

## مدلسازی مستقیم در محاسبه سرعت لرزه‌ای بدون حل معادله آیکونال

فرحناز فتوحی کاوکانی<sup>۱</sup>، محمد علی ریاحی<sup>۲</sup>، ناصر کشاورز<sup>۳</sup> و غلامرضا کرمعلی<sup>۴</sup>

۱- دانشجوی دکتری ژئوفیزیک (لرزه شناسی)، دانشگاه آزاد اسلامی واحد علوم تحقیقات تهران

۲- دانشیار موسسه ژئوفیزیک دانشگاه تهران

۳- استادیار و پژوهنده ارشد پژوهشگاه صنعت نفت

۴- استادیار دانشگاه هوایی شهید فتاحی

### چکیده

در این مطالعه به بررسی مدلسازی مستقیم لرزه‌ای و انتقال تابع تئوری از حوزه مسافت - عمق به حوزه مسافت - زمان پرداخته شده است که برخلاف سایر روش‌های مدلسازی مستقیم لرزه‌ای از حل معادله آیکونال که زمان‌بر و پرهزینه است برای محاسبه زمان رسیدهای تئوری موج صرف نظر شده و از الگوریتم ساده‌تری بر مبنای تکرارهایی به اندازه ابعاد شبکه روی مشتقات متوالی تابع تئوری بر حسب مسافت و عمق، انتقال تابع از حوزه مسافت - عمق به حوزه مسافت - زمان انجام گرفته است. توابع تئوری مختلفی از توابع ساده تا توابع پیچیده‌ای که ساختارهای زیر سطحی را تا حد ممکن بازسازی کند برای بررسی انتخاب و کدهای مربوطه بر اساس الگوریتم مورد نظر نوشته و نتایج بدست آمده با اعمال وارون سازی لرزه‌ای، دوباره از حوزه مسافت - زمان به حوزه مسافت - عمق منتقل و با تابع تئوریک مقایسه شد و انطباق خوبی را نشان دادند.

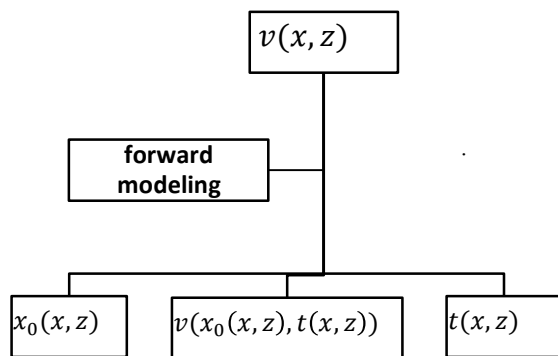
واژگان کلیدی: سرعت لرزه‌ای - مدلسازی مستقیم لرزه‌ای - معادله آیکونال.

### مقدمه

می‌باشد. از جمله مهمترین پردازشهایی که پایه سایر پردازشهای لرزه‌ای است محاسبه سرعت لایه‌ها و تعیین ساختار سرعتی زیر سطحی است. برای تعیین مدل سرعت مناسب در هر منطقه روش‌های مختلفی وجود دارد که داده‌های دریافتی را از حوزه مسافت - زمان به حوزه مسافت - عمق انتقال داده و تصویر لرزه‌ای منطقه را بدست آورده، بر اساس آن مدل زمین شناسی تعیین می‌شود که نشان دهنده موقعیت مکانی، تکتونیکی، سرعتی و در نهایت جنس لایه‌ها است ولی پاسخ یکه‌ای نخواهد بود. از آنجا که مدل مرجعی برای مقایسه تصویر و مدل بدست آمده و تعیین صحت و

دانستن ساختار پوسته برای انجام پروژه‌های اکتشافی در یک منطقه مهم و ضروری است و با توجه به اینکه ایران کشوری با ذخایر غنی هیدروکربنی است لذا برای تعیین محل این ذخایر اولین گام برداشتهای لرزه - ای بازتابی، پردازش، تفسیر و در نهایت تصویر سازی لرزه‌ای لایه‌های زیر سطحی [۱۴] زمین است و پردازش - های لرزه‌ای که امروزه مدلسازی لرزه‌ای یکی از این روش‌های متداول آن است منجر به حصول نتایج دقیق‌تر روی داده‌های بازتابی می‌شود. به این ترتیب مدلسازی لرزه‌ای از ضروریات پروژه‌های اکتشاف نفت و گاز برای تعیین ساختارهای سرعتی در تفسیر بهینه داده‌های لرزه‌ای

مدلسازی مستقیم لرزه‌ای شامل الگوریتم‌هایی هستند که سرعت در حوضه  $(x, z)$  یعنی  $v(x, z)$  یا مدل اولیه ریاضی را به سرعت در حوضه  $(x_0, t)$  یعنی  $v(x_0, t)$  که قابل مقایسه با داده‌های دریافتی از عملیات لرزه‌ای است تبدیل می‌کنند. در این روش مدلسازی مستقیم، علاوه بر انتقال سرعت از حوضه مسافت-عمق به حوضه مسافت-زمان یعنی تولید  $v(x_0, t_0)$  محل و زمان رسید موج به سطح زمین یعنی  $x_0(x, z)$  و  $t_0(x, z)$  از  $v(x, z)$  معلوم را هم ممکن می‌سازد.



شکل ۱- طرح شماتیک از ورودی و خروجی مدلسازی مستقیم برای تشریح الگوریتم بکار رفته از مفهوم پرتو تصویر که توسط هوبرال [۸] برای بیان ارتباط بین مختصات زمانی و مختصات عمقی نقطه بازتابنده بیان شده استفاده می‌شود. مطابق شکل ۲ پرتوها از نقطه زیر سطحی R شروع شده و به سطح زمین می‌رسند. پرتوهایی مانند RI که مسیر عمود بر سطح زمین را طی می‌کنند، دارای زمان رسید کمینه هستند و پرتوهای تصویر نام دارند. نقطه R در دو سیستم مختصات عمقی بر حسب  $(x, z)$  و در مختصات زمانی  $(x_0, t_0)$  قابل تعریف است.

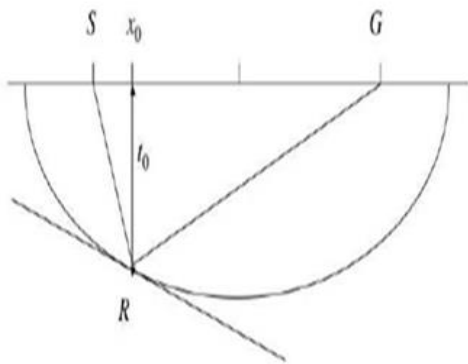
دقت آن وجود ندارد باید با مدلسازی لرزه‌ای مدل مرجعی متناسب با شرایط زمین شناسی و سایر اطلاعات اولیه ایجاد شود. معمولاً برای بدست آوردن مدل مرجع یک مدل ریاضی در حوضه مسافت-عمق تعریف شده و با حل معادله آیکونال [۱] برای آن زمان سیر امواج در مدل محاسبه و تابع به حوضه مسافت-زمان برده می‌شود که قابل مقایسه با داده‌های پردازش شده حقیقی است. در این مطالعه با توجه به اینکه حل معادله آیکونال نیاز به محاسبات پیچیده و طولانی و پرهزینه دارد، از روش پیشنهادی کامرون و همکاران (۲۰۰۷) بدون حل آیکونال استفاده شده است که دقت و سرعت محاسبات افزایش چشمگیری یافته است.

## روش انجام کار

از آنجا که هدف نهایی بدست آوردن بهترین ساختار سرعتی برای منطقه مورد مطالعه است، مدل ریاضی که به عنوان مدل مرجع انتخاب می‌شود باید با دقت و بر اساس شناخت زمین شناسی سطحی و زیر سطحی تعیین و سپس این مدل از حوضه مسافت-عمق به حوضه مسافت-زمان منتقل شود تا محاسبات مربوط به مدلسازی مستقیم لرزه‌ای دقیق‌تر انجام گرفته، نتایج به داده‌های حقیقی نزدیک‌تر شوند. با فرض اینکه تابع ریاضی برحسب مسافت-عمق که به عنوان مدل مرجع انتخاب شده از دقت کافی برخوردار است برای انتقال آن به حوضه مسافت-زمان یعنی انجام مدلسازی مستقیم لرزه‌ای در این تحقیق از روش کامرون و همکاران [۲، ۳، ۴] استفاده شده است.

اگر  $x_0$  محل خروج پرتو تصویر از نقطه بازتابش R و زمان رسید دوطرفه در طول پرتو باشد می‌توان از سرعت‌های مهاجرت  $v_m(x_0, t_0)$  به جای سرعت  $v$  در رابطه (۱) استفاده کرد.

$$t(S, G, x_0, t_0) = \sqrt{\frac{t_0^2}{4} + \frac{|x_0 - S|^2}{v_m^2(x_0, t_0)}} + \sqrt{\frac{t_0^2}{4} + \frac{|x_0 - G|^2}{v_m^2(x_0, t_0)}} \quad (2)$$

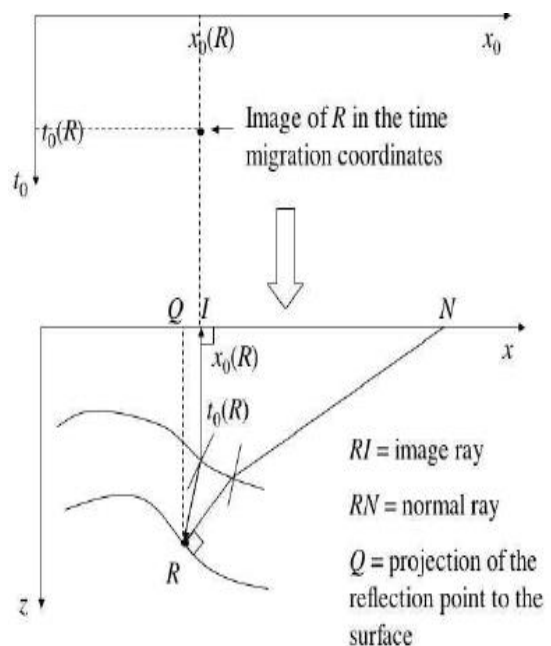


شکل ۳- تقریب زمان رسید، موج از نقطه سطحی S به سمت نقطه R در داخل زمین حرکت و پس از بازتابش در نقطه سطحی G دریافت می‌شود. R روی سطح زمین در محل عمود R به  $x_0$  (عمود به سطح زمین) فرض می‌شود در حالیکه محل حقیقی این نقطه در محل عمود واصل سطح به لایه بازتابنده و عمود بر بازتابنده است. [۳، ۲]

بر اساس معادلات دیکس [۷] برای فاصله‌های کوچک بین چشمه- گیرنده و به شرطی که سرعت درون زمین فقط با عمق تغییر کند، سرعت مهاجرت  $v_m(x_0, t_0)$  با سرعت کمترین مربعات برابر شده و از رابطه (۳) بدست می‌آید.

