

پیش‌بینی پدیده پس‌شکست در حفر تونل با روش‌های بهینه‌سازی هوشمند در معدن زغال سنگ طزره

عادل متحدی^۱؛ فرهنگ سرشکی^{۲*}؛ محمد عطائی^۳

۱- دانشجوی کارشناسی ارشد استخراج معدن، دانشکده معدن، نفت و ژئوفیزیک، دانشگاه شاهرود؛ adelmotahedi@gmail.com

۲- دانشیار دانشکده معدن، نفت و ژئوفیزیک، دانشگاه شاهرود؛ f.sereshki@gmail.com

۳- استاد دانشکده معدن، نفت و ژئوفیزیک، دانشگاه شاهرود؛ ataei@shahroodut.ac.ir

(دریافت ۳۰ شهریور ۱۳۹۴، پذیرش ۳ بهمن ۱۳۹۴)

چکیده

با توجه به نیازهای بشر مانند تأمین مواد معدنی، حمل و نقل، ذخیره سازی زیرزمینی و...، حفر تونل به یک امر بدیهی در جهان امروز تبدیل شده است. پدیده پس‌شکست یکی از پدیده‌های نامطلوبی است که در حین حفر تونل‌ها به ویژه هنگامی که از روش چالزنی و انفجار استفاده می‌شود، با آن مواجه هستیم. پدیده‌ی پس‌شکست باعث کاهش ایمنی محیط کار و افزایش هزینه‌های عملیاتی می‌شود. اولین قدم در فرآیند کنترل و کاهش آثار زیان بار این پدیده، پیش‌بینی آن در فرآیند حفر تونل‌ها است. عوامل تأثیرگذار بر پدیده پس‌شکست به دو دسته اصلی قابل کنترل (پارامترهای انفجار) و غیرقابل کنترل (پارامترهای زمین‌شناسی) تقسیم‌بندی می‌شوند و تمام این عوامل به صورت غیر خطی به یکدیگر وابسته هستند. در این مطالعه، ۵۲ دسته از داده‌های عوامل تأثیرگذار و پس‌شکست به عنوان داده‌های ورودی و خروجی برای پیش‌بینی پس‌شکست با روش‌های رگرسیون چندگانه خطی و غیر خطی، شبکه عصبی مصنوعی، منطق فازی و سیستم استنتاج فازی-عصبی تطبیقی بکار گرفته شدند. مقدار ضریب تعیین مدل‌های رگرسیون چندگانه خطی و غیرخطی، شبکه عصبی مصنوعی، منطق فازی و سیستم استنتاج فازی-عصبی تطبیقی به ترتیب برابر با ۰/۷۱، ۰/۷۳، ۰/۸۰، ۰/۹۵ و ۰/۹۱ به دست آمده است. نتایج نشان دهنده‌ی آن است که روش‌های منطق فازی و سیستم استنتاج فازی-عصبی تطبیقی پیش-بینی بهتری را نسبت به سایر روش‌ها انجام داده‌اند. همچنین، تحلیل حساسیت نشان داد که مقدار بارسنگ تأثیرگذارترین پارامتر بر روی پس‌شکست است. با آگاهی از وقوع پس‌شکست، می‌توان روش‌های کنترلی و جلوگیری کننده‌ای را برای کاهش آثار زیان بار این پدیده بکار گرفت و در نهایت باعث بهبود عملکرد پروژه شد.

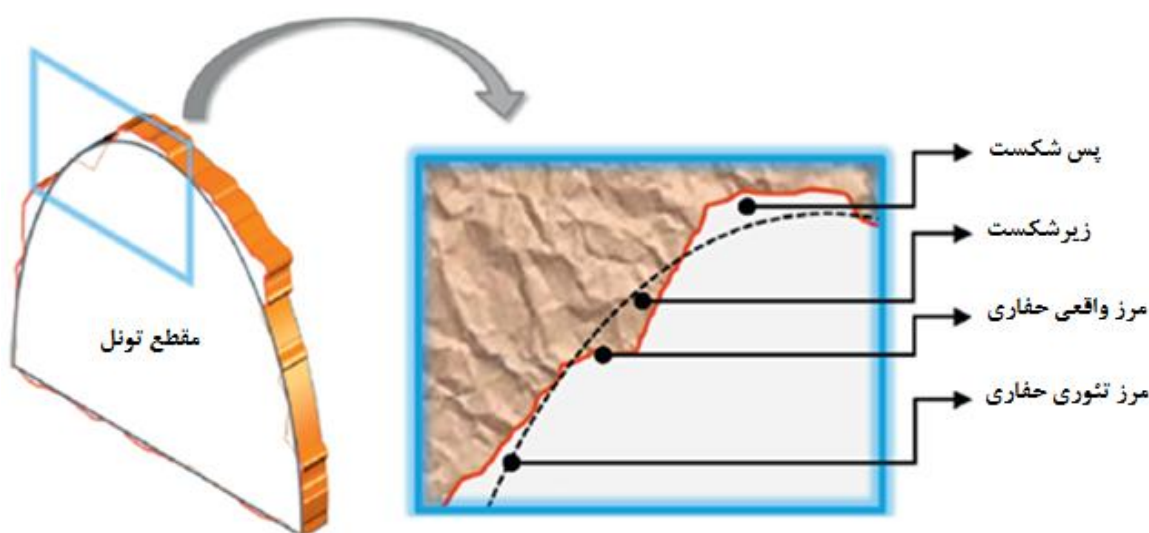
کلمات کلیدی

پس‌شکست، پیش‌بینی، تونل، رگرسیون چندگانه خطی و غیرخطی، شبکه عصبی مصنوعی، منطق فازی، سیستم استنتاج فازی-عصبی تطبیقی

۱- مقدمه

بدیهی در عملیات انفجار است [۳]. پس شکست میزان حفاری اضافه‌ای است که در مقطع تونل رخ می‌دهد و باعث می‌شود تا مقطع ایجاد شده با مقطعی که به صورت تئوری طراحی شده است تفاوت داشته باشد. علاوه بر پدیده پس شکست، پدیده دیگری نیز در طی حفاری تونل‌ها روی می‌دهد. این پدیده "Under break" نامیده می‌شود که معادل فارسی آن زیرشکست است. این پدیده زمانی ایجاد شده که بخشی از سنگ‌های موجود در مقطع تونل، که می‌بایست در عملیات حفاری برداشته شوند، در دیواره تونل باقی بمانند. شکل (۱) نمونه‌ای از پس شکست و زیرشکست ایجاد شده در محیط تونل را نشان می‌دهد.

با توجه به نیازهای مختلف بشر از جمله تأمین مواد معدنی، حمل و نقل، تولید نیرو، ذخیره‌سازی‌های زیرزمینی، انتقال آب، فاضلاب و...، حفر تونل و فضاهای زیرزمینی یک امر بدیهی است. بدون در نظر گرفتن نوع کاربری و هدف از ساخت تونل، تمام آنها در مراحل حفاری خود با پدیده‌ای مواجه هستند که "Over break" نامیده می‌شود [۱]. معادل فارسی این اصطلاح، "پس شکست" گفته می‌شود [۲]. تأثیر این پدیده هنگامی که روش سنتی چالزنی و انفجار بکار گرفته شود، اهمیتی چندین برابر پیدا می‌کند. این پدیده مانند میزان خردایش و پیشروی یکی از نتایج



شکل ۱: پس شکست و زیر شکست در محیط تونل [۳].

باید بتوان آن را پیش‌بینی کرد. پیش‌بینی پس شکست اولین قدم در توسعه سیستم مدیریت پس شکست است. هدف از این پیش‌بینی جلوگیری از ایجاد هزینه‌های اضافه تا حد قابل قبول و نیز افزایش میزان بهره‌وری است. یک سؤال رایج در اجرای پروژه‌های زیرزمینی این است که آیا نحوه‌ی اجرای طرح انفجار باعث وقوع پس شکست شده است یا وضعیت و کیفیت توده سنگ؟ و یا اینکه هر دو این موارد علت وقوع آن بوده‌اند؟ از این روی، برای پیش‌بینی پس شکست ابتدا نیاز است که عوامل تأثیرگذار بر روی آن را به خوبی شناسایی و بررسی کرده و به چنین سوالاتی پاسخ داد.

روش چالزنی و انفجار به علت هزینه سرمایه‌گذاری پایین و همچنین انعطاف‌پذیری و سازگاری بالا در مقابل تغییرات شرایط زمین، یکی از اولین گزینه‌هایی است که برای حفاری تونل در سنگ مدنظر قرار می‌گیرد. علاوه بر آن، به علت پیشرفت‌های صورت گرفته در زمینه‌ی فناوری این روش، معدنکاری زیرزمینی نیز مؤثرتر شده است [۳، ۱]. اما با تمام این مزایا، تأثیر منفی انفجار روی محیط تونل (پس شکست)، باعث کاهش ایمنی، افزایش زمان عملیات، افزایش نگهداری و ترقیق ماده معدنی می‌شود. تأثیرات منفی ذکر شده در نهایت منجر به افزایش هزینه‌های عملیاتی پروژه خواهند شد. بنابراین، برای کاهش تأثیرات زیان بار این پدیده، بایستی از روش‌های کنترلی و جلوگیری کننده استفاده کرد. برای کنترل کردن این پدیده ابتدا

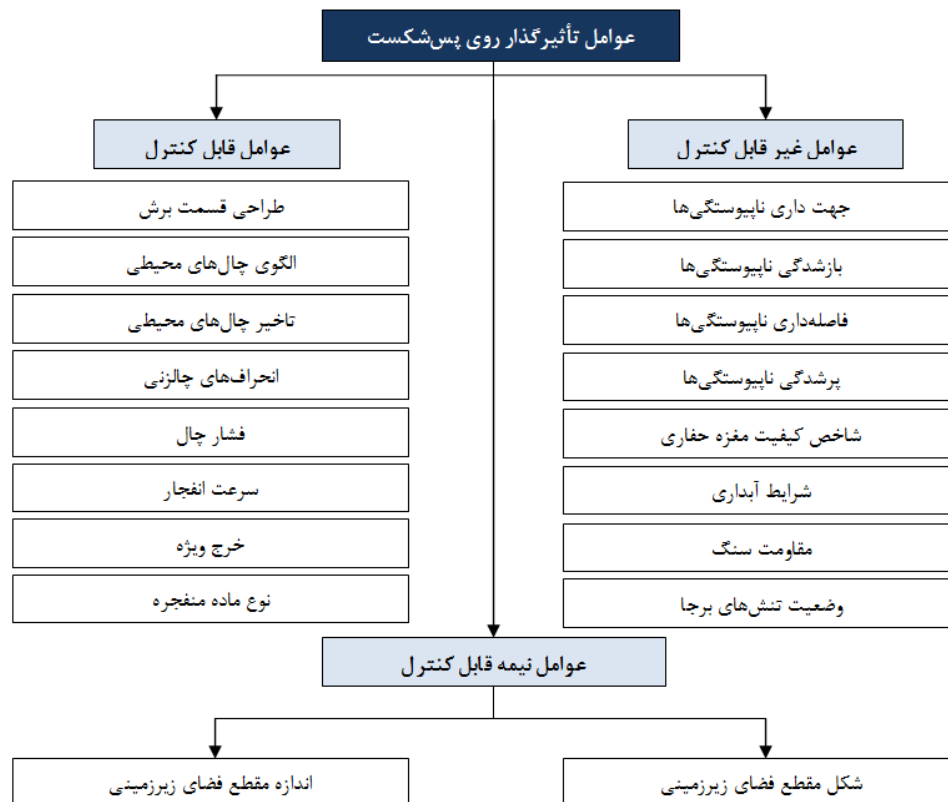
۱-۱- عوامل تأثیرگذار بر روی پدیده پس‌شکست

نیست که قسمت برش تأثیری در وقوع پس‌شکست نداشته باشد. حتی یک الگوی انفجار خوب اگر ضعیف اجرا شود، می‌تواند نتایج بدی برای محیط تونل داشته باشد. به طور خاص، جانمایی صحیح چال‌ها و چالزنی با دقت آنها اهمیت زیادی دارند. بیشتر پس‌شکست‌ها به دلیل چال‌هایی اتفاق می‌افتند که دچار همگرایی یا واگرایی هستند و یا سر وقت و ترتیب خود منفجر نمی‌شوند. ذکر این نکته مهم است که متصدی چالزنی باید به خاطر دقت و کیفیت چالزنی خود مورد ستایش قرار بگیرد، نه به خاطر طولی که در هر شیفت چالزنی می‌کند [۳، ۵، ۴].

