

تحلیل پایداری دینامیکی دامنه‌های سنگی معدن سونگون به روشهای تعادل حدی و عددی

قدرت برزگری*^۱، موسی فتحی^۲

پذیرش مقاله: ۱۴۰۰/۰۹/۲۷

دریافت مقاله: ۱۳۹۹/۱۲/۱۷

چکیده

معدن سونگون در استان آذربایجان شرقی و در فاصله ۴۵ کیلومتری شمال شهرستان ورزقان واقع شده است. در این مطالعه به منظور بررسی ضریب پایداری و میزان جابجایی دامنه‌ها، سه مقطع در محدوده معدن انتخاب شده و مورد تحلیل تعادل حدی و عددی قرار گرفتند. برای تحلیل تعادل حدی (به روش بیشاپ و جانبو) و عددی و تعیین ضریب پایداری و میزان جابجایی با اعمال اثر زلزله، از نرم‌افزارهای SLIDE و UDEC استفاده شده است. نتایج نشان داد که ضریب پایداری در برابر گسیختگی در شرایط استاتیکی بیشتر از ۱/۴ و در شرایط دینامیکی برای شتاب مبنای طرح برابر ۰/۳۵g در محدوده بین ۰/۹۲ تا ۱/۲ قرار می‌گیرد. در شرایطی که شتاب مبنای طرح برابر ۰/۴۲g باشد مقدار ضریب ایمنی به ۰/۸ تا ۱/۰۵ کاهش یافته و در بیشتر محدوده معدن بویژه با استفاده از روش جانبو کمتر از یک خواهد بود و سطح وسیعی از دامنه‌های سنگی معدن ناپایدار خواهند شد. البته در پله‌های استخراج حتی با اعمال شتاب ۰/۳۵g نیز احتمال گسیختگی بصورت محدود وجود دارد. بر اساس نتایج بدست آمده از تحلیل عددی، بطور کلی جابجایی‌ها در قسمت غربی معدن (پایین‌دست دامنه‌ها) بیشتر از محدوده‌های شرقی معدن می‌باشد. بیشترین مقدار جابجایی در حالت دینامیکی با شتاب ۰/۴۲g در مقطع ۲ (قسمت میانی معدن) با بیش از ۴۰ سانتی‌متر خواهد بود مقدار جابجایی‌های در پله‌های استخراج بیشتر از دامنه‌های سنگی می‌باشد و پتانسیل وقوع گسیختگی نوع واژگونی نسبت به سایر انواع دیگر بیشتر است.

کلید واژه‌ها: پایداری دامنه‌ای، دامنه‌های سنگی، تعادل حدی، تحلیل عددی، معدن = سونگون.

۱. عضو هیات علمی گروه علوم زمین، دانشگاه تبریز، gbarzegari@tabrizu.ac.ir

۲. دانش آموخته کارشناسی ارشد زمین‌شناسی مهندسی، گروه علوم زمین، دانشگاه تبریز

* مسئول مکاتبات

۱. مقدمه

تحلیل پایداری دامنه‌های سنگی و نحوه گسیختگی آنها یکی از مسائل مهم در مهندسی ژئوتکنیک می‌باشد. در این تحلیل، ضریب اطمینان دامنه‌ها در برابر گسیختگی برشی ناشی از وزن توده و یا بارگذاری خارجی اعمال شده ارزیابی می‌شود. تحلیل پایداری دامنه‌ای در معادن روباز، بدلیل استخراج روزانه و تغییر مداوم مقطع عرضی آن، یک فرآیند نسبتاً پیچیده و دشواری است. هونگ (Huang, 2014). هرگونه تحلیل نادرست می‌تواند خسارات جبران‌ناپذیری به دنبال داشته باشد. بدنام‌سزکی (Bednarczyk, 2017). بررسی این موضوع بایستی با در نظر گرفتن مسائل فنی، اقتصادی، زیست محیطی و ایمنی انجام - گیرد. کی و همکاران (Qi et al., 2017). در شکل (۱) تصویری از گسیختگی دامنه سنگی معدن مس بینگهام در سال ۲۰۱۳ نشان داده شده است.

مکانیزم گسیختگی در دامنه‌های سنگی عموماً به هندسه دامنه، ویژگی‌های زمین‌شناسی و ژئومکانیکی توده‌سنگ، لایه‌بندی و مشخصات درزه‌ها بستگی دارد. در اکثر توده‌سنگ‌ها، ناپیوستگی‌ها تعیین کننده رفتار مکانیکی، هیدرولیکی و دینامیکی هستند. بنابراین انجام مطالعات ناپیوستگی‌ها به منظور تحلیل و تأثیر آن بر پایداری توده‌سنگ امری مهم و ضروری است. انتخاب روش صحیح پایداری دامنه‌های سنگی به شرایط محیطی، پارامترهای ژئومکانیکی و همچنین انتخاب روش مناسب تحلیل بستگی دارد. فرآیند معمول در تحلیل آنها، استفاده از تحلیل سینماتیکی برای شناسایی بلوک‌های بالقوه ناپایدار و به دنبال آن، تحلیل پایداری تفضیلی این بلوک‌ها با استفاده از روش‌های تعادل حدی و عددی می‌باشد. اولین مرحله در مطالعه یک دامنه، بررسی و شناسایی یک یا چندین مجموعه ناپیوستگی می‌باشد که می‌توانند بلوک‌های سنگی بالقوه ناپایدار را تشکیل دهند. اطلاعات ناپیوستگی‌های موجود به طور عمده مربوط به مغزه‌های اخذ شده از گمانه‌ها و

برداشت‌های انجام گرفته از رخنمون‌های سطحی می‌باشد. این اطلاعات، مبنای طراحی مقدماتی دامنه‌های سنگی را فراهم می‌سازد. شمس‌الدین و همکاران (Shamsoddin et al., 2016). روش‌های تجربی ساده و آسان هستند ولی این روش‌ها فقط پتانسیل گسیختگی را نشان می‌دهند و شرایط کمی پایداری شیب را ارائه نمی‌کنند. بنابراین در شرایطی از جمله در مواردی که هندسه دامنه پیچیده و شرایط زمین‌شناسی متغیر و متنوع است استفاده از این روش‌ها کفایت نمی‌کند. بنابراین در این شرایط، از روش‌هایی همچون تعادل حدی استفاده می‌شود. این روش در طی سالیان، نتایج رضایت‌بخشی برای امور مهندسی ارائه کرده است. روش‌های عددی بیشتر برای ارزیابی پایداری دامنه‌های پیچیده بکار برده می‌شود. متداول‌ترین روش تحلیل پایداری دامنه‌ای، روش تعادل حدی است. از این روش برای بررسی پایداری دامنه‌ها در دو حالت با کنترل ساختاری (شکست صفحه‌ای، گوه‌ای و واژگونی) و کنترل غیرساختاری (شکست دایره‌ای یا قاشقی) استفاده می‌شود. نتیجه هر کدام از روش‌های تعادل حدی تابع میزان دقت اعمال شده در فرضیات انتخابی آن روش می‌باشد کیان و همکاران (Qian et al., 2017). اساس تعادل حدی، ارزیابی نسبت نیروهای مقاوم به نیروهای محرک می‌باشد. لغزش زمانی رخ می‌دهد که مؤلفه نیروهای محرک بر نیروهای مقاوم غلبه کند. زمانی که ضریب پایداری برابر یک باشد دامنه در آستانه لغزش قرار دارد. راگو وانشی (Raghuvanshi, 2017).

از آنجا که رفتار یک توده‌سنگ بیشتر به ناپیوستگی‌ها بستگی دارد و وجود ناپیوستگی‌ها تأثیر زیادی بر روی پایداری سنگ‌ها دارد لذا برای تجزیه و تحلیل تنش‌ها عمدتاً از روش‌های عددی (المان محدود، المان مجزاء و ترکیبی) استفاده می‌شود. مدل-سازی عددی یک روش کارآمدی است که بطور گسترده‌ای در مهندسی سنگ استفاده می‌شود بختیاری و همکاران (Bakhtiyari et al., 2017).



شکل ۱. تصویری از گسیختگی دامنه سنگی معدن مس

بینگهام. پانکو (Pankow, et al., 2014)

مطالعات گسترده‌ای توسط محققین مختلف در زمینه بررسی ناپایداری دامنه‌ها و شیب‌های سنگی با روشهای مختلف انجام داده‌اند از آن جمله، برزگری و فتحی (۱۳۹۷) پتانسیل گسیختگی شیب‌های سنگی معدن سونگون را بر اساس امتیاز توده‌ی سنگ (SMR) و تحلیل سلسله مراتبی (AHP) پهنه‌بندی کرده‌اند. ژنگ و همکاران (Zheng et al., 2021)، شیب سنگی معدن تایپینگ واقع جنوب غربی مغولستان را بررسی کرده‌اند. آذرافزا و همکاران (Azarafza et al., 2020a)، با استفاده از الگوریتم تحلیل بلوک‌های کلیدی فازی، وضعیت پایداری شیب‌های سنگی ناپیوسته را تحت شکست‌های ساختاری بر اساس سناریوهای لغزش گوه‌ای و مسطح مطالعه کرده‌اند. آذرافزا و همکاران (Azarafza et al., 2020b)، همچنین در مطالعه دیگری، شیب سنگی ناپیوسته واقع در فاز ششم مجتمع گاز پارس جنوبی را بر اساس الگوریتم KGM (روش گروه کلیدی) مورد بررسی قرار داده و نتایج بدست آمده از مدل را با نرم افزار UDEC مقایسه کرده‌اند. سرفراز و امینی (Sarfraz and Amini, 2020)، گسیختگی واژگونی در شیب‌های سنگی را با استفاده از UDEC و Phase2، مدلسازی کرده‌اند. مقایسه بین دو مدل سازی عددی نشان داد که نرم افزار UDEC نتایج بهتری نسبت به نرم افزار Phase2 ارائه می‌دهد. منگ و دوستان (Meng et al., 2021)، عملکرد کابل‌های پیش تنیده برای تقویت دامنه‌های سنگی را با استفاده از نرم‌افزار (UDEC) مورد مطالعه قرار داده‌اند. ایشان در این بررسی واکنش دامنه‌ی سنگی مسلح شده و بدون مسلح در برابر نیروی دینامیکی و همچنین

