

## مهاجرت زمانی پیش از برانبارش داده‌های لرزه‌ای دوبعدی به روش کرشهف

پویا هادیان<sup>۱</sup>، عبدالرحیم جواهریان<sup>۲\*</sup> و بهزاد نظری<sup>۳</sup>

<sup>۱</sup> اداره ژئوفیزیک، مدیریت شرکت ملی نفت ایران، تهران، ایران

<sup>۲</sup> استاد بازنشسته، گروه فیزیک زمین، مؤسسه ژئوفیزیک، دانشگاه تهران و استاد دانشکده مهندسی نفت دانشگاه صنعتی امیرکبیر، تهران، ایران

<sup>۳</sup> مرکز پردازش، شرکت عملیات اکتشاف نفت، تهران، ایران

(دریافت: ۸۷/۱۰/۲۲، پذیرش نهایی: ۸۸/۷/۲۱)

### چکیده

مهاجرت لرزه‌ای عمل بازگردان وقایع پراش در ثبت‌های مهاجرت داده نشده به نقاط و در نتیجه انتقال وقایع بازتابی به مکان‌های صحیحشان و ساختن یک تصویر واقعی از ساختارهای درون زمین است. روش مهاجرت کرشهف براساس مجموع پراش است که دامنه‌های لرزه‌ای را در طول هدلولی پراش جمع می‌کند و نتیجه را در رأس هدلولی قرار می‌دهد. روش کرشهف به راحتی برای داده پیش از برانبارش قابل اصلاح است و می‌توان آن را بر ثبت‌های منبع مشترک و دورافت مشترک اعمال کرد. در این مقاله مهاجرت زمانی پیش از برانبارش داده‌های لرزه‌ای دوبعدی به روش کرشهف مورد بررسی قرار می‌گیرد. در این راستا نرم‌افزاری در محیط MATLAB برای مهاجرت ثبت‌های منبع مشترک با این روش نوشته شده است. صحت این نرم‌افزار با داده‌های مصنوعی که به روش ردیابی پرتو موج در مدل زمین‌شناسی با نرم افزار GXII ساخته شده بود، آزمایش شد. مدل به کار رفته، یک مدل دولایه‌ای دوزنقه‌ای شکل و یک مدل کوهپایه سه‌لایه‌ای است که ویژگی شبیه‌های متضاد را دارد. جنبه‌های متفاوت مهاجرت کرشهف نیز مانند حساسیت به مدل سرعت و پهنای دهانه مهاجرت مورد بررسی قرار گرفته است.

واژه‌های کلیدی: بازتابنده‌های شیب‌دار، مهاجرت زمانی دوبعدی پیش از برانبارش، مهاجرت به روش کرشهف، مدل‌سازی ردیابی مسیر پرتو، روش‌های عددی حل معادله موج

## Prestack time migration of 2D seismic records by the Kirchhoff method

Hadian, P.<sup>1</sup>, Javaherian, A.<sup>2</sup> and Nazari, B.<sup>3</sup>

<sup>1</sup> Geophysics Department, NIOC Exploration Directorate, Tehran, Iran

<sup>2</sup> 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

<sup>3</sup> Processing Center, Oil Exploration Operations Company, Tehran, Iran

(Received: 11 Jan 2009, Accepted: 13 Oct 2009)

### Abstract

In exploration seismology, migration refers to a multi-channel processing step that attempts to spatially re-position events and improve focusing. Before migration, seismic data is usually displayed with traces plotted at the surface location of the receivers and with a vertical time axis. This means that dipping reflections are systematically mispositioned in the lateral coordinate and the vertical time axis needs a transformation to depth. Also problematic is the unfocused nature of seismic data before migration. Migration moves dipping reflections to their true subsurface positions and collapses diffractions, thus increasing spatial resolution and yielding a seismic image of the subsurface.

Time migration which produces a migrated time section is appropriate as long as lateral velocity variations are mild to moderate. Dipping events on a stacked section call

for time migration. Conflicting dips with different stacking velocities is one case in which a conventional stacked section differs from a zero-offset section. Thus, poststack migration which assumes that the stacked section is equivalent to a zero-offset is not valid to handle the case of conflicting dips. Instead, one needs to do prestack time migration.

Kirchhoff migration methods are based on the diffraction summation technique, which sums the seismic amplitudes along a diffraction hyperbola whose curvature is governed by the medium velocity, and maps the result to apex of the hyperbola. The Kirchhoff summation technique applies amplitude and phase corrections to the data before summation. These corrections make the summation consistent with the wave equation in that they account for spherical spreading, the obliquity factor (angle-dependency of amplitudes), and the phase shift inherent in Huygens' secondary sources. Since the Kirchhoff migration method is based on summing the amplitudes along the hyperbolic trajectory, as long as the diffraction curve is known, it can be adapted for any domain. The velocity function used in the diffraction curve equation is vrms for prestack migration. Poststack migration uses zero-offset data while prestack time migration applies to unstacked data, so uses shot record, common-offset, and equivalent-offset data. The Kirchhoff prestack time migration sums through the input space along hyperbolic paths to compute each point in the output space. For variable velocity the hyperbola is replaced by a more general shape. Amplitudes change under migration. Velocity model is a matrix of interval velocity at each sampling point. Velocity model is generated using reflector velocities. An important factor in the Kirchhoff migration is migration aperture. Reducing the aperture reduces the maximum dip to migrate. The effect of migration aperture is illustrated using different apertures. Small apertures eliminate steeply dipping events from the migrated section.

A software in MATLAB is written which is capable of migrating common shot records. Traveltime from source to a scatterpoint (i.e. the image point) is approximated by a Dix equation using the rms velocity from the model at the lateral position halfway between the source and the receiver and at the vertical traveltime of the scatterpoint. Similarly, from the scatterpoint to a receiver, a Dix equation using the rms velocity halfway between the scatterpoint and the receiver is used. The source and all receivers are assumed to be on the same horizontal plane.

In this paper, two models consisting of a 2 layered trapezoid model and a 3 layered model are synthesized and inputted to the migration algorithm. The traveltimes are calculated via ray tracing with respect to a shot in the center of the model. Shot records were migrated with the interval velocity model. Since prestack migration is very sensitive to the velocity model, an rms velocity model was used. Using rms velocity field improved the migrated section. The critical parameter of the Kirchhoff migration is a migration aperture width whose effect is more evident in steep dips and depths.

**Key words:** Time migration, prestack migration, Kirchhoff migration, ray tracing, wave equation

## ۱ مقدمه

الگوریتم‌های مهاجرت، علاوه بر جایابی فضایی و متمرکزسازی، تنظیمات دامنه و فاز را به منظور تصحیح تأثیرات واگرایی مسیرهای پرتو هنگام انتشار موج اعمال می‌کنند. هنگامی که در مقطع برانبارش، بازتابنده‌های

مهاجرت لرزه‌ای فرایندی براساس معادله موج است که با انتقال وقایع به موقعیت‌های مکانی صحیحشان، و با بازگرداندن انرژی از پراش‌ها به نقاط پراشده، از شکل واقعی خارج شدن ثبت‌های بازتابی را رفع می‌کند.

مجموع کرشهف معرفی شد (اشنایدر، ۱۹۷۸). این روش، اساساً مانند روش مجموع پراش است که در آن تصحیحات دامنه و فاز روی داده‌ها قبل از جمع کردن صورت گرفته است. این تصحیحات، مجموع را با معادله موج در این مورد که آنها برای انتشار کروی، فاکتور شیب (وابستگی دامنه به زاویه)، و شیفیت فاز در منابع ثانویه هویگنز به حساب می‌آیند، مطابق می‌سازد.

مهاجرت کرشهف شامل مجموع گیری از دامنه‌ها در طول هذلولی‌های پراش است. با داشتن سرعت rms در هر نمونه زمانی معین از ردلرزه ورودی، یک منحنی زمان گذر هذلولی مرتبط با پراشده فرضی روی مقطع ورودی انداخته می‌شود که رأس آن در همان نمونه زمانی قرار دارد. در نظریه هذلولی پراش تا زمان و فاصله بی‌نهایت گسترش می‌یابد. در عمل با یک مسیر مجموع‌گیری هذلولی قطع شده سروکار داریم. گستره فضایی که مسیر مجموع‌گیری واقعی گسترده شده است را دهانه مهاجرت می‌نامند و با تعداد ردلرزه‌هایی که مسیر هذلولی را می‌پوشاند اندازه‌گیری می‌شود. پهنای دهانه مهاجرت، پارامتر بحرانی در مهاجرت کرشهف است. دهانه کوچک باعث حذف شیب‌های تند می‌شود؛ وقایع افقی دروغین تولید می‌کند و نوفه تصادفی ناهمبسته از ردلرزه به ردلرزه را سازماندهی می‌کند (ایلماز، ۲۰۰۱).

در این مقاله، نرم‌افزاری در محیط MATLAB برای مهاجرت زمانی داده‌های لرزه‌ای دو بُعدی به روش کرشهف عرضه شده است. این نرم‌افزار روی دو مدل که شامل بازتابنده‌های شیب‌دار و افقی هستند و ویژگی‌های شیب‌های متضاد را دارند آزمایش شد. ثبت منبع مشترک این مدل‌ها به روش ردیابی پرتو موج به دست آمد و با نرم‌افزار نوشته شده مهاجرت داده شد. برای بررسی اثر مدل سرعت و پهنای دهانه مهاجرت، ثبت منبع مشترک اولیه با مدل سرعت میانی و rms و همچنین پهنای دهانه متفاوت مهاجرت داده و نتایج مقایسه شد.

