

ارزیابی مکانیزم شکست سقف کارگاه‌های جبهه کار طولانی با تجزیه و تحلیل امواج لرزه‌ای القایی

ستار مهدوری^۱؛ کوروش شهریار^{۲*}؛ مصطفی شریف‌زاده^۳

۱- استادیار، عضو هیات علمی دانشکده مهندسی معدن-دانشگاه صنعتی همدان satar.mahdevari@hut.ac.ir

۲- استاد، عضو هیات علمی دانشکده مهندسی معدن و متالورژی-دانشگاه صنعتی امیرکبیر k.shahriar@aut.ac.ir

۳- دانشیار، عضو هیات علمی دانشکده مهندسی معدن و متالورژی-دانشگاه صنعتی امیرکبیر و عضو هیات علمی دانشگاه کورتین استرالیا m.sharifzadeh@curtin.edu.au

(دریافت ۱۱ مهر ۱۳۹۵، پذیرش ۸ خرداد ۱۳۹۶)

چکیده

پدیده شکست سنگ در محدوده کارگاه‌های جبهه کار طولانی که در اثر تمرکز تنش رخ می‌دهد، یکی از مهم‌ترین عواملی است که سبب اختلال در عملیات استخراج، تأخیرهای طولانی مدت، کاهش بهره‌وری و کاهش ایمنی می‌شود. با افزایش عمق و وسعت معادن جبهه کار طولانی، مشکلات ناشی از شکست سنگ به‌ویژه در لایه‌های سقف بلافاصله کارگاه و محدوده جبهه کار به شدت افزایش خواهد یافت. از سوی دیگر امکان پیش‌بینی این پدیده با استفاده از ابزارهای رفتارنگاری سنتی وجود ندارد؛ به‌طوری که فاقد توجیه اقتصادی یا دقت کافی می‌باشند. در این تحقیق مکانیزم شکست، شدت ناپایداری و جهت‌یافتگی شکست‌های قریب‌الوقوع که در حین پیشروی جبهه کار رخ می‌دهند، از طریق تجزیه و تحلیل امواج لرزه‌ای القایی ارزیابی شده است. برای این منظور معدن زغال‌سنگ طبس به‌عنوان مطالعه موردی انتخاب شده است. به‌منظور ارزیابی مکانیزم شکست سنگ، مکانیزم کانونی امواج لرزه‌ای القایی با استفاده از روش وارونه‌سازی تانسور گشتاور لرزه‌ای تعیین شده است. به این ترتیب که تانسور گشتاور لرزه‌ای بر اساس شکل موج امواج لرزه‌ای محاسبه می‌شود و در مرحله بعد با تجزیه تانسور گشتاور لرزه‌ای، مکانیزم شکست سنگ تعیین می‌شود. همچنین جهت‌یافتگی ناپایداری‌ها از طریق ترسیم الگوی پراش امواج لرزه‌ای به‌صورت سه بعدی مشخص شده است. طبق نتایج، مکانیزم کانونی غالب در این معدن به‌صورت نیروی دوقطبی برداری خطی بوده که متناظر با مکانیزم شکست فشاری/کششی است. همچنین مکانیزم شکست برشی در محدوده ناپیوستگی‌های زمین‌شناسی به ویژه گسل‌ها رخ داده است. نتایج این تحقیق نشان می‌دهد که پایش و تجزیه و تحلیل امواج لرزه‌ای القایی معیار مناسبی برای شناخت بهتر شرایط شکست سنگ می‌باشد؛ به‌طوری که با شناسایی نواحی ناپایدار، نوع مکانیزم شکست و جهت‌یافتگی ناپایداری‌ها کمک شایانی به اتخاذ اقدامات پیشگیرانه از جمله اصلاح طرح استخراج، تغییر نرخ پیشروی، انتخاب سیستم نگهداری مناسب و نصب به موقع آن خواهد کرد.

کلمات کلیدی

روش استخراج جبهه کار طولانی، مکانیزم شکست، امواج لرزه‌ای القایی، تانسور گشتاور لرزه‌ای، الگوی پراش سه بعدی

۱- مقدمه

برای موفقیت در کنترل زمین و اجرای موفق و ایمن عملیات استخراج معدن است [۲].

همان‌طور که در شکل ۱ مشاهده می‌شود، پدیده شکست لایه‌های سقف در محدوده کارگاه استخراج با تخریب سقف در منطقه تخریب متفاوت است. شکست سقف که اغلب غیرقابل پیش‌بینی است، ناشی از تمرکز تنش در سقف یا جلوی جبهه‌کار است؛ در حالی که تخریب سقف که به‌صورت عمدی اتفاق می‌افتد در اثر استخراج لایه زغال‌سنگ و تخریب لایه‌های سقف در پشت سیستم نگهداری رخ می‌دهد.



شکل ۱: نمای شماتیک شکست سقف در محدوده کارگاه استخراج

با استخراج لایه زغال‌سنگ در عمق، وضعیت تنش در پیرامون کارگاه استخراج به‌صورت تابعی از دو مؤلفه (۱) تنش محیطی^۱ ناشی از وزن روباره و (۲) تنش القایی^۲ ناشی از استخراج معدن ظاهر می‌شود [۳]. در این خصوص، تعیین تنش‌های القایی و فشارهای تکیه‌گاهی اطراف مرزهای پهنه و بررسی تأثیر آن‌ها بر پایداری کارگاه، تونل‌ها، بازکننده‌ها، پایه‌ها و دیواره‌ها از جمله پارامترهای کلیدی برای طراحی یک پهنه جبهه‌کار طولانی می‌باشند.

از طرف دیگر توزیع بار وارد بر سیستم نگهداری اغلب متأثر از شرایط زمین‌شناسی، میزان تراکم مواد در منطقه تخریب و اندرکنش بین لایه‌های سقف و سیستم نگهداری است. بنابراین با استخراج لایه زغال‌سنگ، شرایط تعادل تنش‌های برجا تغییر کرده و توزیع مجدد تنش‌های برجا در محدوده کارگاه سبب تمرکز تنش در نقاط مختلف اطراف پهنه می‌شود. در این خصوص مطابق شکل ۲، سه نوع فشار تکیه‌گاهی ایجاد می‌شود که عبارتند از: فشار تکیه‌گاهی جلویی^۳، فشار تکیه‌گاهی جانبی^۴ و فشار تکیه‌گاهی عقبی^۵ [۴].

معمولاً فشار تکیه‌گاهی جلویی اهمیت بیشتری دارد و عامل اصلی شکست سقف در جلوی جبهه‌کار است؛ به‌طوری که در فاصله ۱ تا ۳ متری جلوی جبهه‌کار، به حداکثر مقدار خود یعنی حدود ۵ برابر فشار اولیه روباره افزایش می‌یابد. این افزایش فشار در جلوی جبهه‌کار حتی بدون در نظر گرفتن برهم‌نهی^۶ تنش‌های ناشی از استخراج پهنه مجاور، سبب ایجاد مشکلات متعددی برای کنترل لایه‌ها در جلوی کارگاه و هر دو تونل ورودی و خروجی می‌شود [۱].

با حفر یک فضای زیرزمینی، تنش‌های برجا دچار اغتشاش شده و توزیع مجدد تنش‌ها، سبب تغییرشکل و جابه‌جایی توده‌سنگ می‌شود. شدت این تغییرات در روش استخراج جبهه‌کار طولانی نسبتاً زیاد است و پیشروی مداوم جبهه‌کار باعث تغییر تنش‌های القایی و تمرکز تنش در اطراف پهنه به ویژه در محدوده کارگاه استخراج می‌شود که در صورت عدم کنترل مناسب و به موقع، شکست سقف کارگاه و به تبع آن کاهش بهره‌وری و ایمنی را در پی خواهد داشت.

با توجه به طرح منحصر به فرد پهنه استخراجی در روش جبهه‌کار طولانی باید سه عامل مهم برای کنترل شکست لایه‌های سقف به طور همزمان بررسی شوند: (۱) خصوصیات تخریب‌پذیری لایه‌های روباره، (۲) اندازه‌گیری تمرکز تنش و میزان جابه‌جایی‌ها به‌صورت برجا و تحلیل پایداری تونل‌های اطراف پهنه و (۳) کنترل شکست سقف و تحلیل شرایط بارگذاری برای طراحی سیستم نگهداری قدرتی [۱]. بنابراین کنترل مناسب لایه‌های سقف مهم‌ترین عامل برای کسب موفقیت در روش استخراج جبهه‌کار طولانی است.

به‌همین دلیل در این تحقیق سعی شده است با در نظر گرفتن سه عامل فوق، مکانیزم شکست و نحوه حرکت لایه‌های سقف در کارگاه‌های جبهه‌کار طولانی با استفاده از یک روش غیرمخرب مبتنی بر امواج لرزه‌ای القایی که در اثر تمرکز تنش و گسترش ترک‌ها منتشر می‌شوند، ارزیابی و پیش‌بینی شود. برای این منظور کارگاه E2 معدن زغال‌سنگ طبس به‌عنوان مطالعه موردی انتخاب شده است. به این ترتیب با پیش و تجزیه و تحلیل امواج لرزه‌ای ناشی از شکست سنگ در محدوده کارگاه، پارامترهایی همچون مکانیزم شکست، شدت ناپایداری، موقعیت فضایی رشد ترک و جهت‌یافتگی شکست به‌صورت غیرمخرب برآورد شده‌اند.

۲- شکست سقف در کارگاه‌های جبهه‌کار طولانی

قاعده کلیدی برای طراحی یک معدن به روش استخراج جبهه‌کار طولانی، تضمین پایداری همه فضاهای زیرزمینی معدن به‌صورت طبیعی یا مصنوعی در طول مدت استخراج می‌باشد. بنابراین برای طراحی معادن زیرزمینی اطلاع از شرایط زمین‌شناسی و ژئومکانیکی منطقه از قبیل وضعیت تنش‌های برجا قبل از استخراج و توزیع مجدد آن‌ها پس از استخراج و همچنین مقاومت لایه‌های سنگی ضروری است. در این خصوص شناخت مکانیزم شکست سقف مهم‌ترین عامل

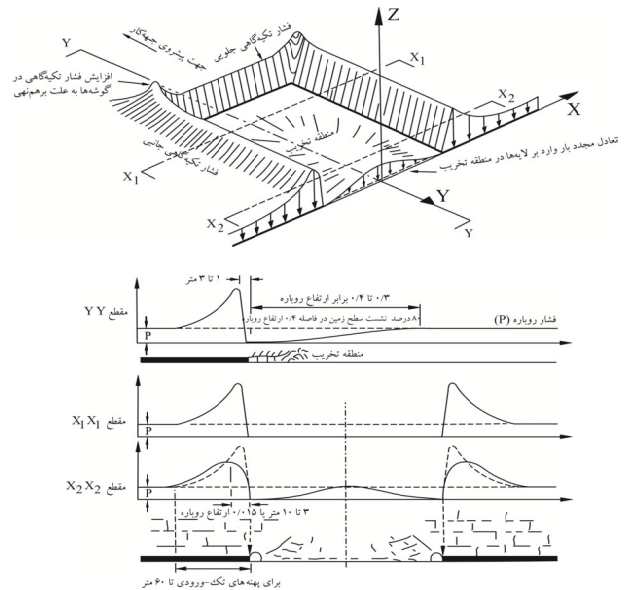
۳- آزمون غیرمخرب امواج لرزه‌ای القایی

امواج لرزه‌ای در اثر فعالیت‌های مختلفی همچون: استخراج معادن زیرزمینی و سطحی، فشار ناشی از پر شدن مخزن سدهای بزرگ، تزریق سیالات به مخازن زیرزمینی عمیق، تخلیه سیالات از سازندهای زیرسطحی و آتشفباری در معادن ایجاد می‌شوند. برخی از امواج لرزه‌ای ناشی از تمرکز تنش و شکست سنگ در اثر رهایی تنش‌های القایی می‌باشند. این امواج به امواج لرزه‌ای منفعل^۸ یا زمین‌لرزه‌های القایی^۹ معروف بوده و برای متمایز کردن آن‌ها نسبت به سایر امواج لرزه‌ای در اصطلاح به آن‌ها رویدادهای لرزه‌ای القایی^{۱۰} گفته می‌شود [۸].

