

پیش‌بینی پایداری پایه با استفاده از الگوریتم برنامه‌نویسی بیان ژن در معادن کارگاه و پایه

مسعود خلیفه‌قلی^۱؛ لهراسب فرامرزی^۱؛ محمدحسین کدخدایی^۱؛ راحب باقرپور^{۱*}

۱- دانشکده مهندسی معدن، دانشگاه صنعتی اصفهان

دریافت: ۱۴۰۱/۱۲/۱۴؛ پذیرش: ۱۴۰۲/۰۱/۲۱

(* نویسنده مسئول: bagherpour@iut.ac.ir)

چکیده

روش‌های استخراج جزئی یکی از انواع روش‌های معدنکاری زیرزمینی است که در آن به منظور تأمین ایمنی محیط کاری از پایه استفاده می‌شود. ارزیابی پایداری پایه‌ها یکی از مسائل بسیار مهم در طراحی معادن زیرزمینی است به طوری که ناپایداری پایه‌ها منجر به خسارات جانی و مالی در عملیات معدنکاری خواهد شد. بنابراین پیش‌بینی پایداری پایه از اهمیت بسیاری برخوردار است. تحلیل پایداری در پیشینه تحقیق شامل روش‌های تحلیلی، عددی و تجربی است که دارای محدودیت بوده و از دقت بالایی برخوردار نیستند. استفاده از الگوریتم ژنتیک ابزاری مفید برای ارزیابی پایداری پایه‌ها است. در این مطالعه همبستگی میان پایداری پایه با پارامترهای هندسی (عرض و ارتفاع) و تنش پایه توسط روش برنامه‌نویسی بیان ژن (GEP) مورد بررسی قرار گرفته است. مدل پیشنهادی در یک پایگاه داده برگرفته از مطالعات پیشین اجرا شده است. عملکرد مدل توسط ۴ شاخص آماری دقت، حساسیت، عدم اشتراک و ضریب همبستگی متو مورد ارزیابی قرار گرفت که مقدار آن‌ها به ترتیب برابر با ۰٫۸۲، ۰٫۷۹، ۰٫۸۶ و ۰٫۶۵ به دست آمده است. نتایج نشان داد که مدل توسعه داده شده از دقت مطلوبی برخوردار است و قادر به پیش‌بینی پایداری پایه می‌باشد.

واژگان کلیدی

معدنکاری زیرزمینی، شاخص پایداری پایه، برنامه‌نویسی بیان ژن، استخراج جزئی

۱- مقدمه

امروزه به علت افزایش عمق ذخایر معدنی، روش‌های استخراج زیرزمینی شامل روش‌های با نگهداری، بدون نگهداری و تخریبی به طور گسترده‌ای مورد استفاده قرار می‌گیرند. از معایب این روش‌ها، ایجاد نشست در سطح زمین و آسیب جدی به ساختارهای سطحی است. بنابراین انتخاب یک روش زیرزمینی مناسب به منظور کاهش نشست، بسیار حائز اهمیت خواهد بود. در میان روش‌های بدون نگهداری، روش‌های استخراج جزئی کمک قابل توجهی به کنترل نشست می‌کنند [۱]. روش کارگاه و پایه یکی از روش‌های استخراج جزئی است که برای ذخایر کم‌عمق و مسطح با ماده معدنی مقاوم همچون

معدن فلزی و سنگ ساختمانی قابل کاربرد است [۱، ۲]. در این روش برای نگهداری سقف کارگاه، بخشی از ماده معدنی به عنوان پایه جایگذاری می‌شود. یکی از مسائل مهم در طراحی پایه‌ها، ارزیابی پایداری آن‌ها است. بسیاری از حوادث معادن زیرزمینی در ارتباط با ناپایداری پایه‌ها در این معادن است [۳]. گسیختگی پایه در معادن زیرزمینی مشکلاتی همچون تلفات جانی، توقف در عملیات معدنکاری و خرابی-های تجهیزات را به همراه دارد [۴]. لذا پیش‌بینی وضعیت پایداری پایه در معادن زیرزمینی از اهمیت ویژه‌ای برخوردار است. محققان بسیاری در زمینه ارزیابی وضعیت پایداری پایه در معادن زیرزمینی با استفاده از روش‌های تجربی، تحلیلی و

عددی به مطالعه پرداخته‌اند.

واگنر (۱۹۸۰) با بررسی معدنکاری کارگاه و پایه در جنوب آفریقا، مشکلات مربوط به طراحی پایه در این معادن را مورد مطالعه قرار داده است. او با بیان اصول طراحی پایه و پیشرفت‌های موجود در این زمینه، نتیجه گرفت که بایستی در این روش‌ها توجه بیشتری به خصوصیات مقاومتی زغالسنگ شود [۵]. واگنر (۲۰۰۳) طراحی پایه در معادن کوچک آلپ با دهانه محدود کارگاه و اثر عملیات پرکردن بر آن را بررسی نموده است. نتایج حاصل از این تحقیق نشان داده است که اغلب، ابعاد پایه ثابت و مستقل از عمق روباره است. با توجه به ضخامت زیاد ذخایر و کوچک بودن نسبت عرض به ارتفاع پایه، بارهای اعمالی به پایه‌ها کم می‌باشد. واگنر نشان داد که وجود ناپیوستگی‌ها، پرکردن و استخراج در طبقات فرعی نقش مهمی در طراحی پایه دارند [۶]. استرهایزن و همکارانش (۲۰۰۸) یک روش طراحی پایه برای معادن زیرزمینی سنگ بر اساس مطالعات موردی در ایالات متحده ارائه کردند و نتیجه گرفتند که علاوه بر ۱۸ مورد ناپایداری پایه، ۲ مورد شکست گسترده در سقف مشاهده شده است که ممکن است مربوط به ناپایداری پایه یا سقف باشد و این ۲ مورد جزو موارد ناپایداری پایه به حساب نمی‌آید. همچنین با شکست بیش از ۱۸ پایه و تعداد زیادی پایه پایدار نشان دادند که پایه‌های شکسته شده، پایداری سقف و پایه‌های کناری را تهدید می‌کنند. آن‌ها نشان دادند که ۱۴ مورد از ۱۸ پایه شکسته شده نسبت عرض به ارتفاع پایه کمتر از ۰/۸ بوده است. همچنین متوسط تنش اعمالی به پایه در طرح‌های مورد مطالعه، تقریباً ۲۵ درصد مقاومت فشاری سنگ (*UCS*) بوده است [۷]. کورتینیک و همکاران (۲۰۰۹) با استفاده از روش‌های تحلیلی و عددی و اندازه‌گیری‌های برجا در دو معدن زیرزمینی سنگ که با روش کارگاه و پایه استخراج می‌شدند، طراحی و بهینه‌سازی ابعاد پایه‌ها و اتاق‌ها در این معادن را مورد بررسی قرار دادند. نتایج این مطالعه نشان داد که تعیین ابعاد مناسب برای اتاق‌ها و پایه‌ها و نیز نصب سیستم‌های مناسب به منظور نظارت مداوم و تشخیص ناپایداری سقف بایستی به طور ویژه مورد توجه قرار گیرد [۸]. جلالی و نجفی (۲۰۱۲) با استفاده از روش مدلسازی عددی به تعیین ابعاد مناسب پایه‌ها در بخش کارگاه و پایه معدن کرومیت فاریاب پرداختند. نتایج حاصل از مدلسازی با در نظر