تأثیر شیب و فاصله کابل بر روی نتایج پایداری را تحلیل کرده‌اند. نتایج بدست آمده نشان می‌دهد که کابل‌های پیش تنیده می‌تواند در کنترل تغییر شکل و بهبود ثبات تحت بارگذاری دینامیکی بسیار موثر باشد. موسوی و همکاران (۱۳۸۸) پایداری دیواره غربی معدن سرچشمه را با استفاده از روش المان مجزای سه بعدی مورد بررسی قرار داده‌اند. پارسایی (۱۳۸۹)، شرایط ژئومکانیکی و پایداری توده‌سنگ معدن مس سونگون را با استفاده از مدلسازی عددی تحلیل نموده‌اند. بالاگر (۱۳۹۱)، پایداری دامنه‌ی مشرف به ساختگاه کارخانه‌ی کانه‌آرایی معدن مس سونگون را تحت بارگذاری زلزله به کمک نرم افزار UDEC را مطالعه کرده‌اند. اظهري (۱۳۹۱)، پایداری بلوک‌های تکتونیکی معدن چغارت را تحت بارگذاری زلزله بررسی کرده‌اند. جوکار (۱۳۹۴)، تأثیر بارهای دینامیکی بر پایداری معدن سرب و روی انگوران را با استفاده از مدلسازی عددی مطالعه کرده‌اند. هونگ (Huang, 2014)، مقدار ضریب پایداری دامنه‌های در معدن روباز سینداک را مورد ارزیابی قرار داده‌اند. سورن و همکاران (Soren et al., 2014)، پایداری شیب معادن روباز را با استفاده از روش المان محدود بررسی کرده‌اند. لانا (Lana, 2014)، مکانیزم شکست در دامنه‌های معدن فیلیتی در برزیل را با استفاده از مدل‌سازی عددی مورد مطالعه و بررسی قرار داده‌اند. یعقوبی و همکاران (۱۳۹۵)، پایداری دامنه‌ها و امکان گسیختگی مجدد در دیواره معدن روباز انگوران را مورد ارزیابی قرار داده‌اند. آذرافزا و همکاران (۱۳۹۴)، پایداری دینامیکی دامنه‌های سنگی مجتمع گاز پارس جنوبی - عسلویه را بررسی کرده‌اند. نظری (۱۳۹۷)، پایداری شیب معدن سنگ آهن شمس‌آباد را مورد بررسی قرار داده‌اند. آذرافزا و همکاران (۱۳۹۷)، گسیختگی واژگونی بلوکی - خمشی پیش‌رونده را با استفاده از روش المان مجزای سه بعدی مدل‌سازی کرده‌اند. در این تحقیق، ضریب پایداری گسیختگی دامنه‌های سنگی معدن سونگون با استفاده از روش‌های تعادل حدی (به روش‌های بیشاپ و جانبو) و تحلیل عددی با مدلسازی SLIDE و UDEC بر اساس شتاب مبنای طرح حاصل از لرزه زایی گسله‌های منطقه مورد بررسی قرار گرفته است.

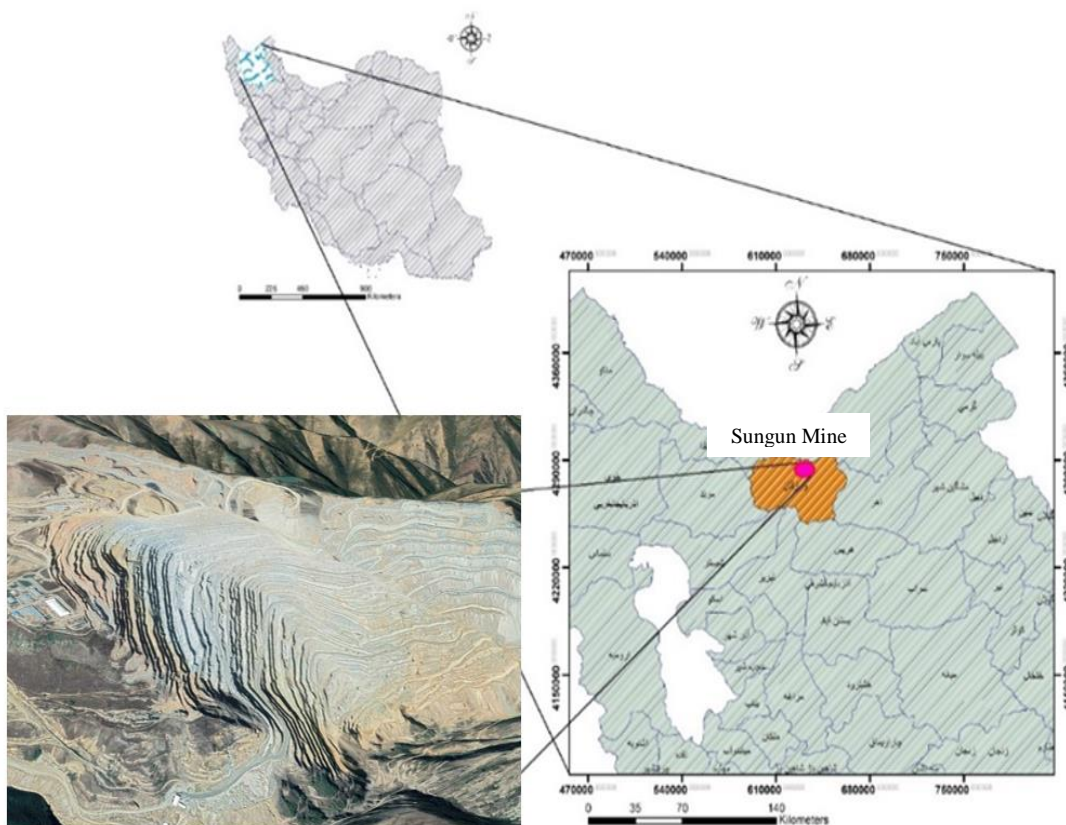
۲. مواد و روش‌ها

۱-۲. موقعیت و زمین‌شناسی معدن مورد مطالعه

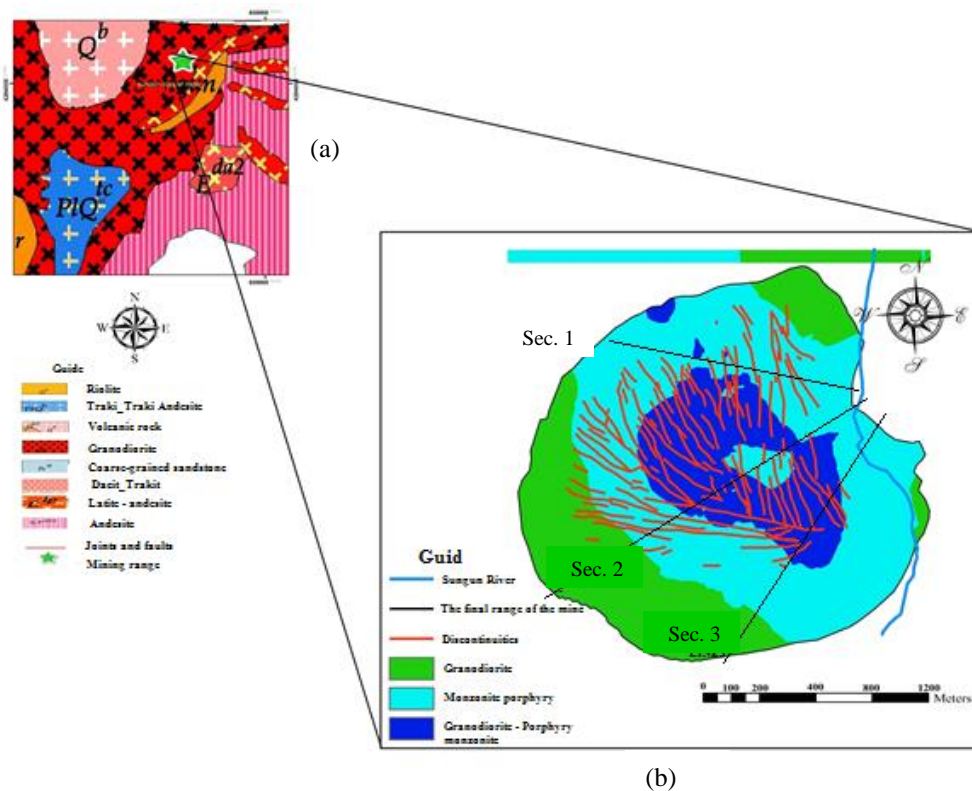
معدن سونگون در ۱۲۵ کیلومتری شمال‌شرق تبریز و ۴۵ کیلومتری شمال شهرستان ورزقان در منطقه‌ای کوهستانی و در موقعیت جغرافیایی ۴۶ درجه و ۴۳ دقیقه طولی و ۳۸ درجه و ۴۳ دقیقه عرضی واقع شده است. راه دسترسی اصلی به معدن از طریق جاده تبریز- ورزقان- سونگون می‌باشد. گستره‌ی معدن قسمتی از رشته کوه‌های قره‌داغ می‌باشد. شیب عمومی منطقه حدود ۶۰ درجه می‌باشد که مسبب اختلاف ارتفاع زیاد در محدوده‌ی معدن می‌باشد (شکل ۲).

