

بررسی پارامترهای مؤثر در تخریب پذیری توده سنگ در معادن تخریب بلوکی با استفاده از سیستم مهندسی سنگ

رامین رفیعی^۱؛ محمد عطائی^{۲*}؛ رضاخالو کاکائی^۳؛ سید محمد اسماعیل جلالی^۴؛ فرهنگ سرشکی^۵

- ۱- استادیار دانشکده مهندسی معدن، نفت و ژئوفیزیک دانشگاه صنعتی شاهرود، raminlamezi@gmail.com
- ۲- استاد دانشکده مهندسی معدن، نفت و ژئوفیزیک دانشگاه صنعتی شاهرود، ataei@shahroodut.ac.ir
- ۳- استاد دانشکده مهندسی معدن، نفت و ژئوفیزیک دانشگاه صنعتی شاهرود، r_kakaie@shahroodut.ac.ir
- ۴- دانشیار دانشکده مهندسی معدن، نفت و ژئوفیزیک دانشگاه صنعتی شاهرود، jalalisme@gmail.com
- ۵- دانشیار دانشکده مهندسی معدن، نفت و ژئوفیزیک دانشگاه صنعتی شاهرود، f.sereshki@gmail.com

(دریافت ۲ اسفند ۱۳۹۲، پذیرش ۱۶ دی ۱۳۹۴)

چکیده

پیش بینی واقعی از میزان قابلیت تخریب توده سنگ، یکی از عوامل کلیدی در موفقیت روش تخریب بلوکی است. با توجه به علاقه اخیر صنعت معدن کاری در استفاده از روش های تخریبی در توده سنگ هایی با مقاومت زیاد، اهمیت پیش بینی قابل اطمینان از تخریب پذیری توده سنگ به طور فزاینده ای بیشتر خواهد شد. در صورتی که قابلیت تخریب کان سنگ به درستی بررسی و ارزیابی نشود، در نتیجه اقداماتی با هزینه های بالا و وقت گیر برای شروع یا حفظ تخریب نیاز است. یک تخمین قابل اطمینان از قابلیت تخریب توده سنگ احتیاج به شناسایی فاکتورهای مؤثر در شروع و گسترش تخریب توده سنگ دارد. در این مقاله ابتدا پارامترهای مؤثر در تخریب پذیری توده سنگ در معادن تخریب بلوکی شناسایی و معرفی شده اند، سپس با استفاده از روش سیستم مهندسی سنگ میزان تأثیرگذاری و تأثیرپذیری هر یک از پارامترها بر روی سیستم تخریب پذیری بررسی شده است. پارامترهای "ننش های برجا"، "نرخ تخریب" و "خردایش" با بیشترین مقدار C+E بیشترین اندرکنش را در سیستم داشته اند. همچنین پارامتر "جهت داری درزه" با بیشترین مقدار C-E مسلط ترین پارامتر سیستم و پارامتر "پتانسیل تخریب پذیری" با دارا بودن حداقل مقدار C-E مغلوب ترین پارامتر سیستم شناخته شده اند.

کلمات کلیدی

تخریب پذیری، تخریب بلوکی، پارامترهای مؤثر، سیستم مهندسی سنگ

۱- مقدمه

قابلیت تخریب توده‌سنگ محاسبه می‌شود [۷-۱۰]. در نهایت مادسلی^۶ در سال ۲۰۰۱ با استفاده از روش نمودار توسعه یافته ماتئوس و استفاده از رگرسیون منطقی، نمودار تخریب‌پذیری معادن تخریب بلوکی را ارائه داد [۱۱]. در هم‌همی روش‌های ذکر شده تمامی پارامترهای مؤثر در قابلیت تخریب به‌طور کامل ارزیابی نشده است، در نتیجه شناسایی این پارامترها برای پیش-بینی دقیق قابلیت تخریب ضروری به‌نظر می‌رسد.

سیستم مهندسی سنگ تکنیکی است که قابلیت تجزیه و تحلیل همزمان فرایندهای پیچیده مهندسی سنگ را دارد. این روش در سال ۱۹۹۲ توسط هادسون^۷ [۱۲] پایه‌گذاری شد. در این روش امکان تجزیه و تحلیل همزمان روابط بین پارامترهای مؤثر توده‌سنگ، ساخت‌گاه و سازه را دارد و آثار ناشی از اندرکنش آن‌ها را بررسی می‌کند. در سیستم‌های مهندسی سنگ شناسایی پارامترهای بحرانی، مسیرهای تأثیرگذار، حلقه‌های برگشتی و ارزیابی تکنیک‌های انتخابی مهندسی مناسب، با استفاده از ماتریس اندرکنش صورت می‌گیرد. محققان زیادی تلاش کردند که این روش را در زمینه‌های مختلف مهندسی توسعه دهند [۱۸-۱۳].

در این مقاله در ابتدا پارامترهای مؤثر در قابلیت تخریب توده‌سنگ به‌طور کامل ارزیابی قرار می‌شوند و سپس با استفاده از سیستم مهندسی سنگ میزان تأثیرگذاری این پارامترها روی سیستم و تأثیر سیستم روی هر یک از این پارامترها بررسی می‌شود. همچنین با استفاده از تحلیل سیستمی تأثیرگذارترین پارامتر و غالب‌ترین پارامتر در سیستم شناسایی و معرفی می‌شوند.