$$v_m(t_0) = \sqrt{\frac{1}{t_0} \int_0^{t_0} v^2(z(\tau)) d\tau} \quad (3)$$

برای تشکیل مختصات زمانی نقطه‌ای روی محور  $x_0$  (سطح زمین) انتخاب می‌شود، بطوریکه پرتو تصویر از  $x_0$  خارج شده و با زمان معلوم به نقطه R می‌رسد. به این ترتیب  $x_0$ ، محل خروج پرتو تصویر و  $t_0$ ، زمان رسید دوطرفه در طول پرتو است. موقعیت نقطه R روی محور  $x$  در مختصات زمانی بجای محل Q که بر سطح عمود است، در محل صحیح پرتو تصویر یعنی I نشان داده می‌شود و برای تقریب زمان رسید مطابق شکل ۳، محل چشمه، محل گیرنده، R نقطه بازتابنده،  $v$  سرعت درون زمین و بیضی رسم شده، مکان هندسی نقاط بازتابش R است، کل زمان سیر موج از S به R و از R به G از رابطه (۱) [۱۴] محاسبه می‌شود:



شکل ۲- پرتوهای تصویر و مختصات زمانی [۳، ۲]

$$t_{SR} + t_{RG} = \sqrt{\frac{t_0^2}{4} + \frac{|x_0 - S|^2}{v^2}} + \sqrt{\frac{t_0^2}{4} + \frac{|x_0 - G|^2}{v^2}} \quad (1)$$

به عنوان حکم باید برای هر نقطه روی شبکه  $(x, z)$  که دارای  $v(x, z)$  معلوم هستند،  $(x_0, t)$  و  $(x_0, t_0)$  تعیین شود.

مدلسازی مستقیم از طریق الگوریتم ردیابی مسیر پرتو محوری [۶] با حل سیستم معادلات ۷ با شرایط مرزی ۶ به صورت زیر انجام گرفته است:

۱- تعریف مدل ریاضی  $v(x, z)$  روی شبکه  $(x, z)$ .

۲- پیدا کردن پرتوهای تصویر این شبکه با شرایط مرزی و حل سیستم معادلات زیر [۲]:

$$v(x_{0i}, T = 0) = f(x_{0i}, T = 0) \quad (۶)$$

$$Q(x_{0i}, T = 0) = 1, \quad P(x_{0i}, T = 0) = 0$$

$$x_T = v \sin \theta, \quad x(0) = x_{0i} \quad (۷)$$

$$z_T = v \cos \theta, \quad z(0) = 0$$

$$\theta_T = -v_n = -v_l, \quad \theta(0) = 0$$

$$Q_T = v^2 P, \quad Q(0) = 1$$

$$P_T = -\frac{v_{nn}}{v} Q = -\left(\frac{v_{ll}}{v} + \frac{kv_T}{v^2}\right) Q, \quad P(0) = 0$$

پارامترهای فوق به صورت زیر تعریف شده‌اند:

مشتقات  $v$  در جهت عمود بر پرتو:

$$v_n = v_x \cos \theta - v_z \sin \theta, \quad v_n \equiv v_q$$

$v_l$  مشتق  $v$  نسبت به طول کمان جبهه

مشتقات دوم  $v$  در جهت عمود بر پرتو:

$$v_{nn} = v_{xx} \cos^2 \theta - 2v_{xz} \cos \theta \sin \theta + v_{zz} \sin^2 \theta,$$

$$v_{nn} \equiv v_{qq}$$

اگر سرعت به طور افقی تغییر کند وارون دیکس [۷] برای پیدا کردن سرعتهای فاصله‌ای با استفاده از سرعتهای مهاجرت مطابق رابطه (۴) به کار می‌رود.

$$v(x_0, t_0) = \sqrt{\frac{\partial}{\partial t_0} (t_0 v_m^2(x_0, t_0))} \quad (۴)$$

بنابراین اگر پرتو تصویر در زمان  $t_0$  با جبهه موجی با انحنای  $R$  [۹] به نقطه سطحی  $x_0$  برسد زمان رسیده‌ها از  $A$  به سطح زمین در امتداد سایر پرتوهای نزدیک به پرتو تصویر که به نقطه سطحی  $x$  رسیده‌اند با بسط تیلور و از رابطه (۵) بدست می‌آیند.

$$t(x, y) = t_0 + \frac{1}{2} \Delta X^T M \Delta X + O(\delta^3) \quad (۵)$$

$$M \text{ و } \Delta X = \begin{pmatrix} x - x_0 \\ y - y_0 \end{pmatrix}, \quad \delta = \sqrt{(x - x_0)^2 + (y - y_0)^2}$$

مشتقات دوم زمان  $t(x, y)$  در نقطه اولیه  $(x_0, y_0)$  است. با توجه به روابط فوق برای انجام مدلسازی مستقیم به عنوان فرض اولیه، پرتوهای تصویری [۶، ۱۰، ۸] را در نظر گرفته شده است که از نقطه‌ای زیر سطح زمین به مختصات  $(x, z)$  آغاز و پس از زمان  $t_0$  به نقطه  $x_0$  روی سطح زمین می‌رسند. ۲ شبکه زیر را برای این پرتوها تعریف شده است:

۱- شبکه  $(x, z)$  با مقادیر  $v(x, z)$  معلوم بطوریکه

$x_{min} \leq x \leq x_{max}$  و  $0 \leq z \leq z_{max}$  است.

۲- شبکه  $(x_0, t)$  با مقادیر  $v(x_0, t_0)$  مجهول که

$x_{min} \leq x_0 \leq x_{max}$  و  $0 \leq t_0 \leq T_{max}$  است.

پ : محاسبه  $v_i(t_{k+1}) = f_i(T_{k+1})Q(T_{k+1})$  برای هر پرتو با در نظر گرفتن شرط

$$f_i(t_{k+1}) \equiv f(x_{0i}, T_{k+1}), \quad i = 0, 1, \dots, n-1$$

به این ترتیب در هر مرحله، در امتداد پرتو  $i$  ام، برای هر نقطه به مختصات  $(x, z)$  و سرعت  $v(x, z)$ ، زمان  $t$  (زمان سیر یک طرفه موج) ثابت نگه داشته شده و سیستم معادلات ردیابی مسیر پرتو محوری بطور همزمان حل و  $x_0$  های معادل این  $x$  ها و  $z$  های معادل این  $t$  ها و سرعت در این نقاط جدید بر حسب  $(x_0, t_0)$  به عنوان  $v(x_0, t_0)$  تعیین شده‌اند.

۴ - رسم نتایج محاسبات به صورت نمودارهای  $v(x_0, t_0)$ ، پرتوها و جبهه‌های موج.

۵ - استفاده از خروجیهای  $t_0(x_i, z_j)$  و  $x_0(x_i, z_j)$  برای تبدیل مدل زمانی به مدل سرعت عمقی و بررسی صحت مدلسازی مستقیم.

### بحث و نتایج

در این بخش با توجه به تابع ریاضی مدل تعریف شده، مدل حقیقی سرعت در مختصات  $(x, z)$  رسم می‌شود. محور  $x$  فواصل افقی روی سطح زمین (فاصله چشمه - گیرنده) و  $z$  فواصل قائم از سطح زمین (عمق) را نشان می‌دهند. پس از انجام مدلسازی مستقیم نتایج به صورت زیر رسم شده است:

- مدل سرعت در مختصات  $(x_0, t)$  به عنوان مدل قابل مقایسه با داده‌های حقیقی رسم می‌شود. محور  $x_0$  نشان دهنده محل خروج پرتوها و حرکت آنها به داخل زمین و  $t$  معرف زمان سیر پرتو از  $x_0$  تا خروج از محدوده مدل (زمان سیر یک طرفه) است. نقاط

$v_{ll}$  مشتق دوم  $v$  در طول کمان جبهه و  $k$  انحنای جبهه،  $n$ ، بردار عمود بر جبهه به صورت زیر است

$$v_n n_x + v_z n_z = v_t = \frac{v_T}{v}$$

۳ - حل سیستم ردیابی مسیر پرتو فوق برای پرتو  $i$  ام با روش مستقیم اولیگر برای  $k = 0$  تا  $k = p - 1$  طی مراحل الف تا پ [۲]:

الف : محاسبه

$$v(x_{0i}, T_k), \quad i = 0, 1, \dots, n, \quad k = 0, 1, \dots, p-1$$

و پرتو تصویر  $(x(x_{0i}, T_k), z(x_{0i}, T_k))$

- برای  $l_i$  (طول کمان جبهه بین پرتو صفرم و پرتو  $i$  ام) و  $v_i(T_k)$  (سرعت روی پرتو  $i$  ام) در زمان  $T_k$ ، چند جمله‌ایهای کمترین مربعاتی را به دسته‌ای از نقاط با مختصات  $(l_i, v_i(T_k))$  برازش داده و  $v_l(T_k)$  و  $v_{ll}(T_k)$  را از روی مشتقات اول و دوم آنها بدست آورده سپس مقادیر سرعت  $v_i(T_k)$  با مقادیر این چند جمله‌ای‌ها جایگزین شده‌اند.

- اگر نقاطی با مختصات  $i$  (شماره پرتو) و  $x_i, z_i$  (مختصات  $x, z$  پرتو  $i$  ام در زمان  $T_k$ ) باشد  $[(i, x_i(T_k)), (i, z_i(T_k))]$  چند جمله‌ایهای کمترین مربعاتی را برازش داده و  $p_x$  و  $p_z$  را از روی مشتقات اول و دوم آنها بدست آورده و سپس مقادیر انحنای  $k(T_k)$  و  $v_T(T_k)$  از روابط ۸ و ۹ بدست آمده است:

$$k = \frac{p'_x p''_z - p'_z p''_x}{(p_x^2 p_z^2)^{3/2}} \quad (8)$$

$$v_t(T_k) = \frac{v(T_k) - v(T_{k-1})}{\Delta T} \quad (9)$$

ب : بهبود دقت  $v(x_{0i}, T_k)$  با انجام بخشهای مرحله الف برای هر پرتو.

پس از مدل‌سازی مستقیم: تابع سرعت بدست آمده روی شبکه  $(x_0, t_0)$  یا شبکه مدل‌سازی مستقیم که در محدوده  $0 \leq x_0 \leq 12$  و  $0 \leq t \leq 5$  تعریف شده است، به صورت  $v(x_0, t) \equiv v_{Dir}$  محاسبه می‌گردد. شبکه  $(x, z)$ ، مختصات عمقی  $(x_0, t_0)$  را پس از مدل‌سازی مستقیم نشان می‌دهد. شکل ۵ نتایج مدل سرعت بدست آمده پس از انجام مدل‌سازی مستقیم را در دو شبکه  $(x, z)$  و  $(x_0, t_0)$  نشان می‌دهد. شکل ۶ جبهه‌های موج روی شبکه  $(x, z)$  و پرتوهای خروجی از محل  $x_0$  روی شبکه  $(x, z)$  را پس از مدل‌سازی مستقیم نشان می‌دهد. شکل ۷ جبهه‌های موج، پرتوها و سرعت ورودی مدل روی شبکه  $(x, z)$  و رابطه بین زمان، عمق و سرعت ورودی مدل پس از مدل‌سازی مستقیم روی شبکه  $(x_0, t)$  را نشان می‌دهد. شکل ۸ پرتوها و جبهه‌های موج روی شبکه  $(x, z)$  و روی مدل سرعت در شبکه  $(x, z)$  بعد از مدل‌سازی مستقیم نشان می‌دهد.