از لحاظ زمین‌شناسی، محدوده مورد مطالعه در بخشی از زون البرز- آذربایجان قرار دارد. فعالیت ماگمایی بعد از ائوسن، نقش عمده‌ای در شکل‌دهی پدیده‌های زمین‌شناختی منطقه ایفاء نموده است. از شاخص‌ترین ویژگی زمین‌شناختی منطقه، نفوذ یک توده بزرگ به صورت سنگ‌های عمیق و نیمه عمیق آذرین

در سنگ‌های آتشفشانی- رسوبی کرتاسه و ائوسن می‌باشد که در شرق و جنوب روستای سونگون ناحیه وسیعی را در بر می‌گیرد. روند تقریبی این سنگ‌ها شرقی- غربی است و دارای ترکیب مونزونیتی می‌باشد. ناپیوستگی‌های منطقه را می‌توان به دو گروه عمده با روندهای تقریبی شرقی - غربی و تقریبی شمالی- جنوبی تقسیم نمود که با جهت تنش‌های تکتونیکی منطقه‌ای مطابقت دارند. با توجه به اطلاعات ژئومکانیکی مغزه- ها، میانگین امتیاز توده سنگ پایه برای کل محدوده کمتر از ۴۰ تا ۸۰ (رده متوسط تا خوب) بدست آمده است که کمترین آن مربوط به سنگ‌های آرژیلیکی دگرسان شده و بیشترین آن مربوط به زون دگرسانی سریسیتی (فیلیکی) می‌باشد (شرکت مهندسی مشاور زمین ژرفاب، ۱۳۸۸). در شکل ۲ نقشه زمین- شناسی محدوده معدن به همراه موقعیت مقاطع منتخب برای تحلیل‌های پایداری نشان داده شده است.



شکل ۲. موقعیت معدن سونگون



شکل ۳. نقشه زمین شناسی معدن سونگون (a) اقتباس از نقشه ۱:۱۰۰۰۰۰ چهارگوش ورزقان (سازمان زمین‌شناسی کشور) ارائه شده توسط شرکت مهندسی مشاور زمین ژرفاب، ۱۳۸۸، به همراه موقعیت مقاطع منتخب برای انجام تحلیل پایداری

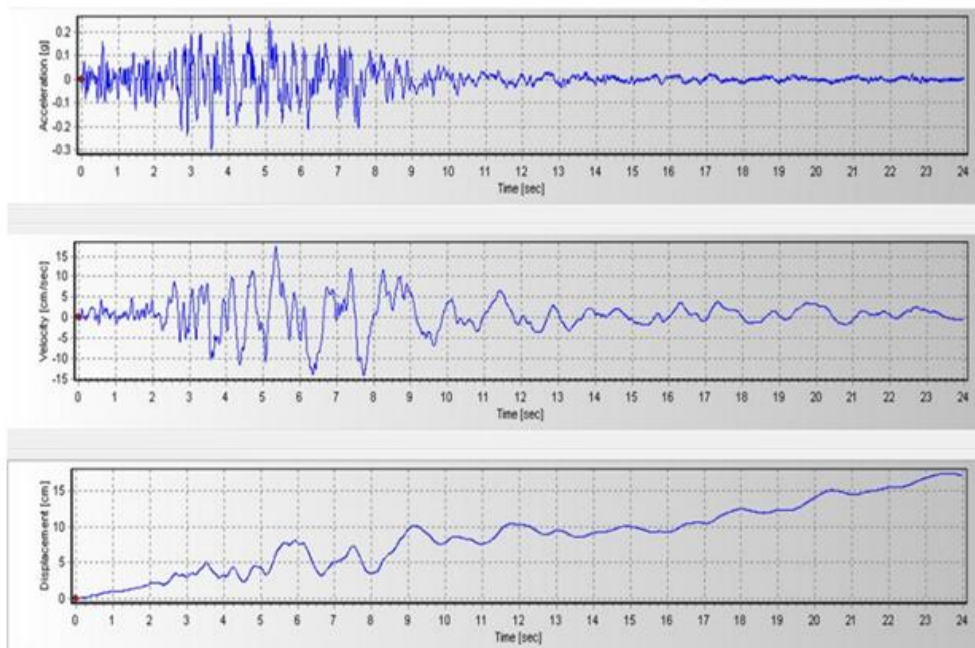
سونگون شده است. توده نفوذی و نیروهای فشارشی همزمان منجر به ایجاد الگوی درزه‌ها و دایک‌ها در منطقه شده است. یکی از پارامترهای اساسی در مهندسی زلزله، تعیین بزرگترین زلزله‌ای است که انتظار وقوع آن در محدوده مورد مطالعه و طی یک دوره‌ای زمانی مشخص وجود دارد. بر اساس آخرین نقشه پهنه‌بندی خطر زلزله، شهرستان اهر و ورزقان جزو مناطق با خطر نسبی زیاد قرار می‌گیرد که شتاب مبنای طرح برابر $0.35g$ می‌باشد. بطور کلی از دیدگاه نئوتکتونیک، چندین گسل جوان و لرزه‌زا گسترده‌ی طرح را در بر می‌گیرند که مهمترین آنها، گسل موسی کندی با طول ۲۶ کیلومتر در فاصله حدود ۳ کیلومتری، گسل محمودآباد با طول ۶۳ کیلومتر در فاصله ۱۰ کیلومتری و گسل قلعه جوق با طول ۳۳ کیلومتر در فاصله ۱۱ کیلومتری می‌باشند. این گسل‌ها به ترتیب توان ایجاد زمین‌لرزه‌هایی با بزرگای $6/4$ ، $6/8$ و $6/5$ در مقیاس ریشتر را دارند. در صورت فعالیت، گسل موسی کندی بیشترین

۲-۲. لرزه‌خیزی منطقه و شتاب مبنای طرح

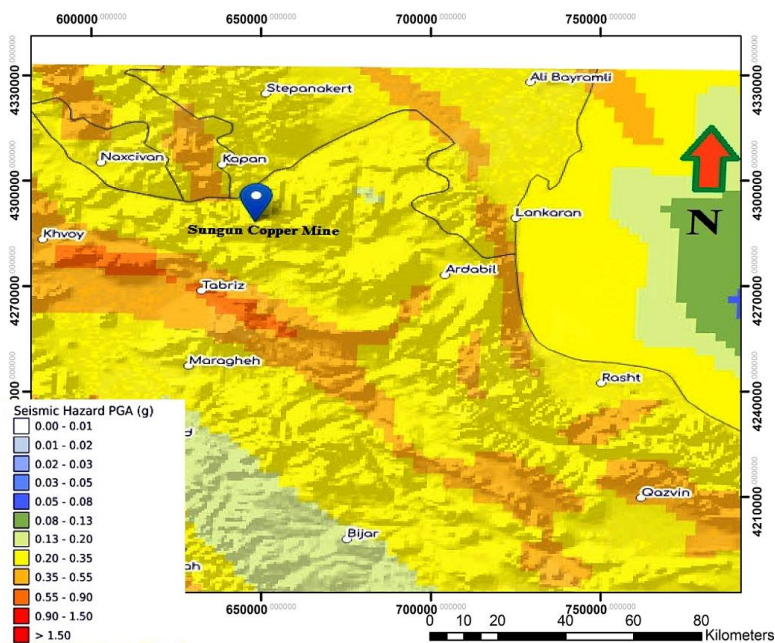
گسترده‌ی مورد مطالعه در زون زمین‌ساخت - رسوبی آذربایجان قرار دارد. گسل‌های منطقه عمدتاً ساز و کار فشاری و بعضاً دارای مؤلفه امتدادلغز هستند و از دیدگاه لرزه زمین‌ساختی اهمیت زیادی دارند. این گستره، از نظر ساختمانی در بخش غربی فلات بالا آمده ولکانیکی مرکزی در چهار گوش اهر واقع شده است. این فلات بوسیله حوزة چین‌خورده قره‌داغ در شمال و حوضه فرو رفته ارسباران در جنوب محدود می‌شود. در واقع توده‌های نفوذی با ترکیب حد واسط تا اسید منطقه سونگون، ادامه غربی گرانیته‌ها و گرانودیوریت‌های شیورداغ است که در یک امتداد خطی تقریباً شرقی - غربی (گسل وناباد) بالا آمده‌اند. قدیمی‌ترین واحد در منطقه سونگون، آهک‌های کرتاسه بالایی و ماسه‌سنگ‌های ائوسن میانی و ولکانیک‌ها می‌باشند که در طی فاز کوهزایی آلپ چین خورده‌اند. ادامه فازهای آلپی در الیگوسن منجر به ایجاد سنگ‌های نفوذی و ولکانیک در منطقه

زمین لرزه را نشان می‌دهد. به دلیل اینکه اعمال کل زمان زمین-لرزه در مدلسازی زمان‌بر است، بنابراین مدت زمانی (معمولاً سه ثانیه) را که بیشترین شتاب زمانی را در بر می‌گیرد. به مدل اعمال می‌شود. در این مطالعه شتاب مبنای طرح در دو حالت $0.35g$ و $0.42g$ و با توجه به مدت زمان بیشتر زمین‌لرزه، مدت پنج ثانیه در نظر گرفته شده است.

