

## تخمین تنش‌های اصلی القایی در کارگاه‌های جبهه‌کار طولانی از طریق وارونه‌سازی تانسور گشتاور لرزه‌ای

ستار مهدوری<sup>۱\*</sup>، کوروش شهریار<sup>۲</sup>، مصطفی شریف‌زاده<sup>۳</sup>

۱- استادیار، گروه مهندسی معدن، دانشگاه صنعتی همدان

۲- استاد، دانشکده مهندسی معدن و متالورژی، دانشگاه صنعتی امیرکبیر

۳- دانشیار، دانشکده مهندسی معدن، دانشگاه کر تین استرالیا

(دریافت: مهر ۱۳۹۵، پذیرش: دی ۱۳۹۶)

### چکیده

با استخراج لایه زغالسنگ در کارگاه‌های جبهه‌کار طولانی، شرایط تعادل تنش‌های برجا تغییر کرده و توزیع مجدد تنش‌های برجا در محدوده کارگاه استخراج منجر به افزایش تمرکز تنش در پیرامون پهنه می‌شود. توزیع مجدد میدان تنش در اطراف کارگاه استخراج سبب ایجاد تنش‌های القایی و به تبع آن تغییر شکل و جابه‌جایی توده‌سنگ می‌شود. در این خصوص به علت تمرکز تنش در اطراف کارگاه استخراج، فشار تکیه‌گاهی جلویی از اهمیت بیش‌تری برخوردار است. از این رو در این پژوهش سعی شده است جهت تنش‌های اصلی القایی پیرامون کارگاه استخراج با استفاده از داده‌های لرزه‌نگاری و از طریق وارونه‌سازی تانسور گشتاور لرزه‌ای تعیین شود. به این ترتیب با تجزیه و تحلیل امواج لرزه‌ای القایی که در اثر تمرکز تنش منتشر می‌شوند، تانسور گشتاور لرزه‌ای محاسبه شده و سپس با استفاده از مقادیر ویژه و بردارهای ویژه، جهت تنش‌های القایی تخمین زده می‌شوند. برای این منظور با انتخاب کارگاه E2 معدن زغالسنگ طبس به عنوان مطالعه موردی، امواج لرزه‌ای متناظر با ۲۴ ریزش سقف در این کارگاه مورد تجزیه و تحلیل قرار گرفته است. نتایج حاصل از این پژوهش نشان می‌دهد که مکانیزم شکست غالب در این کارگاه به صورت فشاری/کششی ظاهر شده است. همچنین ناپایداری‌های کارگاه عمدتاً ناشی از تمرکز تنش بوده و موقعیت فضایی آنها در محدوده جبهه‌کار متمرکز شده است. از طرف دیگر شکست برشی بیشتر در محدوده گسل‌های منطقه ظاهر شده است. به طور کلی در بیش‌تر موارد جهت بیشینه تنش اصلی القایی نسبت به افق زاویه حاده داشته است. این موضوع نشان می‌دهد که تنش‌های القایی افقی بیش‌ترین تأثیر را در ناپایداری و وقوع شکست سقف داشته‌اند.

### کلید واژه‌ها

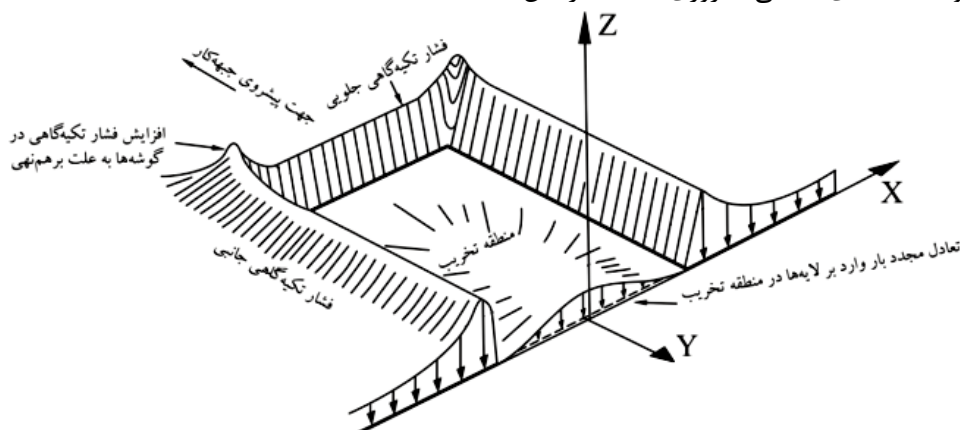
روش استخراج جبهه‌کار طولانی، تنش‌های اصلی القایی، تانسور گشتاور لرزه‌ای، امواج لرزه‌ای القایی، معدن زغالسنگ طبس

\* نویسنده عهده‌دار مکاتبات: [satar.mahdevari@hut.ac.ir](mailto:satar.mahdevari@hut.ac.ir)

## ۱- مقدمه

خصوصاً، شناخت کافی از توزیع تنش‌های القایی در اطراف مرزهای پهنه برای بررسی تأثیر آنها بر روی پایداری کارگاه، تونل‌ها، بازکننده‌ها، پایه‌ها و دیواره‌ها ضروری است. این در حالی است که با تغییر شرایط زمین‌شناسی از محلی به محل دیگر، امکان تعریف یک رابطه مشخص برای این موضوع وجود ندارد [۱].

با استخراج لایه زغالسنگ، شرایط تعادل تنش‌های برجا تغییر کرده و توزیع مجدد تنش‌های برجا در محدوده کارگاه استخراج جبهه‌کار طولانی منجر به افزایش تمرکز تنش در پیرامون پهنه می‌شود. با پیشروی جبهه‌کار وضعیت تنش در پیرامون کارگاه استخراج به صورت تابعی از دو مؤلفه (۱) تنش محیطی<sup>۱</sup> ناشی از وزن روباره و (۲) تنش القایی<sup>۲</sup> ناشی از استخراج معدن ظاهر می‌شود [۱]. لازم به ذکر است که مؤلفه قائم تنش محیطی ناشی از وزن روباره و مؤلفه افقی آن متأثر از نیروهای تکتونیکی و شرایط زمین‌شناسی است. تنش‌های القایی نیز مطابق شکل ۱ به صورت سه نوع فشار تکیه‌گاهی به نام‌های (۱) فشار تکیه‌گاهی جلویی<sup>۳</sup>، (۲) فشار تکیه‌گاهی جانبی<sup>۴</sup> و (۳) فشار تکیه‌گاهی عقبی<sup>۵</sup> در اطراف پهنه تشکیل می‌شود [۲].



شکل ۱: فشارهای تکیه‌گاهی در اطراف یک پهنه جبهه‌کار طولانی تک-ورودی [۳]

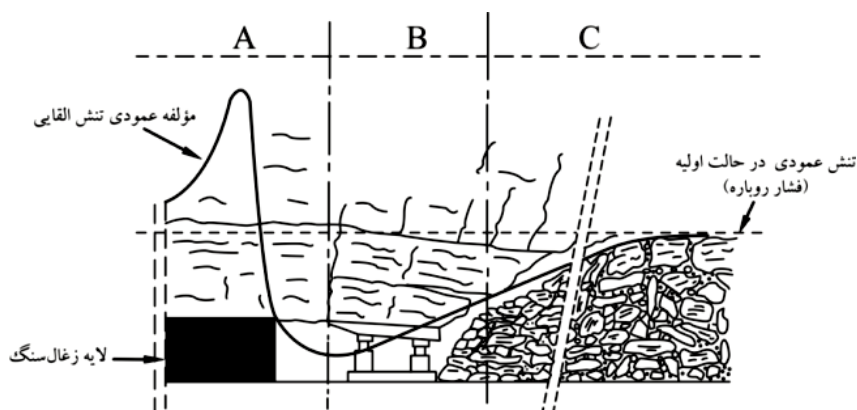
فرضی تحت فشار بوده و کارگاه استخراج در زیر این پل قرار خواهد گرفت. در نتیجه سیستم نگهداری تنها بار ناشی از لایه‌های سنگی با ضخامت خیلی کم (حدود ۱۰ تا ۱۵ متر) را تحمل خواهد کرد [۴].

فشار تکیه‌گاهی جلویی در فاصله ۱ تا ۳ متری جلوی جبهه‌کار، به بیشینه مقدار خود یعنی حدود ۵ برابر فشار اولیه روباره افزایش می‌یابد. این افزایش فشار در جلوی جبهه‌کار حتی بدون در نظر گرفتن برهم‌نهی<sup>۶</sup> تنش‌های ناشی از استخراج پهنه مجاور قبلی، سبب ایجاد مشکلات

روش استخراج جبهه‌کار طولانی در دو دهه گذشته بیش‌ترین رشد و توسعه را نسبت به سایر روش‌های استخراج داشته است. استفاده از سیستم‌های نگهداری هیدرولیکی، ناو زنجیری و ماشین‌های استخراجی پیوسته سبب افزایش چشم‌گیر سرعت و بازدهی عملیات استخراج و کاهش هزینه‌ها شده است. بنابراین امروزه روش استخراج جبهه‌کار طولانی به عنوان یک روش بزرگ مقیاس و ارزان شناخته می‌شود؛ به طوری که برای استخراج کانسارهای لایه‌ای همچون زغالسنگ، طلا، مس، اورانیوم و پتاس به ویژه در اعماق زیاد به عنوان اولین گزینه مطرح خواهد شد. قاعده کلیدی برای طراحی یک معدن به روش استخراج جبهه‌کار طولانی، تضمین پایداری همه فضاهای زیرزمینی معدن به صورت طبیعی یا مصنوعی در طول مدت استخراج است. برای طراحی معادن زیرزمینی اطلاع از شرایط زمین‌شناسی و ژئومکانیکی منطقه از قبیل وضعیت تنش‌های برجا و توزیع مجدد آنها پس از استخراج و همچنین مقاومت لایه‌های سنگی ضروری است. در این

به علت تمرکز تنش در اطراف کارگاه استخراج، فشار تکیه‌گاهی جلویی از اهمیت بیش‌تری برخوردار بوده و سبب ایجاد یک زون پرفشار در جلوی کارگاه استخراج می‌شود که با پیشروی جبهه‌کار حرکت می‌کند. تمرکز تنش ناشی از فشار تکیه‌گاهی جلویی در اصطلاح به صورت یک پل در بالای کارگاه استخراج توصیف می‌شود که یک پایه آن بر روی زغالسنگ استخراج نشده و پایه دیگر آن در فضای تخریب واقع شده است. در صورتی که کارگاه استخراج به درستی طراحی و اجرا شود، هر دو پایه این پل

در شکل ۲ نحوه توزیع مجدد تنش در اطراف کارگاه جبهه کار طولانی نشان داده شده است. در ناحیه A در محدوده ۳۰ متری جلوی جبهه کار، مؤلفه عمودی تنش از مقدار اولیه (فشار روباره) شروع به افزایش می‌کند و در ابتدا به صورت آهسته و سپس با یک نرخ جهشی تا رسیدن به حداکثر مقدار خود افزایش می‌یابد. ناحیه B یک زون کاهش تنش<sup>۸</sup> است که در آن بار وارد بر سقف خیلی کمتر از فشار روباره است. با فاصله از جبهه کار، مؤلفه قائم تنش به صورت آهسته افزایش می‌یابد و در ناحیه C در فاصله چند صد متری پشت کارگاه (در منطقه تخریب) به افزایش ادامه می‌دهد تا به حالت تعادل (فشار روباره) برسد.



