





دانشکده مهندسی معدن، نفت و ژئوفیزیک

مهندسی اکتشاف معدن

تعیین مدل سرعت در سد خرسان ۳ به روش معکوس سازی زمان اولین رسیدهای

امواج لرزه‌ای (توموگرافی لرزه‌ای)

دانشجو

حسین میرزاوند

اساتید راهنما

دکتر امین روشندل کاهو

دکتر علی نجاتی کلاته

اساتید مشاور

دکتر سید محمد اسماعیل جلالی

مهندس کاظم زارعی مظفری

پایان نامه ارشد جهت اخذ درجه کارشناسی ارشد

شهریور ۱۳۹۲

## تقدیم به: آنان که نامشان تا ابد در دل من جاودانه است...

"سلامی به آنان که پرپر شدند  
پر از زخم های مکرر شدند"  
به آنان که سوزی نهان داشتند  
حزین آوایی از آسمان داشتند  
همانان که بر شطِ خون قدم می زدند  
مستانه، نام وطن را قلم می زدند  
همانان که همراز مجنون شدند  
تا ابد بر لب هور افسون شدند  
همانان که راهی مینو شدند  
پرستو پرستو پرستو شدند...  
۳ خرداد ۱۳۹۲

روزی استاد پرسید ز من معنی این درس چیست  
گفتمش معنی هر جمله باشد فرق بین هست و نیست  
حرفهایش تا ابد الفبای جاودان زندگیست  
نقطه‌هایش تکرار لحظه‌های عشق و بندگیست  
تو با جان شیرینت می نویسی مطلبی را بارها  
من همچو فرهاد می کشم نقش عشق را بر کوهسارها  
تو چراغ علم با چه سختی‌ها در دل بیافروختی  
در این راه سرمایه‌ای جاودانی بیاندوختی  
من براه عشق شدم و ندر آنجا سوختم  
در این رهگذار بجز درد و غم نیاندوختم  
تفسیر علم تو مایه‌ی روشنی اهل زمین شد  
داستان عشق من آوای پر پرستوهای نازنین شد...  
حسین میرزاوند ۶ اسفند ۱۳۸۹

یافتن نیکوست

کاوش نیکوتر است...

## تشکر و سپاس‌گزاری

منت خدای را عزوجل که طاعتش موجب قربت است و به شکر اندرش مزید نعمت. هر نفسی که فرو می‌رود ممد حیات است و چون بر می‌آید مفرح ذات. پس در هر نفس دو نعمت موجود است و بر هر نعمتی شکری واجب... اینک که به توفیق حق این پایان‌نامه را به اتمام رساندم بر خود لازم می‌دانم از پدر و مادر مهربان و خانواده عزیزم تشکر و قدردانی کنم.

هم‌چنین از زحمات اساتید راهنما آقایان دکتر امین روشندل کاهو و دکتر علی نجاتی کلاته و استاد مشاور دکتر سید محمد اسماعیل جلالی که در تمام مراحل این کار دلسوزانه مرا یاری رسانده‌اند کمال تشکر را دارم. از اساتید محترم آقای دکتر کامکار روحانی و آقای دکتر سلیمانی که زحمت داوری این پایان‌نامه را برعهده داشتند کمال تشکر و سپاس‌گذاری را دارم.

از شرکت توسعه منابع آب و نیروی ایران آقای مهندس شیروی مجری محترم طرح خرسان ۳ و آقای مهندس کاظم مظفری که مشاورت این پایان‌نامه را بر عهده داشتند و هم‌چنین آقای مهندس شهرداری جهت مساعدت و همکاری‌های لازم و در اختیار قرار دادن داده‌ها و اطلاعات و کمک‌های شایانی که نمودند، تقدیر و تشکر می‌کنم.

از شرکت مهندسی مشاور مهتاب قدس و جناب آقای مهندس بنی هاشمی و آقای مهندس جعفری کمال تشکر و سپاس‌گذاری را دارم.

از شرکت مهندسی سپاسد و آقایان مهندس مزینی، مهندس رستمی، مهندس مددی، مهندس غلامی، مهندس زمان، مهندس کاظمی، آقای شهاوند و تمام همکاران عزیز و پرسنل و کارگران زحمتکش سد گتوند علیا که سالیان دراز در گرما و سرما همراه هم بودیم، کمال تشکر را دارم.

در انتها از زحمات دیگر اساتید محترم و آقایان شاه‌حسینی و رجبی و هم‌چنین تمامی دوستان خوبم و به‌خصوص دکتر لشگری، دکتر اکبری، دکتر شمسی، مهندس رجبی‌نسب، مهندس شاکری، مهندس رضایی، مهندس معمارزاده، خانم مهندس حسینی و خانم مهندس رحیم‌زاده کمال تشکر را دارم.

حسین میرزاوند

## چکیده

لرزه‌نگاری اکتشافی مدرن با توجه به نیاز روزافزون به منابع جدید انرژی و بهره‌برداری بهینه و کارآمد به سرعت توسعه یافته است. مشخص کردن یک مدل سرعتی دقیق یکی از مهم‌ترین مراحل برای بدست آوردن یک تصویر دقیق از سرعت ساختارها در زیر سطح می‌باشد. توموگرافی لرزه‌ای یکی از روش‌هایی است که مدل سرعتی از ساختار زیر سطحی را با استفاده از داده‌های لرزه‌ای ارائه می‌دهد. امروزه این روش در محدوده‌ی وسیعی از مسائل مانند بررسی‌های بزرگ مقیاس پوسته‌ای تا مسائل مهندسی با ابعاد چند متر استفاده می‌شود. این روش در تکمیل داده‌های حفاری برای تفسیر مناطق نیمه پیچیده از نظر زمین‌شناسی و یا برای تعیین پراکندگی حفره‌ها و شکستگی‌ها و تعیین دقیق سازندهای تحکیم‌نیافته (کم‌سرعت) و تحکیم یافته (پرسرعت) می‌تواند مورد استفاده قرار گیرد. در این مطالعه از روش توموگرافی لرزه‌ای جهت بررسی دقیق ساختارها و شکستگی‌های موجود در منطقه‌ی سد خرسان ۳ استفاده شده است. هدف از انجام توموگرافی لرزه‌ای در این منطقه، شناسایی محل‌هایی با قابلیت نشت در واحدهای سنگی موجود می‌باشد. در نهایت با استفاده از روش توموگرافی لرزه‌ای، می‌توان ساختارها و نواحی کم‌سرعت را که منطبق بر لایه‌های ضعیف‌تر می‌باشند و نواحی با سرعت بالا را که منطبق بر لایه‌های فشرده‌تر هستند، را بخوبی شناسایی و از هم تفکیک کرد. با مشخص شدن لایه‌های تحکیم‌نیافته، در مراحل بعد اقدامات اصلاحی جهت بهبود وضعیت زمین در این قسمت‌ها انجام خواهد شد.

برای رسیدن به اهداف مورد نظر، از داده‌های مربوط به چهار خط برداشت توموگرافی لرزه‌ای موج P در تکیه‌گاه راست و بستر سد خرسان ۳ استفاده شده است. از نتایج داده‌های انتخاب شده، اولین زمان رسیده‌ها بدست می‌آیند. این زمان رسیده‌ها در نرم‌افزار ژئوتومو<sup>1</sup> فراخوانی می‌شوند. در مرحله مدل-سازی مستقیم، مدل اولیه بر اساس شرایط زمین‌شناسی و داده‌های ژئوفیزیکی تعریف می‌شود. این

---

<sup>1</sup> Geo Tomo CG

مدل نشان دهنده‌ی یک حدس اولیه از ساختار زیرسطحی بر اساس شرایط موجود می‌باشد. پس از ردیابی مسیر پرتوها توسط نرم‌افزار، عملیات وارون‌سازی انجام می‌شود. نتایج حاصل، مدل‌های دوبعدی و سه‌بعدی سرعت لرزه‌ای در چهار محدوده مطالعاتی می‌باشند. با بررسی این مدل‌ها وضعیت سرعت در لایه‌های زمین در محدوده تکیه‌گاه راست و بستر سد خرسان ۳ مشخص می‌شود. نمایش مدل‌های سرعت بر روی توپوگرافی منطقه در حالت سه‌بعدی، موقعیت و محدوده مناطق پرسرعت و کم‌سرعت در تکیه‌گاه و بستر سد را با وضوح بهتر نسبت به قبل نشان می‌دهد.

**کلمات کلیدی:** توموگرافی لرزه‌ای، اولین زمان رسیده‌ها، مدل اولیه، وارون‌سازی، مدل سرعتی، نواحی کم‌سرعت، سد خرسان ۳.

## فهرست مطالب

۱	فصل اول: کلیات.....
۲	۱-۱ مقدمه.....
۳	۲-۱ تاریخچه پیدایش و مراحل توسعه.....
۴	۳-۱ کاربردهای توموگرافی در لرزه‌شناسی.....
۶	۴-۱ ضرورت تحقیق و اهداف پایان‌نامه.....
۸	۵-۱ روش انجام تحقیق.....
۸	۶-۱ ساختار پایان‌نامه.....
۹	فصل دوم: معرفی منطقه مورد مطالعه و مطالعات پیشین.....
۱۰	۱-۲ مقدمه.....
۱۰	۲-۲ موقعیت جغرافیایی و راه‌های دسترسی.....
۱۱	۳-۲ مطالعات انجام شده.....
۱۲	۴-۲ زمین‌شناسی عمومی منطقه.....
۱۲	۱-۴-۲ زمین ریخت‌شناسی.....
۱۴	۲-۴-۲ چینه‌شناسی.....
۱۴	۱-۲-۴-۲ سازند پابده.....
۱۴	۲-۲-۴-۲ سازند آسماری.....
۱۶	۳-۲-۴-۲ سازند گچساران.....
۱۶	۴-۲-۴-۲ سازند میشان.....
۱۷	۵-۲-۴-۲ بخش آهک گوری.....
۱۷	۶-۲-۴-۲ سازند آغا‌جاری.....

- ۱۷-۲-۴-۷ سازند بختیاری.....
- ۱۸-۲-۴-۸ رسوبات کواترنری.....
- ۱۸-۲-۵ زمین‌شناسی محل ساخت‌گاه سد خراسان ۳.....
- ۱۹-۲-۵-۱ سازند آسماری.....
- ۲۰-۲-۵-۲ زمین‌شناسی گالری‌ها و گمانه‌ها.....
- ۲۳-۲-۶ زمین‌شناسی ساختمانی.....
- ۲۵-۲-۷ مطالعات مکانیک سنگ.....
- ۲۵-۲-۷-۱ شاخص کیفی توده سنگ (RQD).....
- ۲۷-۲-۷-۲ طبقه‌بندی مهندسی توده سنگ ساخت‌گاه سد خراسان با روش RMR.....
- ۲۸-۲-۷-۳ طبقه‌بندی توده سنگ ساخت‌گاه سد خراسان با روش GSI.....
- ۲۹- فصل سوم: اصول، مبانی و روش‌های توموگرافی لرزه‌ای.....
- ۳۰-۳-۱ مقدمه.....
- ۳۱-۳-۲ مبانی نظری در توموگرافی لرزه‌ای.....
- ۳۵-۳-۳ روش‌های بازسازی تصویر.....
- ۳۵-۳-۳-۱ الگوریتم برگشت به عقب یا BP.....
- ۳۶-۳-۳-۲ روش ماتریس وارون (روش گرادیان مزدوج یا CG، روش حداقل مربعات خطا یا LSQR).....
- ۳۸-۳-۳-۳ روش‌های بازسازی تحلیلی (روش‌های فوریه، برگشت به عقب فیلتر شده).....
- ۴۰-۳-۳-۴ روش‌های بازسازی تکراری (SIRT , ART).....
- ۴۲-۳-۴ مقایسه روش‌های مختلف بازسازی تصویر.....
- ۴۴-۳-۵ معادلات ریاضی مربوط به روش SIRT.....
- ۴۹-۳-۶ تقسیم‌بندی توموگرافی.....



- ۷-۳ روش کار..... ۵۰
- ۸-۳ انتخاب کردن داده‌ها..... ۵۱
- ۹-۳ مدل سازی مستقیم..... ۵۲
- ۱-۹-۳ ردیابی پرتو..... ۵۳
- ۲-۹-۳ پارامتری کردن مدل..... ۵۶
- ۱-۲-۹-۳ روش شبکه بندی..... ۵۶
- ۲-۲-۹-۳ روش سلول بندی..... ۵۷
- ۳-۲-۹-۳ پارامتری کردن به روش لایه دگر دیس..... ۵۸
- ۱۰-۳ وارون سازی توموگرافی..... ۶۰
- ۱-۱۰-۳ توموگرافی اولین زمان رسید..... ۶۱
- ۲-۱۰-۳ توموگرافی امواج بازتابی..... ۶۱
- ۱۱-۳ محدودیت های توموگرافی لرزه ای..... ۶۲
- ۱۲-۳ هندسه برداشت..... ۶۴
- ۱-۱۲-۳ برداشت های لرزه ای قائم یا VSP..... ۶۵
- ۲-۱۲-۳ برداشت های درون چاهی..... ۶۸
- فصل چهارم: روش کار و تحلیل داده‌ها..... ۷۱
- ۱-۴ مقدمه..... ۷۲
- ۲-۴ لیست نرم افزارهای استفاده شده..... ۷۳
- ۳-۴ هندسه های مختلف برداشت داده های لرزه ای..... ۷۵
- ۴-۴ فراخوانی داده های لرزه ای و مراحل کار با نرم افزار..... ۷۶
- ۵-۴ ترسیم مقاطع دوبعدی و سه بعدی سرعت در سد خرساں ۳..... ۷۸

۷۹.....	۱-۵-۴ مقاطع سرعت بین گالری‌های GR1 و GR2
۸۵.....	۲-۵-۴ مقاطع سرعت در محدوده بین دو گمانه داخل گالری GR1 و گالری GR1
۹۱.....	۳-۵-۴ مقاطع سرعت بین گمانه ۲۱۴ در تکیه‌گاه راست و تکیه‌گاه راست
۹۷.....	۴-۵-۴ مقاطع سرعت بین گمانه ۱۲ و گمانه ۱۳ در بستر رودخانه
۱۰۳.....	۶-۴ نمایش توپوگرافی محدوده و ترسیم مدل‌های سرعتی بر روی آن
۱۰۸.....	فصل پنجم: نتیجه‌گیری و پیشنهادات
۱۰۹.....	۱-۵ نتیجه‌گیری
۱۱۰.....	۲-۵ پیشنهادات
۱۱۲.....	پیوست
۱۴۱.....	منابع و مراجع

## فهرست اشکال

- فصل دوم: معرفی منطقه مورد مطالعه و مطالعات پیشین..... ۹
- شکل (۱-۲): نقشه راه‌های دسترسی به محدوده سد خرسان ۳ (شرکت آب و نیرو، ۱۳۹۰)..... ۱۱
- شکل (۲-۲): نقشه زمین‌شناسی عمومی منطقه سد خرسان ۳
- ..... (سازمان زمین‌شناسی ایران، ۱۳۷۴)..... ۱۳
- شکل (۳-۲): مقطع تیپ تشکیلات آسماری (خسروتهرانی، ۱۳۶۷)..... ۱۵
- شکل (۴-۲): مقطع زمین‌شناسی واحدهای مختلف سنگی سازند آسماری در تکیه‌گاه‌ها و پی سد خرسان ۳ (شرکت توسعه منابع آب و نیروی ایران، ۱۳۸۳)..... ۲۰
- شکل (۵-۲): نمایی از گالری GR1 حفاری شده در واحد UAS1 (گلشن و همکاران، ۱۳۸۹)..... ۲۲
- شکل (۶-۲): نمایی از گالری GR2 حفاری شده در واحد UAS2 (گلشن و همکاران، ۱۳۸۹)..... ۲۲
- شکل (۷-۲): نمایش عمقی گالری‌ها و گمانه‌های حفر شده در تکیه‌گاه راست و بستر رودخانه..... ۲۳
- شکل (۸-۲): نقشه گسل‌ها و درزه‌های اصلی موجود در محدوده ساخت‌گاه سد خرسان ۳ (شرکت توسعه منابع آب و نیروی ایران، ۱۳۸۳)..... ۲۵
- فصل سوم: اصول، مبانی و روش‌های توموگرافی لرزه‌ای..... ۲۹
- شکل (۱-۳): تصویر یا طرح از  $S_1$  تا  $R_1$  که مجموع یا انتگرال مقادیر تابع  $(a_1, a_2, b_1, \dots)$  در سلول هاست (Stewart, 1992)..... ۳۱
- شکل (۲-۳): هندسه‌ی مربوط به مسیر عبور پرتو  $L$  از محیط  $\theta$  زاویه‌ی بین خط عمود از مبدا مختصات بر مسیر  $L$  با محور افقی،  $a$  فاصله‌ی خط  $L$  از مبدا و  $z$  فاصله‌ی هر نقطه بر روی خط مسیر پرتو  $L$  تا نقطه‌ی عمود می‌باشد (Stewart, 1992)..... ۳۳
- شکل (۳-۳): هندسه‌ی یک سلول و مسیر عبور پرتو (Stewart, 1992)..... ۳۳
- شکل (۴-۳): نمایش یک مقطع سلول‌بندی شده برای سه مسیر پرتو نمونه با فرض انتشار پرتوها بصورت مستقیم از فرستنده به گیرنده (Lehmann, 2007)..... ۳۵

- شکل (۳-۵): توصیف شماتیک دو الگوریتم *ART* و *SIRT* (Stewart, 1992)..... ۴۲
- شکل (۳-۶): نمای کلی از روش‌های بازسازی تصویر. دو روش بالا با فرض محیط پیوسته استفاده می‌شوند و روش‌های پایین با فرض محیط گسسته (Stewart, 1992)..... ۴۳
- شکل (۳-۷): فلوچارت مربوط به روش *SIRT*.  $S^0$  تخمین اولیه‌ی کندی،  $S^q$  کندی در جریان که تصحیحات روی آن انجام می‌شود،  $T^{calc}$  زمان رسید محاسبه شده و  $T^{meas}$  زمان رسید مشاهده شده است.  $S^q$  بطور مرتب اصلاح می‌شود تا جایی که اختلاف  $T^{meas}$  و  $T^{calc}$  به حد مجاز برسد (با تغییر (Lehmann, 2007)..... ۴۸
- شکل (۳-۸): روش پرتابی در ردیابی پرتو (Nolet, 2008)..... ۵۴
- شکل (۳-۹): مسیر پرتو در الگوریتم کوتاه‌ترین مسیر (Nolet, 2008)..... ۵۵
- شکل (۳-۱۰): تصویر دوبعدی از روش سلول‌بندی (Zhou, 1997)..... ۵۸
- شکل (۳-۱۱): تصویر سه‌بعدی از روش سلول‌بندی (Zhou, 1997)..... ۵۹
- شکل (۳-۱۲): مثالی از پارامتری کردن به روش لایه دگردیس در منطقه‌ای در جنوب کالیفرنیا. مدل شامل هشت لایه است که هر لایه به هشت سلول تقسیم‌بندی شده است. این روش مقادیر سرعت برای سلول‌ها در محدوده‌ی یک لایه رایکسان در نظر می‌گیرد (Zhou, 2004)..... ۵۹
- شکل (۳-۱۳): مقایسه‌ی نتایج یک آزمایش مصنوعی برای روش *DLT* و روش شبکه‌بندی. ستاره‌های صورتی چشمه و مثلث‌های سبز گیرنده می‌باشند. (a) مدل واقعی، (b) مسیر پرتوها در مدل واقعی، (c) نتایج توموگرافی با روش شبکه‌بندی، (d) نتایج حاصل از *DLT*. نتایج حاصل از *DLT* به مدل واقعی نزدیکتر می‌باشند (Zhou, 2004)..... ۶۰
- شکل (۳-۱۴): هندسه‌های مختلف برداشت داده‌های لرزه‌ای مورد استفاده در توموگرافی (Lehmann, 2007)..... ۶۵
- شکل (۳-۱۵): هندسه‌ی مربوط به پروفیل عمودی لرزه‌ای. (الف) مسیر پرتوها، (ب) زمان سیرهای مربوطه (Yilmaz, 1987)..... ۶۶
- شکل (۳-۱۶): موقعیت چشمه‌ها، گیرنده‌ها و مسیر پرتوها در برداشت چاه به چاه (Wadhwa et al, 2009)..... ۶۹

- شکل (۳-۱۷): (a) مدل زمین‌شناسی واقعی، (b) روش چاه‌نگاری که فقط اطلاعات نزدیک چاه و روند گسترش لایه را با درون‌یابی مشخص می‌کند، (c) مسیر پرتوها در توموگرافی که هم‌گسل و هم‌حفره را پوشش می‌دهند (با تغییر Lehmann, 2007)..... ۷۰
- فصل چهارم: روش کار و تحلیل داده‌ها..... ۷۱**
- شکل (۴-۱): موقعیت چشمه و گیرنده‌ها برای حالت‌های مختلف برداشت داده‌های لرزه‌ای در سد خرسان ۳..... ۷۶
- شکل (۴-۲): نمایش زمان رسیدها بر مبنای شناسه پرتو..... ۷۸
- شکل (۴-۳): پوشش محدوده بین دو گالری GR1 و GR2 توسط پرتوهای لرزه‌ای..... ۸۰
- شکل (۴-۴): نمایش محدوده سرعت پرتوهای ثبت شده بین دو گالری GR1 و GR2..... ۸۱
- شکل (۴-۵): تمرکز عبور پرتوها از سلول‌های مقطع نمونه شماره ۹ از ۱۸..... ۸۱
- شکل (۴-۶): مدل سرعتی بین دو گالری GR1 و GR2 در محور مختصات  $X=497990$ ، مقطع ۹ از ۱۸..... ۸۲
- شکل (۴-۷): نمایش مقاطع سرعت پردازش شده بین دو گالری GR1 و GR2 در عمق‌های مختلف..... ۸۳
- شکل (۴-۸): نمایش مقاطع سرعت پردازش شده بین گالری‌های GR1 و GR2 در عرض‌های جغرافیایی متفاوت..... ۸۴
- شکل (۴-۹): نمایش مقاطع سرعت پردازش شده بین گالری‌های GR1 و GR2 در طول‌های جغرافیایی مختلف..... ۸۴
- شکل (۴-۱۰): نمای سه‌بعدی از مدل سرعت پردازش شده بین گالری‌های GR1 و GR2 با مقاطع مختلف..... ۸۵
- شکل (۴-۱۱): پوشش محدوده بین دو گمانه و سطح گالری GR1 توسط پرتوهای لرزه‌ای..... ۸۶

- شکل (۴-۱۲): نمایش محدوده سرعت پرتوهای ثبت شده بین گمانه‌های حفر شده و سطح گالری GR1..... ۸۷
- شکل (۴-۱۳): مدل سرعتی بین دو گمانه داخل گالری GR1 و سطح گالری GR1 در محور مختصات  $X=498010$ ، مقطع ۸ از ۱۲..... ۸۸
- شکل (۴-۱۴): نمایش مقاطع سرعت بین دو گمانه داخل گالری GR1 و سطح این گالری در اعماق مختلف..... ۸۹
- شکل (۴-۱۵): نمایش مقاطع سرعت بین دو گمانه داخل گالری GR1 و سطح آن در عرض‌های جغرافیایی مختلف..... ۸۹
- شکل (۴-۱۶): مقطع سرعت بین دو گمانه داخل گالری GR1 و سطح آن در طول و عرض جغرافیایی تعیین شده..... ۹۰
- شکل (۴-۱۷): نمایش سه‌بعدی از مدل سرعت پردازش شده بین دو گمانه داخل گالری GR1 و سطح این گالری، با استفاده از مقاطع مختلف..... ۹۰
- شکل (۴-۱۸): پوشش محدوده بین گمانه ۲۱۴ و سطح تکیه‌گاه راست توسط پرتوهای لرزه‌ای..... ۹۲
- شکل (۴-۱۹): نمایش محدوده سرعت پرتوهای ثبت شده بین گمانه ۲۱۴ و سطح تکیه‌گاه راست..... ۹۳
- شکل (۴-۲۰): مدل سرعت بین گمانه ۲۱۴ و تکیه‌گاه راست در محور مختصات  $X=498000$ ، مقطع ۱۰ از ۲۰..... ۹۳
- شکل (۴-۲۱): نمایش مقاطع سرعت پردازش شده در محدوده بین گمانه ۲۱۴ و سطح تکیه‌گاه راست در عمق‌های مختلف..... ۹۴
- شکل (۴-۲۲): نمایش مقاطع سرعت پردازش شده بین گمانه ۲۱۴ و سطح تکیه‌گاه راست در عرض‌های جغرافیایی مختلف..... ۹۵
- شکل (۴-۲۳): مقاطع سرعت پردازش شده بین گالری ۲۱۴ و سطح تکیه‌گاه راست در طول‌های جغرافیایی مختلف..... ۹۶

- شکل (۴-۲۴): نمایش سه‌بعدی از مدل سرعت پردازش شده بین گمانه ۲۱۴ و سطح تکیه‌گاه راست با استفاده از مقاطع مختلف..... ۹۷
- شکل (۴-۲۵): پوشش محدوده بین گمانه‌های شماره ۱۲ و ۱۳ و ساحل چپ رودخانه توسط پرتوهای لرزه‌ای..... ۹۸
- شکل (۴-۲۶): نمایش محدوده سرعت پرتوهای لرزه‌ای بین گمانه‌های ۱۲ و ۱۳ و ساحل چپ رودخانه..... ۹۹
- شکل (۴-۲۷): مدل سرعتی بین گمانه ۱۲ و ۱۳ و ساحل چپ رودخانه در محور مختصات  $X=498020$ ، مقطع ۲ از ۶..... ۱۰۰
- شکل (۴-۲۸): مقاطع سرعت پردازش شده بین گمانه‌های ۱۲ و ۱۳ و ساحل چپ در عمق‌های مختلف..... ۱۰۱
- شکل (۴-۲۹): مقاطع سرعت بین گمانه‌های ۱۲ و ۱۳ و ساحل چپ در عرض‌های جغرافیایی مختلف..... ۱۰۲
- شکل (۴-۳۰): مقطع سرعت بین گمانه‌های ۱۲ و ۱۳ و ساحل چپ در یک طول جغرافیایی مشخص..... ۱۰۲
- شکل (۴-۳۱): نمایش سه‌بعدی مدل سرعت پردازش شده بین گمانه‌های ۱۲ و ۱۳ و ساحل چپ با استفاده از مقاطع مختلف..... ۱۰۳
- شکل (۴-۳۲): نمایش مدل سرعت بین دو گالری GR1 و GR2 بر روی توپوگرافی منطقه..... ۱۰۵
- شکل (۴-۳۳): نمایش مدل سرعت بین دو گمانه کف گالری GR1 و سطح گالری بر روی توپوگرافی منطقه..... ۱۰۵
- شکل (۴-۳۴): نمایش مدل سرعت بین گالری ۲۱۴ و سطح تکیه‌گاه راست بر روی توپوگرافی منطقه..... ۱۰۶
- شکل (۴-۳۵): نمایش مدل سرعت بین گمانه ۱۲ و ۱۳ در بستر رودخانه و ساحل چپ بر روی توپوگرافی منطقه..... ۱۰۶

شکل (۴-۳۶): نمایش تمام مدل‌های سرعت پردازش شده بر روی توپوگرافی منطقه سد خرسان ۳..... ۱۰۷

## فهرست جداول

فصل دوم: معرفی منطقه مورد مطالعه و مطالعات پیشین..... ۹

جدول (۲-۱): مقدار RQD در ترازهای مختلف جناحین ساخت‌گاه سد خرسان ۳ (گلشن و همکاران، ۱۳۸۹)..... ۲۶

جدول (۲-۲): طبق‌بندی GSI در واحدهای مختلف سازند آسماری (گلشن و همکاران، ۱۳۸۹)..... ۲۸

فصل چهارم: روش کار و تحلیل داده‌ها..... ۷۱

جدول (۴-۱): مشخصات محل چشمه‌ها و محل گیرنده‌ها..... ۷۳



فصل اول

کلیات

## ۱-۱ مقدمه

ریشه اصلی واژه‌ی توموگرافی<sup>۱</sup> از کلمه‌ی یونانی تومو به معنی برش و گراف به معنی تصویر استخراج شده است. اسمی که بعداً به این تکنیک و روش تصویربرداری جدید داده شد، بیشتر به کاربرد آن در علم پزشکی تحت عنوان سی تی اسکن<sup>۲</sup> برمی‌گردد، زیرا اولین تصاویر یا توموگرام‌های رادیولوژی یک اسکن کامل مربوط به بخش خاصی از بدن می‌باشند که در آن‌ها از پرتوهای مجهول  $X$  بجای پرتوهای لرزه‌ای استفاده شده است. این تصاویر با جابجایی منبع اشعه‌ی  $X$  و صفحه‌ی عکس‌برداری در جهت‌های مختلف بدست می‌آیند و رادیولوژیست‌ها قادر هستند، از طریق شدت اشعه‌ی  $X$  مشاهده شده در محدوده‌ی مورد بررسی، وضعیت بافت‌ها و تراکم یا پوکی استخوان‌ها را بررسی کنند. آنچه در ژئوتوموگرافی انجام می‌شود بسیار شبیه توموگرافی پزشکی می‌باشد با این تفاوت که در ژئوتوموگرافی به علت وسعت بیشتر محدوده و شرایط خاص زمین‌شناسی با چالش‌های بیشتری روبرو هستیم (Stewart, 1992).

به تصویر کشیدن ساختار سرعتی زمین با استفاده از وارون‌سازی زمان سیر امواج لرزه‌ای، توموگرافی لرزه‌ای نامیده می‌شود. توموگرافی لرزه‌ای با توجه به آرایش خاص چشمه‌ها و گیرنده‌ها و پوشش کامل منطقه مورد بررسی توسط پرتوهای موج، قابلیت تصویرسازی افق‌های زیرسطحی را با دقت و قدرت تفکیک بالا دارا می‌باشد. این روش ژئوفیزیکی از توانایی قابل توجهی در تشخیص ویژگی‌های لرزه‌شناسی لایه‌های زمین برخوردار است. هدف اصلی در این روش، یافتن توزیع سرعت موج در محدوده‌ی مابین چشمه‌ها و گیرنده‌ها با استفاده از زمان اولین رسیدهای موج می‌باشد. مبنای کار بر تأثیرات مختلف توده‌های سنگی روی سرعت انتشار امواج الاستیک در محیط مورد بررسی استوار است. این روش به عنوان ابزاری مفید برای شناسایی زون‌های شکسته‌شده، هوازده، تحکیم‌نیافته و

---

<sup>1</sup> Tomography

<sup>2</sup> Computed Tomography Scanning

کاربردهای ژئوتکنیکی (نقاط مناسب برای حفاری و تزریق و بررسی اثرات تزریق در توده سنگها)، اکتشافات معدنی، پیش‌بینی خطرات احتمالی معدنکاری، توصیف مخازن نفتی و غیره مورد استفاده قرار می‌گیرد (Lehmann, 2007).

## ۱-۲ تاریخچه‌ی پیدایش و مراحل توسعه

ایده‌ی اولیه‌ی توموگرافی، انجام اندازه‌گیری‌ها در خارج از یک محدوده‌ی هدف برای بدست آوردن مقادیر داخل آن محدوده می‌باشد که اولین بار در سال ۱۹۱۷ توسط رادون<sup>۱</sup> ارائه شد. این ایده در شاخه‌های مختلف علوم طبیعی، علوم پزشکی، میکروسکوپ الکترونی و آزمایش مواد، تصویربرداری نجومی و ژئوفیزیک اکتشافی استفاده شده است (Stewart, 1992).  
مراحل تاریخی پیشرفت و استفاده توموگرافی از ابتدا تا دهه‌ی اخیر را می‌توان به‌صورت زیر خلاصه کرد (Lehmann, 2007).

(Radon, 1917)	ایده اولیه توموگرافی (تبدیل رادون)
(Bracewell, 1956)	استفاده در تصویربرداری نجومی
(Cormak, 1963)	اولین مطالعات توموگرافی پزشکی
(DeRosier, Klug, 1968)	میکروسکوپ الکترونی سه بعدی
(Hounsfield, 1972)	اولین $CT$ اسکنرهای تجاری اشعه‌ی $X$
(Boise et al, 1972)	اولین مطالعات توموگرافی لرزه‌ای
(Laterbur, 1973)	اولین توموگرام تشدید مغناطیس هسته‌ای ( $NMR^2$ )
(Dziewonski et al, 1977)	تهیه‌ی اولین تصاویر سه‌بعدی از ساختارهای درونی زمین
(Hounsfield, Cormack, 1979)	جایزه‌ی نوبل پزشکی برای $CT$ اسکنر

<sup>1</sup>Radon

<sup>2</sup> Nuclear Magnetic Resonance

(Mason, 1981)	تصویربرداری لایه‌های ذغال سنگ با استفاده از توموگرافی
(Anderson and Dziewonski, 1984)	توموگرافی لرزه‌ای پوسته‌ی زمین
(Worthington, 1984)	توموگرافی لرزه‌ای اکتشافی
(Bishop et al, 1985)	توموگرافی بازتابی
(Albrecht, 1991)	توموگرافی انتشار موج <sup>۱</sup>
(Aleotti et al, 1995)	توموگرافی داده‌های لرزه‌ای برداشت شده در چاه
(Zhang and Toksoz, 1998)	توموگرافی غیرخطی زمان سیر داده‌های شکست مرزی
(Washbourne and Meyer, 1999)	توموگرافی به‌روش چاه به چاه در یک ساختار پیچیده
(Kissling et al, 2001)	پارامتری کردن مدل در توموگرافی لرزه‌ای
(Hobro et al, 2003)	توموگرافی با ترکیب داده‌های بازتابی و شکست مرزی

### ۱-۳ کاربردهای توموگرافی در لرزه‌شناسی

در اوایل دهه‌ی ۱۹۷۰ لرزه‌شناسان دریافتند که یک تفسیر کامل سه‌بعدی برای بررسی تغییرات زمان رسید امواج لرزه‌ای نیاز می‌باشد. نقطه‌ی شروع توموگرافی لرزه‌ای مدرن در همین دهه و ارائه گزارش‌هایی در زمینه‌ی توموگرافی لرزه‌ای توسط آکی<sup>۲</sup> و همکاران در مورد ساختمان زمین در منطقه‌ی گسل سن‌آندریاس در کشور آمریکا می‌باشد. در اینجا برای اولین بار از زمان سیرهای امواج  $P$  برای به‌دست آوردن تصویری که به‌صورت ساده تغییرات سرعت امواج لرزه‌ای نسبت به عمق را نشان می‌دهد، استفاده شد. البته پروفیسور آکی برنامه‌های مطالعاتی خود را در کشور شیلی متمرکز کرده بود، ولی در سال ۱۹۷۳ با روی کار آمدن دولت دیکتاتوری پینوشه برنامه‌های خود را تغییر داد و به درخواست یکی از دانشجویان سابق خود در دانشگاه *MIT*، کارهای خود را در این زمینه در لابراتوار

<sup>1</sup> Emission tomography

<sup>2</sup> Aki

لینکلن در ماساچوست ادامه داد. پس از آن با توجه به موفقیت‌های فراوانی که این روش در تعیین ساختمان زمین و تفسیر داده‌های لرزه‌ای ارائه کرده بود، مورد توجه قرار گرفت. تلاش‌های انجام شده در دانشگاه MIT منجر به انجام آزمایش‌های محلی با استفاده از روش آکی شد. السورت<sup>۱</sup> و همکاران (۱۹۷۷) تصویری از ساختار زیر آتشفشان کیلاوا<sup>۲</sup> در هاوایی بدست آوردند. میچل<sup>۳</sup> و همکاران (۱۹۷۷) مطالعات توموگرافی را در ناحیه لرزه‌خیز نیومادرید<sup>۴</sup> انجام دادند. بعد از این بود که آزمایش‌های بزرگی در مقیاس ناحیه‌ای انجام شد و مطالعات توموگرافی در مقیاس قاره‌ای برای بررسی گوشته فوقانی در نواحی قاره‌ای هیمالیا، آمریکای شمالی و اروپا توسط دانشمندان صورت گرفت. با گذشت زمان مطالعات محلی و ناحیه‌ای توموگرافی دقیق‌تری انجام شد، به طوری که توربر<sup>۵</sup> (۱۹۸۴) یک مدل سرعتی برای ناحیه‌ی زیر آتشفشان کیلاوا بدست آورد که وضعیت کمپلکس ماگمایی موجود در زیر سطح را به خوبی تفسیر می‌کرد. بوستوک<sup>۶</sup> و همکاران (۲۰۰۲) موفق شدند چگونگی فرورانش لیتوسفر را در منطقه‌ی شمال غربی اقیانوس آرام با این روش به تصویر بکشند.

از این روش در کشورهایی مانند ژاپن، اسپانیا و یونان برای مقاصد مختلف اکتشافی استفاده شده است. به عنوان مثال در کشور اسپانیا برای اکتشاف مواد معدنی سرب و روی در منطقه‌ی معدنی رئوسین<sup>۷</sup> که دومین معدن بزرگ فلزات پایه در اروپاست، استفاده شده است (Lehmann, 2007). در جزایر یونان، از آن برای مقاصد باستان‌شناسی و مشخص کردن وضعیت لایه‌های پوشاننده‌ی یک شهر باستانی که توسط خاکستر آتشفشان دفن شده بود، استفاده شده است (Filippos et al., 2003).

---

<sup>1</sup> Ellsworth

<sup>2</sup> Kilauea

<sup>3</sup> Mitchell

<sup>4</sup> New Madrid

<sup>5</sup> Thurber

<sup>6</sup> Bostock

<sup>7</sup> Reocin

از این روش در کشور آلمان برای فعالیت‌های زیست محیطی (Yordkayhun et al., 2007) و در آمریکا برای تشخیص آلودگی آب‌های زیرزمینی استفاده شده است (Zelt et al., 2006).  
 سابقه‌ی استفاده از این روش در ایران به دهه‌ی اخیر برمی‌گردد که هم در مطالعات مهندسی کوچک مقیاس و هم مسائل بزرگ مقیاس پوسته‌ای استفاده شده است. در بررسی‌های مهندسی کوچک مقیاس، توموگرافی لرزه‌ای در مطالعات اولیه‌ی پروژه‌های سدسازی و برای شناسایی وضعیت ساخت-گاه و تعیین پتانسیل نشت آب از تکیه‌گاه سدهای بزرگی مانند کارون ۳، بختیاری و سیمره جهت تکمیل مطالعات مکانیک سنگ و زمین‌شناسی مهندسی استفاده شده است (معماریان و همکاران، ۱۳۸۰). در مطالعات بزرگ مقیاس پوسته‌ای، در سال ۱۳۸۲ و ۱۳۸۶ مطالعه توموگرافی دوبعدی پوسته‌ی زمین در مناطق آتشفشانی سهند و سبلان با استفاده از کانون زمین‌لرزه‌های محلی انجام شده است. نتایج حاصل از این مطالعات ناهنجاری‌های کم‌سرعت در زیر مخروطهای آتشفشانی سهند و سبلان را نشان داد که این امر به پدیده‌های زمین‌گرایی مرتبط با آنها نسبت داده شد (بایرام نژاد و همکاران، ۱۳۸۹).

#### ۱-۴ ضرورت تحقیق و اهداف پایان‌نامه

لرزه‌نگاری اکتشافی مدرن با توجه به نیاز روزافزون به منابع جدید انرژی و بهره‌برداری بهینه و کارآمد به سرعت توسعه یافته است. مشخص کردن یک مدل سرعتی دقیق یکی از مهم‌ترین مراحل برای بدست آوردن یک تصویر از ساختار زیر سطح می‌باشد. توموگرافی لرزه‌ای یکی از روش‌هایی است که برای بدست آوردن مدل سرعتی از ساختار زیر سطحی استفاده می‌شود. این روش برای تکمیل داده‌های حفاری در تفسیر مناطق نیمه پیچیده از نظر زمین‌شناسی و یا برای تعیین پراکندگی دقیق محدوده‌های تحکیم‌نیافته (کم‌سرعت) و تحکیم‌یافته (پرسرعت) می‌تواند مورد استفاده قرار گیرد.  
 ضرورت انجام این تحقیق، بررسی و تفسیر نتایج داده‌های توموگرافی لرزه‌ای برای مشخص کردن وضعیت ساخت‌گاه در محدوده‌ی مورد بررسی و مطالعات مهندسی مشابه آن است. با توجه به اینکه

مطالعات لرزه‌نگاری توموگرافی نسبت به آزمایش‌های دیگر مورد استفاده برای شناسایی ساخت‌گاه، مانند آزمایش لوژن، محدوده و حجم بیشتری را در بر می‌گیرند و هزینه آنها نیز به مراتب از هزینه‌های حفاری و آزمایش‌های لوژن کمتر است، بنابراین پیش از اقدام به افزایش حفاری‌ها در منطقه، برای کسب اطلاعات کلی از وضعیت ساخت‌گاه‌ها، انجام مطالعات توموگرافی در مراحل اولیه و با استفاده از حفاری‌های موجود قبلی، با توجه به دقت بالای آن، می‌تواند بسیار مفید باشد.

برداشت‌های توموگرافی چاه به چاه و گالری به گالری، با توجه به پوشش کامل منطقه‌ی مورد بررسی و ارائه‌ی یک تصویر سرعتی مناسب از ساختار، کاربردهای فراوانی دارند. گاهی اوقات در کنار این روش‌ها از برداشت چاه به سطح یا سطح به چاه نیز برای برداشت داده‌های بیشتر استفاده می‌شود. از این روش‌ها در اکتشاف کانه‌ها در حین معدن‌کاری در معادن روباز و زیرزمینی، شناسایی محل دفن زباله‌های هسته‌ای، مقاصد باستان‌شناسی، بررسی‌های ژئوتکنیکی و بررسی دقیق ساختارها در جناحین و بستر سدها استفاده شده است. جهت بررسی ساختارها در جناحین سدها، می‌توان این برداشت‌ها را در گالری‌ها و دستک‌های اکتشافی حفر شده در ترازهای مختلف انجام داد. در محدوده‌ی پی سد نیز می‌توان در گمانه‌های حفر شده کار توموگرافی را انجام داد. با این روش لایه‌های تحکیم-نیافته و لایه‌های تحکیم یافته در محدوده‌ی سد مشخص می‌شوند. نتایج حاصل از این کار در مراحل بعد، جهت انجام عملیات تزریق در تکیه‌گاه‌های چپ و راست و بستر سد، بسیار مفید خواهد بود.

هدف اصلی این پایان‌نامه بدست آوردن مدل‌های سرعت در نقاط مختلف ساخت‌گاه سد خرسان ۳ با استفاده از وارون‌سازی اولین زمان رسیده‌های امواج لرزه‌ای می‌باشد. نتایج حاصل از این کار تحت عنوان مطالعات توموگرافی لرزه‌ای در محل محور سد خرسان ۳، در مقاطع دوبعدی و سه‌بعدی بررسی می‌شوند. این مقاطع که توزیع سرعت امواج انتشار یافته در محیط‌های سنگی را نشان می‌دهند با زمین‌شناسی منطقه مقایسه می‌شوند. در نهایت لایه‌های تحکیم‌نیافته که منطبق بر نواحی کم‌سرعت می‌باشند و لایه‌های تحکیم‌یافته که منطبق بر نواحی با سرعت بالا هستند، مشخص می‌شوند.

## ۱-۵ روش انجام تحقیق

برای رسیدن به اهداف مورد نظر در این پایان نامه، ابتدا داده‌های لرزه‌ای در نواحی مختلف مانند گالری‌ها، گمانه‌ها، سطح تکیه‌گاه و محور رودخانه برداشت می‌شوند. پس از برداشت، داده‌ها به صورت مناسب انتخاب می‌شوند. از نتایج داده‌های انتخاب شده، اولین زمان رسیده‌ها بدست می‌آیند. پس از آن، این زمان رسیده‌ها در نرم‌افزار Geo Tom CG فراخوانی می‌شوند. پس از تعریف مدل اولیه و انجام مراحل وارون‌سازی، کار تهیه مقاطع سرعتی با استفاده از نرم‌افزار انجام می‌شود. در نهایت نتایج کار به صورت مدل‌های سرعتی در مقاطع دوبعدی و سه‌بعدی مورد بحث قرار می‌گیرند.

در انجام این کار از نرم‌افزار تخصصی Geo Tom CG، نرم‌افزار Voxler3 جهت رسم مقاطع سه‌بعدی و نرم‌افزارهای Surfer و Geosoft جهت اصلاح و ترسیم داده‌های توپوگرافی استفاده شده است.

## ۱-۶ ساختار پایان نامه

این پایان نامه در پنج فصل تهیه شده است. فصل اول کلیات کار می‌باشد که شامل مقدمه، تاریخچه پیدایش توموگرافی، بررسی کارهای انجام شده، اهمیت و ضرورت تحقیق و اهداف مطالعه می‌باشد. فصل دوم شامل معرفی منطقه‌ی مورد نظر، زمین‌شناسی عمومی منطقه و بررسی ساختارهای زمین-شناسی محدوده مورد مطالعه می‌باشد. در فصل سوم اصول، مبانی و روش‌های توموگرافی لرزه‌ای بررسی می‌شوند. این فصل شامل مفاهیم نظری توموگرافی، روش‌های بازسازی تصویر، تقسیم‌بندی توموگرافی، مدل‌سازی مستقیم، ردیابی پرتو، پارامتری کردن مدل، وارون‌سازی و بررسی هندسه‌های متفاوت در برداشت داده‌های لرزه‌ای مورد استفاده در توموگرافی می‌باشد. در فصل چهارم به روش کار انجام شده پرداخته می‌شود و تشریح فرآیندها شامل تهیه مدل‌های سرعت با استفاده از داده‌های لرزه‌ای در نواحی مختلف محدوده مورد بررسی و مقایسه این مدل‌ها با زمین‌شناسی منطقه، توضیح داده می‌شود. در فصل پنجم به نتایج این مطالعه و پیشنهادات پرداخته می‌شود.



## فصل دوم

معرفی منطقه‌ی مورد مطالعه و

مطالعات پیشین

## ۲-۱ مقدمه

ساخت‌گاه سد خرسان ۳ در جنوب شرقی شهرستان لردگان از توابع استان چهارمحال و بختیاری و بر روی رودخانه خرسان که یکی از بزرگترین سرشاخه‌های رودخانه کارون به‌شمار می‌رود، قرار دارد. این رودخانه از ارتفاعات دنا در شهرستان یاسوج سر چشمه گرفته است. طول آن ۱۸۰ کیلومتر و ارتفاع سرچشمه آن از سطح دریا ۲۹۰۰ متر می‌باشد.

محدوده سد و دریاچه خرسان ۳ در زون زمین‌شناسی زاگرس چین‌خورده و بر روی یال شمال‌شرقی تافدیس لکی واقع شده است. لیتولوژی عمده آن را سنگ‌های آهکی، آهک مارنی و مارن سازند آسماری تشکیل می‌دهند. سازند آسماری در محدوده محل سد، با توجه به ویژگی‌های سنگ‌شناسی، به دو بخش آسماری بالایی و پائینی تقسیم می‌شود. رسوبات چین‌خورده این منطقه که تناوبی از آهک، دولومیت، آهک مارنی و مارن می‌باشند، دارای چینه‌بندی منظم هستند. فعالیت‌های آتشفشانی در این منطقه وجود نداشته و از لحاظ فعالیت‌های دگرگونی نیز بجز قطعاتی از سنگ‌های دگرگونی که در گنبد‌های نمکی مشاهده شده، رخنمونی از این سنگ‌ها وجود ندارد (گلشن و همکاران، ۱۳۸۹).

## ۲-۲ موقعیت جغرافیایی و راه‌های دسترسی

محدوده مورد مطالعه در بخش علیای رودخانه خرسان در استان چهارمحال و بختیاری و ۴۶ کیلومتری جنوب شرقی شهرستان لردگان و در حوالی روستاهای طلایه و آتشگاه واقع شده است. مختصات جغرافیایی ساخت‌گاه مورد مطالعه ۳۱ درجه و ۱۴ دقیقه و ۵۰ ثانیه عرض شمالی و ۵۰ درجه و ۵۸ دقیقه و ۲۵ ثانیه طول شرقی می‌باشد. دسترسی به ساخت‌گاه سد خرسان ۳ از طریق جاده اصفهان - بروجن - لردگان و یا شهرکرد - بروجن - لردگان و از طریق جاده آسفالت لردگان - سردشت - آتشگاه امکان‌پذیر است. جاده لردگان - آتشگاه به فاصله حدود ۳۰۰ متری شرق ساخت‌گاه به رودخانه خرسان منتهی می‌شود.



شکل (۱-۲): نقشه راه‌های دسترسی به محدوده سد خرسان ۳ (شرکت آب و نیرو، ۱۳۹۰).

## ۳-۲ مطالعات انجام شده

بررسی‌های اولیه تحت عنوان مطالعات تولید انرژی برق‌آبی از سرشاخه‌های کارون، در سال ۱۳۷۱ توسط شرکت مه‌اب قدس شروع و در دو مرحله پیش‌شناخت و شناخت انجام گردیده است. مطالعات مرحله اول طرح سد و نیروگاه خرسان ۳ توسط شرکت سابیر در خرداد ماه ۱۳۷۶ شروع و در مرداد ماه سال ۱۳۷۸ به اتمام رسیده است. بازنگری مطالعات مرحله اول و مطالعات مرحله دوم در تاریخ ۱۳۸۲/۱۲/۴ به مشارکت اشتوکی و آبان پژوه و‌گذار گردید. این مرحله از مطالعات به‌منظور بررسی شرایط زمین‌شناسی و ژئوتکنیکی محدوده فرازبند، تونل انحراف آب و محدوده آبنگیر نیروگاه در دستور کار قرار گرفت (گلشن و همکاران، ۱۳۸۹).

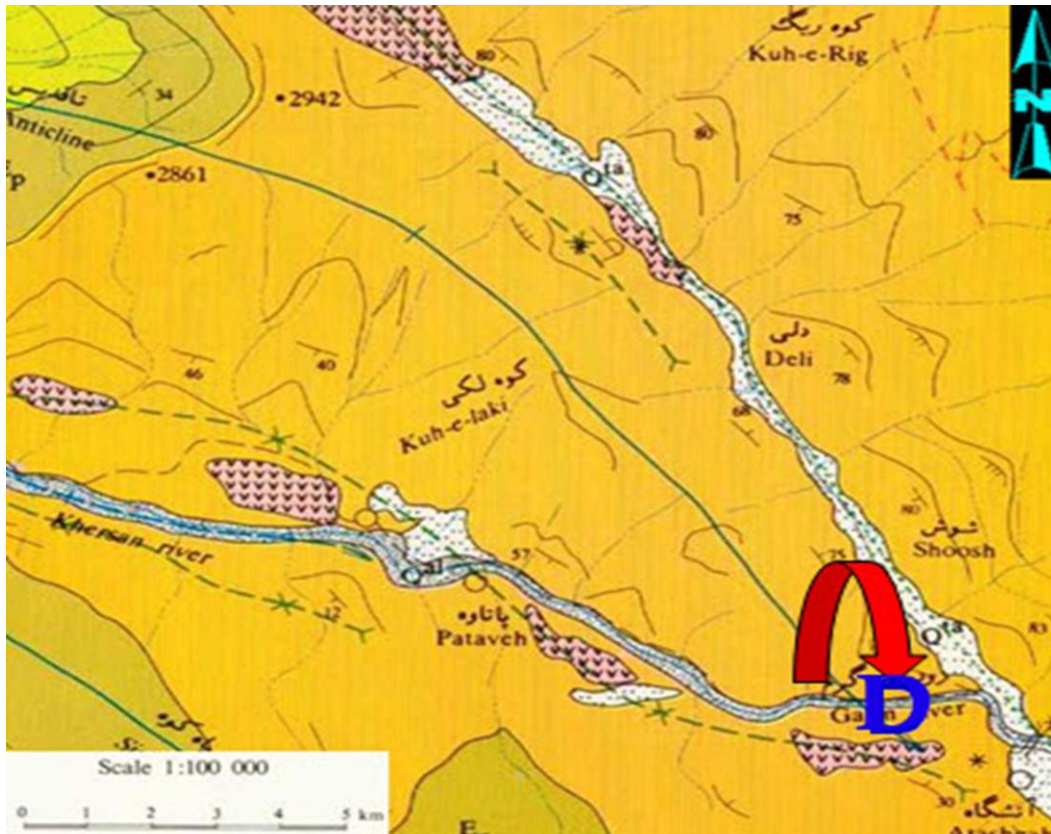
## ۴-۲ زمین‌شناسی عمومی منطقه

محدوده محل سد و دریاچه خرسان ۳ در ناحیه زمین‌شناسی زاگرس چین‌خورده واقع شده است که اختصاصات کلی آن به شرح زیر می‌باشد:

روند کلی این ناحیه، شمال‌غرب - جنوب‌شرق و ساختمان زمین‌شناسی آن ساده، ملایم و شامل مجموعه‌ای از تاقدیس‌های نزدیک به هم و فشرده با سطح محوری تقریباً قائم می‌باشد. رسوبات چین‌خورده این منطقه تناوبی از آهک، دولومیت، آهک مارنی و مارن می‌باشند که دارای چینه‌بندی منظم هستند. فعالیت‌های آتشفشانی در این منطقه وجود نداشته و فقط در گنبد‌های نمکی آثاری از سنگ‌های نفوذی مشاهده شده است. از لحاظ فعالیت‌های دگرگونی نیز بجز قطعاتی از سنگ‌های دگرگونی که در گنبد‌های نمکی مشاهده شده، رخنمونی از این سنگ‌ها وجود ندارد (گلشن و همکاران، ۱۳۸۹). شکل (۲-۲) وضعیت زمین‌شناسی عمومی منطقه، سازندها و ساختارهای موجود را در قسمتی از برگه زمین‌شناسی ۱:۱۰۰۰۰۰ چنگ، نشان می‌دهد (سازمان زمین‌شناسی ایران، ۱۳۷۴).

## ۴-۲-۱ زمین ریخت‌شناسی

حوضه آبریز رودخانه خرسان عمدتاً دارای مورفولوژی کوهستانی است. این رودخانه از به هم پیوستن رودخانه‌ی گرم که از جنوب کوه دنا سرچشمه می‌گیرد و شاخه خرسان که از شمال کوه مذکور سرچشمه می‌گیرد، بوجود آمده است. حداکثر رقوم ارتفاعی مربوط به تاقدیس ریگ با ۳۶۵۰ متر و پس از آن تاقدیس زردکوه به ارتفاع ۲۹۴۲ متر در شمال رودخانه خرسان می‌باشد. بطور کلی تراز ارتفاعات از شمال‌شرقی به سمت جنوب‌غربی به آرامی کاهش می‌یابد. جهت جریان رودخانه تابعی از روند تاقدیس‌ها و ناودیس‌های موجود در منطقه است. در سازندهای نرم، رودخانه دارای پیچ و خم‌های متعدد و بستری عریض می‌باشد. رودخانه خرسان پس از طی کردن حدود ۱۰۰ کیلومتر به رودخانه کارون می‌پیوندد و وارد دشت خوزستان می‌شود (گلشن و همکاران، ۱۳۸۹).



LEGEND

MESO.	CRE. PALEO.	NEOGENE	QUATERNARY	SYMBOLS		DESCRIPTION	PERSIAN DESCRIPTION
				SYMBOL	DESCRIPTION		
				Q <sup>al</sup>	Active stream channel deposit	سبز رودخانه فعال	
				Q <sup>la</sup>	Land slide	زمین لغزه	
				Q <sup>ta</sup>	Talus	واریزه	
				Q	Recent alluvium; (dasht).	آبرفت های جوان (دشت)	
				Q <sup>t</sup>	Recent alluvium; high terraces.	آبرفت های جوان - پادگانه های آبرفتی	
		PLIO.		Pi <sup>b</sup>	BAKHITIARI Fm.: Conglomerate with sandstone.	سازند بختیاری؛ کنگلو مری همراه با ماسه سنگ	
		MIO.		MPI <sup>a</sup>	AGHAJARI Fm.: Brownish red and grey marl, sandstone and siltstone with rare gypsum beds.	سازند آغاچاری؛ مارن، ماسه سنگ و فورش سنگ خاکستری و فرمزه پوره ای گاه همراه با لایه های گچی	
				Mg	GACHSARAN Fm.: Liver red, greenish and yellowish grey marl and gypsum.	سازند گچساران؛ مارن های فرمز جگری، خاکستری زرد و سبز همراه با گچ	
				M <sup>lb</sup>	Limestone partly brecciated	سنگ آهکی برشی شده	
				OM <sup>a</sup>	ASMARI Fm.: Massive, porous and cream limestone.	سازند آسماری؛ سنگ های آهکی کرم و خاکستری روشن، متخلخل و پوره ای	
		EO.		E <sub>1</sub>	JAHNUM Fm.: Massive, grey limestone and dolomite	سازند جهرم؛ سنگهای آهکی و دولومیتی خاکستری روشن و تیره ای	
		PAL.		E <sub>p</sub>	PABDEH Fm.: Interbedded grey marls and marly limestone	سازند پابده؛ نواب سنگ های آهکی خاکستری رنگ و مارن	
				Kg	GURPI Fm.: Blue-grey marls and marly limestone.	سازند گورپی؛ مارن های خاکستری متمایل به آبی همراه با آهک های مارنی	
				K <sub>sa</sub>	SARVAK Fm.: Massive grey to dark grey limestone.	سازند سروک؛ سنگ های آهکی خاکستری تا خاکستری تیره	

SYMBOLS نشانه ها

SYMBOLS	DESCRIPTION	PERSIAN DESCRIPTION
<b>CONTACTS</b>		<b>همبندی ها</b>
Occurate	متشخص	
Approximate	تقریبی	
Concealed	پوشیده	
<b>FAULTS</b>		<b>گسلها</b>
Definite	متشخص	
Inferred	استنباطی	
<b>SYNCLINE</b>		<b>ناودیس</b>
Definite	متشخص	
Approximate	تقریبی	
Concealed	پوشیده	
Overturned	سرگشته	
Plunging syncline	ناودیس با محور مایل یک سو	
Double plunging syncline	ناودیس با محور مایل دو سو	
<b>FOLDING</b>		<b>چین خوردگی</b>
<b>ANTICLINE</b>		<b>تاقدیس</b>
Definite	متشخص	
Approximate	تقریبی	
Concealed	پوشیده	
Overturned	سرگشته	
Plunging anticline	تاقدیس با محور مایل یک سو	
Double plunging anticline	تاقدیس با محور مایل دو سو	

شکل (۲-۲): نقشه زمین شناسی عمومی منطقه سد خراسان ۳ (سازمان زمین شناسی ایران، ۱۳۷۴).

## ۲-۴-۲ چینه‌شناسی

ویژگی‌های چینه‌شناسی و سن سازندها بر اساس بررسی‌های سازمان زمین‌شناسی کشور، در این منطقه از زاگرس چین‌خورده می‌باشد که در طی مطالعات صورت گرفته در این طرح مجدداً مورد بررسی قرار گرفته است. واحدهای چینه‌شناسی منطقه مورد مطالعه از قدیم به جدید عبارتند از:

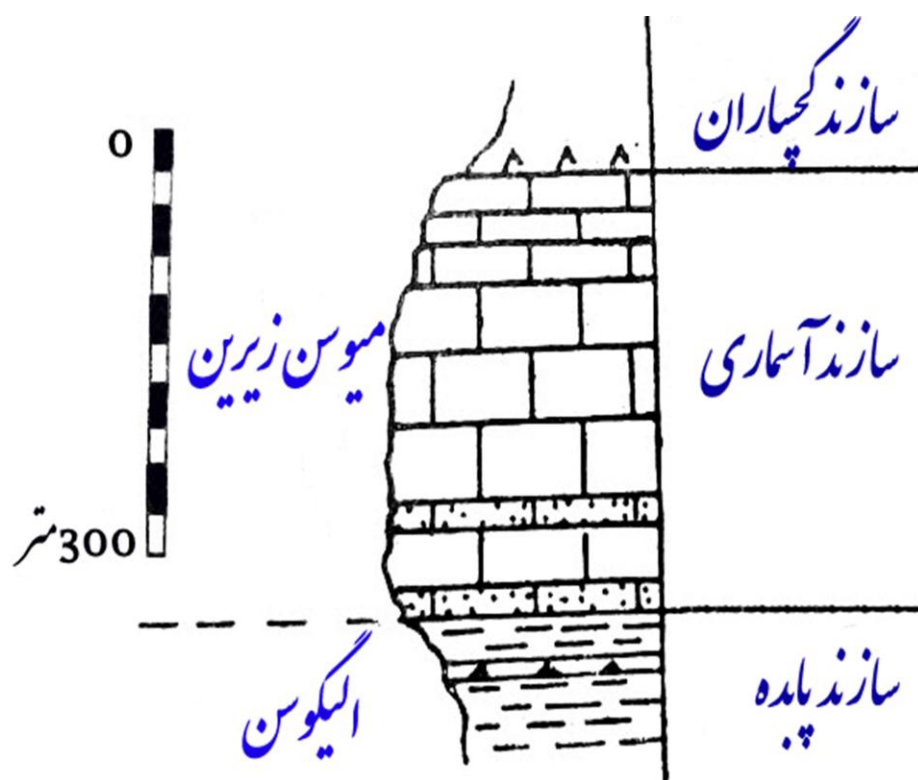
### ۱-۲-۴-۲ سازند پابده

مقطع نمونه‌ی این سازند در تنگ پابده در شمال میدان نفتی لالی خوزستان اندازه‌گیری شده است. در این مقطع ضخامت آن ۷۹۸/۵ متر است که ۱۴۰ متر آن شیل ارغوانی و مارن با لایه‌های نازک آهک در پایین، ۷۴ متر شیل و آهک رسی، ۴۲/۶ متر آهک رسی همراه با چرت، ۸۲/۳ متر شیل‌های تیره و لایه‌های آهک پراکنده و بالاخره ۴۵۸/۵ متر آهک‌های رسی نازک لایه با تناوبی از شیل، در بخش فوقانی می‌باشد. این سازند در قاعده زیرین با لایه‌های شیل ارغوانی، از سازند گورپی متمایز می‌شود. لایه‌های شیلی مذکور در واقع مرز بین رسوبات دوران دوم و سوم زمین‌شناسی است. در کنتاکت فوقانی این سازند، سازند آسماری قرار دارد که گاهی هم‌شیب و گاهی با دگرشیبی همراه است. برجستگی‌های سازند پابده از سازند گورپی بیشتر و از سازند آسماری کمتر است. سن سازند پابده از پالئوسن تا میوسن متغیر می‌باشد (درویش‌زاده، ۱۳۷۰).

### ۲-۲-۴-۲ سازند آسماری

مقطع نمونه این سازند در کوه آسماری واقع در خوزستان انتخاب شده است و به آهک آسماری معروف است. ضخامت آن در مقطع نمونه ۳۱۴ متر است، ولی عموماً از چند متر تا ۵۱۸ متر متغیر می‌باشد. قاعده زیرین این سازند عموماً سازند گورپی و قاعده بالای آن سازند گچساران می‌باشد. شکل (۲-۳) مقطع نمونه تشکیلات آسماری را نشان می‌دهد. سازند آسماری از نظر سنگ‌شناسی شامل لایه‌های آهکی کرم تا قهوه‌ای رنگ، آهک مارنی و مارن می‌باشد. بطور کلی سازند آسماری

شامل دو بخش ماسه‌سنگی اهواز و انیدریتی کلهر می‌باشد. بخش ماسه‌سنگی اهواز که قاعده‌ی سازند آسماری در چاه‌های نفتی اهواز است، شامل ماسه‌سنگ آهکی، آهک ماسه‌ای و کمی شیل می‌باشد. بخش کلهر که در واقع بخش میانی سازند آسماری است، شامل لایه‌هایی از ژئوپس، آهک، آهک مارنی و مارن می‌باشد. این بخش در جنوب غربی لرستان گسترش وسیعی دارد. به علت مقاومت زیاد و سختی آهک آسماری، این تشکیلات ارتفاعات و بخش‌های مقاوم منطقه‌ی زاگرس چین‌خورده را تشکیل می‌دهند. لایه‌های آهکی در بیرون‌زدگی‌ها، با درزه و شکاف زیاد به‌خوبی مشخص است. در بعضی از نقاط رخنمون‌های آهکی به‌صورت توده‌ای نیز مشاهده می‌شوند. میزان درزه‌شدگی در توده سنگ سبب ایجاد پدیده‌های مختلف کارستی در آنها می‌شود. سن سازند آسماری از اولیگوسن تا میوسن آغازی تعیین شده است (درویش‌زاده، ۱۳۷۰).



