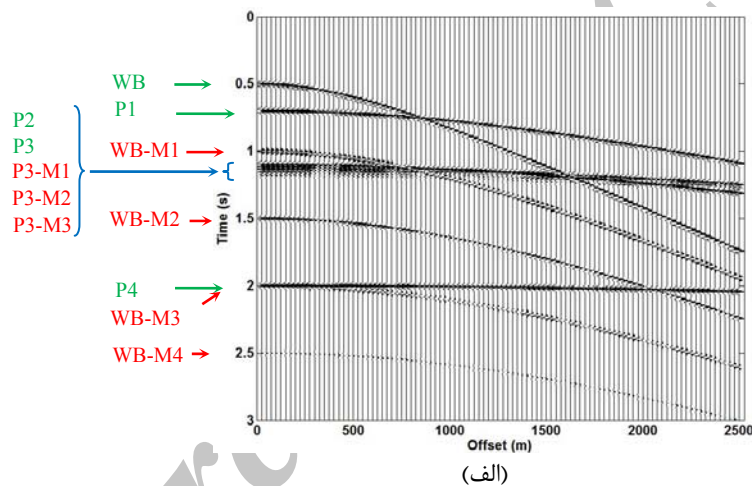
شکل ۲. فرایند تضعیف امواج تکراری در مدل شماره دو با استفاده از برنامه تدوین شده: (الف) برداشت CMP ورودی: P1 تا P7 بازتاب‌های اولیه، P1-M1 تا P1-M6 بازتاب‌های تکراری ساده ناشی از اولین بازتابنده و P3-M1 و P3-M2 بازتاب‌های تکراری ساده ناشی از سومین بازتابنده‌اند، (ب) برداشت ورودی پس از اعمال تصحیح NMO، (ج) حوزه رادون سهمی (ب)، (د) رویدادهای تکراری مدل شده و (ه) برداشت CMP شامل رویدادهای اولیه مدل شماره دو که نتیجه تفریق (د) از (ب) است.

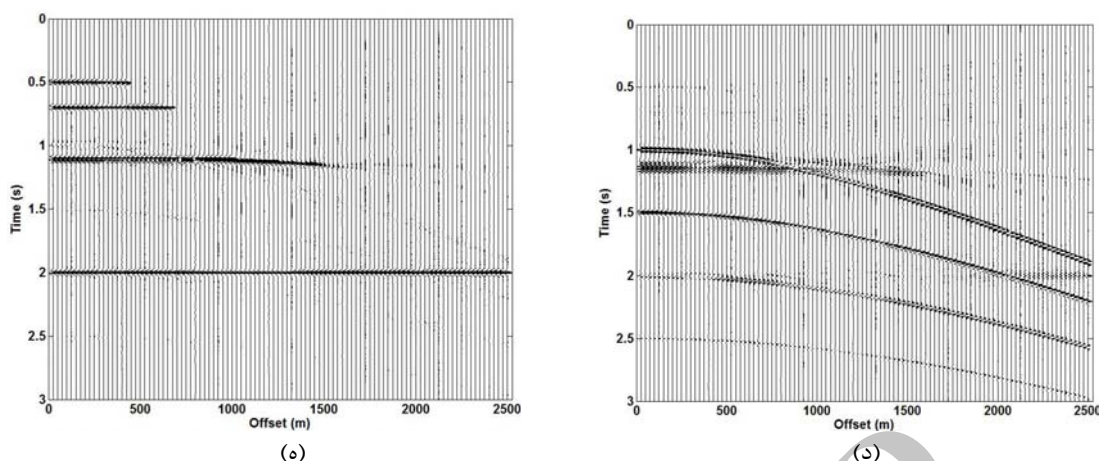


شکل ۳. فرایند تضعیف امواج تکراری در مدل شماره سه با استفاده از برنامه تدوین شده: (الف) برداشت CMP ورودی. WB: بازتابنده کف دریا، P1 تا P4: چهار بازتاب اولیه، WB-M1 تا WB-M4: بازتاب‌های تکراری درون لایه آب، P3-M1 تا P3-M3: بازتاب‌های تکراری بین لایه‌ای مربوط به بازتابنده سوم، (ب) نتیجه اعمال تصحیح NMO بر برداشت ورودی، (ج) حوزه رادون سهمی (ب)، (د) رویدادهای تکراری مدل شده و (ه) برداشت CMP شامل رویدادهای اولیه مدل شماره سه که نتیجه تفریق (د) از (ب) است (میناتیان و همکاران، ۲۰۰۹).