شکست سنگ و وقوع رویدادهای لرزه‌ای در اثر تمرکز تنش و افزایش تنش‌های القایی، تقریباً دو پدیده غیرقابل اجتناب در معادن زیرزمینی هستند [۹]. رویدادهای لرزه‌ای ناشی از استخراج معدن^{۱۱} بدترین پدیده از نظر ایمنی و بهره‌وری می‌باشند [۱۰]. پایش امواج لرزه‌ای معیاری مفید و قابل اعتماد برای تشخیص رویدادهای لرزه‌ای در محدوده کارگاه‌ها و بازکننده‌های معادن زیرزمینی فراهم می‌کند. اگر چه اولین گزارش مستند راجع به پایش امواج لرزه‌ای القایی به سال ۱۷۳۸ میلادی در معادن زغال‌سنگ استفورد^{۱۲} انگلستان برمی‌گردد [۱۱]، ولی تجهیزات پایش امواج لرزه‌ای در سال ۱۹۰۸ برای اولین بار در منطقه معدنی روهر واقع در بوخوم آلمان نصب شدند [۱۲].

امروزه واضح است که اکثر مواد جامد هنگامی که تحت تنش و تغییرشکل قرار می‌گیرند، سیگنال‌های لرزه‌ای ضعیف منتشر می‌کنند [۱۳]. در واقع معدنچی‌های قدیمی نیز با این پدیده آشنا بوده و با شنیدن صداهای ساطع شده از پایه‌ها و دیواره‌های سنگی یا سیستم نگهداری چوبی، نواحی ناپایدار را به‌صورت تقریبی تعیین می‌کردند. با این وجود، این پدیده تقریباً در دهه ۱۹۴۰ به‌صورت علمی مورد بررسی قرار گرفت و از آن پس استفاده از تجهیزات پایش امواج لرزه‌ای القایی مثل سرعت‌سنج (ژئوفون) و شتاب‌سنج برای مطالعه رویدادهای لرزه‌ای^{۱۳} در معادن زیرزمینی متداول شد.

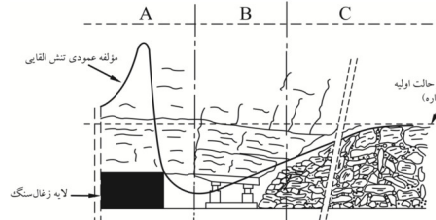
تجزیه و تحلیل یک رویداد لرزه‌ای اطلاعات مهمی در خصوص زمان شروع شکست، موقعیت فضایی منشاء رشد ترک، عمق کانونی لرزه، گشتاور لرزه‌ای، بزرگی لرزه، مکانیزم شکست و جهت‌یابی فضایی انتشار ترک فراهم می‌کند [۱۴]. تجزیه و تحلیل رویدادهای لرزه‌ای در کارگاه‌های جبهه کار طولانی آلمان منجر به ارائه روابط تجربی متعددی شده است. همچنین این مطالعات نشان می‌دهد که امواج لرزه‌ای القایی



شکل ۲: فشارهای تکیه‌گاهی در اطراف پهنه جبهه کار طولانی [۵]

در شکل ۳ تغییرات فشار تکیه‌گاهی جلویی در اطراف کارگاه جبهه کار طولانی نشان داده شده است. در زون A در محدوده ۳۰ متری جلوی جبهه کار، مؤلفه عمودی تنش از مقدار اولیه (فشار روباره) شروع به افزایش می‌کند. به این ترتیب در ابتدا به‌صورت آهسته و سپس با یک نرخ جهشی تا رسیدن به حداکثر مقدار خود افزایش می‌یابد. زون B یک زون کاهش تنش بوده که در آن بار وارد بر سقف خیلی کمتر از فشار روباره است. با فاصله از جبهه کار، مؤلفه عمودی تنش به‌صورت آهسته افزایش می‌یابد و به همین ترتیب در زون C در فاصله چند صد متری پشت کارگاه (در منطقه تخریب) به افزایش ادامه می‌دهد تا به حالت تعادل (فشار روباره) برسد.

موقعیت مکانی حداکثر مقدار فشار تکیه‌گاهی جلویی به علت تفاوت در خصوصیات ژئومکانیکی لایه‌های سنگی همیشه یکسان نیست. این فاصله در لایه‌های زغال‌سنگ انگلستان تقریباً ۱ تا ۳ متر در جلوی خط جبهه کار [۶] و برای منطقه زغالی روهر^۷ در آلمان تا ۱۰ متر برآورد شده است [۷]. همچنین بر اساس اندازه‌گیری‌های برجا در معادن آمریکا حداکثر فشار تکیه‌گاهی جلویی در فاصله حدود ۵ تا ۹ متر در جلوی خط جبهه کار تعیین شده است [۴].



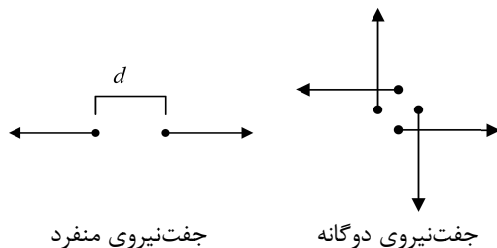
شکل ۳: فشار تکیه‌گاهی جلویی در محدوده جبهه کار [۶]

بررسی تأثیر تنش‌های طبیعی، القایی و غیرلرزه‌ای در معادن جبهه‌کار طولانی نشان می‌دهد که لرزش‌های قوی تقریباً در صفحات قائم و در امتداد ساختارهای تکتونیکی محلی رخ می‌دهند [۲۵]. همچنین برای شناسایی منشأ ریزش‌های سقف کارگاه، از روش برازش گزینشی برای وارونه‌سازی تانسور گشتاور لرزه‌ای استفاده شده است [۲۶]. برای آشنایی بیشتر با روش‌های تفسیر و تجزیه و تحلیل امواج لرزه‌ای القایی به دو کتاب ارزشمند که اخیراً منتشر شده‌اند، رجوع شود [۲۷، ۲۸].

۴- روش تحقیق

در این تحقیق به منظور تعیین جهت‌یابی و مکانیزم شکست لایه‌های سقف در کارگاه جبهه‌کار طولانی از روش وارونه‌سازی تانسور گشتاور لرزه‌ای^{۱۹} استفاده شده است. این روش که تئوری آن در سال ۱۹۷۰ برای تشریح منشأ امواج لرزه‌ای بر مبنای تقریب چشمه نقطه‌ای^{۲۰} مطرح شد [۲۹]، در زمینه‌های مختلف علم لرزه‌شناسی به‌طور گسترده استفاده می‌شود [۳۰].

مدل نیروهای معادل^{۲۱} یکی از روش‌های متداول برای توصیف چشمه لرزه است که بدون در نظر گرفتن اثرات غیرخطی امواج لرزه‌ای، از طریق حل معادلات امواج خطی چشمه لرزه را توصیف می‌کند [۳۱]. نیروهای معادل به‌صورت جابه‌جایی‌های ایجاد شده در یک نقطه مشخص مشابه جابه‌جایی‌هایی که در اثر نیروهای واقعی در چشمه لرزه رخ می‌دهند، تعریف می‌شوند. بنابراین نیروهای معادل برای توصیف فرآیند شکست مورد استفاده قرار می‌گیرند. به این ترتیب طبق قانون بقای اندازه حرکت، ساده‌ترین سیستم نیرویی که تغییرات گشتاور نداشته باشد، سیستم جفت‌نیروی منفرد^{۲۲} یا دوقطبی^{۲۳} نامیده می‌شود. سیستم جفت‌نیروی دوگانه^{۲۴} نیز به‌صورت دو جفت‌نیرو که تغییرات گشتاور در آن‌ها صفر باشد، تعریف می‌شود (شکل ۴).



شکل ۴: تصویر شماتیک نیروهای معادل

به این ترتیب یک چشمه الاستودینامیک با حجم V به‌صورت مجموع جفت‌نیروهای منفرد f_i که به زمان t و مکان r وابسته هستند، تعریف می‌شود. در این صورت جابه‌جایی u_k

به‌شدت تحت تأثیر زمین‌شناسی محلی و طرح استخراج معدن می‌باشند [۱۵]. با مطالعه رویدادهای لرزه‌ای در منطقه زغال‌خیز سار^{۱۴} آلمان مشخص شد که تنش‌های القایی ناشی از عملیات استخراج معدن عامل اصلی فعال شدن گسل‌های محدوده کارگاه استخراج هستند. بزرگی این امواج حتی در مواردی به حدود ۴ ریشتر هم رسیده است. همچنین بر اساس این مشاهدات فشار منفذی بر انتشار امواج لرزه‌ای تأثیر چندانی ندارد [۱۶].

استفاده از ابزارهای پایش امواج لرزه‌ای القایی برای بررسی و کنترل رفتار توده‌سنگ در معادن جبهه‌کار طولانی فرانسه روشی نوین برای بهبود طرح استخراج معدن و افزایش ایمنی در شرایط پیچیده معادن زغال‌سنگ این کشور فراهم کرده است [۱۷]. همچنین تجزیه و تحلیل تاریخچه امواج لرزه‌ای القایی به همراه شبیه‌سازی عددی و تحلیل‌های برگشتی سبب شده است تا رفتار لایه‌های سقف معادن عمیق زغال‌سنگ در فرانسه به راحتی کنترل شده و مشکلات مرتبط با کنترل زمین در معادن این کشور به حداقل ممکن برسد [۱۸].

مکانیزم‌های شکست غیربرشی زمانی مشاهده می‌شوند که بخش قابل توجهی از انرژی لرزه‌ای در ناپایداری‌هایی همچون ریزش حفره-مانند سقف و شکست پایه‌ها آزاد شود [۱۹]. در این خصوص استفاده از روش وارونه‌سازی کامل تانسور گشتاور برای تفسیر امواج لرزه‌ای القایی منجر به نتایج رضایت‌بخشی شده است [۲۰]. همچنین به منظور تعیین محل وقوع امواج لرزه‌ای در معادن جبهه‌کار طولانی آمریکا از روش‌های رویداد اصلی^{۱۵} و تفاضل دوگانه^{۱۶} استفاده شده است که بر اساس نتایج این تحقیقات منشأ امواج لرزه‌ای دقیقاً در بالای کارگاه استخراج بوده و محل انتشار امواج همزمان با پیشروی جبهه‌کار حرکت می‌کند [۲۱].