۲- تخریب‌پذیری توده‌سنگ

تخریب‌پذیری عبارت است از قابلیت بازشدگی توده‌سنگ برجا (گسترش درزه و شکاف)، زمانی که زیربرش و همه سه گام تخریب (تخریب اولیه، گسترش تخریب و تخریب پیوسته) در نظر گرفته شود. قابلیت تخریب کان‌سنگ تابعی است از خصوصیات طبیعی توده‌سنگ و خصوصیات القایی که به‌طور مستقیم به فرآیند معدن‌کاری نسبت داده می‌شود [۱۹].

روش‌های تخریب بلوکی و تخریب طبقات فرعی از جمله روش‌های معدن‌کاری هستند که روی قابلیت تخریب‌پذیری توده‌سنگ میزبان متکی هستند. روش تخریب بلوکی احتیاج به آماده‌سازی و توسعه بیشتری نسبت به سایر روش‌های معدن-کاری زیرزمینی دارد. این بدان معنی است که این روش نیاز به هزینه سرمایه‌گذاری اولیه بالا و روشی نسبتاً بدون انعطاف‌پذیری است. شروع و پیوسته بودن تخریب، میزان بهره‌وری اولیه و عملکرد اقتصادی را در روش تخریب بلوکی کنترل می‌کند. اهمیت این موضوع با توجه به منابع قابل توجه در استفاده از روش‌های تخریبی در توده‌سنگ‌هایی با مقاومت بیشتر در حال افزایش است. در صورتی که قابلیت تخریب کان‌سنگ به‌درستی بررسی و ارزیابی نشود، اقداماتی با هزینه‌های بالا و وقت‌گیر برای شروع یا حفظ تخریب نیاز خواهد بود [۱۲].

قابلیت تخریب کان‌سنگ نه تنها یکی از عوامل حیاتی در امکان‌پذیری گام‌های تخریب است، بلکه در انفجار، خردایش و میزان بازیابی تأثیر بسزایی دارد [۳]. هزینه‌های آتشباری ثانویه و منابع موجود بر اساس میزان خردایش حاصل از ارزیابی قابلیت تخریب برآورد می‌شود [۴].

محققان زیادی برای پیش‌بینی قابلیت تخریب توده‌سنگ تلاش کرده‌اند. اولین سیستم تجربی برای پیش‌بینی قابلیت تخریب، در معادن کلایمکس^۱ توسط کینگ^۲ ارائه شد. این روش میزان تخریب‌پذیری توده‌سنگ را بر اساس نوع سنگ، فاصله-داری ناپیوستگی‌ها و کانی‌شناسی محاسبه می‌کند [۵]. در سال-های بعد رابطه کمی بین RQD و سهولت تخریب بر اساس تجربه‌های قبلی تخریب در معادن کلایمکس و یوراد^۳ توسعه داده شد. در این رابطه عواملی مانند RQD و فاکتور سائیدگی (برای انفجار ثانویه) که وابسته به تخریب‌پذیری کان‌سنگ بودند برای تعریف شاخص قابلیت تخریب استفاده شدند [۶]. نمودار تخریب لابسچر^۴ که بر اساس داده‌های جمع‌آوری شده از معادن تخریب بلوکی شکل گرفته است، نزدیکترین روش به استانداردهای صنعتی است که امروزه برای پیش‌بینی قابلیت تخریب در معادن تخریب بلوکی استفاده می‌شود. در این روش بر اساس دو پارامتر شعاع هیدرولیکی و مقدار MRMR^۵ توده‌سنگ،

۲-۱- ساز و کار تخریب

توده سنگ است. این اطلاعات اساس تفسیرهای پیشرفت و رفتار تخریب خواهد بود.

۳-۱- عوامل طبیعی

عوامل طبیعی که در قابلیت تخریب توده سنگ مؤثر هستند عبارتند از تنش‌های برجا، مقاومت سنگ (مقاومت فشاری تک محوره)، مقاومت برشی ناپیوستگی‌ها و خصوصیات هندسی درزه‌ها که شامل فاصله‌داری، جهت‌داری و طول درزه است [۱۹، ۵].

۳-۱-۱- تنش‌های برجا

شدت و جهت‌داری تنش‌های برجا از عوامل تاثیرگذار روی قابلیت تخریب کانسار هستند. مقدار نسبت بین تنش‌های برجای افقی به عمودی بر روی شدت تنش‌های القایی در فضای پشت تخریب، جهت‌داری درزه‌ها، گسترش و نرخ تخریب تاثیر بسزایی دارد.

تنش‌های محدودکننده بالا ممکن است تخریب اولیه و گسترش آن را در کانسار با وجود ساختارهای مطلوب و خصوصیات مناسب ژئومکانیکی توده سنگ محدود کنند. مقدار بالای این تنش‌ها می‌تواند باعث قفل شدن بلوک‌ها در یکدیگر و پایداری توده سنگ در مقابل گسترش تخریب بشود [۲۱، ۳].