بدست آمده روی شبکه  $(x_0, t)$  دارای محل جدیدی روی شبکه  $(x, z)$  هستند که تعیین و مدل سرعت آنها روی این شبکه جدید  $(x, z)$  هم رسم شده است. - پرتوها و جبهه موج‌ها برای مدل سرعت روی شبکه  $(x, z)$  رسم شده است.

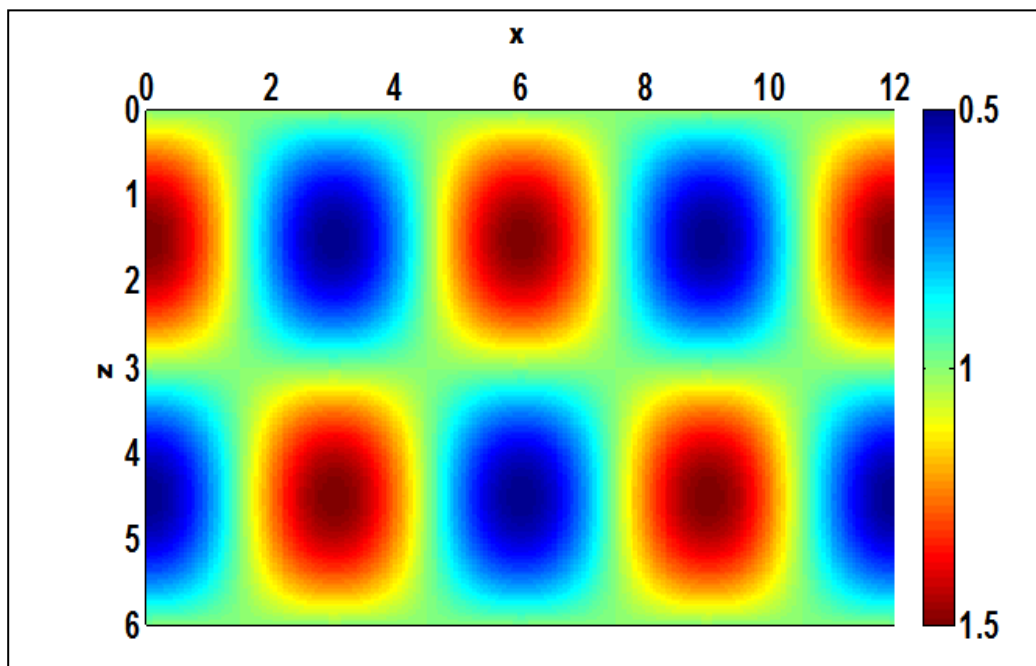
$$v(x, z) = 1 + \frac{1}{2} \cos \frac{\pi x}{3} \sin \frac{\pi z}{3}$$

شرح مدلها و نمایش نتایج اجرای الگوریتم‌ها

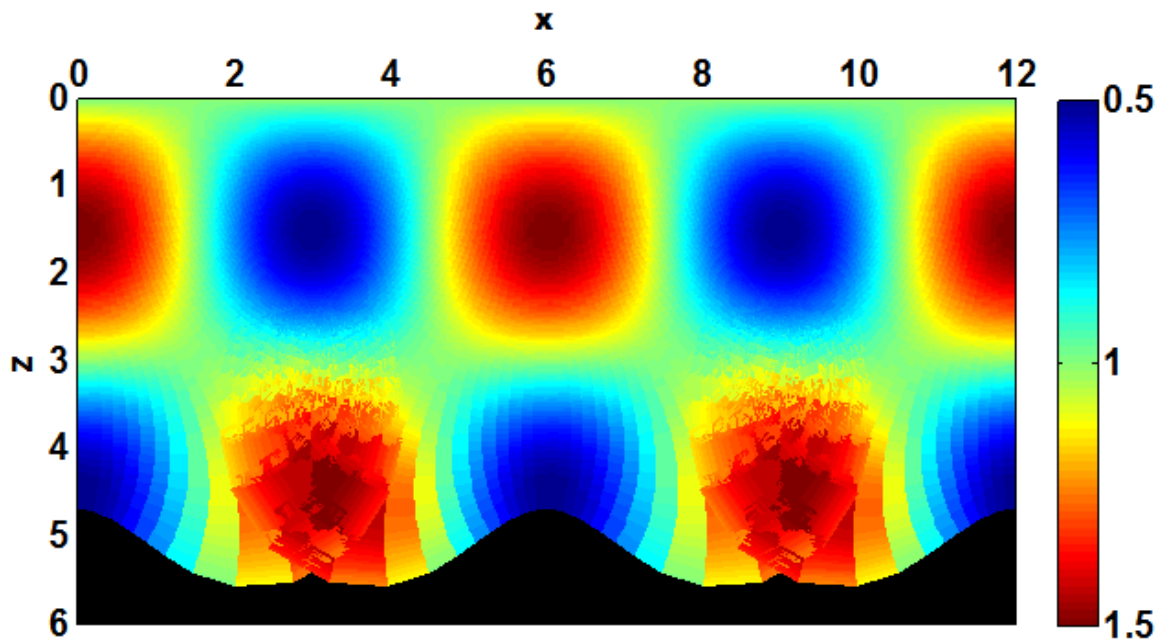
- بازسازی یکی از مدل‌های کامرون [۲، ۴، ۳]

مدل ۱:

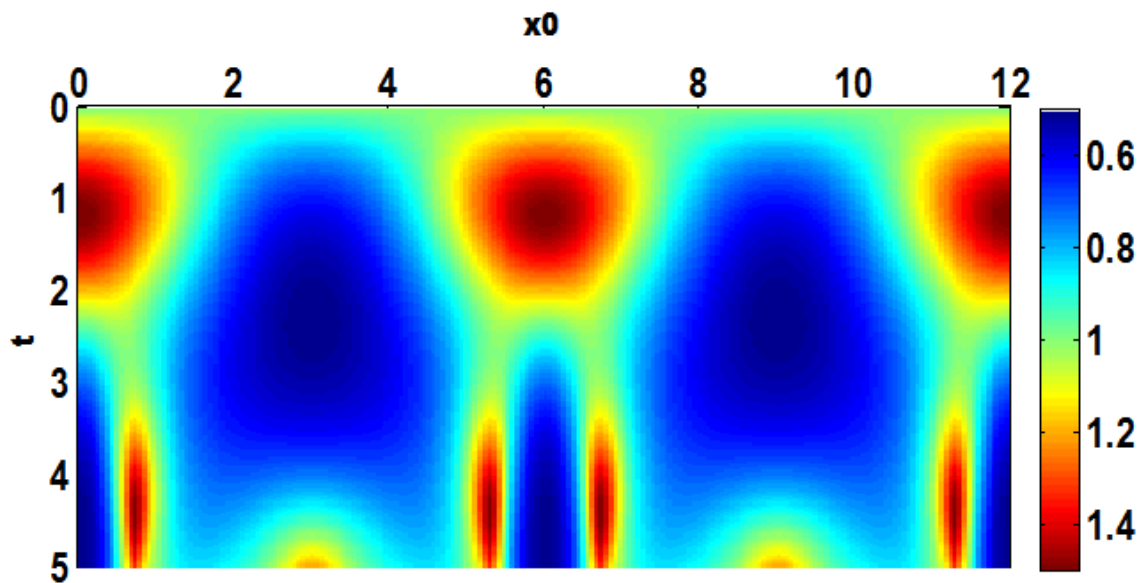
قبل از مدل‌سازی مستقیم: تابع سرعت تئوری در این مدل روی شبکه  $(x, z)$  در محدوده  $0 \leq x \leq 12$  و  $0 \leq z \leq 6$  مطابق شکل ۴ و به صورت زیر تعریف شده است:



شکل ۴ - مدل سرعت حقیقی یا  $v(x, z)$ ، رسم شده بر اساس تابع ریاضی مدل در شبکه تعریف شده  $(x, z)$  قبل از انجام مدل‌سازی مستقیم. مقیاس رنگی نشان‌دهنده سرعت بر حسب کیلومتر بر ثانیه، عمق و فاصله سطحی بر حسب کیلومتر است.

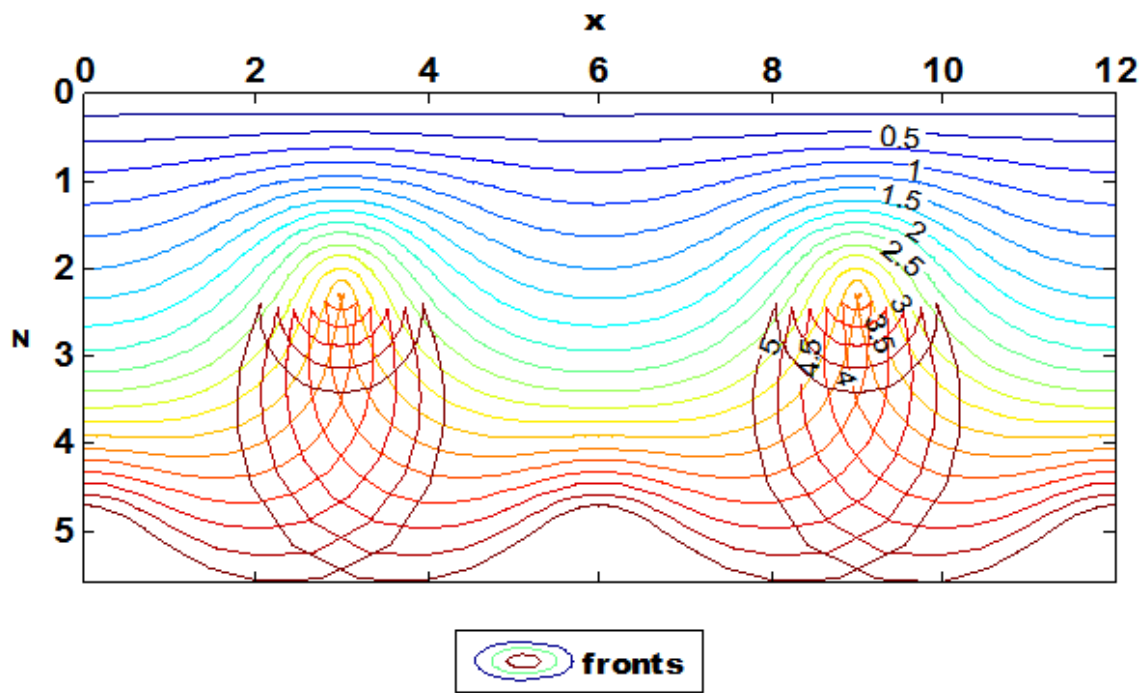


(الف)