به‌منظور شناسایی امواج لرزه‌ای ناشی از استخراج معدن زغال‌سنگ غرب آمریکا از روش شناسایی فضای فرعی^{۱۷} استفاده شده است [۲۲]. در برنامه مدیریت عملیات استخراج معدن استرالیا استفاده از سیستم‌های پایش امواج لرزه‌ای برای کاهش ریسک وقوع پدیده ترکش زغال‌سنگ^{۱۸} الزامی شده است [۲۳]. در لهستان با بررسی تداخل امواج لرزه‌ای، تغییرات زمانی سرعت امواج لرزه‌ای تعیین شده و از طریق همبستگی متقابل، نتایج حاصل با پارامترهای مکانیکی مثل صلبیت و تنش مؤثر مقایسه شده است. بر این اساس یک همبستگی بین پارامترهای ژئومکانیکی و متوسط تغییرات سرعت و امواج لرزه‌ای القایی به‌دست آمده است [۲۴].

شده است. به صورت عملی نیز می‌توان ثابت کرد که مؤلفه‌های تانسور گشتاور لرزه‌ای با متوسط جابه‌جایی ذرات در چشمه متناسب هستند [۳۱]. در نهایت با وارونه‌سازی تانسور گشتاور لرزه‌ای خواهیم داشت:

$$u_k = G' M \rightarrow M = u_k (G'^T G')^{-1} G'^T \quad (6)$$

طبق قانون بقای اندازه حرکت زاویه‌ای در یک سیستم بسته، تانسور گشتاور لرزه‌ای متقارن خواهد بود و در نتیجه تعداد مؤلفه‌های مستقل تانسور در هر سیستم مختصات به شش عدد کاهش می‌یابد. از این رو تانسور گشتاور لرزه‌ای به شکل یک تانسور متقارن ۳×۳ نمایش داده می‌شود:

$$M_{ij} = \begin{bmatrix} M_{xx} & M_{xy} & M_{xz} \\ M_{yx} & M_{yy} & M_{yz} \\ M_{zx} & M_{zy} & M_{zz} \end{bmatrix} \quad (7)$$

تانسور گشتاور لرزه‌ای را می‌توان به دو بخش حجمی^{۲۷} و انحرافی^{۲۸} تقسیم کرد. شکست برشی و جهت‌یابی ترک‌ها با استفاده از بخش انحرافی محاسبه می‌شوند؛ در حالی که تغییرات حجمی از طریق بخش حجمی تانسور قابل محاسبه می‌باشد. بخش حجمی به مؤلفه همسانگرد^{۲۹} (ISO) و بخش انحرافی به دو مؤلفه جفت‌نیروی دوگانه^{۳۰} (DC) و نیروی دوقطبی برداری خطی جبران شده^{۳۱} (CLVD) تجزیه می‌شود. به منظور تجزیه تانسور گشتاور لرزه‌ای در ابتدا مؤلفه همسانگرد آن مطابق رابطه زیر محاسبه می‌شود:

$$M = M^{ISO} + M^{Dev} = \frac{1}{3} \begin{bmatrix} tr(M) & 0 & 0 \\ 0 & tr(M) & 0 \\ 0 & 0 & tr(M) \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} m_1^* & 0 & 0 \\ 0 & m_2^* & 0 \\ 0 & 0 & m_3^* \end{bmatrix} \quad (8)$$

که در آن M^{ISO} مؤلفه اتساعی تانسور و M^{Dev} مؤلفه انحرافی تانسور می‌باشد. همچنین $tr(M) = M_{xx} + M_{yy} + M_{zz}$ اثر^{۳۲} ماترس و m_i^* مقادیر ویژه بخش انحرافی تانسور می‌باشند که به صورت زیر محاسبه می‌شوند:

$$m_i^* = m_i - \frac{tr(M)}{3} \quad (9)$$

که در آن m_i مقادیر ویژه تانسور گشتاور لرزه‌ای می‌باشند. روش‌های مختلفی برای تجزیه بخش انحرافی تانسور به صورت ترکیب‌های متنوعی از مدل چشمه ارائه شده است [۳۲]. در این تحقیق از روشی استفاده می‌شود که در آن با فرض $|m_3^*| \geq |m_2^*| \geq |m_1^*|$ تانسور به سه مؤلفه ISO, CLVD و DC تجزیه می‌شود [۳۴]. صحت نتایج و قابلیت اطمینان این روش برای تفسیر فیزیکی رویدادهای لرزه‌ای در عمل ثابت شده است [۳۵]. به این ترتیب بخش انحرافی تانسور طبق رابطه (۱۰) به دو مؤلفه CLVD و DC تجزیه می‌شود [۳۴]:

در زمان t و مکان x که ناشی از توزیع چگالی نیروهای حجمی معادل f_i در حجم مشخصی از چشمه لرزه است، از طریق انتگرال تابع گرین^{۲۵} و تابع زمانی چشمه^{۲۶} محاسبه می‌شود [۳۱]:

$$u_k(x, t) = \int_{-\infty}^{+\infty} \int_V G_{ki}(x, t; r, \bar{t}) f_i(r, \bar{t}) dV(r) d\bar{t} \quad (1)$$

در این رابطه G_{ki} مؤلفه‌های تابع گرین و معرف اثرات محیط بر روی انتشار امواج الاستیک بین چشمه (r, \bar{t}) و گیرنده (x, t) بوده و V حجم چشمه که در آن نیروهای f_i غیرصفر هستند، است.

با داشتن مدل سرعت-عمق محدودهای از توده‌سنگ منطقه، تابع گرین محاسبه می‌شود. با فرض تغییرات یکنواخت تابع گرین در یک چشمه می‌توان انتگرال فضایی رابطه بالا را ساده کرد. برای این منظور از پیچش زمانی بسط تیلور تابع گرین و تانسور گشتاور وابسته به زمان استفاده خواهد شد. به این ترتیب با بسط تابع بالا به صورت سری تیلور در اطراف یک نقطه مرجع به مرکز $\xi = r$ خواهیم داشت [۳۲]:

$$u_k(x, t) = \sum_{n=1}^{\infty} \frac{1}{n!} G_{ki,j_1 \dots j_n}(x, t; \xi, \bar{t}) * M_{ij_1 \dots j_n}(\xi, \bar{t}) \quad (2)$$

که در آن * نشان‌دهنده تابع پیچش زمانی و کاما نشان‌دهنده مشتق جزئی نسبت به مؤلفه بعد از کاما است. بنابراین محدوده فیزیکی چشمه با مجموعه‌ای از نیروهای معادل مدلسازی می‌شود. اگر ابعاد چشمه نسبت به طول موج امواج لرزه‌ای کوچکتر باشد، تنها اولین بسط سری فوق برای محاسبه جابه‌جایی کافی خواهد بود [۱۰]:

$$u_k(x, t) = G_{ki,j}(x, t; 0, \bar{t}) * M_{ij}(0, \bar{t}) \quad \text{for } \xi = 0 \quad (3)$$

رابطه (۳) با در نظر گرفتن سه فرض دیگر به یک مسئله ساده قابل حل تبدیل خواهد شد. این سه فرض عبارتند از: در نظر گرفتن یک چشمه نقطه‌ای، نادیده گرفتن نیروهای خارجی و تانسور گشتاور لرزه‌ای مستقل از زمان. به این ترتیب رابطه (۳) به شکل زیر بازنویسی می‌شود:

$$u_k(x, t) = M_{ij} [G_{ki,j} * s(\bar{t})] \quad (4)$$

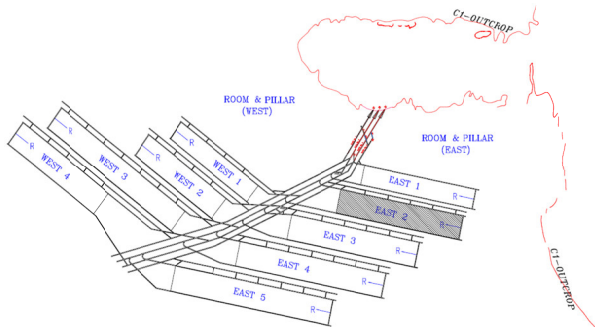
در این رابطه M_{ij} مؤلفه‌های تانسور گشتاور لرزه‌ای، $G_{ki,j}$ مشتق تابع گرین نسبت به j و $s(\bar{t})$ تابع زمانی چشمه است. از طرف دیگر می‌توان تابع زمانی چشمه را در مشتق تابع گرین ادغام نمود. در این صورت رابطه (۴) به صورت رابطه (۵) بازنویسی می‌شود [۳۳]:

$$u_k(x, t) = \frac{\partial G_{ki}(x, t; x_0, t_0)}{\partial (x_0)_j} M_{ij}(x_0, t_0) \quad (5)$$

که در آن $G_{ki}(x, t; x_0, t_0)$ تابع گرین در مکان x و زمان t بوده که در اثر یک ضربه موج در مکان x_0 و زمان t_0 ایجاد

تریاسیک بالایی و ژوراسیک میانی سازندهای نایبند و غدیر بوده که حدود ۱۰۰۰ متر ضخامت دارد. سنگ‌های منطقه اغلب از گل‌سنگ و توالی لایه‌های لای سنگ و ماسه‌سنگ تشکیل شده است. همچنین لایه‌های سنگ‌آهک نیز به صورت مقطعی مشاهده شده است. افق اصلی که حاوی لایه‌های زغال‌سنگ با ضخامت بیش از ۸۰ سانتی‌متر است، در یک مقطع ۵۰ متری از لایه‌های میانی با متوسط عمق ۳۰۰ متر واقع شده است. لایه‌های اصلی زغال‌سنگ منطقه با نام‌های B1, B2, C1, C2 و D نامگذاری شده‌اند. لایه C1 از نظر ضخامت و پایداری مهم‌ترین لایه زغال‌سنگ منطقه به شمار می‌آید. معدن پروده ۱ در جنوب غربی طاق‌دیس پروده در این لایه آماده‌سازی شده است. ضخامت لایه C1 از ۱/۸۵ تا ۲/۱۵ با میانگین ۲ متر متغیر است.

در این تحقیق پهنه E2 مورد مطالعه قرار گرفته که عرض آن ۲۱۵ و طول آن حدود ۱۱۲۰ متر می‌باشد (شکل ۵). شیب لایه‌ها در محل بیرون‌زدگی ۲۰ تا ۳۰ درجه بوده و با کاهش عمق به ۵ تا ۱۰ درجه نیز می‌رسد. بازکننده‌های معدن در یال‌های جنوبی که شیب آن‌ها از ۲۶ درجه تجاوز نمی‌کند، حفاری شده‌اند.



