

الله الرحمن الرحيم



دانشکده مهندسی معدن، نفت و ژئوفیزیک
رشته مهندسی معدن گرایش استخراج معدن

رساله دکتری

برآورد شاخص امکان پیاده‌سازی روش استخراج تخریب توده‌ای
از دیدگاه ژئومکانیکی با کاربرد روش سیستم مهندسی سنگ (RES)

نگارنده: امیر آزادمهر

استاد راهنما
دکتر سید محمد اسماعیل جلالی

شهریور ۱۳۹۸

شماره: ۲۶۹۸۱۴۱۴
تاریخ: ۹۸، ۷، ۲۴
ویرایش:

باسمه تعالی



مدیریت تحصیلات تکمیلی

فرم شماره ۱۲: صورت جلسه نهایی دفاع از رساله دکتری (Ph.D)
(ویژه دانشجویان ورودی های ۹۴ و ما قبل)

بدینوسیله گواهی می شود آقای/خانم امیر آزادمهر دانشجوی دکتری رشته مهندسی معدن به شماره دانشجویی ۹۱۲۴۵۵۵ ورودی مهر ماه سال ۱۳۹۱ در تاریخ ۱۳۹۸/۰۶/۲۴ از رساله نظری / عملی خود با عنوان: برآورد شاخص امکان پیاده سازی روش استخراج تخریب توده ای از دیدگاه ژئومکانیکی با کاربرد روش سیستم مهندسی سنگ (RES)، دفاع و با اخذ نمره ۱۸/۵ به درجه ~~ب~~ نائل گردید.

<input checked="" type="checkbox"/> الف) درجه عالی: نمره ۲۰-۱۹	<input checked="" type="checkbox"/> ب) درجه بسیار خوب: نمره ۱۸/۹۹ - ۱۷
<input type="checkbox"/> ج) درجه خوب: نمره ۱۶/۹۹ - ۱۵	<input type="checkbox"/> د) غیر قابل قبول و نیاز به دفاع مجدد دارد.
<input type="checkbox"/> ه) رساله نیاز به اصلاحات دارد.	

ردیف	هیئت داوران	نام و نام خانوادگی	مرتبیه علمی	امضاء
۱	دکتر سید محمد اسماعیل جلالی	استاد/ اساتید راهنما		
-	-	مشاور/ مشاورین	-	
۲	دکتر حسین جلالی فر	استاد مدعو خارجی		
۳	دکتر محمد عطایی	استاد مدعو داخلی		
۴	دکتر شکرآب زارع	استاد مدعو داخلی		
۵	دکتر فرهنگ سرشکی	سرپرست (نماینده) تحصیلات تکمیلی دانشکده		

مدیر محترم تحصیلات تکمیلی دانشگاه:

ضمن تأیید مراتب فوق مقرر فرمائید اقدامات لازم در خصوص انجام مراحل دانش آموختگی آقای/خانم امیر آزادمهر بعمل آید.

نام و نام خانوادگی رئیس دانشکده:

تاریخ و امضاء



پروردگارا:

نه می توانم موهای آمان را که در راه عزت من سفید شد، سیاه کنم و نه برای دست های پینه بسته شان

که شمره ی تلاش برای افتخار من است، مرهمی دارم

پس توفیقم ده که هر لحظه شکر گزارشان باشم و ثانیه های عمرم را در عحمای دست بودنتان بگذرانم

ماحصل آموخته هایم را تقدیم می کنم به آمان که مهر آسمانشان آرام بخش آلام زمینی ام است

به استوارترین تکیه گاهم، دستان پر مهر پدرم

به سبزترین نگاه زندگیم، چشمان سبز مادرم

تقدیم به همسرم:

پناه هستی ام و امید بودنم

و به دخترم:

که وجودش شادی بخش و مایه دلگرمی من است

تقدیر و تشکر:

راهی بود پر فراز و نشیب که جز به یاری خداوند به فرجام نمی انجامید. حمد و سپاس بی پایان خداوند بلند مرتبه را که به من توفیق تحصیل و کسب علم عنایت نمود. اینک، که به مدد الطاف یکران الهی، مقطعی از دوران تحصیل به پایان می رسد بر خود لازم می دانم از تمامی کسانی که مراد این راه یاری دادند تشکر و قدردانی نمایم.