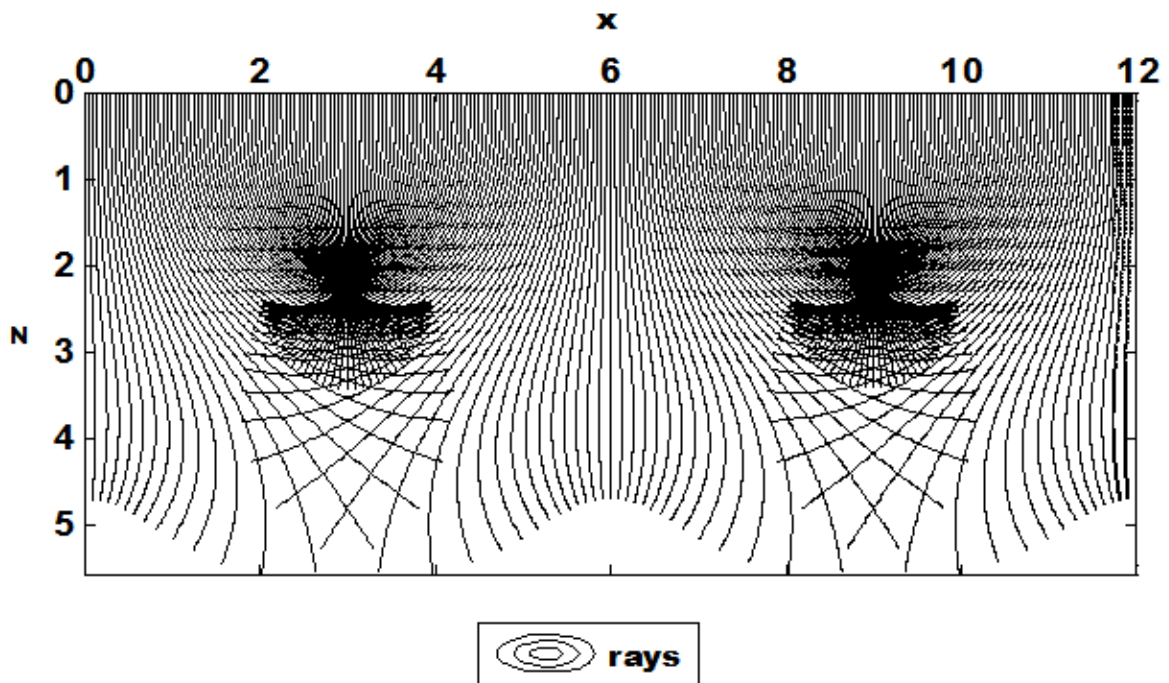


(ب)

شکل ۵ - (الف) مدل سرعت ورودی  $v(x, z)$  روی شبکه  $(x, z)$  متناسب با شبکه  $(x_0, t)$  پس از انجام مدل سازی مستقیم. (ب) سرعت ورودی  $v(x_0, t)$  تولید شده با مدل سازی مستقیم روی شبکه زمانی  $(x_0, t)$ . مقیاس رنگی نشان‌دهنده سرعت بر حسب کیلومتر بر ثانیه، عمق و فاصله سطحی بر حسب کیلومتر و زمان سیر یک طرفه بر حسب ثانیه است.

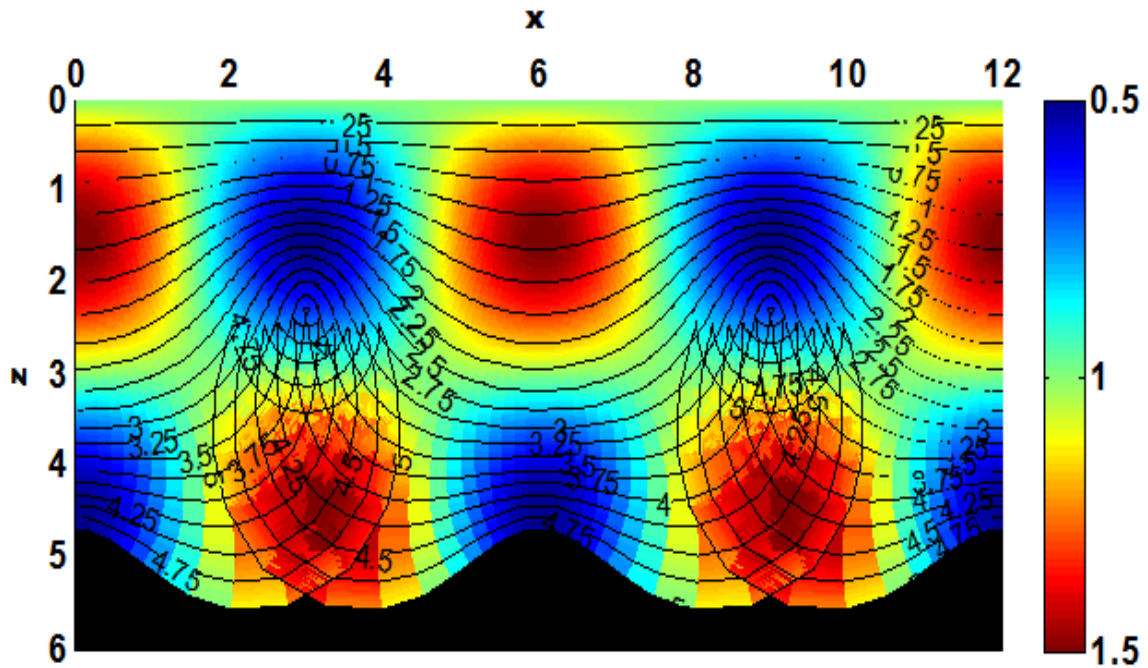


**rays on x-z grid after forward modeling**

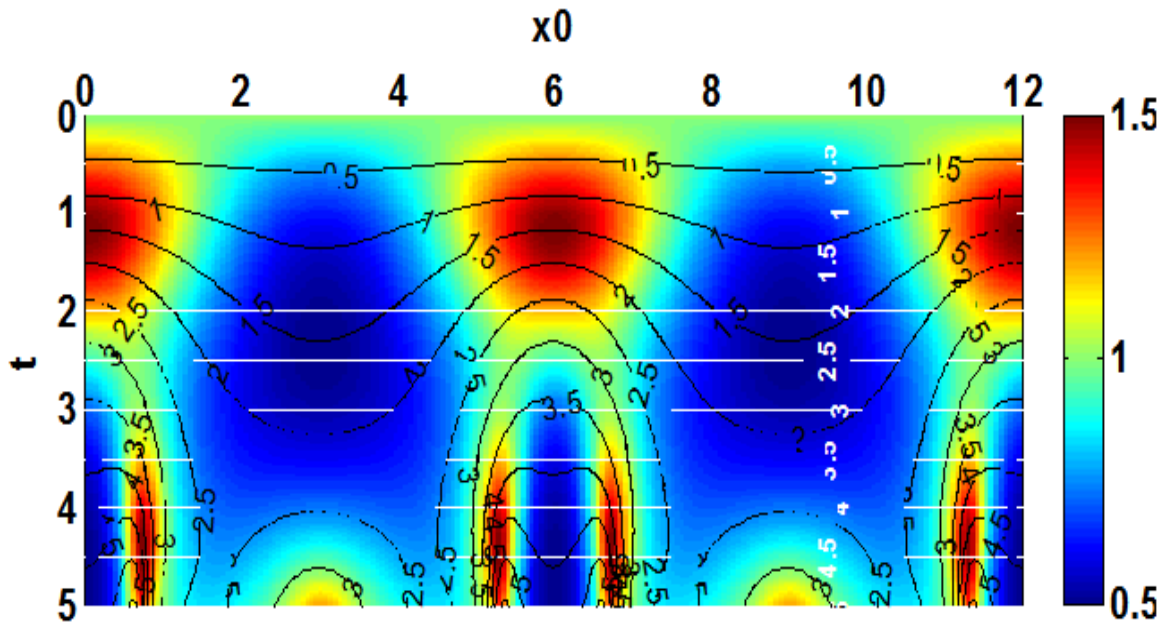


شکل ۶ - (الف) جبهه‌های موج روی شبکه  $(x, z)$  پس از مدل سازی مستقیم  
(ب) پرتوهای خروجی از محل  $x_0$  روی شبکه  $(x, z)$  پس از مدل سازی مستقیم  
عمق و فاصله سطحی بر حسب کیلومتر و زمان سیر یک طرفه بر حسب ثانیه است.





(الف)



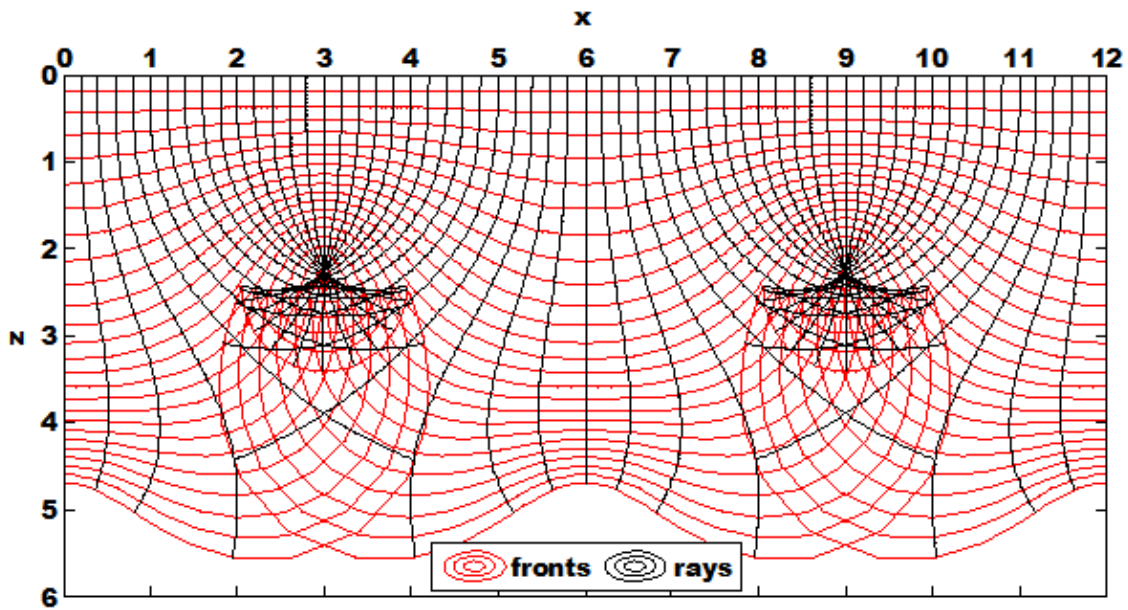
(ب)

شکل ۷- (الف) جبهه‌های موج، پرتوها و سرعت ورودی مدل پس از مدل سازی مستقیم روی شبکه  $(x, z)$