شیب‌دار وجود دارند، به مهاجرت زمانی نیاز است. مهاجرت زمانی تا هنگامی که تغییرات جانبی سرعت، کم تا متوسط باشد، مناسب است. وقتی تغییرات جانبی سرعت قابل ملاحظه است، مهاجرت زمانی تصویر واقعی زیرزمینی را به وجود نمی‌آورد. در عوض باید از مهاجرت عمقی استفاده کرد. وقتی شیب‌های متضاد با سرعت‌های برانبارش متفاوت وجود دارند، مهاجرت پس از برانبارش که فرض می‌کند مقطع برانبارش مساوی مقطع دورافت- صفر است جواب خوبی نمی‌دهد، به جای آن به مهاجرت زمانی پیش از برانبارش نیاز است (ایلماز، ۲۰۰۱). مهاجرت پیش از برانبارش، روشی مهم برای تصویرسازی و تحلیل سرعت است. این روش ساختارهای پرسیب را که در برانبارش NMO (normal moveout) ساده از بین می‌روند تصویر می‌کند، قدرت تفکیک جانبی را بهبود می‌بخشد، انحراف شیب در برآوردهای سرعت را حذف می‌کند و سرعت‌های برآوردی را در موقعیت‌های مهاجرت کرده‌شان قرار می‌دهد. روش‌های مهاجرت پیش از برانبارش اغلب براساس معادله کرشهف دورافت- مشترک هستند، ولی تعدادی از رویکردهای جایگزین نیز معرفی شده‌اند.

معادله موج (در عمق)، اساس الگوریتم‌های مهاجرت معمول است. این الگوریتم‌ها بازتابنده‌های چندگانه، امواج تبدیلی، امواج سطحی، یا نوفه را کاملاً مدل نمی‌کنند. با هر کدام از چنین اثری‌های موجود در ورودی داده به مهاجرت، مانند بازتاب‌های اولیه رفتار می‌شود. الگوریتم‌های مهاجرت براساس حل انتگرالی معادله موج، به روش‌های کرشهف موسوم است. اولین روش مهاجرت توسعه داده شده، روش جایگزینی نیم‌دایره‌ای بود که پیش از دوره رایانه‌ها از آن استفاده می‌شد. سپس روش مجموع- پراش آمد، که براساس جمع کردن دامنه‌های لرزه‌ای در طول یک هذلولی پراش که در انحنای آن سرعت میانی حاکم است. استوار است سپس، روش

## ۲ مهاجرت زمانی - مهاجرت عمقی

رویکرد تفاضل محدود پیشرفت‌های عظیمی در کیفیت تصاویر لرزه‌ای ایجاد کرد، ولی الگوریتم‌ها برای رایانه‌های موجود چالش بزرگی بود. در نتیجه برآوردهایی پیدا شد که می‌توانستند عملیات عددی مورد نیاز را کاهش دهند. یک برآورد کلیدی، استفاده از انتقال دستگاه مختصات برای به دست آوردن یک معادله موج برآوردی بود که زمان گذر قائم،  $t$ ، را جایگزین عمق می‌کرد. یک راه فهم این مسئله آن است که یک مقطع برانبارش تنها حاوی وقایع با  $\Delta t/\Delta x = 0$  تصور شود. این از چهره مقاطع لرزه‌ای بسیاری از حوزه‌های رسوبی جهان به دور نیست. چنین حوزه‌هایی محیط‌های  $v(z)$  هستند و پرتوهای عمود بر وقایع مسطح، قائم هستند. در نتیجه روی مقطع برانبارش در زمان گذر قائم به درستی قرار گرفته‌اند و الگوریتم مهاجرت کار چندانی نمی‌کند.

روش‌های تفاضل محدود اولیه با موفقیت در حوزه‌های رسوبی مورد استفاده قرار گرفتند، ولی هنگامی که این فناوری به کمرندهای تراستی، مرزهای قاره‌ای و مکان‌های دیگری که برآورد  $v(z)$  مدل مناسبی نیست برده شد، به تدریج دریافت شد که خطاهای تصویرسازی مطلوب رخ می‌دهد. در شکل ۱ یک تاقدیس در زیر لایه کم‌سرعت نزدیک به سطح که دارای همبری تحتانی شیب‌دار است، نشان داده شده است. پرتو عمود از رأس ساختار عموماً پرتو با کمترین زمان گذر نیست، گرچه کوتاه‌ترین مسیر تا سطح را دارد. در عوض، پرتویی از سمت راست آن پرتو زمان کمینه است چون بیشتر مسیرش را در محیط پرسرعت می‌گذراند. معلوم شد که شیوه‌های مهاجرت در چنین حالاتی تصویری مغشوش تولید می‌کنند که باعث می‌شود رأس تاقدیس مهاجرت کرده، در نقطه ظهور پرتو با کمترین زمان، قرار گیرد. همانند حالت حوزه رسوبی، الگوریتم، وقایع بدون شیب را دست‌نخورده باقی می‌گذاشت، گرچه در این حالت این

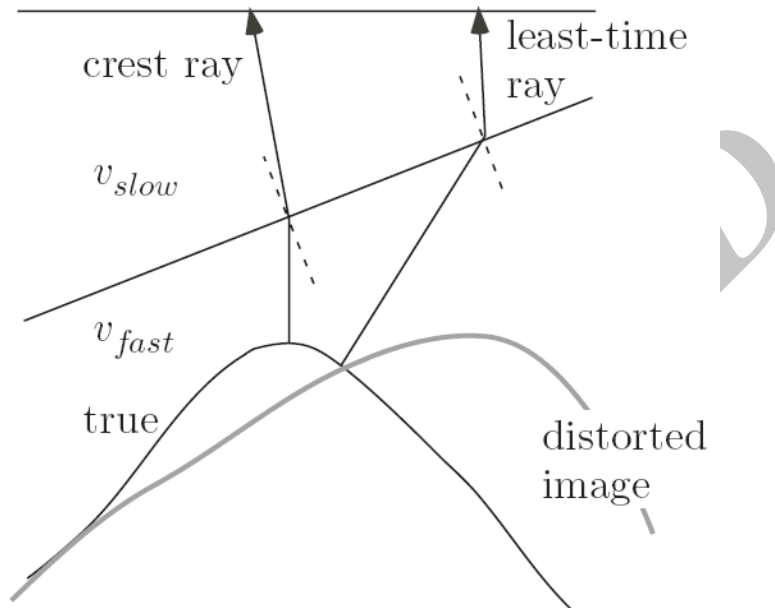
کار درست نبود.

فهم و حل این مشکل به کاربرد واژه‌های مهاجرت زمانی و مهاجرت مکانی منجر شد. مهاجرت زمانی به هر روشی اشاره دارد که به وقایع بی‌شیب تمایل دارد و در شرایط  $v(z)$  به‌خوبی کار می‌کند. مهاجرت مکانی به روش‌های جدیدتری اشاره دارد که برای غلبه بر این مشکلات توسعه یافته‌اند و در نتیجه می‌توانند تصاویری صحیح حتی در تغییرات قوی جانبی سرعت تولید کنند.

شکل ۲ نشان می‌دهد که اگر مهاجرت زمانی مطلوب باشد، چگونه قانون اسنل باید اساساً تغییر کند. الگوریتم مهاجرت زمانی به جای استفاده از زوایایی که پرتوهای تابیده و بازتابده با عمود بر سطح می‌سازند (قانون اسنل)؛ از زوایایی که پرتوها با قائم می‌سازند، استفاده می‌کند. مانند این است که همبری شیب‌دار در نقطه برخورد پرتو چرخیده است تا افقی شود. در نتیجه، هر پرتو قائم ( $\Delta x/\Delta v = 0$ ) از همبری سرعت بدون تغییر جهت، بی‌توجه به بزرگی اختلاف سرعت، عبور می‌کند. این روشن می‌سازد که چرا مهاجرت زمانی، پاسخ نادرستی می‌دهد و همچنین توضیح می‌دهد که چرا این فناوری هنوز علی‌رغم این ناکارایی شناخته شده، محبوب است. این واقعیت که وقایع بی‌شیب، بدون توجه به مدل سرعت، با مهاجرت زمانی تحت تأثیر قرار نگرفته‌اند، به این معنی است که وقتی مدل سرعت دارای اشکال است، فرایند رفتاری غیر سختگیرانه دارد. مدل‌های سرعت که به‌طور خودکار از سرعت‌های برانبارش مشتق شده‌اند، معمولاً پر از بی‌دقتی هستند. وقتی این مدل‌ها با مهاجرت زمانی استفاده می‌شوند، این بی‌دقتی‌ها تأثیر کمی دارند ولی وقتی با مهاجرت عمقی استفاده شوند می‌توانند فاجعه آمیز باشند. حتی امروزه، اکثریت مقاطع لرزه‌ای از شرایط  $v(z)$  ناشی می‌شوند و حاوی بیشتر وقایع بی‌شیب هستند. چنین داده‌هایی را با مراقبت کمی با مهاجرت زمانی می‌توان مهاجرت داد و مقاطعی را که به‌خوبی متمرکز شده‌اند

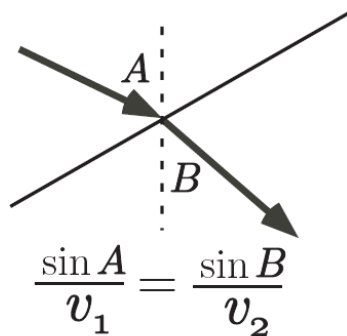
سرعت که در مهاجرت زمانی به چشم نمی‌آیند، مشکلات اساسی در تبدیل عمق ایجاد می‌کند. اگر مقطع عمقی دقیق مورد نیاز است مراقبت بیشتری باید لحاظ شود.

