

بِسْمِ اللَّهِ الرَّحْمَنِ الرَّحِيمِ



دانشکده مهندسی معدن، نفت و ژئوفیزیک  
رشته مهندسی معدن گرایش استخراج  
پایان نامه کارشناسی ارشد

توسعه مدل‌های ارزیابی پایداری در کارگاه‌های باز زیرزمینی مبتنی بر روش نمودار پایداری

نگارنده: محمود شریفی تودشکی

اساتید راهنما

دکتر محمد عطایی

دکتر رضا خالوکاکایی

استاد مشاور

سجاد محمدی

شهریور ۱۳۹۵



مدیریت تحصیلات تکمیلی

باسمه تعالی

شماره:  
تاریخ:  
ویرایش:

پیوست شماره ۲

دانشکده: دانشکده مهندسی معدن، ژئوفیزیک و نفت  
گروه: استخراج

پایان نامه کارشناسی ارشد آقای / خانم محمود شریفی تودشکی به شماره دانشجویی: ۹۳۱۰۲۶۴  
تحت عنوان: توسعه مدل‌های ارزیابی پایداری در کارگاه‌های باز زیرزمینی مبتنی بر روش نمودار پایداری  
در تاریخ ۱۳۹۵/۰۶/۱۷ توسط کمیته تخصصی زیر جهت اخذ مدرک کارشناسی ارشد مورد ارزیابی و با درجه عالی ..... مورد پذیرش قرار گرفت.

امضاء	اساتید مشاور	امضاء	اساتید راهنما
	نام و نام خانوادگی: مهندس سجاد محمدی		نام و نام خانوادگی: دکتر محمد عطایی
	نام و نام خانوادگی:		نام و نام خانوادگی: دکتر رضا خالوکاآینی

امضاء	نماینده تحصیلات تکمیلی	امضاء	اساتید داور
	نام و نام خانوادگی: دکتر مهدی نوروزی		نام و نام خانوادگی: دکتر مجید نیکخواه
			نام و نام خانوادگی: دکتر رامین رفیعی
			نام و نام خانوادگی:
			نام و نام خانوادگی:

تقدیم بہ محضر مولا و آقا امام زمان عجل اللہ

تقدیم بہ پدر بزرگوارم

کہ با غیرت خود الفبای زندگی را بہ من آموخت

تقدیم بہ مادر فداکارم

کہ از اول آفرینش، بیچ واژہ ای توانستہ مہر او را معنی کند

«انامکہ بی صدا شکستند تا طلوع سپیدہ را نظارہ گر باشند»

## تشکر و قدردانی

سپاس خدای را که سخنوران، در ستودن او بمانند و شمارندگان، شمردن نعمت‌های او ندانند و کوشندگان، حق او را گزاردن نتوانند و سلام و درود بر محمد و خاندان پاک او، طاهران معصوم، آنان که وجودمان وامدار وجودشان است.

بدون شک جایگاه و منزلت معلم، والاتر از آن است که در مقام قدردانی از زحمات بی‌شائبه‌ی ایشان با زبان قاصر و دست ناتوان چیزی بنگارم. اما از آنجایی که تجلیل از معلم، سپاس از انسانی است که هدف و غایت آفرینش را تأمین می‌کند و سلامت امانت‌هایی که به دستش سپرده‌اند را تضمین، بر حسب وظیفه و از باب « من لم یشکر المنعم من المخلوقین لم یشکر الله عزّ و جلّ»، از استاد فرهیخته جناب آقای **پروفیسور محمد عطایی** که با وجود مشغله‌های فراوان در کمال سعه‌صدر راهنمای این حقیر بوده‌اند و همچنین استاد بزرگوار جناب آقای **پروفیسور رضا خالوکاکایی** که با حسن خلق و فروتنی، از هیچ کمکی در این عرصه دریغ ننمودند، سپاسگزاری نموده و سلامتی ایشان را از خدای یکتا آرزومندم. همچنین از استاد مشاور صبور و دلسوز، جناب آقای مهندس سجاد محمدی صمیمانه سپاسگزارم که بی‌شک انجام این تحقیق بدون راهنمایی‌ها و تلاش‌های مجدانه‌ی ایشان امکان‌پذیر نبوده است. در پایان لازم می‌دانم از جناب آقای دکتر داود شاهسونی و جناب آقای مهندس باقر رحیم‌پور برای راهنمایی‌های بی‌دریغشان تشکر نمایم.

## تعهد نامه

اینجانب محمود شریفی تودشکی دانشجوی دوره کارشناسی ارشد رشته مهندسی استخراج معدن دانشکده مهندسی معدن، نفت و ژئوفیزیک دانشگاه صنعتی شاهرود نویسنده پایان نامه توسعه مدل‌های ارزیابی پایداری در کارگاه‌های باز زیرزمینی مبتنی بر روش نمودار پایداری تحت راهنمایی دکتر محمد عطایی و دکتر رضا خالوکاکایی متعهد می‌شوم.

- تحقیقات در این پایان نامه توسط اینجانب انجام شده است و از صحت و اصالت برخوردار است .
- در استفاده از نتایج پژوهشهای محققان دیگر به مرجع مورد استفاده استناد شده است .
- مطالب مندرج در پایان نامه تاکنون توسط خود یا فرد دیگری برای دریافت هیچ نوع مدرک یا امتیازی در هیچ جا ارائه نشده است .
- کلیه حقوق معنوی این اثر متعلق به دانشگاه صنعتی شاهرود می باشد و مقالات مستخرج با نام « دانشگاه صنعتی شاهرود » و یا « Shahrood University of Technology » به چاپ خواهد رسید .
- حقوق معنوی تمام افرادی که در به دست آمدن نتایج اصلی پایان نامه تأثیرگذار بوده اند در مقالات مستخرج از پایان نامه رعایت می گردد.
- در کلیه مراحل انجام این پایان نامه ، در مواردی که از موجود زنده ( یا بافتهای آنها ) استفاده شده است ضوابط و اصول اخلاقی رعایت شده است .
- در کلیه مراحل انجام این پایان نامه، در مواردی که به حوزه اطلاعات شخصی افراد دسترسی یافته یا استفاده شده است اصل رازداری ، ضوابط و اصول اخلاق انسانی رعایت شده است .

### تاریخ

### امضای دانشجو

#### مالکیت نتایج و حق نشر

- کلیه حقوق معنوی این اثر و محصولات آن (مقالات مستخرج ، کتاب ، برنامه های رایانه ای ، نرم افزار ها و تجهیزات ساخته شده است ) متعلق به دانشگاه صنعتی شاهرود می باشد . این مطلب باید به نحو مقتضی در تولیدات علمی مربوطه ذکر شود .
- استفاده از اطلاعات و نتایج موجود در پایان نامه بدون ذکر مرجع مجاز نمی باشد.

## چکیده:

با توجه به عواقب ایمنی و اقتصادی یک طراحی نامناسب، پیش‌بینی شرایط پایداری در معادن زیرزمینی فلزی سنگ سخت امری ضروری است. پایداری در معدن کاری زیرزمینی سنگ سخت تابع پارامترهای بسیاری است. بنابراین پیش‌بینی شرایط پایداری با در نظرگیری تمامی پارامترهای تأثیر گذار مسأله‌ی پیچیده‌ای است. روش نمودار پایداری از سال ۱۹۸۱ به عنوان رایج‌ترین روش تجربی در بررسی شرایط پایداری کارگاه‌های باز زیرزمینی فلزی سنگ سخت به کار برده می‌شود. به دلیل تجربی بودن این روش و عدم وجود یک نمودار یکتا و ثابت برای تمام شرایط، ریسک‌های ناشی از خطاهای تفسیر نتایج در این روش زیاد است. علاوه بر این، پارامتر ضریب تأثیر نیروی ثقل در این روش برای سطوح مختلف یکسان در نظر گرفته شده است که باعث ایجاد خطا در پیش‌بینی شرایط می‌شود. برای رفع این دو مشکل عمده مدل‌های تخمینگر مجزا به منظور پیش‌بینی بهتر شرایط پایداری سقف و دیواره‌های کارگاه‌های باز زیرزمینی با استفاده از روش‌های رگرسیون منطقی، ماشین بردار پشتیبان و منطق فازی توسعه داده شد. برای آموزش و آزمون این مدل‌ها، از پایگاه داده‌ای شامل ۸۴ مطالعه موردی شرایط پایداری دیواره و ۷۸ مطالعه موردی شرایط پایداری سقف معادن کارگاه باز کانادا و غنا استفاده گردید. عملکرد مدل‌های توسعه یافته نیز با استفاده از معیارهای مختلف ارزیابی عملکرد مدل‌های دسته‌بندی مورد ارزیابی و مقایسه قرار گرفت. در نهایت با استفاده از داده‌های آزمون که در توسعه مدل‌ها نقشی نداشته‌اند، نتایج پیش‌بینی مدل‌ها با استفاده از معیارهای ارزیابی عملکرد با روش نمودار پایداری رایج مقایسه شد. نتایج حاصله نشان داد که مدل‌های ماشین بردار پشتیبان، منطق فازی و رگرسیون منطقی دارای عملکرد بهتری نسبت به روش نمودار پایداری در پیش‌بینی شرایط پایداری سقف و دیواره کارگاه‌های باز می‌باشند.

**واژگان کلیدی:** کارگاه باز، روش نمودار پایداری، رگرسیون منطقی، ماشین بردار پشتیبان، منطق

فازی، معیارهای ارزیابی عملکرد

## فهرست مطالب:

۱	فصل اول مقدمه و کلیات.....
۲	۱-۱ مقدمه.....
۳	۲-۱ اهمیت انجام تحقیق.....
۴	۳-۱ ضرورت انجام تحقیق.....
۵	۴-۱ اهداف تحقیق.....
۵	۵-۱ روش انجام تحقیق.....
۷	۶-۱ ساختار پایان نامه.....
۹	فصل دوم کارگاه‌های باز زیرزمینی و روش نمودار پایداری.....
۱۰	۱-۲ مقدمه.....
۱۰	۲-۲ روش کارگاه باز.....
۱۱	۱-۲-۲ انواع روش‌های کارگاه باز.....
۱۳	۲-۲-۲ ویژگی روش کارگاه باز.....
۱۳	۳-۲-۲ محدودیت‌های روش کارگاه باز.....
۱۴	۴-۲-۲ پایداری کارگاه باز.....
۱۵	۵-۲-۲ حالات شکست در کارگاه باز.....
۱۵	۳-۲ روش‌های طراحی تجربی.....
۱۶	۱-۳-۲ سیستم طبقه‌بندی توده‌سنگ (RMR).....
۱۷	۲-۳-۲ طبقه‌بندی شاخص کیفی تونل‌زنی (Q).....
۱۷	۳-۳-۲ نمودار تخریب لابسچر.....
۱۹	۴-۲ روش نمودار پایداری.....
۲۰	۱-۴-۲ نمودار پایداری سنتی.....
۲۲	۲-۴-۲ پارامترهای مورد نیاز در روش نمودار پایداری.....
۲۳	۱-۲-۴-۲ شعاع هیدرولیکی یا ضریب شکل.....
۲۴	۲-۲-۴-۲ عدد پایداری اصلاح شده.....
۲۵	۱-۲-۴-۲ تعیین شاخص کیفی تونل‌زنی اصلاح شده ( $Q'$ ).....
۲۶	الف- ضریب تنش سنگ (A).....
۲۷	ب- ضریب درزه (B).....
۲۸	ج- ضریب نیروی ثقل (C).....
۳۰	۳-۴-۲ پارامترهای اضافی مؤثر بر پایداری کارگاه باز.....
۳۱	۱-۳-۴-۲ ضریب گسل F.....
۳۲	۲-۳-۴-۲ اثر زمان.....
۳۴	۳-۳-۴-۲ تأثیرات انفجار.....
۳۶	۴-۴-۲ انواع نمودار پایداری.....
۳۶	۱-۴-۴-۲ تعیین اندازه کارگاه.....
۳۷	۲-۴-۴-۲ نمودار پایداری مبتنی بر ترقیق.....
۳۸	۳-۴-۴-۲ نمودار پایداری طراحی کابل‌های مهاری.....
۴۱	۴-۴-۴-۲ نمودارهای پایداری مبتنی بر ریسک.....



۴۲	..... ۵-۴-۲ اهداف روش نمودار پایداری
۴۳	..... ۶-۴-۲ مشکلات روش نمودار پایداری
۴۵	..... ۷-۴-۲ سابقه تحقیقات پیشین در زمینه نمودار پایداری
۴۸	..... ۷-۴-۲ جمع‌بندی
۴۹	..... فصل سوم روش‌های آماری و هوشمند در توسعه مدل ارزیابی پایداری
۵۰	..... ۱-۳ مقدمه
۵۰	..... ۲-۳ رگرسیون منطقی
۵۱	..... ۱-۲-۳ تخمین پارامترها در رگرسیون منطقی
۵۱	..... ۲-۲-۳ تخمین پارامتر در مدل‌های رگرسیونی غیرخطی دوتایی
۵۳	..... ۳-۳ رگرسیون منطقی چند جمله‌ای
۵۳	..... ۴-۳ کاربرد رگرسیون منطقی در مهندسی معدن
۵۵	..... ۵-۳ ماشین بردار پشتیبان (SVM)
۵۶	..... ۱-۵-۳ کلیات روش ماشین بردار پشتیبان
۵۷	..... ۲-۵-۳ تئوری ماشین‌های بردار پشتیبان
۵۸	..... ۱-۲-۵-۳ تئوری یادگیری آماری
۵۹	..... ۲-۲-۵-۳ تئوری حداقل‌سازی ریسک ساختاری
۵۹	..... ۳-۵-۳ بعد "Vapnik-Chervonenkis"
۶۰	..... ۴-۵-۳ ماشین بردار پشتیبان خطی
۶۷	..... ۵-۵-۳ ماشین بردار پشتیبان غیرخطی
۶۹	..... ۶-۵-۳ توابع کرنل
۷۱	..... ۸-۵-۳ کاربرد ماشین بردار پشتیبان در مهندسی معدن
۷۳	..... ۶-۳ منطق فازی
۷۳	..... ۱-۶-۳ نظریه مجموعه فازی
۷۵	..... ۲-۶-۳ فرآیند استنتاج فازی
۷۵	..... ۱-۲-۶-۳ فازی‌سازی ورودی‌ها
۷۶	..... ۲-۲-۶-۳ پایگاه اطلاعات
۷۸	..... ۳-۲-۶-۳ سیستم استنتاج فازی
۷۸	..... ۱-۳-۲-۶-۳ مدل فازی ممدانی
۷۹	..... ۲-۳-۲-۶-۳ مدل فازی سوگنو
۸۱	..... ۴-۲-۶-۳ غیر فازی‌سازی
۸۲	..... ۳-۶-۳ کاربرد روش منطق فازی در مهندسی معدن
۸۴	..... ۷-۳ جمع‌بندی
۸۵	..... فصل چهارم جمع‌آوری اطلاعات و ایجاد پایگاه داده
۸۶	..... ۱-۴ مقدمه
۸۶	..... ۲-۴ معرفی پایگاه داده
۸۷	..... ۱-۲-۴ پایگاه داده آسانتی
۸۸	..... ۲-۲-۴ پایگاه داده کالیبراسیون پوتوین
۸۸	..... ۳-۴ ساختار پایگاه داده

۹۳	۴-۴ جمع‌بندی
۹۵	<b>فصل پنجم توسعه مدل‌های ارزیابی پایداری کارگاه‌های باز زیرزمینی</b>
۹۶	۱-۵ مقدمه
۹۶	۲-۵ توسعه مدل‌های ارزیابی پایداری دیواره
۹۶	۱-۲-۵ مدل رگرسیون منطقی
۹۸	۲-۲-۵ مدل SVM
۱۰۰	۳-۲-۵ مدل منطق فازی
۱۰۱	۱-۳-۲-۵ فازی‌سازی پارامترهای ورودی و خروجی
۱۰۵	۲-۳-۲-۵ طراحی سیستم استنتاج فازی
۱۰۶	۳-۳-۲-۵ طراحی پایگاه قوانین
۱۰۶	۴-۳-۲-۵ فرآیند غیر فازی‌سازی
۱۰۸	۴-۲-۵ پیش‌بینی با استفاده از روش نمودار پایداری
۱۱۰	۵-۲-۵ بررسی عملکرد مدل‌های ارزیابی پایداری دیواره
۱۱۲	۶-۲-۵ ارزیابی عملکرد مدل‌ها با استفاده از معیارهای مختلف
۱۱۶	۳-۵ مدل‌های توسعه یافته برای شرایط پایداری سقف
۱۱۷	۱-۳-۵ مدل رگرسیون منطقی
۱۱۸	۲-۳-۵ مدل SVM
۱۲۰	۳-۳-۵ مدل منطق فازی
۱۲۰	۱-۳-۳-۵ فازی‌سازی پارامترهای ورودی و خروجی
۱۲۲	۲-۳-۳-۵ طراحی سیستم استنتاج فازی
۱۲۲	۳-۳-۳-۵ طراحی پایگاه قوانین
۱۲۳	۴-۳-۳-۵ فرآیند غیر فازی‌سازی
۱۲۴	۴-۳-۵ پیش‌بینی با استفاده از روش نمودار پایداری
۱۲۶	۵-۳-۵ ارزیابی عملکرد مدل‌های توسعه یافته
۱۲۸	۶-۳-۵ ارزیابی عملکرد مدل‌ها با استفاده از شاخص‌های عملکرد
۱۳۰	۴-۵ نتیجه‌گیری
۱۳۱	<b>فصل ششم نتیجه‌گیری و پیشنهادها</b>
۱۳۲	۱-۶ نتیجه‌گیری
۱۳۳	۲-۶ پیشنهادها
۱۳۵	<b>منابع و مراجع</b>
۱۴۷	<b>پیوست</b>



## فهرست شکل‌ها

- شکل ۱-۱: روند کلی انجام تحقیق ..... ۶
- شکل ۱-۲: طرح کلی نشان دهنده یک کارگاه باز ..... ۱۱
- شکل ۲-۲: معدن کاری کارگاه باز عرضی ..... ۱۲
- شکل ۳-۲: معدن کاری کارگاه باز طولی ..... ۱۳
- شکل ۴-۲: نمودار قابلیت تخریب لابسچر ..... ۱۸
- شکل ۵-۲: نمودار پایداری استاندارد ..... ۲۱
- شکل ۶-۲: روندنمای طراحی کارگاه باز به روش نمودار پایداری ..... ۲۲
- شکل ۷-۲: ابعاد ثابت و مجاز کارگاه ..... ۲۴
- شکل ۸-۲: منحنی تعیین ضریب A برای مقادیر مختلف  $\frac{\sigma_c}{\sigma_1}$  ..... ۲۷
- شکل ۹-۲: منحنی تعیین ضریب درزه B برای درزه‌های افقی با جبهه کار افقی ..... ۲۸
- شکل ۱۰-۲: منحنی تعیین ضریب B برای درزه‌های عمودی با جبهه کار عمودی ..... ۲۸
- شکل ۱۱-۲: حالات مختلف ناپایداری ..... ۲۹
- شکل ۱۲-۲: منحنی تعیین ضریب C برای حالت ریزش و ورقه ورقه شدن ..... ۳۰
- شکل ۱۳-۲: منحنی تعیین ضریب C برای حالات مختلف شکست لغزشی ..... ۳۰
- شکل ۱۴-۲: نمودار تعیین ضریب گسل برای گسل‌های متقاطع با کارگاه‌ها ..... ۳۲
- شکل ۱۵-۲: نمودار پایداری وابسته به زمان پیشنهاد شده ..... ۳۴
- شکل ۱۶-۲: تأثیر حفاری ضعیف و انفجار ناقص ..... ۳۶
- شکل ۱۸-۲: نمودار پایداری ELOS ..... ۳۸
- شکل ۱۹-۲: نمودار طراحی تراکم کابل مهاری ..... ۳۹
- شکل ۲۰-۲: نمودار تعیین فاصله‌داری و تراکم کابل‌های مهاری ..... ۴۰
- شکل ۲۱-۲: نمودار پایداری با خطوط هم تراز احتمالاتی ..... ۴۲
- شکل ۱-۳: تقسیم‌بندی تئوری ماشین‌های بردار پشتیبان ..... ۵۸
- شکل ۲-۳: شماتیکی از نحوه محاسبه بُعد "Vapnik-Chervonenkis" ..... ۶۰
- شکل ۳-۳: داده‌های آموزشی در دو کلاس قابل جداسازی به صورت خطی ..... ۶۱
- شکل ۴-۳: ابرصفحه‌های جداساز ممکن برای جداسازی دو کلاس ..... ۶۲
- شکل ۵-۳: ابرصفحه جداساز بهینه با حداکثر مقدار حاشیه ..... ۶۲
- شکل ۶-۳: ابرصفحه‌های جداساز: حاشیه ایجاد شده توسط خط ضخیم‌تر بیشتر از خط نازک‌تر است ..... ۶۴
- شکل ۷-۳: ابرصفحه جداساز بهینه و مرزهای مربوط به دو کلاس ..... ۶۵
- شکل ۸-۳: انتقال فضای ورودی به فضای ویژگی با تبدیل هیلبرت ..... ۶۸
- شکل ۹-۳: تعریفی مصور از مجموعه‌های قطعی و فازی ..... ۷۴
- شکل ۱۰-۳: ساختار سیستم خبره فازی ..... ۷۵
- شکل ۱۱-۳: سیستم استنتاج فازی ممدانی ..... ۷۹
- شکل ۱۲-۳: مدل استنتاج فازی سوگنو ..... ۸۱
- شکل ۱۳-۳: روش‌های مختلف غیر فازی‌سازی ..... ۸۲
- شکل ۱-۴: نمودار توزیع فراوانی داده‌های شعاع هیدرولیکی دیواره ..... ۸۹
- شکل ۲-۴: نمودار توزیع فراوانی داده‌های سیستم اصلاح شده طبقه‌بندی توده‌سنگ دیواره ..... ۹۰

- شکل ۳-۴: نمودار توزیع فراوانی داده‌های ضریب تنش سنگ دیواره ..... ۹۰
- شکل ۴-۴: نمودار توزیع فراوانی داده‌های ضریب درزه دیواره ..... ۹۰
- شکل ۵-۴: نمودار توزیع فراوانی داده‌های ضریب نیروی ثقل دیواره ..... ۹۱
- شکل ۶-۴: نمودار جعبه‌ای مربوط به داده‌های سقف ..... ۹۱
- شکل ۷-۴: نمودار جعبه‌ای مربوط به داده‌های دیواره ..... ۹۲
- شکل ۸-۴: اطلاعات مربوط به فراوانی داده‌های آموزش مدل‌های دیواره و سقف ..... ۹۳
- شکل ۹-۴: اطلاعات مربوط به فراوانی داده‌های آزمون مدل‌های دیواره و سقف ..... ۹۳
- شکل ۱-۵: مقادیر دقت برای ترکیب‌های مختلف ( $\gamma$ , C) ..... ۹۹
- شکل ۲-۵: پارامترهای ورودی و خروجی مدل فازی ..... ۱۰۱
- شکل ۳-۵: نمایش عدد فازی مثلثی ..... ۱۰۱
- شکل ۴-۵: نمایش عدد فازی ذوزنقه‌ای ..... ۱۰۲
- شکل ۵-۵: توابع عضویت برای پارامتر شعاع هیدرولیکی (HR) ..... ۱۰۳
- شکل ۶-۵: توابع عضویت برای پارامتر شاخص کیفی اصلاح شده تونل‌زنی ( $Q'$ ) ..... ۱۰۳
- شکل ۷-۵: توابع عضویت برای پارامتر ضریب تنش سنگ (A) ..... ۱۰۴
- شکل ۸-۵: توابع عضویت برای پارامتر ضریب درزه (B) ..... ۱۰۴
- شکل ۹-۵: توابع عضویت برای پارامتر ضریب نیروی ثقل (C) ..... ۱۰۴
- شکل ۱۰-۵: برچسب‌های مربوط به کلاس‌های پایداری ..... ۱۰۵
- شکل ۱۱-۵: نحوه‌ی پیش‌بینی شرایط پایداری با استفاده از مدل فازی پیشنهادی ..... ۱۰۷
- شکل ۱۲-۵: تخمین شرایط پایداری داده‌های آزمون دیواره به وسیله‌ی نمودار پایداری پیشنهادی نیکسون ..... ۱۰۹
- شکل ۱۳-۵: مقادیر دقت برای ترکیب‌های مختلف ( $\gamma$ , C) ..... ۱۱۹
- شکل ۱۴-۵: توابع عضویت برای پارامتر شعاع هیدرولیکی (HR) ..... ۱۲۰
- شکل ۱۵-۵: توابع عضویت برای پارامتر شاخص کیفی اصلاح شده تونل‌زنی ( $Q'$ ) ..... ۱۲۱
- شکل ۱۶-۵: توابع عضویت برای پارامتر ضریب تنش سنگ (A) ..... ۱۲۱
- شکل ۱۷-۵: توابع عضویت برای پارامتر ضریب درزه (B) ..... ۱۲۱
- شکل ۱۸-۵: توابع عضویت برای پارامتر ضریب نیروی ثقل (C) ..... ۱۲۲
- شکل ۱۹-۵: برچسب‌های مربوط به کلاس‌های پایداری ..... ۱۲۲
- شکل ۲۰-۵: نحوه‌ی پیش‌بینی شرایط پایداری با استفاده از مدل فازی پیشنهادی ..... ۱۲۴
- شکل ۲۱-۵: تخمین شرایط پایداری داده‌های آزمون سقف به وسیله‌ی نمودار پایداری پیشنهادی نیکسون ..... ۱۲۵
- شکل ۳: نمودار توزیع فراوانی داده‌های شعاع هیدرولیکی سقف ..... ۱۵۴
- شکل ۲: نمودار توزیع فراوانی داده‌های سیستم اصلاح شده طبقه‌بندی توده‌سنگ سقف ..... ۱۵۴
- شکل ۳: نمودار توزیع فراوانی داده‌های ضریب تنش سنگ سقف ..... ۱۵۴
- شکل ۴: نمودار توزیع فراوانی داده‌های ضریب درزه سقف ..... ۱۵۵
- شکل ۵: نمودار توزیع فراوانی داده‌های ضریب نیروی ثقل سقف ..... ۱۵۵

## فهرست جدول‌ها:

- جدول ۲-۱: حدود تغییرات ضرایب مربوط به عدد پایداری اصلاح شده ..... ۲۵
- جدول ۲-۲: تعیین ضریب زمان ..... ۳۳
- جدول ۲-۳: مطالعات انجام شده در زمینه‌ی نمودار پایداری تا به امروز ..... ۴۶
- جدول ۳-۱: برخی از مطالعات انجام شده توسط محققان مختلف با استفاده از روش رگرسیون منطقی در حوزه مهندسی معدن ..... ۵۴
- جدول ۳-۲: برخی از توابع معروف کرنل ..... ۷۰
- جدول ۳-۳: برخی از مطالعات انجام شده توسط محققان مختلف با استفاده از روش SVM در حوزه مهندسی معدن ..... ۷۱
- جدول ۳-۴: برخی از مطالعات انجام شده توسط محققان مختلف با استفاده از روش منطق فازی در حوزه مهندسی معدن ..... ۸۲
- جدول ۵-۱: نتایج حاصل از آموزش مدل رگرسیون منطقی ..... ۹۸
- جدول ۵-۲: نتایج حاصل از آموزش مدل SVM ..... ۱۰۰
- جدول ۵-۳: متغیرهای زبانی استفاده شده در مدل فازی ..... ۱۰۲
- جدول ۵-۴: نمونه‌هایی از قوانین فازی به کار برده شده در مدل فازی پیشنهادی ..... ۱۰۶
- جدول ۵-۵: نتایج حاصل از آموزش مدل فازی ..... ۱۰۸
- جدول ۵-۶: پیش‌بینی موارد آزمون دیواره با استفاده از روش نمودار پایداری ..... ۱۰۹
- جدول ۵-۷: ماتریس درهم ریختگی مراحل آموزش و آزمون مدل رگرسیون منطقی ..... ۱۱۱
- جدول ۵-۸: ماتریس درهم ریختگی مراحل آموزش و آزمون مدل SVM ..... ۱۱۱
- جدول ۵-۹: ماتریس درهم ریختگی مراحل آموزش و آزمون مدل منطق فازی ..... ۱۱۱
- جدول ۵-۱۰: ماتریس احتمال ..... ۱۱۱
- جدول ۵-۱۱: شدت نسبی توافق مربوط به آماره کاپا ..... ۱۱۵
- جدول ۵-۱۲: شاخص‌های ارزیابی کارایی مدل‌های پیشنهادی ..... ۱۱۵
- جدول ۵-۱۳: نتایج حاصل از آموزش مدل رگرسیون منطقی ..... ۱۱۸
- جدول ۵-۱۴: نتایج حاصل از آموزش مدل SVM ..... ۱۱۹
- جدول ۵-۱۵: نمونه‌هایی از قوانین فازی به کار برده شده در مدل فازی پیشنهادی ..... ۱۲۳
- جدول ۵-۱۶: پیش‌بینی داده‌های آزمون سقف با استفاده از روش نمودار پایداری ..... ۱۲۵
- جدول ۵-۱۷: ماتریس درهم ریختگی مراحل آموزش و آزمون مدل رگرسیون منطقی ..... ۱۲۷
- جدول ۵-۱۸: ماتریس درهم ریختگی مراحل آموزش و آزمون مدل SVM ..... ۱۲۷
- جدول ۵-۱۹: ماتریس درهم ریختگی مراحل آموزش و آزمون مدل منطق فازی ..... ۱۲۸
- جدول ۵-۲۰: شاخص‌های ارزیابی کارایی مدل‌های پیشنهادی ..... ۱۲۹

# فصل اول

مقدمه و کلیات

## ۱-۱ مقدمه

روش معدن کاری کارگاه باز رایج ترین روش استخراج معادن سنگ سخت در کشور کانادا است. این روش برای استخراج کانسنگ های با کیفیت و نسبتاً شیب دار با سنگ های دربرگیرنده دارای کیفیت خوب، مناسب است. با توجه به در دسترس بودن فناوری های جدید نگهداری، حفاری و انفجار زمین، روش کارگاه باز به سرعت به نخستین روش استخراج برای بسیاری از عملیات معدن کاری زیرزمینی تبدیل شد. از اینرو توسعه یک روش طراحی کارگاه باز قابل سنجش به منظور جایگزینی روش های استخراج قبلی مورد نیاز بود (Grenon & Hadjigeorgiou, 2003).

در اوایل سال ۱۹۸۰ میلادی بخش بزرگی از صنعت معادن فلزی زیرزمینی، راهبرد<sup>۱</sup> استخراج خود را از روش های مرسوم نظیر «کندن و پرکردن»<sup>۲</sup> به سمت کارگاه باز تغییر دادند. به طوری که بر اساس گزارش های سال ۱۹۹۵ حدود ۹۰٪ معادن فلزی کانادا با این روش استخراج می شدند (Hustrulid et al., 2001). علت این رویکرد هزینه بالای آماده سازی کارگاه ها است که در اثر آن تعداد کمتری کارگاه ولی با مقیاس و ابعاد بزرگتر ایجاد و در نتیجه صرفه جویی در هزینه ها را سبب می شود. از طرف دیگر با بیشتر شدن ابعاد کارگاه های باز نسبت به ابعاد دارای پایداری کافی، ایمنی کاهش و بعضاً نتیجه می تواند فاجعه بار باشد. ناپایداری و ریزش در حوزه کارگاه های باز، هزینه های بازسازی بالا، تأخیر در تولید، بالارفتن میزان ترقیق، از بین رفتن ذخایر معدنی و در نهایت لطمات جانی را به دنبال خواهد داشت. همچنین با توجه به گزارش های مربوط به میزان ترقیق<sup>۳</sup> بالا در اوایل سال ۱۹۸۰، این وضعیت را می توان به عدم وجود ابزارهای طراحی مهندسی جامع نسبت داد (Hustrulid et al., 2001). از اینرو روش نمودار پایداری برای طراحی کارگاه های باز در کانسارهای توده ای عریض توسط ماثوس<sup>۴</sup> و همکاران در سال ۱۹۸۱ میلادی معرفی شد (Mathews et al., 1981). این روش در سال ۱۹۸۸ به

1 - Strategy

2 - Cut And Fill

3 - Dilution

4 - Mathews



دنبال افزایش پایگاه داده‌ی اصلی از ۲۶ مطالعه موردی از ۳ معدن به ۱۷۵ مورد از ۳۴ معدن و اصلاح متغیرهای عدد پایداری توسط پوتوین<sup>۱</sup> تبدیل به روشی رایج در معدن‌کاری زیرزمینی شد (Potvin, 1988). پس از آن نیکسون<sup>۲</sup> (Nickson, 1992) و پوتوین و میلن<sup>۳</sup> (Potvin & Milne, 1992) روش کامل‌تری برای طراحی کابل مهاری با استفاده از روش نمودار پایداری ارائه کرده‌اند. ترومن<sup>۴</sup> و ماودسلی<sup>۵</sup> (۲۰۰۳) نمودار پایداری مائتوس را بر اساس بیش از ۴۰۰ مطالعه موردی از معادن تخریب بلوکی، برای تخریب‌پذیری توسعه داده‌اند (Trueman & Mawdesley, 2003).

## ۱-۲ اهمیت انجام تحقیق

نیاز روزافزون بشر به مواد معدنی، چشم‌انداز رو به پایان کنسارهای سطحی و نیز کاهش هزینه‌های تولید در معدن‌کاری زیرزمینی ناشی از توسعه فناوری‌های آماده‌سازی و استخراج سبب استفاده از روش‌های کم هزینه و قابل رقابت با روش استخراج روباز شده است. طراحی استخراج کنسارهای فلزی سنگ سخت با توجه به عمق کنسارها و شرایط مؤثر برای روش‌های مختلف به صورت روباز و زیرزمینی انجام می‌شود. به این صورت که کنسارهای سطحی و نزدیک سطح به روش‌های مختلف روباز استخراج و با افزایش عمق روش‌های روباز به علت افزایش هزینه‌های استخراج قابلیت خود را از دست داده و به سمت روش‌های زیرزمینی گرایش پیدا می‌شود. به همین دلیل طراحی کارگاه برای انجام استخراج کنسار به صورت زیرزمینی حائز اهمیت است.

در استفاده از پرکاربردترین روش طراحی کارگاه استخراج باز (روش نمودار پایداری)، نواقص و اشکالاتی وجود دارد. از جمله این موارد می‌توان به وجود نواحی پایداری مختلف اشاره کرد. به این معنی که وضعیت پایداری جبهه کار کارگاه استخراج بسته به اینکه کدام نسخه از نمودار پایداری مورد استفاده قرار گیرد، تغییر خواهد کرد؛ که این منبعی برای ایجاد سردرگمی کاربران نمودار پایداری و افرادی که

<sup>1</sup> - Potvin

<sup>2</sup> - Nickson

<sup>3</sup> - Millen

<sup>4</sup> - Trueman

<sup>5</sup> - Mawdesley

از توسعه آن اطلاع چندانی ندارند، است. به همین علت، توسعه مدل‌های پیش‌بینی شرایط پایداری توسط روش‌های مختلف برای کم کردن خطای پیش‌بینی توسط نمودار پایداری اهمیت دارد.

### ۱-۳ ضرورت انجام تحقیق

کشور ایران به صورت بالقوه از ذخایر فلزی مختلف از جمله سنگ آهن مساعدی برخوردار است و در طول ۳ دهه گذشته کلیه فعالیت‌ها بر روی معادن سنگ آهن، سطحی بوده و به صورت روباز استخراج شده است. اما اگر هدف، حفظ جایگاه کشور در تولید سنگ آهن با هدف تأمین سنگ آهن مورد نیاز کارخانه‌های داخلی فولادسازی و همچنین صادرات مازاد آن باشد، به ناچار باید بخشی از ذخایر سنگ آهن به صورت زیرزمینی تجهیز و آماده استخراج شود. با وجود اینکه روی ذخایر زیرزمینی مطالعات دقیق انجام نشده است، اما همین مطالعات اندک نشان از استعداد اقتصادی و قابل قبول کشور در معادن سنگ آهن زیرزمینی دارد (<http://www.imidro.gov.ir>).

با توجه به ضرورت افزایش توسعه استفاده از معادن زیرزمینی در کشور برای استخراج فلزات که به صورت کارگاه‌های باز طراحی می‌شوند (که از جمله این موارد می‌توان به ذخیره شماره ۶ گل‌گهر که در دست طراحی است، اشاره کرد)، نیاز است تا در جهت کاهش نواقص روش نمودار پایداری به عنوان یکی از مهمترین روش‌های طراحی کارگاه باز، پیش‌بینی پایداری و بررسی شرایط قابلیت تخریب حرکت کرد. پیش‌بینی نادرست وضعیت پایداری و انتخاب ابعاد نامناسب برای کارگاه‌های باز منجر به بروز خطرات ناپایداری، افزایش میزان ترقیق و یا از بین رفتن ماده معدنی می‌شود که به لحاظ اقتصادی نیز باعث ایجاد مشکلاتی می‌شود. از اینرو توسعه مدل‌هایی با دقت پیش‌بینی بیشتر برای جلوگیری از خسارات جانی و مالی به وجود آمده بر اثر در نظرگیری ابعاد نامناسب کارگاه‌های باز، امری ضروری است.

## ۴-۱ اهداف تحقیق

در نمودار پایداری مرزهای تعریف شده برای هر یک از حالات پایداری نسبت به نوع نمودار متفاوت است. این نقیصه در کنار گنجاندن تمام دیواره‌ها در یک نمودار باعث ایجاد سردرگمی برای کاربران و بروز خطا در پیش‌بینی شرایط پایداری می‌شود. بر این اساس، ضریب تأثیر نیروی ثقل در این روش برای سطوح مختلف یکسان در نظر گرفته شده است، که باعث ایجاد خطا در پیش‌بینی شرایط پایداری کارگاه می‌شود. بنابراین باید نمودار برای سطوح مختلف کارگاه‌ها به صورت مجزا از یکدیگر باشند. برای رفع این دو مشکل عمده مدل‌های تخمینگر مجزا برای ارزیابی پایداری سقف و دیواره‌ها با استفاده از روش‌های رگرسیون منطقی<sup>۱</sup>، ماشین بردار پشتیبان<sup>۲</sup> و منطق فازی<sup>۳</sup> توسعه داده شده است. بر این اساس هدف از انجام این تحقیق، توسعه مدل‌هایی با دقت بیشتر برای پیش‌بینی وضعیت پایداری کارگاه‌های باز زیرزمینی برای جلوگیری از خسارات جانی و مالی به وجود آمده بر اثر در نظرگیری ابعاد نامناسب برای کارگاه‌ها است.

## ۵-۱ روش انجام تحقیق

با توجه به نقص‌های روش نمودار پایداری و همچنین تفاوت در تأثیر نیروی ثقل بر روی پایداری بخش‌های مختلف کارگاه زیرزمینی مدل‌های رگرسیون منطقی، SVM و منطق فازی به طور مجزا برای پیش‌بینی پایداری دیواره و سقف توسعه داده شده است. روند کلی انجام این پژوهش شامل ۵ مرحله کلی مطابق شکل ۱-۱ است، که به شرح زیر است:

مرحله اول: پایگاه داده تحقیق بر اساس داده‌های موجود به دو قسمت مربوط به دیواره‌ها و سقف تقسیم می‌شود. بر این اساس برای ایجاد مدل‌ها، پایگاه داده‌ای شامل ۸۴ مورد شرایط پایداری برای دیواره‌ها و ۷۸ مورد شرایط پایداری سقف انتخاب شده است.

<sup>1</sup> - Logistic Regression

<sup>2</sup> - Support Vector Machine (SVM)

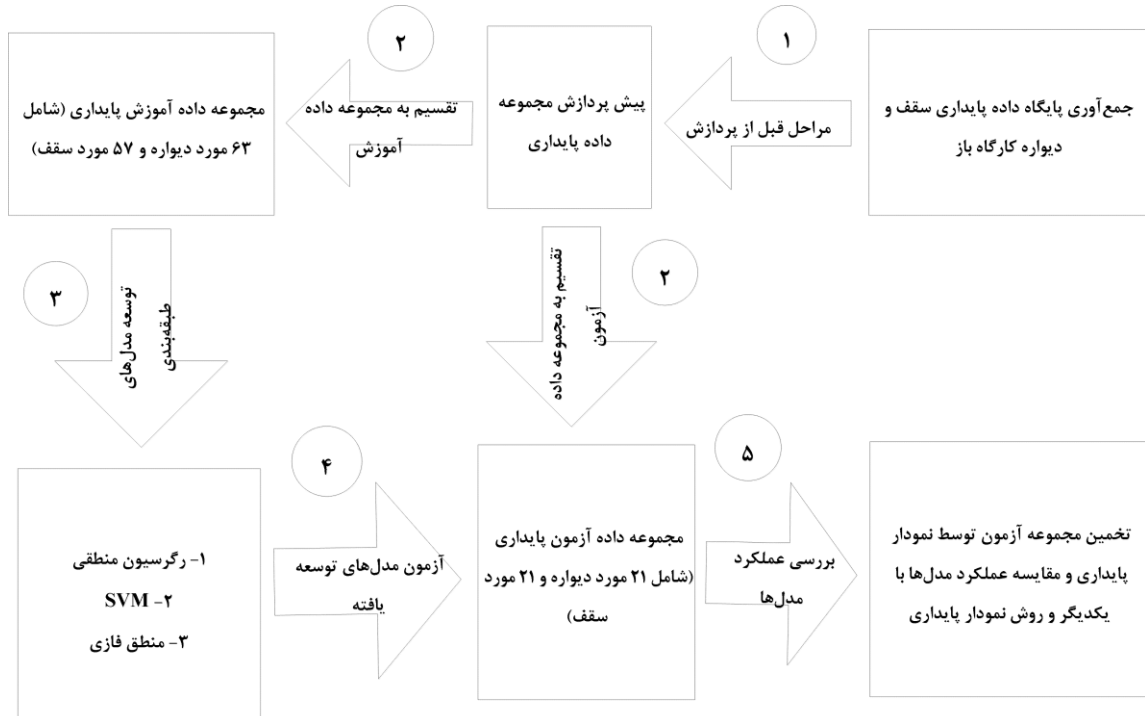
<sup>3</sup> - Fuzzy Logic

مرحله دوم: مجموعه داده‌های دیواره و سقف به دو مجموعه آموزش و آزمون تقسیم می‌شود. بر این اساس حدود ۷۵ درصد از داده‌ها (۶۳ داده دیواره و ۵۷ داده سقف) برای آموزش مدل‌ها و حدود ۲۵ درصد از داده‌ها (۲۱ داده دیواره و ۲۱ داده سقف) نیز برای آزمون آنها مورد استفاده قرار گرفته است.

مرحله سوم: مدل‌های دسته‌بندی رگرسیون منطقی، SVM و منطق فازی با استفاده از داده‌های آموزشی برای هر دو مدل سقف و دیواره توسعه داده شده است.

مرحله چهارم: مدل‌های آموزش دیده برای سقف و دیواره، با استفاده از داده‌های آزمون مربوطه مورد ارزیابی قرار می‌گیرد. برای این کار از معیارهای ارزیابی عملکرد مدل‌ها استفاده شده است.

مرحله پنجم: در این مرحله مدل‌های توسعه یافته با روش نمودار پایداری مقایسه شده است. برای این کار از داده‌های آزمون مدل‌های توسعه یافته استفاده و نتایج حاصله با استفاده از معیارهای عملکرد مدل‌ها با یکدیگر مقایسه شده است.



شکل ۱-۱: روند کلی انجام تحقیق

## ۱-۶ ساختار پایان نامه

پژوهش حاضر در ۶ فصل تدوین شده است:

**فصل اول:** در قسمت اول با بیان مقدمه‌ای به تعیین ضرورت، اهداف و اهمیت تحقیق پرداخته شده است.

**فصل دوم:** در ابتدا روش کارگاه باز، انواع روش‌های طراحی تجربی، روش نمودار پایداری بیان شده و پس از آن سابقه‌ی علمی مربوط به روش نمودار پایداری ذکر شده است.

**فصل سوم:** در این فصل کلیات روش‌های رگرسیون منطقی، ماشین بردار پشتیبان و منطق فازی و نیز سابقه‌ی علمی این موارد در مهندسی معدن ذکر شده است.

**فصل چهارم:** در این فصل پایگاه داده مورد استفاده در تحقیق معرفی و بررسی آماری پایگاه داده مورد استفاده پرداخته شده است.

**فصل پنجم:** مدل‌های رگرسیون منطقی، ماشین بردار پشتیبان و منطق فازی برای پیش‌بینی شرایط پایداری سقف و دیواره به طور مجزا توسعه داده شده و مقایسه نتایج حاصله با روش نمودار پایداری انجام شده است.

**فصل ششم:** به ارائه‌ی نتایج به دست آمده پرداخته شده است. در انتها نیز پیشنهادهایی بر مبنای این پژوهش برای تحقیقات آتی عنوان شده است.



# فصل دوم

کارگاه‌های باز‌زیرزمینی و روش نمودار پایداری

## ۲-۱ مقدمه

روش نمودار پایداری یکی از روش‌های رایج برای طراحی ابعاد پایدار کارگاه‌های باز زیرزمینی است. از اینرو در این فصل با توجه به اهمیت طراحی کارگاه‌های باز در بخش نخست کلیاتی راجع به کارگاه باز ارائه شده است. با توجه به تجربی بودن روش نمودار پایداری در بخش بعدی انواع روش‌های طراحی تجربی ژئومکانیکی به صورت مختصری بیان شده است. در ادامه نیز کلیات و نقد و بررسی روش نمودار پایداری صورت گرفته و سابقه‌ی علمی این موضوع نیز در نهایت ذکر شده است.

## ۲-۲ روش کارگاه باز

معدن کاری کارگاه باز روش معدن کاری زیرزمینی توده‌ای<sup>۱</sup> است، که عموماً در کنسارهای صفحه‌ای<sup>۲</sup> شکل با شکل نسبتاً منظم به کار می‌رود. این روش رایج‌ترین روش استخراج در معادن سنگ سخت کانادا است و برای استخراج کنسارهایی نسبتاً شیبدار و دارای سنگ‌های معدنی و دربرگیرنده با کیفیت خوب، مناسب است. کارگاه‌های باز عموماً به کارگاه‌هایی گفته می‌شوند که به طور کلی نیازی به نگهداری ندارند و در آنها فقط به صورت جزئی از ملزومات نگهداری همچون چوب، بولت و غیره استفاده می‌شود. همچنین این روش یک روش بدون راهرو<sup>۳</sup> است که آن را تبدیل به یکی از ایمن‌ترین روش‌های معدن کاری زیرزمینی کرده است (Urli, 2015).

در این روش همانطور که در شکل ۱-۲ نشان داده شده، استخراج کانه با حفاری و انفجار چال‌های بلند رو به بالا بین دو طبقه فرعی انجام می‌شود و سپس در طبقه پایین‌تر عملیات تخریب انجام می‌شود. در ضمن کارگاه استخراج در طول فرآیند کلی استخراج به طور کلی به صورت باز و نگهداری نشده باقی می‌ماند و پس از اینکه کانه خرد شده به طور کامل تخلیه شد، کارگاه استخراج برای فراهم کردن نگهداری لازم برای دیواره‌های کناری با استفاده از باطله‌های سنگی به طور کامل پر می‌شود (Hustrulid et al., 2001).

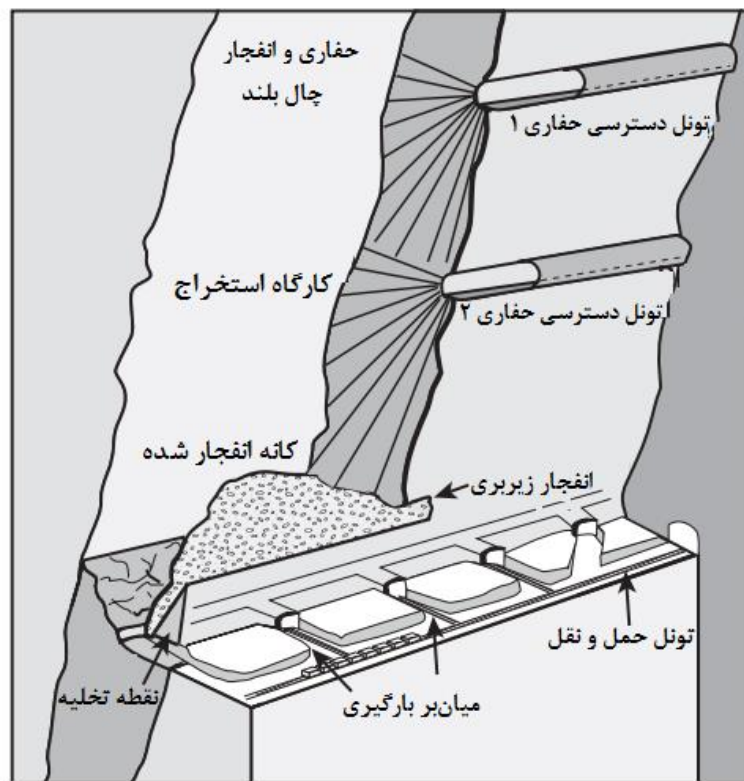
---

1- Bulk

2- Tabular

3 - Non-Entry





شکل ۱-۲: طرح کلی نشان دهنده یک کارگاه باز (Hustrulid et al., 2001)

از جمله مزایای اصلی این روش معدن کاری، بدون راهرو بودن آن است که این ویژگی آن را تبدیل به یکی از ایمن‌ترین روش‌های معدن کاری نموده است. دومین مزیت این روش امکان دستیابی به نرخ تولید بالا است. با این وجود، بهره‌برداری از یک بازکننده‌ی بزرگ زیرزمینی که به صورت نگهداری نشده است، اغلب با مشکلات ناپایداری همراه و می‌تواند منجر به میزان ترقیق قابل توجهی شود. واضح است که میزان ترقیق بیش از حد می‌تواند منجر به تعلیق و یا تعطیلی یک عملیات معدنی شود و این مورد از این نظر می‌تواند با ایجاد مشکلاتی همراه شود (Urli, 2015).

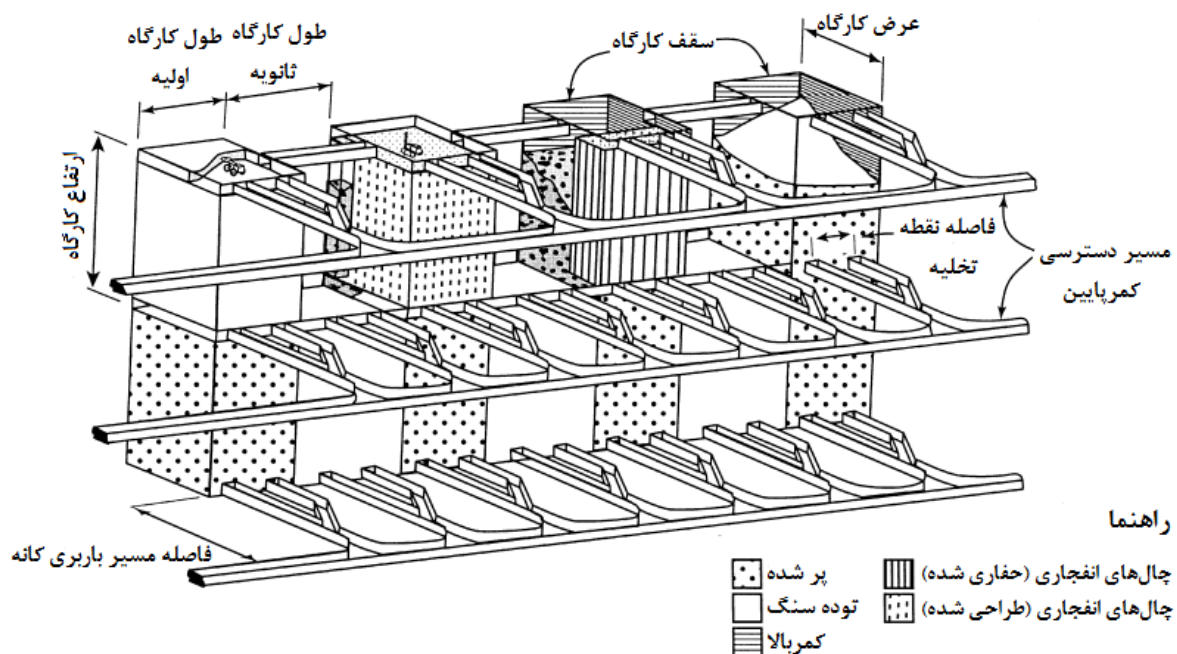
## ۱-۲-۲ انواع روش‌های کارگاه باز

دو نوع معدن کاری کارگاه باز که بیشتر مورد توجه قرار گرفته‌اند، عبارتند از: کارگاه باز با چال‌های انفجاری عرضی<sup>۱</sup> و کارگاه باز طولی<sup>۲</sup>. کارگاه باز با چال‌های انفجاری عرضی برای معدن کاری در شرایط

<sup>۱</sup> - Transverse Blasthole Open Stopping

<sup>۲</sup> - Longitudinal Open Stopping

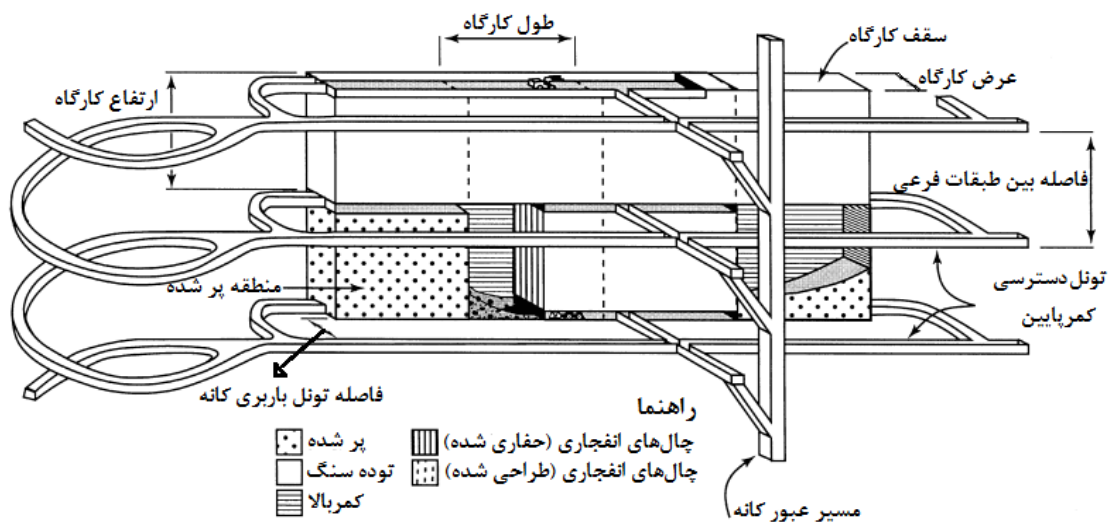
کم تنش و نیز برای تعیین توالی کارگاه‌های پیچیده مطلوب است. مطابق شکل ۲-۲ تمایزی بین کارگاه اولیه و ثانویه صورت گرفته است. ابتدا کارگاه‌های اولیه استخراج و در صورت نیاز پس از استخراج، کارگاه‌ها پر می‌شوند. هنگامی که اکثر کارگاه‌های اولیه حفاری و پر می‌شوند، اپراتورهای معدن از کارگاه‌های ثانویه استفاده می‌کنند. چنین توالی معدن کاری می‌تواند منجر به تمرکز تنش<sup>۱</sup> و مشکلات کنترل زمین شود. کارگاه باز طولی (شکل ۲-۳)، می‌تواند قطعاً منجر به کنترل بهتر مشکلات ناشی از تنش شود، به نحوی که تعداد پایه‌های باقی مانده<sup>۴</sup> را حداقل می‌کند. در این نوع کارگاه‌ها به صورت کامل ناحیه معدنی استخراج می‌شود و این ناحیه به منزله‌ی عرض کارگاه است (Potvin, 1988).