شکل (۲-۳): مقطع تیپ تشکیلات آسماری (خسروتهرانی، ۱۳۶۷).

### ۳-۲-۴-۲ سازند گچساران

نام این سازند از میدان نفتی گچساران که سازند مزبور در آن گسترش خوبی دارد، گرفته شده است. این سازند جزو گروه فارس می‌باشد. گروه فارس به این علت که سنگ‌های پوشش مخازن نفت آسماری را تشکیل می‌دهند، در اکتشاف نفت اهمیت زیادی دارند. رسوبات این گروه شامل سازند گچساران یا فارس زیرین، سازند میشان یا فارس میانی و سازند آجاجاری یا فارس فوقانی می‌باشند. سازند گچساران در خوزستان به ۷ بخش تقسیم شده است ولی در مناطق ساحلی فارس، به سه بخش تقسیم می‌شود. سنگ‌شناسی این سازند از مارن، انیدریت، ژیپس، نمک و لایه‌های نازک آهک تشکیل شده است. رسوبات سازند گچساران در قسمت قاعده به‌طور هم‌شیب بر روی سازند آسماری قرار دارند. در قسمت بالا این رسوبات به‌طور هم‌شیب توسط سازند میشان پوشیده می‌شوند. رنگ رسوبات مزبور خاکستری، قرمز و یا سبز می‌باشد. مورفولوژی این رسوبات عمدتاً بصورت صاف و تپه ماهوری می‌باشد. سن سازند گچساران را بر اساس توالی چینه‌شناسی، میوسن آغازی تشخیص داده‌اند (درویش‌زاده، ۱۳۷۰).

### ۴-۲-۴-۲ سازند میشان

مقطع نمونه این سازند در جنوب غربی میدان نفتی گچساران قرار دارد. ضخامت آن در محل مقطع نمونه ۷۱۰ متر است که شامل ۶۱ متر آهک‌های صدف‌دار با مارن‌های خاکستری و ۶۴۹ متر رسوبات مارنی نرم با آهک‌های صدف‌دار مقاوم‌تر می‌باشد. در هر دو قسمت رسوبات آهکی و مارنی به‌صورت متناوب قرار دارند. قاعده زیرین سازند میشان، قسمت گچی مربوط به سازند گچساران است و قاعده فوقانی آن مارن و ماسه‌سنگ آجاجاری است. سازند آجاجاری به‌صورت تدریجی بر روی سازند میشان قرار دارد. در فارس داخلی در قاعده زیرین این سازند به‌جای سازند گچساران، رسوبات سازند رازک دیده می‌شوند. بر اساس فسیل‌های موجود سن سازند میشان از میوسن آغازی تا میانی ذکر شده است (درویش‌زاده، ۱۳۷۰).



### ۲-۴-۲-۵ بخش آهک گوری

مقطع نمونه بخش گوری در ۲۸ کیلومتری جنوب شرق شهرستان لار در استان فارس قرار دارد. ضخامت آن ۱۱۲/۸ متر می‌باشد. از نظر گسترش جغرافیایی در بخش مرکزی جنوب شرقی فارس دیده می‌شود. از فارس به سمت خوزستان، ضخامت آن کم و در جنوب شرق خوزستان ناپدید می‌شود. بخش گوری از نظر سنگ‌شناسی شامل آهک‌های فسیل‌دار کرم رنگ سخت همراه با لایه‌های مارنی می‌باشد که در قاعده بالا با سازند میشان و در قاعده پایین با مارن و گچ قرمز رنگ سازند گچساران هم‌شیب می‌باشد. سن آهک گوری از میوسن زیرین تا اوایل میوسن میانی تعیین شده است (درویش‌زاده، ۱۳۷۰).

### ۲-۴-۲-۶ سازند آغاچاری

مقطع نمونه این سازند در مسیر جاده امیدیه به سمت میدان نفتی آغاچاری در استان خوزستان اندازه‌گیری شده است. ضخامت این سازند زیاد و به ۲۹۶۵ متر می‌رسد. از نظر گسترش جغرافیایی ضخامت آن از ۶۱۰ متر تا ۳۰۴۸ متر متغیر است. در قاعده زیرین این سازند، مارن‌های خاکستری و آهک‌های سازند میشان به‌صورت هم‌شیب قرار دارند. در قاعده فوقانی آن، کنگلومرای بختیاری به‌صورت دگرشیب قرار دارد. سازند آغاچاری از ماسه‌سنگ‌های آهک‌دار قهوه‌ای تا خاکستری، رگه‌های گچ، مارن‌های قرمز رنگ و سیلتستون تشکیل شده است. سن این سازند میوسن پایانی تا پلیوسن تعیین شده است (درویش‌زاده، ۱۳۷۰).

### ۲-۴-۲-۷ سازند بختیاری

سازند بختیاری که بنام کنگلومرای بختیاری معروف می‌باشد، عبارت از کنگلومرای آهکی و چرت‌دار است که دارای عدسی‌های ماسه‌سنگ می‌باشد. مقطع نمونه این سازند در منطقه گذارلندر واقع در شمال شهرستان مسجدسلیمان اندازه‌گیری شده است. ضخامت سازند بختیاری در مقطع نمونه حدود

۵۱۸ متر می‌باشد. این سازند به‌حالت دگرشیب رسوبات گروه فارس را می‌پوشاند، به‌طوری‌که در قاعده زیرین آن، معمولاً سازند آجاجاری یا فارس فوقانی قرار دارد. در قاعده بالای آن در برخی نقاط رسوبات آبرفتی جوان‌تر دیده می‌شود. در نواحی ساحلی فارس لایه‌ی نازکی از آهک کنگلومرای سازند آجاجاری را می‌پوشاند که معرف سازند بختیاری در این مناطق است. به‌طور کلی قطعات سازنده‌ی کنگلومرای بختیاری، قطعات گرد و کروی از جنس آهک و ماسه‌سنگ است که با سیمانی از مواد ریزدانه مانند آهک و رس به‌هم متصل شده‌اند. سن سازند بختیاری را پلیوسن پایانی و جوان‌تر از آن تعیین نموده‌اند (درویش‌زاده، ۱۳۷۰).

### ۲-۴-۸ رسوبات کواترنری

رسوبات عهد حاضر در محدوده‌ی طرح به‌دلیل متفاوت بودن شرایط تشکیل، از تفاوت‌های آشکاری برخوردارند. آبرفت‌های رودخانه‌ای، واریزه‌های دامنه‌ای و پادگانه‌های آبرفتی عمده‌ترین این رسوبات می‌باشند. رسوبات آبرفتی از جنس ماسه، سیلت، رس و قلوه‌سنگ‌های پراکنده می‌باشند که عمدتاً در خط‌القعر مسیل‌ها، آبراهه‌ها و رودخانه‌ها گسترش دارند. واریزه‌ها که مخلوطی از قطعات زاویه‌دار سنگ و مواد ریزدانه حاصل از هوازدگی آن‌ها می‌باشند، در پای دامنه‌ها دیده می‌شوند. پادگانه‌های آبرفتی با جنس مواد مشابه رسوبات آبرفتی، عمدتاً در محل‌هایی که شیب رودخانه‌ها ملایم و یکنواخت است و یا در محل مئاندر رودخانه‌ها و غالباً در انتهای مخزن دیده می‌شوند (گلشن و همکاران، ۱۳۸۹).

### ۲-۵ زمین‌شناسی محل ساخت‌گاه سد خرسان ۳

مطالعات و بررسی‌های زمین‌شناسی محدوده ساخت‌گاه سد خرسان ۳ نشان می‌دهد، رخنمون‌های سنگی این محل مجموعه‌ای از رسوبات دوران سوم و چهارم زمین‌شناسی می‌باشند. واحد چینه‌شناسی اصلی در محل ساخت‌گاه سد، سازند آسماری است که در ادامه به تفصیل در مورد قسمت‌های مختلف این واحد چینه‌ای در محدوده تکیه‌گاه‌ها و پی سد توضیح داده می‌شود.

## ۲-۵-۱ سازند آسماری

این سازند به دلیل تنوع سنگ‌شناسی و خصوصیات چینه‌شناسی به دو بخش آسماری زیرین با علامت اختصاری LAS و آسماری بالایی با علامت اختصاری UAS تقسیم شده است. مرز بین دو واحد مذکور را آهک‌های فسیل‌دار و آواری تشکیل می‌دهد.

بخش زیرین تناوبی از سنگ‌های آهکی با ضخامت متوسط، آهک‌های مارنی، مارن و درصد کمی دولومیت می‌باشد. ضخامت این بخش در محدوده‌ی محل سد حدود ۲۵۰ متر برآورد شده است. بخش بالایی از آهک‌های ضخیم‌لایه به رنگ قهوه‌ای روشن و میان لایه‌هایی از جنس مارن، که درصد بسیار کمی می‌باشند، تشکیل یافته است. در ترازهای بالا به دلیل توده‌ای بودن، سنگ‌ها عمدتاً صخره‌ساز بوده و به همین دلیل شیب توپوگرافی آن‌ها بیش از ۷۵ درجه می‌باشد. در بالادست محور سد واحد آسماری بالایی تنوع سنگ‌شناسی بیشتری را از خود نشان می‌دهد. براساس نقشه‌های زمین‌شناسی تهیه شده آسماری فوقانی به چهار واحد سنگی از پایین به بالا و با علائم UAS1 تا UAS4 تقسیم‌بندی شده است:

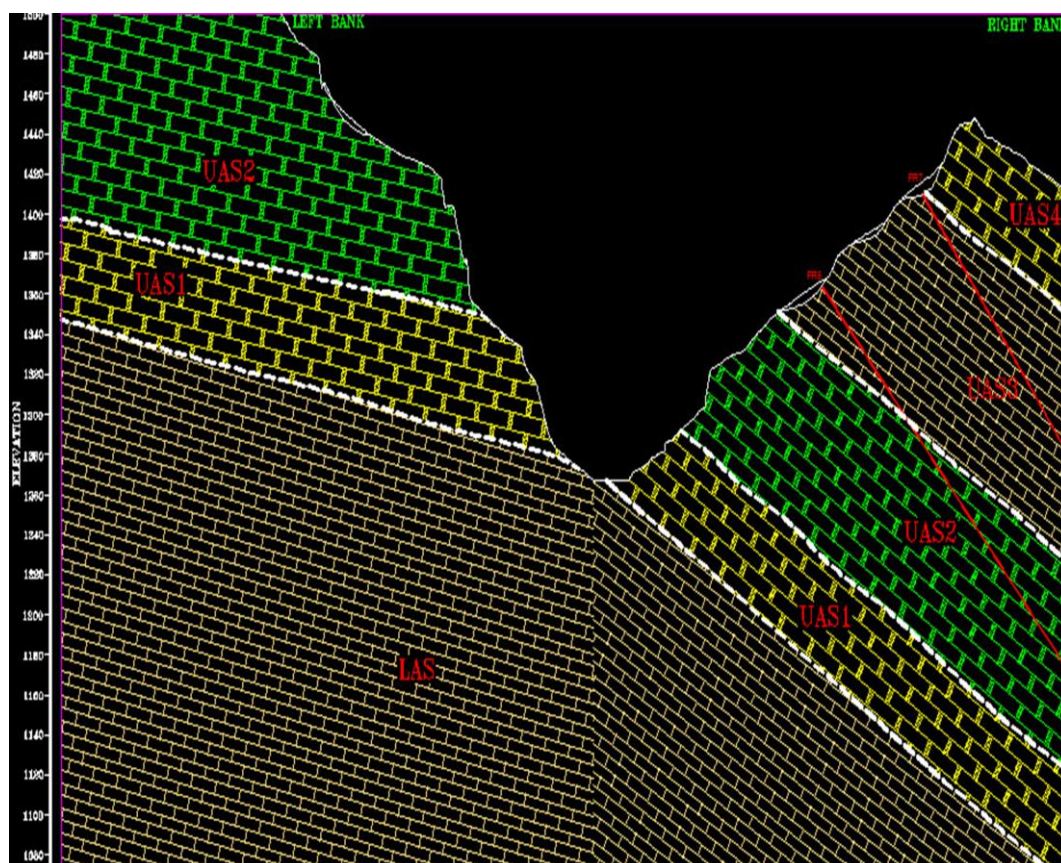
۱- واحد UAS1 از آهک‌های قهوه‌ای روشن تا کرم رنگ و ضخیم لایه تشکیل شده است. ضخامت کلی این واحد ۳۵ متر می‌باشد.

۲- واحد UAS2 از تناوب آهک ضخیم لایه تا متوسط لایه همراه با تعداد کمی میان لایه‌های آهک مارنی تشکیل شده است. ضخامت کلی این واحد حدود ۸۰ متر برآورد شده است.

۳- واحد UAS3 از مارن‌های ضخیم لایه، آهک، آهک مارنی و مارلستون با ضخامتی حدود ۸۰ متر تشکیل شده است.

۴- واحد UAS4 از جنس آهک ضخیم لایه تا متوسط لایه و با ضخامت حدود ۴۵ متر می‌باشد.

شکل (۲-۴) یک مقطع زمین‌شناسی از واحدهای مختلف سنگی سازند آسماری در تکیه‌گاه‌ها و پی سد را نشان می‌دهد.



AGE	FORMATION NAME	UNIT	SUBUNIT	LITHOLOGY
OLIGO MIOCENE	A S M A R I ( A S )	UPPER PART ( U A S )	U.A.S.4	THICK TO MEDIUM BEDDED LIMESTONE(86%) WITH SOME MARLY LIMESTONE.
			U.A.S.3	ALTERNATIONS OF THICK BEDDED MARLSTONE , MEDIUM BEDDED LIMESTONE AND MARLY LIMESTONE.
			U.A.S.2	ALTERNATIONS OF MEDIUM TO THICK BEDDED LIMESTONE & MARLY LIMESTONE.
			U.A.S.1	THICK BEDDED LIMESTONE WITH SOME MARLY LIMESTONE BEDS.
		LOWER PART ( L A S )	L.A.S	ALTERNATIONS OF MEDIUM BEDDED LIMESTONE , MARLY LIMESTONE & MARLSTONE.

شکل (۲-۴): مقطع زمین شناسی واحدهای مختلف سنگی سازند آسماری در تکیه‌گاه‌ها و پی سد خرسان ۳ (شرکت توسعه منابع آب و نیروی ایران، ۱۳۸۳).

## ۲-۵-۲ زمین‌شناسی گالری‌ها و گمانه‌ها

همان‌طور که اشاره شد، سنگ بستر سد خرسان ۳ شامل واحدهای سنگی آسماری بالایی و پایینی می‌باشد. واحد بالایی از سنگ‌های ضخیم لایه آهکی همراه با میان‌لایه‌های پراکنده‌ای از جنس مارن و

واحد پایینی از سنگ آهک، آهک مارنی و مارن به صورت متناوب تشکیل شده است. به منظور انجام مطالعات لرزه‌نگاری و مکانیک سنگ، چندین رشته گالری در جناحین سد و تعدادی گمانه در بستر رودخانه و تکیه‌گاه‌ها حفر شده است. مشخصات گالری‌ها و گمانه‌هایی که از مطالعات لرزه‌ای انجام گرفته در آن‌ها در این تحقیق استفاده شده است، به صورت زیر می‌باشد:

۱- گالری GR1 در تکیه‌گاه راست سد و در تراز ۱۲۹۰ متر از سطح دریا حفاری شده است. طول راسته اصلی این گالری ۴۰ متر و آزیموت آن  $N30^\circ$  می‌باشد. این گالری تماماً در واحد UAS1 حفاری شده است.

۲- گالری GR2 در تکیه‌گاه راست سد و در تراز ۱۳۵۵ متر از سطح دریا حفر شده است. طول راسته اصلی این گالری ۴۵ متر و آزیموت آن  $N323^\circ$  می‌باشد. این گالری در واحد UAS2 حفاری شده است.

۳- گمانه BH214 در تکیه‌گاه راست و در تراز ۱۴۰۷ متر از سطح دریا حفاری شده است. عمق این گمانه ۲۰۰ متر می‌باشد. این گمانه در واحدهای UAS1، UAS2 و LAS حفاری شده است.

۴- گمانه BH12 در بستر راست رودخانه و در تراز ۱۲۷۴ متر از سطح دریا حفر شده است. عمق این گمانه ۱۰۰ متر می‌باشد. این گمانه در واحد LAS حفاری شده است.

۵- گمانه BH13 نیز در بستر چپ رودخانه و در تراز ۱۲۷۵ متر از سطح دریا حفر شده است. عمق این گمانه ۳۰۷ متر می‌باشد. این گمانه در واحد LAS حفاری شده است.

۶- گمانه‌های BH1 و BH2 در داخل گالری GR1 و در تراز ۱۲۸۸ متر از سطح دریا حفاری شده‌اند. عمق هر یک از این گمانه‌ها ۵۰ متر می‌باشد. این گمانه‌ها در واحدهای UAS1 و LAS قرار دارند.

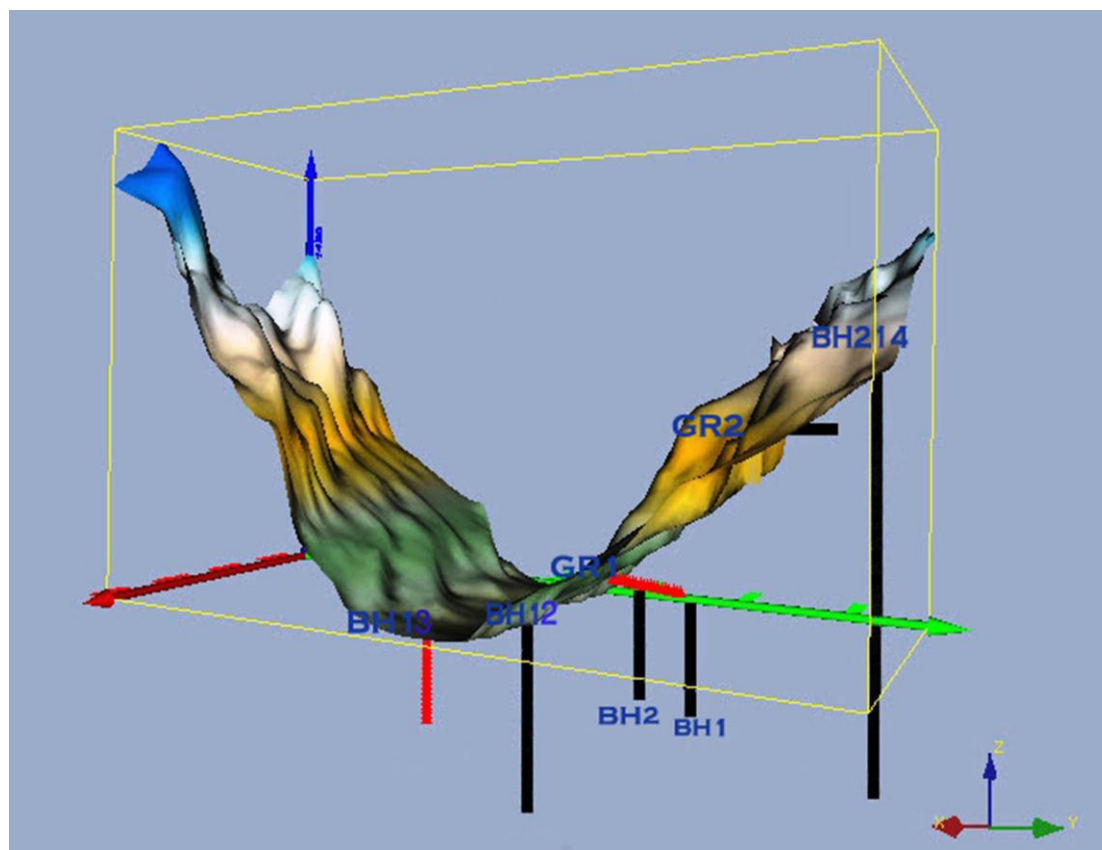
تصاویر (۲-۵) و (۲-۶) نمای بیرونی گالری‌های GR1 و GR2 و واحدهای سنگی در برگیرنده‌ی آن‌ها را نشان می‌دهند. شکل (۲-۷) موقعیت گالری‌ها و گمانه‌های ذکر شده و توپوگرافی موجود را در نمایی سه‌بعدی نمایش می‌دهد.



شکل (۵-۲): نمایی از گالری GR1 حفاری شده در واحد UAS1 (گلشن و همکاران، ۱۳۸۹).



شکل (۶-۲): نمایی از گالری GR2 حفاری شده در واحد UAS2 (گلشن و همکاران، ۱۳۸۹).



شکل (۷-۲): نمایش عمقی گالری‌ها و گمانه‌های حفر شده در تکیه‌گاه راست و بستر رودخانه.

## ۶-۲ زمین‌شناسی ساختمانی

محدوده محل ساخت‌گاه سد خرسان ۳ در زون زمین‌شناسی زاگرس چین‌خورده قرار دارد. یکی از ویژگی‌های این زون وجود تاقدیس‌های فشرده با امتداد شمال غرب - جنوب شرق می‌باشد. محل ساخت‌گاه سد بر روی محور شمالی تاقدیس لکی قرار گرفته است که این تاقدیس به سمت جنوب شرق پلانچ دارد و از روند کلی زاگرس پیروی می‌کند. یال شمال شرقی تاقدیس لکی در بالادست ناودیس شوش را تشکیل می‌دهد. ادامه این ناودیس به سمت شمال شرق تاقدیس ریگ را تشکیل می‌دهد. تاقدیس لکی در بخش جنوب غربی به تاقدیس شورم می‌رسد. علاوه بر ساختارهای ذکر شده، مهم‌ترین عنصر تکتونیکی در محدوده طرح، گسل رورانده طلایه با روند شمال غربی - جنوب شرقی است که از فاصله حدود یک کیلومتری محل سد عبور می‌کند و به راندگی جلاله منتهی می‌شود.

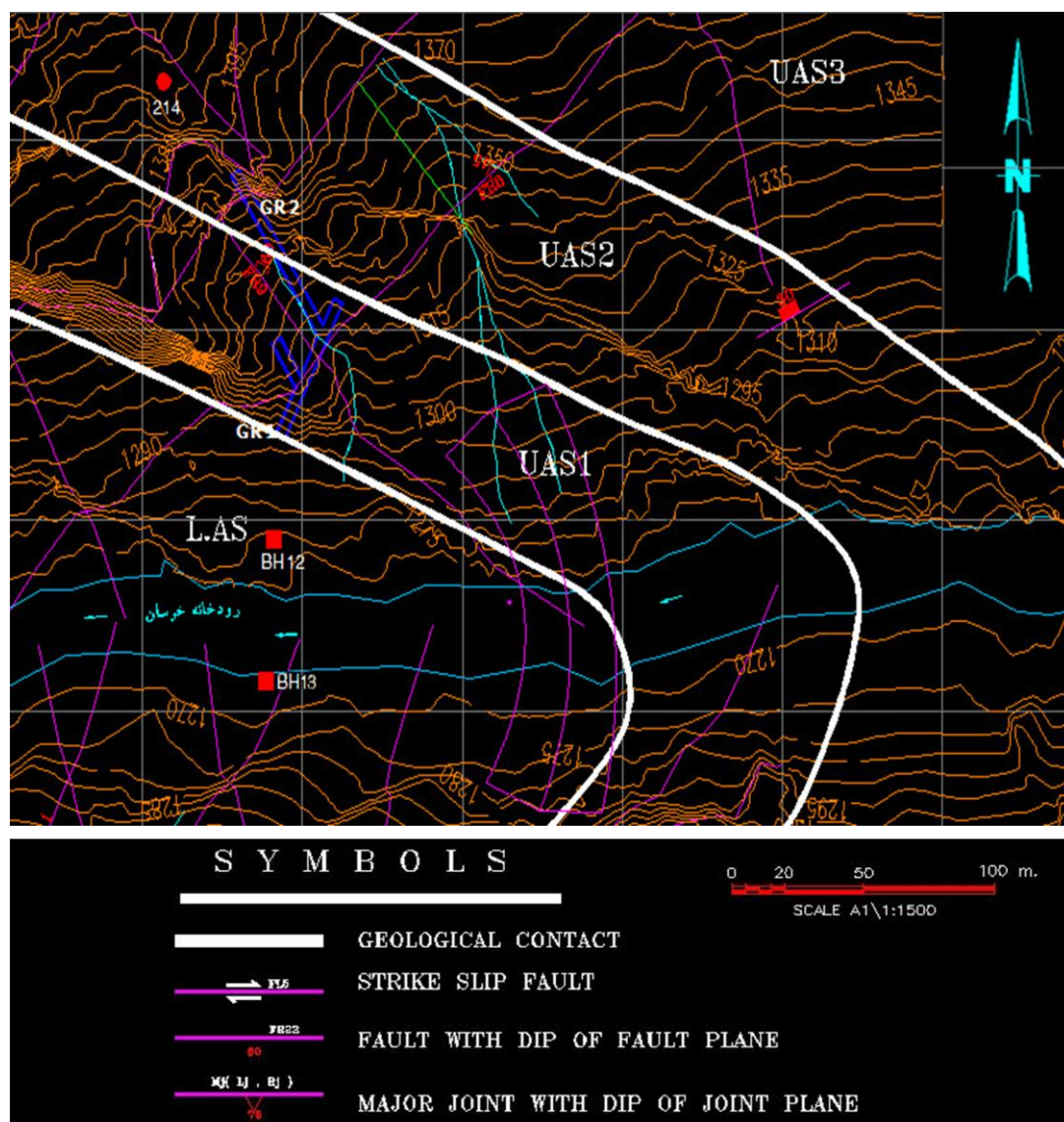
طول کلی این گسل حدود ۲۵ کیلومتر می‌باشد. این ساختارها در نقشه زمین‌شناسی منطقه در شکل (۲-۲) نشان داده شده‌اند (گلشن و همکاران، ۱۳۸۹).

با انجام مطالعات درزه‌نگاری، بررسی وضعیت دسته‌درزه‌ها در تکیه‌گاه‌ها، رخنمون‌های سنگی و گالری‌ها صورت گرفته است. تجزیه و تحلیل اطلاعات برداشت درزه‌ها نشان می‌دهد علاوه بر صفحات لایه‌بندی، چهار دسته درزه در تکیه‌گاه راست و چهار دسته درزه در تکیه‌گاه چپ وجود دارند. درزه‌های موجود به‌طور متوسط دارای طول ۱ تا ۱۰ متر و بازشدگی ۰/۵ تا ۱۰ میلی‌متر می‌باشند. این درزه‌ها عمدتاً با موادی از جنس کلیست، رس، اکسید آهن و خرده ریزه‌های سنگی پر شده و سطوح آن‌ها زبر و خشن می‌باشند (گلشن و همکاران، ۱۳۸۹).

علاوه بر سیستم درزه‌ها تعدادی گسل در محدوده ساخت‌گاه شناسایی و برداشت شده است. گسل‌های جناح راست از نوع نرمال، معکوس و امتداد لغز و گسل‌های جناح چپ عمدتاً از نوع نرمال می‌باشند. حداقل طول گسل‌ها در جناح راست ۴۰ متر و حداکثر ۶۰۰ متر و شیب آن‌ها بین ۳۰ تا ۸۰ درجه متغیر می‌باشد. در مقطع ترسیم شده در شکل (۲-۴) تعدادی از گسل‌های موجود در محدوده ساخت‌گاه و در قسمت تکیه‌گاه راست، نمایش داده شده است. شکل (۲-۸) نقشه گسل‌ها و درزه‌های موجود در محدوده ساخت‌گاه سد را نشان می‌دهد. در این نقشه سیستم گسل‌ها و درزه‌های موجود در محدوده ساخت‌گاه سد، آورده شده است.

پدیده کارستی شدن مشخصاً در آهک‌هایی نظیر ساخت‌گاه سد خرسان ۳ می‌بایست مورد بررسی قرار گیرد. مشاهدات سطحی به‌عنوان اولین روش بررسی و اطلاعات حاصل از گمانه‌ها و گالری‌های اکتشافی، هیچ‌گونه آثاری از کارستی شدن را نشان نمی‌دهند. بررسی‌های زیر سطحی عملاً برای تشخیص نواحی کارستی مشکل می‌باشند. توموگرافی لرزه‌ای یکی از روش‌هایی است که می‌تواند نواحی کارستی را به‌خوبی نشان دهد. همچنین مطالعات ویژه مانند هیدروشیمی ایزوتوپی و ردیابی ممکن است برخی از شواهد کارستی شدن را نشان دهد.





شکل (۲-۸): نقشه گسل‌ها و درزه‌های اصلی موجود در محدوده ساخت‌گاه سد خرسان ۳ (شرکت توسعه منابع آب و نیروی ایران، ۱۳۸۳).

## ۷-۲ مطالعات مکانیک سنگ

### ۱-۷-۲ شاخص کیفی توده سنگ (RQD)

میزان شاخص کیفی توده سنگ بر اساس اطلاعات حاصل از گمانه‌های حفاری شده در تکیه‌گاه راست، تکیه‌گاه چپ و پی مرکزی تعیین شده است. در تکیه‌گاه راست، دامنه تغییرات شاخص کیفی توده سنگ در گمانه‌های اکتشافی بسیار زیاد می‌باشد به طوری که در برخی قطعات در گمانه‌های

مختلف از ۰ تا ۱۰۰ متغیر می‌باشد. به‌طور کلی شاخص کیفی توده سنگ در تکیه‌گاه راست ۷۰ درصد می‌باشد که بر اساس تقسیم‌بندی دیر و بارتن، توده سنگ در رده سنگ‌های متوسط ارزیابی می‌شود. میزان شاخص کیفی توده سنگ در تکیه‌گاه چپ نیز دارای تغییرات زیادی می‌باشد. شاخص کیفی توده سنگ در این ناحیه، بر اساس اطلاعات به‌دست آمده و تجزیه و تحلیل آن‌ها در حد ۶۵ درصد می‌باشد که در رده سنگ‌های متوسط قرار می‌گیرد.

در قسمت پی مرکزی ساخت‌گاه سد نیز ارزیابی شاخص کیفی توده سنگ، بر اساس اطلاعات حاصل از گمانه‌ها در این قسمت، انجام شده است. به‌دلیل هوازگی نسبتاً زیادتر توده سنگ در مقایسه با تکیه‌گاه‌ها و نفوذ آب رودخانه به مرور زمان و اشباع بودن توده سنگ، میزان شاخص کیفی در این قسمت کمتر از تکیه‌گاه‌هاست. به‌طور کلی شاخص کیفی توده سنگ در پی مرکزی ۶۰ درصد اندازه‌گیری شده است که در رده سنگ‌های متوسط قرار می‌گیرد (گلشن و همکاران، ۱۳۸۹).

با بررسی‌های انجام شده بر روی مغزه‌های گرفته شده، مقدار RQD در ترازهای مختلف و با فاصله‌های عمودی ۲۰ متر از یکدیگر، محاسبه شده است. نتایج این کار در جدول (۱-۲) آورده شده است. طبق این جدول میزان شاخص کیفی توده سنگ در واحد آسماری بالا بین ۵۰ تا ۹۰ درصد و در واحد آسماری پایین بین ۴۵ تا ۷۰ درصد می‌باشد.

جدول (۱-۲): مقدار RQD در ترازهای مختلف جناحین ساخت‌گاه سد خرسان ۳ (گلشن و همکاران، ۱۳۸۹).

ارتفاع (متر)									موقعیت	پارامتر
۱۴۲۵	۱۴۰۵	۱۳۸۵	۱۳۶۵	۱۳۴۵	۱۳۲۵	۱۳۰۵	۱۲۸۵	۱۲۶۵		
۵۰-۷۵	۵۰-۷۵	۵۰-۷۵	۶۰-۹۰	۵۰-۷۵	۵۰-۷۰	۵۰-۷۰	۵۰-۷۰	۵۰-۷۰	تکیه‌گاه چپ	RQD (درصد)
۵۰-۷۵	۷۵-۹۰	۶۰-۸۵	۷۵-۹۰	۶۰-۷۵	۷۵-۹۰	۵۰-۶۵	۴۵-۵۰	۵۰-۶۰	تکیه‌گاه راست	

## ۲-۷-۲ طبقه‌بندی مهندسی توده سنگ ساخت‌گاه سد خرسان با روش RMR

در روش طبقه‌بندی RMR شش پارامتر توده سنگ بررسی و امتیازدهی می‌شوند. این پارامترها عبارتند از: مقاومت فشاری تک محوری سنگ بکر، شاخص کیفی توده سنگ، فاصله‌داری درزه‌ها، شرایط درزه‌ها، رطوبت درزه‌ها، تمایل درزه‌ها نسبت به جهت تونل‌زنی. شاخص کیفی توده سنگ طبق محاسبات بخش قبل، تعیین شد. امتیازهای مربوط به درزه‌ها از مطالعات درزه‌نگاری دو طرف ساخت‌گاه و نیز بررسی وضعیت شکستگی مغزه‌ها، بدست آمد و تمایل درزه‌ها نسبت به جهت تونل‌زنی در مجموع نسبتاً خوب برآورد شد. برای تعیین مقاومت فشاری تک محوری، از میانگین‌گیری نتایج آزمایشگاهی استفاده شده است. در محاسبات مقاومت فشاری تک محوری، درصد سنگ‌های موجود در واحدهای سنگ‌شناسی، به‌عنوان ضرایب وزنی در میانگین‌گیری نتایج آزمایشگاهی استفاده می‌شوند. طبق اطلاعات به‌دست آمده از حفاری گمانه‌های اکتشافی، درصد سنگ‌های آهکی، آهک مارنی و مارن در واحدهای مختلف لیتولوژیکی ساخت‌گاه سد، به‌طور میانگین به‌صورت زیر می‌باشد:

۱- واحد UAS1: آهک ۸۵ درصد، آهک مارنی ۱۰ درصد و مارن ۵ درصد.

۲- واحد UAS2: آهک ۸۰ درصد، آهک مارنی ۱۰ درصد و مارن ۵ درصد.

۳- واحد UAS3: آهک ۶۰ درصد، آهک مارنی ۳۰ درصد و مارن ۱۰ درصد.

۴- واحد UAS4: آهک ۱۰۰ درصد، آهک مارنی ۰ درصد و مارن صفر درصد.

۵- واحد LAS: آهک ۶۰ درصد، آهک مارنی ۲۵ درصد و مارن ۱۵ درصد.

پس از تعیین مقادیر پارامترهای ذکر شده، عدد RMR در توده‌های سنگی دو طرف ساخت‌گاه در واحدهای آسماری فوقانی و زیرین محاسبه شده است. توده‌های سنگی واحد آسماری بالایی با RMR بین ۴۸ تا ۷۲ و واحد آسماری پایینی با RMR بین ۴۰ تا ۶۲ در رده‌ی توده‌های نسبتاً خوب تا خوب قرار دارند (گلشن و همکاران، ۱۳۸۹).

### ۳-۷-۲ طبقه‌بندی توده سنگ ساخت‌گاه سد خرسان با روش GSI

شاخص مقاومت زمین‌شناسی یا GSI در هر منطقه از ساخت‌گاه سد، بر مبنای شرایط درزه‌داری توده‌های سنگی محاسبه شده است. نتایج محاسبات در جدول (۲-۲) آورده شده است. میزان GSI برای توده‌های سنگی از ۴۰ تا ۶۰ متغیر می‌باشد که با توجه به مقدار RMR در منطقه، با رابطه تجربی  $GSI = RMR - 5$  هماهنگی نسبتاً خوبی دارد (گلشن و همکاران، ۱۳۸۹).

جدول (۲-۲): طبق‌بندی GSI در واحدهای مختلف سازند آسماری (گلشن و همکاران، ۱۳۸۹).

واحد سنگی	تکیه‌گاه راست	تکیه‌گاه چپ
UAS1	۵۵-۶۰	۴۰-۴۵
UAS2	۵۵-۶۰	۴۵-۵۰
UAS3	۴۵-۵۰	-
LAS	۴۰-۴۵	۴۰-۴۵
زون خردشده	۴۰	۲۵

## فصل سوم

اصول، مبانی و روش‌های

توموگرافی لرزه‌ای

## ۳-۱ مقدمه

توموگرافی در حقیقت انجام اندازه‌گیری‌ها در خارج از یک محدوده‌ی هدف برای بدست آوردن مقادیری در داخل آن محدوده و ارائه‌ی تصویری است که بیانگر ارتباط بین داده‌ها و مجهولات باشد. توموگرافی لرزه‌ای روشی است که یک تصویر سرعتی بلوک‌بندی شده برحسب عمق را با استفاده از داده‌های لرزه‌ای ثبت شده، ارائه می‌دهد. این روش درحقیقت مفاهیم تجزیه و تحلیل زمین‌شناسی و یک برآورد خاص زمین‌شناسی را با تصویرسازی نشان می‌دهد (Lehmann, 2007).

در یک برداشت لرزه‌ای، داده‌های ثبت شده زمان سیر<sup>۱</sup> امواج یا دامنه‌ی<sup>۲</sup> امواج لرزه‌ای می‌باشند. این داده‌ها بصورت انتگرال‌های خطی از توابع کندی<sup>۳</sup> (عکس سرعت) یا فاکتور میرایی<sup>۴</sup> (افت انرژی موج) برای انجام توموگرافی لرزه‌ای استفاده می‌شوند. در توموگرافی لرزه‌ای پس از برداشت و انتخاب کردن داده‌ها و تعریف مدل اولیه، متغیرهای موجود طی یک‌سری فرآیندهای تکراری نسبت به برآورد اولیه بهبود می‌یابند و در نهایت با استفاده از یک فرایند وارون‌سازی، مدل یا تصویر سرعت مرتبط با عمق به کمک رویکردهای ریاضی<sup>۵</sup> بدست می‌آید (Zhou, 1997).

در این فصل پس از بیان مبانی نظری توموگرافی، مهم‌ترین رویکردهای ریاضی برای حل مسائل مربوط به بازسازی تصویر توضیح داده می‌شود. پس از آن راجع به تقسیم‌بندی کلی توموگرافی صحبت می‌شود و مراحل انجام کار در توموگرافی زمان سیر شامل مفاهیم انتخاب داده‌ها، مدل‌سازی مستقیم، وارون‌سازی توضیح داده می‌شوند. در نهایت در مورد هندسه‌های مختلف برداشت مورد استفاده در توموگرافی لرزه‌ای توضیحاتی ارائه می‌شود.

---

<sup>1</sup> Traveltime

<sup>2</sup> Amplitude

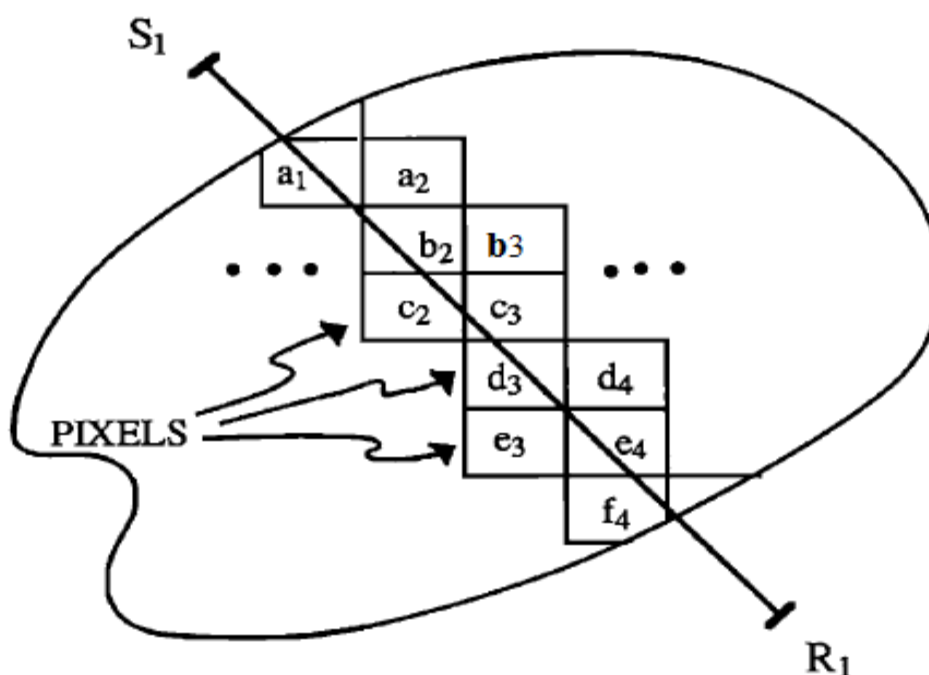
<sup>3</sup> Slowness

<sup>4</sup> Amplitude attenuation

<sup>5</sup> Mathematical approaches

### ۲-۳ مبانی نظری در توموگرافی لرزه‌ای

در توموگرافی پرتوهای لرزه‌ای، مدل اولیه به یک سری سلول تقسیم‌بندی می‌شود. تصویر یا طرح<sup>۱</sup> با استفاده از مجموع یا انتگرال داده‌های محیط مورد بررسی<sup>۲</sup> یا مقادیر برخی توابع که خواص این سلول‌ها را توصیف می‌کنند، در امتداد مسیر مشخصی از پرتو بدست می‌آید. در کاربردهای لرزه‌ای این تابع معمولاً تابع کندی یا میرایی پرتو در سلول می‌باشد. شکل (۱-۳) نمایشی هندسی از یک مسیر عبوری پرتو را نشان می‌دهد. مجموع یا انتگرالی از این نوع به تبدیل رادون<sup>۳</sup> معروف می‌باشد (Stewart, 1992).



شکل (۱-۳): تصویر یا طرح از  $S_1$  تا  $R_1$  که مجموع یا انتگرال مقادیر تابع  $(a_1, a_2, b_1, \dots)$  در سلول‌هاست (Stewart, 1992).

<sup>1</sup> Projection

<sup>2</sup> Object's parameters

<sup>3</sup> Radon transform

شکل (۳-۲) طرحی کلی از چگونگی عملکرد این تبدیل برای پرتو عبوری از محیط را نشان می‌دهد. در یک بررسی دوبعدی توموگرافی تابع  $f(r, \theta)$  با استفاده از تبدیل رادون، برای توصیف پارامتر خاصی از محیط مانند سرعت به کار می‌رود. رابطه‌ی ریاضی تبدیل رادون تابع  $f$  که بیانگر انتگرال یا مجموع مقادیر در امتداد خط سیر پرتو  $L$  از چشمه<sup>۱</sup> ( $S$ ) تا گیرنده<sup>۲</sup> ( $R$ ) می‌باشد، به صورت زیر تعریف می‌شود:

$$[Rf](l, \theta) = \int_S^R f(r, \theta') dz \quad (۳-۱)$$

که در آن  $l$  فاصله‌ی خط  $L$  تا مبدا مختصات،  $z$  فاصله‌ی هر نقطه بر روی خط مسیر پرتو  $L$  تا نقطه‌ی عمود،  $r$  بردار حرکت که  $r^2 = l^2 + z^2$ ،  $\theta$  زاویه‌ی بین خط عمود بر مسیر پرتو  $L$  با محور  $x$  و  $\theta' = \theta - \arctan(z/l)$  می‌باشد (Stewart, 1992).

انتگرال‌گیری در فاصله بین فرستنده و گیرنده انجام می‌شود. در حالت ایده‌آل  $f$  یک تابع پیوسته‌ی دوبعدی می‌باشد که در این حالت تعداد نامحدودی از نقاط برای بازسازی تصویر بررسی می‌شوند. اما در عمل تابع  $f$  در تعداد محدودی از نقاط محاسبه می‌شود.

شکل (۳-۳) هندسه‌ی مربوط به یک سلول<sup>۳</sup> و مسیر پرتو عبوری<sup>۴</sup> از آن را نشان می‌دهد. پارامتر  $d_{kj}$  مسافت طی شده توسط پرتو  $k$ ام در این سلول می‌باشد.  $S_j$  پارامتری است که ویژگی خاصی از سلول را توصیف می‌کند. همان‌طور که گفته شد در کاربردهای لرزه‌ای  $S_j$  معمولاً کندی یا میرایی پرتو در سلول می‌باشد.

---

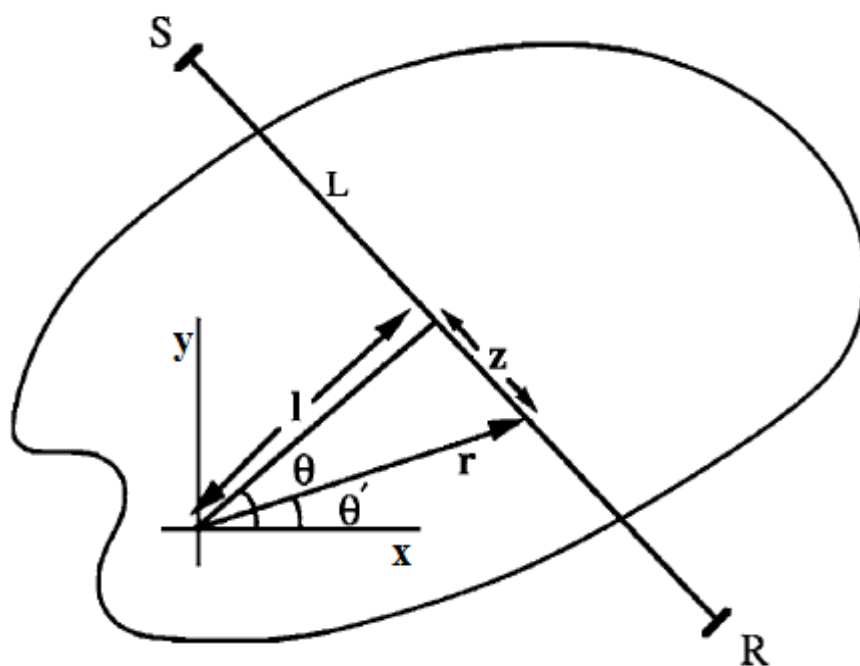
<sup>۱</sup> Source

<sup>۲</sup> Receiver

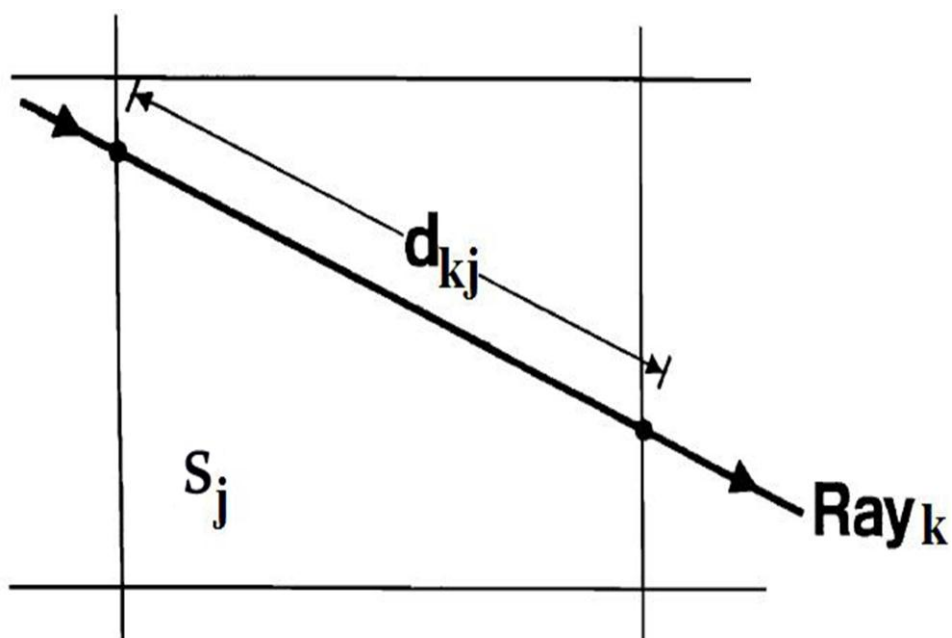
<sup>۳</sup> Pixel geometry

<sup>۴</sup> Ray path





شکل (۳-۲): هندسه‌ی مربوط به مسیر عبور پرتو  $L$  از محیط  $\theta$ . زاویه‌ی بین خط عمود از مبدا مختصات بر مسیر  $L$  با محور افقی،  $l$  فاصله‌ی خط  $L$  از مبدا و  $z$  فاصله‌ی هر نقطه بر روی خط مسیر پرتو  $L$  تا نقطه‌ی عمود می‌باشد (Stewart, 1992).



شکل (۳-۳): هندسه‌ی یک سلول و مسیر عبور پرتو (Stewart, 1992).

شکل (۳-۴) یک مقطع سلول‌بندی شده برای سه مسیر پرتو نمونه، با فرض انتشار مستقیم پرتوها از چشمه به گیرنده را نشان می‌دهد. در هر یک از این سلول‌ها مقدار کندی ( $s_j$ ) که برابر با عکس سرعت انتشار است، ثابت در نظر گرفته می‌شود. دلیل استفاده از کندی به جای سرعت ایجاد یک رابطه خطی در وارون‌سازی<sup>۱</sup> می‌باشد. زمان سیر محاسبه شده ( $t^{calc}$ ) برای یک پرتو عبوری از میان این سلول‌ها از رابطه‌ی زیر محاسبه می‌شود (Lehmann, 2007).

$$t_k^{calc} = \sum_{j=1}^N d_{kj} \cdot s_j \quad (2-3)$$

که در آن  $t_k^{calc}$  زمان سیر محاسبه شده برای پرتو  $k$ ام،  $N$  تعداد اجزای شبکه،  $d_{kj}$  طول مسیر پرتو  $k$ ام در سلول  $j$ ام و  $s_j$  مقدار کندی مربوط به سلول  $j$ ام می‌باشند. زمان سیرهای مربوط به تمام پرتوها را می‌توان در ماتریسی به شکل زیر نوشت:

$$T = D \cdot S \quad (3-3)$$

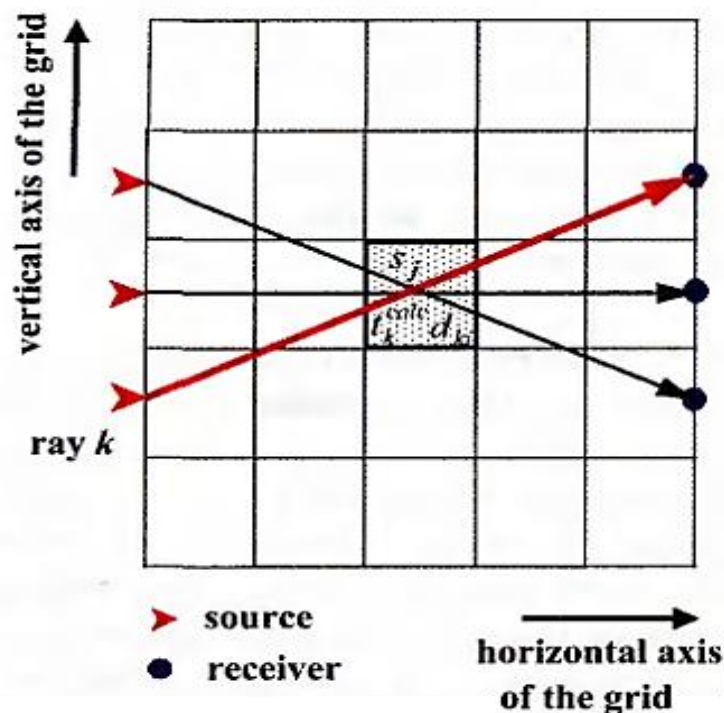
که در آن  $T$  برداری با طول  $M$  (تعداد زمان رسیده‌ها)،  $S$  برداری با طول  $N$  (تعداد سلولها) و  $D$  ماتریسی  $M \times N$  است که آرایه‌های آن طول پرتوها در هر سلول می‌باشند.

در ادامه با استفاده از روش‌های وارون‌سازی، متغیرهای مدل طی یک سری فرآیندهای تکراری نسبت به برآورد اولیه بهبود می‌یابند. در وارون‌سازی هدف بدست آوردن  $S$  مطلوب و در نهایت مشخص کردن یک مدل سرعت مرتبط با عمق می‌باشد.

در توموگرافی لرزه‌ای دسترسی به محیط مورد بررسی برای تصویرسازی غالباً محدودیت دارد و دسترسی به این محیط‌ها از طریق چاه‌های خروجی و یا تونل‌ها میسر می‌شود. اما در مواردی مانند موارد پزشکی و سی‌تی‌اسکن که بر مبنای توموگرافی با پرتوهای  $X$  می‌باشند، چون محیط مورد نظر برای تصویرسازی در آن‌ها مشخص و محدود می‌باشد، سی‌تی‌اسکنرها برای ردیابی پرتوها می‌توانند

<sup>1</sup> Inversion

در هر زاویه‌ی مورد نظر چرخانده شوند و تصویری با وضوح و دقت بالا از محیط مورد بررسی ارائه دهند. فرآیند تکراری بازسازی تصویر<sup>۱</sup> با استفاده از یک سری الگوریتم و رویکردهای ریاضی انجام می‌شود. در ادامه رویکردهای مهم برای وارون‌سازی و بازسازی تصویر توضیح داده می‌شوند.



شکل (۳-۴): نمایش یک مقطع سلول‌بندی شده برای سه مسیر پرتو نمونه با فرض انتشار پرتوها بصورت مستقیم از فرستنده به گیرنده (Lehmann, 2007).

### ۳-۳ روش‌های بازسازی تصویر

#### ۳-۳-۱ الگوریتم برگشت به عقب<sup>۲</sup> یا BP

این روش در آزمایش‌های قدیمی مربوط به بازسازی داده‌ها استفاده شده است (Herman, 1980). مزیت روش بازسازی برگشت به عقب زمان کم محاسبات آن می‌باشد. این روش می‌تواند به عنوان یک

<sup>1</sup> Image reconstruction

<sup>2</sup> Back Projection

تخمین اولیه برای توزیع کندی یا به عنوان یک مدل شروع برای تکنیک‌های پیچیده‌تر بازسازی استفاده شود. رویکرد  $BP$  ساده بوده و لزوماً نیازی به کامپیوتر و محاسبات پیچیده ریاضی ندارد.

توزیع کندی ( $s_j$ ) مربوط به سلول  $j$ ام از فرمول زیر بدست می‌آید:

$$s_j = \frac{\sum_{k=1}^M \left[ \frac{t_k}{d_k} \right] \cdot d_{kj}}{\sum_{j=1}^M d_{kj}} \quad (4-3)$$

که در آن  $d_k$  فاصله کل بین منبع و گیرنده و  $d_{kj}$  طول مسیر پرتو  $k$ ام در سلول  $j$ ام می‌باشد. اگر پرتو از سلولی عبور نکند، مقدار  $d_{kj}$  برای آن سلول صفر است. ساده‌ترین حالت در روش  $BP$  این است که اگر پرتو از سلول عبور کرده باشد، مقدار  $d_{kj}$  بصورت تقریبی یک در نظر گرفته شود و در غیر این صورت مقدار آن را صفر باشد. مزیت روش بازسازی  $BP$  سرعت آن می‌باشد، اما این روش بازسازی دقیقی انجام نمی‌دهد و تصویر بدست آمده از آن وضوح مشخصی ندارد. به‌طور کلی معایب روش  $BP$  شامل بازسازی ضعیف و هم‌چنین عدم امکان استفاده از انحنای پرتو<sup>۱</sup> در بازسازی می‌باشد (Lehmann, 2007).

۲-۳-۳ روش‌های ماتریس وارون (روش گرادیان مزدوج<sup>۲</sup> یا  $CG$ ، روش حداقل مربعات خطا<sup>۳</sup> یا  $LSQR$ )

اگر ماتریس  $D$  در رابطه (۳-۳) یک ماتریس مربعی باشد، توزیع کندی‌های نامعلوم با معکوس کردن این ماتریس و با استفاده از این روش‌ها بدست می‌آید. آرایه‌های ماتریس  $D$  در این رابطه‌ی (۳-۳)، طول  $M$  پرتو در  $N$  سلول را نشان می‌دهند (Lehmann, 2007).

$$S = D^{-1} \cdot T \quad (5-3)$$

<sup>۱</sup> Curved ray

<sup>۲</sup> Conjugate Gradient Method

<sup>۳</sup> Least Square Method

که  $D^{-1}$  وارون ماتریس  $D$  می‌باشد.

روش گرادیان مزدوج روش تکراری کمینه کردن گرادیان در حل مسائل ماتریسی است. روش حداقل مربعات خطا بر کمینه نمودن مجموع مربعات اختلاف بین زمان رسید داده‌های مشاهده شده و زمان رسید داده‌های محاسبه شده و رسیدن به یک مقدار بهینه، طی یک فرآیند تکراری استوار است (Lehmann, 2007).

در استفاده از روش‌های ماتریس وارون توجه به موارد زیر ضروری می‌باشد:

۱- داده‌ها ممکن است همراه با نوفه باشند که در این صورت جواب نهایی مبهم است. در این حالت می‌توان با محاسبه‌ی مقادیر  $s_j$ ، با استفاده از روش حداقل مربعات خطا (LSQR) و از طریق رابطه‌ی زیر خطا را به حداقل رساند:

$$\min = \sum_{k=1}^M \left( t_k^{meas} - \sum_{j=1}^N d_{kj} \cdot s_j \right)^2 \quad (6-3)$$

که در آن  $t_k^{meas}$  زمان سیر اندازه‌گیری شده برای پرتو  $k$  ام می‌باشد.

۲- اگر اندازه تصویر خیلی بزرگ باشد تعداد زیادی المان برای ماتریس و بازسازی تصویر نیاز است، که باعث بالا رفتن حجم کار می‌شود. در این حالت می‌توان از شبکه‌ای با ابعاد بزرگ‌تر استفاده کرد.

۳- اگر ماتریس  $D$  مربعی نباشد یعنی  $M \neq N$  باشد، نمی‌توان بصورت مستقیم وارون‌سازی را انجام داد. در این حالت از روش ماتریس وارون تعمیم یافته<sup>۱</sup> و روش تفکیک مقادیر تکین<sup>۲</sup> یا SVD برای حل مسأله استفاده می‌شود.

<sup>1</sup> Generalised Matrix Inversion

<sup>2</sup> Singular Value Decomposition

۴- اگر داده‌های کافی برای بدست آوردن  $N$  معادله‌ی مستقل موجود نباشد، بی‌نهایت راه حل احتمالی وجود خواهد داشت. در این حالت مسأله با کمینه کردن مقدار کل نوسان کندی‌ها با استفاده از رابطه‌ی زیر حل می‌شود:

$$\min = \sum_{j=1}^N (s_j - s_{av}) \quad (7-3)$$

که در این رابطه  $s_{av}$  میانگین کندی سلول‌هاست (Lehmann, 2007).

ایراد اصلی در روش‌های وارون ماتریسی محاسبات بالای آنها در مقایسه با روش‌های دیگر می‌باشد، که زمان زیاد و حافظه‌ی بالایی برای انجام آنها مورد نیاز است. تعداد عملیات‌های درگیر برابر  $M \times N$  حالت می‌باشد که به طور معمول برای چندین هزار زمان سیر  $M$  و عناصر شبکه  $N$  انجام می‌شود. روش گرادیان مزدوج حتی با وجود خطاهایی مانند خطاهای مربوط به گرد کردن و خطاهای مربوط به داده‌ها، با تعداد تکرار بسیار کمتری تقریب قابل قبولی از کندی ارائه می‌دهد (Paige and Saunders, 1982).

ردیابی پرتو<sup>۱</sup> با استفاده از روش ماتریس وارون امکان پذیر است. این کار طی یک فرآیند تکراری، با وارون‌سازی متوالی ماتریس  $D$  و به‌دست آوردن توزیع کندی مجهول، ردیابی مسیر پرتو با مقدار کندی به‌دست آمده و وارون‌سازی دوباره ماتریس برای مسیر پرتو جدید انجام می‌شود. ردیابی پرتو با این روش یک فرآیند تکراری و دارای محاسبات طولانی در مقایسه با روش‌های دیگر است.

### ۳-۳-۳ روش‌های بازسازی تحلیلی (روش‌های فوریه<sup>۲</sup>، برگشت به عقب فیلتر شده<sup>۳</sup>)

روش‌های تحلیلی بر مبنای یک حل ریاضی دقیق از معادلات تصویر پایه‌ریزی شده‌اند و زمان محاسبات کمتری نیاز دارند. یکی از این روش‌ها روش برگشت به عقب فیلتر شده است که در بیشتر

<sup>1</sup> Ray tracing

<sup>2</sup> Fourier Methods

<sup>3</sup> Filtered Back Projection

اسکنرهای اشعه  $X$  تجاری استفاده می‌شود. روش‌های بازسازی تحلیلی توسط بروکس<sup>۱</sup> (۱۹۷۶)، روجر<sup>۲</sup> و همکاران (۱۹۸۷)، یولا<sup>۳</sup> (۱۹۸۲)، سولیوان<sup>۴</sup> و همکاران (۱۹۸۵) و کلیتون<sup>۵</sup> (۱۹۸۸) توصیف شده‌اند.

روش‌های فوریه بر مبنای قضیه طراحی قطعه<sup>۶</sup> توسط براسول<sup>۷</sup> (۱۹۵۶) فرمول‌بندی شده‌اند. مزیت استفاده از روش فوریه برای بازسازی، در صورتی که درون‌یابی نیاز نباشد، زمان محاسباتی کم مورد نیاز می‌باشد. از معایب آن انعطاف پذیری پایین در انطباق با اطلاعات قبلی و نیز مشکل در بازسازی انحنای پرتو می‌باشد. رویکرد استفاده شده در همه الگوریتم‌های بازسازی دیگر، که پرتوها از طریق مقدار کندی سلول‌ها ردیابی و مسیر هر پرتو بازسازی می‌شود، در اینجا قابل استفاده نمی‌باشد. ایوانسون<sup>۸</sup> (۱۹۸۵) روش جدیدی برای الگوریتم‌های بازسازی تکراری پیشنهاد داد، که توسط روجر و همکاران (۱۹۸۸) برای الگوریتم بازسازی فوریه نیز اعمال شده است. مراحل این روش به شرح زیر می‌باشد:

۱- وارون سازی داده‌ها برای بدست آوردن توزیع کندی

۲- ردیابی پرتوها از طریق توزیع کندی بدست آمده و محاسبه‌ی کمترین زمان رسید برای هر مسیر

پرتو

<sup>1</sup> Brooks

<sup>2</sup> Rogers

<sup>3</sup> Youla

<sup>4</sup> Sullivan

<sup>5</sup> Clayton

<sup>6</sup> Projection slice theorem

<sup>7</sup> Bracewell

<sup>8</sup> Ivansson

۳- استفاده از زمان رسید محاسبه شده‌ی اخیر برای بدست آوردن اختلاف زمان سیر پرتو به صورت مستقیم با زمان رسیده‌های اندازه‌گیری شده مربوط به توزیع کندی ناشناخته. این مقدار که اختلاف زمان رسید بین مسیر پرتو خطی و منحنی است، به زمان رسیده‌های اندازه‌گیری شده اضافه می‌شود.

### ۳-۳-۴ روش‌های بازسازی تکراری (SIRT, ART)

تعداد زیادی روش بازسازی تکراری با اندکی تفاوت وجود دارند که از جمله‌ی آنها می‌توان روش‌های *ART*، *SIRT* و *MART* را نام برد. دو روش برجسته در تکنیک بازسازی تکراری یکی روش بازسازی جبری<sup>۱</sup> یا *ART* (گوردون<sup>۲</sup> و همکاران، ۱۹۷۰) و دیگری روش بازسازی تکرار همزمان<sup>۳</sup> یا *SIRT* (گیلبرت<sup>۴</sup>، ۱۹۷۲) می‌باشند. در روش‌های بازسازی تکراری، حل مسأله تا رسیدن به یک مقدار بهینه تکرار می‌شود. اصول این روش‌ها کمینه کردن مجموع تغییرات کندی در سلول‌های مدل می‌باشد. این تفاوت اصلی روش‌های تکراری با روش حداقل مربعات خطاست، که در آن مجموع مربعات اختلاف بین زمان رسیده‌های داده‌های مشاهده شده و داده‌های محاسبه شده کمینه می‌گردد (Peterson et al., 1985).