شکل ۲: فشار تکیه‌گاهی جلویی در محدوده جبهه کار [۷]

خصوص پایش امواج لرزه‌ای ابزارهای مفید و قابل اعتماد برای تشخیص و ارزیابی رویدادهای لرزه‌ای در محدوده بازکننده‌ها و کارگاه‌های معدن‌های زیرزمینی است [۱۲].

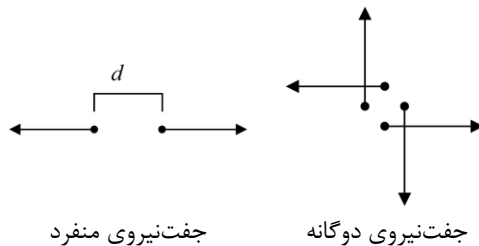
استفاده از ابزارهای پایش امواج لرزه‌ای القایی برای بررسی و کنترل رفتار توده سنگ در معادن جبهه کار طولانی فرانسه روشی نوین برای بهبود طرح استخراج معدن و افزایش ایمنی در شرایط پیچیده معادن زغالسنگ این کشور فراهم کرده است [۱۳]. همچنین تجزیه و تحلیل تاریخچه امواج لرزه‌ای القایی به همراه شبیه‌سازی‌های عددی 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 کمینه شود [۱۴]. به منظور تعیین محل وقوع امواج لرزه‌ای در معادن‌های جبهه کار طولانی آمریکا از روش‌های رویداد اصلی<sup>۱۱</sup> و تفاضل دوگانه<sup>۱۱</sup> استفاده شده است که بر اساس نتایج این پژوهش‌ها، منشاء امواج لرزه‌ای دقیقاً در بالای کارگاه استخراج بوده و محل انتشار امواج

قابل توجه مربوط به کنترل لایه‌ها در هر دو تونل ورودی و خروجی می‌شود. در صورتی که برهم‌نهی تنش‌های ناشی از استخراج پهنه مجاور در نظر گرفته شود، تونل خروجی بیش‌تر از تونل ورودی تحت فشار قرار خواهد گرفت [۴]. این موضوع به خاطر برهم‌نهی فشار در پهنه قبلی است. به عبارت دیگر فشار تکیه‌گاهی جانبی در پهنه‌ای که قبلاً استخراج شده است با فشارهای تکیه‌گاهی جانبی و جلویی پهنه‌ای که هم‌اکنون در حال استخراج است، جمع می‌شود. به همین دلیل معمولاً یکی از مکانیزم‌های شکست برشی که به شکست برشی-برنده<sup>۷</sup> معروف است، سبب ناپایداری تونل خروجی می‌شود [۵، ۶].

موقعیت بیشینه فشار تکیه‌گاهی جلویی از محلی به محل دیگر به علت تفاوت در خصوصیات لایه‌ها تغییر می‌کند. بیشینه مقدار فشار تکیه‌گاهی جلویی در لایه‌های زغالسنگ انگلستان تقریباً نزدیک جبهه کار و در فاصله ۱ تا ۳ متری جلوی خط جبهه کار مشخص شده است [۷]. این فاصله برای منطقه زغالی روهر<sup>۹</sup> در آلمان غربی تا ۱۰ متر نیز برآورد شده است [۸]. همچنین طبق اندازه‌گیری‌های برجا در معادن آمریکا بیشینه فشار تکیه‌گاهی جلویی در فاصله حدود ۵ تا ۹ متر در جلوی خط جبهه کار تعیین شده است [۲].

با توجه به طرح منحصر به فرد پهنه استخراجی در روش جبهه کار طولانی، کنترل تنش‌های القایی تأثیر زیادی بر روی پایداری کارگاه در حین عملیات استخراج خواهد داشت. مطالعات گسترده‌ای برای تخمین تنش‌های القایی در اطراف کارگاه‌های جبهه کار طولانی انجام شده است که می‌توان به استفاده از روش‌های عددی [۹]، انرژی کرنشی [۱۰] و رفتارنگاری برجا [۱۱] اشاره نمود. در این

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<sup>۱۴</sup> یا دوقطبی<sup>۱۵</sup> نامیده می‌شود. سیستم جفت‌نیروی دوگانه<sup>۱۶</sup> نیز به صورت دو جفت‌نیرو که تغییرات گشتاور در آنها صفر باشد، تعریف می‌شود. تصویر شماتیک این دو نوع سیستم در شکل ۳ نشان داده شده است.



شکل ۳: تصویر شماتیک نیروهای معادل

در روش وارونه‌سازی تانسور گشتاور لرزه‌ای یک چشمه الاستودینامیک با حجم  $V$  را می‌توان به صورت مجموع جفت‌نیروهای منفرد  $f_i$  که به زمان  $t$  و مکان  $r$  وابسته هستند، تعریف نمود. در این صورت جابه‌جایی  $u_k$  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<sup>۱۷</sup> و تابع زمانی چشمه<sup>۱۸</sup> محاسبه می‌شود [۲۲]:

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

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. تابع گرین جابه‌جایی‌های حاصل از یک چشمه با یک نیروی واحد را در گیرنده‌ها نمایش می‌دهد.

با داشتن مدل سرعت-عمق محدوده‌ای از توده‌سنگ که امواج از آن عبور می‌کنند، تابع گرین محاسبه می‌شود. با فرض تغییرات یکنواخت تابع گرین در یک چشمه می‌توان انتگرال فضایی رابطه فوق را ساده نمود. 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 فوق به صورت سری تیلور در اطراف یک نقطه مرجع به مرکز  $r = \xi$  خواهیم داشت [۲۳]:

همزمان با پیشروی جبهه‌کار حرکت می‌کند [۱۵]. در استرالیا به منظور کاهش ریسک از سیستم‌های پایش امواج لرزه‌ای در برنامه مدیریت عملیات استخراج معدن استفاده شده است و بر اساس نتایج حاصل عوامل و مکانیزم‌های وقوع پدیده شکست آنی زغالسنگ شناسایی شده‌اند [۱۶]. 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 متوسط تغییرات سرعت و امواج لرزه‌ای القایی مشخص شده است [۱۷]. بررسی تأثیر تنش‌های طبیعی، القایی و غیرلرزه‌ای در معدن‌های جبهه‌کار طولانی نشان می‌دهد که لرزش‌های قوی تقریباً در صفحات قائم و در امتداد ساختارهای تکتونیکی محلی رخ می‌دهند [۱۸]. همچنین برای تشخیص منشاء ریزش‌های سقف کارگاه، روش برازش گرینشی برای وارونه‌سازی تانسور گشتاور به عنوان یک روش کاربردی معرفی شده است [۱۹].

در این پژوهش سعی شده است جهت تنش‌های اصلی القایی پیرامون کارگاه استخراج با استفاده از داده‌های لرزه‌نگاری و از طریق وارونه‌سازی تانسور گشتاور لرزه‌ای تعیین شود. به این ترتیب با تجزیه و تحلیل امواج لرزه‌ای القایی که در اثر تمرکز تنش و رشد ترک‌ها منتشر می‌شوند، تانسور گشتاور لرزه‌ای محاسبه شده و سپس با استفاده از مقادیر ویژه و بردارهای ویژه، جهت تنش‌های اصلی القایی تخمین زده می‌شوند.

## ۲- روش تحقیق

وارونه‌سازی تانسور گشتاور لرزه‌ای که تئوری آن برای تشریح منشاء امواج لرزه‌ای بر مبنای تقریب چشمه نقطه‌ای<sup>۱۲</sup> اولین بار در سال ۱۹۷۰ مطرح شد [۲۰]، در زمینه‌های مختلف علم لرزه‌شناسی به طور گسترده مورد استفاده قرار می‌گیرد [۲۱]. مدل نیروهای معادل<sup>۱۳</sup> 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 [۲۲]. نیروهای معادل به صورت جابه‌جایی‌های ایجاد شده در یک نقطه مشخص مشابه جابه‌جایی‌هایی که در اثر نیروهای واقعی در چشمه لرزه رخ می‌دهند، تعریف می‌شوند.

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

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 ماتریس متقارن  $3 \times 3$  نمایش داده می‌شود:

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

به این ترتیب تانسور گشتاور لرزه‌ای همان چشمه لرزه‌ای درون یک حجم مشخص در حال تعادل (نیرو و گشتاور صفر) می‌باشد و هر مؤلفه این تانسور یک جفت‌نیرو را نشان می‌دهد. همانطور که در شکل ۴ مشاهده می‌شود، مؤلفه‌های تانسور گشتاور لرزه‌ای به صورت جفت‌نیروهایی در نظر گرفته شده‌اند که در سه جهت قرار گرفته (ستون‌های تانسور) و نیروها در انتهای هر کدام در سه جهت اعمال می‌شوند (سطح‌های تانسور). بر روی قطره‌های این تانسور که محور ترک‌ها با جهت نیروهای اعمال شده موازی است، جفت‌نیروها به صورت دوقطبی برداری یا جفت‌نیروی بدون گشتاور عمل می‌کنند؛ در حالی که برای مؤلفه‌های غیرقطری نیروها سبب ایجاد گشتاور در جهت عمود بر صفحه می‌شوند. بنابراین تانسور گشتاور لرزه‌ای یک معرف کامل از دینامیک چشمه لرزه‌ای بوده و قادر به مدلسازی انواع مختلف چشمه لرزه‌ای است.