شکل ۲-۲: معدن کاری کارگاه باز عرضی (Potvin, 1988)

<sup>1</sup>- Stress Concentration

<sup>4</sup>- Pillars Left Behind



شکل ۲-۳: معدن کاری کارگاه باز طولی (Potvin, 1988)

## ۲-۲-۲ ویژگی روش کارگاه باز

رایج‌ترین ویژگی‌های کارگاه باز می‌تواند به شرح زیر بیان شود (Tavakoli, 1994):

- کاملاً باز در اکثر مراحل و فاقد شکست اساسی یا تخریب کلی
- توسعه کارگاه از یک طبقه فرعی به طبقه فرعی دیگر، انجام عملیات بهره برداری تنها از طریق این فرعی‌ها
- حرکت کانه خرد شده به وسیله‌ی نیروی ثقل به نقاط تخلیه که به صورت ثابت هستند.
- استفاده از چال‌های انفجاری طویل برای عملیات انفجاری
- دهانه‌های باز و طول کارگاه‌ها معمولاً ده‌ها متر است.
- شیب کارگاه معمولاً بیشتر از ۵۰ درجه است.
- یک اتاق وسیع اولیه در زیر یا کناره هر کارگاه ایجاد می‌شود.
- معدن‌کاران در داخل کارگاه کار نمی‌کنند.

## ۳-۲-۲ محدودیت‌های روش کارگاه باز

به طور کلی این روش به دلیل محدودیت‌ها و مشکلات موجود در سایر روش‌های معدن‌کاری، انتخاب

شده است. به هر حال شواهدی وجود دارد که به دلیل محدودیت‌های زیر دستیابی به پتانسیل کامل روش ممکن نیست (Tavakoli, 1994):

- مناطق دارای شرایط ضعیف زمین که دسترسی و توسعه را به تأخیر می‌اندازد.
- لنگه تاج‌هایی<sup>۱</sup> که غیر قابل بازیابی هستند.
- اضافه شکست قابل توجه ناشی از دیواره‌ها و سقف کارگاه
- عدم وجود روشی جامع و دقیق برای طراحی کارگاه

## ۲-۲-۴ پایداری کارگاه باز

پایداری در معدن کاری کارگاه باز به سه سطح مختلف سراسری<sup>۲</sup>، ناحیه‌ای<sup>۳</sup> و موضعی<sup>۴</sup> وابسته به حجم سنگ درگیر تقسیم و به صورت زیر بیان می‌شود (Stillberg, 1984):

(۱) ناپایداری کلی که در صورتی رخ می‌دهد که یک ساختار اصلی و یا قسمتی از آن (همچون

کمربالا یا لنگه تاج) بشکند و کنترل فرآیند معدن کاری را دچار مشکل کند. این فروپاشی<sup>۵</sup>

باید به وسیله تقویت و یا طراحی تاج و پایه‌های جانبی جلوگیری شود، به طوری که به

کمربالا در طول استخراج کارگاه‌ها استحکام کافی ببخشد.

(۲) پایداری ناحیه‌ای که باید در هنگام طراحی ارتفاع کارگاه و ابعاد پایه‌ها لحاظ شود. پایداری

کمربالا برای جلوگیری از گسترش شکست که ممکن است منجر به ترقیق زیاد و امکان

ناپایداری کلی شود، ضروری است.

(۳) پایداری موضعی مربوط به میزان حفاری و بارگیری، خسارت ناشی از انفجار و جهت‌داری

نامطلوب ناپیوستگی که منجر به تشکیل گوه‌ها یا بلوک‌هایی برای سقوط به درون تونل‌های

دنبال لایه و مسیرهای عبور کانه می‌شود، است. تأثیر اقتصادی این قبیل از مشکلات ناپایداری

<sup>1</sup> - Crown Pillars

<sup>2</sup> - Global

<sup>3</sup> - Regional

<sup>4</sup> - Local

<sup>5</sup> - Collapse

امکان ندارد برای ساختارهای معدنی خطرناک باشد، ولی به هر حال ملاحظات ایمنی نباید نادیده گرفته شود.

## ۲-۲-۵ حالات شکست در کارگاه باز

عوامل زیر ممکن است به شکست در کارگاه‌های باز کمک کند (Tavakoli, 1994):

- اندازه و هندسه بازکننده‌ها
  - ویژگی‌های زمین‌شناسی همچون چین‌خوردگی، درزه‌ها و گسل‌ها
  - بازتوزیع تنش به علت حفاری‌ها و فعالیت‌های معدن‌کاری
- شکست در کارگاه‌های باز معمولاً به عنوان یک نتیجه‌ی ترکیبی از این سه عامل اتفاق خواهد افتاد. برای مثال وقتی ابعاد یک بازکننده افزایش یابد، احتمال شکست نیز به دلایل ناپیوستگی‌های زمین‌شناسی و یا تنش افزایش می‌یابد. اکثر مشکلات پایداری در کارگاه‌ها مربوط به ناپیوستگی‌های موجود در سنگ است و به خود سنگ مربوط نمی‌باشد. برای انواع حالات شکست در این کارگاه‌ها می‌توان به موارد زیر اشاره کرد:

- شکست گوه‌ای طولی<sup>۱</sup> در سقف
- شکست کمربالا زمانی که طول حفاری شده آن زیاد باشد
- شکست گوه‌ای عرضی در سقف کارگاه
- شکست‌های ناشی از تنش‌های القایی زیاد که در این شرایط شکست زمین، با توجه به تمرکز تنش بالا ناشی از معدن‌کاری همزمان چند پهنه استخراجی رخ می‌دهد.

## ۲-۳ روش‌های طراحی تجربی

روش‌های تجربی در ژئومکانیک با استفاده از تعداد زیادی داده که بر اساس تجارب گذشته حاصل شده، ایجاد شده و فرضیات به کار برده شده در آن از اهمیت بالایی برخوردار است. این روش‌ها همگی به

<sup>۱</sup> - Longitudinal Wedge Failure

تعیین صحیح خواص توده‌سنگ وابسته می‌باشند. عوامل اصلی در روش‌های تجربی به اهداف کاربرد آن بستگی دارد که این اهداف شامل انتخاب تجهیزات نگهداری، پیش‌بینی قابلیت تخریب، تعیین خواص توده‌سنگ برای طراحی و ارزیابی پایداری فضاهاى زیرزمینی است (suorineni, 2014). روش‌های طراحی تجربی مزیت برخورد با مواد پیچیده همچون توده‌سنگ‌ها را دارا می‌باشند. مزیت روش‌های تجربی نسبت به روش‌های تحلیلی و عددی، قابلیت در نظرگیری پارامترهای چندگانه و زمان است. از جمله اشکالات روش‌های تجربی نیز می‌توان به متکی بودن به داده‌ها، سلیقه‌ای بودن، نامشخص بودن میزان دقیق محافظه‌کاری ذاتی و تحت تأثیر قرار گرفتن به وسیله‌ی ویژگی‌های زمین شناسی اشاره کرد. برخی از روش‌های تجربی رایج در ژئومکانیک عبارتند از: سیستم طبقه‌بندی توده‌سنگ<sup>۱</sup> (RMR)، شاخص کیفی تونل‌زنی<sup>۲</sup> (Q)، نمودار تخریب لابسچر<sup>۳</sup> و روش نمودار پایداری<sup>۴</sup> کارگاه باز

## ۲-۳-۱ سیستم طبقه‌بندی توده‌سنگ (RMR)

سیستم طبقه‌بندی توده‌سنگ RMR برای اولین بار توسط بنیاوسکی در سال ۱۹۷۳ ارائه شده که مبتنی بر تجربیات وی در تونل‌های کم عمق حفر شده در سنگ‌های رسوبی است (Bieniawski, 1973). بر اساس این طبقه‌بندی می‌توان زمان پایداری فضای حفاری شده، خواص مکانیکی توده‌های سنگی، نوع و مقدار حائل مورد نیاز مقطع تونل را به صورت تقریبی ارزیابی کرد. آخرین نسخه اصلاحی آن در سال ۱۹۸۹ اریه شد که بر اساس ۶ پارامتر مقاومت تک محوره سنگ بکر، شاخص کیفیت سنگ (RQD)، فاصله‌داری ناپیوستگی، وضعیت ناپیوستگی، وضعیت آب زیرزمینی و جهت‌داری ناپیوستگی است. در این رده‌بندی توده‌سنگ به ۵ رده کلی تقسیم شده که کیفیت آن از خیلی ضعیف تا خیلی خوب متغیر است. در نهایت با توجه به عدد RMR نهایی و با استفاده از جدول‌ها،

---

1- Rock Mass Rating  
2- Tunnelling Quality Index  
3- Laubscher Cavability Graph  
4- Stability Graph

روابط تجربی و نمودارهای ارائه شده می‌توان ارزیابی مناسبی از کیفیت و خواص ژئومکانیکی توده‌سنگ، پایداری و سیستم نگهداری لازم برای فضاهای زیرزمینی را انجام داد (Bieniawski, 1999).

## ۲-۳-۲ طبقه‌بندی شاخص کیفی تونل‌زنی (Q)

سیستم طبقه‌بندی Q در اصل برای طبقه‌بندی توده‌سنگ ارائه شده، که هدف اصلی آن ارائه یک سیستم نگهداری مناسب برای تونل یا فضای زیرزمینی است که در محیط سنگی مورد نظر حفر می‌شود. این سیستم طبقه‌بندی برای اولین بار در سال ۱۹۷۴ توسط بارتن<sup>۱</sup> و همکاران در مؤسسه ژئوتکنیک نروژ<sup>۲</sup> (NGI) معرفی شد (Barton et al., 1974). آنچه امروزه تحت عنوان طبقه‌بندی Q مورد استفاده قرار می‌گیرد، تابعی از سه پارامتر مهم زمین یعنی اندازه نسبی بلوک‌های سنگ ( $RQD/J_n$ )، مقاومت برشی بین بلوک‌های سنگ ( $J_r/J_a$ ) و تنش‌های مؤثر ( $J_w/SRF$ ) است. این ۶ پارامتر برای نشان دادن کیفیت زمین با توجه به پایداری و نگهداری سنگ در یک بازکننده‌ی زیرزمینی به صورت معادله ۱-۲ ترکیب می‌شوند:

$$Q = \frac{RQD}{J_n} \times \frac{J_r}{J_a} \times \frac{J_w}{SRF} \quad (1-2)$$

که در این رابطه RQD: شاخص کیفیت سنگ،  $J_n$ : عدد مربوط به تعداد دسته درزه،  $J_r$ : عدد زبری سطح درزه،  $J_a$ : عدد مربوط به هوازدگی سطح درزه،  $J_w$ : عدد مربوط به آب درزه و SRF: فاکتور کاهش تنش است (Palmstrom & Broch 2006).

## ۳-۳-۲ نمودار تخریب لابسچر

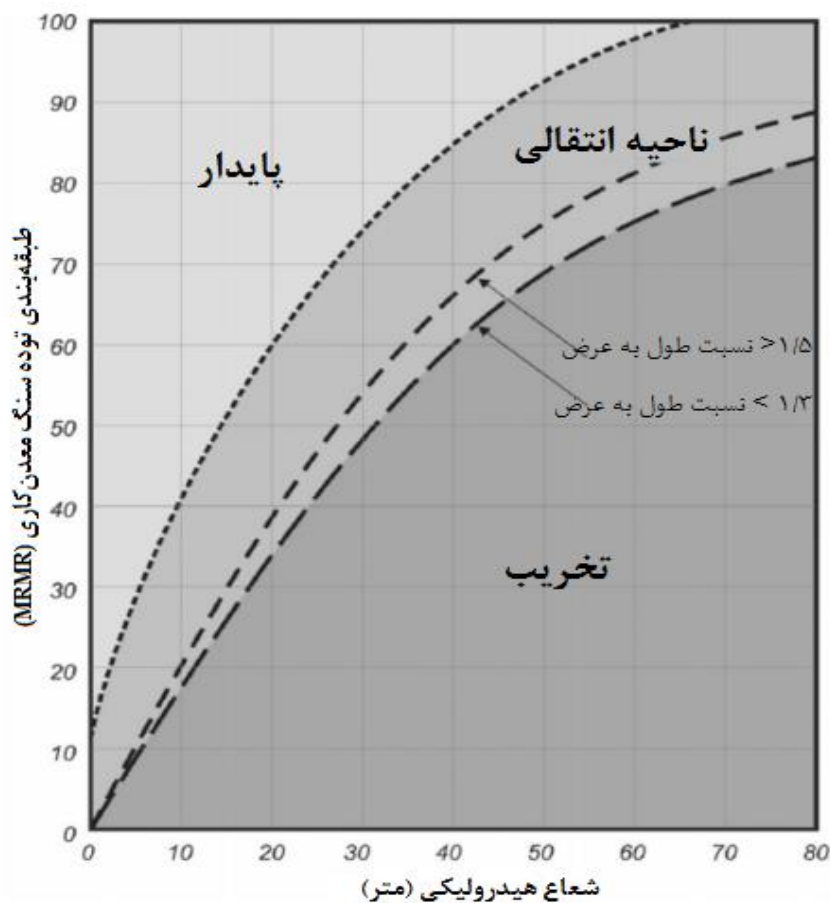
نمودار تخریب لابسچر به طور کلی به عنوان استاندارد صنعتی برای ارزیابی قابلیت تخریب شناخته شده است، هر چند این روش در تمامی معادن تخریبی استفاده نمی‌شود. نمودار تخریب لابسچر از ترسیم مقادیر<sup>۳</sup> MRMR (که ترکیبی از کیفیت توده‌سنگ، تنش‌های برجا و خواص ناپیوستگی‌ها در توده‌سنگ

1- Barton

2- Norwegian Geotechnical Institute

3 - Mining Rock Mass Rating

است)، در مقابل شعاع هیدرولیکی (نسبت مساحت به محیط) بازکننده که وابسته به ابعاد و شکل زیربرش است، ناشی می‌شود. از این نمودار برای تعیین اندازه زیربری لازم برای القاء تخریب در مقدار MRMR معلوم استفاده می‌شود. نمودار پیشنهادی لابسچر با استفاده از پایگاه داده‌ای که از معادن تخریبی در سراسر دنیا جمع‌آوری شده، تهیه شده است. این نمودار همانطور که در شکل (۲-۴) مشاهده می‌شود، از سه ناحیه پایدار (بدون تخریب)، انتقالی (ریزش‌های اصلی یا تخریب جزئی) و تخریب تشکیل شده است. این روش یک روش کاملاً موفق در پیش‌بینی قابلیت تخریب در کنسارهای بزرگ و سست است، ولی دارای محدودیت‌هایی برای کاربرد در کنسارهای قوی و کوچک است (Suorineni, 2014).



شکل ۲-۴: نمودار قابلیت تخریب لابسچر (Suorineni, 2014)



## ۲-۴ روش نمودار پایداری

ماتئوس و همکارانش (۱۹۸۱) یک روش تجربی برای ارزیابی پایداری و طراحی کارگاه‌های استخراج معادن فلزی سنگ سخت با فضای باز<sup>۱</sup> که در اعماق قرار دارند، ارائه کردند. این روش که ترکیبی از مفاهیم مکانیک سنگ، تجارب زیاد معدنی و برخی محاسبات تحلیلی است، برای طراحی کارگاه‌های استخراج در معادن قدیمی و معادن جدید مورد استفاده قرار می‌گیرد.

برای استفاده از این روش بایستی اطلاعات ژئوتکنیکی کافی در دسترس باشد. این روش در سال ۱۹۸۸ با افزایش پایگاه داده اصلی از ۲۶ مطالعه موردی از ۳ معدن به ۱۷۵ مورد از ۳۴ معدن توسط پوتوین اصلاح شد. روش نمودار پایداری در برگزیده عوامل کلیدی مؤثر بر طراحی کارگاه‌های باز است. اهم این عوامل عبارتند از (عطایی، ۱۳۹۴):

- اندازه و شکل بلوک‌های سنگی و مقاومت توده‌سنگ
- شرایط تنش محلی
- جهت درزه‌ها و مقاومت برشی آن‌ها
- اثر نیروی ثقل
- شکل، ابعاد و راستای فضای زیرزمینی یا کارگاه

این عوامل به طور تجربی تعیین و نقش هر یک در پایداری بررسی خواهد شد. سپس به کمک این اطلاعات می‌توان مشخص کرد که آیا فضای باز مورد نظر یا جبهه کار، بدون سیستم نگهداری پایدار است یا حتماً باید سیستم نگهداری نصب شود و یا حتی با نصب سیستم نگهداری هم ناپایدار است و بدین ترتیب ابعاد بهینه کارگاه را تعیین کرد (عطایی، ۱۳۹۴).

هدف اصلی مطالعه ماتئوس و همکاران مشخص کردن وجود یا عدم وجود یک رابطه تجربی بین خواص توده‌سنگ، عمق معدن‌کاری و حداکثر دهانه کارگاه باز پایدار بوده است. این روش برای کانسارهای

<sup>۱</sup> - Open Stope

پرشیب دارای توده‌سنگ‌های با کیفیت خوب تا متوسط کاربرد دارد، ولی برای کنسارهای کم شیب یا دارای توده‌سنگ‌های ضعیف کاربردی ندارد (Mawdesley, 2002).

در مراحل پیش امکان‌سنجی<sup>۱</sup> و امکان‌سنجی<sup>۲</sup> کارگاه‌های معدنی بزرگ اغلب در هنگامی که اطلاعات ژئومکانیکی محدود باشد، روش طراحی انتخابی، روش نمودار پایداری است. این روش به این علت که کارگاه‌های معدنی مشابه با اتاق‌های بزرگ در حفاریات هستند، در بازکننده‌های موقتی در کنسارهای معدنی صفحه‌ای (معمولاً قائم) به کار برده می‌شود. هدف طراحان معدن در مرحله‌ی امکان‌سنجی، توسعه اصولی عملیات جانمایی کارگاه پایدار است. روش نمودار پایداری به طراحان معدن با اطمینان جزئی اجازه تعیین تعدادی از پارامترهای بحرانی طراحی معدن همچون فاصله طبقه فرعی، اندازه کارگاه و نیاز به پایدارسازی با استفاده از نگهداری کابل مهاری را می‌دهد. همچنین این روش اغلب در هنگامی که معدن در مرحله طراحی کارگاه‌های منفرد است و اطلاعات و دانش بیشتری از رفتار توده‌سنگ وجود دارد، مجدداً برای طراحی به کار برده می‌شود (Sunwoo et al., 2006).

## ۲-۴-۱ نمودار پایداری سنتی

نمودار پایداری از ترسیم عدد پایداری  $N$  (که نشان دهنده‌ی توانایی توده‌سنگ به مقاومت تحت شرایط تنش وارده است)، در برابر شعاع هیدرولیکی<sup>۳</sup>  $(HR)$  (که نشان دهنده اندازه جبهه کارهای کارگاه است) حاصل می‌شود که در شکل ۲-۵ نمایش داده شده است. در روش نمودار پایداری، پایداری هر سطح کارگاه استخراج به طور مستقل ارزیابی می‌شود. همانطور که در شکل ۲-۵ مشاهده می‌شود، نمودار پایداری متعارف به ۳ ناحیه تقسیم می‌شود: پایدار<sup>۴</sup>، ناپایدار<sup>۵</sup> (یا ناحیه انتقالی) و تخریب<sup>۶</sup>.

1 - Pre-Feasibility

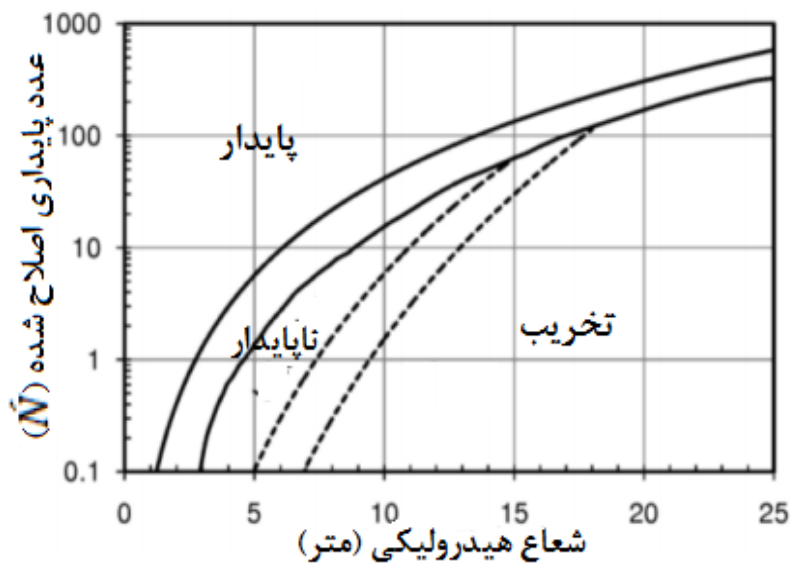
2 - Feasibility

3 - Hydraulic Radius

4 - Stable

5 - Unstable

6 - Cave



شکل ۲-۵: نمودار پایداری استاندارد (Nickson, 1992)

سه منطقه پایداری ترسیم شده بر روی نمودار پایداری به شرح زیر است (Mawdesley, 2002):

۱- پایدار: مورد حفاری شده بدون استفاده از نگهداری و یا با استفاده از نگهداری موضعی پایدار خواهد بود.

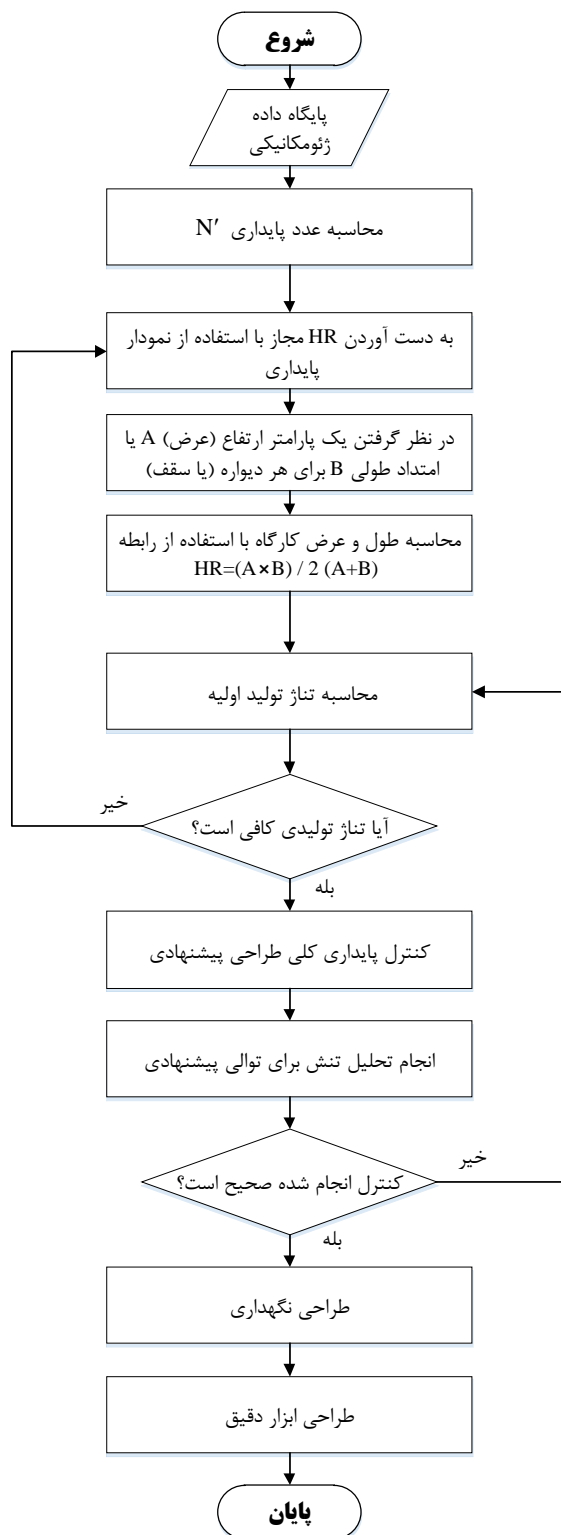
۲- ناپایدار: شکست موضعی رخ می‌دهد ولی شکل قوس<sup>۱</sup> پایدار خواهد بود. با اصلاح طراحی و یا نصب کابل مهاری ممکن است دامنه شکست کاهش یابد.

۳- تخریب: تا زمانی که فضای خالی حفاری شده پر شود، شکست رخ می‌دهد.

با استفاده از عدد پایداری می‌توان حداکثر مقدار مجاز برای شعاع هیدرولیکی را از یک نمودار پایداری محاسبه کرد. اگر چه این حداکثر مقدار با استفاده از نمودار تعیین می‌شود، ولی این مقدار می‌تواند با قضاوت مهندس معدن (معمولاً بر اساس تجربیات قبلی) اصلاح شود. روندنمای پیشنهادی برای طراحی کارگاه با استفاده از روش نمودار پایداری توسط باودن<sup>۲</sup> و همکاران (۱۹۸۹) در شکل ۲-۶ نشان داده شده است (Bawden et al., 1989).

<sup>۱</sup> - Arch

<sup>۲</sup> -Bawden



شکل ۲-۶: روندنمای طراحی کارگاه باز به روش نمودار پایداری (Bawden et al. 1989)

## ۲-۴-۲ پارامترهای مورد نیاز در روش نمودار پایداری

همان طور که در شکل ۲-۳ ملاحظه شد، در این روش بایستی دو ضریب محاسبه شود:

## ۲-۴-۱-۲ شعاع هیدرولیکی یا ضریب شکل

مفهوم شعاع هیدرولیکی برای محاسبه اندازه و شکل سطح کارگاه مورد بررسی توسط لابسچر و تیلور<sup>۱</sup> (۱۹۷۶) معرفی شد (Laubscher & Taylor, 1976). از آن جا که سطح مقطع یک کارگاه به تنهایی شاخص مناسبی برای بزرگی کارگاه نیست، چرا که دو کارگاه با سطح مقطع مساوی ولی با عرض و ارتفاع متفاوت وضعیت پایداری گوناگونی دارند، لذا از شعاع هیدرولیکی (نسبت مساحت به محیط کارگاه) به عنوان شاخص بزرگی کارگاه و ابعاد و شکل جبهه کار استفاده می‌شود. شعاع هیدرولیکی برابر تقسیم مساحت بر محیط جبهه کار کارگاه است و این مقدار در سطوح بلند و نازک بیش از سطوح مربعی است.

رابطه بین شعاع هیدرولیکی و طول حفاری، با ارتفاع ثابت کارگاه که معمولاً به عنوان فاصله طبقه فرعی شناخته شده، از رابطه ۲-۲ به دست می‌آید:

$$HR = \frac{(H)(L)}{2(H+L)} \quad (2-2)$$

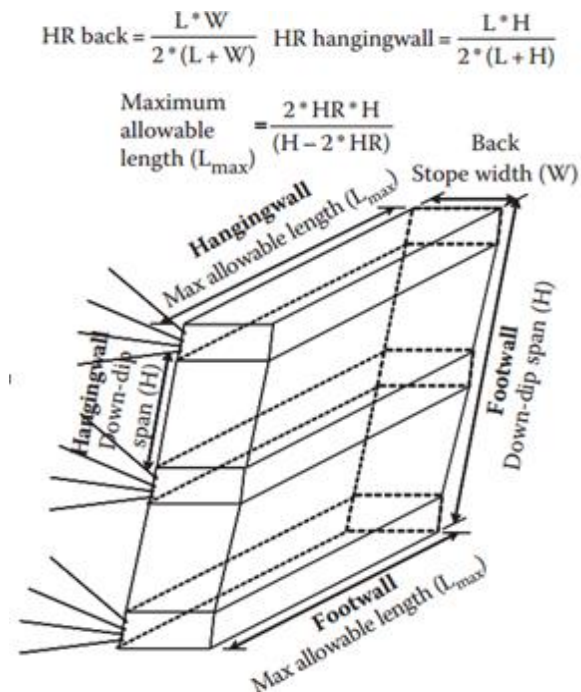
در این رابطه H ارتفاع و L طول دیواره جبهه کارگاه است.

برای تعیین حداکثر طول مجاز نگهداری نشده کارگاه، باید ابتدا ارتفاع یا عرض حفاریات تعیین شود. برای دیوارهای عمودی این مقدار به طور کلی مربوط به ابعاد کف تا کف برای جبهه کار مورد بررسی است. به عنوان مثال شکل ۲-۷ نشان می‌دهد که برای یک کمرپایین، دهانه هم امتداد با شیب کارگاه «ثابت<sup>۲</sup>» در نظر گرفته شده با فاصله طبقه فرعی انتخابی، تعیین می‌شود. برای سقف و دیواره‌های انتهایی کارگاه، عرض به طور کلی به وسیله‌ی کانه یا عرض کارگاه کنترل می‌شود (به طور مثال در کانسار رگه باریک، کارگاه‌ها به طور عمودی با عرضی کمتر از عرض کانه استخراج می‌شود). برای کمربالا به علت تقویت آن به وسیله‌ی کابل مهاری در هر فاصله از طبقه فرعی، بُعد «ثابت» دهانه هم امتداد با

<sup>1</sup>- Laubscher And Taylor

<sup>2</sup>- Fixed

شیب کابل‌های مهاری است (برای کانسنگ‌های خیلی شیبدار این مقدار تقریباً برابر فاصله‌داری طبقه است) (Villaescusa, 2014).



شکل ۲-۷: ابعاد ثابت و مجاز کارگاه (Villaescusa, 2014)

## ۲-۲-۴-۲ عدد پایداری اصلاح شده<sup>۱</sup>

این عدد قابلیت پایداری توده‌سنگ را تحت شرایط تنش‌های موجود نشان می‌دهد و با استفاده از رابطه ۲-۳ تعیین می‌شود:

$$N' = (Q')(A)(B)(C) \quad (۳-۲)$$

که در این رابطه:

$Q'$ : مقدار اصلاح شده شاخص کیفی تونل‌زنی در سنگ (Q)

A: ضریب مربوط به تنش‌های حاصل از معدن‌کاری یا ضریب تنش سنگ<sup>۲</sup>

B: ضریب مربوط به ناپیوستگی‌های بحرانی برای دیواره مورد نظر یا ضریب تعدیل راستای درزه‌های

<sup>۱</sup> - Modified Stability Number

<sup>۲</sup> - Stress Factor

سنگ<sup>۱</sup>

C: ضریب مربوط به جهت دیواره مورد نظر یا ضریب تعدیل نیروی ثقل<sup>۲</sup>  
 حدود تغییرات هر یک از ضرایب فوق در جدول ۱-۲ درج شده است.

جدول ۱-۲: حدود تغییرات ضرایب مربوط به عدد پایداری اصلاح شده (عطایی، ۱۳۹۴)

ضریب	محدوده تغییرات	مقدار معمول در معدن کاری سنگ سخت
RQD/Jn	۰/۵ - ۲۰۰	۲/۵ - ۲۵
Jr/Ja	۰/۲۵۰ - ۵	۰/۱ - ۵
A	۰/۱ - ۱	۰/۱ - ۱
B	۰/۲ - ۱	۰/۲ - ۱
C	۲ - ۸	۲ - ۸
N'	۰/۵۰۰۰ - ۸۰۰۰	۰/۱ - ۱۰۰۰

نحوه تعیین هر یک از این پارامترها به شرح زیر است:

#### ۱-۲-۲-۴-۲ تعیین شاخص کیفی تونل زنی اصلاح شده ( $Q'$ )

جمع‌آوری اطلاعات خواص سنگ بکر و شرایط درزه نخستین گام در تعریف قلمروهای ژئومکانیکی است. این اطلاعات اصلی می‌تواند برای مشخص نمودن قلمرو توده‌سنگ براساس نوع سنگ، کانی‌شناسی و شرایط درزه مورد استفاده قرار گیرد. سیستم‌های طبقه‌بندی توده‌سنگ به صورت ضمنی پارامترهای کلیدی مؤثر بر پایداری توده‌سنگ همچون اندازه بلوک سنگی و مقاومت برشی را توصیف می‌کند. سیستم اصلاح شده  $Q'$  به عنوان پارامتر ورودی روش‌های ارزیابی پایداری کارگاه استخراج معرفی شده است. متغیرهای  $Q'$  شامل شاخص کیفی سنگ (RQD)، تعداد دسته درزه‌ها ( $J_n$ )، عدد زبری سطح درزه ( $J_r$ ) و عدد هوازدگی سطح درزه ( $J_a$ ) است، به نحوی که تأثیر تنش برای محاسبه بیش از یک‌بار برای روش طراحی کارگاه در نظر گرفته نشده است. همچنین وجود آب زیرزمینی نیز در نظر گرفته نشده است. بنابراین در روش نمودار پایداری مقدار  $Q$  بدون کسر مربوط به

<sup>1</sup> - Joint Orientation Factor

<sup>2</sup> - Gravity Factor

تنش  $\left(\frac{J_W}{SRF}\right)$  بیان می‌شود و شاخص اصلاح شده از رابطه ۲-۴ محاسبه می‌شود (Potvin, 1988):

$$Q' = \left(\frac{RQD}{J_n}\right) \left(\frac{J_r}{J_a}\right) \quad (۴-۲)$$

### الف- ضریب تنش سنگ (A)

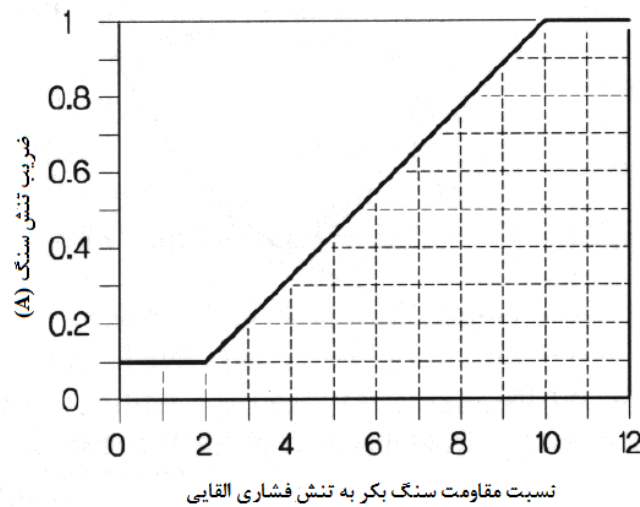
این ضریب بیان کننده تنش‌هایی است که بر سطح آزاد سنگ‌ها یا جبهه کارها در حفاریات زیرزمینی اثر می‌کند. این ضریب با توجه به مقاومت فشاری تک محوری سنگ بکر و تنشی که به موازات سطح مورد نظر در جبهه کار القا می‌شود، تعیین می‌شود و مقدار آن در بازه ۰/۱ برای تنش‌های فشاری بالا تا ۱ برای شرایط آرام<sup>۱</sup> (شامل کشش) و همچنین وضعیت‌های متوسط بین این دو حد است. مقاومت فشاری تک محوری سنگ بکر را می‌توان از آزمایش‌های آزمایشگاهی و یا با تخمین‌هایی به دست آورد و تنش القایی یا تنش وارده بر دیواره کارگاه یا از مدل‌سازی عددی و یا از روش‌های منتشر شده توزیع تنش با استفاده از مقادیر اندازه‌گیری شده یا مفروض تنش‌های برجا، تخمین زده می‌شود (عطایی، ۱۳۹۴).

پس از تعیین تنش وارده بر دیواره مورد نظر، ضریب تنش سنگ به کمک رابطه  $K = \sigma_c / \sigma_1$  که نسبت مقاومت سنگ بکر به تنش فشاری القایی در دیواره فضای زیرزمینی است، به دست می‌آید. با توجه به مقادیر فوق مقدار ضریب A برابر است با:

$$A = \begin{cases} 0.1 & \frac{\sigma_c}{\sigma_1} < 2 \\ 0.1125 \frac{\sigma_c}{\sigma_1} - 0.125 & 2 < \frac{\sigma_c}{\sigma_1} < 10 \\ 1 & \frac{\sigma_c}{\sigma_1} > 10 \end{cases} \quad (۵-۲)$$

در شکل ۲-۸ ضریب تنش سنگ بر حسب مقادیر مختلف  $\frac{\sigma_c}{\sigma_1}$  نشان داده شده است (عطایی، ۱۳۹۴).

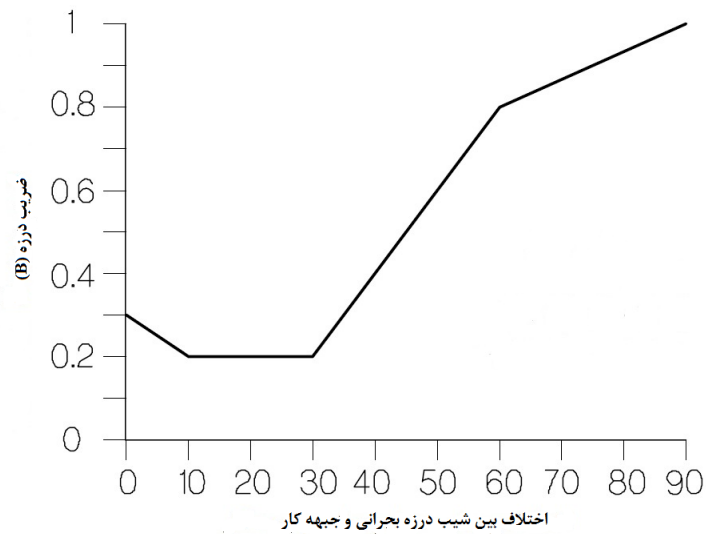




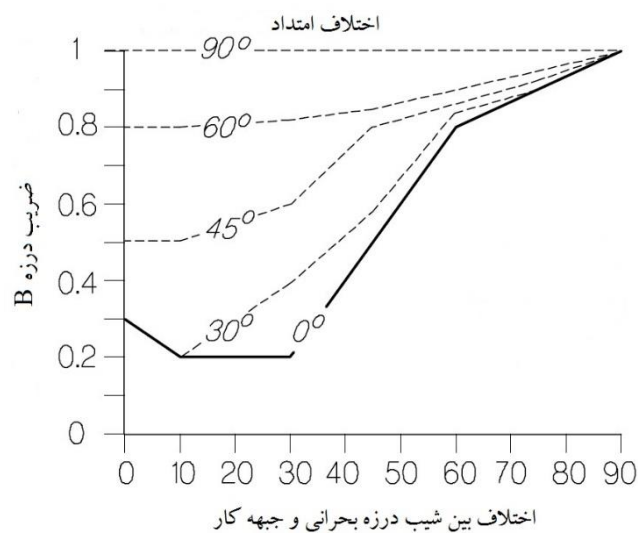
شکل ۲-۸: منحنی تعیین ضریب A برای مقادیر مختلف  $\frac{\sigma_C}{\sigma_1}$  (عطایی، ۱۳۹۴)

### ب- ضریب درزه (B)

این ضریب نقش درزه‌ها را در پایداری جبهه کار بیان می‌کند. بیشتر ریزش‌ها و شکستگی‌های ناشی از ساختار سنگ در طول درزه‌های بحرانی که با سطح آزاد زاویه کوچکی می‌سازد، رخ می‌دهد. هر چه زاویه بین ناپیوستگی‌ها و سطح آزاد کمتر باشد، سنگ بکر بین آن‌ها بر اثر آتش‌کاری، تنش‌ها و با یک دسته درزه دیگر راحت‌تر خواهد شکست. وقتی که این زاویه به صفر نزدیک می‌شود، به دلیل آن که بلوک‌های سنگ درزه‌دار به صورت تیر عمل می‌کنند، افزایش مقاومت خیلی کم رخ می‌دهد. بیشترین تأثیر درزه بحرانی بر پایداری فضای حفر شده، هنگامی است که امتداد آن به موازات سطح آزاد باشد و کمترین تأثیر زمانی است که سطوح با یکدیگر زاویه قائمه بسازند. ضریب B به اختلاف بین راستای درزه بحرانی و هر کدام از سطوح جبهه کار بستگی دارد. در اثنای ثبت ناپیوستگی‌های منطقه برای هر دیواره یک درزه بحرانی تعیین می‌شود (درزه کم شیب و هم امتداد دیواره) و به کمک یکی از شکل‌های ۲-۹ و ۲-۱۰ می‌توان مقدار ضریب B را تعیین کرد. در عمل همواره ضریب B برای تمام درزه‌ها تعیین و از کمترین عدد استفاده می‌شود. مقدار این ضریب بین ۰/۲ تا ۱ تغییر می‌کند (عطایی، ۱۳۹۴).



شکل ۲-۹: منحنی تعیین ضریب درزه B برای درزه‌های افقی با جبهه کار افقی (عطایی، ۱۳۹۴)



شکل ۲-۱۰: منحنی تعیین ضریب درزه B برای درزه‌های عمودی با جبهه کار عمودی (عطایی، ۱۳۹۴)

### ج- ضریب نیروی ثقل (C)

به تجربه ثابت شده است که سقف کارگاه همواره ناپایدارتر از دیواره کارگاه است. علت این امر اثر نیروی

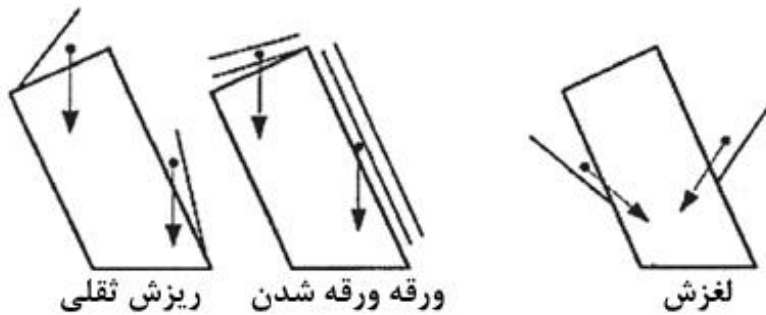
ثقل است. بدین جهت به کمک ضریب C اثر جهت دیواره کارگاه منظور خواهد شد. در این روش طبق

شکل ۲-۱۱ سه کلاس مجزای زیر برای ناپایداری سنگ تعریف می‌شود:

- ریزش در سقف به علت نیروی ثقل

- ریزش در دیواره‌ها به علت لغزش بلوک یا ورقه ورقه شدن

- ریزش از دیواره‌ها به صورت لغزیدن



شکل ۲-۱۱: حالات مختلف ناپایداری (عطایی، ۱۳۹۴)

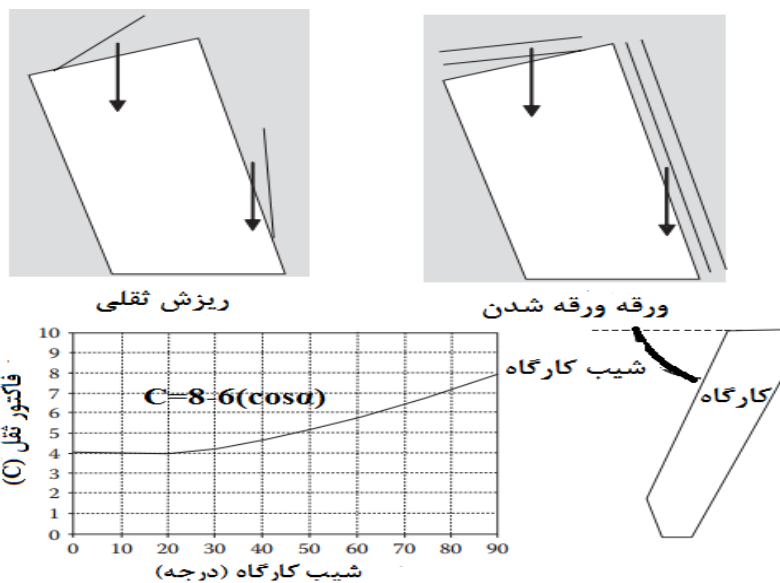
اگر بردار نیروی ثقل از مرکز تقریبی بلوک متقاطع با صفحه ناپیوستگی به وسیله‌ی یک فلش عمودی ترسیم شود، در صورتی که فلش ترسیمی به طور مستقیم درون بازکننده واقع شود حالت شکست، ریزش ثقلی خواهد بود. علاوه بر این اگر بردار گرانش درون محیط بدون تقاطع با ناپیوستگی قرار گیرد، حالت شکست ورقه ورقه شدن یا شکست پیچشی می‌تواند رخ دهد. همچنین وقتی که بردار گرانش ناپیوستگی بحرانی را قطع نماید، پتانسیل ایجاد شکست لغزشی وجود خواهد داشت. (Potvin, 1988)

پوتوین در سال ۱۹۸۸ پیشنهاد کرد که ریزش ناشی از نیروی ثقل و ورقه ورقه شدن به زاویه شیب سطح دیواره جبهه کار یا زاویه تمایل سطح جبهه کار یا کارگاه بستگی دارد و از نمودار شکل ۲-۱۲ و یا از رابطه زیر قابل محاسبه است:

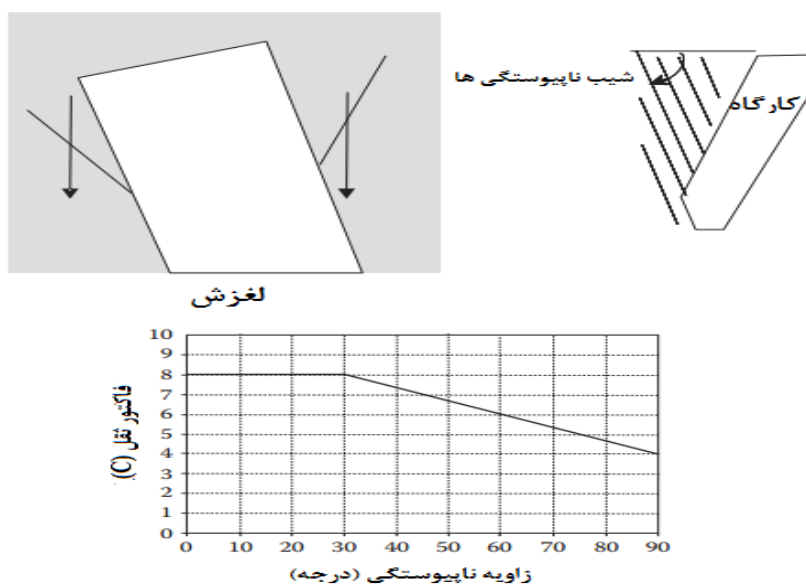
$$C = 8 - 6\cos\alpha \quad (۲-۶)$$

که در این رابطه  $\alpha$  شیب جبهه کار است. بیشترین این ضریب ۸ و مربوط به دیواره‌های قائم و کمترین آن ۲ و مربوط به سطوح افقی جبهه کار است.

ریزش و شکستگی‌های لغزشی به زاویه شیب درزه بحرانی ( $\beta$ ) و ضریب تعدیل  $C$  بستگی دارد که این رابطه در شکل ۲-۱۳ نشان داده شده است.



شکل ۲-۱۲: منحنی تعیین ضریب C برای حالت ریزش و ورقه ورقه شدن



شکل ۲-۱۳: منحنی تعیین ضریب C برای حالات مختلف شکست لغزشی

پس از تعیین پارامترهای  $Q'$ ،  $A$ ،  $B$  و  $C$  می‌توان مقدار  $N'$  را محاسبه کرد.

## ۲-۴-۳ پارامترهای اضافی مؤثر بر پایداری کارگاه باز

روش نمودار پایداری نقطه شروع مناسبی برای تجزیه و تحلیل است. به هر حال برخی از عوامل همچون تأثیر گسل‌ها، شرایط انفجار، زمان خالی بودن فضای حفاری که تأثیر بالقوه‌ای بر روی پایداری کارگاه دارند، در این روش لحاظ نمی‌شوند. تأثیر عوامل نام برده به صراحت در روش‌های تجربی دیده

نشده و معیار طراحی صنعتی برای این عوامل وجود ندارد. محققان بسیاری برای کمی‌سازی این عوامل تلاش کرده‌اند که برخی از آن‌ها عبارتند از:

### ۲-۴-۳-۱ ضریب گسل F

از آن جایی که سیستم طبقه‌بندی  $Q$  به اندازه کافی تأثیر وجود گسل را در نظر نمی‌گیرد؛ بنابراین  $Q'$  در رابطه (۲-۴) نیز وجود گسل را در نظر نمی‌گیرد. این در حالی است که بسیاری از کارگاه‌های باز تحت تأثیر حضور گسل‌های موجود در مجاورت آن‌ها هستند. به همین دلیل در بسیاری از معادن با وجود این که از طریق نمودار پایداری استاندارد، پایداری دیواره برای کارگاه پیش‌بینی شده است، اما به دلیل وجود گسل در نزدیکی آن‌ها اغلب این دیواره‌ها تخریب می‌شوند. سوریننی<sup>۱</sup> و همکاران برای رفع این مشکل ضریب گسل را مطابق رابطه (۲-۷) برای ترکیب در نمودار پایداری برای طراحی کارگاه باز توسعه داده‌اند (Suorineni et al., 2001b).

$$N'_f = (Q')(A)(B)(C)(F) \quad (۲-۷)$$

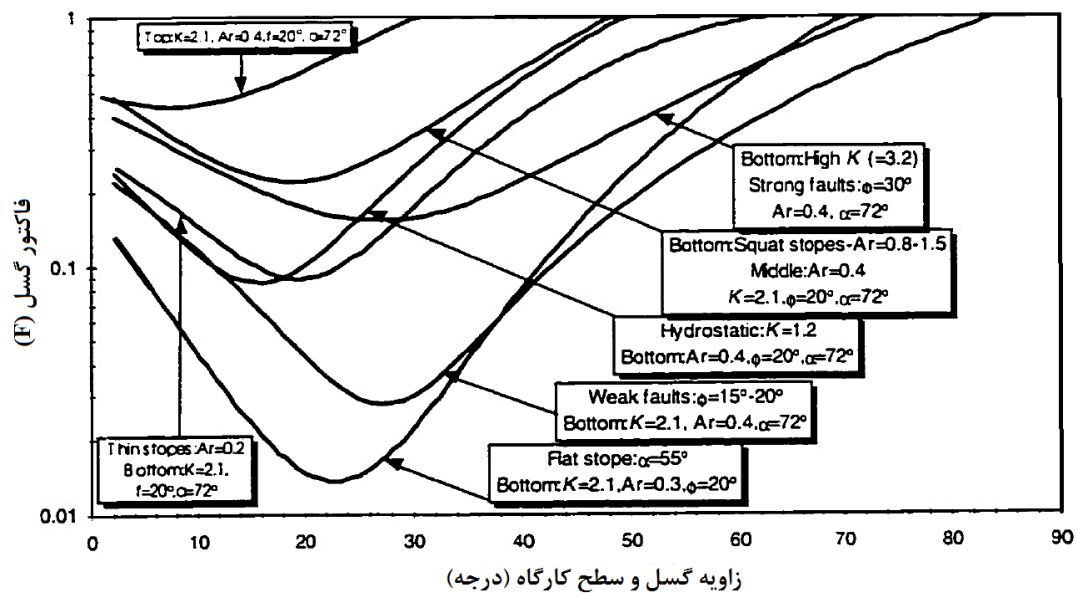
در این رابطه:

$N'_f$ : عدد پایداری اصلاح شده برای در نظر گرفتن وجود گسل‌ها در مجاورت کارگاه

F: ضریب گسل

در شکل ۲-۱۴ نمودار تعیین ضریب گسل بر اساس وضعیت قرارگیری گسل نسبت به کارگاه نشان داده شده است. در این شکل K بیانگر نسبت تنش اصلی حداکثر به تنش اصلی حداقل،  $A_r$  بیانگر نسبت ابعاد کارگاه (عرض کارگاه/ ارتفاع کارگاه)،  $\alpha$  بیانگر شیب کارگاه،  $\varphi$  بیانگر زاویه اصطکاک داخلی گسل و  $\gamma$  بیانگر زاویه بین گسل و سطح کارگاه است.

<sup>۱</sup> - Suorineni



شکل ۲-۱۴: نمودار تعیین ضریب گسل برای گسل‌های متقاطع با کارگاه‌ها (Suorineni et al. 2001b)

برای گسل‌های غیر متقاطع، فواصل گسل با تقسیم بر ارتفاع مایل کارگاه نرمال شده است. گسل‌ها زمانی که زاویه بین گسل و سطح کارگاه تقریباً  $30^{\circ}$  -  $20^{\circ}$  است، دارای بیشترین تأثیر بر پایداری کارگاه هستند. همچنین گسل‌های نزدیک به حالت عمود بر دیواره کارگاه دارای تأثیر بسیار کمی هستند (عطایی، ۱۳۹۴).

## ۲-۳-۴-۲ اثر زمان

عمر دهانه کارگاه در طراحی از این بابت مهم است که در بهترین روش استخراج یک کانسار، عملیات استخراج کامل ذخیره و پرکردن کارگاه قبل از ریزش آن صورت می‌پذیرد. کارگاه‌های باز به طور معمول برای مدت ۱ تا ۶ ماه از اولین انفجار تا تخلیه طراحی می‌شوند. البته در موارد خاص عمر دهانه کارگاه تا ۱ سال یا بیشتر هم می‌تواند باشد. عملیات پرکردن کارگاه ممکن است بلافاصله پس از استخراج صورت پذیرد و یا اینکه برای مدتی به تعویق افتد و یا حتی این عملیات انجام نپذیرد. زمان بر روی پایداری تأثیر می‌گذارد و تبعاتش بر روی ترقیق، عمدتاً زمان و مکان پر کردن و یا عدم انجام عملیات پر کردن را دیکته می‌کند (عطایی، ۱۳۹۴).

پاکالنیس<sup>۱</sup> تأثیر زمان را بر روی پایداری کارگاه باز بررسی کرده و نتیجه می‌گیرد که با وجود اهمیت بسیار زیاد در نظر گرفتن زمان برای پایداری کارگاه، کمی‌سازی آن مشکل است (عطایی، ۱۳۹۴). دیدرچز و تننت<sup>۲</sup> رفتار وابسته به زمان پایداری کارگاه را در معدن کید<sup>۳</sup> تعیین کرده و تعدیلاتی را در شاخص کیفیت توده‌سنگ  $Q'$  برای احتساب زمان مطابق جدول ۲-۲ تعریف کرده‌اند.