در الگوریتم *ART*، میزان اصلاح کندی برای سلول‌هایی که اولین پرتو از آن‌ها عبور می‌کند، از رابطه‌ی (۳-۸) محاسبه می‌شود. این مقدار اصلاح بر روی مقدار کندی تمام سلول‌ها اعمال می‌گردد و این کار به همین ترتیب برای تمام پرتوهای دیگر نیز انجام می‌شود. بنابراین هر دور تکرار شامل بررسی تمام پرتوها می‌باشد و مجموع تغییرات کندی در هر دوره‌ی تکرار نسبت به دوره‌ی قبل کمینه می‌گردد. عملیات تا رسیدن به یک مقدار بهینه تکرار می‌شود (Peterson et al., 1985).

<sup>1</sup> Algebraic Reconstruction Technique

<sup>2</sup> Gordon

<sup>3</sup> Simultaneous Iterative Reconstruction Technique

<sup>4</sup> Gilbert



$$\Delta s_j^k = \frac{\Delta t_k \cdot d_{kj}}{\sum_{j=1}^N (d_{kj})^2} \quad (۸-۳)$$

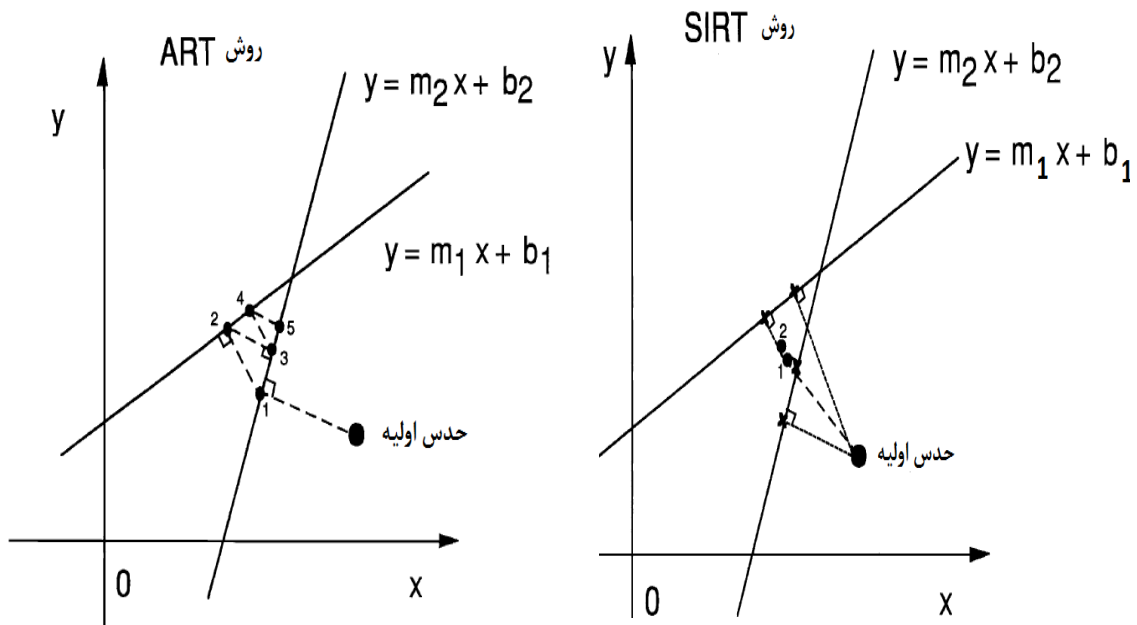
که در آن  $\Delta t_k$  اختلاف زمان مشاهده شده و زمان محاسبه شده برای پرتو  $k$ ام،  $d_{kj}$  طول پرتو  $k$ ام در سلول  $j$ ام و  $\Delta s_j^k$  مقدار تصحیح کندی سلول  $j$ ام برای پرتو  $k$ ام می‌باشد. در الگوریتم *SIRT*، میزان اصلاح کندی هر سلول با در نظر گرفتن تمام پرتوهای عبوری از آن سلول انجام می‌شود. به عبارت دیگر میزان اصلاح کندی سلول‌هایی که یک پرتو از آن عبور می‌کند مانند روش *ART* محاسبه می‌شود، اما این اصلاح پس از بررسی تمامی پرتوها و در پایان یک دور تکرار بر مقادیر کندی سلول‌ها اعمال می‌شود. بنابراین می‌توان نوشت (Stewart, 1992):

$$\Delta s_j = \frac{1}{N} \sum_{k=1}^N \Delta s_j^k \quad (۹-۳)$$

که  $N$  تعداد پرتوهای عبوری از سلول  $j$ ام و  $\Delta s_j$  مقدار اصلاح کندی این سلول می‌باشد. شکل (۳-۵) توصیف شماتیک و مقایسه‌ای دو الگوریتم بازسازی تکراری در پیدا کردن جواب دو معادله (خط) را نشان می‌دهد. همان‌طور که دیده می‌شود در الگوریتم *ART* هر مرحله از حدس جواب، با در نظر گرفتن یک معادله (خط) انجام می‌شود و مسأله پس از حل برای هر معادله وارد مرحله‌ی جدید می‌شود. اما در الگوریتم *SIRT* حدس جواب برای هر معادله انجام می‌شود ولی پس از محاسبه‌ی مقدار میانگین این جواب‌ها، مرحله‌ی بعد انجام می‌شود (Stewart, 1992).

روش‌های تکراری مفیدترین روش‌ها برای بازسازی تصاویر ژئوفیزیکی می‌باشند. از مزایای آن‌ها زمان نسبتاً کم محاسبات بازسازی است. هم‌چنین تمام آرایش‌های فرستنده - گیرنده را به راحتی در نظر می‌گیرند، اطلاعات اولیه را به خوبی در سیستم لحاظ می‌کنند و برای بازسازی انحنای پرتو مفید می‌باشند. هر چند روش *ART* کمتر قادر به کنترل نوفه می‌باشد، ولی یکی از کارآمدترین روش‌های بازسازی است که در هر دوره‌ی تکرار بدون هیچ زمان محاسبه اضافی، تعداد زیادی از داده‌های

تصحیح شده را ثبت می‌کند. از معایب این روش تکرار جبری این است که در تمام موارد تکرار، همگرایی به یک مقدار قابل قبول برای آن میسر نیست (Lehmann, 2007).



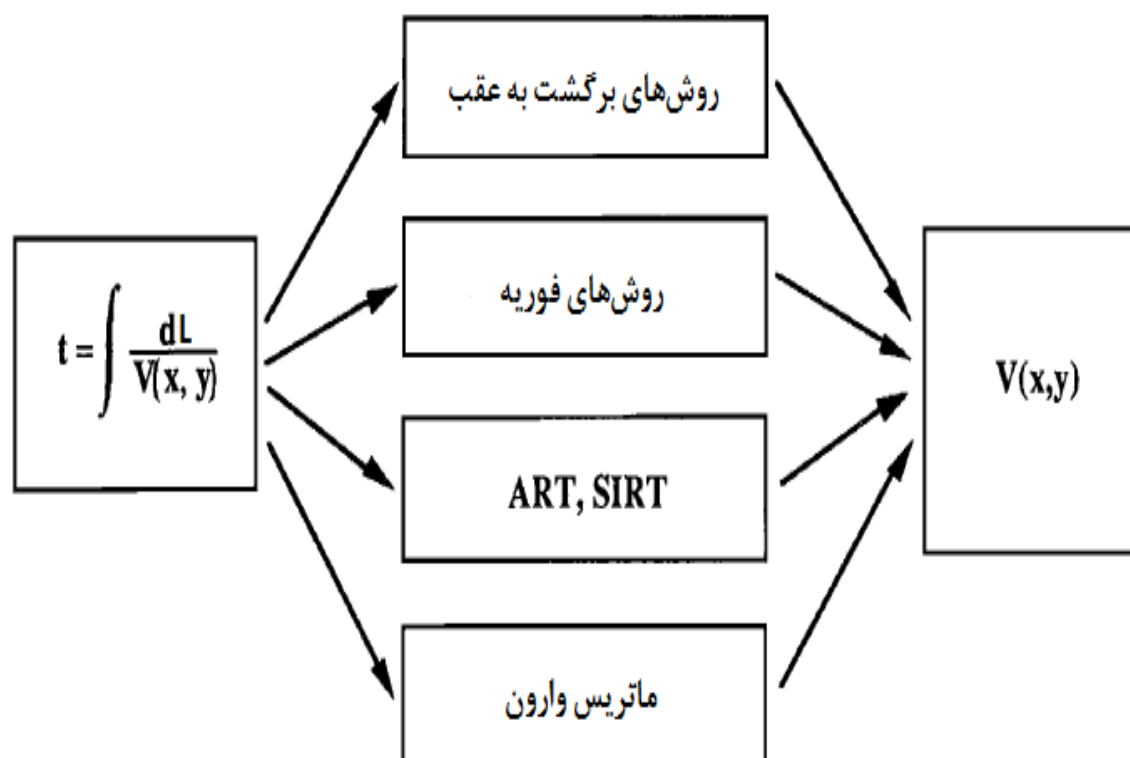
شکل (۳-۵): توصیف شماتیک دو الگوریتم *ART* و *SIRT* (Stewart, 1992).

### ۳-۴ مقایسه‌ی روش‌های مختلف بازسازی تصویر

مقایسه‌ی بین روش‌های مختلف بازسازی تصویر در توموگرافی توسط میراندا<sup>۱</sup> (۱۹۸۹) انجام شده است. الگوریتم‌های بازسازی تحلیلی بیشتر برای موارد سی تی اسکن پزشکی استفاده می‌شوند. الگوریتم *SIRT* نتایج بهتر و مطلوب‌تری ارائه می‌دهد. با استفاده از این الگوریتم تصاویر بدست آمده وضوح بهتری نسبت به روش‌های دیگر دارند و تاثیر نوفه از تصاویر بدست آمده حذف می‌شود. الگوریتم برگشت به عقب یا *BP* عمدتاً یک شکل کلی و مختصر از ناهنجاری‌ها را نشان می‌دهد. روش بازسازی کمترین مربعات (*LSQR*) با داده‌های بدون نوفه به خوبی جواب می‌دهد، اما با وارد

<sup>۱</sup> Miranda

شدن نوفه نتایج به شدت تغییر می‌کنند. برای روش گرادیان مزدوج یا  $CG$  نیز همین امر اتفاق می‌افتد. نتایج تحقیقات یولا<sup>۱</sup> و وب<sup>۲</sup> (۱۹۸۲) برای الگوریتم فوریه استفاده شده در یک برداشت ژئوفیزیک، که هندسه برداشت به خوبی موارد پزشکی مشخص و بهینه نبود، بسیار خوب بوده است. شکل (۳-۶) یک نمای کلی از روش‌های بازسازی تصویر در توموگرافی را نشان می‌دهد.



شکل (۳-۶): نمای کلی از روش‌های بازسازی تصویر. دو روش بالا با فرض محیط پیوسته استفاده می‌شوند و روش‌های پایین با فرض محیط گسسته (Stewart, 1992).

با توجه به این که الگوریتم  $SIRT$  یکی از مناسب‌ترین روش‌های مورد استفاده در وارون‌سازی بوده و استفاده زیادی دارد، در ادامه روابط ریاضی و مراحل انجام این الگوریتم شرح داده می‌شود.

<sup>1</sup> Youla

<sup>2</sup> Webb

### ۳-۵ معادلات ریاضی مربوط به روش SIRT

مبانی الگوریتم SIRT که در توموگرافی پرتوهای لرزه‌ای استفاده شده است، بر مبانی روش کازمرز<sup>۱</sup> (کازمرز، ۱۹۳۷) برای حل معادلات خطی است. در این روش محاسبات ماتریسی بصورت ردیف به ردیف انجام گرفته و نیازی به ذخیره کردن تمام آرایه‌ها و عناصر ماتریس نمی‌باشد.

ماتریس  $T = D.S$  که در معادله (۳-۳) به آن اشاره شد، شامل بردار  $T$  با  $M$  زمان رسید و بردار  $S$  یا کندی به عنوان تابع مدل برای  $N$  سلول است (Lehmann, 2007).

$$T = \begin{bmatrix} t_1 \\ t_2 \\ \dots \\ t_M \end{bmatrix} \quad (۱۰-۳)$$

$$S = \begin{bmatrix} s_1 \\ s_2 \\ \dots \\ s_N \end{bmatrix} \quad (۱۱-۳)$$

همچنین  $D$  ماتریسی  $M \times N$  است که آرایه‌های آن طول پرتوها در هر سلول می‌باشند.

$$D = \begin{bmatrix} d_{11} & d_{12} & \dots & d_{1N} \\ d_{21} & d_{22} & \dots & d_{2N} \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ d_{M1} & d_{M2} & \dots & d_{MN} \end{bmatrix} \quad (۱۲-۳)$$

که  $d_{MN}$  طول پرتو  $M$  ام در سلول  $N$  ام می‌باشد.

ماتریس  $D$  در حقیقت عملگری خطی است که با عمل بر روی بردار  $S$  مربوط به مقادیر کندی برآورد شده، داده‌های اندازه‌گیری شده‌ی بردار  $T$  را ارائه می‌دهد. رابطه‌ی (۳-۳) برای انجام توموگرافی به صورت زیر نوشته می‌شود (Lehmann, 2007).

<sup>۱</sup> Kaczmarz method

$$T^{meas} = D.S^{true} \quad (۱۳-۳)$$

این معادله بصورت مستقیم حل نمی‌شود. با مشخص بودن مقادیر  $T^{meas}$  و  $D$  و با استفاده از روش‌های وارون‌سازی، مقادیر  $S^{true}$  طی یک فرآیند تکراری نسبت به برآورد اولیه بهبود می‌یابند. کار اصلی مشخص کردن یک عملگر وارون‌سازی تعمیم یافته<sup>۱</sup> است. در عمل به دو دلیل تعیین عملگر وارون‌سازی تعمیم یافته مشکل می‌باشد (Lehmann, 2007):

اول اینکه ماتریس  $D$  بسیار بزرگ و پراکنده است. دوم اینکه با توجه به نحوه توزیع پرتوها، ماتریس  $D$  بد شرط<sup>۲</sup> است. این امر باعث می‌شود محاسبات وارون‌سازی  $D$  بسیار ناپایدار<sup>۳</sup> باشند. روش کازمرز (کازمرز، ۱۹۳۷) این مشکلات را برای وارون‌سازی ماتریس‌های بزرگ و پراکنده برطرف کرده و یک ابزار موثر و مفید در تعیین یک راه‌حل تقریبی برای معادله‌ی (۱۳-۳) با استفاده از یک فرآیند تکراری ارائه می‌دهد.

در الگوریتم  $SIRT$  که از روش کازمرز پیروی می‌کند، برخلاف الگوریتم  $ART$  که اصلاح مدل بعد از ردیابی هر پرتو انجام می‌شود، ابتدا تمام پرتوها در سلول‌ها ردیابی و مقادیر اصلاح محاسبه می‌شوند و پس از پایان یک دور تکرار روی مدل اعمال می‌گردد. استراتژی اصلی روش‌های تکراری اعمال اصلاح به دست آمده، از اختلاف زمان سیر مشاهده شده نسبت به زمان سیر محاسبه شده برای هر پرتو، بر روی مقدار کندی اولیه سلول‌ها می‌باشد. این کار تا رسیدن به یک مقدار بهینه ادامه می‌یابد. شکل (۳-۷) فلوچارت مربوط به روش  $SIRT$  را نشان می‌دهد که شامل سه مرحله اساسی می‌باشد. روش کار بدین صورت است که ابتدا یک سری مقادیر اولیه برای بردار کندی انتخاب می‌شود ( $S^0$ ). این مقادیر می‌توانند یک مقدار کندی ثابت و یا مقادیر حاصل از روش برگشت به عقب یا  $BP$  باشند.

<sup>۱</sup> Generalised inverse operator

<sup>۲</sup> Ill conditioned

<sup>۳</sup> Unstable

گام اول: در این مرحله متغیرهای مدل با استفاده از مقادیر اولیه محاسبه می‌شوند. بدین ترتیب که پس از ردیابی پرتو با استفاده از روش‌های موجود، زمان محاسبه شده برای هر پرتو با انجام مدل‌سازی مستقیم و با استفاده از رابطه‌ای مشابه رابطه‌ی (۳-۲) بدست می‌آید. این کار برای تمام پرتوها ( $M$ ) انجام می‌شود (Lehmann, 2007) ( $k = 1, 2, \dots$ ).

$$t_k^{calc} = \sum_{j=1}^N d_{kj} \cdot s_j^q \quad (14-3)$$

که در آن  $t_k^{calc}$  زمان سیر محاسبه شده برای پرتو  $k$ ام،  $N$  تعداد اجزای مدل،  $d_{kj}$  طول مسیر پرتو  $k$ ام در سلول  $j$ ام و  $s_j$  مقدار کندی مربوط به سلول  $j$ ام در مرحله‌ی تکرار  $q$ ام می‌باشد. گام دوم: مقدار تصحیح کندی در هر سلول برای تمام پرتوهای عبوری از آن سلول محاسبه می‌شود و مقدار میانگین آن از رابطه‌ی (۳-۹) محاسبه می‌شود.

مقادیر تصحیح به دو دسته‌ی تصحیحات جمعی و ضربی تقسیم‌بندی می‌شوند. در نوع جمعی به هر سلول یک ضریب وزنی اختصاص داده می‌شود. ضرایب وزنی مربوطه، تابعی از طول مسیر پرتو عبوری از هر سلول ( $d_{kj}$ ) و زمان باقیمانده برای پرتو  $k$ ام ( $\Delta t_k$ ) می‌باشند. زمان باقیمانده اختلاف زمان مشاهده شده با زمان محاسبه شده در مرحله‌ی تکرار  $q$ ام است (Dines and Lytle, 1979).

$$\Delta s_j^k = \Delta t_k \cdot \frac{d_{kj}}{\sum_{j=1}^N (d_{kj})^2} \quad (15-3)$$

$$\Delta t_k = t_k^{meas} - t_k^{calc,q} \quad (16-3)$$

در تصحیح ضربی مقدار تصحیح از رابطه‌ی زیر محاسبه می‌شود (Lehmann, 2007):

$$\Delta c_j^q = \frac{t_k^{meas}}{t_k^{calc,q}} \quad (17-3)$$

الگوریتم  $ART$  میزان اصلاح کندی برای هر پرتو را به محض محاسبه بکار می‌برد. به عنوان مثال به محض اینکه  $t_k^{calc}$  برای مسیر پرتو  $k$ ام محاسبه شد، مقدار تصحیح حاصل از آن برای تمام سلول‌هایی

که این پرتو از آن‌ها عبور می‌کند، اعمال می‌شود. اما الگوریتم *SIRT* تا زمانی که تمام تصحیحات مربوط به تمام پرتوهای عبوری از تمام سلول‌ها محاسبه نشوند، هیچ تصحیحی روی مدل اعمال نمی‌کند. در اینجا مقدار متوسط تصحیحات بدست آمده از تمام پرتوهای عبوری در هر سلول مشخص می‌شود و مقدار کندی هر سلول با این مقدار میانگین تصحیح می‌شود.

گام سوم: تصحیحات بدست آمده به مقدار کندی در جریان  $(s_j^q)$  مربوط به سلول  $j$  ام اضافه می‌شوند و مقدار جدید کندی  $(s_j^{q+1})$  برای مرحله‌ی تکرار بعد  $(q+1)$  به عنوان مقدار شروع اولیه استفاده می‌شود. کندی جدید، با استفاده از تصحیح جمعی و تصحیح ضربی، بصورت زیر بدست می‌آید (Lehmann, 2007):

$$s_j^{q+1} = s_j^q + \Delta s_j \quad (18-3)$$

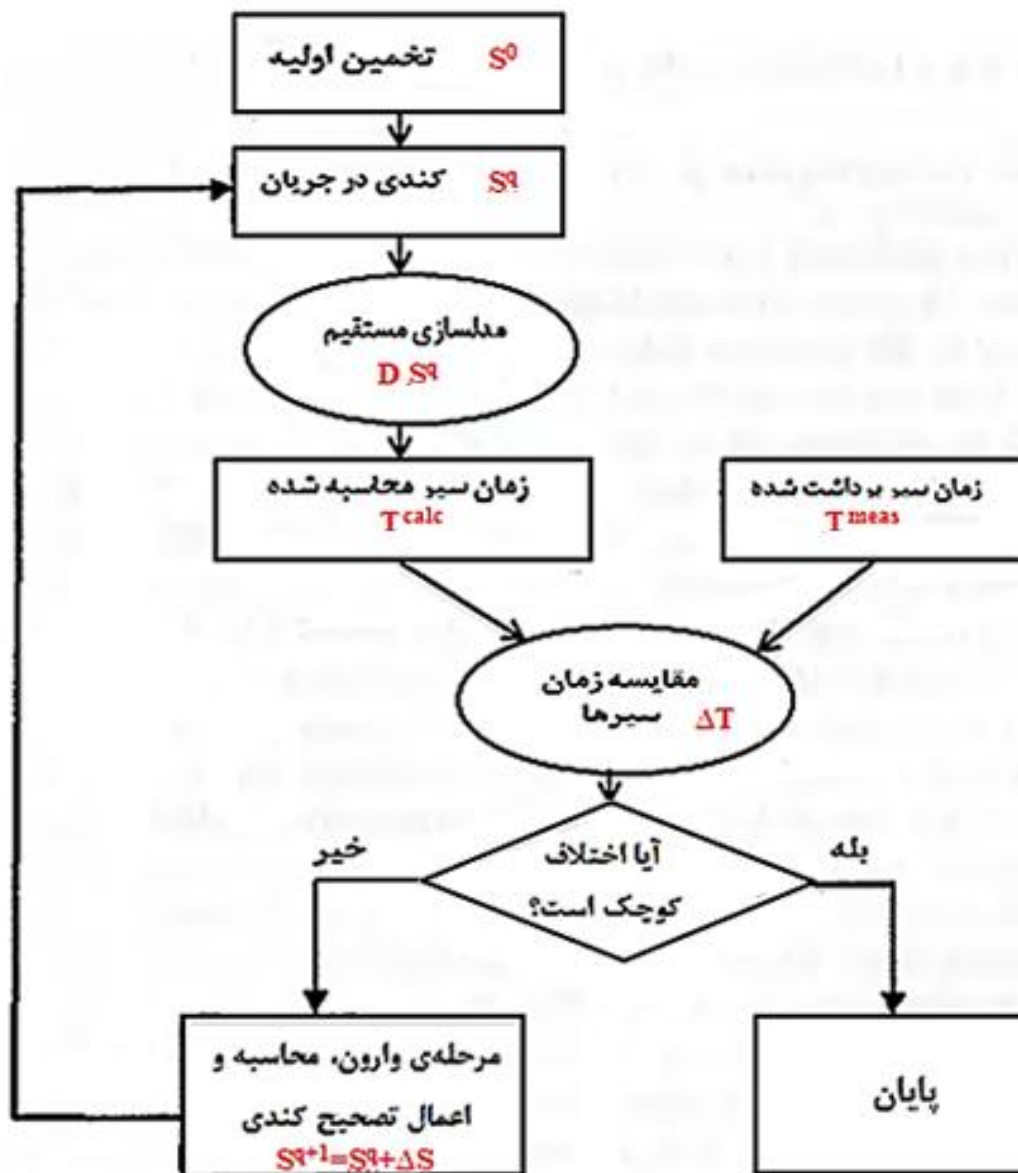
$$s_j^{q+1} = s_j^q \cdot \Delta c_j^q \quad (19-3)$$

بنابراین اگر مقدار زمان سیر محاسبه شده‌ی پرتو در مقایسه با مقدار زمان مشاهده شده خیلی کوچک باشد، در این صورت مقدار کندی در سلولی که این پرتو از آن عبور کرده باشد با یک مقدار مناسب افزایش می‌یابد. پس از انجام مراحل ذکر شده برای تمام سلول‌ها و تمام پرتوها، اولین مرحله‌ی تکرار کامل شده است.

برای مرحله‌ی تکرار  $q$  ام مقدار  $t_k^{calc,q}$  مانند قبل از رابطه‌ی (3-14) بدست می‌آید که این مقدار با مقدار زمان مشاهده برای هر پرتو مقایسه می‌شود. تمام اختلاف‌های بین مقادیر این زمان رسیده‌ها برای تصحیح مقدار کندی در جریان  $(s_j^q)$  استفاده می‌شود. بنابراین در تکرار بعدی مقدار  $t_k^{calc,q+1}$  به مقدار واقعی نزدیک‌تر خواهد شد.

عملیات تکرار تا رسیدن به دقت مورد نظر ادامه می‌یابد. پیدا کردن یک معیار توقف مناسب برای این تکنیک بازسازی ساده نیست. گاهی اوقات این معیار از روش سعی و خطا مشخص می‌شود. رویکرد

دیگر این است که یک حد آستانه‌ای برای خطای باقیمانده در نظر گرفته شود و یا ارزیابی نرخ کاهش خطا ملاک قرار گیرد. به عبارت دیگر اختلاف زمان مشاهده شده و مقدار زمان محاسبه شده از یک مرحله به بعد در یک محدوده‌ی تقریباً ثابت قرار بگیرد.



شکل (۳-۷): فلوچارت مربوط به روش  $SIRT$ .  $S^0$  تخمین اولیه‌ی کندی،  $S^q$  کندی در جریان که تصحیحات روی آن انجام می‌شود،  $T^{calc}$  زمان رسید محاسبه شده و  $T^{meas}$  زمان رسید مشاهده شده است.  $S^q$  بطور مرتب اصلاح می‌شود تا جایی که اختلاف  $T^{meas}$  و  $T^{calc}$  به حد مجاز برسد (با تغییر Lehmann, 2007).



### ۳-۶ تقسیم‌بندی توموگرافی

در یک تقسیم‌بندی کلی توموگرافی لرزه‌ای به دو دسته عمده تقسیم می‌شود:

۱- توموگرافی معادله موج<sup>۱</sup> یا توموگرافی پراش<sup>۲</sup> یا *WET*

۲- توموگرافی پرتو<sup>۳</sup> یا توموگرافی زمان سیر<sup>۴</sup> یا *RT*

توموگرافی جبهه‌ی موج یا توموگرافی پراش بر اساس معادله‌ی موج، خاصیت پراکندگی و پراش می‌باشد (Wu and Toksoz, 1987). آنچه که در توموگرافی پرتو استفاده می‌شود، بر اساس خواص پرتوها پایه‌گذاری شده است که از هندسه‌ی نور پیروی می‌کند و انتشار پرتوها را در شرایطی که تغییرات ویژه‌ای در شرایط ساختاری ایجاد شده باشد توصیف می‌کند. هم‌چنین از امواج صوتی و امواج الکترومغناطیسی نیز می‌توان برای توموگرافی استفاده کرد (Aki and Richards, 1980). هرچند برای انجام توموگرافی لرزه‌ای و به‌دست آوردن مدل سرعت، از داده‌های مربوط به جبهه‌ی موج هم می‌توان استفاده کرد، اما از توموگرافی زمان سیر بیشتر استفاده می‌شود و هم‌چنان یک ابزار اصلی برای تجزیه و تحلیل داده‌های لرزه‌ای می‌باشد، زیرا روشی راحت‌تر و دارای محاسبات کمتر می‌باشد. اولین زمان رسیده‌ها به آسانی مشاهده می‌شوند و میزان خطای آنها در حد قابل اطمینانی تخمین زده می‌شود. ولی شکل موج‌ها به خاطر تداخل با فازهای بعدی اغلب حالت پیچیده‌ای دارند.

در برداشت‌های جبهه‌ی موج، شکل جبهه موج اغلب تحت تاثیر عوامل زیر می‌باشد:

۱- نوع منبع تولید کننده سیگنال

۲- مشخصات پرتوهای تابشی از منبع

۳- جذب انرژی موج

<sup>1</sup> Wave equation tomography

<sup>2</sup> Diffraction tomography

<sup>3</sup> Ray tomography

<sup>4</sup> Traveltime tomography

#### ۴- اتصال بین ژئوفون و زمین

تنها در جایی که ارزیابی صحیحی از تمام این پارامترها وجود داشته باشد، می‌توان یک نتیجه‌ی رضایت‌بخش با استفاده از توموگرافی جبهه‌ی موج بدست آورد. با توجه به اینکه در کاربردهای عملی توموگرافی لرزه‌ای، بیشتر موارد ذکرشده در بالا پوشیده می‌باشند، استفاده از این روش در بحث اکتشاف‌های با وضوح بالا پیچیدگی زیادی دارد. بنابراین با توجه به موارد ذکر شده و کاربردهای عملی توموگرافی زمان سیر، تمرکز اصلی بر روی این روش می‌باشد (Lehmann, 2007).

توموگرافی زمان سیر یک مدل سرعتی از محدوده را با استفاده از زمان سیر پرتوها ارائه می‌دهد. در مطالعات توموگرافی زمان سیر، اغلب یکی از روش‌های توموگرافی اولین زمان رسید<sup>۱</sup> یا توموگرافی امواج بازتابی<sup>۲</sup> استفاده می‌شود (Mao and Sturat, 1997). توموگرافی اولین زمان رسید با استفاده از اولین زمان رسیده‌های امواج لرزه‌ای انجام می‌شود (Zhou, 2002). توموگرافی امواج بازتابی با استفاده از زمان سیر امواج دریافتی بازتابش شده از سطح بازتابی انجام می‌شود (Mao and Stuart, 1997).

### ۳-۷ روش کار

بدست آوردن مدل سرعتی مرتبط با عمق با استفاده از توموگرافی لرزه‌ای یک فرایند تکراری است که می‌توان آن را به مراحل مختلف و جداگانه‌ی زیر تقسیم‌بندی کرد:

- ۱) جمع‌آوری و انتخاب کردن داده‌ها: پس از برداشت نیاز است که داده‌ها بصورت مناسب انتخاب شوند. از نتایج داده‌های انتخاب شده، اولین زمان رسیده‌ها بدست می‌آیند.
- ۲) تعریف مدل اولیه و مدل‌سازی مستقیم: این مدل نشان دهنده‌ی یک حدس اولیه از ساختار زیرسطحی بر اساس شرایط زمین‌شناسی و داده‌های ژئوفیزیکی موجود می‌باشد. مدل‌سازی مستقیم با هدف محاسبه‌ی زمان سیرها در مدل اولیه انجام می‌شود.

<sup>1</sup> First-arrival tomography

<sup>2</sup> Reflection tomography

۳) وارون‌سازی توموگرافی سرعت‌ها با توجه به مدل اولیه: در این مرحله تفاوت بین زمان سیر داده‌های انتخاب شده (زمان سیر مشاهده شده) و زمان سیر محاسبه شده توسط مدل اولیه، مشخص می‌شود. در وارون‌سازی توموگرافی، تغییرات مدل تا به حداقل رسیدن اختلاف بین این زمان سیرها ادامه می‌یابد.

۴) کنترل کیفی مدل سرعت: کیفیت مدل توموگرافی با استفاده از معیارهای آماری و زمین‌شناسی کنترل می‌شود. اگر اختلاف زمان سیرها از لحاظ آماری قابل قبول باشد و هم‌چنین مدل اصلاح شده با داده‌های زمین‌شناسی همبستگی داشته باشد، فرآیند توموگرافی خاتمه یافته است. اگر نتیجه رضایت‌بخش نباشد، مدل اصلاح شده‌ی موجود به‌عنوان یک مدل اولیه‌ی جدید در نظر گرفته می‌شود و مراحل ۱ تا ۴ تکرار می‌شوند.

### ۳-۸ انتخاب کردن داده‌ها<sup>۱</sup>

از آن‌جا که رویدادهای مربوط به اولین زمان رسیده‌ها در این تحقیق استفاده شده است، برخی از ویژگی‌های مربوط به انتخاب کردن داده‌ها در این حالت، شرح داده می‌شود. اولین زمان رسیده‌ها را می‌توان با استفاده از منحنی زمان - فاصله شناسایی و انتخاب کرد. جمع‌آوری و انتخاب کردن داده‌ها یکی از مراحل وقت‌گیر انجام کار می‌باشد که شامل مراحل زیراست (Al-Rufaii, 2002):

- ۱) مشخص کردن هندسه برداشت (موقعیت فرستنده و گیرنده‌ها): اطلاعات مربوط به هندسه برداشت با ثبت داده‌های لرزه‌ای گره خورده است. این مرحله باید با دقت انجام شود، چون خطاهای مربوط به هندسه‌ی برداشت خطاهای مرسوم هستند و باعث پایین آمدن دقت نتایج توموگرافی می‌شوند.
- ۲) پردازش داده‌های لرزه‌ای ثبت شده: برای اولین زمان رسیده‌ها پردازش شامل فیلترکردن، افزایش بازیابی و شکل‌دهی ریز موج‌هاست.

<sup>1</sup> Event picking

۳) انتخاب و چینش داده‌های ثبت شده: انتخاب داده‌ها می‌تواند بصورت دستی یا اتوماتیک انجام شود. انتخاب دستی کاری وقت‌گیر بوده و می‌تواند بشدت تحت تاثیر چینش اشتباه و خطاهای کاربر قرار گیرد و به همین دلیل نهایتاً برای تعداد محدودی از داده‌ها استفاده می‌شود. انتخاب اتوماتیک با استفاده از نرم‌افزارهای در دسترس انجام می‌شود.

۴) کنترل کیفی<sup>۱</sup> یا  $QC$ : پس از انتخاب داده‌ها کنترل کیفی آن‌ها ضروری می‌باشد. کنترل کیفی یا  $QC$  شامل نموداری از زمان سیرهای انتخاب شده نسبت به مقدار دورافت<sup>۲</sup> می‌باشد که داده‌هایی که بصورت اشتباه انتخاب شده باشند بر روی آن مشخص می‌شوند.

۵) نوشتن با فرمت مخصوص: در نهایت زمان سیرهای انتخاب شده و اطلاعات مربوط به هندسه برداشت (موقعیت فرستنده و گیرنده‌ها) جهت استفاده در وارون‌سازی توموگرافی، بصورت فایلی با فرمت مخصوص نوشته می‌شوند.

### ۳-۹ مدل‌سازی مستقیم<sup>۳</sup>

مدل‌سازی مستقیم شبیه‌سازی پرتو یا موج منتشر شده بر اساس شرایط زمین‌شناسی و داده‌های ژئوفیزیکی موجود برای یک محیط زیرسطحی می‌باشد. هدف از مدل‌سازی بدست آوردن لرزه‌نگاشت<sup>۴</sup> ثبت شده توسط مجموعه‌ای از گیرنده‌ها، برای یک مدل مفروض می‌باشد (Carcione et al., 2002). مدل‌سازی بر اساس تئوری پرتو یا تئوری موج می‌باشد که در آن مسیر انتشار پرتوها و زمان سیرها برای یک مدل مشخص می‌شوند. در توموگرافی زمان سیر انجام این کار وابسته به تئوری پرتو می‌باشد اما در توموگرافی جبهه‌ی موج بر اساس نظریه موج صورت می‌گیرد (Aki and Richards, 1980).

<sup>1</sup> Quality Control

<sup>2</sup> Offset

<sup>3</sup> Forward modeling

<sup>4</sup> Seismogram

## ۳-۹-۱ ردیابی پرتو

روش‌های متفاوتی برای ردیابی پرتو وجود دارد که تمام این روش‌ها بر پایه‌ی اصل فرما<sup>۱</sup> می‌باشند (Nolet, 2008). طبق این اصل پرتو نور در عبور از یک نقطه به نقطه‌ی دیگر مسیری را دنبال می‌کند که زمان لازم برای طی آن در مقایسه با مسیرهای مجاور، کمینه باشد. ساده‌ترین مدل در ردیابی پرتو این است که مسیر امواج به صورت خطی در نظر گرفته شوند و تمام پرتوها از اصل فرما در کمترین زمان انتشار پیروی کنند. روش‌های متداول ردیابی پرتو در مدل‌سازی مستقیم عبارتند از: روش‌های ردیابی پرتو در یک نقطه، دو نقطه و سه نقطه (AL-Rufaii, 2002).

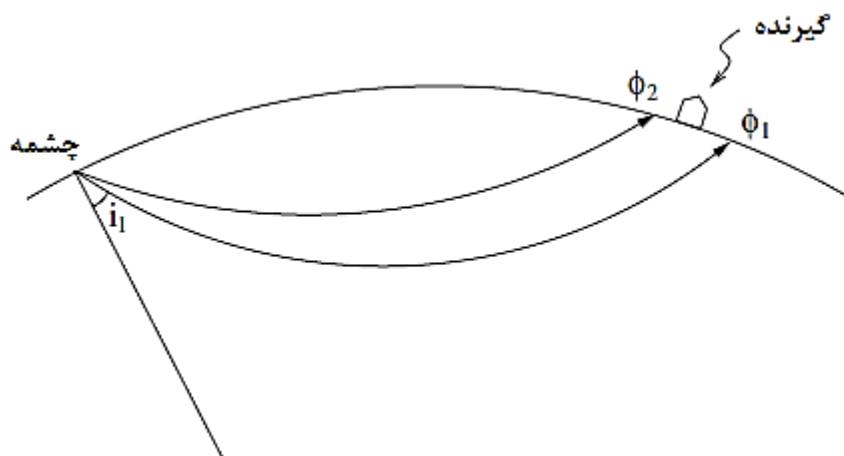
روش پرتابی<sup>۲</sup> نمونه‌ای از ردیابی مسیر پرتو در یک نقطه می‌باشد. شکل (۳-۸) چگونگی استفاده از روش برای مشخص کردن مسیر پرتوها را نشان می‌دهد. در این روش موقعیت چشمه مشخص می‌باشد و در ابتدا برای پرتوها یک جهت مشخص تعریف می‌شود و فرض می‌شود پرتوها در آن مسیر و تحت زاویه‌ای مشخص منتشر شده‌اند. در شکل (۳-۸) ابتدا پرتو با زاویه‌ی خروجی  $i_1$  در نظر گرفته می‌شود که با زاویه‌ی رسید  $\phi_1$  خارج از محدوده‌ی گیرنده قرار می‌گیرد. در گام بعد زاویه‌ی خروجی  $i_2$  برای پرتو در نظر گرفته می‌شود که در این حالت نیز تحت زاویه‌ی رسید  $\phi_2$  جواب مناسبی گرفته نمی‌شود. اگر زاویه رسید مناسب برای پرتو دریافتی  $\phi$  فرض شود، اصلاح مسیر پرتو با استفاده از روش درونیابی نیوتن<sup>۳</sup> بر طبق رابطه‌ی (۳-۲۰) برای مسیرهای انتخابی و طی یک فرآیند تکراری انجام می‌شود (Nolet, 2008).

$$i_{next} = i_1 + \frac{\phi - \phi_1}{\phi_2 - \phi_1} (i_2 - i_1) \quad (۳-۲۰)$$

<sup>۱</sup> Fermat's Principle

<sup>۲</sup> Shooting method

<sup>۳</sup> Newton interpolation scheme



شکل (۳-۸): روش پرتابی در ردیابی پرتو (Nolet, 2008).

اگر سرعت با عمق تغییر کند، روش پرتابی غالباً به جواب مناسبی همگرا نمی‌شود. در این حالت از روش انحنای پرتو<sup>۱</sup> برای ردیابی مسیر پرتو استفاده می‌شود. این روش نمونه‌ای از ردیابی مسیر پرتو در دو نقطه می‌باشد که دو نقطه‌ی ثابت در ابتدا و انتهای مسیر مشخص می‌باشند. در ادامه با استفاده از یک الگوریتم معین، مسیر منحنی به سمت مسیر واقعی اشعه همگرا می‌شود. الگوریتمی که مناسب-ترین مسیر پرتو را در شرایط مختلف نشان می‌دهد، روشی است که توسط دیج‌کسترا<sup>۲</sup> در توموگرافی لرزه‌ای استفاده شد (Nakanishi et al., 1986). این الگوریتم به صورت کارآمدتری تحت عنوان روش کوتاه‌ترین مسیر<sup>۳</sup> توسط موزر<sup>۴</sup> (۱۹۹۱) اصلاح شد. در این روش مشابه آنچه در شکل (۳-۹) دیده می‌شود، مسیر بین دو نقطه‌ی ثابت که موقعیت چشمه و گیرنده می‌باشند، به تعدادی قسمت مجزا و شامل تعدادی گره<sup>۵</sup> تقسیم‌بندی می‌شود. این الگوریتم می‌گوید اگر کوتاه‌ترین مسیر از منبع تا یک

<sup>۱</sup> Ray bending

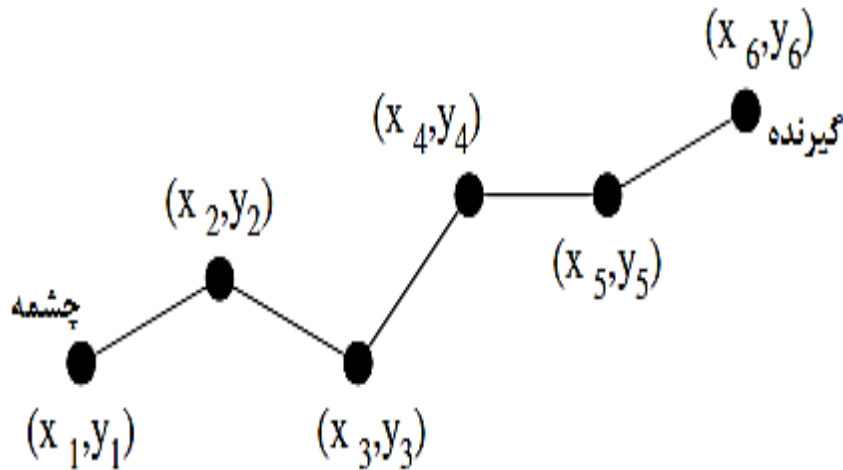
<sup>۲</sup> Dijkstra

<sup>۳</sup> Shortest path method

<sup>۴</sup> Moser

<sup>۵</sup> Node

گره خاص معلوم باشد، از اطلاعات بدست آمده برای این مسیر، جهت پیدا کردن کوتاه‌ترین مسیر برای گره‌های دیگر می‌توان استفاده کرد (Nolet, 2008).



شکل (۳-۹): مسیر پرتو در الگوریتم کوتاه‌ترین مسیر (Nolet, 2008).

زمان رسید کل در یک مسیر، شامل تعدادی گره با موقعیت  $(x_i, y_i, z_i)$ ، از رابطه‌ی زیر بدست می‌آید (Nolet, 2008).

$$T = \sum_{i=2}^N \frac{L_i}{\bar{v}_i} \quad (۲۱-۳)$$

که در آن،  $N$  تعداد اجزا به طول  $L$  و  $\bar{v}$  سرعت میانگین بین دو گره می‌باشد.

$$L_i = \sqrt{[(x_i - x_{i-1})^2 + (y_i - y_{i-1})^2 + (z_i - z_{i-1})^2]}, \quad \bar{v} = \frac{(v_i + v_{i-1})}{2} \quad (۲۲-۳)$$

در نهایت یک دسته معادله برای مسیر پرتو بدست می‌آیند که زمان رسید در آن‌ها از اصل فرما پیروی می‌کند و موقعیت گره‌ها با کمینه کردن زمان رسید کل از این معادلات بدست می‌آیند (Nolet, 2008).

$$\frac{\partial T}{\partial x_k} = 0, \quad \frac{\partial T}{\partial y_k} = 0, \quad \frac{\partial T}{\partial z_k} = 0 \quad (۲۳-۳)$$

که  $k = 2, 3, \dots, N-1$  تعداد گره‌هاست که برای نقاط ابتدایی و انتهایی ثابت می‌باشد. ردیابی مسیر پرتوها در سه نقطه، ردیابی بین چشمه، یک نقطه مشخص در زیر سطح و محل گیرنده می‌باشد. نقطه‌ی مشخص شده در زیر سطح می‌تواند در سطح شکست مرزی یا بازتابی باشد. آنچه برای روش کوتاه‌ترین مسیر گفته شد در اینجا نیز استفاده می‌شود (Aki and Richarads, 1980).

### ۳-۹-۲ پارامتری کردن مدل<sup>۱</sup>

در انجام مراحل توموگرافی وجود ناهنجاری‌ها و آشفتگی‌های کوچک در مدل اولیه، به همان نسبت باعث ایجاد تغییر در مقدار زمان محاسبه شده نهایی می‌شود. هدف اصلی وارون‌سازی به حداقل رساندن این اختلاف بین زمان سیرها می‌باشد. بنابراین انتخاب مدل اولیه مناسب و چگونگی پارامتری کردن آن نقش مهمی در دقت انجام کار، همگرایی و وضوح تصویر نهایی دارد (Zhou, 1997). معمولاً سه روش برای پارامتری کردن مدل وجود دارد:

روش شبکه‌بندی<sup>۲</sup>، روش سلول‌بندی<sup>۳</sup> و روش تغییر شکل لایه یا لایه‌ی دگر‌دیس<sup>۴</sup>.

### ۳-۹-۲-۱ روش شبکه‌بندی

این روش مدل مورد نظر را به شبکه‌هایی از سلول‌ها تقسیم‌بندی می‌کند که هر کدام از آن‌ها سرعت ثابتی دارند. در طول عملیات وارون‌سازی توموگرافی، مقادیر سرعت در هر سلول با اصلاح مسیر پرتوها، توسط مقادیر جدید جایگزین می‌شوند. سطوح بازتابش در این‌جا معمولاً در زون‌های تغییر سرعت قرار دارند. روش شبکه‌بندی برای انجام توموگرافی اولین زمان رسیده‌ها استفاده شده است (Mao and Stuart, 1997).

<sup>1</sup> Model parameterization

<sup>2</sup> Grid-based parameterization

<sup>3</sup> Cell-based parameterization

<sup>4</sup> Deformable Layer Tomography Parameterization



### ۳-۹-۲-۲ روش سلول بندی

در این روش مدل به تعدادی سلول اصلی تقسیم‌بندی می‌شود که در هر کدام از آن‌ها تغییرات سرعت ثابت می‌باشد. همان‌طور که در تصاویر (۳-۱۰) و (۳-۱۱) دیده می‌شود، سطح مشترک بین سلول‌ها بصورت قطعات مسطحی طراحی شده است که تغییر و انحنای در هر سلول مدل پایه را برای ردیابی پرتو توصیف می‌کنند. مرز بین سلول‌ها بوسیله‌ی خطوط قائم مشخص می‌شود. هر بخش از سطح مشترک بین سلول‌ها، بصورت یک خط راست بین دو خط قائم مجاور هم در مدل نمایش داده می‌شود (Zhou, 1997).

دو فصل مشترک مجاور هم ممکن است در برخی نقاط متصل و یا از هم جدا باشند. اگر مقدار امپدانس یا مقاومت ظاهری در امتداد فصل مشترکی تغییر کند، آن فصل مشترک می‌تواند نشان دهنده یک سطح بازتابی باشد. پارامتری کردن به روش سلول پایه، هندسه‌ی واقعی زیر سطح را بهتر شبیه‌سازی کرده و مقدار سرعت و موقعیت سطوح بازتابی را نسبت به روش شبکه‌بندی بهتر مشخص می‌کند. این روش تغییرات بسیار زیاد سرعت در سلول‌های مجاور را به خوبی نشان می‌دهد. در این روش نیاز است که تعداد زیادی از پارامترهای ناشناخته در طول عملیات وارون‌سازی مشخص شوند (Zhou, 1997).

### ۳-۹-۲-۳ پارامتری کردن به روش لایه دگردیس

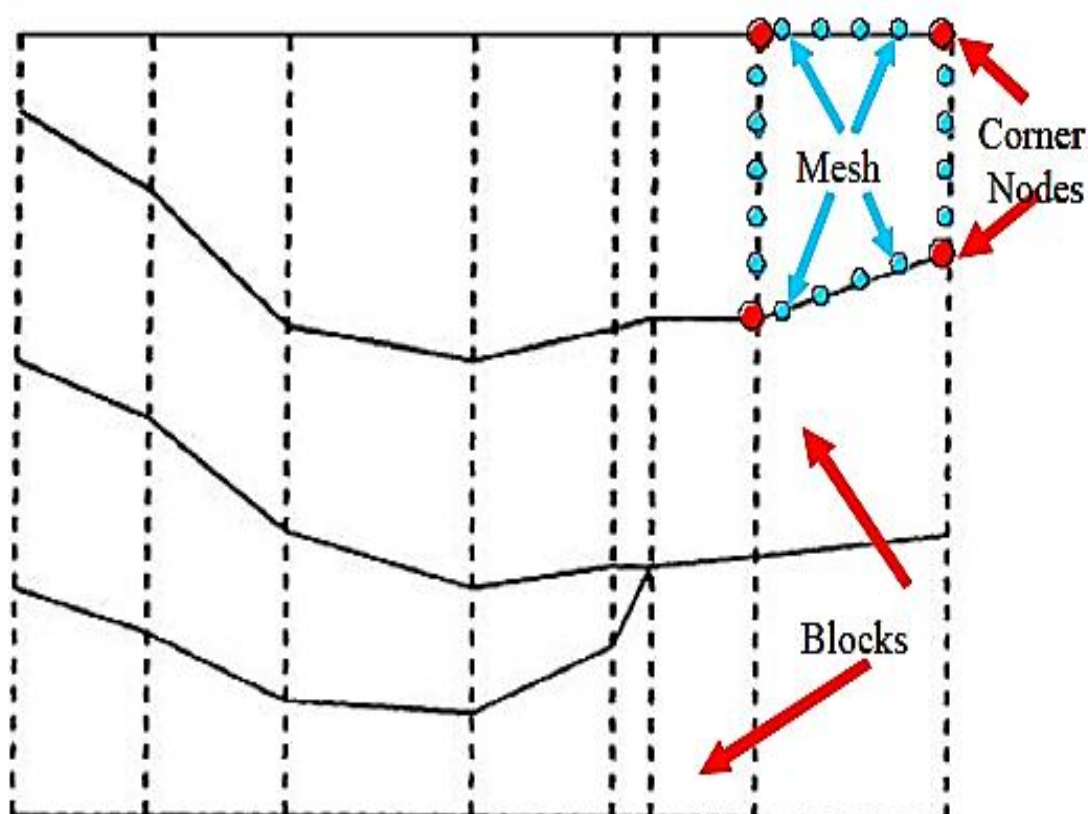
پارامتری کردن به روش لایه دگردیس که به روش *DLT* معروف می‌باشد، تعمیم یافته‌ی روش سلول‌بندی است. در این‌جا مدل شامل تعدادی سلول با فصل مشترکی از قطعات مسطح می‌باشد. مجموعه‌ای افقی از سلول‌ها مانند آنچه در شکل (۳-۱۲) دیده می‌شود برای شبیه‌سازی لایه‌ها استفاده می‌شوند که دارای مقادیر خاص سرعت می‌باشند و می‌توانند در جهت قائم متغیر باشند. هرلایه بوسیله یک مقدار سرعت مشخص می‌شود و از لایه‌های مجاور توسط یک فصل مشترک که از قطعات مسطح تشکیل شده است، جدا می‌شود (Zhou, 1997).

روش پارامتری کردن  $DLT$  دارای چندین مزیت زیر می‌باشد:

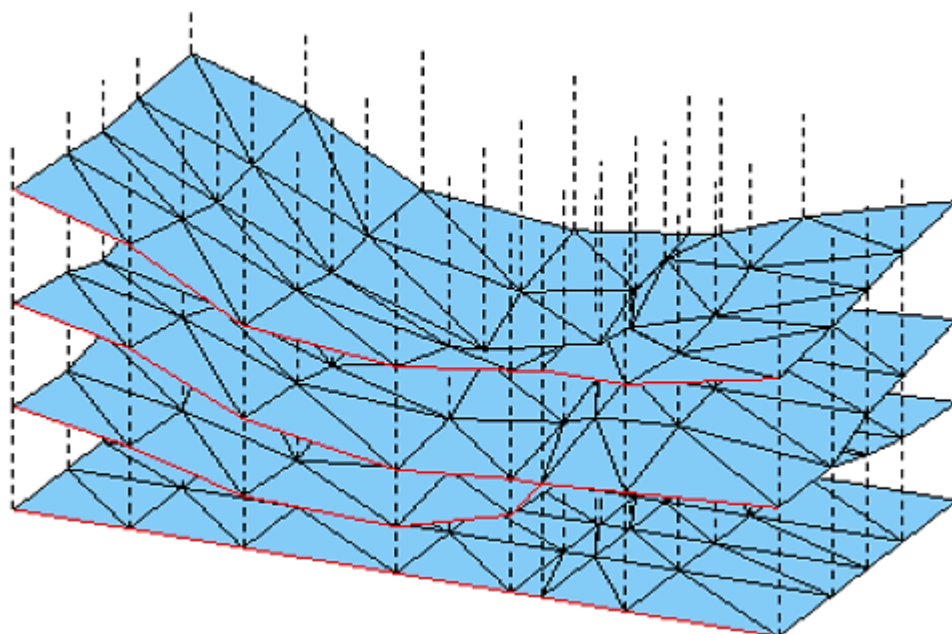
اول این که با استفاده از این روش تعداد پارامترهای مدل کاهش می‌یابد، نتایج وارون‌سازی توموگرافی پایدارتر شده و همگرایی در نتایج بهتر می‌شود. کارهای آزمایشگاهی نشان داده است که این روش نتایج بهتری نسبت به روش معمولی پارامتری کردن یعنی روش شبکه‌بندی ارائه می‌دهد. شکل (۳-۳) مقایسه‌ی نتایج توموگرافی حاصل از پارامتری کردن به روش  $DLT$  و پارامتری کردن به روش شبکه‌بندی را نشان می‌دهد.

دوم این که این روش پارامتری کردن واقعیت زمین‌شناسی در زیر سطح را بهتر مدل‌سازی کرده و ترکیب اطلاعات زمین‌شناسی را بخوبی نشان می‌دهد.

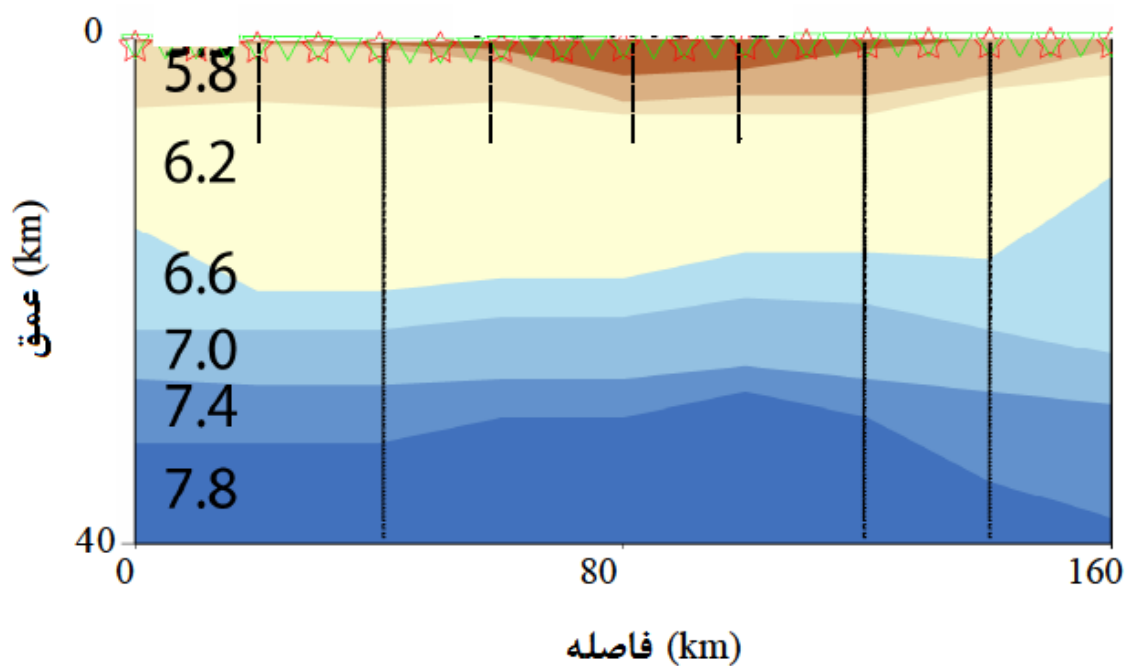
سوم این که روش  $DLT$  توپوگرافی سطوح بازتابی را بهتر تعریف می‌کند.



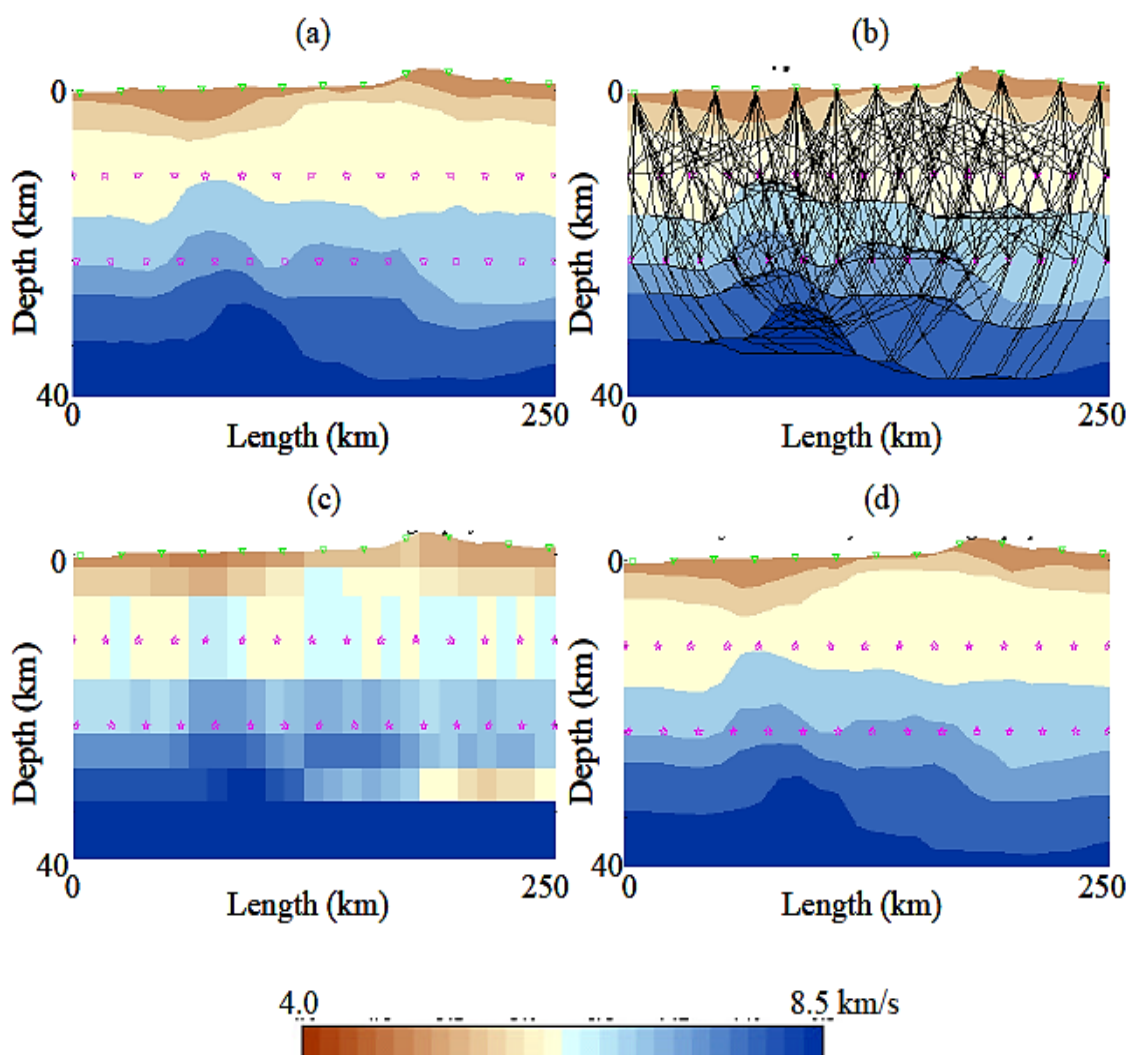
شکل (۳-۱۰): تصویر دوبعدی از روش سلول‌بندی (Zhou, 1997).



شکل (۳-۱۱): تصویر سه‌بعدی از روش سلول‌بندی (Zhou, 1997).



شکل (۳-۱۲): مثالی از پارامتری کردن به روش لایه دگرديس در منطقه‌ای در جنوب کالیفرنیا. مدل شامل هشت لایه است که هر لایه به هشت سلول تقسیم‌بندی شده است. این روش مقادیر سرعت برای سلول‌ها در محدوده‌ی یک لایه رایکسان در نظر می‌گیرد (Zhou, 2004).



شکل (۳-۱۳): مقایسه‌ی نتایج یک آزمایش مصنوعی برای روش  $DLT$  و روش شبکه‌بندی. ستاره‌های صورتی چشمه و مثلث‌های سبز گیرنده می‌باشند. (a) مدل واقعی، (b) مسیر پرتوها در مدل واقعی، (c) نتایج توموگرافی با روش شبکه‌بندی، (d) نتایج حاصل از  $DLT$ . نتایج حاصل از  $DLT$  به مدل واقعی نزدیکتر می‌باشند (Zhou, 2004).

### ۳-۱۰ وارون‌سازی توموگرافی

مدل اولیه‌ی مربوط به ساختار مورد بررسی، با استفاده از شواهد زمین‌شناسی و داده‌های ژئوفیزیک به‌دست می‌آید و زمان سیر محاسبه شده و مشاهده شده با یکدیگر مقایسه می‌شوند. هدف از وارون‌سازی به حداقل رساندن اختلاف زمان سیر حاصل از مدل اولیه و زمان سیر مربوط به داده‌های واقعی (برداشت شده) طی یک فرایند تکراری می‌باشد (zhou, 2003; zhou, 1997). زمان سیر از رابطه‌ی زیر به‌دست می‌آید:

$$t_i = \int_{l_i(z)} s \cdot dl_i(z) \quad (24-3)$$

که در آن  $t_i$  زمان سیر مربوط به پرتو  $i$ ام،  $s$  مقدار کندی یا عکس سرعت و  $l$  طول پرتو  $i$ ام است که با عمق  $z$  تغییر می‌کند.

### ۳-۱۰-۱ توموگرافی اولین زمان رسید

توموگرافی اولین زمان رسید با استفاده از اولین زمان رسیدهای ثبت شده انجام می‌شود. همان‌طور که در بخش‌های قبل اشاره شد، در این روش مدل اولیه به تعدادی سلول تقسیم‌بندی می‌شود و در نهایت حل مسئله وارون با استفاده از یک الگوریتم مانند الگوریتم *SIRT* و با رابطه زیر انجام می‌شود.

$$dt_i = M \cdot ds \quad (25-3)$$

### ۳-۱۰-۲ توموگرافی امواج بازتابی

توموگرافی امواج بازتابی با استفاده از زمان سیر امواج لرزه‌ای بازتابش شده از سطح بازتابی انجام می‌شود. با توجه به اینکه در توموگرافی امواج بازتابی معمولاً از تعداد پرتوهای بیشتری استفاده می‌شود، در این روش تصویری با وضوح بهتر بدست می‌آید (Mao and Stuart, 1997).

اگر مشتقات جزئی نسبت به کندی ( $s$ ) و عمق ( $z$ ) استفاده شوند، می‌توان از رابطه‌ی (۳-۲۴) رابطه‌ی زیر را بدست آورد (Zhou, 1997a; Zhou, 2003):

$$dt_i = \int_{l_i(z)} ds \cdot dl_i(z) + \int_{l_i(z)} s \cdot \frac{\partial}{\partial z} [dl_i(z)] \cdot dz \quad (26-3)$$

انتگرال‌های سمت راست رابطه‌ی بالا، با استفاده از یک ترکیب خطی تحت عنوان کرنل‌های فری‌چت<sup>۱</sup> به‌صورت زیر تخمین زده می‌شوند (Zhou, 1997; Zhou, 2003):

<sup>1</sup> Frechet kernels

$$k_{-z} = s \frac{\partial}{\partial z} [dl_i(z)], \quad k_{-s} = dl(z) \quad (27-3)$$

بنابراین می‌توان نوشت:

$$dt_i = \sum_j^J k_{-s_{ij}} ds_j + \sum_l^L k_{-z_{il}} dz_l \quad (28-3)$$

که در آن،  $J$  تعداد کل سلول‌های کندی و  $L$  تعداد کل گره‌های رابط بین سلول‌هاست که با فرآیند وارون‌سازی اصلاح می‌شوند. ماتریس کرنل  $k_{-s_{ij}}$  طول  $i$  پرتو در  $j$  سلول کندی می‌باشد، در حالی- که ماتریس کرنل  $k_{-z_{il}}$  شامل  $i$  پرتو و  $l$  گره رابط می‌باشد.