شکل ۵: موقعیت پهنه E2 در معدن طبس [۳۷]

ساختمان زمین‌شناسی ناحیه پروده از چند گسل بزرگ با راستای شرقی-غربی تشکیل شده است و به وسیله گسل‌های کوچک‌تر به مناطق مجزا تفکیک می‌شود. منطقه زغال‌خیز پروده از سمت غرب به گسل کلمرد و از شرق به گسل نایبند محدود شده است که در راستای شمالی-جنوبی گسترش یافته‌اند. ساختارهای گسلی دیگری که در راستای شرقی-غربی و بین این دو گسل قرار گرفته‌اند، در شکل ۶ نشان داده شده‌اند. از سمت جنوب گسل زنونقان و از سمت شمال گسل رستم مرزهای معدن را تعیین می‌کنند. گسل رستم یک گسل معکوس بوده که جابه‌جایی آن حدود ۷۰۰ متر می‌باشد. گسل نایبند و گسل‌های کوچک اطراف آن از نظر فعالیت‌های لرزه‌ای فعال هستند. طول گسل‌های منطقه از ۱۳۵ تا ۲۴۳۵

$$M^{Dev} = M^{DC} + M^{CLVD}$$

$$= m_3^* \begin{bmatrix} -F & 0 & 0 \\ 0 & F-1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}, \quad F = -\frac{m_{min}^*}{m_{max}^*} \quad (10)$$

در این رابطه $|F| \leq 0.5$ بوده و برای حالت DC خالص برابر صفر و برای حالت CLVD خالص برابر ± 0.5 می‌باشد [۳۶]. این پارامتر برای شکست‌های کششی مثبت و برای شکست‌های فشاری منفی است. به این ترتیب تجزیه کامل تانسور گشتاور لرزه‌ای به صورت زیر خلاصه می‌شود:

$$M = M^{ISO} + M^{DC} + M^{CLVD}$$

$$= \frac{1}{3}(m_1 + m_2 + m_3)I$$

$$+ m_3^*(1-2F)(a_3a_3 - a_2a_2)$$

$$+ m_3^*F(2a_3a_3 - a_2a_2 - a_1a_1) \quad (11)$$

در این رابطه m_i مقادیر ویژه تانسور گشتاور لرزه‌ای بوده و متناظر با بردارهای ویژه a_i بوده و m_3^* حداکثر مقدار ویژه بخش انحرافی تانسور می‌باشند. همچنین بردار دوگانه $a_i a_i$ معرف یک نیروی دوقطبی در جهت بردار ویژه a_i است. در نهایت به منظور تعیین بزرگی هر یک از سه مؤلفه ISO, CLVD و DC تأثیر نسبی هر کدام بر حسب درصد به صورت زیر محاسبه می‌شود:

$$ISO = \frac{1}{3} \frac{tr(M)}{|m_{max}|} \quad (12)$$

$$CLVD = -2 \frac{m_{min}^*}{|m_{max}^*|} (1 - |ISO|) \quad (13)$$

$$DC = 1 - |ISO| - |CLVD| \quad (14)$$

در این روابط m_{max} حداکثر مقدار ویژه تانسور می‌باشد.

۵- معدن زغال‌سنگ پروده طبس

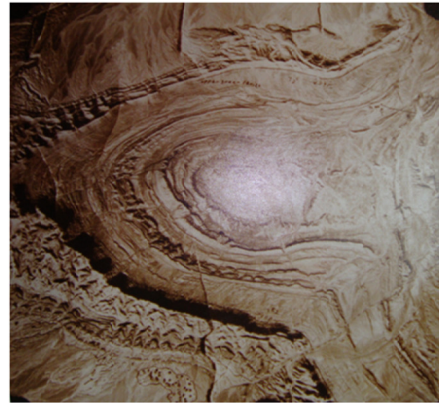
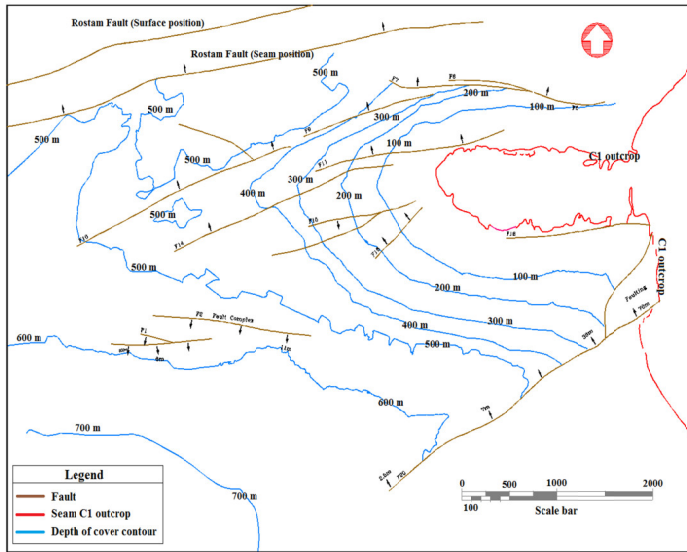
معدن پروده طبس که اولین معدن زیرزمینی مکانیزه ایران می‌باشد، در سال ۱۳۸۶ راه‌اندازی شده است. این معدن در فاصله ۸۵ کیلومتری شهر طبس در استان خراسان جنوبی واقع شده است. حداقل و حداکثر ارتفاع منطقه از سطح دریا ۷۳۰ و ۱۰۵۰ متر است.

میزان زغال‌سنگ استخراجی از این معدن روزانه حدود ۴۰۰۰ تن و سالانه حدود ۱/۵ میلیون تن است. ذخیره قابل استخراج معدن در منطقه‌ای با وسعت ۱۲۰۰ کیلومتر مربع در بخش مرکزی طاق‌دیس نامتقارن پروده واقع شده است. ذخایر قطعی و احتمالی این معدن به ترتیب حدود ۴۰۰ میلیون تن و ۲/۷۵ میلیارد تن برآورد شده است.

ویژگی‌های کمی و کیفی لایه‌های زغال‌سنگ در این منطقه دارای تغییرات تدریجی بوده که از روندی مشخص پیروی می‌کنند. لایه‌های زغال‌سنگ منطقه اغلب مربوط به رسوبات

گسل‌ها از ۱ تا ۹۰ متر متغیر بوده و بیشترین فراوانی مربوط به گسل‌هایی با جابجایی ۲ تا ۵ متر است [۳۷].

متر متغیر است ولی بیشترین فراوانی مربوط به گسل‌هایی با طول ۲۰۰ تا ۵۰۰ متر است. همچنین جابجایی عمودی



ب) گسل‌های اصلی

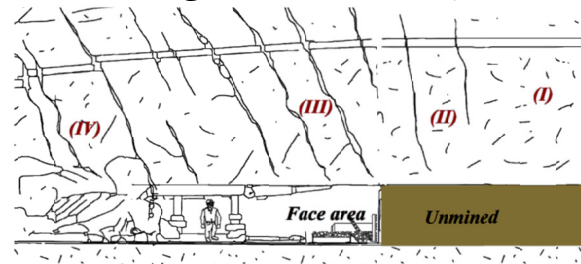
الف) عکس هوایی

شکل ۶: نقشه زمین‌شناسی محدوده معدن طبس [۳۷]

طور کامل سست شده و در صورتی که نگهداری نشوند به درون کارگاه فرو می‌ریزند. البته با توجه به نوع سقف بلافاصله ممکن است مدت زمان خودپایداری متفاوت باشد. در نهایت با عبور جبهه کار بسته به شرایط ژئومکانیکی، سقف بلافاصله در فاصله‌ای معین در پشت سیستم نگهداری تخریب می‌شود. پدیده شکست سقف کارگاه استخراج مشکلات متعددی را در فرآیند استخراج معدن ایجاد می‌کند و در برخی موارد ادامه عملیات را غیرممکن می‌سازد. بنابراین در این تحقیق با تعریف این چهار ناحیه و تجزیه و تحلیل امواج لرزه‌ای القایی که از نواحی II و III منتشر می‌شوند، مکانیزم شکست توده‌سنگ در سقف و جلوی جبهه کار مورد بررسی قرار گرفته است. به‌منظور ارزیابی مکانیزم شکست سنگ از روش تجزیه و تحلیل مکانیزم کانونی امواج لرزه‌ای القایی استفاده شده است. با تجزیه تانسور گشتاور لرزه‌ای سه مؤلفه که متناظر با تغییرات حجمی، شکست فشاری/کششی و شکست برشی می‌باشند، تعریف شده است. پنج مکانیزم شکست شامل ترکش ناشی از کاهش حجم^{۳۳}، ترکش ناشی از افزایش حجم^{۳۴}، شکست فشاری، شکست کششی و شکست برشی تعریف شده است. البته در عمل ممکن است توده‌سنگ با یکی از این مکانیزم‌ها و یا به‌صورت ترکیبی از دو یا چند مکانیزم دچار شکست شود. جهت‌یافتگی شکست نیز بر اساس سه زاویه امتداد، شیب و لغزش تعیین شده است؛ به گونه‌ای که با استفاده از الگوی پراش سه بعدی امواج، تغییرات دامنه موج بر روی یک رویه سه بعدی ترسیم شده است.

۶- نتایج

در این تحقیق چهار ناحیه متفاوت بر اساس تنش‌های القایی و محل انتشار امواج القایی به‌صورت (۱) ناحیه شبه‌پیوسته، (۲) ناحیه شروع ترک و انتشار امواج لرزه‌ای، (۳) ناحیه سست-شدگی و (۴) ناحیه تخریب مطابق شکل ۷ تعریف شده است. لازم به ذکر است که این چهار ناحیه به گونه‌ای تعریف شده‌اند که همزمان با پیشروی جبهه کار حرکت می‌کنند.



شکل ۷: تعریف چهار ناحیه ناپایدار در لایه‌های سقف کارگاه

در ناحیه شبه‌پیوسته به علت اغتشاش در تنش‌های برجا، توده‌سنگ دچار تغییرشکل‌های الاستیک می‌شود. ناحیه انتشار امواج لرزه‌ای که در اثر افزایش تمرکز تنش تشکیل می‌شود، منجر به ایجاد ترک‌ها و شکستگی‌های جدید یا لغزش در امتداد ناپیوستگی‌های زمین‌شناسی می‌شود. در واقع تنش‌های القایی سبب شروع ترک‌ها و گسترش آن‌ها در جلوی جبهه کار شده و این پدیده با انتشار امواج لرزه‌ای همراه است. در ناحیه سست‌شدگی با پیشروی جبهه کار لایه‌های سنگی سقف تحت بارگذاری‌های زیادی قرار گرفته و با گسترش شکستگی‌ها به-

۶-۱- داده‌های لرزه‌نگاری

در مدت استخراج پهنه E2 از سال ۱۳۸۸ تا ۱۳۹۲ حدود ۴۸۴۳ رویداد لرزه‌ای با بزرگی کمتر از ۳ ریشتر توسط مرکز لرزه‌نگاری ایران وابسته به مؤسسه ژئوفیزیک دانشگاه تهران در محدوده ایستگاه‌های پروده ثبت شده است. به منظور بررسی قابلیت کاربرد داده‌های لرزه‌نگاری در ارزیابی مکانیزم شکست لایه‌های سقف در این معدن، ۲۴ شکست که منجر به ریزش معدن شده‌اند، بر اساس گزارشات معدن انتخاب شده است و از طریق تاریخ و محل وقوع آن‌ها، رویدادهای لرزه‌ای متناظر با بزرگی لرزه‌ای بین ۰/۱۶- تا ۲/۰۹- مورد بررسی قرار گرفته‌اند.