جدول ۲-۲: تعیین ضریب زمان (عطایی، ۱۳۹۴)

T ضریب زمان		زمان در معرض قرار گیری دیواره
$Q' < 10$	$Q' > 10$	
۰/۸	۱	۳ < ماه
۰/۵	۰/۸	۳ - ۵ ماه
۰/۳	۰/۵	۵ - ۱۲ ماه
۰/۲	۰/۳	۱۲ > ماه

رابطه (۲-۸) برای تعیین عدد پایداری صحیح  $N^*$  به منظور احتساب زمان به کار رفته است.

$$N^* = (Q')(A)(B)(C)(T) \quad (۲-۸)$$

ونگ<sup>۴</sup> تأثیر زمان در معرض قرارگیری سطح کارگاه را بر روی ترقیق در معادن مختلف مورد پژوهش قرار داد؛ اما بر این اساس رابطه واضحی میان زمان در معرض قرارگیری سطح کارگاه و مقدار ترقیق مشخص نشد. با این وجود پیمایش‌های نظارتی در فضاهاى زیرزمینی (CMS<sup>۵</sup>) در معادن مختلفی در غنا، کانادا و استرالیا نشان دادند که ترقیق با افزایش زمان در معرض قرارگیری، افزایش پیدا می‌کند. هسلوپ<sup>۶</sup> و دایت<sup>۷</sup> ذکر می‌کنند که توالی کارگاه‌ها می‌تواند روی باز توزیع تنش در اطراف آن‌ها تأثیر بگذارد؛ آن‌ها همچنین به اهمیت زمان خود پایداری کارگاه اشاره می‌کنند. از طرفی دیگر، باز توزیع تنش ناشی از استخراج، به زمان و هندسه وابسته است. بنابراین هسلوپ و دایت خطوط هم‌تراز

<sup>۱</sup> - Pakalnis

<sup>۲</sup> - Diederichs And Tannant

<sup>۳</sup> - Kidd

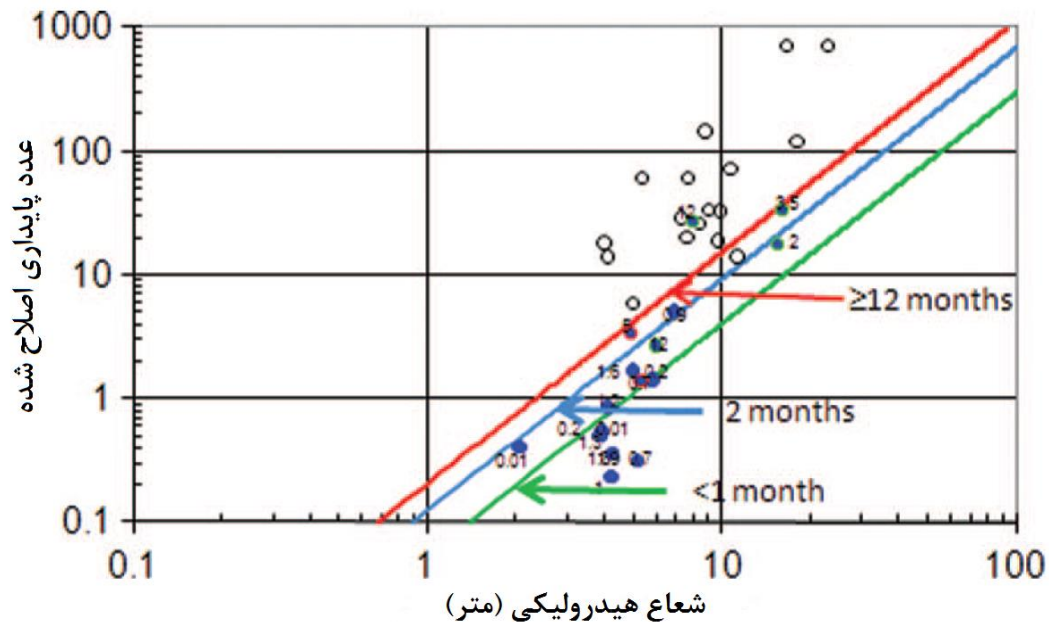
<sup>۴</sup> - Wang

<sup>۵</sup> - Cavity Monitoring Survey

<sup>۶</sup> - Heslop

<sup>۷</sup> - Dight

پایداری وابسته به زمان را به صورت فرضی در نمودار پایداری پیشنهاد کرده‌اند. پس از مواردی دیگر نیز به نمودار فرضی وابسته به زمان نمودار پایداری هسلوپ و دایت اضافه شده است که نمودار حاصله در شکل ۲-۱۵ نمایش داده شده است (عطایی، ۱۳۹۴).



شکل ۲-۱۵: نمودار پایداری وابسته به زمان پیشنهاد شده (عطایی، ۱۳۹۴)

### ۲-۴-۳- تأثیرات انفجار

تأثیرات ناشی از انفجار بر روی توده سنگ در نمودار پایداری در نظر گرفته نشده است. در توصیف خصوصیات توده سنگ، ISRM توصیه می‌کند که تنها ناپیوستگی‌های طبیعی سنگ در نظر گرفته شود و بنابراین آسیب‌های ناشی از انفجار در مقدار  $Q'$  در رابطه (۲-۴) در نظر گرفته نمی‌شود. سوریننی و همکاران بیان می‌کنند که آسیب‌های ناشی از حفاری در توده سنگ باید در تخمین کیفیت توده سنگ به منظور تعیین نگهداری در نظر گرفته شود. این موضوع توسط لوست<sup>۱</sup> و هوک و همکاران نیز بیان شده است. در این رابطه با گنجاندن ترک‌های جدید ایجاد شده در تخمین کیفیت توده سنگ  $Q'$ ، تأثیر انفجار در نمودار پایداری در نظر گرفته خواهد شد (Suorineni, 2010).

<sup>۱</sup> - Loset

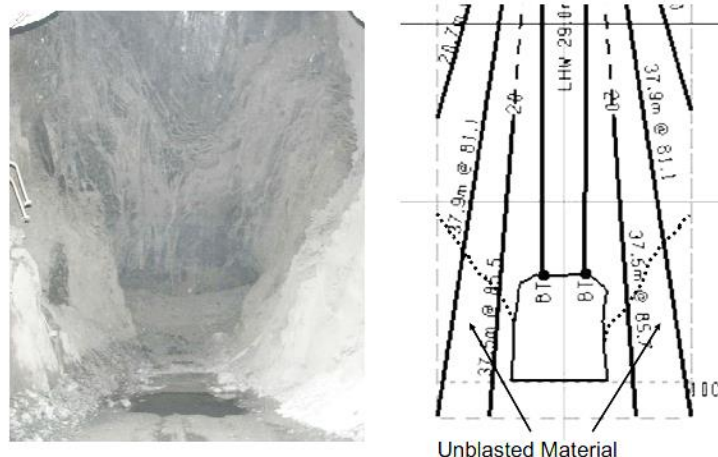


تحقیقات مشخص می‌کنند که روش حفاری چال‌زنی و آتشباری موجب آسیب دیواره فضای حفر شده حداکثر تا عمق ۱ متری در راهروها و تونل‌ها بسته به کیفیت توده‌سنگ و نوع آتشباری اعم از معمولی و یا کنترل‌شده می‌شود. در انفجارهای تولیدی (در کارگاه‌ها) آسیب به دیواره‌های کارگاه محدود به مقدار ۰/۵ متر است. به طور متوسط باید تصریح کرد که اگرچه مقدار بیش خردایش ۰/۵ متر ممکن است ناچیز باشد، اما در کانسارهای با ضخامت ۱ متر باعث ترقیق ۵۰٪ خواهد شد. همچنین این مقدار از بیش خردایش، ترقیقی حدود ۵٪ را برای کانساری با ضخامت ۱۰ متر به وجود خواهد آورد که مقداری جزئی خواهد بود. از این‌رو پاکالنیس و کلارک پیشنهاد کردند که مقدار تأثیر انفجار به صورت ثابت و حدود ۰/۵ متر برای اضافه شدن به نمودار ELOS مناسب خواهد بود (Suorineni, 2010).

حفاری و انفجار ناقص منجر به بازیابی ضعیف پاشنه‌های کارگاه و یا باقی ماندن کانه به صورت لایه بر روی کمربالا و در نتیجه باعث افزایش میزان پایداری می‌شود. به عنوان نمونه شکل ۲-۱۶ موردی را که در آن پاشنه‌های چال انفجاری پس از انفجار به صورت کامل باقی مانده را نشان می‌دهد. که این مورد در حالتی که شعاع هیدرولیکی کوچکتر از مقدار آن در حالت برنامه‌ریزی شده باشد، به وجود می‌آید و باعث کاهش میزان بازیابی کانه و نیز افزایش پایداری کمربالا می‌شود. عملیات انفجار یکی از عوامل مهم در پیش‌بینی بیش‌شکستگی<sup>۱</sup> کمربالای کارگاه و به تبع مقدار ترقیق حاصله است. در ضمن بیش‌شکستگی اصطلاح مورد استفاده برای توصیف حجم سنگ ناپایدار مربوط به دیواره‌ای خاص که خارج از شکل طراحی شده به درون کارگاه ریخته می‌شود، است (Capes, 2009).

---

<sup>۱</sup> - Overbreak



شکل ۲-۱۶: تأثیر حفاری ضعیف و انفجار ناقص (Capes et al., 2009)

## ۲-۴-۴ انواع نمودار پایداری

نمودار پایداری در اصل برای بهینه کردن ابعاد کارگاه‌های با چال‌های بلند توسعه یافت. از این نظر کارگاه‌ها یا به طور بالقوه پایدار (بدون نیاز به سیستم نگهداری)، یا به صورت بالقوه ناپایدار (نیازمند نصب سیستم نگهداری) و یا تخریبی (غیر قابل پایدارسازی با سیستم نگهداری) هستند. این توصیف ارائه شده کاملاً به صورت کیفی است. کاربردهای مختلفی تاکنون برای استفاده‌ی نمودار پایداری معرفی شده است. در قسمت زیر انواع نمودار پایداری و شرایط به کارگیری هر یک از آن‌ها بیان شده است.

### ۲-۴-۴-۱ تعیین اندازه کارگاه

کیفیت توده‌سنگ و شرایط تنش، اندازه کارگاه‌های باز را دیکته می‌کنند. برای معادن جدید و یا عملیاتی، این موارد پارامترهایی کلیدی برای برنامه‌ریزی کارگاه‌های جدید بدون راهرو هستند. نمودار پایداری سنتی برای این منظور ابزار مفیدی است. در مراحل برنامه‌ریزی، اندازه کارگاه و مقدار نگهداری مورد نیاز برای دیواره‌های آن به منظور استراتژی‌های استخراجی ایمن و اقتصادی مورد نیاز هستند. به هر حال با استفاده از این روش، تخمینی کمی برای ترفیق حاصل نمی‌شود، چنانکه ارزیابی پایداری نیز اساساً به صورت کیفی است. همچنین باید توجه داشت که نمودار پایداری سنتی، برای

کانسارهای توده‌ای توسعه یافته و بنابراین تعاریف پایدار، ناپایدار و تخریبی در آن ممکن است برای کانسارهایی که از آن‌ها بسیار نازک‌ترند کاربرد نداشته باشد؛ چرا که پایگاه داده‌ای نمودار پایداری اصلی بر اساس کانسارهای توده‌ای ایجاد شده است (Suorineni, 2010).

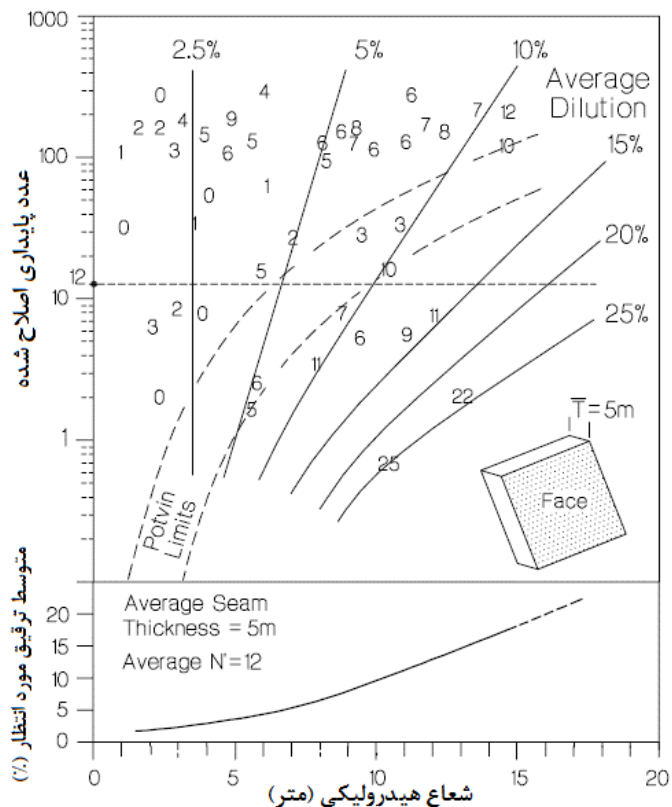
## ۲-۴-۴ نمودار پایداری مبتنی بر ترقیق

ترقیق یک مسأله و معضل عمومی در بسیاری از معادن است. از اینرو نه تنها پایداری کارگاه دارای اهمیت است بلکه مهم‌تر از آن علاقه معدن کاران به پیش‌بینی مقدار ترقیق ایجاد شده در عملیات و سطح قابل قبول برای آن است. این سطح قابل قبول ترقیق بسته به نوع کانی و روش استخراج از یک معدن به دیگری متغیر است. میزان ترقیق به لحاظ کمی در کارگاه استخراج از این جهت دارای اهمیت است که با استفاده از این مقدار، یک معدن در مورد میزان ترقیق قابل قبول برای طراحی ابعاد کارگاه می‌تواند تصمیم‌گیری نماید. ترقیق برنامه‌ریزی نشده کمربالا، هزینه‌ی قابل توجهی به بسیاری از عملیات معدن کاری کارگاه باز اضافه می‌کند (عطایی، ۱۳۹۴).

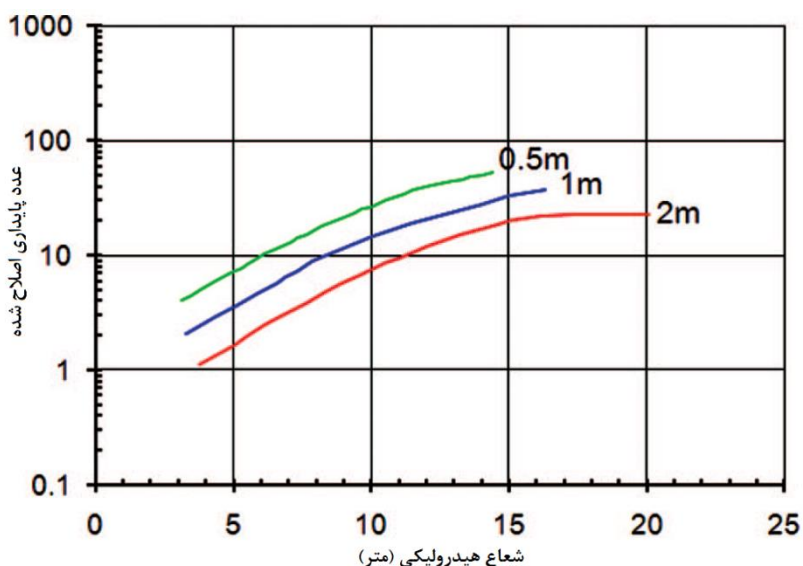
پس از ارائه اولین نمودارهای پایداری مبتنی بر ترقیق توسط پاکالنیس، تحولات اخیر در بررسی فضاهای زیرزمینی و پیشنهاد قرار گرفتن خطوط ترقیق در نمودار پایداری، امکان ایجاد یک نمودار پایداری بر اساس رقت از نظر عمق شکست و بیش خردایش معادل سطحی<sup>۱</sup> ELOS را فراهم آورد. مطابق رابطه (۹-۲) مقدار ELOS از نسبت حجم ریزش یا اضافه شکست به مساحت دیواره کارگاه به دست می‌آید و بر حسب متر است. در شکل ۲-۱۷ نمودار پایداری همراه با ترقیق قابل انتظار و در شکل ۲-۱۸ نمودار پایداری ELOS نمایش داده شده است (عطایی، ۱۳۹۴).

$$ELOS = \frac{\text{حجم اضافه شکست دیواره کارگاه}}{\text{مساحت دیواره کارگاه}} \quad (9-2)$$

<sup>۱</sup> - Equivalent Linear Overbreak/Slough



شکل ۲-۱۷: نمودار پایداری همراه با میزان ترقیق قابل انتظار (عطایی، ۱۳۹۴)

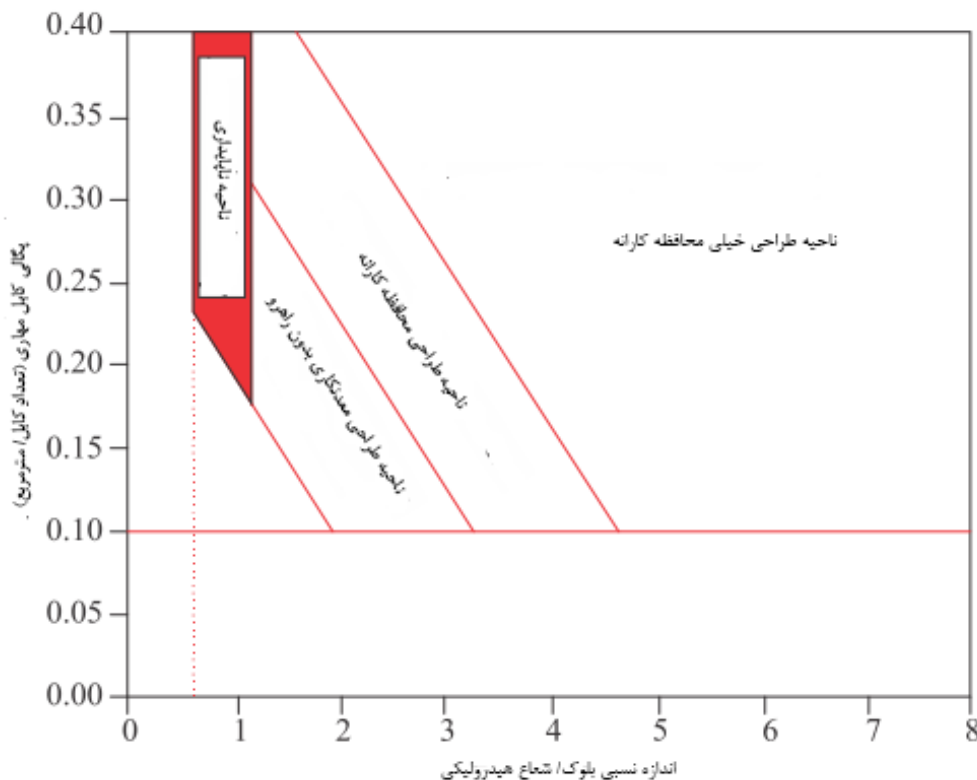


شکل ۲-۱۸: نمودار پایداری ELOS (Suorineni, 2010)

### ۲-۴-۳ نمودار پایداری طراحی کابل‌های مهاری

انتخاب الگوی طراحی برای تقویت پایداری به چندین عامل همچون خواص توده‌سنگ بستگی دارد.

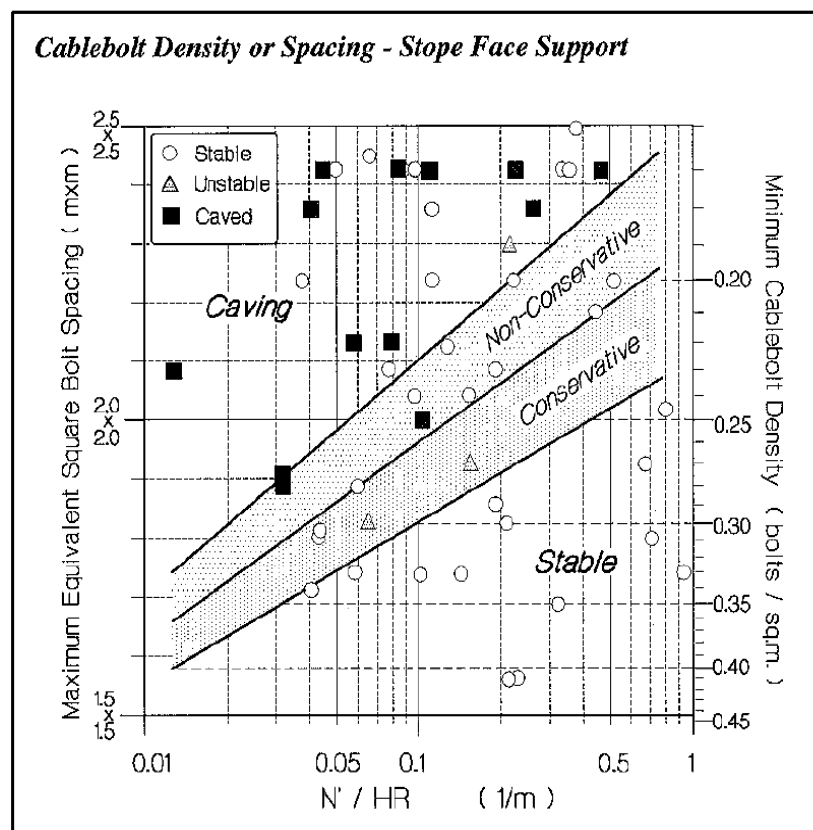
نیکسون (۱۹۹۲) اشاره کرد که روش‌های مختلفی برای تعیین الگوی مهاری می‌تواند به کار برده شود که از جمله این روش‌ها، روش طراحی وزن مرده سنگ، روش طبقه‌بندی توده‌سنگ، روش تئوری تیر و غیره است (Nickson, 1992). در هر صورت تمامی این روش‌ها بر روی این واقعیت که درزه‌داری زیاد کمربالای کارگاه و نیز توده‌سنگ‌های با کیفیت ضعیف بیشتر نیاز به نگهداری دارند، اتفاق نظر دارند. پوتوین و همکاران (۱۹۸۹) منحنی تراکم (چگالی) کابل مهاری را توسعه دادند و مجدداً ارائه کردند (Potvin et al., 1989). همانطور که در شکل ۲-۱۹ مشاهده می‌شود هر چه نسبت اندازه نسبی بلوک (RQD/Jn) به شعاع هیدرولیکی (HR) کوچکتر باشد، بایستی الگوی کابل مهاری برای فراهم کردن نگهداری لازم متراکم‌تر باشد. بنابراین کابل‌های مهاری بیشتری نصب و سبب ایجاد نگهداری بیشتر می‌شود. همچنین این شکل نشان می‌دهد که برای بلوک با اندازه کوچک (۰/۶-۰/۷) هیچ گونه تراکم بولتی برای فراهم‌سازی پایداری کافی نیست و این استراتژی تقویت را بی‌اهمیت می‌سازد (Potvin & Hadjigeorgiou, 2001).



شکل ۲-۱۹: نمودار طراحی تراکم کابل مهاری (Potvin & Hadjigeorgiou, 2001)

پوتوین و همکارانش در سال ۱۹۸۹ پیشنهاد دادند که طراحی کابل‌های مهاری باید با در نظر گرفتن مکانیزم احتمال ریزش باشد. در جایی که ریزش به صورت لغزش پیش‌بینی شده، کابل مهاری باید تحت زاویه شیب ۱۷ تا ۲۷ درجه نسبت به سطحی که لغزش ممکن است رخ دهد، نصب شود. برای نصب کابل‌های مهاری در نگهداری یک ریزش ورقه ورقه‌ای، مناسب‌ترین جهت عمود بر صفحه تورق است (Potvin, 1989).

نیکسون در سال ۱۹۹۲ میزان تراکم کابل‌های مهاری را بر اساس نسبت عدد پایداری اصلاح شده به شعاع هیدرولیکی در مطالعات موردی بسیاری مورد مطالعه قرار داد. هاجینسون<sup>۱</sup> و دایدریچز<sup>۲</sup> در سال ۱۹۹۶، مناطق طراحی محافظه کارانه و غیر محافظه کارانه را بر اساس اطلاعات موجود مطابق شکل ۲-۲۰ مشخص کردند (Hutchinson & Diederichs, 1996).



شکل ۲-۲۰: نمودار تعیین فاصله‌داری و تراکم کابل‌های مهاری (Hutchinson, 1996)

<sup>۱</sup>- Hutchinson

<sup>۲</sup>- Diederichs

در جایی که تجزیه و تحلیل پایداری نشان دهد که جبهه کار نیاز به نگهداری دارد، از نمودار ارائه شده در شکل ۲-۲۰ می‌توان به عنوان راهنمای اولیه برای انتخاب الگوی کابل‌های مهاری استفاده کرد. در این نمودار الگوی نصب کابل مهاری به فراوانی درزه‌ها در توده‌سنگ (پارامتر  $\frac{RQD}{j_n}$ ) و شعاع هیدرولیکی فضای زیرزمینی بستگی دارد. دو منطقه محافظه‌کارانه و غیر محافظه‌کارانه در این شکل نشان داده شده است. منطقه مورد استفاده باید بر اساس نوع کاربری فضای زیرزمینی و تجربه به دست آمده از نصب کابل مهاری در محل انتخاب شود. در شروع هر پروژه، طراح باید طرحی را که محافظه‌کارانه‌تر است در نظر بگیرد (عطایی، ۱۳۹۴).

#### ۲-۴-۴ نمودارهای پایداری مبتنی بر ریسک

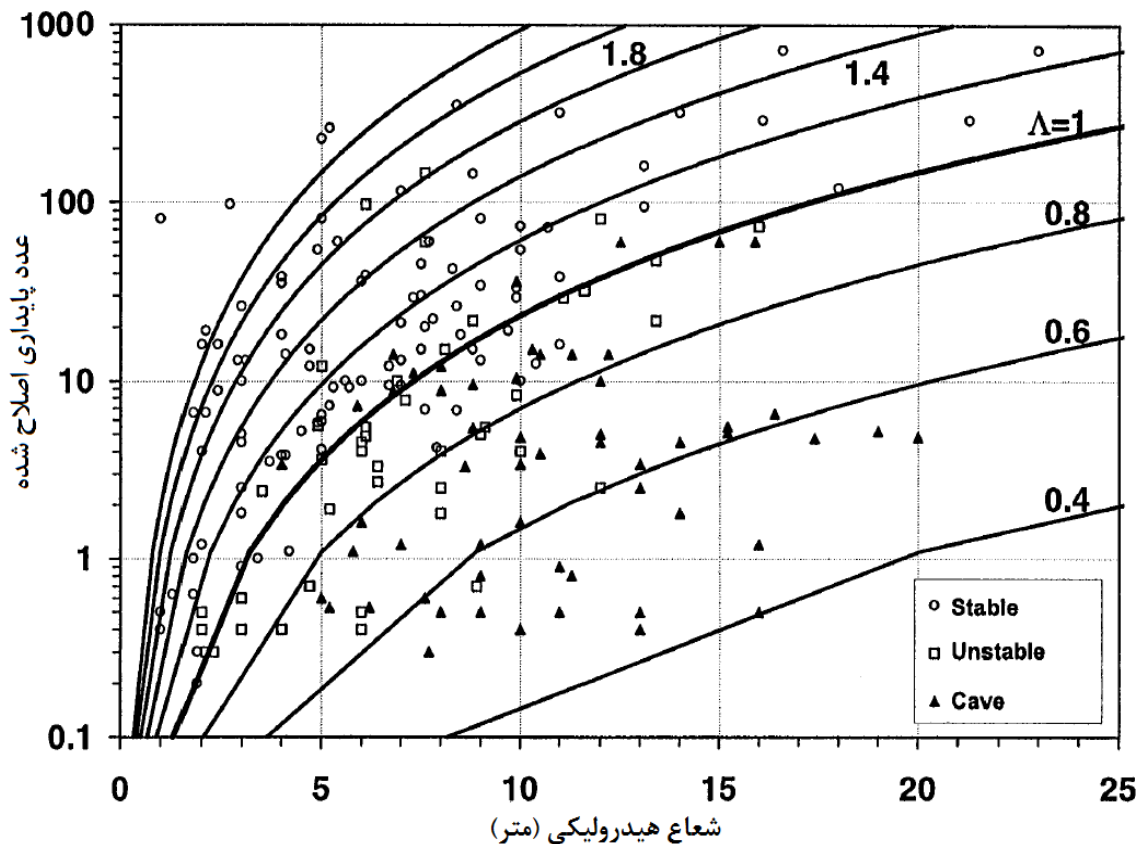
چهار نوع نمودار پایداری مبتنی بر ریسک شامل نمودار پایداری مبتنی بر احتمال، بر مبنای روش مونت کارلو، آمار و احتمالات بیزین<sup>۱</sup> و رگرسیون منطقی وجود دارد، که در اینجا تنها نمودار پایداری مبتنی بر احتمال معرفی می‌شود. مزیت نمودارهای پایداری مبتنی بر ریسک این است که وابسته به میزان ترقیق قابل قبول معدن، اندازه کارگاه را می‌تواند برآورد کنند.

شکل ۲-۲۱ نمودار پایداری مبتنی بر آمار و احتمالات است. در این شکل، سطح کارگاه قرار گرفته روی خط با نسبت احتمال ( $\Lambda = 1$ ) دارای شانس برابر پایداری و ناپایداری است. هر خط احتمال پایداری سطح کارگاه در برابر شکست آن را نشان می‌دهد. معدن نسبت به سطح ریسک (ترقیق) که مایل به پذیرش آن است می‌تواند ابعاد کارگاه خود را بر این اساس انتخاب کند.

مفهوم نسبت احتمال برای موارد تاریخی واقعی در معادن سنگ سخت زیرزمینی کانادایی جایی که عمق شکست دیواره‌ها از طریق داده‌های حاصل از پیمایش فضای زیرزمینی مشخص شده بودند، به کار رفته است. نسبت‌های احتمال به صورت محاسبات برگشتی انجام شده و بر اساس عمق شکست مشاهده شده ترسیم شده‌اند. در این شکل نسبت احتمال بالاتر عمق شکست کوچک‌تر را نشان

<sup>۱</sup> - Bayesian

می‌دهد (Suorineni et al., 2001).



شکل ۲-۲۱: نمودار پایداری با خطوط هم تراز احتمالاتی (Suorineni et al., 2001)

## ۲-۴-۵ اهداف روش نمودار پایداری

- اهداف زیر جهت توسعه مدل پیشنهادی ماتئوس توسط باودن تعیین شده است (Bawden, 1993):
- ۱- مدل باید قادر به پیش‌بینی پایداری کلی کارگاه بر اثر عوامل به وجود آورنده ناپایداری باشد. به جای تمرکز بر روی محاسبات دقیق و شناسایی پتانسیل ریزش هر بلوک، مدل باید بر روی تعیین ابعاد محافظه‌کارانه، کمتر محافظه‌کارانه و بحرانی کارگاه استخراج متمرکز شود.
  - ۲- مدل باید قابل اطمینان باشد و از اینرو نسبت به کلیه پارامترهای کلیدی ژئوتکنیکی مؤثر در طراحی کارگاه استخراج زیرزمینی حساس باشد. همچنین مهم است که عوامل مختلف مرتبط با معدن‌کاری کارگاه باز همچون هندسه کارگاه، توالی معدن‌کاری، انفجار و نگهداری با استفاده از پر کردن کارگاه و کابل‌های مهاری به صورت مستقیم و یا غیر مستقیم در مدل



لحاظ شود.

۳- مدل باید برای کاربرد مهندسین و زمین‌شناسان ساده باشد. پارامترهای ورودی باید به طور کلی به جای استفاده از آزمایش‌های گران قیمت، مطالعات طولانی و تجهیزات پیشرفته متکی بر روش‌های مشاهده‌ای باشد.

۴- مدل باید در هر مرحله از معدن‌کاری (همچون مطالعات امکان‌سنجی و برنامه‌ریزی کوتاه مدت و بلند مدت) قابل کاربرد باشد. گرچه دقت مدل تابعی از کیفیت پارامترهای ورودی است ولی مدل بایستی حداقل قادر به ارائه پاسخ تقریبی در مرحله امکان‌سنجی باشد.

۵- مدل باید نماینده رفتار کلی توده‌سنگ و نیز قادر به تعیین حالات شکست زیرزمینی باشد. این کار باعث ایجاد درک بهتری از شرایط زمین و کمک به انتخاب راه‌حل‌های اصلاحی مناسب برای کنترل مشکلات زمین شود.

## ۲-۴-۶ مشکلات روش نمودار پایداری

روش نمودار پایداری در اصل به عنوان ارزیابی اولیه پایداری در مرحله پیش امکان‌سنجی پروژه‌ها توسعه داده شد. در حال حاضر در سراسر جهان از این روش به عنوان ابزار طراحی در مراحل تعیین ابعاد کارگاه استفاده می‌شود و تبدیل به ابزار تجربی تعیین ابعاد دیوارهای کارگاه استخراج شده است. قابلیت سودآوری عملیات استخراج به طور مستقیم مرتبط با بهره‌وری است که به نوبه‌ی خود به وسیله‌ی ابعاد کارگاه استخراج تحت تأثیر قرار دارد. اعتبارسنجی روش طراحی کارگاه از زمانی که نخستین کارگاه استخراج شد، آغاز می‌شود. به هر حال، این روش دارای محدودیت‌هایی است که برای ارزیابی قابلیت کاربرد آن در هر محیط ژئوتکنیکی باید این محدودیت‌ها لحاظ شود. همچنین توسعه‌های مربوط به نمودار پایداری منجر به وجود آمدن مقادیر مختلف عدد پایداری برای سطوح مشابه کارگاه شده و نیز باعث ایجاد نواحی انتقالی مختلف در نمودار پایداری شده است. کاربرد تعاریف مختلف عوامل پایداری و نیز نواحی انتقالی مختلف منجر به ایجاد داده‌های غیر قابل قیاس با یکدیگر و مشکلات بالقوه‌ای برای استفاده می‌شود. در طول این سال‌ها قابلیت کاربرد و محدودیت‌های روش توسط محققان مختلفی

(Potvin, 2014; Sourineni, 2010; Suorineni et al., 2001; Stewart & Forsyth, 1995) مرور شده

است. به طور خاص موارد زیر دارای اهمیت تلقی شده است:

- کاربرد نواحی انتقالی مختلف در نمودار پایداری مانع استفاده از تجارب به دست آمده از یک ناحیه، در ناحیه دیگر و نیز باعث ناتوانی اصل بنیادی طراحی تجربی (تجمع دانش تخصصی برای استفاده در شرایط مشابه) می‌شود.
- وجود نواحی پایداری مختلف به این معنی است که وضعیت پایداری جبهه کار کارگاه استخراج بسته به اینکه کدام نسخه از نمودار پایداری مورد استفاده قرار گیرد، تغییر خواهد کرد. این منبعی برای ایجاد سردرگمی کاربران بی تجربه نمودار پایداری و افرادی که از توسعه آن اطلاعی ندارند، است.
- هنگام تفسیر نتایج برای معادنی که شرایط آنها تفاوت قابل توجهی با مستندات موجود در پایگاه داده پایداری دارند، باید با احتیاط عمل شود. یکی از نگرانی‌های اصلی استفاده از روش ماتئوس کمبود داده از معادن دارای توده‌سنگ‌های ضعیف و یا قوی برای حفاری‌ها با شعاع هیدرولیکی بیش از ۱۵ است.
- تعریف شرایط پایدار در برابر شرایط تخریب از آنجا که میزان عمق شکست بیان نشده، سلیقه‌ای است. علاوه بر این روش نمودار پایداری مکانیزم‌های پیچیده شکست را برای بیش از یک مجموعه ناپیوستگی در نظر نگرفته است.
- علیرغم کاربرد مقادیر ورودی قابل اندازه‌گیری، میزان دقت محافظه‌کارانه ذاتی<sup>۱</sup> مشخص نیست.
- روش بیانگر عملیات معدن‌کاری است که ممکن است توسط عوامل محیطی همچون قوانین و روش‌های محلی و به خصوص مسائل زیست محیطی تحت تأثیر واقع شده باشد.
- مدل ریزش لغزشی در کمر پایین توسط ضریب C به صورت ضعیفی نشان داده شده است.

<sup>۱</sup> - Inherent Conservatism

- ضریب تنش سنگ A برای ناپایداری‌های به وجود آمده در اثر تنش کششی تعریف نشده است.
- اغلب، هندسه‌ی پیچیده کارگاه بسیار ساده‌سازی می‌شود.
- تأثیرات انفجارها معمولاً نادیده گرفته می‌شود.
- پایداری سطوحی که به وسیله‌ی پر کردن به وجود آمده‌اند در این روش مشخص نمی‌شود.
- زمان خود ایستایی در این روش در نظر گرفته نمی‌شود.
- در کارگاه‌هایی که شکل آن‌ها دارای گوشه و یا فرورفتگی است، این روش قادر به ارزیابی پایداری نیست.

بنابراین روش نمودار پایداری ممکن نیست لزوماً روش طراحی بهینه را ارائه کند، بلکه نقطه شروعی برای طراحی در هر محیط ژئوتکنیکی خاص است. بر این اساس جمع‌آوری شواهد تجربی و مستندات موجود برای طراحی شکل هندسی بهینه کارگاه استخراج در هر سایت معدنی خاص لازم است.

## ۷-۴-۲ سابقه تحقیقات پیشین در زمینه نمودار پایداری

روش نمودار پایداری برای طراحی کارگاه باز در سال ۱۹۸۱ توسط مانتوس برای کاربرد در معادن زیرزمینی فلزی سنگ سخت معرفی شد. این روش در سال ۱۹۸۸ به دنبال افزایش پایگاه داده‌ی اصلی از ۲۶ مطالعه موردی از ۳ معدن به ۱۷۵ مورد از ۳۴ معدن و اصلاح متغیرهای عدد پایداری توسط پوتوین تبدیل به روشی رایج در معدن‌کاری زیرزمینی شد.

با توجه به اهمیت طراحی فضاهای باز زیرزمینی و تأثیر آن بر روی پایداری فضای زیرزمینی مطالعات متعددی در زمینه نمودار پایداری پس از معرفی آن برای اصلاح و بهبود کارایی آن ارائه شده است، که این مطالعات در جدول (۲-۳) بر حسب نوع تحقیق و سال انجام آن آورده شده است.

جدول ۲-۳: مطالعات انجام شده در زمینه‌ی نمودار پایداری تا به امروز

ردیف	محقق (سال انتشار)	توضیحات
۱	Mathews et al. (1981)	معرفی روش نمودار پایداری بر اساس ۲۶ مورد سابقه تاریخی
۲	Potvin (1988)	کالیبراسیون ضرایب نمودار پایداری و مناطق مختلف آن بر اساس ۱۷۵ مورد سابقه تاریخی
۳	Potvin et al. (1989)	پیشنهاد طراحی کابل‌های مهاری با در نظرگیری مکانیزم احتمال ریزش
۴	Potvin & Milne (1992)	ارائه خطوط تجربی نگهداری با استفاده از کابل‌های مهاری
۵	Nickson (1992)	تعریف مجدد مرز ناپایداری-تخریب (مرز ناحیه نیازمند سیستم نگهداری - خطوط نگهداری مهاری کابلی <sup>۱</sup> ) - نخستین تعریف جزئی آماری از منطقه پایداری- ناپایداری ناپایداری
۶	Scoble & Moss (1994)	پیشنهاد افزودن خطوط ترقیق <sup>۲</sup> به نمودار پایداری
۷	Hoek (1995)	ارائه ضریب گرانج (c) برای ریزش و ورقه ورقه شدن
۸	Stewart & Forsyth (1995)	بازتعریف تعریف مجدد مناطق انتقالی <sup>۳</sup> نمودار پایداری
۹	Hadjigeorgiou et al. (1995)	اصلاح ضریب نیروی ثقل برای شکست لغزشی <sup>۴</sup> - تعریف جزئی آماری از منطقه پایداری- ناپایداری برای دومین مرتبه
۱۰	Milne et al. (1996)	معرفی ضریب شعاع <sup>۵</sup> (RF)
۱۱	Clarck & Pakalnis (1997)	بازسنجش خطوط ترقیق پیشنهادی (ELOS) - اصلاح ضریب نیروی ثقل برای کم‌پایین‌های با شیب کمتر از ۷۰ درجه
۱۲	Suorineni (1998)	نخستین تحلیل جامع آماری نمودار پایداری با استفاده از آمار و احتمالات بیزین
۱۳	Germain & Hadjigeorgiou (1998)	پیشنهاد ارائه شاخص حجمی
۱۴	Suorineni et al. (1999)	معرفی ضریب گسل
۱۵	Martin et al. (1999)	ارائه عدد پایداری اصلاح شده که این عدد نشان دهنده پایداری توده‌سنگ تحت شرایط تنش‌های موجود است.
۱۶	Diederichs & Kaiser (1999)	اصلاح ضریب تنش برای تنش کششی القایی و مناطق انتقالی وابسته به تنش
۱۷	Trueman et al. (2000); Mawdesley et al. (2001)	توسعه پایگاه داده‌ای با ۴۰۰ مورد و اصلاح مناطق نمودار پایداری با استفاده از داده‌های معادن استرالیا
۱۸	Mawdesley (2001)	تعیین ضریب مربوط به نقص درزه و تعدیل راستای آن
۱۹	Suorineni et al. (2001)	ارائه نمودار پایداری وابسته به زمان

1 - Cablebolt Support Line

2- Dilution lines

3- Transition Zones

4 Sliding Failure

5- Radius Factor

ادامه جدول ۲-۳: مطالعات انجام شده در زمینه‌ی نمودار پایداری تا به امروز

ردیف	محقق (سال انتشار)	توضیحات
۲۰	Mawdesley (2002)	ارائه نسخه توسعه یافته نمودار پایداری به‌عنوان روشی جایگزین برای پیش‌بینی قابلیت تخریب توده‌سنگ در معادن تخریب بلوکی
۲۱	Trueman & Mawdesley (2003)	دومین تحلیل جامع آماری با ۴۸۳ مورد و استفاده از رگرسیون منطقی
۲۲	Stewart & Trueman (2003)	کاربرد نمودار پایداری توسعه یافته برای کمی‌سازی تأثیر رهایش تنش بر پایداری حفرات
۲۳	Wang (2004)	ارزیابی کمی تأثیر تنش، زیربری، انفجار و زمان در معرض قرارگیری بر روی پایداری کمربالا و ترقیق در کارگاه باز
۲۴	Sunwoo et al. (2006)	ارزیابی پایداری در بازکننده‌های زیرزمینی وسیع به وسیله‌ی روش نمودار پایداری ماتئوس
۲۵	سعیدی و همکاران (2007) (۱۳۸۶)	استفاده از روش‌های نمودار پایداری و ترقیق پاکالنیس برای تعیین ترقیق در روش استخراج جبهه‌کار طولانی در معادن زغالسنگ کرمان
۲۶	Bewick & Kaiser (2009)	کاربرد مدل‌سازی عددی برای اعتبارسنجی ضریب نقص درزه (B)
۲۷	Suorineni (2010)	بررسی روش نمودار پایداری و توسعه‌های صورت گرفته در آن و برشمردن محدودیت‌های آن
۲۸	جبین پور و یآوری شهرضا (2010) (۱۳۹۰)	تعیین قابلیت تخریب توده‌سنگ با استفاده از روش‌های نمودار پایداری و تخریب لابسچر و مقایسه آنها
۲۹	Mitri et al. (2011)	در نظرگیری تنش کششی برای اصلاح مجدد ضریب تنش سنگ
۳۰	Stewart et al. (2011)	ارائه عوامل مؤثر بر بیش شکستگی در کانسار رگه باریک طلا در استرالیا با استفاده از روش نمودار پایداری توسعه یافته ماتئوس و مقایسه آماری
۳۱	Sharp (2011)	پیش‌بینی شرایط پایداری معدن زیرزمینی کارگاه باز Olympic Dam در جنوب استرالیا
۳۲	صاحبی و همکاران (2011) (۱۳۹۳)	طراحی نرم افزار Rock Dil 1.0 بر اساس روش ترقیق پاکالنیس جهت محاسبه ترقیق در معادن
۳۳	Suorineni (2012)	پیشنهاد رویکردی واحد برای کاربرد نمودار پایداری برای طراحی کارگاه باز و هشدار نسبت به کاربرد مستقیم این روش برای کانسارهای رگه باریک
۳۴	Melo et al. (2014)	تحلیل عامل ضریب گرانش C برای کمرباطین، ابتدا و انتهای کارگاه و کاربرد نمودار پایداری برای شرایط ژئومکانیکی برزیل
۳۵	Potvin (2014)	بیان چالش‌ها، اشتباهات و استفاده‌های نابجا از روش نمودار پایداری اصلاح شده پس از حدود ۳۰ سال از معرفی آن
۳۶	Papaioanou & Suorineni (2015)	توسعه نمودار پایداری کمی جامع مبتنی بر ترقیق مستقل از عرض کانسار. مطالعه موردی: ۲۲۶ کارگاه از ۶ معدن فلزی استرالیا

ادامه جدول ۲-۳: مطالعات انجام شده در زمینه‌ی نمودار پایداری تا به امروز

ردیف	محقق (سال انتشار)	توضیحات
۳۷	Jordá-Bordehore et al. (2015)	ارزیابی پایداری حفرات کارستی <sup>۱</sup> کم عمق با استفاده از روش تجربی نمودار پایداری و سیستم‌های طبقه‌بندی مهندسی سنگ
۳۸	Vallejos et al. (2016)	ارزیابی عملکرد و اهمیت عوامل تعدیل عدد پایداری مورد استفاده در روش نمودار پایداری

## ۲-۴-۷ جمع‌بندی

در این فصل ابتدا با توجه به کاربرد روش نمودار پایداری در طراحی کارگاه‌های باز، کلیاتی در مورد این کارگاه‌ها و انواع روش‌های آن بیان شد. سپس با توجه به تجربی بودن روش نمودار پایداری، برخی از انواع روش‌های طراحی تجربی در ژئومکانیک بیان شد. در ادامه نیز کلیاتی راجع به روش نمودار پایداری و انواع آن و مشکلات روش بیان شد. همچنین سابقه‌ی علمی این موضوع نیز در بخش پایانی مورد بررسی قرار گرفت. در فصل بعد کلیات مربوط به روش‌های آماری رگرسیون منطقی، SVM و منطق فازی بیان می‌شود.

<sup>۱</sup> - Karstic Caves

# فصل سوم

روش‌های آماری و هوشمند در توسعه مدل ارزیابی

پایداری

## ۳-۱ مقدمه

برای توسعه مدل‌های ارزیابی پایداری بر مبنای روش نمودار پایداری از انواع رویکردهای آماری و هوشمند می‌توان بهره گرفت. بر این اساس در فصل حاضر به بررسی مبانی سه روش از آن‌ها که در این پایان‌نامه مورد استفاده قرار گرفته، پرداخته شده است. برای این منظور در ابتدا روش رگرسیون منطقی به عنوان یک روش آماری تشریح شده و در ادامه آن پژوهش‌های انجام شده بر مبنای آن در مهندسی معدن ارائه می‌شود. در ادامه فصل نیز روش‌های ماشین بردار پشتیبان و منطق فازی از گروه روش‌های هوشمند مورد بحث قرار می‌گیرند و سعی می‌شود پیشینه استفاده از آن‌ها در حوزه مهندسی معدن بررسی شود.

## ۳-۲ رگرسیون منطقی

رگرسیون منطقی<sup>۱</sup> روش مدل‌سازی آماری برای نشان دادن تأثیر متغیرهای مستقل کمی یا کیفی بر متغیر وابسته دوتایی<sup>۲</sup> (دو وجهی) است. در این روش متغیر وابسته (Y) تنها شامل دو مقدار ممکن است و آن را تبدیل به ابزاری مفید برای تجزیه و تحلیل داده‌هایی که دارای متغیرهای وابسته طبقه‌ای<sup>۳</sup> مانند بله/خیر، زندگی/مرگ و یا پایدار/شکسته شده، در مقایسه با رگرسیون عددی است. رگرسیون منطقی، متغیر وابسته را به جای مدل‌سازی به طور مستقیم، به صورت احتمالاتی برآورد می‌کند (Wattimena et al., 2013).

رگرسیون منطقی یکی از روش‌های کاربردی برای پیش‌بینی متغیرهای گروهی است. به عنوان مثال در صورتی که نتیجه آزمایشی به صورت برد/باخت تعریف شود، در این حالت دیگر متغیر وابسته پیوسته نیست، بلکه به صورت دسته‌بندی شده خواهد بود. یکی از انواع رگرسیون منطقی، مدل رگرسیون منطقی دوحالتی<sup>۴</sup> است که تعداد دسته‌بندی‌های متغیر وابسته در این مدل دو دسته است. در صورتی که تعداد دسته‌بندی‌ها بیش از دو دسته باشد، آنگاه با توجه به حالت متغیر وابسته (یعنی اسمی<sup>۵</sup> و ترتیبی<sup>۶</sup>) مدل‌های رگرسیون منطقی اسمی

1 - Logistic Regression

2 - Binary

3 - Categorical Response Variables

4 - Dichotomous

5 - Nominal

6 - Ordinal



و ترتیبی حاصل می‌شود (Zhou et al., 2008).

در این روش ارتباط بین متغیر وابسته و متغیرهای مستقل غیر خطی می‌باشند. رگرسیون منطقی به طور مستقیم متغیر خروجی را پیش‌بینی نمی‌کند، بلکه آن را به صورت احتمالاتی یعنی عددی بین صفر و یک پیش‌بینی می‌کند. کاربرد اصلی تحلیل رگرسیون منطقی برای نشان دادن تأثیر مجموعه‌ای از متغیرهای مستقل بر متغیر وابسته است. کاربرد دیگر آن برای پیش‌بینی مقدار متغیر وابسته هر عنصر بر اساس وضعیت آن عنصر در متغیرهای مستقل است (Agresti, 2007). برای ایجاد معادله رگرسیون منطقی باید ضرایب متغیرهای مستقل و یا پارامترهای مسأله به طور تخمینی محاسبه شوند. در ادامه نحوه تخمین پارامترهای رگرسیون منطقی بیان می‌شود.

### ۳-۲-۱ تخمین پارامترها در رگرسیون منطقی

روش‌های مختلفی برای تخمین پارامترها وجود دارد؛ یکی از روش‌های رایج، روش حداقل مربعات خطا<sup>۱</sup> است. هدف در این روش، یافتن ضرایب رگرسیونی برای حداقل نمودن میانگین مربعات خطا است. روش دیگری که برای این منظور استفاده می‌شود، روش حداکثر درست‌نمایی<sup>۲</sup> است که به منظور حداکثرسازی درست‌نمایی مدل، پارامترهای مدل را تخمین می‌زند. در این روش پارامترهای مدل به نحوی تخمین زده می‌شوند که لگاریتم درست‌نمایی، حداکثر شود. در صورتی که خطای مشاهده‌ای و داده‌ها از توزیع نرمال<sup>۳</sup> پیروی کنند، روش تخمین حداقل مربعات خطا به حالت خاصی از روش حداکثر درست‌نمایی تبدیل می‌شود (Hilbe, 2009).

### ۳-۲-۲ تخمین پارامتر در مدل‌های رگرسیونی غیر خطی دوتایی

همان طور که قبلاً بیان شد، روش‌های مختلفی مانند روش حداقل مربعات خطا و حداکثر درست‌نمایی برای تخمین ضرایب رگرسیونی در سیستم‌های خطی وجود دارد. به علت طبیعت دسته‌بندی متغیرهای وابسته در

<sup>۱</sup> - Least Square Error

<sup>۲</sup> - Maximum Likelihood

<sup>۳</sup> - Normal Distribution

مدل‌های رگرسیون منطقی، استفاده مستقیم از این روش‌ها برای تخمین پارامتر در این مسائل امکان‌پذیر نیست. به طور کلی می‌توان برای تبدیل مسائل غیر خطی به خطی از تبدیل لگاریتم استفاده کرد که به مدل حاصله، مدل لگاریتم طبیعی یا لاجیت<sup>۱</sup> گفته می‌شود (Hilbe, 2009).

در صورتی که  $n$  مجموعه داده آزمایشی مستقل وجود داشته باشد و در هر مجموعه، بردار متغیرهای پیش‌بینی به صورت بردار  $x$  به شکل  $x_i = (x_{i1}, x_{i2}, \dots, x_{in})$  باشد، به طوری که متغیر وابسته به صورت  $z_i$ ،  $i=1, 2, \dots, n$  تعریف شود، در این صورت  $z_i$  دارای توزیع برنولی<sup>۲</sup> با احتمال موفقیت  $\pi_i$  است. احتمال  $\pi_i$  تابعی از  $x_i$  است و در مدل رگرسیون منطقی توسط تابع  $g(\pi_i)$  مشخص شده که مطابق رابطه (۱-۳) بیان می‌شود (Agresti, 2007).

$$g(\pi_i) = \log \frac{\pi_i}{1 - \pi_i} = \beta_1 x_{i1} + \beta_2 x_{i2} + \dots + \beta_p x_{ip} \quad (1-3)$$

همچنین بردار  $\beta = (\beta_1, \beta_2, \dots, \beta_p)^T$  بردار مربوط به پارامترهای مدل رگرسیون است و  $x_{i1}$  برابر یک و ضریب  $\beta_1$  برابر ثابت مدل است. احتمال وقوع برای هر مجموعه از مشاهدات که اصطلاحاً احتمال وقوع رویداد گفته می‌شود، بر اساس تابع نمایی<sup>۳</sup> متغیرهای مستقل و مطابق رابطه (۲-۳) برآورد می‌شوند (Agresti, 2007).

$$\pi_i = \frac{\exp(x_i^T \beta)}{1 + \exp(x_i^T \beta)} = \frac{\exp(\eta_i)}{1 + \exp(\eta_i)} \quad (2-3)$$

همچنین در رگرسیون منطقی نیز مانند رگرسیون خطی محاسبه ضریب رگرسیون منطقی  $\beta_k$  هر متغیر مستقل  $x_k$  با کنترل اثر سایر متغیرهای مستقل انجام می‌شود. به عبارت دیگر اثر متغیرهای مستقل دیگر ثابت می‌ماند. کنترل متغیرهای مستقل دیگر به معنای حذف اثر آن‌ها از روی متغیر مستقل  $x_k$  و متغیر وابسته  $Y$  است. این کنترل در رابطه محاسبه ضریب رگرسیون منطقی برای هر متغیر مستقل اعمال می‌شود (Agresti, 2007).