به دست آورد. البته، اینها هنوز مقاطع زمانی هستند و یک مهاجرت زمانی به این معنی راضی کننده نیست که می‌توان سرعت‌های مهاجرت را برای تبدیل عمق به کار برد. به طور کلی، خطاهای

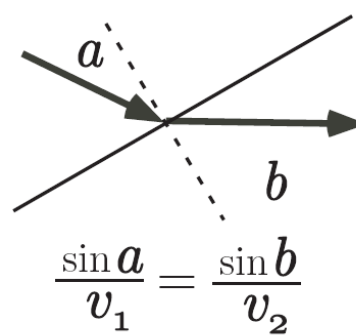


شکل ۱. پرتو با کمترین زمان همیشه از رأس تاقدیس نمی‌آید (مارگریو، ۲۰۰۳).

Time migration



Depth migration

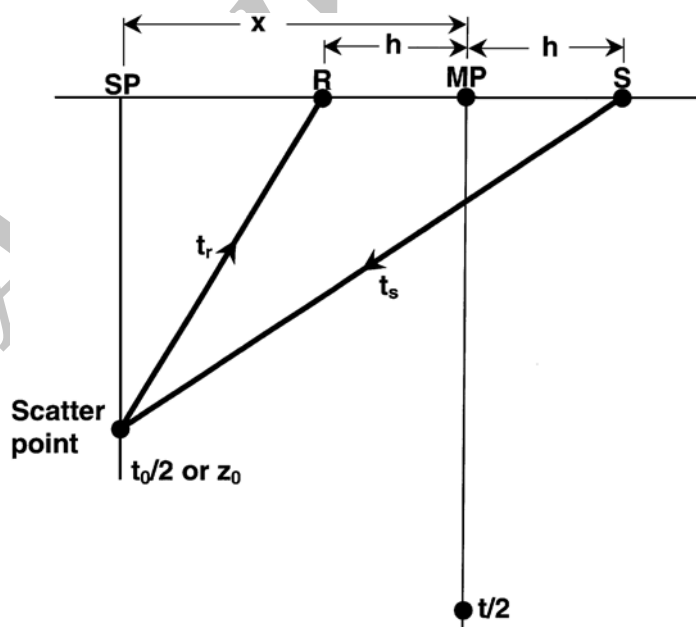


شکل ۲. (راست) وقتی پرتویی با همبندی سرعت شیب‌دار برخورد می‌کند، قانون اسنل پرتو بازتابیده را با استفاده از رابطه بین زوایا نسبت به عمود بر سطح پیش‌بینی می‌کند. (چپ) در یک الگوریتم مهاجرت زمانی، از قانون اسنل تبعیت نمی‌شود زیرا زوایای قائم استفاده می‌شود. اگر همبندی سرعت افقی باشد، هردو روش نتیجه یکسانی می‌دهند (مارگریو، ۲۰۰۳).

خروجی برده می‌شوند. در نظریه کرششف، یک مدل زیرزمینی، متشکل از نقاط پراشده است که انرژی را از هر منبعی به همه گیرنده‌ها پراش می‌دهند. یک واقعه بازتابنده با یک آرایش مرتب از نقاط پراشده تشکیل شده است که بازتابی همدوس را تولید می‌کنند. هدف مهاجرت پیش از برانبارش، جمع‌آوری همه انرژی پراشیده و بازگرداندن آن به مکان نقاط پراشده است. مهاجرت پیش از برانبارش کرششف، یک مکان خروجی (یا نقطه پراشده) را در نظر می‌گیرد و انرژی مربوط را از همه ردلرزه‌های ورودی موجود جمع می‌کند. این رویه برای هر نمونه خروجی تکرار می‌شود.

اکثر مهاجرت‌های زمانی کرششف، مسیرهای مستقیم از منبع به نقطه پراشده، و از نقطه پراشده به گیرنده را در نظر می‌گیرند، مانند شکل ۳. کل زمان گذر  $t$  با جمع کردن زمان منبع به نقطه پراشده  $t_s$  و زمان نقطه پراشده به گیرنده  $t_r$  برآورد می‌شود.

$$t = t_s + t_r \quad (1)$$



شکل ۳. هندسه مهاجرت زمانی پیش از برانبارش کرششف با منبع  $S$  و گیرنده  $R$ . کل زمان گذر مجموع زمان منبع به نقطه پراشده  $t_s$  و زمان نقطه پراشده به گیرنده  $t_r$  است (بنکرافت، ۱۹۹۸).

واژه‌های مهاجرت زمانی و مهاجرت عمقی ایجاد شدند زیرا نسخه‌های اولیه این فناوری‌ها تنها به ترتیب مقاطع زمانی و عمقی تولید می‌کردند. گرچه، این درست نیست و هر دو می‌توانند مقاطع زمانی و عمقی را تولید کنند. در نتیجه، این واژه‌ها باید به‌منزله واژه‌های تخصصی استفاده شوند که نشان می‌دهد آیا الگوریتم، قابلیت تولید یک تصویر صحیح در حضور تغییرات شدید جانی سرعت را دارد یا نه. صرف حضور محور زمانی یا عمقی روی مقطع لرزه‌ای مهاجرت کرده چیزی درباره روش استفاده شده به ما نمی‌گوید.

### ۳ مهاجرت زمانی پیش از برانبارش کرششف

مهاجرت کرششف (اشنايدر، ۱۹۷۸) براساس محاسبه سطح زمان گذر که انرژی از یک نقطه زیرزمینی بر آن پراشیده شده است استوار است. نمونه‌های ورودی روی سطح زمان گذر، مطابق انتگرال پراش کرششف مجموع گرفته و مستقیماً به یک نمونه مهاجرت داده شده

زمان  $t$ ، یک فیلتر ضد الیاسینگ محلی اعمال می‌شود (اگر نیاز باشد)، و نمونه مطلوب درون‌یابی می‌شود. این نمونه سپس مقیاس و جمع می‌شود تا نمونه مهاجرت کرده به دست آید. این فرایند برای همه نمونه‌های مهاجرت کرده خروجی تکرار می‌شود. وقتی مسیر مجموع‌گیری هذلولی است، به کل این فرایند، NMO کرش‌هف گفته می‌شود. کاربردهای عملی مجموع‌گیری کرش‌هف با زمان ثبت محدود روی ردلرزه‌های ورودی محدود می‌شوند. در نتیجه، انرژی از یک نقطه پراشده به شرط داشتن کل زمان گذر از منبع به نقطه پراشده به گیرنده در محدوده زمان ثبت، در همه ردلرزه‌ها ثبت خواهد شد. پوش مکانی ردلرزه‌ها که حاوی این انرژی است، دهانه مهاجرت است. انرژی از نقطه پراشده در  $(x=0, t_0)$  روی سطح زمان گذر  $t(x, h)$  معادله (۳) می‌افتد. این سطح با عنوان هرم خوفو (cheops pyramid) (اتولینی، ۱۹۸۲؛ کلرپوت، ۱۹۸۵) شناخته می‌شود و در شکل ۴-a نشان داده شده است. یک دسته CMP که در نقطه پراشده  $x=0$  قرار گرفته است، هرم خوفو را روی یک مسیر هذلولی قطع می‌کند و امکان تصحیح NMO متداول را به وجود می‌آورد. گرچه، تقاطعات همه دسته‌های CMP دیگر  $(x \neq 0)$  مسیرهای غیرهذلولی دارند، و انرژی با تصحیح NMO هذلولی به اشتباه قرار داده خواهد شد. مهاجرت پیش از برانبارش، مسیر غیرهذلولی را به حساب می‌آورد و در نتیجه همه انرژی پراشیده را متمرکز می‌کند.