از استاد محترم جناب آقای دکتر سید محمد اسماعیل جلالی به دلیل زحمات بی شائبه ایشان در تمامی مراحل تحقیق، نهایت قدردانی را دارم.

از استاد عزیز یاشار پور رحیمیان، که در تمام مدت فرصت مطالعاتی در کنارم بود و در تهیه داده های معادن تخریب توده ای به من کمک کردند، کمال سپاس و قدردانی را دارم.

امیر آزاد مهر

۱۳۹۸/۰۶/۲۴

تعهدنامه

این جانب امیر آزادمهر دانشجوی دوره دکتری رشته مهندسی استخراج معدن دانشکده مهندسی معدن، نفت و ژئوفیزیک دانشگاه شاهرود نویسنده رساله با عنوان برآورد شاخص امکان پیاده‌سازی روش استخراج توده‌ای از دیدگاه ژئومکانیکی با کاربرد روش سیستم مهندسی سنگ (RES)، تحت راهنمایی دکتر سید محمد اسماعیل جلالی متعهد می‌شوم:

تحقیقات در این رساله توسط این جانب 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 رساله تاکنون توسط خود یا فرد دیگری برای دریافت هیچ نوع مدرک یا امتیازی در هیچ جا ارایه نشده است.

حقوق معنوی این اثر، به دانشگاه شاهرود تعلق دارد و مقالات مستخرج به نام دانشگاه شاهرود یا Shahrood University به چاپ خواهد رسید.

حقوق معنوی تمام افرادی که در به دست آمدن نتایج اصلی رساله تاثیرگذار بوده‌اند رعایت شده است. در تمام مراحل انجام این پایان‌نامه، در مواردی که از موجود زنده (یا بافت‌های آن‌ها) استفاده شده است، ضوابط و اصول اخلاقی رعایت شده است.

در کلیه مراحل انجام این رساله، در مواردی که به حوزه اطلاعات شخصی افراد دسترسی یافته یا استفاده شده است اصل رازداری، ضوابط و اصول اخلاق انسانی رعایت شده است.

امضاء

تاریخ:

کلیه حقوق معنوی این اثر و محصولات آن (مقالات مستخرج، کتاب، برنامه‌های یارانه‌ای، نرم‌افزارها و تجهیزات ساخته‌شده) متعلق به دانشگاه صنعتی شاهرود هست. این مطلب باید به نحو مقتضی در تولیدات علمی مربوطه ذکر شود. استفاده از اطلاعات و نتایج موجود در پایان‌نامه بدون ذکر مرجع مجاز نیست.