۶-۲- محاسبه تانسور گشتاور لرزه‌ای

به‌منظور ارزیابی مکانیزم شکست لایه‌های سقف در معدن طبس، تانسور گشتاور لرزه‌ای با استفاده از امواج لرزه‌ای ثبت شده، تخمین زده شده است. به این ترتیب که با استفاده از تابع HybridMT یک کد بر مبنای روابط ارائه شده در فصل قبل، در نرم‌افزار MATLAB نوشته شده است. برای این منظور هندسه شبکه لرزه‌ای و مدل سرعت یک بعدی از طریق برنامه "focimt" فراخوانی شده است [۳۸].

در فرآیند وارونه‌سازی تانسور گشتاور لرزه‌ای از امواج لرزه‌ای با دوره تناوب زیاد (بسامد کم) استفاده می‌شود و از این طریق چشمه لرزه‌ای به یک تابع دلتا ساده در هر نقطه و در هر لحظه تبدیل می‌شود. به این ترتیب شکل موج به علت فیلتر شدن نویزهای آن، به موجی تبدیل می‌شود که تنها در چند دوره طول موج آن تکرار می‌شود و به راحتی با استفاده از مدل یک بعدی سرعت قابل پیش‌بینی خواهد شد.

مهم‌ترین بخش در وارونه‌سازی تانسور گشتاور لرزه‌ای، تعیین یک تابع گرین بر مبنای شرایط پیچیده زمین‌شناسی است. برای غلبه بر این موضوع در این تحقیق یک روش ساده در حوزه یا دامنه زمان^{۳۵} ارائه شده است تا به طور مستقیم انتشار موج از چشمه را در محیط‌های همگن مشخص کند. به این ترتیب داده‌های ورودی شامل دامنه، زمان رسیدن موج و قطبش اولین جنبش موج P می‌باشد. پارامترهای دیگر نظیر زاویه جهش، زاویه تابش، آزیموت و فاصله چشمه تا گیرنده بر اساس داده‌های ورودی تعیین می‌شوند. همچنین موقعیت ایستگاه‌های لرزه‌ای بر روی کره کانونی با استفاده از آزیموت (ϕ) و زاویه جهش (φ) تعیین شده است.

$$\tan \phi = \frac{Y_s - Y_o}{X_s - X_o} \quad (15)$$

$$\cos \varphi = \frac{Z_s - Z_o}{\sqrt{(X_s - X_o)^2 + (Y_s - Y_o)^2 + (Z_s - Z_o)^2}} \quad (16)$$

که در آن X_o, Y_o, Z_o و X_s, Y_s, Z_s به ترتیب مختصات فضایی ایستگاه و چشمه لرزه‌ای می‌باشند. لازم به ذکر است که انتگرال منحنی جابه‌جایی زمین با گشتاور لرزه‌ای متناسب است. به منظور وارونه‌سازی تانسور گشتاور لرزه‌ای و انتخاب بهترین تانسور گشتاور از روش حداقل مربعات با تابع هزینه متناظر با مجموع حداقل خطای باقیمانده استفاده شده است. روش حداقل مربعات به عنوان متداول‌ترین معیار بهینه‌سازی از طریق حداقل کردن L2 محاسبه می‌شود:

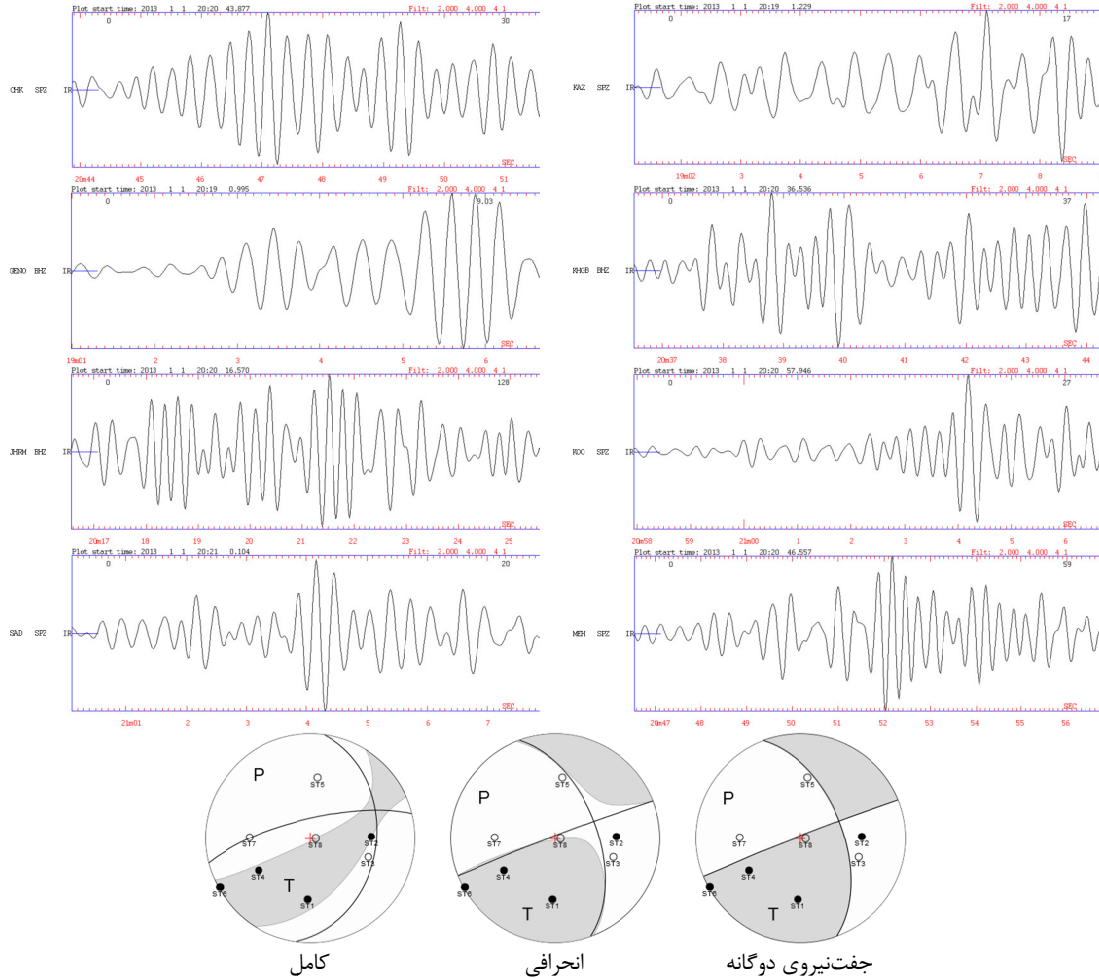
$$L2 = \sum_i \left(d_i - \sum_j a_{ij} M_j \right)^2 \quad (17)$$

که در آن d_i داده‌های ورودی، a_{ij} ضرایب تناسب خطی و M_j المان‌های تانسور هستند. در واقع در این روش مقدار خطا پس از مقایسه مقادیر واقعی (d_i) و مقادیر برآورد شده ($\sum_j a_{ij} M_j$)، محاسبه می‌شود.

فرآیند وارونه‌سازی با سه روش متفاوت شامل: (۱) تانسور کامل گشتاور لرزه‌ای بدون اعمال محدودیت، (۲) تانسور انحرافی و (۳) تانسور جفت‌نیروی دوگانه اجرا شده است.

تانسور کامل گشتاور لرزه‌ای به سه مؤلفه شکست ناشی از تغییر حجم، شکست فشاری یا کششی و شکست برشی تجزیه می‌شود. تانسور انحرافی با فرض اینکه هیچگونه همگرایی حجمی رخ نداده است، محاسبه می‌شود. تانسور جفت‌نیروی دوگانه نیز با صفر قرار دادن دترمینان ماتریس از طریق ضرایب لاگرانژ و با فرض شکست برشی محض محاسبه شده است. به‌عنوان نمونه نتایج وارونه‌سازی تانسور گشتاور لرزه‌ای برای رویداد SAT120118 در شکل ۸ ارائه شده است.

گشتاور اسکالر و بزرگی گشتاور برای این رویداد به ترتیب برابر با $M_0 = 1.74 \times 10^{12}$ و $M_W = 2.09$ حاصل شده‌اند. همچنین حداکثر، مقدار متوسط و حداقل مقادیر ویژه برای این رویداد به ترتیب معادل -1.9×10^{11} ، 3.8×10^{10} و 3.6×10^9 و بردارهای ویژه متناظر با آن‌ها به ترتیب برابر با $(-0.3824, -0.5781, -0.7208)$ ، $(0.7532, 0.2567, -0.6056)$ و $(0.5351, 0.7745, 0.3373)$ به‌دست آمده است. چون حداکثر مقدار ویژه برای این رویداد لرزه‌ای منفی شده است، نتیجه می‌شود که حداکثر تنش اصلی القایی فشاری است. همچنین طبق بردار ویژه متناظر با حداکثر مقدار ویژه، حداکثر تنش اصلی القایی با زاویه ۲۲/۵ درجه نسبت به افق قرار گرفته است. همچنین نتیجه تجزیه تانسور گشتاور لرزه‌ای برای این رویداد لرزه‌ای در رابطه (۱۸) ارائه شده است.



شکل ۸: نتایج وارونه‌سازی تانسور گشتاور لرزه‌ای برای رویداد SAT120118

$$\begin{bmatrix} -8.43 & 8.60 & -6.91 \\ - & -5.88 & 3.61 \\ - & - & -0.52 \end{bmatrix} \times 10^{10} = \left(\begin{bmatrix} -4.95 & 0 & 0 \\ 0 & -4.95 & 0 \\ 0 & 0 & -4.95 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} -2.96 & 6.63 & -4.39 \\ - & -0.01 & 3.52 \\ - & - & 2.98 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} -0.53 & 1.97 & -2.52 \\ - & -0.92 & 0.09 \\ - & - & 1.45 \end{bmatrix} \right) \times 10^{10} \quad (18)$$

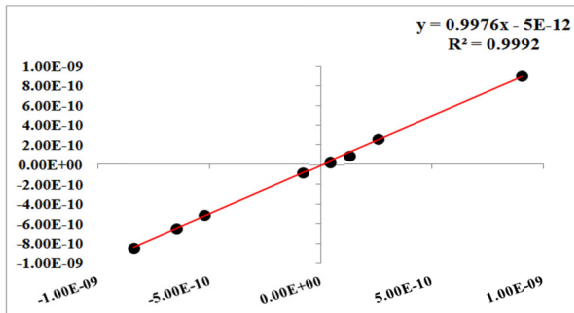
$$= \left(\begin{bmatrix} -4.95 & 0 & 0 \\ 0 & -4.95 & 0 \\ 0 & 0 & -4.95 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 5.31 & 0 & 0 \\ 0 & -10.62 & 0 \\ 0 & 0 & 5.31 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & -3.44 \\ 0 & 3.44 & 0 \end{bmatrix} \right) \times 10^{10}$$

شده‌اند. همان‌طور که مشاهده می‌شود، ضریب همبستگی و مقدار خطا به ترتیب ۰/۹۹۹۲ و ۰/۰۲۸۵ حاصل شده است. در مجموع برای همه رویدادهای لرزه‌ای ضریب همبستگی بیش از ۰/۹۰ و مقدار خطا کمتر از ۰/۳ حاصل شده است.

