

## آشنایی با الگوریتم توموگرافی محلی لوتوس (LOTOS)

زهرا محمدی پور، دانشجوی کارشناسی ارشد پژوهشگاه بین‌المللی زلزله‌شناسی و مهندسی زلزله  
فرزام یمینی فرد (نویسنده مسؤل)، استادیار پژوهشگاه زلزله‌شناسی، پژوهشگاه بین‌المللی زلزله‌شناسی و مهندسی زلزله،  
E-mail: [faryam@iiees.ac.ir](mailto:faryam@iiees.ac.ir)

**چکیده:** در این مقاله الگوریتم توموگرافی محلی لوتوس بر روی داده‌های محلی زاگرس اعمال شده و مزیت‌های این کد نسبت به الگوریتم‌های موجود دیگر مورد بررسی قرار گرفته است. علاوه بر آن، بر پارامترهای کلیدی، روش انتخاب بهینه آن‌ها و روش‌های راست‌آزمایی نتایج توموگرافی تأکید شده است. نتایج این بررسی نشان می‌دهد که فاصله گره‌ها و ابعاد سلول‌ها با در نظر گرفتن چگالی پرتو تعیین شده و ناهنجاری‌های غیرواقعی ناشی از تمرکز پرتوها به حداقل می‌رسد. این الگوریتم با به‌کارگیری روش ردیابی خمشی قابلیت بازسازی مسیرهای پرتو ناشی از توزیع سرعت‌های با شکل پیچیده مانند ورقه فرورونده در مناطق فرورانش را دارا است. تعیین محل در این الگوریتم به روش جستجو در شبکه و احتمالاتی بوده و به همین دلیل نتایج توموگرافی نسبت به روش‌های معمول کمتر به تعیین محل اولیه حساس است.

**کلیدواژه‌ها:** مدل سرعتی سه‌بعدی، وارونه‌سازی، شبکه پارامتری شده، آزمون مصنوعی

### 1 - مقدمه

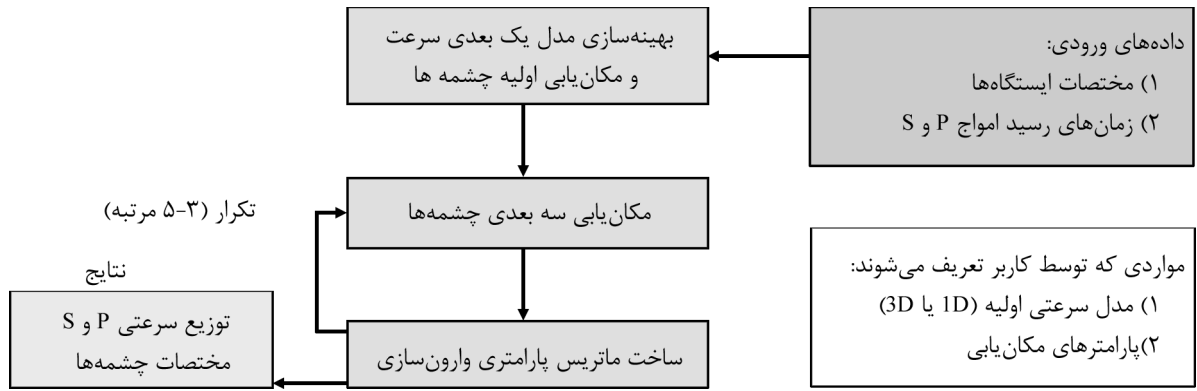
نرم‌افزارهای توموگرافی محلی از ابزارهای پیچیده زلزله‌شناسی هستند که با توجه به استفاده از کدهای متعدد برای انجام مراحل مختلف، نیاز به تنظیم دقیق پارامترها و درنهایت اعتبارسنجی و نمایش نتایج با نرم‌افزارهای جانبی دارد. به همین دلیل این روش مهم کمتر در ایران به کار گرفته شده است. در این مقاله، برنامه توموگرافی جدید لوتوس (LOTOS) که اجرای بسیار ساده‌تری نسبت به نرم‌افزارهای معمول مانند سیمول پی‌اس (SIMULPS) دارد، معرفی شده است.

الگوریتم لوتوس برای وارونه‌سازی همزمان مدل سرعتی امواج P و S و مختصات چشمه طراحی شده است [1]. در کنار وارونه‌سازی  $V_p$  و  $V_s$  امکان وارونه‌سازی همزمان  $V_p-V_p/V_s$  نیز وجود دارد. مکان‌یابی چشمه در این الگوریتم به‌صورت احتمالاتی و بر اساس محاسبه تابع هدف

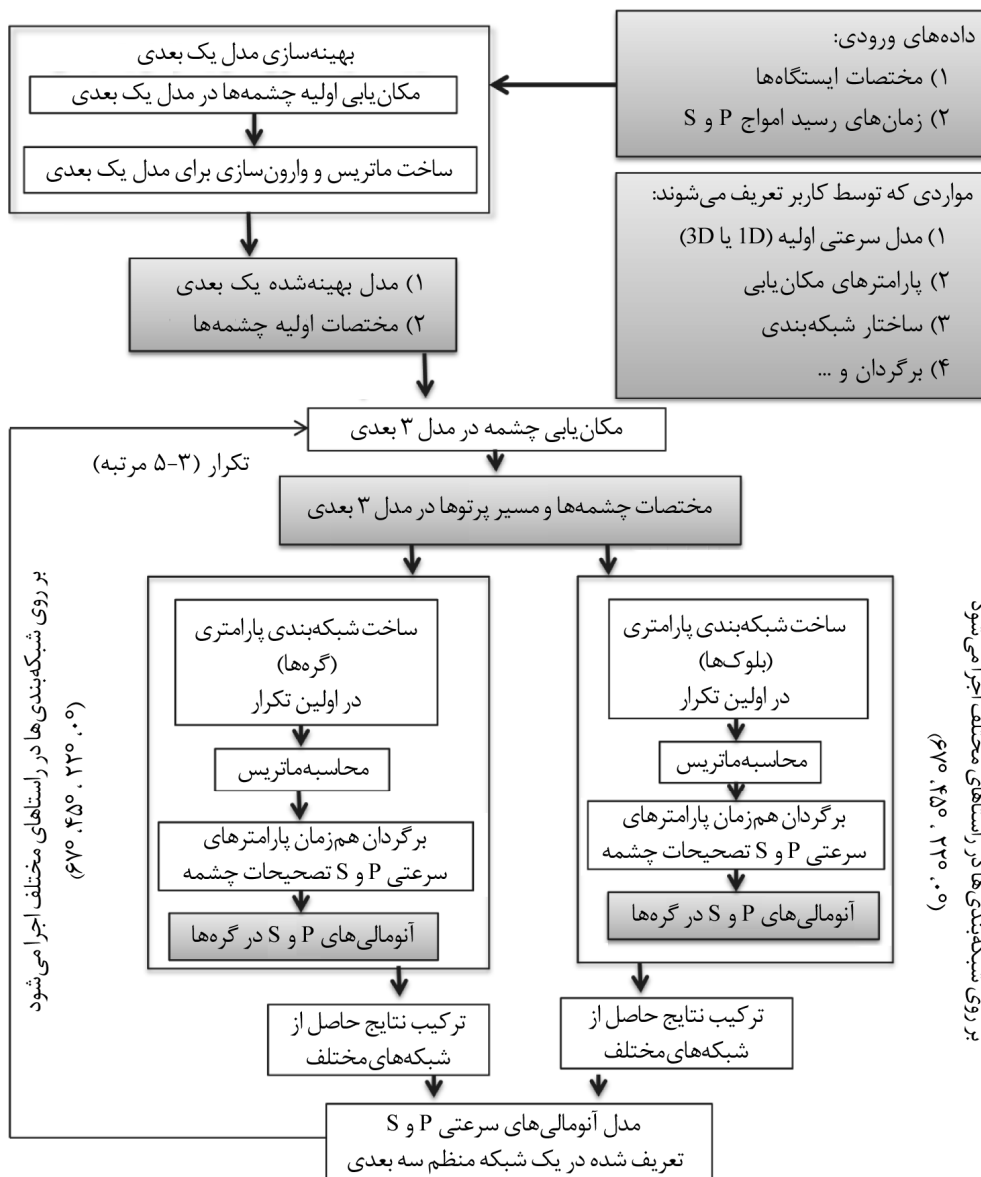
این الگوریتم شامل گام‌های اصلی زیر است:

1. بهینه‌سازی برای یافتن بهترین مدل یک‌بعدی سرعتی و مکان‌یابی اولیه چشمه‌ها به‌طور هم‌زمان.
2. مکان‌یابی چشمه‌ها در مدل سه‌بعدی سرعت.
3. وارونه‌سازی همزمان برای پارامترهای چشمه و مدل سرعتی با استفاده از چندین شبکه پارامتری شده.

گام‌های دوم و سوم چندین مرتبه تکرار می‌شوند [2-1].



شکل (1): ساختار کلی الگوریتم LOTOS، شامل گام‌های اصلی برنامه، داده‌های ورودی، پارامترهای آزاد که توسط کاربر تعریف می‌شود و خروجی [1].



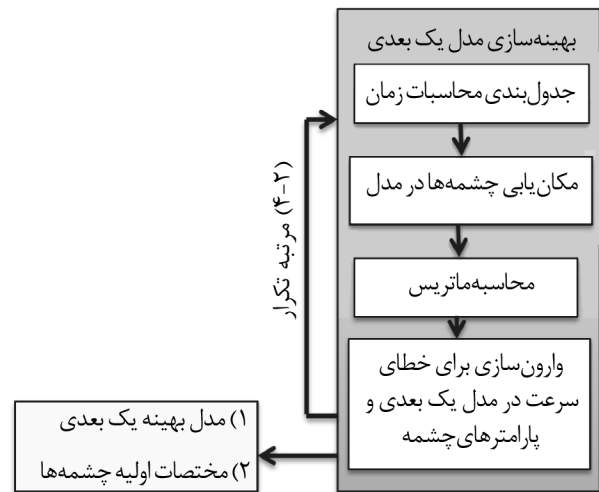
شکل (2): جزئیات بیشتر شکل (1)، ساختار کلی الگوریتم LOTOS برای وارون‌سازی  $Vp-Vs$ ، برای وارون‌سازی  $Vp-Vp/Vs$  نیز همین ساختار است (اما فقط با پارامتر گره) [1]. تعداد تکرار بهینه عمل وارون‌سازی بین 3 تا 5 مرتبه باشد.

## 2 - معرفی مختصر الگوریتم لوتوس

### 2-1 - الگوریتم بهینه‌سازی مدل یک‌بعدی و مکان‌یابی

#### اولیه چشمه

ساختار کلی الگوریتم بهینه‌سازی مدل یک‌بعدی سرعت و مکان‌یابی اولیه چشمه‌ها در شکل (3) نشان داده شده است.



شکل (3): گام‌های اصلی برای بهینه‌سازی مدل یک‌بعدی سرعت و مکان‌یابی اولیه چشمه‌ها [1]. تعداد تکرار بهینه‌سازی عمل وارونه‌سازی می‌تواند بین 2 تا 4 مرتبه باشد.

رومرکزی متفاوت با استفاده از فرمول تحلیلی محاسبه می‌شود [3]. این الگوریتم اجازه می‌دهد زوایای فرودی پرتوها طوری تعریف شوند که پرتوها در سطح به ایستگاه‌ها ختم شوند.

در این مرحله فرض بر این است که گیرنده‌ها در ارتفاع  $Z = 0$  یعنی در سطح تراز دریا قرار دارند و محاسبات با ردیابی پرتوها از چشمه با تغییراتی جزئی و با گام ثابت در زوایای فرود آن‌ها انجام می‌شوند.

گام دوم، مکان‌یابی چشمه در مدل یک‌بعدی: زمان‌های سیر پرتوها با استفاده از مقادیر جدول‌بندی شده در گام اول محاسبه می‌شود. آنگاه زمان‌های سیر برای ارتفاع ایستگاه‌ها تصحیح می‌شوند. مکان‌یابی چشمه بر اساس محاسبه تابع هدف (goal function) است. این تابع بازتابی از احتمال وجود چشمه در نقطه موردنظر است [1]. جستجو برای تابع هدف نهایی با استفاده از روش جستجوی شبکه‌ای انجام می‌شود. جستجو از یک شبکه‌بندی درشت شروع و در یک شبکه‌بندی ریز به پایان می‌رسد. این الگوریتم مکان‌یابی بسیار پایدار است.

گام سوم، محاسبه اولین ماتریس در طول پرتوها در تکرار پیشین: هر عنصر ماتریس  $A_{ij}$  برابر است با انحراف زمان در طول پرتوی  $i$ ام که در نتیجه تغییر سرعت واحد در سطح عمق  $i$ ام حاصل می‌شود (مشتق زمان سیر نسبت به سرعت). سطوح عمقی به صورت یکنواخت تعریف می‌شوند و سرعت بین سطوح خطی در نظر گرفته می‌شود.

گام چهارم، وارونه‌سازی ماتریس: این گام به‌طور هم‌زمان برای داده‌های  $P$  و  $S$  با استفاده از ماتریس محاسبه شده در گام سوم اجرا می‌شود. ماتریس علاوه بر پارامترهای سرعت شامل عناصری جهت تصحیح پارامترهای چشمه  $(dx, dy, dz, dt)$  نیز هست. بردار داده شامل پسماندهای محاسبه‌شده بعد از مکان‌یابی چشمه در گام دوم است.