چکیده

با افزایش عمق بهره‌برداری از معادن بزرگ‌مقیاس روباز، هزینه‌های تولید نیز متناسب با آن افزایش می‌یابد. بنابراین الزام کاستن از هزینه‌ها، مهندسين طراح را به سمت به‌کارگیری رویکردهای کم‌هزینه‌تر زیرزمینی نظیر روش استخراج تخریب توده‌ای سوق می‌دهد. از سوی دیگر، هزینه‌های بالای آماده‌سازی استخراج تخریب توده‌ای، حصول اطمینان از امکان پیاده‌سازی این روش را پیش از آغاز هر پروژه ایجاب می‌نماید. از دیدگاه فنی، چالش قابلیت تخریب به‌خصوص برای کنسارهای با کنسنگ‌های مقاوم‌تر همواره مدنظر طراحان بوده است. بسیاری از متغیرهای کلیدی روش تخریب توده‌ای از جمله الگوی طراحی و پیشروی زیربرش، پیکربندی دهانه‌های تخلیه، ارتفاع ستون تخلیه و سرعت تخلیه تابعی از خردشوندگی توده سنگ هستند، این متغیرها نقش بسیار مهمی در شروع تخریب، تداوم آن و تولید محصول با خردشدگی مناسب ایفا می‌کنند. در این تحقیق، در ابتدا تمامی عوامل موثر بر امکان اجرای این روش تبیین شده و سیستم‌های مهندسی سنگ (RES)، به عنوان ابزار بررسی کمی اندرکنش این عوامل بر یکدیگر بکار رفته است، کدگذاری ماتریس اندرکنش سیستم مهندسی سنگ، با تمرکز بر تاثیرات غیرمستقیم عوامل بر یکدیگر و همچنین کاهش عدم قطعیت بهبود داده شده است. بدین منظور پس از تعیین ماتریس اندرکنش مستقیم، برای به دست آوردن ماتریسی واحد که برآیند نظرات کارشناسان مختلف باشد و همچنین کاهش عدم قطعیت، ابتدا با استفاده از سیستم‌های فازی ماتریس برآیند نظر کارشناسان تهیه و سپس با استفاده از روش تحلیل ساختاری PWP، ماتریس اندرکنش غیرمستقیم عوامل محاسبه شده است. در نهایت، پس از تحلیل اندرکنش‌ها در ماتریس بهبود یافته، شاخص فازی غیرمستقیم امکان‌پذیری پیاده‌سازی روش تخریب توده‌ای توسعه داده شده است. برای این منظور ۲۳ عامل موثر از میان ۳۲ عامل موثر بر امکان پیاده‌سازی روش تخریب توده‌ای انتخاب و بر اساس نتایج مطالعات پیشین در چهار گروه اصلی عوامل ژئومکانیکی، عوامل محیطی، عوامل هندسی و عوامل عملیاتی طبقه‌بندی شده‌اند. در نهایت با استفاده از ماتریس اندرکنش فازی غیرمستقیم، شاخص امکان‌پذیری پیاده‌سازی روش تخریب توده‌ای ارایه و مقادیر آن برای معادن کمث، دیابلو رجیمنت و ریزرو نورث محاسبه شده است. برای تکمیل پژوهش، نتایج به دست آمده با داده‌های به دست آمده از گزارش‌های مربوط به معادن مذکور، مقایسه گردیده است که حاکی از انطباق خوب روش ارایه شده در برآورد امکان‌پذیری پیاده‌سازی روش تخریب توده‌ای بوده است.

واژگان کلیدی: تخریب توده‌ای، خردشوندگی، شاخص امکان پیاده‌سازی، سیستم‌های مهندسی سنگ، اندرکنش غیرمستقیم

لیست مقالات مستخرج از رساله

آزادمهر، ا.، جلالی، س. م. ا.، پوررحیمیان، ی.، (۱۳۹۷). برآورد قابلیت تخریب توده سنگ در روش استخراج تخریب توده‌ای، با استفاده از روش سیستم‌های مهندسی سنگ (RES)، مهندسی تونل و فضاهای زیرزمینی

آزادمهر، ا.، جلالی، س. م. ا.، پوررحیمیان، ی.، (۱۳۹۷). تعیین و رتبه‌بندی عوامل موثر بر خردشوندگی توده سنگ در روش تخریب توده‌ای با استفاده از روش تحلیل ساختاری PWP، سومین کنفرانس بین‌المللی مهندسی معدن و علوم زمین

Azadmehr, A., Jalali, S M E., Pour Rahimian, Y., (۲۰۱۹). An application of Rock engineering System for assessment of the Rock Mass Fragmentation: A hybrid approach and case study, Rock Mechanics and Rock Engineering

Azadmehr, A., Jalali, S M E., Pour Rahimian, Y., (۲۰۱۷). Ranking of influencing factors on rock mass fragmentation in block caving, MPES ۲۰۱۷, Lulea, Sweden