به منظور محاسبه مقادیر ویژه و بردارهای ویژه تانسور گشتاور لرزه‌ای، پارامتر  $\lambda$  به صورت رابطه (۸) تعریف می‌شود:

$$Mx_i = \lambda_i x_i \quad (8)$$

در رابطه (۸) بردارهای غیرصفر  $x_i$  بردار ویژه تانسور و  $\lambda_i$  مقادیر ویژه آن خواهند بود به شرطی که رابطه (۹) برقرار باشد:

$$(M - \lambda_i I)x_i = 0 \quad (9)$$

رابطه (۹) برای مقادیر  $x_i$  جواب غیرصفر دارد اگر و تنها اگر  $M - \lambda_i I$  یکتا باشد، یعنی  $\det(M - \lambda_i I) = 0$  بنابراین با حل این دترمینان یک چندجمله‌ای حاصل می‌شود که ریشه‌های آن همان مقادیر ویژه خواهند بود. برای هر مقدار ویژه، یک بردار ویژه وجود دارد و بردارهای ویژه از هم مستقل خطی هستند. به عبارت دیگر به ازای درجه چندجمله‌ای  $\det(M - \lambda_i I) = 0$  بردار ویژه‌ای وجود دارد که همواره مستقل خطی است. بنابراین از آنجا

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

که در آن \* نشان‌دهنده تابع پیچش زمانی و کاما بعد از تابع گرین نشان‌دهنده مشتق جزئی نسبت به مؤلفه بعد از کاما است. بنابراین محدوده فیزیکی چشمه با مجموعه‌ای از نیروهای معادل مدلسازی می‌شود. به طوری که این نیروها به علت اختلاف بین تنش مدل و تنش فیزیکی واقعی که به اشباع تنش<sup>۱۹</sup> معروف است، ایجاد می‌شوند. اگر ابعاد چشمه نسبت به طول موج امواج لرزه‌ای کوچک‌تر باشد، تنها اولین بسط سری بالا برای محاسبه جابه‌جایی کافی خواهد بود [۲۴]:

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

رابطه (۳) با در نظر گرفتن سه فرض دیگر به صورت یک مسئله ساده به راحتی قابل حل 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 صورت رابطه (۴) بازنویسی می‌شود:

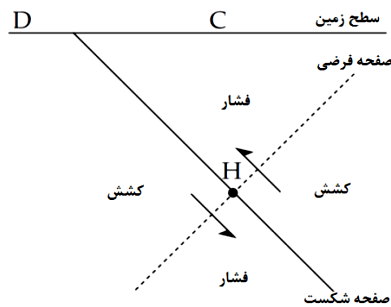
$$u_k(x, t) = M_{ij}[G_{ki,j} * s(\bar{t})] \quad (4)$$

در رابطه (۴)  $M_{ij}$  مؤلفه‌های تانسور گشتاور لرزه‌ای،  $G_{ki,j}$  مشتق تابع گرین  $G_{ki}$  نسبت به  $z$  و  $s(\bar{t})$  تابع زمانی چشمه است. اگر یک نیروی حجمی که معرف یک چشمه لرزه‌ای است را بتوان به صورت ترکیب خطی جفت‌نیروها و گشتاور لرزه‌ای نوشت، پس جابه‌جایی حاصل از این نیرو را نیز می‌توان به صورت مجموع جابه‌جایی‌های حاصل از جفت‌نیروهای منفرد محاسبه نمود [۲۴]. بنابراین با استفاده از تابع گرین و تابع زمانی چشمه می‌توان جابه‌جایی امواج P و S را به تانسور گشتاور لرزه‌ای مرتبط کرد. 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 [۲۵]:

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

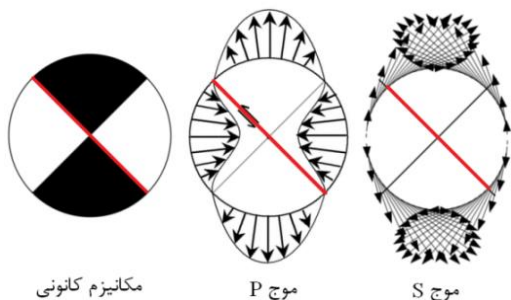
که در آن  $G_{ki}(x, t; x_0, t_0)$  تابع گرین در مکان  $x$  و زمان  $t$  بوده که در اثر یک ضربه موج در مکان  $x_0$  و زمان  $t_0$  ایجاد شده است. به صورت عملی نیز می‌توان ثابت نمود که مؤلفه‌های تانسور گشتاور لرزه‌ای با متوسط جابه‌جایی ذرات در چشمه متناسب هستند [۲۲]. در نهایت با وارونه‌سازی تانسور گشتاور لرزه‌ای خواهیم داشت:

خواهد شد. این چهار ناحیه توسط صفحه اصلی شکست و یک صفحه فرضی که عمود بر صفحه اصلی است، از هم جدا می‌شوند. به این ترتیب با نصب یک گیرنده در نقاط C یا D حرکت اولین پالس موج P به ترتیب به سمت بالا (فشاری) یا پایین (کششی) ثبت خواهد شد.



شکل ۵: امواج فشاری و کششی در یک ترک فرضی [۲۶]

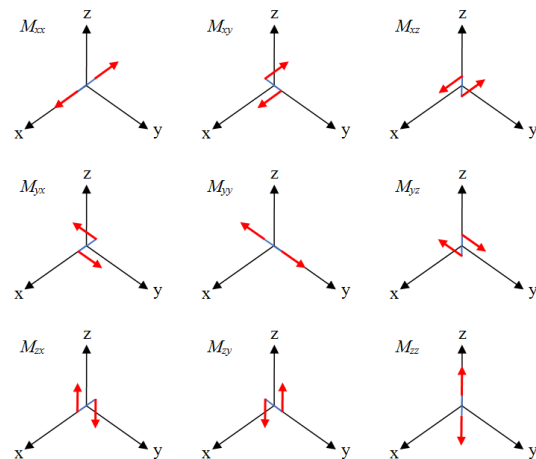
در شکل ۶ مکانیزم کانونی و بردارهای مربوط به امواج P و S برای ترک فرضی ارایه شده در شکل ۵ نمایش داده شده است. مکانیزم کانونی که الگوی انرژی ساطع شده را مدل می‌کند، به صورت الگوی پراش موج P بر روی یک کره کانونی نمایش داده می‌شود.



شکل ۶: مکانیزم کانونی و انتشار امواج P و S برای ترک فرضی

همانطور که مشاهده می‌شود، در لحظه شروع رشد ترک‌ها، اگر حرکت موج P از توده سنگ پیرامون کانون لرزه سبب دور شدن حرکت ذرات از کانون شود، در ربع دایره مشکی و اگر سبب نزدیک شدن حرکت ذرات به سمت کانون شود، در ربع دایره سفید واقع خواهد شد. نمایش تصویری مکانیزم کانونی بر روی نیم‌کره پایینی (یا بالایی) به صورت تصویر استریوگرافیک نحوه قطبی شدن موج P را نشان می‌دهد. دیاگرام یا شکل هندسی حاصل تصویر کروی یک کره واحد است که مرکز آن در چشمه یک رویداد لرزه‌ای واقع شده است. انواع تصویرهای استریوگرافیک مثل استریونت اشمیت<sup>۲۱</sup> یا شبکه ولف<sup>۲۲</sup> برای نمایش قطبش موج P قابل کاربرد هستند. در این پژوهش استریونت اشمیت در نیم‌کره پایینی مورد استفاده قرار گرفته است.

که تانسور گشتاور لرزه‌ای یک تانسور مرتبه دوم است، چندجمله‌ای حاصل درجه سه بوده و در نتیجه سه مقدار ویژه وجود دارد. برای محاسبه بردارهای ویژه، با قرار دادن هر یک از مقادیر ویژه در رابطه (۹) بردار ویژه متناظر با آن مقدار ویژه حاصل خواهد شد.



شکل ۴: مؤلفه‌های تانسور گشتاور لرزه‌ای [۲۲]

روش‌های مختلفی برای بررسی نحوه انتشار انرژی لرزه‌ای در رویدادهای لرزه‌ای ارایه شده است. در این خصوص مکانیزم کانونی که بر مبنای اولین پالس موج P تعیین می‌شود، اطلاعات مفیدی درباره مکانیزم کانونی جهت‌یافتگی شکست سنگ ارایه می‌کند. مکانیزم کانونی امواج لرزه‌ای القایی که با استفاده از یک تانسور مرتبه دوم تعریف می‌شود، تغییرشکل محدوده چشمه لرزه‌ای را به صورت گرافیکی توصیف می‌کند. هنگامی که یک رویداد لرزه‌ای منتشر می‌شود، انرژی الاستیک انباشته شده در آن در اثر جابه‌جایی و تغییرشکل توده سنگ به صورت ناگهانی آزاد می‌شود. اولین پالس موج P که توسط گیرنده دریافت می‌شود، نوع فشاری یا کششی بودن موج در چشمه لرزه‌ای را مشخص می‌کند [۲۵].

برای تشریح این موضوع همان طور که در شکل ۵ مشاهده می‌شود، مقطع عرضی یک ترک فرضی درون توده سنگ در نظر گرفته می‌شود. مرکز کانونی<sup>۲۰</sup> این رویداد لرزه‌ای در نقطه H فرض می‌شود. زمانی که ناحیه بالای سطح ترک (صفحه شکست) به سمت بالا حرکت می‌کند، یک ناحیه فشاری در جلوی حرکت صفحه شکست و یک ناحیه کششی در پشت آن ایجاد می‌شود. از آنجا که ناحیه زیرین ترک نیز دچار تغییرشکل می‌شود، دو ناحیه فشاری و دو ناحیه کششی در اطراف مرکز کانونی لرزه ایجاد

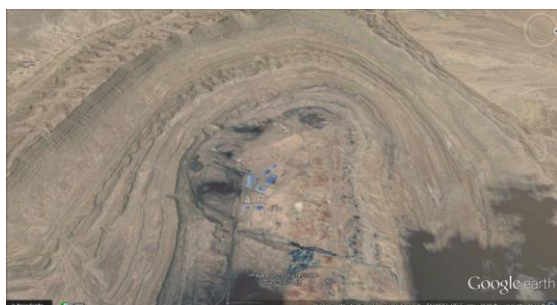
## ۳- معدن زغالسنگ پروده طبس

معدن زغالسنگ شماره یک پروده طبس به عنوان تنها معدن مکانیزه ایران در سال ۱۳۸۶ تجهیز و راه‌اندازی شده است. همان طور که در شکل ۷ نشان داده شده است، این معدن در فاصله ۸۵ کیلومتری شهر طبس در استان خراسان جنوبی واقع شده است. کمینه و بیشینه ارتفاع منطقه از سطح دریا ۷۳۰ و ۱۰۵۰ متر است.