دسته‌ی دیگری از عوامل تأثیرگذار بر روی پدیده پس‌شکست نیز وجود دارند که عوامل نیمه قابل کنترل گفته می‌شوند. اهمیت عوامل نیمه قابل کنترل نسبت به سایرین کمتر است. این عوامل شامل اندازه و شکل مقطع تونل می‌شوند. در حالت کلی مقاطع با شکل پیچیده پس‌شکست بیشتری را ایجاد می‌کنند. همچنین تونل‌های بزرگتر باعث تغییر شکل بیشتر لایه‌ها و پس‌شکست زیادتر می‌شوند [۶]. در شکل (۲) عوامل تأثیرگذار بر روی پدیده پس‌شکست ذکر شده است.

عوامل تأثیرگذار بر روی پدیده پس‌شکست به طور کلی در دو گروه اصلی و مهم طبقه‌بندی می‌شوند: عوامل غیرقابل کنترل (پارامترهای زمین‌شناسی) و عوامل قابل کنترل (پارامترهای انفجار).

عوامل غیرقابل کنترل عواملی هستند که مهندسين در آنها نقشی نداشته و به طبیعت توده سنگ و مشخصات محل حفاری مربوط هستند. در واقع این عوامل توسط طبیعت دیکته می‌شوند. این عوامل بیشتر شامل ویژگی‌های ناپیوستگی‌های ساختاری توده سنگ می‌شوند. ویژگی‌های ناپیوستگی‌ها بخصوص جهت داری آنها در وقوع پدیده پس‌شکست تأثیر زیادی دارند و باعث تأثیرگذاری روی کیفیت فرآیند انفجار می‌شوند. در مقابل، عوامل قابل کنترل عواملی هستند که مهندسين در آنها نقش داشته و با تصحیح آنها طی حفر تونل، می‌توان وقوع پس‌شکست را مدیریت کرد. این امکان همواره وجود دارد که پس‌شکست به علت طراحی ضعیف یک الگوی انفجار ایجاد شود. در این بین، طراحی ضعیف بخش چال‌های محیطی بیشترین تأثیر را در وقوع پس‌شکست دارند. اما این بدان معنی



شکل ۲: عوامل تأثیرگذار بر روی پدیده‌ی پس‌شکست

۱-۲- تاریخچه تحقیقات

افزایش ترقیق ماده معدنی در تونل‌های معدنی و کاهش پایداری توده سنگ پیرامون تونل به علت خسارت زدن به آن می‌شود. تمام موارد گفته شده باعث کاهش بهره‌وری پروژه و بروز مشکلات مدیریتی و در نهایت افزایش هزینه کلی تمام شده عملیات می‌شود.

بر اساس آمار ارائه شده، هزینه تأمین نگهداری اضافه به دلیل وقوع پس‌شکست به ۱۵ تا ۱۸ درصد هزینه‌ی کلی ساخت و ساز می‌رسد [۲۲]. با توجه به موارد گفته شده با پیش‌بینی و در نهایت کنترل پدیده پس‌شکست می‌توان در هزینه تمام شده‌ی پروژه‌ها به مقدار زیادی صرفه‌جویی کرد. در این تحقیق نیز با استفاده از روش‌های بهینه‌سازی هوشمند و به‌کارگیری اطلاعات عوامل تأثیرگذار بر روی پدیده پس‌شکست، سعی شده است، توانایی این روش‌ها برای پیش‌بینی پس‌شکست مورد ارزیابی قرار گیرد. برای ساخت مدل‌های پیش‌بینی کننده، نیاز به جمع‌آوری اطلاعات مربوط به داده‌های ورودی (عوامل تأثیرگذار) و داده‌ی خروجی (مقدار پس شکست) است. در ادامه نحوه‌ی جمع‌آوری این اطلاعات شرح داده شده است.

سابقه تحقیقات در زمینه پیش‌بینی پدیده پس‌شکست بسیار گسترده است. محققین بسیاری طی سال‌های گذشته سعی در ارائه روشی مناسب و دقیق برای پیش‌بینی این پدیده داشته‌اند. در جدول (۱) نحوه‌ی تحقیقات صورت گرفته توسط افراد مختلف آورده شده است [۱۲-۱۳، ۱۴، ۱۵، ۱۶]. تحقیقات مختلفی نیز طی سال‌های گذشته در زمینه‌های مرتبط با پدیده‌ی پس‌شکست و همچنین استفاده از روش‌های بهینه‌سازی هوشمند به منظور پیش‌بینی صورت گرفته است. این تحقیقات در جدول (۲) آورده شده است [۳۲-۳۳، ۳۴].

۱-۳- اهمیت و ضرورت پیش‌بینی پس‌شکست

پدیده پس‌شکست تأثیر نامطلوبی بر روند عملیات ساخت و ساز تونل می‌گذارد و با افزایش مقدار آن، فرآیندهای نامطلوب بیشتر می‌شوند. وقوع این پدیده باعث افزایش هزینه‌های نگهداری به علت نیاز به پر کردن محل‌های اضافه حفاری شده، افزایش زمان عملیات و کاهش بهره‌وری به علت انجام کارهای بی‌حاصل،

جدول ۱: تحقیقات صورت گرفته در زمینه پیش‌بینی پس‌شکست

نحوه پیش‌بینی پس‌شکست	سال	مؤلف
ارائه رابطه تجربی بین جهت داری ناپیوستگی‌ها و جهت تونل	۱۹۷۶	Thidemann
تعیین سطوح خسارت انفجار با استفاده از سرعت ذره‌ای ماکزیمم	۱۹۷۹	Holmberg & Persson
تعیین سطوح خسارت انفجار با استفاده از سرعت ذره‌ای ماکزیمم	۱۹۸۲	Oriurd
تعیین سطوح خسارت انفجار با استفاده از سرعت ذره‌ای ماکزیمم	۱۹۸۵	Rustan et al
تعیین عمق پس‌شکست با استفاده از فاصله داری ناپیوستگی‌ها	۱۹۸۸	Bajmholt
تعیین سطوح خسارت انفجار با استفاده از سرعت ذره‌ای ماکزیمم	۱۹۹۵	Dunn & Meyer
تعیین سطوح خسارت انفجار با استفاده از سرعت ذره‌ای ماکزیمم	۱۹۹۶	Bogdanhoff
ارائه رابطه تجربی بین شاخص کیفیت توده سنگ و خرج ویژه چال‌های محیطی	۱۹۹۶	Ibarra et al
ترکیب روابط سرعت ذره‌ای ماکزیمم و مقاومت کششی سنگ	۱۹۹۸	Dinis da gama
تعیین سطوح خسارت انفجار با استفاده از سرعت ذره‌ای ماکزیمم	۲۰۰۳	Dey & Murthy
ارائه رابطه تجربی بین پارامترهای سنگ، طرح انفجار و مواد منفجره	۲۰۰۴	Dey
تعیین ارتباط بین پس‌شکست، نوع لیتولوژی و امتیاز توده سنگ	۲۰۰۶	Schmitz et al
ساخت مدل آنالیز تفکیک کننده بیز بر اساس جهت داری و گسترش ناپیوستگی‌ها	۲۰۰۸	Feng qiang et al
تعیین سطوح خسارت انفجار با استفاده از سرعت ذره‌ای ماکزیمم	۲۰۱۰	Katti et al
استفاده از رگرسیون چنگانه و شبکه عصبی بر اساس پارامترهای زمین‌شناسی	۲۰۱۳	Jang & Topal
استفاده از شبکه عصبی موجکی بر اساس پارامترهای زمین‌شناسی	۲۰۱۳	Sun et al

جدول ۲: تحقیقات صورت گرفته در زمینه‌های مرتبط با پس‌شکست و استفاده از روش‌های بهینه‌سازی هوشمند

موضوع تحقیقات	سال	مؤلف
ارائه تئوری انفجار کنترل شده برای کاهش پس‌شکست	۱۹۵۷، ۱۹۵۳	Longeforse & Lundborg
ارائه سیستم طبقه‌بندی جدید برای انفجار کنترل شده	۱۹۸۵	Rustan et al
بررسی روش‌های برداشت شکل مقطع تونل بعد از حفاری	۱۹۹۲	Clark & Lindsey
بررسی تأثیر جهت داری ناپیوستگی‌ها بر روی پس‌شکست	۱۹۹۴	Chakraborty et al
بررسی مکانیزم روش Tracer blasting برای کاهش پس‌شکست در تونل	۱۹۹۶	Singh
بررسی روش مقطع برداری نوری برای محاسبه پس‌شکست در تونل	۱۹۹۶	Maerz et al
بررسی تأثیر تاخیر چال‌های محیطی بر روی پس‌شکست	۱۹۹۸	Rustan
بررسی تأثیر طراحی چال‌های ضربه گیر بر روی پس‌شکست	۲۰۰۱	Hustrulid & Iverson
ارائه راهکار برای کاهش و کنترل میزان پس‌شکست در تونل‌های کشور کره	۲۰۰۳	Kim et al
بررسی نقش مشخصات توده سنگ و طرح انفجار بر روی میزان خسارت انفجار و پیشنهاد یک رویه جدید برای طراحی چال‌های محیطی	۲۰۰۵	Sing & Xavier
ارائه تکنیک پیمایش لیزری در تونل که یکی از کاربردهای آن محاسبه میزان پس‌شکست است	۲۰۰۸	Decker & Dove
ارزیابی تأثیر پارامترهای الگوی انفجار بر روی عقب زدگی با کمک شبکه عصبی مصنوعی	۲۰۰۸	Monjezi & Dehghani
بررسی روش‌های اندازه‌گیری مقطع فضاهای زیرزمینی	۲۰۱۱	Gikas
توسعه مدل فازی برای پیش‌بینی پرتاب سنگ در معدنکاری روباز	۲۰۱۱	Rezaei et al
پیش‌بینی و کنترل پرتاب سنگ در عملیات انفجار با کمک شبکه عصبی	۲۰۱۱	Monjezi et al
استفاده از پیمایش لیزری سه بعدی برای برداشت هندسه مقطع تونل	۲۰۱۲	Ganic et al
بررسی تأثیر درزه‌های شبه لایه بر روی پس‌شکست	۲۰۱۲	Shiwei et al
ارزیابی پدیده پرتاب سنگ با استفاده از ماشین بردار پشتیبان	۲۰۱۲	Amini et al
بکارگیری شبکه‌های عصبی مصنوعی مختلف برای پیش‌بینی همزمان عقب-زدگی و خردایش	۲۰۱۳	Sayadi et al
ارزیابی عوامل تأثیرگذار بر وقوع پس‌شکست در تونل البرز و شناسایی عواملی که مهمترین تأثیر را دارند	۲۰۱۵	Hossaini et al
پیش‌بینی و بهینه‌سازی عقب‌زدگی و خردایش با کمک شبکه عصبی مصنوعی و الگوریتم کلونی زنبور	۲۰۱۵	Ebrahimi et al

۲- توصیف منطقه مورد مطالعه

ژوراسیک قرار داشته و به شکل لایه‌ای و رگه‌ای دیده می‌شود. زغال‌های این منطقه از نوع گازی چرب و کک شوی چرب هستند. مصرف عمده زغال سنگ این معدن در ذوب آهن اصفهان است. زغال‌های منطقه طزره مربوط به دوران دوم زمین‌شناسی و در حد فاصل تریاس بالایی تا ژوراسیک میانی قرار دارند. تشکیلات شمشک در طزره بین ۹۰۰ تا ۳۰۰۰ متر ضخامت داشته و دارای ۸۲ لایه زغالی است [۳۳].