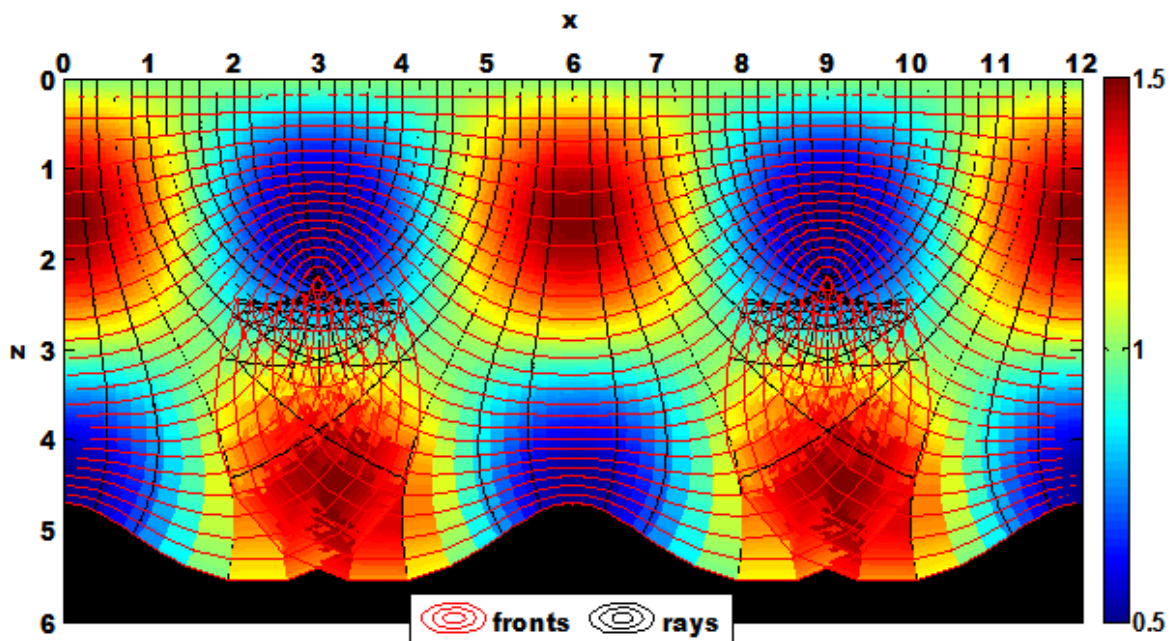
(ب) رابطه بین زمان، عمق و سرعت ورودی مدل پس از مدل سازی مستقیم روی شبکه  $(x_0, t)$ .

مقیاس رنگی نشان‌دهنده سرعت برحسب کیلومتر بر ثانیه، فاصله سطحی

بر حسب کیلومتر و زمان برحسب ثانیه است.

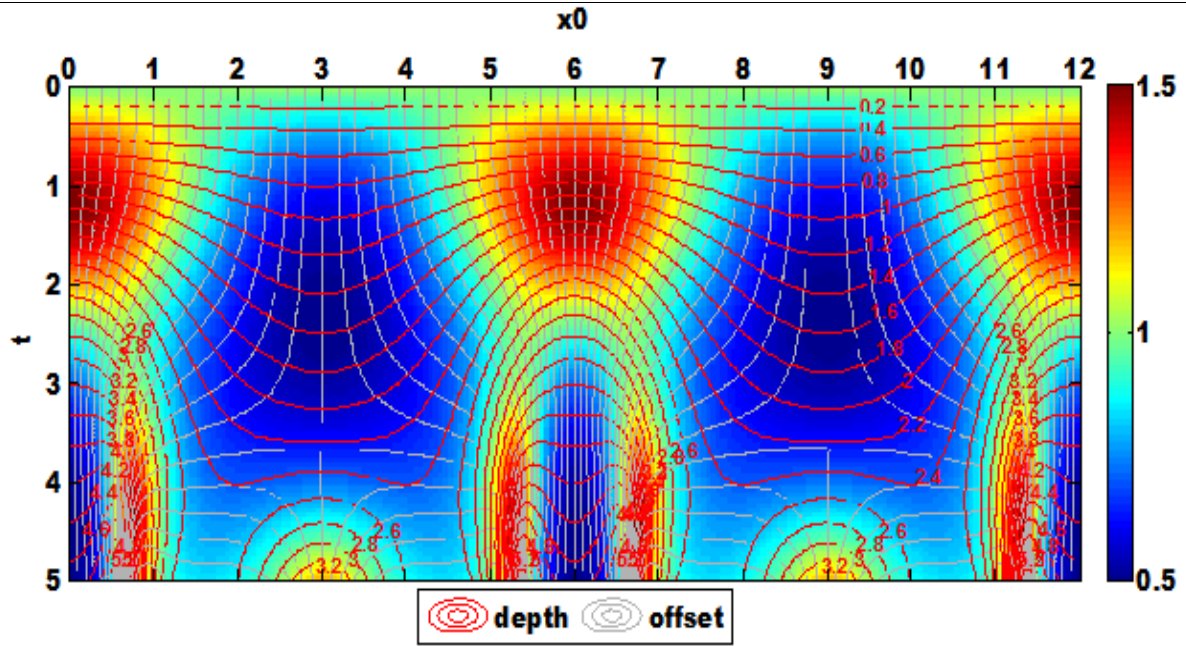


(الف)

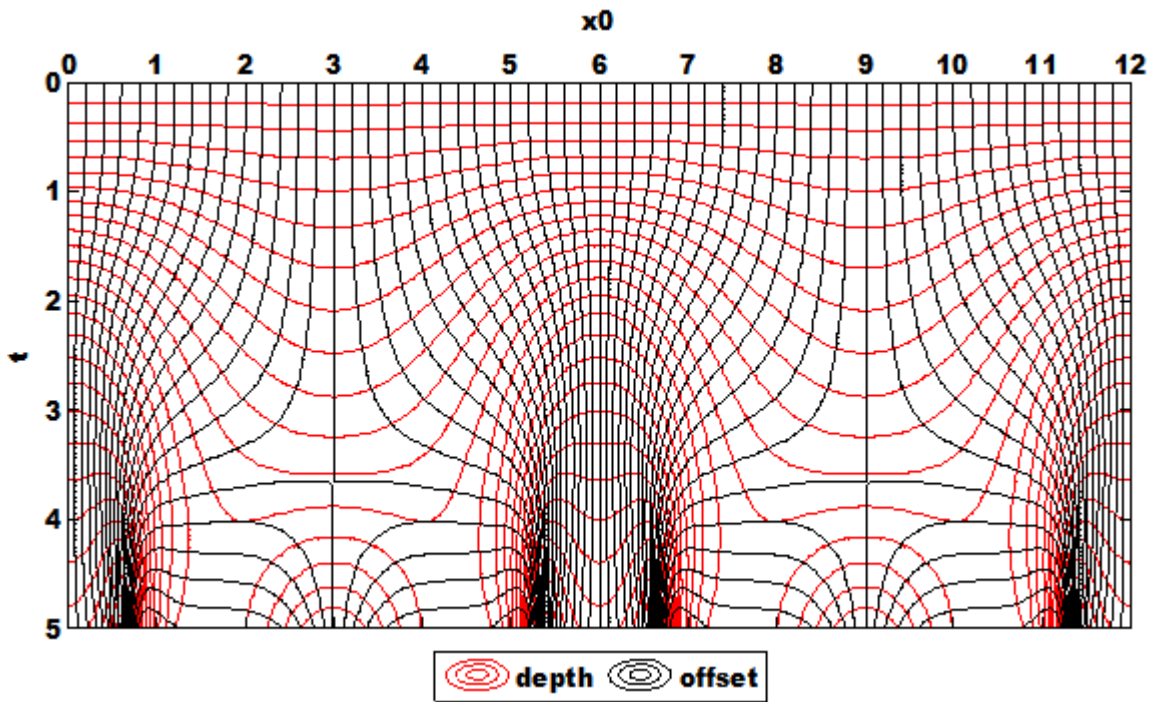


(ب)

شکل ۸ - (الف) پرتوها و جبهه‌های موج روی شبکه  $(x, z)$  بعد از مدل‌سازی مستقیم  
(ب) پرتوها و جبهه‌های موج و سرعت روی شبکه  $(x, z)$  بعد از مدل‌سازی مستقیم  
مقیاس رنگی نشان‌دهنده سرعت بر حسب کیلومتر بر ثانیه، عمق و فاصله سطحی بر حسب کیلومتر است.



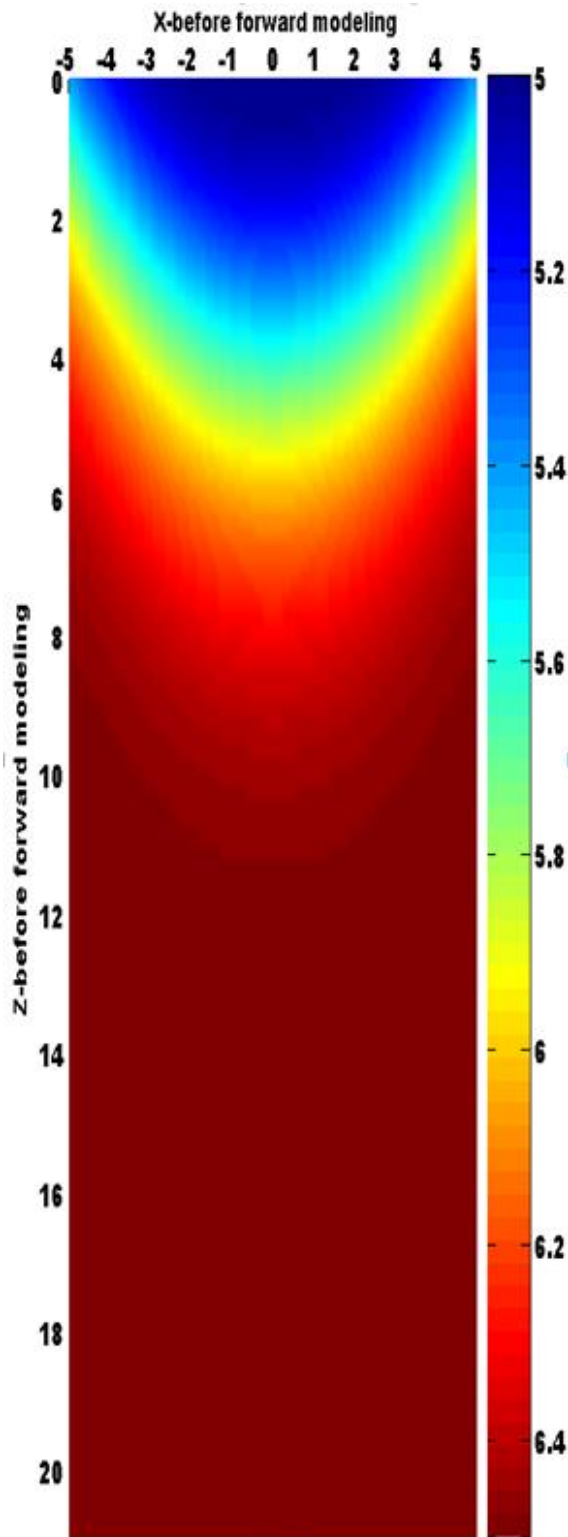
(الف)



(ب)

شکل ۹ - (الف) رابطه بین عمق و فاصله سطحی روی شبکه  $(x_0, t)$  بعد از مدل‌سازی مستقیم  
 (ب) رابطه بین عمق و فاصله سطحی با سرعت روی شبکه  $(x_0, t)$  بعد از مدل‌سازی مستقیم  
 مقیاس رنگی نشان‌دهنده سرعت بر حسب کیلومتر بر ثانیه، عمق و فاصله سطحی بر حسب  
 کیلومتر و زمان سیر یک طرفه بر حسب ثانیه است.