مقادیر بهینه برای پارامترهای آزاد میرایی (damping)، ضرایب هموارسازی (coefficients smoothing) و تعداد تکرار (iteration) بر اساس آزمایش‌های مصنوعی ارزیابی

هدف الگوریتم بهینه‌سازی مدل یک‌بعدی سرعت، یافتن مدل سرعتی یک‌بعدی بهینه در منطقه است که می‌تواند به‌عنوان مدل آغازین در وارونه‌سازی توموگرافی سه‌بعدی در نظر گرفته شود. این الگوریتم شامل مراحل زیر است:

گام مقدماتی، انتخاب داده‌ها برای بهینه‌سازی: از میان کل داده‌ها، داده‌هایی انتخاب می‌شود که تا حد امکان نسبت به عمق به‌طور یکنواختی توزیع شده باشند. برای این کار، برای هر بازه عمقی رویدادهایی با بیشترین تعداد فاز ثبت‌شده انتخاب می‌شود. تعداد کل رویدادها در هر بازه عمقی بایستی کمتر از مقدار از پیش تعیین شده باشد.

گام اول، محاسبه جدول زمان سیر در مدل یک‌بعدی اولیه: در تکرار اول مدل اولیه سرعت توسط کاربر و با استفاده از اطلاعات موجود تعیین می‌شود.

زمان سیر بین چشمه‌ها تا گیرنده‌های در فواصل

بازسازی را از مدل مصنوعی اولیه دارد و بنابراین مقدار میرایی متناظر با این آزمایش، برای وارونه‌سازی نهایی در نظر گرفته می‌شود.

## 2-2- الگوریتم خمشی برای ردیابی پرتو در مدل سرعتی سه‌بعدی

یکی از ویژگی‌های الگوریتم لوتوس استفاده از الگوریتم ردیابی پرتو بر اساس اصل فرما است. این الگوریتم مشابه همان الگوریتمی است که توسط اوم و توربر [6] به کار گرفته شده و ردیابی خمشی نامیده می‌شود. یک ویژگی مهم این الگوریتم این است که می‌تواند هر نوع پارامتری شدن توزیع سرعت را به کار بگیرد. این کار را می‌توان توسط گره‌ها یا سلول‌ها، چندضلعی‌ها یا توابع تحلیلی یا هر روش دیگری انجام داد. نسخه 12 الگوریتم لوتوس شامل انتخاب‌های متنوعی برای تعریف مدل سرعتی است. اساس روش ردیابی پرتو خمشی در الگوریتم لوتوس در شکل (5) نمایش داده شده است. در مثال ارائه‌شده از یک ساختار سرعتی اغراق‌آمیز استفاده شده است. در راستای عمودی سرعت از 2/5 تا 9 کیلومتر بر ثانیه تغییر می‌کند. آنومالی صفحه شطرنجی دامنه‌های  $\pm 30$  درصد دارند.

واضح است که مسیر پرتو شکل پیچیده‌ای با این توزیع سرعتی دارد. جستجوی مسیر پرتو با کمترین زمان سیر در چندین گام نشان داده شده است. مسیر آغازین یک خط مستقیم است، در گام اول (قسمت اول شکل (1)) انتهای

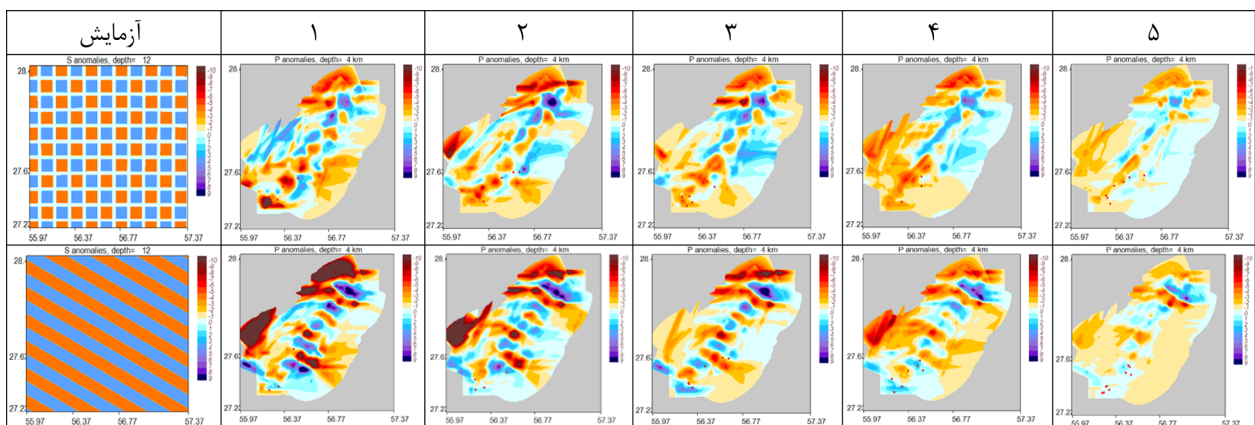
می‌شوند. وارونه‌سازی این ماتریس گسسته با استفاده از روش حداقل مربعات LSQR [4, 10] انجام می‌شود. مجموعی از تغییرات سرعتی به دست آمده و مدل مرجع جاری به‌عنوان مدل مرجع در تکرار بعد که شامل گام‌های اول تا چهارم است، استفاده می‌شود. تعداد کل تکرارها نیز بر طبق نتیجه مدل‌سازی مصنوعی تعیین می‌شود.

همان‌طور که بیان شد جهت تعیین پارامترهای آزاد برنامه، مناسب‌ترین روش بهره‌گیری از آزمایش‌های مصنوعی است. به‌عنوان مثال برای تعیین پارامتر میرایی دامنه در شرقی‌ترین بخش زاگرس از همین روش بهره بردیم. مطابق جدول (1) مقادیر این پارامتر را تنظیم و هر بار دو آزمایش مصنوعی صفحه شطرنجی و نوارهای مورب (شکل (4))، ستون اول سمت چپ) را بر روی آن انجام دادیم.