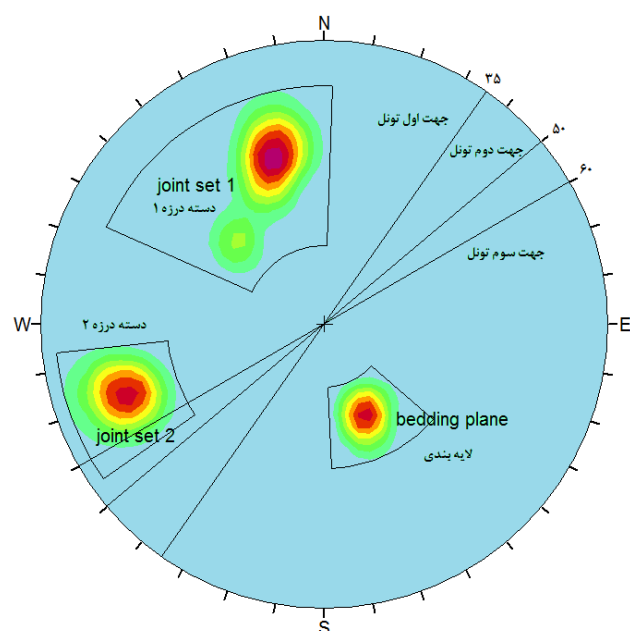
منطقه معدنی طزره در ۷۰ کیلومتری شمال غرب شهرستان شاهرود و ۴۵ کیلومتری شمال شرق شهرستان دامغان بین طول‌های "۵۴°۱۸'۴۸" و "۵۴°۳۰'۴۵" شرقی و عرض‌های "۳۶°۲۲'۳۰" و "۳۶°۲۵'۵۰" به مساحت ۶۸/۴۵ کیلومتر مربع واقع شده است، و از جاده آسفالت تهران- مشهد ۲۸ کیلومتر فاصله دارد (شکل ۳). در این معدن زغال درون سنگ‌های



شکل ۳: موقعیت مکانی منطقه معدنی طزره

۲-۱- اطلاعات عوامل غیر قابل کنترل

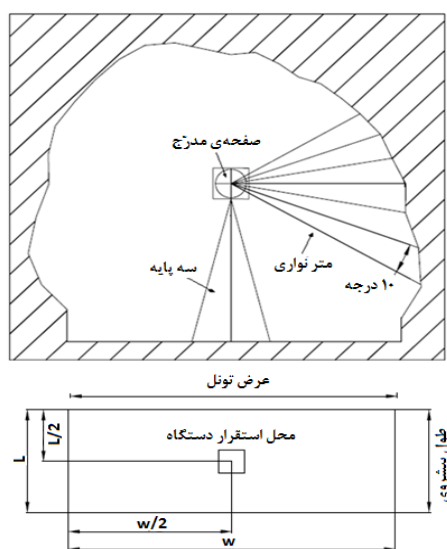
تونل مورد مطالعه در این تحقیق، تونلی دنبال لایه با نام تونل تعریض است که در بخش مرکزی مجموعه معدنی طزره که تحت نام تونل مادر شناخته می‌شود، قرار دارد. این تونل در فاصله‌ای حدود ۸۰۰ متری از دهانه تونل مادر در جهت شمال شرق با آزیموت ۳۵ درجه حفر شده و در طول مطالعه، در طی مسیر خود به ترتیب به سمت آزیموت‌های ۵۰ و ۶۰ درجه منحرف شد. در مسیر تونل لایه‌های سنگی به همراه دو دسته درزه غالب مشاهده شدند. بر اساس بررسی‌های انجام شده، لایه‌های سنگی غالب در مسیر این تونل شامل شیل‌های متورق خاکستری و سیلتستون می‌شوند. علاوه بر لایه‌های سنگی، در ۳ عدد از مقاطع، تونل با قسمتی از لایه زغال نیز برخورد داشت. شیب لایه‌ها در طول تونل به طور متوسط ۴۰ درجه و در جهت شمال غربی با آزیموت متوسط ۳۳۵ درجه است. دسته درزه شماره ۱ که امتداد آن به طور تقریبی موازی با محور تونل است، دارای شیب متوسط ۶۰ درجه در جهت جنوب شرقی با آزیموت متوسط ۱۶۰ درجه است. همچنین شیب و جهت شیب متوسط دسته درزه شماره ۲ که امتداد آن نیز به طور تقریبی عمود بر محور تونل است به ترتیب برابر با ۷۳ و ۷۰ درجه است. شکل (۴) تصویر استریوگرافیک ناپیوستگی‌های مشاهده شده در مسیر تونل را نشان می‌دهد. با توجه به جهت‌داری ناپیوستگی‌ها، دسته درزه شماره یک وضعیت بحرانی‌تری در ارتباط با تونل نسبت به دو دسته‌ی دیگر دارد.



شکل ۴: تصویر استریوگرافیک ناپیوستگی‌ها در مسیر تونل

از لحاظ پرکنندگی درزه‌ها، دسته درزه ۱ بدون پرکنندگی و دسته درزه ۲ دارای پرکنندگی از جنس کلسیت است. از لحاظ شرایط آب‌های زیرزمینی وضعیت تونل در تمام مقاطع خشک و همچنین مقاومت فشاری متوسط سنگ‌های مقاطع تونل در طی مسیر، بین ۲۳ تا ۷۸ مگاپاسکال متغیر است. فاصله‌داری دسته درزه ۱ به طور متوسط در مقاطع مورد مطالعه ۱۹ سانتیمتر، فاصله‌داری متوسط دسته درزه ۲ برابر با ۱۵ سانتیمتر و فاصله داری متوسط لایه‌ها برابر با ۲۱ سانتیمتر هستند. همچنین مقدار شاخص کیفیت مغزه حفاری در مقاطع تونل به طور متوسط ۴۲

قابل مشاهده باشند. با استفاده از متر نواری، طول نقاط واقع در دیواره مقطع تونل از مرکز صفحه مدرج و همچنین زاویه‌ای که برداشت در آن صورت گرفته، اندازه‌گیری می‌شود. در نهایت با داشتن زوایا و طول‌های مربوط به هر کدام از نقاط می‌توان مقطع بدست آمده‌ی تونل را در فضای دو بعدی رسم کرد و با استفاده از آن میزان پس‌شکست ایجاد شده را اندازه‌گیری کرد. فواصل زاویه‌ای برداشت نقاط روی مقطع تونل، ۱۰ درجه است. دستگاه برداشت کننده‌ی مقطع تونل و محل قرارگیری آن به ترتیب در شکل (۵) و شکل (۶) نشان داده شده است. پس از برداشت اطلاعات و رسم مقطع بدست آمده‌ی تونل در نرم افزار AutoCAD، با انطباق مقطع تئوری بر روی آن، میزان پس‌شکست برای هر کدام از مقاطع مورد نظر بدست می‌آید. به عنوان نمونه شکل (۷) نتیجه برداشت مقطع شماره‌ی ۷ تونل با کمک دستگاه ساخته شده را نشان می‌دهد.



شکل ۵: محل قرارگیری دستگاه برداشت کننده‌ی مقطع تونل



شکل ۶: دستگاه برداشت کننده‌ی مقطع تونل به روش قطبی

درصد به دست آمده است. با توجه به اینکه سیستم امتیاز توده سنگ (RMR)، اکثر عوامل غیر قابل کنترل تأثیرگذار بر روی پدیده پس‌شکست را شامل می‌شود، این امتیاز به عنوان ورودی مربوط به عوامل زمین‌شناسی مد نظر قرار گرفته است. مقدار تعدیل امتیاز توده سنگ با توجه به وضعیت دسته درزه شماره ۱ نسبت به راستای تونل، برای تمام مقاطع برابر با ۱۲- در نظر گرفته شده است. با توجه به نتایج مقدار میانگین امتیاز RMR در کل مسیر تونل برابر با ۴۹ است.

۲-۲- اطلاعات عوامل قابل کنترل

برای این گروه به ترتیب خرج ویژه کل مقطع تونل، فاصله‌داری و بارسنگ چال‌های محیطی و وزن ماده منفجره در کل چال‌های محیطی به عنوان عوامل قابل کنترل در نظر گرفته شدند. برای جمع‌آوری اطلاعات مورد نیاز، پس از اتمام حفر چال‌ها، اطلاعات الگوی انفجار و چالزنی برای هر کدام از مقاطع ثبت شده است. این اطلاعات شامل تعداد چال‌ها، فاصله‌ی چال‌ها از یکدیگر و تعداد فشنگ ماده منفجره در هر چال می‌شوند.

با کمک این اطلاعات مقادیر هر کدام از عوامل تأثیرگذار قابل کنترل برای هر مقطع تعیین شده است. نوع ماده منفجره مصرفی برای عملیات انفجار، امولایت کارتریجی با ابعاد ۲۷×۳۰۰ میلی‌متر و وزن ۲۰۰ گرم با سرعت ۵۰۰۰ تا ۵۲۰۰ متر بر ثانیه است. در هر چال ۳ عدد از این ماده منفجره قرار داده می‌شود. با توجه به اطلاعات به دست آمده، بیشترین مقدار خرج ویژه در مقاطع تونل ۲/۳۷ کیلوگرم بر متر مکعب و کمترین مقدار آن ۰/۵۵ کیلوگرم بر متر مکعب است. بیشترین وزن ماده منفجره در چال‌های محیطی مقاطع تونل ۷/۹ کیلوگرم است. مقاطع ۱ و ۳ هر کدام با ۶ عدد چال محیطی کمترین وزن ماده منفجره در چال‌های محیطی را دارند.