<sup>1</sup> - Logit

<sup>2</sup> - Bernoulli Distribution

<sup>3</sup> - Exponential Function

### ۳-۳ رگرسیون منطقی چند جمله‌ای

مدل رگرسیون منطقی ساده تنها برای متغیرهای وابسته دوتایی استفاده می‌شود. این مدل برای مواردی که متغیر وابسته چند حالتی باشد، یعنی تعداد آن‌ها بیش از دو دسته باشد، قابل تعمیم است. فرض کنید متغیر وابسته دارای  $k$  دسته باشد. در این صورت یکی از مقادیر متغیر وابسته به عنوان دسته مرجع انتخاب می‌شود. همچنین احتمال عضویت نمونه در سایر دسته‌ها با احتمال عضویت در دسته مرجع مقایسه می‌شود. در چنین شرایطی اگر دسته‌های ممکن  $k$  دسته باشند، آنگاه تعداد  $k-1$  مدل لاجیت مورد نیاز است. رابطه بین احتمال رخداد هر دسته و  $p$  متغیر توضیحی  $x_1, x_2, \dots, x_p$  به صورت مدل رگرسیون چندگانه (۳-۳) بیان می‌شود (Catterjee & Hadi, 2006):

$$\log \left( \frac{\pi_j(x_j)}{\pi_k(x_i)} \right) = \beta_{0j} + \beta_{1j} x_{1i} + \beta_{2j} x_{2i} + \dots + \beta_{pj} x_{pi}; \quad \begin{cases} j=1,2,\dots,(k-1) \\ i=1,2,\dots,n \end{cases} \quad (3-3)$$

از آنجا که تمامی  $\pi$  ها به یک اضافه می‌شوند، بنابراین رابطه فوق به صورت رابطه (۴-۳) بیان می‌شود:

$$\log(\pi_j(x_i)) = \frac{\exp(\beta_{0j} + \beta_{1j} x_{1i} + \beta_{2j} x_{2i} + \dots + \beta_{pj} x_{pi})}{1 + \sum_{j=1}^{k-1} \exp(\beta_{0j} + \beta_{1j} x_{1i} + \beta_{2j} x_{2i} + \dots + \beta_{pj} x_{pi})} \quad \text{for } j=1,2,\dots,(k-1) \quad (4-3)$$

در این رابطه  $\pi_j$ ، احتمال چند جمله‌ای مشاهده در دسته  $j$ ام و  $\beta_{pj}$  ها نیز ضرایب رگرسیون منطقی می‌باشند.

### ۴-۳ کاربرد رگرسیون منطقی در مهندسی معدن

با توجه به کاربردهای مختلف این روش آماری در علوم مختلف که بیشتر از آن برای حل مسائل مربوط به دسته‌بندی و پیش‌بینی استفاده شده است، در زمینه مهندسی معدن نیز طی سالیان گذشته از این روش برای دسته‌بندی و نیز پیش‌بینی استفاده شده است. در جدول ۳-۱ خلاصه‌ای از پژوهش‌ها از سال ۲۰۰۰ تاکنون توسط محققان مختلف در حوزه مسائل مربوط به مهندسی معدن بیان شده است.

جدول ۳-۱: برخی از مطالعات انجام شده توسط محققان مختلف با استفاده از روش رگرسیون منطقی در حوزه

مهندسی معدن

ردیف	محقق (سال انتشار)	توضیحات
۱	Carranza & Hale (2001)	استفاده از روش رگرسیون منطقی به منظور پیش‌بینی احتمال وجود یا عدم وجود کانی طلا برای تهیه نقشه مناطق بالقوه طلا در منطقه Baguio در فیلیپین
۲	Maiti & Bhattacharjee (2001)	تحلیل رگرسیون منطقی به منظور بررسی قابلیت بروز حوادث شغلی در میان گروه‌های مختلف کارگری در معدن زغالسنگ زیرزمینی
۳	Paoliello et al. (2002)	بررسی میزان در معرض قرارگیری کودکان به سرب و کادمیوم <sup>۱</sup> حاصل از فعالیت‌های معدنی در منطقه‌ای از برزیل با استفاده از تحلیل رگرسیون منطقی
۴	Ohlmacher & Davis (2003)	کاربرد رگرسیون منطقی برای تهیه نقشه خطر زمین لغزش در منطقه شمال شرق کانزاس <sup>۲</sup> در آمریکا
۵	Mawdesley (2004)	استفاده از رگرسیون منطقی برای بهبود دقت مناطق پایداری در روش نمودار پایداری
۶	Kim et al. (2006)	ارزیابی خطرات ناشی از نشست زمین در نزدیکی معدن زیرزمینی زغالسنگ در کره جنوبی با استفاده از مدل‌های رگرسیون منطقی، احتمالاتی و سیستم اطلاعات جغرافیایی <sup>۳</sup> (GIS)
۷	Liu et al. (2009)	ارائه مدل رگرسیون منطقی برای پیش‌بینی هجوم آب از درون انواع زغالسنگ
۸	Palei & Das (2009)	ارائه مدل رگرسیون منطقی به منظور پیش‌بینی میزان حوادث ناشی از ریزش سقف در فعالیت‌های کاری معادن زغالسنگ
۹	Zobrist et al. (2009)	کاربرد تحلیل رگرسیون منطقی برای ارزیابی اثرات زیست محیطی، اجتماعی و اقتصادی ناشی از فعالیت‌های معدن‌کاری در حوزه آبریز رودخانه سرتج <sup>۴</sup> در کشور رومانی
۱۰	Paul (2009)	پیش‌بینی حوادث ناشی از کار در معادن زیرزمینی کشور هند با استفاده از رگرسیون منطقی چند متغیره <sup>۵</sup>
۱۱	Choi et al. (2010)	تهیه مدل‌های رگرسیون منطقی و منطق فازی برای تخمین احتمال نشست در معدن زیرزمینی زغالسنگ در کشور کره جنوبی
۱۲	Das et al. (2010)	ارائه روش رگرسیون منطقی برای تهیه نقشه‌های قابلیت وقوع زمین لغزش در امتداد جاده شمال هیمالیا و مقایسه نتایج آن با روش طبقه‌بندی احتمال پایداری شیب مبتنی بر ژئوتکنیک <sup>۶</sup>
۱۳	Ercanoglu & Temiz (2011)	استفاده از روش‌های رگرسیون منطقی و منطق فازی برای ارزیابی قابلیت وقوع زمین لغزش در ناحیه‌ای از کشور ترکیه

<sup>۱</sup> - Lead and Cadmium

<sup>۲</sup> - Kansas

<sup>۳</sup> - Geographic Information System

<sup>۴</sup> - Certaj

<sup>۵</sup> - Multivariate Logistic Regression

<sup>۶</sup> - Geotechnical-Based Slope Stability Probability Classification (SSPC)

ادامه جدول ۳-۱: برخی از مطالعات انجام شده توسط محققان مختلف با استفاده از روش رگرسیون منطقی در حوزه مهندسی معدن

ردیف	محقق (سال انتشار)	توضیحات
۱۴	Dong et al. (2011)	ارائه مدل رگرسیون منطقی برای پیش‌بینی احتمال شکستن سدهای واریزه‌ای <sup>۱</sup> ایجاد شده بر اثر زلزله در کشور ژاپن
۱۵	Wattimena et al. (2013)	استفاده از رگرسیون منطقی به منظور محاسبه احتمال پایداری پایه در معادن زغالسنگ با هندسه و شرایط تنش شناخته شده (نسبت تنش به مقاومت) و نیز استفاده از رگرسیون منطقی برای رسم خطوط هم احتمال پایه‌های زغالی
۱۶	Onder (2013)	ارزیابی حوادث شغلی کارگران معدن زغالسنگ با استفاده از مدل رگرسیون منطقی و پیش‌بینی احتمال وقوع حوادثی که منجر به از دست دادن روزهای کاری برای کارگران شده است.
۱۷	Vallejos & McKinnon (2013)	پیش‌بینی سوابق لرزه‌ای <sup>۲</sup> و حوادث ناشی از فعالیت‌های انفجار در معدن کاری با استفاده از روش‌های رگرسیون منطقی و شبکه عصبی <sup>۴</sup>
۱۸	Wattimena (2014)	پیش‌بینی خطر انفجار ناشی از گاز و زغال در معدن زغالسنگ به وسیله‌ی رگرسیون منطقی
۱۹	Ghasemi et al. (2014)	توسعه مدل‌های رگرسیون منطقی و فازی برای پیش‌بینی پایداری سراسری در معادن زغالسنگ اتاق و پایه
۲۰	Dong at al. (2016)	تفکیک امواج زمین لرزه <sup>۵</sup> و امواج ناشی از انفجار در معدن با استفاده از سه الگوریتم طبقه‌بندی رگرسیون منطقی، فیشر <sup>۶</sup> و نایو بیزین <sup>۷</sup>

### ۳-۵ ماشین بردار پشتیبان (SVM)

روش ماشین بردار پشتیبان یکی از روش‌های یادگیری با نظارت<sup>۸</sup> است که در حل مسائل پیش‌بینی، دسته‌بندی به صورت خطی و غیرخطی و نیز خوشه‌بندی<sup>۹</sup> کاربرد فراوانی داشته و این مسائل در حوزه‌ی فنی و مهندسی با این روش قابل حل می‌باشند. این روش به عنوان ابزاری توانمند در حل مسائل تقریب غیرخطی توابع و شناسایی الگو استفاده می‌شود. الگوریتم ماشین بردار پشتیبان یا SVM به دو دسته اصلی

<sup>۱</sup> - Landslide Dams

<sup>۲</sup> - Isoprobability Contours

<sup>۳</sup> - Seismic Records

<sup>۴</sup> - Neural Network

<sup>۵</sup> - Seismic Events

<sup>۶</sup> - Fisher

<sup>۷</sup> - Naive Bayesian

<sup>۸</sup> - Supervised Learning

<sup>۹</sup> - Clustering

به نام‌های رگرسیون بردار پشتیبان<sup>۱</sup> یا SVR و دسته‌بندی بردار پشتیبان<sup>۲</sup> یا SVC تقسیم می‌شود. SVR برای حل مسائل مربوط به پیش‌بینی و رگرسیون غیرخطی کاربرد دارد، در حالی که SVC در حل مسائل مربوط به طبقه‌بندی به کار می‌رود. چون هدف در این تحقیق طبقه‌بندی است، از توضیح SVR خودداری نموده و فقط به اصول کلی SVC پرداخته می‌شود.

### ۳-۵-۱ کلیات روش ماشین بردار پشتیبان

مبنای الگوریتم SVM در سال ۱۹۹۵ توسط وپنیک<sup>۳</sup> و کورتس<sup>۴</sup> بر پایه تئوری یادگیری آماری پیشنهاد شد (Cortes & Vapnik, 1995). الگوریتم SVM برای برطرف کردن ضعف‌های شبکه‌های عصبی مصنوعی ابداع شده است. مزایای این روش نسبت به شبکه عصبی توانایی دسته‌بندی به صورت پویا و برخط، سادگی و انجام محاسبات بسیار سریع و عمومیت در داشتن تعداد ویژگی است.

این روش دارای دو ویژگی است: به اندازه کافی ساده است، که محققان با دانش کافی می‌توانند به سادگی درک کنند؛ همچنین روشی توانمند است که دقت پیش‌بینی این روش بسیاری از روش‌های دیگر همچون نزدیکترین همسایگان<sup>۵</sup> و شبکه‌های عصبی را تحت الشعاع قرار می‌دهد. ایده اصلی SVM بر پایه نگاشت مجموعه داده‌های اصلی از فضای ورودی به یک بُعد بالا یا حتی فضای ویژگی با بُعد بی‌نهایت<sup>۶</sup> است، به نحوی که مسأله دسته‌بندی در فضای ویژگی ساده‌تر شود. SVM دارای قابلیت تکثیر رابطه ناشناخته موجود بین مجموعه‌ای از متغیرهای ورودی و خروجی سیستم است. مزیت اصلی SVM آن است که از ترفند کرنل<sup>۷</sup> برای ایجاد دانش فنی در مورد یک مسأله استفاده می‌کند، به نحوی که پیچیدگی مدل و خطای پیش‌بینی به طور همزمان به حداقل برسند.

<sup>۱</sup> - Support Vector Regression

<sup>۲</sup> - Support Vector Classification

<sup>۳</sup> - Vapnik

<sup>۴</sup> - Cortes

<sup>۵</sup> - Nearest Neighbours

<sup>۶</sup> - Infinite-Dimensional

<sup>۷</sup> - Kernel

از ویژگی‌های روش SVM می‌توان به طبقه‌بندی داده‌ها با حداکثر قابلیت تعمیم، رسیدن به نقطه بهینه تفکیک داده‌ها، تعیین خودکار ساختار بهینه برای دسته‌بندی کننده و امکان مدل‌سازی داده‌های غیر خطی با استفاده از تجزیه و تحلیل اجزا اصلی اشاره کرد. همچنین این روش از یک نگاهت غیر خطی برای تبدیل داده‌های اصلی به ابعاد بالاتر استفاده می‌کند. مؤلفه اساسی که ماشین بردار را متمایز می‌کند، پیروی روند پردازش این الگوریتم از قاعده‌هایی است که به عنوان حداقل‌سازی ریسک ساختاری<sup>۱</sup> (SRM) شناخته می‌شود. در واقع الگوریتم خطاهای طبقه‌بندی را در داده‌های مشاهده نشده بدون فرض قبلی از احتمال تخریب داده، به حداقل می‌رساند. با توجه به چارچوب آماری نظری قوی، ثابت شده SVM در زمینه‌های مختلف به ویژه برای داده‌های حاوی نویز<sup>۲</sup>، نسبت به مدل‌های موضعی که از روش‌های سنتی بی‌نظم استفاده می‌کند، بسیار قدرتمندتر است. این روش هر چند که دارای قابلیت تعمیم مناسب است ولی در مرحله آموزش و آزمون می‌تواند زمان بر باشد (Deka, 2014).

### ۳-۵-۲ تئوری ماشین‌های بردار پشتیبان

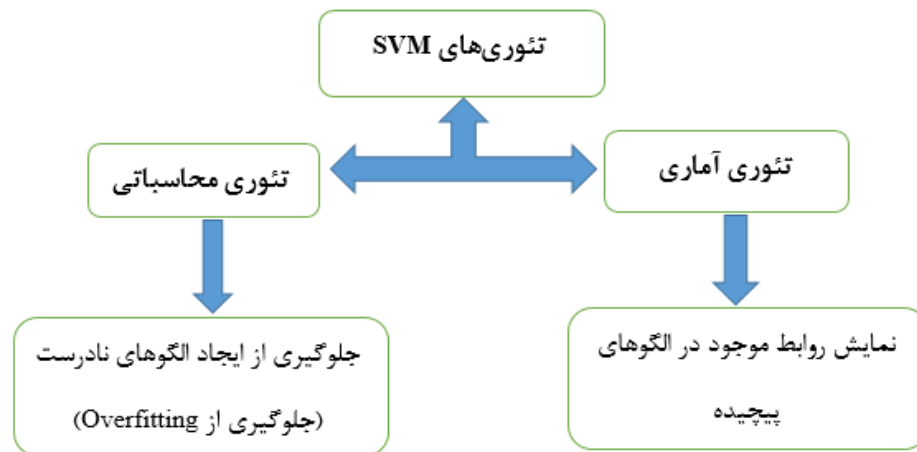
الگوریتم ماشین‌های بردار پشتیبان برای حل مسائل پیچیده و غیر خطی در ریاضی و مهندسی، ابداع شده است. این روش تقریباً قوی‌ترین و دقیق‌ترین روش در بین همه الگوریتم‌های مشهور یادگیری ماشین بوده و به صورت ابتکاری توسط وپنیک بر مبنای اصول نظری و تئوری‌های مربوطه بسط و توسعه داده شده است. الگوریتم SVM از دو تئوری بسیار دقیق آماری و ریاضی گرفته شده است. این الگوریتم بر مبنای اصول تئوری یادگیری آماری<sup>۳</sup> (SLT) و تئوری حداقل‌سازی ریسک ساختاری (SRM) تعریف شده است. همان‌طور که در شکل ۳-۱ مشاهده می‌شود، با استفاده از تئوری آماری، روابط موجود در الگوهای پیچیده کشف شده و با استفاده از تئوری ریاضی و محاسباتی از پدیده «تطبیق بیش از حد»<sup>۴</sup> جلوگیری می‌شود.

<sup>۱</sup>- Structural Risk Minimization

<sup>۲</sup>- Noise

<sup>۳</sup>-Statistical Learning Theory

<sup>۴</sup>- Overfitting



شکل ۳-۱: تقسیم‌بندی تئوری ماشین‌های بردار پشتیبان (Merler & Jurman, 2006)

### ۳-۵-۲-۱ تئوری یادگیری آماری

در تئوری یادگیری آماری هدف از مدل‌سازی انتخاب یک مدل از فضای فرضی (فضای نهشته<sup>۱</sup>) بوده که کمترین اختلاف را با تابع اساسی<sup>۲</sup> در فضای هدف<sup>۳</sup> داشته باشد. در این تئوری خطاها به دو دسته تقسیم می‌شوند (Gunn, 1998):

الف) خطای تقریب<sup>۴</sup>: این خطا زمانی ایجاد می‌شود که فضای نهشته (فضای ورودی) از فضای هدف کوچک‌تر باشد. انتخاب ضعیف و نامناسب پارامترهای مدل سبب افزایش خطای تقریب می‌شود.

ب) خطای تخمین<sup>۵</sup>: این خطا ناشی از روش یادگیری است و در اثر انتخاب نامناسب الگوریتم آموزشی مدل ایجاد می‌شود.

هر دو خطای فوق بر عملکرد الگوریتم SVM تأثیر مستقیم دارند؛ به طوری که معمولاً در مدل‌سازی مجموع آن‌ها که به خطای تعمیم معروف است، مورد استفاده قرار می‌گیرد. در تئوری یادگیری آماری برای کاهش خطای تابع  $R[f]$  به صورت رابطه (۳-۵) تعریف می‌شود و هدف آن حداقل‌سازی مقدار ریسک است.

<sup>۱</sup>- Hypothesis Space

<sup>۲</sup>- Underlying Function

<sup>۳</sup>- Target Space

<sup>۴</sup>- Approximation Error

<sup>۵</sup>- Estimation Error



$$R[f] = \int_{X \times Y} L(y, f(x)) P(x, y) dx dy \quad (5-3)$$

در رابطه فوق،  $P(x, y)$  مجهول مسأله و  $R[f]$  تابع کاهش خطا است.

### ۲-۲-۵-۳ تئوری حداقل‌سازی ریسک ساختاری

برای توضیح تئوری اصل حداقل‌سازی ریسک ساختاری مجموعه داده‌ای طبق رابطه (۶-۳) به عنوان فضای ورودی در نظر گرفته می‌شود.

$$S_1 \subset S_2 \subset \dots \subset S_\infty \quad (6-3)$$

در این رابطه  $S_h$  یک فضای ورودی با بُعد  $h$  یا "Vapnik-Chervonenkis" است. با حل مسأله زیر حداقل ریسک ساختاری به صورت رابطه (۷-۳) محاسبه می‌شود.

$$\min_{S_h} R_{emp}[f] + \sqrt{\frac{h \times \ln\left(\frac{2l}{h} + 1\right) - \ln\left(\frac{\delta}{4}\right)}{l}} \quad (7-3)$$

معمولاً مدل‌سازی مسائلی که دارای چند خروجی می‌باشند، خیلی دشوار است. برای حل این گونه مسائل، ابتدا مسأله مورد نظر به صورت مجموعه‌ای از مسائل با یک خروجی تبدیل شده و هر کدام به صورت مستقل حل می‌شوند. پس از حل هر یک از آن‌ها نتیجه نهایی که ترکیبی از مسائل خروجی است، برای مسأله اصلی در نظر گرفته می‌شود (Gunn, 1998).

### ۲-۲-۵-۳ بُعد "Vapnik-Chervonenkis"

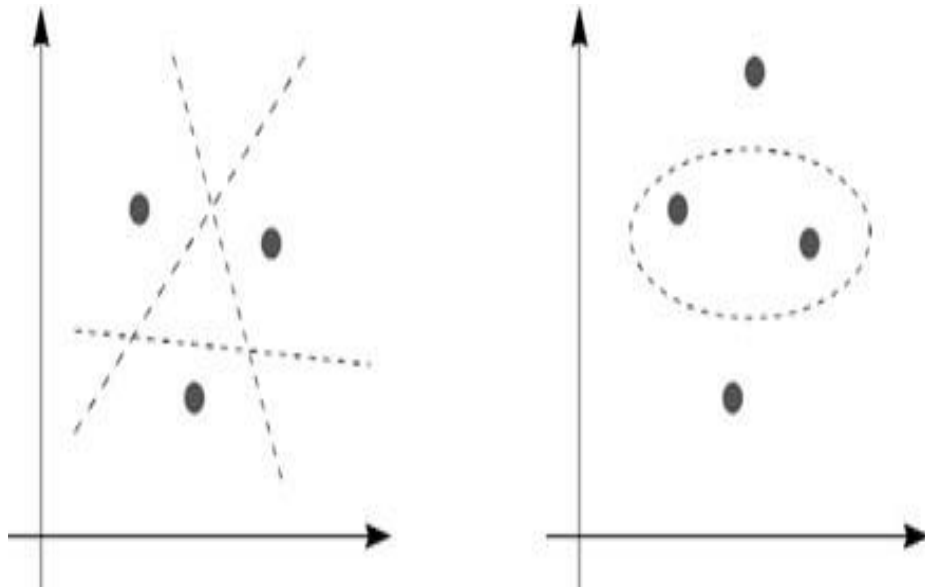
بُعد "Vapnik-Chervonenkis" یا بُعد VC در یک تابع برابر مقدار  $P$  است، اگر و فقط اگر دو شرط زیر در مجموع نقاط آن تابع برقرار باشد.

الف) مجموعه‌ای از نقاط شامل  $\left\{x^i\right\}_{i=1}^P$  با فرض  $q > p$  وجود نداشته باشد.

در واقع بُعد VC یک مقدار اسکالر بوده که توسط آن ظرفیت مجموعه توابع تعیین می‌شود.

همان‌طور که در شکل ۲-۳ مشاهده می‌شود، سه نقطه در صفحه با سه تابع خطی تفکیک شده‌اند، پس بُعد VC برای توابع خطی در فضای دو بُعدی برابر سه است. به طور کلی بُعد VC در مجموعه توابع خطی در

فضای  $n$  بُعدی برابر  $n+1$  است. اما در این شکل چهار نقطه را نمی‌توان به صورت خطی جدا نمود و برای تفکیک آن‌ها از یک منحنی استفاده شده است. در این مورد بُعد VC با تعداد مجموعه‌های تفکیک‌پذیر برابر است (Gunn, 1998).

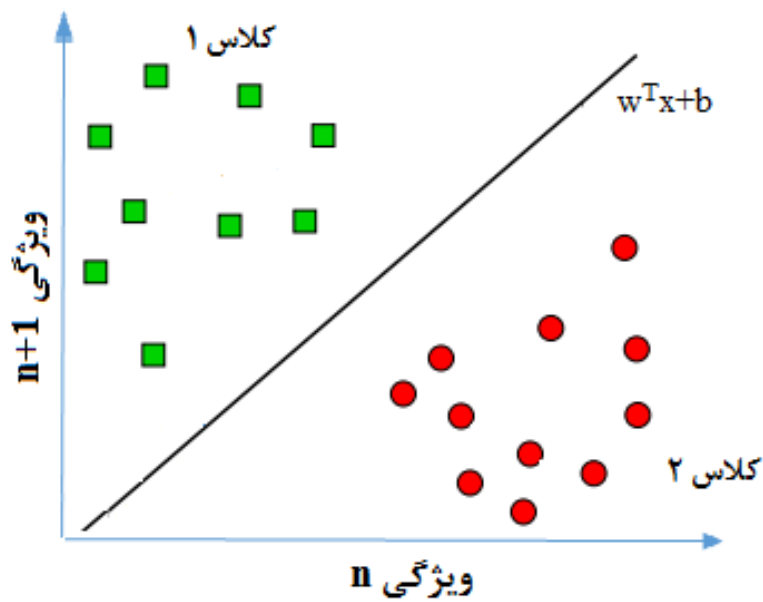


شکل ۳-۲: شمایکی از نحوه محاسبه بُعد "Vapnik-Chervonenkis" (Gunn, 1998)

### ۳-۵-۴ ماشین بردار پشتیبان خطی

حالت ساده SVM، ماشین SVM خطی است که ایده اصلی SVM نیز در آن به وضوح تشریح می‌شود. در این بخش روش به دست آوردن ابر صفحه<sup>۱</sup> بهینه برای زمانی که بردارهای آموزشی می‌توانند بدون خطا و به صورت خطی از یکدیگر جدا شوند، بیان می‌شود. یک مسأله طبقه‌بندی خطی برای جداسازی داده‌های آموزشی دو کلاس را در نظر بگیرید. فرض کنید  $x_i, i=1, 2, \dots, N$  مجموعه بردارهای ویژگی مربوط به داده‌های آموزشی باشد که به صورت خطی از یکدیگر قابل جداسازی هستند و در دو کلاس ۱ و ۲ همانند شکل ۳-۳ طبقه‌بندی شده‌اند.

<sup>۱</sup> - Hyperplane



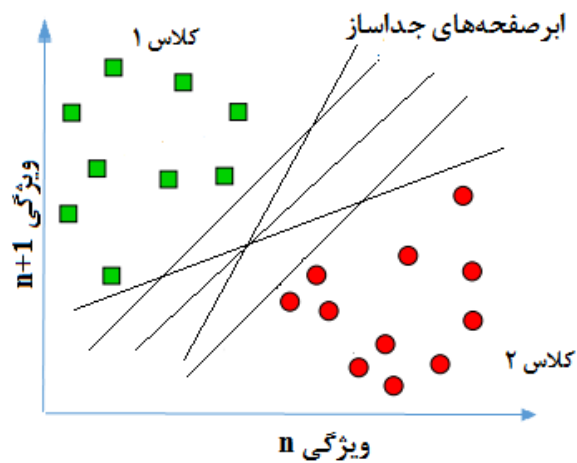
شکل ۳-۳: داده‌های آموزشی در دو کلاس قابل جداسازی به صورت خطی

معادله ابرصفحه‌ای که تمامی داده‌های آموزشی دو کلاس یک و دو را از یکدیگر تفکیک کند، به صورت رابطه (۸-۳) بیان می‌شود.

$$g(x) = w^T x + b \quad (۸-۳)$$

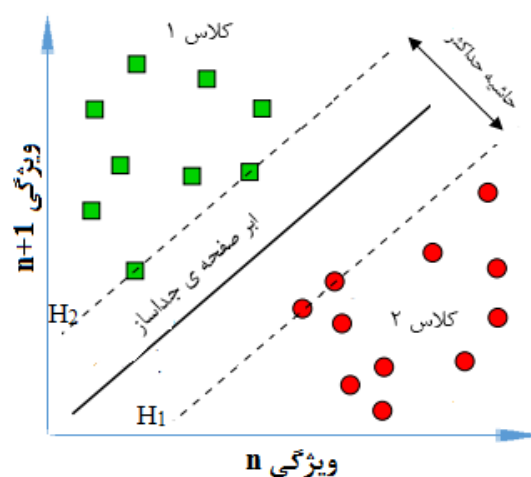
در این رابطه، بردار نرمال ابرصفحه است و فاصله این ابرصفحه تا مبدأ برابر  $\frac{|b|}{\|w\|}$  است.

به طور کلی این ابرصفحه یکتا نبوده و می‌توان مقادیر مختلفی برای  $w$  و  $b$  به دست آورد. شکل ۴-۳ چند نمونه از ابرصفحه‌هایی را که می‌توان برای طبقه‌بندی صحیح خطی داده‌های دو کلاس در نظر گرفت، نشان می‌دهد. هدف اصلی که در الگوریتم دسته‌بندی بردارهای پشتیبان مطرح می‌شود، یافتن بهترین خطی است که می‌تواند به صورت خطی این دو کلاس را از هم تفکیک کند (Law, 2006).



شکل ۳-۴: ابرصفحه‌های جداساز ممکن برای جداسازی دو کلاس

تمامی ابرصفحه‌های نشان داده شده در شکل فوق عمل جداسازی را به درستی انجام می‌دهند، اما تنها یک ابرصفحه وجود دارد که بیشترین فاصله (حداکثر حاشیه<sup>۱</sup>) را نسبت به داده‌های هر دو کلاس دارد، که این ابرصفحه، ابرصفحه جداساز بهینه<sup>۲</sup> گفته می‌شود. ابرصفحه جداساز بهینه در شکل ۳-۵ نشان داده شده است. این ابرصفحه منحصر به فرد به دلیل اینکه بیشترین فاصله را تا نزدیکترین داده از هر کلاس در دو سمت خود ایجاد می‌کند، بهترین دسته‌بندی با کمترین میزان خطا ارائه می‌دهد (Law, 2006).



شکل ۳-۵: ابرصفحه جداساز بهینه با حداکثر مقدار حاشیه

<sup>1</sup> - Max Margine

<sup>2</sup> - Optimal Separator Hyperplane

در حالت جداسازی خطی، داده‌های کلاس ۱ پشت ابرصفحه  $H_1$  و داده‌های کلاس ۲ پشت ابرصفحه  $H_2$  قرار می‌گیرند. داده‌هایی از هر کلاس که دقیقاً بر روی ابرصفحه‌های  $H_1$  و  $H_2$  قرار می‌گیرند، بردارهای پشتیبان نامیده می‌شوند. مهمترین نقاط آموزش بردارهای پشتیبان هستند؛ این بردارها ابرصفحه را تعیین و روی موقعیت بهینه سطح تصمیم تأثیر مستقیم دارند.

فرض می‌شود مسأله‌ای برای جداسازی مجموعه نمونه‌های آموزشی که متعلق به دو کلاس جداگانه هستند، وجود دارد. طبق معادله (۹-۳) بردار شاخص  $y_i$  شامل مقادیر +۱ و -۱ را به نحوی تعریف می‌کنند که برای کلاس ۱ مقدار +۱ و برای کلاس ۲ مقدار -۱ داشته باشد.

$$\begin{cases} +1 & \text{if } x_i \text{ in class1} \\ -1 & \text{if } x_i \text{ in class2} \end{cases} \quad (9-3)$$

هر ابرصفحه دقیقاً توسط جهت و مکان قرارگیری آن در فضا مشخص می‌شود، که  $w$  جهت ابرصفحه و  $b$  مکان آن را در فضا مشخص می‌کند. تابع تصمیم‌گیری را می‌توان به صورت معادله (۱۰-۳) و (۱۱-۳) تعریف کرد.

$$d(x) = \text{sign}(w^T x + b) \quad (10-3)$$

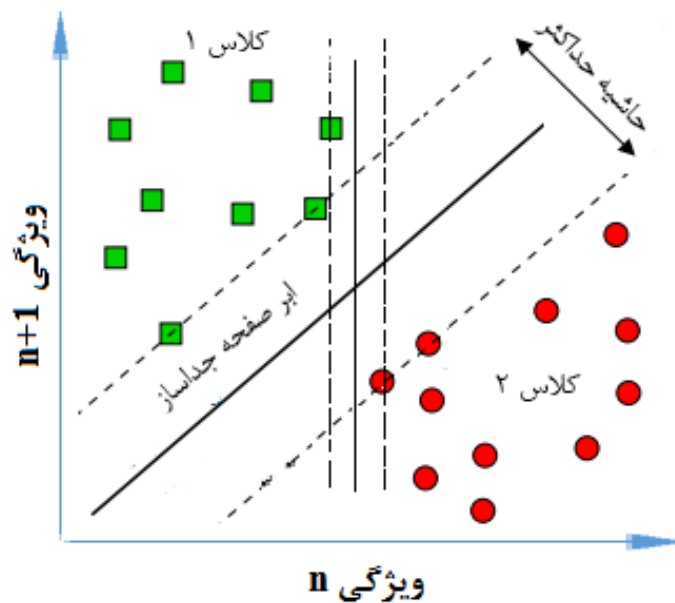
$$\begin{cases} (w^T x_i + b) > 0 & \text{if } y_i = +1 \\ (w^T x_i + b) < 0 & \text{if } y_i = -1 \end{cases} \quad (11-3)$$

ابرفصفحه‌ای که در این‌گونه مسائل برای طبقه‌بندی داده‌ها استفاده می‌شود باید دارای دو ویژگی خاص باشد: اول اینکه دارای کمترین میزان خطای ممکن باشد و دوم اینکه از داده‌های هر کلاس بیشترین فاصله ممکن را داشته باشند. در این حالت اگر رابطه (۱۱-۳) برای صفحه جداساز در نظر گرفته شود، داده‌های آموزشی در بالا و پایین این صفحه قرار خواهند گرفت، که به ترتیب برای  $y_i = +1$  و  $(w^T x_i + b > 0)$  و برای  $y_i = -1$ ،  $(w^T x_i + b < 0)$  خواهد بود. بر اساس شرایط بیان شده، هنگامی مجموعه‌ای از نقاط به صورت بهینه با یک صفحه جداسازی می‌شوند که (Law, 2006):

۱- بدون اشتباه در کلاس مربوط به خود قرار گرفته باشند.

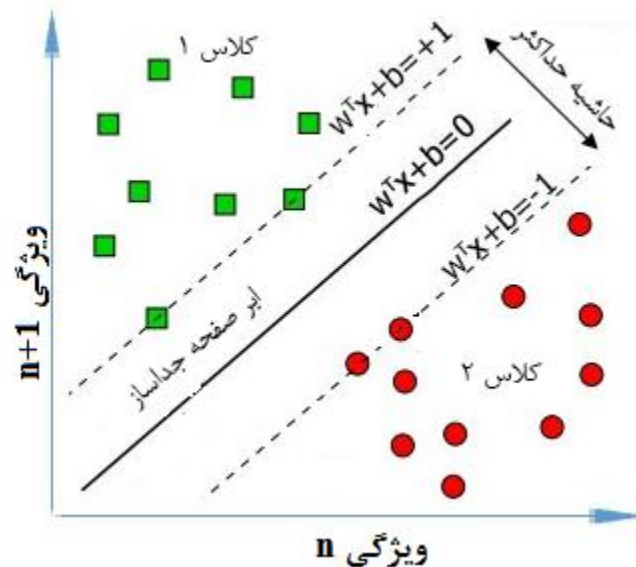
۲- فاصله بین نزدیکترین نقاط هر کلاس داده تا صفحه جداکننده بیشینه باشد.

بر این اساس پارامترهای  $w$  و  $b$  باید به گونه‌ای محاسبه شوند که دو شرط ذکر شده برقرار باشد. بنابراین در طبقه‌بندی ماشین بردار پشتیبان خطی قصد بر این است که ابرصفحه‌ای را به دست آورد که علاوه بر طبقه‌بندی صحیح داده‌های آموزشی، حاشیه بین دو کلاس را نیز بیشینه کند. شکل ۳-۶ تفاوت بین دو ابرصفحه جداساز را نشان می‌دهد.



شکل ۳-۶: ابرصفحه‌های جداساز: حاشیه ایجاد شده توسط خط ضخیم‌تر بیشتر از خط نازک‌تر است

ابرفضحه‌ای که در شکل فوق با خط ضخیم‌تر نشان داده شده است، ابرصفحه مورد نظر برای جداسازی دو کلاس است. زیرا علاوه بر جداسازی دو کلاس، حاشیه بین ابرصفحه و دو کلاس را نیز بیشینه کرده است. در صورتی که معادله ابرصفحه جداساز بهینه به صورت  $w^T x_i + b = 0$  باشد، بنابراین معادله ابرصفحه‌های حاشیه‌ای در دو سمت ابرصفحه جداساز به صورت  $w^T x_i + b = +1$  و  $w^T x_i + b = -1$  خواهد بود. شکل ۳-۷ معادلات در نظر گرفته شده برای مرزها و ابرصفحه جداساز بهینه را نشان می‌دهد.



شکل ۳-۷: ابرصفحه جداساز بهینه و مرزهای مربوط به دو کلاس

چون داده‌ها به صورت خطی جدایی پذیر هستند، پس هیچ کدام از داده‌ها روی صفحه  $w^T x + b = 0$  قرار نمی‌گیرند. بنابراین می‌توان به جای رابطه (۳-۱۱) از رابطه (۳-۱۲) استفاده کرد.

$$(w^T x_i + b) = \begin{cases} \geq +1 & \text{if } y_i = \text{class1} \\ \leq -1 & \text{if } y_i = \text{class2} \end{cases} \quad (3-12)$$

و می‌توان آن را به فرم ساده شده رابطه (۳-۱۳) بازنویسی نمود.

$$y_i (w^T x_i + b) \geq 1, \quad i = 1, 2, \dots, N \quad (3-13)$$

برای یافتن بهترین صفحه جداساز، باید صفحه بیشترین فاصله را از کلاس‌ها داشته باشد و این فاصله حداکثر شود. حال فاصله بین این دو حاشیه به صورت رابطه (۳-۱۴) به دست می‌آید.

$$\frac{|(w^T x + b - 1) - (w^T x + b + 1)|}{\|w\|} = \frac{2}{\|w\|} \quad (3-14)$$

بر اساس رابطه (۳-۱۴) اگر مقدار  $\frac{2}{\|w\|}$  حداکثر شود، مقدار حاشیه مورد نظر در بیشترین مقدار خود

قرار دارد. برای سادگی کار به جای حداکثر کردن  $\frac{2}{\|w\|}$  می‌توان مقدار  $\|w\|^2$  مخرج را حداقل کرد. یا

به عبارتی می‌توان جمله را به صورت  $\frac{1}{2} w^T w$  نوشت. بنابراین برای شرایط بیان شده، مسأله ماشین

بردار پشتیبان به فرم معادله (۳-۱۵) تبدیل می‌شود که به آن یک مسأله درجه دو گفته می‌شود.

$$\begin{aligned} \text{minimize } g(w) &= \frac{1}{2} w^T w & (15-3) \\ \text{subject to } y_i (w^T x_i + b) &\geq 1, \quad i=1,2,\dots,N \end{aligned}$$

چون رابطه (۱۵-۳) یک مسأله درجه دو با شرط نامساوی است، بنابراین مقدار تابع هدف یکتا خواهد بود. در مسأله درجه دو فوق برای حداقل کردن و به دست آوردن مقادیر بهینه  $w$  و  $b$  با توجه به قید نامساوی موجود بایستی از ضریب لاگرانژ<sup>۱</sup> استفاده کرد. ضرایب لاگرانژ که گاهی ضرایب نامعین نیز خوانده می‌شود، برای شناسایی نقاط خاص تابعی که دارای چندین متغیر و محدودیت است مورد استفاده قرار می‌گیرد. در واقع اگر هدف، حداقل سازی تابع  $f(x)$  با توجه به محدودیت  $g(x) \geq 0$  باشد، باید تابع لاگرانژ که به صورت رابطه (۱۶-۳) تعریف می‌شود حداقل شود.

$$L(x, \alpha) = f(x) + \alpha g(x) \quad (16-3)$$

با در نظر گرفتن تابع لاگرانژ فرم با قید نامساوی درجه دو (۱۵-۳) به فرم بدون قید رابطه (۱۷-۳) تبدیل می‌شود که به آن تابع لاگرانژ اولیه گفته می‌شود.

$$L_p(w, b, a) = \frac{1}{2} w^T w - \sum_{i=1}^N a_i [y_i (w^T x_i + b) - 1] \quad (17-3)$$

برای حداقل کردن معادله (۱۷-۳) باید نقاط ایستادن تابع لاگرانژ را به دست آورد. برای رسیدن به این هدف شرایط کاروش-کوهن-تاکر<sup>۲</sup> اعمال می‌شود که به صورت رابطه (۱۸-۳) است.

$$\begin{aligned} \frac{\partial L}{\partial w} = 0 &\Rightarrow w_0 = \sum_{i=1}^N a_i x_i y_i \\ \frac{\partial L}{\partial b} = 0 &\Rightarrow \sum_{i=1}^N a_i y_i \end{aligned} \quad (18-3)$$

حال اگر مقدار  $w$  به دست آمده از مشخصات جزئی رابطه (۱۸-۳) در رابطه (۱۷-۳) قرار داده شود، معادله اساسی ماشین‌های بردار به صورت رابطه (۱۹-۳) معرفی می‌شود که فرم دوگان<sup>۳</sup> معادله لاگرانژ (۱۷-۳) است.

<sup>1</sup> - Lagrange Multiplier

<sup>2</sup> - Karush-Kuhn-Tucker (KKT)

<sup>3</sup> - Dual



$$\begin{aligned} \text{Max } L_d(a) &= \sum_{i=1}^N a_i - \frac{1}{2} \sum_{i,j=1}^N y_i y_j a_i a_j x_i^T x_j \\ \text{s.t. } \begin{cases} a_i \geq 0 \\ \sum_{i=1}^N a_i y_i = 0 \end{cases} \end{aligned} \quad (19-3)$$

با حل معادله بالا مقادیر ضرایب لاگرانژ برای هر یک از بردارهای آموزشی به دست خواهد آمد، که با توجه به محدودیت ذکر شده در رابطه (۳-۱۷) مقدار بزرگتر یا مساوی صفر خواهد بود. از میان بردارهای آموزشی کلاس ۱ و ۲ آن بردارهایی که مقدار  $a$  متناظر با آنها بزرگتر از صفر است، بردارهای پشتیبان نامیده می‌شوند. در محاسبات برای به دست آوردن ابرصفحه بهینه فقط از این بردارها استفاده می‌شود، بنابراین حجم محاسبات تا حد زیادی کاهش می‌یابد. بردارهای پشتیبان دقیقاً بر روی دو ابرصفحه  $w^T x + b = \pm 1$  قرار می‌گیرند.

از رابطه (۳-۱۵) مقدار مطلوب  $w_0$  به دست می‌آید و مقدار بهینه  $b$  نیز از طریق رابطه  $b = y_i - w^T x_i$  و میانگین‌گیری از تمامی مقادیر به دست آمده محاسبه می‌شود. معادله کلی محاسبه مقدار بهینه  $b$  را می‌توان به صورت رابطه (۳-۲۰) بیان کرد.

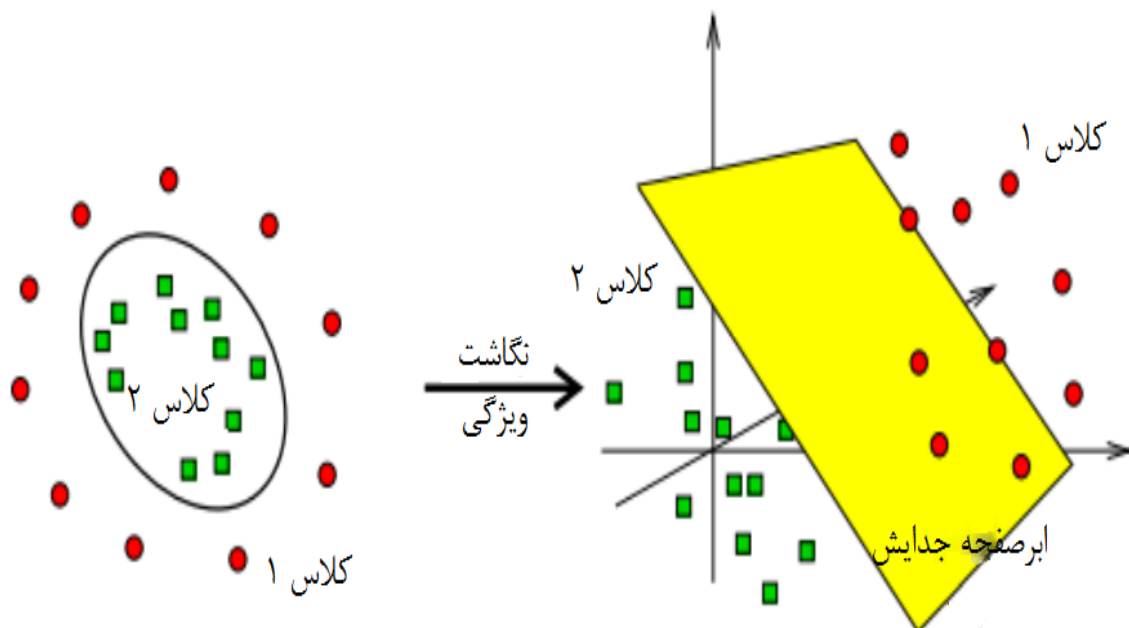
$$b_0 = \frac{1}{sv} \sum_{i=1}^{sv} (y_i - w^T x_i) \quad (20-3)$$

در این رابطه  $sv$  مشخص کننده تعداد بردارهای پشتیبان است. با به دست آوردن مقادیر  $w_0$  و  $b_0$  می‌توان معادله ابرصفحه جداساز بهینه را پیدا کرد. با داشتن این مقادیر و با توجه به رابطه تابع تصمیم ماشین بردار پشتیبان یعنی رابطه (۳-۱۱) برای طبقه‌بندی یک داده ناشناخته مثل  $x$ ، اگر مقدار تابع تصمیم بزرگتر از صفر باشد، داده در کلاس ۱+ طبقه‌بندی و اگر مقدار تابع تصمیم کوچک‌تر از صفر باشد، داده در کلاس ۱- طبقه‌بندی می‌شود (Law, 2006).

### ۳-۵-۵ ماشین بردار پشتیبان غیرخطی

ماشین‌های بردار پشتیبان ذکر شده در بخش‌های قبلی برای دسته‌بندی الگوهای یک مسأله دو کلاسه، از مرزهای جداکننده خطی و یک ابر صفحه استفاده می‌کنند. با این وجود می‌توان مسائلی که

به صورت خطی جدایی پذیر نیستند را با نگاشت نقاط نمونه، به فضایی با بُعد بیشتر با استفاده از یک نگاشت غیر خطی حل کرد. SVM در ابتدای کار تنها برای سیستم‌های خطی به کار گرفته می‌شد و صفحه جداساز بهینه تنها برای حالت خطی وجود داشت. این در حالی بود که در بسیاری از مسائل طبقه‌بندی و رگرسیون راه حل خطی جواب مناسبی را ارائه نمی‌کرد. مطالعات گسترده انجام شده در این زمینه تئوری مرسر<sup>۱</sup> را برای حل این مشکل ارائه داد تا SVM بتواند مسائلی را که به صورت خطی جداپذیر نیستند را نیز پشتیبانی نماید. ایده اصلی این تئوری انتقال برداری مانند  $x$  از فضای محدود (فضای ورودی) به فضای بالاتر (فضای ویژگی یا فضای هیلبرت) با استفاده از تبدیل هیلبرت<sup>۲</sup> و طبقه‌بندی آن در فضای بالا بود. در این شرایط برداری مانند  $x$  در فضای بالاتر به صورت  $\varphi(x)$  نوشته می‌شود. شکل ۳-۸ نحوه انتقال از فضای ورودی به فضای ویژگی را نشان می‌دهد (Huang et al., 2006).



شکل ۳-۸: انتقال فضای ورودی (سمت چپ) به فضای ویژگی (سمت راست) با تبدیل هیلبرت (Huang et al., 2006)

با استفاده از این قضیه با تبدیل  $x$  به  $\varphi(x)$  در معادلات (۳-۱۸) و (۳-۲۰) روابط بردار وزن و بایاس

<sup>۱</sup> - Mercer

<sup>۲</sup> - Hilbert Transform

ماشین بردار پشتیبان غیرخطی نیز به صورت رابطه (۳-۲۱) خواهد بود.

$$d(x) = \text{sign}(w^T \phi(x_i + b)) \quad (۳-۲۱)$$

$$b_0 = \frac{1}{sv} \sum_{i=1}^{sv} (y_i - w^T \phi(x_i)) \quad (۳-۲۱)$$

و در نهایت با به کارگیری روابط بالا، تابع تصمیم ماشین بردار پشتیبان غیر خطی نیز به صورت رابطه (۳-۲۲) خواهد بود.

$$d(x) = \text{sign}(w^T \phi(x_i) + b) \quad (۳-۲۲)$$

به طور کلی SVM بردارهای ورودی را با استفاده از یک کرنل به فضایی بزرگتر می‌برد که تفکیک پذیری خطی در آن بهتر انجام می‌شود. با استفاده از کرنل‌های مختلف، می‌توان روش‌های فراگیری مختلفی با انواع سطوح تصمیم‌گیری دلخواه ایجاد کرد. به این ترتیب است که SVM به عنوان یک کلاس جدید از دسته‌بندی کننده‌ها و ماشین‌های تشخیص الگو در می‌آید (Huang et al., 2006).

### ۳-۵-۶ توابع کرنل<sup>۱</sup>

در الگوریتم ماشین‌های بردار پشتیبان برای نگاشت داده‌ها از فضای ورودی به فضای ویژگی از توابع کرنل استفاده می‌شود. اگر از توابع کرنل استفاده شود، نه تنها نیازی به استفاده از ضرب داخلی در فضای ویژگی نیست، بلکه با این کار خطای حاصل از افزایش ابعاد کنترل می‌شود.

طبق تئوری هیلبرت که بر مبنای کرنل‌های تکرار شونده ارائه شده است، ضرب داخلی در فضای ورودی معادل تابع کرنل در فضای ویژگی است و طبق رابطه ۳-۲۳ نمایش داده می‌شود.

$$K(x, x^*) = (\Phi(x), \Phi(x^*)) \quad (۳-۲۳)$$

در این حالت اگر  $K$  یک تابع معین، مثبت و متقارن باشد که در شرایط مرسر صدق کند، معادلات (۳-۲۴) و (۳-۲۵) به صورت زیر حاصل می‌شوند:

$$K(x, x^*) = \sum_m^{\infty} a_m \Phi_m(x) \Phi_m(x^*) \quad , \quad a_m \geq 0 \quad (۳-۲۴)$$

<sup>۱</sup> - Kernel Functions

$$\iint K(x, x^*)g(x)g(x^*)dx dx^* > 0, \quad g \in L_2 \quad (25-3)$$

پس در واقع تابع کرنل در فضای ویژگی همان نتیجه ضرب داخلی در فضای ورودی را ارائه می‌دهد (Gunn, 1998). در جدول ۲-۳ برخی از توابع کرنل معروف که دارای شرایط مرسر هستند، ارائه شده است. این توابع برای هر  $x$  و  $x^*$  معتبر می‌باشند.

جدول ۲-۳: برخی از توابع معروف کرنل (Deka, 2014)

فرمول	تابع کرنل
$K(u, v) = \tanh(\alpha u \cdot v + b)$	Sigmoid
$K(u, v) = (1 + u \cdot v)^d$	Polynomial
$K(u, v) = \exp(-\gamma \ u - v\ ^2)$	RBF

### ۳-۵-۷ ماشین بردار پشتیبان چند کلاسه

SVM یک دسته‌بندی کننده دوتایی است و نمی‌توان از آن برای تفکیک چند دسته، به طور مستقیم استفاده کرد. بنابراین برای دسته‌بندی چندین دسته، نیاز است که مسأله به تعداد زیادی دسته‌بندی کننده دوتایی تبدیل شود. به طور کلی دو راه برای حل مسأله  $q$  دسته‌ای برای SVM عمومیت دارد (Hsu & Lin, 2002):

۱- روش یکی در برابر همه<sup>۱</sup>: در این روش تعداد  $q$  دسته‌بندی کننده SVM ساخته می‌شوند، که هر یک از آن‌ها یک دسته را از سایر دسته‌ها جدا می‌کنند. برای آزمون یک داده ورودی، تمامی توابع ( $q$  تابع) تصمیم‌گیر محاسبه می‌شوند و در نهایت با مقایسه نتایج آن دسته‌ای انتخاب می‌شود که مقدار تابع برای آن از بقیه دسته‌ها بیشتر بوده است.

۲- روش یک در برابر یک<sup>۲</sup>: در این روش تمام حالت‌های ممکن برای انتخاب شدن دو دسته برای مقایسه با یکدیگر در نظر گرفته می‌شوند و به ازای هر حالت، ابرصفحه‌ی جداساز ساخته

<sup>1</sup> - One - Against - All

<sup>2</sup> - One- Against -One

می‌شود. در این روش هر SVM تنها بین دو دسته مشخص تصمیم‌گیری می‌کند. طبق این

روش برای تعداد  $q$  دسته به آموزش تعداد  $(\frac{q(q-1)}{2})$  دسته‌بندی کننده SVM نیاز است.

### ۳-۵-۸ کاربرد ماشین بردار پشتیبان در مهندسی معدن

روش SVM پس از معرفی توسط وپنیک در دهه‌ی ۹۰ میلادی در علوم مختلف مورد استفاده قرار گرفت. با توجه به اینکه این روش نسبتاً جدید بوده در حوزه‌ی مهندسی معدن مطالعات مختلفی با استفاده از آن برای پیش‌بینی و طبقه‌بندی انجام شده است. با توجه به کاربرد موفق این روش در این حوزه انتظار می‌رود که در آینده نیز با توجه به نتایج مناسب حاصله از این روش، تحقیقات بیشتری با استفاده از آن انجام شود. در جدول ۳-۳ برخی از کاربردهای این روش در مهندسی معدن از سال ۲۰۰۰ تا کنون طبق مقالات منتشر شده، اشاره شده است.