مدل ناودیسی تعریف شده :



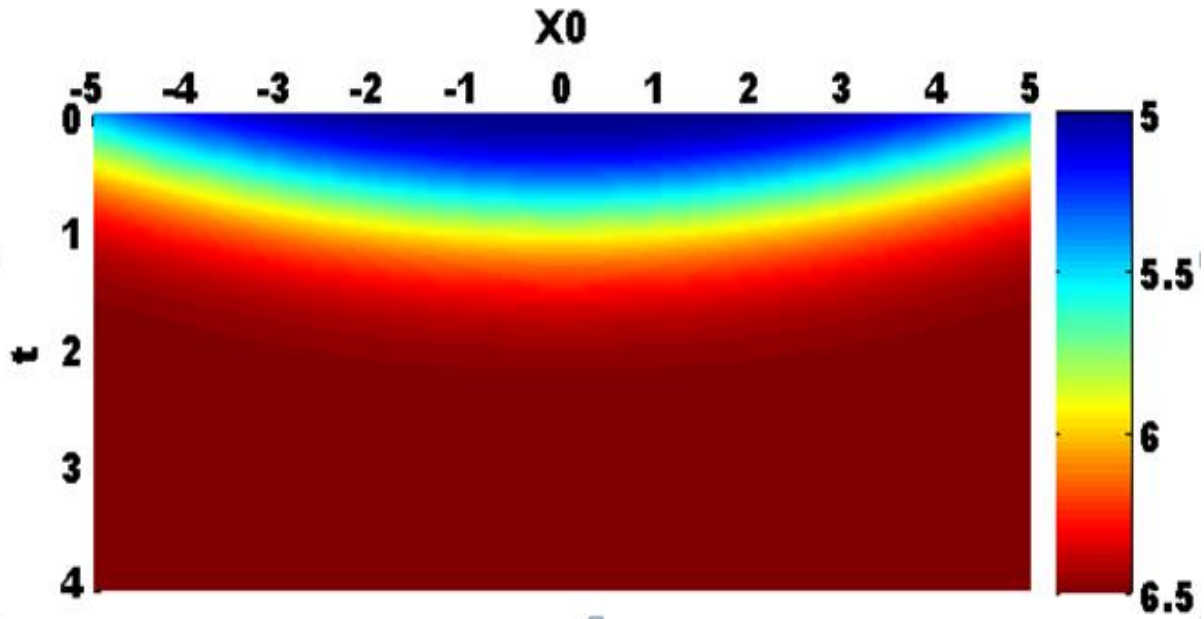
قبل از مدل سازی مستقیم : تابع سرعت تئوری تعریف شده، نشان دهنده ناودیسی است که هنگام پردازشهای سرعتی مشکلات فراوانی به دلیل تقاطع مسیر موجها ایجاد می کند و از نظر تله های نفتی تشخیص آنها حائز اهمیت است. شبکه  $(x, z)$  برای این مدل در محدوده  $-5 \leq X \leq 5$  و  $0 \leq z \leq 21$  مطابق شکل ۱۰ و به صورت زیر تعریف شده است:

$$v(x, z) = 6.5 - \frac{1.5}{e^{((0.18Z + (0.15X)^2)^2)}}$$

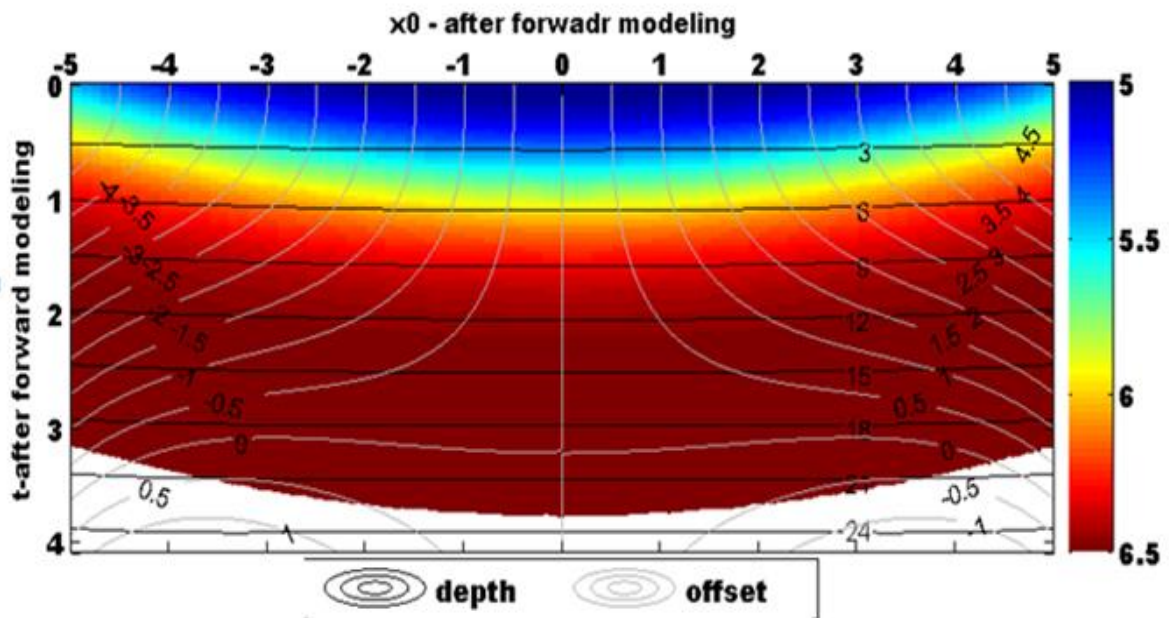
پس از مدل سازی مستقیم : تابع سرعت بدست آمده روی شبکه  $(x_0, t_0)$  یا شبکه مدل سازی مستقیم که در محدوده  $0 \leq t \leq 4$  و  $-5 \leq x_0 \leq 5$  تعریف شده است، به صورت  $v(x_0, t) \equiv v_{Dix}$  محاسبه می گردد. شبکه  $(x, z)$ ، مختصات عمقی  $(x_0, t_0)$  را پس از مدل سازی مستقیم نشان می دهد. شکل های ۱۱ و ۱۳ نتایج مدل سرعت بدست آمده پس از انجام مدل سازی مستقیم را در دو شبکه  $(x_0, t_0)$  و  $(x, z)$  نشان می دهند.

شکل ۱۲ پرتوهای خروجی از محل  $x_0$  و جبهه های موج روی شبکه  $(x_0, t)$  و شکل ۱۴ جبهه های موج، پرتوها و سرعت ورودی مدل روی شبکه  $(x, z)$  را پس از مدل سازی مستقیم نشان می دهد. شکل ۱۵ جبهه های موج روی شبکه  $(x, z)$  و شکل ۱۶ پرتوها را روی شبکه  $(x, z)$  بعد از مدل سازی مستقیم نشان می دهد.

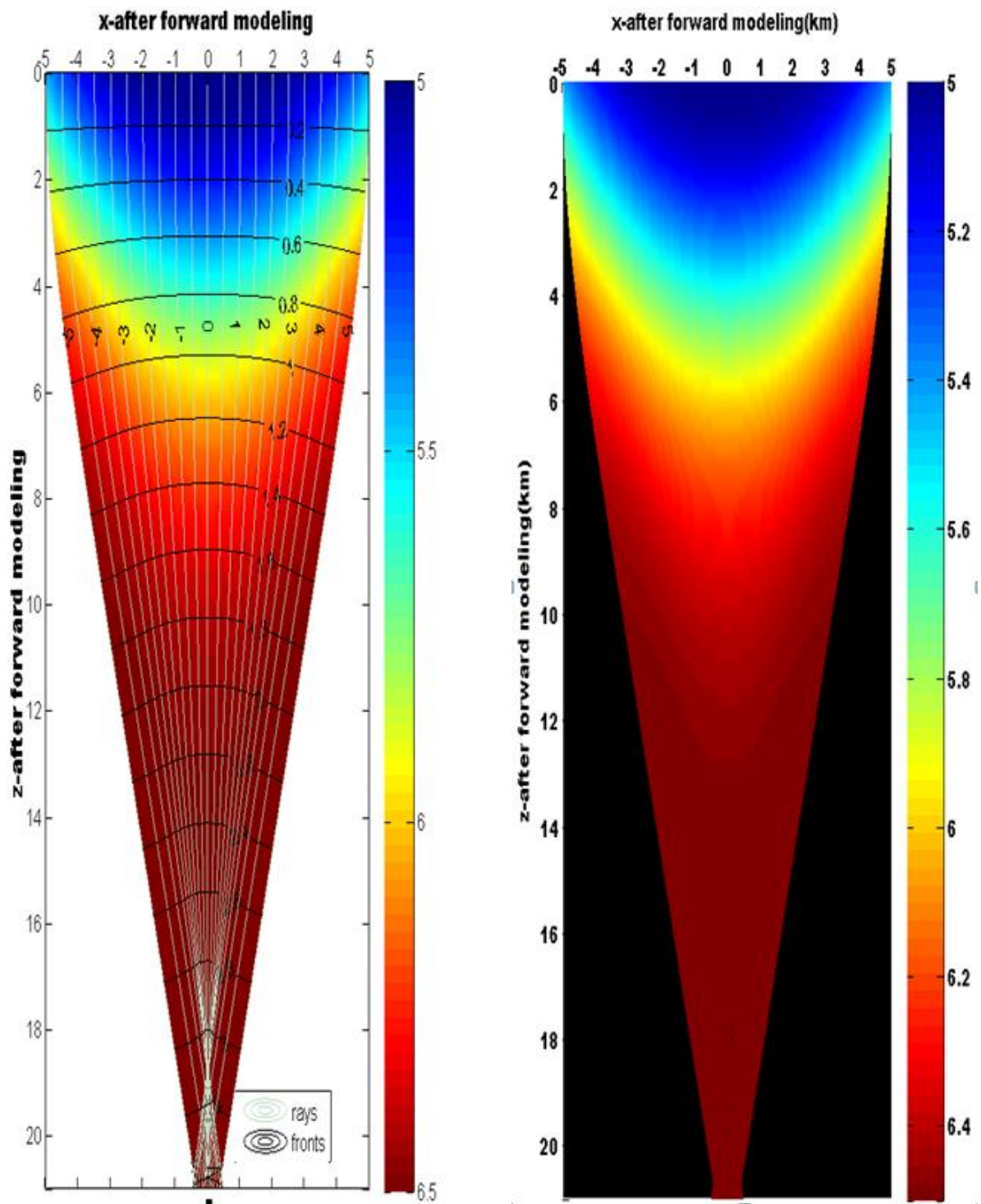
شکل ۱۰: مدل سرعت حقیقی یا  $v(x, z)$ ، رسم شده بر اساس تابع ریاضی مدل در شبکه تعریف شده  $(x, z)$  قبل از انجام مدل سازی مستقیم. مقیاس رنگی نشان دهنده سرعت بر حسب کیلومتر بر ثانیه، عمق و فاصله سطحی بر حسب کیلومتر است.