گرفتن ۴ مرحله استخراج نشان داد که پایه‌های ۹ و ۱۲ متری در تمام مراحل استخراج پایدار می‌مانند و پایه‌های ۳ و ۶ متری در مرحله سوم استخراج شکسته می‌شوند. همچنین مقایسه نتایج روش عددی با روش سطح تأثیر و رابطه لاندرو و پاکالنیس نشان داد که در پایه‌هایی با نسبت عرض به ارتفاع بسیار کم نمی‌توان رابطه‌ای بین تنش افقی و قائم برقرار نمود در حالی که توزیع تنش افقی در پایه‌های عریض به صورت سهمی می‌باشد [۹]. مالان و ناپیر (۲۰۱۲) مشکلات مرتبط با تعیین مقاومت پایه‌های سنگ سخت را به کمک مطالعه موردی کمپلکس بوشولد واقع در جنوب آفریقا بررسی نمودند. آنها در نهایت به این نتیجه رسیدند که هرکدام از روش‌های عددی و تجربی، محدودیت‌های خاص خود را دارند و بنابراین به تنهایی نمی‌توانند مقاومت پایه را به درستی ارزیابی کنند بلکه تمهیدات دیگری همچون نظارت مداوم در حین عملیات مورد نیاز است [۱۰]. دهقان و همکاران (۲۰۱۳) با انجام مدلسازی عددی به بررسی دقیق انفجار سنگ در معدن کرومیت *Fetr6* پرداختند. نتایج نشان داد که پارامترهای ناپیوستگی مانند زاویه اصطکاک و سختی برشی، عوامل بحرانی شکست پایه در این معدن بوده و نیز نسبت عرض به ارتفاع پایه برابر ۰/۳، فقدان برنامه‌ریزی استخراج ماده معدنی و نگهداری ناکافی سقف، از دلایل اصلی این گسیختگی می‌باشند [۱۱]. عبداللهی پور و قنادشیرازی (۲۰۱۴) با در نظر گرفتن سه ناحیه با خصوصیات ژئومکانیکی متفاوت واقع در استان‌های بوشهر، ایلام و خوزستان به بررسی پایداری مغارهای ذخیره هیدروکربن و پایه‌های سنگی بین آن‌ها پرداختند. ابتدا با انجام مدلسازی عددی در نرم‌افزار *Phase2* و با فرض ۴ سطح مقطع برای مغارها، سطح مقطع مناسب انتخاب شد. سپس با استفاده از روش عددی و قانون آتش-سوزی (قانونی برای جلوگیری از تلفات جانی در آتش‌سوزی و نیز کاهش آسیب ناشی از آتش‌سوزی، زلزله و حوادث مشابه) ضخامت مجاز برای پایه سنگی بین دو مغار مجاور را ارزیابی کردند. نتایج نشان داد که قانون آتش‌سوزی ضخامت بیشتری برای پایه پیشنهاد می‌کند. بنابراین با توجه به کاربرد مغار بایستی حداقل ضخامت لازم برای پایه انتخاب شود [۱۲]. کوردینگ و همکارانش (۲۰۱۵) با بررسی شکست‌های رخ داده در دو مورد از مغارهای ذخیره گاز در سازند شیل، روشی برای تحلیل پایداری این مغارها ارائه کردند و به منظور تأیید

انجام شد. نتایج نشان داد که مدل توسعه داده شده رفتار پایه‌ها را به خوبی مورد تجزیه و تحلیل قرار می‌دهد [۱۷].

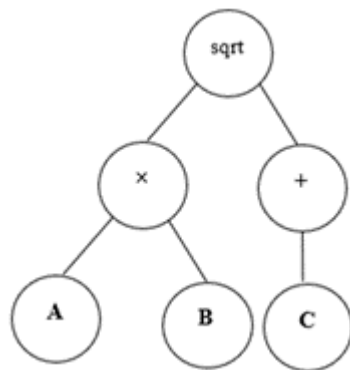
تواری و همکارانش (۲۰۱۸) روشی برای طراحی بهینه و تحلیل پایداری پایه تاج در لایه‌های پرشیب زغالسنگ که در چندین طبقه استخراج می‌شدند، ارائه دادند. ابتدا به کمک مدل‌سازی سه‌بعدی، تحلیل پایداری انجام شده است و سپس با اشاره به طراحی تجربی پایه تاج، روش مورد نظر اعتبارسنجی شد. نتایج این تحلیل نشان داد که کاهش ضخامت پایه تاج بدون تأثیرپذیری پایداری طبقات امکان‌پذیر است و نیز با انطباق یک روش منظم شامل شبیه‌سازی عددی و تحلیل تجربی، اندازه بهینه پایه تاج می‌تواند در رگه پرشیب زغال طراحی شود [۱۸]. یو و همکارانش (۲۰۱۸) با در نظر گرفتن کاهش تصاعدی اندازه پایه و رفتارهای محصورکنندگی ذرات ورقه‌شده زغالسنگ، مدل جدیدی برای طراحی پایداری بلند مدت پایه در روش معدنکاری نواری ارائه دادند و نتیجه گرفتند که ورقه‌شدن پایه اندازه مؤثر پایه را کاهش می‌دهد اما توده ذرات ورقه‌شده زغالسنگ در اطراف پایه می‌تواند ناحیه تسلیم را کاهش دهد. همچنین حداکثر عمق ورقه‌شدن با افزایش ارتفاع پایه افزایش می‌یابد. نهایتاً معدنکاری نواری در عمق کم نسبت به ورقه‌شدن پایه حساس‌تر است [۱۹]. یو و همکارانش (۲۰۱۸) با انجام مدل‌سازی دو بعدی و سه بعدی در نرم‌افزار UDEC تأثیر عرض پهنه در تنش قائم وارد بر پایه زغالسنگ را با استفاده از ضریب تمرکز تنش مورد بررسی قرار دادند. مطالعه آن‌ها نشان داد که اندازه معدن تأثیر مشابهی در روش نواری و اتاق و پایه دارد و تنها در شرایطی که نسبت اندازه معدن به عمق معدنکاری کوچکتر یا مساوی ۳ تا ۴ باشد می‌توان از تئوری سطح تأثیر برای محاسبه تنش قائم وارد بر پایه استفاده کرد [۱]. لیانگ و همکاران (۲۰۲۰) با استفاده از الگوریتم‌های GBDT، XGBoost و LightGBM به پیش‌بینی پایداری پایه در سنگ سخت پرداختند. نتایج نشان داد که این الگوریتم‌ها عملکرد جامعی دارند و نیز مقدار دقت پیش‌بینی برای آن‌ها به ترتیب برابر با ۰٫۸۳۱۰، ۰٫۸۳۱۰ و ۰٫۸۱۶۹ به دست آمده است. متوسط تنش و نسبت عرض به ارتفاع پایه تأثیر قابل توجهی در نتایج پیش‌بینی دارند [۲۰]. احمد و همکاران (۲۰۲۰) الگوریتم‌های درخت تصادفی و درخت تصمیم C4.5 را برای پیش‌بینی پایداری پایه در معادن زیرزمینی زغالسنگ و سنگ تزئینی پیشنهاد دادند. نتایج