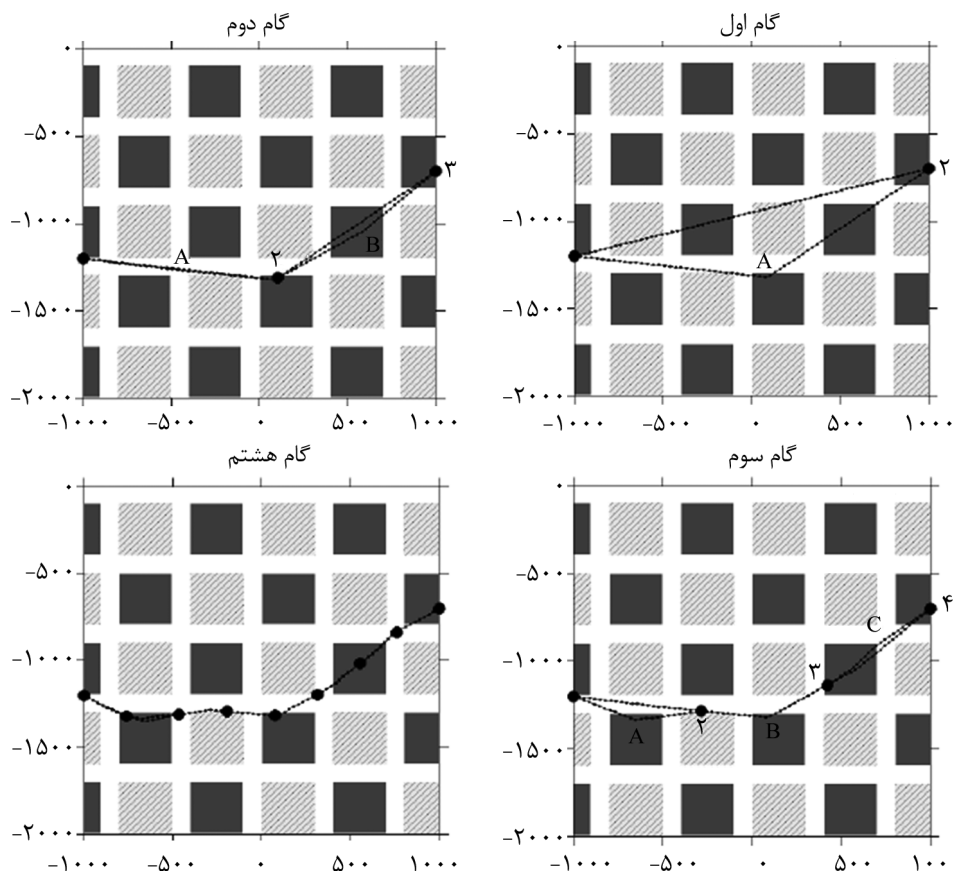
نتایج حاصل از بازسازی در عمق 4 کیلومتری برای فاز P در شکل (4) آمده است. به‌وضوح آزمایش 1، بهترین

جدول (1): مقدار پارامتر میرایی دامنه در آزمایش‌های مختلف برای شرقی‌ترین بخش زاگرس.

آزمایش	میرایی دامنه (فاز P)	میرایی دامنه (فاز S)
1	0/25	0/25
2	0/5	0/5
3	0/5	1
4	0/75	1/5
5	8	10



شکل (4): تعیین پارامتر میرایی دامنه در شرقی‌ترین بخش زاگرس با استفاده از آزمایش‌های مصنوعی. ستون اول سمت چپ: شکل آزمایش‌های مصنوعی و ستون‌های بعدی بازسازی آزمایش موردنظر از اشکال مصنوعی با استفاده از مقادیر ذکرشده در جدول (1).



شکل (5): اصول الگوریتم خمش. ساخت مسیر پرتو در مدلی با یک تباین سرعت اغراق آمیز. مدل سرعتی یک بعدی از 2500 تا 9000 متر بر ثانیه تا عمق 2000 متری متغیر است. بخش‌های هاشور زده خاکستری رنگ آنومالی -30 درصد و بخش‌های سیاه رنگ آنومالی +30 درصد هستند [1].

### 2-3-3 - وارونه‌سازی توپوگرافی تکرار شونده

#### 2-3-3-1 - مکان‌یابی چشمه در مدل سرعتی سه بعدی

مدل سرعتی آغازین در یک بعد و مکان‌یابی اولیه چشمه‌ها در گام بهینه‌سازی مدل یک بعدی به دست می‌آید. سپس چشمه‌ها با ردیابی سه بعدی پرتوها (خمش) مجدداً مکان‌یابی می‌شوند. مشابه حالت یک بعدی، الگوریتم مکان‌یابی بر اساس یافتن تابع هدف نهایی است. توضیح تابع هدف مشابه حالت یک بعدی است. در این الگوریتم برای مکان‌یابی چشمه‌ها در سه بعد از یک روش گرادیانی [7] استفاده می‌شود که به اندازه روش جستجوی شبکه‌ای دقیق نیست؛ اما بسیار سریع‌تر است [1].

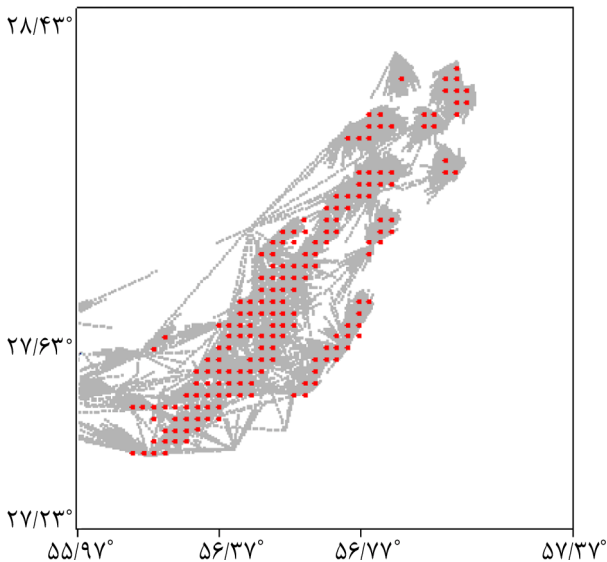
#### 2-3-3-2 - پارامتری کردن با استفاده از گرہها

برای پارامتری کردن توزیع سرعت دو انتخاب موجود

پرتو در نقاط 1 و 2 ثابت شده‌اند و نقطه A در وسط پرتو برای خمش انتخاب شده است. تغییر شکل پرتو به صورت عمود بر راستای پرتو و در دو جهت مخالف اعمال می‌شود. میزان جابه‌جایی مسیر پرتو نسبت به حالت قبل به طور خطی به فاصله نقطه A تا انتهای قطعه بستگی دارد. همان‌طور که در قسمت دوم شکل (5) نشان داده شده، سه نقطه ثابت است (نقاط 1، 2 و 3) و تغییر شکل مسیر پرتو در دو نقطه A و B اجرا می‌شود.

در گام سوم (قسمت سوم شکل (5)) چهار نقطه ثابت هستند و سه قطعه تغییر شکل می‌یابند. در قسمت چهارم شکل (5) نتیجه تغییر شکل برای 8 قطعه نشان داده شده است. مسیر پرتویی که به این روش ساخته می‌شود، تمایل دارد از میان آنومالی‌های پرسرعت بگذرد و از نواحی کم‌سرعت دوری می‌کند [1].

خلاصه جمع و متوسط‌گیری می‌شوند [1-2]. نمونه‌ای از چگالی پرتو و گره‌های مستقر در شبکه‌بندی در مطالعه مربوط به شرقی‌ترین بخش زاگرس (فاز P، عمق 4 کیلومتری) در شکل (6) آمده است.



شکل (6): شبکه‌بندی گره‌ها و تراکم پرتوها در مطالعه مربوط به شرقی‌ترین بخش زاگرس در عمق 4 کیلومتری برای فاز P.

#### 2-3-4 - محاسبه ماتریس و وارونه‌سازی برای $Vp-Vs$

اولین ماتریس با استفاده از مسیرهای پرتو محاسبه شده پس از محاسبه مکان چشمه‌ها در مدل سه‌بعدی محاسبه می‌شود. هر عنصر ماتریس،  $A_{ij} = \partial t_i / \partial v_j$ ، برابر است با انحراف زمان در طول آامین پرتو در اثر تغییرات واحد سرعت در زامین گره/بلوک.