فصل ۱- کلیات	۱
۱-۱- مقدمه	۲
۲-۱- مفاهیم و رویکرد پژوهش	۳
۳-۱- ضرورت انجام پژوهش	۵
۴-۱- هدف از انجام پژوهش	۶
۵-۱- نوآوری تحقیق	۷
۶-۱- ساختار رساله	۹
فصل ۲- روش تخریب توده‌ای و سازو کار تخریب	۱۱
۱-۲- مقدمه	۱۲
۲-۲- توصیف روش تخریب توده‌ای	۱۳
۳-۲- الزامات بنیادی پیاده‌سازی روش تخریب توده‌ای	۱۶
۴-۲- مفاهیم تخریب	۲۰
۵-۲- قابلیت تخریب توده سنگ	۲۳
۶-۲- روش‌های تجربی برآورد قابلیت تخریب	۲۴
۱-۶-۲- روش کینگ	۲۴
۲-۶-۲- روش شاخص قابلیت تخریب	۲۴
۳-۶-۲- روش حداقل عرض زیر برش	۲۵
۴-۶-۲- روش نمودار تخریب لابسچر	۲۷
۵-۶-۲- روش نمودار پایداری ماتیوس	۳۰
۶-۶-۲- روش نمودار توسعه‌یافته ماتیوس	۳۲
۷-۶-۲- نمودار پاتوین	۳۳
۸-۶-۲- نمودار پایداری استوارت و فورسیت	۳۴
۷-۲- روش‌های عددی برآورد قابلیت تخریب	۳۵
۱-۷-۲- مدل‌های الاستیک دوبعدی	۳۵
۲-۷-۲- مدل‌های پلاستیک دوبعدی	۳۶
۳-۷-۲- مدل‌های نرم شونده‌گی کرنش هم‌محور	۳۷
۴-۷-۲- مدل‌های اجزای مجزا	۳۷
۵-۷-۲- روش‌های ترکیبی	۳۸
۸-۲- روش‌های تحلیلی	۳۹
۹-۲- خردشوندگی توده سنگ	۴۱
۱-۹-۲- روش‌های آماری برآورد خردشوندگی	۴۳
۱۰-۲- نرم‌افزارهای برآورد خردشوندگی	۴۸
۱-۱۰-۲- نرم‌افزار BCF	۴۸
۲-۱۰-۲- نرم‌افزار JKFrage	۵۳

۵۲	..... نرم افزار Core2Frag
۵۴	..... عوامل موثر بر امکان پذیری پیاده سازی روش تخریب توده ای
۵۵	..... عوامل ژئومکانیکی
۶۴	..... عوامل محیطی
۶۸	..... عوامل هندسی
۷۳	..... عوامل عملیاتی
۸۳	..... مخاطرات عملیاتی
۸۷	..... بحث و جمع بندی
۹۱	..... فصل ۳- سیستم های مهندسی سنگ (RES) و روش های تحلیل اندرکنش غیرمستقیم عوامل
۹۰	..... ۱-۳- مقدمه
۹۰	..... ۲-۳- سیستم های مهندسی سنگ (RES)
۹۱	..... ۱-۲-۳- ماتریس های اندرکنش
۹۱	..... ۲-۲-۳- کدگذاری ماتریس های اندرکنش
۹۵	..... ۳-۲-۳- نمودار علت-اثر
۹۷	..... ۳-۳- سابقه استفاده از رویکرد سیستم های مهندسی سنگ در کاربردهای مختلف
۱۰۱	..... ۴-۳- روش های تحلیل سیستم های پیچیده
۱۰۱	..... ۱-۴-۳- تحلیل ساختاری
۱۰۳	..... ۲-۴-۳- نگاشتهای شناخت فازی
۱۰۶	..... ۳-۴-۳- روش تحلیل اثر روند
۱۰۶	..... ۴-۴-۳- تجزیه و تحلیل اثر متقاطع
۱۱۹	..... ۵-۴-۳- جمع بندی
۱۲۱	..... فصل ۴- برآورد شاخص امکان پذیری پیاده سازی روش استخراج توده ای
۱۲۲	..... ۱-۴- مقدمه
۱۲۲	..... ۲-۴- تعیین ماتریس اندرکنش سیستم های مهندسی سنگ
۱۲۴	..... ۳-۴- سیستم های فازی
۱۲۶	..... ۱-۳-۴- تابع عضویت
۱۳۰	..... ۴-۴- تعیین ماتریس اندرکنش با نگرش فازی
۱۳۶	..... ۵-۴- تعیین ماتریس اندرکنش غیر مستقیم به روش تحلیل ساختاری
۱۴۶	..... ۶-۴- شاخص امکان پذیری پیاده سازی روش تخریب توده ای
۱۴۹	..... ۱-۴-۴- معادن مورد مطالعه
۱۵۶	..... ۲-۴-۴- برآورد شاخص امکان پذیری پیاده سازی در معادن مورد مطالعه
۱۶۱	..... ۷-۴- جمع بندی
۱۶۳	..... فصل ۵- نتیجه گیری و پیشنهادها
۱۶۴	..... ۱-۵- نتیجه گیری
۱۶۷	..... ۲-۵- پیشنهادها