محاسبات پایداری، مدل‌سازی سه بعدی یکی از مغارها با استفاده از نرم‌افزار 3DEC انجام شد و مورد تجزیه و تحلیل قرار گرفت. نتایج نشان داده است که عوامل شکست و کاهش ضریب ایمنی در این مغارها به دلیل حجم زیاد استخراج، تخریب شیل در بخشهای خارجی پایه به علت ترکیب ورقه‌شدن و لغزش ناشی از تنش، و نسبت تقریباً کوچک عرض به ارتفاع بوده است [۱۳]. دوریس و اسنوپارک (۲۰۱۷) با انجام مدل‌سازی عددی در معدن زیرزمینی CSA به ارزیابی پایداری پایه و رفتار آن در حین استخراج پرداختند. آن‌ها با در نظر گرفتن سه گالری موازی از این معدن که هر کدام در دو فاز جداگانه استخراج می‌شدند، نتایج حاصل از مدل‌سازی هر مرحله را مورد بررسی قرار دادند. بررسی آن‌ها توسعه بار پایه در حین استخراج تدریجی و نیاز به پایدارسازی فضای استخراج شده با استفاده از میل مهار در طی زمان را نشان داده است [۱۴]. ناپاگاریا و تورس (۲۰۱۷) مفهوم کرنش شکست را برای ارزیابی پایداری پایه‌های مربعی شکل در روش اتاق و پایه به کار بردند. آن‌ها به کمک مدل‌سازی عددی در FLAC3D، رابطه جدیدی برای محاسبه کرنش شکست پایه به دو شکل نمایی و خطی ارائه دادند. اختلاف بسیاری بین نتایج مدل‌سازی با مقادیر پیش‌بینی شده کرنش از طریق روابط وجود دارد که نشان می‌دهد یافتن ارتباط مناسب بین متغیرهای مورد استفاده در مدل‌سازی و ارائه یک رابطه اصلاح شده دشوار است [۱۵]. رفیعی و مارتین (۲۰۱۸) با به کارگیری مدل تضعیف چسبندگی-تقویت اصطکاک، شکست تصاعدی پایه‌های سنگ سخت را در دو حالت دوبعدی و سه‌بعدی مدل‌سازی نمودند و این روش توسط داده‌های مربوط به ۸۵ پایه در دو معدن مورد ارزیابی قرار گرفت. نتایج نشان داد که مدل‌های عددی ارائه شده با موفقیت توانستند پایه‌های پایدار و ناپایدار را از یکدیگر تفکیک نمایند [۱۶]. سینها و والتون (۲۰۱۸) معیار تسلیم تصاعدی S شکل را با ترکیب نمودن مدل تضعیف چسبندگی-تقویت اصطکاک مرتبط با ورقه‌شدن بخش‌های سطحی پایه و شکست برشی در مرکز پایه اصلاح نمودند. این معیار سپس در مدل‌سازی سه‌بعدی مورد استفاده قرار گرفت و تأثیر نسبت عرض به ارتفاع و طول به عرض پایه بر مقاومت آن مورد تحلیل قرار گرفت. به منظور توسعه این مدل، مجموعه‌ای از داده‌های تجربی در آن قرار گرفت و جدایش موارد پایدار و ناپایدار با دقت قابل قبولی

عنوان یک برنامه کامپیوتری کدگذاری می‌شوند. عملگرهای اصلی ژنتیک در GEP شامل جهش، انتقال و بازسازی می‌باشد. جهش مربوط به طول کروموزوم است و باید مقدار ثابت داشته باشد. محدوده پیشنهادی برای پارامتر جهش بین ۰/۱ تا ۰/۰۱ است. همچنین مقادیر بین ۰/۰۱ و ۰/۱ برای عملگر انتقال در نظر گرفته می‌شود. عملگر بازسازی به سه نوع یک نقطه‌ای، دو نقطه‌ای و بازسازی ژنی تقسیم‌بندی می‌شود که بر اساس پیشنهاد فریرا مجموع مقادیر آن‌ها برابر ۰/۷ می‌باشد و در نهایت باعث برقراری حداکثر همبستگی میان پارامترهای ورودی شده و مناسب‌ترین مدل را ارائه می‌دهد [۲۴].

این الگوریتم ترکیب یک ساختار درختی و خطی همانند الگوریتم برنامه‌نویسی ژنتیک می‌باشد. ساختار درختی که نمونه‌ای از آن در شکل ۱ نمایش داده شده است به صورت چپ به راست و از پایین به بالا خوانده می‌شود (در این الگوریتم هر درخت بیانگر یک ژن در ساختار توسعه معادله می‌باشد). به طور مثال در شکل ۱ معادله استخراج شده از درخت به صورت معادله زیر نشان داده می‌شود:

$$y = \sqrt{A \times B} + c \quad (1)$$



شکل ۱- نمونه‌ای از درخت بیان ژن

این الگوریتم به طور گسترده در تحقیقات مهندسی به کار گرفته شده است که به عنوان نمونه می‌توان به تحقیقات صورت گرفته توسط فرادنبه و همکارانش در سال ۲۰۱۶ [۲۵] به منظور پیش‌بینی لرزش زمین ناشی از انفجار در سنگ، ارمانی و همکارانش در سال ۲۰۱۸ [۲۶] به منظور پیش‌بینی مقاومت فشاری تک محوره، فرادنبه و طاهری در سال ۲۰۱۹

ارزیابی عملکرد نشان دهنده دقت قابل قبول این مدل‌ها در پیش‌بینی پایداری است. همچنین در مقایسه با روش‌های SVM و FDA، الگوریتم درخت تصادفی برتری دارد [۲۱]. لی و همکاران (۲۰۲۱) به منظور تکمیل ارزیابی تصادفی پایداری پایه در سنگ سخت، شاخص مقاومت زمین شناسی را به فاکتورهای اصلی اضافه نمودند. نتایج نشان داد که عرض پایه و مقاومت فشاری تک محوره نقش مهمی در حفظ پایداری پایه دارند. همچنین شاخص مقاومت زمین‌شناسی تأثیر قابل توجه بر پایه‌هایی دارند که سطح خارجی آن‌ها در حال ورقه شدن است [۲۲]. ژو و همکاران (۲۰۲۳) با ترکیب شبکه عصبی BP و الگوریتم‌های فراابتکاری، پنج مدل برای پیش‌بینی تنش القایی پایه‌ها در روش استخراج کارگاه و پایه توسعه دادند. نتایج نشان داد که این مدل‌ها از عملکرد مناسبی در پیش‌بینی تنش برخوردارند [۲۳].

روش‌های تجربی برای شرایط خاصی توسعه داده شده‌اند و استفاده از آن‌ها با محدودیت همراه است. همچنین در روش‌های عددی خصوصیات مواد و شرایط مرزی ساده‌سازی می‌شوند. امروزه، الگوریتم‌های یادگیری ماشین در ارزیابی پایداری پایه با موفقیت به کار رفته و از دقت بالایی برخوردارند [۲۳]. بنابراین استفاده از روش‌های آسان، سریع، با دقت بالا و کارآمد در ارزیابی پایداری پایه ضروری است. در این تحقیق با استفاده از پایگاه داده شامل ۲۲۷ مورد وضعیت پایداری پایه و الگوریتم برنامه‌نویسی بیان ژن مدلی جهت ارزیابی پایداری پایه توسعه یافته است. به عبارت دیگر، همبستگی میان پایداری پایه با پارامترهای هندسی (عرض و ارتفاع) و تنش پایه توسط روش برنامه‌نویسی بیان ژن (GEP) مورد بررسی قرار می‌گیرد. با توجه به تئوری سطح تأثیر پارامترهای h , w و σ_p بر پایداری پایه مؤثر است. بنابراین با استفاده از این سه پارامتر به توسعه مدل جهت ارزیابی پایداری پایه در مراحل اولیه پرداخته شده است.