وارونه‌سازی برای ماتریس گسسته A با استفاده از الگوریتم تکرارشونده حداقل مربعات LSQR [4, 10] انجام می‌شود. علاوه بر پارامترهای سرعتی P و S، ماتریس شامل عناصری مربوط به چشمه  $(dx, dy, dz, dt)$  و تصحیحات ایستگاهی است. دامنه و هموارسازی (smoothness) حل توسط دو بلوک اضافی کنترل می‌شود. بلوک اول یک ماتریس قطری است که در هر سطر فقط یک عنصر دارد و بردار داده صفر است. افزایش وزن این بلوک دامنه آنومالی سرعتی P یا S حاصل را کاهش می‌دهد. بلوک دوم هموارسازی حل را کنترل می‌کند. هر سطر

است. روش اول پارامتری کردن با گره‌هایی است که با استفاده از الگوریتم تحلیلی در فضای مورد مطالعه مستقر شده‌اند. گره‌ها بر روی خطوط عمودی که به‌طور منظم در نمای نقشه‌ای توزیع یافته‌اند، قرار دارند (به‌عنوان مثال با گام‌های  $5 \times 5$  کیلومتری). در هر خط عمود، گره‌ها منطبق بر توزیع پرتوها مستقر می‌شوند. در غیاب پرتوها هیچ گره‌ای مستقر نخواهد شد. فاصله بین گره‌ها در نواحی با چگالی پرتو بالاتر، کوچک‌تر انتخاب می‌شود. با این وجود جهت جلوگیری از تراکم بیش از حد گره‌ها یک فاصله کمینه تعریف می‌شود (مثلاً 5 کیلومتر). بین گره‌ها تغییرات سرعت خطی در نظر گرفته می‌شود.

#### 2-3-3 - پارامتری کردن با استفاده از سلول‌ها

الگوریتم لوتوس قابلیت پارامتری کردن مدل با سلول‌های مستطیل شکل را نیز دارا است. سلول‌ها در مختصات کارتیزین و با تقسیم حجم مورد مطالعه به متوازی‌السطوح‌هایی با اندازه‌های متفاوت و منطبق بر چگالی پرتو طرح‌ریزی می‌شوند. هرچه چگالی پرتو کمتر باشد اندازه سلول بزرگ‌تر است. به‌طور عملی ساختار شبکه‌ای بر اساس تقسیمات متوالی متوازی‌السطوح‌ها به دو قسمت مساوی در راستاهای  $x$ ،  $y$  و  $z$ ، یکی پس از دیگری، تحقق می‌یابد. این فرآیند از کل حجم مورد مطالعه آغاز شده و هنگامی که اندازه سلول‌ها کوچک‌تر از یک مقدار از پیش تعیین شده بشود، به اتمام می‌رسد. در هر تکرار تقسیم کردن هر سلول به دو قسمت فقط زمانی انجام می‌شود که مجموع طول پرتوهای درون بلوک حاضر بزرگ‌تر از یک مقدار از پیش تعیین شده باشد. مقدار آنومالی سرعتی بازیابی شده در هر بلوک ثابت در نظر گرفته می‌شود [2].

جهت کاهش تأثیر توزیع گره‌ها و سلول‌ها بر روی نتایج، وارونه‌سازی با استفاده از چندین شبکه با راستاهای مختلف انجام می‌گیرد (مثلاً صفر، 22، 45 و 67 درجه). پس از محاسبه نتایج برای شبکه‌هایی با راستاهای مختلف، همگی با حذف اثر تصنعی مرتبط با راستای شبکه، در یک مدل

مقدار پسماندها ( $Dt_i$ ) که به صورت رابطه (2) بیان می شود، هستند:

$$(Dt_i) = \begin{cases} 1, & \text{if } [Dt_i]/C_{ps} < \tau_1 \\ (Dt_i - \tau_2), & \text{if } \tau_1 < [Dt_i]/C_{ps} < \tau_2 \\ 0, & \text{if } [Dt_i]/C_{ps} < \tau_2 \end{cases} \quad (2)$$

در رابطه (2)،  $\tau_1$  و  $\tau_2$  مقادیر از پیش تعریف شده برای حد بالا و پایین پسماندها هستند. در حالتی که پسماندها کمتر از  $\tau_1$  باشد تابع هدف 1 است. مقادیر  $\tau_1$  و  $\tau_2$  با استفاده از مقادیر مورد انتظار برای آنومالی های سرعتی تعریف می شوند و B نیز یک عبارت وابسته به طول مسیر پرتو ( $d_i$ ) است:

$$(Bd_i) = \begin{cases} 1, & \text{if } d_i < d_{\min} \\ (d_{\min}/d_i)^m, & \text{if } d_i > d_{\min} \end{cases} \quad (3)$$

با افزایش طول مسیر پرتو وزن کاهش می یابد. پرتوهای بلند تجمع بیشتری از آنومالی های زمانی در طول مسیر خود داشته و بنابراین معمولاً پسماندهای بزرگ تری دارند. قضیه مذکور به این دلیل است که در الگوریتم مکان یابی این نوع پرتوها نسبت به پرتوهای کوتاه وزن کمتری دارند.  $d_{\min}$  طول پرتوها در حوزه نزدیک است که در آن وزن تمام پرتوها یکسان است.  $m$  بیانگر کاهش وزن با افزایش فاصله است.  $C_{ps}$  در رابطه (2)، عبارتی است که وزن فاز را متمایز می کند. برای فاز P وزن 1 است. در صورتی که فاز S و P در یک نگاشت مشترک قرائت نشده باشند، وزن فاز S کوچک تر خواهد بود. اگر هر دو فاز P و S در یک ایستگاه وجود داشته باشند پسماند به صورت تفاضلی در نظر گرفته می شود، رابطه (4):

$$Dt_i = (t_{obs}^S - t_{ref}^S) - (t_{obs}^P - t_{ref}^P) \quad (4)$$

پسماندهای زمان برای فرآیند مکان یابی برای فاز P و فاز S بدون جفت فاز P، از رابطه (5) محاسبه می شوند:

$$Dt_i = (t_{obs}^P - t_{ref}^P) - Dt_0 \quad (5)$$

تصحیحات زمان وقوع  $Dt_0$  از شرط زیر حاصل می شود، رابطه (6):

این بلوک شامل دو عنصر مساوی غیر صفر با علامت های مخالف است که با تمام ترکیبات گره/سلول های همسایه در شبکه پارامتری شده، منطبق است. بردار داده در این بلوک نیز صفر است. افزایش وزن این بلوک اختلاف بین حل در گره های همسایه را کاهش داده و باعث هموارسازی میدان سرعتی محاسبه شده می شود [1، 2].

### 2-3-5 - وارونه سازی $Vp$ و نسبت $Vp/Vs$

زمانی که  $Vp$  و  $Vs$  به طور مستقل به دست می آیند، آشفتگی به شدت تحت تأثیر پارامترهای تنظیم که تعریف نسبتاً مبهمی دارند بوده و بنابراین نسبت ساده این دو مقدار نمی تواند الزاماً نسبت دقیق  $Vp/Vs$  را به دست دهد. به همین دلیل است که در این الگوریتم این دو نمونه وارونه سازی به طور مجزا در نظر گرفته شده است [2].