مشاهده می‌شود رویدادهای تکراری بین لایه‌ای در این حوزه بسیار به رویداد اولیه مربوطه نزدیک‌اند ولی تا حد مناسبی قابل تفکیک از آن هستند. شکل ۴-د رویدادهای تکراری مدل شده را نشان می‌دهد. با کسر کردن این شکل از شکل ۴-ب، شکل ۴-ه به دست می‌آید که در آن امواج تکراری به میزان قابل قبولی تضعیف شده‌اند. اما در صورتی که فاصله زمانی دو بازتابنده کمتر از این حد باشد، تضعیف رویدادهای تکراری بین لایه‌ای حاصل، دیگر با این برنامه مقدور نخواهد بود، زیرا در این حالت رویدادهای اولیه و تکراری در حوزه رادون به قدری به یکدیگر نزدیک می‌شوند که قابل تفکیک از هم نخواهند بود.

به منظور بررسی کارایی برنامه تدوین شده در مورد امواج تکراری بین لایه‌ای، فاصله زمانی دو بازتابنده‌ای که امواج تکراری بین لایه‌ای در آن بازتاب تکراری داشته‌اند، از ۲۰۰ میلی‌ثانیه در مدل پیشین به ۲۰ میلی‌ثانیه کاهش داده شد. بقیه شرایط همانند مدل قبل است. در شکل ۴-الف ورداشت CMP ورودی در حوزه دورافت نمایش داده شده است. همان‌طور که مشاهده می‌شود رویدادهای تکراری بین لایه‌ای مربوط به بازتابنده سوم کاملاً با آن تداخل یافته‌اند. در شکل ۴-ب نتیجه اعمال تصحیح NMO بر داده ورودی نشان داده شده است. در شکل ۴-ج داده‌ها با به کارگیری همان تعداد پارامتر q مورد استفاده در مدل قبل به حوزه رادون انتقال یافته‌اند. همان‌طور که





شکل ۴. ورداشت CMP شکل ۳ در حالتی که فاصله زمانی بین بازتابنده دوم و سوم به ۲۰ میلی‌ثانیه کاهش داده شده است. (الف) ورداشت CMP ورودی. WB: بازتابنده کف دریا، P1 تا P4: چهار بازتاب اولیه، WB-M1 تا WB-M4: بازتاب‌های تکراری درون لایه آب، P3-M1 تا P3-M3: بازتاب‌های تکراری بین لایه‌ای مربوط به بازتابنده سوم، (ب) نتیجه اعمال تصحیح NMO بر ورداشت ورودی، (ج) حوزه رادون سهمی (ب)، (د) رویدادهای تکراری مدل شده و (ه) ورداشت CMP ورودی پس از تضعیف امواج تکراری، که نتیجه تفریق (د) از (ب) است.

۵ داده واقعی

در این بخش نحوه عملکرد برنامه تدوین شده بر مجموعه‌ای از داده‌های واقعی مربوط به عملیات دریایی در ناحیه خلیج فارس نشان داده می‌شود. شکل ۵-الف ورداشت CMP ورودی را نشان می‌دهد که با استفاده از سرعت رویدادهای اولیه تحت تصحیح NMO قرار گرفته است و بنابراین رویدادهای اولیه مسطح شده‌اند و رویدادهای تکراری کمتر از حد تصحیح شده‌اند. در این داده‌ها فاصله نمونه‌برداری زمانی ۴ میلی‌ثانیه، فاصله بین ردلرزه‌ها ۵۰ متر و دورافت نزدیک برابر با ۹۲ متر است. این داده‌ها به حوزه رادون سهمی انتقال یافته‌اند و پس از صامت کردن بخش‌های شامل انرژی اولیه، نقاط باقی‌مانده که مربوط به بازتاب‌های تکراری‌اند، به حوزه $x-t$ بازگردانده شده‌اند. شکل ۵-ب بازتاب‌های تکراری مدل شده را نشان می‌دهد. در شکل ۵-ج ورداشت CMP ورودی پس از تضعیف امواج تکراری نمایش داده شده است که در نتیجه کسر کردن شکل ۵-ب از شکل ۵-الف به دست آمده است. همان‌طور که مشاهده می‌شود، برنامه تدوین شده در تضعیف امواج تکراری در داده‌های