۳-۱-۲- ساختار توده سنگ

وجود شکستگی‌ها با شیب مطلوب، فاصله‌داری کم و مقاومت برشی کم در تخریب کان‌سنگ دارای اهمیت بسیاری است [۵]. جهت‌داری دسته درزه‌های اصلی جزء عوامل بحرانی برای تعیین قابلیت تخریب هستند. جهت‌داری دسته درزه‌های اصلی نسبت به جهت‌داری تنش‌های برجا یکی از عوامل مهم در شکل‌گیری سقف قوسی شکل و قفل شدگی بلوک‌ها است [۲۲]. یکی از عوامل بحرانی در موفقیت تخریب کان‌سنگ حضور دسته درزه با شیب کم است، زیرا فقدان یک صفحه ضعیف با زاویه کم، احتمال تشکیل سقف قوسی شکل را بالا می‌برد. این ساختارها باعث جابه‌جایی عمودی مناسب سنگ در هنگام معدن‌کاری و منجر به شکست‌های برشی و وزنی مناسب می‌شوند [۱۰]. فاصله‌داری یکنواخت درزه‌ها به تمرکز یا متغیر بودن چگالی درزه‌ها ترجیح داده می‌شود، چرا که این امر منجر به توسعه تخریب دودکشی در طول مرزهای تخریب می‌شود.

تخریب در نتیجه تأثیر دو عامل اصلی نیروی جاذبه و تنش‌های القایی در تاج زیربرش یا فضای پشت تخریب اتفاق می‌افتد که به رابطه بین تنش‌های القایی، مقاومت توده سنگ، هندسه و مقاومت ناپیوستگی‌ها در توده سنگ بستگی دارد.

اگر تنش‌های فشاری مماسی القا شده در تاج زیر برش یا فضای پشت تخریب کم باشند یا تمایل به کشش داشته باشند، بلوک‌های سنگی ممکن است تحت نیروی جاذبه ریزش کنند یا در جهت شیب ناپیوستگی لغزش یابند. این حالت زمانی اتفاق می‌افتد که مقدار تنش‌های افقی برجا ناچیز باشند یا در اثر وجود مرزهای شکافدار یا معدن‌کاری قبلی، رهاسازی تنش‌ها و توزیع مجدد آن‌ها باعث کاهش شدت این تنش‌ها از بلوک یا پهنه در حال استخراج شده باشد [۲۰].

از طرفی زمانی که مقدار تنش‌های مماسی القا شده در مقایسه با مقاومت فشاری توده سنگ و مقاومت برشی ناپیوستگی‌ها بیشتر باشد، شکست و گسیختگی ممکن است در مرزهای توده سنگ و بلوک‌ها یا نزدیک آن‌ها اتفاق بیافتد و بلوک‌ها در اثر نیروی وزن سقوط کنند. تحت این شرایط فرآیند غالب شکست، شکست ترد سنگ سالم و لغزش در جهت ناپیوستگی‌ها است. این نحوه از تخریب گاهی اوقات به‌عنوان تخریب تنش‌ی تعریف می‌شود [۲۰].

۳- پارامترهای مؤثر در تخریب

قابلیت تخریب کانسار تابعی از عوامل طبیعی مانند خصوصیات ژئومکانیکی توده سنگ و عوامل القایی ناشی از معدن‌کاری است. تنش‌های قبل از معدن‌کاری و خصوصیات توده سنگ در گروه عوامل طبیعی، در حالی که تنش‌های القایی و تأثیرات ناشی از معدن‌کاری در گروه عوامل القایی قرار می‌گیرند.

کنترل یا اصلاح عوامل مؤثر در قابلیت تخریب توده سنگ دارای محدودیت‌های زیادی است. از مهمترین این محدودیت‌ها، مناطق مختلف ژئوتکنیکی است. بهترین روند در بررسی قابلیت تخریب توده سنگ تعیین دقیق خصوصیات ژئومکانیکی

۳-۲-۲- زیر برش

حفر زیر برش برای ایجاد شکست اولیه در تخریب از نظر قابلیت تخریب و رفتار نهایی توده سنگ در طول عمر تخریب بسیار مهم است. یک انفجار مناسب زیر برش باعث شکست و جابه جایی عمودی توده سنگ به سمت پایین و جریان یافتن مواد شکسته شده در قیف های استخراج در اندازه مناسب می شود. یک استخراج ضعیف زیر برش منجر به تغییر شکل پایه ها، تشکیل بلوک ها با ابعاد بزرگ و در نهایت می تواند منجر به عدم ایجاد تخریب اولیه شود [۱۹].

برای پیشروی زیر برش نسبت به جهت داری تنش های اصلی در شدت تنش های مرزی مؤثر است. به همین دلیل برای کاهش تنش های قفل کننده در فضای پشت تخریب زیر برش ها اغلب در جهت تنش های اصلی حفاری می شوند [۱۰].

۳-۲-۳- نرخ تخریب

کنترل نرخ تخریب اثرات قابل توجهی بر روی رفتار خردایش و تخریب توده سنگ دارد. نرخ تخریب بر روی کیفیت توده سنگ، تنش القایی و میزان گسترش درزه تأثیر دارد.

نرخ تخریب با افزایش سرعت حفاری زیر برش افزایش می یابد اما در عین حال احتمال تشکیل فضای خالی در پشت فضای تخریب را نیز افزایش می دهد. نرخ تخریب مطلوب زمانی اتفاق می افتد که میزان نرخ زیر برش (RU^A) بیشتر از نرخ آسیب (RD^A) و کمتر از نرخ تخریب باشد (RC^1) باشد $(RC > RU > RD)$ [۲۰].