### 2-3-6 - چرخه تکرار شونده

گام های ساخت شبکه، محاسبه ماتریس و وارونه سازی برای چندین شبکه با راستاهای مختلف اجرا می شود. آنومالی های سرعتی حاصل که برای تمام شبکه ها محاسبه شده اند، ترکیب شده و در یک شبکه منظم محاسبه می شوند. این مدل به توزیع سرعتی مطلق که در تکرار قبل استفاده شده است، اضافه می شود. تکرارهای جدید گام های مکان یابی چشمه، محاسبه ماتریس و وارونه سازی را تکرار می کنند.

### 3 - الگوریتم مکان یابی

مکان یابی در این الگوریتم بر اساس تابع هدف (goal function) است. به عبارت دیگر احتمال وجود چشمه در یک نقطه با تابع هدف محاسبه می شود. تابع هدف احتمال وجود چشمه در فضای از قبل تعریف شده را منعکس می کند. کولاکوف [1] فرم ویژه ای از تابع هدف را به شکل زیر ارائه کرد:

$$G = \frac{\sum_{i=1}^N A(Dt_i)B(d_i)C}{\sum_{i=1}^N B(d_i)C} \quad (1)$$

در این رابطه  $N$  تعداد کل فازهای قرائت شده و  $A$  تابعی از

تعریف می‌شود. مثلاً در بازه‌های عمقی نزدیک به سطح زمین گام کوچک‌تر از گام تعریف‌شده در بازه‌های عمقی پایین‌تر است.

#### 4 - مدل‌سازی مصنوعی

مهم‌ترین و سخت‌ترین کار در مسائل وارونه‌سازی توموگرافی، ارائه استدلال‌ات قانع‌کننده‌ای است مبنی بر این که نتایج حاصل منطبق بر ساختار واقعی زمین است. به این منظور، محققین اغلب آزمایش‌های مصنوعی (synthetic tests) را برای راست‌آزمایی نتایج به کار می‌گیرند [5].

1. ارزیابی قدرت تفکیک سه‌بعدی؛
2. تعیین مقادیر بهینه پارامترهای آزاد (درجات هموارسازی، میرایی دامنه، وزن پارامترهای چشمه، تصحیحات ایستگاهی، تعداد تکرارها و غیره)؛
3. تخمینی از دامنه‌های واقعی آنومالی‌ها؛
4. تولید مدلی که بهترین هم‌خوانی با مشاهدات واقعی را دارد [8-9].

الگوریتم لوتوس روش‌های متعددی را جهت انجام آزمایش‌های مصنوعی و اطمینان از نتایج حاصل را در اختیار کاربر می‌گذارد.

این آزمایش‌ها شامل موارد زیر است:

1. آزمایش مصنوعی صفحه شطرنجی (checkerboard)؛
2. آزمایش مصنوعی آنومالی‌های آزاد افقی؛
3. آزمایش مصنوعی آنومالی‌های آزاد عمودی؛
4. آزمایش مصنوعی صفحه شطرنجی در مقاطع عمودی. علی‌رغم موارد فوق، این الگوریتم قابلیت اعمال نوفه به مدل‌های مصنوعی را دارد که اعتماد به نتایج را افزایش می‌دهد؛ زیرا در داده‌های واقعی همیشه نوفه‌هایی با منشأهای مختلف وجود دارد.

#### 4-1 - آزمایش مصنوعی صفحه شطرنجی

یکی از معروف‌ترین انواع آزمایش مصنوعی، آزمایشی است که به نام آزمایش صفحه شطرنجی شناخته می‌شود.

$$\sum_{i=1}^{N_p} B(d_i) (t_{obs}^P - t_{ref}^P - Dt_0) = 0 \quad (6)$$

که در آن  $t_{obs}^P$  زمان سیر مشاهده‌شده،  $t_{ref}^P$  زمان سیر مرجع که با استفاده از جدول مرجع محاسبه می‌شود و این امکان وجود دارد که در صورت در دسترس بودن اطلاعات، برای عمق موهو و توپوگرافی تصحیح شود.

همچنین هر مشاهده منفردی بایستی در رابطه (7)

صدق کند:

$$|t_{obs}^P - t_{ref}^P - Dt_0| < \tau_2 \quad (7)$$

محاسبه تابع هدف در گره‌های یک شبکه سه‌بعدی منظم به مرکزیت نقطه جاری انجام می‌شود. اگر بیشینه تابع هدف در حواشی شبکه به دست آید، یک شبکه دیگر به مرکزیت گره‌ای با بیشینه تابع هدف تنظیم می‌شود. این فرآیند می‌تواند در گام‌های مختلف و برای فاصله‌بندی‌های متفاوت شبکه و همچنین پارامترهای متفاوت اجرا شود. در این برنامه می‌توان سه‌گام در نظر گرفت: در گام اول شبکه‌بندی درشت در نظر گرفته می‌شود و در گام‌های بعدی شبکه کوچک‌تر شده و پسماندهای مجاز نیز کوچک‌تر می‌شوند.

از مهم‌ترین پارامترها، تعیین فاصله عمودی و افقی بین گره‌ها است. جهت جلوگیری از تراکم بیش‌ازحد گره‌ها در نواحی با چگالی پرتو زیاد فاصله حداقل برای گره‌ها تعریف می‌شود. تعیین نوع شبکه‌بندی (گره یا بلوک) نیز در این بخش تعیین می‌شود.

مطابق رابطه (8)، جستجو برای مکان چشمه‌ها بر اساس روش ماکزیمم مقدار گرادیان GF است:

$$P_x^i D_x + P_y^i D_y + P_z^i D_z + Dt = dt_i \quad (8)$$

که در آن  $P$  ها بردار آهستگی (slowness) و  $dt$  پسماندهای مشاهده شده هستند.

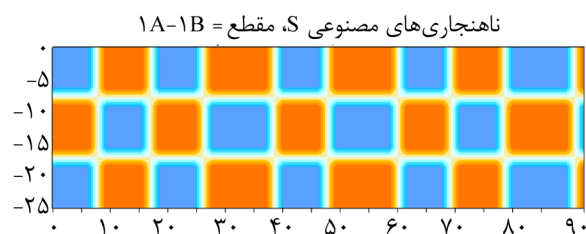
در این قسمت جدول مرجع (reference table) برای مجموعه‌ای از عمق چشمه‌ها و فواصل رومرکزی تهیه می‌شود. فرض بر این است که گیرنده‌ها در ارتفاع صفر هستند. پرتوها را با تغییرات جزئی در زاویه فرود به سمت چشمه سوق می‌دهند. عمق چشمه‌ها با گام‌های مختلفی



دیگر، جهت تولید آزمایش مصنوعی ایجاد یک شکل دلخواه و آزاد عمودی است. می‌توان در آن واحد تعداد دلخواهی از آنومالی‌های آزاد را در مقاطع عمودی مختلف تعریف کرد.