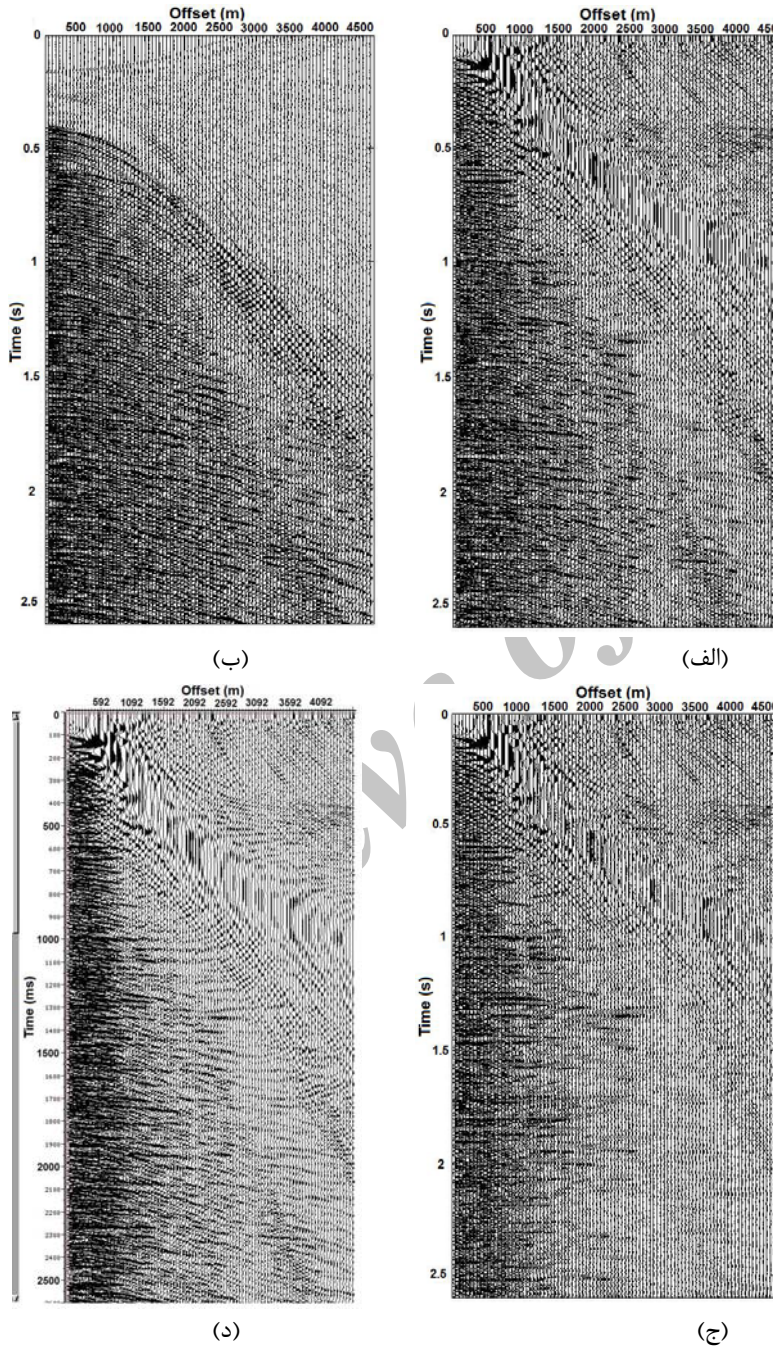
واقعی نیز موفق عمل کرده است. عمل تضعیف رویدادهای تکراری در ورداشت CMP واقعی شکل ۵-الف در نرم‌افزار Geocluster نیز صورت گرفت که نتیجه آن در شکل ۵-د آورده شده است. از مقایسه این شکل با شکل ۵-ج می‌توان نتیجه گرفت که برنامه تدوین شده، از قابلیت مطلوبی در تضعیف رویدادهای تکراری برخوردار است.

۶ نتیجه‌گیری

تبدیل رادون سهمی روشی قوی در تضعیف رویدادهای تکراری براساس اختلاف سرعت است؛ به این معنی که اگر رویدادهای اولیه و تکراری در یک زمان دورافت صفر موردنظر، سرعت‌های RMS گوناگونی داشته باشند، به بخش‌های متفاوت حوزه تبدیل تصویر، و از یکدیگر تفکیک می‌شوند. با این روش می‌توان گستره زیادی از امواج تکراری با برون‌راند‌های متفاوت را تضعیف کرد. نتایج حاصل از به‌کارگیری برنامه تدوین شده در MATLAB براساس تبدیل رادون سهمی روی مدل‌های مصنوعی متفاوت روشن ساخت که این برنامه قادر است

با یکدیگر تداخل یافته‌اند، به نقاط قابل تفکیک در حوزه رادون سهمی تصویر کند و آنها را به خوبی تضعیف سازد.