تأثیر را بر محدوده‌ی معدن خواهد داشت که برای شرایط سنگی حداکثر شتاب افقی برابر $0.42g$ ایجاد خواهد کرد (شرکت مهندسی مشاور زمین ژرفاب، ۱۳۸۸). در شکل‌های (۴ و ۵) رکوردهای شتاب، سرعت و جابجایی زلزله مورخ ۱۳۹۱ اهر-ورزقان با بزرگای $6/1$ ریشتر نشان داده شده است که وقوع حداکثر شتاب زمین برابر $0.3g$ در آن



شکل ۴. نمودارهای شتاب، سرعت و جابجایی زلزله مورخ ۱۳۹۱ اهر-ورزقان



شکل ۵. موقعیت معدن مس سونگون در نقشه پهنه‌بندی خطر زلزله

۳-۲. اصول تحلیل پایداری دینامیکی

هر مساله‌ی ژئومکانیکی، بر اساس روش‌های تحلیل و طراحی، دارای یک سری فرآیند است که باید متناسب با روش تحلیل بصورت گام به گام طی شود. بنابراین برای مدلسازی مقاطع تحلیل مراحل زیر انجام گردید.

الف. انتخاب هندسه مدل: بدین منظور سه مقطع در محدوده معدن انتخاب گردید که مقطع ۱ در قسمت شمالی معدن و در راستای شمال غربی - جنوب شرقی، مقطع ۲ در قسمت میانی معدن و در راستای جنوب غربی - شمال شرقی و مقطع ۳ در قسمت جنوبی معدن در راستای جنوب غربی - شمال شرقی قرار دارند. موقعیت این مقاطع بگونه‌ای انتخاب شده است که عمود بر راستای دامنه باشند و تمامی ساختارهای مختلف زمین‌شناسی را در برگیرند. موقعیت این مقاطع در شکل ۲ نشان داده شده است.

ب. ابعاد شبکه بندی نقش مهمی را در تحلیل‌های دینامیکی ایفا می‌کند، بنابراین ضروری است تا اندازه المان‌ها جهت انتقال صحیح موج زلزله، مورد بررسی قرار گیرد تا از اعوجاج موج زلزله در مدل جلوگیری شود. چرا که بزرگتر شدن ابعاد المان‌ها، باعث کاهش تعداد گره‌ها و در نتیجه کاهش دقت می‌شود. همچنین با کاهش ابعاد المان‌ها، زمان محاسبات افزایش یافته و در نتیجه باعث مشکلات سخت افزاری می‌گردد. لذا با توجه به مؤثر بودن ابعاد شبکه در تحلیل دینامیکی می‌بایستی ابعاد شبکه با از رابطه (۱) تعیین گردد.

$$\Delta L = \lambda/8 \quad (1)$$

در این رابطه ΔL ابعاد شبکه و λ طول موج می‌باشد. به منظور جلوگیری از اعوجاج موج زمین‌لرزه بایستی بزرگترین بعد المان کوچکتر از ۰/۱ تا ۱/۸ طول موج بزرگترین فرکانس در موج زمین‌لرزه باشد.

ج. تعریف ویژگی‌های فیزیکی و مکانیکی توده تشکیل دهنده و اعمال آن بر مدل هندسی می‌باشد.

د. هر سیستم دینامیکی دارای میرایی داخلی است. میرایی در نظر گرفته شده برای سیستم باید متناسب با جنس مواد و دامنه فرکانس ورودی باشد و بتواند شرایط میرایی واقعی در طبیعت

را شبیه سازی کند. از آنجای که میرایی بحرانی برای سنگ‌ها بین ۱ تا ۵ درصد است و چون این میرایی مستقل از فرکانس طبیعی یا غالب است، حق انتخاب بیشتری را به محقق می‌دهد و پاسخ سیستم را کمتر تحت تأثیر قرار می‌دهد. میرایی با استفاده از رابطه (۲) قابل محاسبه می‌باشد.

$$C = aM + bK \quad (2)$$

که در آنها a ضریب میرایی جرم و b ضریب میرایی سختی می‌باشد. با توجه به اینکه برابر شدن فرکانس سازه با فرکانس موج ورودی باعث افزایش خسارت می‌شود بنابراین با استفاده از آنالیز مودال فرکانس طبیعی برآورد شده و در تحلیل مورد استفاده قرار می‌گیرد. در تحلیل دینامیکی مورد نظر از معیار شکست موهر- کولمب که معیاری الاستوپلاستیک است استفاده شده است و در قسمت پلاستیک این معیار، میرایی مستتر می‌باشد.

بدلیل تفاوت ماهیت تحلیل دینامیکی و نیاز به میرا شدن انرژی دینامیکی در سیستم، مرزهای بکار رفته در مدل استاتیکی باید تغییر کند. نوع مرز استفاده شده در سیستم برای تحلیل دینامیکی در نرم‌افزار UDEC از نوع مرزهای آزاد و آرام در طرفین و آرام در پایین مدل می‌باشد که مرز آرام برای جذب انرژی و جلوگیری از انعکاس موج در مرزها بکار می‌رود. وجود مرز آرام در پایین مدل باعث می‌شود که اعمال بار زلزله به صورت تاریخچه شتاب و یا سرعت امکان پذیر نباشد. در نتیجه، با استفاده از روابط (۳ و ۴) داده‌های شتاب - زمان به داده‌های تنش - زمان تبدیل شوند.

$$\sigma_s = 2(\rho c_s)v_s \quad (3)$$

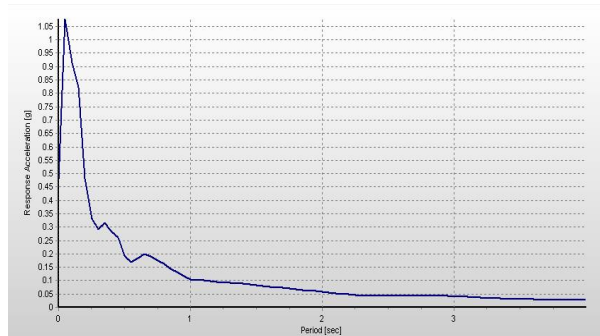
$$\sigma_n = 2(\rho c_p)v_n \quad (4)$$

در این رابطه σ_n تنش نرمال، σ_s تنش برشی برحسب پاسکال، p جرم مخصوص بر حسب کیلوگرم بر متر مکعب، c_p و c_s سرعت انتشار موج فشاری و برشی و v_n و v_s سرعت‌های نرمال و مماسی ذرات بر حسب متر بر ثانیه می‌باشد. برای اصلاح داده‌ها باید مطابق آیین نامه ASCE ابتدا کلیه شتاب نگاشت‌ها به حداکثر مقدار خود مقیاس شوند. بدین معنی که حداکثر شتاب همه آنها برابر گردد، در گام بعدی طیف پاسخ

دارد بطوری که با افزایش ارتفاع و مقدار شیب، میزان تنش برشی افزایش می‌یابد. گسیختگی زمانی رخ می‌دهد که مؤلفه نیروهای محرک بر نیروهای مقاوم غلبه کند. با توجه به شیب ناپیوستگی‌ها و دامنه‌های سنگی معدن مورد مطالعه و تأثیر دگرسانی در توده‌سنگ‌ها که شرایطی به شدت درزه‌دار با مقاومت پایینی را ایجاد نموده است علاوه بر گسیختگی‌های صفحه‌ای، گوه‌ای و واژگونی، شرایط بالقوه گسیختگی دایره‌ای نیز در دیواره‌های معدن وجود دارد. در این مطالعه تحلیل پایداری تعادل حدی با استفاده از روش بیشاپ و جانبو انجام گردید. در روش بیشاپ فرض بر این است که سطح لغزش دایره‌ای بوده و نیروهای جانبی افقی هستند. در روش جانبو سطح لغزش ممکن است به هر شکلی باشد و تصور بر این است که نیروهای جانبی افقی بوده و در تمامی قطعات برابر هستند. این تحلیل با استفاده از نرم افزار SLIDE و به روش آنالیز قطعه‌ای انجام می‌شود. بدین منظور ابتدا هندسه مقاطع عرضی موردنظر مدلسازی شده و خواص ژئومکانیکی و پارامترهای مقاومت برشی در مدل اعمال گردید. با توجه به وجود ناپیوستگی‌های فراوان در محل، چندین ترک کششی برای شبیه‌سازی با محیط واقعی در سطوح دامنه‌ها مدلسازی شده است. سطح آب زیرزمینی در بالاترین تراز ممکن و نیروی ناشی زلزله نیز مدنظر قرار گرفته است.

بر اساس شواهد موجود و مطالعات هیدروژئولوژی انجام شده، ضریب فشار آب منفذی در دیواره‌های معدن عموماً بین ۰/۱ تا ۰/۱۵ بار و در شرایط اشباع این نسبت حدود ۰/۵ بار در نظر گرفته شده است. شتاب زلزله محدوده به ترتیب بر اساس نقشه جهانی خطر زمین‌لرزه (۱۳۹۸) و حداکثر شتاب محتمل گسل-های گسترده طرح برابر ۰/۳۵ و ۰/۴۵ متر بر مجذور ثانیه (g) ۰/۳۵ و ۰/۴۵ (Ax) بدست آمده، که در مدلسازی اعمال شده است.

شتاب هر یک از زوج شتاب نگاشت‌های مقیاس شده با اعمال نسبت میرایی ۵ درصد تعیین می‌گردد (شکل ۶).