شکل ۱-۲	معادن تخریب توده‌ای مهم	۱۴
شکل ۲-۲	نمایی از روش تخریب توده‌ای	۱۵
شکل ۳-۲	مدل مفهومی تخریب	۲۲
شکل ۴-۲	نمودار رابطه بین RQD و شاخص قابلیت تخریب	۲۵
شکل ۵-۲	عرض زیربرش مورد نیاز برای تخریب پیوسته برای زیربرش‌های مستطیل شکل	۲۶
شکل ۶-۲	تاثیر تغییر حداقل عرض زیربرش بر شعاع هیدرولیکی در زیربرش‌هایی با مساحت برابر	۲۶
شکل ۷-۲	نحوه تعیین MRMR	۲۸
شکل ۸-۲	ارتباط بین طبقه‌بندی لابسچر، شعاع هیدرولیکی و قابلیت تخریب	۲۹
شکل ۹-۲	نمودار پایداری ماتیوس	۳۱
شکل ۱۰-۲	توسعه نمودار ماتیوس برای کارگاه‌های باز	۳۲
شکل ۱۱-۲	نمودار اصلاح‌شده‌ی پایداری توسط پاتوین	۳۳
شکل ۱۲-۲	نمودار اصلاح‌شده‌ی پایداری ماتیوس توسط استوارت و فورسیت	۳۴
شکل ۱۳-۲	مراحل خردشوندگی در روش تخریب توده‌ای	۴۲
شکل ۱۴-۲	مثالی از ابعاد بلوک‌ها در خردشوندگی اولیه، محاسبه‌شده به‌وسیله BCF	۴۹
شکل ۱۵-۲	نمودارهای توزیع ابعاد خردشوندگی اولیه و ثانویه محاسبه‌شده به‌وسیله BCF	۴۹
شکل ۱۶-۲	مقایسه خردایش واقعی و خردایش پیش‌بینی شده توسط BCF	۵۱
شکل ۱۷-۲	عوامل موثر بر امکان‌پذیری پیاده‌سازی روش تخریب توده‌ای	۵۶
شکل ۱۸-۲	تاثیر مقاومت تراکمی تک‌محوره بر خردشدگی	۵۷
شکل ۱۹-۲	رابطه بین بازشدگی درزه و تنش نرمال بر روی درزه	۵۹
شکل ۲۰-۲	نتایج خردشوندگی در بررسی تاثیر بازشدگی درزه	۶۰
شکل ۲۱-۲	نتایج خردشوندگی برای مکعب‌های با اندازه درزه متفاوت و بدون درزه	۶۲
شکل ۲۲-۲	بررسی رابطه جهت‌داری و اندازه درزه‌ها بر خردشوندگی	۶۳
شکل ۲۳-۲	تاثیر تنش قائم بر چگالی سنگ خردشده	۶۶
شکل ۲۴-۲	رابطه تنش قائم و گیرافتادگی	۶۷
شکل ۲۵-۲	رابطه تنش قائم با گیرافتادگی (در شرایط تخلیه منفرد)	۶۷
شکل ۲۶-۲	بررسی تاثیر ارتفاع ستون تخلیه بر خردشوندگی	۷۱
شکل ۲۷-۲	حالت‌های مختلف گیر افتادگی در نقاط تخلیه	۷۳
شکل ۲۸-۲	منحنی قابلیت جریان سنگ‌های خردشده	۷۳
شکل ۲۹-۲	اندرکنش بیضوی‌های تخلیه و ناحیه برشی و تراکمی	۷۷
شکل ۳۰-۲	کانه خرد شده تحت تاثیر زون‌های مختلف تنش در ستون تخلیه	۷۷
شکل ۳۱-۲	تاثیر ارتفاع فضای خالی بر تراکم ذرات خردشده	۷۸
شکل ۳۲-۲	نتایج خردشوندگی تحت شرایط تراکم متفاوت در ستون تخلیه	۸۰
شکل ۱-۳	مفهوم ماتریس اندرکنش برای سیستمی شامل دو عامل A و B	۹۴
شکل ۲-۳	ماتریس اندرکنش ۳×۳ برای عوامل مکانیک سنگی	۹۴
شکل ۳-۳	کدگذاری ماتریس اندرکنش با استفاده از شیب نمودار در رویکرد RES	۹۶