امواج تکراری گوناگونی از جمله امواج تکراری مربوط به آب، امواج تکراری ساده و امواج تکراری بین لایه‌ای را که در دورافت‌های نزدیک تا دور با رویدادهای اولیه یا



شکل ۵. نتیجه تضعیف امواج تکراری در یک مجموعه داده واقعی مربوط به ناحیه خلیج فارس با استفاده از برنامه تدوین شده و مقایسه نتایج حاصل با نتایج مربوط به نرم‌افزار Geocluster. (الف) برداشت CMP ورودی که با استفاده از سرعت رویدادهای اولیه تحت تصحیح NMO قرار گرفته است، (ب) رویدادهای تکراری مدل شده در حوزه $x-t$ ، (ج) برداشت ورودی پس از تضعیف رویدادهای تکراری با استفاده از کسر کردن (ب) از (الف)، و (د) نتیجه تضعیف بازتاب‌های تکراری در برداشت CMP واقعی شکل (الف) با استفاده از نرم‌افزار Geocluster.

Sacchi, M. D., 2002, Statistical and transform methods in geophysical signal processing, Department of Physics, University of Alberta.

Sacchi, M. D. and Porsani, M., 1999, Fast high resolution parabolic Radon transform. 69th SEG meeting, Houston, Expanded Abstracts, 1477-1480.

Sacchi, M. D. and Ulrych, T. J., 1995, High-resolution velocity gathers and offset space reconstruction. *Geophysics*, **60**, 1169-1177.

Schonewille, M. A. and Duijndam, A. J. W., 2001, Parabolic Radon transform, sampling and efficiency. *Geophysics*, **66**, 667-678.

Thorson, J. R. and Claerbout, J. F., 1985, Velocity-stack and slant-stack stochastic inversion. *Geophysics*, **50**, 2727-2741.

Treitel, S., Gutowski, P. R. and Wagner, D. E., 1982, Plane-wave decomposition of seismograms. *Geophysics*, **47**, 1375-1401.

Yilmaz, O., 1989, Velocity stack processing. *Geophysical Prospecting*, **37**, 357-382.

Yilmaz, O., 2001, *Seismic data analysis*, SEG, 2027 pp.

البته این کد در ارتباط با بازتاب‌های تکراری بین لایه‌ای با فاصله زمانی کمتر از ۲۰ میلی‌ثانیه محدودیت دارد، زیرا در این حالت در حوزه رادون، رویدادهای تکراری به‌خوبی از رویداد اولیه مربوط، قابل تفکیک نخواهند بود. مقایسه عملکرد برنامه تدوین شده با نتایج حاصل از نرم‌افزار Geocluster نشان داد که برنامه تدوین شده از توانایی مطلوب برخوردار است و قابلیت تضعیف رویدادهای تکراری در داده‌های واقعی را دارد.

منابع

مینائیان، و.، ۱۳۸۷، تضعیف امواج تکراری در لرزه‌نگاری بازتابی با استفاده تبدیل رادون، پایان‌نامه کارشناسی ارشد مهندسی اکتشاف نفت، دانشکده مهندسی معدن، متالورژی و نفت، دانشگاه صنعتی امیرکبیر.

Beylkin, G., 1987, Discrete Radon transform. *IEEE transactions on acoustic, Speech and Signal Processing*, **35**, 162-172.

Cao, Z., Bancroft, J. C., Brown, R. J. and Xiaio, Ch., 2003, Radon transform and multiple attenuation. *CREWES Research Report*, **15**.

Cary, P., 1998, The simplest discrete Radon transform. 68th SEG meeting, New Orleans, Expanded Abstracts, 1999-2002.

Chapman, C. H., 1981, Generalized Radon transforms and slant stacks. *Geophys. J. R. Astr. Soc.*, **66**, 445-453.

Hampson, D., 1986, Inverse velocity stacking for multiple elimination. *J. Can. Soc. Expl. Geophys.*, **22**, 44-55.

Hargreaves, N., Cooper, N. and Whiting, P., 2001, High-resolution Radon demultiple. *ASEG 15th Geophysical Conference and Exhibition*, Brisbane.

Kabir, M. N. and Marfurt, K. J., 1999, Toward true amplitude multiple removal. *The Leading Edge*, **18**, 66-73.

Minaeian, V., Javaherian, A. and Moslemi, A., 2009, Multiple attenuation by f-x parabolic Radon transform. *EAGE 1st International Petroleum Conference & Exhibition*, Shiraz.

Radon, J., 1917, Über die Bestimmung von Funktionen durch ihre Integralwerte längs gewisser Mannigfaltigkeiten. *Ber. Sächs. Akad. Wissenschaft. Leipzig Math. Phys. Kl.*, **69**, 262-267.