۳-۲-۴- خردایش

موفقیت و سودآوری روش تخریب بلوکی به میزان قابل توجهی وابسته به میزان خردایش حاصله از تخریب کانسنگ است. ابعاد و فاصله بین نقاط تخلیه، انتخاب تجهیزات و کنترل استخراج از عوامل طراحی و عملیاتی هستند که تحت تأثیر میزان خردایش هستند. پارامترهایی که در میزان خردایش مؤثر هستند عبارتند از:

- خصوصیات ساختارهای زمین شناسی موجود
- میزان تنش های القایی و برجا
- مقاومت توده سنگ

پرشدگی و تداوم ناپیوستگی ها با توجه به نقش بسیار مهمی در میزان مقاومت توده سنگ دارند، روی قابلیت تخریب و همچنین گسترش تخریب تأثیرگذار هستند.

خصوصیات ناپیوستگی با توجه به تأثیرات مهمی که در قابلیت تخریب دارد باید به دقت اندازه گیری شود. ناپیوستگی -هایی با مقاومت برشی کم برای تخریب مناسب هستند چرا که مقاومت کمی در مقابل تنش های برشی از خود نشان می دهند و تمایل بیشتری به بازشدگی دارند [۵].

۳-۱-۳- آب زیرزمینی

حضور آب در منطقه باعث کاهش اصطکاک بین درزه ها یا افزایش فشار آب منفذی می شود که در روند تخریب مؤثر و قابلیت تخریب را افزایش می دهد. منبع آب می تواند از منابع آب زیرزمینی، یا از بارندگی های فصلی باشد [۲۰].

۳-۲- عوامل القایی

اگرچه قابلیت تخریب کان سنگ تابعی از خصوصیات طبیعی توده سنگ است، ولی به طور قابل توجهی از پارامترهای القایی تأثیرپذیر است. پارامترهای القایی تابعی از قضاوت های مهندسی هستند که بر اساس چگونگی معدن کاری شکل می گیرند. این پارامترها به طور مستقیم وابسته به خصوصیات طبیعی یا خصوصیات ژئومکانیکی کان سنگ خاصی نیستند، هر چند ابعاد و مراحل زیر برش می تواند به گونه ای طراحی شود که از مزیت های حوزه های ژئوتکنیکی و تغییرات طبیعی در توده سنگ برای رسیدن به تخریب و کاهش سطح زیر برش استفاده شود.

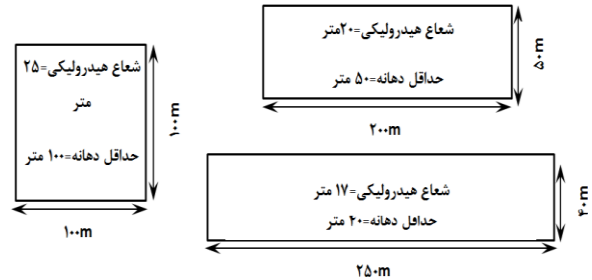
۳-۲-۱- ارتفاع بلوک

ارتفاع بلوک وابسته به هندسه کان سنگ، خردایش کان سنگ و خصوصیات سنگ روباره است. فاصله عمودی بین سطوح معدنی بر روی قابلیت تخریب تأثیر دارند. خردایش ثانویه مواد تخریب شده از طریق ساییدگی کان سنگی که به سمت پایین ستون جریان دارد، اتفاق می افتد. از اینرو قابلیت تخریب کان سنگ، سنگ روباره و نتایج خردایش در تعیین ارتفاع بهینه بلوک در فرایند طراحی معدن تأثیرگذار هستند [۳].

➤ ارتفاع ستون استخراجی

۳-۲-۵- شعاع هیدرولیکی

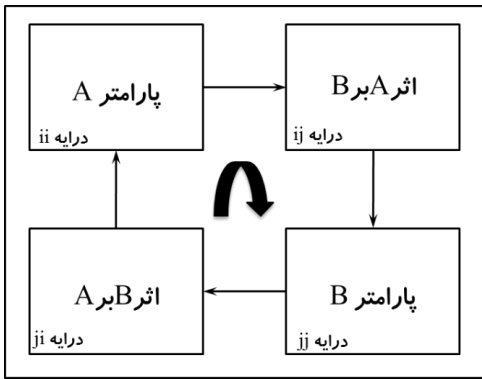
شعاع هیدرولیکی از تقسیم سطح زیربرش ایجاد شده بر محیط آن محاسبه می‌شود. در این سطح هیچ پایه‌ای نباید باقی گذاشته شود. شعاع هیدرولیکی روی مقدار تنش‌های القایی در فضای پشت تخریب تأثیرگذار است و هر چه شعاع هیدرولیکی بزرگتر باشد مقدار تنش‌ها بیشتر و نرخ تخریب افزایش می‌یابد. بالاترین شعاع هیدرولیکی را دایره و بعد از آن مربع دارد. در مواردی که شعاع هیدرولیکی در حالت حدی است، هر چقدر نسبت دهانه حداکثر به حداقل بالا باشد، شعاع هیدرولیکی کاهش می‌یابد (شکل ۱).