### 5 - آزمایش زوج و فرد

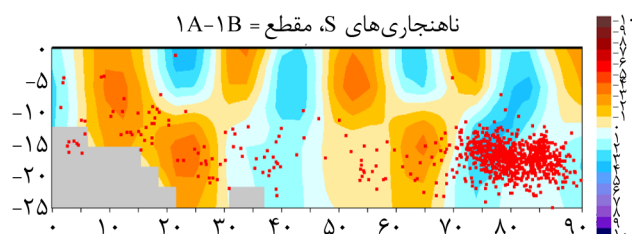
جهت بررسی تأثیر خطاهای تصادفی در داده‌ها، آزمایشی انجام می‌شود که در آن کل داده‌ها با روشی دلخواه به دو گروه مساوی تقسیم می‌شود (برای مثال دو دسته مرتبط با زلزله‌هایی با شماره‌های زوج و فرد). تمام مراحل به‌طور مستقل بر روی این دو دسته داده پیاده می‌شود. تفاوت‌های مدل‌های نهایی نقش فاکتور تصادفی در داده‌ها را منعکس می‌کند. همچنین مقایسه این نتایج با نتایج وارونه‌سازی کل داده‌ها نشان می‌دهد که نصف کردن داده‌ها چه اثری بر روی کیفیت مدل می‌گذارد [7]. در الگوریتم لوتوس نیز امکان انجام این آزمایش وجود دارد. به این صورت که ابتدا با کل داده‌ها تصویر توموگرافی را با پارامترهای برگزیده به دست می‌آوریم. سپس با توجه به شماره اختصاص داده‌شده به داده‌ها، آن‌ها را به دو دسته زوج و فرد تقسیم کرده و با این دو دسته نیز مجدداً توموگرافی را انجام می‌دهیم. انتظارمان این است که این سه دسته داده اشکال توموگرافی یکسانی را نتیجه دهد. این آزمایش هم بر روی مقاطع افقی و هم بر روی مقاطع عمودی قابل انجام است. در شکل (8) نمونه‌ای از این آزمایش را بر روی مقاطع عمودی در شرقی‌ترین بخش زاگرس می‌بینیم که نتایج مشابهی را نتیجه داده و نشان‌دهنده کیفیت خوب داده‌های ورودی است.



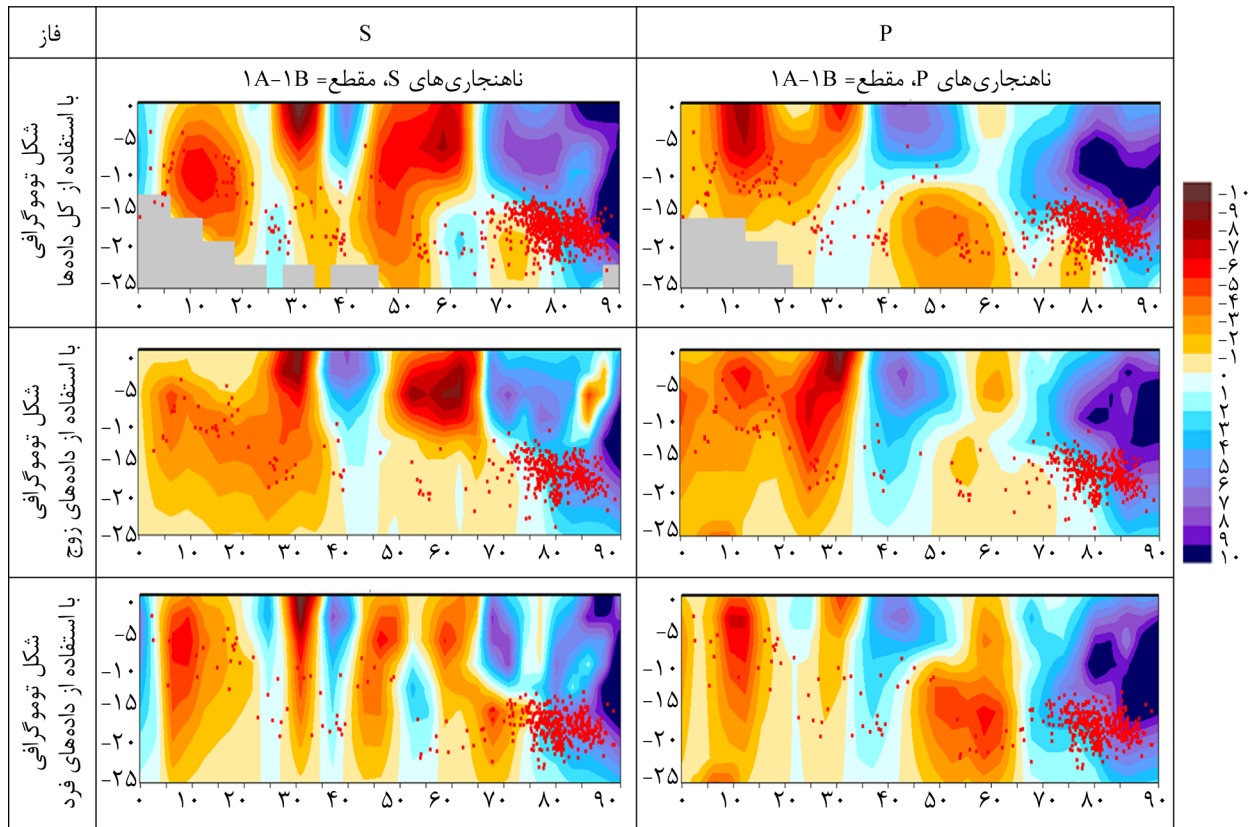
در این آزمایش مدل مصنوعی به‌صورت منظم و به فرم شطرنج در اعماق مختلف در نظر گرفته می‌شود تا قدرت بازسازی مدل مورد ارزیابی قرار گیرد. در چنین طرحی مدل به‌صورت یک‌درمیان به مناطقی با سرعت‌های بالا و پایین تقسیم می‌شود طول هر بخش مساوی (و یا بزرگ‌تر) از کوچک‌ترین طول موج بازسازی‌شده در مدل به‌دست‌آمده است. مناطقی که ساختار شطرنجی پس از وارونه‌سازی به‌وضوح بازسازی شود، مناطقی هستند که ساختار مدل حل شده به‌خوبی قابل پذیرش است [11]. در شکل‌های (4) و (7) یک نمونه از این نوع آزمایش قابل مشاهده است. مثالی از این آزمایش بر روی مقاطع عمودی که بر روی منطقه شرق زاگرس انجام شده و بازسازی مدل مصنوعی شطرنجی پس از وارونه‌سازی در شکل (7) آمده است. مناطق واقع شده در عمق‌های کمتر از 20 کیلومتر با دقت قابل قبولی بازسازی شده‌اند و محدوده قابل قبول تصاویر توموگرافی در راستای این مقطع است.