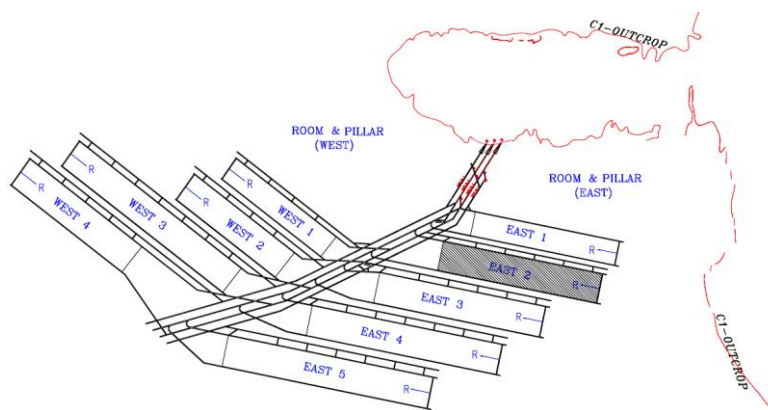
میزان زغالسنگ استخراجی از این معدن روزانه حدود ۴۰۰۰ تن و سالانه حدود ۱/۵ میلیون تن است. ذخیره قابل استخراج بخش مرکزی طاق‌دیس نامتقارن پروده در منطقه‌ای با وسعت ۱۲۰۰ کیلومترمربع واقع شده است. ذخایر قطعی و احتمالی این معدن به ترتیب حدود ۴۰۰ میلیون تن و ۲/۷۵ میلیارد تن برآورد شده است. لایه‌های زغالسنگ منطقه عمدتاً مربوط به رسوبات تریاسیک بالایی و ژوراسیک میانی سازندهای ناپبند و غدیر بوده که حدود ۱۰۰۰ متر ضخامت دارد.

سنگ‌های منطقه عمدتاً از گل‌سنگ و توالی لایه‌های لای‌سنگ و ماسه‌سنگ تشکیل شده است. 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. در این پژوهش پهنه E2 مورد مطالعه قرار گرفته که عرض آن ۲۱۵ و طول آن حدود ۱۱۲۰ متر است (شکل ۸).



شکل ۷: موقعیت جغرافیایی معدن زغال‌سنگ پروده طبس [۲۷]



شکل ۸: موقعیت پهنه E2 در معدن طبس [۲۸]

یک گسل معکوس بوده که جابه‌جایی آن حدود ۷۰۰ متر است. گسل ناپبند و گسل‌های کوچک اطراف آن از نظر فعالیت‌های لرزه‌ای فعال هستند.

بر اساس مطالعات زمین‌شناسی و تجربه‌های 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 سقف سبب ایجاد تأخیرهای طولانی در عملیات استخراج معدن شده است. در مدت استخراج پهنه E2 حدود ۴۸۴۳ رویداد

ساختمان زمین‌شناسی ناحیه پروده از چند گسل بزرگ با راستای شرقی-غربی تشکیل شده است و به وسیله گسل‌های کوچک‌تر به مناطق مجزا تفکیک شده است. منطقه زغال‌خیز پروده از سمت غرب به گسل کلمرد و از شرق به گسل ناپبند محدود شده است که در راستای شمالی-جنوبی گسترش یافته‌اند. ساختارهای گسلی دیگری در راستای شرقی-غربی و بین این دو گسل قرار گرفته‌اند. از سمت جنوب گسل زنونقان و از سمت شمال گسل رستم مرزهای معدن را تعیین می‌کنند. گسل رستم

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-عمق قابل پیش‌بینی خواهد شد.

لازم به ذکر است که انتگرال منحنی جابه‌جایی زمین با گشتاور لرزه‌ای متناسب است. همچنین برای 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:

$$L2 = \sum_i \left( d_i - \sum_j a_{ij} M_j \right)^2 \quad (10)$$

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 ( $d_i$ ) با مقادیر تخمین زده شده ( $\sum_j a_{ij} M_j$ )، محاسبه می‌شود.

#### ۴-۱- تعیین مکانیزم شکست

مکانیزم کانونی امواج لرزه‌ای القایی با استفاده از تانسور گشتاور لرزه‌ای برای همه ۲۴ رویداد لرزه‌ای که در این تحقیق مورد بررسی قرار گرفته‌اند، در شکل ۱۱ ارائه شده است. همانطور که مشاهده می‌شود، در عمل ممکن است توده‌سنگ به صورت ترکیبی از دو یا چند مکانیزم دچار شکست شود. در این شکل امواج فشاری به صورت مشکی و امواج کششی به صورت سفید نمایش داده شده‌اند. لازم به ذکر است که به علت اختلاف در علامت تنش فشاری در تئوری الاستیسیته و مکانیک سنگ، محور حداکثر تنش کششی در وسط امواج فشاری و محور حداکثر تنش فشاری در وسط امواج کششی قرار گرفته است.

همانطور که مشاهده می‌شود، در این کارگاه مکانیزم شکست بیشتر رویدادهای لرزه‌ای به صورت شکست فشاری یا کششی ظاهر شده است. این رویدادهای لرزه‌ای عمدتاً ناشی از تمرکز تنش بوده و موقعیت فضایی آنها در محدوده جبهه‌کار متمرکز شده است. همچنین چهار رویداد به صورت شکست برشی ظاهر شده است که با استفاده از نقشه زمین‌شناسی منطقه مشخص می‌شود که در امتداد گسل‌های منطقه رخ داده‌اند.

لرزه‌ای با بزرگی کم‌تر از ۳ ریشتر توسط مرکز لرزه‌نگاری ایران در محدوده ایستگاه‌های پروده ثبت شده است. با توجه به بزرگی لرزه‌ای اندک این رویدادهای لرزه‌ای و همچنین نزدیکی عمق کانونی آنها به عمق کارگاه استخراج، نتیجه گرفته می‌شود که منشاء این رویدادهای لرزه‌ای حرکت صفحات تکتونیکی نبوده و احتمالاً ناشی از شکست لایه‌های سنگی یا تحریک گسل‌های منطقه در اثر استخراج معدن می‌باشند. از این رو در این تحقیق روشی برای تخمین تنش‌های اصلی القایی با استفاده از تجزیه و تحلیل امواج لرزه‌ای القایی ارائه شده است. به این ترتیب بر اساس گزارشات دفتر فنی معدن، ۲۴ شکست که منجر به ریزش در کارگاه E2 شده بودند، انتخاب شده‌اند و از طریق تاریخ و محل وقوع آنها، رویدادهای لرزه‌ای متناظر مورد بررسی قرار گرفته است.

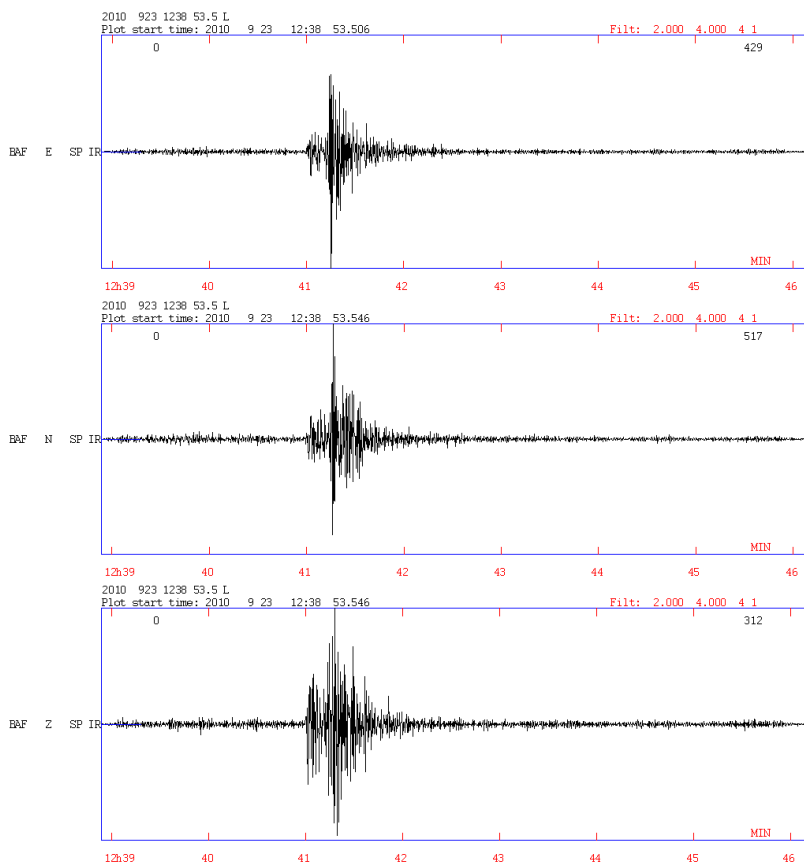
#### ۴- نتایج

در این پژوهش در ابتدا داده‌های لرزه‌نگاری بررسی شده و امواج لرزه‌ای القایی در محدوده‌های ناپایدار انتخاب شده‌اند. در مرحله بعد شکل موج رویدادهای لرزه‌ای فیلتر شده و پس از حذف نویزهای آن، پنجره زمانی<sup>۳۳</sup> مشخصی برای تمرکز بر روی اولین جنبش موج P تعریف شده است. به این ترتیب داده‌های ورودی شامل دامنه موج، زمان رسیدن موج و قطبش اولین جنبش موج P است.