۳- نحوه‌ی اندازه‌گیری پس‌شکست در مقطع تونل

برای اندازه‌گیری مقطع بدست آمده بعد از انجام عملیات انفجار، دستگاهی توسط نویسندگان این مقاله ساخته شده است. این دستگاه شامل صفحه‌ی مدرج برای اندازه‌گیری زاویه‌های قائم، ترازهای حبابی برای تراز کردن دستگاه به کمک سه پایه و متر نواری است. برای سهولت در تراز کردن دستگاه یک عدد آینه در قسمت فوقانی دستگاه به شکلی که قابلیت دوران ۹۰ درجه‌ای در راستای افق دارد، قرار داده شده تا ترازها توسط فرد تراز کننده

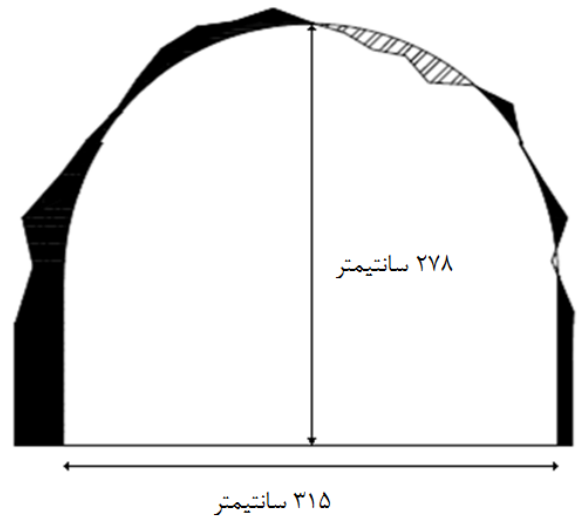
شکست در تونل مورد مطالعه ارائه شده است. همچنین در این مطالعه با استفاده از روش‌های آنالیز رگرسیون چندگانه خطی و غیرخطی، رابطه‌های ریاضی نیز برای پیش‌بینی پس‌شکست ارائه شده است. در جدول (۴) نمادهای منظور شده برای پارامترهای ورودی و خروجی پیش‌بینی پس‌شکست آورده شده است.

جدول ۴: پارامترهای ورودی و خروجی همراه با نماد آنها

نوع داده	پارامترها	نماد
ورودی	پارامترهای زمین شناسی	RMR
	امتیاز توده سنگ	
	پارامترهای انفجار	
خروجی	وزن ماده منفجره چال‌های محیطی (Kg)	PC
	خرج ویژه کل مقطع (Kg/m^3)	SC
	فاصله داری چال‌های محیطی (m)	S
	بارسنگ چال‌های محیطی (m)	B
	پس‌شکست (درصد)	OB

۴-۱- مدل رگرسیون چندگانه خطی^۱

به منظور پیدا کردن مدل پیش‌بینی پس‌شکست، روش رگرسیون چندگانه با استفاده از اطلاعات عوامل قابل کنترل و غیر قابل کنترل و مقادیر پس‌شکست که به ترتیب متغیر مستقل و وابسته مسأله هستند، به کار گرفته شده است. هدف از این روش این است که عواملی شناسایی شوند که پس‌شکست‌ها را تفسیر کنند. هنگامی که رگرسیون چندگانه اجرا می‌شود، مشکل هم خطی بین متغیرهای مستقل باید کنترل شود. این مسأله هنگامی روی می‌دهد که همبستگی در بین متغیرهای مستقل قوی باشد. بنابراین خطای استاندارد و ضرایب افزایش یافته، منجر به جمع-بندی نادرست رگرسیون چندگانه می‌شوند. فاکتور تورم واریانس و حد قابل قبول خطا، معمولاً برای بررسی کردن مشکل هم خطی بودن متغیرهای مستقل استفاده می‌شوند. فاکتور تورم واریانس مقدار افزایش واریانس تخمین ضرایب، در اثر مواردی که هیچ همبستگی‌ای بین متغیرهای مستقل وجود نداشته را اندازه می‌گیرد. اگر دو متغیر مستقل هیچ همبستگی‌ای نداشته باشند، مقدار فاکتور تورم واریانس برابر یک می‌شود. به طور معمول اگر مقدار فاکتور تورم واریانس برابر ۵ باشد، مشکل هم خطی وجود دارد. حد قابل قبول خطا عکس مقدار فاکتور تورم واریانس است.



شکل ۷: رسم مقطع شماره ۷ تونل (مناطق سیاه نشانه پس‌شکست و مناطق هاشور خورده نشانه زیرشکست هستند)

با استفاده از اطلاعات جمع‌آوری شده برای عوامل تأثیرگذار و پس‌شکست در تونل، داده‌های ورودی و خروجی مورد نیاز برای ساخت مدل‌های پیش‌بینی کننده فراهم شده است. در جدول (۳) نتایج تحلیل آماری اطلاعات به دست آمده، آورده شده است.

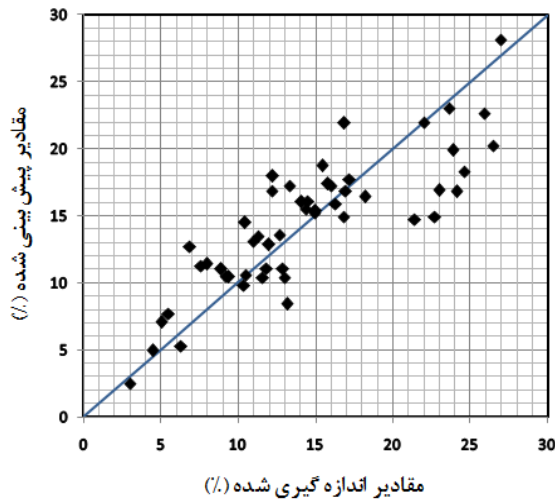
جدول ۳: تحلیل آماری اطلاعات جمع‌آوری شده.

نام پارامتر	میانگین	انحراف معیار	مقدار حداقل	مقدار حداکثر	تعداد
وزن ماده منفجره چال‌های محیطی (Kg)	۶/۲۵	۱/۱۲	۳/۶۰	۷/۹	۵۲
خرج ویژه کل مقطع (Kg/m^3)	۱/۸۸	۰/۴۱	۰/۵۵	۲/۳۷	۵۲
فاصله داری چال‌های محیطی (m)	۰/۵۹	۰/۱۲	۰/۴۸	۱/۱	۵۲
بارسنگ چال‌های محیطی (m)	۰/۶۲	۰/۱۷	۰/۵۱	۱/۳	۵۲
RMR	۴۹/۴	۸/۳۹	۳۱	۶۴	۵۲
پس‌شکست (%)	۱۴/۷۸	۶/۴۱	۳	۲۸/۵۰	۵۲

۴-۲ مدل‌های پیش‌بینی پس‌شکست

در این قسمت با استفاده روش‌های بهینه‌سازی هوشمند که شامل شبکه‌های عصبی مصنوعی، منطق فازی و سیستم استنتاج عصبی - فازی تطبیقی می‌شوند، مدل‌هایی برای پیش‌بینی پدیده پس

$$OB = -18.3 - 0.33[RMR] + 4.62[PC] + 17.49[S] + 16.82[B] \quad (2)$$



شکل ۹: مقایسه مقادیر اندازه‌گیری و پیش‌بینی شده با کمک رابطه (۲).

۴-۲- مدل رگرسیون چندگانه غیرخطی^۳

مدل رگرسیون چندگانه خطی در ارائه یک رابطه ریاضی مناسب محدودیت داشت. متغیرهای مستقل و وابسته در این مطالعه ارتباطی غیرخطی با یکدیگر دارند. بنابراین رگرسیون چندگانه غیرخطی برای پیش‌بینی پس‌شکست مورد استفاده قرار گرفت. قبل از بکارگیری این روش، ابتدا مدل غیرخطی هر کدام از متغیرهای مستقل با متغیر وابسته پیدا شد. نتایج این کار در جدول (۵) آورده شده است.

جدول ۵: خلاصه‌ای از مدل‌های غیرخطی متغیرهای مستقل.

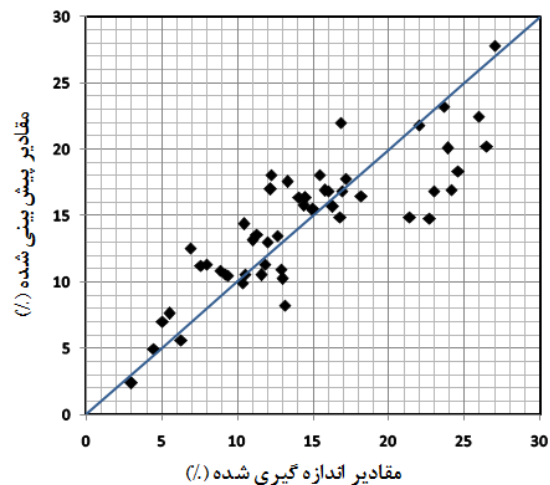
متغیرهای مستقل	ضریب تعیین				
	خطی	درجه ۲	درجه ۳	درجه ۴	معکوس
RMR	۰/۳۲	۰/۳۳	۰/۴۵	۰/۴۶	۰/۲۷
PC	۰/۱۰	۰/۲۲	۰/۲۲	۰/۲۳	۰/۰۵
SC	۰/۰۰۱	۰/۰۳	۰/۰۳	۰/۰۵	۰/۰۴
S	۰/۰۱	۰/۴۰	۰/۴۴	۰/۴۹	۰/۰۰۱
B	۰/۱۵	۰/۱۵	۰/۱۵	۰/۱۶	۰/۱۹
متغیر وابسته: OB					

برای تهیه رابطه نهایی، ترکیب‌های مختلف مدل‌های غیرخطی بدست آمده بین متغیرهای مستقل و متغیر وابسته مورد بررسی قرار گرفته و در نهایت رابطه (۳) بدست آمد. ضرایب مدل خطی

اگر مقدار آن کمتر از ۰/۱ باشد، مشکل هم خطی بودن متغیرهای مستقل وجود دارد. یک راه آسان برای پاسخ به این مشکل، حذف متغیرهای مشکوک است [۳].

برای انجام آنالیز رگرسیون چندگانه خطی از نرم افزار SPSS استفاده شده است. اولین آنالیز با استفاده از روش Enter انجام شده و در آن پس‌شکست به عنوان متغیر وابسته و پنج عامل تأثیرگذار به عنوان متغیر مستقل در نظر گرفته شدند. در نهایت رابطه (۱) برای پیش‌بینی پس‌شکست ارائه شد. این رابطه دارای ضریب تعیین^۲ (R^2) ۰/۷۲ است، و در آن از تمام متغیرها استفاده شده است. در شکل (۸) مقادیر واقعی و پیش‌بینی شده با کمک رابطه (۱) مقایسه شده‌اند.

$$OB = -18.54 - 0.35[RMR] + 4.26[PC] + 1.45[SC] + 16.90[S] + 18.19[B] \quad (1)$$



شکل ۸: مقایسه مقادیر اندازه‌گیری و پیش‌بینی شده با کمک رابطه (۱).

با توجه نتایج هم خطی بین متغیرها، متغیر خرج ویژه (SC) دارای فاکتور تورم واریانس ۸/۱۴ است. به همین دلیل با استفاده از روش گام به گام این متغیر در طی آنالیز کنار گذاشته شده و رابطه (۲) با ضریب تعیین ۰/۷۱ برای پیش‌بینی پس‌شکست بدست آمد. در این رابطه اگرچه ضریب تعیین کاهش یافته اما مشکل هم خطی بین متغیرهای مستقل در آن کمتر است. در شکل (۹) مقادیر واقعی و پیش‌بینی شده با کمک این رابطه مقایسه شده‌اند.