شکل ۱۱: سرعت ورودی  $v(x_0, t)$  تولید شده با مدل سازی مستقیم روی شبکه زمانی  $(x_0, t)$ . مقیاس رنگی نشان‌دهنده سرعت برحسب کیلومتر بر ثانیه، فاصله سطحی بر حسب کیلومتر و زمان سیر یک طرفه برحسب ثانیه است.

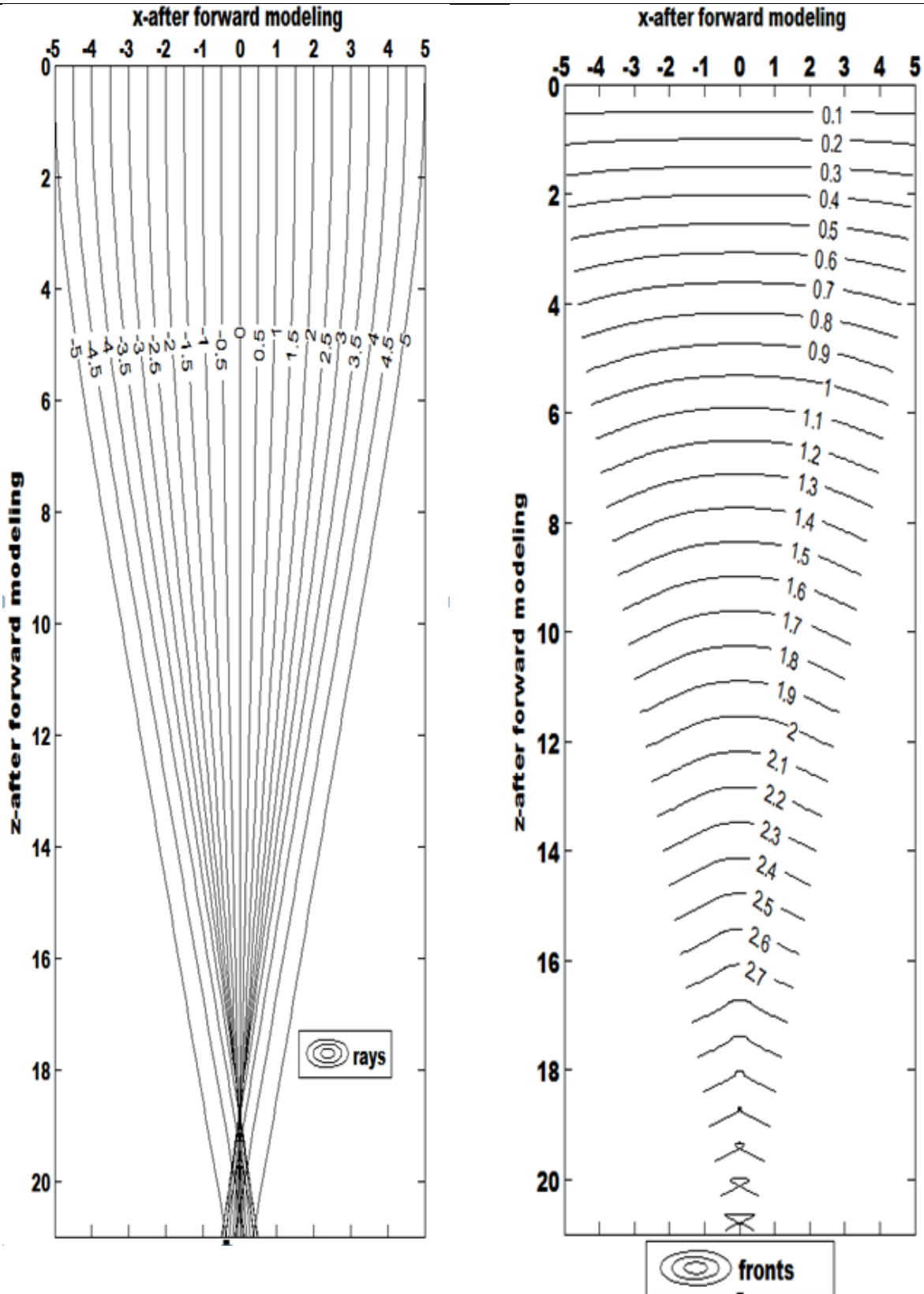


شکل ۱۲: رابطه بین زمان، عمق و سرعت ورودی مدل پس از مدل سازی مستقیم روی شبکه  $(x_0, t)$ . مقیاس رنگی نشان‌دهنده سرعت برحسب کیلومتر بر ثانیه، فاصله سطحی بر حسب کیلومتر و زمان برحسب ثانیه است.



شکل ۱۴: پرتوهای خروجی از محل  $x_0$  روی شبکه  $(x, z)$  پس از مدل سازی مستقیم. عمق و فاصله سطحی بر حسب کیلومتر است.

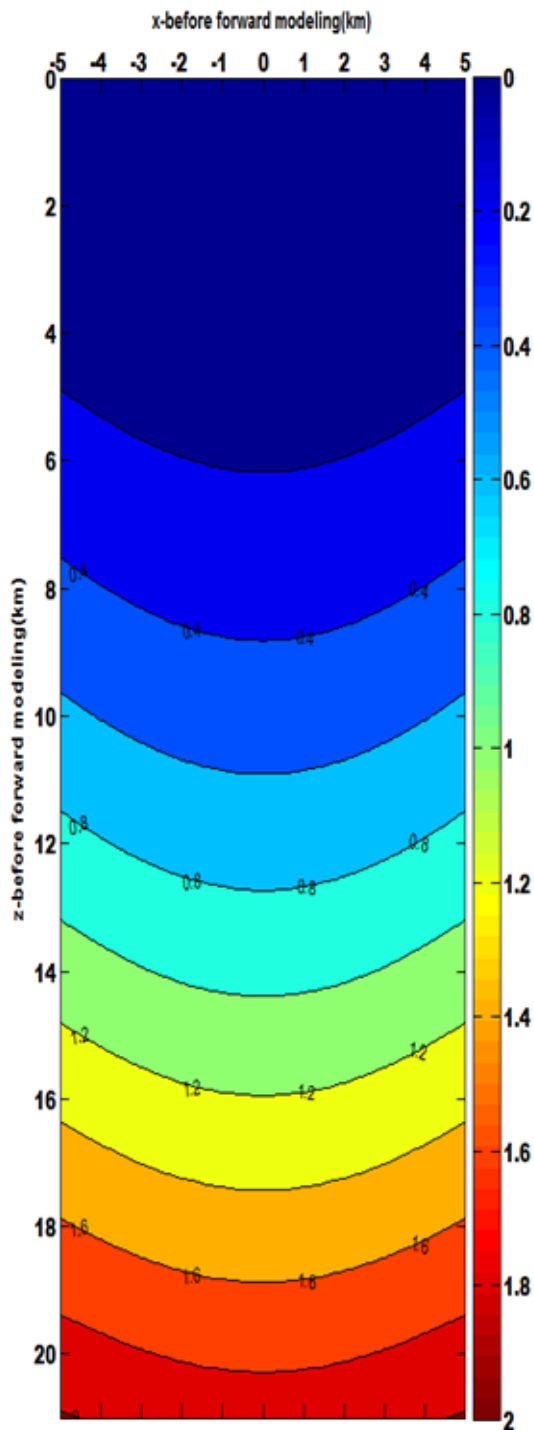
شکل ۱۳: مدل سرعت ورودی  $v(x, z)$  روی شبکه  $(x, z)$  متناسب با شبکه  $(x_0, t)$  پس از انجام مدل سازی مستقیم عمق و فاصله سطحی بر حسب کیلومتر است. مدل سازی مستقیم. مقیاس رنگی نشان دهنده سرعت بر حسب کیلومتر بر ثانیه، عمق و فاصله سطحی بر حسب کیلومتر است.



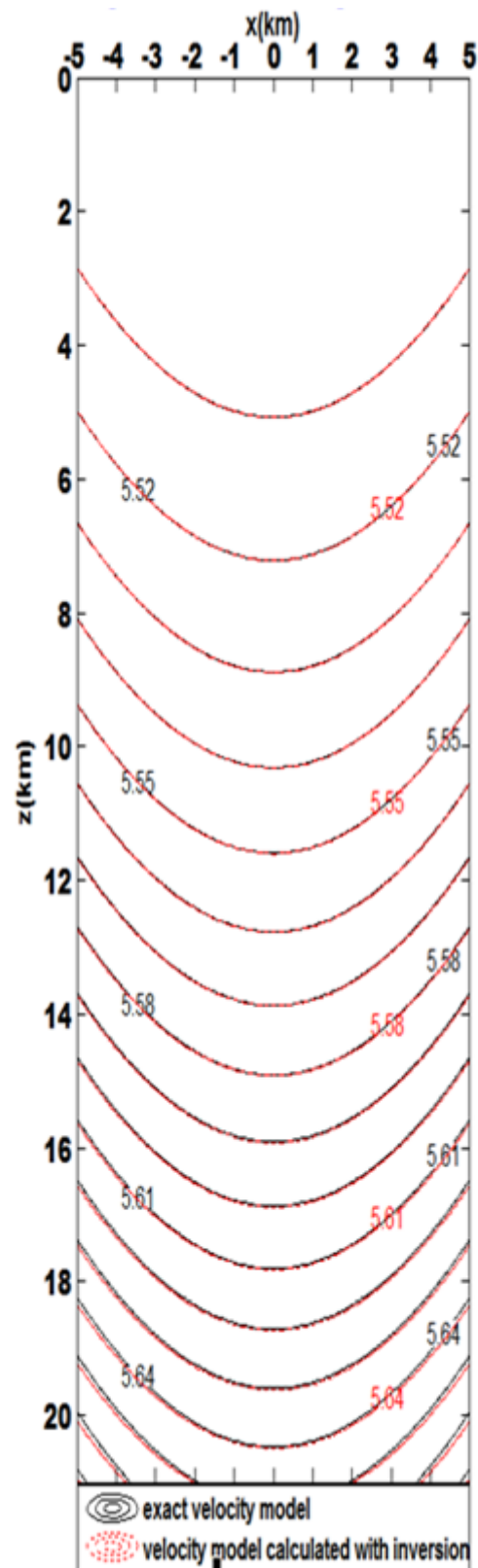
شکل ۱۶: مسیر پرتوها روی شبکه  $(x, z)$  پس از مدل سازی مستقیم. عمق و فاصله سطحی بر حسب کیلومتر است.