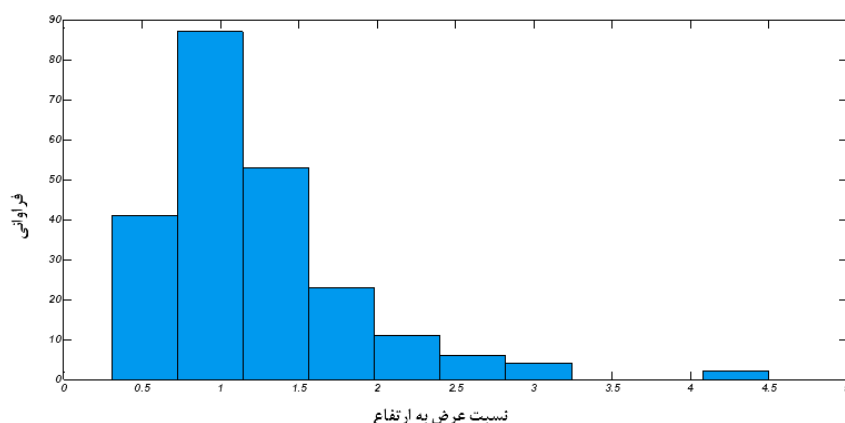
۲- الگوریتم برنامه‌نویسی بیان ژن

برنامه‌نویسی بیان ژن (GEP) اولین بار توسط فریرا در سال ۲۰۱۱ با استفاده از اصول الگوریتم ژنتیک (GA) و برنامه‌نویسی ژنتیک (GP) توسعه یافت. GEP هر مسئله‌ای را مشابه ارزیابی بیولوژیکی مورد تحلیل قرار می‌دهد. به این صورت که مسأله مورد نظر در کروموزوم‌هایی با طول ثابت به

و [۳۳] گردآوری شده است. پایگاه داده اول مربوط به معدن سرب و روی *McArthur River* است که به روش کارگاه و پایه استخراج می‌شود. متوسط تنش وارد بر پایه‌ها در این معدن توسط تئوری سطح تأثیر محاسبه شده و برای تخمین مقاومت پایه از فرمول محصورشدگی لاندن استفاده شده است. همچنین ضریب ایمنی پایه‌های پایدار در این معدن عموماً بزرگتر از ۱٫۴ بوده است. پایگاه داده دوم برگرفته از پایگاه داده ترکیبی مورد استفاده در [۳۴] می‌باشد. در این مورد نیز متوسط تنش وارد بر پایه‌ها توسط تئوری سطح تأثیر، مدل‌سازی دو بعدی المان مرزی و المان محدود و مدل‌سازی سه بعدی المان محدود محاسبه شده است. پایگاه داده شامل دو پارامتر ورودی (نسبت عرض به ارتفاع و تنش پایه) و یک پارامتر خروجی (پایداری پایه) می‌باشد. هیستوگرام فراوانی داده‌های به کار گرفته شده در این مطالعه شامل نسبت عرض به ارتفاع و تنش پایه (پارامترهای ورودی) در شکل‌های ۲ و ۳ نمایش داده شده است. همچنین خلاصه‌ای از ویژگی‌های آماری این پارامترها در جدول ۱ ارائه شده است.

جدول ۱- خلاصه داده‌های مورد استفاده و دسته‌بندی آن‌ها

پارامتر	واحد	نماد	دسته‌بندی	کمینه	بیشینه	متوسط	انحراف معیار
نسبت عرض به ارتفاع پایه	-	w/h	ورودی	۰٫۳۱	۴٫۵	۱٫۲۲	۰٫۶۰۸
تنش وارد بر پایه	MPa	σ_p	ورودی	۱۹	۱۲۷٫۶	۵۲٫۵۳	۲۳٫۶۲۸

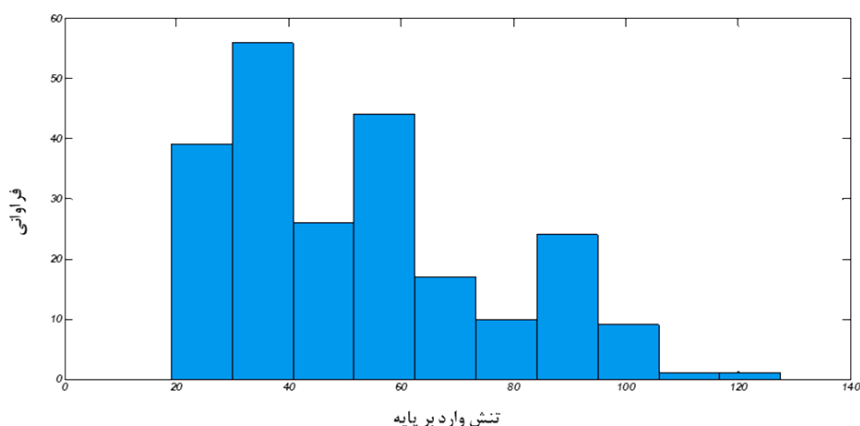


شکل ۲- هیستوگرام فراوانی نسبت عرض به ارتفاع پایه

[۲۷] به منظور پیش‌بینی پدیده انفجار سنگ، کدخدایی و قاسمی در سال ۲۰۱۹ [۲۸] به منظور پیش‌بینی شاخص سایش سرشار، حاجی‌حسینی و همکارانش در سال ۲۰۱۹ [۲۹] به منظور پیش‌بینی همگرایی تونل، اینس و همکارانش در سال ۲۰۱۹ [۳۰] به منظور پیش‌بینی مقاومت فشاری تک محوره در سنگ‌های پیروکلاستیک و بسطامی و همکارانش در سال ۲۰۲۰ [۳۱] به منظور پیش‌بینی هزینه آتشباری در معادن سنگ آهک اشاره کرد. روش‌های مبتنی بر هوش مصنوعی نمی‌تواند معادله‌ای که برای پیش‌بینی یک متغیر وابسته استفاده کرده است را نمایش دهد. اما بر خلاف آن، الگوریتم برنامه‌نویسی بیان ژن با نمایش معادله پیش‌بینی متغیر وابسته، برتری بیشتری نسبت به هوش مصنوعی دارد.