شکل ۱: رابطه بین شعاع هیدرولیکی و حداقل دهانه [۱۰]

۴- سیستم مهندسی سنگ

سیستم مهندسی سنگ روشی است که امکان تجزیه و تحلیل هم‌زمان روابط بین پارامترهای مؤثر توده سنگ، ساختگاه و سازه را دارد و آثار ناشی از اندرکنش آن‌ها را بررسی می‌کند. در سیستم‌های مهندسی سنگ شناسایی پارامترهای بحرانی، مسیرهای تأثیرگذار، حلقه‌های برگشتی و ارزیابی تکنیک‌های انتخابی مهندسی مناسب، با استفاده از ماتریس اندرکنش صورت می‌گیرد. ماتریس اندرکنش یک ماتریس مربعی است که بر روی قطر اصلی آن پارامترهای مؤثر بر رفتار توده سنگ و سازه قرار داشته و عناصر غیر قطری آن اندرکنش بین پارامترها را نشان می‌دهد. همان‌طور که در شکل ۲ نشان داده شده است پارامتر A در درایه بالا سمت چپ و پارامتر B در درایه پایین سمت راست قرار گرفته‌اند. درایه بالا سمت راست نشان دهنده تأثیر A بر روی B و درایه پایین سمت چپ نشان دهنده تأثیر B روی A است [۱۲].



شکل ۲: مفهوم ماتریس اندرکنش برای سیستمی شامل دو پارامتر A و B [۱۲]

به عنوان مثال در شکل ۳ ماتریس اندرکنش مربوط به یک توده سنگ درزه‌دار که سه موضوع و عامل اساسی ساختار سنگ، تنش در سنگ و جریان آب نشان داده شده است، ماتریس ۳×۳ خواهد بود که روی قطر اصلی پارامترهای اصلی تنش، ساختار سنگ و جریان آب قرار می‌گیرند و در سایر درایه‌ها اندرکنش بین این ۳ پارامتر قرار می‌گیرد [۲۳].

ساختار سنگ	شکستگی‌ها بر مقادیر و جهت تنش‌ها اثر می‌گذارند	شبکه شکستگی‌ها نفوذپذیری ثانویه را کنترل می‌کنند
F_{ij}		
تنش‌ها می‌توانند شکستگی‌ها را باز کنند یا ببندند و یا همین‌طور آنها را به وجود آورند	تنش‌ها	به طور کلی هر چه تنش‌های قائم بزرگتر باشند، نفوذپذیری کمتر است
جریان آب پیوسته آب در شکستگی‌ها بر خصوصیات آنها تأثیر می‌گذارد	جریان آب در شکستگی‌ها تنش قائم را کاهش می‌دهد.	جریان آب
		K_{ij}

شکل ۳: ماتریس اندرکنش ۳×۳ برای پارامترهای مکانیک سنگی [۲۳]

به منظور تفسیر سیستم‌های مهندسی سنگ روش‌های متعددی برای کدگذاری ماتریس اندرکنش ارائه شده است. در این مقاله برای کدگذاری از روش کدگذاری نیمه کمی خبره (ESQ^{۱۱}) ارائه شده توسط هادسون [۱۲] استفاده شده است. این روش ۵ کلاس کدگذاری از ۰ تا ۴ دارد (جدول ۱).

در فضای (C/E) وضعیت اندرکنش آن پارامتر را مشخص می-کند. بدیهی است هر چه مقدار عددی حاصل جمع (C+E) پارامتر مورد نظر بیشتر باشد، شدت اندرکنش آن با کل سیستم بیشتر بوده و هر چه مقدار عددی تفاضلی (C-E) (با در نظر گرفتن علامت آن) بیشتر باشد میزان غلبه پارامتر مذکور روی سیستم بیشتر است. مقدار منفی برای (C-E) نشان‌دهنده غلبه سیستم بر پارامتر مورد نظر است.

۵- ماتریس اندرکنش قابلیت تخریب توده‌سنگ

به منظور درک چگونگی اندرکنش پارامترهای توضیح داده شده در بخش قبل، نیاز به یک مطالعه سیستمی است تا بتوان میزان اثر تغییر یک پارامتر در سایر پارامترها را تشریح کرد. بنابراین پارامترهای لیست شده در قسمت قبل در امتداد قطر اصلی یک ماتریس اندرکنش به همراه درایه آخر که توسط "پتانسیل قابلیت تخریب" پر می‌شود، قرار می‌گیرند. درایه آخر در واقع موضوع مورد مطالعه است. ستون اندرکنش‌هایی که از این درایه عبور می‌کند نشان می‌دهد که چگونه سیستم توده‌سنگ، تخریب‌پذیری را تحت تأثیر قرار می‌دهد، به همین ترتیب سطر عبوری از این درایه نشان دهنده اثر تخریب‌پذیری بر سیستم توده‌سنگ است. ماتریس اندرکنش کدگذاری شده برای مسئله قابلیت تخریب معادن تخریب بلوکی در جدول ۲ آورده شده است. شایان ذکر است که برای کدگذاری ماتریس اندرکنش از نظرات ۱۰ کارشناس خبره در این زمینه استفاده شده است.