پارامترهای ورودی و خروجی و ساختار مدل و الگوریتم آموزشی مورد استفاده است. برای تعریف ساختار بهینه شبکه‌های عصبی می‌توان از روش‌های ابتکاری استفاده کرد [۳].

در این تحقیق برای ساخت شبکه عصبی از نرم افزار Neuroph Studio استفاده شده است. به منظور مدل‌سازی، شبکه‌های عصبی چند لایه پرسپترون با ساختارهای مختلف به روش سعی و خطا به کار گرفته شدند. از بین داده‌های موجود ۸۰ درصد (۴۲ داده) برای آموزش شبکه و ۲۰ درصد (۱۰ داده) برای آزمایش شبکه عصبی به کار گرفته شده‌اند. فرآیند آموزش به صورت باسرپرست و همراه با الگوریتم انتشار برگشتی خطا صورت گرفته است. همچنین شرط پایانی عملیات آموزش کمتر شدن خطای کلی شبکه از مقدار ۰/۰۰۳ قرار داده شد.

قبل از اعمال داده‌ها به شبکه عصبی مصنوعی، مقادیر متغیرهای ورودی و خروجی با استفاده از رابطه (۴) نرمال‌سازی شده (بین ۱ و ۰) و سپس برای آموزش و آزمایش شبکه استفاده شدند.

$$X_n = X_0 / X_{MAX} \quad (4)$$

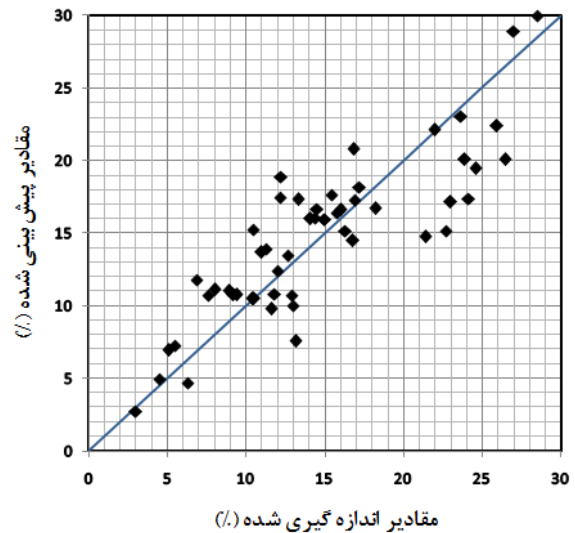
X_0 مقدار پارامتر، X مقدار بیشینه‌ی پارامتر و X_n مقدار نرمال شده‌ی پارامتر است. در جدول (۶) برخی از شبکه‌های عصبی به کار گرفته شده با ساختارهای متفاوت ارائه شده است. این شبکه‌ها براساس مقدار ضریب تعیین و میانگین مربعات خطای^۵ خود با یکدیگر مقایسه شده‌اند (رابطه ۵).

$$MSE = \sum_{i=1}^n (OB_{i\text{ predicted}} - OB_{i\text{ measured}})^2 / N \quad (5)$$

در این رابطه N تعداد داده‌ها، $OB_{i\text{ predicted}}$ و $OB_{i\text{ measured}}$ به ترتیب i امین عنصر پیش‌بینی شده و اندازه‌گیری شده هستند. با توجه به بررسی‌های صورت گرفته، شبکه عصبی با ساختار ۳-۱-۳-۴-۵ که میانگین مربعات خطای آن ۴/۷۹ است، به عنوان مدل پیش‌بینی کننده‌ی پس‌شکست انتخاب شد. مقدار میانگین مربعات خطای آموزش شبکه برابر با ۴/۵۰ و ضریب تعیین آن ۰/۹۰ به دست آمده است. شکل (۱۱) ساختار مدل انتخاب شده برای پیش‌بینی پس‌شکست را نشان می‌دهد. مقایسه مقادیر اندازه‌گیری شده و پیش‌بینی شده‌ی پس‌شکست با استفاده از شبکه عصبی برای داده‌های آزمایش در شکل (۱۲) نشان داده شده است.

رابطه (۱) به عنوان ضرایب اولیه در ساخت مدل غیرخطی در نظر گرفته شده است. مدل غیرخطی نهایی، دارای ضریب تعیین ۰/۷۳ است. با توجه به نتایج، مدل غیرخطی عملکرد مطلوب‌تری نسبت به مدل خطی داشته است. در شکل (۱۰) مقادیر واقعی و پیش‌بینی شده با کمک رابطه (۳) مقایسه شده‌اند.

$$OB = 28.39 - 0.003[RMR^2] + 0.38[PC^2] + SC - 8.60[1/S] + 14.23[Ln(B)] \quad (3)$$



شکل ۱۰: مقایسه مقادیر اندازه‌گیری و پیش‌بینی شده با کمک رابطه (۳).

۴-۳- مدل شبکه عصبی مصنوعی^۴

شبکه‌های عصبی مصنوعی با الهام از عملکرد مغز انسان و واحدهای پردازشگر آن بوجود آمده‌اند. این مدل بر این فرض استوار است که همانند مغز بشر امکان یادگیری توسط سلول‌های عصبی برای آن موجود است. مهم‌ترین ویژگی شبکه‌های عصبی، غیرخطی بودن و قابلیت حذف نویز است. شبکه‌های عصبی نیاز به دستورات کاملاً صریح و مشخص و مدل‌های ریاضی محض ندارند و برای حل مسائلی که فرمول حل آن‌ها ناشناخته است و یا ابهامی در آن‌ها دیده می‌شود، کاربرد دارند. شبکه‌های عصبی شامل سه لایه ورودی، میانی و خروجی هستند و این امکان وجود دارد که به تعداد دلخواه لایه میانی در نظر گرفته شود ولی امروزه به اثبات رسیده است که شبکه‌های با یک لایه میانی قادر به حل کلیه مسائل خواهند بود [۳۴]. کارایی و عملکرد شبکه‌های عصبی مصنوعی به صورت گسترده‌ای تحت تأثیر ارتباط تابعی بین

۴-۴- مدل فازی

در بسیاری از علوم نظیر ریاضیات و منطق، فرض بر این است که مرزها و محدودیت‌های دقیقاً تعریف شده‌ای وجود دارند و یک موضوع خاص یا در محدوده آن مرزها می‌گنجد یا نمی‌گنجد. مواردی چون مرد یا زن، سیاه یا سفید و... از این جمله‌اند. در این فلسفه مرزها کاملاً مشخص و تعریف شده هستند. این منطق دقت را فدای سهولت می‌کند [۳۵].

در سال ۱۹۶۵ عسگر لطفی زاده، اولین مقاله خود را در زمینه فازی تحت عنوان مجموعه‌های فازی منتشر کرد که جرقه اولیه‌ای از پرتو یک جهان بینی در عرصه ریاضیات و علوم بود. منطق فازی این امکان را فراهم می‌کند تا عدم قطعیت‌ها و ابهامات نیز در نظر گرفته شوند [۳۵].

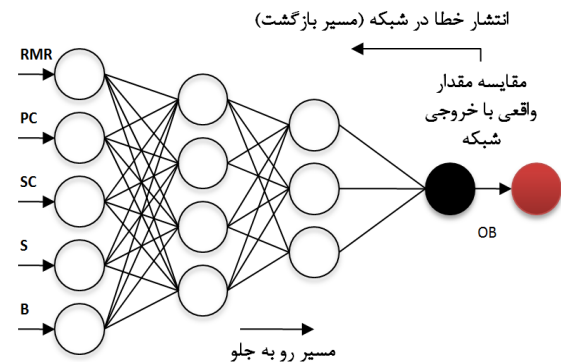
در این تحقیق، برای ایجاد مدل فازی پیش‌بینی پس‌شکست، از سیستم استنتاج ممدانی استفاده شده است. در روش ممدانی از عملگر MIN برای AND و از عملگر MAX برای OR که به روش استنتاج MIN-MAX معروف است، استفاده می‌شود. در این روش اگر عبارت قسمت اگر توسط عملگر AND به هم ارتباط داده شده باشند، برای ترکیب این عبارات و به دست آوردن خروجی واحد از قاعده مورد نظر، کمینه خروجی هر یک از این عبارات محاسبه می‌شود. هم‌چنین اگر قواعد فازی توسط عملگر OR به هم ارتباط داده شده باشند، برای ترکیب قواعد فعال شده و به دست آوردن خروجی واحد از روی خروجی‌های این قواعد، بیشینه خروجی‌های هر یک از این عبارات محاسبه می‌شود [۳۵].

از بین داده‌های موجود ۸۰ درصد برای ایجاد مدل فازی و ۲۰ درصد مابقی برای آزمایش مدل به کار گرفته شده‌اند. قواعد فازی بر اساس پایگاه داده نوشته شده‌اند و تعداد آن‌ها برابر با ۳۴ قاعده "اگر- آنگاه" است (۸ عدد از قواعد به علت مشکل تضاد و یکسان بودن قسمت "اگر" آن‌ها با قواعد دیگر، از پایگاه قواعد فازی حذف شده‌اند).

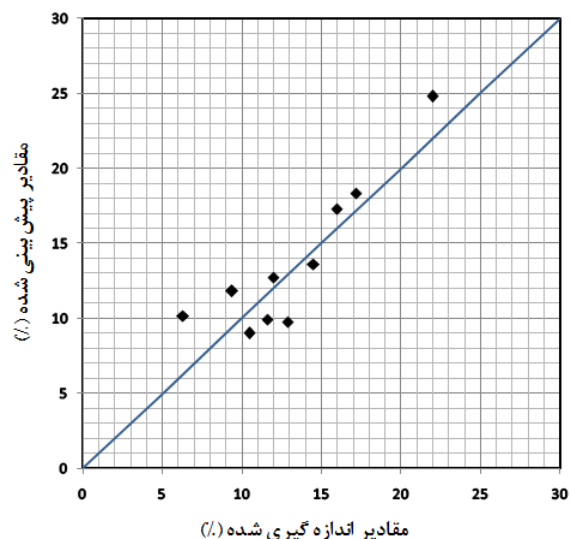
ساختار مدل فازی پیش‌بینی پس‌شکست در شکل (۱۳) نشان داده شده است. عملیات فازی‌سازی با استفاده از توابع عضویت انتخاب شده برای متغیرهای ورودی و خروجی مسأله انجام شده است. توابع عضویت تعیین شده برای متغیرهای مسأله، در شکل های ۱۹-۱۴ قابل مشاهده هستند.

جدول ۶: شبکه‌های عصبی با ساختارهای متفاوت.