- شکل ۳-۴: نحوه شکل گیری محورهای علت و اثر در ماتریس اندرکنش ۹۸
- شکل ۳-۵: نمودار (C-E) تعمیم داده شده به N عامل ۹۹
- شکل ۴-۱: تابع عضویت ارتفاع ۶ متری - A) مجموعه ترد - B) مجموعه فازی ۱۲۷
- شکل ۴-۲: هسته، مرز و تکیه گاه در مجموعه فازی ۱۲۸
- شکل ۴-۳: اجزای سیستم فازی ۱۲۹
- شکل ۴-۴: تابع عضویت نشان دهنده مقدار ترد ولتاژ به عنوان فازی ساز ۱۳۰
- شکل ۴-۵: نمای شماتیک از روش های مختلف غیرفازی سازی ۱۳۱
- شکل ۴-۶: مجموعه فازی تعریف شده ۱۳۳
- شکل ۴-۷: تابع عضویت خروجی ۱۳۴
- شکل ۴-۸: قوانین طرح شده برای عامل P_1 ۱۳۴
- شکل ۴-۹: سیستم فازی شامل ۵ ورودی و یک خروجی ۱۳۵
- شکل ۴-۱۰: باز شده سیستم فازی شامل ورودی، قوانین و خروجی ۱۳۵
- شکل ۴-۱۱: نمونه ای از قوانین فازی نوشته شده در سیستم فازی ۱۳۶
- شکل ۴-۱۲: هیستوگرام بررسی ویژگی های ماتریس اندرکنش فازی، در مقابل ماتریس اندرکنش مستقیم ۱۳۷
- شکل ۴-۱۳: هیستوگرام شدت اثرگذاری، وابستگی و اندرکنش عوامل موثر بر امکان پذیری پیاده سازی روش تخریب توده ای، در روش غیرمستقیم ۱۴۱
- شکل ۴-۱۴: مقایسه هیستوگرام شدت اندرکنش عوامل موثر بر خردشوندگی در روش مستقیم و غیرمستقیم ۱۴۷
- شکل ۴-۱۵: نمودار اثرگذاری-اثرپذیری عوامل موثر بر قابلیت معدن کاری روش تخریب توده ای ۱۴۹
- شکل ۴-۱۶: تصویر جانمایی فضایی بخش های مختلف معدن التینیت ۱۵۳
- شکل ۴-۱۷: ژئولوژی منطقه و نمایی از نقاط نمونه گیری در تراز زیربرش ۱۵۵
- شکل ۴-۱۸: موقعیت نسبی زون های لیتولوژی و آلتراسیون در کانسار کمث ۱۵۷
- شکل ۴-۱۹: نمای سه بعدی طرح معدن کمث، شامل زیربرش، قیف های تخلیه و دریفت های باربری ۱۵۷
- شکل ۴-۲۰: نمودار توزیع خردشوندگی اولیه و ثانویه در معدن کمث با استفاده از نرم افزار ۱۶۲
- شکل ۴-۲۱: طبقه بندی شاخص امکان پذیری پیاده سازی روش تخریب توده ای ۱۶۳