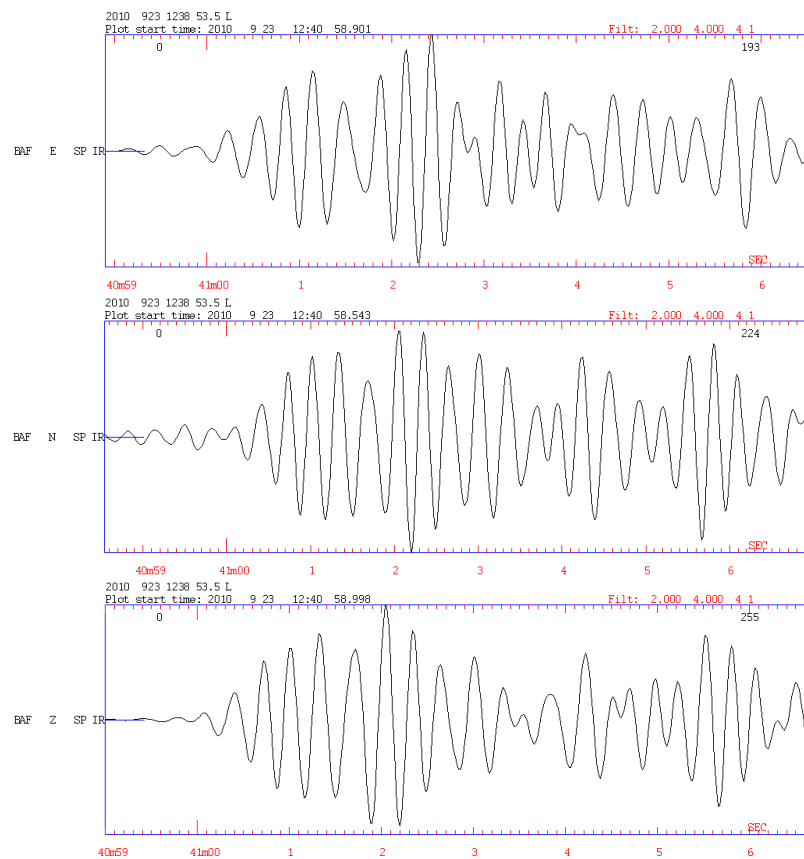
پارامترهای دیگر نظیر زاویه جهش، زاویه تابش، آزیموت و فاصله چشمه تا گیرنده بر اساس داده‌های ورودی تعیین می‌شوند. به عنوان نمونه منحنی‌های شکل موج مربوط به رویداد لرزه‌ای P20100923.124043.30 در یکی از ایستگاه‌های لرزه‌نگاری در شکل ۹ نمایش داده شده است. همان‌طور که مشاهده می‌شود، شکل موج این رویداد در سه جهت شرقی-غربی، شمال-جنوبی و عمودی ثبت شده و مدت زمان آن حدود ۶ دقیقه است. به منظور بررسی اولین جنبش موج P، تغییرات سرعت جابه‌جایی زمین در مدت ۸ ثانیه اول برای این رویداد لرزه‌ای در شکل ۱۰ نشان داده شده است.

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

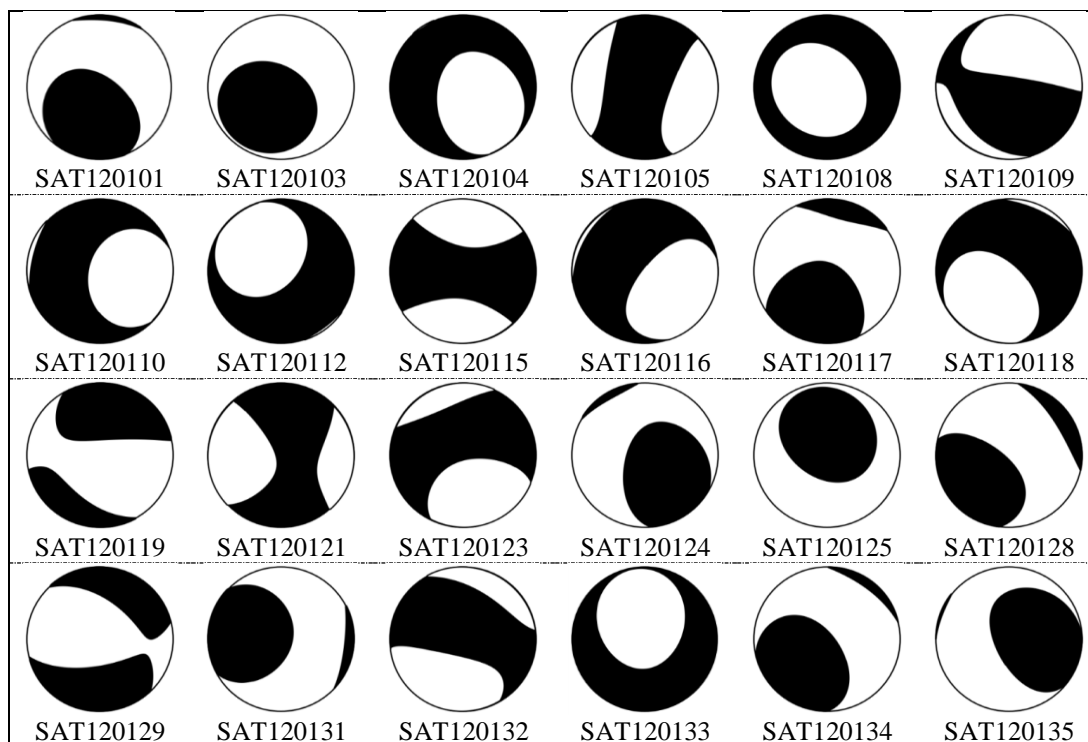




شکل ۹: شکل موج رویداد لرزه‌ای P20100923.124043.30



شکل ۱۰: شکل موج رویداد لرزه‌ای P20100923.124043.30 در مدت ۸ ثانیه اول



شکل ۱۱: مکانیزم شکست حاصل از تجزیه و تحلیل مکانیزم کانونی امواج لرزه‌ای

#### ۴-۲- تعیین جهت تنش‌های اصلی القایی

تانسور گشتاور لرزه‌ای بیانگر نیروهای معادل در یک چشمه لرزه‌ای نقطه‌ای است که بردارهای ویژه محورهای اصلی را تشکیل می‌دهند. بنابراین می‌توان یک سیستم مختصات جدید بر مبنای بردارهای ویژه تانسور گشتاور لرزه‌ای تعریف نمود به طوری که تنش‌های اصلی القایی در راستای آنها باشند. در این سیستم مختصات منشاء لرزه با استفاده از ترکیب خطی چشمه‌های دوقطبی متعامد تعریف می‌شود. به عنوان نمونه نتایج وارونه‌سازی تانسور گشتاور لرزه‌ای برای رویداد SAT120131 عبارت است از:

$$\begin{bmatrix} 5.49 & 1.10 & 5.55 \\ & -1.71 & 1.00 \\ & & 5.59 \end{bmatrix} \times 10^{11}$$

مقادیر ویژه بیشینه، متوسط و کمینه برای این رویداد به ترتیب معادل  $1.13 \times 10^{12}$ ،  $-1.88 \times 10^{11}$  و  $-6.95 \times 10^8$  و بردارهای ویژه متناظر با آنها به ترتیب  $(0.6999, 0.1136, 0.7051)$ ،  $(0.1096, -0.9927, 0.0512)$  و  $(0.7058, 0.0414, -0.7072)$  به دست آمده است. از آنجا که بیشینه مقدار ویژه برای این رویداد لرزه‌ای مثبت شده است، نتیجه می‌شود که بیشینه تنش اصلی القایی کششی است. همچنین طبق بردار ویژه متناظر با بیشینه مقدار ویژه، تنش اصلی بیشینه با زاویه حدود ۴۵ درجه نسبت به

قائم قرار گرفته است. نتایج مقادیر ویژه و بردارهای ویژه برای همه رویدادهای لرزه‌ای به ترتیب در جدول‌های ۱ و ۲ ارائه شده است. به طور کلی بردار ویژه متناظر با بیشینه مقدار ویژه مثبت، مربوط به محور کشش بوده که در آن امواج فشاری منتشر می‌شوند. لازم به ذکر است که این نتایج مربوط به تنش‌های القایی که در اثر تمرکز تنش و به تبع آن رشد و گسترش ترک‌ها ایجاد شده‌اند، بوده و با تنش‌های تکتونیکی متفاوت هستند. در این خصوص اثبات شده است که مقادیر ویژه و بردارهای ویژه متناظر آنها به ترتیب بیانگر بزرگی و جهت گسترش ترک‌ها در محل چشمه لرزه‌ای بوده و معیار خوبی برای تانسور تنش ارائه خواهند داد [۲۹].

به این ترتیب جهت تنش‌های اصلی القایی برای کارگاه E2 معدن طبس در شکل ۱۲ خلاصه شده است. همان طور که مشاهده می‌شود، سه بردار برای معرفی سه تنش اصلی القایی نشان داده شده است. به طور کلی وقتی که بیشینه تنش اصلی القایی مثبت بوده و جهت آن تقریباً افقی باشد، نشان دهنده شکست کششی است. از طرف دیگر وقتی که بیشینه تنش اصلی القایی منفی بوده و جهت آن تقریباً قائم باشد، شکست فشاری است. به عبارت دیگر، بخش عمده‌ای از وزن لایه‌های روباره به سمت جلوی

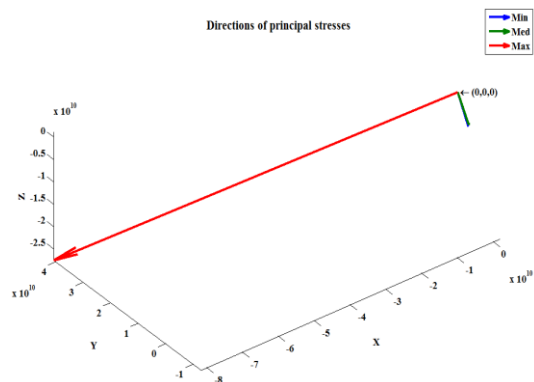
جبهه‌کار، تقاطع‌های T-شکل و راهروهای اطراف منتقل می‌شود.