همه ردلرزه‌های ورودی ممکن است حاوی انرژی پراشیده از هر نقطه پراشده باشند. یک دسته (Common Scatter Point, CSP) در حکم مجموعه‌ای از انرژی از همه ردلرزه‌های ورودی به یک فضای دو بُعدی از دورافت و زمان  $(h, t)$  که در آن انرژی پراشیده برای عمل متمرکز کننده بعدی، به طور بهینه قرار داده شده، تعریف می‌شود. این فرایند در شکل ۴ نمایش داده شده است، که در آن همه انرژی در هرم خوفو به هذلولی در صفحه  $x=0$

از هندسه شکل ۳ و ثابت فرض کردن سرعت  $V$  عبارت (۱) بسط داده می‌شود تا معادله ریشه دوم مضاعف (DSR, Double square root) را به دست دهد (کلرپوت، ۱۹۸۵)

$$t = \left[ \frac{z_0^2 + (x+h)^2}{V^2} \right]^{1/2} + \left[ \frac{z_0^2 + (x-h)^2}{V^2} \right]^{1/2} \quad (2)$$

که در آن  $z_0$  عمق نقطه پراشده،  $x$  مکان نقطه میانی (MP) - منبع - گیرنده نسبت به نقطه پراشده (SP) در  $x=0$  و  $h$  نصف دورافت منبع - گیرنده است. برای مواجهه با تغییرات قائم سرعت و تغییرات ضعیف جانبی سرعت، معادله DSR به صورت زیر تعدیل می‌شود.

$$t = \left[ \left( \frac{t_0}{2} \right)^2 + \frac{(x+h)^2}{V_{mig}^2} \right]^{1/2} + \left[ \left( \frac{t_0}{2} \right)^2 + \frac{(x-h)^2}{V_{mig}^2} \right]^{1/2} \quad (3)$$

که در آن سرعت مهاجرت  $V_{mig}$  تقریب RMS تانر و کوهلر (۱۹۶۹) ارزیابی شده در  $t_0$  است. زمان  $t_0=t(x=0, h=0)$  زمان دوطرفه دورافت - صفر محاسبه شده از سرعت میانگین  $V_{ave}$  به صورت زیر است.

$$t_0 = \frac{2z_0}{V_{ave}} \quad (4)$$

معادله (۳) سطح زمان گذر که بر آن انتگرال‌گیری (مجموع‌گیری) کرش‌هف صورت می‌گیرد را تعریف می‌کند. کاربرد کامل انتگرال کرش‌هف فرایندی پیچیده است. برای مثال، لازم است که ردلرزه‌های ورودی با یک فیلتر دیفرانسیلی برای داده سه بُعدی یا یک فیلتر دیفرانسیلی ریشه دوم برای داده‌های دو بُعدی هم‌امیخت شوند (منظور از فیلتر دیفرانسیلی، یک اپراتور هم‌امیخت است که مشتق زمان را به کار می‌برد). انتگرال‌گیری یا مجموع‌گیری برای یک نمونه مهاجرت کرده خروجی در زمان  $t_0$  نیازمند محاسبه  $t$  در هر ردلرزه ورودی است. در

کوسینوس تا اعمال می‌کند، و در انتها یک فیلتر جعبه‌ای ضد الیاسینگ روی داده‌ها اعمال می‌کند. نمودار گردش کار نرم‌افزار نوشته شده در شکل ۵ آمده است.

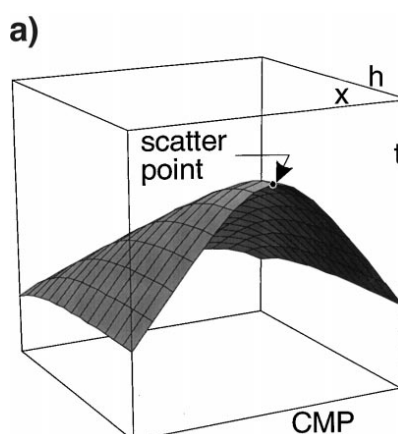
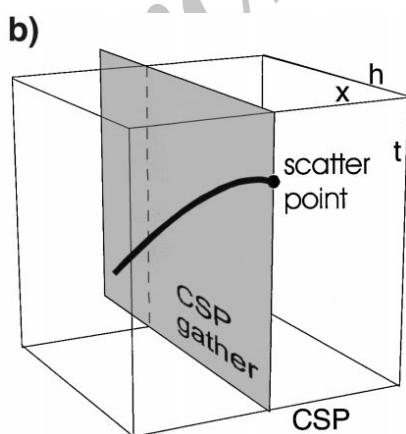
#### ۵ مدل دوزنقه‌ای

این مدل به کمک نرم‌افزار GXII با ردیابی پرتو موج و پارامترهای زیر ساخته شده است. طول مقطع ۵۰۰۰ متر و عمق آن ۳۰۰۰ متر است. یک منبع در فاصله ۲۵۰۰ واقع است و ۱۰۱ گیرنده با فاصله ۵۰ متر در سطح زمین چیده شده‌اند. سطح زمین افقی در نظر گرفته شده است و مدل زمین دولاپه‌ای با سرعت‌های ۲۰۰۰ و ۳۰۰۰ متر بر ثانیه است (شکل ۶). ردیابی پرتو با نمونه‌برداری زمانی با فواصل ۲ ms به طول ۳۰۰۰ ms با اعمال یک فیلتر و یک gain صورت گرفت تا ثبت منبع مشترک به دست آید (شکل ۷). از ثبت منبع مشترک (شکل ۷) و مدل سرعت آن (شکل ۸) به صورت SEG-Y خروجی گرفته شد و پس از تبدیل به ماتریس در MATLAB به منزله ورودی مهاجرت مورد استفاده قرار گرفت. تصویر مهاجرت کرده در شکل ۹ مشاهده می‌شود.

فروانداخته شده است (دسته CSP شکل ۴-b). انرژی از نقاط پراشده همسایه ( $x \neq 0$ ) پراکنده می‌شود و به‌طور مخرب باطل خواهد شد (شکل ۴-b).

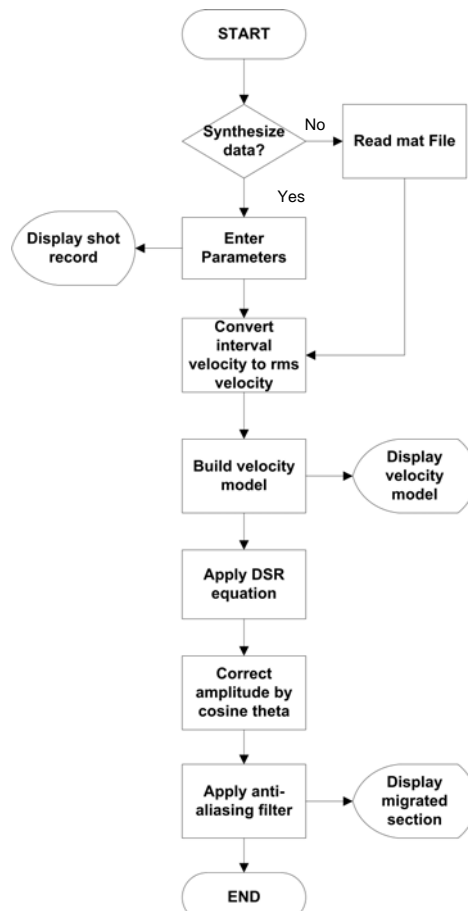
#### ۴ برنامه عرضه شده در محیط MATLAB

همان‌طور که پیش از این ذکر شد روش کرشهف بر پایه جمع دامنه‌های موجود در طول منحنی پراش صورت می‌گیرد. این روش با توجه به اصل هویگنس به انجام می‌رسد. اصل هویگنس فرض می‌کند که یک بازتابنده از مجموعه‌ای نقاط پراش که در کنار هم قرار گرفته‌اند تشکیل شده است. مهاجرت با فرونشاندن هر هذلولی پراش به نقطه آغازی آن حاصل می‌شود. در این روش با هر نقطه به طور مستقل برخورد می‌شود. سرعت استفاده شده در این روش سرعت rms است که ممکن است به طور جانبی تغییر کند. در هر صورت، تغییرات جانبی سرعت هذلولی پراش را تخریب می‌کند، پس باید این موضوع در نظر گرفته شود. مقدار سرعت rms مربوط به نمونه زمانی خروجی یعنی نقطه عطف هذلولی است. این برنامه زمان گذر منبع-گیرنده را از روش معادله ریشه دوم مضاعف محاسبه می‌کند. سپس تصحیح دامنه را با

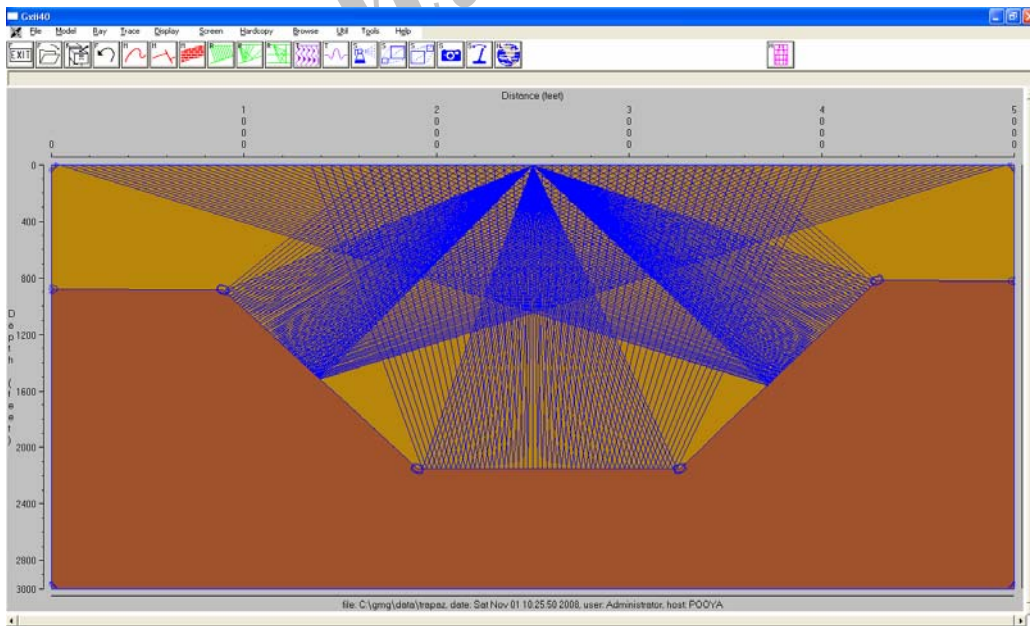


شکل ۴. (a) هرم خوفو، سطح زمان گذر  $t(x, h)$  برای یک نقطه پراشده. (b) دسته CSP تشکیل شده با فروانداختن هرم خوفو به یک هذلولی در صفحه  $x=0$  (بنکرافت، ۱۹۹۸).