فهرست جداول

عنوان

صفحه

جدول ۱-۳: مفاهیم کدگذاری بر اساس روش ESQ.....	۹۶
جدول ۲-۳: مطالعات موردی انجام شده با استفاده از روش سیستم‌های مهندسی سنگ از سال ۱۹۹۲ تا ۲۰۱۹ ...	۱۰۰
جدول ۱-۴: ماتریس اندرکنش مستقیم عوامل موثر بر امکان‌پذیری پیاده‌سازی روش تخریب توده‌ای	۱۲۵
جدول ۲-۴: ماتریس اندرکنش مستقیم فازی عوامل موثر بر امکان‌پذیری پیاده‌سازی روش تخریب توده‌ای	۱۳۸
جدول ۳-۴: ماتریس اندرکنش غیرمستقیم عوامل موثر بر روند تخریب با استفاده از روش PWP	۱۴۰
جدول ۴-۴: مقایسه سهم شدت اثرگذاری، شدت وابستگی و شدت اندرکنش هر عامل در دو روش مستقیم و غیرمستقیم	۱۴۳
جدول ۵-۴: مقایسه‌ی رتبه‌بندی عوامل موثر بر خردشوندگی در دو روش مستقیم و غیرمستقیم.....	۱۴۶
جدول ۶-۴: مقایسه میزان تاثیر عوامل در بین گروه‌های مختلف عوامل موثر	۱۴۷
جدول ۷-۴: رده‌بندی عوامل موثر بر خردشوندگی	۱۵۱
جدول ۸-۴: ارزیابی شرایط زیربرش در معادن توده‌ای	۱۵۲
جدول ۹-۴: مشخصات ناپیوستگی‌های اصلی در معدن دیابلو رجیمنت	۱۵۴
جدول ۱۰-۴: مقادیر شاخص طبقه بندی سنگ معدن دیابلو رجیمنت	۱۵۴
جدول ۱۱-۴: مشخصات ژئومکانیکی سنگ‌های معدن رزرو نورته	۱۵۵
جدول ۱۲-۴: امتیاز عوامل موثر بر خردشوندگی در مطالعات موردی	۱۵۸
جدول ۱۳-۴: محاسبه شاخص خردشوندگی موارد مطالعاتی به روش مستقیم و غیرمستقیم.....	۱۶۱
جدول ۱۴-۴: اطلاعات خردشوندگی معادن موارد مطالعاتی	۱۶۲

فصل اول

کلیات

۱-۱- مقدمه

بررسی تحقیقات پیشین بر روی روش استخراج تخریب توده‌ای و همچنین موارد واقعی به کارگیری آن در معادن تخریبی سراسر دنیا نشان می‌دهد، برآورد قابلیت تخریب و چگونگی خردشوندگی توده سنگ در زمره مهم‌ترین مسایل طراحی مهندسی قلمداد می‌شود. به بیان دیگر، قابلیت تخریب یک توده سنگ با ویژگی‌های ژئومکانیکی مشخص با توجه به ابعاد مود نیاز زیربرش و سپس دستیابی به ابعاد مناسب سنگ خردشده، به عنوان عاملی کلیدی در مطالعات امکان‌سنجی روش تخریب توده‌ای در نظر گرفته می‌شود.

بررسی‌های انجام‌شده در حین مطالعات مقدماتی این رساله نشان می‌دهد، قابلیت تخریب به‌تنهایی نمی‌تواند ملاک مناسبی برای بیان چگونگی خردشوندگی و همچنین توزیع احتمالی قطعات خردشده‌ی قابل تحویل در نقاط تخلیه باشد. علاوه بر قابلیت تخریب و چگونگی خردشوندگی توده سنگ مسایلی از قبیل پایداری حفريات زیرزمینی (مانند تونل‌های تراز استخراج، زیر برش‌ها، قیف‌ها و نقاط تخلیه)، آرایش و چیدمان قیف‌های تخلیه، سرعت تخلیه و مخاطرات عملیاتی (از قبیل انفجار هوا، انفجار سنگ، رقیق‌شدگی، هجوم آب و گل و گیرافتادگی) امکان پیاده‌سازی روش استخراج تخریب توده‌ای را به‌طور گسترده‌ای تحت تاثیر قرار می‌دهند. در حقیقت بی‌توجهی به هرکدام از این عوامل می‌تواند کل عملیات معدنکاری را به خطر اندازد.

بنابراین با توجه به نکات مطرح‌شده و کاستی‌های موجود در پژوهش‌های پیشین، این رساله با هدف تعیین شاخص امکان‌پذیری اجرای روش تخریب توده‌ای با نگرشی ویژه به مجموعه گسترده‌ای از عوامل ژئومکانیکی و عملیاتی و اندرکنش سیستمی آن‌ها تعریف شده است.