جدول ۳-۳: برخی از مطالعات انجام شده توسط محققان مختلف با استفاده از روش SVM در حوزه مهندسی معدن

ردیف	محقق (سال انتشار)	توضیحات
۱	Zhao et al. (2003)	استفاده از روش SVM برای پیش‌بینی پایداری شیب
۲	Liu et al. (2004)	ارائه الگوریتم رگرسیون SVM برای طراحی پارامترهای نگهداری مهاری شاتکریت <sup>۱</sup> تونل
۳	Wang et al. (2007)	ارائه روشی جدید برای آشکارسازی، توصیف و طبقه‌بندی شکستگی سنگ بر اساس تکنیک پردازش تصویر و SVM (کاربرد به عنوان تفکیک‌کننده)
۴	Zhi-xiang et al. (2009)	تهیه مدلی بر اساس روش SVM جهت محاسبه ضریب نشست ناشی از معدن‌کاری
۵	Qiu et al. (2010)	استفاده از مدل GA-SVM برای طبقه‌بندی مهندسی سنگ‌های دربرگیرنده بر اساس بررسی مدل قابلیت اطمینان (کاربرد به عنوان طبقه‌بندی کننده)
۶	Zhu et al. (2010)	پیش‌بینی میزان جابه‌جایی جاده‌ها در اثر معدن‌کاری با استفاده از روش SVM
۷	Longjun et al. (2011)	کاربرد SVM برای پیش‌بینی پارامترهای مشخصه لرزش ناشی از انفجار و مقایسه نتیجه آن با الگوریتم جنگل تصادفی <sup>۲</sup> (RF)
۸	Zhou & Li (2011)	ارائه مدل پیشنهادی برای پیش‌بینی ضخامت زون سنگی شکسته با استفاده از SVM و مدل رگرسیون خطی چندگانه
۹	Jian et al. (2011)	پیش‌بینی مقاومت پایه در معادن زیرزمینی با استفاده از روش SVM

<sup>۱</sup>- Shotcrete-Bolting Support

<sup>۲</sup>- Forest Random

ادامه جدول ۳-۳: برخی از مطالعات انجام شده توسط محققان مختلف با استفاده از روش SVM در حوزه مهندسی معدن

ردیف	محقق (سال انتشار)	توضیحات
۱۰	Khandelwal & Kankar (2011)	پیش‌بینی مقدار بیش فشاری هوا <sup>۱</sup> ناشی از انفجار با استفاده از روش SVM
۱۱	Lv et al. (2011)	پیش‌بینی جانمایی شیب در انتقال روش معدن‌کاری از روش روباز به زیرزمینی
۱۳	Mohamadnejad et al. (2012)	مقایسه نتایج روش‌های تجربی و روش‌های هوش مصنوعی SVM و GRNN برای پیش‌بینی لرزش ناشی از انفجار
۱۴	Amini et al. (2012)	پیش‌بینی پرتاب سنگ ناشی از انفجار در معدن مس سونگون با استفاده از روش SVM
۱۵	Shi et al. (2012)	پیش‌بینی میانگین اندازه ذرات سنگ خرد شده ناشی از انفجار پله در معدن با استفاده از SVM
۱۶	Cheng & Yang (2012)	ارائه مدلی بر اساس SVM برای طبقه‌بندی میزان خطر برای سیستم تهویه معدن (کاربرد به عنوان تفکیک‌کننده)
۱۷	قاسمی و همکاران (2012) (۱۳۹۱)	جداسازی ماده معدنی از باطله بر اساس داده‌های ژئوفیزیکی با استفاده از تکنیک SVM (کاربرد به عنوان تفکیک‌کننده)
۱۸	مودتی و همکاران (2012) (۱۳۹۱)	شناسایی زون‌های دگرسان هیدروترمال با استفاده از الگوریتم ماشین بردار پشتیبان (کاربرد به عنوان تفکیک‌کننده)
۱۹	Mohammadnejad et al. (2013)	پیش‌بینی میزان عقب‌زدگی در اثر عملیات انفجار با استفاده از SVR
۲۰	پیرهادی و همکاران (2014) (۱۳۹۳)	ارائه مدل غیرخطی برای پیش‌بینی عملکرد رودهدر با استفاده از روش SVM
۲۱	Zhou & Zhung (2014)	استفاده از مدل SVM برای پیش‌بینی سطح ایمنی معادن گازدار
۲۲	Hasanipanah et al. (2015)	امکان‌سنجی اندازه‌گیری غیر مستقیم لرزش زمین ناشی از انفجار در سد بختیاری با استفاده از روش SVM و مقایسه نتایج حاصله با نتایج روش‌های تجربی
۲۳	Yongkui et al. (2015)	پیش‌بینی افزایش ارتفاع جریان آب در زون خردشده با استفاده از تکنیک SVM
۲۴	Gao & Li (2015)	استفاده از روش SVM برای پیش‌بینی نرخ پیشروی TBM در شرایط سنگ سخت
۲۵	Dindarloo (2016)	کاربرد SVM برای تحلیل قابلیت اطمینان و زمان خرابی ماشین LHD

<sup>۱</sup>- Air Overpressure

### ۳-۶ منطق فازی

سیستم‌های هوشمند که برای تقلید رفتار انسان‌ها به کار می‌روند باید بتوانند عدم دقت و عدم قطعیت موجود در فرآیند استدلال انسان را نیز تقلید و مدیریت کنند. منطق فازی می‌تواند راه و روش استدلال، پیش‌بینی و شکل‌گیری ایده بشر را تقلید کند. بنابراین این روش در توصیف اشیاء با مرزهای مبهم به وسیله‌ی اطلاعات کیفی مهارت دارد و استدلال می‌کند که یک ناحیه «خاکستری» بین «سیاه» و «سفید» وجود دارد. منطق فازی با نظریه مجموعه فازی<sup>۱</sup> توسط پروفیسور لطفی‌زاده در سال ۱۹۶۵ پیشنهاد شد (Zadeh, 1965). این نظریه به طور خاص ایجاد شد تا به صورت ریاضی نشان دهنده‌ی عدم اطمینان و ابهام و فراهم کننده ابزاری برای مواجهه با عدم دقت ذاتی بسیاری از مسائل باشد. این منطق برای مقابله با فرایندهای کیفی، مبهم و نامطمئن سیستم منطق فازی می‌تواند به خوبی یک فرایند تفکر همانند بشر را ارائه کند. یکی از دلایل موفقیت منطق فازی این است که متغیرهای زبانی<sup>۲</sup>، مقادیر و قوانین فازی مهندسان را برای برگرداندن دانش بشری برای نمایش به صورت یکپارچه و قابل ارزیابی درون رایانه توانمند می‌سازند (Petry & Zhao, 2009).

### ۳-۶-۱ نظریه مجموعه فازی

در بسیاری از شرایط اطلاعات دقیق، برای مدل‌سازی در شرایط زندگی واقعی کافی نمی‌باشد، زیرا قضاوت‌ها و اولویت‌های بشری اغلب ذهنی، نامشخص و مبهم است و نمی‌تواند با مقادیر عددی دقیق برآورد شود. از این‌رو نظریه مجموعه‌های فازی توسط زاده برای رفع مشکل ابهام<sup>۳</sup> و گنگ بودن<sup>۴</sup> ادراک و استدلال بشری به عنوان راهی برای پردازش داده‌ها از طریق توانمندی‌های ریاضی برای حل چنین عدم قطعیت‌هایی معرفی شد، و ابزاری مؤثر را برای نشان دادن مفاهیم مبهم با فراهم کردن عضویت جزئی، ایجاد می‌کند. این نظریه جهان را به دسته‌های قطعی تقسیم نمی‌کند و به جای آن درجه عضویتی را برای یک عنصر متعلق به یک یا چند گروه اختصاص دهد، به نحوی که ممکن است

<sup>۱</sup> - Fuzzy Set Theory

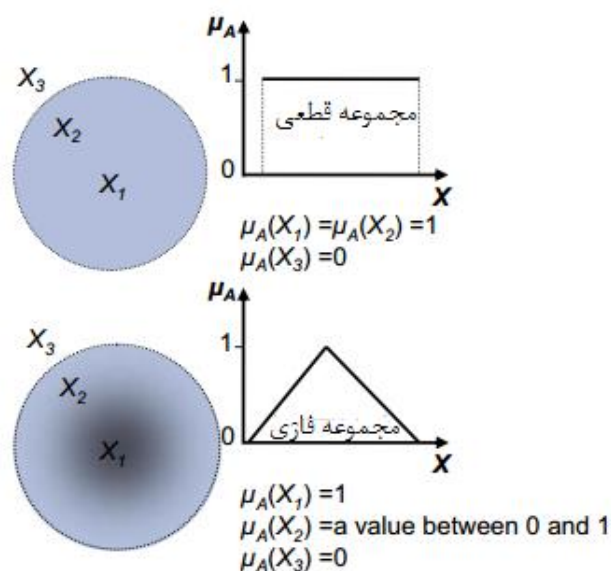
<sup>۲</sup> - Linguistic Variables

<sup>۳</sup> - Vagueness

<sup>۴</sup> - Ambiguity

ویژگی‌های بیشتر از یک گروه را به اشتراک بگذارد (Shen et al., 2013).

یک مجموعه فازی تعمیمی از یک مجموعه قطعی (کلاسیک) است که بر خلاف آن دارای مرزهای دقیق و شفاف نیست. مطابق شکل ۳-۹ در مجموعه‌ی قطعی، هر عضو از مجموعه مرجع یا تعلق کامل به یک مجموعه دارد و یا اصلاً تعلق ندارد. در حالی که در یک مجموعه فازی، هر عضو با یک درجه تعلق (عضویت)<sup>۱</sup> عضو یک مجموعه است. به عبارتی در مجموعه‌های قطعی بُرد تابع عضویت می‌تواند دو مقدار صفر و یک باشد در حالی که مجموعه‌های فازی این امکان را فراهم می‌آورند که بُرد تابع عضویت مقداری بین صفر تا یک داشته باشد. یعنی، بُرد تابع عضویت از  $\{0, 1\}$  در مورد مجموعه‌های قطعی به بازه بسته  $[0, 1]$  برای مجموعه‌های فازی تبدیل می‌شود (قاسمی و ونوسفادرازی، ۱۳۹۳).



شکل ۳-۹: تعریفی مصور از مجموعه‌های قطعی و فازی ( $\mu_A$  بیانگر درجه عضویت است) (قاسمی و ونوسفادرازی، ۱۳۹۳)

تابع عضویت  $\mu_A$  تخمینی (میزانی) از احتمال را برای یک عنصر  $x$  به عنوان عضوی از مجموعه  $A$  فراهم می‌کند. تابع عضویت میزان تعلق  $x$  به مجموعه فازی  $A$  را با مقادیر عددی در فاصله  $[0, 1]$  نشان می‌دهد. به طور مشخص:

$$\mu_A(x) : X \rightarrow [0, 1] \quad (۳-۲۶)$$

<sup>۱</sup> - Membership Degree



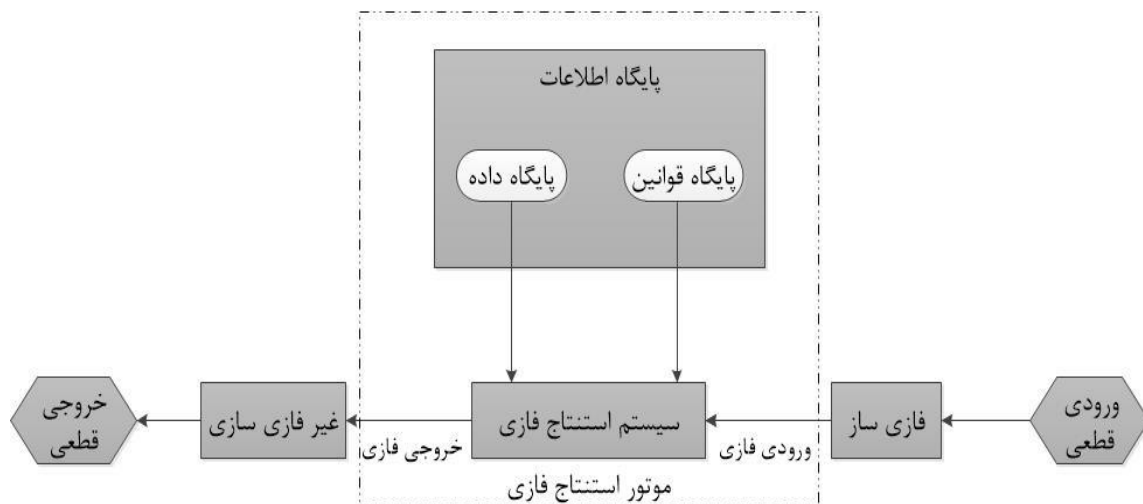
به عبارت دیگر مجموعه فازی A مجموعه‌ای از زوج مرتب‌ها است:

$$A = \{(x, \mu_A(x)); x \in X, \mu_A(x) \in [0, 1]\} \quad (3-27)$$

مقدار  $\mu_A(x)$  برابر یا نزدیک به یک، تعلق کامل عنصر به مجموعه A و مقادیر نزدیک به صفر تعلق کمتر به مجموعه A را باعث می‌شود (Karray & DeSilva, 2004).

### ۳-۶-۲ فرآیند استنتاج فازی

برای استفاده از سیستم‌های فازی رایج در سیستم‌های مهندسی، یک روش ساده اضافه کردن یک فازی‌ساز<sup>۱</sup> در ورودی است که متغیرها با مقادیر واقعی را به یک مجموعه فازی تبدیل می‌کند و یک غیر فازی‌ساز که یک مجموعه فازی را به یک متغیر با مقدار واقعی در خروجی تبدیل می‌کند. فرآیند استنتاج فازی از چهار بخش تشکیل می‌شود که شامل فازی‌سازی متغیرهای ورودی، سیستم استنتاج فازی، پایگاه قواعد فازی و در نهایت غیر فازی کردن خروجی است. هر یک از بخش‌های ذکر شده در ادامه به تفصیل مورد بحث قرار خواهد گرفت. در شکل ۳-۱۰ چهار قسمت اصلی از یک سیستم فازی نشان داده شده است. در ادامه هر یک از این بخش‌ها به طور خلاصه شرح داده می‌شوند.



شکل ۳-۱۰: ساختار سیستم خبره فازی (Azimi et al., 2010)

### ۳-۶-۲-۱ فازی‌سازی ورودی‌ها

<sup>۱</sup> - Fuzzifier

گام نخست در سیستم‌های استنتاج فازی دریافت ورودی‌های قطعی و تعیین درجه عضویت آنها به هر یک از مجموعه‌های فازی از طریق توابع عضویت است. این عمل یعنی تبدیل مقادیر قطعی متغیرهای ورودی به مقادیر فازی، فازی‌سازی نامیده می‌شود. ورودی‌ها همواره مقادیر عددی محدود شده به مجموعه مادر مربوط به متغیر ورودی می‌باشند. خروجی این مرحله یک درجه‌ی فازی است که میزان عضویت ورودی را در مجموعه فازی تعیین می‌کند و این خروجی همواره یک عدد بین صفر و یک است (Chen & Pham, 2000). تابع عضویت، تعلق (عضویت) اعضای یک مجموعه را به مجموعه فازی نشان می‌دهد و درجه عضویت بیانگر این است که یک عضو به چه میزان به مجموعه فازی تعلق دارد. درجه عضویت می‌تواند مقداری بین صفر تا یک داشته باشد که یک نشان دهنده‌ی تعلق کامل و صفر نشان دهنده‌ی عدم تعلق است. انواع مختلف توابع عضویت وجود دارد که به طور کلی می‌توان آن‌ها را می‌توان به دو دسته خطی (مثلثی<sup>۱</sup> و ذوزنقه‌ای<sup>۲</sup>) و غیر خطی (گوسی<sup>۳</sup>، زنگوله‌ای شکل<sup>۴</sup>، S شکل<sup>۵</sup> و غیره) تقسیم نمود. نوع تابع عضویت به صورت قراردادی و بسته به تجربه فرد انتخاب می‌شود. از اینرو تابع عضویتی که توسط دو کاربر برای یک مسأله مشترک انتخاب می‌شود، بسته به تجربه و دیدگاه آنها ممکن است متفاوت باشد. همچنین ممکن است تابع عضویت با توجه به ماهیت مسأله با استفاده از روش‌های یادگیری ماشین<sup>۶</sup> (مانند شبکه عصبی، الگوریتم ژنتیک و غیره) انتخاب شود (قاسمی ورنوسفادرازی، ۱۳۹۳).

### ۳-۶-۲ پایگاه اطلاعات

همان طور که در شکل ۳-۱۰ ملاحظه می‌شود، پایگاه اطلاعات از دو قسمت پایگاه داده<sup>۷</sup> و پایگاه قوانین<sup>۸</sup> تشکیل شده است. پایگاه داده، توابع عضویت مجموعه‌های فازی که در قوانین فازی به کار گرفته می‌شوند را

<sup>۱</sup> - Triangular

<sup>۲</sup> - trapezoidal

<sup>۳</sup> - Gaussian

<sup>۴</sup> - Bell-shaped

<sup>۵</sup> - S-shaped

<sup>۶</sup> - Machine Learning Methods

<sup>۷</sup> - Data Base

<sup>۸</sup> - Rule Base

مشخص می‌کند، در حالی که پایگاه قوانین شامل چندین قانون فازی است. قوانین فازی که به آنها قوانین اگر-آنگاه<sup>۱</sup> نیز اطلاق می‌شود، مکانیزمی را برای توصیف سیستم‌های پیچیده (غیر قطعی- مبهم) با برقراری ارتباط بین پارامترهای ورودی و خروجی با استفاده از متغیرهای زبانی فراهم می‌سازند. برای توسعه قوانین فازی عموماً دو روش کیفی<sup>۲</sup> و کمی<sup>۳</sup> به کار گرفته می‌شود. در روش کیفی، قوانین بر اساس قضاوت افراد خبره، تجربه و دانش مهندسان و کارشناسان مستخرج می‌شوند، در حالی که در روش کمی، قوانین بر اساس داده‌های موجود به نحوی که تمام حالات ممکن را پوشش دهند، توسعه می‌یابند. البته در بعضی مواقع ترکیب این دو روش برای تشکیل پایگاه قوانین به کار گرفته می‌شود (قاسمی ورنوسفادانی، ۱۳۹۳).

روابط ورودی- خروجی به وسیله توابع شرطی<sup>۴</sup> فازی که به عنوان قوانین «اگر-آنگاه» فازی شناخته شده‌اند، تعریف می‌شوند. یک قانون شرطی فازی به طور کلی از یک مقدمه (فرض)<sup>۵</sup> و پی‌آمد (نتیجه)<sup>۶</sup> تشکیل شده است. برای نمونه «اگر x بلند است (مقدمه) آنگاه y کوتاه است (پی‌آمد)» در این گزاره اصطلاح‌های کوتاه و بلند را می‌توان توسط توابع عضویت نمایش داد (Jang et al., 1997).

بیشتر سیستم‌های فازی مبتنی بر قانون از بیش از یک قانون تشکیل می‌شوند. منطق فازی از همهی قانون‌های نوشته شده به منظور برآورد خروجی بهره می‌گیرد. فرآیند رسیدن به پی‌آمد کلی (خروجی) از تک تک پی‌آمدها در هر قانون، ترکیب قوانین<sup>۷</sup> (اجتماع قوانین) نامیده می‌شود. در تعیین یک روش برای ترکیب، دو حالت حدی ساده با عنوان «سیستم پیوند<sup>۸</sup> قوانین» و «سیستم جدایش<sup>۹</sup> قوانین» وجود دارد که قوانین آن‌ها به ترتیب با عملگرهای «AND» و «OR» با یکدیگر مرتبط می‌شوند (Chen & Pham, 2000).

<sup>1</sup> - If-Then Rules

<sup>2</sup> - Subjective

<sup>3</sup> - Objective

<sup>4</sup> - Conditionl

<sup>5</sup> - premise (Antecedent)

<sup>6</sup> - Consequent (Conclusion)

<sup>7</sup> - Aggregation

<sup>8</sup> - Conjunctive

<sup>9</sup> - Disjunctive

### ۳-۲-۶-۳ سیستم استنتاج فازی

ساختار پایه‌ی سیستم‌های استنتاج فازی از سه بخش مفهومی تشکیل می‌شود. بخش اول، قواعد هستند که شامل گزینشی از قواعد فازی است. بخش دوم، پایگاه داده است که توابع عضویت مورد استفاده در قواعد فازی در قالب آن تعریف می‌شوند. در نهایت بخش سوم ساز و کار استنتاج است که روال استنتاج توسط آن و به کمک قواعد موجود برای رسیدن به یک خروجی قابل قبول انجام می‌شود.

در این گام واحد استنتاج فازی، قوانین اگر- آنگاه فازی را به منظور اختصاص دادن یک نگاشت از ورودی‌های فازی به خروجی‌های فازی بر اساس قوانین ترکیب فازی به کار می‌برد. این گام بخش اصلی سیستم استنتاج فازی محسوب می‌شود که در آن مجموع حقایق<sup>۱</sup> از فرآیندهای فازی‌سازی ایجاد شده در بخش قبلی توسط پایگاه قوانین و انجام فرآیند مدل‌سازی، حاصل شده است (Jamshidi et al., 2013).

در ادامه دو نوع سیستم‌های استنتاج فازی ممدانی و سوگنو که دارای کاربردهای گسترده‌ای در علوم و مهندسی هستند، معرفی می‌شوند.

### ۳-۲-۶-۳-۱ مدل فازی ممدانی<sup>۲</sup>

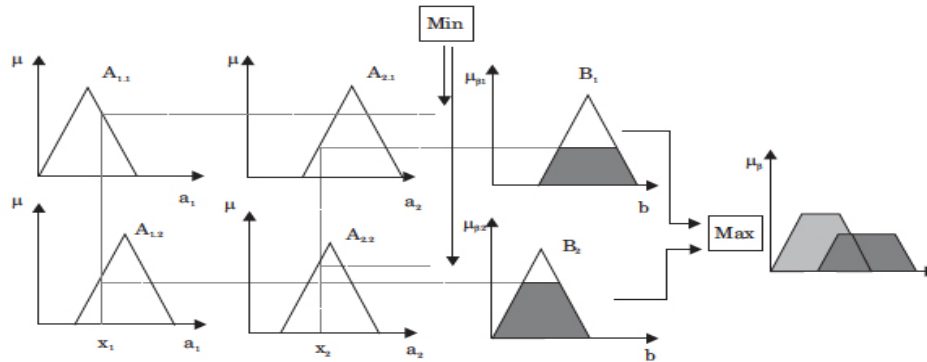
روش استنتاج فازی ممدانی رایج‌ترین روش فازی است. روش ممدانی از جمله‌ی اولین تئوری‌های فازی مربوط به سیستم‌های کنترلی است. این روش در سال ۱۹۷۵ توسط پروفسور ابراهیم ممدانی استاد دانشگاه کوئین مری<sup>۳</sup> لندن در راستای کنترل یک ماشین بخار به کمک مجموعه‌ای از قواعد فازی مطرح شد. قواعد فازی مورد استفاده در این سیستم با توجه به تجارب انسانی فراهم آورده شده‌اند. این ابداع ممدانی بر مبنای مقاله‌ای از پروفسور لطفی زاده در سال ۱۹۷۳ در ارتباط با الگوریتم‌های فازی در سیستم‌های پیچیده و فرآیندهای تصمیم‌گیری مطرح شد. قواعد فازی مورد استفاده در این سیستم با توجه به تجارب انسانی فراهم آورده شده‌اند. در استنتاج ممدانی توابع عضویت خروجی مجموعه‌ی فازی باید غیر فازی شود. این امر در بسیاری از موارد بهتر از استفاده از یک تابع عضویت خروجی که تحت عنوان تابع عضویت خروجی یگانه شناخته می‌شود، است. این

<sup>1</sup> - Facts

<sup>2</sup> - Mamdani Fuzzy Models

<sup>3</sup> - Queen Mary

روش چون محاسبات مورد نیاز را کاهش می‌دهد، باعث افزایش کارایی فرآیند غیر فازی‌سازی می‌شود. در روش ممدانی مرکز جرم تابع دو بُعدی محاسبه می‌شود. شکل ۳-۱۱ نحوه اشتقاق خروجی  $z$  را در یک سیستم استنتاج فازی ممدانی با دو قاعده نشان می‌دهد (Ross, 2009).



شکل ۳-۱۱ سیستم استنتاج فازی ممدانی (Ross, 2009)

یک قاعده در مدل فازی ممدانی دارای شکل کلی زیر است:

If  $x$  is  $A$  and  $y$  is  $B$  then  $z = C$  (۳-۲۸)

در سیستم اولیه ممدانی از دو سیستم استنتاج فازی برای کنترل گرمای ورودی به دیگ بخار و دریچه سیلندر بخار و در نهایت تنظیم فشار بخار در دیگ بخار و سرعت موتور استفاده شده است. از آنجا که این دستگاه تنها قادر به دریافت مقادیر عددی است، خروجی فازی در نهایت طی روال غیر فازی‌سازی به مقادیر عددی تبدیل شده است (Jang et al., 1997).

### ۳-۶-۲-۳-۲ مدل فازی سوگنو

این روش که در سال ۱۹۸۵ مطرح شد، از بسیاری از جهات مشابه با روش ممدانی است. در این روش دو بخش اول استنتاج یعنی فازی‌سازی و اعمال عملگرهای فازی کاملاً مشابه با روش ممدانی است. تفاوت اصلی در این است که خروجی توابع عضویت سوگنو خطی یا ثابت است. این مدل که توسط تاکاگی<sup>۱</sup>، سوگنو<sup>۲</sup> و کانگ<sup>۳</sup> پیشنهاد شد، تلاشی برای توسعه‌ی یک سیستم قاعده‌مند در راستای ایجاد قواعد فازی با توجه به

<sup>۱</sup> - Takagi

<sup>۲</sup> - Sugeno

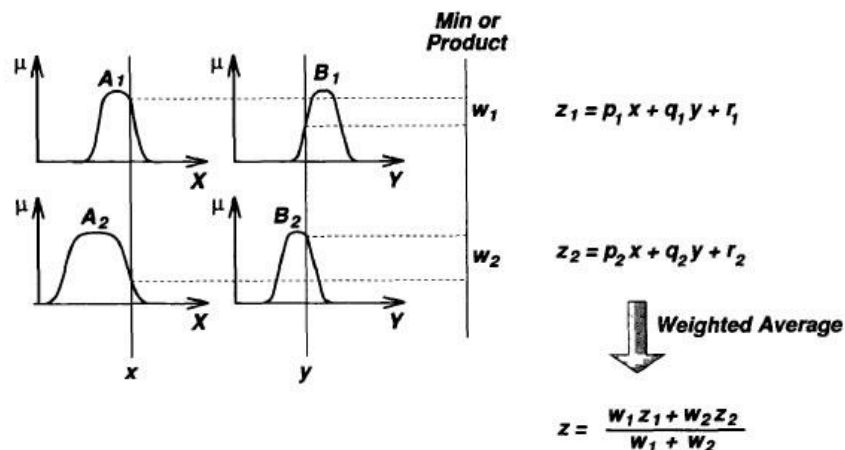
<sup>۳</sup> - Kang

مجموعه‌های ورودی - خروجی است. یک قاعده در مدل فازی سوگنو دارای فرم کلی (۳-۲۹) است:

$$\text{If } x \text{ is } A \text{ and } y \text{ is } B \text{ then } Z = f(x,y) \quad (۳-۲۹)$$

که  $A$  و  $B$  مجموعه‌های فازی و  $Z = f(x,y)$  یک تابع در قسمت نتیجه‌ی قاعده است. معمولاً  $f(x,y)$  یک چند جمله‌ای با متغیرهای  $x$  و  $y$  است. البته هر تابعی که قابلیت توصیف خروجی مدل از طریق ناحیه فازی مربوط به قسمت فرض قواعد را داشته باشد را می‌توان به عنوان این تابع انتخاب کرد. اگر  $f(x,y)$  یک چند جمله‌ای درجه یک باشد، از سیستم استنتاج فازی حاصل با عنوان مدل فازی سوگنو درجه‌ی اول ذکر می‌شود. همچنین اگر  $f(x,y)$  برابر یک مقدار ثابت باشد، از سیستم با عنوان مدل فازی سوگنو درجه‌ی صفر یاد می‌شود (Ross, 2009).

شکل ۳-۱۲ روال استدلال فازی را در مدل سوگنو نشان می‌دهد. از آنجا که هر قاعده دارای خروجی عددی است، خروجی نهایی با محاسبه‌ی میانگین وزن‌دار شده محاسبه می‌شود. به این ترتیب این روش فاقد فرآیند زمان‌بر غیر فازی‌سازی در مدل ممدانی است. در عمل، گاهی عملگر میانگین وزن‌دار شده با عملگر جمع وزن‌دار شده جایگزین می‌شود ( $Z = W_1 Z_1 + W_2 Z_2$ ). به این ترتیب باز هم از حجم محاسبات، به خصوص در مرحله‌ی آموزش سیستم استنتاج فازی کاسته می‌شود. به هر حال در صورت نزدیک نبودن درجات کمال ( $\sum_i w_i$ ) به مقدار واحد، این ساده‌سازی میزان معنای زبان شناختی تابع عضویت را کاهش می‌دهد. از آنجا که تنها قسمت فازی مدل سوگنو در قسمت فرض آن است، به آسانی می‌توان تمایز میان مجموعه‌ی قواعد فازی و غیر فازی را مشخص کرد (Jang et al., 1997).



شکل ۳-۱۲: مدل استنتاج فازی سوگنو (Jang et al., 1997)

### ۳-۶-۲-۴ غیر فازی‌سازی

غیر فازی‌سازی روشی است که طی آن یک مجموعه‌ی فازی به یک مقدار عددی تبدیل می‌شود. روش‌های مختلفی برای غیر فازی کردن مجموعه‌ی A در مجموعه‌ی جهانی Z وجود دارد. پنج روش متداول غیر فازی‌سازی یعنی روش مرکز سطح<sup>۱</sup>، روش نیم‌ساز سطح<sup>۲</sup>، روش میانگین حداکثر<sup>۳</sup>، روش کوچکترین حداکثر<sup>۴</sup> و روش بزرگترین حداکثر<sup>۵</sup> در شکل ۳-۱۳ نشان داده شده‌اند. روش مرکز سطح یکی از معروف‌ترین روش‌ها برای فرآیند غیر فازی‌سازی است. مزیت این روش این است که همه توابع عضویت فعال در قسمت پی‌آمد (همه قوانین فعال) در فرآیند غیر فازی‌سازی شرکت می‌کنند. روش COA از معادله (۳-۳۰) برای فرآیند انتقال از یک مقدار فازی به واقعی استفاده می‌کند (Jang et al., 1997).

$$Z_{COA}^* = \frac{\int_Z \mu_A(z) z dz}{\int_Z \mu_A(z) dz} \quad (3-30)$$

در این رابطه  $Z_{COA}^*$  مقدار واقعی برای خروجی Z و  $\mu_A(z)$  مجموع تابع عضویت خروجی است.

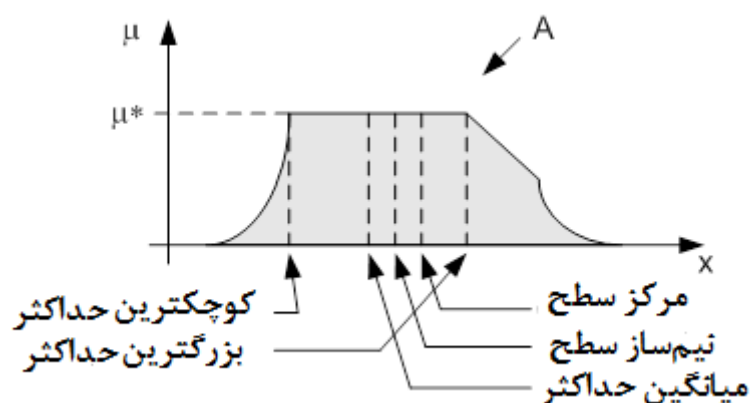
<sup>1</sup> - Centroid Of Area(COA)

<sup>2</sup> - Bisector Of Area

<sup>3</sup> - Mean Of Maximum

<sup>4</sup> - Smallest Of Maximum

<sup>5</sup> - Largest Of Maximum



شکل ۳-۱۳: روش‌های مختلف غیرفازی‌سازی (Jang et al., 1997)

### ۳-۶-۳ کاربرد روش منطق فازی در مهندسی معدن

به علت فراگیر شدن کاربرد منطق فازی در علوم مختلف، از این روش در مهندسی معدن نیز کاربردهای بسیاری داشته است. از جمله این کاربردها می‌توان به انتخاب روش معدن‌کاری، مشکلات انتخاب تجهیزات معدنی، مسائل مربوط به مکانیک سنگ، طراحی انفجار و غیره اشاره نمود. در جدول ۳-۴ برخی از این تحقیقات از سال ۱۹۸۵ تا کنون بر اساس مقالات منتشر شده ذکر شده است.

جدول ۳-۴: برخی از مطالعات انجام شده توسط محققان مختلف با استفاده از روش منطق فازی در حوزه مهندسی

معدن برگرفته از (Jang & Topal, 2014)

ردیف	محقق (سال انتشار)	توضیحات
۱	Nguyen (1985)	کاربرد نظریه مجموعه فازی برای ارزیابی سیستم طبقه‌بندی توده سنگ (RMR) برای کمک به مهندسان معدن در فرآیندهای تصمیم‌گیری ژئومکانیکی
۲	Yun & Huang (1987)	ارائه یک الگوریتم مجموعه فازی برای انتخاب روش بهینه معدن‌کاری به منظور طراحی مناسب معدن زیرزمینی
۳	Juang & Lee (1989)	توسعه سیستمی مبتنی بر منطق فازی برای طبقه‌بندی توده سنگ‌ها
۴	Denby & Schofield (1990)	کاربرد منطق فازی در درجه اول برای انتخاب روش استخراج و نیز انتخاب تجهیزات حفاری و حمل و نقل در معادن سطحی
۵	Zettler et al. (1997)	استفاده از روش منطق فازی برای کنترل فرآیند تزریق سیال در محیط‌های سنگی
۶	Grima & Babuška (1999)	استفاده از مدل فازی تاکاگی-سوگنو برای پیش‌بینی مقاومت فشاری تک محوره نمونه‌های سنگی و مقایسه عملکرد آن با مدل رگرسیون



ادامه جدول ۳-۴: برخی از مطالعات انجام شده توسط محققان مختلف با استفاده از روش منطق فازی در حوزه مهندسی معدن برگرفته از (Jang & Topal, 2014)

ردیف	محقق (سال انتشار)	توضیحات
۷	Bascetin & Kesimal (1999)	مطالعه انتخاب بهینه سیستم‌های حمل زغالسنگ از معدن به نیروگاه با استفاده از الگوریتم فازی
۸	Bitarafan & Ataei (2004)	انتخاب روش مناسب معدن‌کاری با تخصیص وزن به معیارهای مختلف با استفاده از روش‌های تصمیم‌گیری چند معیاره فازی
۹	Iphar & Goktan (2006)	استفاده از مدل فازی ممدانی برای پیش‌بینی سیستم‌های طبقه‌بندی توده‌سنگ و قابلیت حفاری به منظور انتخاب تجهیزات معادن سطحی
۱۰	Li et al. (2007)	تعیین پارامترهای مربوط به نشست ایجاد شده در سطح زمین، ناشی از استخراج معادن زیرزمینی زغالسنگ با استفاده از روش برنامه نویسی ژنتیک فازی
۱۱	Ataei et al. (2008)	استفاده از فرآیند تحلیل سلسله مراتبی AHP برای حل مشکل انتخاب روش معدن‌کاری در آنومالی شماره ۸ گل بینی جاجرم و در نهایت انتخاب روش کندن و پرکردن به عنوان روش بهینه از میان ۶ روش
۱۲	Naghadehi et al. (2009)	به کارگیری روش تحلیل سلسله مراتبی فازی <sup>۱</sup> برای انتخاب روش معدن‌کاری در معدن بوکسیت جاجرم و انتخاب روش کندن و پر کردن از میان روش‌های مورد مطالعه
۱۳	Hamidi et al. (2010)	استفاده از سیستم استنتاج فازی ممدانی با ۷ متغیر ورودی برای استفاده در سیستم‌های طبقه‌بندی مهندسی توده‌سنگ
۱۴	Azimi et al. (2010)	استفاده از نظریه مجموعه فازی برای سیستم‌های طبقه‌بندی تعیین قابلیت انفجار <sup>۲</sup> و نیز توسعه مدل فازی ممدانی بر اساس قوانین فازی برای خردایش
۱۵	Rezaei et al. (2011)	توسعه مدل فازی ممدانی برای پیش‌بینی پرتاب سنگ <sup>۳</sup> بر اساس ۴۵۰ داده جمع آوری شده از معدن سنگ آهن گل گهر
۱۶	Fişne et al. (2011)	پیش‌بینی حداکثر سرعت ذرات <sup>۴</sup> با استفاده از روش منطق فازی و مقایسه نتایج حاصل از آن با مدل رگرسیونی
۱۷	Ataei & Kamali (2012)	کاربرد سیستم استنتاج عصبی- فازی تطبیقی <sup>۵</sup> برای پیش‌بینی حداکثر سرعت ذرات
۱۸	Verma & Singh (2013)	استفاده از ANFIS برای پیش‌بینی سرعت موج طولی <sup>۶</sup> سنگ‌های مختلف

<sup>۱</sup> - Fuzzy Analytical Hierarchy Process (FAHP)

<sup>۲</sup> - Blastability Designation (BD)

<sup>۳</sup> - Flyrock

<sup>۴</sup> - Peak Particle Velocity (PPV)

<sup>۵</sup> - Adaptive Neuro-Fuzzy Inference System (ANFIS)

<sup>۶</sup> - Longitudinal Wave Velocity

ادامه جدول ۳-۴: برخی از مطالعات انجام شده توسط محققان مختلف با استفاده از روش منطق فازی در حوزه مهندسی معدن برگرفته از (Jang & Topal, 2014)

توضیحات	محقق (سال انتشار)	ردیف
توسعه مدل فازی ممدانی برای پیش‌بینی مقاومت فشاری تک محوره سنگ‌های اطراف تونل‌های دسترسی در معدن زغالسنگ جبهه کار بلند <sup>۱</sup> و مقایسه نتایج حاصله با نتایج مدل‌های آماری	Rezaei et al. (2014)	۱۹
توسعه مدل فازی برای پیش‌بینی ابعاد پایدار پایه در معادن زغالسنگ اتاق و پایه <sup>۲</sup>	Ghasemi et al. (2014)	۲۰
پیش‌بینی انرژی خالص برش <sup>۳</sup> در سنگ‌های ساختمانی با استفاده از سیستم عصبی- فازی	Yurdakul et al. (2014)	۲۱
استفاده از سیستم استنتاج فازی و تحلیل رگرسیون چند متغیره برای پیش‌بینی RMR و مقایسه نتایج دو مدل با یکدیگر	Jalalifar et al. (2014)	۲۲
پیش‌بینی ریسک نشست در خط مترو شماره ۴ تهران با استفاده از سیستم استنتاج فازی و شبکه عصبی مصنوعی	Rafie & Namin (2015)	۲۳
توسعه مدل‌های فازی و تحلیل رگرسیونی برای تخمین اضافه شکست <sup>۴</sup> ناشی از عملیات انفجار در تونل البرز	Mohammadi et al. (2015)	۲۴
ارائه مدل منطق فازی و مدل‌های رگرسیون چندگانه برای پیش‌بینی ترقیق خارج از رگه <sup>۵</sup> در معدن کاری جبهه کار بلند با استفاده از اطلاعات معادن زغال طبس و کرمان	Bahri et al. (2015)	۲۵
ارائه مدلی جدید مبتنی بر سیستم عصبی- فازی برای مدل‌سازی نشست در سدهای با هسته مرکزی سنگ ریزه‌ای <sup>۶</sup>	Behnia et al. (2016)	۲۶

### ۳-۷ جمع‌بندی

در این فصل با توجه به کاربرد روش‌های رگرسیون منطقی، SVM و منطق فازی برای توسعه مدل‌های پیش‌بینی شرایط پایداری کارگاه‌های باز زیرزمینی، اصول کلی این روش‌ها به همراه سابقه تحقیقات این موارد در بخش مهندسی معدن ذکر شد. در فصل بعد برای معرفی ساختار پایگاه داده مربوطه توضیحاتی ارائه می‌شود.

<sup>1</sup> - Longwall

<sup>2</sup> - Room And Pillar

<sup>3</sup> - Specific Cutting Energy

<sup>4</sup> - Overbreak

<sup>5</sup> - Out-Of-Seam

<sup>6</sup> - Central Core Rockfill Dams

# فصل چہارم

جمع آوری اطلاعات و ایجاد پایگاہ دادہ

## ۴-۱ مقدمه

با توجه به داده محور بودن روش‌های تجربی، برای توسعه مدل‌های مربوطه نیاز به پایگاه داده‌ای مناسب است. از اینرو با توجه به در دست نبودن اطلاعات لازم از معادن کشور، از پایگاه داده‌ی مورد استفاده توسط پوتوین و سوریننی برای توسعه مدل‌های مربوطه استفاده شده است. در این فصل به معرفی اطلاعات کلی این پایگاه داده پرداخته می‌شود.

## ۴-۲ معرفی پایگاه داده

به منظور توسعه‌ی مدل‌های مناسب و کارآمد برای ارزیابی وضعیت پایداری در کارگاه‌های باز زیرزمینی از داده‌های مربوط به کارگاه‌های نگهداری نشده (سطوح حفاری که هیچ‌گونه کابل نگهداری نصب نشده است) استفاده شده است. پایگاه داده اخیر از ادغام دو پایگاه داده معدن آشانتی<sup>۱</sup> واقع در ناحیه زرخیز اُبوآسی<sup>۲</sup> در جنوب کشور غنا و نیز پایگاه داده کالیبراسیون<sup>۳</sup> پوتوین تشکیل شده است. شرایط پایداری شامل سه دسته به صورت زیر است:

- پایدار: به بخش‌هایی از کارگاه که در محدوده حفاری طراحی شده از قبل، واقع شده و مقدار ترقیق در آنها کمتر از ۱۰ درصد است، اطلاق می‌شود.
- تخریب شده: به بخش‌هایی از کارگاه که با توجه به مقدار شکست و ترقیق بیش از حد، فراتر از محدوده‌های حفاری طراحی شده واقع شده و میزان ترقیق به علت شکستگی بیش از ۳۰ درصد باشد؛ همچنین شکست‌هایی که باعث بسته شدن کارگاه می‌شود، گفته می‌شود.
- ناپایدار: حالتی است که به لحاظ شکست و ترقیق بین دو حالت پایدار و تخریب شده قرار می‌گیرد.

---

<sup>1</sup> - Ashanti

<sup>2</sup> - Obuasi

<sup>3</sup> - Calibration

#### ۴-۲-۱ پایگاه داده آشنائی

معدن آشنائی بر روی کمر بند طلا از جنوب پرستی<sup>۱</sup> تا جنوب کننگو<sup>۲</sup> در امتداد شمال شرقی - جنوب غربی قرار گرفته است. همچنین رگه طلا دار این ناحیه دارای گسترش عرضی بیشتر از ۷/۶ کیلومتر و عمق سطح اکتشافی کمتر از ۱/۶ کیلومتر از سطح زمین است و یکی از ده معدن طلای بزرگ جهان به شمار می‌رود. کانسارهای این ناحیه با شیبی بین ۶۰ تا ۸۰ درجه به طور مشخص در مناطق برشی گسترده (درزه‌ها، گسل‌ها و زون‌های برشی) همراه با شیست متورق کربن‌دار و فیلیت واقع شده‌اند. دو زون برشی عمده واقع در این ناحیه، درزه شیب‌دار آب‌آسی و درزه کم شیب کُته دُر<sup>۳</sup> هستند. همچنین کانسنگ‌ها و سنگ میزبان به شدت شکسته شده و درزه‌دار هستند و درزه‌ها به طور کلی با مواد گرافیتی پر شده‌اند. گسل‌های اصلی و برشی در مجاورت کانسارها قرار دارند و پایداری سطوح کارگاه‌های مجاور خود را تحت تأثیر قرار می‌دهند (Suorineni, 1998).

کانسار در آشنائی توسط مرزهای گرافیتی به دو قسمت تقسیم می‌شود. به نحوی که دو قسمت شدن کانسار تأثیر نامطلوبی به خصوص بر پایداری قسمت سقف کارگاه‌ها دارد. تخریب در قسمت فوقانی کارگاه به تدریج و به علت وجود ناپیوستگی‌های پر شده گرافیتی با شیب کم یا زیاد در کانسار رخ می‌دهد.

روش کارگاه باز طولی، روش استخراج رایج در معدن آشنائی است. این کارگاه‌ها برای استخراج ۱۰ تا ۲۰ هزار تن کانه طراحی شده‌اند. همچنین هر یک از کارگاه‌ها برای استخراج و پرکردن در طی ۳ ماه طراحی و عملیات پرکردن کارگاه نیز با سنگ باطله یا مواد سیمانی پرکننده به صورت فوری انجام می‌شود (Suorineni, 1998).

<sup>۱</sup> - Prestea

<sup>۲</sup> - Konongo

<sup>۳</sup> - Cote D'or

#### ۴-۲-۲ پایگاه داده کالیبراسیون پوتوین

پایگاه داده توسعه یافته پوتوین، باعث افزایش اعتماد در کاربرد نمودار پایداری شده است. این پایگاه داده سبب توسعه پایگاه داده محدود ماتئوس و همکاران شده و از آن به عنوان پایگاه داده کالیبراسیون یاد می‌شود.

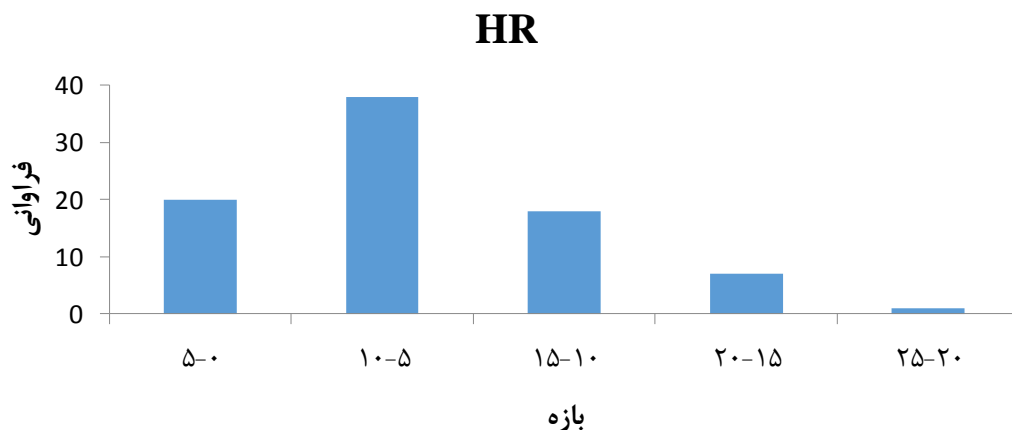
پوتوین پایگاه داده پایداری بزرگتری را با استفاده از تجارب کارگاه‌های باز کانادایی جمع‌آوری کرده و پایه‌ای را برای تعدیل عوامل اصلی معرفی شده توسط ماتئوس، فراهم کرده است. مکان‌های واقعی سایت‌های معدنی برداشت شده توسط پوتوین محرمانه<sup>۱</sup> باقی مانده است. به هر حال کل پایگاه داده شامل ۱۷۵ مورد تاریخی از عملیات معدن‌کاری نگهداری نشده و ۶۷ مورد نگهداری شده از ۳۴ معدن کارگاه باز کشور کانادا است. اطلاعات این پایگاه داده نیز حاوی خواص توده‌سنگ‌ها، شرایط تنش و شرایط فیزیکی مربوط به سایت‌ها است. به علت اینکه در برخی از موارد اطلاعات کافی قبلی در دسترس نبوده، تخمین کلیه پارامترها با اعتماد کامل ممکن نبوده و کل پایگاه داده به دو قسمت تقسیم شده است؛ یک پایگاه داده اصلی (با سطح اطمینان بالا) شامل داده‌های دقیق و یک پایگاه داده مکمل (با سطح اعتماد کمتر) حاوی داده‌های با دقت کمتر. پوتوین از پایگاه داده اصلی برای کالیبراسیون روش و از پایگاه داده مکمل برای تأیید قابلیت اطمینان روش استفاده کرده است (Potvin, 1988).

#### ۴-۳ ساختار پایگاه داده

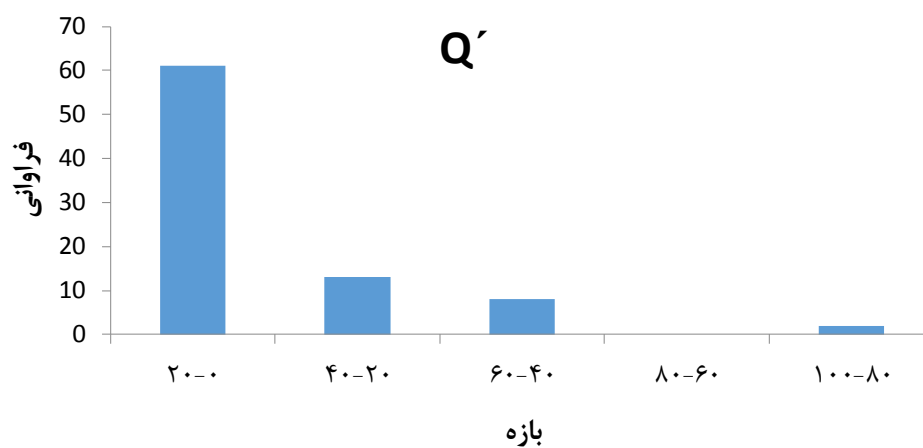
در این تحقیق پایگاه داده به علت تفاوت ویژگی‌های دیواره و سقف کارگاه از جمله تفاوت تاثیر نیروی گرانش به دو بخش تقسیم شده است. بر این اساس پایگاه داده شامل ۸۴ مورد مربوط به شرایط پایداری دیواره‌های کارگاه بدون نگهداری و ۷۸ مورد مربوط به شرایط پایداری سقف کارگاه بدون نگهداری در نظر گرفته شده است. باید ذکر شود که این پایگاه داده بخشی از پایگاه داده‌های ذکر شده است (پیوست ۱ مشاهده شود).

<sup>۱</sup> - Confidential

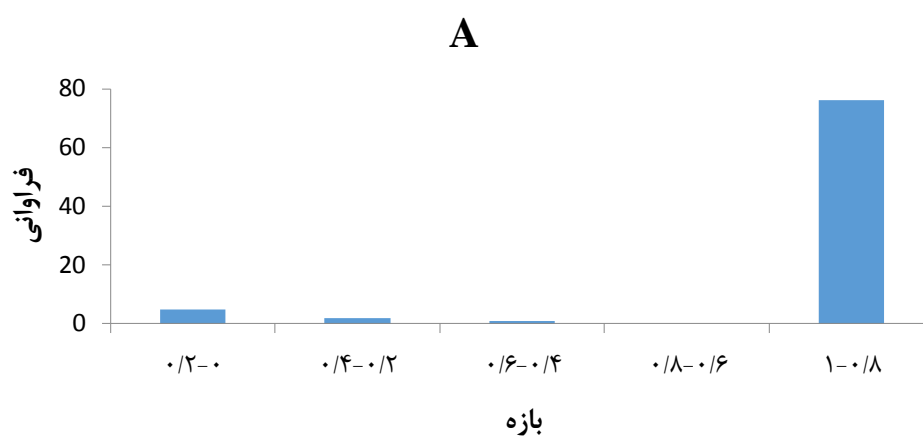
در مواردی که هدف از ارائه‌ی مدل‌ها، پیش‌بینی شرایط پایداری، ناپایداری و تخریب شده است یکی از شروط لازم برای توسعه مدل‌های بهتر، برابر بودن تعداد موارد پایدار، ناپایدار و تخریب شده در پایگاه داده است. بنابراین در این تحقیق، پایگاه داده مربوط به دیواره شامل ۲۸ مورد از هر یک از دسته‌های پایدار، ناپایدار و تخریب شده است. همچنین پایگاه داده مربوط به سقف نیز شامل ۲۶ مورد از هر یک از دسته‌های پایدار، ناپایدار و تخریب شده است. پایگاه داده شامل پارامترهای مربوط به نمودار پایداری یعنی ضریب تنش سنگ (A)، ضریب مربوط به درزه (B)، ضریب نیروی ثقل (C)، شعاع هیدرولیکی (HR) و شاخص اصلاح شده کیفی تونل‌زنی ( $Q'$ ) است. تمامی این پارامترها متغیرهایی از نوع پیوسته بوده و به عنوان پارامترهای ورودی در توسعه مدل‌ها در نظر گرفته شده است. به منظور شناسایی توزیع فراوانی پارامترها، نمودارهای توزیع فراوانی بر روی پایگاه داده مربوط به دیواره‌ها انجام شده و نتایج آن در شکل‌های ۴-۱ تا ۴-۵ نشان داده شده است. همچنین نمودارهای توزیع فراوانی مربوط به داده‌های سقف در پیوست (۲) قابل مشاهده است.