۳- تفسیر داده‌ها

در این مطالعه به منظور پیش‌بینی پایداری پایه‌ها از یک پایگاه داده شامل ۲۲۷ پایه معدنی استفاده شده است. این پایگاه داده از تحقیقات انجام شده در این زمینه شامل [۳۲]



شکل ۳- هیستوگرام فراوانی تنش وارد بر پایه

۴- نتایج و بحث

۴-۱- توسعه مدل

به منظور توسعه یک شاخص جدید برای پیش‌بینی پایداری پایه، الگوریتم GEP در نرم افزار GeneXpro tools مورد استفاده قرار گرفته است. در این نرم افزار برای دستیابی به مرحله نهایی (توسعه مدل ریاضی) بایستی ۶ مرحله انجام شود که شامل وارد نمودن پارامترهای ورودی و خروجی، تعیین تابع برازندگی، تعریف عملگرهای ریاضی، تعیین خصوصیات کروموزوم‌ها، تعریف عملگرهای ژنتیک و تعیین تابع اتصال است. به منظور توسعه مدل GEP، پایگاه داده به صورت تصادفی به دو مجموعه تقسیم شده است. مجموعه اول شامل ۱۸۰ پایه برای آموزش مدل و مجموعه دوم شامل ۴۷ پایه برای ارزیابی دقت مدل توسعه داده شده می‌باشد. لازم به ذکر است پارامتر خروجی (وضعیت پایداری پایه) به صورت صفر-

یک در نظر گرفته شده است. همچنین تابع هدف بر اساس پارامترهای ورودی به صورت $y = f(w, h, \sigma_p)$ است. عملگرهای ریاضی به کار رفته در نرم افزار مربوط به GEP عبارتند از: جمع (+)، تفریق (-)، ضرب (\times)، تقسیم (/)، ریشه دوم (sqrt)، تابع نمایی (Exp)، توان دوم (x^2)، توان سوم (x^3)، ریشه سوم (3Rt)، ریشه پنجم (5Rt)، کسکانت (Csc)، سکانت (sec)، تانژانت معکوس (Atan)، متمم (Not). همچنین پارامترهای اولیه ورودی به نرم‌افزار و مقادیر آن‌ها در این مطالعه در جدول ۲ ارائه شده است. لازم به ذکر است مقادیر عددی جدول ۲ به صورت تصادفی انتخاب شده و تأثیری در نتیجه مدل توسعه‌یافته نخواهد داشت و فقط زمان رسیدن به حالت بهینه را طولانی‌تر می‌کند (علاوه بر این انتخاب اعداد نباید قواعد بیان شده در بخش ۲ را نقض کند).

جدول ۲- پارامترهای اولیه و مقدار آن‌ها

پارامتر	مقدار	پارامتر	مقدار
تعداد کروموزوم	۱۰۰	نرخ جهش	۰٫۴۴
طول سر	۸	نرخ ترانهشی ژن	۰٫۱
تعداد ژن	۳	نرخ ترانهشی توالی جایگذاری	۰٫۱
تابع اتصال	Multiplication (\times)	نرخ ترانهشی توالی جایگذاری ریشه	۰٫۱
تابع برازندگی	Sensitivity/specifity	نرخ وارونگی	۰٫۱
مقدار گرد کردن	۰٫۵	نرخ هم‌نهشی یک نقطه	۰٫۱
ترکیب ژن	۰٫۲	نرخ هم‌نهشی دو نقطه	۰٫۳

پس از اجرای مراحل ذکر شده توسط نرم‌افزار (GeneXpro)

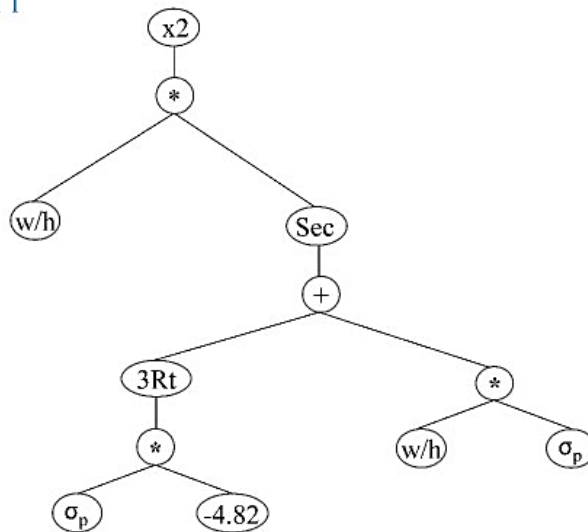
tools)، مدل با ۲۷۰۰ گام برای پیش‌بینی پایداری پایه اجرا شد. درخت بیان هر ژن در شکل ۴ نشان داده شده است. همانطور که قبلاً اشاره شد، مدل نهایی توسعه‌یافته از این الگوریتم دارای حداکثر همبستگی میان پارامترهای هر درخت می‌باشد. بنابراین ساختار درختی، جایگاه پارامترهای ورودی و مقادیر اعداد ثابت در مدل توسعه‌یافته، بر این اساس تشکیل شده است. معادلات ریاضی مربوط به هر درخت به ترتیب به صورت معادلات ۲ تا ۴ استخراج شده است. این معادلات به وسیله تابع اتصال "ضرب" به یکدیگر متصل شده‌اند. و بر اساس آن یک شاخص جدید تحت عنوان شاخص پایداری پایه (PSI) طبق معادله ۵ تعریف می‌شود. سپس یک آستانه احتمال با مقدار ۰.۵ تعریف می‌شود که بیانگر حالت پایداری پایه می‌باشد. به عبارت دیگر زمانی که مقدار PSI کمتر از ۰.۵ باشد بیانگر عدم پایداری پایه می‌باشد.

$$Sub - ET1 = \left[\frac{W}{H} \times \left(\text{Sec} \left((-4.82\sigma_p)^{\frac{1}{3}} + \left(\frac{W}{H} \times \sigma_p \right) \right) \right) \right]^2 \quad (2)$$

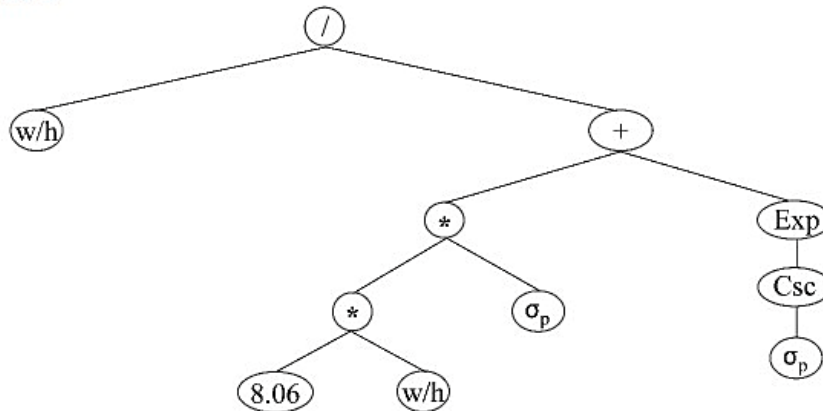
$$Sub - ET2 = \frac{\frac{W}{H}}{\left(8.06 \times \sigma_p \times \frac{W}{H} \right) + \text{EXP}(\text{Csc}(\sigma_p))} \quad (3)$$

$$Sub - ET3 = \text{EXP} \left[\left(\left(\frac{W}{H} \right)^{\frac{1}{3}} \times \sigma_p \right) - \left(37.9 \times \frac{W}{H} \right) \right] \quad (4)$$

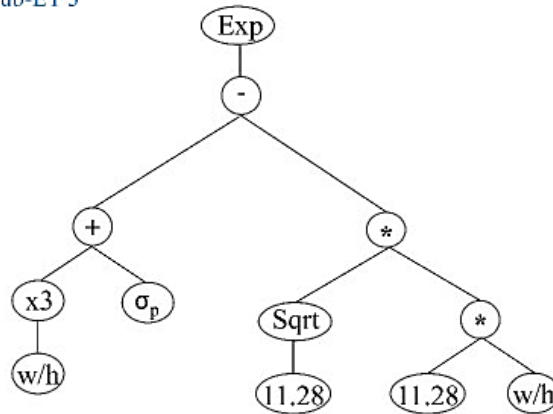
Sub-ET 1



Sub-ET 2



Sub-ET 3



شکل ۴- درخت‌های بیان مربوط به هر ژن

۴-۲- ارزیابی عملکرد مدل

باشد. در این بخش عملکرد مدل توسعه داده شده با داده‌های تست ارزیابی شده و مقدار واقعی PSI با مقدار پیش‌بینی شده آن در جدول ۳ مقایسه شده است.