توموگرافی پرتوهای بازتابی با وارون‌سازی رابطه‌ی (۲۸-۳) و مشخص کردن تغییرات کندی در سلول  $j$  ام  $(ds_j)$  و تغییرات عمق در نقطه‌ی  $l$  ام از شبکه  $(dz_l)$ ، با استفاده از الگوریتم‌های موجود مانند  $LSQR$  انجام می‌شود (Paige and Saunders, 1982).

### ۱۱-۳ محدودیت‌های توموگرافی لرزه‌ای

در توموگرافی لرزه‌ای مانند روش‌های دیگر وارون‌سازی مسائلی مانند عدم یکتایی<sup>۱</sup>، عدم پایداری<sup>۲</sup>، ابهام در نتایج<sup>۳</sup> و وضوح<sup>۴</sup> تصویر مطرح می‌باشد. علاوه بر این در توموگرافی لرزه‌ای مشکلات مربوط به شناسایی و انتخاب داده‌ها و ابهامات مربوط به سرعت در عمق نیز بایستی بررسی شوند. محدودیت-های توموگرافی لرزه‌ای با داده‌های مربوطه، پارامتری کردن مدل و روش مورد استفاده برای وارون-سازی ارتباط دارند (Al-Rufaii, 2002).

<sup>1</sup> Non-uniqueness

<sup>2</sup> Instability

<sup>3</sup> Ambiguity

<sup>4</sup> Resolution

عدم یکتایی بدین معناست که اگر یک سری داده موجود باشد، تعداد نامحدودی از مدل‌ها را می‌توان برای آن در نظر گرفت. ولی اگر یک مدل موجود باشد می‌توان برای این مدل به یک پاسخ یکتا رسید. از آن‌جا که داده‌های لرزه‌ای بصورت محدود و گسسته می‌باشند، در شرایط یکسان همیشه بیشتر از یک مدل متناسب با داده‌ها وجود دارد. منظور از پایداری، همگرایی به سمت جواب نهایی طی مراحل انجام کار می‌باشد. بنابراین اگر اختلاف زمان رسیده‌ها واگرا شوند، مسئله از حالت پایدار خارج می‌شود. اگر تغییرات کوچک در داده‌های برداشت شده که با نوفه همراه می‌باشند، تغییرات زیادی در مدل ایجاد نکند راه حل توموگرافی پایدار است. از جمله دلایل اولیه که باعث عدم یکتایی و عدم پایداری در راه حل توموگرافی می‌شوند، می‌توان هندسه‌ی برداشت، پوشش ضعیف اشعه، وجود نوفه و پارامتری کردن نادرست مدل را نام برد. به منظور کاهش عدم یکتایی و عدم پایداری، انجام تعدیل با پردازش محلی در درون هر سلول یا لایه و در زمان یکسان ضروری می‌باشد. انجام این کار ناپیوستگی سرعت را در امتداد مرز جدایش لایه‌ها نشان می‌دهد. علاوه بر این، استفاده از اطلاعات و داده‌های لرزه‌ای قبلی مانند داده‌های مربوط به چاه و اطلاعات زمین‌شناسی موجود می‌توانند در این زمینه کمک کنند. این اطلاعات برای به حداقل رساندن مسأله‌ی عدم پایداری، در مدل اولیه لحاظ می‌شوند (Al-Rufaii, 2002).

یک روش وارون‌سازی مناسب می‌تواند عدم یکتایی را با یک روش آماری کنترل کند. میانگین و انحراف معیار اختلاف زمان سیرهای واقعی و پیش‌بینی شده، اندازه‌گیری و تجزیه و تحلیل می‌شوند. راه حل نهایی بایستی کمترین مقدار میانگین و تغییرات واریانس را بین زمان سیرهای مشاهده شده و محاسبه شده نشان دهد (zhou, 1997).

دامنه و فاز رویدادهای لرزه‌ای تحت تاثیر عواملی مانند ناهمگونی لایه‌ها، پراکندگی یا پراش، میرایی، تغییر انرژی در امتداد فصل مشترک، میزان انرژی منبع و نوفه‌ها قرار دارند. این عوامل می‌توانند باعث تضعیف امواج لرزه‌ای دریافتی شوند (Al-Rufaii, 2002). این موضوع در شناسایی و انتخاب

رویدادهای لرزه‌ای موثر می‌باشد. به منظور کاهش خطا در هنگام انتخاب دستی داده‌ها، لازم است داده‌ها پردازش شوند و پیوستگی کار بالا برود. انتخاب اتوماتیک سریع‌تر از انتخاب دستی داده‌هاست و می‌توان آن را با کیفیت خیلی خوب انجام داد. به هر حال کنترل کیفی داده‌ها و اطمینان از نحوه‌ی انتخاب درست داده‌ها امری ضروری می‌باشد.

### ۳-۱۲ هندسه‌ی برداشت

برای رسیدن به اهداف مورد نظر در توموگرافی لرزه‌ای هندسه‌های متفاوتی برای برداشت داده‌های لرزه‌ای مورد استفاده قرار می‌گیرد. نوع هندسه‌ی مورد استفاده در توموگرافی به نوع پرتو مورد استفاده برای انجام توموگرافی و امکان دسترسی به محیط مورد بررسی بستگی دارد. در بعضی از این روش‌ها، محیط مورد بررسی به طور کامل توسط پرتوها پوشش داده می‌شود و در برخی دیگر با توجه به مسیر عبور پرتوها، قسمتی از محیط مورد نظر قابل پوشش نیست. محدوده‌ی عبور پرتوها، محدوده‌ای است که اطلاعات مربوط به آن با توموگرافی بصورت مستقیم مشخص می‌شود. در نهایت روشی مناسب‌تر است که بتواند در عمق مورد نظر برای بررسی، پوشش کاملی از مسیر را شامل شود. حالت‌های مختلفی برای برداشت داده‌ها با توجه به موقعیت قرارگیری چشمه و گیرنده وجود دارند. این حالت‌ها در شکل (۳-۱۴) نشان داده شده است که عبارتند از:

۱- برداشت‌های سطح به سطح بازتابی

۲- برداشت‌های سطح به چاه یا پروفیل لرزه‌ای قائم<sup>۱</sup> یا *VSP*

۳- برداشت‌های چاه‌های متقابل<sup>۲</sup> یا چاه به چاه

۴- برداشت‌های گالری به سطح

۵- برداشت‌های گالری به گالری

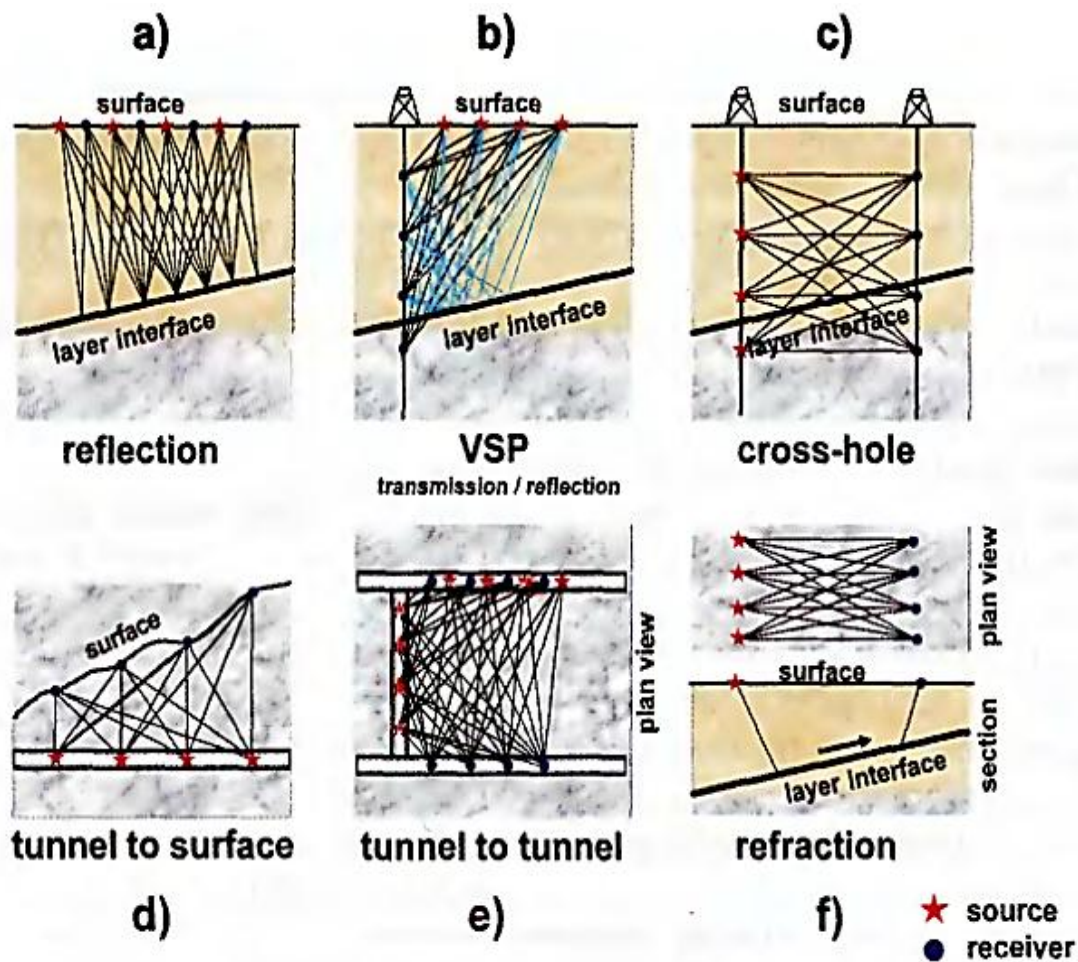
<sup>۱</sup> Vertical Seismic Profiling

<sup>۲</sup> Cross hole



۶- برداشت‌های سطح به سطح شکست مرزی

روش چاه‌های متقابل و روش *VSP* نمونه‌هایی از هندسه‌های مهم برداشت برای توموگرافی می‌باشند (Lehmann, 2007). در ادامه توضیحات بیشتری، همراه با ذکر مثال، در مورد برداشت‌های مهم مورد استفاده در توموگرافی لرزه‌ای داده می‌شود.



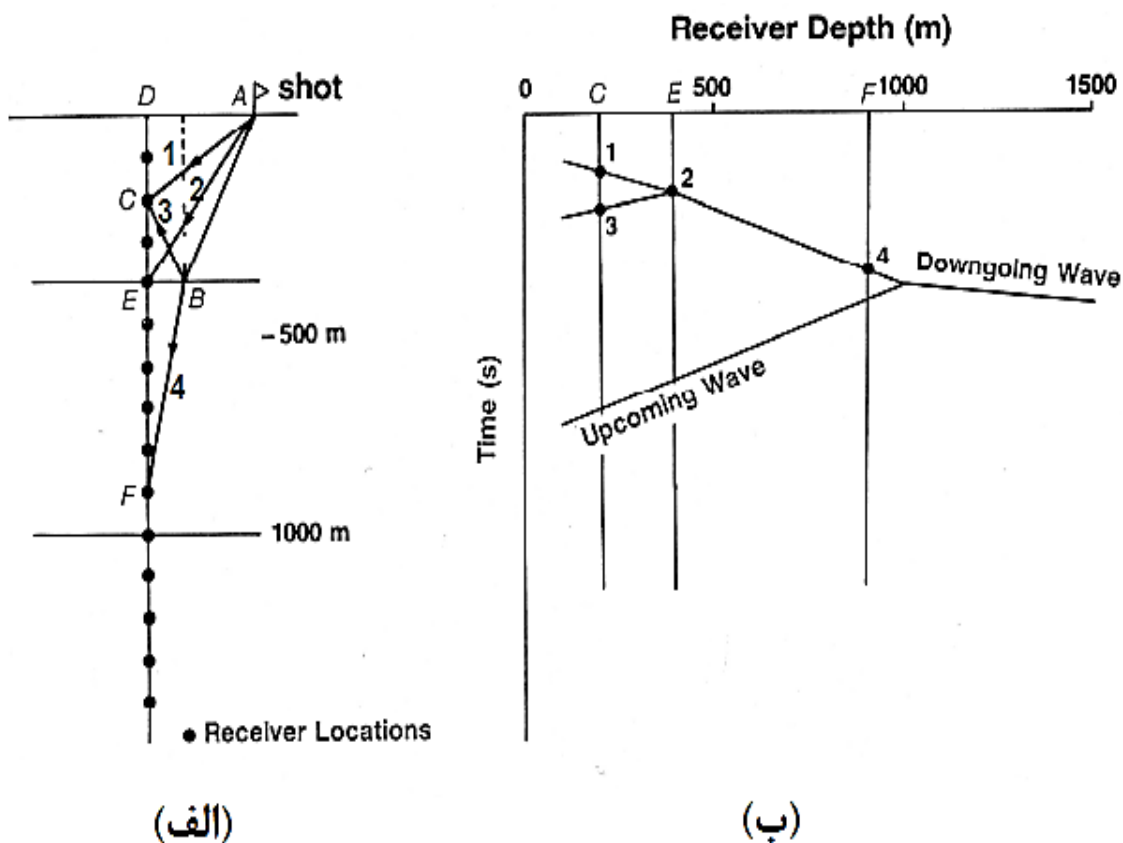
شکل (۳-۱۴): هندسه‌های مختلف برداشت داده‌های لرزه‌ای مورد استفاده در توموگرافی (Lehmann, 2007).

### ۳-۱۲-۱ برداشت‌های لرزه‌ای قائم یا *VSP*

پروفیل لرزه‌ای قائم یک روش لرزه‌ای است که در آن سیگنال‌های تولید شده در سطح زمین توسط ژئوفون‌هایی که در عمق‌های مختلف یک چاه تعبیه شده‌اند، دریافت می‌شوند (Hardage, 1985). اگر منبع تولید موج در نزدیک چاه واقع شده باشد، مقدار دورافت صفر در نظر گرفته می‌شود و اگر منبع

تولید موج در فاصله‌ی دورتری از چاه قرار بگیرد مقدار دورافت برای  $VSP$  مخالف صفر می‌باشد (Yilmaz, 1987).

یک نمونه از هندسه‌ی پروفیل لرزه‌ای قائم به کار گرفته شده، در شکل (۳-۱۵) نشان داده شده است. همان‌طور که در شکل (۳-۱۵-الف) دیده می‌شود، ژئوفون‌های موجود در چاه هم پرتوهای پایین‌رونده یعنی پرتوهای  $AC$ ،  $AE$  و  $ABF$  و هم پرتو بالارونده یعنی پرتو  $ABC$  را ثبت می‌کنند. شکل (۳-۱۵-ب) داده‌های  $VSP$  شامل رویدادهای پایین‌رونده و بالارونده را بر روی نمودار زمان رسیدهای ثبت شده نسبت به عمق گیرنده‌ها نشان می‌دهد (Hardage, 1985).



شکل (۳-۱۵): هندسه‌ی مربوط به پروفیل عمودی لرزه‌ای. (الف) مسیر پرتوها، (ب) زمان سیرهای مربوطه (Yilmaz, 1987).

یکی از مزایای روش  $VSP$  امکان تشخیص مستقیم عمق سطح بازتابش می‌باشد. به عبارت دیگر مانند

آنچه در شکل (۳-۱۵-الف) دیده می‌شود، اگر ژئوفون  $E$  در سطحی هم‌تراز با سطح بازتابی قرار داشته باشد، زمان رسیدهای موج مستقیم پایین‌رونده و موج بازتابی بالا‌رونده در این نقطه یکی خواهند بود، که اطلاعات مستقیم از عمق سطح بازتابی را نشان می‌دهد. این هم‌زمانی در شکل (۳-۱۵-ب) نشان داده شده است (Stewart et al, 1984). علاوه بر این تکنیک *VSP* یک روش کم‌هزینه می‌باشد که اندازه‌گیری دقیق سرعت امواج لرزه‌ای و بررسی سنگ‌شناسی ساختارهای اطراف چاه را میسر می‌سازد. نتایج حاصل از چاه‌نگاری، فقط وضعیت ساختارها در نزدیکی چاه را مشخص می‌کنند، ولی یک روش تصویربرداری توموگرافی *VSP* سرعت ساختارها در اطراف چاه و لایه‌های اطراف تحت پوشش پرتوها را در محدوده‌ی وسیع‌تری نشان می‌دهد (Lehmann, 2007).

وضوح و دقت داده‌های *VSP* بیشتر از روش‌های سنتی لرزه‌ای و کمتر از لاگ‌های صوتی است، به طوری که قادر می‌باشد ویژگی‌های ظریفی را که از طریق لرزه‌نگاری سطحی قابل شناسایی نیستند را شناسایی کرده و همبستگی بهتری از داده‌های لرزه‌ای مربوط به چاه و روش سنتی لرزه‌نگاری ارائه دهد (Balch et al, 1982). عامل اصلی که باعث کاهش وضوح تصویر می‌شود، دامنه‌ی برداشت داده‌های *VSP* می‌باشد. به عبارتی اگر تمام ژئوفون‌ها ضرورتاً در موقعیت یکسان  $(x, y)$  قرار گیرند، مقدار پوشش پرتو در زیر سطح تا حد زیادی کاهش می‌یابد. به منظور بهبود تصویر بدست آمده از ساختار زیرسطحی برداشت همزمان داده‌های لرزه‌ای سطحی و داده‌های لرزه‌ای *VSP* می‌تواند بسیار مفید باشد (McMechan and Hu, 1986).

مشکل اصلی داده‌های لرزه‌ای *VSP* برای انجام توموگرافی کم بودن تعداد پرتوهای عبوری می‌باشد. به منظور مشخص کردن سرعت‌ها و موقعیت سطوح بازتابش ضروری است که عبور پرتوها بصورت متقابل باشد. با توجه به اینکه تمام گیرنده‌ها در برداشت *VSP* در موقعیت یکسان  $(x, y)$  قرار می‌گیرند، محدوده‌ی کمی در معرض عبور پرتوها قرار می‌گیرد. با توجه به این عامل ضروری است که در نتایج بدست آمده از توموگرافی لرزه‌ای در این روش دقت بیشتری صورت گیرد.

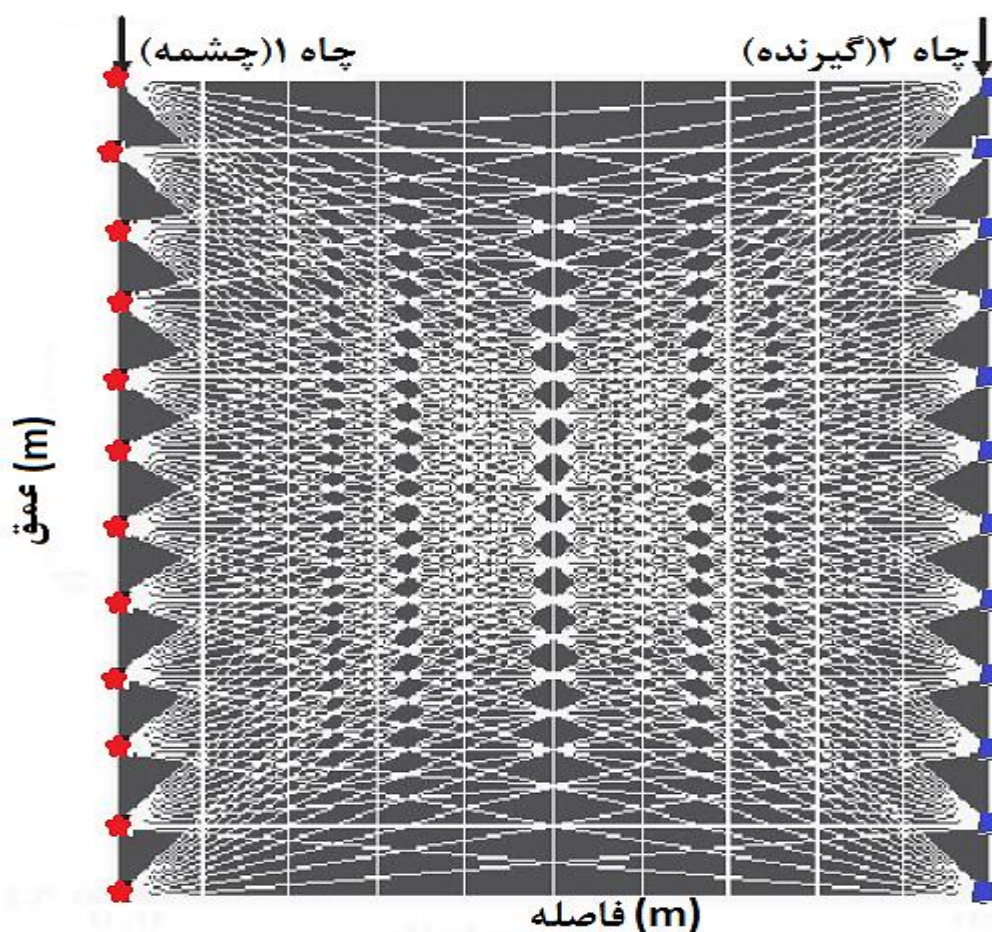
### ۳-۱۲-۲ برداشت‌های درون چاهی

برداشت‌های درون چاهی در داخل چاه‌های قائم، تونل‌ها یا گالری‌ها و دستک‌های حفر شده، انجام می‌شوند. این روش‌ها پوشش ایده‌آلی از پرتوهای لرزه‌ای، جهت بدست آوردن یک تصویر سرعتی از ساختارها بین دو چاه قائم و یا بین دو گالری یا تونل ارائه می‌دهند. در این روش‌ها فرستنده‌ها در داخل یک چاه یا گالری و گیرنده‌ها در داخل چاه یا گالری دیگر قرار می‌گیرند و محدوده‌ی بین دو چاه یا دو گالری با عبور پرتوهای لرزه‌ای شناسایی می‌شود. علاوه بر این می‌توان تعدادی گیرنده در سطح زمین نیز قرار داد. در روش گالری به گالری فرستنده یا گیرنده‌ها می‌توانند در داخل دستک‌های حفر شده در داخل این گالری‌ها نیز قرار داده شوند. با تغییر دادن محل چشمه و گیرنده در درون چاه‌ها یا گالری‌ها می‌توان حجم بالایی از اطلاعات لرزه‌ای را برداشت نمود (Lehmann, 2007).

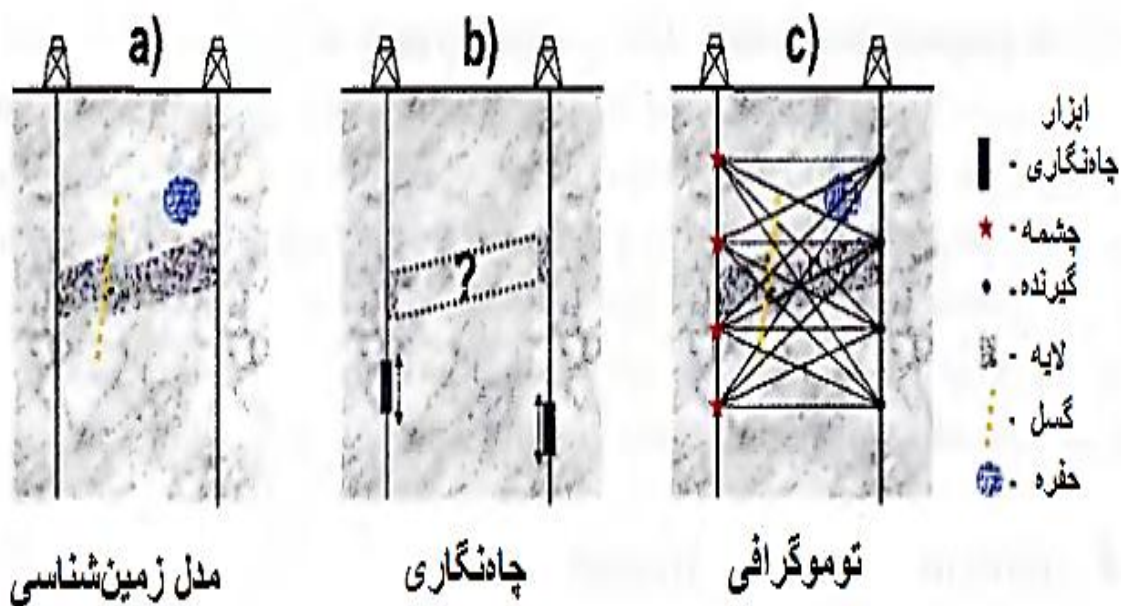
شکل (۳-۱۶) یک آرایش لرزه‌ای درون چاهی در دو چاه متقابل را نشان می‌دهد. همان‌طور که در شکل دیده می‌شود، محدوده‌ی بین دو چاه به تعدادی سلول تقسیم‌بندی شده است. با تعیین مسیر عبور پرتوها در هر سلول از چشمه به گیرنده، زمان رسیدن محاسبه می‌شوند. این زمان رسیده‌ها با زمان رسیدن برداشت شده مقایسه می‌شوند و در نهایت سرعت در هر سلول تخمین زده می‌شود (Wadhwa et al, 2009).

شکل (۳-۱۷) یک برداشت توموگرافی درون چاهی در یک ناحیه بین دو چاه و مقایسه‌ی آن با برداشت‌های چاه‌نگاری را نشان می‌دهد. شکل (۳-۱۷-ا) مدل زمین‌شناسی را نشان می‌دهد که شامل یک لایه‌ی گسل خورده و یک حفره در بالای این لایه می‌باشد. همان‌طور که در شکل (۳-۱۷-ب) دیده می‌شود، چاه‌نگاری فقط اطلاعات مربوط به ساختارهای نزدیک چاه را ارائه می‌دهد و هیچ اطلاعات زمین‌شناسی از محدوده‌ی بین دو چاه، بصورت مستقیم از این طریق به دست نمی‌آید. اطلاعات چاه‌نگاری فقط می‌توانند عمق لایه نازک را در هر دو چاه نشان دهند. با استفاده از شیب و عمق بدست آمده، فقط می‌توان روند گسترش این لایه را در بین دو چاه، از طریق درون‌یابی خطی

نشان داد. بنابراین گسل کوچک و حفره‌ی موجود از این طریق شناسایی نمی‌شوند. اما با استفاده از توموگرافی لرزه‌ای درون‌چاهی هم گسل و هم حفره‌ی موجود بصورت مستقیم شناسایی می‌شوند. همان‌طور که در شکل (۳-۱۷-۱) دیده می‌شود، چشمه‌های تعبیه شده در چاه سمت چپ پرتوهای لرزه‌ای تولید می‌کنند که با عبور از محیط مورد بررسی و دریافت توسط گیرنده‌ها در چاه سمت راست تمام محدوده را بخوبی پوشش می‌دهند. بنابراین یک برداشت توموگرافی درون‌چاهی، نسبت به روش‌های دیگر مانند چاه‌نگاری که از طریق درون‌یابی خطی و بصورت حدسی ساختارها را نشان می‌دهند، یک ابزار قابل اطمینان‌تر برای بررسی ساختارهای بین چاه‌ها می‌باشد. به هر حال نتایج حاصل از توموگرافی درون‌چاهی هنگامی که با داده‌های چاه و نتایج حاصل از مغزه تلفیق شوند، تصویری با وضوح بالا از ساختار زیر سطحی ارائه می‌دهند (Lehmann, 2007).



شکل (۳-۱۶): موقعیت چشمه‌ها، گیرنده‌ها و مسیر پرتوها در برداشت چاه به چاه (Wadhwa et al., 2009).



شکل (۳-۱۷): (a) مدل زمین‌شناسی واقعی، (b) روش چاه‌نگاری که فقط اطلاعات نزدیک چاه و روند گسترش لایه را با درون‌یابی مشخص می‌کند، (c) مسیر پرتوها در توموگرافی که هم گسل و هم حفره را پوشش می‌دهند (با تغییر Lehmann, 2007).

برداشت‌های توموگرافی چاه به چاه و گالری به گالری، با توجه به پوشش کامل منطقه‌ی مورد بررسی و ارائه‌ی یک تصویر سرعتی مناسب از ساختار، کاربردهای فراوانی دارند. گاهی اوقات در کنار این روش‌ها از برداشت چاه به سطح یا سطح به چاه نیز برای برداشت داده‌های بیشتر استفاده می‌شود. از این روش‌ها در اکتشاف کانه‌ها، شناسایی محل دفن زباله‌های هسته‌ای، مقاصد باستان‌شناسی، بررسی‌های ژئوتکنیکی و بررسی دقیق ساختارها در جناحین و بستر سدها استفاده شده است.

## فصل چهارم

### روش کار و تحلیل داده‌ها

## ۴-۱ مقدمه

به منظور بدست آوردن مدل سرعتی برای مشخص کردن محدوده‌های ضعیف (درزه و گسل) و مناطق خرد شده، متخلخل و کارستی در محل تکیه‌گاه راست و بستر سد خرسان ۳، از داده‌های مربوط به ۴ خط برداشت لرزه‌ای موج P استفاده شده است. مشخصات این خطوط برداشت در جدول (۴-۱) آورده شده است. پس از برداشت داده‌های لرزه‌ای برای انجام توموگرافی، نیاز است که این داده‌ها به صورت مناسب انتخاب شوند. از نتایج داده‌های انتخاب شده، اولین زمان رسیده‌ها به دست می‌آیند. کار پردازش داده‌ها و انتخاب اولین زمان رسیده‌ها، به کمک نرم‌افزارهای موجود مانند Pick Win و Seisimager انجام می‌شود. پس از آن زمان رسیده‌ها در نرم‌افزار Geo Tomo CG فراخوانی می‌شوند. در مرحله مدل‌سازی مستقیم، مدل اولیه بر اساس شرایط زمین‌شناسی و داده‌های ژئوفیزیکی موجود تعریف می‌شود. این مدل نشان دهنده‌ی یک حدس اولیه از ساختار زیرسطحی بر اساس شرایط موجود می‌باشد. پس از بازسازی و ردیابی مسیر پرتوها توسط نرم‌افزار، عملیات وارون‌سازی توموگرافی به روش SIRT انجام می‌شود. در وارون‌سازی تغییرات مدل تا به حداقل رسیدن اختلاف بین زمان‌سیرهای مشاهده شده و محاسبه شده ادامه می‌یابد. اگر اختلاف زمان‌سیرها از لحاظ آماری قابل قبول باشد و هم‌چنین مدل اصلاح شده با نتایج و برداشت‌های زمین‌شناسی همبستگی داشته باشد، فرآیند توموگرافی خاتمه یافته است. اگر نتیجه رضایت‌بخش نباشد، مدل اصلاح شده‌ی موجود به عنوان یک مدل اولیه‌ی جدید در نظر گرفته می‌شود و مراحل ذکر شده، تکرار می‌شوند. این کار تا رسیدن به یک مدل مناسب ادامه می‌یابد. در نهایت نتایج توموگرافی لرزه‌ای در تکیه‌گاه راست و بستر سد خرسان ۳ به صورت مدل‌های سرعتی در مقاطع دوبعدی و سه‌بعدی مورد بحث قرار می‌گیرند.

در این فصل مراحل انجام کار شامل تعیین مدل اولیه، وارون‌سازی داده‌های لرزه‌ای، تفسیر مقاطع دوبعدی و سه‌بعدی سرعت، آماده‌سازی داده‌های توپوگرافی منطقه و نمایش مدل‌های سرعتی بر روی نقشه توپوگرافی منطقه توضیح داده می‌شود. با توجه به اطلاعات موجود، سعی شده است توضیحات



به صورتی باشد که بتوان از نتایج آن براحتی و بدون ابهام بهره گرفت و در صورت انجام کارهای مشابه، تجربیات حاصل از این تحقیق مفید و راه‌گشا باشد. شرح نتیجه‌گیری‌ها، مشکلات و پیشنهادات در هر یک از مراحل ارائه شده است.

جدول (۴-۱): مشخصات محل چشمه‌ها و محل ژئوفون‌ها (گیرنده‌ها).

ردیف	محل چشمه‌ها (فرستنده)	محل ژئوفون‌ها (گیرنده)
۱	GR2 گالری	GR1 گالری
۲	GR1 دو گمانه داخل گالری	GR1 داخل گالری
۳	بر روی تکیه‌گاه راست BH214 گمانه	سطح تکیه‌گاه راست
۴	در بستر سمت راست BH12 گمانه رودخانه	در بستر سمت چپ رودخانه و BH13 گمانه سطح کناری رودخانه

#### ۴-۲ لیست نرم‌افزارهای استفاده شده

در مراحل مختلف انجام کار از نرم‌افزارهای متفاوتی استفاده شده است. در ادامه لیست این نرم‌افزارها با ذکر توضیح مختصری از کارهای انجام گرفته توسط هر یک از آن‌ها، آورده شده است.

##### ۱- نرم‌افزار Geo Tomo CG

این نرم‌افزار برای بررسی‌های دوبعدی و سه‌بعدی توموگرافی استفاده می‌شود. در این پایان‌نامه از نرم‌افزار ژئوتومو برای بدست آوردن مقاطع دوبعدی سرعت در طول و عرض‌های جغرافیایی مختلف یا ترازهای ارتفاعی متفاوت، استفاده شده است. همچنین مسیر پرتوها بین چشمه‌ها و گیرنده‌ها و بهترین پوشش موجود توسط پرتوهای لرزه‌ای در هر منطقه، به کمک این نرم‌افزار به خوبی قابل

تشخیص می‌باشد. در بخش‌های دیگر، این نرم‌افزار مقدار سرعت مربوط به تمام پرتوهای عبوری را در قالب یک سری نمودار بر مبنای شناسه هر پرتو یا فاصله بین چشمه و گیرنده نمایش می‌دهد. حداقل و حداکثر سرعت موجود در منطقه مورد بررسی با توجه به زمان رسیدهای ثبت شده، به‌خوبی قابل تشخیص می‌باشد. پس از تعریف مدل اولیه، از این سرعت‌ها برای وارون‌سازی استفاده می‌شود.

#### ۲- نرم افزار Voxler 3

از این نرم‌افزار برای بررسی‌های سه‌بعدی توموگرافی لرزه‌ای و رسم مقاطع سه‌بعدی توزیع سرعت لرزه‌ای استفاده شده است. هم‌چنین ترسیم موقعیت فضایی گالری‌ها و گمانه‌های مورد استفاده در برداشت توموگرافی و نمایش موقعیت فرستنده‌ها و گیرنده‌ها در داخل این گالری‌ها و گمانه‌ها و سطح تکیه‌گاه به کمک این نرم‌افزار انجام شده است. پس از استخراج و پردازش داده‌های توپوگرافی منطقه توسط نرم‌افزارهای دیگر، در نهایت توپوگرافی منطقه در حالت سه‌بعدی مورد نیاز، توسط این نرم‌افزار ترسیم شده است.

#### ۳- نرم افزار Global Mapper 12

از این نرم‌افزار برای استخراج فایل سه‌بعدی داده‌های توپوگرافی از نقشه‌های رقومی موجود، استفاده شده است.

#### ۴- نرم افزار Surfer9

از این نرم‌افزار برای گرید کردن داده‌های توپوگرافی منطقه و تهیه فایل نهایی ورودی نرم‌افزار Voxler با فرمت grd استفاده شده است.

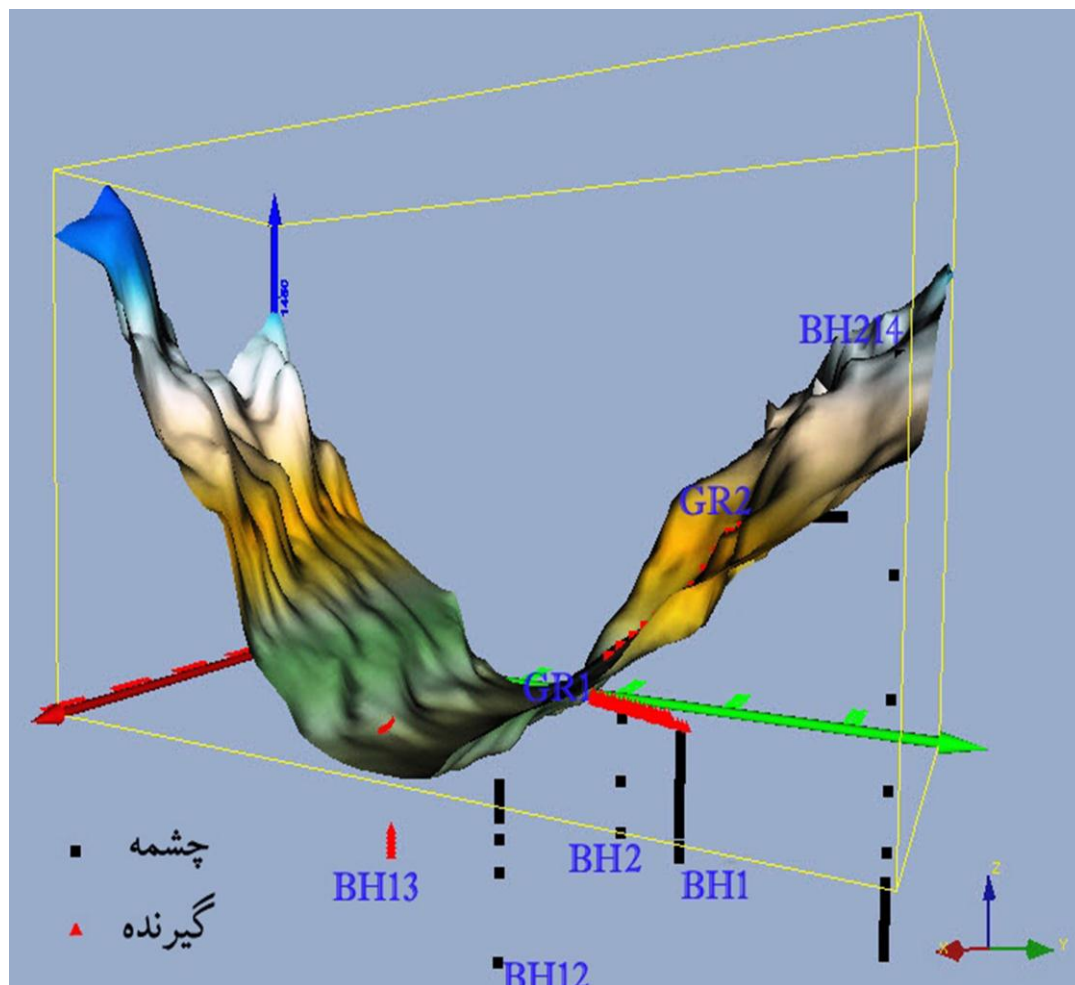
#### ۵- نرم افزار AutoCAD 2007

به کمک این نرم‌افزار اطلاعات نقشه توپوگرافی و هم‌چنین نقشه‌های مربوط به ساختارهای موجود در منطقه مورد بررسی مانند گسل‌ها و درزه‌ها، از نقشه‌های ترکیبی استخراج شد.

### ۳-۴ هندسه‌های مختلف برداشت داده‌های لرزه‌ای

روش برداشت صحرایی به‌منظور توموگرافی لرزه‌ای با روش‌های لرزه‌نگاری سطحی از نظر نوع چشمه و گیرنده‌ها مشابه و از نظر آرایش آن‌ها متفاوت است. در این روش چشمه‌ها و گیرنده‌ها در روی دو خط به نحوی چیده می‌شوند که منطقه مورد نظر توسط آن‌ها بهترین پوشش را داشته باشد. به این ترتیب یک پوشش کامل از پرتوهای موج ارسالی در آن‌ها داده می‌شود.

در برداشت داده‌های لرزه‌ای برای انجام توموگرافی در محدوده سد خرسان ۳، با توجه به گالری‌ها و گمانه‌های حفر شده، از هندسه‌های متفاوتی استفاده شده است. همانطور که در جدول (۱-۴) آورده شده است از داده‌های مربوط به چهار خط برداشت لرزه‌ای در این پایان‌نامه استفاده شده است. خط برداشت ردیف یک در جدول (۱-۴) که در محدوده بین گالری‌های GR1 و GR2 انجام شده است، یک برداشت گالری به گالری می‌باشد. این برداشت پوشش ایده‌آلی از پرتوها در محدوده مورد بررسی ارائه می‌دهد. در این برداشت مطابق شکل (۱-۴) چشمه‌ها در داخل گالری GR2 و گیرنده‌ها در داخل گالری GR1 قرار دارند. خط برداشت ردیف دو در حقیقت ترکیبی از دو پروفیل لرزه‌ای قائم (VSP) می‌باشد که مطابق شکل (۱-۴) چشمه‌ها در داخل گمانه‌های قائم شماره ۱ و ۲ و گیرنده‌ها در داخل گالری GR1 قرار دارند. پروفیل‌های لرزه‌ای عمودی متقابل باعث می‌شوند که محدوده مورد نظر به‌طور کامل پوشش داده شود. خط برداشت ردیف ۳ یک برداشت VSP است که مطابق شکل (۱-۴) چشمه‌ها در داخل گمانه شماره ۲۱۴ حفاری شده بر روی تکیه‌گاه راست و گیرنده‌ها بر روی سطح تکیه‌گاه راست قرار دارند. خط برداشت ردیف ۴ نمونه‌ای از برداشت در چاه‌های متقابل می‌باشد. در این برداشت مطابق شکل (۱-۴) چشمه‌ها در داخل گمانه شماره ۱۲ در کف بستر سمت راست و گیرنده‌ها در داخل گمانه شماره ۱۳ در کف بستر سمت چپ رودخانه قرار دارند. هم‌چنین تعدادی گیرنده در سطح کناری رودخانه در سمت چپ قرار داده شده است.



شکل (۴-۱): موقعیت چشمه و گیرنده‌ها برای حالت‌های مختلف برداشت داده‌های لرزه‌ای در سد خرسان ۳.

#### ۴-۴ فراخوانی داده‌های لرزه‌ای و مراحل کار با نرم‌افزار

فایلی که توسط نرم‌افزار ژئوتومو فراخوانی می‌شود باید دارای فرمت 3dd باشد. بنابراین پس از انتخاب اولین زمان رسیدهای مربوط به داده‌های لرزه‌ای برداشت شده در هر قسمت، این داده‌ها در قالب یک فایل 3dd تهیه و تنظیم می‌شوند. در این فایل یک خط مربوط به هر پرتو شامل چهار قسمت شناسه پرتو، مختصات چشمه، مختصات گیرنده و زمان رسید ثبت شده برای آن پرتو می‌باشد. پس از آن داده‌ها در قالب این فایل 3dd تهیه شده در نرم‌افزار ژئوتومو فراخوانی می‌شوند. در شروع کار می‌توان نمودارهایی بر مبنای زمان رسید و شناسه‌ی پرتو یا مختصات چشمه و گیرنده ترسیم کرد. همان‌طور که در شکل (۴-۲) دیده می‌شود، این نمودارها در مشخص کردن زمان رسیدها و پرتوهای غیرعادی

موثر می‌باشند. با مشخص شدن این پرتوها می‌توان بررسی بیشتری روی آن‌ها انجام داد. از جمله نمودارهای دیگر که در این قسمت می‌توان ترسیم کرد نمودار سرعت بر مبنای شناسه پرتو می‌باشد. با استفاده از این نمودار حداقل و حداکثر سرعت موجود در هر قسمت تخمین زده می‌شود. در مراحل بعد این سرعت حداقل و حداکثر، پس از مقایسه با زمین‌شناسی موجود در انجام توموگرافی استفاده می‌شود.

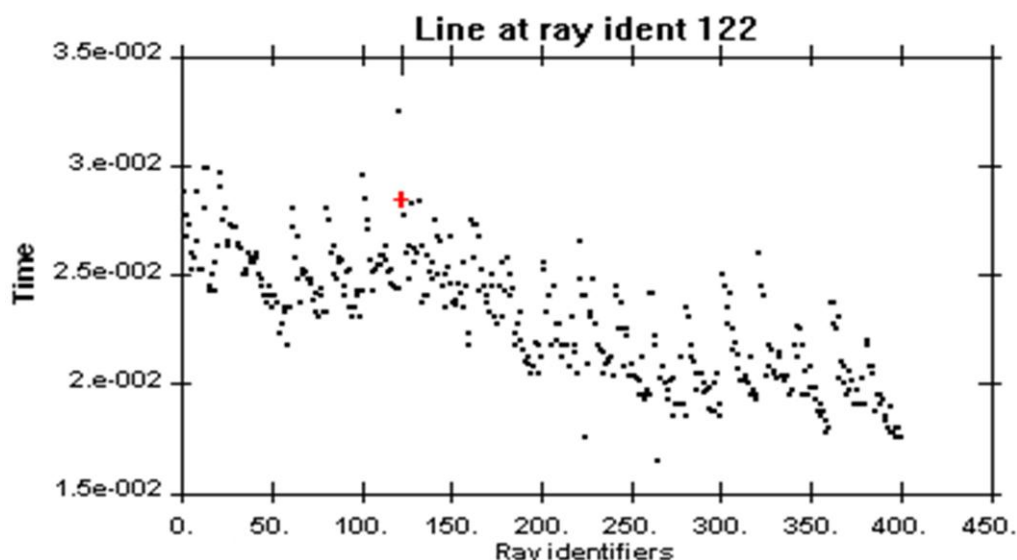
پس از فراخوانی داده‌ها، کار تعریف مدل اولیه انجام می‌شود. در این قسمت، نرم‌افزار یک سرعت میانگین پیش‌فرض را با توجه به داده‌های موجود در نظر می‌گیرد. نیاز است که این مقدار سرعت با زمین‌شناسی موجود تطبیق داده شود. پس از آن مدل اولیه به تعدادی سلول تقسیم‌بندی می‌شود. تعداد شبکه‌بندی بر مبنای حداقل و حداکثر طول جغرافیایی، عرض جغرافیایی و ارتفاع موجود برای هر محدوده، در این قسمت مشخص می‌شوند. با توجه به این که تعداد شبکه‌بندی در تعداد مراحل تکرار و در نتیجه وضوح تصویر نهایی تاثیرگذار است، بایستی در انجام آن دقت شود.

مرحله بعد تعیین پارامترهای وارون‌سازی است. مسیر پرتوها به صورت پیش‌فرض مستقیم در نظر گرفته می‌شود. حداقل و حداکثر سرعت مجاز با توجه به زمین‌شناسی منطقه و سرعت‌های محاسبه شده توسط نرم‌افزار، وارد می‌شود و تعداد تکرارها برای انجام عملیات وارون‌سازی مشخص می‌شوند. در حالت ایده‌آل با ۱۰ تا ۱۵ مرحله تکرار، فرآیند وارون‌سازی به یک باقیمانده قابل قبول می‌رسد.

در نهایت عملیات run یا اجرای برنامه انجام می‌شود. فایل حاصل یک فایل با فرمت 3dm می‌باشد که شامل مختصات سه‌بعدی و سرعت محاسبه‌شده در هر گره از مدل نهایی می‌باشد. فایل باقیمانده نیز با فرمت rsd بدست می‌آید که شامل مقدار باقیمانده در هر تکرار و مجموع باقیمانده‌ها برای هر مسیر پرتو در تکرار نهایی می‌باشد.

پس از انجام مراحل بالا و ذخیره کردن فایل‌های مربوطه می‌توان مقاطع توموگرام را نمایش داد. توموگرام یک نمایش دوبعدی از مقادیر سرعت محاسبه شده می‌باشد. مقاطع سرعت را می‌توان در

صفحات  $XY$ ،  $XZ$  و  $YZ$  نمایش داد. همچنین می‌توان موقعیت چشمه‌ها و گیرنده‌ها و تعداد پرتوهای عبوری از هر مقطع را نشان داد.



شکل (۴-۲): نمایش زمان رسیده‌ها بر مبنای شناسه پرتو.

#### ۴-۵ ترسیم مقاطع دوبعدی و سه‌بعدی سرعت در سد خرسان ۳

در این پایان‌نامه نتایج مطالعات توموگرافی لرزه‌ای در تکیه‌گاه راست و بستر سد خرسان ۳ در مقاطع دوبعدی و سه‌بعدی سرعت، مورد بحث قرار می‌گیرند.

برای رسم مقاطع دوبعدی سرعت، زمان رسیده‌های مربوط به هریک از چهار خط برداشت ذکر شده در قالب یک فایل 3dd و به‌صورت جداگانه در نرم‌افزار ژئوتومو فراخوانی می‌شوند. پس از انجام مراحل مختلف کار، مقاطعی که بهترین انطباق را با زمین‌شناسی موجود داشته و وضوح بالایی داشتند، به‌عنوان مقاطع نهایی انتخاب شدند.

با توجه به این‌که در یک مدل سرعت سه‌بعدی می‌توان نقاط کم‌سرعت و پرسرعت را با وضوح بیشتر در اعماق و مختصات متفاوت بررسی کرد، در ادامه مقاطع سه‌بعدی سرعت نیز ترسیم شده است. در این حالت با تمرکز بر روی نقاط کم‌سرعت، امکان تعیین ابعاد و موقعیت دقیق آنومالی‌ها مشخص

خواهد شد. منظور از آنومالی‌ها زون‌های تحکیم نیافته، شکستگی‌ها، نواحی متخلخل و نواحی کارستی می‌باشند که بالاترین پتانسل نشت و فرار آب را دارند.

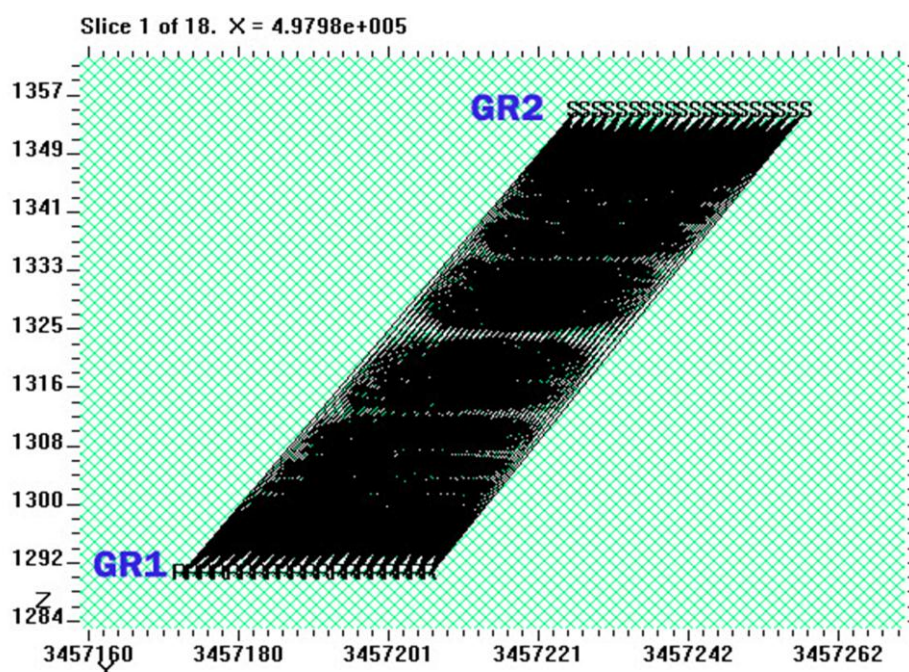
همان‌طور که در بخش قبل اشاره شد، فایل نهایی حاصل از انجام عملیات وارون‌سازی در نرم‌افزار ژئوتومو، یک فایل با فرمت 3dm می‌باشد. این فایل شامل مختصات سه‌بعدی  $X, Y, Z$  و سرعت محاسبه‌شده در هر گره از مدل نهایی می‌باشد. با فراخوانی این فایل در نرم‌افزار 3 Voxler مقاطع و اشکال سه‌بعدی سرعت لرزه‌ای و هم‌چنین موقعیت فضایی چشمه‌ها و گیرنده‌ها بر روی این اشکال، ترسیم شده است. برای نمایش سه‌بعدی مدل سرعت، حالت‌های مختلفی مانند نمایش سلولی و نمایش به‌صورت برش در این نرم‌افزار وجود دارد. با بررسی تمام حالت‌های موجود و رسم اشکال مربوط به آن‌ها در نهایت از روش نمایش به‌صورت برش استفاده شده است، که بهترین نمایش تصاویر را از مدل مورد بررسی ارائه می‌دهد. در ادامه مقاطع دوطبقه و سه‌بعدی سرعت مربوط به هر یک از چهار محدوده برداشت و تفسیر آن‌ها بیان می‌شود.

#### ۴-۵-۱ مقاطع سرعت بین گالری‌های GR1 و GR2

در این بخش از برداشت، تعداد چشمه‌ها ۲۰ عدد و فاصله آن‌ها از یکدیگر ۲ متر می‌باشد. چشمه‌ها در داخل گالری GR2 قرار گرفته‌اند. از انفجار دینامیت به‌عنوان چشمه استفاده شده است. تعداد گیرنده-ها ۲۰ عدد ژئوفون مخصوص دریافت موج P می‌باشند که به فاصله ۲ متر از یکدیگر و در داخل گالری GR1 قرار گرفتند. در مجموع تعداد ۴۰۰ پرتو لرزه‌ای فرستاده شده، توسط ژئوفون‌ها ثبت شده است. شکل (۳-۴) پوشش محدوده بین دو گالری توسط پرتوهای لرزه‌ای ثبت شده را نشان می‌دهد.

همان‌طور که در فصل دوم اشاره شد گالری GR2 در واحد UAS2 سازند آسماری و گالری GR1 در واحد UAS1 سازند آسماری حفاری شده‌اند. تشکیل دهنده اصلی در محدوده بین گالری‌ها سنگ‌های آهکی است. در تعریف مدل اولیه سرعت شروع توسط نرم‌افزار ۳۲۰۰ متر بر ثانیه محاسبه شده است که با سرعت متوسط سنگ‌های آهکی منطقه و زمین‌شناسی موجود انطباق خوبی دارد. با توجه به

زمین‌شناسی موجود و سرعت موج در سنگ‌های آهکی و با توجه به حداقل و حداکثر سرعت محاسبه شده برای پرتوها، محدوده سرعتی ۲۰۰۰ تا ۵۰۰۰ متر بر ثانیه برای وارون‌سازی در نظر گرفته شده است. شکل (۴-۴) نمایش محدوده سرعت پرتوهای ثبت شده را نشان می‌دهد. سرعت‌های معمولی در سنگ‌های رسوبی به‌طور تقریبی از ۱۸۰۰ تا ۵۰۰۰ متر بر ثانیه تغییر می‌کنند. سرعت موج در سنگ آهک از ۳۰۰۰ تا ۶۰۰۰ متر بر ثانیه و در مارن‌ها از ۱۸۰۰ تا ۳۸۰۰ متر بر ثانیه متغیر است. در مارن‌های آهکی سرعت موج بین این محدوده‌ها متغیر است و در هوا ۳۳۱ متر بر ثانیه می‌باشد.

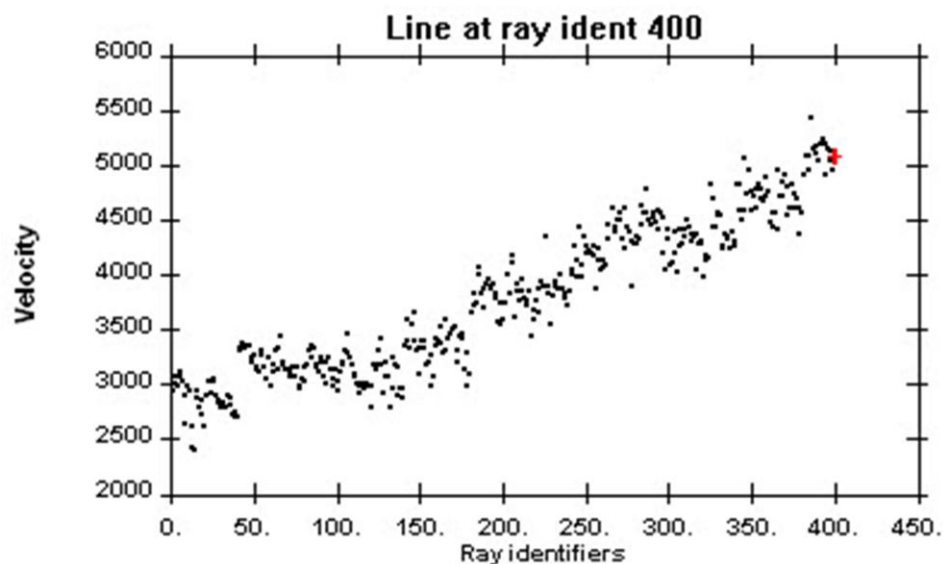


شکل (۴-۳): پوشش محدوده بین دو گالری GR1 و GR2 توسط پرتوهای لرزه‌ای.

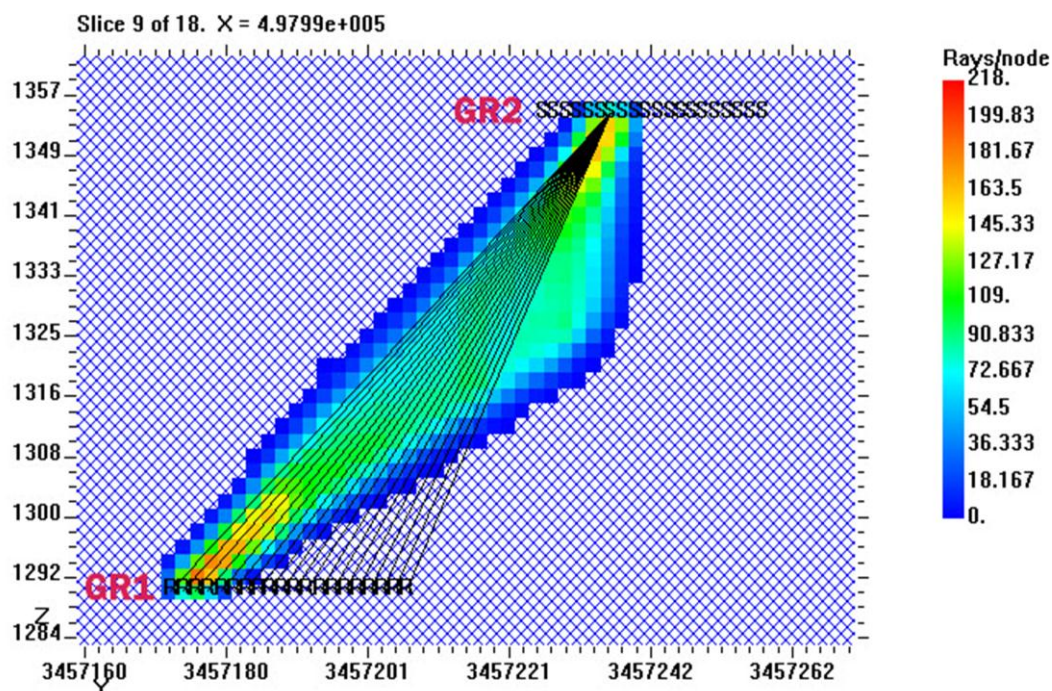
شبکه‌بندی و تعیین ابعاد سلول‌ها با توجه به مقادیر حداقل و حداکثر طول جغرافیایی (X)، عرض جغرافیایی (Y) و ارتفاع موجود (Z) انجام شد. پس از جایگزینی مقادیر مختلف، بررسی وضوح تصاویر پردازش شده و هم‌چنین کارایی نرم‌افزار، مقادیر  $X=18$ ،  $Y=55$  و  $Z=39$  متر برای تعیین شبکه‌بندی در این مدل استفاده شد. پردازش مقاطع در صفحه‌ی مختصات YZ انجام شده است. تعداد کل مقاطع پردازش شده در این قسمت ۱۸ مقطع می‌باشد. در اینجا مقطعی آورده شده است که شامل تعداد



پرتوهای عبوری زیاد از سلول‌ها باشد و پوشش بیشتری از محدوده را نشان می‌دهد. شکل (۴-۵) تمرکز عبور پرتوها از سلول‌های مقطع شماره ۹ و نمایشی از مسیر عبور یک پرتو را نشان می‌دهد.

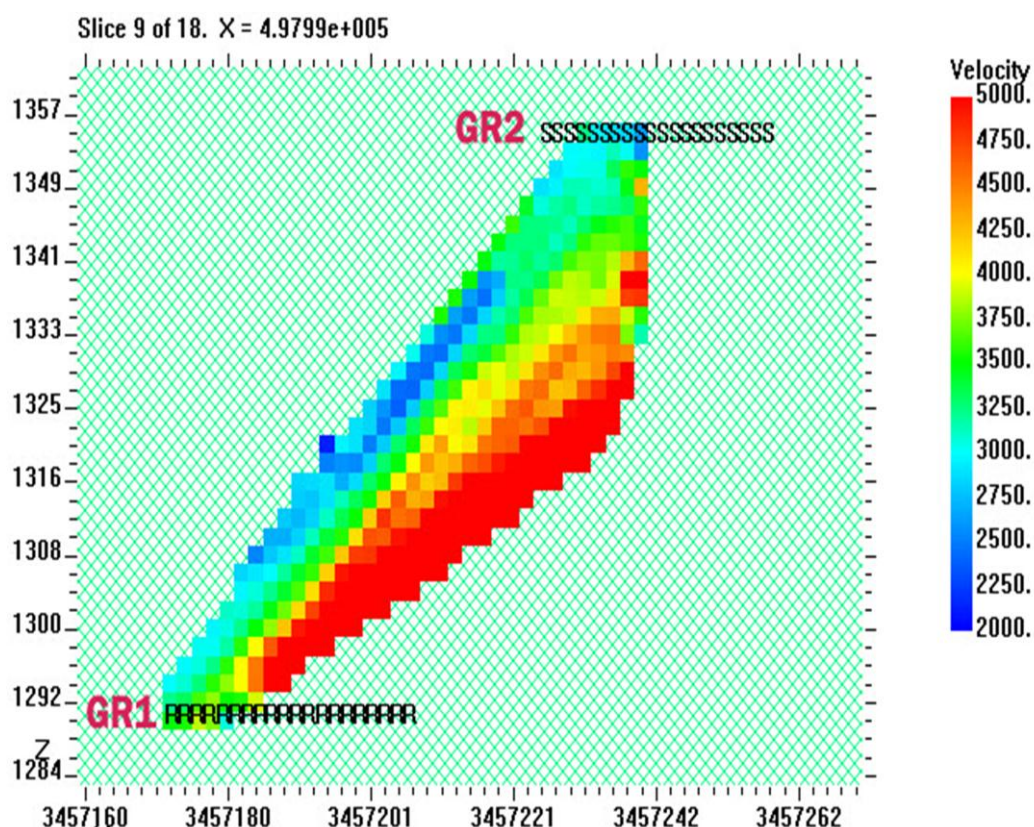


شکل (۴-۴): نمایش محدوده سرعت پرتوهای ثبت شده بین دو گالری GR1 و GR2.



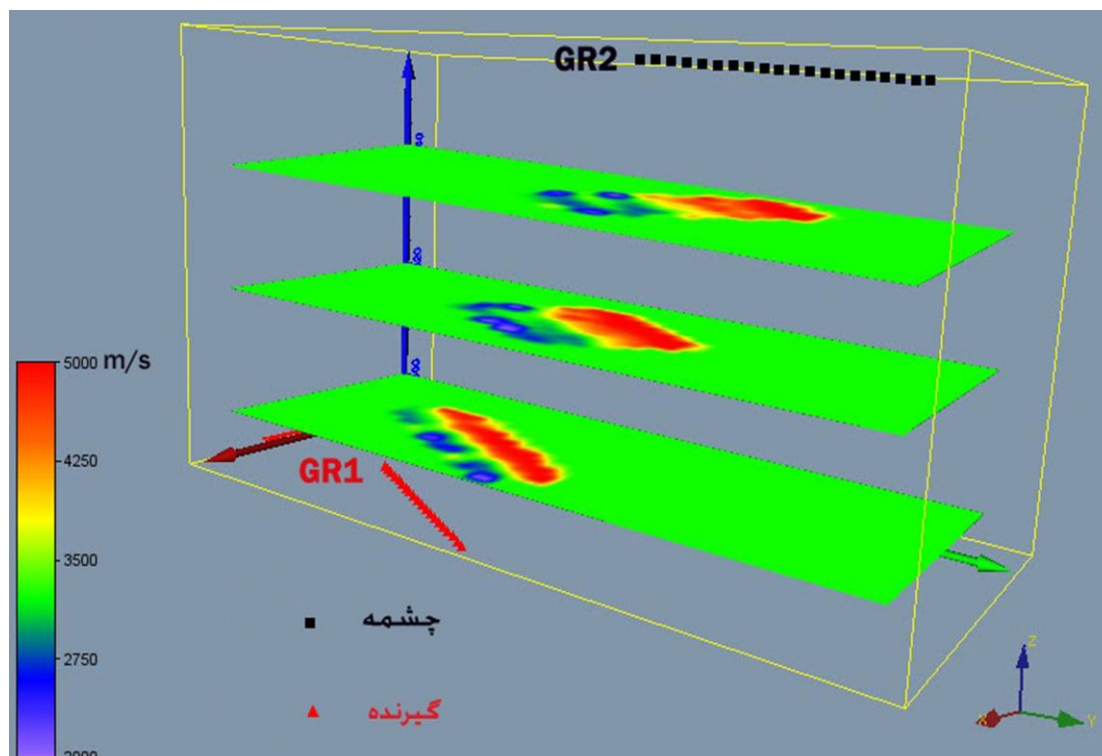
شکل (۴-۵): تمرکز عبور پرتوها از سلول‌های مقطع نمونه شماره ۹ از ۱۸.