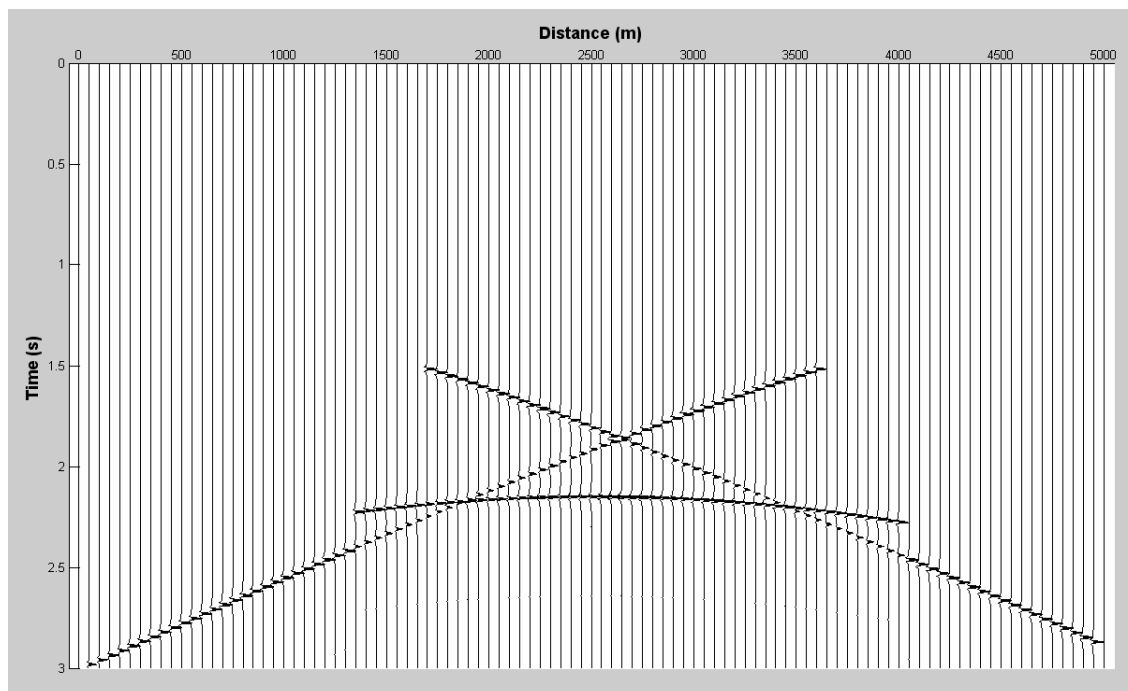




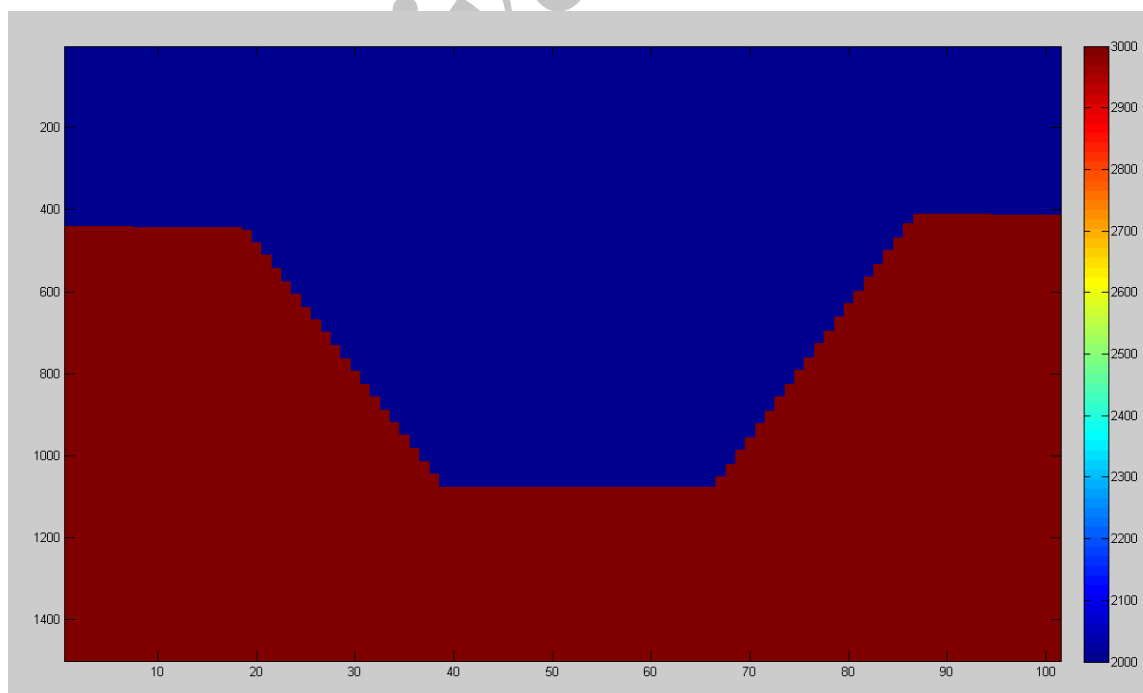
شکل ۵. نمودار گردش کار نرم‌افزار نوشته شده در محیط MATLAB (هادیان، ۱۳۸۷).



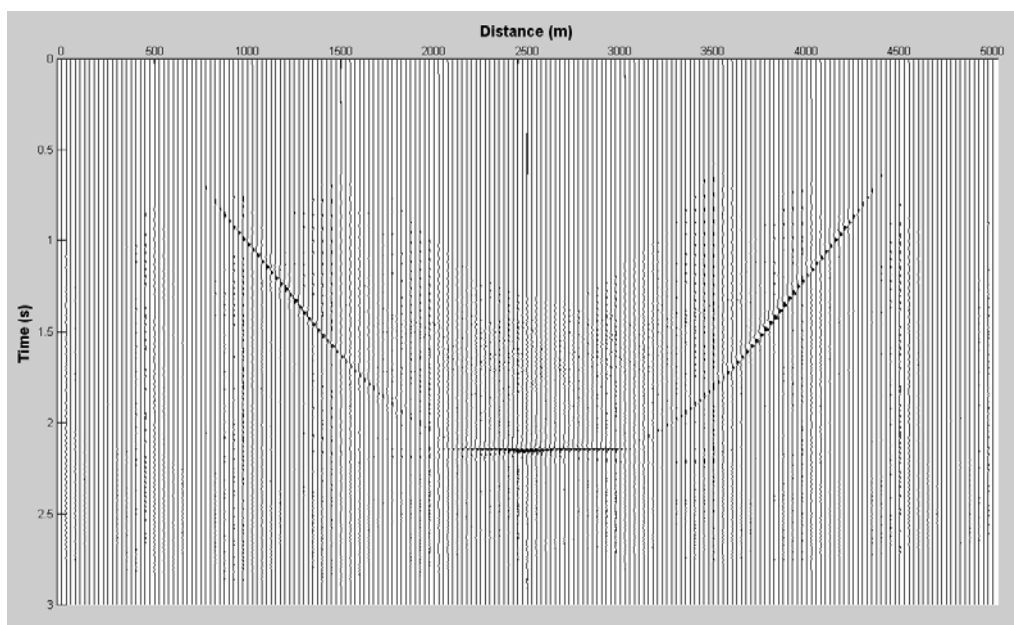
شکل ۶. مدل دوزنقه‌ای و مسیرهای ردیابی پرتوی موج.



شکل ۷. ثبت منبع مشترک ناشی از ردیابی مسیر پرتو مدل ذوزنقه شکل ۶، محل منبع در موقعیت ۲۵۰۰ متری واقع است.



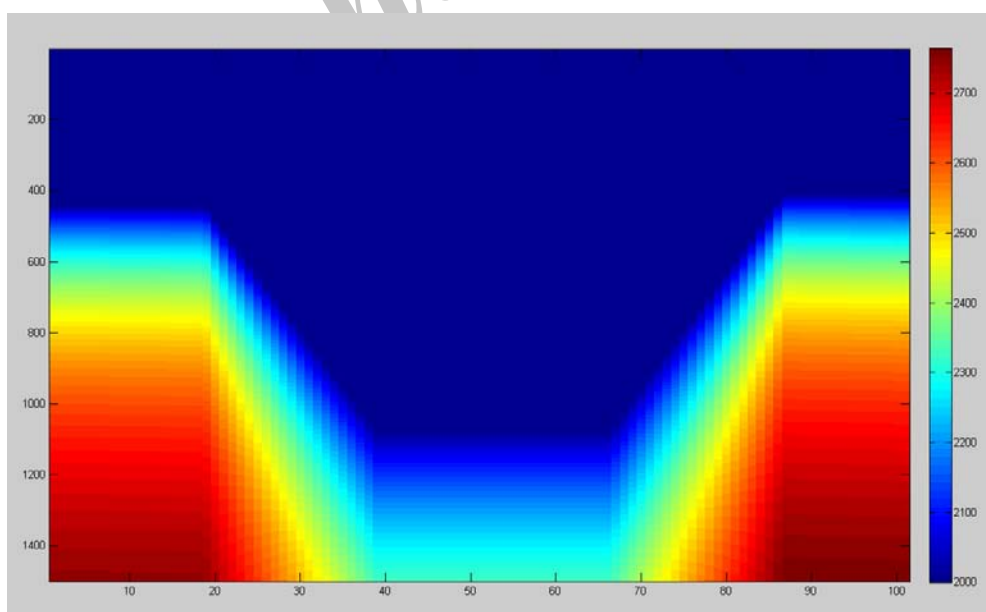
شکل ۸. نیمرخ سرعت میانی مربوط به مدل شکل ۶.