شکل ۶. طیف پاسخ زوج شتاب نگاشت‌های مقیاس شده در مرحله بعد طیف‌های پاسخ هر زوج شتاب نگاشت با استفاده از روش جذر مجموع مربعات با یکدیگر ترکیب شده و یک طیف ترکیبی واحد برای هر زوج ساخته می‌شود. به دلیل اینکه همه شتابنگاشت‌ها به مقدار حداکثر خود به g رسیده‌اند پس نقطه شروع همه آنها برابر با g می‌شود. سپس طیف‌های پاسخ ترکیبی سه زوج شتاب نگاشت، متوسط‌گیری شده و در محدوده زمان‌های تناوب، 0.2 T-1.5 T با طیف طرح استاندارد مقایسه می‌شود. ضریب مقیاس چنان تعیین می‌شود که مقادیر متوسط در هیچ حالت کمتر از ۰/۴ برابر مقدار نظیر آن در طیف استاندارد نباشد. در گام نهایی، ضریب مقیاس تعیین شده، باید در شتاب نگاشت‌های مقیاس شده در گام اول ضرب شده و در تحلیل دینامیکی مورد استفاده قرار گیرد.

۲-۴. تحلیل پایداری دامنه‌های سنگی به روش تعادل حدی روش تعادل حدی برای تحلیل پایداری دامنه‌های خاکی و سنگی در مطالعات ژئوتکنیکی مورد استفاده قرار می‌گیرد. در این روش، ضریب پایداری بر اساس نسبت مقاومت برشی سطوح لغزش به تنش برشی لازم برای گسیختگی تعیین می‌شود. ضریب پایداری به عوامل مختلفی بستگی دارد و مقدار آن با اعمال ضرایب تأثیر فشار منفذی و زلزله کاهش می‌یابد. ضریب پایداری با افزایش ارتفاع و شیب دامنه نسبت عکس

۵-۲. تحلیل پایداری دامنه‌های سنگی به روش عددی

در تحلیل پایداری، اولین قدم انتخاب هندسه مدل است. هندسه مدل باید دربرگیرنده محدوده مورد مطالعه و عوامل هندسی تأثیرگذار در رفتار محیط باشد. هندسه باید به اندازه‌ای گسترده باشد که بتواند تمام ساختارهای زمین‌شناسی در منطقه را در برگیرد. بدین منظور، هندسه مدل مقطع ۱، دارای ارتفاع حدود ۴۹۸ متر و گسترش طولی حدود ۱۰۰۰ متر، مقطع ۲ دارای ارتفاع حدود ۵۱۸ متر و گسترش طولی حدود ۹۹۰ متر و مقطع ۳ دارای ارتفاع حدود ۴۶۵ متر و گسترش طولی حدود ۸۰۰ متر منظور گردید. با توجه به عملیات درزه‌نگاری انجام شده در محدوده مورد مطالعه، مشخصات ناپیوستگی‌های دخیل در مقاطع تحلیلی در جدول ۱ و استریونت آنها به ترتیب در شکل (۷) نشان داده شده است.

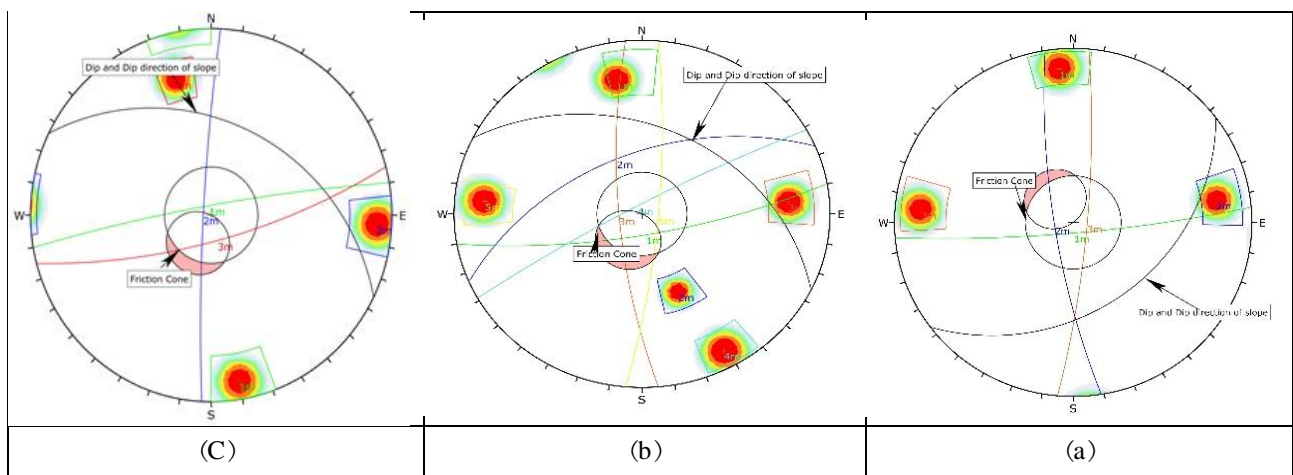
در مدل ساخته شده به منظور شبیه‌سازی شرایط مرزی با شرایط واقعی زمین، در جهت محور قائم مقدار بردار سرعت در جهت x و در جهت محور افقی مقدار بردار سرعت در جهت

γ برابر با صفر در نظر گرفته شده است. بدلیل تفاوت ماهیت تحلیل دینامیکی و نیاز به میرا شدن انرژی دینامیکی در سیستم، نوع مرز استفاده شده در این سیستم برای تحلیل دینامیکی از نوع مرزهای آزاد و آرام در طرفین و آرام در پایین مدل می‌باشد که مرز آرام برای جذب انرژی و جلوگیری از برگشت موج در مرزها بکار می‌رود. وجود مرز آرام در پایین مدل باعث می‌شود که اعمال بار زلزله به صورت تاریخچه شتاب و یا سرعت امکان پذیر نباشد. هندسه، نیمرخ زمین‌شناسی و ناپیوستگیها و شرایط مرزی مقاطع مدلسازی شده برای تحلیل مقاطع در شکل (۸)، نشان داده شده‌اند.

در این تحلیل از معیار موهر-کولمب استفاده شده است. پارامترهای فیزیکی و مکانیکی سنگ و ناپیوستگی‌ها به ترتیب در جداول (۲) و (۳) ارائه شده‌اند. پارامترهای مقاومت برشی با استفاده از معیار هوک-براون و با استفاده از نرم‌افزار Roclab تعیین شده‌اند.

جدول ۱. شیب و جهت شیب دامنه و دسته درزه‌های مقاطع تحلیل

Section No.	Dip/Dip Direction of Slope	Dip/Dip Direction of Benches	Spacing (me)	Aperture (mm)	Dip/Dip Directio of joint sets				
					JS1	JS2	JS3	JS4	JS4
1	37/143	67/143	1-1.5	0.9	83/175	78/361	81/095		
2	37/026	67/026	0.5-1	1.2	76/170	52/37	76/265	84/331	80/095
3	37/026	67/026	0.8-1.2	0	84/350	85/273	74/165		



شکل ۷. استریونت دسته درزه‌های اصلی محدوده مورد مطالعه، (a) مقطع ۱ (b) مقطع ۲ (c) مقطع ۳

جدول ۲. پارامترهای فیزیکی و مکانیکی سنگ

parameter	Density (kN/m ³)	E (MPa)	Poisson ratio	C (MPa)	Φ(°)	UCS (MPa)	GSI
Monzonite	21	2.3e4	0.16	3	39	170	57
Granodiorite	22	2.5e4	0.18	3.5	42	190	60

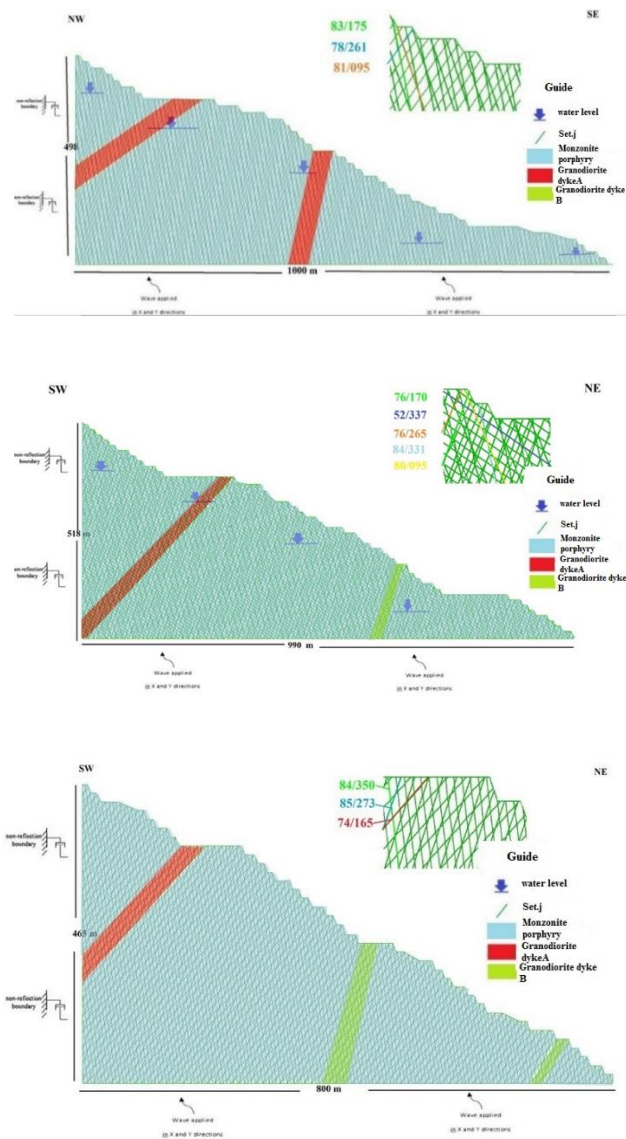
جدول ۳. پارامترهای ژئومکانیکی ناپیوستگی‌ها