جهت ارزیابی عملکرد مدل توسعه داده شده ۴۵ مورد از ۲۲۷ نمونه جهت تست مدل GEP به صورت تصادفی انتخاب شد. لازم به ذکر است که داده‌های تست هیچ مشابهتی با داده‌های استفاده شده جهت آموزش مدل ندارد و مستقل از آن می‌-

جدول ۳- مقایسه مقادیر پیش‌بینی شده و واقعی داده‌های تست

شماره	w/h	تنش پایه (مگاپاسکال)	مقدار واقعی	مقدار پیش- بینی	شماره	w/h	تنش پایه (مگاپاسکال)	مقدار واقعی	مقدار پیش‌بینی
۱	۱٫۸	۵۶٫۷	۰	۰	۲۴	۰٫۸	۲۲	۰	۰
۲	۱٫۲۵	۳۷	۰	۰	۲۵	۱٫۵۸	۹۳٫۵	۱	۱
۳	۲	۴۰	۰	۰	۲۶	۱	۴۳	۱	۱
۴	۱٫۴۳	۵۵٫۲	۰	۰	۲۷	۰٫۴۶	۷۲	۱	۱
۵	۰٫۹	۳۲	۰	۰	۲۸	۱	۸۴	۱	۱
۶	۲٫۹۲	۶۳	۰	۰	۲۹	۱٫۴۲	۸۲٫۰۱	۱	۱

۷	۱٫۶	۳۵	۰	۰	۳۰	۱٫۲۴	۳۴	۱	۰
۸	۰٫۸	۵۵	۰	۱	۳۱	۱٫۵	۵۸	۱	۱
۹	۱٫۶۷	۷۲٫۴	۰	۱	۳۲	۰٫۵۶	۲۸	۱	۱
۱۰	۲٫۲	۵۲	۰	۰	۳۳	۱٫۲۵	۸۲٫۹۹	۱	۱
۱۱	۱	۳۲	۰	۰	۳۴	۰٫۶۶	۴۷٫۵	۱	۱
۱۲	۲	۳۵	۰	۰	۳۵	۰٫۸۸	۴۷٫۵	۱	۱
۱۳	۲٫۲۲	۸۶٫۹	۰	۱	۳۶	۰٫۷۵	۵۷٫۰۱	۱	۱
۱۴	۱٫۴	۲۸	۰	۰	۳۷	۰٫۷۶	۵۰	۱	۱
۱۵	۱	۳۱	۰	۰	۳۸	۰٫۹۲	۵۵	۱	۱
۱۶	۱٫۱	۳۵	۰	۰	۳۹	۱٫۲	۵۶	۱	۱
۱۷	۰٫۸	۸۶	۰	۱	۴۰	۰٫۵۵	۶۸٫۹۹	۱	۱
۱۸	۰٫۷۵	۲۹	۰	۰	۴۱	۰٫۹۳	۲۹	۱	۰
۱۹	۱	۳۱٫۷	۰	۰	۴۲	۰٫۶	۴۸	۱	۱
۲۰	۲٫۶	۶۰	۰	۰	۴۳	۰٫۹۲	۵۵	۱	۱
۲۱	۱٫۱	۲۷	۰	۰	۴۴	۱٫۳	۹۸٫۶۱	۱	۱
۲۲	۱٫۳۳	۳۶	۰	۰	۴۵	۱٫۳	۳۵	۱	۰
۲۳	۰٫۴۶	۳۸	۰	۱					

	ناپایدار	پایدار
ناپایدار	19(TP)	5(FN)
پایدار	3(FP)	18(TN)

شکل ۵- ماتریس آشفستگی

با توجه به شکل ۵ و معادلات ۶ تا ۹ مقدار شاخص‌های آماری AC ، SE ، SP و MCC به ترتیب برابر با $۰٫۸۶$ ، $۰٫۷۹$ ، $۰٫۸۲$ و $۰٫۶۵$ به دست آمده است. AC و SE از ۰ تا ۱ تغییر می‌کنند که هر چه به ۱ نزدیکتر باشد نشان می‌دهد کیفیت مدل زیاد است؛ MCC معیاری برای کیفیت طبقه‌بندی دوگانه است که بین -۱ و $+۱$ متغیر است؛ مقدار $+۱$ نشان‌دهنده پیش‌بینی عالی است، مقدار ۰ یعنی بهتر از پیش‌بینی تصادفی نیست و مقدار -۱ نشان‌دهنده مغایرت کامل بین مقادیر پیش‌بینی شده و مشاهده شده می‌باشد [۳۵]. بنابراین با توجه به مقادیر به دست آمده برای این شاخص‌ها می‌توان نتیجه گرفت که مدل توسعه داده شده از کیفیت بسیار خوبی برخوردار است.

به منظور ارزیابی عملکرد الگوریتم برنامه‌نویسی بیان ژن نسبت به سایر الگوریتم‌ها، دقت مدل توسعه داده شده با مدل-

ماتریس آشفستگی ابزاری مناسب برای ارزیابی کیفیت مدل‌ها در مسائل طبقه‌بندی است. شکل ۵ این ماتریس را برای مطالعه کنونی نشان می‌دهد. با استفاده از این ماتریس، شاخص‌های آماری مختلفی مانند دقت (AC)، حساسیت (SE)، عدم اشتراک (SP) و ضریب همبستگی متو (MCC) می‌تواند برای ارزیابی کیفیت یک مدل تعیین شود. این شاخص‌های آماری با استفاده از روابط زیر محاسبه می‌شوند [۳۵]:

$$AC = \frac{TP + TN}{TP + FP + TN + FN} \quad (۶)$$

$$SE = \frac{TP}{TP + FN} \quad (۷)$$

$$SP = \frac{TN}{FP + TN} \quad (۸)$$

$$MCC = \frac{(TP \times TN) - (FP \times FN)}{\sqrt{(TP + FN) \times (TP + FP) \times (TN + FP) \times (TN + FN)}} \quad (۹)$$

های پیشنهاد شده توسط قاسمی و همکاران (۲۰۱۷)، دینگ و همکاران (۲۰۱۸)، لیانگ و همکاران (۲۰۲۰) و احمد و همکاران (۲۰۲۰) مقایسه شده است (جدول ۴). مقایسه پایگاه داده و دقت این مدل‌ها با مدل پیشنهاد شده نشان می‌دهد روش برنامه‌نویسی بیان ژن عملکرد بهتری نسبت به سایر الگوریتم‌ها دارد.

جدول ۴- مقایسه دقت مدل توسعه داده شده و سایر مدل‌ها

دقت مدل (درصد)	الگوریتم‌ها	تعداد داده‌ها	نویسندگان
۸۲	ماشین بردار پشتیبان (SVC)	۱۷۸	قاسمی و همکاران (۲۰۱۷) [۳۶]
۸۴	J48		
۸۱	تقویت‌گرادیان تصادفی (SGB)	۲۰۵	دینگ و همکاران (۲۰۱۸) [۳۷]
۸۳	درخت تصمیم تقویت‌گرادیان (GBDT)	۲۳۶	لیانگ و همکاران (۲۰۲۰) [۲۰]
۸۳	تقویت‌گرادیان بینهایت (XGBoost)		
۸۲	ماشین تقویت‌گرادیان سبک (LightGBM)		
۸۳	درخت تصمیم C4.5	۴۶	احمد و همکاران (۲۰۲۰) [۲۱]

- توسعه مدل در نرم افزار بر اساس عملگرهای ژنتیک انجام شده است و اعتبارسنجی متقابل در نظر گرفته نمی‌شود.
- سایر پارامترهای مؤثر بر پایداری پایه مانند خواص مکانیک سنگی در این مدل لحاظ نشده است. زیرا علاوه بر دشواری دستیابی به این اطلاعات، هدف از توسعه مدل ارزیابی اولیه از پایداری پایه در مراحل طراحی است.