جدول ۱: مقادیر ویژه تانسور گشتاور لرزه‌ای

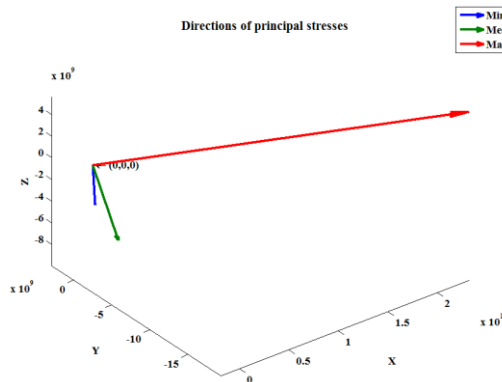
Event ID	$m_{min}$	$m_{med}$	$m_{max}$	Event ID	$m_{min}$	$m_{med}$	$m_{max}$
SAT120101	-4.21E+09	-1.27E+10	3.41E+10	SAT120119	-1.82E+08	-1.94E+09	2.37E+09
SAT120103	-8.89E+09	-1.62E+10	1.06E+11	SAT120121	2.52E+11	1.18E+12	-1.36E+12
SAT120104	3.75E+10	-6.89E+10	8.09E+10	SAT120123	2.04E+10	3.30E+11	-1.49E+12
SAT120105	-3.17E+11	5.24E+11	6.69E+11	SAT120124	-1.08E+11	1.43E+11	7.08E+11
SAT120108	1.20E+10	4.16E+10	-9.98E+10	SAT120125	-3.90E+09	-8.90E+09	1.65E+10
SAT120109	2.82E+08	-2.92E+09	2.98E+09	SAT120128	-1.96E+07	-2.48E+08	1.27E+09
SAT120110	2.03E+10	3.13E+10	-2.56E+11	SAT120129	-1.21E+11	1.21E+11	-3.48E+11
SAT120112	1.86E+10	2.88E+10	-1.10E+11	SAT120131	-6.95E+08	-1.88E+11	1.13E+12
SAT120115	5.07E+10	9.91E+10	-1.07E+11	SAT120132	7.87E+07	4.68E+08	-9.04E+08
SAT120116	1.24E+11	6.85E+11	-1.76E+12	SAT120133	5.76E+09	2.24E+10	-4.79E+10
SAT120117	3.94E+10	-8.41E+11	2.31E+12	SAT120134	6.40E+08	-5.25E+09	4.16E+10
SAT120118	3.60E+09	3.80E+10	-1.90E+11	SAT120135	4.50E+10	-5.45E+10	-9.62E+10

جدول ۲: بردارهای ویژه متناظر با مقادیر ویژه تانسور گشتاور لرزه‌ای

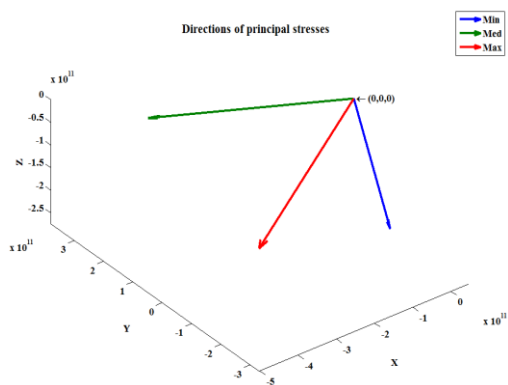
Event ID	$a_{min}$			$a_{med}$			$a_{max}$		
SAT120101	0.5010	0.7340	0.4585	-0.4229	-0.2546	0.8697	0.7551	-0.6296	0.1828
SAT120103	-0.2253	0.1943	0.9547	0.4643	0.8829	-0.0701	-0.8565	0.4275	-0.2892
SAT120104	0.4468	0.8452	0.2932	0.8712	-0.3366	-0.3574	-0.2034	0.4151	-0.8867
SAT120105	-0.1552	0.2281	0.9612	-0.5268	0.8040	-0.2758	-0.8357	-0.5491	-0.0046
SAT120108	-0.0800	0.6963	0.7132	-0.1745	-0.7143	0.6778	-0.9814	0.0702	-0.1787
SAT120109	0.3983	0.1923	0.8969	-0.4861	-0.7849	0.3842	0.7779	-0.5890	-0.2192
SAT120110	0.5965	0.5830	0.5516	-0.3043	0.8002	-0.5168	0.7427	-0.1404	-0.6547
SAT120112	-0.4511	0.8854	-0.1124	-0.4131	-0.0955	0.9057	-0.7911	-0.4550	-0.4088
SAT120115	0.9982	-0.0384	-0.0452	-0.0491	-0.1074	-0.9930	0.0333	0.9935	-0.1091
SAT120116	0.0931	-0.7674	0.6344	0.7313	0.4851	0.4795	0.6757	-0.4193	-0.6063
SAT120117	0.8017	0.5783	-0.1511	0.0057	-0.2602	-0.9655	-0.5977	0.7732	-0.2119
SAT120118	0.3373	0.7745	0.5351	-0.6056	-0.2567	0.7532	-0.7208	0.5781	-0.3824
SAT120119	0.6197	0.0544	0.7830	0.7204	-0.4355	-0.5398	-0.3116	-0.8985	0.3091
SAT120121	0.9177	-0.2563	-0.3035	-0.2391	-0.9665	0.0934	0.3173	0.0132	0.9482
SAT120123	0.8653	0.3092	0.3945	-0.2406	-0.4342	0.8681	0.4397	-0.8461	-0.3013
SAT120124	0.3056	-0.3404	0.8893	0.5310	0.8361	0.1375	-0.7903	0.4302	0.4362
SAT120125	-0.3355	0.7214	0.6058	0.2987	-0.5285	0.7947	-0.8934	-0.4475	0.0381
SAT120128	-0.5718	0.3594	0.7375	0.6333	0.7648	0.1183	0.5215	-0.5347	0.6649
SAT120129	0.5640	-0.1351	-0.8146	0.1105	-0.9653	0.2367	0.8183	0.2235	0.5295
SAT120131	0.7058	0.0414	-0.7072	0.1096	-0.9927	0.0512	0.6999	0.1136	0.7051
SAT120132	-0.4105	0.2236	0.8840	0.8502	0.4442	0.2824	-0.3295	0.8676	-0.3724
SAT120133	0.4527	-0.8893	-0.0651	-0.0394	-0.0929	0.9949	-0.8908	-0.4478	-0.0771
SAT120134	0.4819	0.8414	0.2445	-0.5531	0.0756	0.8297	0.6796	-0.5351	0.5018
SAT120135	-0.8081	-0.0282	0.5884	-0.3672	-0.7569	-0.5406	0.4606	-0.6529	0.6013