Parameter	Normal Stiffness	Shear Stiffness	Friction Angle	Cohesion of joints
Unit	GPa/m	GPa/m	Degree	MPa
Section 1	23	2.3	30	0.21
Section 2	23	2.3	27	0.18
Section 3	23	2.3	29	0.13

۳. نتایج و بحث

۳-۱. نتایج تحلیل تعادل حدی

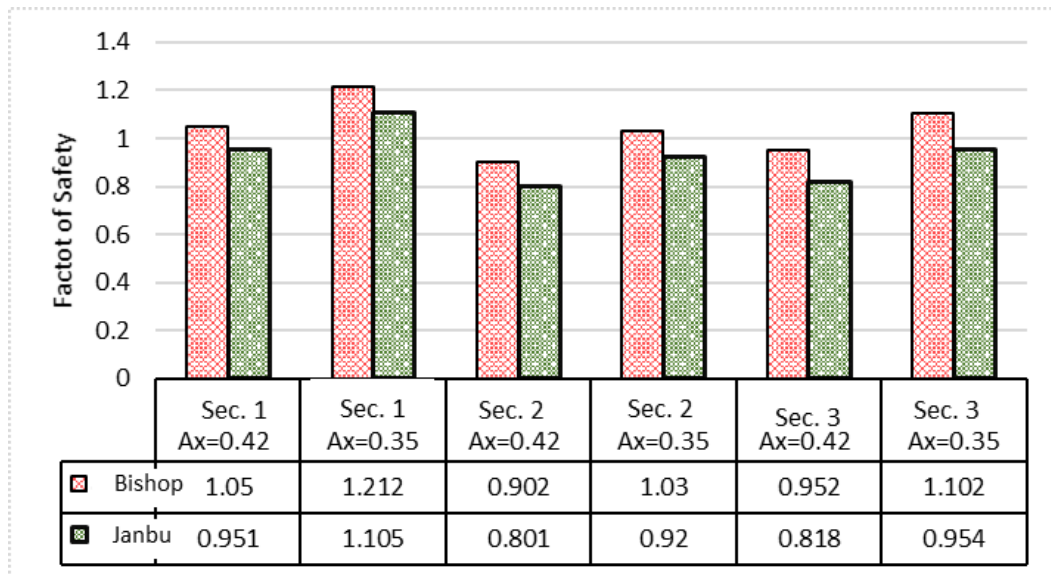
نتایج تحلیل تعادل حدی نشان می‌دهد که ضریب پایداری در برابر گسیختگی در حالت استاتیکی بیشتر از ۱/۴ می‌باشد. همانطور که در شکل ۹ نشان داده شده است در حالت اعمال بار دینامیکی ناشی از زلزله در حالت اعمال شتاب مبنای برابر $g/0.35$ ضریب پایداری در هر سه مقطع در محدوده بین $g/0.92$ تا $g/1.2$ قرار دارد. در این حالت حداقل ضریب پایداری برابر $g/0.92$ و $g/0.95$ به ترتیب برای مقاطع ۲ و ۳ و به روش جانبو بدست آمده است. در صورت اعمال شتاب مبنای برابر $g/0.42$ ضریب پایداری در هر دو حالت بیشاپ و جانبو در تمامی مقاطع بین $g/0.8$ تا $g/1.05$ قرار می‌گیرد و تقریباً در تمامی محدوده معدن شرایط گسیختگی حاکم می‌گردد. نتایج نشان می‌دهد ضرایب پایداری بدست آمده در روش بیشاپ به مقداری جزئی از روش جانبو بیشتر است.



شکل ۸. هندسه، ابعاد، نیمرخ زمین‌شناسی، ناپیوستگی‌ها و شرایط مرزی مقاطع مدل‌سازی شده به ترتیب از بالا به پایین شامل مقطع ۱، مقطع ۲ و مقطع ۳

۳-۱. نتایج تحلیل تعادل عددی

به منظور تحلیل عددی با اعمال بار دینامیکی، ابتدا می‌بایست مدل از نظر استاتیکی حل شده و به تعادل برسد. سپس با اعمال بار دینامیکی، شرایط تعادلی مدل را تغییر یافته تا دوباره در شرایط دینامیکی تحلیل شده متعادل گردد. نتایج حاصل از تحلیل عددی نشان می‌دهد که با اعمال بار دینامیکی شرایط ناپایداری حاکم می‌شود.



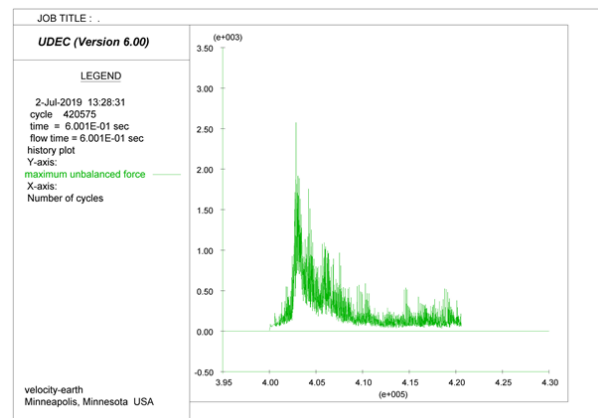
شکل ۹. ضرایب پایداری دامنه‌های سنگی در حالت دینامیکی با شتاب‌های مبنای طرح ۰/۳۵g و ۰/۴۲g

آمده است همانطور که مشاهده می‌شود در حالت استاتیکی پایدار بوده و تنها بصورت جزئی در پله‌ها شاهد ناپایداری هستیم (شکل ۱۱).



شکل ۱۱. نمایی از وضعیت کنونی در محدوده مقطع ۱ نتایج بررسی مقطع ۲ نشان داد در قسمت میانی - غربی معدن، حداکثر جابجایی به ترتیب بعد از اعمال شتاب‌های مورد نظر در تک پله‌ها به مقدار ۱۸ و ۷۳ سانتی‌متر و در مناطق سطحی دامنه بطور متوسط در حدود ۱۵ و ۶۰ سانتی‌متر می‌باشد. در قسمت میانی - شرقی معدن حداکثر جابجایی در تک پله‌ها به ترتیب به مقدار ۱۶ و ۵۰ سانتی‌متر و در مناطق سطحی دامنه به

تغییرات نیروهای نامتعادل کننده مقطع ۱ (به عنوان مثال) در شکل ۱۰ نشان داده شده است. همانطور که مشاهده می‌شود منحنی نیروی‌های نامتعادل کننده در ابتدا به صفر میل کرده سپس در یک بازه زمانی معینی به تعادل رسیده‌اند.



شکل ۱۰. منحنی تغییرات نیروهای نامتعادل کننده - مقطع ۱ نتایج بدست آمده از تحلیل مقطع ۱ نشان می‌دهد در قسمت شمالی غربی معدن، حداکثر جابجایی بعد از اعمال شتاب‌های مبنای انتخاب شده به ترتیب برابر ۰/۳۵g و ۰/۴۲g در تک پله‌ها به مقدار ۱۲ و ۳۵ سانتی‌متر و در مناطق سطحی دامنه بطور متوسط حدود ۹ و ۳۰ سانتی‌متر می‌باشد و در قسمت شمالی - شرقی معدن، حداکثر جابجایی در تک پله‌ها برابر ۸ و ۲۸ سانتی‌متر و در مناطق سطحی حدود ۷ و ۲۵ سانتی‌متر بدست

شکل ۱۳ مشاهده می‌شود در قسمت جنوبی معدن، به نسبت به قسمت شمالی معدن، پتانسیل گسیختگی بیشتر می‌باشد.



شکل ۱۳. نمایی از وضعیت فعلی محدوده جنوبی معدن

نمودارهای جابجایی مقاطع نشان می‌دهد بیشترین مقدار جابجایی در حالت دینامیکی در راستای افقی و قائم در نقاط سطحی دامنه روی خواهد بود. در شکل (۱۴) نمودار جابجایی مقطع میانی - شرقی معدن در زمان‌های متفاوت و در راستای افقی و قائم به عنوان نمونه نشان داده شده است. نتایج حاصل از تحلیل دینامیکی با اعمال بار زلزله با استفاده از نرم‌افزار UDEC برای مقاطع تحلیل شده بطور خلاصه در جدول (۴) ارائه شده است. تغییرات جابجایی کلی پله‌ها و دامنه‌های سنگی در مقاطع تحلیل شده در نمودار شکل (۱۵) نشان داده شده است.

ترتیب برابر ۱۵ و ۴۵ سانتی‌متر خواهد بود. در شکل ۱۲ تصویری از وضعیت درزه‌نگاری در محدوده میانی و غربی معدن نشان داده شده است که حاکی از وجود ناپیوستگی‌های غالب پرشیب است که سبب ناپایداری دامنه در شرایط دینامیکی می‌شود (شکل ۱۲).