۵- نتیجه‌گیری

در این مقاله، شاخص جدیدی با استفاده از الگوریتم برنامه‌نویسی بیان ژن برای پیش‌بینی پایداری پایه توسعه داده شده است. نسبت عرض به ارتفاع و تنش وارد بر پایه پارامترهای ورودی به الگوریتم را تشکیل می‌دهند. از نظر تئوری خصوصیات مقاومتی پایه تأثیر به‌سزائی در پایداری پایه دارد. مقاومت پایه با مطالعات مکانیک سنگی به دست می‌آید که مستلزم زمان و هزینه زیادی است. با استفاده از مشخصات هندسی (عرض و ارتفاع پایه) و تنش وارد بر پایه، بدون مشخص بودن مقاومت سنگ، می‌توان ارزیابی اولیه از پایداری پایه از طریق مدل توسعه یافته با عملکرد بالا انجام داد. به منظور ارزیابی عملکرد مدل، ۴۵ نمونه تصادفی از دو پایگاه

۳-۴- مزایا و محدودیت‌های مدل

مدل *GEP* پیشنهادی یک چهارچوب اصولی برای پیش‌بینی پایداری پایه ارائه می‌دهد که نشان دهنده ارتباط بین پایداری پایه با مشخصات هندسی و تنش وارد بر پایه است. به علت سادگی، عملکرد بالا، سرعت و دقت زیاد، الگوریتم برنامه نویسی بیان ژن در مطالعات مختلف مهندسی مورد استفاده قرار گرفته است. ساختار درختی این الگوریتم، استخراج معادلات مربوطه را آسان نموده است. دقت زیاد در روش‌های یادگیری ماشین منجر به استفاده گسترده‌تر آن‌ها نسبت به معیارهای تجربی شده است. این روش‌ها به دو دسته هوش مصنوعی و روش‌های مبتنی بر درخت تقسیم می‌شوند. تعداد زیاد داده‌های مورد استفاده و دقت بالا مزایای مدل توسعه داده شده می‌باشند. همچنین محدودیت‌های این مدل عبارتند از:

- مدل پیشنهادی تنها قادر به پیش‌بینی پایداری یا ناپایداری پایه است و میزان پایداری پایه را مورد ارزیابی قرار نمی‌دهد.
- این مدل بر اساس پایگاه داده محدود توسعه داده شده است و در محدوده پارامترهای ورودی کاربرد دارد. دستیابی به یک مدل جامع‌تر نیازمند استفاده از داده‌های بیشتر است.

شرح	واحد	نماد
عرض پایه	m	W
ارتفاع پایه	m	H
تنش وارد بر پایه	MPa	σ_p
تعداد موارد پایدار که ناپایدار پیش‌بینی شده	-	FP
تعداد موارد ناپایدار که پایدار پیش‌بینی شده	-	FN
تعداد موارد ناپایدار که به درستی پیش‌بینی شده	-	TP
تعداد موارد پایدار که به درستی پیش‌بینی شده	-	TN

داده شامل ۲۲۷ پایه معدنی انتخاب و مقدار شاخص PSI برای آن‌ها محاسبه شده است. سپس ماتریس آشفستگی برای مقایسه مقادیر واقعی و پیش‌بینی شاخص پایداری تشکیل شد. در مجموع، وضعیت پایداری ۳۷ پایه به درستی پیش‌بینی شده است. مقدار شاخص‌های آماری دقت، حساسیت، عدم اشتراک و ضریب همبستگی متئو به ترتیب برابر با ۰٫۸۲، ۰٫۷۹، ۰٫۸۶ و ۰٫۶۵ به دست آمد که نشان می‌دهد مدل GEP عملکرد مطلوبی دارد و از توانایی قابل قبول برای پیش‌بینی پایداری پایه برخوردار است. روش‌های تحلیلی، عددی و تجربی کاربرد قابل توجهی در ارزیابی و پیش‌بینی پایداری پایه دارند. لذا پیشنهاد می‌شود عملکرد مدل پیشنهادی در مقایسه با این روش‌ها از طریق مطالعه موردی در یک معدن کارگاه و پایه مورد بررسی قرار گیرد.

۶- فهرست نمادها

۷- منابع

- [1] Yu, Y., K.-Z. Deng, and S.-E. Chen, *Mine size effects on coal pillar stress and their application for partial extraction*. Sustainability, 2018. **10**(3): p. 792.
- [2] Malli, T., et al., *Numerical analysis of underground space and pillar design in metalliferous mine*. Journal of African Earth Sciences, 2017. **134**: p. 365-372.
- [3] Esterhuizen, G., D. Dolinar, and J. Ellenberger, *Assessment of stable and failed pillars in underground limestone mines*. Mining Engineering (to be published), 2008.
- [4] Ghasemi, E., M. Ataei, and K. Shahriar, *An intelligent approach to predict pillar sizing in designing room and pillar coal mines*. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences, 2014. **65**: p. 86-95.
- [5] Wagner, H., *Pillar design in coal mines*. Journal of the Southern African Institute of Mining and Metallurgy, 1980. **80**(1): p. 37-45.
- [6] Wagner, H. *The role of pillars in small underground mines*. in *International Conference on safety and Environmental Aspects of Mining*. 2003.
- [7] Esterhuizen, G., D.R. Dolinar, and J.L. Ellenberger. *Pillar strength and design methodology for stone mines*. in *Proceedings of the 27th international conference on ground control in mining*. Morgantown WV: West Virginia University. 2008.