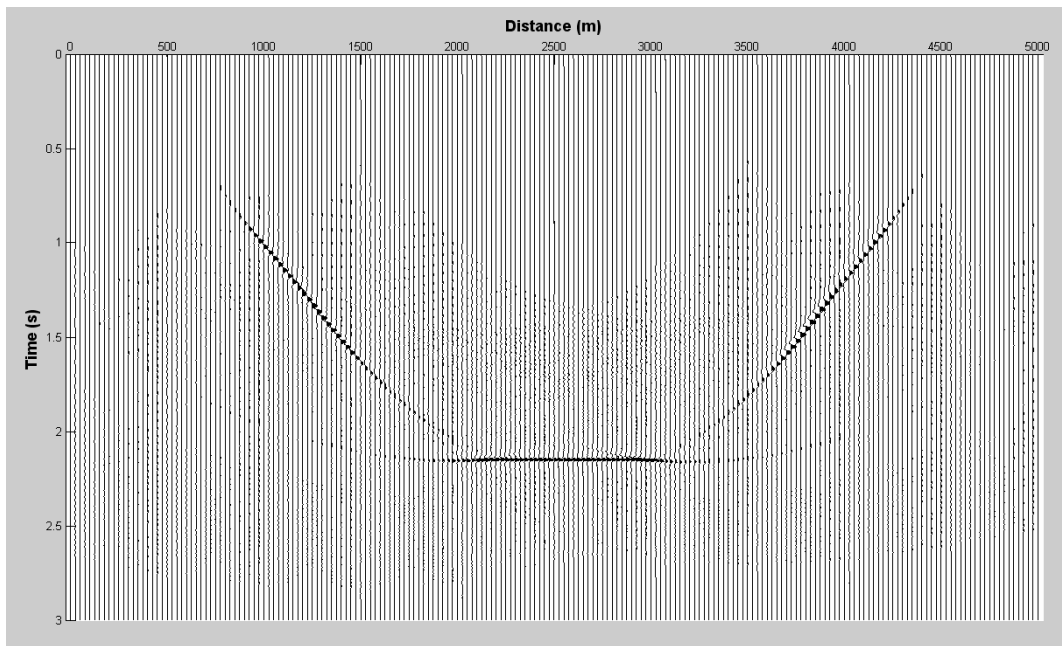
شکل ۹. تصویر مهاجرت کرده شکل ۶ با مدل سرعت میانی.

استفاده شده است. با مقایسه شکل ۱۱ با شکل ۹ مشاهده می‌شود که مهاجرت با مدل سرعت rms بازتابنده‌های شیب‌دار را بهتر نمایان کرده و پیوستگی و کیفیت بازتاب‌ها بهبود یافته است.

مهاجرت پیش از برانبارش به مدل سرعت به کار رفته بسیار حساس است و لازم است قبل از مهاجرت، سرعت‌ها هموار شوند. شکل ۱۰ مدل سرعت rms را نشان می‌دهد. در شکل ۱۱ به جای مدل سرعت میانی (شکل ۸) از مدل سرعت rms (شکل ۱۰) برای مهاجرت ثبت منبع مشترک



شکل ۱۰. نیم‌رخ سرعت rms مربوط به شکل ۶.

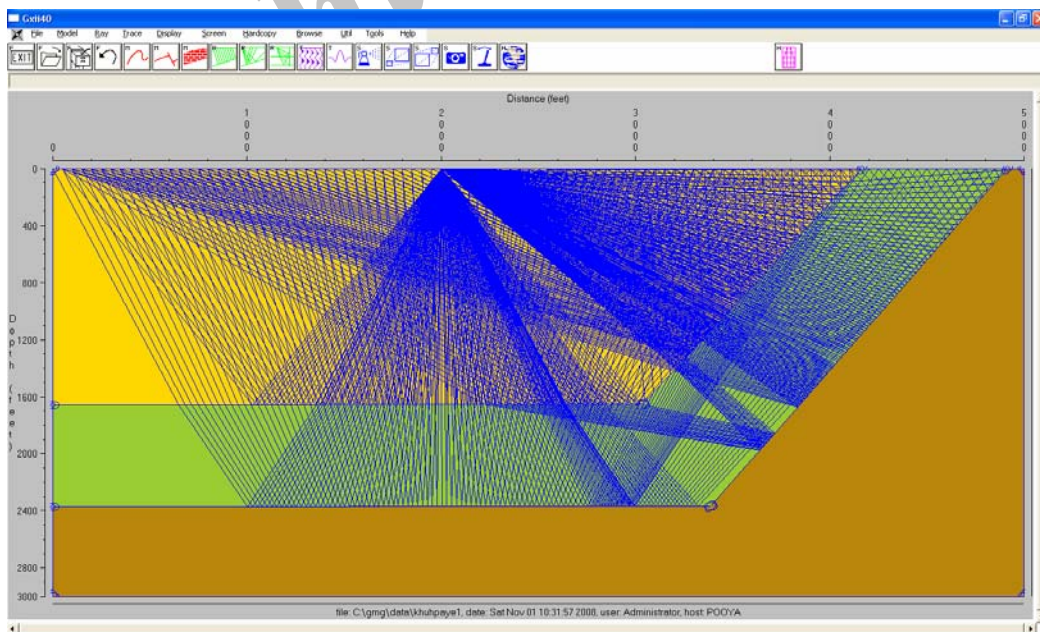


شکل ۱۱. تصویر مهاجرت کرده شکل ۶ با مدل سرعت rms.

#### ۵ مدل کوهپایه

با فواصل ۵۰ متر برای ردیابی پرتو قرار داده شد (شکل ۱۲). مدل سه لایه‌ای است و سرعت لایه‌ها به ترتیب ۲۲۰۰، ۲۵۰۰ و ۳۰۰۰ متر بر ثانیه است.

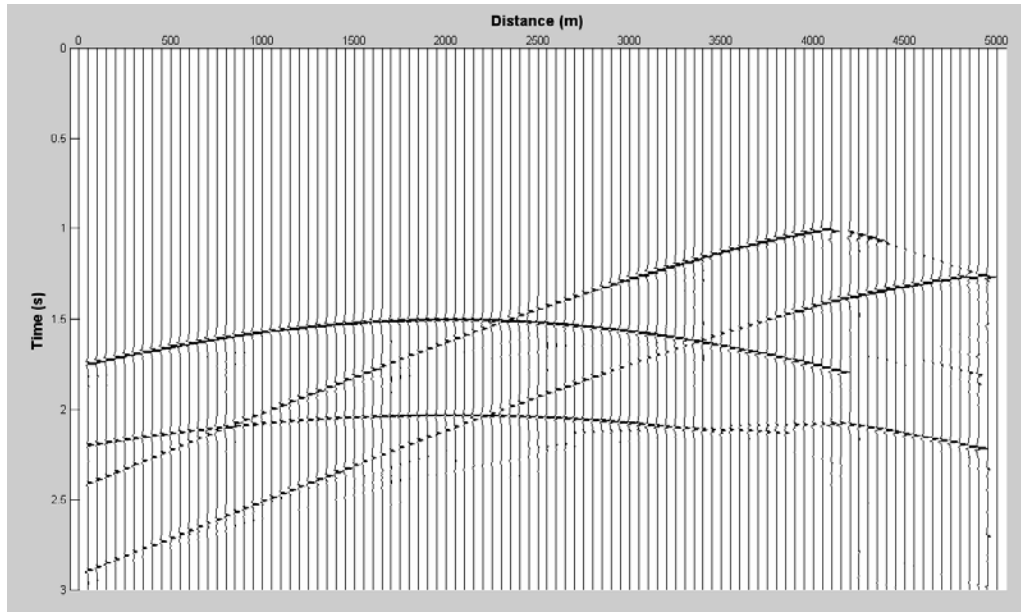
این مدل به کمک نرم‌افزار مدل زمین‌شناسی به عمق حداکثر ۳۰۰۰ متر و فاصله حداکثر ۵۰۰۰ متر در نظر گرفته شد. یک منبع در فاصله ۲۰۰۰ و تعداد ۱۰۱ گیرنده



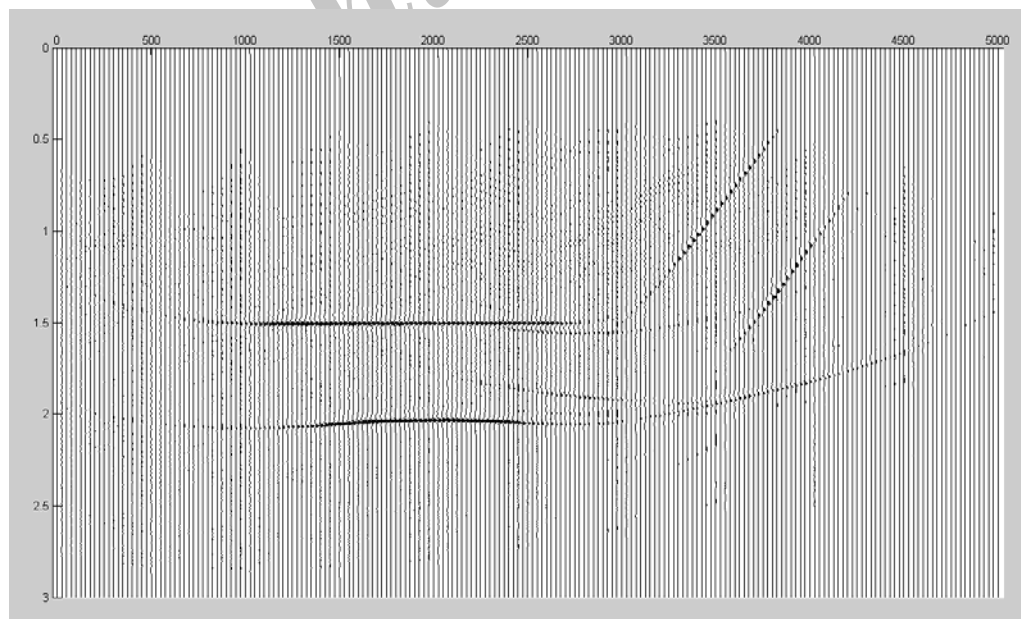
شکل ۱۲. مدل کوهپایه و مسیرهای ردیابی پرتوی موج.