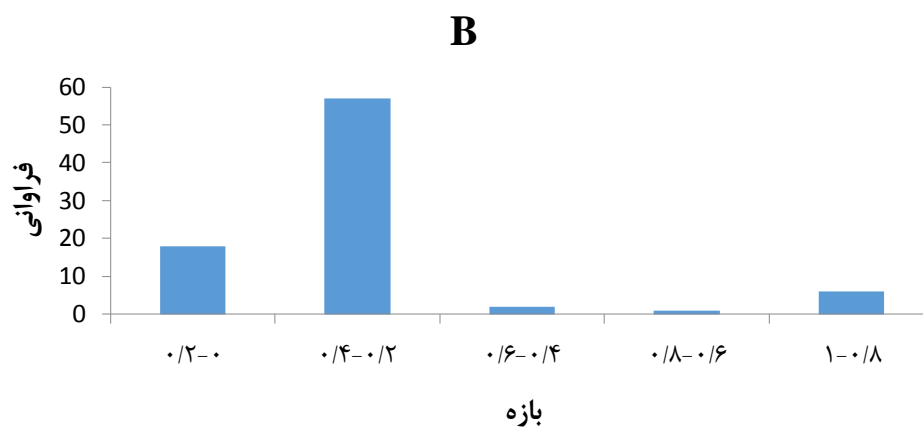
شکل ۴-۱: نمودار توزیع فراوانی داده‌های شعاع هیدرولیکی دیواره



شکل ۲-۴: نمودار توزیع فراوانی داده‌های سیستم اصلاح شده طبقه‌بندی توده‌سنگ دیواره

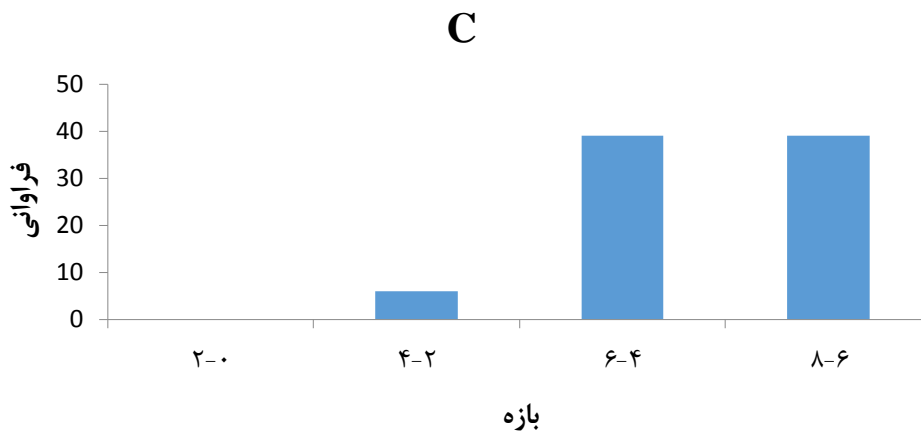


شکل ۳-۴: نمودار توزیع فراوانی داده‌های ضریب تنش سنگ دیواره



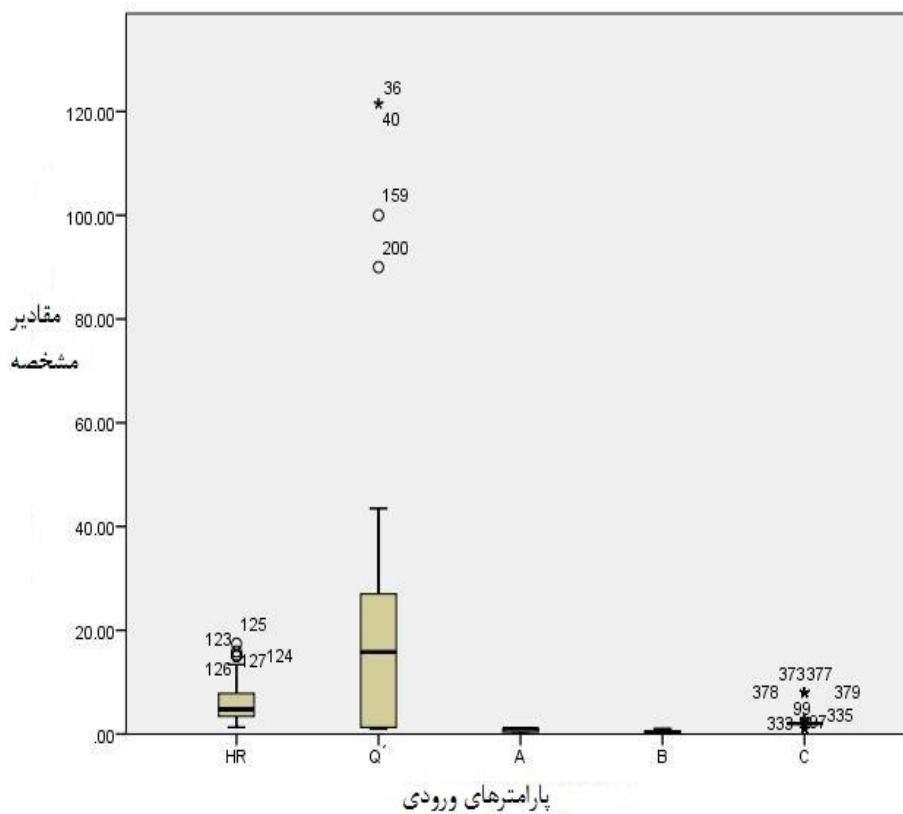
شکل ۴-۴: نمودار توزیع فراوانی داده‌های ضریب درزه دیواره



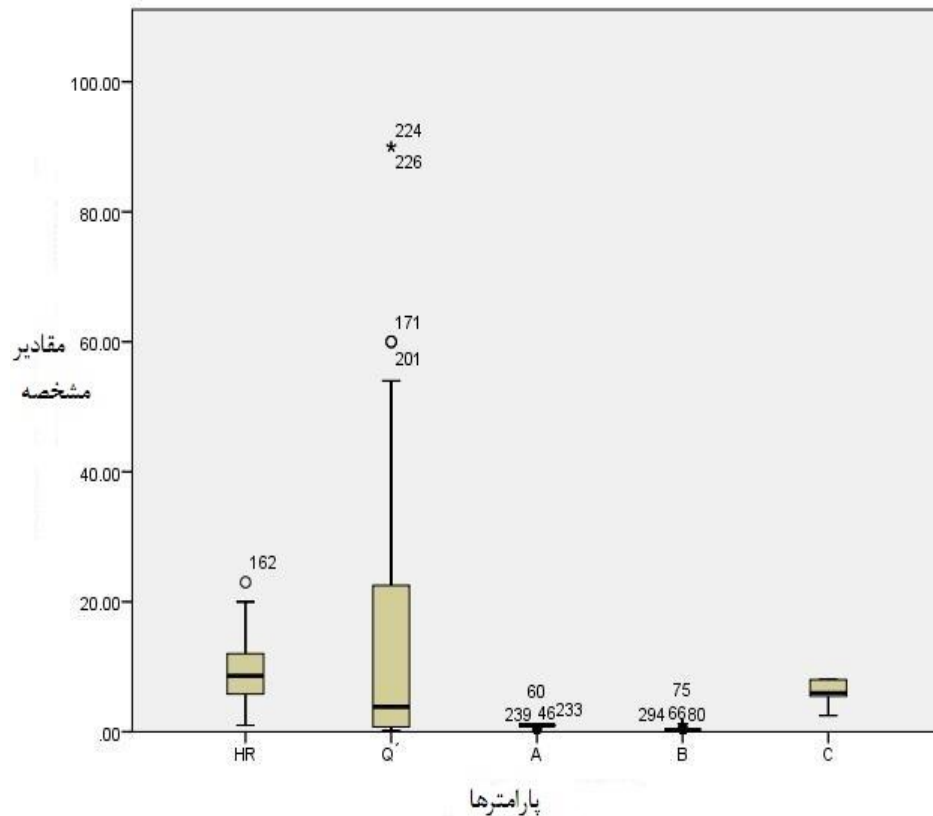


شکل ۴-۵: نمودار توزیع فراوانی داده‌های ضریب نیروی ثقل دیواره

همچنین نمودارهای جعبه‌ای مربوط به داده‌ها نیز در شکل‌های ۴-۶ و ۴-۷ نشان داده شده است.

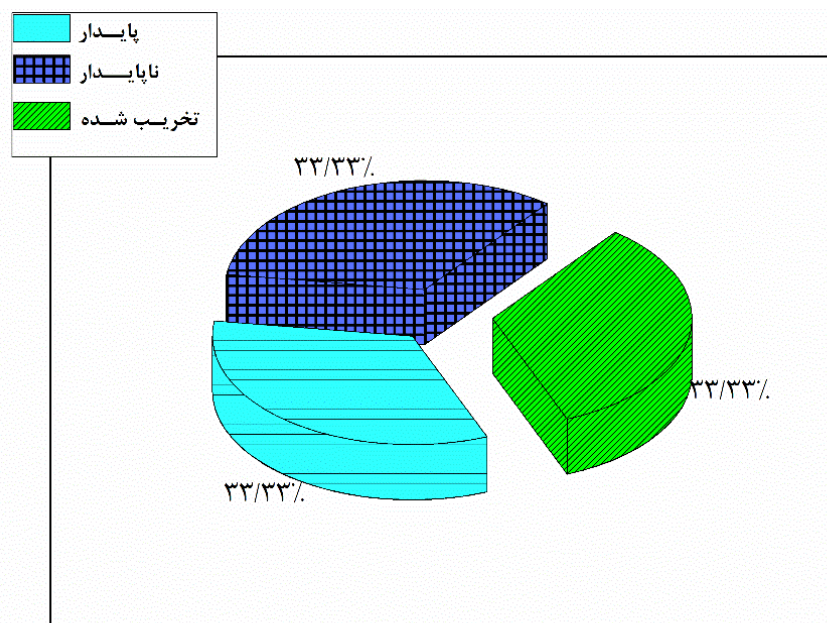


شکل ۴-۶: نمودار جعبه‌ای مربوط به داده‌های سقف

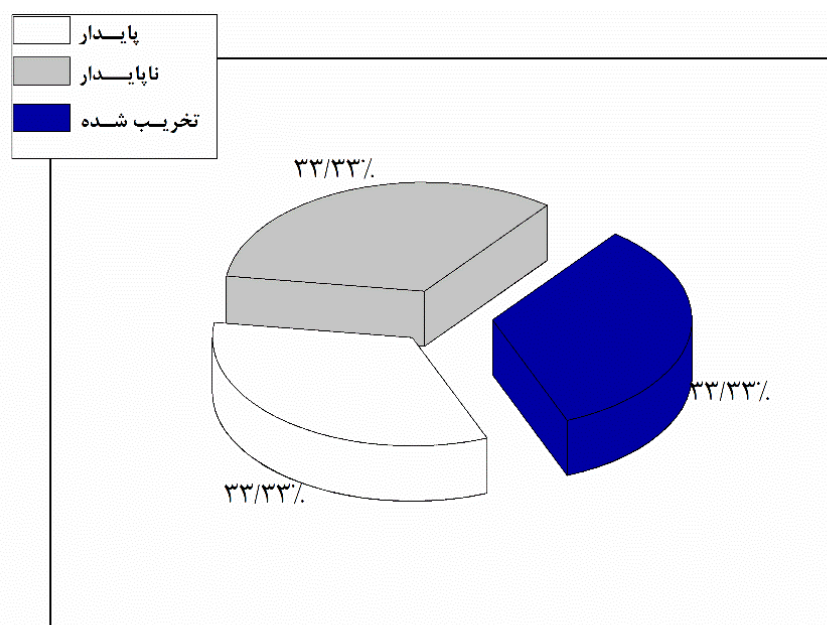


شکل ۴-۷: نمودار جعبه‌ای مربوط به داده‌های دیواره

به منظور انجام تحقیق و ساخت مدل‌های ارزیابی، پایگاه داده‌های سقف و دیواره به طور تصادفی به دو گروه تقسیم شده است. گروه اول شامل حدود ۷۵ درصد داده‌ها است که برای آموزش مدل‌ها استفاده می‌شود و گروه دوم که شامل حدود ۲۵ درصد داده‌ها می‌شود، برای آزمون مدل‌های ایجاد شده استفاده می‌شود. لازم به ذکر است که برای کارایی بهتر روش‌های به کار برده شده، لازم است که تعداد موارد هر دسته یعنی پایدار، ناپایدار و تخریب شده در مرحله آموزش مدل‌ها برابر باشند که این نکته در تحقیق در نظر گرفته شده است. اطلاعات آماری مربوط به داده‌های آموزش و آزمون برای مدل‌های دیواره و سقف در شکل‌های ۴-۸ و ۴-۹ بیان شده است.



شکل ۴-۸: اطلاعات مربوط به فراوانی داده‌های آموزش مدل‌های دیواره و سقف



شکل ۴-۹: اطلاعات مربوط به فراوانی داده‌های آزمون مدل‌های دیواره و سقف

#### ۴-۴ جمع‌بندی

در این فصل ابتدا اطلاعات کلی ساختار پایگاه داده شامل اطلاعات جغرافیایی و زمین‌شناسی معادن مربوطه بیان شد. در ادامه اطلاعات آماری پارامترهای مربوطه و توزیع فراوانی آنها با استفاده از

نمودارهای توزیع فراوانی بیان شد. در فصل بعد با استفاده از این پایگاه داده مدل‌هایی برای پیش‌بینی

شرایط پایداری کارگاه‌ها توسعه می‌یابند.

# فصل پنجم

توسعه مدل های ارزیابی پایداری

کارگاه های باز زیرزمینی

## ۵-۱ مقدمه

در فصول قبل به اهمیت ارزیابی پایداری کارگاه‌های باز زیرزمینی و روش مرسوم این کار پرداخته شد. همانطور که بحث شد روش نمودار پایداری به عنوان متداول‌ترین روش تجربی در این زمینه دارای نواقصی است. بنابراین برای غلبه بر اشکالات این روش، توسعه مدل‌هایی با استفاده از روش‌های آماری و هوشمند تشریح شده در فصل سوم مد نظر قرار گرفت. برای این منظور از پایگاه اطلاعات ساخته شده در فصل چهارم استفاده شده است. در فصل پیش‌رو روش توسعه هریک از این مدل‌ها بیان خواهد شد. پس از آن با استفاده از داده‌های آزمون، کارایی هریک از مدل‌ها بررسی شده و بر اساس معیارهای مختلفی مورد سنجش قرار می‌گیرد. در انتها نتایج هر یک از این مدل‌ها با نتایج نمودار پایداری مرسوم مقایسه خواهد شد.

## ۵-۲ توسعه مدل‌های ارزیابی پایداری دیواره

در این بخش مدل‌های رگرسیون منطقی، SVM و فازی بر اساس ۶۳ داده آموزش یعنی حدود ۷۵ درصد از کل داده‌ها توسعه داده می‌شود. متغیرهای ورودی (متغیرهای مستقل) در این مدل‌ها ۱- شعاع هیدرولیکی (HR) ۲- شاخص اصلاح شده کیفی تونل‌زنی ( $Q'$ ) ۳- ضریب تنش سنگ (A) ۴- ضریب نقص درزه (B) ۵- ضریب نیروی ثقل (C) و نیز متغیر خروجی (وابسته در رگرسیون منطقی) شرایط پایداری (Y) تعریف شده است.

### ۵-۲-۱ مدل رگرسیون منطقی

در این بخش تحلیل رگرسیون منطقی بر روی ۶۳ داده‌ای که برای آموزش مدل‌ها در نظر گرفته شده‌اند با استفاده از بسته نرم افزار آماری SPSS نسخه ۲۳ انجام شده است. متغیر وابسته که شرایط پایداری (Y) است، در این مدل برای موارد پایدار مقدار آن برابر ۱، برای موارد تخریب شده برابر صفر و برای موارد ناپایدار برابر ۲ در نظر گرفته شده است. با وارد کردن داده‌ها به نرم افزار SPSS و انجام تحلیل رگرسیون منطقی چند جمله‌ای بر روی آنها مدل‌های زیر برای محاسبه احتمال تعلق نمونه به دسته‌های مختلف وضعیت

پایداری به دست آمده است. کلاس مربوط به موارد ناپایدار نیز به عنوان کلاس مرجع در نظر گرفته شده است. بر این اساس مقدار احتمال وقوع هر کلاس با استفاده از معادلات مربوط به هر دسته طبق روابط (۱-۵) تا (۵-۵) قابل محاسبه است. همچنین در بین مقادیر احتمال محاسبه شده برای هر دسته، مقدار احتمال هر دسته که از مقدار احتمال دو دسته دیگر بیشتر باشد، شرایط پایداری به آن دسته تعلق می‌گیرد.

$$A = \exp(3.126 + 0.954HR - 1.08Q' - 7.65A - 28.45B + 1.03C) \quad (۱-۵)$$

$$B = \exp(-31.86 - 1.04HR + 0.43Q' + 8.975A + 6.39B + 3.166C) \quad (۲-۵)$$

$$\pi_0(t) = \frac{A}{1 + A + B} \quad (۳-۵)$$

در این معادله  $\pi_0(t)$  احتمال رخداد تخریب شدن وضعیت دیواره‌های کارگاه است.

$$\pi_1(t) = \frac{B}{1 + A + B} \quad (۴-۵)$$

در این معادله  $\pi_1(t)$  احتمال رخداد پایدار بودن وضعیت دیواره‌های کارگاه است. در نهایت احتمال رخداد کلاس ناپایداری دیواره (کلاس مرجع) برابر است با:

$$\pi_2(t) = 1 - \pi_1(t) - \pi_0(t) \quad (۵-۵)$$

در این معادله  $\pi_2(t)$  احتمال رخداد ناپایداری وضعیت دیواره‌های کارگاه است.

نتایج حاصل از آموزش مدل رگرسیون منطقی مطابق با ماتریس درهم ریختگی<sup>۱</sup> در جدول ۱-۵ بیان شده است که مطابق این نتایج، مدل آموزش رگرسیون منطقی قادر به پیش بینی تمامی موارد پایدار دیواره کارگاه است. همچنین این مدل ۱۷ مورد از موارد حالت تخریب و ۱۸ مورد از شرایط ناپایدار را به درستی پیش بینی کرده است.

<sup>۱</sup> - Confusion Matrix

جدول ۵-۱: نتایج حاصل از آموزش مدل رگرسیون منطقی

ناپایدار	تخریب شده	پایدار	پیش‌بینی شده
			مشاهده شده
۰	۰	۲۱	پایدار
۴	۱۷	۰	تخریب شده
۱۸	۳	۰	ناپایدار

### ۵-۲-۲ مدل SVM

در این بخش با استفاده از روش ماشین بردار پشتیبان مدلی جدید برای پیش‌بینی شرایط پایداری در کارگاه‌های باز زیرزمینی ارائه شده است. برای این منظور از بسته کتابخانه‌ای Libsvm توسعه داده شده توسط چانگ و لین<sup>۱</sup> (۲۰۰۱) برای مدل‌سازی SVM در نرم افزار Matlab استفاده شده است (Chang & Lin, 2001). همچنین برای پیاده‌سازی الگوریتم SVM از نرم افزار Matlab نسخه ۱۳ استفاده شده است. در این روش انتخاب پارامتر تابع کرنل و متغیر جریمه یکی از مسائل اصلی است. چهار مورد از پر کاربردترین توابع کرنل در این روش تابع خطی<sup>۲</sup>، تابع چند جمله‌ای<sup>۳</sup>، تابع پایه شعاعی<sup>۴</sup> و تابع سیگموئید<sup>۵</sup> می‌باشند. با توجه به ویژگی‌های مجموعه داده، انتخاب تابع کرنل پایه شعاعی برای توسعه مدل SVM مناسب است. رابطه مربوط به این تابع در معادله (۵-۶) بیان شده که در آن انتخاب پارامتر  $\gamma$  حائز اهمیت است. پارامتر جریمه (C) نیز فاصله بین نقطه اشتباه طبقه‌بندی شده و ابر صفحه جداساز را اندازه‌گیری می‌کند. انتخاب یک مقدار کم برای این پارامتر سبب افزایش تعداد خطاهای آموزشی و عدم تطابق<sup>۶</sup> و انتخاب مقدار زیاد نیز سبب رفتاری شبیه SVM حاشیه سخت<sup>۷</sup> و بیش برآزش مدل می‌شود.

$$k(x, y) = \exp(-\gamma \times \|x - y\|^2) \quad (۵-۶)$$

<sup>۱</sup> - Chang And Lin

<sup>۲</sup> - Linear Function

<sup>۳</sup> - Polynomial Function

<sup>۴</sup> - Radial Basic Function

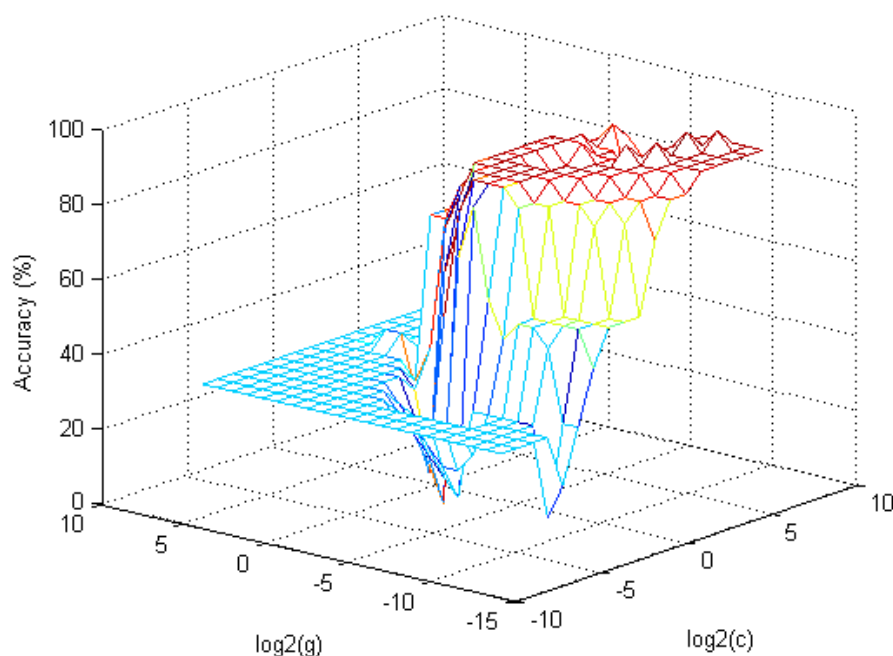
<sup>۵</sup> - Sigmoid Function

<sup>۶</sup> - Underfitting

<sup>۷</sup> - Hard Margin



با توجه به عملکرد بهتر و سریع‌بودن تابع کرنل پایه شعاعی در فرایند آموزش، در این تحقیق نیز از این تابع کرنل استفاده شده است. کتابخانه Libsvm با استفاده از تابع کرنل پایه شعاعی، ابزاری را تحت عنوان جست‌وجوی شبکه‌ای<sup>۱</sup> همراه با اعتبارسنجی متقابل<sup>۲</sup> برای انتخاب پارامترهای مناسب مدل SVM فراهم می‌کند (Chang & Lin, 2001). در این روش برای یافتن پارامترهای بهینه، به ازای مقادیر زوج پارامترهای مختلف  $(C, \gamma)$  مدل آموزش دیده و دقت مدل به ازای هر یک از این مقادیر مشخص شده و پارامترهای بهینه مدل نیز تعیین می‌شوند. برای انجام این کار بازه تغییرات پارامتر جریمه  $C$  برابر با  $(C=2^{-8}, 2^{-7}, \dots, 2^{+8})$  و بازه تغییرات پارامتر تابع کرنل پایه شعاعی  $(g=2^{-8}, 2^{-7}, \dots, 2^{+8})$  انتخاب شده و در این حدود و بر اساس زوج پارامترهای مختلف  $(C, \gamma)$  مدل آموزش دیده و مدل بهینه توسط پارامترهای بهینه مشخص می‌شود. شکل ۱-۵ نشان دهنده انجام روش جست‌وجوی شبکه‌ای همراه با اعتبارسنجی متقابل در مدل SVM مربوطه است. در این شکل محور  $x$  برابر  $\log_2(C)$ ، محور  $y$  برابر  $\log_2(g)$  و محور  $z$  نیز مشخص کننده دقت مدل آموزش است.



شکل ۱-۵: مقادیر دقت برای ترکیب‌های مختلف  $(C, \gamma)$

<sup>۱</sup> - Grid Search Method

<sup>۲</sup> - Cross Validation

بر این اساس پارامتر  $\gamma$  برابر  $0/0029$ ، پارامتر جریمه (C) نیز برابر  $6/964$  برای مدل مربوطه انتخاب شده است. نتایج حاصل از آموزش مدل به ازای پارامترهای حاصله در جدول ۵-۲ مشخص شده است:

جدول ۵-۲: نتایج حاصل از آموزش مدل SVM

ناپایدار	تخریب شده	پایدار	پیش‌بینی شده
			مشاهده شده
۰	۰	۲۱	پایدار
۲	۱۹	۰	تخریب شده
۲۰	۱	۰	ناپایدار

طبق این نتایج مدل آموزش SVM قادر به پیش‌بینی تمامی موارد پایدار، ۱۹ مورد از موارد تخریب شده و ۲۰ مورد از موارد ناپایدار دیواره کارگاه است.

### ۵-۲-۳ مدل منطق فازی

در این بخش با استفاده از روش منطق فازی، مدل دیگری برای پیش‌بینی شرایط پایداری دیواره‌ها در کارگاه باز زیرزمینی ارائه شده است. این مدل با استفاده از جعبه ابزار منطق فازی در نرم افزار Matlab نسخه ۱۳ توسعه یافته است. ساخت مدل فازی در این بخش در ۴ مرحله زیر انجام شده است:

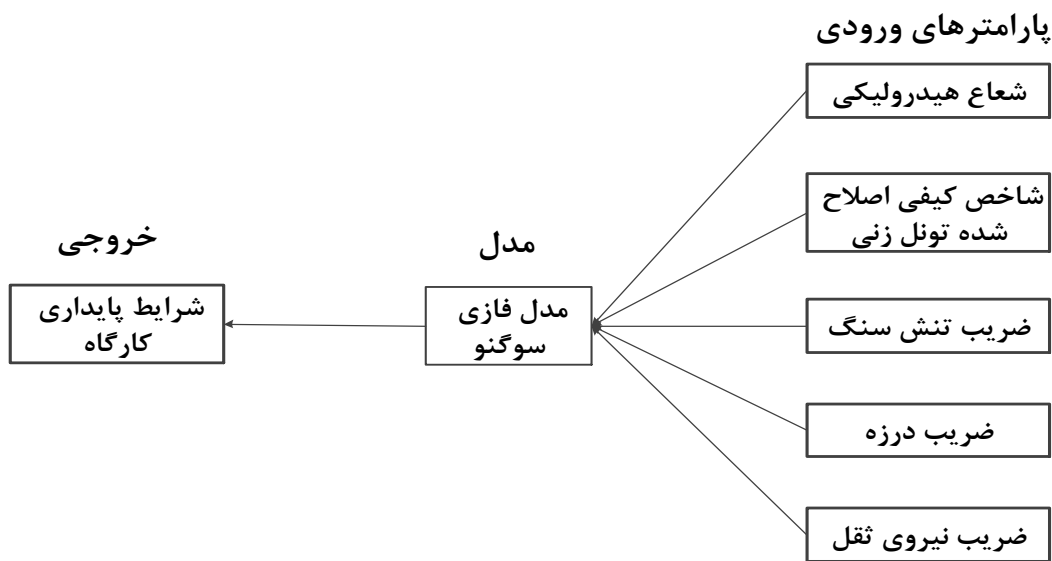
(۱): فازی‌سازی پارامترهای ورودی و خروجی

(۲): طراحی سیستم استنتاج فازی

(۳): طراحی پایگاه قوانین

(۴): انتخاب روش مناسب برای فرآیند غیر فازی‌سازی

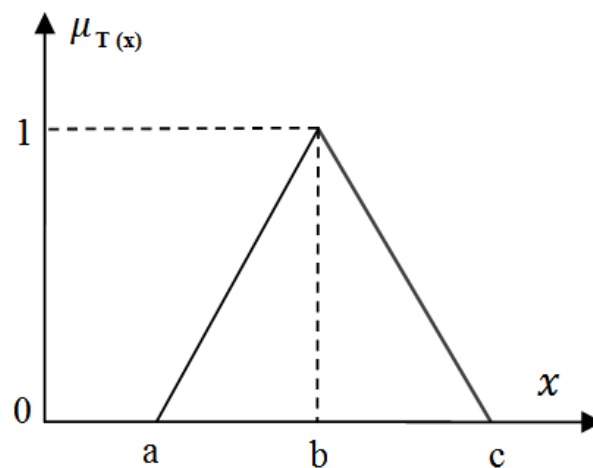
در ادامه هر یک از موارد فوق که به صورت شماتیک در شکل ۵-۲ نشان داده شده است، به صورت جزئی شرح داده می‌شوند.



شکل ۵-۲: پارامترهای ورودی و خروجی مدل فازی

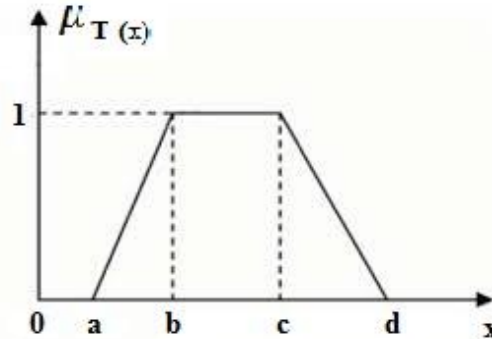
### ۵-۲-۳-۱ فازی‌سازی پارامترهای ورودی و خروجی

انواع مختلفی از توابع عضویت برای تبدیل پارامترهای ورودی و خروجی به شکل فازی موجود است. در این بخش از توابع عضویت مثلثی و ذوزنقه‌ای به دلیل سادگی و کارایی بالا در محاسبات رایانه‌ای استفاده شده است. در حالت مثلثی عدد مربوطه را به صورت  $\text{Triangular}(x;a,b,c)$  نشان داده می‌شود که پارامترهای  $a$ ،  $b$  و  $c$  به ترتیب بیانگر کمترین مقدار ممکن، محتمل‌ترین مقدار و بیشترین مقدار ممکن برای عدد مورد نظر هستند و همان‌طور که در شکل ۵-۳ نشان داده شده عدد مورد نظر می‌تواند بین  $a$  تا  $c$  تغییر کند.



شکل ۵-۳: نمایش عدد فازی مثلثی

در حالت دوزنقه‌ای عدد مربوطه به صورت Trapezoid  $(x;a,b,c,d)$  نمایش داده می‌شود و در این حالت همان‌طور که در شکل ۴-۵ نشان داده شده عدد مورد نظر می‌تواند بین  $a$  تا  $d$  تغییر کند.



شکل ۴-۵: نمایش عدد فازی دوزنقه‌ای

بر این اساس توابع عضویت مثلثی و دوزنقه‌ای که در معادله‌های (۷-۵) و (۸-۵) بیان شده‌اند، برای تبدیل متغیرهای زبانی به مقادیر واقعی در بازه ۰ تا ۱ مورد استفاده قرار می‌گیرند.

$$\text{Triangular}(x;a,b,c) = \max \left[ \min \left( \frac{x-a}{b-a}, \frac{c-x}{c-b} \right), 0 \right] \quad (7-5)$$

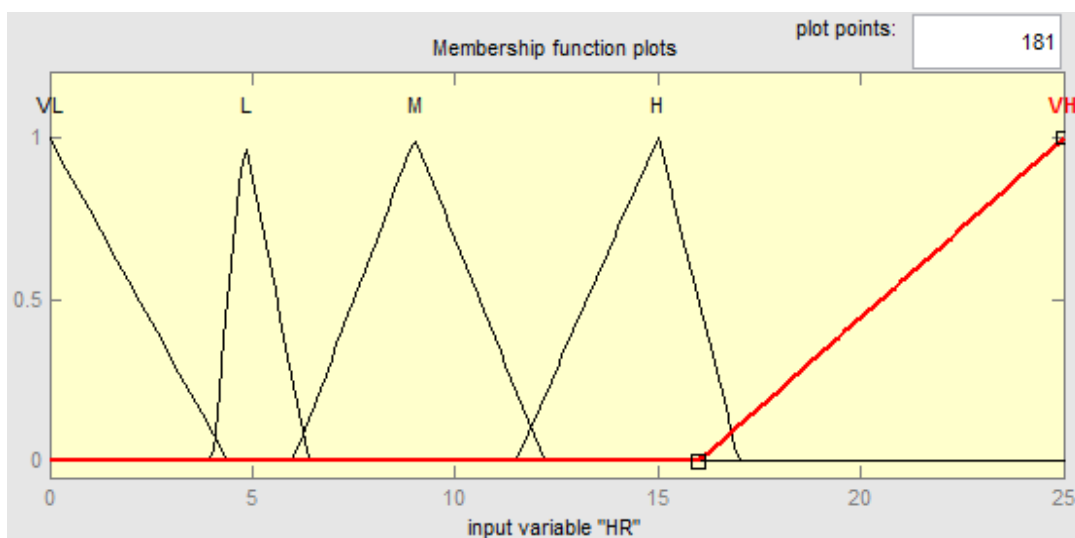
$$\text{Trapezoid}(x;a,b,c,d) = \max \left[ \min \left( \frac{x-a}{b-a}, 1, \frac{d-x}{d-c} \right), 0 \right] \quad (8-5)$$

در این معادله‌ها  $a, b, c, d$  پارامترهای مقدار زبانی و  $x$  محدوده پارامترهای ورودی است. همچنین متغیرهای زبانی استفاده شده در این شکل‌ها در جدول ۳-۵ بیان شده‌اند. باید ذکر شود که تعداد توابع عضویت و دامنه‌ی تغییرات آنها برای پارامترهای گوناگون به صورت کیفی و بر اساس قضاوت مهندسی و درک مؤلف انتخاب شده است.

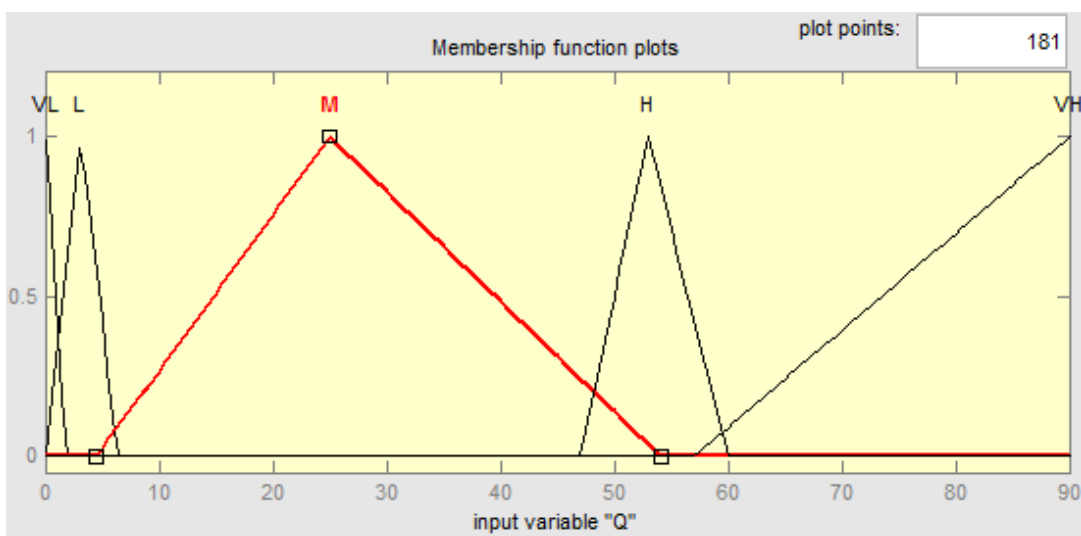
جدول ۳-۵: متغیرهای زبانی استفاده شده در مدل فازی

توصیف	متغیر زبانی
خیلی زیاد	VH
زیاد	H
متوسط	M
کم	L
خیلی کم	VL

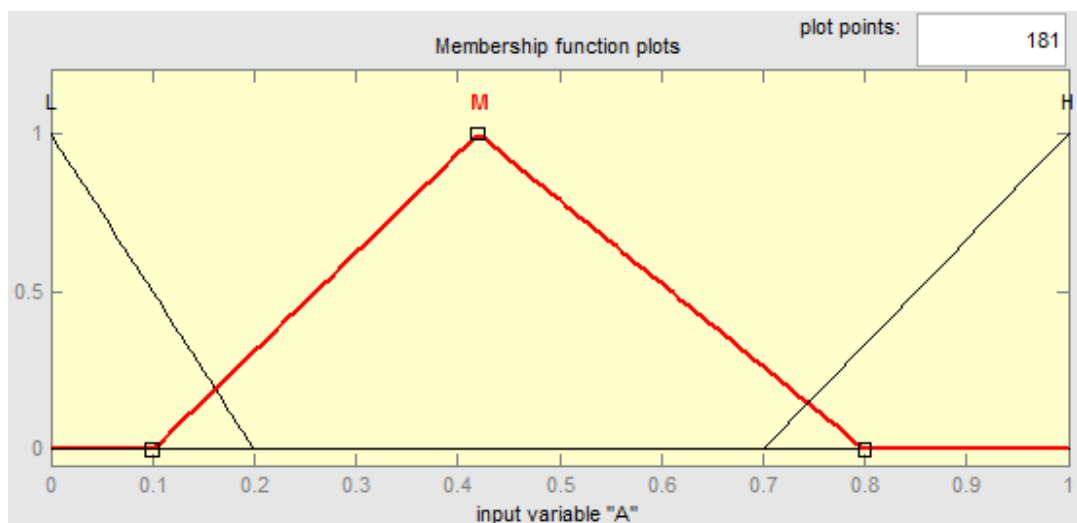
شکل‌های گرافیکی توابع عضویت برای متغیرهای ورودی در شکل‌های ۵-۵ تا ۵-۹ نشان داده شده است. برچسب‌های مربوط به خروجی سه کلاس شرایط پایداری نیز در شکل ۵-۱۰ نشان داده شده است.



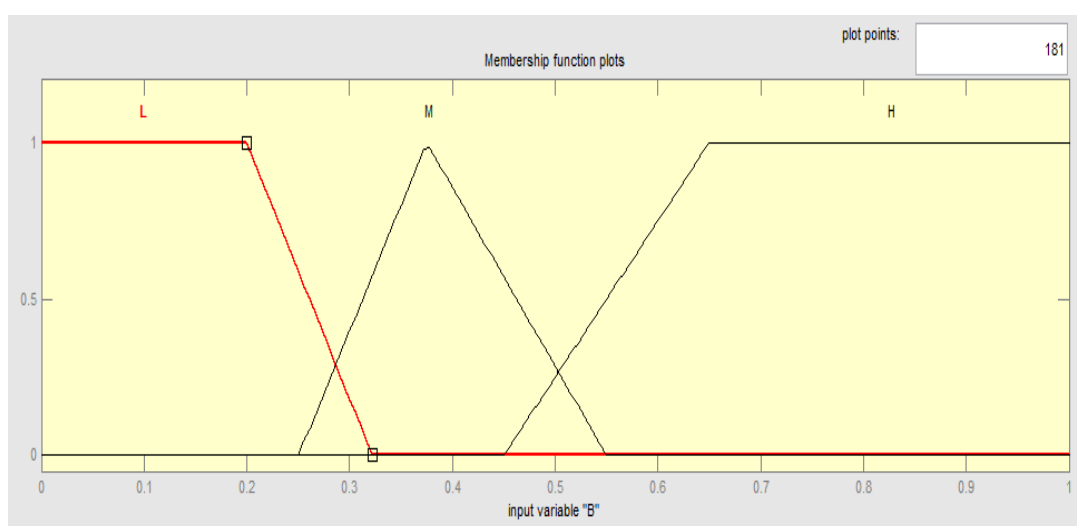
شکل ۵-۵: توابع عضویت برای پارامتر شعاع هیدرولیکی (HR)



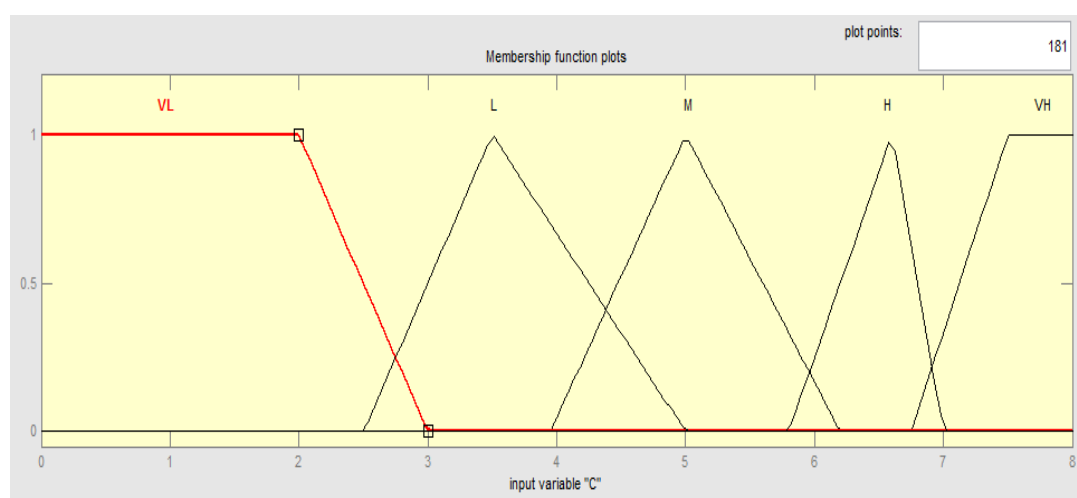
شکل ۵-۶: توابع عضویت برای پارامتر شاخص کیفی اصلاح شده تونل‌زنی (Q')



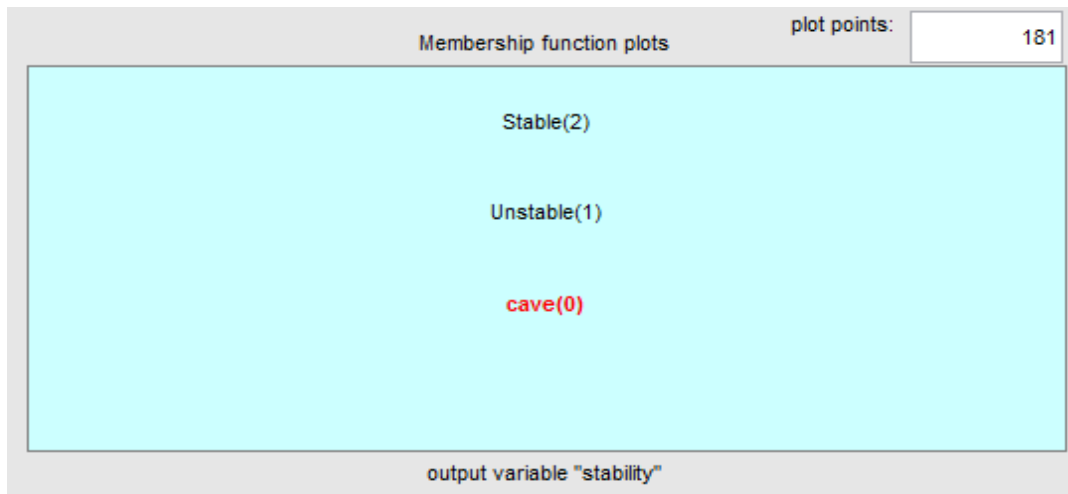
شکل ۵-۷: توابع عضویت برای پارامتر ضریب تنش سنگ (A)



شکل ۵-۸: توابع عضویت برای پارامتر ضریب درزه (B)



شکل ۵-۹: توابع عضویت برای پارامتر ضریب نیروی ثقل (C)



شکل ۵-۱۰: برچسب‌های مربوط به کلاس‌های پایداری

### ۵-۲-۳-۲ طراحی سیستم استنتاج فازی

تا به حال سیستم‌های استنتاج فازی گوناگونی برای حل مسائل ارائه شده است که دو نوع پرکاربرد و مرسوم آن مدل فازی ممدانی و مدل فازی تاکاگی-سوگنو-کانگ هستند که به طور وسیع در حل مسائل مهندسی به کار می‌روند. این مدل‌های فازی بسیار شبیه یکدیگر هستند، اما تفاوت اصلی آن‌ها در بخش پی‌آمد قوانین است. در این تحقیق به دلیل این که پارامتر خروجی (شرایط پایداری) به صورت مقادیر عددی صفر و یک است، سیستم استنتاج فازی سوگنو درجه صفر برای توسعه مدل فازی مورد نظر استفاده می‌شود. نمونه‌ای از قانون فازی در این سیستم به شکل معادله (۵-۹) است:

$$\text{If } x \text{ is } A_i \text{ and } y \text{ is } B_i \text{ then } z = k_i \text{ (for } i=1,2,\dots,r) \quad (5-9)$$

در این رابطه  $x$  و  $y$  متغیرهای ورودی،  $A_i$  و  $B_i$  عبارات زبانی یا مجموعه‌های فازی در بخش مقدمه قانون،  $z$  متغیر خروجی،  $k_i$  مقادیر عددی قطعی در بخش پی‌آمد قانون و  $r$  تعداد قوانین است. در این تحقیق مقادیر  $k_i$  برای موارد پایدار برابر ۲، برای موارد تخریب شده صفر و برای موارد ناپایدار ۱ در نظر گرفته شده است.

### ۵-۲-۳-۳ طراحی پایگاه قوانین

مرحله‌ی بعد در طراحی مدل فازی، ساخت قوانین اگر-آنگاه است. در واقع این قوانین برای ارائه‌ی ارتباط فازی بین پارامترهای ورودی و خروجی مدل استفاده می‌شوند. در سیستم فازی هیچ مدل و معادله ریاضی وجود ندارد و پیچیدگی مدل، وجود عدم قطعیت و روابط غیر خطی با استفاده از قوانین فازی بیان می‌شود. در این تحقیق برای ایجاد پایگاه قوانین، تعداد ۱۲۳ قانون فازی نوشته شده است. این قوانین بر اساس داده‌های موجود در سری داده‌های آموزشی به نحوی که تمامی حالت‌های ممکن را پوشش دهند، توسعه یافته‌اند (برای سایر داده‌ها قابل تعمیم نیست). در جدول ۴-۵ بعضی از این قوانین فازی برای نمونه ارائه شده است.

جدول ۴-۵: نمونه‌هایی از قوانین فازی به کار برده شده در مدل فازی پیشنهادی

شماره قانون	پارامترهای ورودی				
	C	B	A	$Q'$	HR
۱	L	M	H	VH	VL
۲	M	L	H	H	L
۳	M	M	H	VL	M
۴	VL	L	M	M	M
۵	M	M	H	L	M
۶	M	M	H	H	M
۷	M	L	H	L	H
۸	M	L	H	L	H

### ۵-۲-۳-۴ فرآیند غیر فازی‌سازی

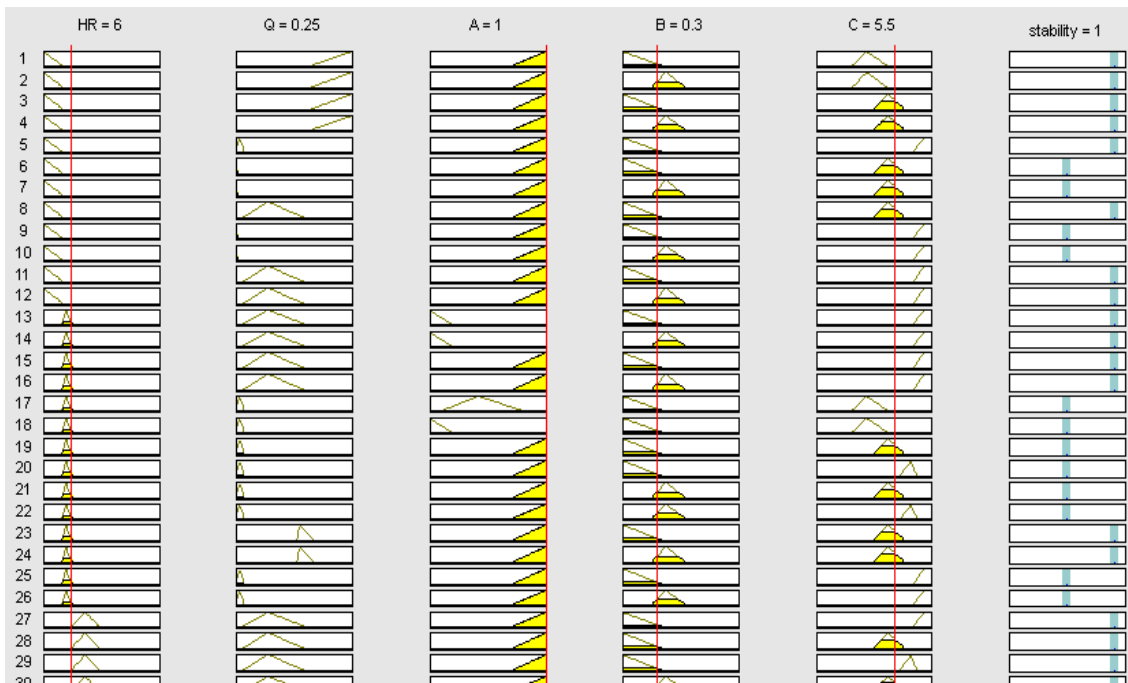
در مرحله آخر باید با استفاده از فرآیند غیر فازی‌سازی، نتایج به دست آمده از مدل فازی به مقادیر واقعی (قطعی) تبدیل شود. برای استنتاج به روش سوگنو دو روش غیر فازی‌سازی به نام‌های میانگین



وزنی<sup>۱</sup> (wtaver) و جمع وزنی<sup>۲</sup> (wtsum) وجود دارد که روش میانگین وزنی نسبت به روش جمع وزنی کاربرد بیشتری در حل مسائل دارد، لذا در این تحقیق روش میانگین وزنی برای این منظور به کار گرفته می‌شود. در این روش خروجی نهایی با میانگین وزنی گرفتن از توابع عضویت، تمامی خروجی‌های سیستم با استفاده از رابطه‌ی (۱۰-۵) حاصل می‌شود:

$$z^* = \frac{\sum \mu_A(z) \cdot z}{\sum \mu_A(z)} \quad (10-5)$$

در این رابطه  $z^*$  مقدار قطعی برای خروجی فازی و  $\mu_A(z)$  تابع عضویت ترکیب شده است. در صورت وارد کردن داده‌های ورودی مناسب، مدل فازی ارائه شده در این بخش قادر به پیش‌بینی شرایط پایداری مربوط به سقف کارگاه است. به طور مثال همان‌طور که در شکل ۵-۱۱ مشاهده می‌کنید، زمانی که شعاع هیدرولیکی برابر ۶ متر، شاخص اصلاح شده کیفی تونل‌زنی برابر ۰/۲۵، ضریب تنش سنگ ۱، ضریب درزه ۰/۳ و ضریب نیروی ثقل ۵/۵ باشد، خروجی پیش‌بینی شده توسط مدل برابر ۱ یا ناپایدار است که دقیقاً معادل مقدار واقعی آن است.



شکل ۵-۱۱: نحوه‌ی پیش‌بینی شرایط پایداری با استفاده از مدل فازی پیشنهادی

<sup>۱</sup> - Weighted Average

<sup>۲</sup> - Weighted Sum

نتایج حاصل از مرحله آموزش مدل فازی بر اساس ماتریس درهم ریختگی مندرج در جدول ۵-۵ بیان شده است.

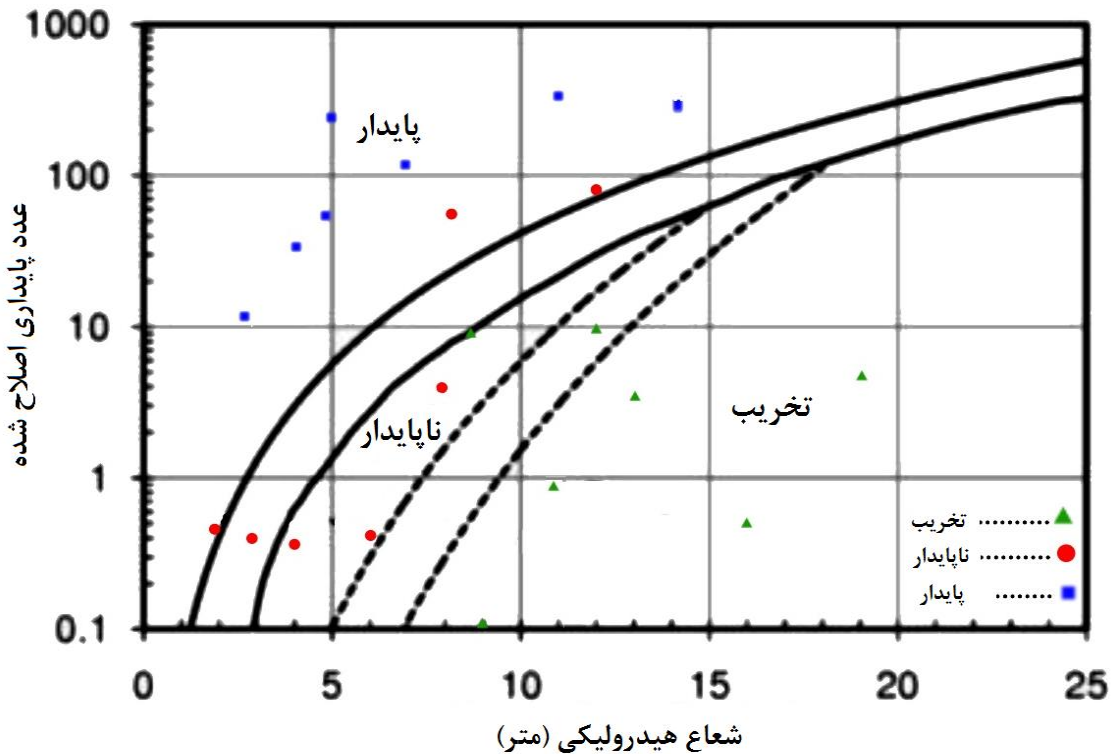
جدول ۵-۵: نتایج حاصل از آموزش مدل فازی

ناپایدار	تخریب شده	پایدار	پیش‌بینی شده
			مشاهده شده
۰	۰	۲۱	پایدار
۲	۱۹	۰	تخریب شده
۲۰	۱	۰	ناپایدار

طبق این نتایج مدل آموزش فازی قادر به پیش‌بینی تمامی موارد پایدار دیواره کارگاه است. همچنین این مدل ۱۹ مورد از موارد حالت تخریب و ۲۰ مورد از شرایط ناپایدار را به درستی پیش‌بینی کرده است.

#### ۵-۲-۴ پیش‌بینی با استفاده از روش نمودار پایداری

در این بخش برای ارزیابی عملکرد روش نمودار پایداری و مقایسه آنها با مدل‌های توسعه یافته، ۲۱ مورد مربوط به داده‌های مرحله آزمون مدل‌های توسعه یافته در بخش‌های قبل با استفاده از این روش و بر اساس شعاع هیدرولیکی و عدد پایداری آنها پیش‌بینی می‌شود. در شکل ۵-۱۲ تمامی موارد مربوط به کلاس‌های پایدار، ناپایدار و تخریب شده با استفاده از شعاع هیدرولیکی و مقدار عدد پایداری مربوطه نشان داده شده‌اند. در این شکل موارد پایدار با علامت مربع، موارد ناپایدار با علامت دایره و موارد تخریب شده با علامت مثلث نشان داده شده است.



شکل ۵-۱۲: تخمین شرایط پایداری داده‌های آزمون دیواره به وسیله‌ی نمودار پایداری پیشنهادی نیکسون

همان‌طور که در شکل ۵-۱۲ نشان داده شده، ۷ مورد از موارد پایدار توسط نمودار پایداری به درستی پیش‌بینی و از ۷ مورد شرایط ناپایدار و تخریب شده نیز به ترتیب ۳ و ۵ مورد به درستی پیش‌بینی شده است.

نتایج حاصل از شکل ۵-۱۲ به صورت مجزا در جدول ۵-۶ آورده شده است. در این جدول نمونه‌های مشاهده شده واقعی که بر اساس عدد پایداری و شعاع هیدرولیکی مربوطه در نمودار پایداری تخمین زده شده، بر اساس ۵ ناحیه موجود در نمودار بیان شده است و تنها موارد عیناً صحیح پیش‌بینی شده به عنوان موارد صحیح در نظر گرفته شده‌اند. ضمناً در ماتریس درهم ریختگی حاصل شده به علت عدم وجود موارد مربوط به ناحیه انتقالی پایدار - ناپایدار و نیز ناحیه انتقالی ناپایدار - تخریب شده در موارد مشاهده شده واقعی، سطر مربوط به این دو مورد برابر صفر در نظر گرفته شده است.

جدول ۵-۶: پیش‌بینی موارد آزمون دیواره با استفاده از روش نمودار پایداری

پیش‌بینی شده					تعداد واقعی	مشاهده شده
تخریب شده	ناحیه انتقالی ناپایدار- تخریب شده	ناپایدار	ناحیه انتقالی پایدار- ناپایدار	پایدار		
۰	۰	۰	۰	۷	۷	پایدار
۰	۰	۰	۰	۰	۰	ناحیه انتقالی پایدار- ناپایدار
۰	۰	۳	۱	۳	۷	ناپایدار
۰	۰	۰	۰	۰	۰	ناحیه انتقالی ناپایدار- تخریب شده
۵	۱	۱	۰	۰	۷	تخریب شده

### ۵-۲-۵ بررسی عملکرد مدل‌های ارزیابی پایداری دیواره

در این بخش عملکرد سه مدل رگرسیون منطقی، SVM و فازی بر اساس نتایج حاصل از مراحل آموزش و آزمون مدل‌ها با استفاده از معیارهای مختلف ارزیابی می‌شوند. برای این منظور از گروه داده‌های آزمون که متشکل از داده‌های جمع آوری شده ۲۱ مورد معدن کاری کارگاه باز کانادا و غنا که در توسعه مدل‌ها نقشی نداشته‌اند، استفاده شده است. همچنین با استفاده از ماتریس درهم ریختگی حاصل از نمودار پایداری عملکرد این روش نیز مورد ارزیابی قرار می‌گیرد. ماتریس درهم ریختگی چگونه عملکرد الگوریتم دسته بندی را با توجه به مجموعه داده ورودی به تفکیک انواع دسته‌های مسأله دسته بندی، نمایش می‌دهد. در این ماتریس هر ستون بیان کننده پیش‌بینی قرارگیری نمونه در کلاس‌ها و هر سطر ماتریس بیان کننده قرارگیری نمونه واقعی در کلاس‌ها است. در جدول‌های ۵-۷ تا ۵-۹ ماتریس‌های درهم ریختگی مربوط به مراحل آموزش و آزمون سه مدل توسعه یافته بر اساس نتایج حاصل از این مدل‌ها ذکر شده است.