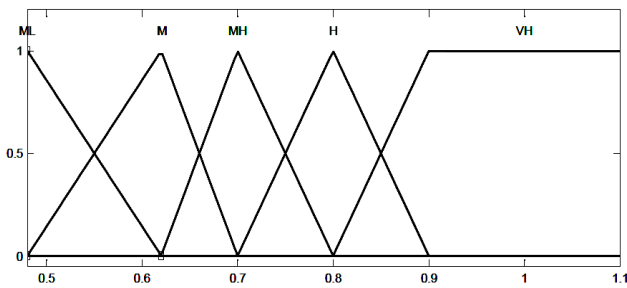
ساختار مدل	تابع تحریک	MSE	R ²
۵-۴-۲-۱	سیگموئید-سیگموئید-سیگموئید	۵/۸۱	۰/۸۲
۵-۵-۲-۱	سیگموئید-سیگموئید-سیگموئید	۵/۷۶	۰/۸۴
۵-۴-۳-۱	سیگموئید-سیگموئید-سیگموئید	۴/۷۹	۰/۸۰
۵-۴-۳-۱	سیگموئید-تانزانت هایپربولیک-تانزانت هایپربولیک	۶/۶	۰/۷۸
۵-۵-۱	سیگموئید-سیگموئید	۵/۵۶	۰/۸۲
۵-۵-۱	سیگموئید-تانزانت هایپربولیک	۸/۳۵	۰/۸۴
۵-۱۲-۶-۱	سیگموئید-سیگموئید-سیگموئید	۸/۵۲	۰/۸۴
۵-۷-۱	سیگموئید-سیگموئید	۵/۷۶	۰/۸۲



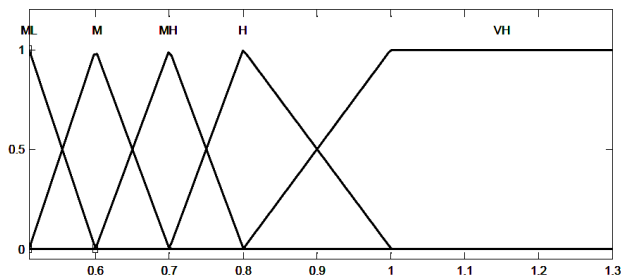
شکل ۱۱: ساختار شبکه عصبی مصنوعی برای پیش‌بینی پس‌شکست.



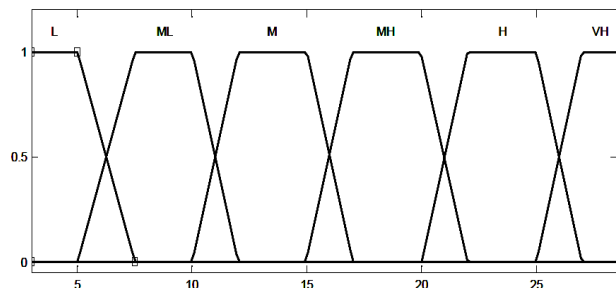
شکل ۱۲: مقایسه مقادیر اندازه‌گیری و پیش‌بینی شده‌ی پس‌شکست با کمک شبکه عصبی مصنوعی برای داده‌های آزمایش.



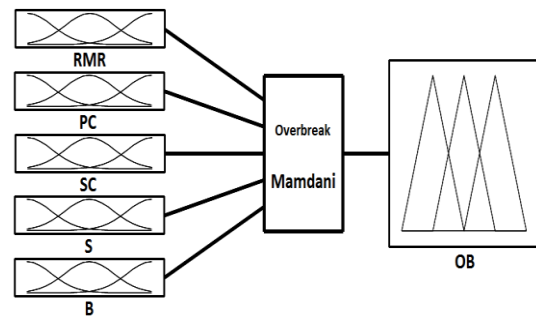
شکل ۱۷: تابع عضویت متغیر ورودی S.



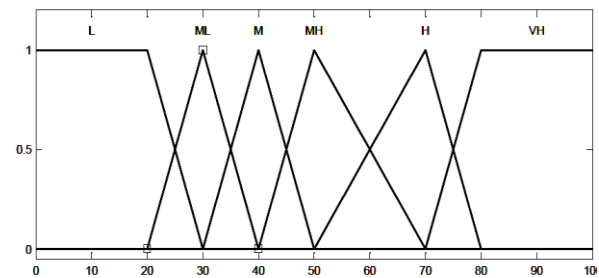
شکل ۱۸: تابع عضویت متغیر ورودی B.



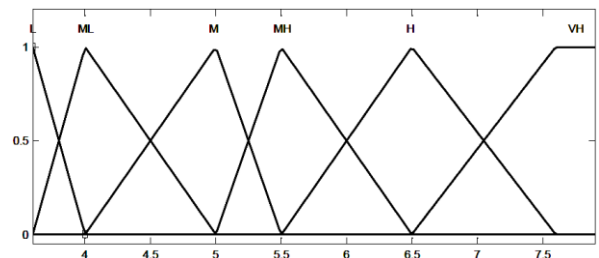
شکل ۱۹: تابع عضویت متغیر خروجی OB.



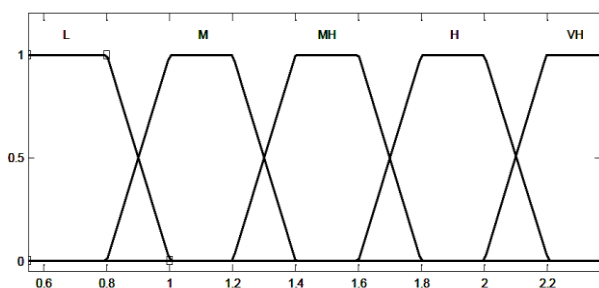
شکل ۱۳: ساختار مدل فازی پیش‌بینی پس‌شکست.



شکل ۱۴: تابع عضویت متغیر ورودی RMR.

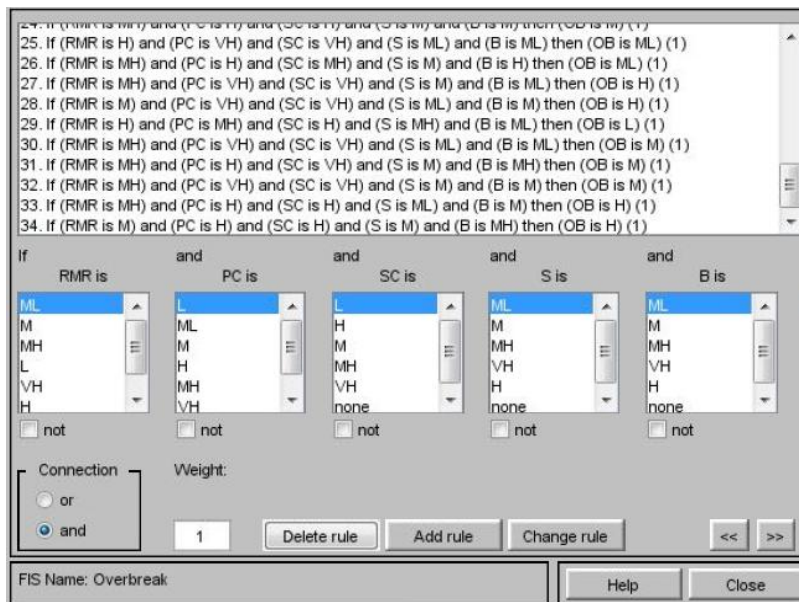


شکل ۱۵: تابع عضویت متغیر ورودی PC.



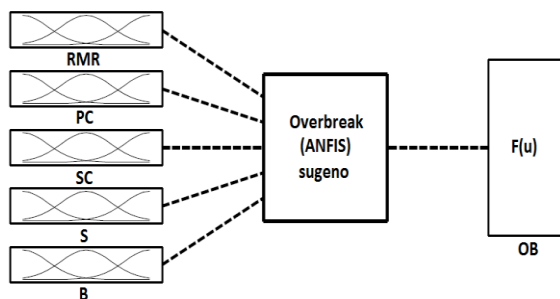
شکل ۱۶: تابع عضویت متغیر ورودی SC.

شکل (۲۰) قسمتی از پایگاه قواعد فازی را نشان می‌دهد. عملیات غیرفازی سازی مدل پیش‌بینی پس‌شکست براساس روش گرانیگاه که یکی از بهترین روش‌های غیرفازی سازی است، صورت گرفته است. مقایسه مقادیر اندازه‌گیری شده و پیش‌بینی شده‌ی پس‌شکست با استفاده از مدل فازی برای داده‌های آزمایش در شکل (۲۱) نشان داده شده است. ضریب تعیین بین مقادیر اندازه‌گیری شده و پیش‌بینی شده 0.95 و مقدار میانگین مربعات خطا $1/63$ به دست آمده است.



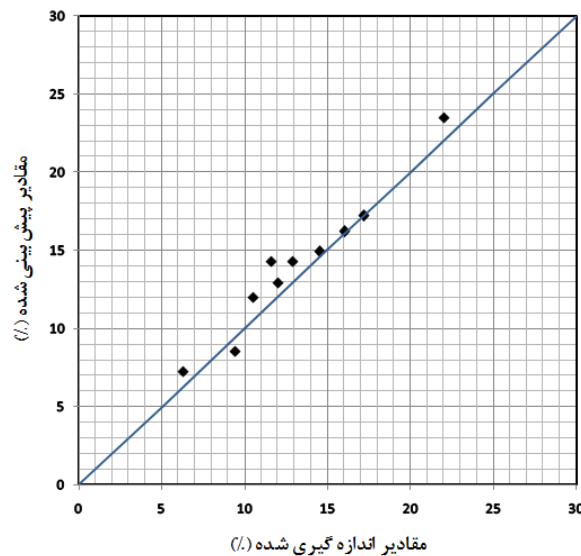
شکل ۲۰: قواعد فازی "اگر - آنگاه" برای مدل پیش‌بینی پس‌شکست.

واقع مدل‌های فازی-عصبی برای حل مشکل شناسایی پارامترهای سیستم استنتاج فازی، از یک شبکه تطبیقی که حالت عمومی شبکه عصبی پیشرو چندلایه است، استفاده می‌کنند [۳۶]. مدل فازی-عصبی تطبیقی بر اساس روش استنتاج سوگنو عمل می‌کند. شکل (۲۲) ساختار مدل فازی-عصبی تطبیقی پیش‌بینی پس‌شکست را نشان می‌دهد. روش غیرفازی سازی در این مدل روش متوسط وزن دار است، زیرا در مدل فازی-عصبی تطبیقی، عملیات غیرفازی سازی تنها با روش متوسط وزن دار انجام می‌شود. در این تحقیق، برای ساخت سیستم فازی-عصبی از دو روش شبکه‌بندی فضا^۷ و زیر خوشه‌بندی^۸ استفاده شده است.



شکل ۲۲: ساختار مدل فازی-عصبی تطبیقی پیش‌بینی پس‌شکست.