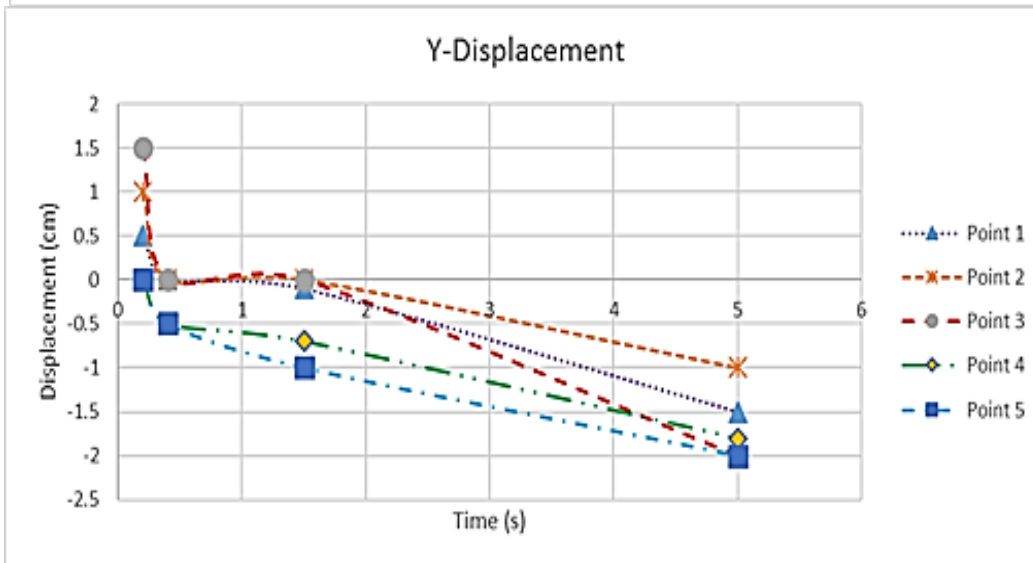
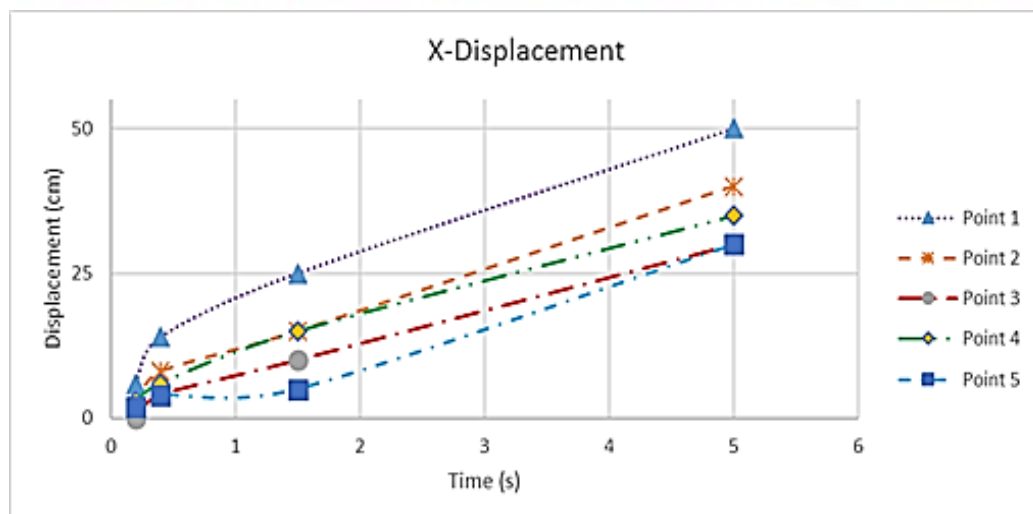
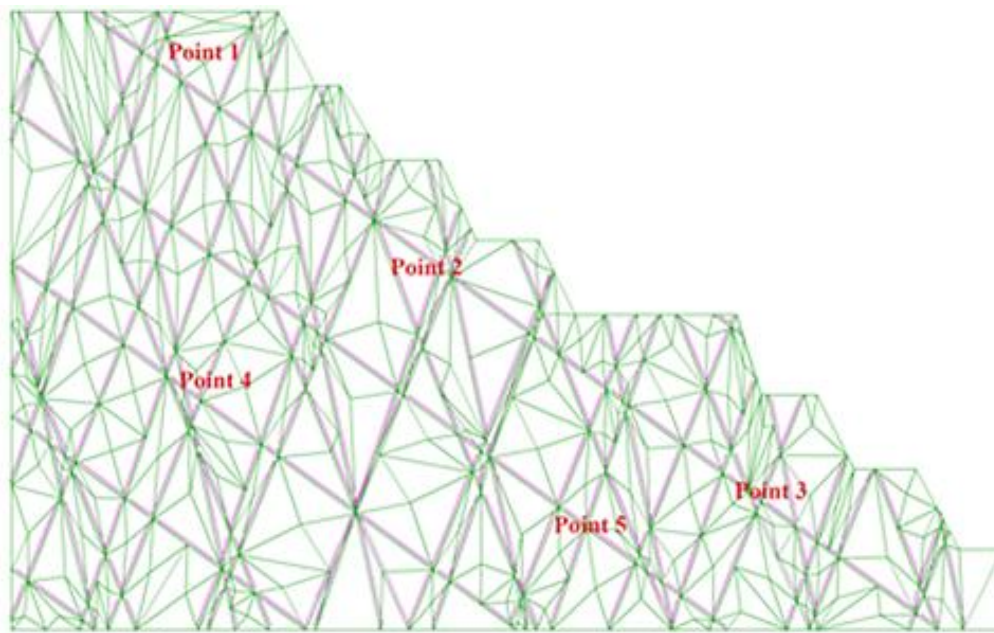
شکل ۱۲. تصویری از دسته درزه‌ها و پرشدگی‌های فواصل

درزه‌ها در محدوده میانی و غربی معدن

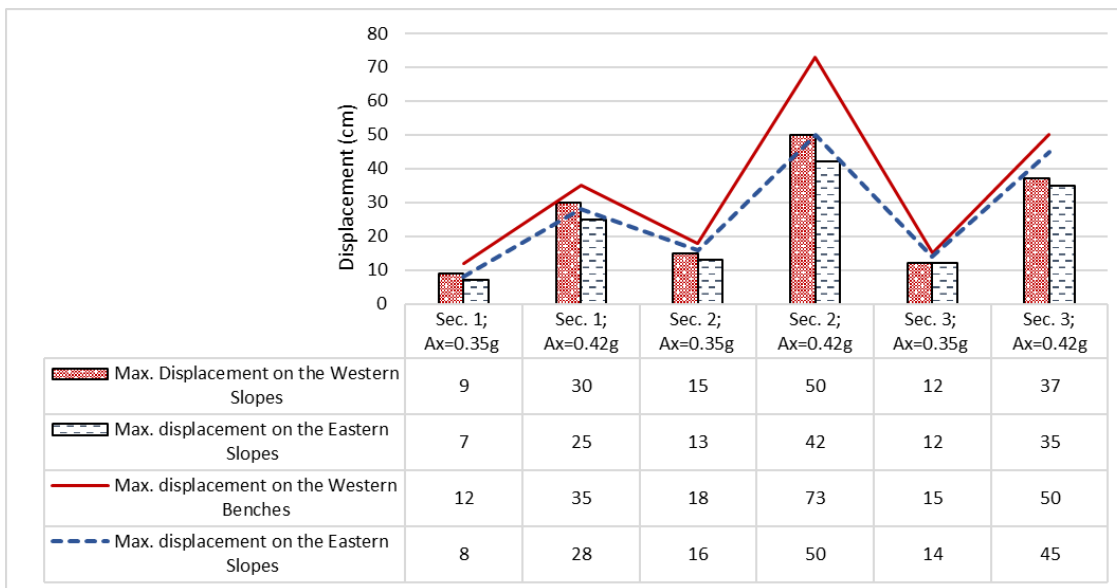
نتایج تحلیل عددی مقطع ۳ نشان می‌دهد که در قسمت جنوب - غربی معدن به ترتیب بعد از اعمال شتاب‌های مبنای موردنظر، حداکثر جابجایی در تک پله‌ها به مقدار ۱۵ و ۵۰ سانتی‌متر و در مناطق سطحی دامنه بطور متوسط در حدود ۱۲ و ۴۰ سانتی - متر می‌باشد. در قسمت جنوب شرقی معدن، حداکثر جابجایی‌ها در تک پله‌ها به مقدار ۱۴ و ۴۵ سانتی‌متر و در مناطق سطحی دامنه حدود ۱۳ و ۳۵ سانتی‌متر بدست می‌آید. همانطور که در

جدول ۴. خلاصه نتایج تحلیل عددی دامنه‌ها و پله‌های سنگی مورد مطالعه

Max. displacement (cm)	DBA (g)	NW	NE	MW	ME	SW	SE
Benches	0.35	12	8	18	16	15	14
	0.42	35	28	73	50	50	45
Slopes	0.35	9	7	15	15	12	13
	0.42	30	25	60	45	40	35



شکل ۱۴. تاریخچه جابجایی کلی مقطع میانی شرقی معدن با شتاب مبنای $0.42g$ در جهات محور X و Y در نقاط تعریف شده



شکل ۱۵. تغییرات جابجایی حداکثر در مقاطع مورد بررسی محدوده معدن سونگون

۴. نتیجه گیری

در این مقاله، برای بررسی پایداری دامنه‌های سنگی در محدوده معدن سونگون از تلفیق روشهای تحلیل تعادل حدی با استفاده از نرم افزار SLIDE و تحلیل عددی با استفاده از نرم افزار UDEC استفاده شده است. برای این منظور ابتدا اطلاعات مورد نیاز شامل زمین شناسی، درزه نگاری، لرزه خیزی گستردهی طرح، هیدروژئولوژیکی و نتایج آزمایش‌های آزمایشگاهی جمع آوری گردید. سپس سه مقطع مختلف در محدوده‌ی شمالی، میانی و جنوبی معدن در راستای عمود بر دامنه‌ها و بگونه‌ای انتخاب شدند که تمامی ساختارهای زمین شناسی را در بر داشته باشند.