### 4-2 - آزمایش مصنوعی آنومالی‌های آزاد افقی و عمودی

جهت تولید آزمایش مصنوعی موجود می‌توان شکل دلخواهی را در مقاطع افقی ایجاد نمود. اشکالی که در این حالت به‌عنوان آنومالی آزاد تعریف می‌شوند، می‌توانند اشکال ساده (مثل مربع، مثلث و دایره) و یا الگوهای پیچیده‌تری باشند. حتی می‌توان اشکال را بر اساس آنچه در وارونه‌سازی داده‌های واقعی به دست می‌آید تعریف کرد که روشی مطمئن جهت اعتبارسنجی تصاویر توموگرافی است. روش



شکل (7): مثالی از آزمایش مصنوعی صفحه شطرنجی عمودی برای مقطعی در شرقی‌ترین بخش زاگرس، سمت چپ: مدل مصنوعی صفحه شطرنجی، سمت راست: بازسازی مدل مصنوعی در راستای مقطع عمودی AB برای فاز S. نقاط قرمز در تصاویر توموگرافی زمین‌لرزه‌های تعیین محل شده در مدل سه‌بعدی به روش احتمالاتی هستند.



شکل (8): آزمایش داده‌های زوج و فرد جهت اطمینان از تصاویر توמוگرافی به دست آمده در راستای مقطعی در شرقی‌ترین بخش زاگرس به نتایج نسبتاً مشابه منجر شده است.

## 6 - نتیجه‌گیری

2. استفاده از گره و بلوک در مقیاس محلی و ناحیه‌ای

جهت پارامتری کردن مدل امکان‌پذیر بوده و علاوه بر آن در نظر گرفتن نتایج در راستاهای مختلف و استفاده از متوسط آن‌ها در هر مرحله به عنوان ورودی برای مرحله بعد، وابستگی نتایج به راستای مدل اولیه را به حداقل می‌رساند.

3. ساخت انواع مدل‌های مصنوعی و انجام آزمایش‌های

مصنوعی با ابزاری که در این الگوریتم به این منظور در نظر گرفته شده به سهولت امکان‌پذیر است.

4. این الگوریتم از ردیابی پرتوی خمشی استفاده می‌کند

که قابلیت بازسازی مسیر پرتو با وجود توزیع سرعت‌های با شکل پیچیده مانند ورقه فرورونده در مناطق فرورانش دارا است. این توزیع سرعت‌های نسبتاً پیچیده با استفاده از گره‌ها، سلول‌ها، چندضلعی‌ها و توابع تحلیلی وارونه‌سازی شده و فاصله گره‌ها و ابعاد سلول‌ها با در نظر گرفتن چگالی پرتو تعیین می‌شود و با ایجاد یک

در این نوشتار برخی از ویژگی‌های الگوریتم توמוگرافی محلی نسبتاً جدید لوتوس که به طور رایگان در اختیار کاربران قرار گرفته ارائه شد. اگر بخواهیم این الگوریتم را با الگوریتم‌های شناخته‌شده توמוگرافی محلی مانند الگوریتم معروف SIMULPS مقایسه کنیم، می‌توان به موارد زیر اشاره کرد:

1. با توجه به قابل اجرا بودن الگوریتم در سیستم عامل

Windows (برخلاف برنامه‌های دیگر که تنها روی

سیستم عامل Unix یا Linux اجرا می‌شود) و نمایش

مستقیم نتایج (برای نمایش نتایج نیاز به نرم‌افزار مجزا

مانند GMT ندارد)، می‌تواند به سادگی جهت توמוگرافی

محلی به کار گرفته شود. علاوه بر آن بهینه‌سازی مدل

یک‌بعدی اولیه نیز بدون نیاز به برنامه وارونه‌سازی

یک‌بعدی مجزا در این برنامه گنجانده شده به سهولت

امکان‌پذیر است.

- Seismological Society of America*, **77**(3), 972-986.
7. Koulakov, I., Sobolev, S.V., and Ash, G. (2006) P- and S-velocity images of the lithosphere-asthenosphere system in the Central Andes from local source tomographic inversion. *Geophysical Journal International*, **167**, 106-126.
  8. Koulakov, I., Yudistira, T., Luher, B.G., and Wandodo (2009) P, S velocity and  $V_p/V_s$  ratio beneath the Toba caldera complex (Northern Sumatra) from local earthquake tomography. *Geophysical Journal International*, **177**(3), 1121-1139.
  9. Abers, G.A. and Roecker, S.W. (1991) Deep structure of an arc-continent collision: Earthquake relocation and inversion for upper mantle P and S wave velocities beneath Papua New Guinea. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, **96**, 6379-6401.
  10. Van der Sluis, A. and Van der Vorst, H. (1987) Numerical solution of large, sparse linear algebraic systems arising from tomographic problems. *Seismic Tomography*, **5**, 49-83.
  11. Rawlinson, N. and Sambridge, M. (2003) Seismic traveltime tomography of the crust and lithosphere. *Advances in Geophysics*, **46**, 81-197.
- توزیع یکنواخت اثر تمرکز پرتوها در تصویر توموگرافی را به حداقل می‌رساند.
5. در تعیین محل زمین‌لرزه‌ها از روش احتمالاتی استفاده می‌شود که علاوه بر غیرخطی بودن نیاز به تعیین محل اولیه به‌عنوان ورودی را از بین می‌برد و داده‌های ورودی به زمان‌های رسید و مختصات ایستگاه‌ها محدود می‌شود. به‌طور خلاصه به‌کارگیری آسان این نرم‌افزار و امکان اعمال الگوریتم وارونه‌سازی آن به دسته داده‌های بسیار متفاوت، بدون تنظیم پیچیده پارامترها، توانمندی آن در امکان وارونه‌سازی هم‌زمان  $V_p$ - $V_p/V_s$  در کنار وارونه‌سازی  $V_s$  و  $V_p$  و همچنین قابلیت‌های این الگوریتم برای اجرای آزمون‌های مختلف جهت حصول اطمینان از نتایج به‌دست آمده، از عواملی هستند که استفاده از این الگوریتم را نسبت به الگوریتم‌های دیگر آسان‌تر می‌سازد.

## مراجع

1. Koulakov, I. (2012) Code LOTOS-12 for 3D tomographic inversion based on passive seismic data from local and regional events.
2. Koulakov, I. (2009) Code LOTOS-10 for 3D tomographic inversion based on passive seismic data from local and regional events.
3. Nolet, G. (1981) 'Linearized inversion of (tele-seismic) data'. In: *The Solution of the Inverse Problem in Geophysical Interpretation*, edited by R. Cassinis (ed.), 9-37, Plenum Press, New York.
4. Paige, C.C. and Saunders, M.A. (1982) LSQR: An algorithm for sparse linear equations and sparse least squares. *ACM Transactions on Mathematical Software (TOMS)*, **8**(1), 43-71.
5. Abt, D.L. and Fischer, K.M. (2008) Resolving three-dimensional anisotropic structure with shear wave splitting tomography. *Geophysical Journal International*, **173**, 859-886.
6. Um, J. and Thurber, C.H. (1987) A fast algorithm for two-point seismic ray tracing. *Bulletin of the*