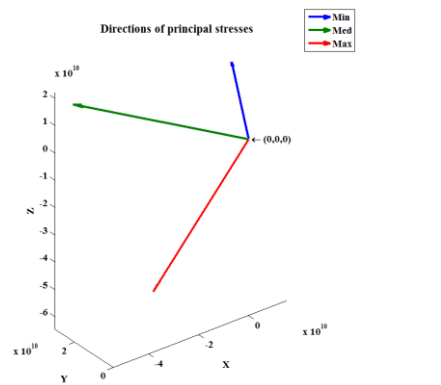
SAT120103



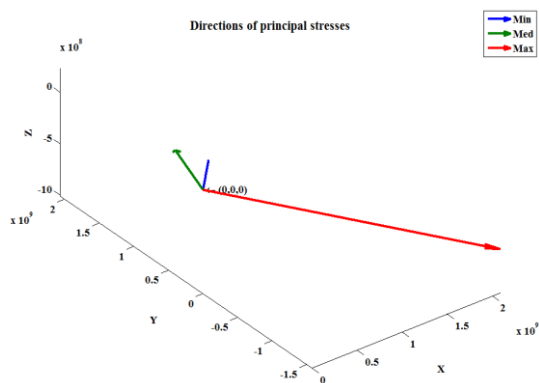
SAT120101



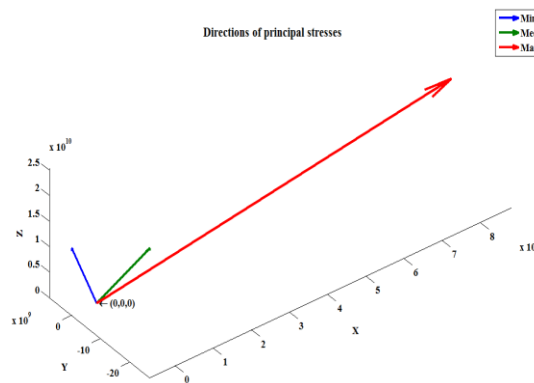
SAT120105



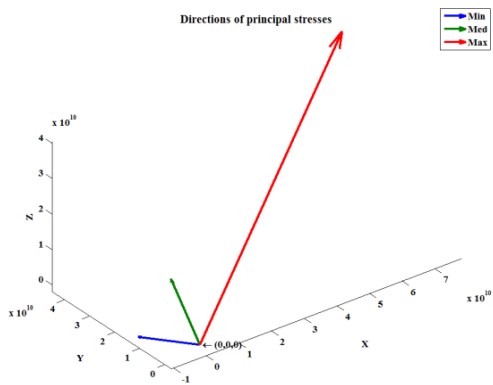
SAT120104



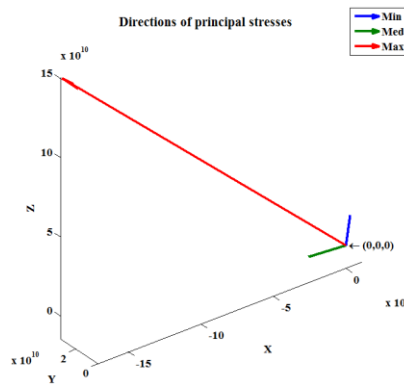
SAT120109



SAT120108

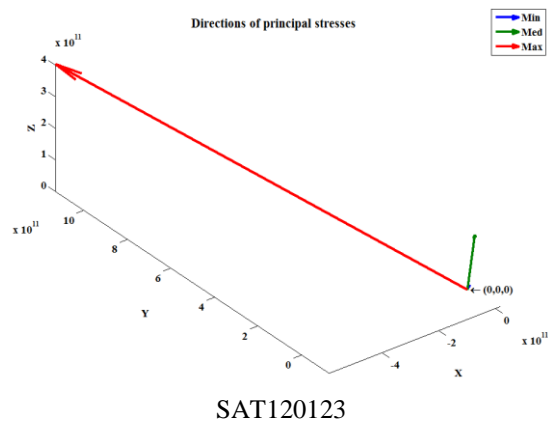
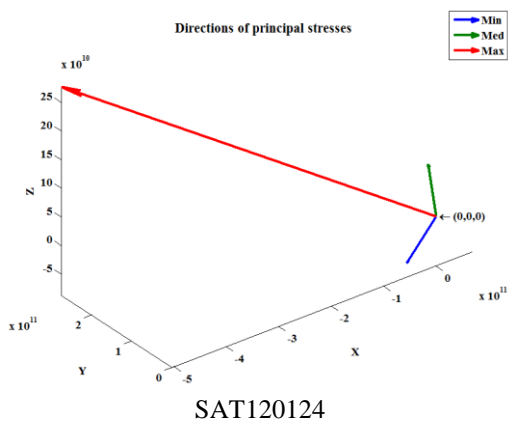
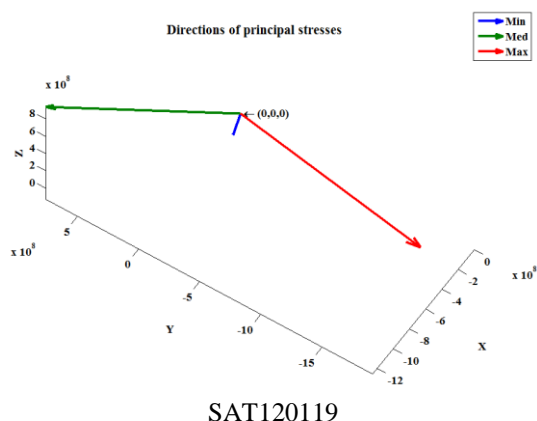
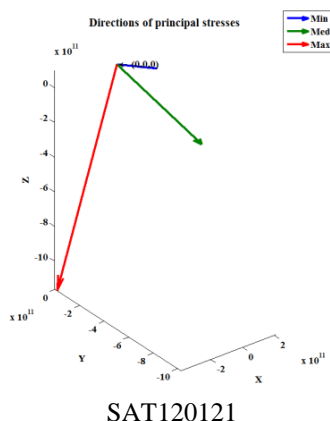
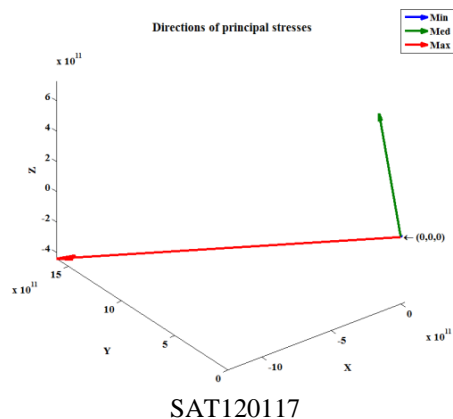
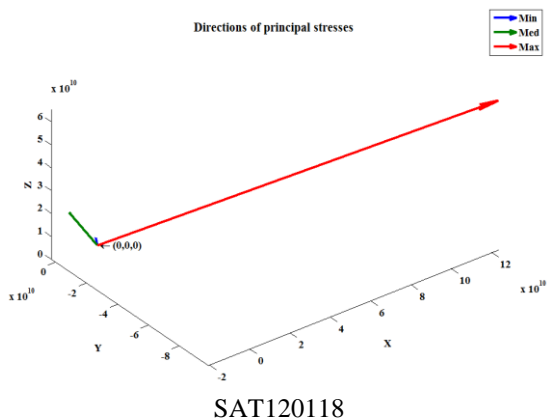
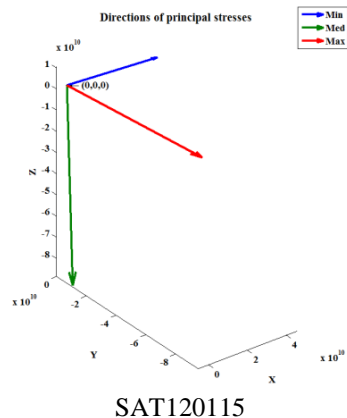
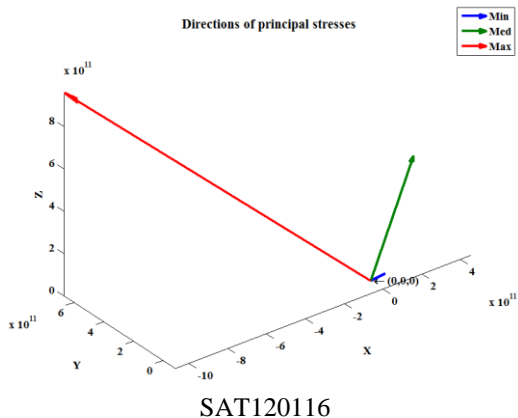


SAT120112

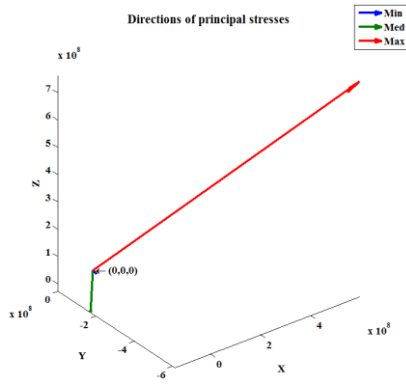


SAT120110

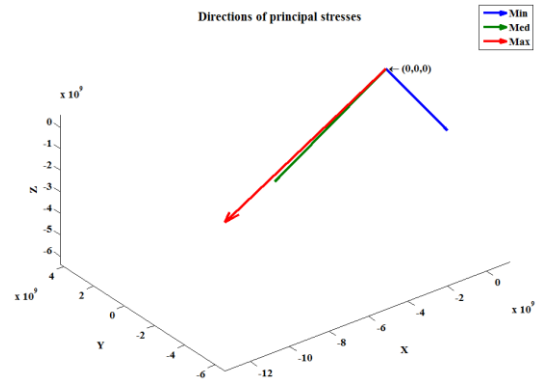
شکل ۱۲: جهت تنش‌های اصلی القایی حاصل از مقادیر و بردارهای ویژه تانسور گشتاور لرزه‌ای



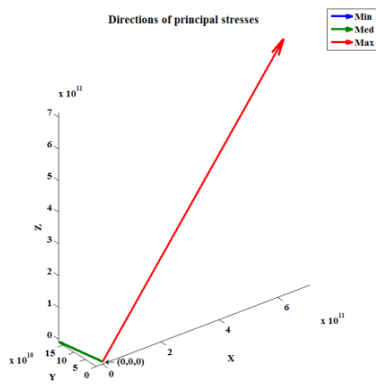
شکل ۱۲: جهت تنش‌های اصلی القایی حاصل از مقادیر و بردارهای ویژه تانسور گشتاور لرزه‌ای (ادامه)



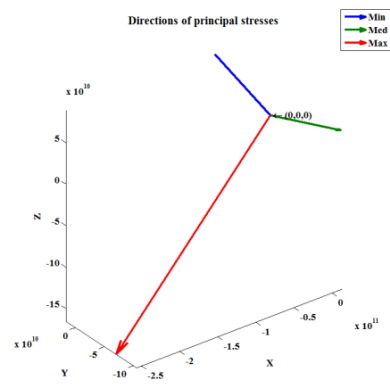
SAT120128



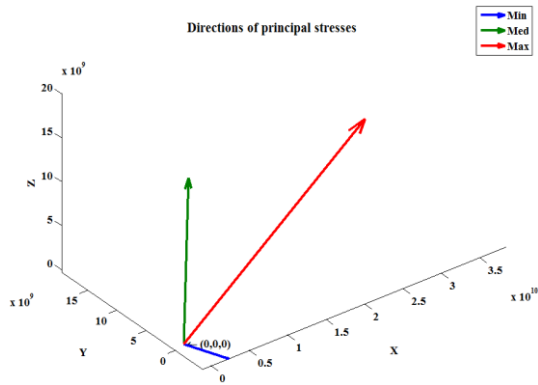
SAT120125



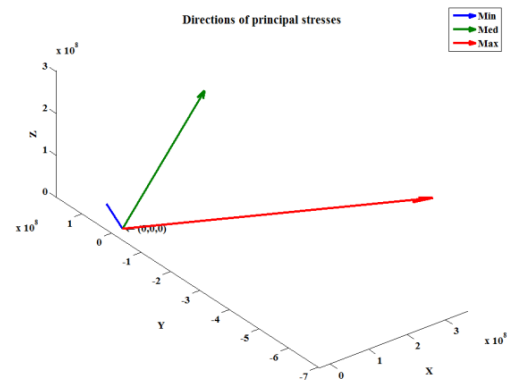
SAT120131



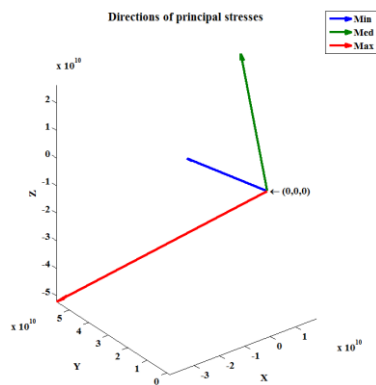
SAT120129



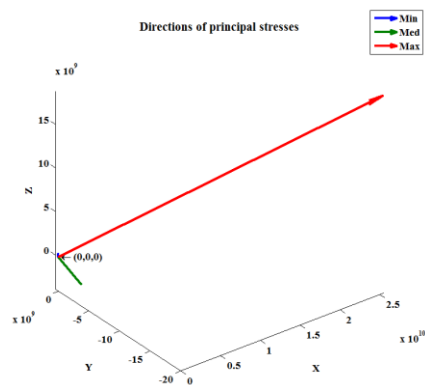
SAT120133



SAT120132



SAT120135

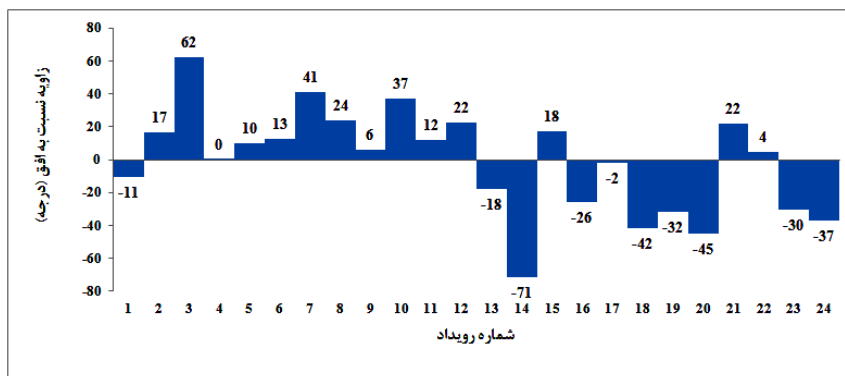


SAT120134

شکل ۱۲: جهت تنش‌های اصلی القایی حاصل از مقادیر و بردارهای ویژه تانسور گشتاور لرزه‌ای (ادامه)

برهم‌نهی فشارهای تکیه‌گاهی جلویی و جانبی که نشان می‌دهد مقدار فشار تکیه‌گاهی جلویی در امتداد جبهه کار غیریکنواخت است، همخوانی دارد. البته باید توجه شود که تخریب سقف تأثیری بر بیشینه فشار تکیه‌گاهی جلویی در محدوده تقاطع‌های T-شکل ندارد. بدیهی است با افزایش عمق لایه، فشار تکیه‌گاهی جلویی نیز افزایش خواهند یافت. همچنین از نظر موقعیت مکانی، بیشینه فشار تکیه‌گاهی در لایه زغالسنگ و بیشینه فشار تکیه‌گاهی در سقف الزاماً در یک صفحه قائم واقع نخواهند شد و بسته به صلبیت<sup>۲۵</sup> نسبی لایه‌های سقف بلافاصله و لایه زغالسنگ ممکن است هر دو از صفحه قائم منحرف شوند [۴].