شکل (۴-۶) نمایش مقطع شماره ۹ از مدل سرعت پردازش شده پس از ۱۰ مرحله تکرار می‌باشد که در محور مختصات  $X=497990$  مقطع برداری شده است. همان‌طور که در شکل دیده می‌شود مقدار سرعت پردازش شده در محدوده بین دهانه‌ی گالری‌ها نزدیک ۲۸۰۰ متر بر ثانیه می‌باشد که از ابتدای دهانه گالری GR1 شروع و تا ابتدای گالری GR2 ادامه می‌یابد. هر چه به سمت عمق سنگ پیش می‌رویم این سرعت افزایش یافته و به ۳۵۰۰ تا ۴۵۰۰ متر بر ثانیه می‌رسد. این افزایش سرعت به دلیل فشرده شدن لایه‌های آهکی موجود است. با توجه به زمین‌شناسی موجود بین گالری‌ها که عمدتاً سنگ‌های آهکی است کاهش سرعت در محدوده بین دهانه گالری‌ها می‌تواند مربوط به پدیده هوازدگی باشد. در اینجا مرز لایه‌های هوازده و تحکیم یافته را می‌توان تشخیص داد. تمامی ۱۸ مقطع پردازش شده مربوط به این محدوده در پیوست الف آورده شده است.

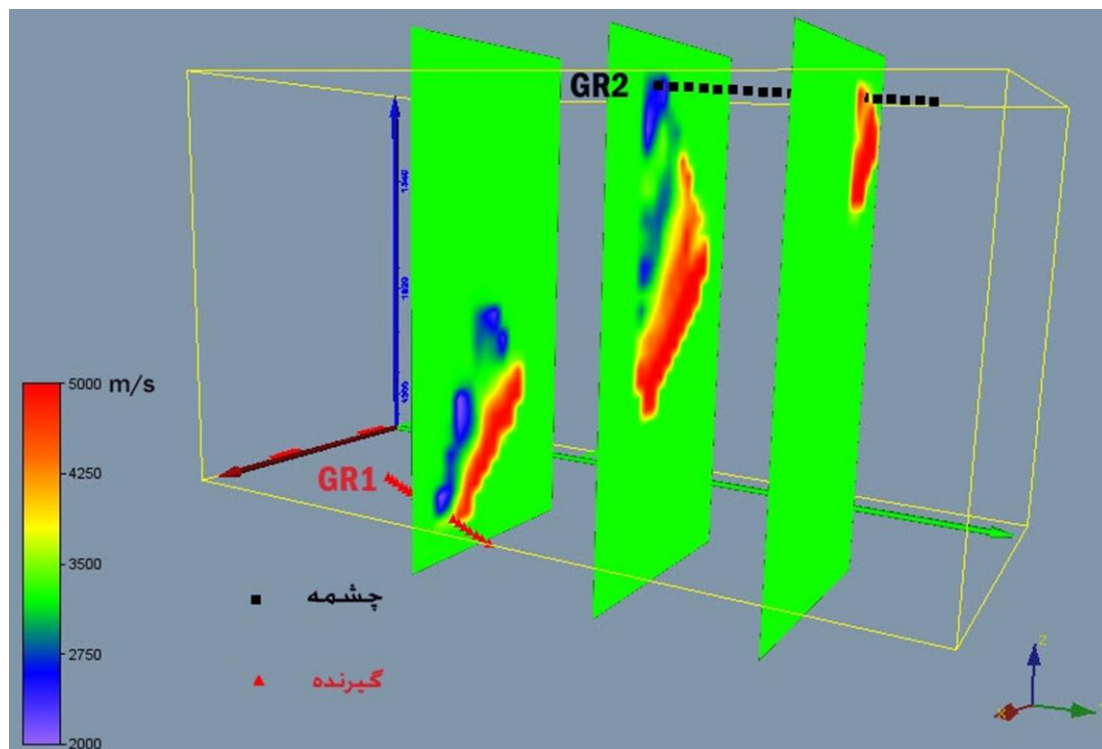


شکل (۴-۶): مدل سرعتی بین دو گالری GR1 و GR2 در محور مختصات  $X=497990$ ، مقطع ۹ از ۱۸.

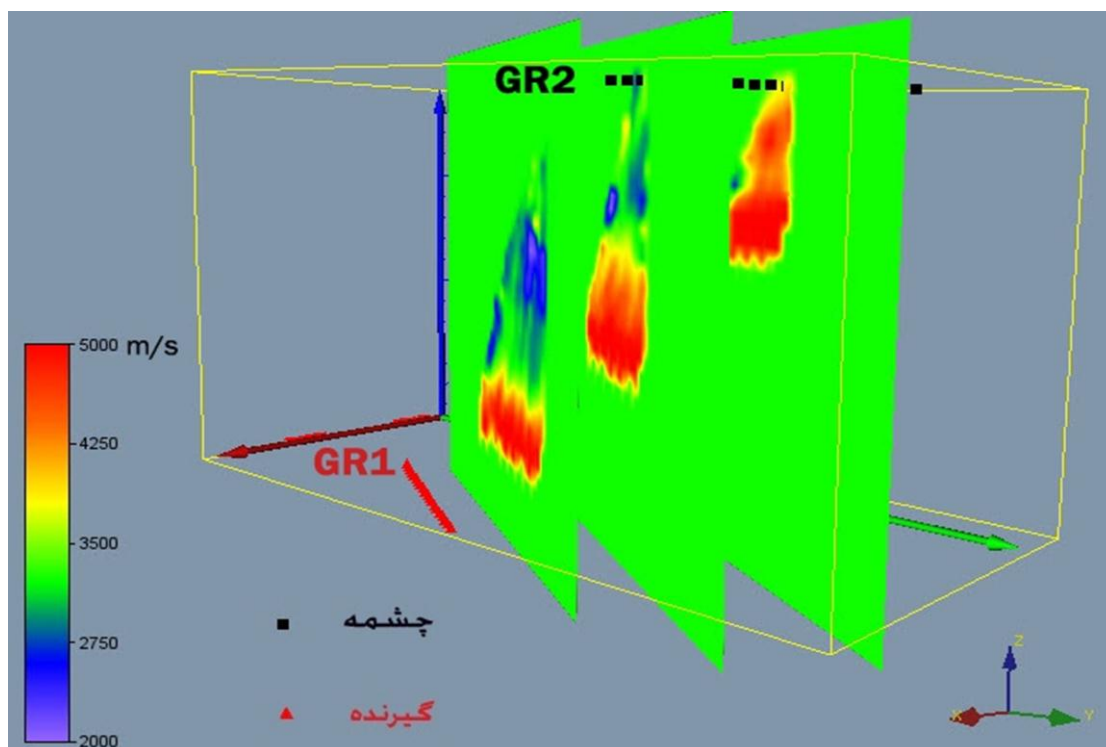
برای رسم تصاویر سه‌بعدی سرعت، فایل 3dm مربوطه که شامل ۳۸۶۱۰ مولفه سرعت محاسبه شده در سلول‌ها، همرا با مختصات آن‌ها می‌باشد، فراخوانی می‌شود. شبکه‌بندی با همان مقادیر استفاده شده در نرم‌افزار ژئوتومو یعنی  $X=18$ ,  $Y=55$  و  $Z=39$  انجام می‌شود. حاصل ضرب این اعداد برابر با تعداد سلول‌ها و تعداد مولفه سرعت محاسبه شده می‌باشد. برای رسم تصاویر از حالت نمایش برشی استفاده شده است. نمایش تصاویر به صورتی است که وضعیت مدل سرعتی را در اعماق مختلف و در زوایای دید متفاوت، به خوبی نشان دهند. اشکال (۷-۴)، (۸-۴) و (۹-۴) نمایش مقاطع سرعت پردازش شده در صفحات  $XY$ ،  $XZ$  و  $YZ$  را نشان می‌دهند. در شکل (۴-۱۰) یک نمای سه‌بعدی از سرعت لرزه‌ای با استفاده هم‌زمان از سه مقطع سرعتی در صفحات مختلف، نمایش داده شده است. افزایش سرعت لرزه‌ای از دهانه‌ی گالری‌ها به سمت عمق سنگ، در تصاویر مشاهده می‌شود. مناطق آبی رنگ، نقاط کم‌سرعت با بالاترین پتانسیل نشست در تکیه‌گاه می‌باشند، که در این شکل‌ها ابعاد و موقعیت دقیق آن‌ها به راحتی قابل تشخیص است.



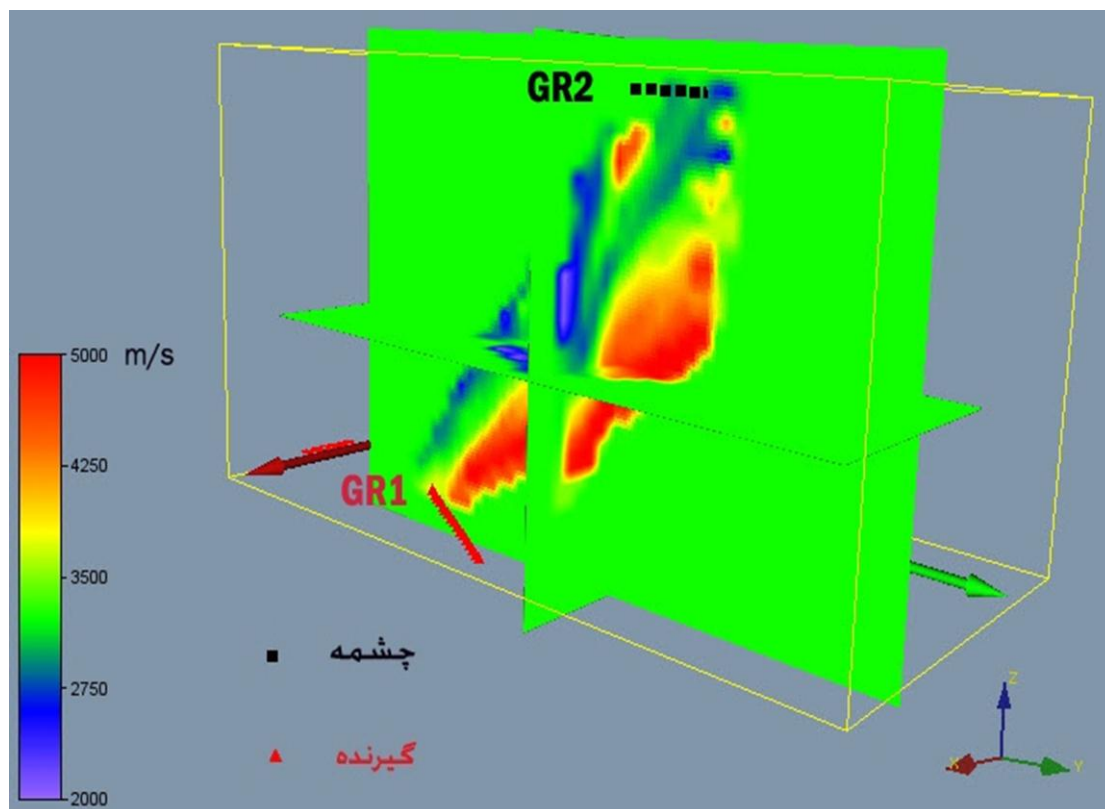
شکل (۴-۷): نمایش مقاطع سرعت پردازش شده بین دو گالری GR1 و GR2 در عمق‌های مختلف.



شکل (۴-۸): نمایش مقاطع سرعت پردازش شده بین گالری‌های GR1 و GR2 در عرض‌های جغرافیایی متفاوت.



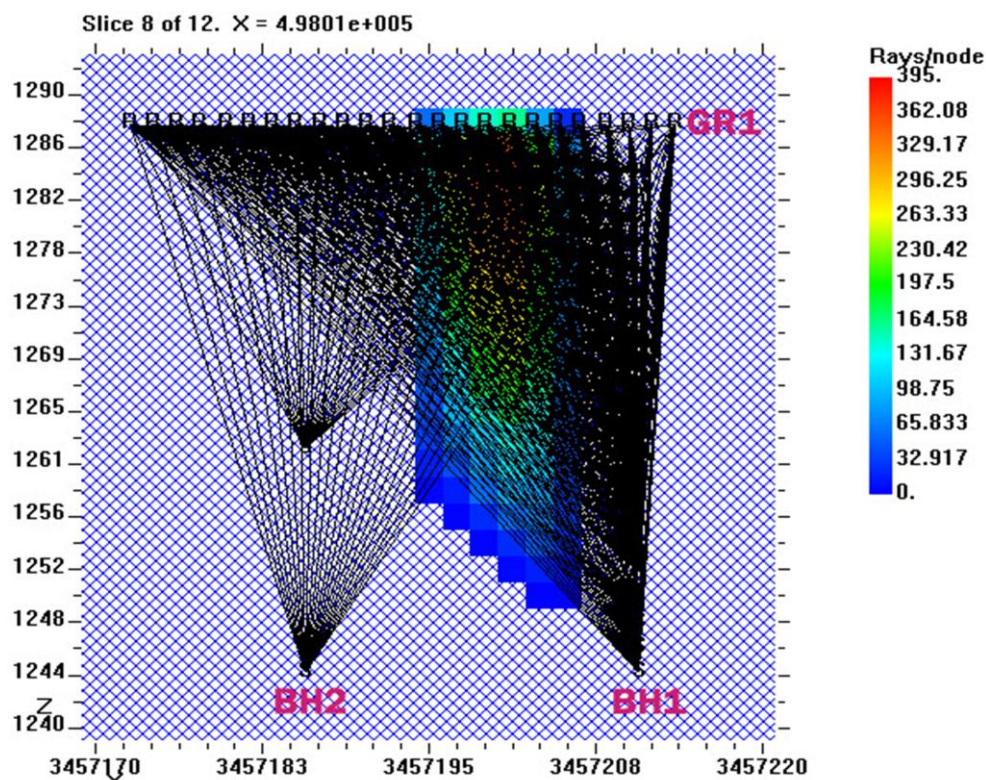
شکل (۴-۹): نمایش مقاطع سرعت پردازش شده بین گالری‌های GR1 و GR2 در طول‌های جغرافیایی مختلف.



شکل (۴-۱۰): نمای سه‌بعدی از مدل سرعت پردازش شده بین گالری‌های GR1 و GR2 با مقاطع مختلف.

#### ۴-۵-۲ مقاطع سرعت در محدوده بین دو گمانه داخل گالری GR1 و گالری GR1

در این بخش از برداشت مجموع تعداد چشمه‌ها ۲۳ عدد می‌باشد. تعداد ۲۰ عدد از چشمه‌ها مربوط به گمانه شماره یک می‌باشد که در انتهای گالری GR1 و در فاصله بین دو ژئوفون شماره ۲۲ و ۲۳ زده شده است. ۳ چشمه دیگر مربوط به گمانه شماره دو می‌باشد که بین دو ژئوفون شماره ۸ و ۹ و به سمت ورودی گالری زده شده است. فاصله چشمه‌ها در داخل گمانه شماره یک، ۲ متر می‌باشد. به سمت عمق گالری به علت ریزش گمانه در یک قسمت، این فاصله به ۴ الی ۶ متر رسیده است. فاصله چشمه‌ها در داخل گمانه شماره دو به علت ریزشی بودن، ۲۰ الی ۲۲ متر می‌باشد. گیرنده‌ها تعداد ۲۴ عدد ژئوفون مخصوص موج P می‌باشند که در راهرو اصلی گالری GR1 و به فاصله ۲ متر از یکدیگر قرار دارند. در مجموع تعداد ۵۵۲ پرتو لرزه‌ای فرستاده شده، توسط گیرنده‌ها ثبت شده است. شکل (۴-۱۱) موقعیت چشمه‌ها و گیرنده‌ها و منطقه تحت پوشش توسط پرتوهای لرزه‌ای را نشان می‌دهد.



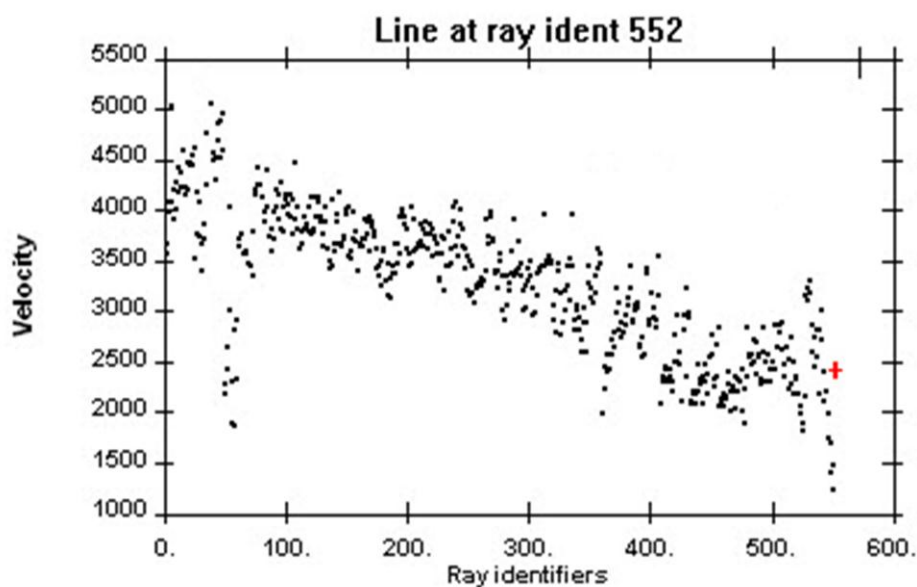
شکل (۴-۱۱): پوشش محدوده بین دو گمانه و سطح گالری GR1 توسط پرتوهای لرزه‌ای در صفحه مختصات YZ.

گالری GR1 در واحد UAS1 حفر شده است و گمانه‌ها در واحدهای سنگی UAS1 و LAS قرار دارند. در تعریف مدل اولیه با توجه به زمان رسیدهای برداشت شده، سرعت شروع توسط نرم‌افزار حدود ۲۳۰۰ متر بر ثانیه محاسبه شده است که با زمین‌شناسی لایه‌های آهکی، آهک مارنی در واحدهای سنگی UAS1 و LAS مطابقت دارد. طبق اطلاعات بدست آمده از حفاری گمانه‌های اکتشافی و بررسی مقاطع زمین‌شناسی رسم شده و زمین‌شناسی موجود و با توجه به حداکثر و حداکثر سرعت محاسبه شده برای پرتوها، محدوده سرعتی ۲۰۰۰ تا ۴۵۰۰ متر بر ثانیه برای وارون‌سازی در نظر گرفته شده است. شکل (۴-۱۲) محدوده سرعت پرتوهای ثبت شده را نشان می‌دهد.

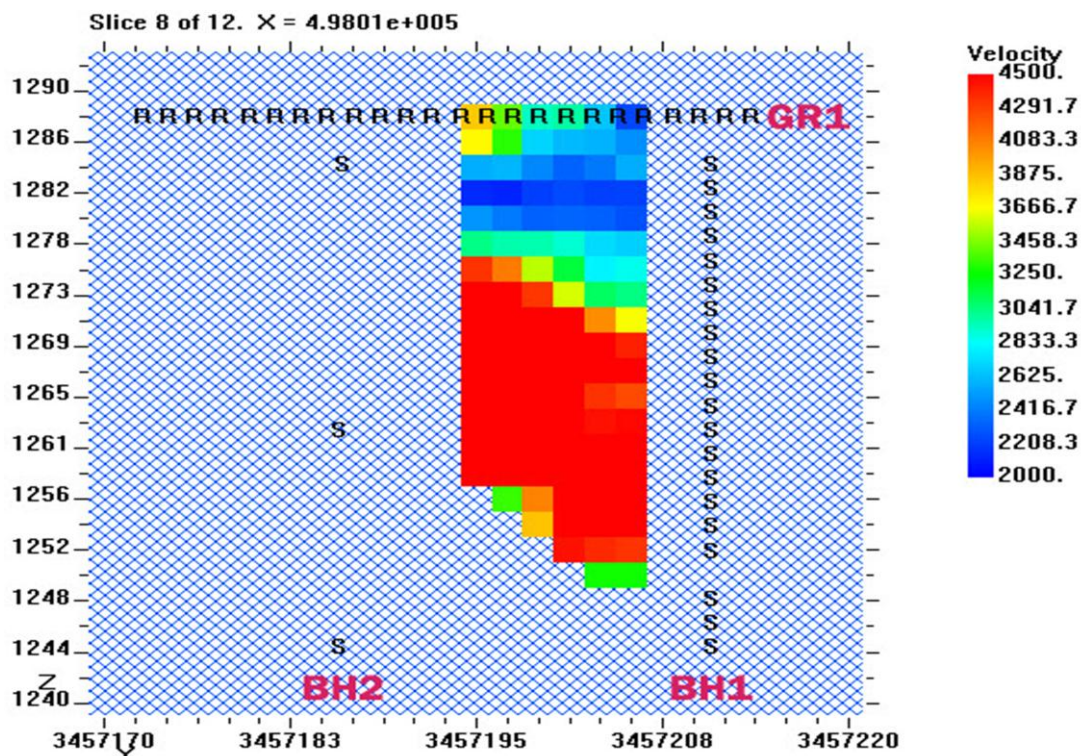
شبکه‌بندی و تعیین ابعاد سلول‌ها با در نظر گرفتن مقادیر حداقل و حداکثر طول جغرافیایی، عرض جغرافیایی و ارتفاع انجام شده است. پس از جایگزینی مقادیر مختلف، بررسی وضوح تصاویر پردازش شده و هم‌چنین کارآیی نرم‌افزار در دادن خروجی در نهایت مقادیر  $X=12$  و  $Y=25$  و  $Z=26$  برای

شبکه‌بندی این مدل در نظر گرفته شد. در نهایت مقاطع سرعت دوبعدی پس از ۱۰ مرحله تکرار پردازش شدند. تعداد کل مقاطع پردازش شده در این قسمت ۱۲ مقطع می‌باشد. در اینجا یک مقطع از ۱۲ مقطع بدست آمده، نمایش داده شده است و تمامی مقاطع مربوط به این قسمت در پیوست الف آورده شده است.

شکل (۴-۱۳) نمایش مقطع شماره ۸ از مدل سرعت پردازش شده پس از ۱۰ مرحله تکرار می‌باشد، که در صفحه مختصات YZ و مختصات  $X=498010$  مقطع برداری شده است. در این مقطع نقاط تحکیم یافته از لحاظ سرعت در فاصله حدود ۱۲ متر از زیر سطح گالری به خوبی قابل تشخیص می‌باشد. نقاط با سرعت کمتر در نزدیک کف گالری می‌تواند به علت وجود میان لایه‌هایی از جنس آهک مارنی باشد. هوازدگی، وجود درزه و شکاف و پدیده‌های ناشی از کاهش تنش در قسمت حفاری شده نیز می‌تواند از دلایل کاهش سرعت در این محدوده باشد. با توجه به این که گمانه‌های حفر شده، در عمق بیشتر وارد واحد سنگی LAS می‌شوند و با توجه به جنس لایه‌های این واحد سنگی، انتظار می‌رود در صورت انجام عملیات در عمق بیشتر با زون‌های کم‌سرعت مواجه شویم.



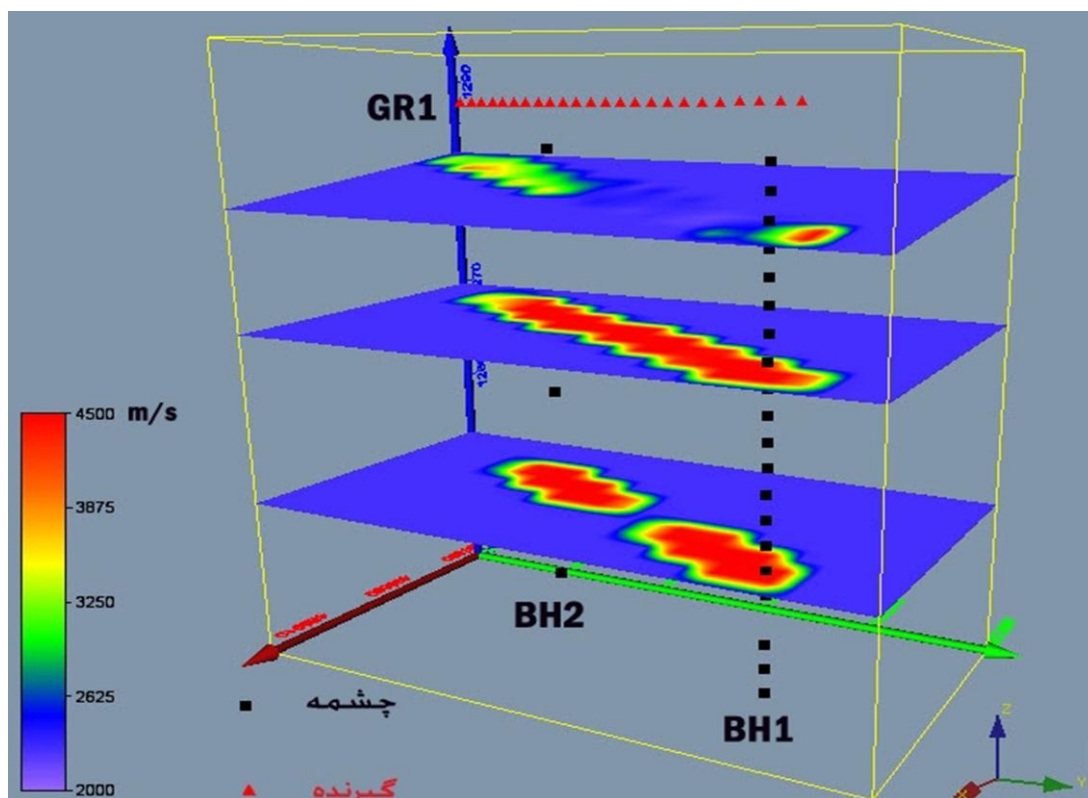
شکل (۴-۱۲): نمایش محدوده سرعت پرتوهای ثبت شده بین گمانه‌های حفر شده و سطح گالری GR1.



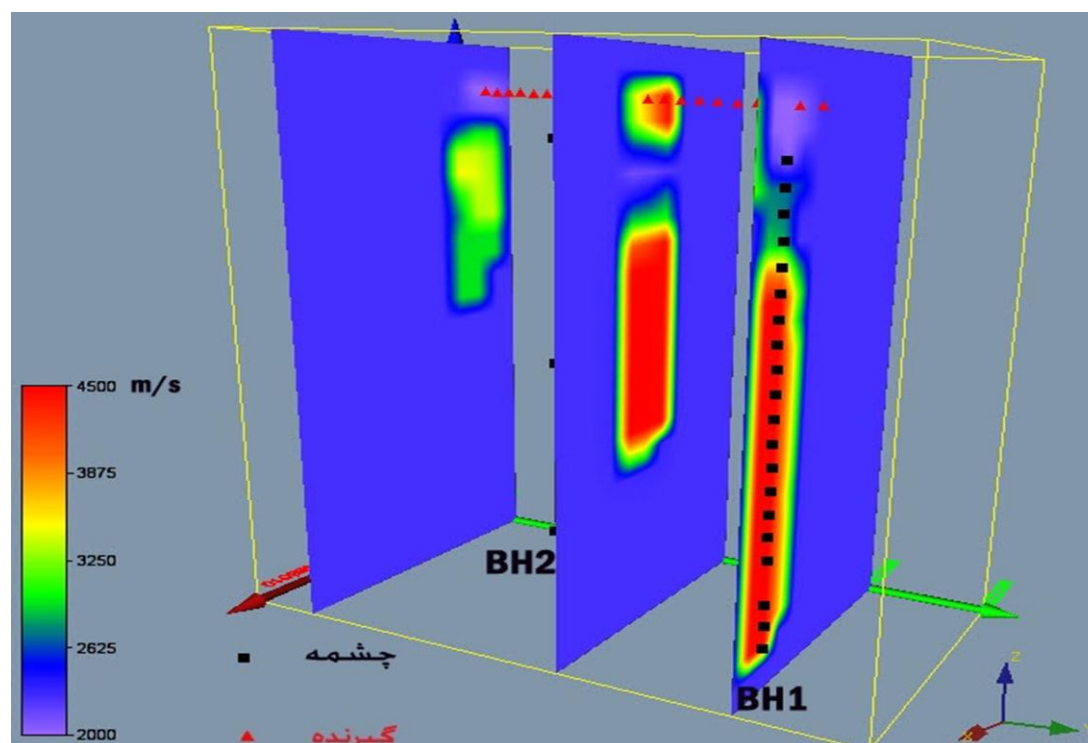
شکل (۴-۱۳): مدل سرعتی بین دو گمانه داخل گالری GR1 و سطح گالری GR1 در محور مختصات  $X=498010$ ، مقطع ۸ از ۱۲.

برای نمایش سه‌بعدی سرعت در این محدوده ابتدا فایل 3dm آن در نرم‌افزار Voxler فراخوانی می‌شود. این فایل شامل ۷۸۰۰ مولفه سرعت محاسبه شده، همراه با مختصات آن‌ها می‌باشد. این عدد برابر تعداد سلول‌های در نظر گرفته شده برای شبکه‌بندی، در نرم‌افزار ژئوتومو است. مقادیر مورد استفاده برای شبکه‌بندی  $X=12$ ،  $Y=25$  و  $Z=26$  می‌باشند، که در نرم‌افزار ژئوتومو نیز همین اعداد استفاده شده‌اند. اشکال (۴-۱۴)، (۴-۱۵) و (۴-۱۶) نمایش مقاطع سرعت پردازش شده با تغییرات طول و عرض جغرافیایی و در عمق‌های متفاوت را نشان می‌دهند. شکل (۴-۱۷) نمایش سه‌بعدی از مدل سرعت با استفاده از سه مقطع لرزه‌ای در صفحات مختلف را نشان می‌دهد. در این تصاویر مرز نقاط تحکیم یافته با سرعت بالا در عمق بیشتر و مناطق کم‌سرعت در محدوده نزدیک به سطح گالری، مشخص شده‌اند. با استفاده از این مدل‌های سرعتی موقعیت و ابعاد زون‌های ضعیف به‌خوبی قابل تشخیص است.

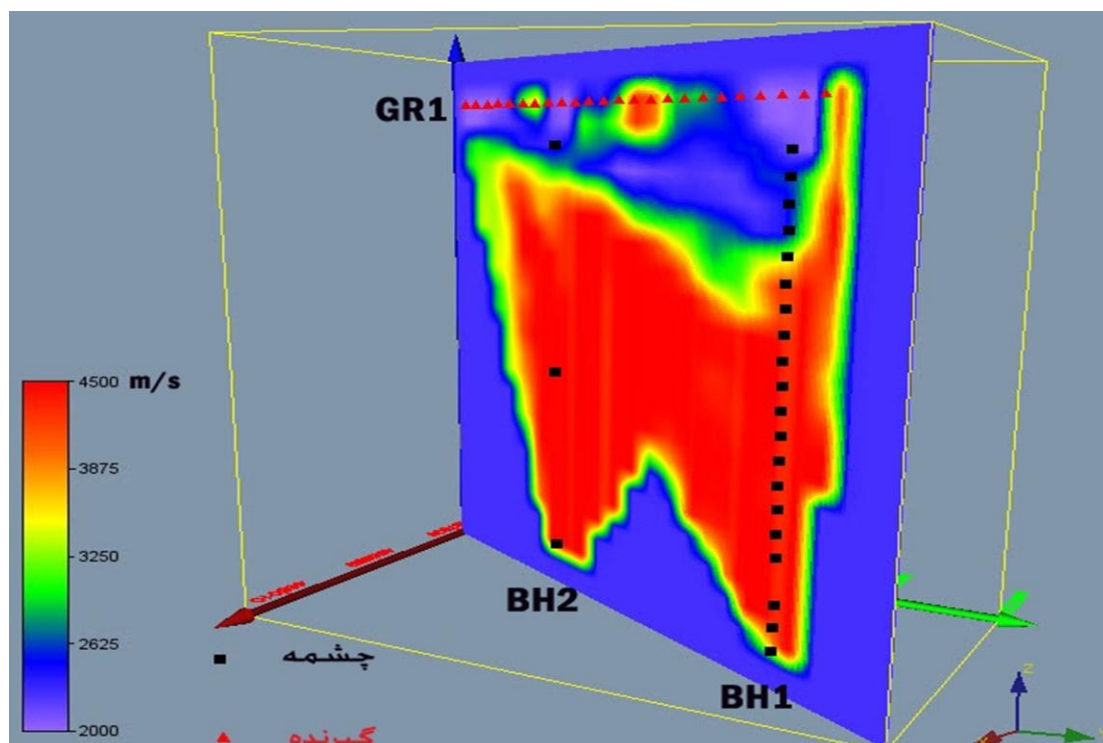




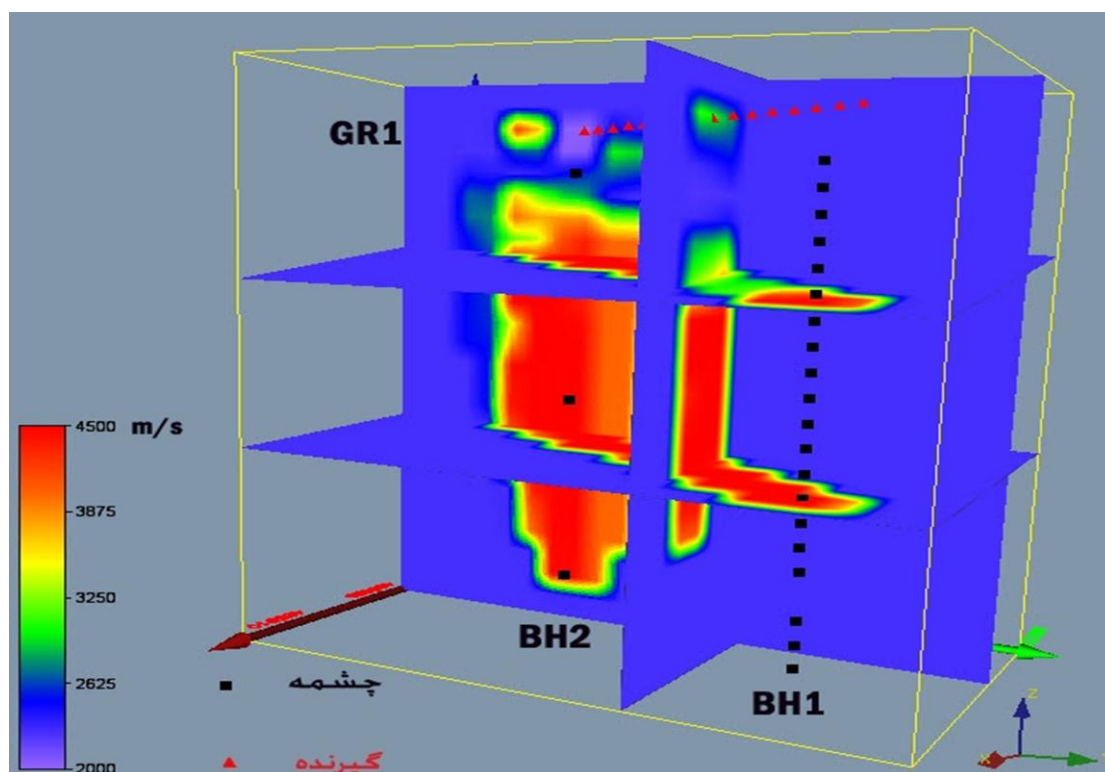
شکل (۴-۱۴): نمایش مقاطع سرعت بین دو گمانه داخل گالری GR1 و سطح این گالری در اعماق مختلف.



شکل (۴-۱۵): نمایش مقاطع سرعت بین دو گمانه داخل گالری GR1 و سطح آن در عرض‌های جغرافیایی مختلف.



شکل (۴-۱۶): مقطع سرعت بین دو گمانه داخل گالری GR1 و سطح آن در طول و عرض جغرافیایی تعیین شده.



شکل (۴-۱۷): نمایش سه‌بعدی از مدل سرعت پردازش شده بین دو گمانه داخل گالری GR1 و سطح این گالری، با استفاده از مقاطع مختلف.

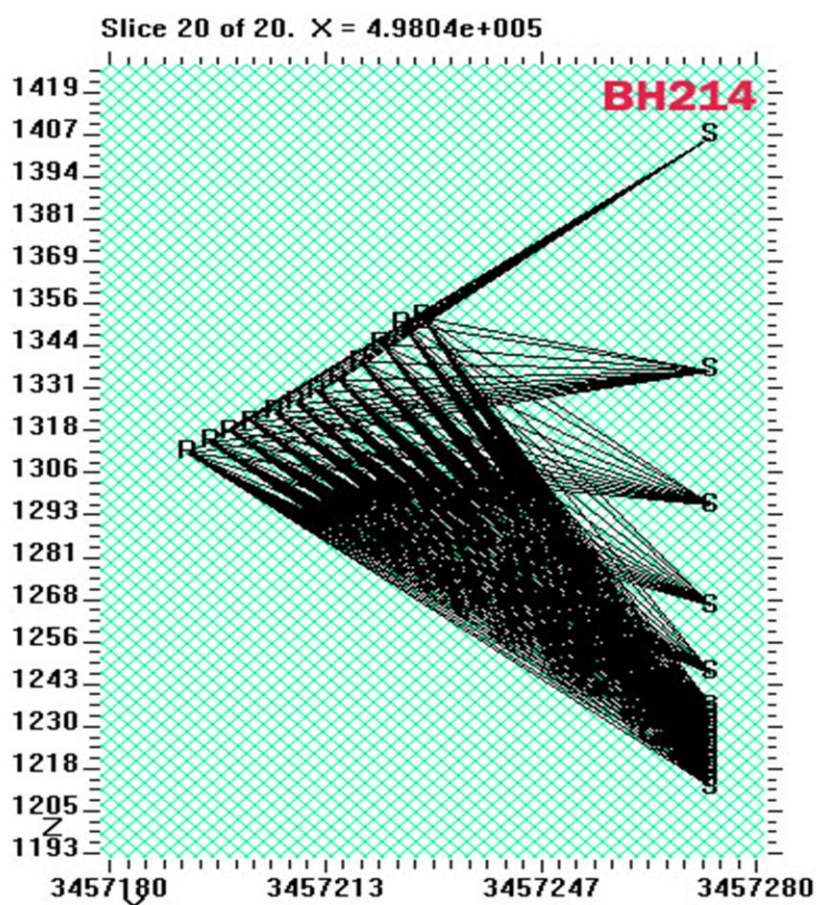
#### ۴-۵-۳ مقاطع سرعت بین گمانه ۲۱۴ در تکیه‌گاه راست و سطح تکیه‌گاه راست

در این بخش از برداشت تعداد چشمه‌ها ۱۸ عدد می‌باشد که در داخل گمانه ۲۱۴ واقع در تکیه‌گاه راست تعبیه شده‌اند. چشمه‌ها در فاصله‌های متفاوت از هم قرار دارند که این فاصله از عمق ۱۹۴ متر تا عمق ۱۷۰ متر، ۲ متر می‌باشد و به سمت بالا فاصله بیشتر می‌شود. گیرنده‌ها تعداد ۱۲ عدد ژئوفون مخصوص موج P می‌باشند که بر روی سطح غیر افقی تکیه‌گاه راست تا حد فاصل گالری GR2 تعبیه شده‌اند. فاصله بین هر کدام از آن‌ها ۶ متر می‌باشد. در مجموع تعداد ۲۱۶ پرتو لرزه‌ای فرستاده شده، توسط ژئوفون‌ها ثبت شده است. شکل (۴-۱۸) پوشش محدوده مورد نظر توسط پرتوهای لرزه‌ای را نشان می‌دهد.

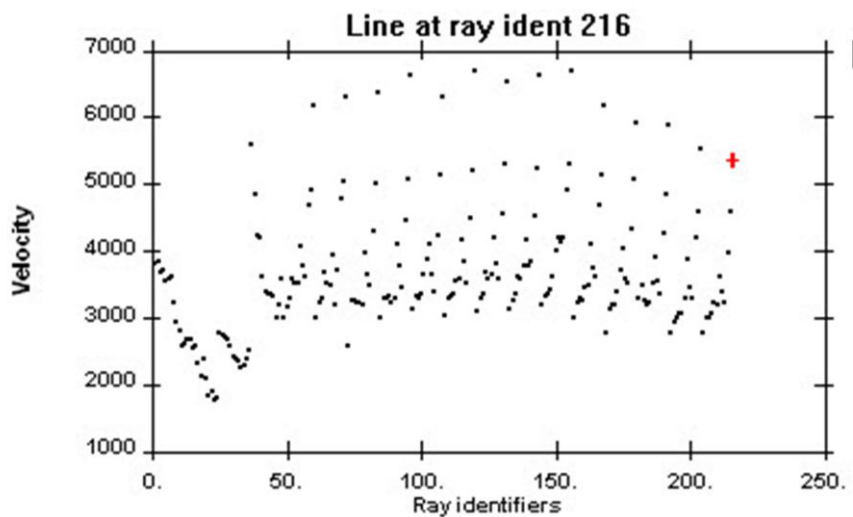
گمانه ۲۱۴ با عمق ۲۰۰ متر و در تراز ۱۴۰۷ متر از سطح دریا در واحدهای سنگی UAS1، UAS2 و LAS حفاری شده است. این گمانه با توجه به عمق زیاد، محدوده وسیعی از واحدهای سنگی را شامل می‌شود. در فصل دوم واحدهای سنگی موجود در این گمانه توضیح داده شدند. در تعریف مدل اولیه با توجه به زمان رسیدهای ثبت شده، سرعت شروع توسط نرم‌افزار ۲۹۸۳ متر بر ثانیه محاسبه شده است. این سرعت با سرعت متوسط واحدهای سنگی موجود که ترکیبی از لایه‌های آهکی، آهک مارنی و مارن می‌باشند، مطابقت دارد. با توجه به زمین‌شناسی موجود و سرعت‌های محاسبه شده برای پرتوها، محدوده سرعتی ۲۰۰۰ تا ۴۵۰۰ متر بر ثانیه برای وارون‌سازی در نظر گرفته شده است. شکل (۴-۱۹) محدوده سرعت‌های محاسبه شده را نشان می‌دهد. همان‌طور که در این شکل دیده می‌شود، پراکندگی سرعت‌ها تا ۶۰۰۰ متر بر ثانیه هم می‌رسد. با رساندن محدوده سرعتی به این عدد، مشاهده شد که وضوح تصاویر نهایی از بین می‌رود. در نهایت پس از انطباق تصاویر با زمین‌شناسی موجود، مناسب‌ترین محدوده سرعتی ۲۰۰۰ تا ۴۵۰۰ متر بر ثانیه تشخیص داده شد.

با در نظر گرفتن محدوده برداشت که مقادیر بزرگی از طول جغرافیایی، عرض جغرافیایی و ارتفاع را شامل می‌شود، تعداد سلول‌ها در شبکه‌بندی خیلی زیاد می‌باشد. با توجه به کارایی نرم‌افزار و وضوح

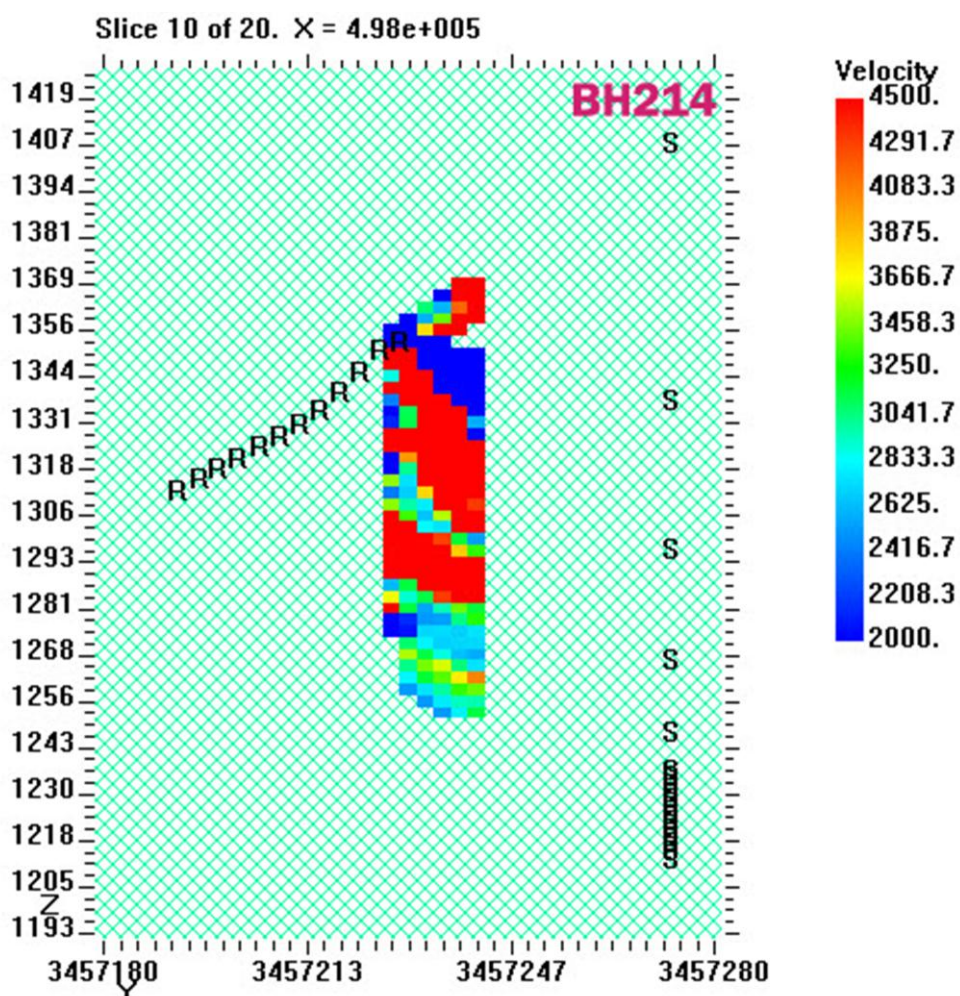
تصاویر نهایی پردازش شده، مقادیر متفاوت با تعداد مراحل تکرار مختلف آزمایش شدند. در نهایت مقادیر  $X=20$ ،  $Y=37$  و  $Z=75$  برای شبکه‌بندی در نظر گرفته شد. پردازش مقاطع سرعت دوبعدی در ۱۰ مرحله تکرار انجام شده است. تعداد کل مقاطع پردازش شده در این قسمت ۲۰ مقطع می‌باشد که در پیوست الف آورده شده‌اند. شکل (۴-۲۰) مقطع شماره ۱۰ از مدل سرعت را نشان می‌دهد که در صفحه مختصات  $YZ$  و مختصات  $X=498000$  مقطع برداری شده است. در این شکل توالی نقاط تحکیم یافته در زیر تکیه‌گاه راست به خوبی قابل تشخیص است. توالی محدوده‌های با سرعت بیشتر و کمتر به علت وجود لایه‌های مختلف سازند آسماری در محدوده مورد بررسی است که از لحاظ زمین‌شناسی و تحکیم یافتگی تا حدودی با هم متفاوت می‌باشند. مناطق با سرعت کمتر که با رنگ آبی مشخص شده‌اند، مناطقی هستند که دارای پتانسیل نشت می‌باشند و نیاز به توجه بیشتر دارند.



شکل (۴-۱۸): پوشش محدوده بین گمانه ۲۱۴ و سطح تکیه‌گاه راست توسط پرتوهای لرزه‌ای.

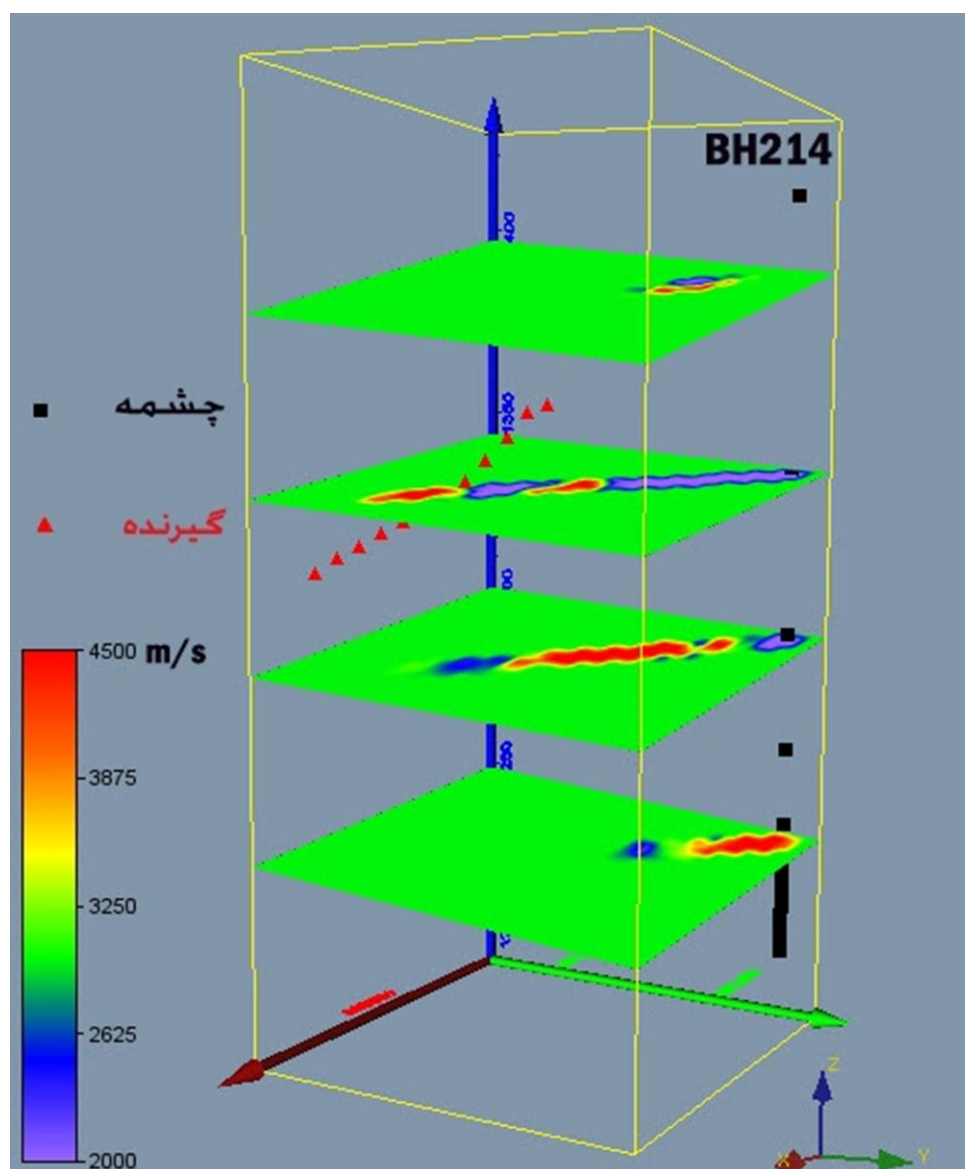


شکل (۴-۱۹): نمایش محدوده سرعت پرتوهای ثبت شده بین گمانه ۲۱۴ و سطح تکیه‌گاه راست.

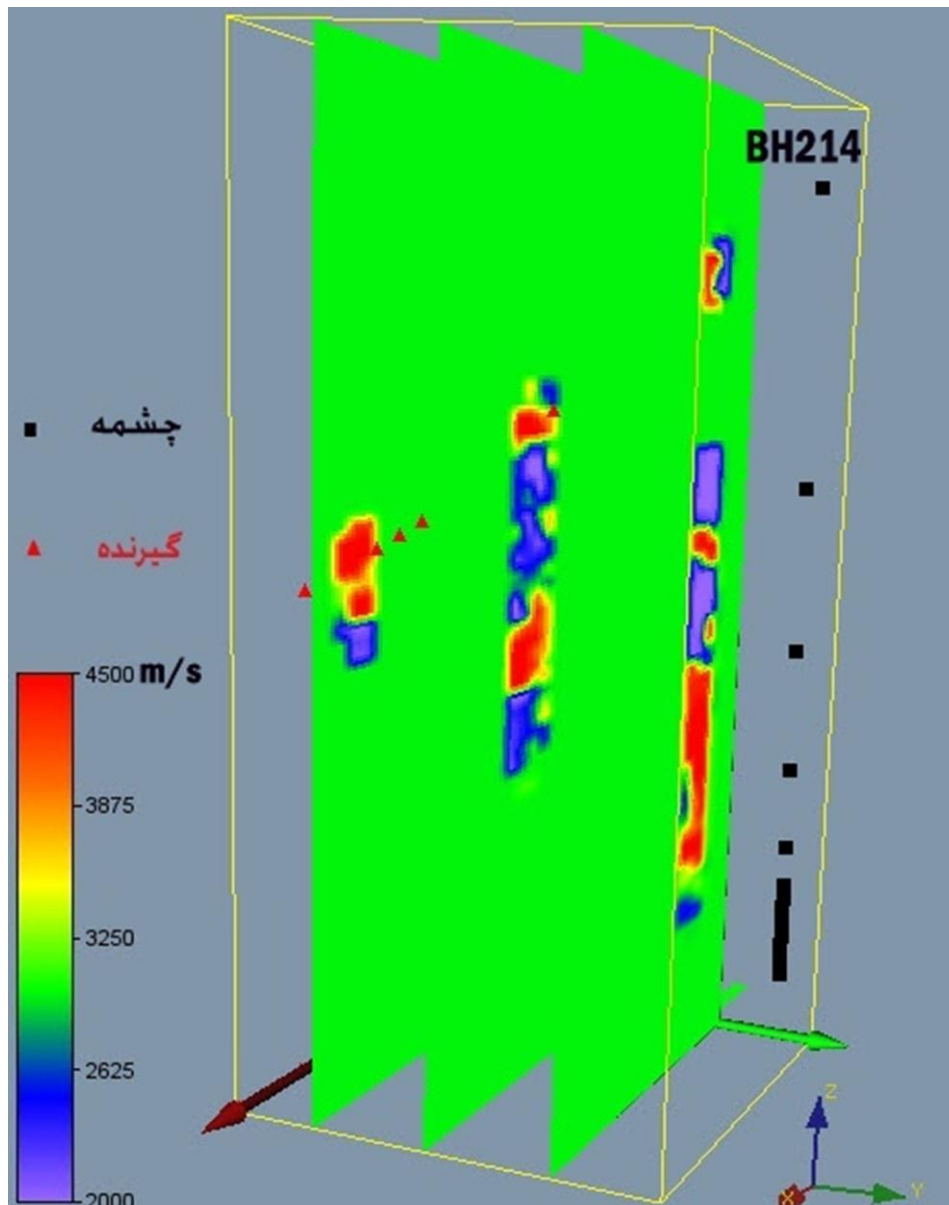


شکل (۴-۲۰): مدل سرعت بین گمانه ۲۱۴ و تکیه‌گاه راست در محور مختصات  $X=498000$ ، مقطع ۱۰ از ۲۰.

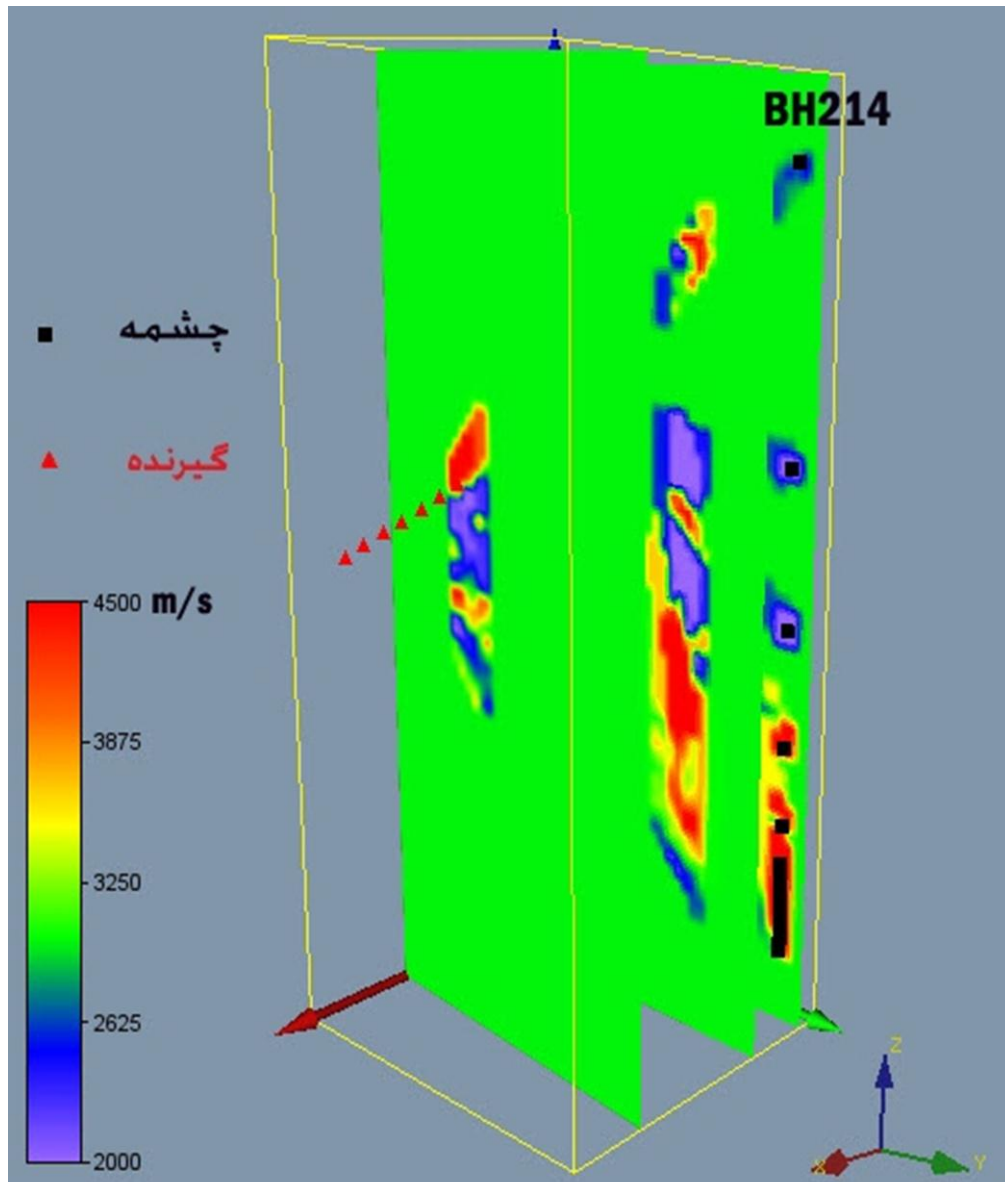
برای رسم تصاویر سه‌بعدی ابتدا فایل 3dm مربوط به این قسمت که شامل ۵۵۵۰۰ مولفه سرعت لرزه‌ای است، فراخوانی می‌شود. اشکال (۲۱-۴)، (۲۲-۴) و (۲۳-۴) مقاطع سه‌بعدی سرعت پردازش شده را در طول و عرض جغرافیایی و عمق‌های متفاوت نشان می‌دهند. شکل (۲۴-۴) یک نمایش سه‌بعدی از مدل سرعت این محدوده را با استفاده از سه مقطع لرزه‌ای در صفحات مختلف نشان می‌دهد. این اشکال توالی نقاط با سرعت بالا و نقاط کم‌سرعت در زیر تکیه‌گاه راست را نشان می‌دهند.



شکل (۲۱-۴): نمایش مقاطع سرعت پردازش شده در محدوده بین گمانه ۲۱۴ و سطح تکیه‌گاه راست در عمق‌های مختلف.

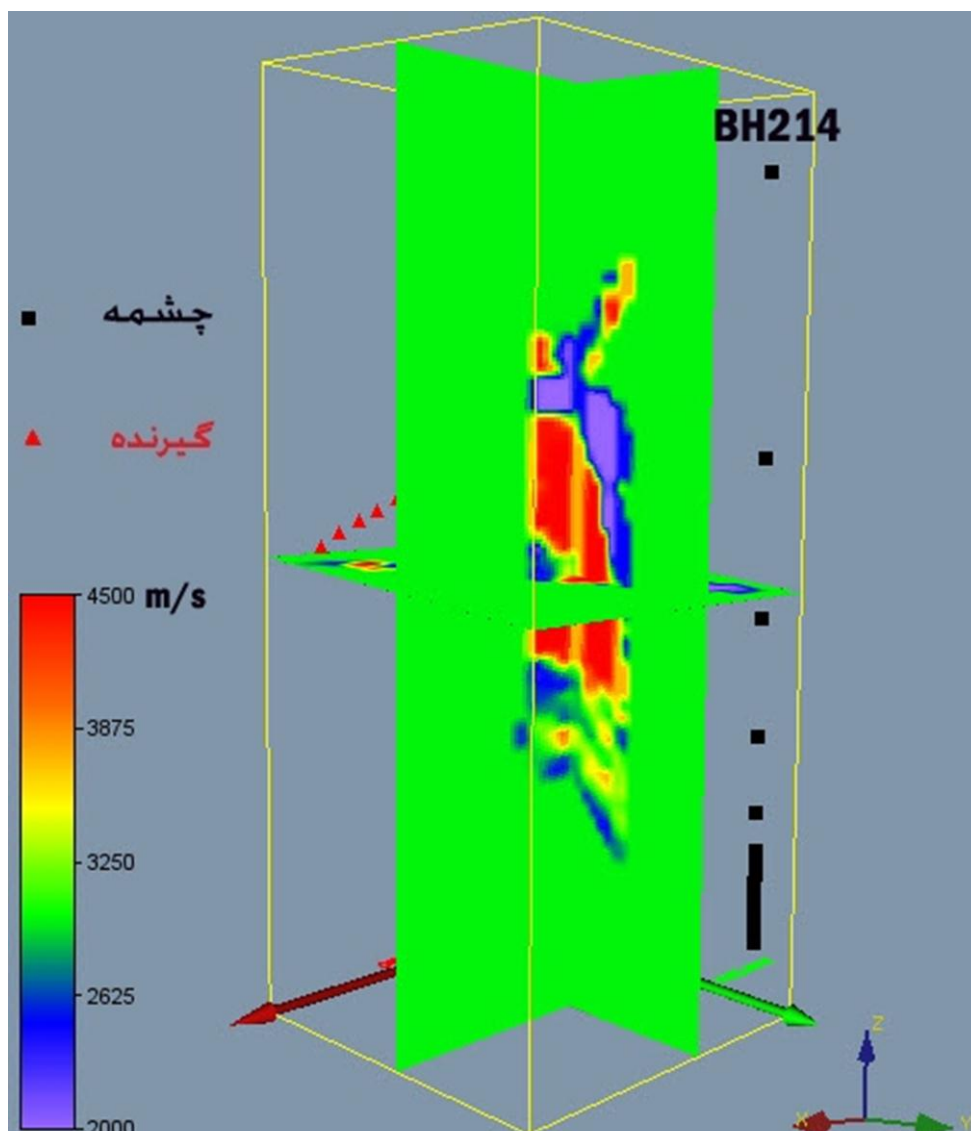


شکل (۴-۲۲): نمایش مقاطع سرعت پردازش شده بین گمانه ۲۱۴ و سطح تکیه‌گاه راست در عرض‌های جغرافیایی مختلف.



شکل (۴-۲۳): مقاطع سرعت پردازش شده بین گالری ۲۱۴ و سطح تکیه‌گاه راست در طول‌های جغرافیایی مختلف.