نتایج وارونه‌سازی تانسور گشتاور لرزه‌ای برای سایر رویدادها در جدول ۱ خلاصه شده است. همان‌طور که مشاهده می‌شود، بزرگی گشتاور در محدوده بین ۰/۱۶- و ۲/۰۹ تغییر می‌کند. همچنین فراوانی بزرگی لرزه‌ای بیشتر در بازه ۱ تا ۲ بوده است. از طرف دیگر عدم قطعیت تانسورهای محاسبه شده با استفاده از ضریب همبستگی (R^2) و میانگین مربعات خطا (RMSE) برای دامنه اندازه‌گیری شده u_k و دامنه تخمین زده شده u_k^* به صورت زیر در نظر گرفته شده است [۳۹]:

$$RMSE = \sqrt{\frac{\sum_{k=1}^N (u_k - u_k^*)^2}{\sum_{k=1}^N u_k^2}} \quad (19)$$

به‌عنوان نمونه، در شکل ۹ دامنه‌های اندازه‌گیری شده با دامنه‌های محاسبه شده برای رویداد SAT120118 مقایسه



شکل ۹: مقایسه دامنه‌های واقعی و تخمینی رویداد SAT120118

جدول ۱: جزئیات مربوط به وارونه‌سازی تانسور گشتاور لرزه‌ای

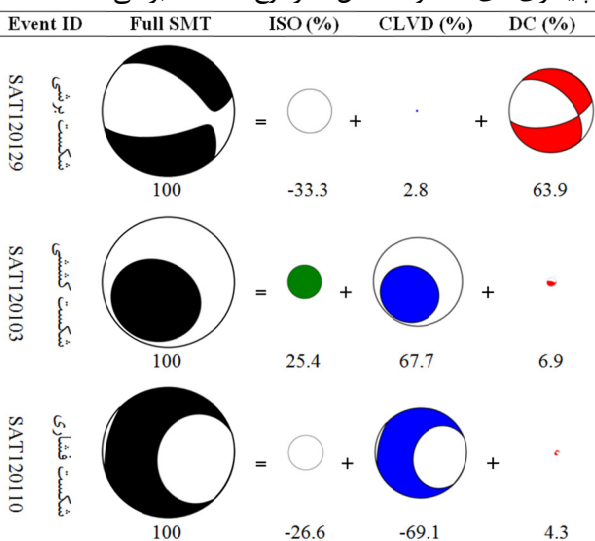
No.	X (m)	Y (m)	Z (m)	M _{xx} (N-m)	M _{yy} (N-m)	M _{zz} (N-m)	M _{xy} (N-m)	M _{xz} (N-m)	M _{yz} (N-m)	M ₀ (N-m)	M _w
1	483373	3651477	278	1.61E+10	1.04E+10	-9.35E+09	-1.91E+10	8.42E+09	-2.53E+09	2.59E+10	0.88
2	483694	3651565	293	7.36E+10	6.35E+09	6.63E+08	-4.50E+10	2.86E+10	-1.37E+10	7.59E+10	1.19
3	483484	3651517	238	-4.14E+10	3.29E+10	5.81E+10	2.75E+10	4.10E+10	-2.88E+10	7.97E+10	1.20
4	483138	3651593	272	6.05E+11	5.24E+11	-2.53E+11	9.63E+10	1.26E+11	-1.84E+11	6.41E+11	1.80
5	483347	3651647	345	-9.47E+10	2.65E+10	2.20E+10	1.14E+10	-2.31E+10	-1.29E+10	7.69E+10	1.19
6	483437	3651642	288	1.16E+09	-7.54E+08	-6.11E+07	-2.46E+09	1.37E+08	1.31E+09	2.96E+09	0.25
7	483278	3651632	267	-1.31E+11	2.19E+10	-9.51E+10	2.61E+10	1.36E+11	-2.99E+10	1.83E+11	1.44
8	483376	3651667	332	-6.00E+10	-7.88E+09	5.51E+09	-4.58E+10	-4.53E+10	-2.47E+10	8.12E+10	1.21
9	483231	3651586	277	5.06E+10	-1.04E+11	9.65E+10	-4.94E+09	2.93E+09	2.22E+10	1.09E+11	1.29
10	482974	3651586	263	-4.37E+11	-7.53E+10	-4.40E+11	7.33E+11	9.69E+11	-3.49E+11	1.34E+12	2.02
11	483558	3651532	284	8.52E+11	1.34E+12	-6.79E+11	-1.05E+12	2.93E+11	-5.94E+11	1.74E+12	2.09
12	483548	3651584	258	-8.43E+10	-5.88E+10	-5.18E+09	8.60E+10	-6.91E+10	3.61E+10	1.37E+11	1.36
13	483148	3651638	299	-8.47E+08	1.54E+09	-4.51E+08	1.27E+09	4.39E+08	-1.12E+09	2.17E+09	0.16
14	483129	3651624	255	1.43E+11	1.12E+12	-1.19E+12	2.08E+11	-5.06E+11	-1.04E+11	1.29E+12	2.01
15	483184	3651571	306	-2.53E+11	-1.00E+12	1.17E+11	5.93E+11	1.35E+11	-5.01E+11	1.08E+12	1.95
16	483124	3651694	285	4.72E+11	2.18E+11	5.15E+10	-1.66E+11	-2.63E+11	1.82E+11	5.16E+11	1.74
17	483494	3651593	329	1.20E+10	-1.20E+09	-7.03E+09	8.96E+09	-1.88E+09	1.75E+09	1.36E+10	0.69
18	483013	3651624	218	2.40E+08	2.16E+08	5.48E+08	-4.71E+08	4.31E+08	-4.80E+08	3.76E+08	-0.09
19	483564	3651595	226	-2.70E+11	9.34E+10	-1.71E+11	-6.74E+10	-9.21E+10	-8.22E+10	2.74E+11	1.56
20	483096	3651642	317	5.49E+11	-1.71E+11	5.59E+11	1.10E+11	5.55E+11	9.98E+10	8.07E+11	1.87
21	483518	3651543	273	2.53E+08	-5.84E+08	-2.65E+07	4.28E+08	-2.72E+07	3.66E+08	7.22E+08	-0.16
22	483579	3651453	282	-3.68E+10	-4.86E+09	2.19E+10	-2.13E+10	-4.34E+09	-3.39E+09	3.76E+10	0.98
23	483626	3651496	256	1.78E+10	1.23E+10	6.91E+09	-1.47E+10	1.67E+10	-1.14E+10	2.97E+10	0.91
24	483350	3651546	310	1.62E+09	-7.22E+10	-3.51E+10	1.48E+10	-5.88E+10	1.47E+10	8.44E+10	1.22

۶-۳- تجزیه و تحلیل مکانیزم کانونی

همان‌طور که اشاره شد، در این تحقیق مکانیزم‌های شکست به پنج گروه به نام‌های ترکش ناشی از کاهش حجم، ترکش ناشی از افزایش حجم، شکست فشاری، شکست کششی و شکست برشی تقسیم شده‌اند. در عمل ممکن است توده‌سنگ در اثر یکی از این مکانیزم‌ها و یا به‌صورت ترکیبی از دو یا چند مکانیزم دچار شکست شود. بر این اساس تانسور گشتاور لرزه‌ای به سه مؤلفه اصلی به نام‌های ISO، CLVD و DC تجزیه شده است. نتایج تجزیه و تحلیل مکانیزم کانونی برای سه تانسور گشتاور لرزه‌ای و مؤلفه‌های آن در شکل ۱۰ ارائه شده است. در این شکل اندازه شکل هندسی متناظر با بزرگی نسبی مؤلفه‌های تانسور بوده و جهت شمال در بالای آن‌ها قرار می‌گیرد. همچنین امواج فشاری به‌صورت رنگی و امواج کششی به‌صورت سفید نمایش داده شده‌اند.

همان‌طور که مشاهده می‌شود، مکانیزم شکست غالب در رویدادهای SAT120129، SAT120103 و SAT120110 به ترتیب برشی، کششی و فشاری است. به‌طور کلی در این معدن مکانیزم کانونی بیشتر رویدادهای لرزه‌ای به‌صورت نیروی دوقطبی برداری خطی که متناظر با مکانیزم شکست فشاری یا کششی است، ظاهر شده است. این رویدادهای لرزه‌ای اغلب ناشی از تمرکز تنش بوده و موقعیت فضایی آن‌ها در محدوده سقف و جلوی جبهه‌کار متمرکز شده است.

در خصوص مؤلفه DC محدوده تغییرات بین ۴/۲۹ تا ۸۵/۵۷ درصد بوده و در چهار رویداد به‌صورت شکست برشی ظاهر شده است. به این ترتیب که رویداد SAT120109 یک شکست ترافشاری (برشی+فشاری) بوده ولی رویدادهای



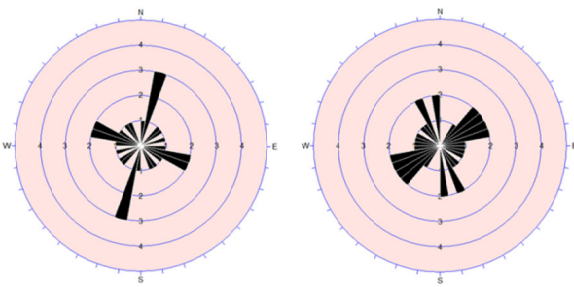
شکل ۱۰: نتایج تجزیه و تحلیل مکانیزم کانونی امواج

جابه‌جایی در هر رویه با استفاده از پراش امواج فشاری (قرمز) و کششی (آبی) مشخص شده است. لازم به ذکر است که به علت اختلاف در علامت تنش فشاری در تئوری الاستیسیته و مکانیک سنگ، محور حداکثر شکست کششی در وسط امواج فشاری و محور حداکثر شکست فشاری در وسط امواج کششی قرار گرفته است.

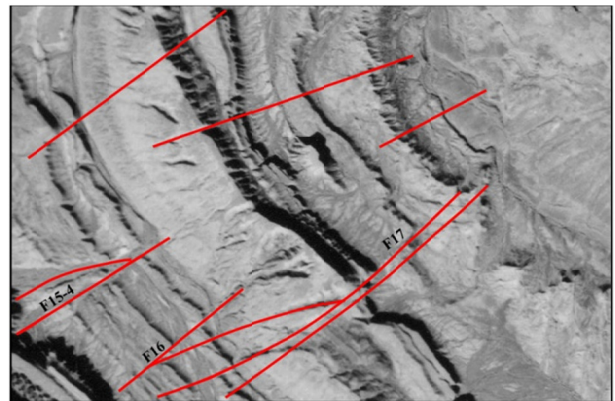
طبق نتایج، اکثر رویدادهای لرزه‌ای در این معدن به صورت جفت‌نیروی محوری منفرد و با تغییر حجم کم به وقوع پیوسته‌اند. از طرف دیگر مکانیزم کانونی جفت‌نیروی دوگانه در چهار رویداد متناظر با شکست برشی در محدوده گسل‌های منطقه متمرکز شده است.