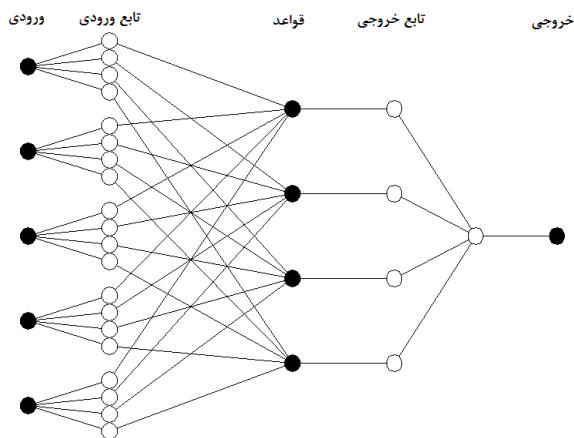
در روش شبکه‌بندی فضا، برای هر کدام از پنج عدد متغیر ورودی مسأله به ترتیب سه و چهار مجموعه فازی در نظر گرفته شده و نتایج آن‌ها در تکرارهای مختلف با هم مقایسه شده است. آموزش



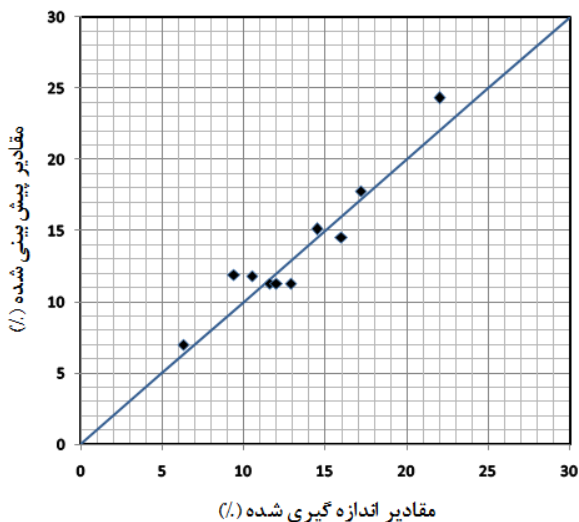
شکل ۲۱: مقایسه مقادیر اندازه‌گیری و پیش‌بینی شده‌ی پس‌شکست با کمک منطق فازی برای داده‌های آزمایش.

۴-۵- مدل سیستم استنتاج فازی-عصبی تطبیقی^۶

سیستم استنتاج فازی-عصبی تطبیقی، شبکه تطبیق پذیر و قابل آموزشی است که به لحاظ عملکرد کاملاً مشابه سیستم استنتاج فازی است. مدل‌های فازی-عصبی توسط Jang در سال ۱۹۹۳ گسترش یافت است و برای تسهیل فرایند یادگیری و انطباق، منطق فازی را با شبکه‌های عصبی مصنوعی ترکیب می‌کند. در



شکل ۲۳: ساختار مدل نهایی فازی-عصبی تطبیقی برای پیش‌بینی.



شکل ۲۴: مقایسه مقادیر اندازه‌گیری و پیش‌بینی شده‌ی پس‌شکست با کمک مدل سیستم استنتاج فازی - عصبی تطبیقی برای داده‌های آزمایش.

۵- مقایسه و ارزیابی کارایی مدل‌های پیش‌بینی کننده

برای ارزیابی کارایی مدل‌های رگرسیون چندگانه خطی و غیرخطی از کل داده‌ها و همچنین برای ارزیابی عملکرد مدل‌های شبکه عصبی مصنوعی، فازی و فازی-عصبی تطبیقی از داده‌های آزمایش استفاده شده است. این ارزیابی توسط شاخص‌های آماری مجذور میانگین مربعات خطا^۹ (رابطه ۶) و ضریب تعیین انجام شده است [۳۰].

$$RMSE = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (OB_{ipredicted} - OB_{imeasured})^2}{N}} \quad (۶)$$

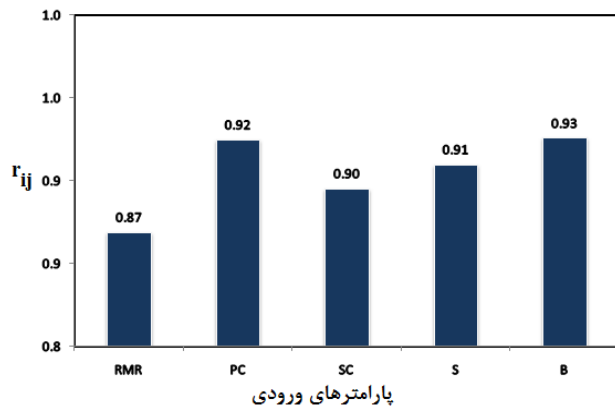
مدل فازی-عصبی براساس الگوریتم انتشار برگشتی خطا صورت گرفته است. در جدول (۷) اطلاعات چهار مورد از مدل‌های ساخته شده با روش شبکه‌بندی فضا ارائه شده است. از بین مدل‌های ساخته شده به کمک روش زیر خوشه‌بندی، مدلی با مقدار بازه‌ی تأثیر ۰/۵۵، فاکتور کوپیدن ۱/۲۵، نرخ پذیرش ۰/۹ و نرخ نپذیرفتن ۰/۱۵، نتایج مطلوب‌تری از خود نشان داد. در نهایت با بررسی نتایج مدل‌های به دست آمده، مدل ساخته شده با روش زیر خوشه‌بندی به عنوان مدل نهایی پیش‌بینی پس‌شکست با روش فازی-عصبی تطبیقی انتخاب شد. مقدار میانگین مربعات خطا و ضریب تعیین آزمایش این مدل به ترتیب برابر با ۱/۹۸ و ۰/۹۱ به دست آمده است. در جدول (۸) اطلاعات مدل منتخب فازی-عصبی تطبیقی ارائه شده است. شکل (۲۳) ساختار مدل نهایی فازی-عصبی و شکل (۲۴) مقایسه مقادیر پیش‌بینی شده و اندازه‌گیری شده توسط این مدل را نشان می‌دهند.

جدول ۷: مقایسه نتایج پیش‌بینی ۲ عدد از مدل‌های فازی - عصبی.

پارامتر	مدل ۱	مدل ۲	مدل ۳	مدل ۴
نوع تابع ورودی	مثلی	مثلی	دوزنقه‌ای	دوزنقه‌ای
نوع تابع خروجی	خطی	خطی	خطی	خطی
تعداد توابع عضویت	۴	۳	۴	۳
مقدار MSE آزمایش	۵/۴۷	۴	۶/۲۱	۹/۱۲

جدول ۸: اطلاعات مدل منتخب فازی - عصبی تطبیقی.

مقدار	نوع پارامترهای ANFIS
۵۶	تعداد گره‌ها
۲۴	تعداد پارامترهای خطی
۴۰	تعداد پارامترهای غیرخطی
گوسی	نوع توابع عضویت
خطی	نوع تابع عضویت متغیر خروجی
۴	تعداد توابع عضویت
۳۶۰۰۰	تعداد تکرار
۴/۳۲	میانگین مربعات خطای آموزش



شکل ۲۵: تحلیل حساسیت برای پیش‌بینی پس‌شکست.

۷- ارائه‌ی راهکار برای کاهش میزان پس‌شکست

در این بخش با توجه به تحلیل حساسیت صورت گرفته و همچنین مشاهدات صورت گرفته در محل تونل، راهکارهایی برای کاهش میزان پس‌شکست در تونل ارائه شده است. به دلیل اینکه تنها پارامترهای انفجار قابل کنترل هستند، تغییرات باید در بخش طرح انفجار انجام گیرد. از اشکالات مهم در تونل مورد نظر، می‌توان به وجود خطا در نحوه‌ی چالزنی و جانمایی چال‌ها، به ویژه چال‌های محیطی تونل اشاره کرد. از این رو دقت خوبی بر روی جانمایی چال‌ها و زاویه‌ی انحراف آن‌ها صورت نمی‌گیرد. این امر باعث نزدیک شدن ابتدا و انتهای برخی چال‌ها به یکدیگر شده و در نتیجه امکان وقوع پس‌شکست به علت تمرکز مواد منفجره در این بخش‌ها افزایش می‌یابد. برای جلوگیری از این مسأله، ابتدا باید الگوی انفجار چال‌های محیطی تونل براساس تئوری انفجار کنترل شده طراحی شود و با توجه به نتایج آن در مقاطع تونل و همچنین با توجه به وضعیت توده سنگ در قسمت چال‌های محیطی، این طراحی در هر مرحله به روز شود. در جدول (۱۰) اطلاعات طرح پیشنهادی انفجار کنترل شده برای چال‌های محیطی تونل آورده شده است. در این طراحی، سنگ‌های تونل با مقاومت متوسط در نظر گرفته شده‌اند [۴].

جدول ۱۰: طرح پیشنهادی برای انفجار کنترل شده چال‌های محیطی (قطر چال‌ها ۳۵ میلی‌متر است).

مقدار	رابطه	پارامتر
۰/۵۲	۱۵× قطر چال	فاصله داری (m)
۰/۶۲	۱/۲× داری	بارسنگ (m)
۰/۱۱	۹۰× (قطر چال) ^۲	تراکم خرج (Kg/m)

در این رابطه N تعداد داده‌ها، OB_i predicted و OB_i measured به ترتیب i امین عنصر پیش‌بینی شده و اندازه‌گیری شده هستند. در جدول (۹) مقدار مجذور میانگین مربعات خطا برای مدل‌های پیش‌بینی کننده آورده شده است. همانطور که مشخص است، در این مطالعه، روش‌های فازی و سیستم استنتاج فازی-عصبی تطبیقی، کارایی بهتری نسبت به روش‌های رگرسیون چندگانه خطی، غیرخطی و شبکه عصبی مصنوعی داشته‌اند.

جدول ۹: مقایسه عملکرد مدل‌های پیش‌بینی کننده پس‌شکست.

R^2	RMSE	مدل‌های پیش‌بینی پس‌شکست
۰/۷۱	۳/۳۳	رگرسیون چندگانه خطی
۰/۷۳	۳/۲۸	رگرسیون چندگانه غیر خطی
۰/۸۰	۲/۱۹	شبکه عصبی مصنوعی
۰/۹۵	۱/۲۸	فازی
۰/۹۱	۱/۴۱	سیستم استنتاج فازی-عصبی تطبیقی

۶- تحلیل حساسیت

برای تعیین عاملی که بیشترین تأثیر را بر روی پس‌شکست دارد، از تحلیل حساسیت با روش دامنه کوسینوس^{۱۰} استفاده شده است. برای این منظور، تمام داده‌ها در یک فضای m بعدی تعریف می‌شوند. در این روش تمام پارامترها به شکل مستقیم به خروجی مرتبط می‌شوند. قدرت این ارتباط با رابطه (۷) محاسبه می‌شود [۳۱].

$$r_{ij} = \frac{\sum_{k=1}^m x_{ik} x_{jk}}{\sqrt{\sum_{k=1}^m x_{ik}^2 \sum_{k=1}^m x_{jk}^2}} \quad (7)$$

در این رابطه، m تعداد داده‌ها، x_i داده‌های ورودی و x_j داده‌های خروجی هستند. هرچه مقدار r_{ij} بیشتری داشته باشد، تأثیر متغیر ورودی بر متغیر خروجی بیشتر است. نتایج تحلیل حساسیت در شکل (۲۵) نشان داده شده است. با توجه به شکل، پارامتر بارسنگ تأثیر بیشتری بر روی مقدار پس‌شکست داشته است. اما به طور کلی، پارامترهای انفجار که مربوط به طراحی چال‌های محیطی تونل هستند، بیشترین تأثیر را در وقوع پس‌شکست داشته‌اند.

کننده، می‌توان به عنوان یک سیستم اعلام خطر برای وقوع پدیده پس‌شکست در طی حفاری تونل استفاده کرد.