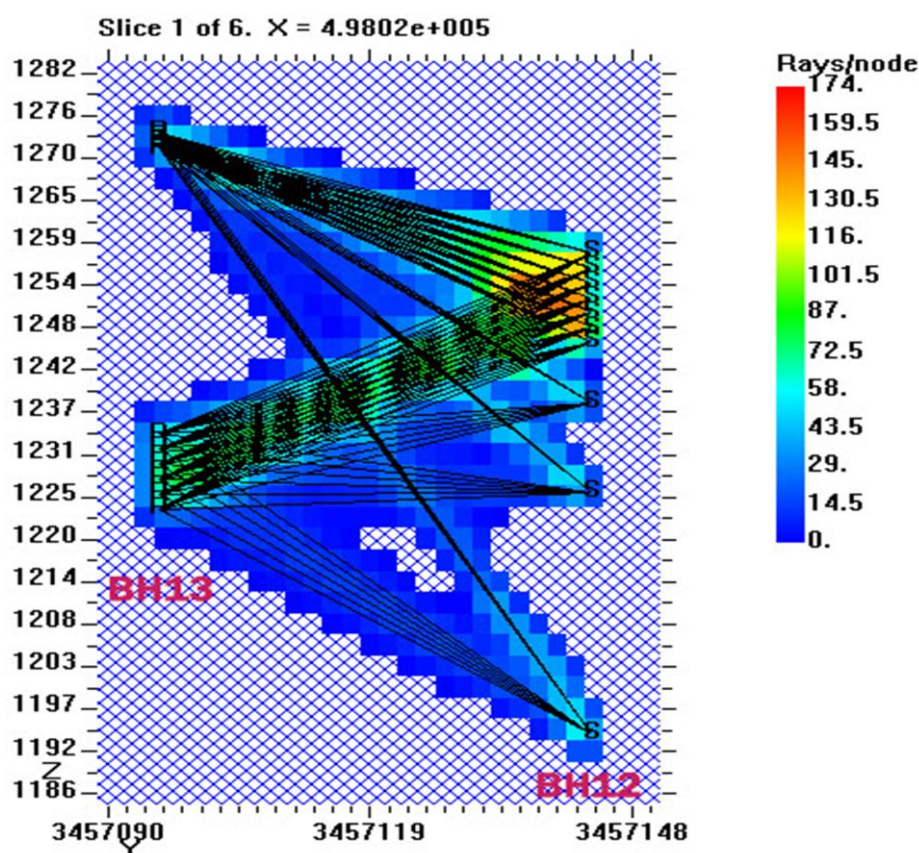


شکل (۴-۲۴): نمایش سه‌بعدی از مدل سرعت پردازش شده بین گمانه ۲۱۴ و سطح تکیه‌گاه راست با استفاده از مقاطع مختلف.

#### ۴-۵-۴ مقاطع سرعت بین گمانه ۱۲ و گمانه ۱۳ در بستر رودخانه

در این بخش از برداشت از ۱۰ چشمه تولید موج استفاده شده است. چشمه‌ها در داخل گمانه BH12 در بستر سمت راست رودخانه قرار دارند. به علت ریزشی بودن گمانه فاصله چشمه‌ها متفاوت است. فاصله تعداد ۷ چشمه از ۱۰ چشمه ۲ متر می‌باشد. سه چشمه دیگر به ترتیب در عمق ۲۱، ۳۴ و ۶۵ متری گمانه قرار دارند. گیرنده‌ها شامل دو دسته می‌باشند. تعداد ۱۲ عدد ژئوفون مخصوص موج P در نزدیک سطح تکیه‌گاه چپ در امتداد مسیر رودخانه تعبیه شده است. فاصله ژئوفون‌ها از یکدیگر ۲ متر

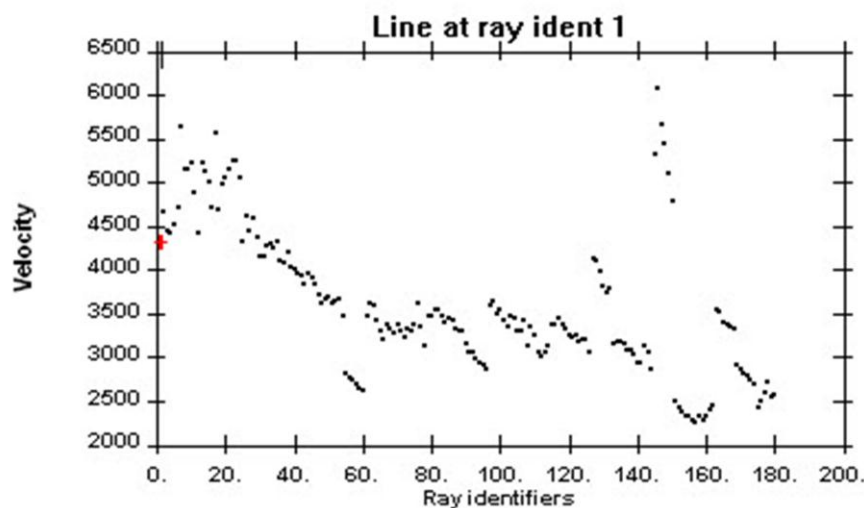
می‌باشد. دسته دیگر گیرنده‌ها ۶ عدد هیدروفون می‌باشند، که در داخل گمانه آب‌دار BH13 در بستر سمت چپ رودخانه تعبیه شده‌اند. هیدروفون‌ها در عمق ۴۶ متر گمانه قرار دارند و فاصله هر کدام از آن‌ها برابر ۲ متر می‌باشد. در مجموع تعداد ۱۸۰ پرتو لرزه‌ای فرستاده شده، توسط گیرنده‌ها ثبت شده است. شکل (۴-۲۵) موقعیت چشمه‌ها و گیرنده‌ها در نمای دوبعدی و پوشش محدوده مورد نظر توسط پرتوهای لرزه‌ای را نشان می‌دهد.



شکل (۴-۲۵): پوشش محدوده بین گمانه ۱۲ و ۱۳ و ساحل چپ رودخانه توسط پرتوهای لرزه‌ای.

گمانه شماره ۱۲ و ۱۳ در واحد LAS سازند آسماری حفاری شده‌اند. همان‌طور که در توضیحات زمین‌شناسی اشاره شد، این واحد تناوبی از سنگ‌های آهکی با ضخامت متوسط، آهک‌های مارنی، مارن و درصد کمی دولومیت می‌باشد. با توجه به زمان رسیدهای ثبت شده، سرعت شروع توسط نرم-افزار ۳۲۱۱ متر بر ثانیه در نظر گرفته شده است که با سرعت متوسط سنگ‌های آهکی و آهک مارنی

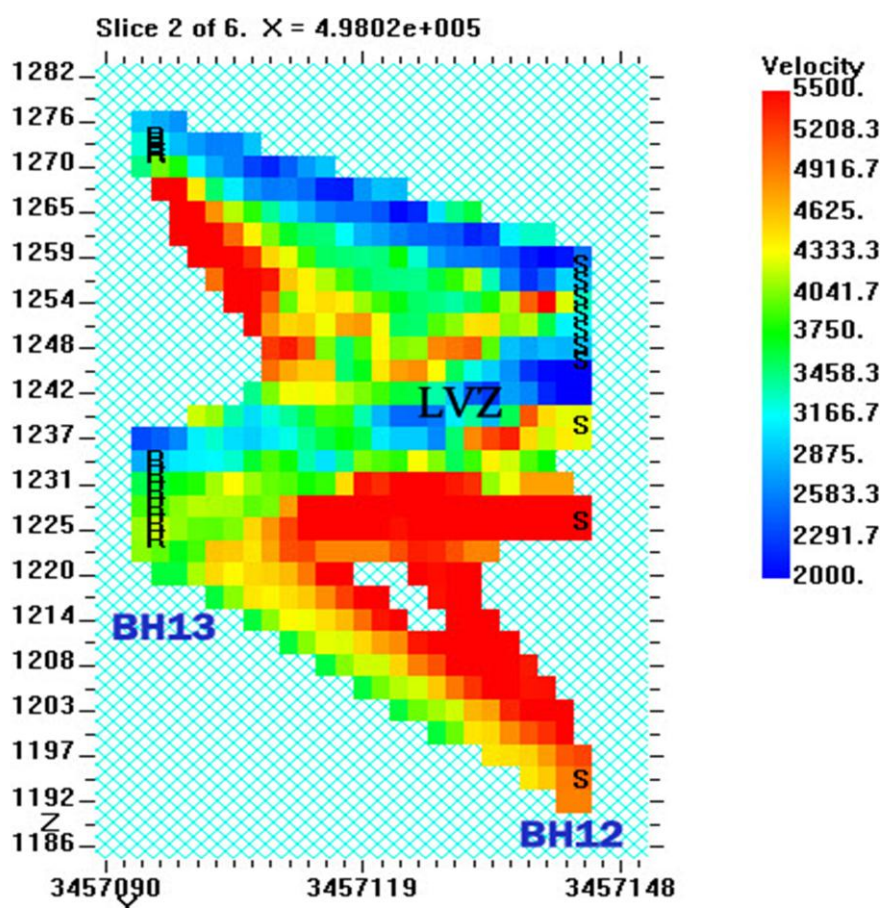
سازند آسماری مطابقت دارد. با در نظر گرفتن محدوده سرعت‌های محاسبه شده پرتوها و بررسی حالت‌های مختلف و وضوح تصاویر بدست آمده و مقایسه تصاویر با زمین‌شناسی موجود، در نهایت محدوده سرعتی ۲۰۰۰ تا ۵۵۰۰ متر بر ثانیه برای وارون‌سازی در نظر گرفته شد. شکل (۴-۲۶) نمایش محدوده سرعت‌های محاسبه شده برای پرتوهای لرزه‌ای ثبت شده را نشان می‌دهد.



شکل (۴-۲۶): نمایش محدوده سرعت پرتوهای لرزه‌ای بین گمانه‌های ۱۲ و ۱۳ و ساحل چپ رودخانه.

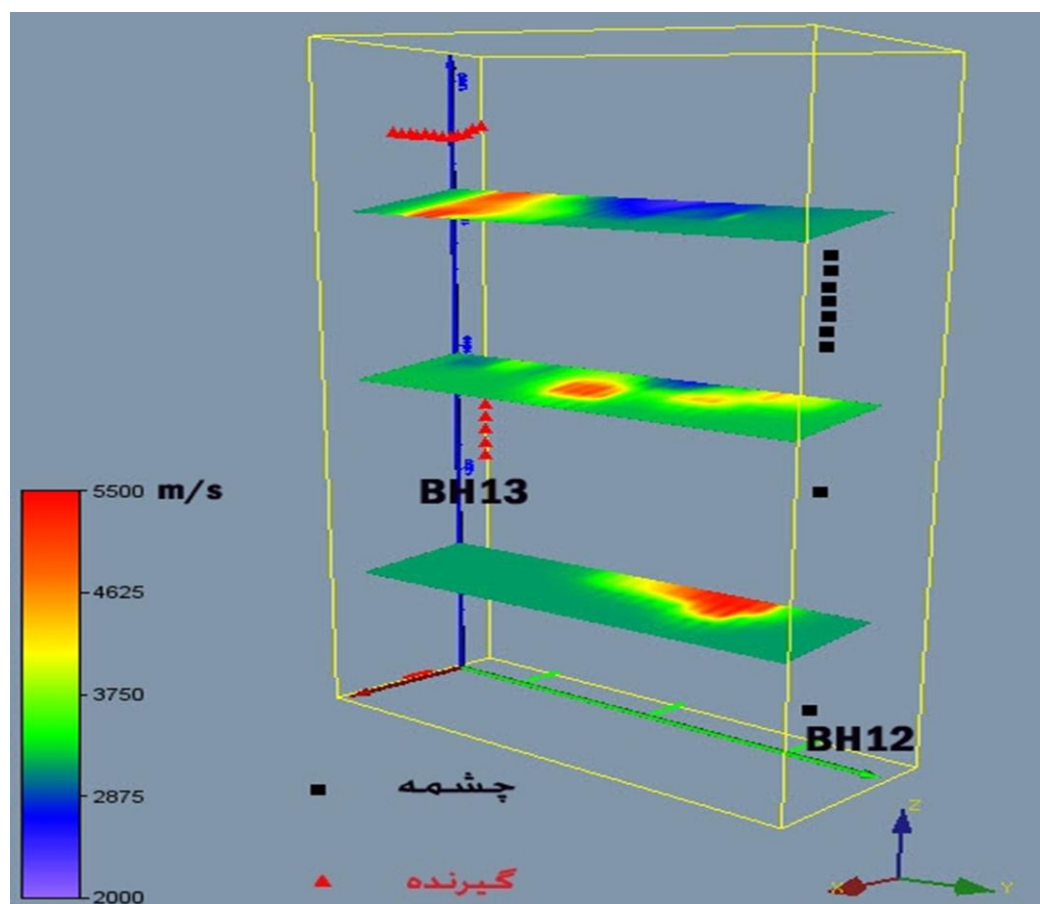
برای شبکه‌بندی و تعیین ابعاد سلول‌ها، با توجه به حداقل و حداکثر طول و عرض جغرافیایی و ارتفاع موجود در منطقه، مقادیر متفاوتی جایگزین شدند. در نهایت با در نظر گرفتن تعداد تکرارها، وضوح تصاویر نهایی و کارایی نرم‌افزار در پردازش مدل نهایی، مقادیر  $X=6$ ،  $Y=30$  و  $Z=35$  برای شبکه‌بندی این مدل استفاده شد. پردازش مقاطع سرعت دوبعدی با ۸ مرحله تکرار وارن‌سازی، انجام شده است. تعداد ۶ مقطع سرعت دوبعدی در صفحه مختصات  $YZ$  برای این محدوده پردازش شده است. تمام مقاطع در پیوست الف آورده شده‌اند. شکل (۴-۲۷) مقطع شماره ۲ را که در مختصات  $X=498020$  مقطع‌برداری شده است، نشان می‌دهد. در این مقطع توالی لایه‌ها از سرعت کم تا زیاد و نقاط با سرعت کمتر، در محدوده زیر بستر رودخانه به‌خوبی قابل تشخیص است. با بررسی این لایه‌های سرعتی می‌توان شکستگی‌ها و خردشدگی‌های احتمالی را بررسی کرد. همان‌طور که در مدل مشاهده

می‌شود، سرعت در عمق کم بستر، از ۲۰۰۰ متر بر ثانیه شروع می‌شود و در اعماق ۵۰ الی ۶۰ متر به ۴۰۰۰ تا ۵۵۰۰ متر بر ثانیه هم می‌رسد. سرعت کم در مناطق با عمق کمتر می‌تواند به علت هوازدگی و تماس مداوم لایه‌های بالایی با آب رودخانه باشد. مقادیر بالای سرعت در اعماق زیاد نشان دهنده تحکیم یافتگی لایه‌های آهکی زیرین می‌باشد. به‌طور کلی نقاط آبی رنگ با سرعت کمتر مناطقی هستند که پتانسل بالایی برای نشت در بستر دارند. در ارتفاع ۱۲۳۷ تا ۱۲۴۲ متر و در عرض جغرافیایی  $Y=3457125$  در محدوده مشخص شده سرعت به‌طور محسوس نسبت به نقاط اطراف کمتر گشته است. این کاهش سرعت می‌تواند به علت وجود یک زون کارستی همراه با پرشدگی رسی در این ناحیه باشد که در مقاطع سه‌بعدی نیز دیده می‌شود.

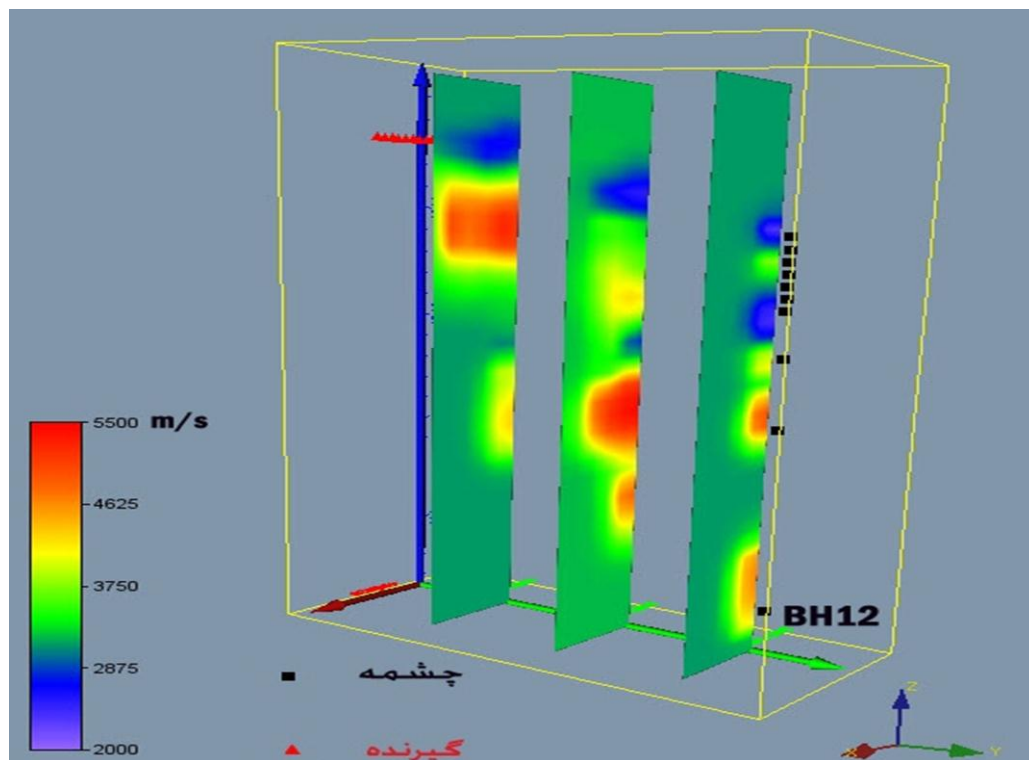


شکل (۴-۲۷): مدل سرعتی بین گمانه ۱۲ و ۱۳ و ساحل چپ رودخانه در محور مختصات  $X=498020$ ، مقطع ۲ از ۶.

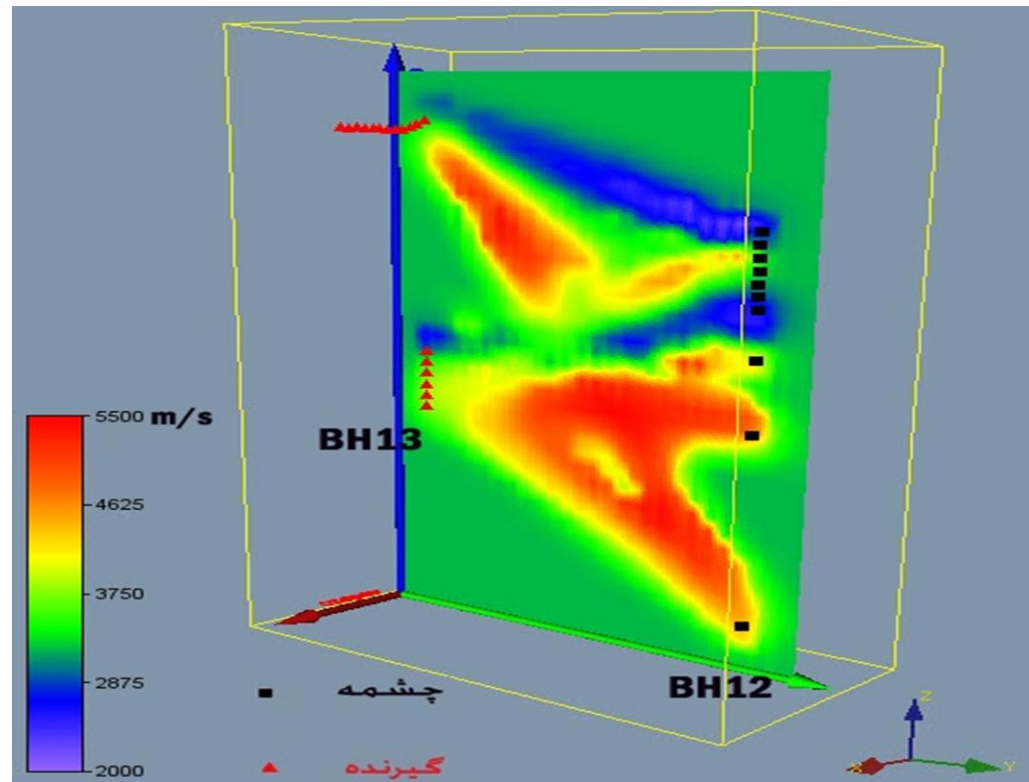
برای رسم تصاویر سه‌بعدی ابتدا با فراخوانی فایل 3dd موجود، موقعیت فضایی چشمه‌ها و گیرنده‌ها ترسیم می‌شود. موقعیت گیرنده‌های تعبیه شده در امتداد ساحل چپ رودخانه که در نمایش دوبعدی قابل تشخیص نبودند، در این جا بخوبی مشخص است. پس از آن فایل 3dm تهیه شده، فراخوانی می‌شود. این فایل شامل ۶۳۰۰ مؤلفه سرعت لرزه‌ای و مختصات سه‌بعدی مربوط به آن‌ها می‌باشد. مقادیر مورد استفاده برای شبکه‌بندی در این جا نیز  $X=6$ ,  $Y=30$  و  $Z=35$  می‌باشند. اشکال (۴-۲۸)، (۴-۲۹) و (۴-۳۰) مقاطع سرعت لرزه‌ای مربوط به بستر رودخانه را در طول و عرض جغرافیایی و عمق‌های مختلف نشان می‌دهند. شکل (۴-۳۱) یک نمایش سه‌بعدی از مدل سرعت پردازش شده را با استفاده از چندین مقطع لرزه‌ای در صفحات مختلف، نشان می‌دهد. عمق و ابعاد نواحی کم‌سرعت در مدل‌های پردازش شده به خوبی قابل تشخیص می‌باشد.



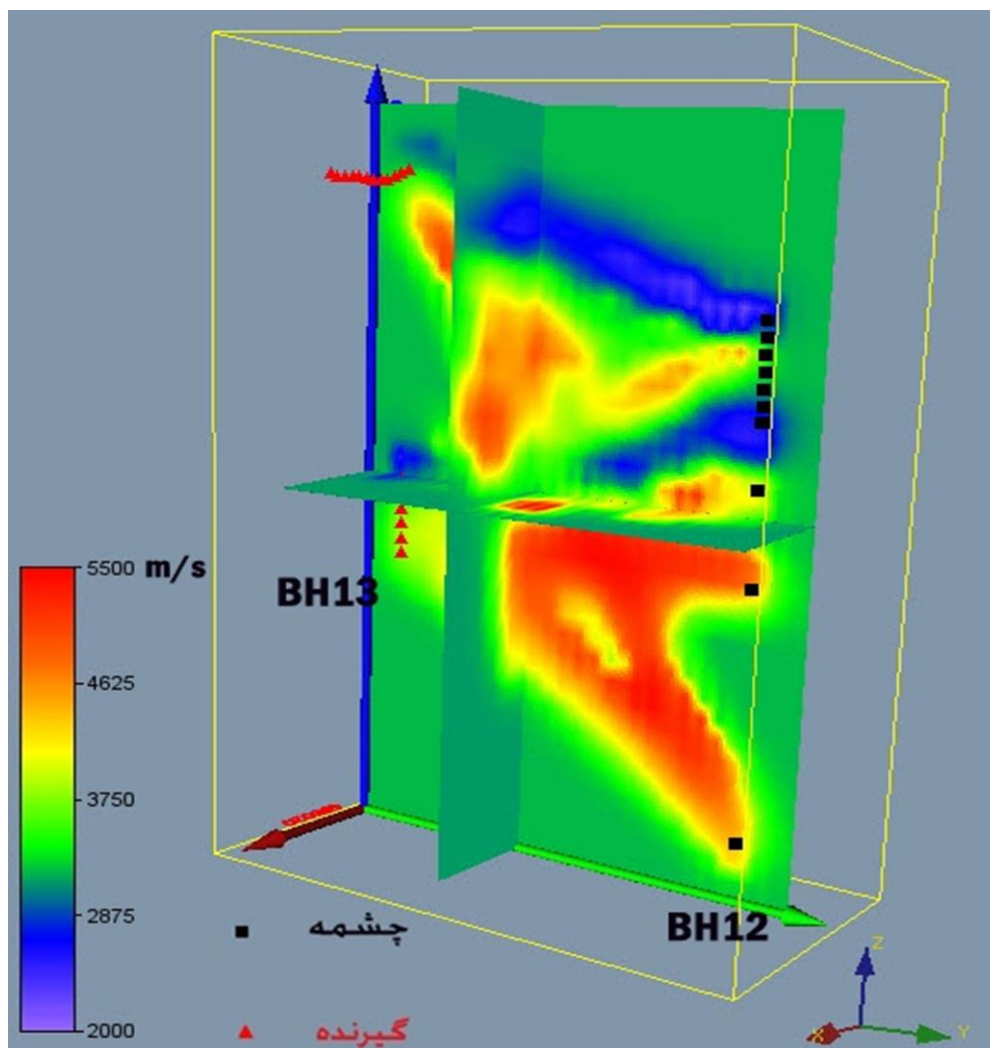
شکل (۴-۲۸): مقاطع سرعت پردازش شده بین گمانه‌های ۱۲ و ۱۳ و ساحل چپ در عمق‌های مختلف.



شکل (۴-۲۹): مقاطع سرعت بین گمانه‌های ۱۲ و ۱۳ و ساحل چپ در عرض‌های جغرافیایی مختلف.



شکل (۴-۳۰): مقطع سرعت بین گمانه‌های ۱۲ و ۱۳ و ساحل چپ در یک طول جغرافیایی مشخص.



شکل (۴-۳۱): نمایش سه‌بعدی مدل سرعت پردازش شده بین گمانه‌های ۱۲ و ۱۳ و ساحل چپ با استفاده از مقاطع مختلف.

#### ۴-۶ نمایش توپوگرافی محدوده و ترسیم مدل‌های سرعتی بر روی آن

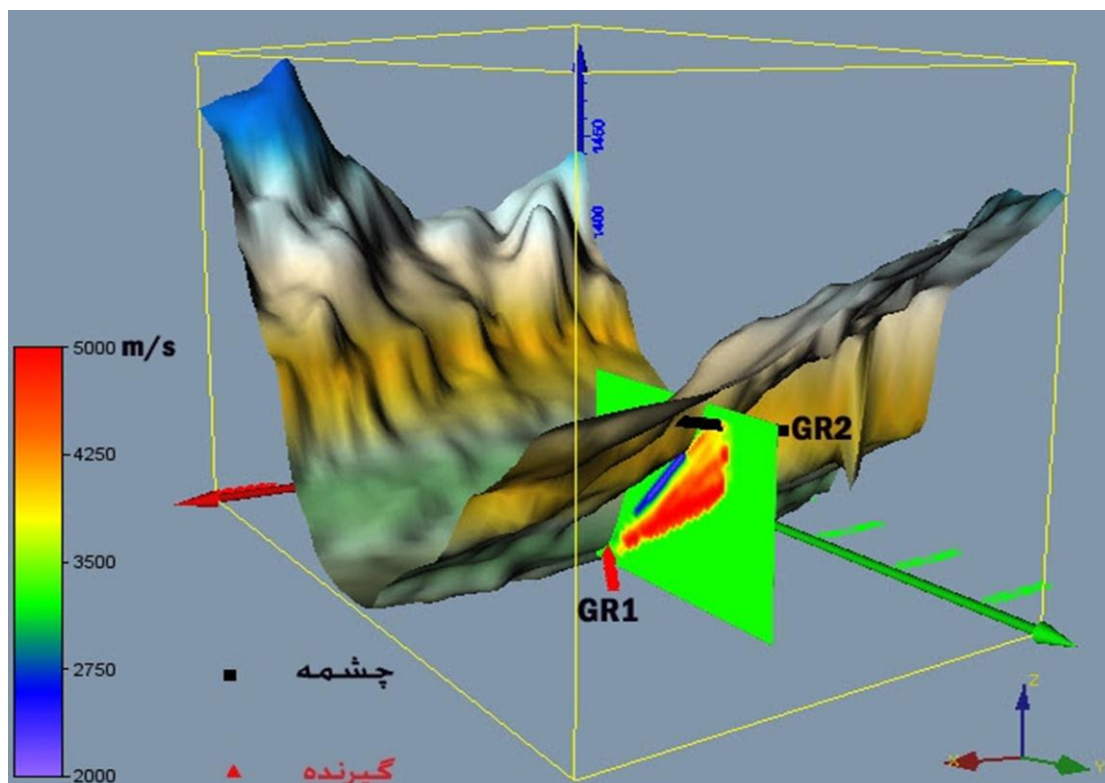
برای نمایش توپوگرافی منطقه در حالت سه‌بعدی مورد نیاز، ابتدا از فایل رقومی موجود (فایل .dwg) مختصات X، Y و Z مربوط به تمام نقاط محدوده مورد بررسی استخراج شد. این فایل شامل مختصات سه‌بعدی ۱۵۰۰۰ نقطه موجود در منطقه می‌باشد. برای انجام این کار از نرم‌افزار Global Mapper 12 استفاده شد. پس از آن با فراخوانی فایل تهیه شده در نرم‌افزار Surfer کار گریدبندی داده‌ها انجام و فایل grd مورد نیاز برای استفاده آماده شد. در نهایت با فراخوانی فایل آماده شده، توپوگرافی منطقه

در حالت سه‌بعدی در نرم‌افزار Voxler ترسیم شد. پس از ترسیم توپوگرافی، موقعیت چشمه‌ها، گیرنده‌ها و مدل‌های سرعت مربوط به هر قسمت بر روی آن پیاده‌سازی شد.

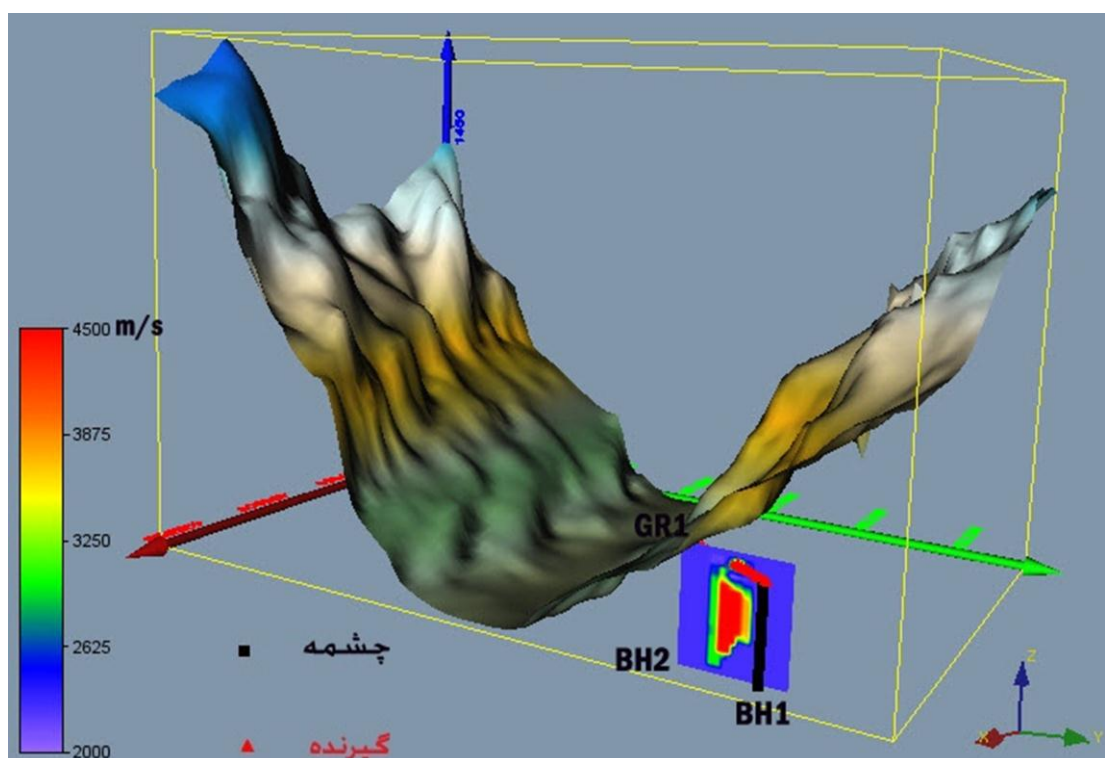
نمایش مدل‌های سرعت بر روی توپوگرافی منطقه، موقعیت و محدوده مناطق پرسرعت و کم‌سرعت در تکیه‌گاه و بستر سد را با وضوح بهتر نسبت به قبل نشان می‌دهد. اشکال (۴-۳۲)، (۴-۳۳)، (۴-۳۴) و (۴-۳۵) نمایش جداگانه هر کدام از مدل‌های سرعتی را بر روی توپوگرافی منطقه نشان می‌دهند. در شکل (۴-۳۲) نواحی کم‌سرعت در محدوده بین دهانه گالری‌های GR1 و GR2 با رنگ آبی قابل مشاهده است. به سمت داخل این محدوده، با فشردگی واحدهای سنگی افزایش سرعت دیده می‌شود. در شکل (۴-۳۳) نواحی کم‌سرعت در عمق کمتر و نزدیک به کف گالری و نواحی با سرعت بالاتر در عمق بیشتر در مقطع آورده شده، دیده می‌شود. در شکل (۴-۳۴) تناوبی از نواحی با سرعت کمتر و بیشتر در محدوده تکیه‌گاه راست دیده می‌شود. در شکل (۴-۳۵) نواحی با سرعت کمتر در نزدیک بستر رودخانه و در عمق بیشتر قابل مشاهده است.

شکل (۴-۳۶) نمایش تمام مدل‌های سرعت را بر روی توپوگرافی به تصویر کشیده است. این شکل نمایش کلی موقعیت گالری‌ها، گمانه‌ها و مدل‌های سرعت تهیه‌شده در تکیه‌گاه راست و بستر سد خرسان ۳ می‌باشد. این شکل محدوده مناطق بررسی شده را به خوبی نشان می‌دهد. تمام زون‌های تحکیم نیافته در محدوده‌های بررسی شده، که منطبق بر نواحی کم‌سرعت می‌باشند، در این شکل به رنگ آبی دیده می‌شوند. این نواحی بالاترین پتانسیل نشست آب در تکیه‌گاه و بستر سد را دارند. بررسی مقاطع سرعت بدست آمده مربوط به تکیه‌گاه راست و بستر رودخانه و مقایسه آنها با نتایج مطالعات مکانیک سنگ، نشان دهنده کیفیت پایین‌تر توده سنگ در بستر رودخانه نسبت به تکیه‌گاه راست می‌باشد.

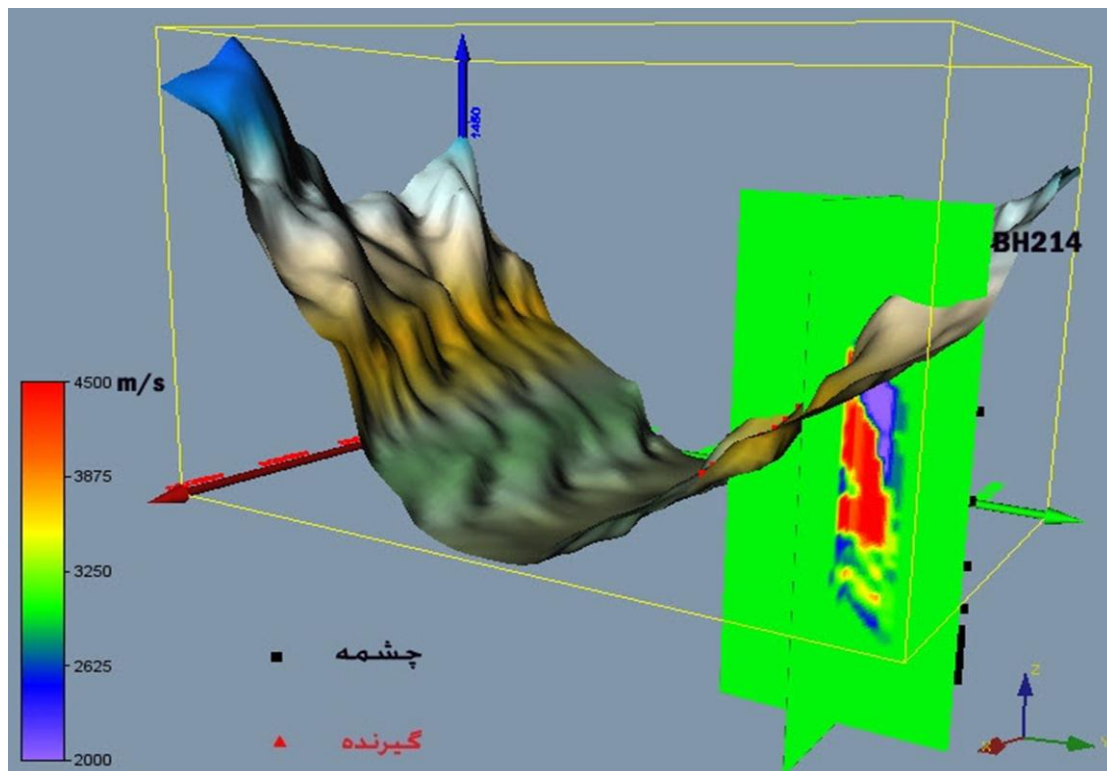




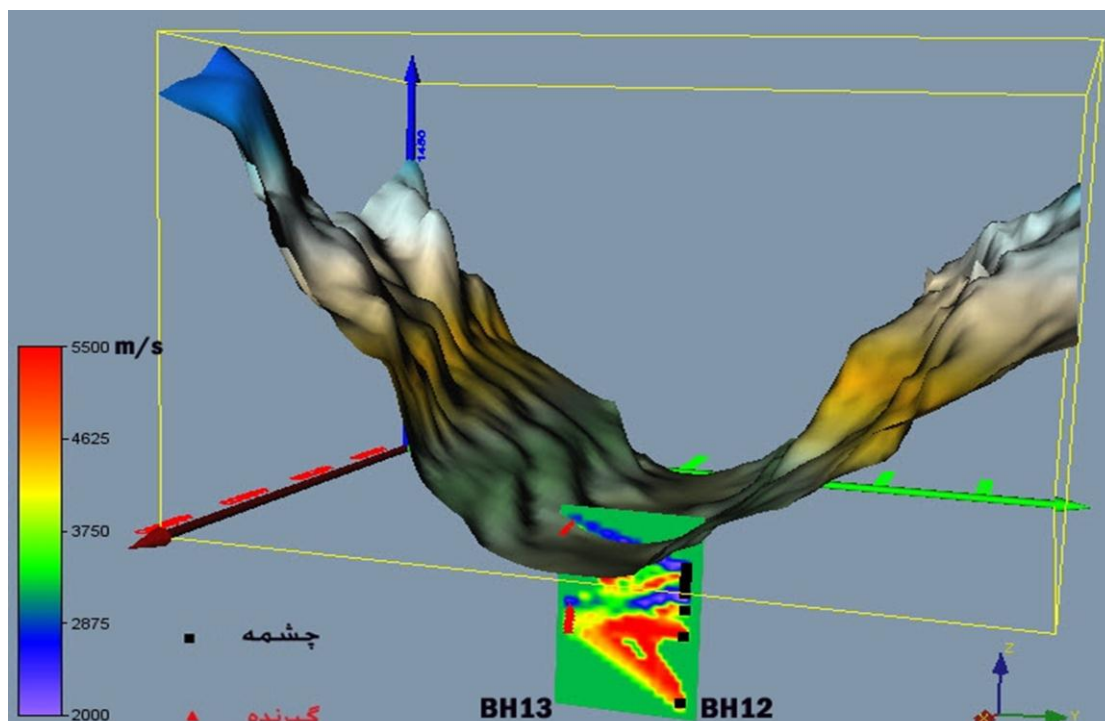
شکل (۴-۳۲): نمایش مدل سرعت بین دو گالری GR1 و GR2 بر روی توپوگرافی منطقه.



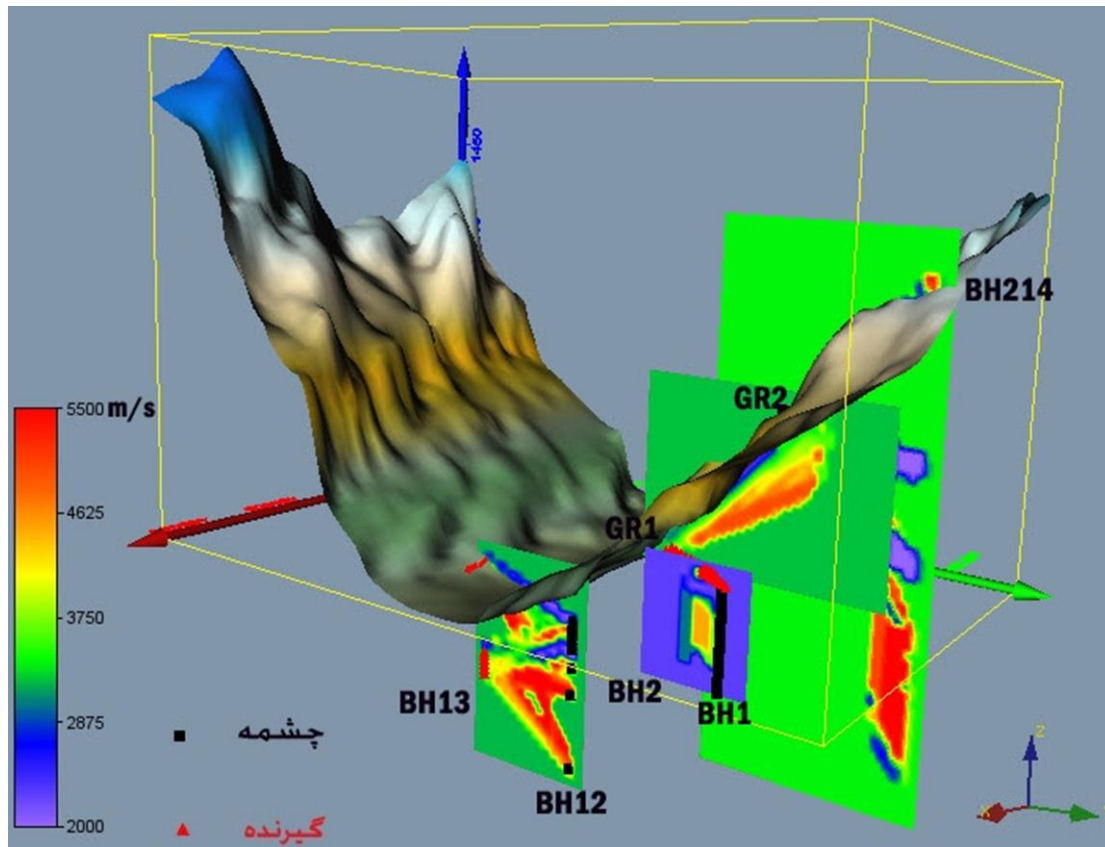
شکل (۴-۳۳): نمایش مدل سرعت بین دو گمانه کف گالری GR1 و سطح گالری بر روی توپوگرافی منطقه.



شکل (۴-۳۴): نمایش مدل سرعت بین گالری ۲۱۴ و سطح تکیه‌گاه راست بر روی توپوگرافی منطقه.



شکل (۴-۳۵): نمایش مدل سرعت بین گمانه ۱۲ و ۱۳ در بستر رودخانه و ساحل چپ بر روی توپوگرافی منطقه.



شکل (۴-۳۶): نمایش تمام مدل‌های سرعت پردازش شده بر روی توپوگرافی منطقه سد خرسان ۳.

## فصل پنجم

### نتیجه‌گیری و پیشنهادات

## ۵-۱ نتیجه‌گیری

در این پایان‌نامه از اولین زمان رسیدهای موج P جهت به‌دست آوردن مدل‌های سرعتی در چهار محدوده مختلف در تکیه‌گاه راست و بستر سد خرساں ۳ استفاده شده است. مدل‌های سرعتی به‌دست آمده، وضعیت لایه‌ها و ساختارهای زیرسطحی را نشان می‌دهند. در ادامه نتایج مربوط به انجام این مطالعه آورده شده است.

- در مدل‌های سرعت دوبعدی و سه‌بعدی به‌دست آمده در این مطالعه، مناطق با کاهش سرعت، محدوده‌های مورد نظر جهت بررسی می‌باشند. این مناطق، نواحی با قابلیت نشست در تکیه‌گاه و بستر سد می‌باشند.
- علت کاهش سرعت در محدوده‌های بررسی شده وجود لایه‌های تحکیم نیافته، هوازگی لایه-های سطحی و نزدیک سطح، هوازگی در محدوده حفریات و سیستم درزه‌ها و شکستگی‌های موجود در منطقه می‌باشند.
- توموگرافی لرزه‌ای ساختارها و نواحی کم‌سرعت را که منطبق بر این لایه‌های ضعیف، حفره‌ها و شکستگی‌ها می‌باشند و نواحی با سرعت بالا را که منطبق بر لایه‌های تحکیم یافته هستند، به‌خوبی شناسایی کرد.
- در تکیه‌گاه راست و در محدوده بین گالری‌های GR1 و GR2، بر اساس مدل سرعت به‌دست آمده، به‌جز منطقه بین دهانه ورودی گالری‌ها که به علت هوازگی کیفیت سنگ نسبت به اطراف اندکی پایین‌تر (دارای سرعت کمتر) است، در بقیه مناطق و به‌خصوص به سمت داخل، توده سنگ از کیفیت بهتری (دارای سرعت بیشتر) برخوردار است.
- در تکیه‌گاه راست و در عمق‌های زیاد با توجه به وجود لایه‌های واحد سنگی LAS انتظار می‌رود که تناوبی از لایه‌های کم‌سرعت و پرسرعت وجود داشته باشند. مقاطع لرزه‌ای برداشت شده در محدوده بین گمانه ۲۱۴ و سطح تکیه‌گاه راست و هم‌چنین گمانه‌های ۱ و ۲ در

داخل گالری GR1 این موضوع را نشان می‌دهند. بررسی نتایج مطالعات مکانیک سنگ و شاخص کیفی توده سنگ نیز نشان دهنده کیفیت پایین‌تر توده سنگ در این واحد سنگی می‌باشد.

- در محدوده بستر رودخانه وجود لایه کم‌سرعت در عمق کم به خوبی مشهود است. سرعت کم این لایه نزدیک سطح به علت هوازدگی و تماس با جریان آب می‌باشد. در اعماق بیشتر نیز محدوده‌های کم‌سرعتی مشاهده می‌شوند که احتمالاً نشان دهنده وجود حفره‌های کارستی پر شده با مواد رسی در این مناطق می‌باشند.
- بررسی مقاطع لرزه‌ای مربوط به تکیه‌گاه راست و بستر رودخانه و مقایسه با نتایج مطالعات مکانیک سنگ نشان دهنده کیفیت پایین‌تر توده سنگ در بستر رودخانه نسبت به تکیه‌گاه راست می‌باشد.

## ۵-۲ پیشنهادات

- در ادامه برخی از پیشنهادات که می‌تواند راه‌گشای کارهای آینده و مطالعات مشابه باشد ارائه می‌شود.
- با توجه به اینکه توموگرافی با موج برشی (S) از توموگرافی با موج فشاری (P)، به نواحی با خردشدگی زیاد و تراکم درز و شکاف حساس‌تر می‌باشد، پیشنهاد می‌شود که در تمام برداشت‌های مشابه، حداقل در نقاطی که احتمال وجود شکستگی یا گسل بیشتر است، برداشت موج S نیز انجام شود.
  - با برداشت دو موج P و S در هر محدوده، می‌توان با استفاده از روابط موجود یک مقطع پیوسته از مدول دینامیکی یانگ به دست آورد که در مقایسه با آزمایشات پرهزینه و وقت‌گیر برجای مکانیک سنگ کم‌هزینه‌تر می‌باشد. مقایسه این مدل با نتایج آزمایشات مکانیک سنگ انجام شده می‌تواند بسیار مفید باشد. در این مقطع بدست آمده از مدول یانگ، نواحی با

مدول یانگ پایین و سرعت کم منطبق بر نواحی ضعیف و خردشده و نواحی با مدول یانگ بالا و سرعت زیاد منطبق بر بخش‌های با مقاومت زیاد و بکر می‌باشند.

- استفاده از توموگرافی جبهه موج برای مدل‌سازی دقیق‌تر با جزئیات بیشتر، می‌تواند بسیار مفید باشد.
- انجام توموگرافی فاکتور کیفیت (دامنه موج) به منظور شناسایی نواحی با میرایی بالا که معمولاً منطبق بر نواحی با درزه و شکاف یا نواحی با فشردگی کم می‌باشند، پیشنهاد می‌شود.
- استفاده از ردیابی پرتو، برای در نظر گرفتن مسیر واقعی و انحنای پرتوها و در نهایت به دست آوردن مدل‌های سرعت که به واقعیت نزدیک‌تر باشند، پیشنهاد می‌شود.
- با توجه به کاربردها و استفاده توموگرافی لرزه‌ای در مباحثی مانند مدل‌سازی شکستگی‌ها در فرونشست معادن ذغال‌سنگ، شناسایی محدوده کانسارها، مطالعات زیست محیطی، شناسایی محل مناسب دفن زباله‌های هسته‌ای و شناسایی دقیق مناطق باستانی مدفون شده و نتایج خوب به دست آمده، استفاده از این روش در پروژه‌های داخلی مشابه می‌تواند مفید باشد.
- همان‌طور که گفته شد برداشت‌های توموگرافی چاه به چاه و گالری به گالری پوشش کاملی از پرتوها در محدوده برداشت ارائه می‌دهند. در برخی محدوده‌های مورد بررسی در سد خرسان ۳ با وجود گمانه‌های متقابل از این روش استفاده نشده است. به عنوان مثال در گمانه‌های شماره ۱ و ۲ داخل گالری GR1 از دو برداشت VSP متقابل استفاده شده است. انجام توموگرافی به روش چاه‌های متقابل در موارد مشابه نتایج بهتری از وضعیت لایه‌ها ارائه می‌دهد. هم‌چنین می‌توان از هر دو روش استفاده نمود و نتایج کار را با هم مقایسه کرد.

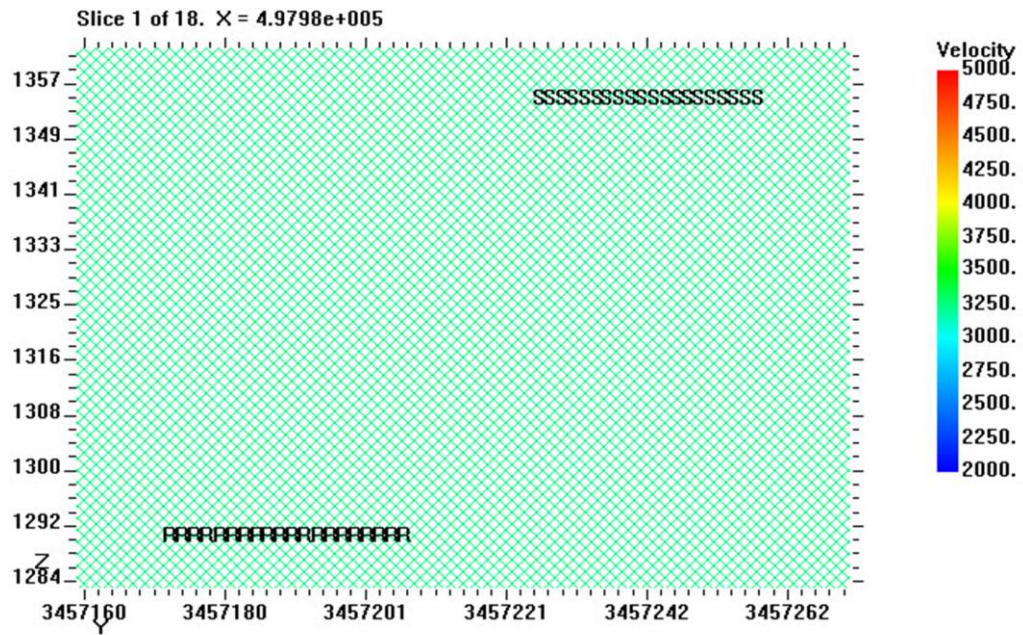
پیوست

تصاویر تمام مقاطع پردازش شده دوبعدی در

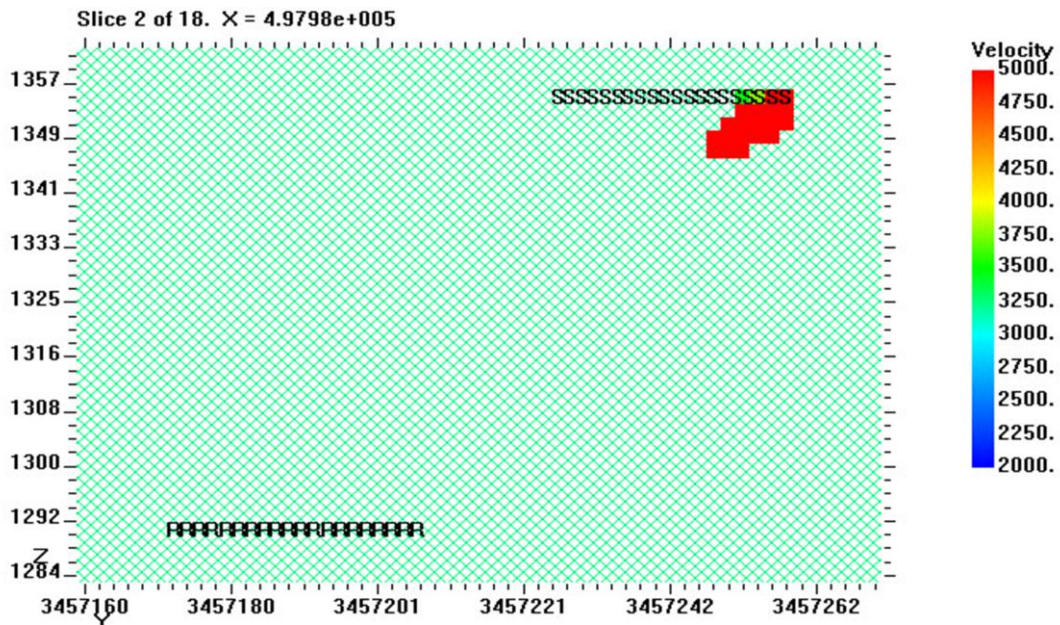
منطقه مورد مطالعه



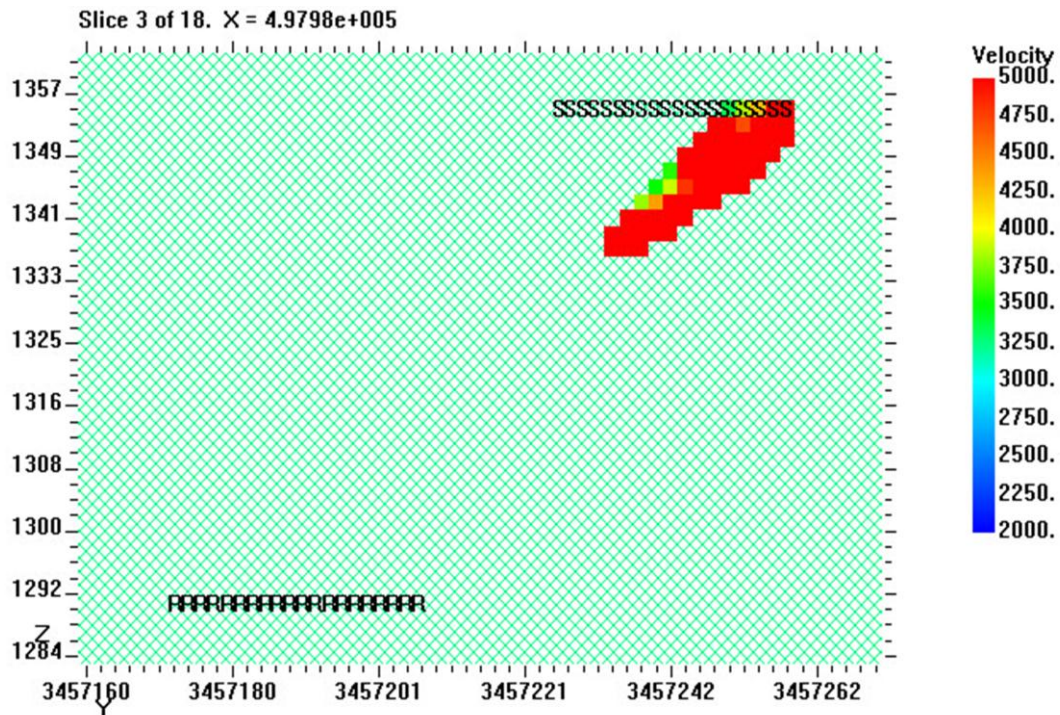
الف-۱ تصاویر ۱۸ مقطع سرعت پردازش شده بین دو گالری GR1 و GR2



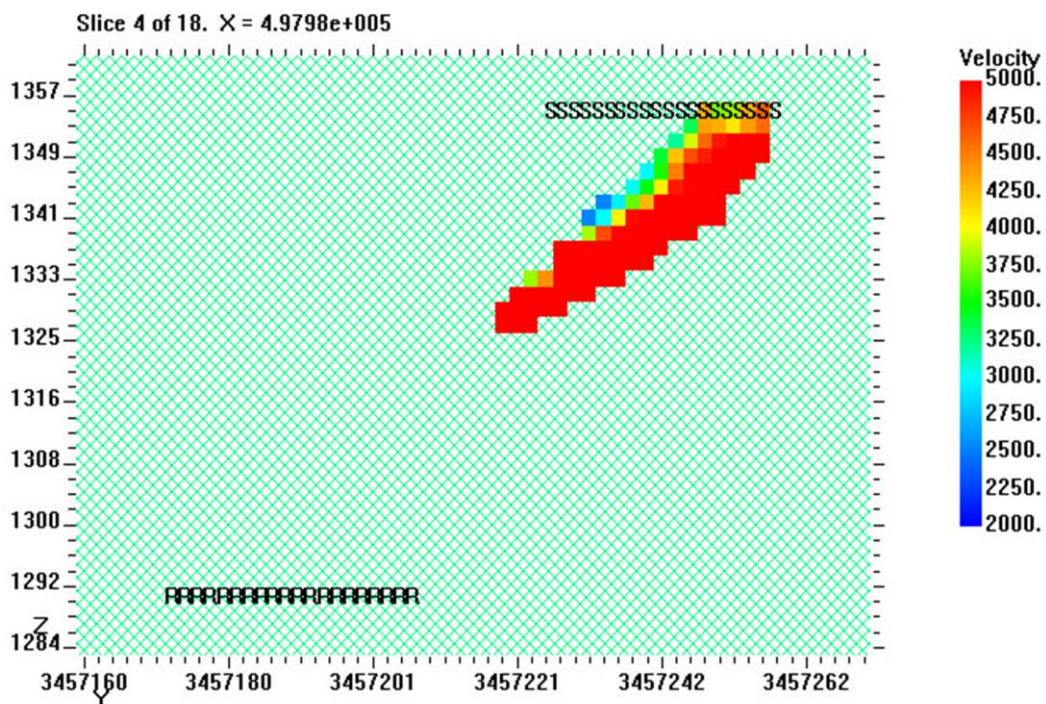
شکل (الف-۱): مدل سرعتی بین دو گالری GR1 و GR2، مقطع ۱ از ۱۸.



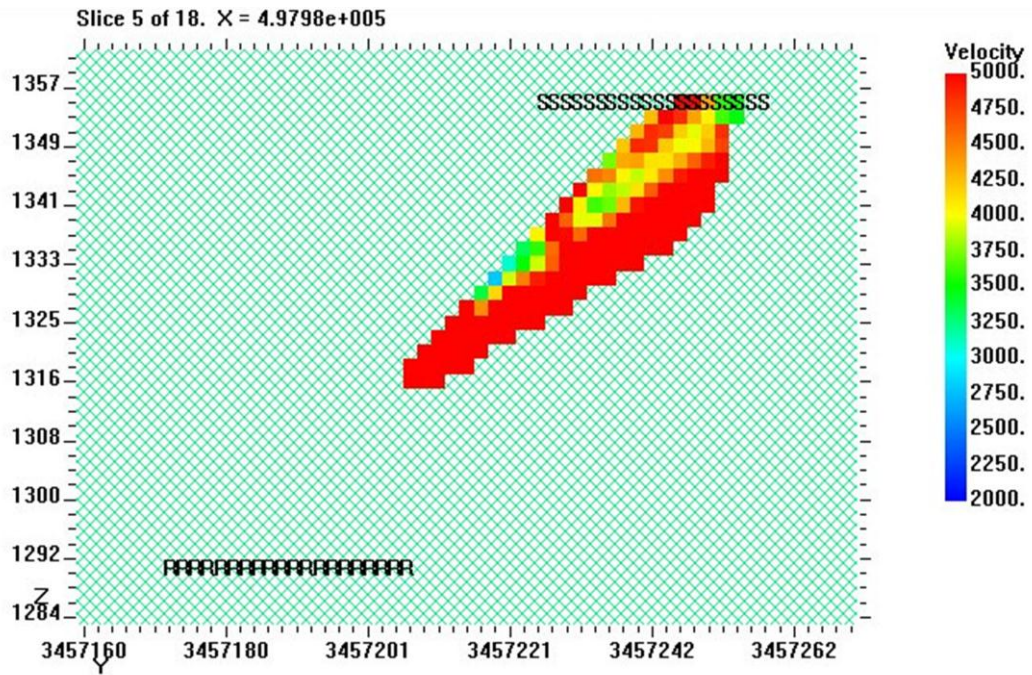
شکل (الف-۲): مدل سرعتی بین دو گالری GR1 و GR2، مقطع ۲ از ۱۸.



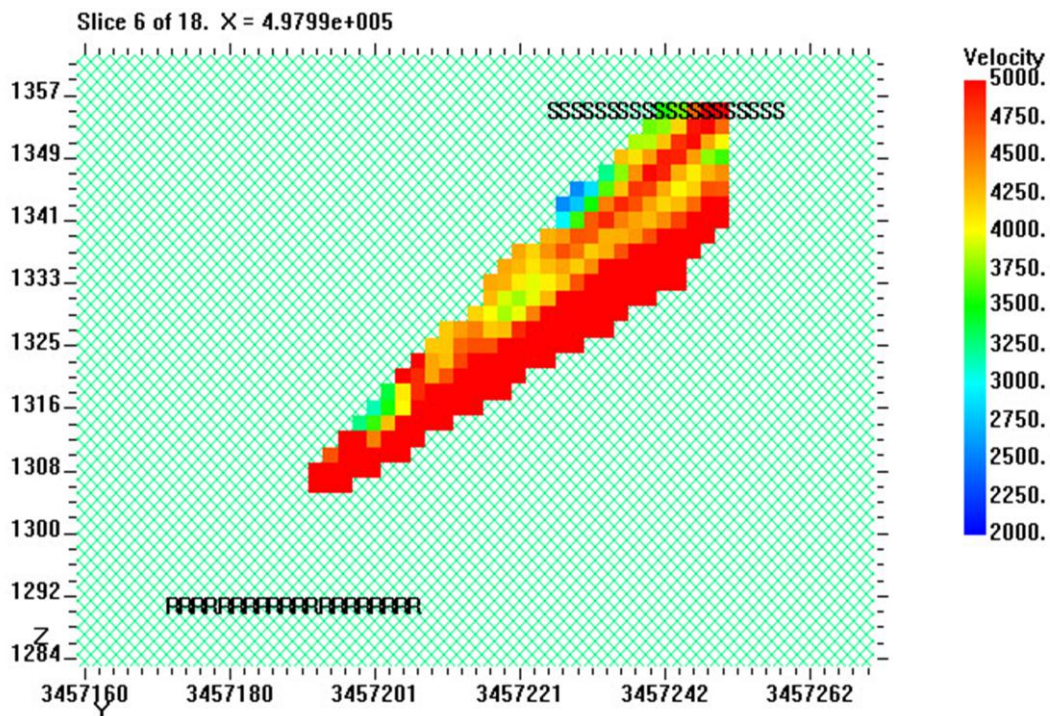
شکل (الف-۳): مدل سرعتی بین دو گالری GR1 و GR2. مقطع ۳ از ۱۸.