جدول ۲: جهت‌یافتگی شکست طبق زوایای امتداد، شیب و لغزش

Event ID	صفحه شکست			عمود بر صفحه شکست		
	ϕ	δ	λ	ϕ	δ	λ
SAT120101	20.6	41.9	-133.3	252.3	60.9	-58.4
SAT120103	16.7	75.3	170.8	109.0	81.1	14.9
SAT120104	276.7	28.4	128.1	55.0	68.0	71.6
SAT120105	288.0	47.4	-112.0	138.8	46.9	-67.8
SAT120108	299.1	69.3	139.7	45.8	52.7	26.3
SAT120109	12.0	83.3	-154.6	278.8	64.7	-7.4
SAT120110	326.4	34.1	-170.0	228.1	84.4	-56.3
SAT120112	294.6	69.4	83.1	133.6	21.6	107.7
SAT120115	1.0	38.8	94.1	175.7	51.3	86.7
SAT120116	272.7	84.9	-129.6	176.5	39.8	-8.0
SAT120117	49.1	33.6	-74.2	210.3	57.8	-100.3
SAT120118	256.4	74.8	123.7	7.9	36.6	26.1
SAT120119	197.0	80.6	-37.5	294.2	53.1	-168.2
SAT120121	4.7	42.6	-63.3	150.4	52.8	-112.4
SAT120123	8.8	66.4	64.5	238.8	34.2	134.5
SAT120124	259.5	20.4	-66.8	54.9	71.3	-98.3
SAT120125	328.6	53.9	-41.4	86.1	57.7	-135.8
SAT120128	101.3	56.4	27.7	355.1	67.3	143.1
SAT120129	51.4	57.2	-14.3	149.2	78.0	-146.4
SAT120131	42.6	57.7	146.8	151.9	62.5	37.1
SAT120132	338.3	86.4	-27.6	70.3	62.4	-175.9
SAT120133	300.2	49.5	94.9	112.6	40.7	84.3
SAT120134	15.4	19.7	-136.5	243.6	76.6	-75.4
SAT120135	333.0	32.7	-1.0	63.8	89.5	-122.7



شکل ۱۲: نمودار گل سرخی مربوط به صفحه‌های شکست



شکل ۱۱: گسل‌های محدوده کارگاه بر روی نقشه زمین‌شناسی

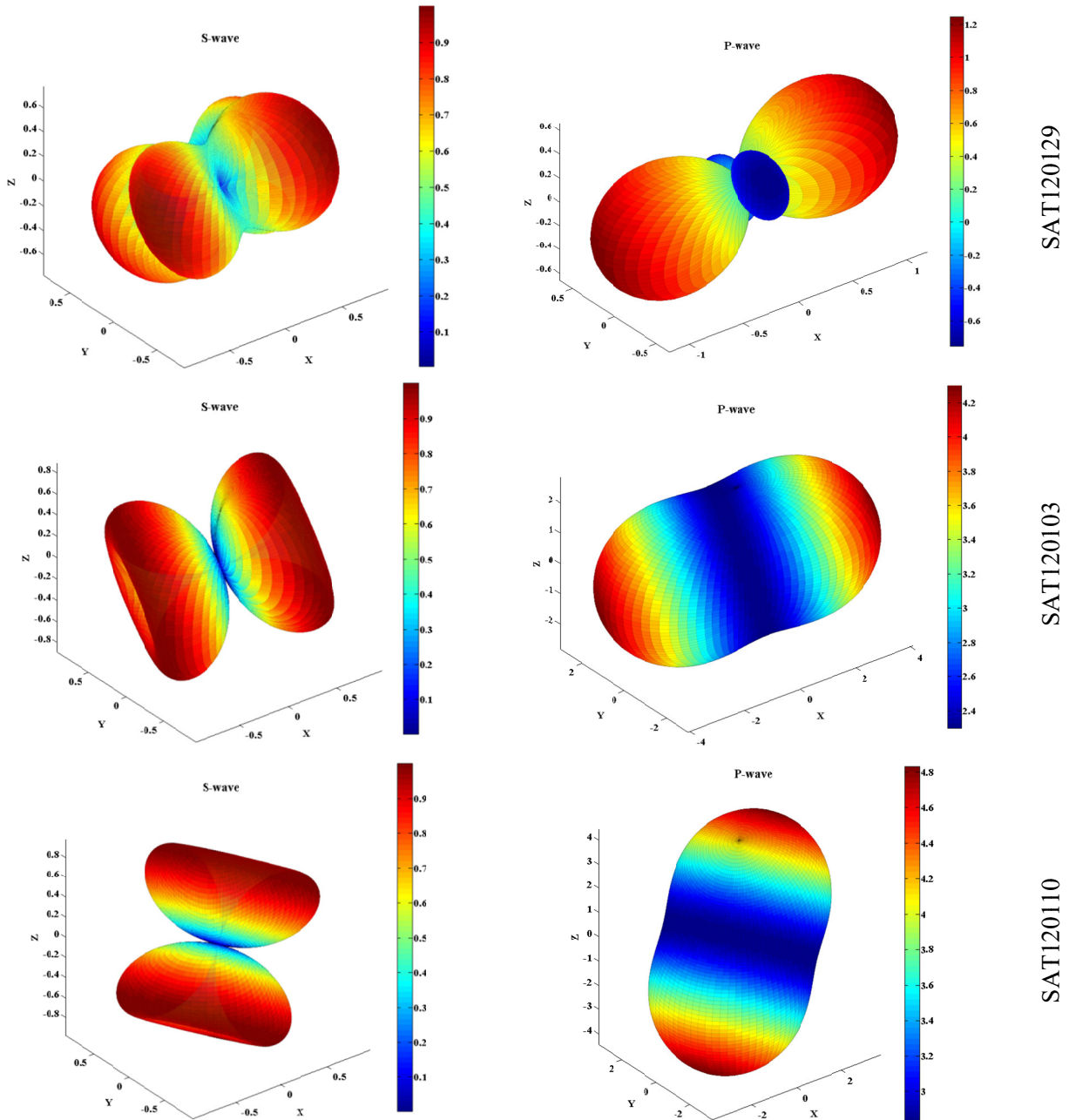
یافته‌های این تحقیق همخوانی خوبی با شرایط واقعی شکست توده‌سنگ پیرامون کارگاه دارد. بر اساس مطالعات زمین‌شناسی و تجارب استخراج معدن در این پهنه، تغییر شکل لایه‌ها در محدوده کارگاه‌های فعال به ویژه در نزدیکی گسل‌ها به شدت زیاد بوده است. به طوری که در برخی مواقع زیرش‌های گنبدی-شکل سقف سبب ایجاد تأخیرهای طولانی در عملیات استخراج شده است. نتایج تجزیه و تحلیل مکانیزم کانونی نشان می‌دهد که این نوع ریزش‌ها ناشی از مکانیزم شکست برشی بوده که به صورت اندرکنش بین تنش‌های تکتونیکی و القایی ایجاد شده‌اند. مشاهدات میدانی در معادن آلمان نیز نشان می‌دهد که شکست برشی تحت تأثیر فعالیت‌های استخراجی نیست و برهم‌نهی تنش‌های تکتونیکی و القایی در وقوع این شکست نقش بسزایی دارد [۴۰].

۴-۶- تجزیه و تحلیل الگوی پراش امواج

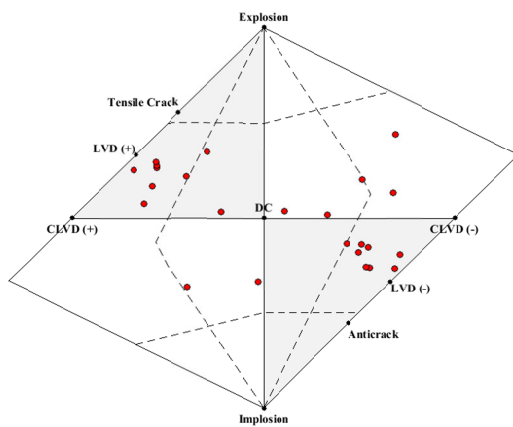
به‌منظور تجزیه و تحلیل الگوی پراش امواج P و S از پارامترهای مربوط به جهت‌یافتگی شکست از قبیل زوایای امتداد (ϕ)، شیب (δ) و لغزش (λ) استفاده شده است. نتایج جهت‌یافتگی شکست در جدول ۲ خلاصه شده‌اند.

نمودار گل سرخی^{۳۶} مربوط به صفحه‌های شکست نیز در شکل ۱۲ ارائه شده است. همانطور که مشاهده می‌شود، جهت صفحات شکست به ترتیب به صورت N15°E و E15°S حاصل شده است. بنابراین بیشتر شکست‌ها به صورت موازی یا عمود بر جهت پیشروی جبهه کار اتفاق افتاده‌اند.

جهت‌یافتگی شکست‌ها با ترسیم الگوی پراش سه بعدی امواج P و S نیز مورد بررسی قرار گرفته است. به این ترتیب که دامنه امواج به شکل رویه‌های سه بعدی برای به تصویر کشاندن انرژی لرزه‌ای ساطع شده در هر رویداد لرزه‌ای ترسیم شده است. نتایج سه رویداد لرزه‌ای برای هر دو نوع موج P و S در شکل ۱۳ ارائه شده است. در این شکل تغییرات دامنه



شکل ۱۳: تعیین جهت یافتگی شکست با استفاده از الگوی پراش سه بعدی امواج P و S برای سه رویداد لرزه‌ای



شکل ۱۴: مقایسه نتایج با نمودار هادسون

برای ارزیابی صحت نتایج، از نمودار هادسون^{۳۷} استفاده شده است [۴۱]. همان‌طور که در شکل ۱۴ مشاهده می‌شود، نمودار هادسون با دو پارامتر که در راستای محورهای افقی و قائم تعریف شده‌اند، ترسیم می‌شود. در محور افقی نسبت بین مؤلفه‌های DC و CLVD در بخش انحرافی تانسور گشتاور لرزه‌ای (حجم ثابت) و در محور قائم نسبت بین ISO و کل بخش انحرافی تانسور (نسبت تغییر حجم) مشخص می‌شود. طبق این شکل مکانیزم شکست غالب در کارگاه E2 معدن طبس که توده‌سنگ پیرامون کارگاه از نوع سنگ نرم می‌باشد، به‌صورت شکست فشاری و کششی ظاهر شده است.

۵- نتیجه‌گیری

به‌منظور کسب موفقیت در کارگاه‌های جبهه کار طولانی، شناخت مکانیزم شکست لایه‌های سقف کمک شایانی برای پیش‌بینی احتمال و شدت ریزش و همچنین اقدامات مناسب و به موقع برای کاهش خطرات احتمالی خواهد کرد. در این تحقیق مکانیزم شکست سقف کارگاه‌های جبهه کار طولانی با روش ارزیابی غیرمخرب مبتنی بر تجزیه و تحلیل امواج لرزه‌ای القایی بررسی شده است. به‌منظور شناخت مکانیزم شکست سنگ در اطراف کارگاه استخراج از روش‌های مکانیزم کانونی و الگوی پراش سه بعدی امواج لرزه‌ای استفاده شده است. بر اساس نتایج، رویدادهای لرزه‌ای بیشتر در محدوده جبهه کار مشاهده می‌شوند و بزرگی آن‌ها نیز در بخش‌های مختلف متفاوت بوده است. همچنین عمق رویدادهای لرزه‌ای اغلب در افق جبهه کار واقع شده است. رویدادهای لرزه‌ای ناشی از استخراج معدن به طور کلی در دو حالت اتفاق افتاده‌اند: (۱) ناپایداری کارگاه استخراج یا ایجاد شکستگی در مرزهای پهنه استخراجی و (۲) لغزش و جابه‌جایی در امتداد ناپیوستگی‌های زمین‌شناسی. بر اساس نتایج این تحقیق مکانیزم کانونی غالب در کارگاه E2 معدن زغال‌سنگ طبس به صورت نیروی دوقطبی برداری خطی است که متناظر با مکانیزم شکست فشاری/کششی همراه با تغییر حجم می‌باشد. همچنین ناپایداری‌های مربوط به مکانیزم شکست برشی در محدوده گسل‌های منطقه متمرکز شده‌اند. مکانیزم شکست برشی در نواحی خاص و احتمالاً تحت تأثیر اندرکنش بین تنش‌های القایی و تکتونیکی رخ می‌دهد. در مجموع لایه‌های سنگی در محدوده جبهه کار که تمرکز تنش بالا است، بیشتر تحت تأثیر تنش‌های فشاری و کششی قرار می‌گیرند؛ در حالی که توده‌سنگ اطراف پهنه به ویژه در سقف راهروها و تونل‌ها بیشتر متأثر از شکست برشی ناشی از عبور جبهه کار و تحریک ضعف‌های ساختاری یا ناپیوستگی‌های زمین‌شناسی است.