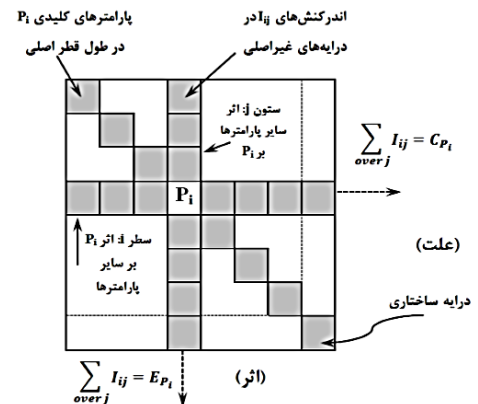
شکل ۵ نمودار علت-اثر پارامترها را نشان می‌دهد. در این نمودار، قطر اصلی نشان دهنده مکان هندسی $C=E$ است. در طول این قطر، مجموع مقادیر $C+E$ افزایش می‌یابد و خطوط شدت اندرکنش مساوی بر روی نمودار رسم می‌شوند تا تفاوت میان اندرکنش‌های زیاد و کم را قایل شوند. نقاطی که در قسمت پایین، سمت راست نمودار قرار می‌گیرند پارامترهایی را مشخص می‌کنند که روی سیستم تسلط دارند، چرا که از مقدار $C-E$ بزرگتری نسبت به نقاطی که در اطراف قطر قرار دارند، برخوردارند. پارامترهایی که تحت اثر سیستم قرار گرفته‌اند در قسمت بالای سمت چپ نمودار قرار می‌گیرند و مقادیر $C-E$ کوچکتری دارد. نمودار علت-اثر در فهم نقش هر پارامتر در

جدول ۱: کدگذاری پارامترها به روش نیمه کمی خبره [۱۲]

مقدار کدگذاری	توضیحات
۰	بدون اندرکنش
۱	اندرکنش ضعیف
۲	اندرکنش متوسط
۳	اندرکنش قوی
۴	اندرکنش بحرانی

۴-۱- نمودار علت-اثر

نمودار علت-اثر پارامترها که از تأثیر ماتریس اندرکنش به دست می‌آید امکان شناسایی پارامترهای غالب طراحی و شدت اندرکنش هر یک پارامترها را بر رفتار سیستم نشان می‌دهد. در نمودار علت-اثر پارامترها، اثر یک پارامتر روی سیستم «اثر» و اثر سیستم روی پارامتر «تأثیر» نامیده می‌شود. بعد از کدگذاری ماتریس می‌توان مجموع هر ردیف و ستون را محاسبه کرد. مجموع مقادیر ردیف به‌عنوان «علت» یا اثر P_i روی سیستم و مجموع مقادیر ستون به‌عنوان «تأثیر» یا اثر سیستم روی پارامتر در محور مختصات با حروف C و E نشان داده می‌شود. بنابراین مقدار C نشان‌گر مسیری است که تأثیرات P_i روی سیستم می‌باشد و مقدار E تأثیری است که سیستم روی P_i دارد (شکل ۴) [۱۲].



شکل ۴: نحوه شکل‌گیری محورهای علت و اثر در ماتریس اندرکنش [۱۲]

پس از کدگذاری ماتریس مقادیر علت و اثر تمام پارامترها محاسبه و روی نمودار علت-اثر رسم می‌شوند. موقعیت هر نقطه

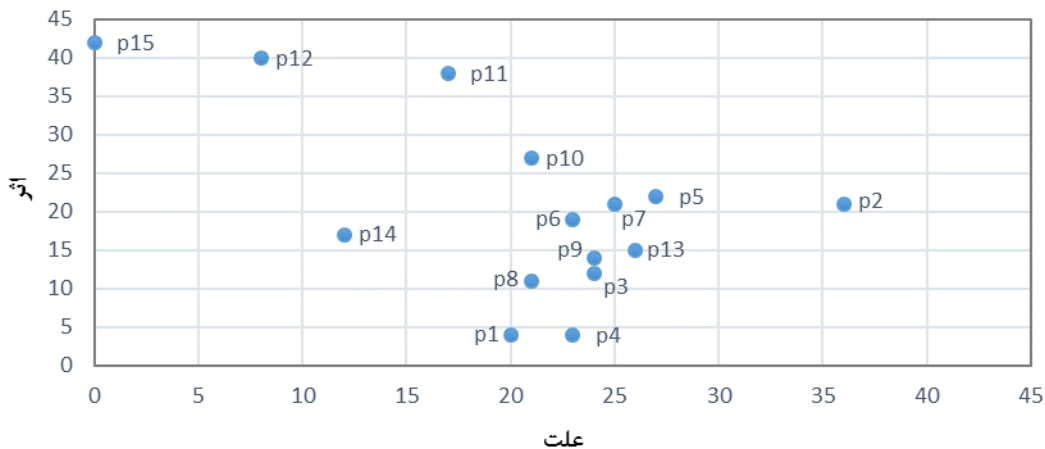
و ۲ یعنی "تنش‌های برجا" و "جهت‌داری درزه" بیشترین تسلط را بر سیستم دارند. با توجه به مجموع مقادیر علت‌ها و اثرها شدت اندرکنش پارامترها در شکل ۶ رسم شده است. به طور کلی هر چه اندرکنش یک سیستم بیشتر باشد، آن سیستم به صورت بالقوه ناپایدار است، زیرا شانس بیشتری وجود دارد که تغییر کوچک در یک پارامتر تا حد قابل توجهی بر رفتار سیستم تأثیر بگذارد.