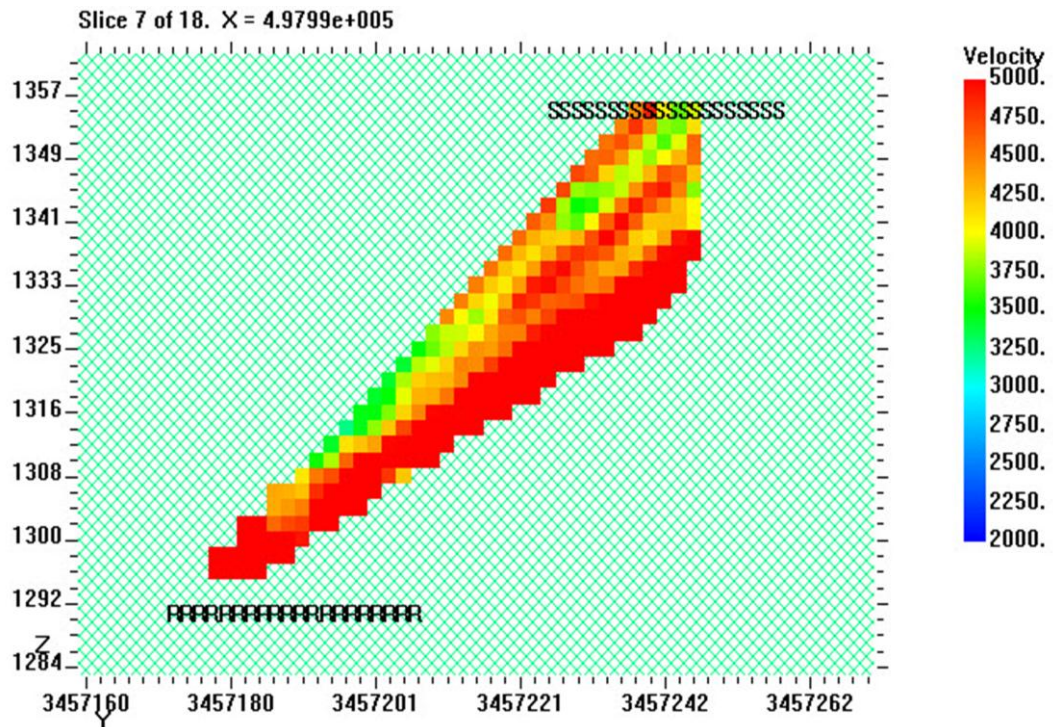
شکل (الف-۴): مدل سرعتی بین دو گالری GR1 و GR2. مقطع ۴ از ۱۸.



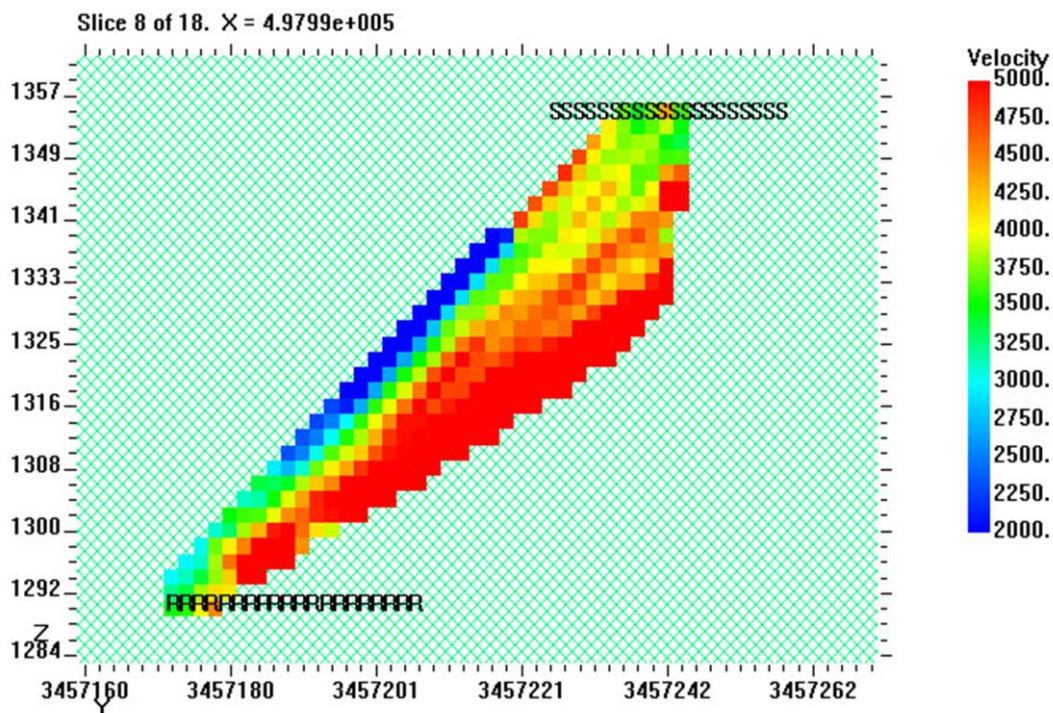
شکل (الف-۵): مدل سرعتی بین دو گالری GR1 و GR2، مقطع ۵ از ۱۸.



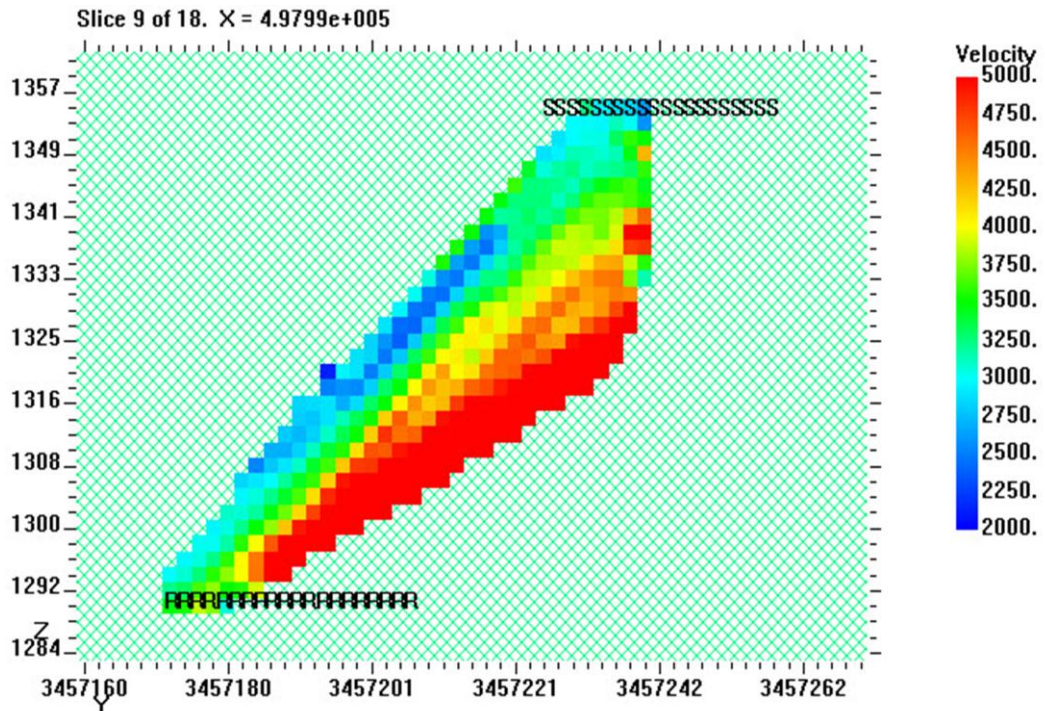
شکل (الف-۶): مدل سرعتی بین دو گالری GR1 و GR2، مقطع ۶ از ۱۸.



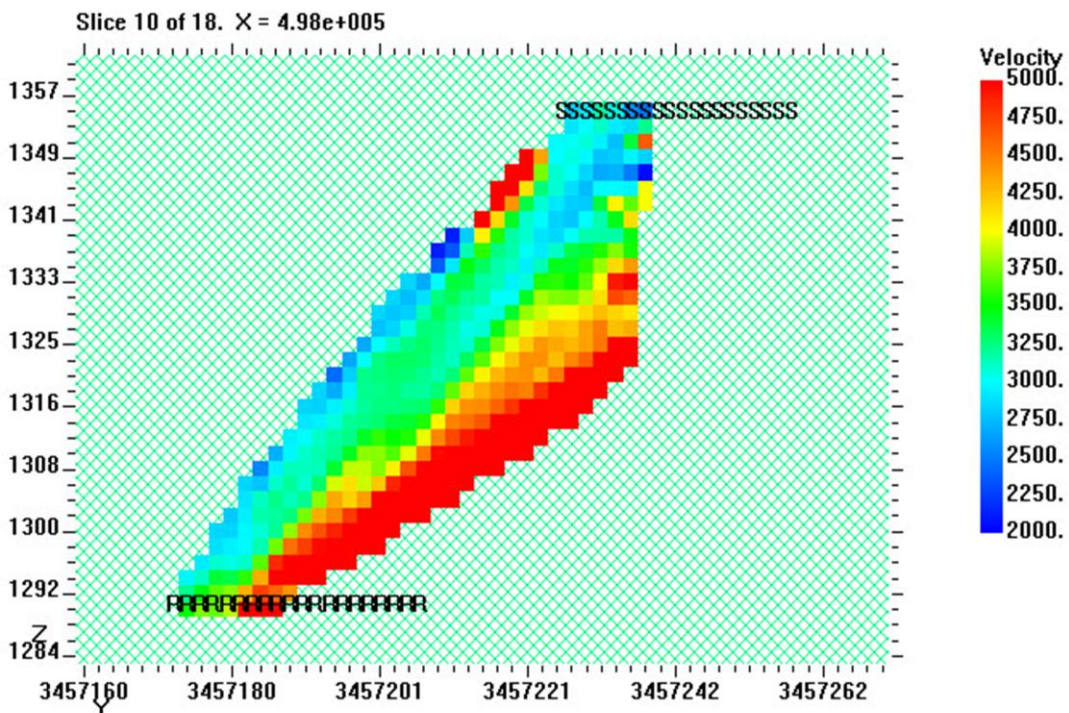
شکل (الف-۷): مدل سرعتی بین دو گالری GR1 و GR2، مقطع ۷ از ۱۸.



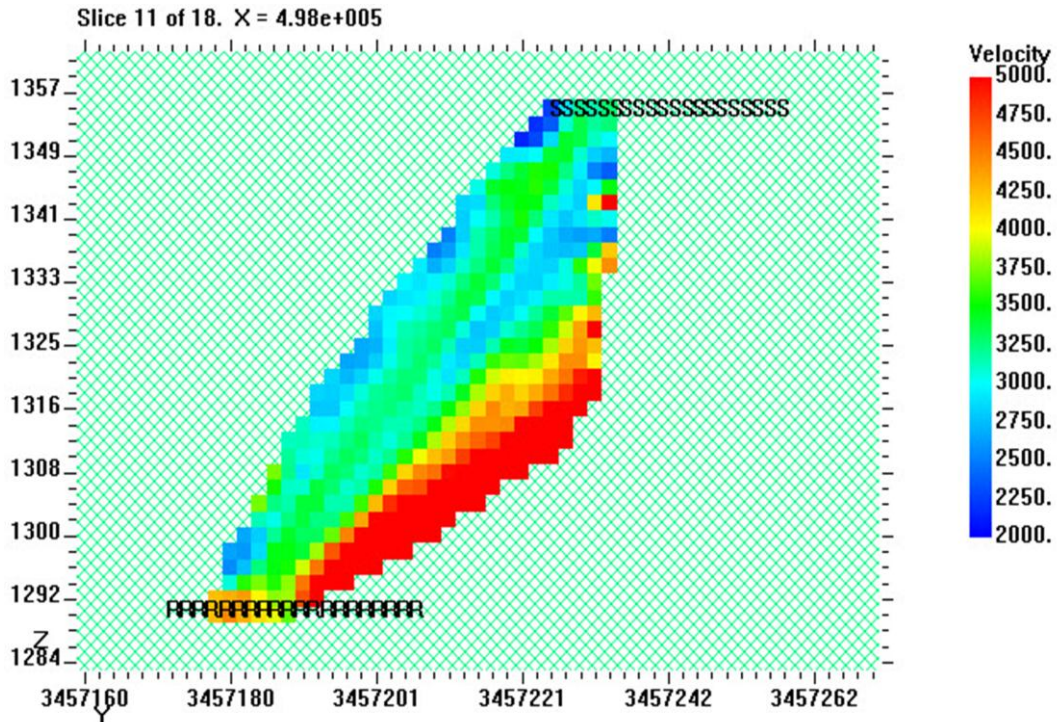
شکل (الف-۸): مدل سرعتی بین دو گالری GR1 و GR2، مقطع ۸ از ۱۸.



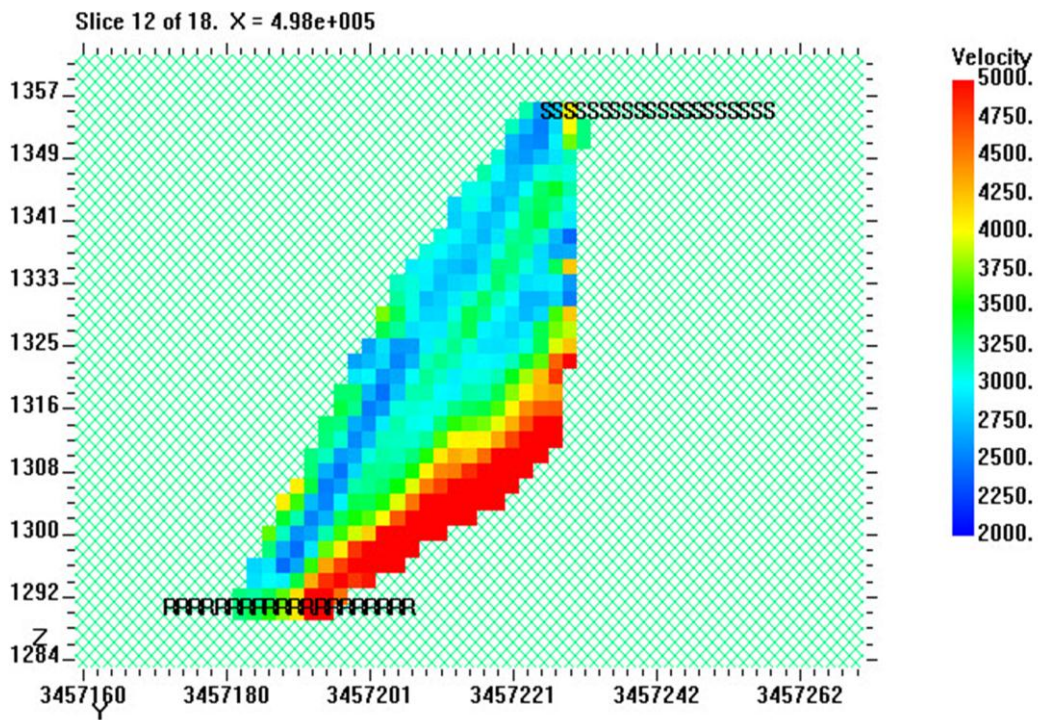
شکل (الف-۹): مدل سرعتی بین دو گالری GR1 و GR2، مقطع ۹ از ۱۸.



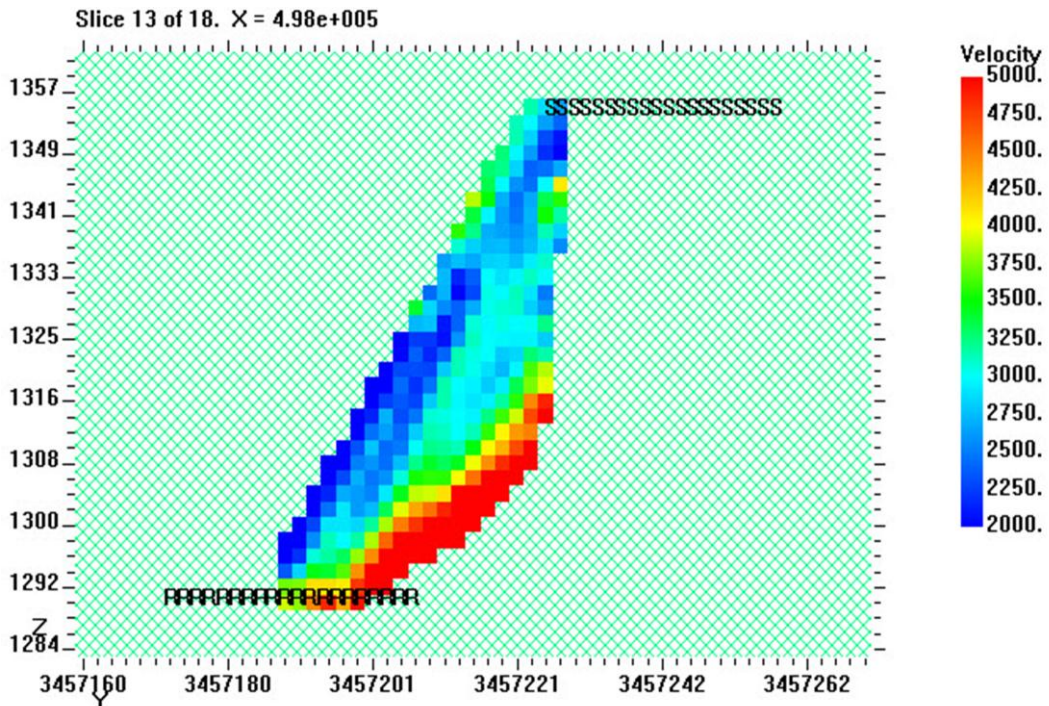
شکل (الف-۱۰): مدل سرعتی بین دو گالری GR1 و GR2، مقطع ۱۰ از ۱۸.



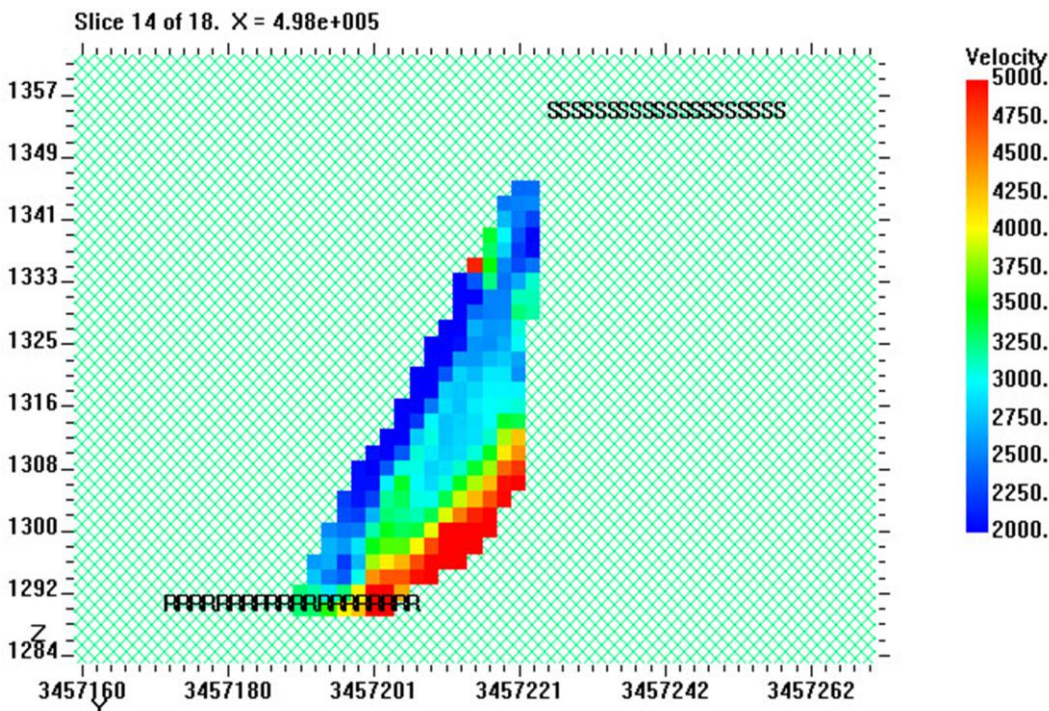
شکل (الف-۱۱): مدل سرعتی بین دو گالری GR1 و GR2. مقطع ۱۱ از ۱۸.



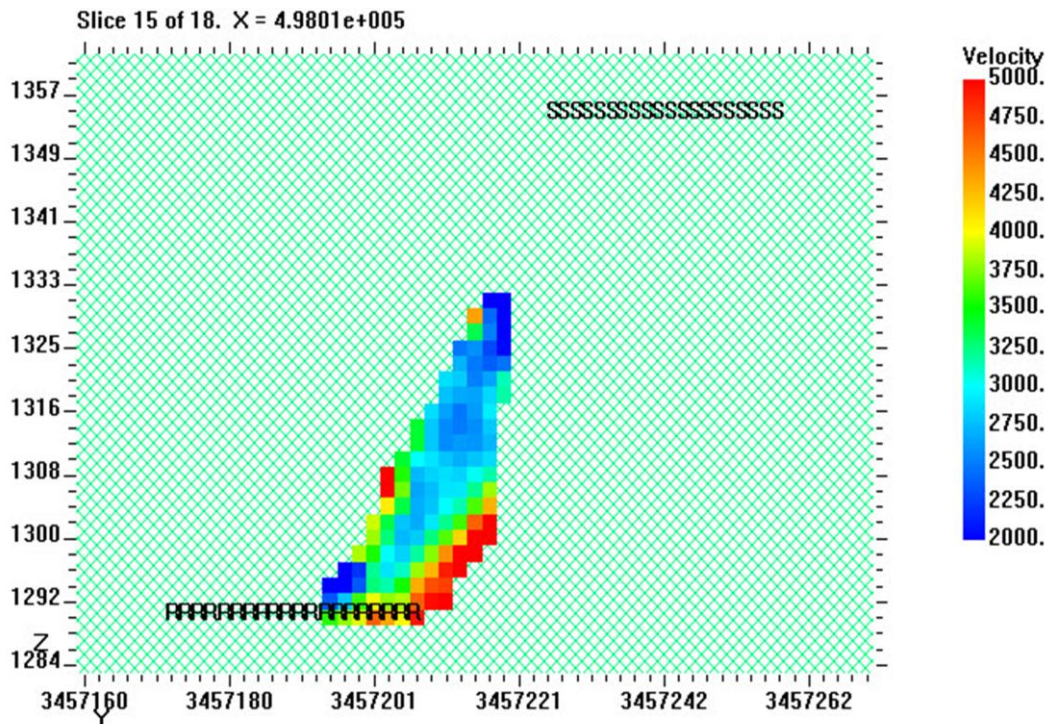
شکل (الف-۱۲): مدل سرعتی بین دو گالری GR1 و GR2. مقطع ۱۲ از ۱۸.



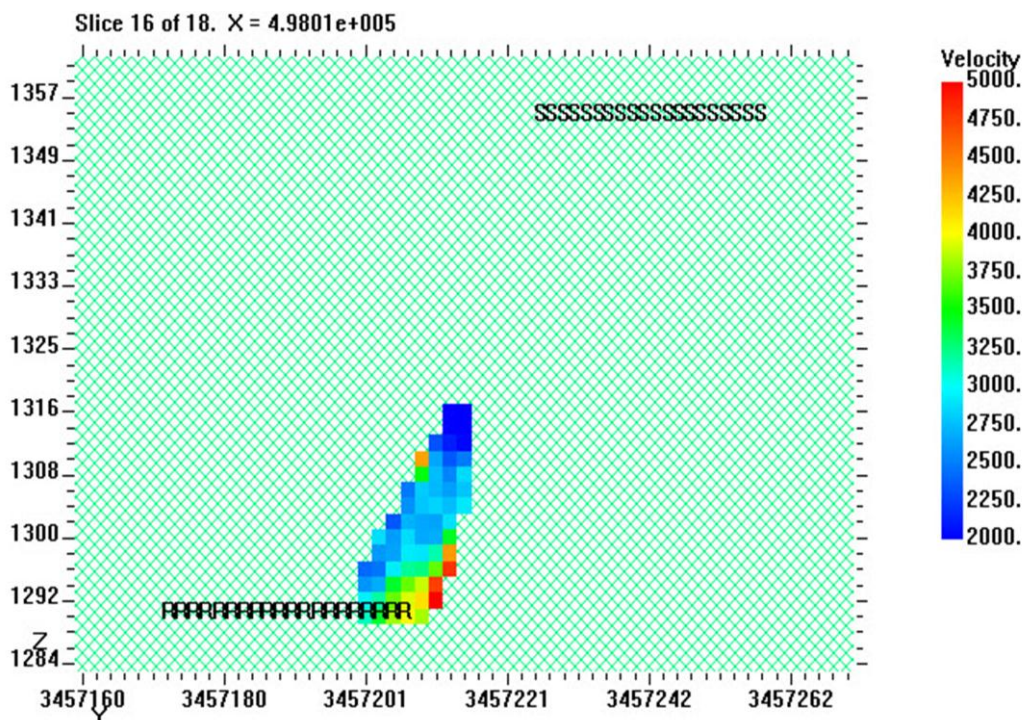
شکل (الف-۱۳): مدل سرعتی بین دو گالری GR1 و GR2، مقطع ۱۳ از ۱۸.



شکل (الف-۱۴): مدل سرعتی بین دو گالری GR1 و GR2، مقطع ۱۴ از ۱۸.

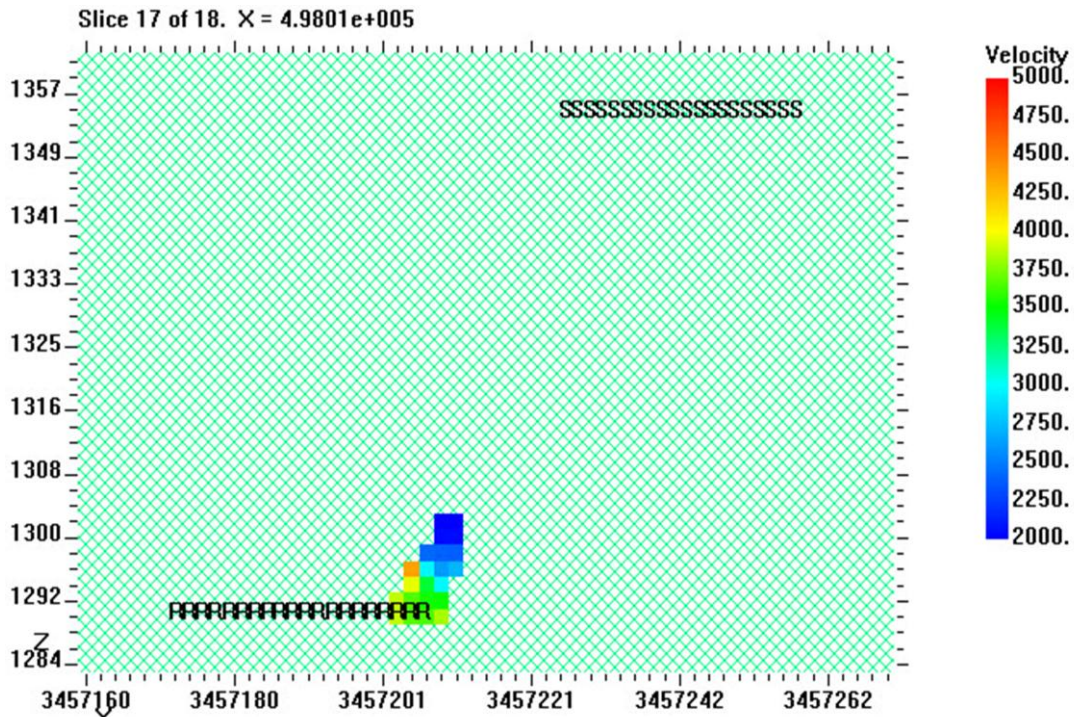


شکل (الف-۱۵): مدل سرعتی بین دو گالری GR1 و GR2، مقطع ۱۵ از ۱۸.

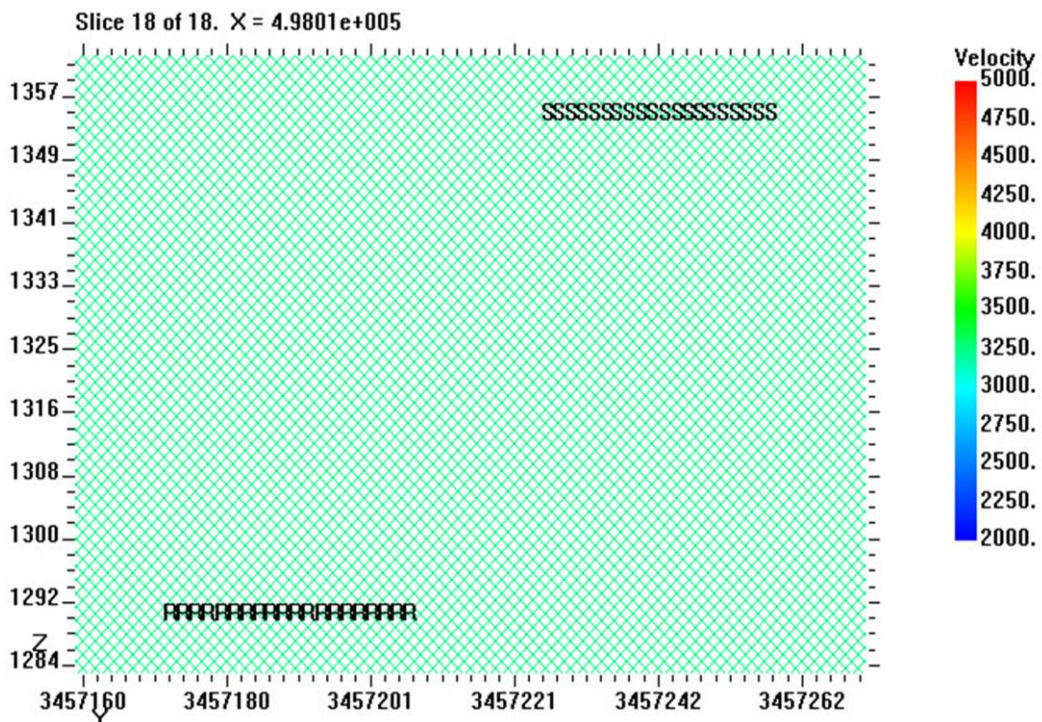


شکل (الف-۱۶): مدل سرعتی بین دو گالری GR1 و GR2، مقطع ۱۶ از ۱۸.



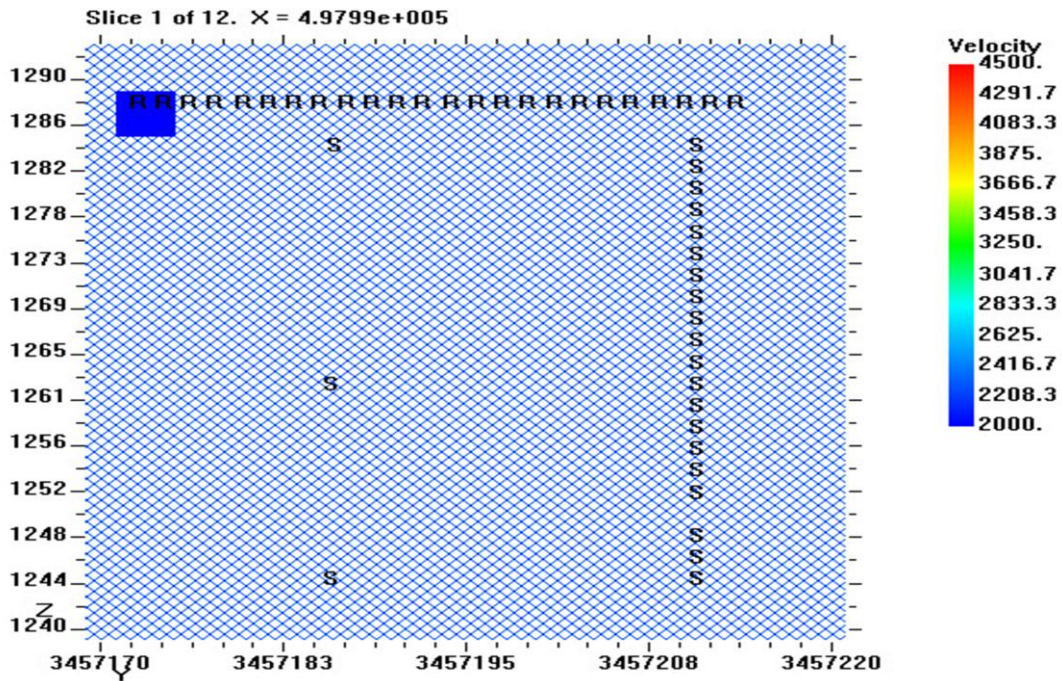


شکل (الف-۱۷): مدل سرعتی بین دو گالری GR1 و GR2، مقطع ۱۷ از ۱۸.

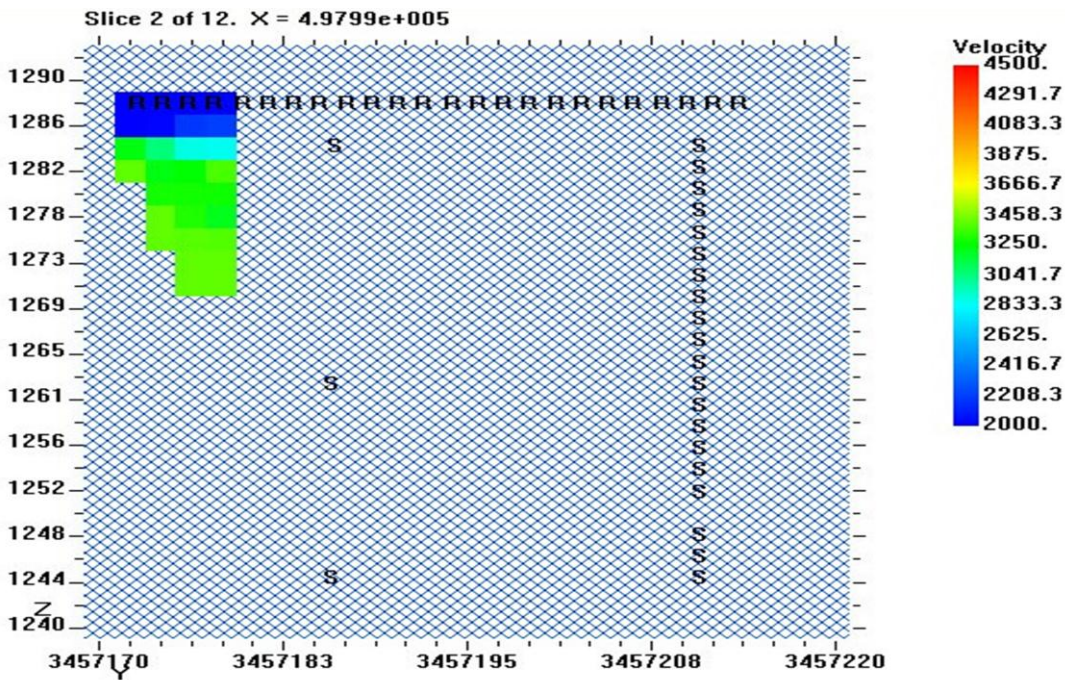


شکل (الف-۱۸): مدل سرعتی بین دو گالری GR1 و GR2، مقطع ۱۸ از ۱۸.

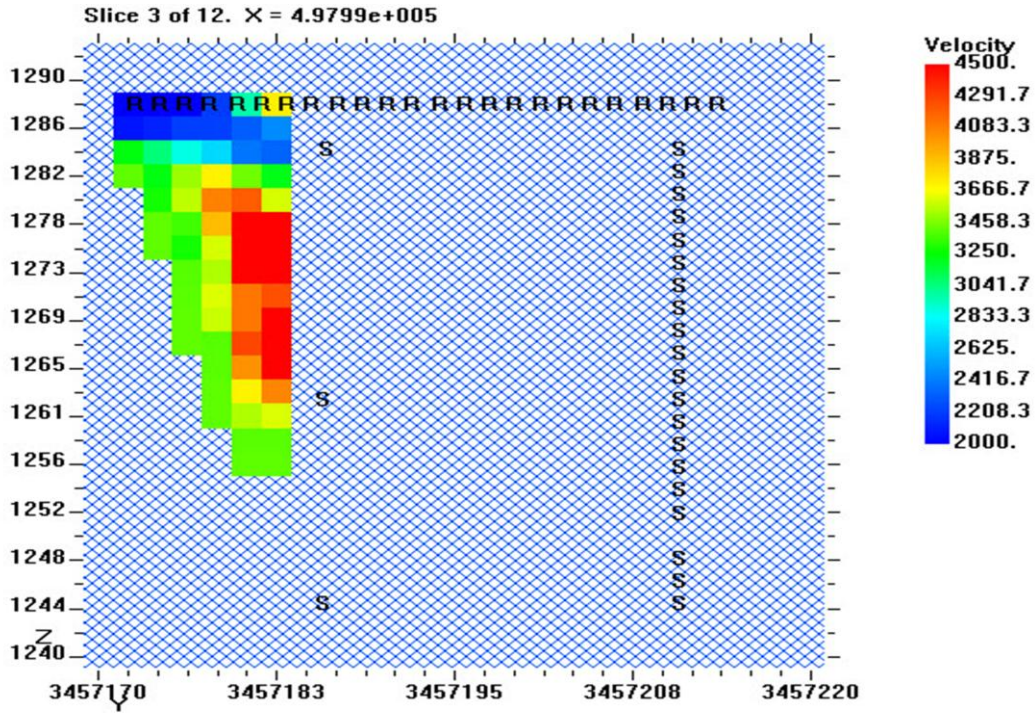
الف- ۲ تصاویر ۱۲ مقطع سرعت پردازش شده بین دو گمانه گالری GR1 و سطح گالری



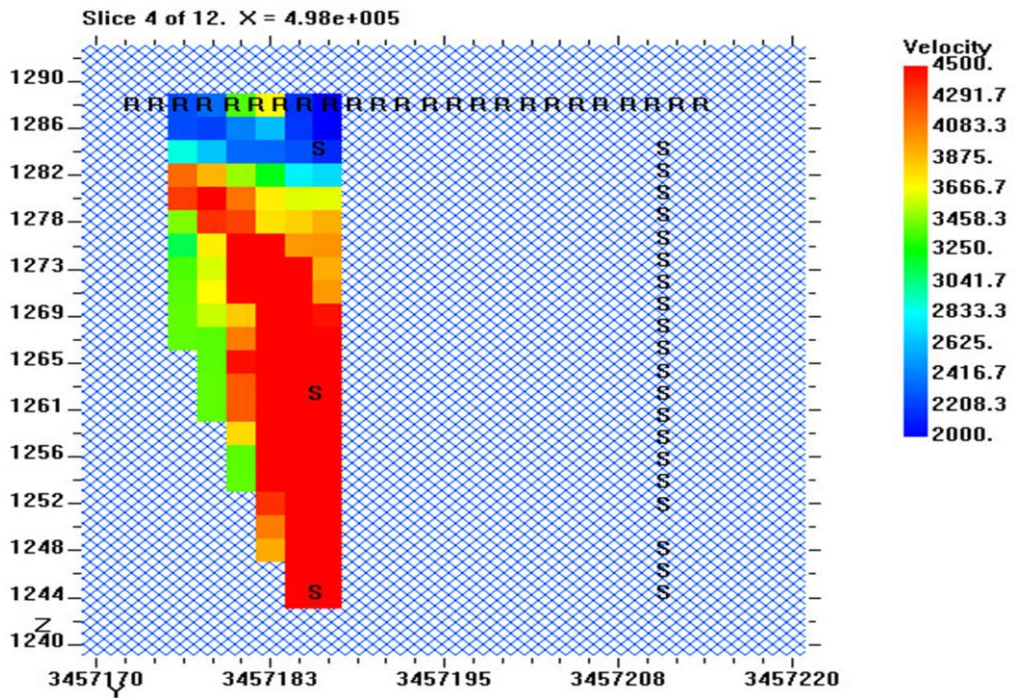
شکل (الف-۱۹): مدل سرعتی بین دو گمانه گالری GR1 و سطح گالری، مقطع ۱ از ۱۲.



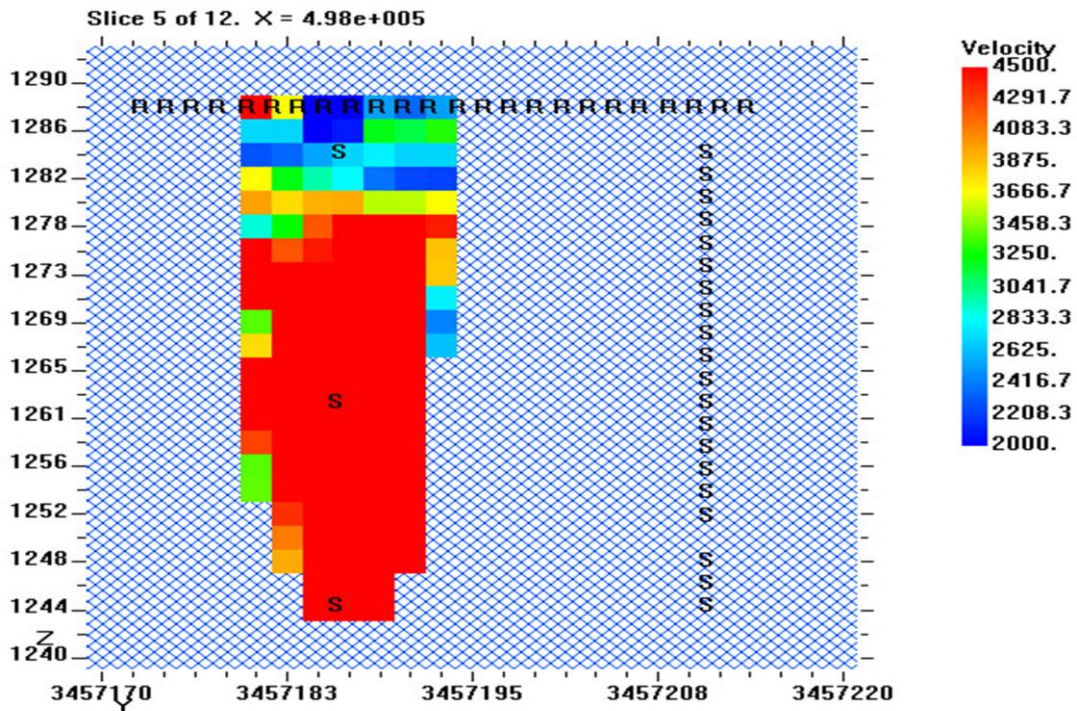
شکل (الف-۲۰): مدل سرعتی بین دو گمانه گالری GR1 و سطح گالری، مقطع ۲ از ۱۲.



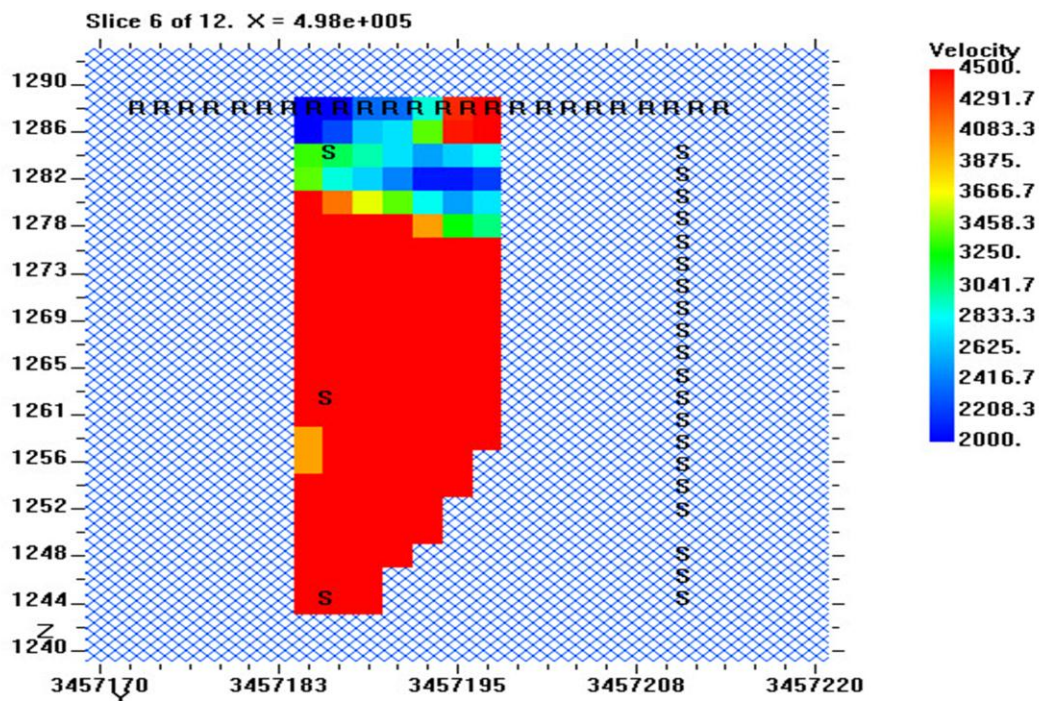
شکل (الف-۲۱): مدل سرعتی بین دو گمانه گالری GR1 و سطح گالری، مقطع ۳ از ۱۲.



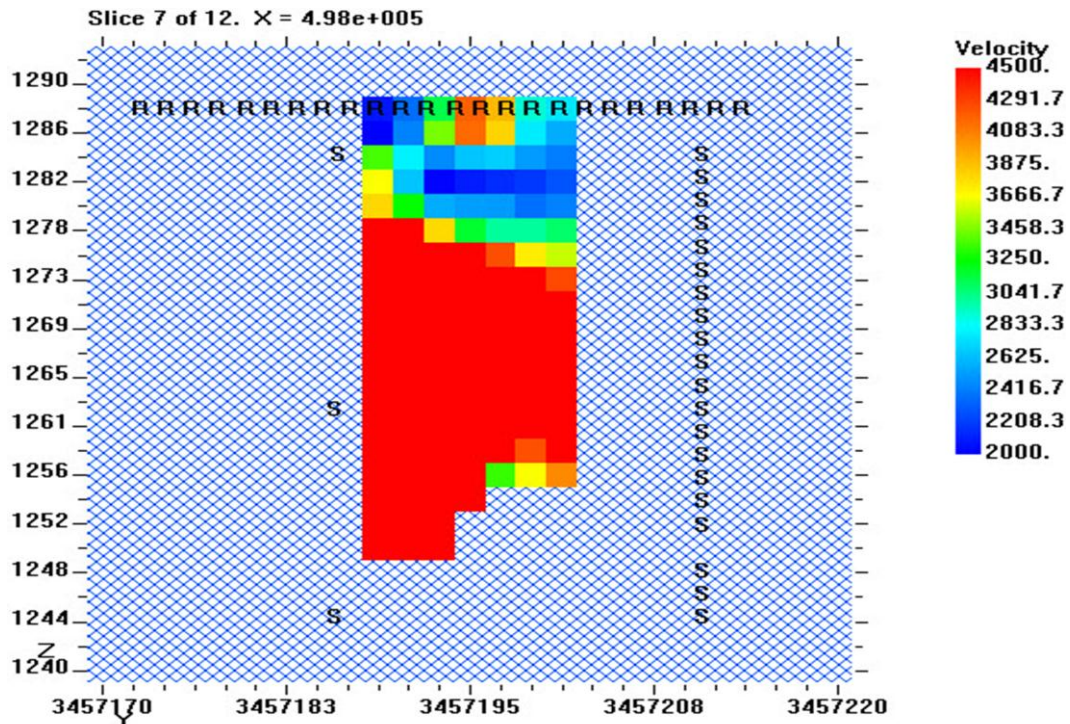
شکل (الف-۲۲): مدل سرعتی بین دو گمانه گالری GR1 و سطح گالری، مقطع ۴ از ۱۲.



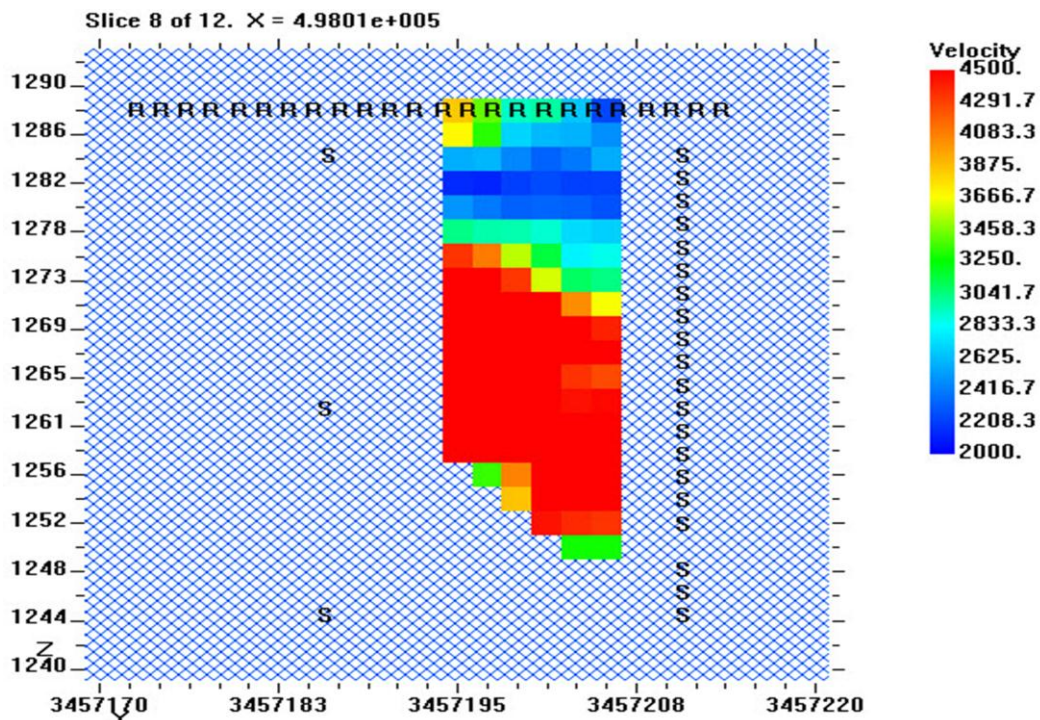
شکل (الف-۲۳): مدل سرعتی بین دو گمانه گالری GR1 و سطح گالری، مقطع ۵ از ۱۲.



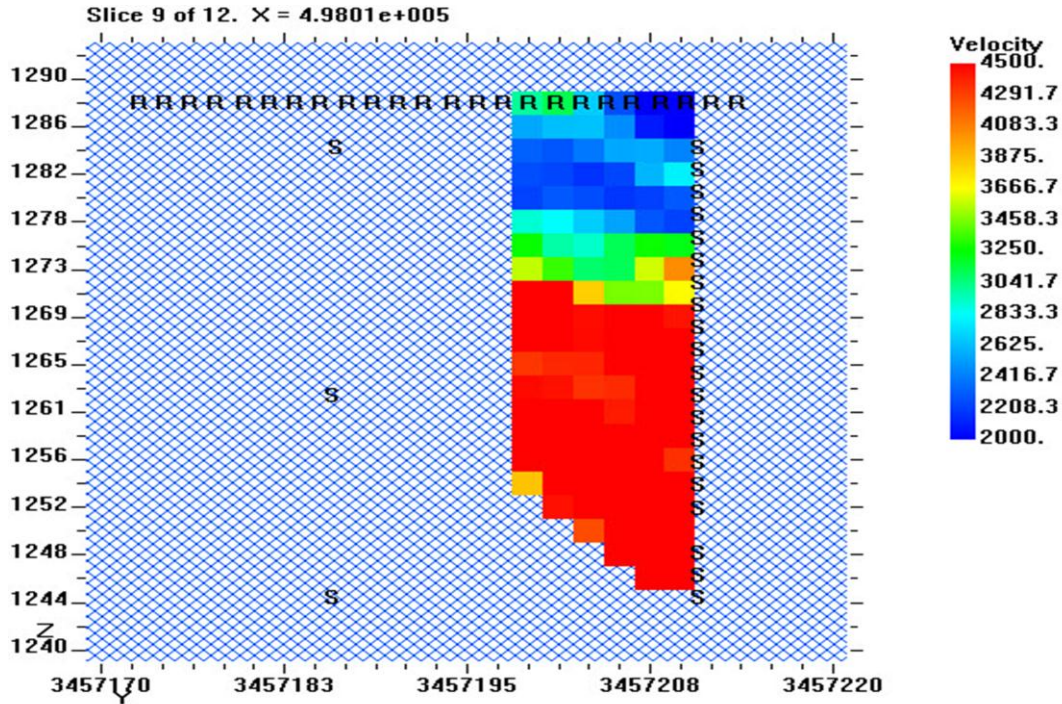
شکل (الف-۲۴): مدل سرعتی بین دو گمانه گالری GR1 و سطح گالری، مقطع ۶ از ۱۲.



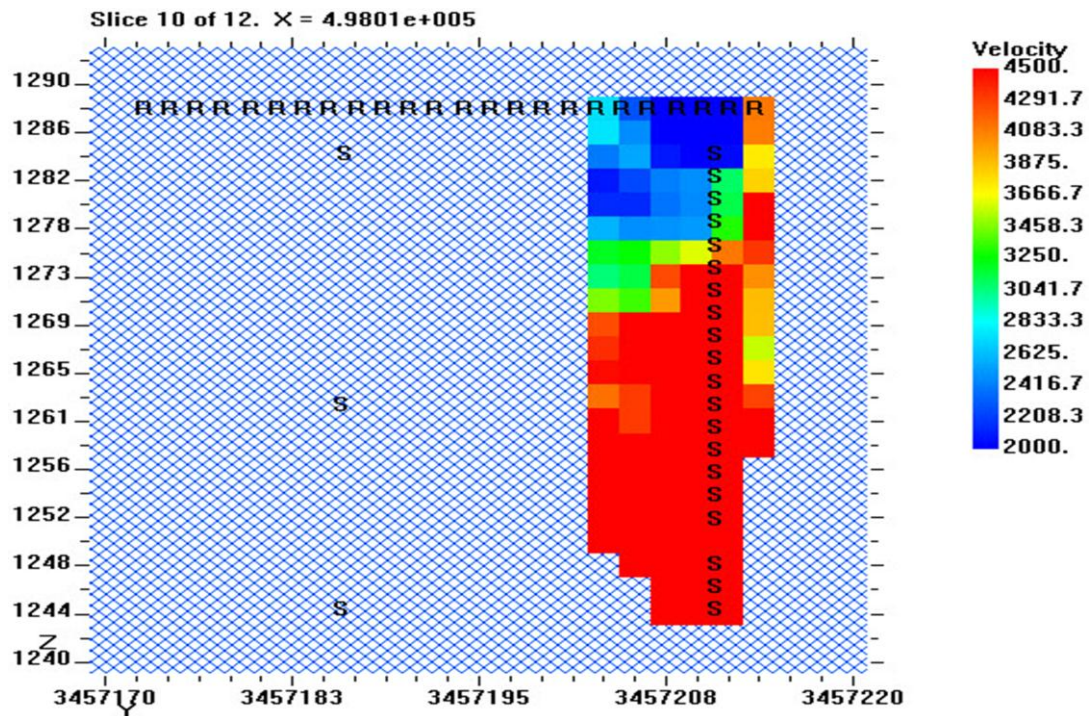
شکل (الف-۲۵): مدل سرعتی بین دو گمانه گالری GR1 و سطح گالری، مقطع ۷ از ۱۲.



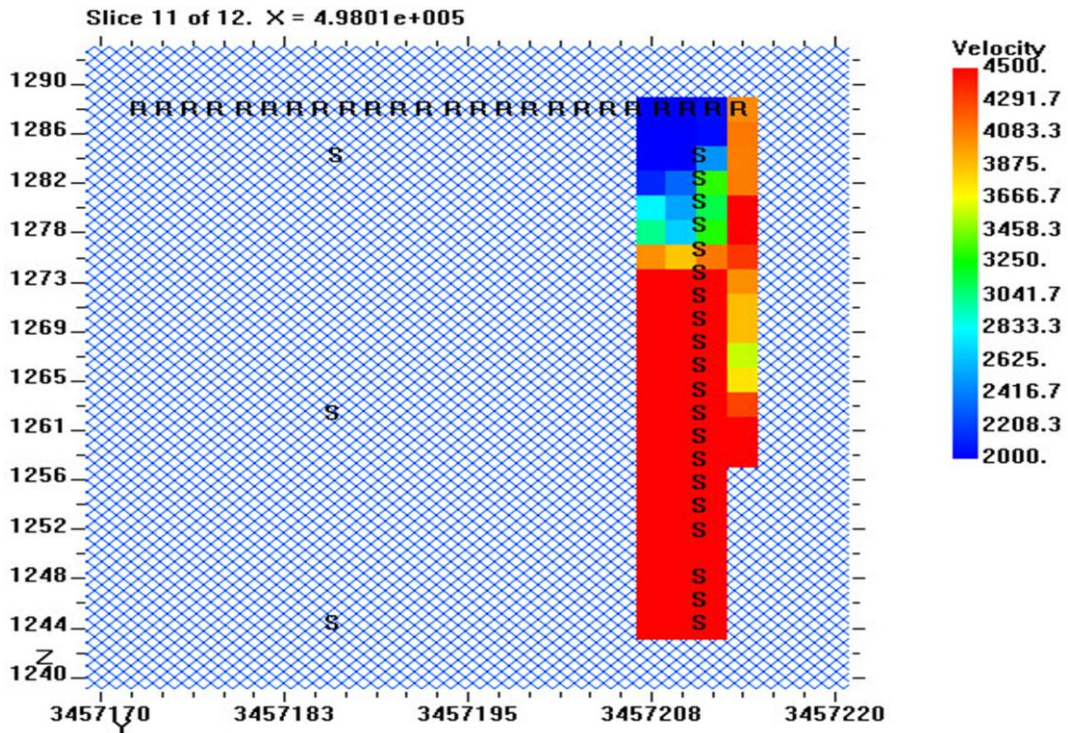
شکل (الف-۲۶): مدل سرعتی بین دو گمانه گالری GR1 و سطح گالری، مقطع ۸ از ۱۲.



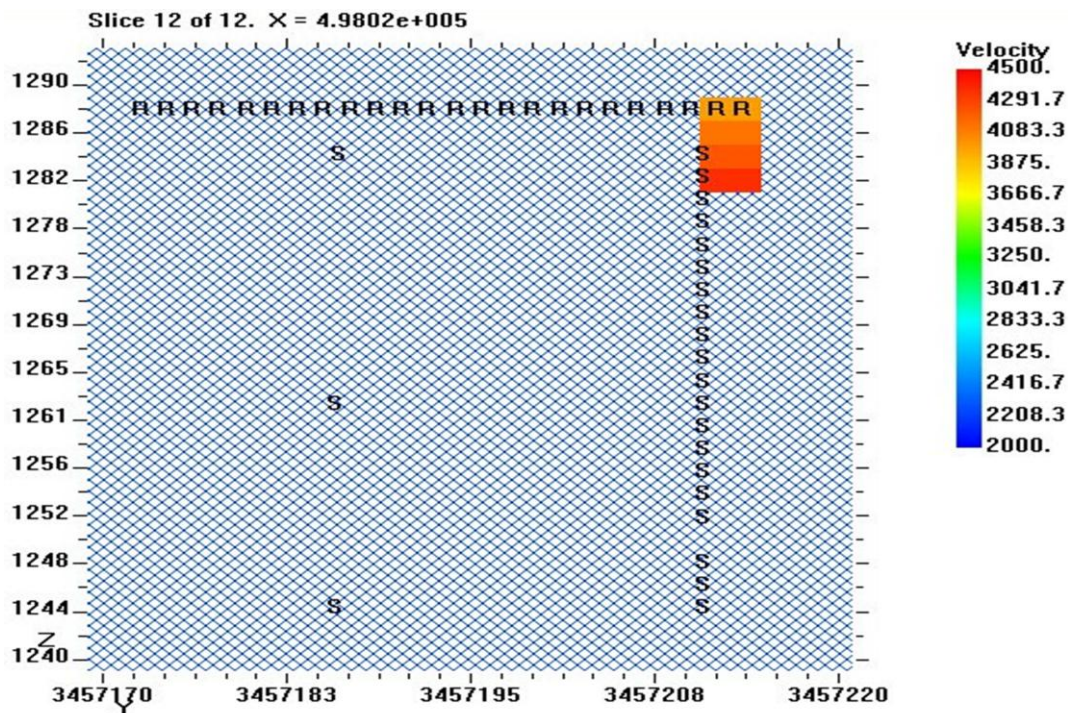
شکل (الف-۲۷): مدل سرعتی بین دو گمانه گالری GR1 و سطح گالری، مقطع ۹ از ۱۲.



شکل (الف-۲۸): مدل سرعتی بین دو گمانه گالری GR1 و سطح گالری، مقطع ۱۰ از ۱۲.

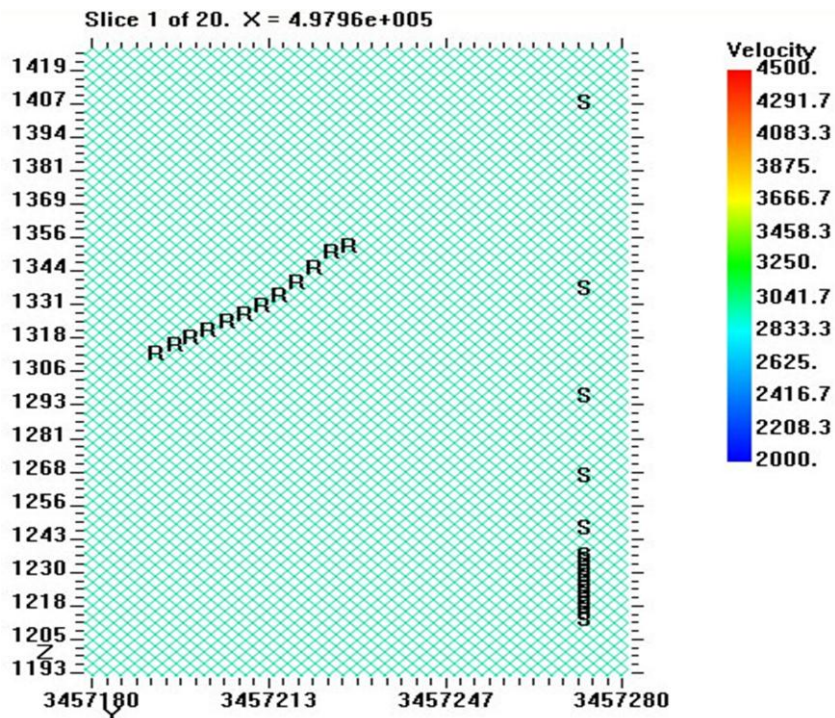


شکل (الف-۲۹): مدل سرعتی بین دو گمانه گالری GR1 و سطح گالری، مقطع ۱۱ از ۱۲.

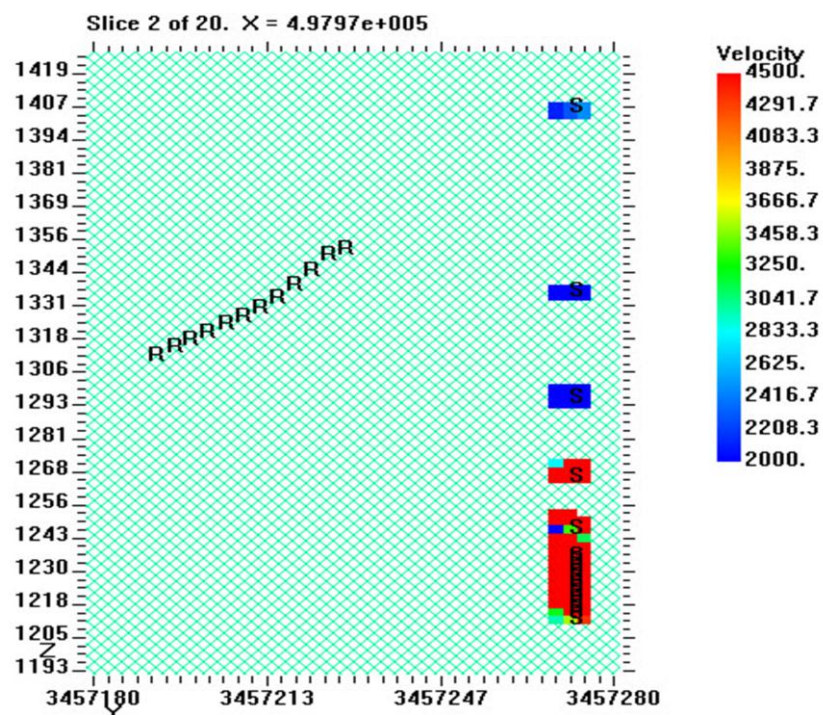


شکل (الف-۳۰): مدل سرعتی بین دو گمانه گالری GR1 و سطح گالری، مقطع ۱۲ از ۱۲.