جدول ۵-۷: ماتریس درهم ریختگی مراحل آموزش و آزمون مدل رگرسیون منطقی

مرحله	شرایط پایداری	واقعی	پیش‌بینی شده	
			پایدار	تخریب شده
	پایدار	۲۱	۲۱	۰
آموزش	تخریب شده	۲۱	۰	۱۷
	ناپایدار	۲۱	۰	۳
	پایدار	۷	۷	۰
آزمون	تخریب شده	۷	۰	۵
	ناپایدار	۷	۱	۱

جدول ۵-۸: ماتریس درهم ریختگی مراحل آموزش و آزمون مدل SVM

مرحله	شرایط پایداری	واقعی	پیش‌بینی شده	
			پایدار	تخریب شده
	پایدار	۲۱	۲۱	۰
آموزش	تخریب شده	۲۱	۰	۱۹
	ناپایدار	۲۱	۰	۱
	پایدار	۷	۷	۰
آزمون	تخریب شده	۷	۰	۶
	ناپایدار	۷	۱	۰

جدول ۵-۹: ماتریس درهم ریختگی مراحل آموزش و آزمون مدل منطق فازی

مرحله	شرایط پایداری	واقعی	پیش‌بینی شده	
			پایدار	تخریب شده
آموزش	پایدار	۲۱	۲۱	۰
	تخریب شده	۲۱	۰	۱۹
	ناپایدار	۲۱	۰	۲۰
آزمون	پایدار	۷	۷	۰
	تخریب شده	۷	۰	۵
	ناپایدار	۷	۱	۶

بر اساس این جدول‌ها، در مدل رگرسیون برای مراحل آموزش و آزمون به ترتیب ۵۶ و ۱۷ مورد پیش‌بینی به صورت صحیح انجام شده است. این مقادیر برای مدل SVM به ترتیب ۶۰ و ۱۹ مورد است. همچنین مدل فازی نیز در مرحله آموزش دارای ۶۰ مورد پیش‌بینی صحیح و در مرحله آزمون دارای ۱۸ مورد پیش‌بینی صحیح است.

### ۵-۲-۶ ارزیابی عملکرد مدل‌ها با استفاده از معیارهای مختلف

در این بخش عملکرد مدل‌ها در مرحله‌ی آموزش و آزمون نیز با استفاده از شاخص‌های عملکرد ارزیابی شده است. از جمله معیارهایی که برای ارزیابی عملکرد مدل پیشنهادی می‌توان به کار گرفت، معیارهای دقت<sup>۱</sup>، نرخ مثبت واقعی<sup>۲</sup>، نرخ مثبت کاذب<sup>۳</sup> و معیار آماری کاپا<sup>۴</sup> است.

عملکرد یک الگوریتم دسته‌بندی کننده<sup>۵</sup> با مقایسه نتایج پیش‌بینی شده توسط مدل ارزیابی می‌شود. یک مدل پیش‌بینی کننده دو کلاس می‌تواند چهار خروجی محتمل داشته باشد. اگر مقدار واقعی

<sup>۱</sup> - Accuracy

<sup>۲</sup> - True Positive Rate

<sup>۳</sup> - False Positive Rate

<sup>۴</sup> - Kappa

<sup>۵</sup> - Classifier

مثبت است (P) و به عنوان مثبت (P') دسته‌بندی شده، آن را به عنوان مثبت واقعی (TP) به حساب می‌آورند؛ اگر آن را به عنوان منفی (N') دسته‌بندی کند، آن را به عنوان منفی کاذب (FN) محسوب می‌کنند. در صورتی که مقدار واقعی آن منفی (N) بوده و به عنوان منفی دسته‌بندی شود، آن را به عنوان منفی واقعی (TN) محسوب می‌کنند؛ اگر الگوریتم دسته‌بندی کننده این مورد را به عنوان مثبت دسته‌بندی کند، به عنوان مثبت کاذب (FP) محسوب می‌شود. این اطلاعات در یک ماتریس احتمالی در جدول (۵-۱۰) قسمت (الف) نمایش داده شده است. این ماتریس احتمالی مبنای معیارهای عملکرد را تشکیل می‌دهد. سه مورد از آنها نرخ مثبت واقعی (TPR)، نرخ مثبت کاذب (FPR) و دقت (ACC) است. این معیارها طبق روابط (۵-۱۱) تا (۵-۱۳) قابل محاسبه هستند. همچنین در مورد یک مسأله پیش‌بینی سه کلاس همان طور که در جدول (۵-۱۰) قسمت (ب) نشان داده شده، ماتریس احتمالی یک ماتریس ۳ در ۳ است. برای ارزیابی عملکرد در این مورد ابتدا باید موارد TP، FP و FN برای یک کلاس به عنوان کلاس مرجع (یعنی کلاس A) تخمین زده شود و سایر کلاس‌ها (کلاس‌های B و C) به عنوان کلاس منفی برای کلاس مرجع در نظر گرفته شوند و مقدار TN نیز بر اساس مقدار این دو کلاس برآورد شوند. سپس برای دو کلاس باقی‌مانده یعنی کلاس‌های B و C نیز به همین ترتیب برای تعیین موارد TP، FP، TP و TN عمل می‌شود (Vallejos & McKinnon, 2013).

$$TPR = \frac{TP}{TP + FN} \quad (۵-۱۱)$$

$$FPR = \frac{FP}{FP + TN} \quad (۵-۱۲)$$

$$ACC = \frac{TP + TN}{TP + TN + FP + FN} \quad (۵-۱۳)$$

جدول ۵-۱۰: ماتریس احتمال. (الف) مسأله پیش‌بینی دو کلاسه (ب) مسأله پیش‌بینی سه کلاسه  
(Vallejos & McKinnon, 2013)

		مقدار واقعی	
		P	N
(الف): خروجی پیش‌بینی شده	P'	TP	FP
	N'	FN	TN

		مقدار واقعی		
		A	B	C
(ب): خروجی پیش‌بینی شده	A	AA	AB	AC
	B	BA	BB	BC
	C	CA	CB	CC

برای یک الگوریتم دسته‌بندی کننده، هر چه مقدار شاخص‌های دقت و نرخ مثبت واقعی بیشتر و به یک نزدیک‌تر باشد و نیز مقدار شاخص نرخ مثبت کاذب کمتر و نزدیک به صفر باشد، نشان دهنده‌ی بهتر بودن دسته‌بندی کننده و ارائه نتایج بهتر است.

یکی دیگر از معیارهایی که در این تحقیق برای ارزیابی کارایی مدل‌ها استفاده شده، معیار آماری کاپا است. معیار کاپا، توافق دوطرفه بین دسته‌بندی کننده و مقادیر دنیای واقعی را نشان می‌دهد. معیار کاپا نرخ دسته‌بندی صحیح را پس از احتمال شانس شرایط حذف شده اندازه‌گیری می‌کند. این معیار با استفاده از معادله (۵-۱۴) محاسبه می‌شود. N در این رابطه تعداد کل داده‌ها است (Kuhn & Johnson, 2013).

$$P(E) = \frac{(TP + FN) \times (TP + FP) \times (TN + FN)}{N^2} \quad (۵-۱۲)$$

$$P(A) = \frac{(TP + TN)}{N} \quad (۵-۱۳)$$

$$k = \frac{P(A) - P(E)}{1 - P(E)} \quad (۵-۱۴)$$

در معادلات فوق دو پارامتر P(A) بیانگر درصد توافقات واقعی و P(E) بیانگر درصد توافقات شانس و k



بیانگر آماره کاپا است. لندیس و کخ<sup>۱</sup> (۱۹۷۷) مقیاسی را برای توصیف میزان تطابق پیشنهاد کرده‌اند، که در جدول ۵-۱۱ ذکر شده است. همان طور که مشاهده می‌شود، مقدار کاپا از ۱- (اختلاف کلی) تا ۱+ (شرایط ایده‌آل) متغیر است. مقدار کاپا کمتر از ۰/۴ نشان دهنده‌ی توافق ضعیف و مقدار ۰/۴ و بیشتر نشان دهنده‌ی توافق خوب است (Sakiyama et al., 2008).

جدول ۵-۱۱: شدت نسبی توافق مربوط به آماره کاپا

شدت توافق	آماره کاپا
تقریباً کامل	۰/۸۱-۱
قابل توجه	۰/۶۱-۰/۸۰
حد متوسط <sup>۲</sup>	۰/۴۱-۰/۶۰
متوسط <sup>۳</sup>	۰/۲۱-۰/۴۰
جزئی	۰/۰۰-۰/۲۰
ضعیف	-۱/۰۰-۰/۰۰

این معیارها برای مرحله آموزش و آزمون مدل‌های توسعه یافته و روش نمودار پایداری در جدول ۵-۱۲ محاسبه شده است.

جدول ۵-۱۲: شاخص‌های ارزیابی کارایی مدل‌های پیشنهادی

مدل	مرحله	دقت	نرخ مثبت واقعی	نرخ مثبت کاذب	آماره کاپا
رگرسیون منطقی	آموزش	۰/۸۸	۰/۸۶۲	۰/۰۵۸	۰/۸۲۳
	آزمون	۰/۸۰۹	۰/۸۲۳	۰/۰۸۴	۰/۷۶۶
SVM	آموزش	۰/۹۵۲	۰/۹۳۴	۰/۰۲۳	۰/۹۲۹
	آزمون	۰/۹۰۴	۰/۸۹۲	۰/۰۴۵	۰/۸۵۷

<sup>۱</sup> - Landis and Koch

<sup>۲</sup> - Moderate

<sup>۳</sup> - Fair

ادامه جدول ۵-۱۲: شاخص‌های ارزیابی کارآیی مدل‌های پیشنهادی

مدل	مرحله	دقت	نرخ مثبت واقعی	نرخ مثبت کاذب	آماره کاپا
فازی	آموزش	۰/۹۵۲	۰/۹۳۴	۰/۰۲۳	۰/۹۲۹
	آزمون	۰/۸۵۷	۰/۸۳۶	۰/۰۷	۰/۷۸۶
نمودار پایداری	آزمون	۰/۷۱۴	۰/۶۸۱	۰/۰۸۳	۰/۵۹۱

بر اساس نتایج به دست آمده از مراحل آموزش و آزمون مدل‌های رگرسیون منطقی، SVM و فازی بر اساس شاخص‌های عملکرد مدل‌ها نتیجه می‌شود که در بین مدل‌های توسعه یافته مدل SVM دارای عملکرد بهتری نسبت به مدل منطق فازی و مدل فازی نیز دارای عملکرد بهتری نسبت به مدل رگرسیون منطقی است. همچنین با در نظرگیری موارد آزمون مربوط به مدل‌های توسعه یافته و مقایسه آن‌ها با روش نمودار پایداری می‌توان نتیجه گرفت که مدل SVM با دقت کلی ۹۰/۴ درصد مربوط به موارد آزمون دارای عملکرد بهتری نسبت به مدل منطق فازی با دقت ۸۵/۷ و رگرسیون منطقی با دقت ۸۰/۹ درصد است و این مدل‌ها نیز دارای عملکرد بهتری نسبت به روش نمودار پایداری با دقت ۷۱/۴ درصد می‌باشند.

### ۵-۳ مدل‌های توسعه یافته برای شرایط پایداری سقف

در این بخش مدل‌های رگرسیون منطقی، SVM و فازی بر اساس ۵۷ داده مربوط به سقف کارگاه باز یعنی حدود ۷۵ درصد از کل داده‌ها توسعه داده می‌شود. ارزیابی این مدل‌ها نیز با مابقی داده‌ها انجام می‌شود. متغیرهای مستقل در این مدل‌ها شعاع هیدرولیکی (HR)، شاخص اصلاح شده کیفی تونل‌زنی ( $Q'$ )، ضریب تنش سنگ (A)، ضریب نقص درزه (B) و ضریب نیروی ثقل (C) هستند و متغیر وابسته شرایط پایداری (Y) است.

## ۵-۳-۱ مدل رگرسیون منطقی

در این بخش تحلیل رگرسیون منطقی بر روی ۵۷ داده‌ای که برای آموزش مدل‌ها در نظر گرفته شده‌اند، با استفاده از بسته نرم افزار آماری SPSS نسخه ۲۳ انجام شده است. متغیر وابسته که شرایط پایداری (Y) است، برای موارد پایدار مقدار آن برابر ۱، برای موارد تخریب شده برابر صفر و برای موارد ناپایدار برابر ۲ است. با وارد کردن داده‌ها به نرم افزار SPSS و انجام تحلیل رگرسیون منطقی چند جمله‌ای بر روی آنها مدل‌های زیر برای محاسبه احتمال تعلق نمونه به دسته‌های مختلف پایداری به دست آمده است. کلاس مربوط به موارد ناپایدار نیز به عنوان کلاس مرجع در نظر گرفته شده است. بر این اساس مقدار احتمال وقوع هر کلاس با استفاده از معادلات مربوط به هر دسته طبق روابط (۵-۱۵) تا (۵-۱۹) قابل محاسبه است.

$$A = \exp(-3.3 + 2.33HR - 0.5Q' - 3.1A - 8.57B - 0.12C) \quad (۵-۱۵)$$

$$B = \exp(-539.2 - 1660HR + 30.6Q' - 734.8A + 4230B + 955.3C) \quad (۵-۱۶)$$

$$\pi_0(t) = \frac{A}{1 + A + B} \quad (۵-۱۷)$$

در این معادله  $\pi_0(t)$  احتمال رخداد تخریب شرایط کارگاه است.

$$\pi_1(t) = \frac{B}{1 + A + B} \quad (۵-۱۸)$$

در این معادله  $\pi_1(t)$  احتمال رخداد پایدار بودن شرایط کارگاه است.

$$\pi_2(t) = 1 - \pi_1(t) - \pi_0(t) \quad (۵-۱۹)$$

در این معادله  $\pi_2(t)$  احتمال رخداد ناپایداری شرایط کارگاه است.

نتایج حاصل از مرحله آموزش مدل رگرسیون منطقی در جدول ۵-۱۳ درج شده است.

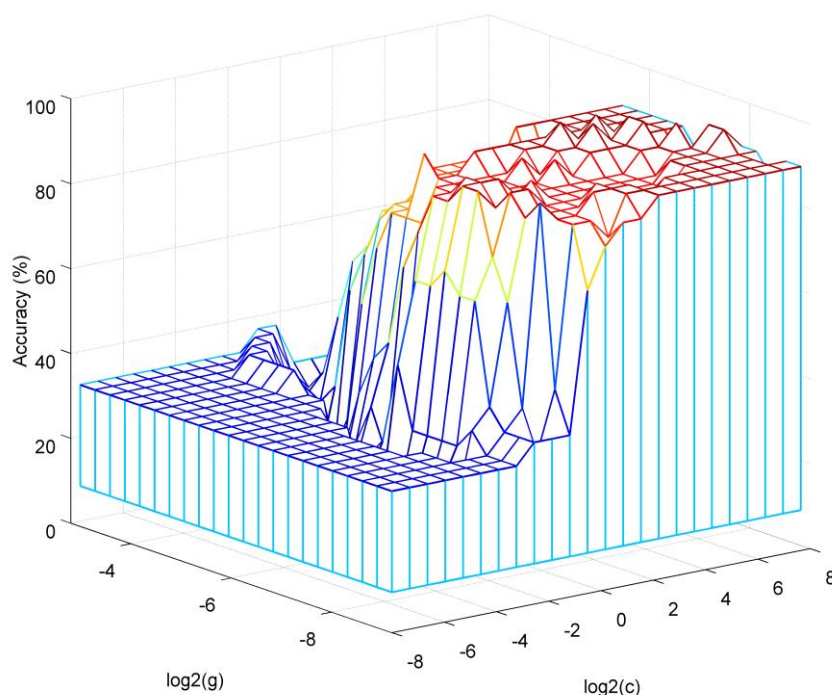
جدول ۵-۱۳: نتایج حاصل از آموزش مدل رگرسیون منطقی

ناپایدار	تخریب شده	پایدار	پیش‌بینی شده
			مشاهده شده
۰	۰	۱۹	پایدار
۲	۱۷	۰	تخریب شده
۱۶	۳	۰	ناپایدار

نتایج حاصل از آموزش مدل رگرسیون منطقی نشان می‌دهد که تمامی موارد پایدار به درست پیش‌بینی شده و در موارد تخریب شده و ناپایدار نیز به ترتیب ۱۷ و ۱۶ مورد به درستی پیش‌بینی شده است.

### ۵-۳-۲ مدل SVM

در این بخش با استفاده از روش ماشین بردار پشتیبان مدل دیگری برای پیش‌بینی شرایط پایداری سقف در کارگاه‌های باز زیرزمینی ارائه شده است. در این مدل نیز برای پیاده سازی الگوریتم SVM از بسته کتابخانه‌ای Libsvm و نرم افزار Matlab نسخه ۱۳ استفاده شده است. برای توسعه این مدل نیز همانطور که در مدل SVM مربوط به دیواره اشاره شد از تابع کرنل پایه شعاعی به دلیل عملکرد بهتر استفاده شده است. همچنین برای انتخاب پارامترهای مناسب نیز از روش جست و جوی شبکه‌ای همراه با اعتبارسنجی متقابل استفاده شده است. بازه تغییرات پارامتر جریمه C برابر با  $(C=2^{-8}, 2^{-7}, \dots, 2^{+8})$  و بازه تغییرات پارامتر تابع کرنل پایه شعاعی  $(g=2^{-8}, 2^{-7}, \dots, 2^{+8})$  انتخاب شده و در این حدود و بر اساس زوج پارامترهای مختلف  $(C, \gamma)$  مدل آموزش دیده و مدل بهینه توسط پارامترهای بهینه مشخص می‌شود. شکل ۵-۱۳ نشان دهنده انجام روش جست‌وجوی شبکه‌ای همراه با اعتبارسنجی متقابل در مدل SVM مربوطه است.



شکل ۵-۱۳: مقادیر دقت برای ترکیب‌های مختلف ( $C$ ,  $\gamma$ )

برای این مدل در مرحله آموزش مدل از تابع کرنل پایه شعاعی برای حالت SVM چند کلاسه استفاده شده است. همچنین پارامترهای  $\gamma$  در تابع کرنل برابر  $0.362$  و پارامتر جریمه برابر  $11/794$  در نظر گرفته شده است. پس از اجرای این مدل برای داده‌های آموزش مربوطه، نتایج مندرج در جدول ۵-۱۴ به دست آمده است.

جدول ۵-۱۴: نتایج حاصل از آموزش مدل SVM

ناپایدار	تخریب شده	پایدار	پیش‌بینی شده
			مشاهده شده
۰	۰	۱۹	پایدار
۱	۱۸	۰	تخریب شده
۱۸	۱	۰	ناپایدار

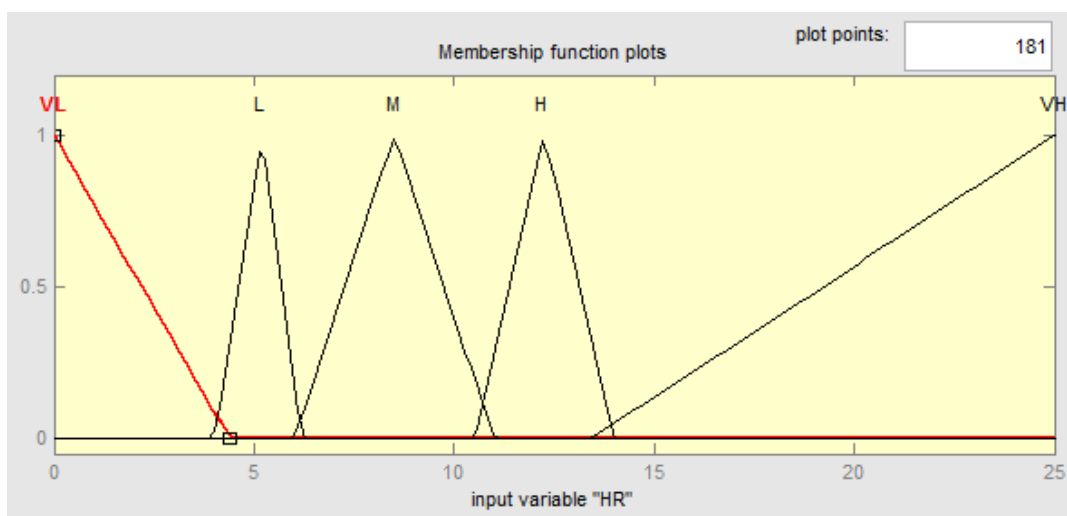
بر اساس این نتایج مدل در مرحله‌ی آموزش مدل تمامی موارد پایدار به درستی پیش‌بینی و ۱۸ مورد از موارد ناپایدار و تخریب شده نیز به درستی پیش‌بینی کرده است.

### ۵-۳-۳ مدل منطق فازی

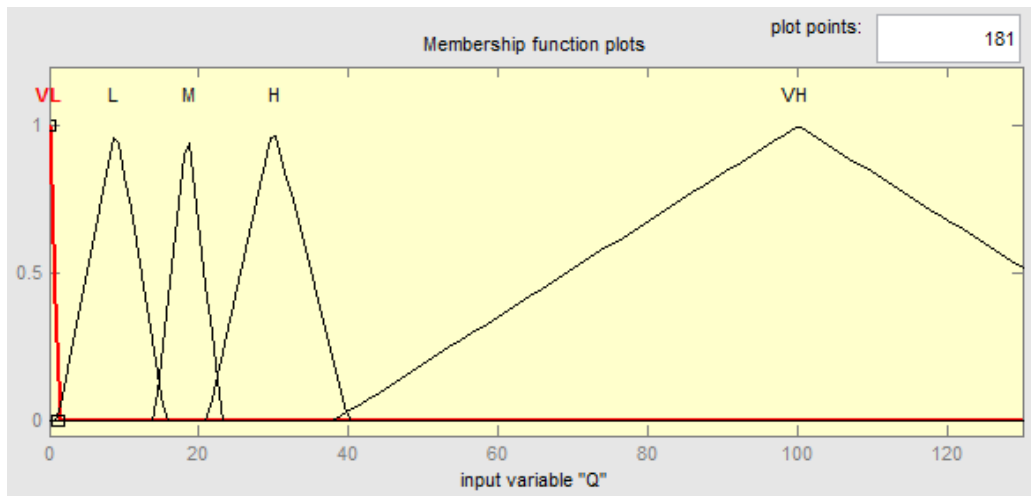
در این بخش با استفاده از روش منطق فازی، مدلی جدید برای پیش‌بینی شرایط پایداری سقف کارگاه باز زیرزمینی ارائه شده است. این مدل با استفاده از جعبه ابزار منطق فازی در نرم افزار Matlab نسخه ۱۳ توسعه یافته است. ساخت مدل فازی در این بخش همانند مدل فازی مربوط به سقف در ۴ مرحله انجام می‌شود.

### ۵-۳-۳-۱ فازی‌سازی پارامترهای ورودی و خروجی

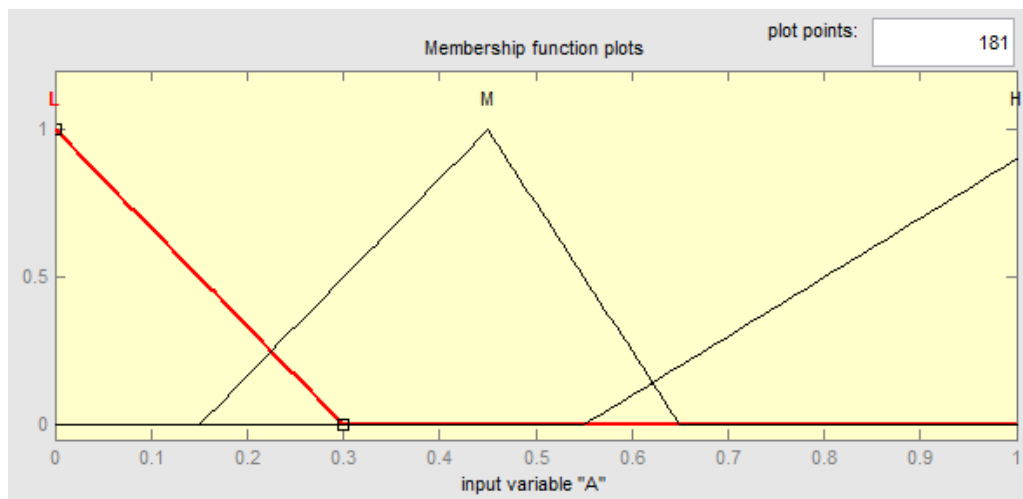
انواع مختلفی از توابع عضویت برای تبدیل پارامترهای ورودی و خروجی به شکل فازی موجود است. در این بخش از توابع عضویت مثلثی به دلیل سادگی و کارایی بالا در محاسبات رایانه‌ای استفاده شده است. شکل‌های گرافیکی توابع عضویت برای متغیرهای ورودی و خروجی در شکل‌های ۵-۱۴ تا ۵-۱۸ نشان داده شده است. برچسب‌های مربوط به کلاس‌های پایداری نیز در شکل ۵-۱۹ مشخص شده است. در این شکل‌ها متغیر زبانی استفاده شده در جدول ۵-۳ قبلاً توصیف شده است. باید ذکر شود که تعداد توابع عضویت و دامنه‌ی تغییرات آن‌ها برای پارامترهای گوناگون به صورت کیفی و بر اساس قضاوت مهندسی و درک مؤلف انتخاب شده است.



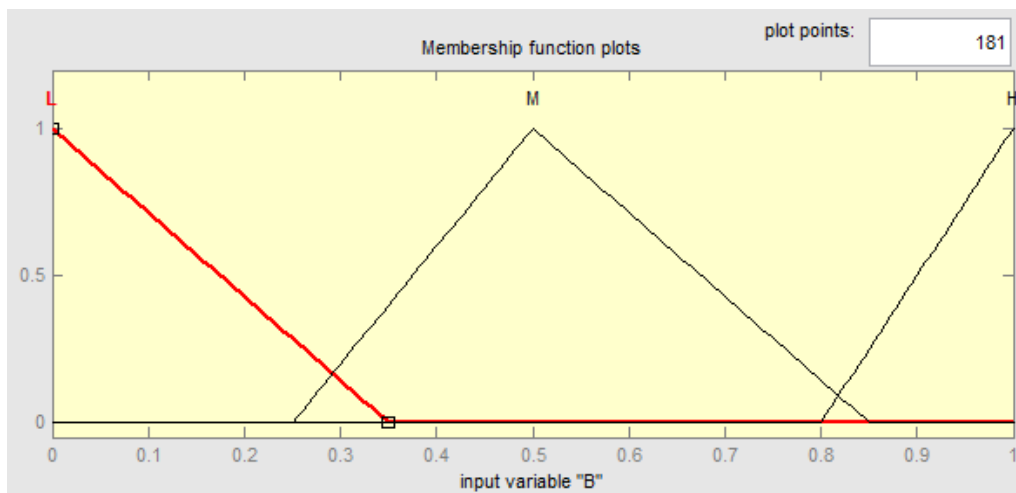
شکل ۵-۱۴: توابع عضویت برای پارامتر شعاع هیدرولیکی (HR)



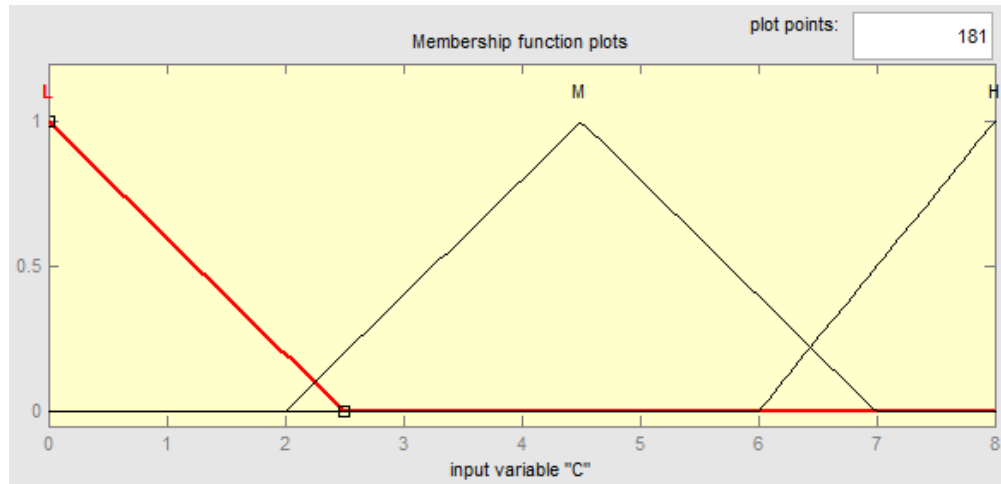
شکل ۵-۱۵: توابع عضویت برای پارامتر شاخص کیفی اصلاح شده تونل‌زنی ( $Q'$ )



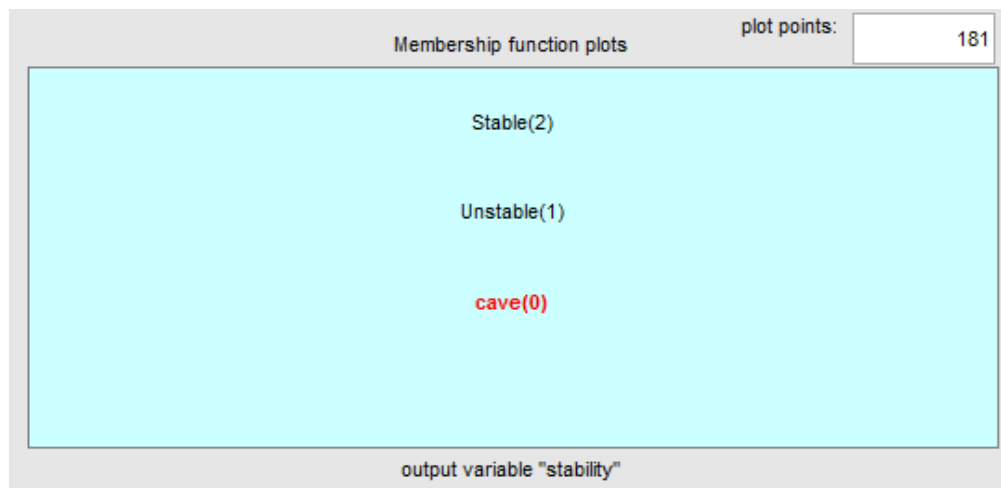
شکل ۵-۱۶: توابع عضویت برای پارامتر ضریب تنش سنگ (A)



شکل ۵-۱۷: توابع عضویت برای پارامتر ضریب درزه (B)



شکل ۵-۱۸: توابع عضویت برای پارامتر ضریب نیروی ثقل (C)



شکل ۵-۱۹: برچسب‌های مربوط به کلاس‌های پایداری

### ۵-۳-۳-۲ طراحی سیستم استنتاج فازی

در این تحقیق به دلیل این که پارامتر خروجی (شرایط پایداری سقف) به صورت مقادیر عددی صفر و یک است، سیستم استنتاج فازی سوگنو درجه صفر برای توسعه مدل فازی مورد نظر استفاده می‌شود. در این تحقیق مقادیر  $k_i$  در بخش پی‌آمد قوانین برای موارد پایدار برابر ۲، برای موارد تخریب شده ۰ و برای موارد ناپایدار ۱ در نظر گرفته شده است.

### ۵-۳-۳-۳ طراحی پایگاه قوانین

مرحله‌ی بعد در طراحی مدل فازی، ساخت قوانین اگر-آنگاه است. در واقع این قوانین برای ارائه‌ی ارتباط فازی



بین پارامترهای ورودی و خروجی مدل استفاده می‌شوند. در این تحقیق برای ایجاد پایگاه قوانین، تعداد ۸۹ قانون فازی نوشته شده است. این قوانین بر اساس داده‌های موجود در سری داده‌های آموزشی به گونه‌ای که تمامی حالت‌های ممکن را پوشش دهند، توسعه یافته‌اند. در جدول ۵-۱۵ بعضی از این قوانین فازی برای نمونه ارائه شده است.

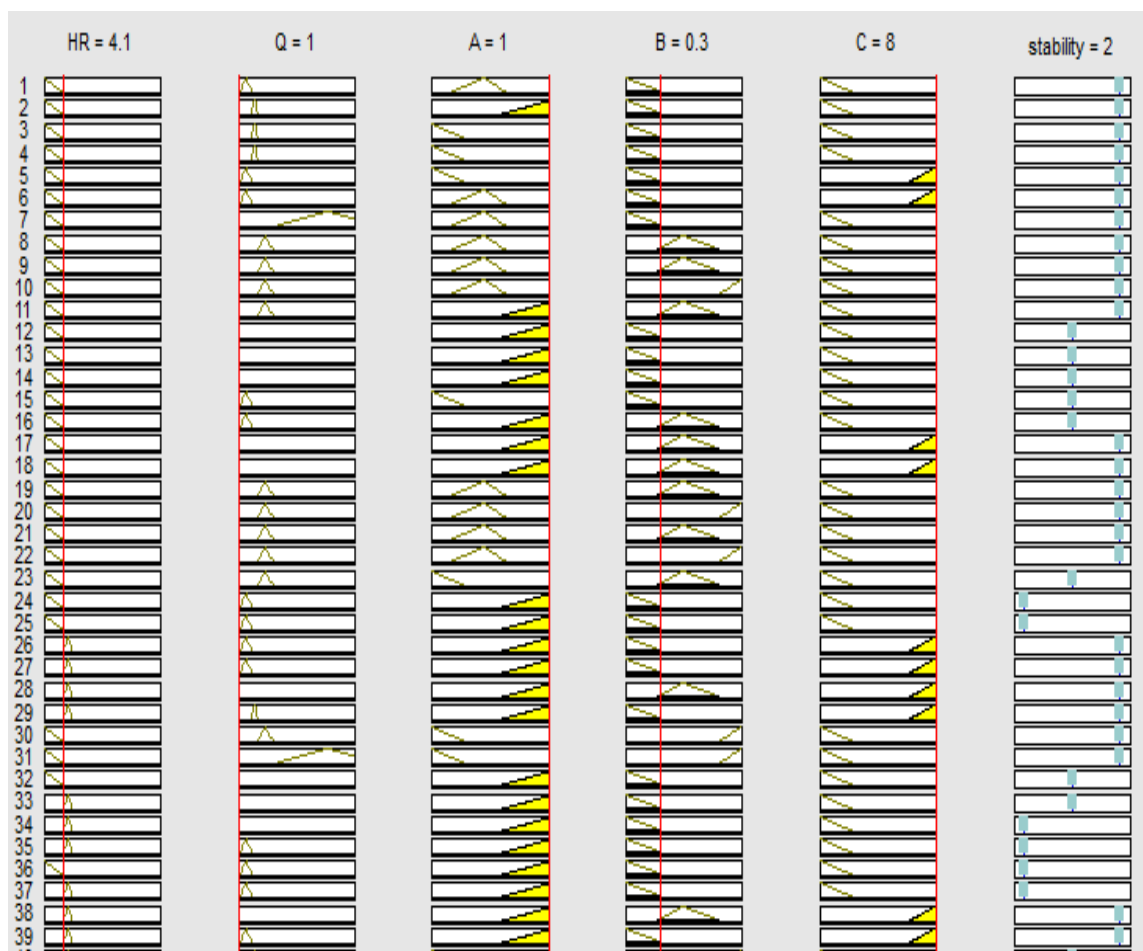
جدول ۵-۱۵: نمونه‌هایی از قوانین فازی به کار برده شده در مدل فازی پیشنهادی

خروجی	پارامترهای ورودی					شماره
	C	B	A	Q'	HR	قانون
Stable (2)	L	L	L	M	VL	۱
Stable (2)	H	L	M	L	VL	۲
Stable (2)	L	M	M	H	VL	۳
Unstable (1)	L	L	H	VL	VL	۴
Unstable (1)	L	M	H	L	VL	۵
Caved (0)	L	L	H	L	L	۶
Caved (0)	L	H	H	L	M	۷
Caved (0)	L	L	H	H	H	۸
Stable (2)	L	H	L	VH	VL	۹
Unstable (1)	L	M	L	H	L	۱۰

### ۵-۳-۳-۴ فرآیند غیر فازی‌سازی

در مرحله آخر باید با استفاده از فرآیند غیر فازی کردن نتایج به دست آمده از مدل فازی به مقادیر واقعی (قطعی) تبدیل شود. در این تحقیق از روش میانگین وزنی برای عملیات غیر فازی‌سازی استفاده شده است. در صورت وارد کردن داده‌های ورودی مناسب، مدل فازی ارائه شده در این بخش قادر به پیش‌بینی شرایط پایداری مربوط به سقف کارگاه است. به طور مثال همان گونه که در شکل ۵-۲۰ مشاهده می‌کنید، زمانی که شعاع هیدرولیکی برابر ۴/۹ متر، شاخص اصلاح شده کیفی تونل‌زنی برابر ۱/۵، ضریب تنش سنگ ۱، ضریب درزه ۰/۲ و ضریب نیروی ثقل ۸ باشد، خروجی پیش‌بینی شده توسط مدل برابر ۲ یا پایدار است که دقیقاً

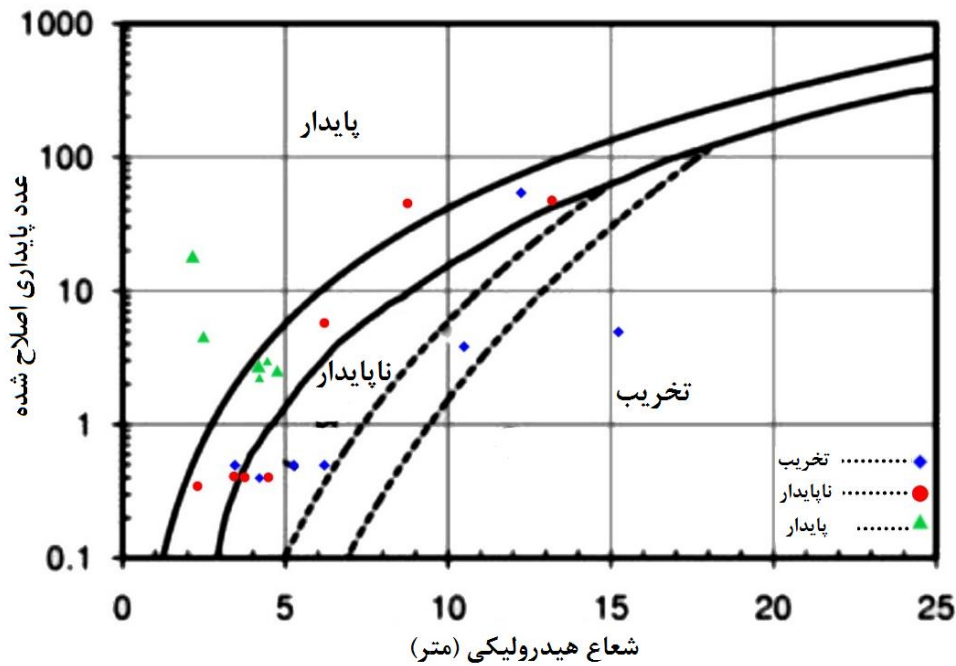
معادل مقدار واقعی آن است.



شکل ۵-۲۰: نحوه‌ی پیش‌بینی شرایط پایداری با استفاده از مدل فازی پیشنهادی

### ۵-۳-۴ پیش‌بینی با استفاده از روش نمودار پایداری

در این بخش برای ارزیابی عملکرد روش نمودار پایداری، ۲۱ مورد مربوط به آزمون مدل‌های توسعه یافته با استفاده از این روش و بر اساس شعاع هیدرولیکی و عدد پایداری مربوطه پیش‌بینی می‌شود. همان‌طور که در شکل ۵-۲۱ نشان داده شده، ۶ مورد از این موارد توسط نمودار به درستی پیش‌بینی و ۱۵ مورد نیز به درستی پیش‌بینی نشده است.



شکل ۵-۲۱: تخمین شرایط پایداری داده‌های آزمون سقف به وسیله‌ی نمودار پایداری پیشنهادی نیکسون

نتایج حاصل از شکل ۵-۲۱ به صورت مجزا در جدول ۵-۱۶ آورده شده است. در این جدول نمونه‌های مشاهده شده واقعی که بر اساس عدد پایداری و شعاع هیدرولیکی مربوطه در نمودار پایداری تخمین زده شده، بر اساس ۵ ناحیه موجود در نمودار بیان شده است و تنها موارد عیناً صحیح پیش‌بینی شده به عنوان موارد صحیح در نظر گرفته شده‌اند. ضمناً در ماتریس درهم ریختگی حاصل شده به علت عدم وجود موارد مربوط به ناحیه انتقالی پایدار - ناپایدار و نیز ناحیه انتقالی ناپایدار - تخریب شده در موارد مشاهده شده واقعی، سطر مربوط به این دو مورد برابر صفر در نظر گرفته شده است.

جدول ۵-۱۶: پیش‌بینی داده‌های آزمون سقف با استفاده از روش نمودار پایداری

پیش‌بینی شده					تعداد واقعی	مشاهده شده
تخریب شده	ناحیه انتقالی ناپایدار - تخریب شده	ناپایدار	ناحیه انتقالی پایدار - ناپایدار	پایدار		
۰	۰	۰	۴	۳	۷	پایدار
۰	۰	۰	۰	۰	۰	ناحیه انتقالی پایدار - ناپایدار

ادامه جدول ۵-۱۶: پیش‌بینی داده‌های آزمون سقف با استفاده از روش نمودار پایداری

پیش‌بینی شده					تعداد واقعی	مشاهده شده
تخریب شده	ناحیه انتقالی ناپایدار - تخریب شده	ناپایدار	ناحیه انتقالی پایدار - ناپایدار	پایدار		
۰	۰	۲	۴	۱	۷	ناپایدار
۰	۰	۰	۰	۰	۰	ناحیه انتقالی ناپایدار - تخریب شده
۱	۱	۳	۲	۰	۷	تخریب شده

همانطور که در ماتریس درهم ریختگی مشاهده می‌شود، از ۷ مورد مربوط به شرایط پایدار ۳ مورد به درستی پیش‌بینی شده است. همچنین از ۷ مورد شرایط ناپایدار ۲ مورد و ۷ مورد شرایط تخریب شده ۱ مورد درست پیش‌بینی شده است.

### ۵-۳-۵ ارزیابی عملکرد مدل‌های توسعه یافته

در این بخش نتایج به دست آمده از ۳ مدل رگرسیون منطقی، SVM و منطق فازی ارزیابی و کارآیی مدل‌ها با یکدیگر مقایسه می‌شوند. داده‌های جمع آوری شده از ۲۱ مورد مربوط به سقف کارگاه باز کانادا و غنا که در توسعه مدل‌ها نقشی نداشته‌اند، برای ارزیابی و کارآیی مدل‌ها استفاده می‌شوند. نتایج پیش‌بینی شده توسط مدل‌های رگرسیون منطقی، SVM و منطق فازی طی مراحل آموزش و آزمون به طور خلاصه به ترتیب در ماتریس‌های درهم ریختگی ۵-۱۷ تا ۵-۱۹ ارائه شده است. همچنین در ادامه با استفاده از نتایج حاصل از این ماتریس‌ها، معیارهای ارزیابی عملکرد تشریح شده در مدل دیواره محاسبه می‌شوند.

جدول ۵-۱۷: ماتریس درهم ریختگی مراحل آموزش و آزمون مدل رگرسیون منطقی

مرحله	شرایط پایداری	واقعی	پیش‌بینی شده		
			پایدار (۲)	تخریب شده (۰)	ناپایدار (۱)
	پایدار (۲)	۱۹	۱۹	۰	۰
آموزش	تخریب شده (۰)	۱۹	۰	۱۷	۲
	ناپایدار (۱)	۱۹	۰	۳	۱۶
	پایدار (۲)	۷	۷	۰	۰
آزمون	تخریب شده (۰)	۷	۰	۶	۱
	ناپایدار (۱)	۷	۲	۰	۵

جدول ۵-۱۸: ماتریس درهم ریختگی مراحل آموزش و آزمون مدل SVM

مرحله	شرایط پایداری	واقعی	پیش‌بینی شده		
			پایدار (۲)	تخریب شده (۰)	ناپایدار (۱)
	پایدار (۲)	۱۹	۱۹	۰	۰
آموزش	تخریب شده (۰)	۱۹	۰	۱۸	۱
	ناپایدار (۱)	۱۹	۰	۱	۱۸
	پایدار (۲)	۷	۷	۰	۰
آزمون	تخریب شده (۰)	۷	۰	۶	۱
	ناپایدار (۱)	۷	۰	۰	۷

جدول ۵-۱۹: ماتریس درهم ریختگی مراحل آموزش و آزمون مدل منطق فازی

مرحله	شرایط پایداری	واقعی	پیش‌بینی شده		
			پایدار (۲)	تخریب شده (۰)	ناپایدار (۱)
پایدار (۲)	پایدار (۲)	۱۹	۱۹	۰	۰
آموزش	تخریب شده (۰)	۱۹	۰	۱۷	۲
ناپایدار (۱)	ناپایدار (۱)	۱۹	۰	۰	۱۹
پایدار (۲)	پایدار (۲)	۷	۷	۰	۰
آزمون	تخریب شده (۰)	۷	۰	۶	۱
ناپایدار (۱)	ناپایدار (۱)	۷	۰	۱	۶

بر اساس این جدول‌ها، در مدل رگرسیون برای مراحل آموزش و آزمون به ترتیب ۵۲ و ۱۸ مورد از ۵۷ مورد و ۲۱ مورد واقعی پیش‌بینی به صورت صحیح انجام شده است. این مقادیر برای مدل SVM به ترتیب ۵۵ و ۲۰ مورد است. همچنین مدل فازی نیز در مرحله آموزش دارای ۵۵ مورد پیش‌بینی صحیح و در مرحله آزمون دارای ۱۹ مورد پیش‌بینی صحیح است.

### ۵-۳-۶ ارزیابی عملکرد مدل‌ها با استفاده از شاخص‌های عملکرد

برای مقایسه کارایی مدل‌های رگرسیون منطقی، SVM و فازی از معیارهایی که قبلاً بیان شد یعنی دقت، حساسیت، اختصاصی بودن و معیار کاپا استفاده شده است. در جدول ۵-۲۰ این مقادیر پس از محاسبه بیان شده‌اند، که این مقادیر بیانگر کارایی بهتر مدل SVM نسبت به مدل فازی و نیز بهتر بودن مدل فازی نسبت به مدل رگرسیون منطقی است.

جدول ۵-۲۰: شاخص‌های ارزیابی کارآیی مدل‌های پیشنهادی

مدل	مرحله	دقت	نرخ مثبت واقعی	نرخ مثبت کاذب	آماره کاپا
رگرسیون منطقی	آموزش	۰/۹۱۲	۰/۸۹۱	۰/۰۴۳	۰/۸۷
	آزمون	۰/۸۵۷	۰/۸۳۶	۰/۰۷	۰/۷۸۶
SVM	آموزش	۰/۹۶۵	۰/۹۴۸	۰/۰۱۷	۰/۹۳
	آزمون	۰/۹۵۲	۰/۹۳۶	۰/۰۲۲	۰/۹۱۴
فازی	آموزش	۰/۹۶۵	۰/۹۴۸	۰/۰۱۷	۰/۹۳
	آزمون	۰/۹۰۴	۰/۸۹۲	۰/۰۴۵	۰/۸۵۷
نمودار پایداری	آزمون	۰/۲۸۶	۰/۲۴۲	۰/۳۴	۰/۱۵۱

بر اساس نتایج به دست آمده از مراحل آموزش و آزمون مدل‌های توسعه یافته می‌توان نتیجه گرفت که مدل SVM به لحاظ معیارهای عملکرد در دو مرحله آموزش و آزمون دارای عملکرد بهتری نسبت به دو مدل دیگر است. همچنین مدل فازی نیز به لحاظ عملکرد از مدل رگرسیون منطقی مناسب‌تر است. با مقایسه نتایج حاصل از آزمون مدل‌های توسعه یافته و روش نمودار پایداری می‌توان نتیجه گرفت که مدل‌های توسعه یافته دارای عملکرد بهتری نسبت به روش نمودار پایداری برای موارد مربوط به سقف در کارگاه باز زیرزمینی هستند. همچنین با توجه به اختلاف زیاد موارد آزمون مدل‌های توسعه یافته و نمودار پایداری می‌توان نتیجه گرفت که تفکیک موارد مربوط به سقف از دیواره می‌تواند سبب بهبود پیش‌بینی توسط نمودار پایداری برای موارد مربوط به دیواره‌ها در مقایسه با سقف شود.

## ۵-۴ نتیجه‌گیری

در این فصل ابتدا مدل‌هایی در دو بخش برای پیش‌بینی شرایط پایداری دیواره‌ها و سقف در کارگاه باز زیرزمینی، به وسیله‌ی روش‌های رگرسیون منطقی، SVM و منطق فازی توسعه داده شد. سپس عملکرد این مدل‌ها به وسیله‌ی شاخص‌هایی با نمودار پایداری مقایسه شد. بر اساس نتایج به دست آمده از عملکرد مدل‌های توسعه یافته مربوط به دیواره و مقایسه آن‌ها در دو مرحله آموزش و آزمون نتیجه گرفته می‌شود که مدل SVM در بین مدل‌ها به لحاظ عملکرد مناسب‌ترین مدل به شمار می‌رود. پس از این مدل به ترتیب مدل منطق فازی و رگرسیون منطقی به لحاظ عملکرد در جایگاه‌های بعدی قرار می‌گیرند. همچنین با مقایسه عملکردهای مرحله آزمون مدل‌های توسعه یافته و روش نمودار پایداری نیز نتیجه گرفته می‌شود که مدل‌های توسعه یافته دارای عملکرد بهتری نسبت به روش نمودار پایداری در تخمین این موارد هستند. در مدل‌های توسعه یافته برای داده‌های مربوط به سقف کارگاه‌ها نیز با مقایسه عملکرد این مدل‌ها در مراحل آموزش و آزمون نتیجه گرفته می‌شود که مدل SVM دارای بهترین عملکرد است. پس از مدل SVM، مدل منطق فازی و رگرسیون منطقی به ترتیب دارای عملکردهای بهتر می‌باشند. مقایسه عملکرد مرحله آزمون مدل‌های توسعه یافته سقف و نمودار پایداری نیز نشان دهنده بهتر بودن عملکرد مدل‌های توسعه یافته در مقایسه با روش نمودار پایداری است.



# فصل هشتم

نتیجہ گیری و پیشہ ندادہ

## ۶-۱ نتیجه‌گیری

وضعیت پایداری سطوح کارگاه‌های باز زیرزمینی و ارزیابی آن‌ها مهمترین مسأله در طراحی و ایمنی این نوع روش استخراج است. این مسأله به دلیل نقایص موجود در روش نمودار پایداری یکی از مسائل پیچیده در معدن‌کاری زیرزمینی محسوب می‌شود، که به پارامترهای متعددی وابسته است. بنابراین پیش‌بینی وضعیت پایداری کارگاه‌ها با در نظرگیری تمامی عوامل مؤثر کاری دشوار است. در این تحقیق سه مدل به طور مجزا برای دیواره‌ها و سقف کارگاه‌های باز زیرزمینی به منظور پیش‌بینی وضعیت پایداری کارگاه‌ها توسعه یافته است: (۱) مدل آماری بر اساس تحلیل رگرسیون منطقی (۲) مدل محاسبات نرم ماشین بردار پشتیبان (۳) مدل محاسبات نرم منطق فازی. این مدل‌ها بر اساس داده‌های واقعی جمع‌آوری شده از معادن کارگاه باز کشورهای کانادا و غنا توسعه یافته است. هر سه مدل با استفاده از پارامترهای تأثیر گذار بر پایداری کارگاه همچون شعاع هیدرولیکی، ضریب تنش سنگ، ضریب درزه، ضریب نیروی ثقل و شاخص اصلاح شده تونل‌زنی به عنوان پارامترهای ورودی، وضعیت پایداری کارگاه را پیش‌بینی می‌کنند. همچنین به منظور ارزیابی روش نمودار پایداری و مقایسه مدل‌های توسعه یافته با روش نمودار پایداری، موارد مربوط به آزمون مدل‌ها با استفاده از این روش تخمین زده شده و نتایج حاصله با یکدیگر مقایسه شده است. بر این اساس نتایج زیر حاصل شده است:

- ۱- بر اساس نتایج به دست آمده در مراحل آموزش و آزمون مدل‌ها نتیجه گرفته شد که مدل‌های توسعه یافته مدل‌های مناسب و کاربردی برای پیش‌بینی شرایط پایداری هستند و می‌توانند به طور مؤثری با کمترین میزان خطا برای پیش‌بینی وضعیت پایداری کارگاه‌ها به کار برده شوند. باید ذکر شود که نتایج به دست آمده از این مدل‌ها را می‌توان به عنوان هشدار اولیه مد نظر قرار داد و برای اطمینان بیشتر قطعاً بررسی‌های بیشتر لازم و ضروری است.
- ۲- مقایسه عملکرد سه مدل با یکدیگر مشخص کرد که مدل SVM در مقایسه با مدل منطق فازی و این مدل نیز نسبت به مدل رگرسیون منطقی موفق‌تر و پیش‌بینی موفق‌تری از خود

نشان می‌دهد. بر این اساس در مدل‌های توسعه یافته برای شرایط پایداری دیواره‌های کارگاه، مدل SVM با دقت پیش‌بینی برابر با  $90/5$  درصد دارای بهترین عملکرد بود. پس از این مدل به ترتیب مدل منطق فازی و مدل رگرسیون منطقی با دقت پیش‌بینی برابر با  $85/7$  و  $80/9$  درصد دارای عملکرد مناسبی بودند.

۳- در مدل‌های توسعه یافته برای شرایط پایداری سقف نیز مدل SVM با دقت پیش‌بینی  $95/2$  درصد بهترین عملکرد را دارا بود. پس از این مدل نیز مدل‌های منطق فازی و رگرسیون منطقی با دقتی برابر با  $90/5$  و  $85/7$  درصد دارای عملکرد مناسبی در پیش‌بینی شرایط پایداری سقف کارگاه بودند.

۴- از مزایای مدل SVM و فازی در مقایسه با مدل رگرسیون می‌توان به سرعت بالا و عدم نیاز به حل معادلات پیچیده ریاضی اشاره کرد. مقایسه نتایج حاصل از آزمون مدل‌های توسعه یافته با روش نمودار پایداری با استفاده از معیارهای ارزیابی عملکرد نیز در هر دو بخش دیواره و سقف حاکی از عملکرد بهتر مدل‌های توسعه یافته در پیش‌بینی این موارد نسبت به روش نمودار پایداری است.