همان‌طور که در شکل ۱۳ مشاهده می‌شود، در بیش‌تر موارد بیشینه تنش اصلی القایی نسبت به افق دارای زاویه حاده است. این موضوع نشان می‌دهد که تنش‌های القایی افقی بیش‌ترین تأثیر را در ناپایداری و وقوع شکست سقف داشته‌اند. در این خصوص می‌توان چنین نتیجه‌گیری کرد که لایه‌های سنگی سقف کارگاه استخراج که با عبور سیستم نگهداری مشابه یک تیر طره‌ای عمل خواهند کرد، در اثر تنش‌های افقی تحت کشش و فشار قرار گرفته و دچار شکست می‌شوند.



شکل ۱۳: جهت بیشینه تنش اصلی القایی نسبت به افق

سپس جهت تنش‌های اصلی القایی بر اساس مقادیر ویژه و بردارهای ویژه تانسور گشتاور القایی تعیین شده است. طبق نتایج حاصل از این پژوهش مکانیزم کانونی غالب در کارگاه E2 معدن طبس متناظر با مکانیزم شکست فشاری/کششی است. همچنین مکانیزم شکست برشی عمدتاً در محدوده ناپیوستگی‌های زمین‌شناسی به ویژه گسل‌های منطقه رخ داده است. بر اساس نتایج حاصل در بیش‌تر موارد بیشینه تنش اصلی القایی نسبت به افق دارای زاویه حاده است. این

به این ترتیب اغتشاس تنش، سبب ایجاد یک ناحیه با تمرکز تنش شدید در جلوی جبهه کار خواهد شد و همزمان با پیشروی جبهه کار در جلوی آن حرکت می‌کند. همزمان با تغییر شکل توده سنگ پیرامون جبهه کار، انرژی الاستیک به شکل کرنش الاستیک شروع به ذخیره شدن می‌کند. این پدیده تا زمانی ادامه خواهد داشت که تنش‌های انباشته شده از مقاومت توده سنگ تجاوز نکند. با تجاوز تنش‌های انباشته شده از مقاومت توده سنگ، بر اساس تئوری بازگشتی الاستیک<sup>۲۴</sup>، شکستگی‌ها شکل می‌گیرند [۳۰] و انرژی ذخیره شده به شکل گرما، گسترش ترک‌ها و انتشار امواج لرزه‌ای آزاد می‌شود [۳۱].

مشاهدات میدانی در معدن‌های جبهه کار طولانی حاکی از آن است که امواج لرزه‌ای القایی عمدتاً از جلوی جبهه کار منتشر می‌شوند [۱۹]. این مشاهدات با مدل تعریف شده در این پژوهش که امواج لرزه‌ای ناشی از گسترش ترک‌ها و تمرکز تنش‌های القایی هستند، مطابقت دارد. به این ترتیب انتشار امواج لرزه‌ای در جلوی جبهه کار بیانگر این است که تنش‌های القایی به سمت جلوی جبهه کار متمایل شده‌اند.

نتایج این پژوهش حاکی از آن است که تمرکز تنش‌های فشاری و کششی در دو انتهای جبهه کار (تقاطع‌های T-شکل) بیش‌تر است. این موضوع با اصل

## ۵- نتیجه‌گیری

در این پژوهش یک روش غیرمخرب مبتنی بر امواج لرزه‌ای القایی برای تخمین جهت تنش‌های اصلی القایی در کارگاه‌های جبهه کار طولانی معرفی شده است. به این ترتیب در ابتدا تانسور گشتاور لرزه‌ای با استفاده از شکل موج امواج لرزه‌ای برآورد شده است و در مرحله بعد مقادیر ویژه و بردارهای ویژه تانسور گشتاور محاسبه شده‌اند.

- [8] Whittaker, B.N. (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.
- [9] Everling, G. and 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.
- [10] Guo, H. Yuan, L. Shen, B. Qu, Q. Xue, J. (2012). Mining-induced strata stress changes, fractures and gas flow dynamics in multi-seam longwall mining. *Int J Rock Mech Min Sci* 54:129-139. doi: 10.1016/j.ijrmms.2012.05.023.
- [11] Rezaei, M. Hossaini, M.F. Majdi, A. (2015). Determination of Longwall Mining-Induced Stress Using the Strain Energy Method. *Rock Mech Rock Eng* 48(6). doi: 10.1007/s00603-014-0704-8
- [12] Zhang, N. Zhang, N. Han, C. Qian, D. Xue, F. (2014). Borehole stress monitoring analysis on advanced abutment pressure induced by Longwall Mining. *Arab J Geosci* 7:457-463. doi:10.1007/s12517-013-0831-7
- [13] Mendecki, A.J. (2016). Mine seismology reference book: seismic hazard. Institute of Mine Seismology. ISBN: 978-0-9942943-0-2.
- [14] Driad-Lebeau, L. Lahaie, F. Al Heib, M.A. Josien, J.P. Bigarre, P. Noirel, J.F. (2005). Seismic and geotechnical investigations following a rockburst in a complex French mining district. *Int J Coal Geol* 64:66-78.
- [15] 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.
- [16] Boltz, M.S. Pankow, K.L. McCarter, M.K. (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.
- [17] 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.
- [18] 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.
- [19] Kozłowska, M. Orlecka-Sikora, B. Rudziński, Ł. Cielesta, S. Mutke, G. (2016). Atypical evolution of seismicity patterns resulting

موضوع نشان می‌دهد که تنش‌های القایی افقی بیش‌ترین تأثیر را در ناپایداری و وقوع شکست سقف داشته‌اند. در این خصوص می‌توان چنین نتیجه‌گیری کرد که لایه‌های سنگی سقف کارگاه استخراج که با عبور سیستم نگهداری مشابه یک تیر طره‌ای عمل خواهند کرد، در اثر تنش‌های افقی تحت کشش و فشار قرار گرفته و دچار شکست می‌شوند. از طرف دیگر مکانیزم شکست برشی در نواحی خاص و احتمالاً تحت تأثیر اندرکنش بین تنش‌های القایی و تکتونیکی رخ می‌دهد.

## ۶- 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 پروده سپاسگزاری می‌شود.

## منابع

- [1] Peng, S.S. (2008). Coal Mine Ground Control. 3rd Edition, West Virginia University, Department of Mining Engineering, College of Engineering and Mineral Resources, Morgantown, p.750.
- [2] Gibowicz, S.J. and 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.
- [3] Peng, S.S. (2006). Longwall mining, 2nd edn. Morgantown, West Virginia, ISBN: 0-9789383-0-5.
- [4] Whittaker, B.N. (1974). An appraisal of strata control practice. *Min Eng* 134(166):9-29.
- [5] Bieniawski, Z.T. (1987). Strata control in mineral engineering. John Wiley & Sons, ISBN: 9780470203293.
- [6] Kripakov, N.P. (1982). Alternatives for controlling cutter roof in coal mines. In Proc. of 2<sup>nd</sup> Int. Conf. on Ground Control in Mining (West Virginia University, Morgantown): 142-151.
- [7] Hill, J.L. and Bauer, E.R. (1984). An investigation of the causes of cutter roof failure in a central Pennsylvania coal mine: a case study. In Proc. of 25th US Symp. on Rock Mechanics (AIME, New York): 603-614.



[32] Cook, N.G.W. (1976). Seismicity associated with mining. *Eng Geol* 10(2-4):99-122. doi: 10.1016/0013-7952(76)90015-6.

<sup>1</sup> Ambient stress

<sup>2</sup> Induced stress

<sup>3</sup> Front abutment pressure

<sup>4</sup> Side abutment pressure

<sup>5</sup> Rear abutment pressure

<sup>6</sup> Superposition

<sup>7</sup> Cutter-type failure

<sup>8</sup> Distressed zone

<sup>9</sup> Ruhr

<sup>10</sup> Master event

<sup>11</sup> Double-difference

<sup>12</sup> Point-source approximation

<sup>13</sup> Equivalent forces

<sup>14</sup> Single force couple

<sup>15</sup> Dipole

<sup>16</sup> Double force couple

<sup>17</sup> Green's function

<sup>18</sup> Source time function

<sup>19</sup> Stress glut

<sup>20</sup> Hypocenter

<sup>21</sup> Schmidt

<sup>22</sup> Wulff

<sup>23</sup> Time window

<sup>24</sup> Elastic rebound theory

<sup>25</sup> Stiffness

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.

[20] 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.

[21] 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.

[22] Udiás, A. (1999). Principles of seismology. Cambridge University Press, Cambridge. ISBN: 0-521-62478-9.

[23] Aki, K. and Richards, P.G. (2002). Quantitative seismology. 2nd edn. University Science Books, Sausalito, CA. ISBN: 978-1891389634.

[24] Jost, M.L. and Herrmann, R.B. (1989). A student's guide to and review of moment tensors. *Seismol Res Lett* 60:37-57. doi: 10.1785/gssrl.60.2.37.

[25] Gibowicz, S.J. and Kijko, A. (1994). An introduction to mining seismology. Academic Press Inc. ISBN: 0-12-282120-3.

[26] Shearer, P.M. (2009). Introduction to Seismology. 2nd edn. Cambridge University Press. ISBN: 9780521708425.

[27] Lowrie, W. (2007). Fundamentals of geophysics. 2nd edn. Cambridge University Press. ISBN: 978-0-511-35447-2.

[28] Google earth, V 7.1.5.1557. (2009). Parvadeh Coal mines, Tabas. 33\_00036.3700N, 56\_49030.1500E, elev 2746 ft. Digital Globe 2015. [http://www.earth.google.com]

[29] IRITEC. (2003). Tabas Coal Mine Project, detailed design report, vol 1, underground mine revision B. Iran International Engineering Company (IRITEC), p 464.

[30] Michael, A.J. (1987). Use of focal mechanisms to determine stress: a control study. *J Geophys Res* 92(B1):357-368. doi: 10.1029/JB092iB01p00357.

[31] Reid, H.F. (1911). The elastic-rebound theory of earthquakes. Bulletin of the Department of Geology, University of California Publications: 6(19):413-444.