برای انجام تحلیل دینامیکی با اعمال شتاب مبنای طرح بر اساس پهنه‌بندی خطر زلزله و گسل‌های موجود در گستره‌ی طرح برابر ۰/۳۵g و ۰/۴۲g تعیین گردید. نتایج نشان داد که ضریب پایداری در برابر وقوع گسیختگی در شرایط استاتیکی بیشتر از ۱/۴ و در شرایط دینامیکی در صورتی که شتاب مبنای طرح ۰/۳۵g باشد در کلیه مناطق معدن بین ۰/۹۲ تا ۱/۲ می- باشد و بویژه در بیشتر پله‌های استخراج گسیختگی دامنه‌ای رخ

خواهد داد و در صورتی که شتاب مبنای طرح ۰/۴۲ باشد ضریب پایداری در بیشتر محدوده معدن کمتر از یک خواهد بود و سطح وسیعی از دامنه‌های سنگی معدن دچار گسیختگی خواهند شد. نتایج تحلیل عددی نشان داد بطور کلی جابجایی‌ها در نیمه غربی معدن (پایین دست دامنه‌ها) به مقدار تقریبی ۸ سانتی‌متر بیشتر از نیمه شرقی معدن می‌باشد. بیشترین مقدار جابجایی در حالت دینامیکی با شتاب ۰/۴۲ g در مقطع ۲ (قسمت میانی معدن) با بیش از ۴۰ سانتی‌متر خواهد بود. مقدار جابجایی‌های در پله‌های استخراج بیشتر از دامنه‌های سنگی می‌باشد که این مقدار اختلاف به بیش از ۲۰ سانتی‌متر هم می- رسد. با توجه به اینکه شتابهای موردنظر در تحلیل‌های صورت گرفته اثرات ناشی از انفجار و آتشفباری برای استخراج را هم پوشش می‌دهد از بررسی تأثیر انفجار در این مطالعه چشم پوشی شد.

۵. تشکر و قدردانی

بدینوسیله از کمک‌های ارزنده آقای مهندس حبیب شمسی بویژه در جمع‌آوری داده‌های میدانی نهایت قدردانی و تشکر را می‌نمایم.

منابع

- آذرآفزا، م.، اصغری کلجاهی، ا.، مشرفی فر، م.، ۱۳۹۴. تحلیل پایداری دینامیکی دامنه‌های سنگی درزه‌دار تحت شرایط زمین‌لرزه مطالعه موردی: محدوده فلر گاز فاز ۷ مجتمع گاز پارس جنوبی- عسلویه. نشریه انجمن زمین شناسی مهندسی ایران، دوره ۸، شماره ۱، صفحه ۶۷ تا ۷۸.
- آذرآفزا، م.، قاضی فرد، ا.، اصغری کلجاهی، ا.، ۱۳۹۷. مدل‌سازی گسیختگی واژگونی بلوکی-خمش پیشرونده با استفاده از روش عددی المان مجزا، مطالعه موردی: منطقه ویژه پارس جنوبی. نشریه انجمن زمین شناسی مهندسی ایران، دوره ۱۰، شماره ۱، صفحه ۶۱ تا ۷۳.
- برزگری، ق.، فتحی، م.، ۱۳۹۷. پهنه‌بندی پتانسیل گسیختگی شیب‌های سنگی معدن مس سونگون بر اساس امتیاز توده‌ی سنگ (SMR) و تحلیل سلسله مراتبی (AHP). نشریه انجمن زمین شناسی مهندسی ایران، دوره ۱۱، شماره ۲، صفحه ۹۹ تا ۱۱۳.
- بالاگر، و.، ۱۳۹۱. تحلیل پایداری شیروانی مشرف به ساختگاه کارخانه کانه آرائی معدن مس سونگون تحت بارگذاری زلزله به کمک نرم افزار UDEC2D، پایان نامه کارشناسی ارشد، دانشگاه بین المللی امام خمینی (ره).
- پارسایی، م.، ۱۳۸۹. تحلیل شرایط ژئومکانیکی و پایداری توده سنگ معدن مس سونگون با مدل‌سازی عددی، فصلنامه علمی پژوهشی زمین و منابع واحد لاهیجان، صفحه ۳۱ تا ۴۲.
- جوکار، ا.، ۱۳۹۴. تحلیل و مدل‌سازی عددی تأثیر بارهای دینامیکی بر پایداری معدن سرب و روی انگوران، پایان نامه کارشناسی ارشد، دانشگاه زنجان، دانشکده مهندسی معدن.
- شرکت مهندسین مشاور زمین ژرفاب، ۱۳۸۸. مطالعه میزان ریسک پایداری و سیستم رفتار نگاری دیواره مشرف به نوار نقاله و سنگ شکن، گزارش تحلیل پایداری، ارائه سیستم پایدارسازی و طراحی سیستم پایش، شرکت ملی صنایع مس ایران مجتمع مس سونگون.
- موسوی، م.، یاراحمدی بافقی، ع.، بخشی، ح.، ۱۳۸۸. تحلیل پایداری دیواره غربی معدن مس سرچشمه با استفاده از روش المان مجزای سه بعدی، نشریه دانشکده فنی، صفحه ۳۱۱ تا ۳۲۳.
- نظری، ا.، ۱۳۹۷. تحلیل پایداری شیب معدن سنگ‌آهن شمس‌آباد، پایان نامه کارشناسی ارشد، دانشگاه صنعتی شاهرود.
- یعقوبی، ا.، شمس‌الدین سعید، م.، معارف‌وند، پ.، ۱۳۹۵. تحلیل پایداری و ارزیابی ریزش سنگین مجدد در دیواره معدن روباز انگوران، نشریه علمی-پژوهشی روش‌های تحلیلی و عددی در مهندسی معدن، صفحه ۳۳ تا ۴۵.
- Azarafza, M., Akgün, H., Feizi-Derakhshi, M.R., Azarafza, M., Rahnamarad, J. and Derakhshani, R., 2020a. Discontinuous rock slope stability analysis under blocky structural sliding by fuzzy key-block analysis method. *Heliyon*, 6(5): 03907.
- Azarafza, M., Akgün, H., Ghazifard, A. and Asghari-Kaljahi, E., 2020b. Key-block based analytical stability method for discontinuous rock slope subjected to toppling failure. *Computers and Geotechnics*, 124: p.103620.
- Azhari, A., Yarahmadi, A., and Faramarzi, L., 2012. Dynamic analysis of tectonic blocks 1 and 2 of Choghart Open-Pit mines under earthquake. in 9th International Congress on Civil Engineering, Isfahan, Iran.
- Bakhtiyari, E., Almasi, A., Cheshomi, A., & Hassanpour, J., 2017. Determination of shear strength parameters of rock mass using back analysis methods and comparison of results with empirical methods. *European Journal of Engineering Research and Science*, 2(11): 35-42.
- Bednarczyk, Z., 2017. Slope stability analysis for the design of a new lignite open-pit mine. *Procedia engineering*, 191: 51-58.
- Huang, Y. H., 2014. Slope stability analysis by the limit equilibrium method: Fundamentals and methods. American Society of Civil Engineers.
- Lana, M.S., 2014. Numerical modeling of failure mechanisms in phyllite mine slopes in Brazil. *International Journal of Mining Science and Technology*, 24(6): 777-782.
- Meng, Z., Hou, Y., Guo, L., Wang, F., Liu, K., Qi, G. and Ma, J., 2021. Discrete element simulation analysis of the bending and toppling failure mechanisms of high rock slopes. *Geofluids*, 2012 (84):1-12.
- Pankow, K. L., Moore, J. R., Hale, J. M., Koper, K. D., Kubacki, T., Whidden, K. M., & McCarter, M. K. 2014. Massive landslide at Utah copper mine generates wealth of geophysical data. *GSA Today*, 24(1): 4-9.

-
- Qi, K., Tan, Z. and Li, W., 2017. Stability analysis and optimum reinforcement design for an intense weathered rock slope. *Earth and Environmental Science*, 64(1): p. 012014
- Qian, Z. G., Li, A. J., Lyamin, A. V., & Wang, C. C., 2017. Parametric studies of disturbed rock slope stability based on finite element limit analysis methods. *Computers and Geotechnics*, 81: 155-166.
- Raghuvanshi, T. K., 2017. Plane failure in rock slopes—A review on stability analysis techniques. *Journal of King Saud University-Science*, 31(1): 101-109.
- Sarfaraz, H. and Amini, M., 2020. Numerical simulation of slide-toe-toppling failure using distinct element method and finite element method. *Geotechnical and Geological Engineering*, 38(2): 2199-2212.
- Shamsoddin, S. M., Maarefvand, P., & Yaaghubi, E., 2016. Optimizing and slope determination of final wall for Maiduk Mine with consideration of destabilizer factors, *International Journal of Mining Science and Technology*. 26(3): 501-509.
- Soren, K., Budi, G., & Sen, P., 2014. Stability analysis of open pit slope by finite difference method. *International Journal of Research in Engineering and Technology*, 3(5): 326-334.
- Zheng, Y., Wang, R., Chen, C., Sun, C., Ren, Z. and Zhang, W., 2021. Dynamic analysis of anti-dip bedding rock slopes reinforced by pre-stressed cables using discrete element method. *Engineering Analysis with Boundary Elements*, 130: 79-93.