تشکر و قدردانی

از همکاری مسئولان و کارشناسان معدن زغال‌سنگ طبس به ویژه آقای مهندس کریتی ثانی تشکر می‌شود. همچنین از مؤسسه ژئوفیزیک دانشگاه تهران به خاطر در اختیار گذاشتن داده‌های لرزه‌نگاری منطقه پروژه سپاسگزاری می‌شود.

منابع

- mines using fuzzy TOPSIS. *Sci Total Environ* 488-489:85-99. doi: 10.1016/j.scitotenv.2014.04.076.
- [3]. Gibowicz SJ, Lasocki S. 2001. Seismicity induced by mining: ten years later, In: Dmowska R, Saltzman B. (Eds.), *Adv Geophys* 44:39-181. ISBN: 0-12-018844-9.
- [4]. Peng SS. 2006. *Longwall mining*, 2nd edn. Morgantown, West Virginia, ISBN: 0-9789383-0-5.
- [5]. Whittaker BN. 1974. An appraisal of strata control practice. *The Min Eng* 1302-1309.
- [6]. Whittaker BN. 1982. A review of progress with longwall mine design and layout. In: *Proc. of State-of-the-Art of Ground Control in Longwall Mining and Mining Subsidence (AIME, New York)*: 77-84.
- [7]. Everling G, Jacobi O. 1977. Longwall mining in Germany: rock pressure and design of mine layouts. In: *Proc. of 6th Int. Strata Control Conf. (Banff)*: paper I-2.
- [8]. Kisslinger C. 1976. A review of theories of mechanisms of induced seismicity. *Eng Geol* 10 85-98.
- [9]. Cook NGW. 1976. Seismicity associated with mining. *Eng Geol* 10(2-4):99-122. doi: 10.1016/0013-7952(76)90015-6.
- [10]. Gibowicz SJ, Kijko A. 1994. *An introduction to mining seismology*. Academic Press Inc. ISBN: 0-12-282120-3.
- [11]. Pan YS, Li ZH, Zhang MT. 2003. Distribution, type, mechanism and prevention on rockburst in China. *Chin J Rock Mech Rock Eng* 22(11):1844-1851.
- [12]. Mintrop L. 1909. Die Erdbebenstation der Westfälischen Berggewerkschaftskasse in Bochum. *Glueckauf* 45:357-365.
- [13]. Hardy Jr. HR. 2003. *Acoustic Emission/Microseismic Activity. Vol I, principles, techniques, and geotechnical applications*. CRC Press. ISBN: 9789058091932.
- [14]. Cronin VS. 2010. A primer on focal mechanism solutions for geologists. https://serc.carleton.edu/files/NAGTWorkshops/structure/04.../Focal_mechanism_primer.pdf
- [15]. Bischoff M, Cete A, Fritschen R, Meier T. 2010. Coal mining induced seismicity in the Ruhr area, Germany. *Pure Appl Geophys* 167(1-2):63-75. doi: 10.1007/s00024-009-0001-8.
- [16]. Alber M, Fritschen R. 2011. Rock mechanical analysis of a $M_l = 4.0$ seismic event induced by mining in the Saar District, Germany. *Geophys J Int* 186:359-372. doi: 10.1111/j.1365-246X.2011.05047.x.
- [17]. Driad-Lebeau L, Lahaie F, Al Heib MA, Josien JP, Bigarre P, Noirel JF. 2005. Seismic and geotechnical investigations following a rockburst in a complex French mining district. *Int J Coal Geol* 64:66-78.
- [18]. Al Heib M. 2012. Numerical and geophysical tools applied for the prediction of mine induced seismicity in French coalmines. *Int J Geosci* 3:834-846. doi: 10.4236/ijg.2012.324084.
- [19]. Cesca S, Rohr A, Dahm T. 2013. Discrimination of induced seismicity by full moment tensor inversion and decomposition. *J Seismol* 17:147-163. doi: 10.1007/s10950-012-9305-8.
- [20]. Sen AT, Cesca S, Bischoff M, Meier T, Dahm T. 2013. Automated full moment tensor inversion of coal mining-induced seismicity. *Geophys J Int* 195(2):1267-1281. doi: 10.1093/gji/ggt300.
- [21]. Boltz MS, Pankow KL, McCarter MK. 2014. Fine details of mining-induced seismicity at the Trail Mountain coal mine using modified hypocentral relocation techniques. *Bull Seismol Soc Am* 104(1):193-203. doi: 10.1785/0120130011.
- [22]. Chambers DJA, Koper KD, Pankow KL, McCarter MK. 2015. Detecting and characterizing coal mine related seismicity in the Western US using subspace methods.
- [1]. Bieniawski ZT. 1987. *Strata control in mineral engineering*. John Wiley & Sons, ISBN: 9780470203293.
- [2]. Mahdevvari S, Shahriar K, Esfahanipour A. 2014. Human health and safety risks management in underground coal

- [31]. Aki K, Richards PG. 2002. Quantitative seismology. 2nd edn. University Science Books, Sausalito, CA. ISBN: 978-1891389634.
- [32]. Jost ML, Herrmann RB. 1989. A student's guide to and review of moment tensors. *Seismol Res Lett* 60:37-57. doi: 10.1785/gssrl.60.2.37.
- [33]. Shearer PM. 2009. Introduction to Seismology. 2nd edn. Cambridge University Press. ISBN: 9780521708425.
- [34]. Knopoff L, Randall MJ. 1970. The compensated linear vector dipole: A possible mechanism for deep earthquakes. *J Geophys Res Solid Earth* 75(26):4957-4963. doi: 10.1029/JB075i026p04957.
- [35]. Vavryčuk V. 2015. Moment tensor decompositions revisited. *J Seismol* 19:231-252. doi: 10.1007/s10950-014-9463-y.
- [36]. Vavryčuk V. 2001. Inversion for parameters of tensile earthquakes. *J Geophys Res* 106(B8):16339-16355. doi: 10.1029/2001JB000372.
- [37]. IRITEC. 2003. Tabas Coal Mine Project, detailed design report, vol 1, underground mine revision B. Iran International Engineering Company (IRITEC), p 464.
- [38]. Kwiatek G, Martínez-Garzón P, Bohnhoff M. 2016. HybridMT: A MATLAB/shell environment package for seismic moment tensor inversion and refinement. *Seismol Res Lett* 87(4):964-976. doi: 10.1785/0220150251.
- [39]. Stierle E, Vavryčuk V, Šílený J, Bohnhoff M. 2014. Resolution of non-double-couple components in the seismic moment tensor using regional networks—I: a synthetic case study. *Geophys J Int* 196(3):1869-1877. doi: 10.1093/gji/ggt502.
- [40]. Fritschen R. 2010. Mining-induced seismicity in the Saarland, Germany. *Pure Appl Geophys* 167(1-2):77-89. doi: 10.1007/s00024-009-0002-7.
- [41]. Hudson J, Pearce R, Rogers R. 1989. Source type plot for inversion of the moment tensor. *J Geophys Res Solid Earth* 94(B1):765-774. doi: 10.1029/JB094iB01p00765.
- Geophys J Int* 203(2):1388-1399. doi: 10.1093/gji/ggv383.
- [23]. Calleja J, Nemcik J. 2016. Coalburst causes and mechanisms. In: Aziz N, Kininmonth B. (eds.), Proc 16th Coal Operators' Conference, Mining Engineering, University of Wollongong, 10-12 February 2016, pp. 310-320.
- [24]. Czarny R, Marcak H, Nakata N, Pilecki Z, Isakow Z. 2016. Monitoring velocity changes caused by underground coal mining using seismic noise. *Pure Appl Geophys* 173(6):1907-1916. doi: 10.1007/s00024-015-1234-3.
- [25]. Kozłowska M, Orlecka-Sikora B, Rudziński Ł, Cielesta S, Mutke G. 2016. Atypical evolution of seismicity patterns resulting from the coupled natural, human-induced and coseismic stresses in a longwall coal mining environment. *Int J Rock Mech Min Sci* 86:5-15. doi: 10.1016/j.ijrmms.2016.03.024.
- [26]. Rudziński Ł, Cesca S, Lizurek G. 2016. Complex rupture process of the 19 March 2013, Rudna Mine (Poland) induced seismic event and collapse in the light of local and regional moment tensor inversion. *Seismol Res Lett* 87(2A). doi: 10.1785/0220150150.
- [27] Mendecki AJ. 2016. Mine seismology reference book: seismic hazard. Institute of Mine Seismology. ISBN: 978-0-9942943-0-2.
- [28] Glazer SN. 2016. Mine Seismology: Data Analysis and Interpretation. Springer, Switzerland. ISBN: 978-3-319-32612-2.
- [29] Gilbert F. 1971. Excitation of the normal modes of the earth by earthquake sources. *Geophys J Roy Astron Soc* 22(2):223-226. doi: 10.1111/j.1365-246X.1971.tb03593.x.
- [30] Udiás A. 1999. Principles of seismology. Cambridge University Press, Cambridge. ISBN: 0-521-62478-9.

پی نوشت

- ¹ Ambient stress
² Induced stress
³ Front abutment pressure
⁴ Side abutment pressure
⁵ Rear abutment pressure
⁶ Superposition
⁷ Ruhr
⁸ Passive
⁹ Induced earthquake
¹⁰ Induced seismicity
¹¹ Mining-induced seismicity
¹² Stafford
¹³ Seismic events
¹⁴ Saar
¹⁵ Master event
¹⁶ Double-difference
¹⁷ Subspace detection
¹⁸ Coalburst
¹⁹ Seismic moment tensor inversion

- ²⁰ Point-source approximation
²¹ Equivalent forces
²² Single force couple
²³ Dipole
²⁴ Double force couple
²⁵ Green's function
²⁶ Source time function
²⁷ Volumetric
²⁸ Deviatoric
²⁹ Isotropic
³⁰ Double couple
³¹ Compensated linear vector dipole
³² Trace
³³ Implosion
³⁴ Explosion
³⁵ Time domain
³⁶ Rose diagram
³⁷ Hudson plot