پروژه حائز اهمیت بوده و قادر است اندرکنش‌های سودمند و غیر سودمند از نظر مهندسی را مشخص سازد. محاسبه میزان اندرکنش به صورت مقدار C+E می‌تواند موجب شناسایی پارامترهایی شود که لازم است تحت کنترل قرار گیرند، چرا که تغییر در این پارامترها احتمالاً می‌تواند باعث القای تغییرات مهمی در سیستم شود. از نمودار علت-اثر رسم شده این امر آشکار می‌شود که پارامتر ۱۵ یعنی "پتانسیل قابلیت تخریب" توده سنگ کاملاً تحت اثر سیستم بوده و در عوض پارامترهای ۴

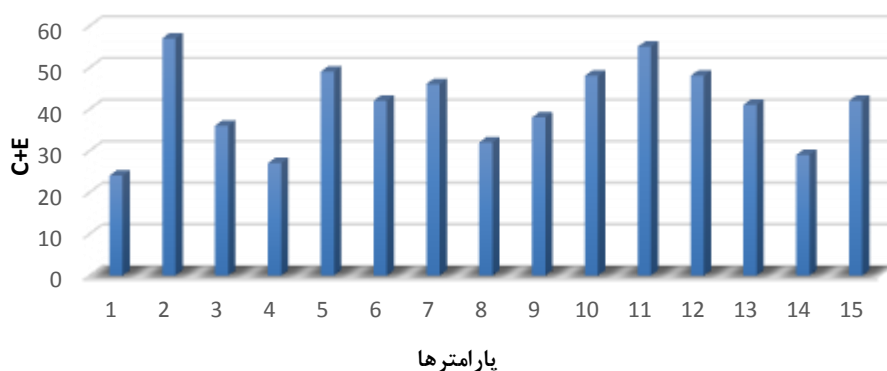
جدول ۲: ماتریس اندرکنش کدگذاری شده برای قابلیت تخریب توده سنگ در معادن تخریب بلوکی

P₁	2	2	1	1	2	3	0	0	1	2	3	1	0	2	20
1	P₂	3	3	4	3	3	0	2	3	3	3	1	3	4	36
0	1	P₃	0	2	2	1	0	1	3	3	4	2	2	3	24
0	2	1	P₄	1	1	1	0	2	2	3	3	1	2	4	23
0	3	1	0	P₅	2	3	3	3	3	3	2	1	1	2	27
0	2	1	0	1	P₆	1	2	3	3	3	3	1	1	2	23
0	1	1	0	2	2	P₇	3	1	3	3	3	2	1	3	25
0	0	0	0	3	0	4	P₈	2	2	3	4	0	0	3	21
2	2	0	0	1	1	3	3	P₉	3	3	2	1	1	2	24
0	2	1	0	2	2	0	0	0	P₁₀	4	3	2	1	4	21
0	2	1	0	2	2	0	0	0	1	P₁₁	3	2	1	3	17
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	2	P₁₂	1	1	4	8
0	4	1	0	2	2	2	0	0	2	3	4	P₁₃	3	3	26
1	0	0	0	1	0	0	0	0	1	3	3	0	P₁₄	3	12
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	P₁₅	0
4	21	12	4	22	19	21	11	14	27	38	40	15	17	42	

P₁: مقاومت فشاری تک محوره؛ **P₂**: تنش‌های برجا؛ **P₃**: فاصله‌داری درزه؛ **P₄**: جهت‌داری درزه؛ **P₅**: بازشدگی درزه؛ **P₆**: تداوم درزه؛ **P₇**: زبری درزه؛ **P₈**: پرشدگی درزه؛ **P₉**: آب زیرزمینی؛ **P₁₀**: شعاع هیدرولیکی؛ **P₁₁**: نرخ تخریب؛ **P₁₂**: خردایش؛ **P₁₃**: ارتفاع بلوک؛ **P₁₄**: شرایط زیربرش زبربرش؛ **P₁₅**: قابلیت تخریب



شکل ۵: نمودار علت-اثر برای مسئله قابلیت تخریب توده سنگ در معادن تخریب بلوکی



شکل ۶: مقادیر شدت اندرکنش پارامترها در سیستم تخریب پذیری

۶- نتیجه گیری

- پارامتر مقاومت فشاری تک محور با داشتن حداقل مقدار C+E دارای کمترین اندرکنش در سیستم است.

چنین اطلاعاتی می تواند بسیار سودمند باشد، به عنوان مثال در بررسی خصوصیات منطقه مورد مطالعه به طراح این امکان را می دهد که پارامترهایی که دارای اندرکنش بیشتری هستند را با دقت و جزئیات بیشتری بررسی کنند. همچنین نتایج به دست آمده حاکی از آن است که تقریباً تمامی ۱۴ پارامتر معرفی شده تا حد زیادی انفعالی بوده و تأثیر زیادی بر روی پارامتر هدف سیستم دارند. بنابراین باید در تصمیم های مهندسی در نظر گرفته شوند.

مراجع

- [۱] A. Van As and R. Jeffrey, "Hydraulic fracturing as a cave inducement technique at Northparkes Mines," in *Proceedings MassMin*, 2000, pp. 165-172.
- [۲] R. Kendrick, "Induction caving of the Urad mine," in *Mining Congress Journal*, 1970, pp. 39-44.
- [۳] F. S. Kendorski, "Cavability of ore deposits. *Mining Engineering*," pp. 628-631, 1978.