MATLAB به‌منزله ورودی مهاجرت مورد استفاده قرار گرفت. تصویر مهاجرت کرده در شکل ۱۴ آورده شده است. در شکل ۱۵ تصویر مهاجرت کرده با مدل سرعت rms نشان داده شده است.

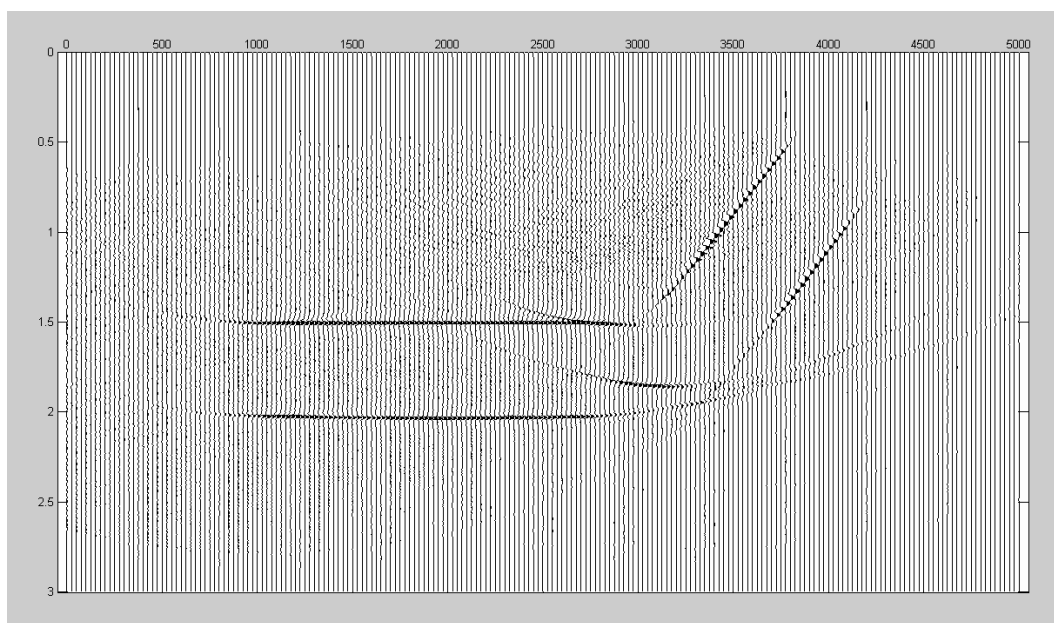
ردیابی پرتو با نمونه‌برداری زمانی با فواصل ۲ ms به طول ۳۰۰۰ ms با اعمال یک فیلتر و یک gain صورت گرفت تا ثبت منبع به دست آید (شکل ۱۳). از ثبت منبع (شکل ۱۳) و مدل سرعت آن به صورت segy خروجی گرفته شد و پس از تبدیل به ماتریس در



شکل ۱۳. ثبت منبع مشترک ناشی از ردیابی مسیر پرتو مدل کوهپایه، محل منبع در موقعیت ۲۰۰۰ متری واقع است.



شکل ۱۴. تصویر مهاجرت کرده با مدل سرعت میانی.



شکل ۱۵. تصویر مهاجرت کرده با مدل سرعت rms.

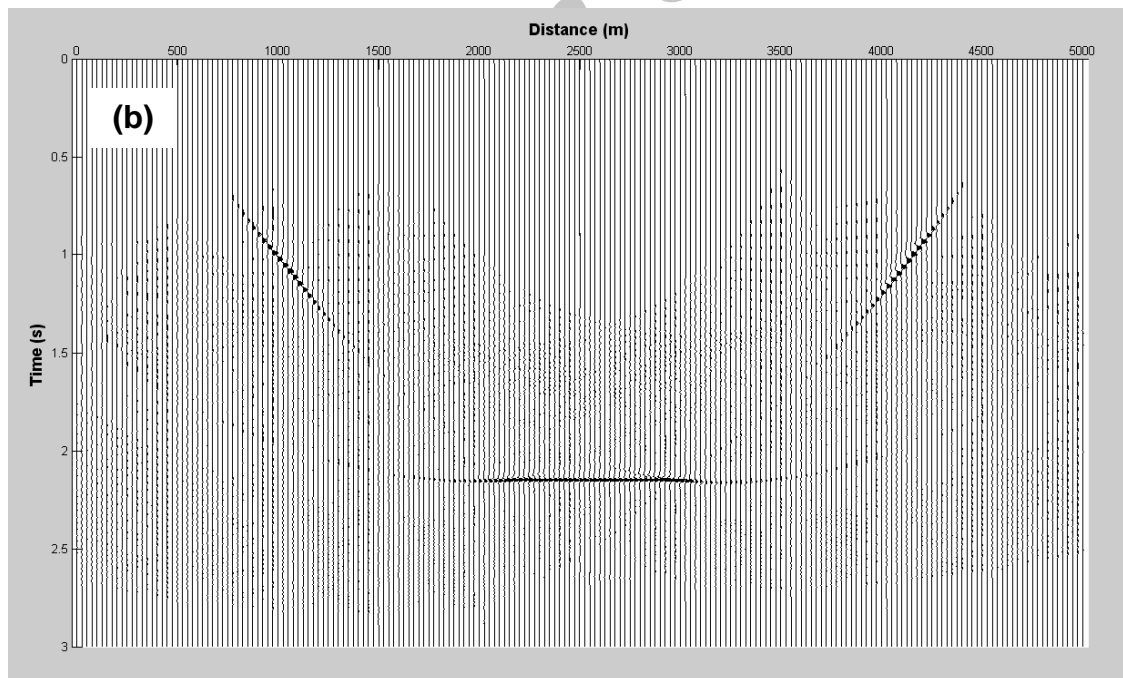
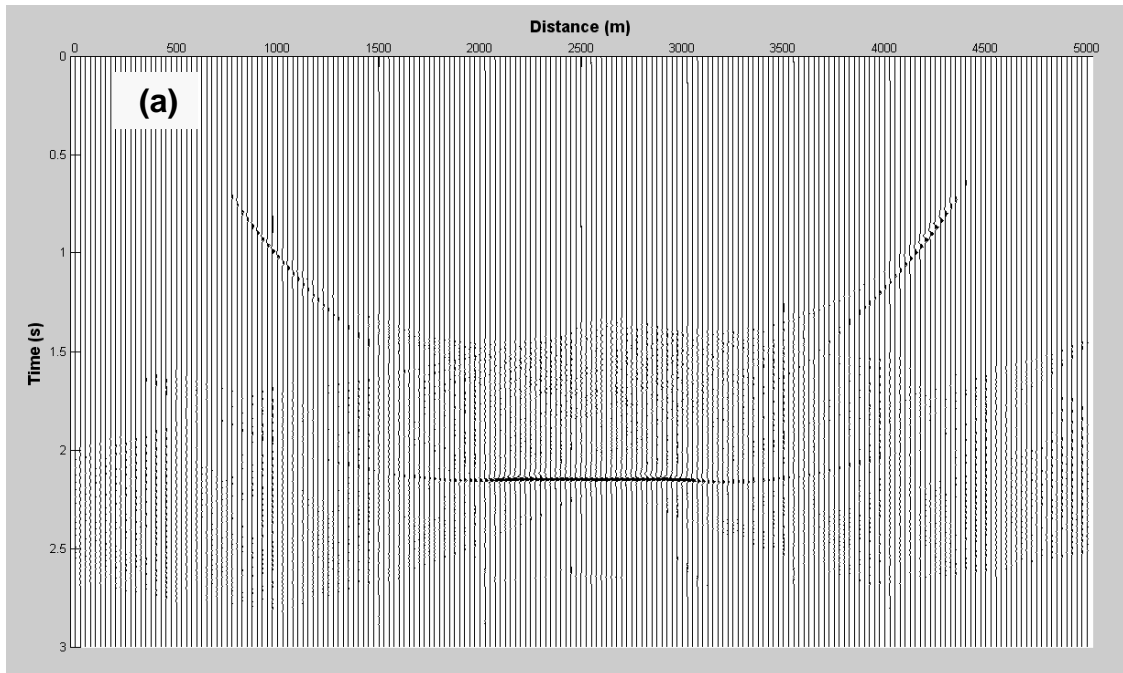
## ۶ پهنای دهانه مهاجرت

مهاجرت کرشلف شامل مجموع‌گیری از دامنه‌ها در طول هذلولی‌های پراش است. با داشتن سرعت rms در هر نمونه زمانی معین از ردلرزه ورودی، یک منحنی زمان گذر هذلولی مرتبط با پراشنده فرضی روی مقطع ورودی انداخته می‌شود که رأس آن در همان نمونه زمانی قرار دارد. در نظریه هذلولی پراش تا زمان و فاصله بی‌نهایت گسترش می‌یابد. در عمل با یک مسیر مجموع‌گیری هذلولی قطع شده در ارتباط است. گستره فضایی که مسیر مجموع‌گیری واقعی گسترده شده است را دهانه مهاجرت می‌نامند که با تعداد ردلرزه‌هایی که مسیر هذلولی را می‌پوشاند اندازه‌گیری می‌شود.