شکل ۱۵: جبهه‌های موج روی شبکه  $(x, z)$  پس از مدل سازی مستقیم. عمق و فاصله سطحی بر حسب کیلومتر است.

پریندها مدل سرعت و اعداد روی پریندها مقدار سرعت بر حسب کیلومتر بر ساعت را نشان می دهند.



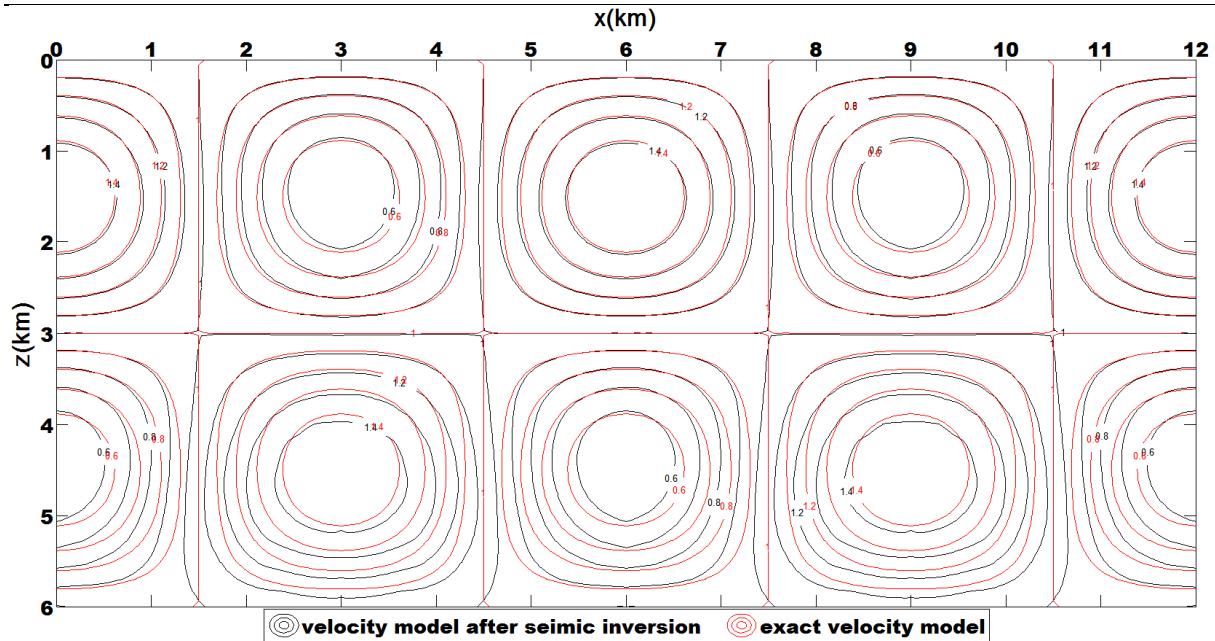
شکل ۱۸- خطای محاسبات وارون سازی لرزه ای برای مدل ناودیسسی. شبکه  $x - z$  پس از وارون سازی لرزه ای و پیش مدل سازی لرزه ای نشان می دهند. مقیاس رنگی نشان دهنده میزان خطای محاسبات است.



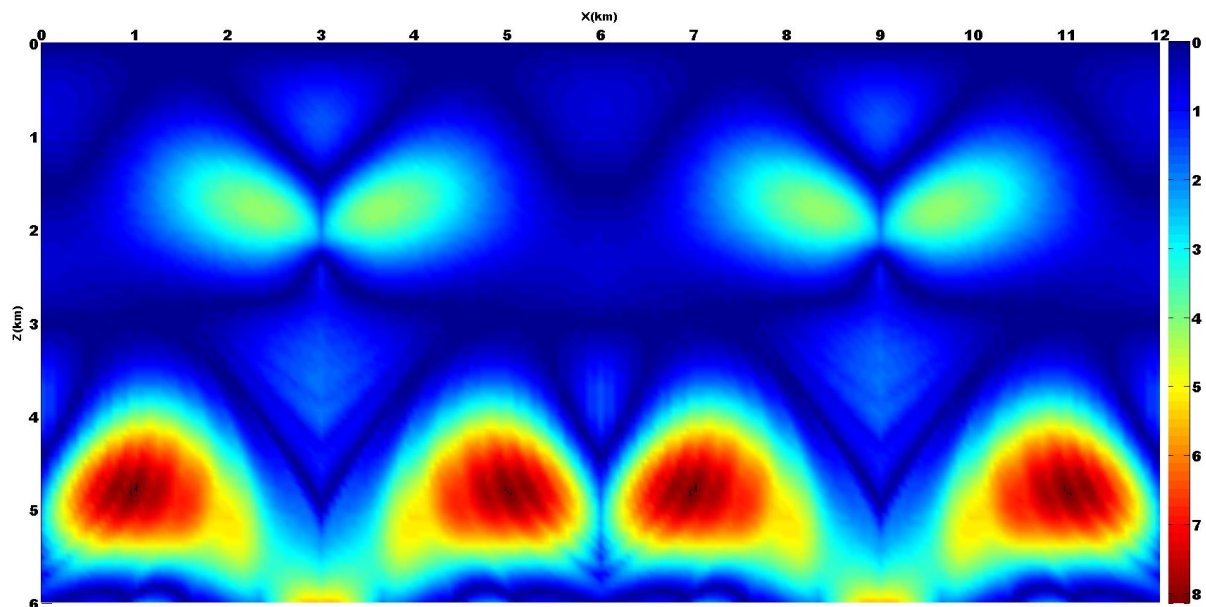
شکل ۱۷- انطباق مدل سرعت محاسبه شده از الگوریتم وارون سازی لرزه ای و مدل سرعت حقیقی در مدل ناودیسسی.



مدلسازی مستقیم در محاسبه سرعت لرزه‌ای بدون حل معادله آیکونال



شکل ۱۹ - انطباق مدل سرعت محاسبه شده از الگوریتم وارون سازی لرزه‌ای و مدل سرعت حقیقی در مدل کامرون و همکاران ۲۰۰۷. خطوط رنگی مدل سرعت و اعداد روی پربندها مقدار سرعت بر حسب کیلومتر بر ساعت را نشان می‌دهند.



شکل ۲۰ - خطای محاسبات وارون سازی لرزه‌ای برای مدل کامرون و همکاران ۲۰۰۷. شبکه  $x - Z$  پس از وارون سازی لرزه‌ای و پیش مدلسازی لرزه‌ای نشان می‌دهند. مقیاس رنگی نشان‌دهنده میزان خطای محاسبات است.

سازی لرزه‌ای و مدل سرعت حقیقی را در مدل ناودیسی و مدل شماره ۱ کامرون [۳، ۲] روی شبکه  $x - Z$  پس از وارون سازی لرزه‌ای و پیش مدلسازی لرزه‌ای نشان می‌دهند. مقایسه این مدل‌های سرعت با یکدیگر تطابق بسیار خوبی را نشان می‌دهند.

جهت تایید و انطباق مدل بدست آمده از مدلسازی مستقیم، با انجام وارون سازی لرزه‌ای [۱۱، ۱۲، ۱۳]، مدل سرعت اولیه به صورت محاسباتی بدست آمده و میزان خطا محاسبه شده است. شکل‌های ۱۷ و ۱۹ به ترتیب مدل سرعت بدست آمده از الگوریتم وارون

seismic velocity estimation using time-migration velocity: *Geophysics* 73, no 5, VE205–VE210

- 4- Cervený, V., and Soares, J.E.P., 1992, Fresnel volume ray tracing: *Geophysics*, 57, 902-915.
- 5- Cervený, V., 2001 *Seismic Ray Theory* (Cambridge: Cambridge University Press)
- 6- Dix, C. H., 1955, Seismic velocities from surface measurements *Geophysics* 20 68–86.
- 7- Hubra, I P., 1977, Time migration—some ray theoretical aspects *Geophys. Prospect.* 25 738–45.
- 8- Osher, S., and Sethian, J. A., 1988, Front propagating with curvature dependent speed: algorithms based on Hamilton–Jacobi formulations *J. Comput. Phys.* 79 12–49
- 9- Popov, M. M., and Psencik, P.en., 1978, Computation of ray amplitudes in inhomogeneous media with curved interfaces *Studia Geoph. et Geod.* 22 248–58.
- 10- Sethian, J. A., 1996, A fast marching level set method for monotonically advancing fronts *Proc. Natl Acad Sci.* 934.
- 11- Sethian, J. A., 1999a, Fast marching methods *SIAM Rev.* 41 199–235
- 12- Sethian, J. A., 1999b, *Level Set Methods and Fast Marching Methods* (Cambridge: Cambridge University Press).
- 13- Yilmaz, O., 2001, *Seismic data analysis* Soc. Explor. Geophys.

شکل‌های ۱۸ و ۲۰ خطای محاسبات وارون سازی لرزه‌ای را به ترتیب برای مدل ناودیسی و مدل کامرون نشان می‌دهند. بیشینه خطای محاسبات برای مدل کامرون ۸ درصد و برای مدل ناودیسی ۲ درصد است.

### نتیجه گیری

بررسی نتایج نشان می‌دهند که روش فوق با توجه به توانایی در تولید مقاطع صحیح و کم خطا برای انجام مدلسازی مستقیم لرزه‌ای روش مناسبی است. با توجه به اینکه الگوریتم حاضر بر خلاف سایر روش‌های مدلسازی مستقیم لرزه‌ای از حل معادله آیکونال استفاده نمی‌کند، سرعت محاسبات برای مدل کامرون ۲/۸۰۳۲۷۷ و برای مدل ناودیسی ۵/۲۴۳۶۸۴ ثانیه است که نشان دهنده سرعت بسیار زیاد الگوریتم است. به این ترتیب این الگوریتم به همراه کدهای نوشته شده قادر است با دقت و سرعت زیاد مدلسازی مستقیم لرزه‌ای را انجام دهد.

### منابع

- ۱- مقایسه شش روش لرزه‌ای برای محاسبه زمان رسید امواج و کاربرد آنها روی داده‌های حقیقی، رساله کارشناسی ارشد، دانشگاه آزاد واحد تهران شمال.
- 1- Cameron, M., 2007, Finding seismic velocities from surface measurements: PhD thesis, University of California at Berkeley
- 2- Cameron, MK., Fomel, S B., and Sethian, J A., 2007, Seismic velocity estimation from time migration: *Inverse Problems* 23 (2007) 1329–1369
- 3- Cameron, MK., Fomel, S B., and Sethian, J A., 2008, Time-to-depth conversion and