در این مقاله ابتدا تمامی پارامترهای مؤثر در تخریب پذیری به دو گروه پارامترهای طبیعی و القایی تقسیم بندی شده اند. پارامترهای طبیعی شامل مقاومت سنگ سالم، تنش های برجا، خصوصیات ساختار توده سنگ و آب زیرزمینی و پارامترهای القایی شامل شعاع هیدرولیکی، نرخ تخریب، خردایش، ارتفاع بلوک و شرایط زیربرش هستند. سپس با استفاده از روش سیستم مهندسی سنگ پارامترها مؤثر در سیستم تخریب پذیری ارزیابی شدند. این ارزیابی بر اساس مکان هندسی پارامترها در نمودار علت-اثر صورت گرفته است.

- پارامتر تنش های برجا و نرخ تخریب بیشترین اندرکنش را در سیستم دارند (حداکثر مقدار C+E). و این بدان معنی است که تغییرات کوچکی در این پارامترها تا حد قابل توجهی بر رفتار سیستم تأثیر خواهد گذاشت.

- پارامتر جهت داری درزه مسلط ترین پارامتر سیستم است (حداکثر مقدار E-C).

- پارامتر خردایش و پتانسیل قابلیت تخریب با داشتن حداقل مقدار C-E مغلوب ترین پارامترهای سیستم هستند.

- (RES) methodology in rockfall hazard assessment on the Chengdu-Lhasa Highway, China," *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, vol. 41, pp. 833-838, 2004.
- [۱۵] D. Rozos, L. Pyrgiotis, S. Skias, and P. Tsagaratos, "An implementation of rock engineering system for ranking the instability potential of natural slopes in Greek territory. An application in Karditsa County," *Landslides*, vol. 5, pp. 261-270, 2008.
- [۱۶] P. Budetta, A. Santo, and F. Vivencio, "Landslide hazard mapping along the coastline of the Cilento region (Italy) by means of a GIS-based parameter rating approach," *Geomorphology*, vol. 94, pp. 340-352, 2008.
- [۱۷] A. Younessi and V. Rasouli, "A fracture sliding potential index for wellbore stability analysis," *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, vol. 47, pp. 927-939, 2010.
- [۱۸] M. Zare Naghadehi, R. Jimenez, R. KhaloKakaie, and S.-M. E. Jalali, "A new open-pit mine slope instability index defined using the improved rock engineering systems approach," *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, vol. 61, pp. 1-14, 2013.
- [۱۹] C. Mawdesley, *Prediction rock mass cavability in block caving mines. PhD Thesis: University of Queensland*, 20۰۲
- [۲۰] B. H. G. Brady and E. T. Brown, *Rock Mechanics for underground mining*: Springer, 2004.
- [۲۱] B. Brady, "Brown; ET,(1985), *Rock Mechanics for Underground Mining*," ed: George Allen and Unwin (Publishers) Ltd.
- [۲۲] F. S. Kendorski, "Cavability of ore deposits," *Mining Engineering*, pp. 628-631, 1978.
- [۲۳] J. P. Harrison and J. A. Hudson, *Engineering rock mechanics-an introduction to the principles*: Access Online via Elsevier, 2000.
- [۴] L. J. Lorig, M. P. Board, D. O. Potyondy, and M. J. Coetzee, *Numerical modelling of caving using continuum and micro-mechanical models*. Montreal, Canada: CAMr95:3rd Canadian Conference on Computer Applications in the Minerals Industry, 1995.
- [۵] M. A. Mahtab and J. D. Dixon, "Influence of rock fractures and block boundary weakening on cavability," *Trans Soc of Mining Engineers of the AIME*, pp. 6-12, 1976.
- [۶] L. Obert, R. Munson, and C. Rich, "Caving properties of the Climax orebody," *Trans Soc of Mining Engineers of the AIME*, pp. 129-133, 1976.
- [۷] J. Diering, "Practical approach to the numerical stress analysis of mass mining operations," *Institution of Mining and Metallurgy Transactions. Section A. Mining Industry*, vol. 96, 1987.
- [۸] D. H. Laubscher, "A geomechanics classification system for the rating of rock mass in mine design," *JS Afr. Inst. Metall*, vol. 90, pp. 267-273, 1990.
- [۹] D. H. Laubscher, "Cave mining-the state of the art," *Journal of the South African Institute of Mining and Metallurgy*, vol. 94, p. 2279 1994.
- [۱۰] D. H. Laubscher, *A practical manual on block caving*. Brisbane: Julius Kmttschnitt Mineral Research Cenfre, 2000.
- [۱۱] C. Mawdesley, R. Trueman, and W. Whiten, "Extending the Mathews Stability Graph for open-stope design," *Trans Instn Min Metall, Sect A: Min Technol*, pp. 27-39, 2001.
- [۱۲] J. A. Hudson, *Rock engineering systems, Theory and Practice*, 1992.
- [۱۳] Y. Shang, S. Wang, G. Li, and Z. Yang, "Retrospective case example using a comprehensive suitability index (CSI) for siting the Shisan-Ling power station, China," *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, vol. 37, pp. 839-853, 2000.
- [۱۴] L. Zhang, Z. Yang, Q. Liao, and J. Chen, "An application of the rock engineering systems

پی نوشت

- ¹Climax
- ² King
- ³ Urad
- ⁴Laubscher
- ⁵Mining Rock Mass Rating
- ⁶Mawdesley
- ⁷Hudson
- ⁸ Rate of undercutting
- ⁹ Rate of damage
- ¹⁰ Rate of caving
- ¹¹Expert Semi-Quantitative