- [8] Kortnik, J., *Optimization of the high safety pillars for the underground excavation of natural stone blocks*. Acta Geotechnica Slovenica, 2009. **2009**: p. 1.
- [9] Jalali, S.M.E. and M. Njafi, *Optimization of Pillar Size in Faryab Chromite Mine Considering Extraction Sequences*. Journal of Mining Engineering, 2012. **7**(15): p. 35-47.
- [10] Malan, D. and J. Napier, *Design of stable pillars in the Bushveld Complex mines: a problem solved?* 2012.
- [11] Dehghan, S., et al., *3-D modeling of rock burst in pillar No. 19 of Fetr6 chromite mine*. International Journal of Mining Science and Technology, 2013. **23**(2): p. 231-236.
- [12] Abdollahipour, A. and H. Ghannadshirazi, *Stability analysis and determination of rock pillar between two adjacent caverns in different regions of Asmari formation in Iran*. International Journal of Mining Science and Technology, 2014. **24**(5): p. 593-596.
- [13] Cording, E.J., Y.M.A. Hashash, and J. Oh, *Analysis of pillar stability of mined gas storage caverns in shale formations*. Engineering Geology, 2015. **184**: p. 71-80.
- [14] Ďuriš, L. and R. Šňupárek, *Numerical analysis of the stability of lignite pillars*. Procedia Engineering, 2017. **191**: p. 310-316.
- [15] Napa-García, G. and V.N. Torres, *Applicability of failure strain for the stability evaluation of square pillars in room and pillar mining*. 2017.
- [16] Rafiei Renani, H. and C.D. Martin, *Modeling the progressive failure of hard rock pillars*. Tunnelling and Underground Space Technology, 2018. **74**: p. 71-81.
- [17] Sinha, S. and G. Walton, *A progressive S-shaped yield criterion and its application to rock pillar behavior*. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences, 2018. **105**: p. 98-109.
- [18] Tewari, S., et al., *Crown pillar design in highly dipping coal seam*. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences, 2018. **103**: p. 12-19.
- [19] Yu, Y., et al., *An improved method for long-term stability evaluation of strip mining and pillar design*. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences, 2018. **107**: p. 25-30.
- [20] Liang, W., et al., *Predicting hard rock pillar stability using GBDT, XGBoost, and LightGBM algorithms*. Mathematics, 2020. **8**(5): p. 765.
- [21] Ahmad, M., et al., *Predicting the pillar stability of underground mines with random trees and C4. 5 decision trees*. Applied Sciences, 2020. **10**(18): p. 6486.
- [22] Li, C., et al., *Stochastic assessment of hard rock pillar stability based on the geological strength index system*. Geomechanics and Geophysics for Geo-Energy and Geo-Resources, 2021. **7**: p. 1-24.
- [23] Zhou, J., et al., *Hybridizing five neural-metaheuristic paradigms to predict the pillar stress in bord and pillar method*. Frontiers in Public Health, 2023. **11**: p. 22.
- [24] Shirani Faradonbeh, R., et al., *Prediction of ground vibration due to quarry blasting based on gene expression programming: a new model for peak particle velocity prediction*. International journal of environmental science and technology, 2016. **13**: p. 1453-1464.

- [25] Faradonbeh, R.S., et al., *Prediction of ground vibration due to quarry blasting based on gene expression programming: a new model for peak particle velocity prediction*. International journal of environmental science and technology, 2016. **13**(6): p. 1453-1464.
- [26] Armaghani, D.J., et al., *Uniaxial compressive strength prediction through a new technique based on gene expression programming*. Neural Computing and Applications, 2018. **30**(11): p. 3523-3532.
- [27] Faradonbeh, R.S. and A. Taheri, *Long-term prediction of rockburst hazard in deep underground openings using three robust data mining techniques*. Engineering with Computers, 2019. **35**(2): p. 659-675.
- [28] Kadkhodaei, M. and E. Ghasemi, *Development of a GEP model to assess CERCHAR abrasivity index of rocks based on geomechanical properties*. Journal of Mining and Environment, 2019. **10**(4): p. 917-928.
- [29] Hajihassani, M., et al., *A gene expression programming model for predicting tunnel convergence*. Applied Sciences, 2019. **9**(21): p. 4650.
- [30] İnce, İ., et al., *Estimation of uniaxial compressive strength of pyroclastic rocks (Cappadocia, Turkey) by gene expression programming*. Arabian Journal of Geosciences, 2019. **12**(24): p. 756.
- [31] Bastami, R., et al., *Prediction of blasting cost in limestone mines using gene expression programming model and artificial neural network*. Journal of Mining and Environment, 2020(Articles in Press).
- [32] Schubert, C. and E. Villaescusa. *An approach to hard rock pillar design at the McArthur River Mine. in The AusIMM Annual Conference, Mount Isa*. 1998.
- [33] Wattimena, R., *Predicting the stability of hard rock pillars using multinomial logistic regression*. International journal of rock mechanics and mining sciences, 2014(71): p. 33-40.
- [34] Lunder, P. and R. Pakalnis, *Determination of the strength of hard-rock mine pillars*. World Mining Express, 1998. **4**: p. 24-28.
- [35] Ghasemi, E. and H. Gholizadeh, *Development of two empirical correlations for tunnel squeezing prediction using binary logistic regression and linear discriminant analysis*. Geotechnical and Geological Engineering, 2019. **37**: p. 3435-3446.
- [36] Ghasemi, E., H. Kalhori, and R. Bagherpour, *Stability assessment of hard rock pillars using two intelligent classification techniques: A comparative study*. Tunnelling and Underground Space Technology, 2017. **68**: p. 32-37.
- [37] Ding, H., et al., *Prediction of pillar stability for underground mines using the stochastic gradient boosting technique*. IEEE Access, 2018. **6**: p. 69253-69264.



Predicting pillar stability using gene expression programming algorithm in underground stope and pillar mines

Masoud Khalifegholi¹; Lohrasb Faramarzi²; Mohammad Hossein Kadkhodaei¹; Raheb Bagherpour³
1. Department of Mining Engineering, Isfahan University of Technology, Isfahan, Iran

Received: 2023. March .02; Accepted: 2023. April .10

(* corresponding author: bagherpour@iut.ac.ir)

Keywords

Underground mining
Pillar stability index
Partial extraction
Gene expression programming

Final English Extended Abstract

Summary

In this study, the correlation between pillar stability with geometric parameters (width and height) and pillar stress has been investigated by the gene expression programming (GEP) method. The proposed model is implemented in a database taken from previous studies. The performance of the model was evaluated by 4 statistical indicators of accuracy, sensitivity, specificity, and

Matthew's correlation coefficient, whose values were obtained as 0.82, 0.79, 0.86, and 0.65, respectively. The results showed that the developed model has good accuracy and can predict the stability of pillars.

Introduction

The stope and pillar method is one of the partial extraction methods and it significantly helps to control subsidence. One of the important issues in the design of pillars is to evaluate their stability. Predicting the stability of pillars in underground mines is of particular importance. In this study, the correlation between pillar stability with geometric parameters (width and height) and pillar stress has been investigated by the gene expression programming (GEP) method. The proposed model is implemented in a database of two previous studies. The performance of the model was evaluated by 4 statistical indicators. According to the values obtained for these indicators, the proposed model has good quality and provides a reliable prediction of the pillar stability.

Methodology and Approaches

A database including 227 pillars was used to predict the pillar stability. The database contains two inputs (width to height ratio and pillar stress) and one output (pillar stability).

In GeneXprotools software, the model was run and the expression tree of each gene was determined. Mathematical equations related to each tree have been extracted and are connected to each other by the "multiplication" connection function and a new index called Pillar Stability Index (PSI) is defined. Then, a probability threshold with a value of 0.5 is defined, which represents the pillar stability state.

In order to evaluate the performance of the developed model, 45 cases from 227 samples were randomly selected to test GEP model. By using confusion matrix, various statistical indicators such as accuracy (AC), sensitivity (SE), specificity (SP) and Matthew's correlation coefficient (MCC) can be determined to evaluate the quality of a model.

Results and Conclusions

In this article, a new index has been developed using the gene expression algorithm to predict the pillar stability. The ratio of width to height and the pillar stress are the input parameters to the algorithm. In order to evaluate the performance of the model, 45 random samples were selected from two databases including 227 pillars and the value of PSI index was calculated for them. Then the confusion matrix was formed to compare the actual and predicted values of the stability index. The value of the statistical indicators of accuracy, sensitivity, specificity and Matthew's correlation coefficient was obtained as 0.82, 0.79, 0.86 and 0.65 respectively, which showed that the GEP model has a good performance and has an acceptable ability to predict the pillar stability.