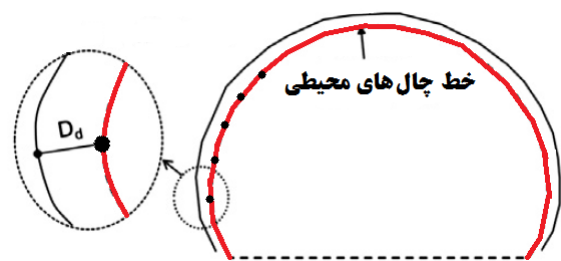
۹- تقدیر و تشکر

از مدیریت و کارشناسان محترم مجموعه معدنی طزره به خاطر فراهم کردن شرایط لازم برای جمع‌آوری داده‌های مورد نیاز و همچنین در اختیار قرار دادن اطلاعات تشکر به عمل می‌آید.

۱۰- منابع

- [1] Murthy, V.M.S.R; Dey, K & Raitani, R; 2003; "Prediction of over break in underground tunnel blasting a case study", Journal of Canadian Tunnelling, 109-115.
- [2] خلیلی، س؛ ۱۳۹۰؛ پایان نامه کارشناسی ارشد: "تحلیل و مقایسه روش های طراحی الگوی آتشیاری سینه کارهای تونلی" دانشکده فنی مهندسی، دانشگاه بین المللی امام خمینی (ره)، قزوین، ایران.
- [3] Jang, H & Topal, E; 2013; "Optimizing over break prediction based on geological parameters comparing multiple regression analysis and artificial neural network", Tunnelling and Underground Space Technology, 38, 161-169.
- [4] Singh, S.P & Xavier, P; 2005; "Causes, impact and control of over break in underground excavation", Tunnelling and Underground Space Technology, 20, 63-71.
- [5] Ibarra, J.A; Maerz, N.H & Franklin, J.A ;1996; "Over break and under break in underground openings Part2: causes and implications", Geotechnical and Geological Engineering, 14, 325-340.
- [6] Mahtab, M.A; Rossier, K; Kalamaras, G.S & Grasso P; 1997; "Assessment of geological over break for tunnel design and contractual claims", International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences, 34, 3-4, Paper No. 185.
- [7] Dinis da Gama, C & Navarro Torres, V ; 2002; "Prediction of EDZ (Excavation Damage Zone) from explosive detonation in underground openings", ISRM International symposium on rock engineering for mountainous regions, 25-28.
- [8] Schmitz, R.M; Viroux, S; Charlier, R & Hick, S ; 2006; "The role of rock mechanics in analyzing over break: application to the soumagne tunnel", EURock 2006-Multiphysics coupling and long term behavior in rock mechanics, 631-636.
- [9] Feng qiang, G; Xi bing, L & Wei, Z; 2008; "Over-excavation forecast of underground opening by using bayes discriminant analysis method", Journal of Central South University of Technology., 15, 498-502.
- [10] Katti, A.R; Mahuli, R.R & Kulkarni, U.V; 2010; "Understanding level at acceleration and peak particle

برای کاهش خطا در عملیات چالزنی می‌توان به این شکل عمل کرد که قبل از حفاری، ابتدا خطی که چال‌های محیطی قرار است بر روی آن حفر شوند، به کمک رنگ روی مقطع تونل مشخص شود [۲۵]. این کار باعث می‌شود تا فاصله‌ی چال‌های محیطی از دیواره‌ی مقطع رعایت شود. راهکار بعدی مشخص کردن محل حفر چال روی این خط با کمک خط‌کش T شکل است تا هر چال سر جای خود حفر شود (شکل ۲۶). رعایت موارد ذکر شده همراه با دقت اپراتور در حین حفر چال، همگی امکان وقوع پس-شکست را کاهش خواهند داد.



شکل ۲۶: مشخص کردن خط چال‌های محوری و مکان چال‌های محیطی (Dd فاصله‌ی خط چال‌های محیطی تا دیواره‌ی مقطع تونل است).

در تونل مورد مطالعه، چال‌های محیطی با چاشنی‌های تاخیری ۱/۲ ثانیه‌ای با نمره‌های ۴، ۶ و ۸ منفجر می‌شوند. اگر بجای انفجار تاخیری، چال‌های محیطی به طور همزمان منفجر شوند، گرچه لرزش زیاد می‌شود اما از افزایش طول ترک‌ها و ایجاد پس-شکست تا حد زیادی جلوگیری می‌شود.

۸- نتیجه‌گیری

هدف اصلی این تحقیق بررسی کارایی روش‌های بهینه‌سازی هوشمند در زمینه‌ی پیش‌بینی پدیده‌ی پس‌شکست است. با توجه به آثار زیان بار این پدیده در فرآیند ساخت تونل، پیش‌بینی آن می‌تواند کمک بسیاری در کنترل و جلوگیری از این آثار زیان بار داشته باشد. برای انجام پیش‌بینی، اطلاعات زمین‌شناسی، انفجار و پس‌شکست، قبل و بعد از هر وهله انفجار در مقطع تونل، به ترتیب به عنوان متغیرهای مستقل و وابسته مدل‌های پیش‌بینی کننده جمع‌آوری شدند. نتایج بررسی روش‌های مختلف نشان داد که در شرایط این تحقیق، مدل فازی و سیستم استنتاج فازی - عصبی تطبیقی، قابلیت بهتری برای پیش‌بینی پس‌شکست دارند. با افزایش پایگاه داده، می‌توان قدرت تعمیم و دقت مدل‌های پیش‌بینی کننده را بالا برد. با این کار، از مدل‌های پیش‌بینی

- [26] Shiwei, s; Lie, N; Shulin, D & Yan, X; 2013; "Influence Mechanism of Lamella Joints on Tunnel Blasting Effect", Research Journal of Applied Sciences, Engineering and Technology, 5, 20, 4905-4908.
- [27] Monjezi, M & Dehghani, H; 2008; "Evaluation of effect of blasting pattern parameters on back break using neural network", Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences, 45, 1446-1453.
- [28] Monjezi, M; Bahrami, A; Varjani, A.Y & Sayadi, A.K; 2011; "Prediction and controlling of fly rock in blasting operation using artificial neural network", Arabian Journal of Geosciences, 4, 421-425.
- [29] Amini, H; Gholami, R; Monjezi, M; Torabi, S.R & Zadhesh, J; 2012; "Evaluation of fly rock phenomenon due to blasting operation by support vector machine", Neural computing & Application, 21, 2077-2085.
- [30] Rezaei, M; Monjezi, M & Yazdani varjani, A; 2012; "Development of fuzzy model to predict flyrock in surface mining", Safety Science, 49, 298-305.
- [31] Sayadi, A; Monjezi, M; Talebi, N & Khandelwal, M; 2013; "A comparative study on the application of various artificial neural networks to simultaneous prediction of rock fragmentation and back break", Journal of Rock Mechanics and Geotechnical Engineering, 5, 318-324.
- [32] Ebrahimi, E; Monjezi, M, Khalesi, M.R & Armaghani, D.J; 2015; "Prediction and optimization of back-break and rock fragmentation using an artificial neural network and a bee colony algorithm", Bulletin of Engineering Geology and the Environment.
- [33] <http://www.ngdir.ir>
- [34] شهبایی فر، م؛ ۱۳۸۳؛ "تخمین ذخیره کانسار با استفاده از شبکه‌های عصبی مصنوعی"، کنفرانس مهندسی معدن ایران، دانشگاه تربیت مدرس، تهران، ایران.
- [35] عطائی، م؛ ۱۳۸۹؛ "تصمیم‌گیری چند معیاره فازی"، چاپ اول، دانشگاه صنعتی شاهرود، سمنان، ایران.
- [36] حسین پور، ح؛ اژدری مقدم، م؛ خسروی، م؛ ۱۳۹۱؛ "پیش‌بینی خشکسالی یک ساله با استفاده از مدل فازی - عصبی، سری-های زمانی خشکسالی و شاخص‌های اقلیمی (مطالعه موردی: زاهدان)"، نشریه آب و فاضلاب، شماره ۲.
- پانوشت‌ها:**
- 1- Multiple Linear Regression Model
 - 2- Determination Coefficient
 - 3- Multiple Nonlinear Regression Model
 - 4- Artificial Neural Network Model
 - 5- Mean Square Error (MSE)
 - Model 6- Adaptive Network-based Fuzzy Inference System (ANFIS)
 - 7- Grid partition
 - 8- Sub clustering
 - 9- Root Mean Square Error (RMSE)
 - 10- Cosine Amplitude Method (CAM)
- velocity: case study", Indian Geotechnical Conference, 83-86.
- [11] Dey, K & Murthy, V.M.S.R; 2012; "Prediction of blast induced over break from uncontrolled burn-cut blasting in tunnel driven through medium rock class", Tunnelling and Underground Space Technology, 28, 49-56.
- [12] Sun, S; Liu, J & Wei, J; 2013; "Prediction of over break blocks in tunnels based on the wavelet neural network method and the geological statistics theory", Mathematical Problems in Engineering, Article ID 70649.
- [13] Maerz, N.H; Ibarra, J.A & Franklin J.A; 1996; "Over break and under break in underground openings Part1: measurement using the light sectioning method and digital image processing", Geotechnical and Geological Engineering, 14, 307-323.
- [14] Clark, T.A & Lindsey, N.E; 1992; "Profiling methods reviewed", Tunnels and Tunnelling, 29-31.
- [15] Decker, J.B & Dove, J.E; 2008; "Laser Scanning Techniques in Devil's Slide Tunnels", 42nd US Rock Mechanics Symposium, San Francisco, USA.
- [16] Ganic, A; Milutinovic, A; Tokalic, R & Ognjanovic, S; 2011; "Measuring methods for cross sections of underground mine chambers", Underground Mining Engineering, 19, 101-108.
- [17] Gikas, V; 2012; "Three-Dimensional Laser Scanning for Geometry Documentation and Construction Management of Highway Tunnels during Excavation", Sensors Journal, 12, 11249-11270.
- [18] Hossaini, M.F ; Mohammadi, M; Hahjiantilaki, N and Tavallaie, A; 2015; "Cause of dynamic overbreak and control measures taken at the Alborz tunnel, Iran", 15th coal Operators Conference, University of Wallongong, Astustralia, 316-320.
- [19] Rustan, A.P; 1998; "Micro-sequential contour blasting-how does it influence the surrounding rock mass?", Engineering Geology, 49, 303-313.
- [20] Rustan, A; Naartijarvit, T & Ludvig, B ; 1985; "Controlled blasting in hard intense jointed rock in tunnel", CIM Bulletin, 12, 63-68.
- [21] Chakraborty, A.K; Jethwa, J.L & Palthankar, A.G ; 1994; "Assessing the effects of joint orientation and rock mass quality on fragmentation and over break in tunnel blasting", Tunnelling and Underground Space Technology, 9:4,471-482.
- [22] Singh, S.P; 1996; "Mechanism of tracer blasting", Geotechnical and Geological Engineering, 14, 41-50.
- [23] Singh, S.P; 2001; "Influence geology blast damage", CIM Bulletin, 94.
- [24] Mandal, S.K; Singh, M.M & Dasgupta, S; 2008; "Theoretical concept to understand plan and design smooth blasting pattern", Geotechnical and Geological Engineering, 26, 399-416.
- [25] Kim, Y & Moon, H; 2013; "Application of the guideline for over break control in granitic rock mass in Korean tunnels", Tunnelling and Underground Space Technology, 35, 67-77.