## الف-۳ تصاویر ۲۰ مقطع سرعت پردازش شده بین گمانه ۲۱۴ و سطح تکیه‌گاه راست

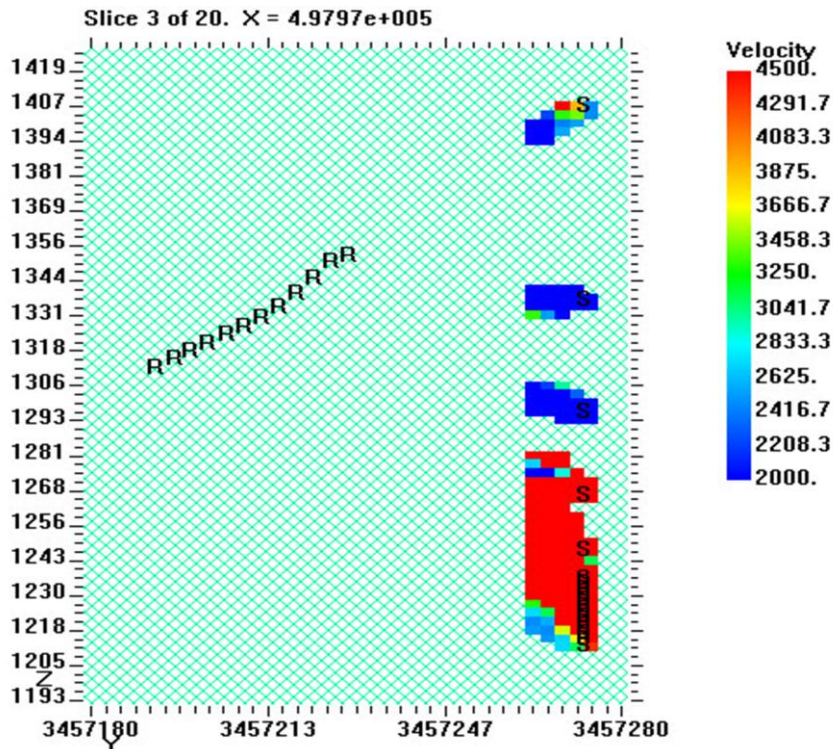


شکل (الف-۳۱): مدل سرعتی بین گمانه ۲۱۴ و سطح تکیه‌گاه راست، مقطع ۱ از ۲۰.

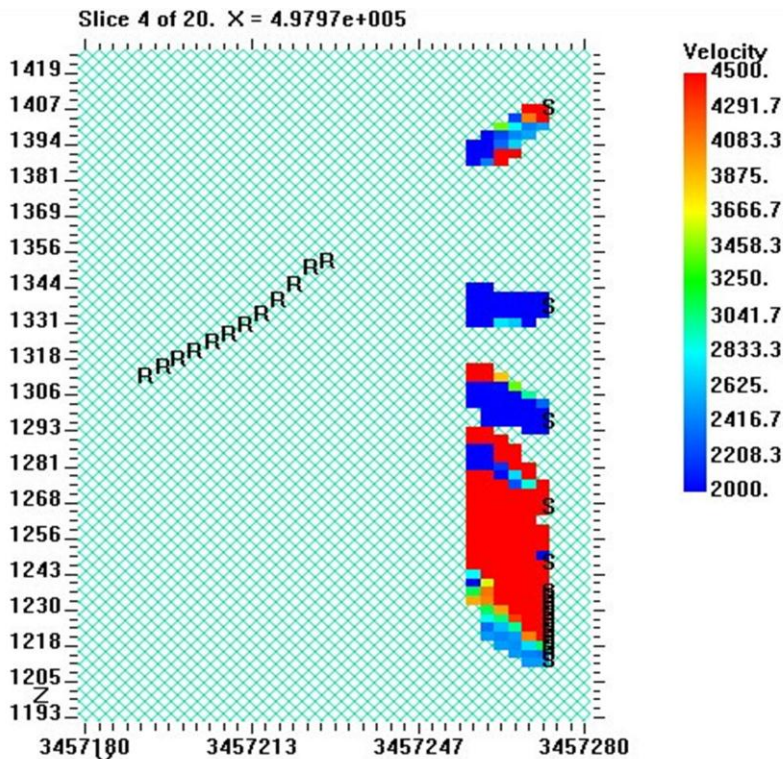


شکل (الف-۳۲): مدل سرعتی بین گمانه ۲۱۴ و سطح تکیه‌گاه راست، مقطع ۲ از ۲۰.

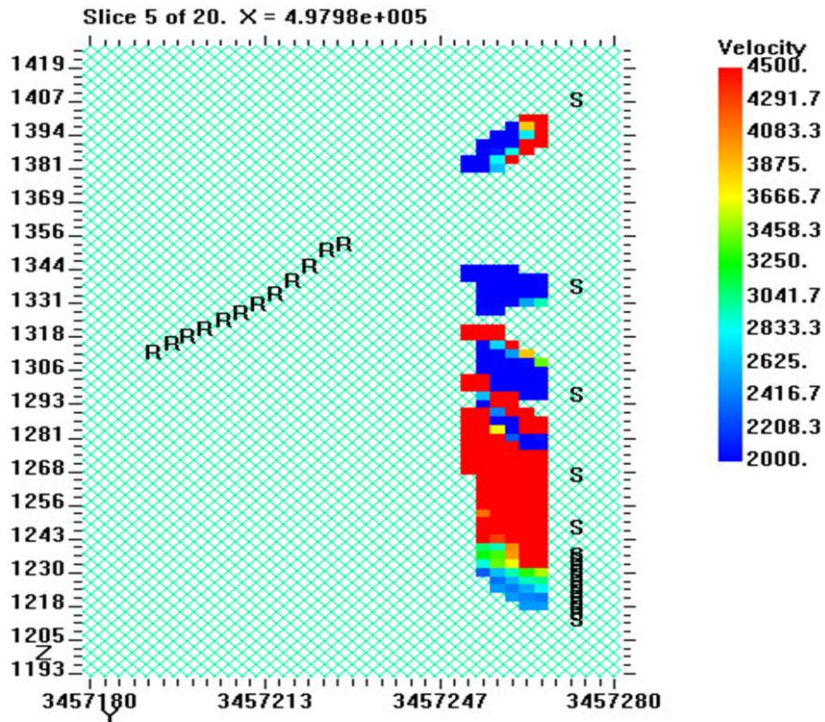




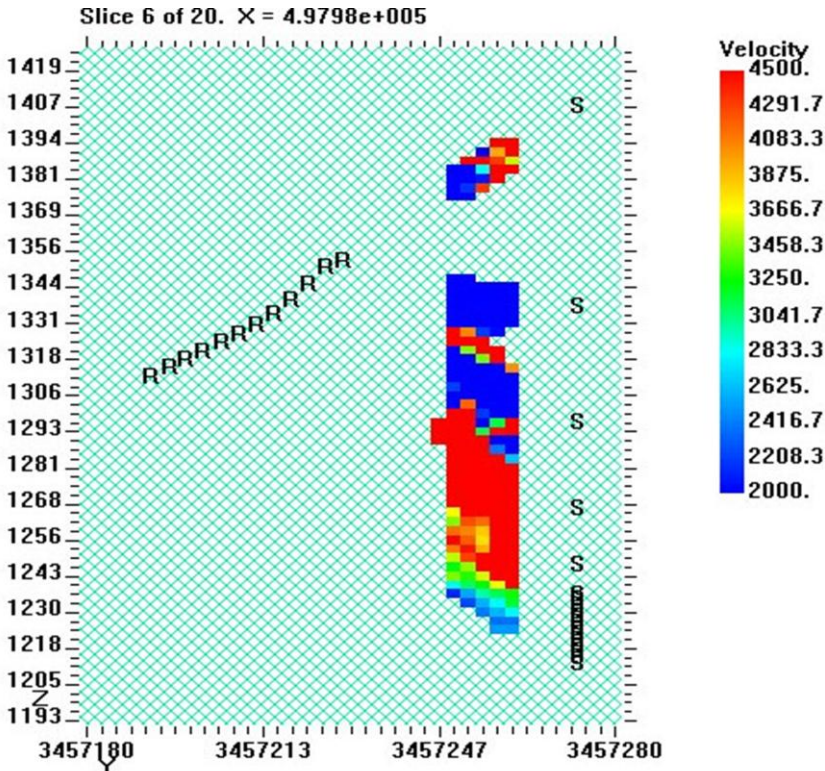
شکل (الف-۳۳): مدل سرعتی بین گمانه ۲۱۴ و سطح تکیه‌گاه راست، مقطع ۳ از ۲۰.



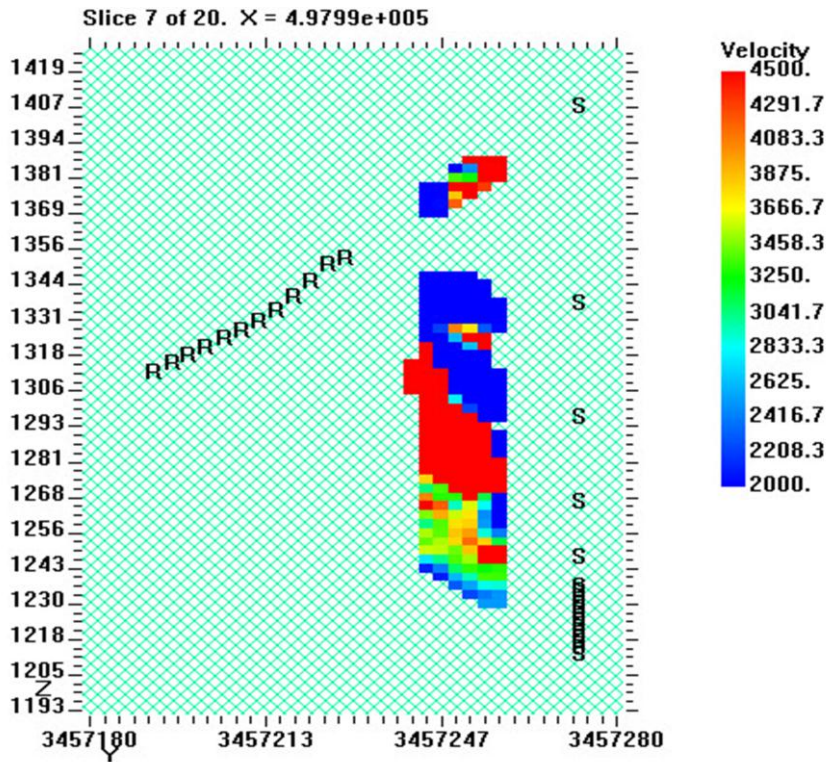
شکل (الف-۳۴): مدل سرعتی بین گمانه ۲۱۴ و سطح تکیه‌گاه راست، مقطع ۴ از ۲۰.



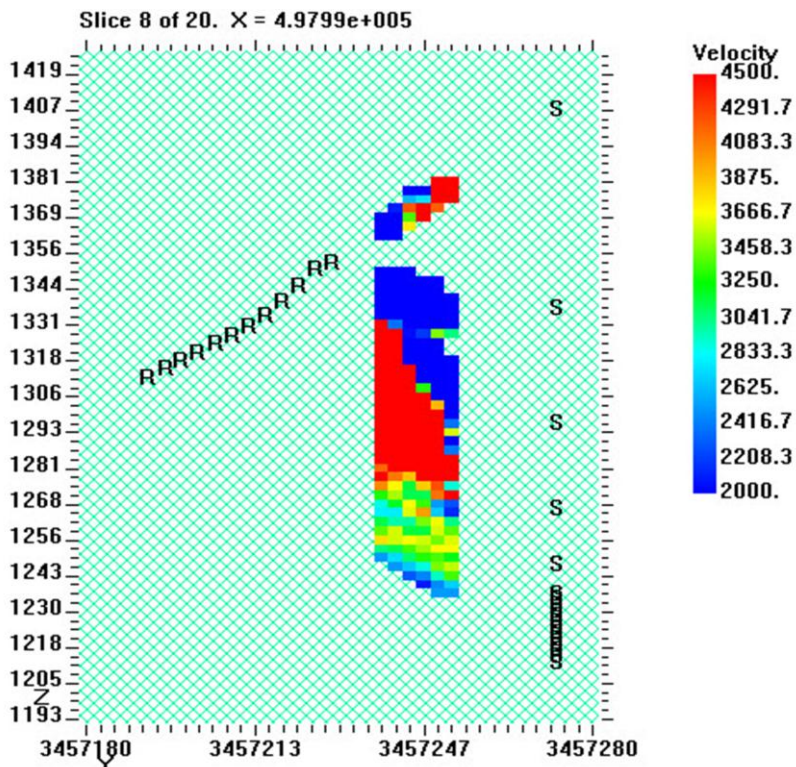
شکل (الف-۳۵): مدل سرعتی بین گمانه ۲۱۴ و سطح تکیه‌گاه راست، مقطع ۵ از ۲۰.



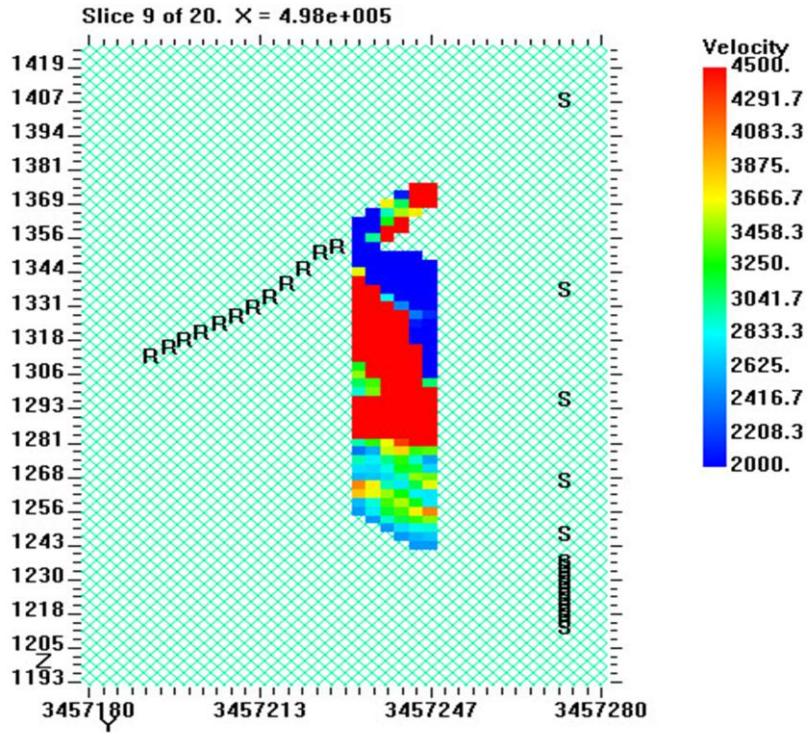
شکل (الف-۳۶): مدل سرعتی بین گمانه ۲۱۴ و سطح تکیه‌گاه راست، مقطع ۶ از ۲۰.



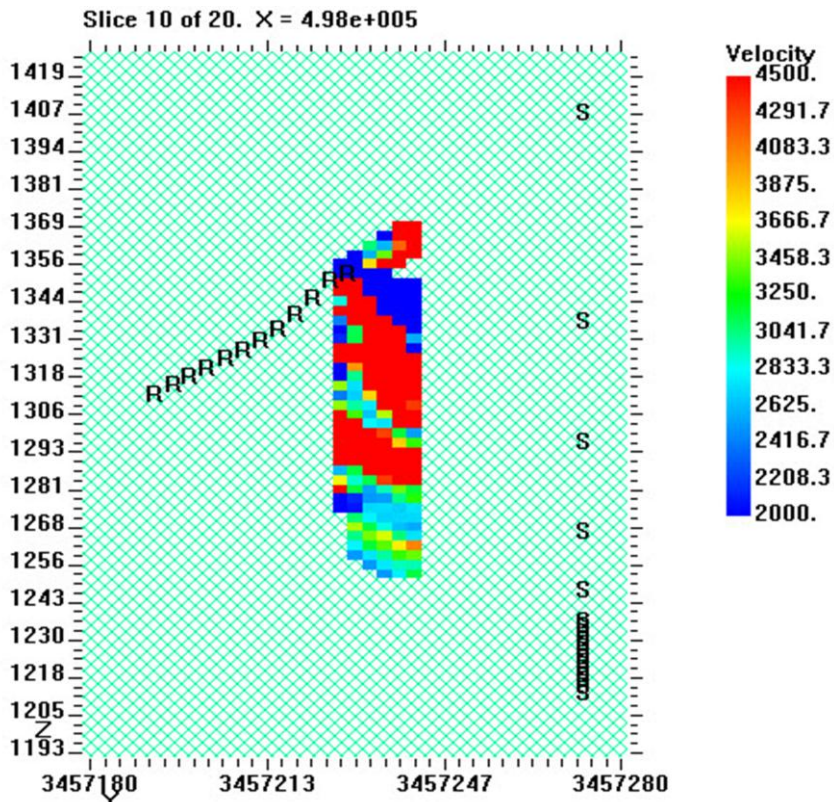
شکل (الف-۳۷): مدل سرعتی بین گمانه ۲۱۴ و سطح تکیه‌گاه راست، مقطع ۷ از ۲۰.



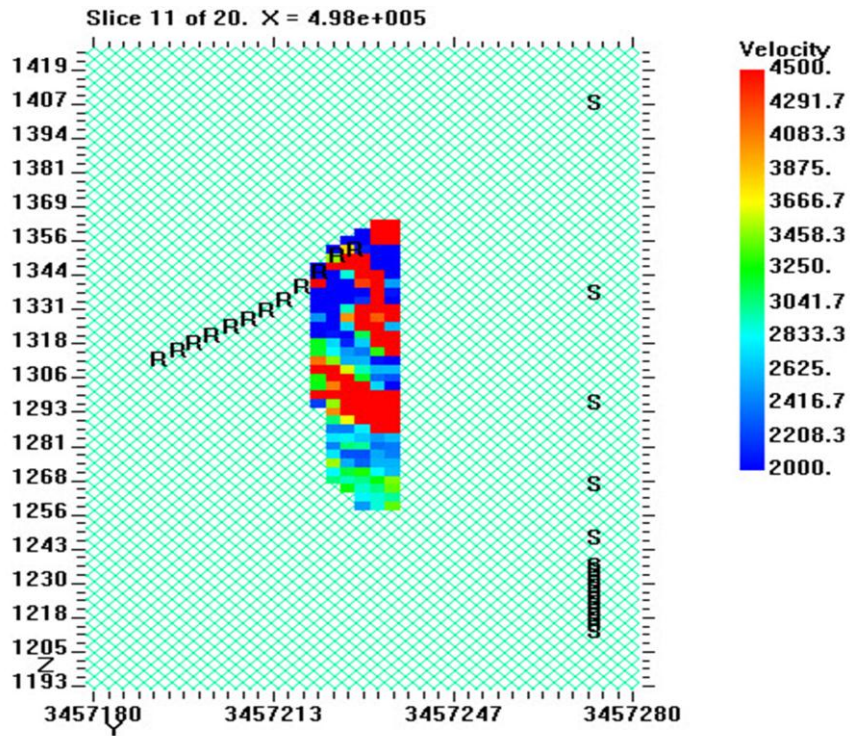
شکل (الف-۳۸): مدل سرعتی بین گمانه ۲۱۴ و سطح تکیه‌گاه راست، مقطع ۸ از ۲۰.



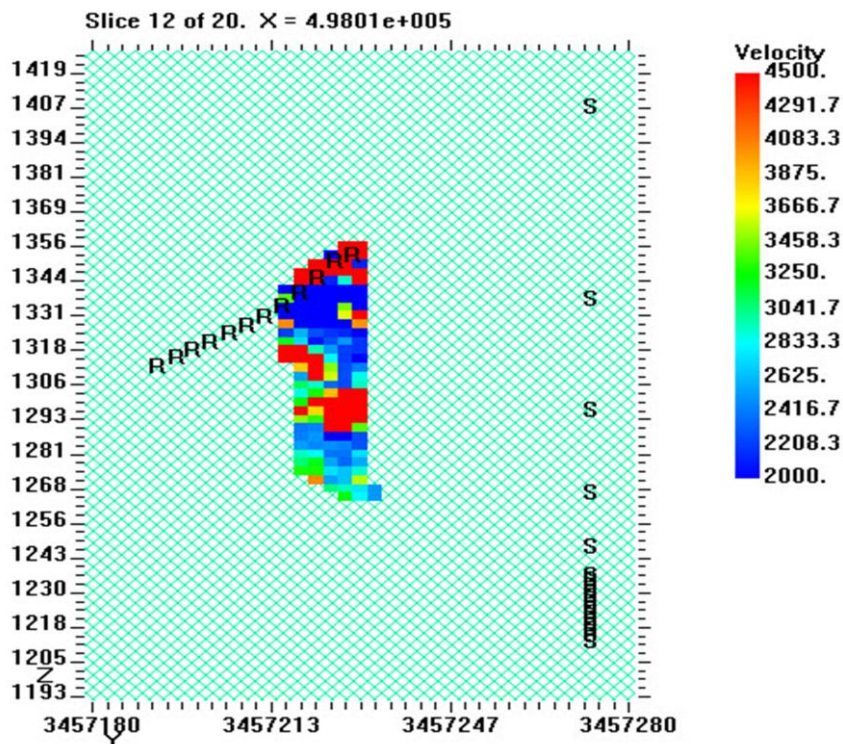
شکل (الف-۳۹): مدل سرعتی بین گمانه ۲۱۴ و سطح تکیه‌گاه راست، مقطع ۹ از ۲۰.



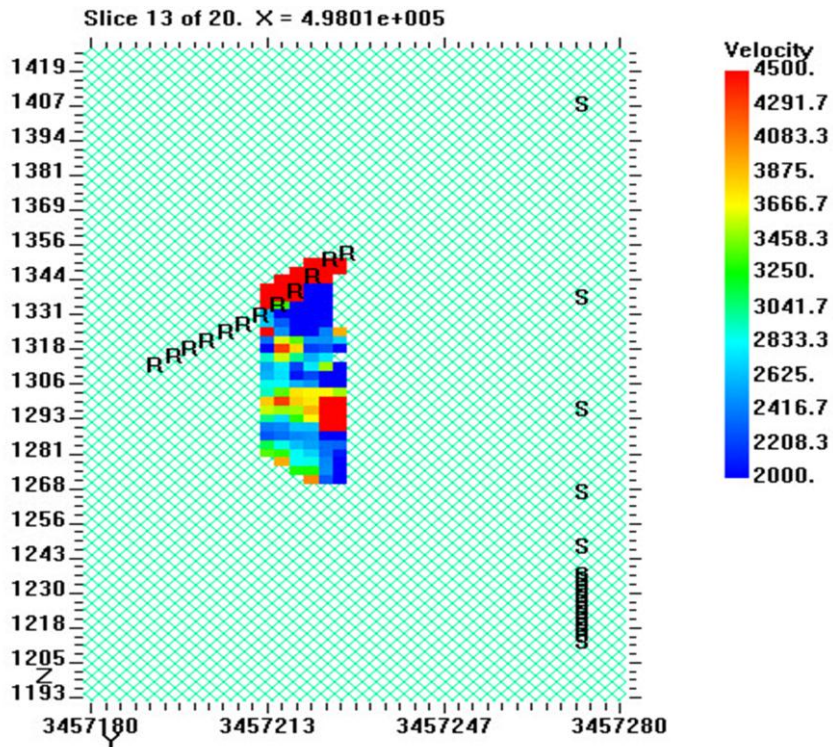
شکل (الف-۴۰): مدل سرعتی بین گمانه ۲۱۴ و سطح تکیه‌گاه راست، مقطع ۱۰ از ۲۰.



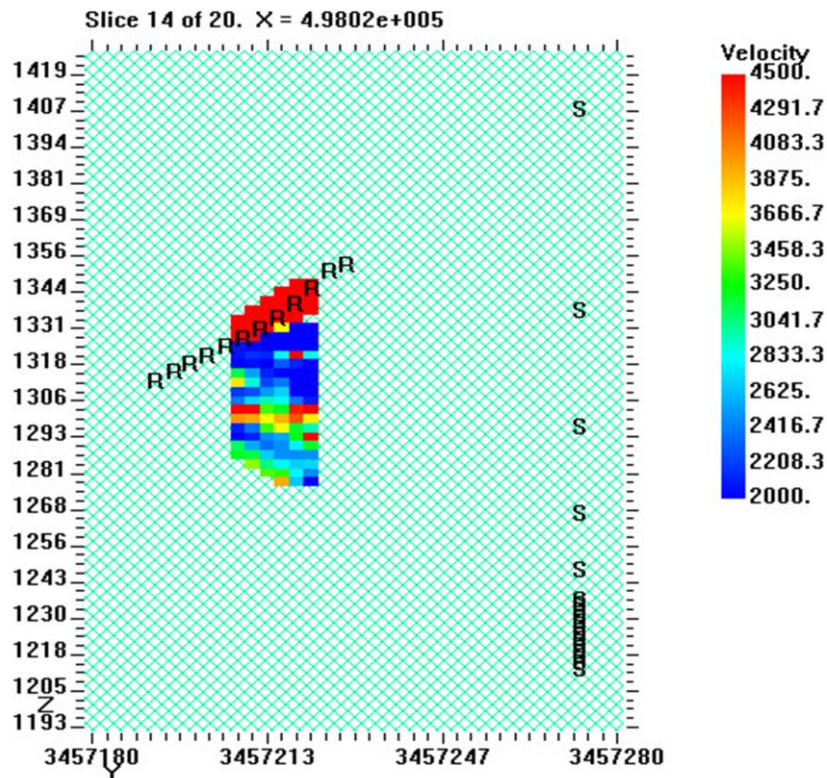
شکل (الف-۴۱): مدل سرعتی بین گمانه ۲۱۴ و سطح تکیه‌گاه راست، مقطع ۱۱ از ۲۰.



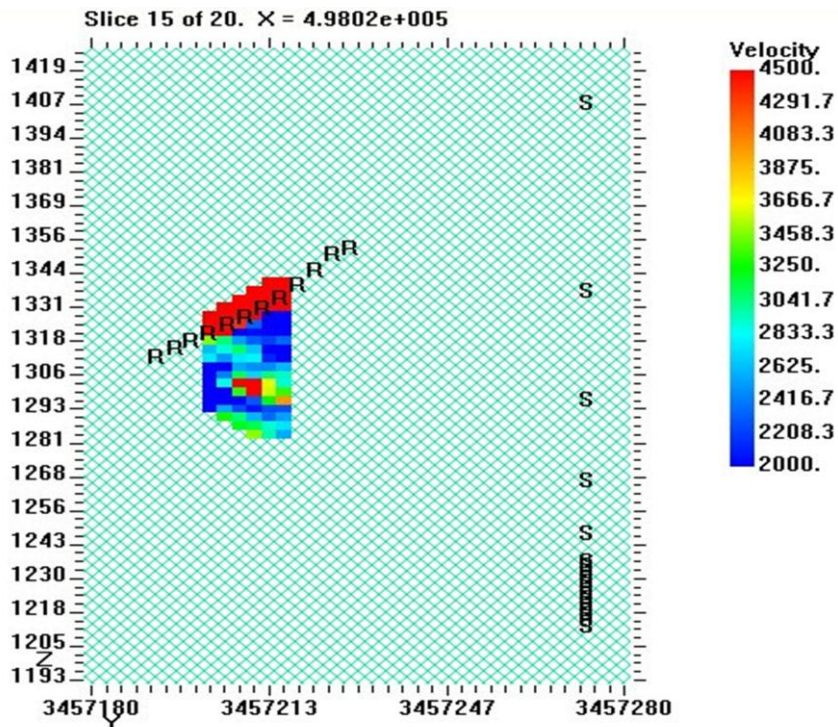
شکل (الف-۴۲): مدل سرعتی بین گمانه ۲۱۴ و سطح تکیه‌گاه راست، مقطع ۱۲ از ۲۰.



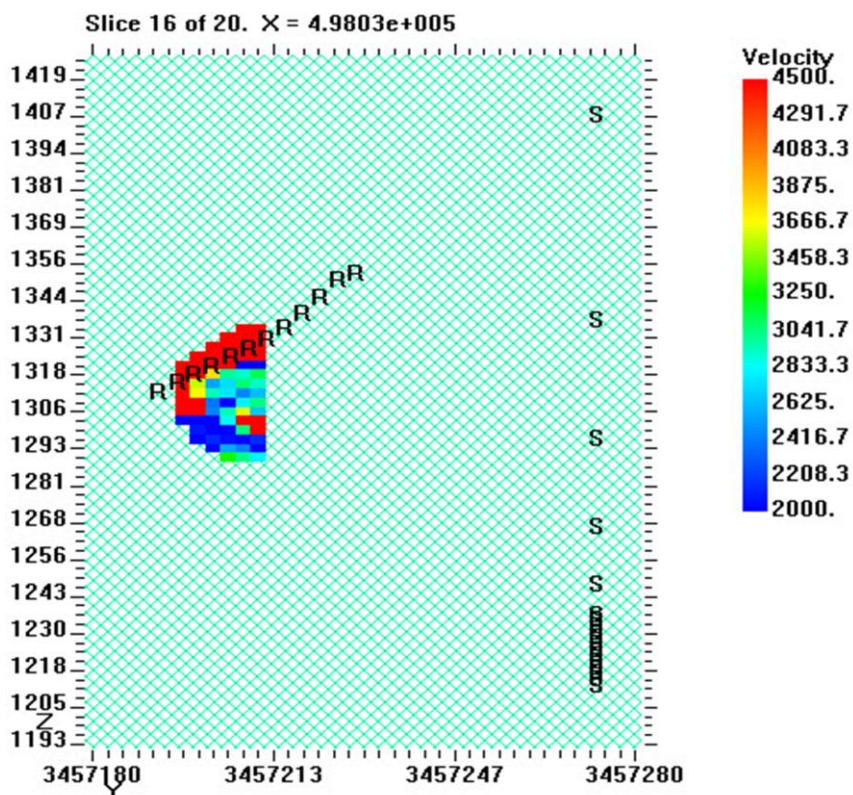
شکل (الف-۴۳): مدل سرعتی بین گمانه ۲۱۴ و سطح تکیه‌گاه راست، مقطع ۱۳ از ۲۰.



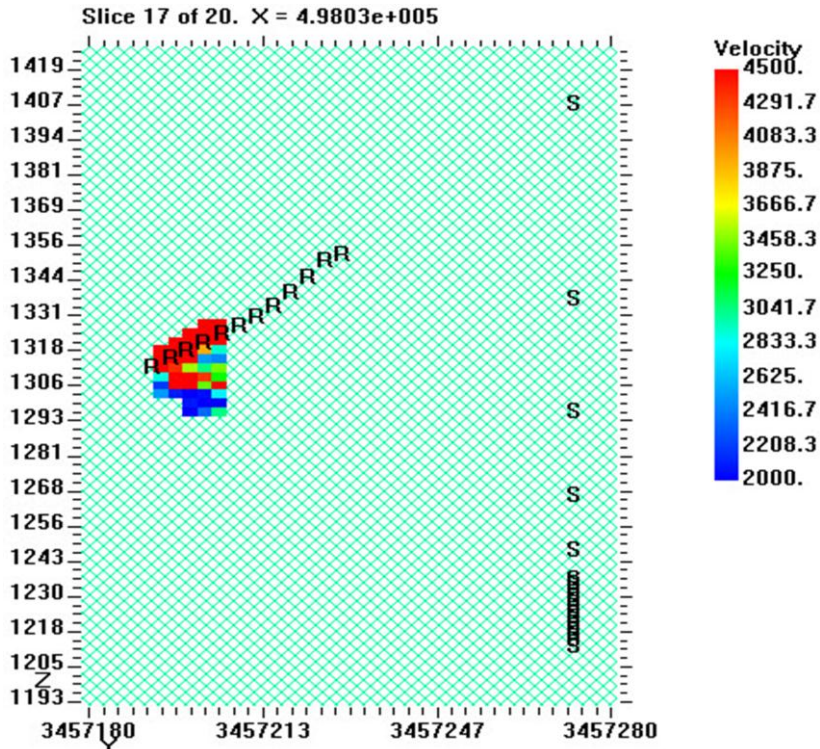
شکل (الف-۳۴): مدل سرعتی بین گمانه ۲۱۴ و سطح تکیه‌گاه راست، مقطع ۱۴ از ۲۰.



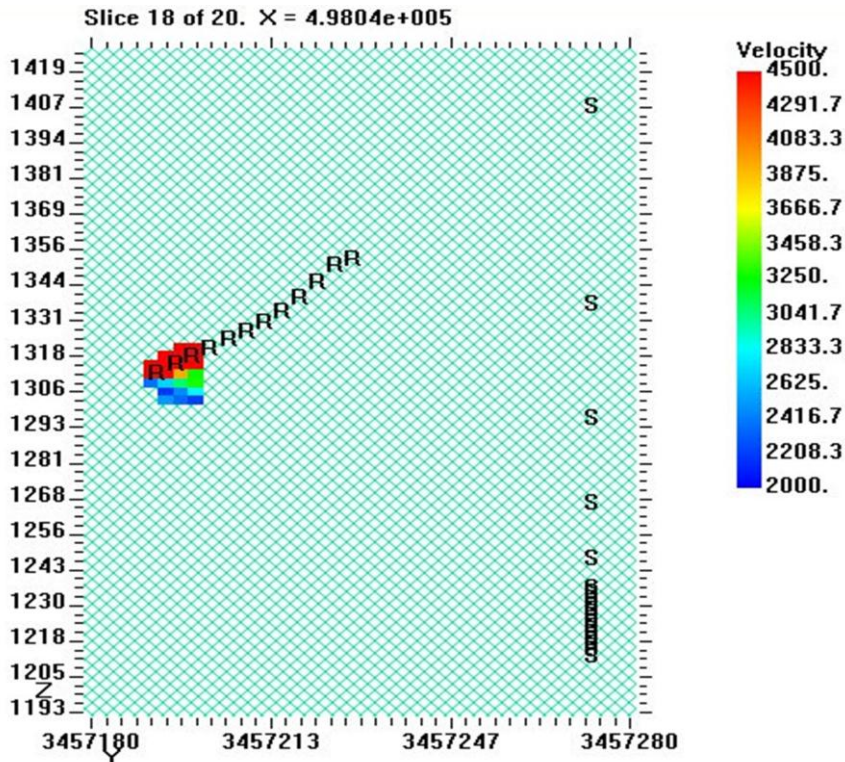
شکل (الف-۴۵): مدل سرعتی بین گمانه ۲۱۴ و سطح تکیه‌گاه راست، مقطع ۱۵ از ۲۰.



شکل (الف-۴۶): مدل سرعتی بین گمانه ۲۱۴ و سطح تکیه‌گاه راست، مقطع ۱۶ از ۲۰.

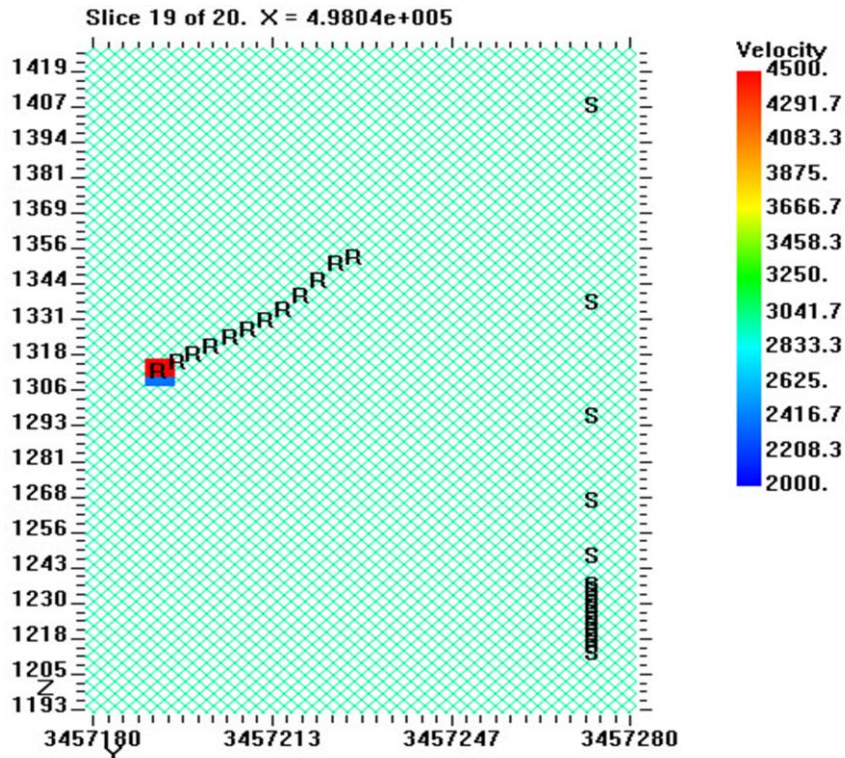


شکل (الف-۴۷): مدل سرعتی بین گمانه ۲۱۴ و سطح تکیه‌گاه راست، مقطع ۱۷ از ۲۰.

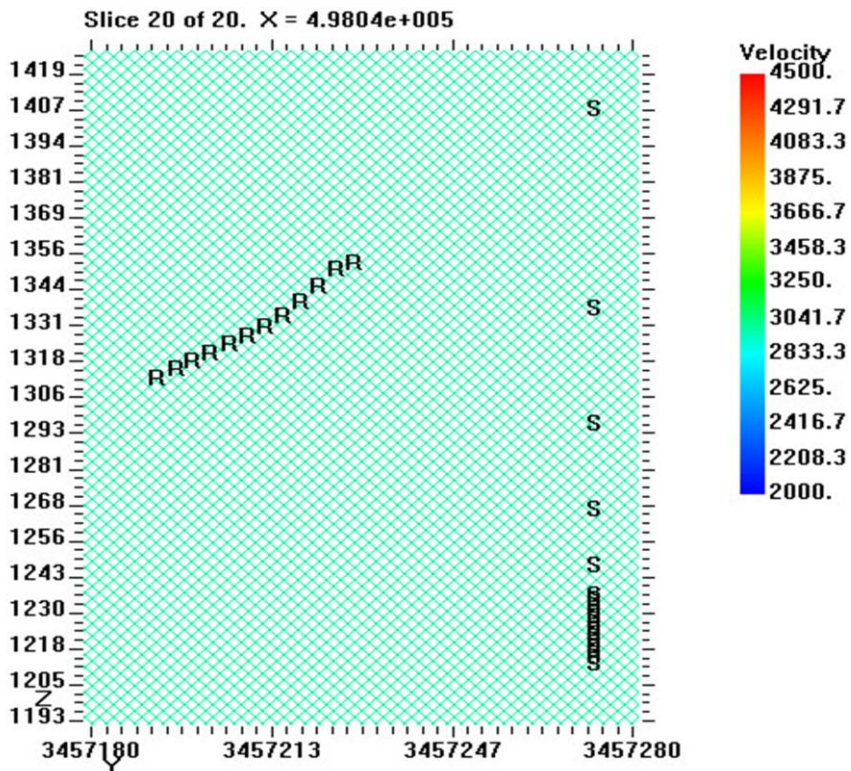


شکل (الف-۴۸): مدل سرعتی بین گمانه ۲۱۴ و سطح تکیه‌گاه راست، مقطع ۱۸ از ۲۰.



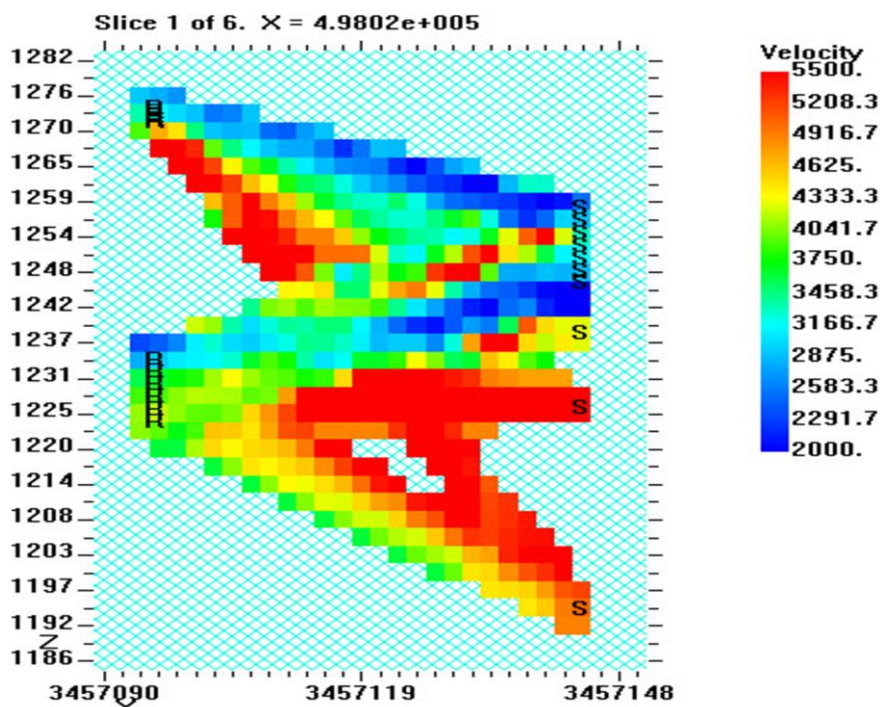


شکل (الف-۴۹): مدل سرعتی بین گمانه ۲۱۴ و سطح تکیه‌گاه راست، مقطع ۱۹ از ۲۰.

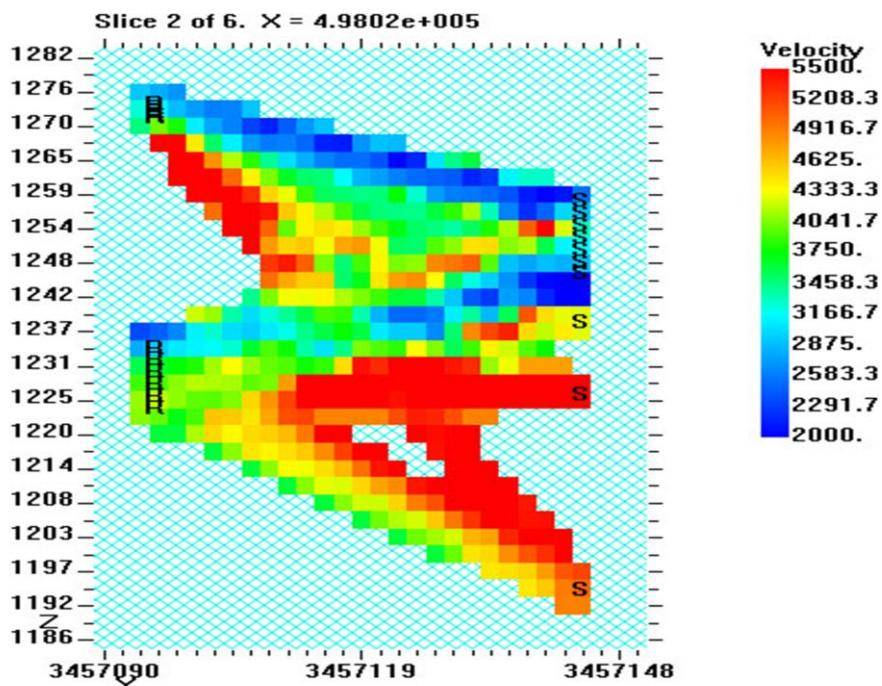


شکل (الف-۵۰): مدل سرعتی بین گمانه ۲۱۴ و سطح تکیه‌گاه راست، مقطع ۲۰ از ۲۰.

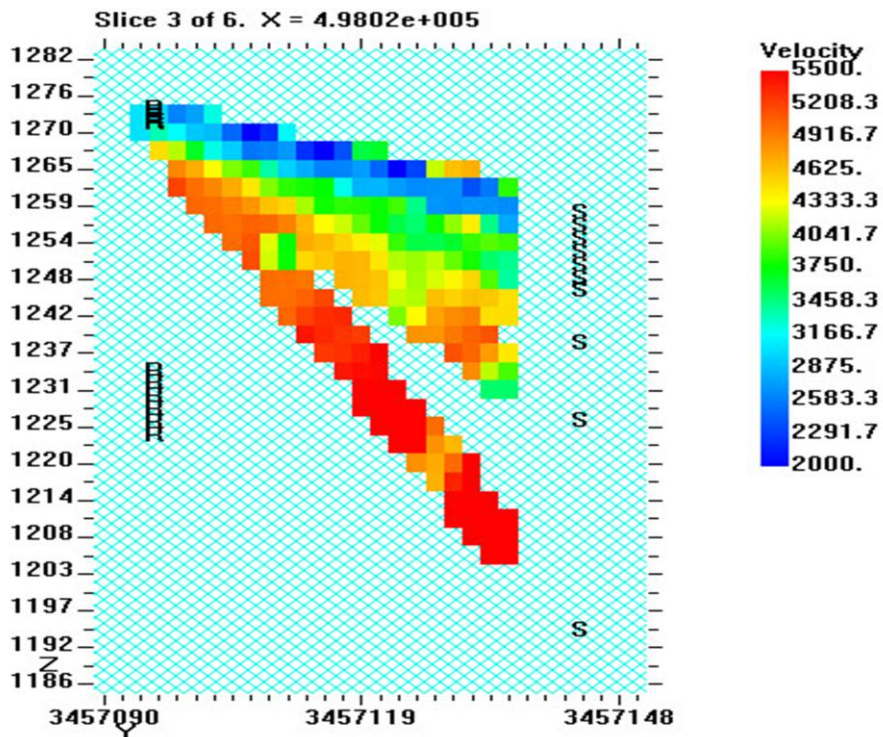
الف-۴ تصاویر ۶ مقطع سرعت پردازش شده بین گمانه‌های ۱۲ و ۱۳ در بستر رودخانه



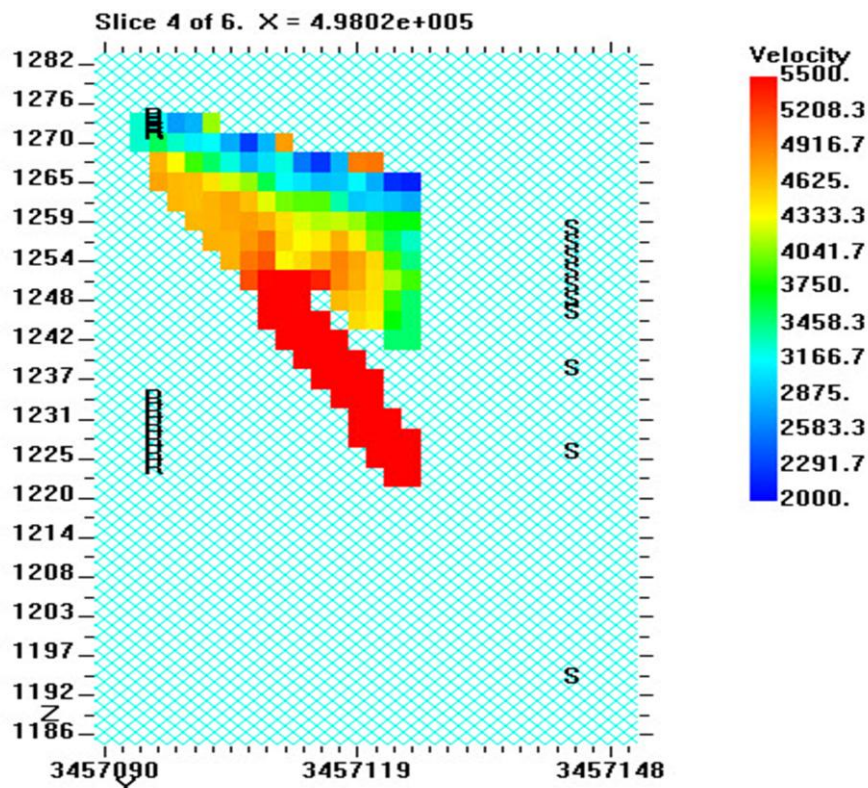
شکل (الف-۵۱): مدل سرعتی بین گمانه‌های ۱۲ و ۱۳ و ساحل چپ، مقطع ۱ از ۶.



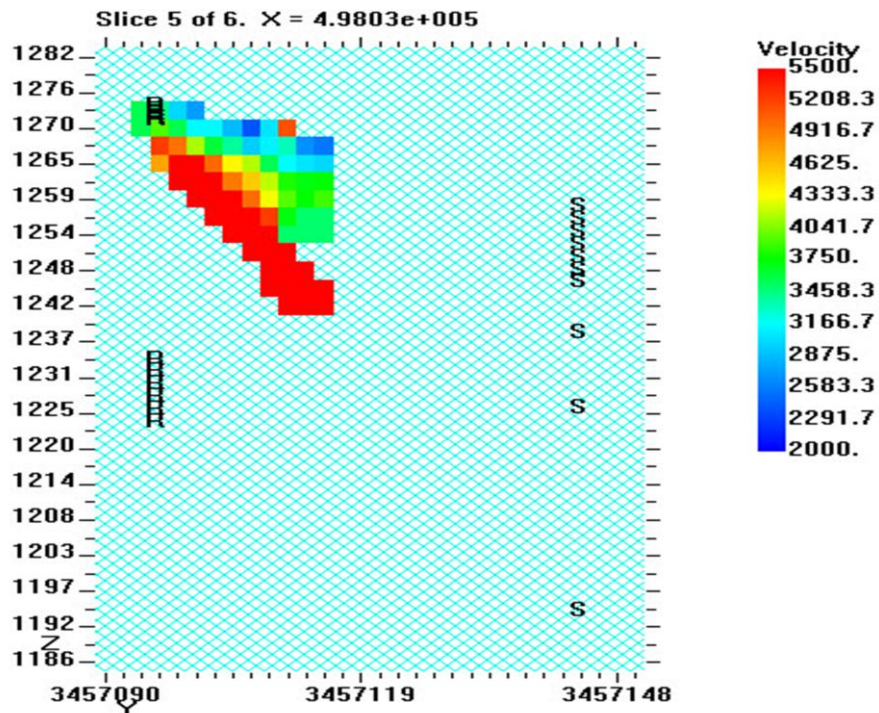
شکل (الف-۵۲): مدل سرعتی بین گمانه‌های ۱۲ و ۱۳ و ساحل چپ، مقطع ۲ از ۶.



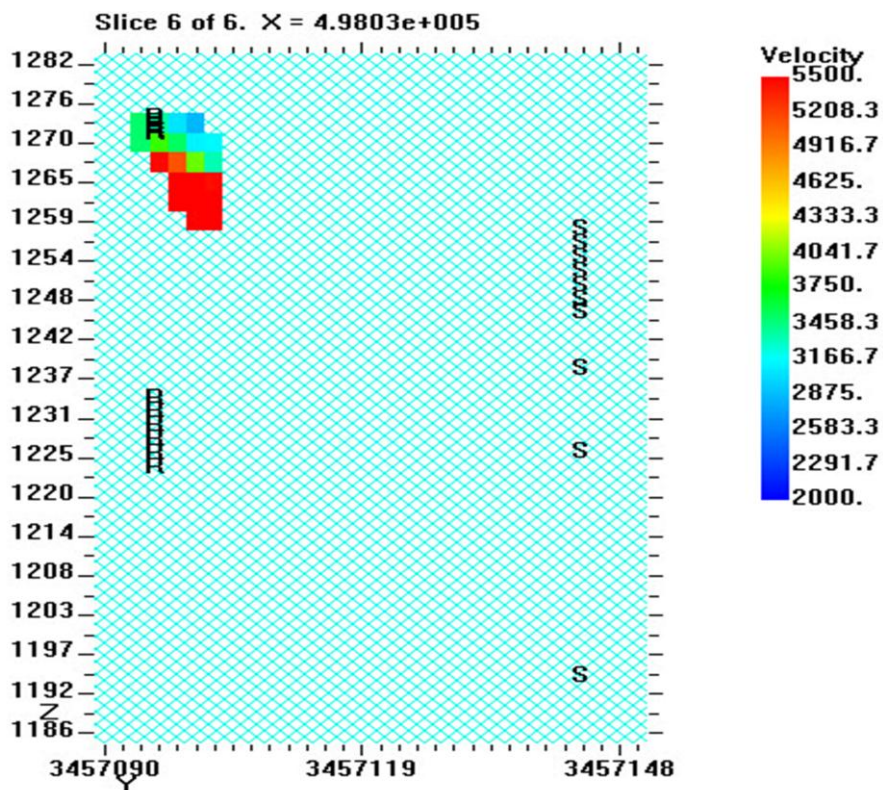
شکل (الف-۵۳): مدل سرعتی بین گمانه‌های ۱۲ و ۱۳ و ساحل چپ، مقطع ۳ از ۶.



شکل (الف-۵۴): مدل سرعتی بین گمانه‌های ۱۲ و ۱۳ و ساحل چپ، مقطع ۴ از ۶.



شکل (الف-۵۵۵): مدل سرعتی بین گمانه‌های ۱۲ و ۱۳ و ساحل چپ، مقطع ۵ از ۶.



شکل (الف-۵۶): مدل سرعتی بین گمانه‌های ۱۲ و ۱۳ و ساحل چپ، مقطع ۶ از ۶.

## منابع و مراجع

احسان بخش م، انصاری مقدم ف، باقرزاده ن، (۱۳۷۴)، گزارش زمین‌شناسی برگه ۱/۱۰۰۰۰۰ چنگ، سازمان زمین‌شناسی ایران.

بایرام نژاد ا، قیطانچی م، میرزایی م، (۱۳۸۹)، "توموگرافی دوبعدی پوسته در شمال غرب ایران با استفاده از زمین‌لرزه‌های محلی"، چهاردهمین کنفرانس ژئوفیزیک ایران، ص ۱۰۹۹-۱۱۰۳، تهران. خسروتهرانی خ، (۱۳۶۷)، کلیاتی در باره چینه‌شناسی ایران و مقاطع تیپ تشکیلات، انتشارات دانشگاه تهران، ص ۳۰۰.

درویش‌زاده ع، (۱۳۷۰)، زمین‌شناسی ایران، چاپ اول، انتشارات امیرکبیر، تهران، ص ۶۵۳. گلشن ص، آشتیانی م، زرقانی م، (۱۳۸۹)، "گزارش زمین‌شناسی مهندسی و ژئوتکنیک سد خرسان ۳"، شرکت توسعه منابع آب و نیروی ایران، ص ۱۹.

معماریان ح، رضایی م، رجایی ا، (۱۳۸۰)، "استفاده از روش توموگرافی در بدست آوردن پارامترهای مکانیکی سنگ"، اولین کنفرانس مکانیک سنگ ایران، تهران.

Aki, K. and Lee, H.K., (1976), Determination of three-dimensional anomalies under a seismic array using first P arrival times from local earthquakes:1. A homogeneous initial model. *J. Geophys*, pp.4381-4399.

Aki, K., Chvnristoffersson, A. and Husebye, E.S., (1977), Determination of the three-dimensional seismic structure of the lithosphere, *J. Geophys*, pp.277-296.

Aki, K. and Richards, P.G., (1980), Quantative seismology, Theory and methods: W.H.Freeman and Co.

Al-Rufaii, K., (2002), Seismic tomography in areas associated with complex near-surface structures: Ph. D. dissertation, University of Houston.

Balch, A.H., Lee, M.W., Miller, J.J., Ryder, R.T., (1982), The use of vertical seismic profiles in seismic investigations: *Geophysics*, 47, pp.906-918.

Bostock, M.G., Hyndman, R.D., Rondenay, S.J., and Peacock, S., (2002), An inverted continental Moho and the serpentinization of the forearc mantle. *Nature*, 417, pp.536–538.

Bracewell, R.N., (1956), Strip integration in radio astronomy: *Australian J. of Physics*, 9, pp.198-217.

Brooks, R.A. and di Chiro, G., (1976), Principles of computer assisted tomography (CAT) in radiographic and radioisotopic imaging: *Phys. Med. Biol.*, 21, pp.689-732.

Carcione, J.M., Gérard, C., Herman, G.C. and Kroode, A.P.E., ( 2002), Seismic modeling. *Geophysics*, Luxembourg, Vol. 67, no. 4, pp.1304-1325.

Dines, K.A. and Lytle, R.J., (1979), Computerized geophysical tomography: *Proc. IEEE*, 67, pp.1065-1073.

Ellsworth, W.L. and Koyagani, R.Y., (1977), Three-dimension crust and upper mantle structure of the Kilauea volcano, Hawaii. *J. Geophys. Res.*, 82, pp.5379–5394.

Filippos I. L., Roger A. C., Ioannis F. L and Costas C. M., (2003), Accurate seismic inversion techniques in prospecting for small size archaeological features: the case of Akrotiri excavation area on Thera Island, Greece, *International Conference of Earth Sciences and Electronics, Istanbul (ICESE)*.

GEOTOMCG, (2005), Installing and running the three-dimensional tomography program.

Gilbert, P., (1972), Iterative methods for the three-dimensional reconstruction of an object from projections: *J. Theor. Biol.* 36, pp.105-117.

Gordon, R. ., Bender, R. . and Herman, G. .T., (1970), Algebraic Reconstruction Techniques (ART) for three dimensional electron microscopy and x-ray photography: J. Theor. Biol. 29, pp.471-481.

Hardage, H.A., (1985), Vertical seismic profiling- PartA: Principles: Geophysical Press.

Herman, G.T., (1980), Image Reconstruction From Projections: The Fundamentals of Computed Tomography: Academic Press.

Hounsfield, G. .N., (1973), Computerized transverse axial scanning (tomography) Part I: Description of system: British J. Radiology, 46, pp.1016-1022.

Ivansson, S., (1985), A study of methods for tomographic velocity estimation in the presence of low-velocity zones: Geophysics, 50, pp.969-988.

Kaczmarz, S., (1937), Angenahert auflosung von systemen linearen gleichungen: Bull. Acad. Polon. Sci. Lett. A, pp.355.

Lehmann, B., (2007), Seismic travel time tomography for engineering and exploration applications, EAGE Publications bv, pp.14-79

Mao, W. and Stuart, G.W., (1997), Transmission-reflection tomography: Application to reverse VSP data: Geophysics, 62, pp.884-894.

McMechan, G.A. and Hu, L.Z., (1986), On the effect of recording aperture in migration of vertical seismic profile data: Geophysics, 51, pp.2007-2010.

Mirand, F., (1989), Geophysical Tomographic Reconstruction of Travel-time and Amplitude Anomalies, University College of Swansea.

Mitchell, B.J., Cheng, C. C., and Stauder, W. A., (1977), Three-dimensional velocity model of the lithosphere beneath the New Madrid seismic zone. *Bull. Seismol. Soc. Am.*, 62: pp.1061-1074.

Moser, T.J., (1991), Shortest path calculations of seismic rays. *Geophys.*, 56: pp.59–67.

Nakanishi, I. and Yamaguchi, K., (1986), A numerical experiment on nonlinear image reconstruction from first-arrival times for two-dimensional island arc structure. *J. Phys. Earth*, 34: pp.195–201.

Nolet, G., (2008), A Breviary Of Seismic Tomography: Imaging the Interior of the Earth and Sun, University of Nice/Sophia Antipolis, France, Cambridge University Press, pp.40.

Paige, C.C. and Saunders, M.A., (1982), LSQR: An algorithm for sparse linear equations and sparse least squares: *ACM Trans. Math. Software*, 8, pp.43-71, 195-209.

Peterson, J.E., Paulsson, N.P., McEvelly, T.V., (1985), Applications of algebraic reconstruction techniques to crosshole seismic data, *Geophysics*, Vol. 50, No. 10; pp. 1566-1580.

Radon, J., (1917), Über die Bestimmung von Funktionen durch ihre integralwerte langs Gewisser Mannigfaltigkeiten, *Bu.Suchss. Akad. Leipzig: Math. Phys.K* . 69, pp.262.

Stewart, R.R., Huddleston, P.D., Kan, T.K., (1984), Seismic versus sonic velocities: A vertical seismic profiling study: *Geophysics*, 49, pp.1153-1168.

Stewart, R.R., (1992), Exploration Seismic Tomography: Fundamentals: SEG Course Notes Series, Vol. 3, University of Calgary, Calgary, Alberta, Canada, pp.39.

Thurber, C.H., (1984), Seismic detection of the summit magma complex of Kilauea volcano, Hawaii. *Science*, 223:pp.165–167.

Wadhwa, R.S., Chaudhari, M.S., Saha, A., Mukhopadhyay, R., Ghosh, N., (2009), Deciphering of weak zones using cross-hole seismic tomography, *J. Ind. Geophys.*, Vol.13, No.1, pp.9-16.



Wu, R.S. and Toksoz, M.N., (1987), Diffraction tomography and multisource holography applied to seismic imaging: *Geophysics* 52, 1, pp.11-25.

Yilmaz, O., (1987), *Seismic data analysis: SEG Series on Investigations in Geophysics, Volume I*, pp.1907.

Yordkayhun, S., Tryggvason, A and Juhlin, C., (2007), A 3D seismic traveltime tomography study of the shallow subsurface at the CO<sub>2</sub>SINK project site, Ketzin, Germany. EAGE 69th Conference & Exhibition, London, UK.

Youla, D.C and Webb, H., (1982).Image Restoration by the Method of Convex Projections: Part 1. Theory, *IEEE transactions on medical imaging*, Vol. MI-1, NO. 2. pp.83-94.

Zelt, C.A., Azaria, A and Levander, A., (2006), 3D seismic refraction traveltime tomography at a groundwater contamination site, *Geophysics*, Vol. 71, NO. 5, pp.67–78.

Zhou, H., Mendoza, J.A C. A. Link, J. Jech, and J. A. McDonald., (1993), Crosswell imaging in a shallow unconsolidated reservoir: *The Leading Edge*, 12, pp.32-36.

Zhou, H., (1997), Determination of velocities and interfaces by multi-scale tomography: 67th Ann. Internat. Mtg: Society of Exploration Geophysicists, Expanded Abstracts, pp.1877-1880.

Zhou, H., (2003), Multi-scale traveltime tomography, *Geophysics*, 68, pp.1639-1649.

Zhou, H., (2004), Multi-scale tomography for crustal P and S velocities in southern California, *PAGEOPH*, 161, pp.283-302.

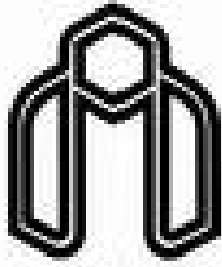
**Abstract:**

Modern exploration seismology has been developing very fast as a result of the growing need to provide new energy resources and to exploit the existing ones more efficiently. Definition of an accurate velocity model is one of the most critical steps for successful imaging of the subsurface. Seismic tomography is one of methods that provides a velocity model of the subsurface of the earth using seismic data. Today this method is applied in many fields in the large scale crustal studies to engineering problems with multiple dimensions. This method can be used in completion of drilling data and geological interpretation of semi-complex areas and to determine the distribution of pores and fractures and precise determination of the weak (low velocity) and strong (high velocity) formations.

In this study using seismic tomography for careful review of existing structures and fractures in Khersan 3 Dam region. The aim of seismic tomography in this region is to detect potential flow and transport paths in mass rocks. Finally, the seismic tomography has clearly identified structures and low velocity areas that correspond with the weaker zones and high velocity areas that correspond with the more compact zones. Revealing the weak zones, in the later stages corrective actions to improve the situation in these areas will be conducted.

To achieve the desired targets, four lines of P-wave seismic tomography data in right abutment and floor of Khersan 3 Dam has been used. From results of selected data, first arrival times are obtained. This arrival times read in Geo Tomo software. In direct modeling, the initial model is defined on the basis of geological and geophysical data. This model represents an initial guess of the subsurface structure is based on existing conditions. After ray tracing by software, inversion processes is performed. Results are two-dimensional and three-dimensional seismic velocity model of the four studies areas. With studies these models, layers of Earth's Condition in right abutment and floor of Khersan 3 Dam basin is characterized. Show models on topography of the area, display positions and areas of high and low speed zones in abutment and floor of dam with better resolution than previously indicated.

**Keywords:** Seismic tomography, First arrival times, Initial model, Inversion, Velocity model, Low velocity areas, Khersan 3 Dam.



**Shahrood University of Technology**  
**Faculty of Mining, Petroleum and Geophysics**

**Determination of velocity model in Khersan 3 dam using  
inversion of first arrival time of seismic waves (Seismic  
Tomography)**

M. Sc. Thesis

**Hossein Mirzavand**

Supervisors:

**Dr. A. Roshandel Kahoo**

**Dr. A. Nejati Kalateh**

Advisors:

**Dr. S.E. Jalali**

**Mr. K. Mozafari**

September 2013