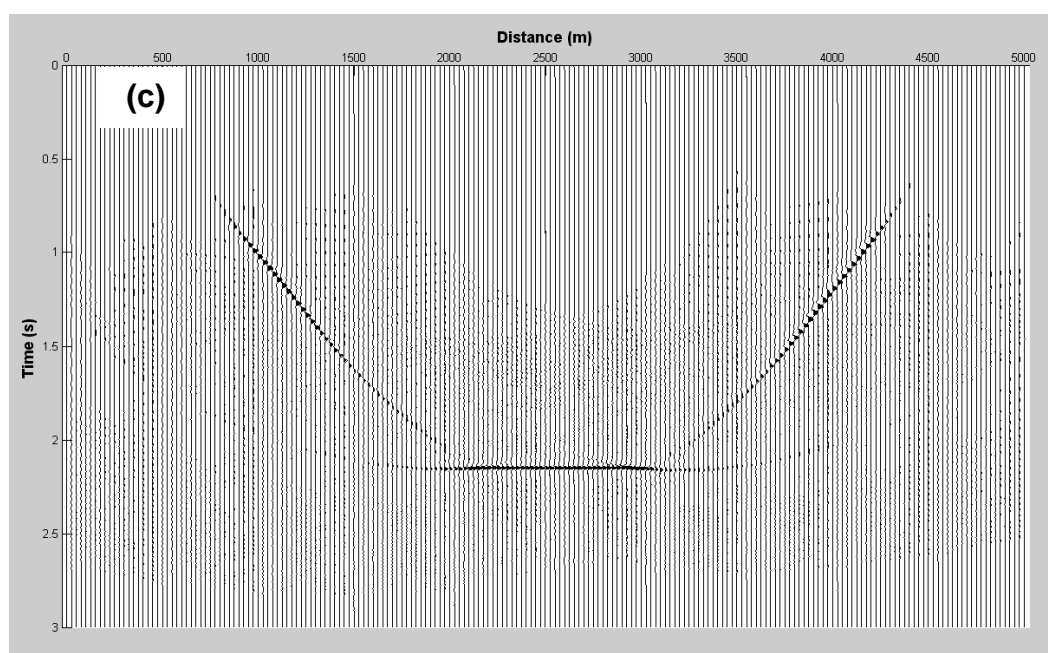
انحنای هذلولی پراش با تابع سرعت تعیین می‌شود. هذلولی سرعت کم دهانه کوچک‌تری در مقایسه با هذلولی سرعت زیاد دارد: سرعت زیاد به معنی مهاجرت بیشتر است. در عمل با تابع سرعتی سروکار داریم که با عمق تغییر می‌کند. هذلولی‌های پراش ممکن است انحنای گوناگونی برحسب مقادیر سرعت در نمونه

زمانی داده شده باشند. به دلیل تغییرات قائم سرعت، پهنای دهانه معمولاً تابع زمان است. در حالت معمول که با عمق سرعت افزایش می‌یابد، مهاجرت قسمت کم‌عمق مقطع نیازمند یک دهانه باریک است در حالی که قسمت‌های عمیق، نیازمند دهانه بزرگ‌ترند. یعنی با داشتن شیب ثابت وقایع عمیق بیشتر از وقایع کم‌عمق مهاجرت می‌یابند.

دهانه مهاجرت کوچک وقایع با شیب‌های تند را روی مقطع خروجی حذف می‌کند. افزایش پهنای دهانه امکان مهاجرت مناسب وقایع پرشیب را به وجود می‌آورد. از اینجا می‌توان فهمید که استفاده از پهنای دهانه کوچک، مانند یک فیلتر شیب حین مهاجرت عمل می‌کند، زیرا دهانه کوچک دامنه پرشیب هذلولی پراش را از مجموع‌گیری خارج می‌کند. در شکل ۱۶ مهاجرت با دهانه ۱۰۰۰، ۲۰۰۰ و ۳۰۰۰ متر نمایش داده شده است. از مقایسه شکل ۱۶ با شکل ۱۱ مشاهده می‌شود که با کاهش دهانه مهاجرت بازتابنده‌های شیب‌دار حذف شده‌اند.



شکل ۱۶. تصویر مهاجرت کرده شکل ۶ با دهانه مهاجرت (a) ۱۰۰۰ متر، (b) ۲۰۰۰ متر و (c) ۳۰۰۰ متر.



ادامه شکل ۱۶.

به روش کرشلف بسط داده شد که قابلیت مهاجرت ثبت‌های منبع مشترک دو بُعدی را دارد. توانایی این نرم‌افزار در مهاجرت ثبت‌های منبع تولید شده با نرم‌افزار GXII به روش ردیابی پرتو موج سنجیده شد که نتایج آن در زیر آمده است:

- نرم‌افزار عرضه شده در مهاجرت بازتابنده‌های افقی و شیب‌دار به خوبی عمل می‌کند.

- پارامتر بحرانی مهاجرت کرشلف پهنای دهانه مهاجرت است. دهانه کوچک باعث حذف شیب‌های تند می‌شود، وقایع افقی دروغین تولید و نوفه تصادفی ناهمبسته از ردلرزه به ردلرزه را سازماندهی می‌کند. اثر پارامتر بحرانی دهانه مهاجرت در شیب‌های تند و اعماق بیشتر مشخص می‌شود.

- در مهاجرت پیش از برانبارش مدل سرعت مناسب از اهمیت ویژه‌ای برخوردار است. به طوری که اگر سرعت‌های به کار رفته دقیق نباشد، این عملگر در ساختارهای ساده مزیت کیفی خود را آشکار نمی‌کند و

به طور خلاصه این موارد را می‌توان برای انتخاب پهنای مهاجرت مناسب عنوان کرد.

۱- پهنای دهانه بسیار کوچک باعث از بین رفتن شیب‌های تند و تغییرات سریع در دامنه‌ها می‌شود.

۲- پهنای دهانه بسیار کوچک نوفه‌های تصادفی را به خصوص در قسمت‌های عمیق تر مقطع به صورت وقایع افقی جعلی سازماندهی می‌کند.

۳- پهنای دهانه مهاجرت بسیار بزرگ به معنای زمان بیشتر برای رایانه است. مهم‌تر از آن دهانه‌های بزرگ باعث می‌شود که کیفیت مهاجرت در شرایط نسبت سیگنال به نوفه کم، تنزل یابد. استفاده از پهنای بزرگ باعث می‌شود نوفه تصادفی در زمان‌های زیاد وارد داده کم عمق سالم شود.

## ۷ نتیجه گیری

در این مقاله نرم‌افزاری در محیط MATLAB برای مهاجرت پیش از برانبارش زمانی داده‌های لرزه‌ای دو بُعدی



نمی‌توان آن را درحکم یک روش مهاجرت برتر به حساب آورد.

- با توجه به حساسیت زیاد مهاجرت پیش از برانبارش نسبت به سرعت می‌توان از آن به‌منزله ابزاری برای به‌دست آوردن سرعت‌های rms استفاده کرد.

#### منابع

هادیان، پ، ۱۳۸۷، مهاجرت زمانی پیش از برانبارش داده‌های لرزه‌ای دو بُعدی به روش کرشهف، پایان‌نامه کارشناسی ارشد مهندسی اکتشاف نفت، دانشکده مهندسی معدن، متالورژی و نفت، دانشگاه صنعتی امیرکبیر.

Bancroft, J. C., 2007, A practical understanding of pre- and poststack migrations, Volume 2 (prestack): Soc. Expl. Geophys.

Claerbout, J. F., 1985, Imaging the Earth's interior: Blackwell Scientific Publications.

Margrave, G. F., 2003, Numerical methods of exploration seismology with algorithms in MATLAB: The University of Calgary.

Ottolini, R. A., 1982, Migration of reflection seismic data in angle midpoint coordinates: Ph.D. diss., Stanford Univ.

Robinson, E. A., 1983, Migration of Geophysical Data: International Human Resources Development Corp.

Schneider, W. A., 1978, Integral formulation for migration in two and three dimensions: Geophysics, **43**, 49-76.

Taner, M. and Koehler, F., 1969, Velocity spectra-Digital computer derivation and application of velocity functions: Geophysics, **34**, 859-881.

Yilmaz, O., 2001, Seismic data analysis: Soc. Expl. Geophys.