۵- با توجه به تفاوت نتیجه مربوط به عملکرد روش نمودار پایداری در دو مدل دیواره و سقف می‌توان نتیجه گرفت که ارائه مدل‌های مجزا برای دیواره‌ها و سقف می‌تواند در راستای پیش‌بینی بهتر شرایط پایداری مفید واقع شود.

قابل ذکر است که اعتبار مدل‌های پیشنهادی به داده‌هایی که برای توسعه مدل‌ها به کار رفته محدود می‌شود.

## ۲-۶ پیشنهادها

- مدل‌های رگرسیون منطقی، SVM و فازی بر اساس داده‌های جمع‌آوری شده از معادن کارگاه باز کشورهای کانادا و غنا توسعه یافته‌اند و تنها برای کاربرد در این مناطق مناسب هستند. لازمی توسعه مدل‌های جامع، جمع‌آوری داده‌های فراوان از تمامی معادن کارگاه باز در سایر

مناطق جهان است. لذا پیشنهاد می‌شود در ادامه با تکمیل پایگاه داده‌ها، مدل‌های جامع‌تری برای ارزیابی شرایط پایداری در این معادن توسعه یابد.

- علاوه بر پارامترهای در نظر گرفته شده در این تحقیق، بر اساس مطالعات صورت گرفته پارامترهای دیگری همچون تأثیر انفجار، زمان و گسل نیز بر پایداری کارگاه‌ها تأثیر گذار بیان شده‌اند. لذا پیشنهاد می‌شود در آینده تأثیر همزمان این پارامترها بر وضعیت پایداری کارگاه‌های باز نیز مورد بررسی قرار گیرد و در مدل‌های جدید از این پارامترها نیز استفاده شود.
- توصیه می‌شود این مدل‌ها به طور مستقیم برای سایر معادن کارگاه باز به کار برده نشود، بلکه می‌توان برای سایر معادن با ویژگی‌های مشابه نیز چنین مدل‌هایی توسعه داد. همچنین مدل‌های توسعه یافته را می‌توان با جمع‌آوری داده‌های بیشتر در آینده بهبود بخشید.
- توصیه می‌شود مدل‌هایی مشابه برای شرایط نگهداری شده کارگاه‌های باز زیرزمینی ارائه شود.

منابع و مراجع

پیره‌ادی، ا.، ابراهیم آبادی، آ.، صمدی، م.، (۱۳۹۳)، "ارائه مدلی غیر خطی برای پیش بینی عملکرد رودهدرها با استفاده از روش ماشین بردار پشتیبان"، کنفرانس ملی علوم معدنی، ساری، سازمان نظام مهندسی معدن استان مازندران.

جبین پور، ع.، یوری شهرضا، م.، (۱۳۹۰)، "مقایسه راهکارهای طبقه‌بندی Mathews و Laubscher در پیش‌بینی قابلیت تخریب توده سنگ"، سی امین گردهمایی علوم زمین، تهران، سازمان زمین شناسی و اکتشافات معدنی کشور.

سعیدی، غ.، رضایی، ب.، شهریار، ک.، بخت‌آور، ع.، (۱۳۸۶)، "پیش‌بینی رقت زغال با باطله در روش استخراج جبهه کار طولانی در معادن زغالسنگ کرمان با استفاده از روش‌های تجربی"، سومین کنفرانس مکانیک سنگ ایران، تهران، دانشگاه صنعتی امیرکبیر.

صاحبی، م.، افتخاری، د.، کاظمی نجف آبادی، ا.، (۱۳۹۱)، "طراحی نرم افزار Rock Dil 1.0 جهت محاسبه میزان رقت در معادن"، چهارمین کنفرانس مهندسی معدن ایران، تهران، انجمن مهندسی معدن، دانشگاه تهران.

عطایی، م.، (۱۳۹۴)، "روش‌های با نگهداری در معدن کاری زیرزمینی"، چاپ اول، انتشارات دانشگاه صنعتی شاهرود.

قاسمی، ا.، مختاری، ا.، فتحیان‌پور، ن.، (۱۳۹۱)، "جداسازی ماده معدنی از باطله بر اساس داده‌های ژئوفیزیکی با به کارگیری تکنیک SVM"، اولین کنفرانس فناوری‌های معدن کاری ایران، یزد، دانشگاه یزد.

قاسمی ورنوسفادرانی، ا.، (۱۳۹۳)، رساله دکتری، "توسعه مدل‌هایی به منظور ارزیابی پایداری سراسری و موضعی در معادن زغالسنگ اتاق و پایه" دانشکده مهندسی معدن، نفت و ژئوفیزیک، دانشگاه صنعتی شاهرود.

مودتی، م.، مجدی‌فر، س.، رنجبر، ح.، نظام آبادی‌پور، ح.، (۱۳۹۱)، "نقشه برداری دگرسانی هیدروترمال با استفاده از الگوریتم ماشین بردار پشتیبان"، چهارمین کنفرانس مهندسی معدن ایران، تهران، انجمن مهندسی معدن، دانشگاه تهران.

Agresti, Alan. "Logistic regression." *An Introduction to Categorical Data Analysis, Second Edition* (2007): 99-136..

Amini, H., Gholami, R., Monjezi, M., Torabi, S. R., & Zadhesh, J. (2012). "Evaluation of flyrock phenomenon due to blasting operation by support vector machine". *Neural Computing and Applications*, 21(8), 2077-2085.

Ataei, M., Jamshidi, M., Sereshki, F., & Jalali, S. M. E. (2008). "Mining method selection by AHP approach". *Journal of the Southern African Institute of Mining and Metallurgy*, 108(12), 741-749.

Ataei, M., & Kamali, M. (2012). "Prediction of blast-induced vibration by adaptive neuro-fuzzy inference system in Karoun 3 power plant and dam". *Journal of Vibration and Control*, 1077546312444769.

Azadeh, A., Osanloo, M., & Ataei, M. (2010). "A new approach to mining method selection based on modifying the Nicholas technique". *Applied Soft Computing*, 10(4), 1040-1061.

- Azimi, Y., Osanloo, M., Aakbarpour-Shirazi, M., & Bazzazi, A. A. (2010). "Prediction of the blastability designation of rock masses using fuzzy sets". *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, 47(7), 1126-1140.
- Bahri, N. A., Ebrahimi, F. M. A., & Reza, S. G. (2015). "A fuzzy logic model to predict the out-of-seam dilution in longwall mining". *International Journal of Mining Science and Technology*, 25(1), 91-98.
- Barton, N., Lien, R., & Lunde, J. (1974). "Engineering classification of rock masses for the design of tunnel support". *Rock mechanics*, 6(4), 189-236.
- Bascetin, A., & Kesimal, A. (1999). "The study of a fuzzy set theory for the selection of an optimum coal transportation system from pit to the power plant". *International Journal of Surface Mining, Reclamation and Environment*, 13(3), 97-101.
- Bawden, W., Sauriol, G., Milne, D., & Germain, P. (1989). "Practical rock engineering slope design case histories from Noranda Minerals". *CIM Bulletin*, 82(927), 37-45.
- Bawden, W. F. (1993). "The use of rock mechanics principles in Canadian underground hard rock mine design". *Comprehensive Rock Engineering: Principles, Practice and Projects*, 5, 247-90.
- Behnia, D., Ahangari, K., Goshtasbi, K., Moeinossadat, S. R., & Behnia, M. (2016). "Settlement modeling in central core rockfill dams by new approaches". *International Journal of Mining Science and Technology*.
- Bewick, R. P., & Kaiser, P. K. (2009). "Numerical assessment of factor B in Mathews' method for open slope design". In *Proceedings of the 3 rd CANUS Rock Mechanics Symposium*.
- Bieniawski, Z. T. (1973). "Engineering classification of jointed rock masses," *Trans. South African Institute Civil Engineering*, P239–254.
- Bieniawski, Z. T. (1999). "Rock Mass Rating (RMR)". *Rock Mass Classification*, 34-46.
- Bitarafan, M. R., & Ataei, M. (2004). "Mining method selection by multiple criteria decision making tools". *The Journal of the South African Institute of Mining and Metallurgy*, 104(9), 493-498.
- Capes, G. W. (2009). "Open slope hangingwall design based on general and detailed data collection in unfavourable hangingwall conditions". Ph.D thesis. University of Saskatchewan.
- Carranza, E. J. M., & Hale, M. (2001). "Logistic regression for geologically constrained mapping of gold potential, Baguio district, Philippines". *Exploration and Mining Geology*, 10(3), 165-175.
- Chang, C.C., Lin, C.J., (2001). "LIBSVM: a Library for Support Vector Machines". <<http://www.csie.ntu.edu.tw/~cjlin/libsvm/>>
- Chatterjee, S. Hadi, A.S., (2006). "Regression analysis by example". John Wiley & Sons.

- Chen, G., & Pham, T. T. (2000). "Introduction to fuzzy sets, fuzzy logic, and fuzzy control systems". CRC press.
- Cheng, J., & Yang, S. (2012). "Data mining applications in evaluating mine ventilation system". *Safety Science*, 50(4), 918-922.
- Choi, J. K., Kim, K. D., Lee, S., & Won, J. S. (2010). "Application of a fuzzy operator to susceptibility estimations of coal mine subsidence in Taebaek City, Korea". *Environmental Earth Sciences*, 59(5), 1009-1022.
- Clark, L., & Pakalnis, R. (1997). "An empirical design approach for estimating unplanned dilution from open stope hangingwalls and footwalls". 99th CIM-AGM. Vancouver, Cd-Rom.
- Cortes, C., & Vapnik, V. (1995). "Support-vector networks". *Machine learning*, 20(3), 273-297.
- Das, I., Sahoo, S., van Westen, C., Stein, A., & Hack, R. (2010). "Landslide susceptibility assessment using logistic regression and its comparison with a rock mass classification system, along a road section in the northern Himalayas (India)". *Geomorphology*, 114(4), 627-637.
- Denby, B., & Schofield, D. (1990). "Applications of expert systems in equipment selection for surface mine design". *International Journal of Surface Mining, Reclamation and Environment*, 4(4), 165-171.
- Diederichs, M., & Kaiser, P. (1999). "Tensile strength and abutment relaxation as failure control mechanisms in underground excavations". *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, 36(1), 69-96.
- Deka, P. C. (2014). "Support vector machine applications in the field of hydrology: a review". *Applied Soft Computing*, 19, 372-386.
- Dindarloo, S. R. (2016). "Support vector machine regression analysis of LHD failures". *International Journal of Mining, Reclamation and Environment*, 30(1), 64-69.
- Dong, J. J., Tung, Y. H., Chen, C. C., Liao, J. J., & Pan, Y. W. (2011). "Logistic regression model for predicting the failure probability of a landslide dam". *Engineering Geology*, 117(1), 52-61.
- Dong, L., Wesseloo, J., Potvin, Y., & Li, X. (2016). "Discrimination of mine seismic events and blasts using the Fisher Classifier, Naive Bayesian Classifier and logistic regression". *Rock Mechanics and Rock Engineering*, 49(1), 183-211.
- Ercanoglu, M., & Temiz, F. A. (2011). "Application of logistic regression and fuzzy operators to landslide susceptibility assessment in Azdavay (Kastamonu, Turkey)". *Environmental Earth Sciences*, 64(4), 949-964.
- Fişne, A., Kuzu, C., & Hüdaverdi, T. (2011). "Prediction of environmental impacts of quarry blasting operation using fuzzy logic". *Environmental monitoring and*



- assessment*, 174(1-4), 461-470.
- Gao, L., & Li, X. B. (2015). "Utilizing partial least square and support vector machine for TBM penetration rate prediction in hard rock conditions". *Journal of Central South University*, 22, 290-295.
- Germain, P., & Hadjigeorgiou, J. (1998). "Influence of stope geometry on mining performance". Proc. CIM-AGM, Montreal, CD-ROM.
- Ghasemi, E., Ataei, M., & Shahriar, K. (2014). "An intelligent approach to predict pillar sizing in designing room and pillar coal mines". *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, 65, 86-95.
- Grenon, M., & Hadjigeorgiou, J. (2003). "Open stope stability using 3D joint networks". *Rock Mechanics and Rock Engineering*, 36(3), 183-208.
- Grima, M. A., & Babuška, R. (1999). "Fuzzy model for the prediction of unconfined compressive strength of rock samples". *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, 36(3), 339-349.
- Gunn, S. R. (1998). "Support vector machines for classification and regression". *ISIS technical report*, 14.
- Hadjigeorgiou, J., Leclair, J., & Potvin, Y. (1995). "An update of the stability graph method for open stope design". *CIM Rock Mechanics and Strata Control session*, Halifax, Nova Scotia, 14-18.
- Hamidi, J. K., Shahriar, K., Rezai, B., & Bejari, H. (2010). "Application of fuzzy set theory to rock engineering classification systems: an illustration of the rock mass excavability index". *Rock mechanics and rock engineering*, 43(3), 335-350.
- Hamrin, H., Hustrulid, W., & Bullock, R. (2001). "Underground mining methods and applications". *Underground Mining Methods: Engineering Fundamentals and International Case Studies*, 3-14.
- Hasanipanah, M., Monjezi, M., Shahnazar, A., Jahed Armaghani, D., & Farazmand, A. (2015). "Feasibility of indirect determination of blast induced ground vibration based on support vector machine". *Measurement*, 75, 289-297.
- Hilbe, J. M. (2009). "Logistic regression models". CRC press.
- Hsu, C. W., & Lin, C. J. (2002). "A comparison of methods for multiclass support vector machines". *IEEE transactions on Neural Networks*, 13(2), 415-425.
- Huang, T. M., Kecman, V., & Kopriva, I. (2006). "Kernel based algorithms for mining huge data sets (Vol. 1)". Heidelberg: Springer.
- Hustrulid, W. A., Hustrulid, W. A., & Bullock, R. C. (2001). "Underground mining methods: Engineering fundamentals and international case studies". SME.
- Hutchinson, D. J., & Diederichs, M. S. (1996). "Cablebolting in underground mines". BiTech Publishers.

- Iphar, M., & Goktan, R. M. (2006). "An application of fuzzy sets to the Diggability Index Rating Method for surface mine equipment selection". *International journal of rock mechanics and mining sciences*, 43(2), 253-266.
- Jalalifar, H., Mojedifar, S., & Sahebi, A. A. (2014). "Prediction of rock mass rating using fuzzy logic and multi-variable RMR regression model". *International Journal of Mining Science and Technology*, 24(2), 237-244.
- Jamshidi, A., Yazdani-Chamzini, A., Yakhchali, S. H., & Khaleghi, S. (2013). "Developing a new fuzzy inference system for pipeline risk assessment". *Journal of loss prevention in the process industries*, 26(1), 197-208.
- Jang, H., & Topal, E. (2014). "A review of soft computing technology applications in several mining problems". *Applied Soft Computing*, 22, 638-651.
- Jang, J. S. R., Sun, C. T., & Mizutani, E. (1997). "Neuro-fuzzy and soft computing; a computational approach to learning and machine intelligence", Englewood Cliffs, NJ.
- Jian, Z., LI, X.-b., SHI, X.-z., Wei, W., & WU, B.-b. (2011). "Predicting pillar stability for underground mine using Fisher discriminant analysis and SVM methods". *Transactions of Nonferrous Metals Society of China*, 21(12), 2734-2743.
- Jordá-Bordehore, L., Martín-García, R., Alonso-Zarza, A. M., Jordá-Bordehore, R., & Romero-Crespo, P. L. (2015). "Stability assessment of shallow limestone caves through an empirical approach: application of the stability graph method to the Castañar Cave study site (Spain)". *Bulletin of Engineering Geology and the Environment*, 1-15.
- Karray, F. O., & De Silva, C. W. (2004). "Soft computing and intelligent systems design: theory, tools, and applications". Pearson Education.
- Khandelwal, M., & Kankar, P. (2011). "Prediction of blast-induced air overpressure using support vector machine". *Arabian Journal of Geosciences*, 4(3-4), 427-433
- Kim, K. D., Lee, S., Oh, H. J., Choi, J. K., & Won, J. S. (2006). "Assessment of ground subsidence hazard near an abandoned underground coal mine using GIS". *Environmental Geology*, 50(8), 1183-1191.
- Laubscher, D. H. and Taylor, H. W. (1976). "The importance of geomechanics classification of jointed rock masses in mining operations". In Z. T. Bieniawski (ed.), *Proceedings of the Symposium on Exploration for Rock Engineering*, Johannesburg, South Africa, 1–5 November, pp. 119–128. Cape Town, South Africa: A.A. Balkema.
- Law, M. (2006). "A simple introduction to support vector machines". *Lecture for CSE*, 802.
- Li, W. X., Dai, L. F., Hou, X. B., & Lei, W. (2007). "Fuzzy genetic programming method for analysis of ground movements due to underground mining". *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, 44(6), 954-961.
- Liu, K. Y., Qiao, C. S., & Tian, S. F. (2004). "Design of tunnel shotcrete-bolting support

- based on a support vector machine". *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, 41, 768-773.
- LIU, Z., JIN, D., & LIU, Q. (2009). "Prediction of water inrush through coal floor based on binary logistic regression model and CART". *Coal Geology & Exploration*, 1, 013.
- Longjun, D., Xibing, L., Ming, X., & Qiyue, L. (2011). "Comparisons of random forest and support vector machine for predicting blasting vibration characteristic parameters". *Procedia Engineering*, 26, 1772-1781.
- Lv, P., Wu, S., & Jin, W. (2011). "Real-time Monitoring and Prediction Method to Slope Displacement in Transition from Open Pit to Underground".
- Maiti, J., & Bhattacharjee, A. (2001). "Predicting accident susceptibility: a logistic regression analysis of underground coal mine workers". *JOURNAL-SOUTH AFRICAN INSTITUTE OF MINING AND METALLURGY*, 101(4), 203-208.
- Mathews, K. E., Hoek, E., Wyllie, D. C., & Stewart, S. B. V. (1981). "Prediction of stable excavation spans at depths below 1000m in hard rock mines". CANMET Report, DSS Serial No. OSQ80-00081.
- Mawdesley, C. A. (2002). "Predicting rock mass cavability in block caving mines", Ph.D thesis. Queensland: University of Queensland.
- Mawdesley, C. A. (2004). "Using logistic regression to investigate and improve an empirical design method". *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, 41, 756-761.
- Melo, M., & Pinto, C. L. L. (2014). "Potvin stability graph applied to brazilian geomechanic environment". *Rem: Revista Escola de Minas*, 67(4), 413-419.
- Merler, S., & Jurman, G. (2006). "Terminated ramp-support vector machines: a nonparametric data dependent kernel". *Neural Networks*, 19(10), 1597-1611.
- Milne, D., Pakalnis, R., & Lunder, P. (1996). "Approach to the quantification of hanging-wall behaviour". *Transactions of the Institution of Mining and Metallurgy. Section A. Mining Industry*, 105.
- Mitri, H. S., Hughes, R., & Zhang, Y. (2011). "New rock stress factor for the stability graph method". *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, 48(1), 141-145.
- Mohammadi, M., Hossaini, M. F., Mirzapour, B., & Hajiantilaki, N. (2015). "Use of fuzzy set theory for minimizing overbreak in underground blasting operations—A case study of Alborz Tunnel, Iran". *International Journal of Mining Science and Technology*, 25(3), 439-445.
- Mohamadnejad, M., Gholami, R., & Ataei, M. (2012). "Comparison of intelligence science techniques and empirical methods for prediction of blasting vibrations". *Tunnelling and Underground Space Technology*, 28, 238-244.
- Mohammadnejad, M., Gholami, R., Sereshki, F., & Jamshidi, A. (2013). "A new

- methodology to predict backbreak in blasting operation". *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, 60, 75-81.
- Naghadehi, M. Z., Mikaeil, R., & Ataei, M. (2009). "The application of fuzzy analytic hierarchy process (FAHP) approach to selection of optimum underground mining method for Jajarm Bauxite Mine, Iran". *Expert Systems with Applications*, 36(4), 8218-8226.
- Nickson, S. D. (1992). "Cable support guidelines for underground hard rock mine operations". University of British Columbia.
- Nguyen, V. (1985). "Some fuzzy set applications in mining geomechanics", *Int. J. Rock Mech. Min. Sci. Geomech. Abstracts* 369–379 (Elsevier).
- Ohlmacher, G. C., & Davis, J. C. (2003). "Using multiple logistic regression and GIS technology to predict landslide hazard in northeast Kansas", USA. *Engineering Geology*, 69(3), 331-343.
- Onder, S. (2013). "Evaluation of occupational injuries with lost days among opencast coal mine workers through logistic regression models". *Safety science*, 59, 86-92.
- Palei, S. K., & Das, S. K. (2009). "Logistic regression model for prediction of roof fall risks in bord and pillar workings in coal mines": An approach. *Safety Science*, 47(1), 88-96.
- Palmstrom, A. and E. Broch (2006). "Use and misuse of rock mass classification systems with particular reference to the Q-system". *Tunnelling and Underground Space Technology* 21(6): 575-593.
- Paoliello, M. M. B., De Capitani, E. M., da Cunha, F. G., Matsuo, T., de Fátima Carvalho, M., Sakuma, A., & Figueiredo, B. R. (2002). "Exposure of children to lead and cadmium from a mining area of Brazil". *Environmental Research*, 88(2), 120-128.
- Papaioanou, A., & Suorineni, F. T. (2015). "Development of a Generalised Dilution-based Stability Graph for Open Stope Design". *Journal of Research Projects Review*, 27.
- Paul, P. S. (2009). "Predictors of work injury in underground mines—an application of a logistic regression model". *Mining Science and Technology (China)*, 19(3), 282-289.
- Petry, F. E., & Zhao, L. (2009). "Data mining by attribute generalization with fuzzy hierarchies in fuzzy databases". *Fuzzy Sets and Systems*, 160(15), 2206-2223.
- Potvin, Y. (1988). "Empirical open stope design in Canada". Ph.D thesis. University of British Columbia, Vancouver.
- Potvin, Y., Hudyma, M., & Miller, H. (1989). "Design guidelines for open stope support". *CIM bulletin*, 82(926), 53-62.
- Potvin, Y., & Milne, D. (1992). "Empirical cable bolt support design". Paper presented at the Rock Support in mining and underground construction, proc. int. symp. on rock support.

- Potvin, Y., & Hadjigeorgiou, J. (2001). "The stability graph method for open-stope design". *Underground Mining Methods: Engineering Fundamentals and International Case Studies*. Society of Mining, Metallurgy and Exploration, 8307 Shaffer Parkway, Littleton, CO 80127, USA, 2001., 513-520.
- Potvin Y. (2014). "The modified stability graph method, some 30 years later". In: *Proceedings of 1st international conference on applied empirical design methods in mining*. Lima, Peru.
- Qiu, D., Li, S., Zhang, L., & Xue, Y. (2010). "Application of GA-SVM in classification of surrounding rock based on model reliability examination". *Mining Science and Technology (China)*, 20(3), 428-433.
- Rafie, M., & Namin, F. S. (2015). "Prediction of subsidence risk by FMEA using artificial neural network and fuzzy inference system". *International Journal of Mining Science and Technology*, 25(4), 655-663.
- Rezaei, M., Majdi, A., & Monjezi, M. (2014). "An intelligent approach to predict unconfined compressive strength of rock surrounding access tunnels in longwall coal mining". *Neural Computing and Applications*, 24(1), 233-241.
- Rezaei, M., Monjezi, M., & Varjani, A. Y. (2011). "Development of a fuzzy model to predict flyrock in surface mining". *Safety science*, 49(2), 298-305.
- Ross, T. J. (2009). "Fuzzy logic with engineering applications". John Wiley & Sons.
- Scoble, M., & Moss, A. (1994). "Dilution in underground bulk mining :implications for production management". Geological Society, London, Special Publications, 79(1), 95-108.
- Sharp, J. E. U. R. (2011). "Applicability of the Mathews stability method to open stope stability assessment at Olympic Dam Mine".
- Shen, L., Olfat, L., Govindan, K., Khodaverdi, R., & Diabat, A. (2013). "A fuzzy multi criteria approach for evaluating green supplier's performance in green supply chain with linguistic preferences". *Resources, Conservation and Recycling*, 74, 170-179.
- Stewart, S., & Forsyth, W. (1995). "The Mathew's method for open stope design". *CIM bulletin*, 88(992), 45-53.
- Stewart, P. C., Trueman, R., & Brunton, I. (2011). "Factors influencing overbreak in the Barkers orebody, Kundana Gold mine: narrow vein case study". *Mining Technology*, 120(2), 80-89.
- Stewart, P., & Trueman, R. (2003). "Applying the Extended Mathews stability graph to stress relaxation, site specific effects and narrow vein stoping". In *1st Australasian Ground Control in Mining Conference-Ground Control in Mining: Technology and Practice* (pp. 55-61). UNSW School of Mining Engineering.
- Stillborg, B. L. (1984). "Open stope design at the research mine in Kiruna, Sweden. Design and performance of Underground Excavations", London, pp 237 – 283.

- Sunwoo, C., Jung, Y. B., & Karanam, U. R. (2006). "Stability assessment in wide underground mine openings by Mathews' stability graph method". *Tunnelling and Underground Space Technology*, 21(3), 246.
- Suorineni, F. T. (1998). "Effects of faults and stress on open stope design", PhD thesis. Waterloo: University of Waterloo.
- Suorineni, F. T., Henning, J. G., & Kaiser, P. K. (2001a). "Narrow-vein mining experiences at Ashanti: Case study". In Proc. Int. Symp. on 'Mining techniques of narrow-vein deposits', Val'dor, Que., Canada (pp. 57-62).
- Suorineni, F. T., Kaiser, P. K., & Tannant, D. D. (2001b). "Likelihood statistic for interpretation of the stability graph for open stope design", 38, 735-744.
- Suorineni, F. T. (2010). "The stability graph after three decades in use: Experiences and the way forward". *International Journal of Mining, Reclamation and Environment*, 24(4), 307-339.
- Suorineni, F. T. (2012). "A critical review of the stability graph method for open stope design". *MassMin 2012*, 10-14.
- Suorineni, F. T. (2014). "Reflections on Empirical Methods in Geomechanics—The Unmentionables and Hidden Risks". *Third Australasian Ground Control In Mining Conference*.
- Tavakoli, M. (1994). "Underground metal mine crown pillar stability analysis", PhD thesis. Wollongong: University of wollongong.
- Trueman, R., & Mawdesley, C. (2003). "Predicting cave initiation and propagation". *CIM bulletin*, 96(1071), 54-59.
- Trueman, R., Mikula, P., Mawdesley, C., & Harries, N. (2000). "Experience in Australia with the application of the Mathews' method for open stope design". *CIM bulletin*, 93(1036), 162-167.
- Urli, V. (2015). "Ore-Skin Design to Control Sloughage in Underground Open Stope Mining". (Doctoral dissertation, University of Toronto).
- Vallejos, J. A., & McKinnon, S. D. (2013). "Logistic regression and neural network classification of seismic records". *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, 62, 86-95.
- Vallejos, J. A., Delonca, A., Fuenzalida, J., & Burgos, L. (2016). "Statistical analysis of the stability number adjustment factors and implications for underground mine design". *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, 87, 104-112.
- Verma, A. K., & Singh, T. N. (2013). "A neuro-fuzzy approach for prediction of longitudinal wave velocity". *Neural Computing and Applications*, 22(7-8), 1685-1693.
- Villaescusa, E. (2014). "Geotechnical Design for Sublevel Open Stopping". CRC Press.
- Wang, J., (2004). "Influence of stress, undercutting, blasting, and time on open stope

- stability and dilution". PhD. Thesis, University of Saskatchewan.
- Wang, W., Liao, H., & Huang, Y. (2007). "Rock fracture tracing based on image processing and SVM". Paper presented at the Natural Computation, 2007. ICNC 2007. Third International Conference on.
- Wattimena, R. K., Kramadibrata, S., Sidi, I. D., & Azizi, M. A. (2013). "Developing coal pillar stability chart using logistic regression". *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, 58, 55-60.
- Wattimena, R. K. (2014). "Predicting the stability of hard rock pillars using multinomial logistic regression". *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, (71), 33-40.
- Yongkui, S., Jingyu, Z., & Pengrui, L. (2015). "Classification and Prediction Method of the Development Height of Fractured Zone with Flowing Water [J]". *The Electronic Journal of Geotechnical Engineering*, 20(10), 4125-4135.
- Yun, Q. X., & Huang, G. Q. (1987). "A fuzzy set approach to the selection of mining method". *Mining Science and Technology*, 6(1), 9-16.
- Yurdakul, M., Gopalakrishnan, K., & Akdas, H. (2014). "Prediction of specific cutting energy in natural stone cutting processes using the neuro-fuzzy methodology". *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, 67, 127-135.
- Zadeh, L. A. (1965). "Fuzzy sets". *Information and control*, 8 (3), 338-353.
- Zettler, A. H., Poisel, R., Reichl, I., & Stadler, G. (1997). "Pressure sensitive grouting (PSG) using an artificial neural network combined with fuzzy logic". *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, 34(3), 358-e1.
- Zhao, H. B., Feng, X. T., LI, S. J., & YIN, S. D. (2003). "Forecasting evolution of slope deformation by genetic-support vector machine [J]". *Rock and Soil Mechanics*, 4, 036.
- Zhi-xiang, T., Pei-xian, L., Li-li, Y., & Ka-zhong, D. (2009). "Study of the method to calculate subsidence coefficient based on SVM". *Procedia Earth and Planetary Science*, 1(1), 970-976.
- Zhou, F., Wu, D., Yang, X., & Jiao, J. (2008). "Ordinal logistic regression for affective product design". In *2008 IEEE International Conference on Industrial Engineering and Engineering Management* (pp. 1986-1990). IEEE.
- Zhou, J., & Li, X. B. (2011). "Evaluating the Thickness of Broken Rock Zone for Deep Roadways using Nonlinear SVMs and Multiple Linear Regression Model". *Procedia Engineering*, 26, 972-981.
- Zhu, Z.-d., Li, H.-b., Shang, J.-f., Wang, W., & Liu, J.-h. (2010). "Research on the mining roadway displacement forecasting based on support vector machine theory". *Journal of Coal Science and Engineering (China)*, 16(3), 235-239.

Zobrist, J., Sima, M., Dogaru, D., Senila, M., Yang, H., Popescu, C & Balteanu, D. (2009). "Environmental and socioeconomic assessment of impacts by mining activities—a case study in the Certej River catchment, Western Carpathians, Romania". *Environmental Science and Pollution Research*, 16(1), 14-26.

گزارش بازدید در اعماق ۱۴۰۰ متری معدن سنگ آهن زیرزمینی اوکراین، ([www.imidro.gov.ir](http://www.imidro.gov.ir))



سوست

## پیوست ۱

داده‌های دیواره:

ردیف	سطح	HR	$Q'$	A	B	C	$N'$	وضعیت پایداری
۱	HW	۲	۰/۲۵	۱	۰/۳	۵	۰/۳۷	ناپایدار
۲	HW	۲	۰/۲۵	۱	۰/۳	۶	۰/۴۵	ناپایدار
۳	HW	۳	۰/۲۵	۱	۰/۳	۵/۵	۰/۴	ناپایدار
۴	HW	۳	۰/۲۵	۱	۰/۳	۸	۰/۶	ناپایدار
۵	HW	۴	۰/۲۵	۱	۰/۳	۵	۰/۳۷	ناپایدار
۶	End	۴/۷	۳/۲	۰/۳	۰/۲	۳/۵	۰/۶۷	ناپایدار
۷	HW	۴/۹	۳/۱	۱	۰/۳	۶	۵/۶	ناپایدار
۸	HW	۵	۴/۸	۱	۰/۳	۸	۱۱/۵	ناپایدار
۹	HW	۶	۳	۱	۰/۳	۵	۴/۵	ناپایدار
۱۰	HW	۶	۰/۲۵	۱	۰/۳	۶/۵	۰/۴۸	ناپایدار
۱۱	HW	۶	۲/۴	۱	۰/۳	۵/۵	۴	ناپایدار
۱۲	HW	۶	۳	۱	۰/۳	۵	۴/۵	ناپایدار
۱۳	HW	۶	۰/۲۵	۱	۰/۳	۵/۵	۰/۴	ناپایدار
۱۴	HW	۶/۹	۶	۱	۰/۳	۶	۱۰/۸	ناپایدار
۱۵	HW	۷/۱	۱۰/۵	۱	۰/۲	۳/۷	۷/۸	ناپایدار
۱۶	HW	۸	۱	۱	۰/۳	۶	۱/۸	ناپایدار
۱۷	HW	۸	۱/۵	۱	۰/۳	۵/۵	۲/۵	ناپایدار
۱۸	HW	۸	۲/۴	۱	۰/۳	۵/۵	۴	ناپایدار
۱۹	HW	۸/۱	۸	۱	۰/۳	۶	۱۴/۴	ناپایدار
۲۰	End	۸/۹	۶	۰/۲	۰/۲۵	۲/۵	۰/۷۵	ناپایدار
۲۱	HW	۹	۲/۴	۱	۰/۳	۷	۵	ناپایدار
۲۲	HW	۹/۱	۴/۲	۱	۰/۲	۶/۵	۵/۵	ناپایدار
۲۳	FW	۹/۹	۱۳/۵	۱	۰/۲	۳	۸/۱	ناپایدار
۲۴	HW	۱۰	۲/۴	۱	۰/۳	۵/۵	۴	ناپایدار
۲۵	FW	۱۱/۶	۲۷	۰/۵	۰/۳	۸	۳۲/۴	ناپایدار
۲۶	HW	۱۲	۱/۵	۱	۰/۳	۵/۵	۲/۵	ناپایدار
۲۷	FW	۱۲	۶۰	۱	۰/۳	۴/۵	۸۱	ناپایدار
۲۸	HW	۱۶	۵۴	۱	۰/۳	۴/۵	۷۲/۹	ناپایدار
۲۹	HW	۶	۰/۷۵	۱	۰/۳	۷	۱/۶	تخریب شده
۳۰	HW	۱۲	۶	۱	۰/۳	۵/۵	۱۰	تخریب شده
۳۱	HW	۷/۷	۶	۰/۱	۰/۲	۲/۵	۰/۳	تخریب شده
۳۲	HW	۸	۰/۲۵	۱	۰/۳	۷	۰/۵	تخریب شده

وضعیت پایداری	$N'$	C	B	A	$Q'$	HR	سطح	ردیف
تخریب شده	۵/۴	۶	۰/۲	۱	۴/۵	۸/۸	HW	۳۳
تخریب شده	۹/۵	۷	۰/۳	۱	۴/۵	۸/۸	HW	۳۴
تخریب شده	۰/۵	۶/۵	۰/۳	۱	۰/۲۵	۹	HW	۳۵
تخریب شده	۱/۲	۵/۵	۰/۳	۱	۰/۷۵	۹	HW	۳۶
تخریب شده	۰/۸	۶	۰/۲	۰/۱	۰/۵	۹	HW	۳۷
تخریب شده	۱/۶	۷	۰/۳	۱	۰/۷۵	۱۰	HW	۳۸
تخریب شده	۰/۴	۵/۵	۰/۳	۱	۰/۲۵	۱۰	HW	۳۹
تخریب شده	۳/۴	۷	۰/۳	۱	۱/۶	۱۰	HW	۴۰
تخریب شده	۰/۵	۶/۵	۰/۳	۱	۰/۲۵	۱۱	HW	۴۱
تخریب شده	۰/۹	۴	۰/۳	۱	۰/۷۵	۱۱	HW	۴۲
تخریب شده	۰/۸	۶	۰/۲	۰/۱	۰/۵	۱۱/۳	HW	۴۳
تخریب شده	۴/۵	۵	۰/۳	۱	۳	۱۲	HW	۴۴
تخریب شده	۰/۵	۶	۰/۳	۱	۰/۲۵	۱۳	HW	۴۵
تخریب شده	۰/۴	۵	۰/۳	۱	۰/۲۵	۱۳	HW	۴۶
تخریب شده	۲/۵	۵/۵	۰/۳	۱	۱/۵	۱۳	HW	۴۷
تخریب شده	۳/۴	۵	۰/۳	۱	۲/۲۵	۱۳	HW	۴۸
تخریب شده	۱/۸	۸	۰/۳	۱	۰/۷۵	۱۴	HW	۴۹
تخریب شده	۱/۸	۶	۰/۳	۱	۱	۱۴	HW	۵۰
تخریب شده	۴/۵	۵	۰/۳	۱	۳	۱۴	HW	۵۱
تخریب شده	۰/۵	۶/۵	۰/۳	۱	۰/۲۵	۱۶	HW	۵۲
تخریب شده	۱/۲	۵/۵	۰/۳	۱	۰/۷۵	۱۶	HW	۵۳
تخریب شده	۶/۵	۵/۵	۰/۲	۱	۵/۹	۱۶/۴	HW	۵۴
تخریب شده	۵/۲	۸	۰/۳	۱	۲	۱۹	HW	۵۵
تخریب شده	۴/۸	۸	۰/۲	۱	۳	۲۰	HW	۵۶
پایدار	۸۱	۴/۵	۰/۳	۱	۶۰	۱	HW	۵۷
پایدار	۱۳/۲	۷/۵	۰/۲	۱	۸/۸	۲/۷	FW	۵۸
پایدار	۳۴/۶	۵/۵	۰/۳	۱	۲۱	۴	HW	۵۹
پایدار	۲۶	۵/۵	۰/۳	۱	۱۶	۳	HW	۶۰
پایدار	۳۸/۴	۸	۰/۳	۱	۱۶	۴	HW	۶۱
پایدار	۱۲	۸	۰/۲	۰/۳	۲۴	۴/۷	FW	۶۲
پایدار	۵/۸	۸	۰/۳	۰/۱	۲۴	۴/۹	End	۶۳
پایدار	۲۲۸	۶/۵	۰/۶۵	۱	۵۴	۵	HW	۶۴
پایدار	۲۶۰	۶/۵	۱	۱	۴۰	۵/۲	HW	۶۵
پایدار	۱۰	۸	۰/۲	۱	۶	۵/۶	HW	۶۶
پایدار	۳۶	۸	۰/۲	۱	۲۲/۵	۶	HW	۶۷
پایدار	۲۱	۸	۰/۲	۱	۱۳/۱	۷	HW	۶۸

ردیف	سطح	HR	Q'	A	B	C	N'	وضعیت پایداری
۶۹	HW	۷	۴۸	۱	۰/۳	۸	۱۱۵	پایدار
۷۰	HW	۷/۸	۱۳/۵	۱	۰/۲	۸	۲۱/۶	پایدار
۷۱	HW	۸/۳	۳۰	۱	۰/۲	۷	۴۲	پایدار
۷۲	FW	۸/۴	۴۳/۵	۱	۱	۸	۳۴۸	پایدار
۷۳	HW	۹	۵۴	۱	۰/۳	۵	۸۱	پایدار
۷۴	HW	۱۱	۴۰	۱	۱	۸	۳۲۰	پایدار
۷۵	HW	۲/۷	۳/۵	۱	۰/۲	۷/۵	۰/۵	پایدار
۷۶	FW	۱۳/۱	۴۰	۱	۰/۵	۸	۱۶۰	پایدار
۷۷	HW	۱۴	۴۰	۱	۱	۸	۳۲۰	پایدار
۷۸	HW	۴/۹	۲۲/۵	۱	۰/۳	۸	۵۴	پایدار
۷۹	HW	۱۶/۶	۹۰	۱	۱	۸	۷۲۰	پایدار
۸۰	HW	۶/۱	۲۱/۵	۱	۰/۳	۶	۳۸/۷	پایدار
۸۱	HW	۲۳	۹۰	۱	۱	۸	۷۲۰	پایدار
۸۲	HW	۴/۶	۳/۵	۱	۰/۲	۷/۵	۵/۲	پایدار
۸۳	HW	۸/۸	۳۰	۱	۰/۶	۸	۱۴۴	پایدار
۸۴	HW	۵	۵۴	۱	۰/۳	۵	۸۱	پایدار
***End: دیواره انتهایی      **FW: کمر پایین      *HW: کمر بالا								

:

## داده‌های سقف:

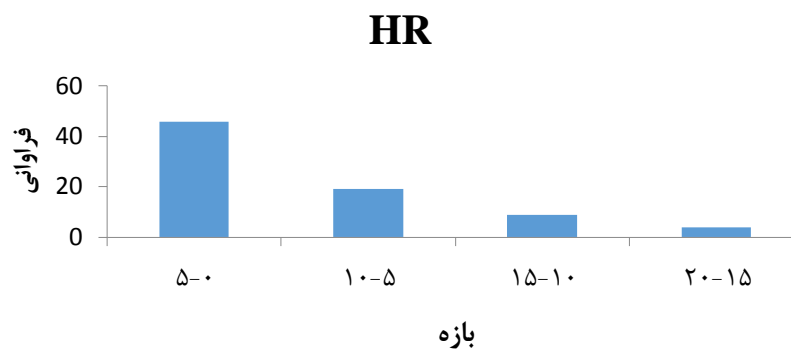
وضعیت پایداری	$N'$	C	B	A	$Q'$	HR	سطح	ردیف
ناپایدار	۱/۶	۲	۰/۴	۱	۲	۲/۱	Back	۱
ناپایدار	۰/۳	۲	۰/۲	۰/۱	۸	۲/۱	Back	۲
ناپایدار	۰/۳	۲	۰/۲	۰/۱	۸	۲/۳	Back	۳
ناپایدار	۰/۴	۲	۰/۲	۱	۱	۲/۴	Back	۴
ناپایدار	۰/۴	۲	۰/۲	۱	۱	۲/۷	Back	۵
ناپایدار	۰/۴	۲	۰/۲	۱	۱	۲/۹	Back	۶
ناپایدار	۴	۲	۰/۲	۱	۱	۳/۴	Back	۷
ناپایدار	۲۴	۲	۰/۴	۰/۱	۳۰	۳/۵	Back	۸
ناپایدار	۰/۴	۲	۰/۲	۱	۱	۳/۸	Back	۹
ناپایدار	۰/۴	۲	۰/۲	۱	۱	۴/۱	Back	۱۰
ناپایدار	۰/۴	۲	۰/۲	۱	۱	۴/۴	Back	۱۱
ناپایدار	۰/۴	۲	۰/۲	۱	۱	۴/۶	Back	۱۲
ناپایدار	۳/۶	۲	۱	۰/۱	۱۸	۵	Back	۱۳
ناپایدار	۱/۹	۲	۰/۳	۰/۱	۳۲	۵/۲	Back	۱۴
ناپایدار	۵/۵	۲	۰/۳	۰/۵	۱۸/۲	۶/۱	Back	۱۵
ناپایدار	۹۷/۲	۲	۱	۰/۴	۱۲۱/۵	۶/۱	Back	۱۶
ناپایدار	۵	۱	۰/۵	۰/۵	۲۰	۶/۱	Back	۱۷
ناپایدار	۳/۲	۲	۰/۳	۰/۳	۱۸/۲	۶/۴	Back	۱۸
ناپایدار	۳	۱	۰/۵	۰/۳	۲۰	۶/۴	Back	۱۹
ناپایدار	۱۴۵/۸	۲	۱	۰/۶	۱۲۱/۵	۷/۶	Back	۲۰
ناپایدار	۶۰	۱	۱	۰/۶	۱۰۰	۷/۶	Back	۲۱
ناپایدار	۴۶/۸	۲	۱	۰/۶	۳۹	۸/۸	Back	۲۲
ناپایدار	۲۰	۱	۱	۰/۵	۴۰	۸/۸	Back	۲۳
ناپایدار	۲۸/۷	۲/۵	۰/۸۵	۰/۵	۲۷	۱۱/۱	Back	۲۴
ناپایدار	۲۴	۱	۱	۰/۶	۴۰	۱۳/۴	Back	۲۵
ناپایدار	۴۶/۸	۲	۱	۰/۶	۳۹	۱۳/۴	Back	۲۶
تخریب شده	۰/۴	۲	۰/۲	۱	۱	۴/۷	Back	۲۷
تخریب شده	۰/۵	۲	۰/۲	۱	۱/۳	۴/۹	Back	۲۸
تخریب شده	۰/۵	۲	۰/۲	۱	۱/۳	۵/۲	Back	۲۹
تخریب شده	۰/۵	۲	۰/۲	۰/۱	۱۳/۳	۵/۲	Back	۳۰
تخریب شده	۰/۵	۲	۰/۲	۰/۱	۱۳/۳	۶/۲	Back	۳۱
تخریب شده	۰/۳	۲	۰/۲	۰/۱	۱۶	۷/۶	Back	۳۲
تخریب شده	۰/۵	۲	۰/۲	۱	۱/۳	۷/۸	Back	۳۳
تخریب شده	۳/۴	۲	۰/۸	۰/۱	۲۱	۸/۶	Back	۳۴

وضعیت پایداری	$N'$	C	B	A	$Q'$	HR	سطح	ردیف
تخریب شده	۱۰/۳	۱	۱	۱	۱۰/۳	۹/۹	Back	۳۵
تخریب شده	۳۶	۲	۱	۱	۱۸	۹/۹	Back	۳۶
تخریب شده	۴/۸	۲	۰/۲	۰/۴	۳۰	۱۰	Back	۳۷
تخریب شده	۳/۴	۷	۰/۳	۱	۹	۱۰/۵	Back	۳۸
تخریب شده	۱۳/۶	۲	۰/۲	۱	۳۴	۱۰/۵	Back	۳۹
تخریب شده	۱۳/۶	۲	۰/۲	۱	۳۴	۱۱/۳	Back	۴۰
تخریب شده	۱۳/۶	۲	۰/۲	۱	۳۴	۱۲/۲	Back	۴۱
تخریب شده	۶۰/۵	۲/۸	۰/۸	۱	۲۷	۱۲/۵	Back	۴۲
تخریب شده	۶۰/۵	۲/۸	۰/۸	۱	۲۷	۱۵	Back	۴۳
تخریب شده	۵	۱	۰/۵	۰/۵	۲۰	۱۵/۲	Back	۴۴
تخریب شده	۵/۴۶	۲	۰/۳	۰/۵	۱۸/۲	۱۵/۲	Back	۴۵
تخریب شده	۶۰/۵	۲/۸	۰/۸	۱	۲۷	۱۵/۹	Back	۴۶
تخریب شده	۴/۵	۱	۰/۵	۰/۷	۱۳	۱۷/۴	Back	۴۷
تخریب شده	۰/۴	۲	۰/۲	۱	۱	۴/۲	Back	۴۸
تخریب شده	۰/۵	۲	۰/۲	۱	۱/۳	۴/۲	Back	۴۹
تخریب شده	۰/۵	۲	۰/۲	۱	۱/۳	۳/۸	Back	۵۰
تخریب شده	۰/۵	۲	۰/۲	۱	۱/۳	۳/۴	Back	۵۱
تخریب شده	۰/۵	۲	۰/۲	۱	۱/۳	۳/۹	Back	۵۲
پایدار	۰/۶	۲	۰/۲	۰/۱	۱۵/۸	۱/۳	Back	۵۳
پایدار	۰/۶	۲	۰/۲	۰/۱	۱۵/۸	۱/۸	Back	۵۴
پایدار	۸	۲	۰/۲	۱	۲۰	۱/۹	Back	۵۵
پایدار	۱۸/۷	۲	۰/۶	۰/۶	۲۶	۲/۱	Back	۵۶
پایدار	۱۵/۶	۲	۰/۶	۰/۵	۲۶	۲/۴	Back	۵۷
پایدار	۱۲/۵	۲	۰/۶	۰/۴	۲۶	۲/۹	Back	۵۸
پایدار	۹/۴	۲	۰/۶	۰/۳	۲۶	۳	Back	۵۹
پایدار	۱۲/۵	۲	۰/۶	۰/۴	۲۶	۳/۱	Back	۶۰
پایدار	۲/۷	۸	۰/۳۴	۱	۱	۳/۵	Back	۶۱
پایدار	۱۸	۲	۱	۰/۱	۹۰	۴	Back	۶۲
پایدار	۳/۸	۲	۰/۸۵	۰/۱	۲۲/۵	۴	Back	۶۳
پایدار	۸/۷	۲	۰/۲	۰/۵	۴۳/۵	۲/۴	Back	۶۴
پایدار	۲/۷	۸	۰/۳۴	۱	۱	۴/۱	Back	۶۵
پایدار	۳۲	۸	۰/۲	۱	۲۰	۴/۲	Back	۶۶
پایدار	۲/۷	۸	۰/۳۴	۱	۱	۴/۳	Back	۶۷
پایدار	۲/۷	۸	۰/۳۴	۱	۱	۴/۴	Back	۶۸
پایدار	۲/۱	۸	۰/۲	۱	۱/۳	۴/۷	Back	۶۹
پایدار	۲/۱	۸	۰/۲	۱	۱/۳	۴/۸	Back	۷۰

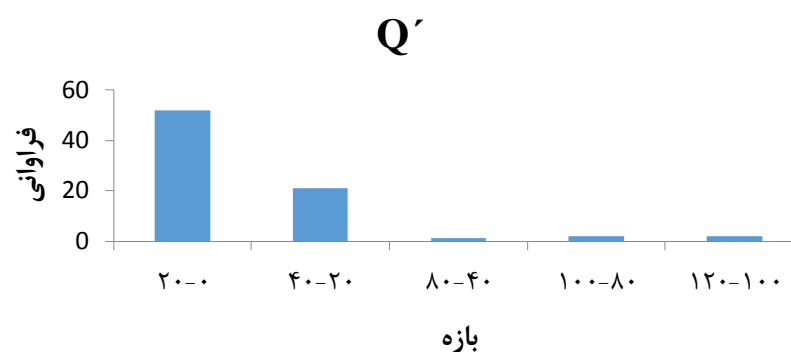
وضعیت پایداری	$N'$	C	B	A	$Q'$	HR	سطح	ردیف
پایدار	۲/۱	۸	۰/۲	۱	۱/۳	۴/۹	Back	۷۱
پایدار	۲/۱	۸	۰/۲	۱	۱/۳	۵	Back	۷۲
پایدار	۲/۷	۸	۰/۳۴	۱	۱	۵	Back	۷۳
پایدار	۱	۲	۰/۲	۰/۳	۸	۱/۸	Back	۷۴
پایدار	۴/۸	۸	۰/۳	۱	۲	۲/۴	Back	۷۵
پایدار	۴/۸	۸	۰/۳	۱	۲	۲/۹	Back	۷۶
پایدار	۲/۷	۸	۰/۳۴	۱	۱	۳/۳	Back	۷۷
پایدار	۲/۱	۸	۰/۲	۱	۱/۳	۴/۲	Back	۷۸
*Back: سقف								

## پیوست ۲:

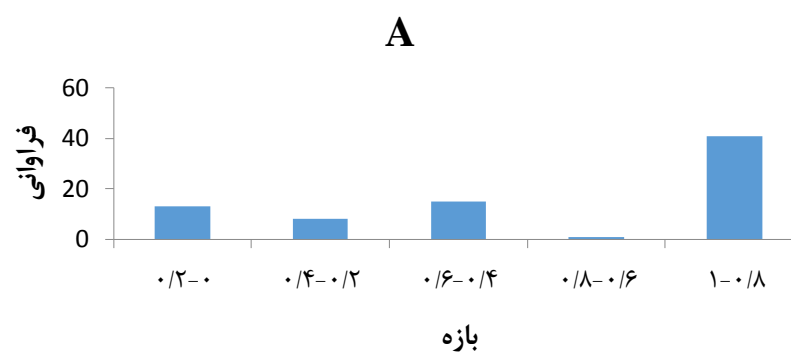
نمودارهای توزیع فراوانی داده‌های سقف:



شکل ۳: نمودار توزیع فراوانی داده‌های شعاع هیدرولیکی سقف



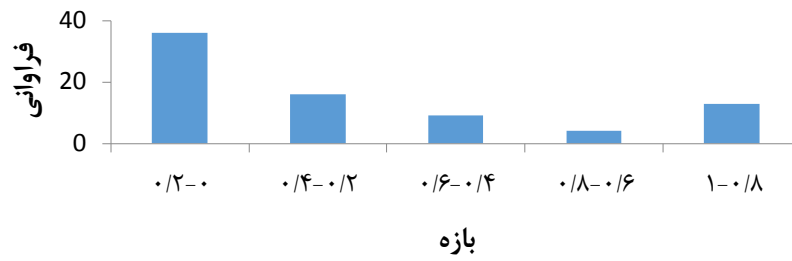
شکل ۲: نمودار توزیع فراوانی داده‌های سیستم اصلاح شده طبقه‌بندی توده‌سنگ سقف



شکل ۳: نمودار توزیع فراوانی داده‌های ضریب تنش سنگ سقف

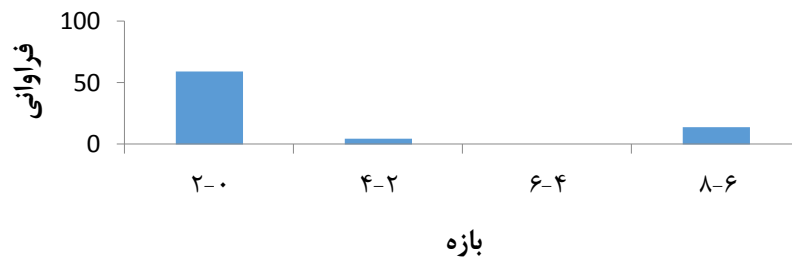


### B



شکل ۴: نمودار توزیع فراوانی داده‌های ضریب درزه سقف

### C



شکل ۵: نمودار توزیع فراوانی داده‌های ضریب نیروی ثقل سقف

## **Abstract**

Prediction of stability conditions in metal hard rock underground mines, due to safety and economic consequences of an inappropriate design is essential. The stability of such mines depends on the several parameters and accordingly, the prediction of stability condition with regard to these parameters is a complex problem. Since 1981, the stability graph method is used as the most common method for evaluating the stability condition of hard rock underground open stopes. As it is an empirical method and also absences of unique graph, the risk of interpreting the results is high. In addition, the gravity factor in this method for different surfaces has been considered the same. Therefore, to overcome these two major problems, three estimator models were developed to predict stability conditions of roof and walls of underground open stopes with the use of logistic regression, support vector machine (SVM) and fuzzy logic methods. For training and testing of these models, a database including 84 and 78 case histories for walls and roof in Canada and Ghana were used respectively. These models were evaluated with use of different evaluation criterion. Finally, the performances of these models were compared with the common stability graph by using performance evaluation criteria. The results showed that the SVM, fuzzy logic and logistic regression models have better performance in predicting the open stopes stability rather than stability graph method.

**Keywords:** Open Stope, Stability Graph Method, Logistic Regression, Support Vector Machine, Fuzzy Logic, Performance Evaluation Criteria



Shahrood University of Technology  
Faculty of Mining, Petroleum and Geophysics  
MSc Thesis in Mining Extraction

**Development of models for stability evaluation in the underground  
open stopes based on the stability graph method**

**By: Mahmoud Sharifi Toudeshki**

**Supervisors:**

**Prof. Mohammad Ataei**

**Prof. Reza Khalookakaie**

**Advisor:**

**Sadjad Mohammadi**

**September 2016**