۱-۲- مفاهیم و رویکرد پژوهش

از دیدگاه براون^۱، موفقیت نهایی و بازدهی مناسب روش تخریب توده‌ای وابسته به خردشوندگی مناسب توده سنگ در حین فرآیند تخریب است. بنابراین پیش‌بینی خردشوندگی مواد در نقاط تخلیه یک موضوع بسیار مهم است. زیرا بخش زیادی از فرایند طراحی در روش تخریب توده‌ای بر مبنای این متغیر کلیدی انجام می‌شود (Brown, ۲۰۰۳). از جمله این موارد می‌توان به ابعاد و فاصله‌داری نقاط تخلیه، انتخاب تجهیزات، روند کنترل تخلیه، نیازمندی‌های عملیات آتشباری برای رفع گیرافتادگی‌ها و سنگ‌های بزرگ اندازه و برنامه تولید اشاره کرد.

تاکنون روش‌های عددی و تجربی متفاوتی برای پیش‌بینی قابلیت تخریب و خردشوندگی توده سنگ با توجه به برنامه‌ریزی تولید در معادن تخریب توده‌ای مورد استفاده قرار گرفته است. مبنای روش‌های تجربی بیشتر تجربیات حاصل از معادن مختلف بوده است. در این خصوص طبقه‌بندی مهندسی توده سنگ نه تنها شالوده روش‌های تجربی را تشکیل می‌دهد، بلکه برای تعیین خصوصیات توده سنگ در مدل‌سازی عددی نیز استفاده می‌شود (Bieniawski, ۱۹۸۹). در روش‌های تجربی ذهن‌گرایی و عدم قطعیت قابل توجهی در برآورد قابلیت تخریب و خردشوندگی وجود دارد، این موضوع به‌ویژه در تعیین ضرایب تعدیل در نمودارهای لابسچر^۲ و ماتیس^۳ ملاحظه می‌شود (Brown, ۲۰۰۳).

روش‌های عددی نیز حساسیت زیادی به خصوصیات عوامل ورودی و روش مدل‌سازی دارند. تغییرات بسیار ناچیز در خصوصیات مواد یا ابعاد و نوع مش‌بندی، تغییرات بزرگی را در نتایج خروجی مدل‌سازی ایجاد می‌کند. علاوه بر این همان‌طور که اشاره شد، انجام مدل‌سازی عددی برای یک پروژه بزرگ مقیاس معدنی، فرآیندی بسیار پیچیده و زمان‌بر است.

^۱ Brown

^۲ Laubscher

^۳ Mathews

برآورد خردشوندگی اولیه و ثانویه نیز به‌طور گسترده‌ای با روش‌های تجربی انجام شده است (Rogers, et al., ۲۰۱۰)، اما در بسیاری از موارد، نتایج توزیع خردشوندگی به‌دست آمده از ابزارهای برآورد، با یکدیگر و همچنین با مقادیر واقعی خردشوندگی تفاوت بسیار زیادی داشته است (Brown, ۲۰۰۳). در واقع بیشتر تلاش‌های انجام شده برای توسعه شاخص‌های تخریب‌پذیری و خردشوندگی دربرگیرنده‌ی تمام عوامل موثر در تخریب نیستند. از طرفی در همه روش‌های ذکر شده، تاثیر هر عامل به‌صورت مستقل از سایر عوامل بر روی سیستم بررسی و اعمال شده است. تمامی عوامل مهندسی بیان شده در کنار قابلیت تخریب و خردشوندگی دارای اندرکنش متقابل با یکدیگر و تاثیری محسوس بر نتایج مطالعات هستند. بنابراین برای اجرای موفقیت‌آمیز معدنکاری تخریب توده‌ای علاوه بر مدنظر قرار دادن دو عامل بنیادی قابلیت تخریب و خردشوندگی توجه به سایر عوامل تاثیرگذار و اندرکنش متقابل آن‌ها در فاز مطالعات امکان‌سنجی فنی و اقتصادی مساله‌ای بسیار ضروری است.

بررسی تاریخی موضوع نشان می‌دهد، تاکنون روش جامعی که دربرگیرنده تمامی عوامل تاثیرگذار بر امکان‌پذیری روش تخریب توده‌ای باشد، ارایه نشده است. همچنین در بررسی هر یک از عوامل موثر بر امکان‌پذیری اجرای روش تخریب توده‌ای، سایر عوامل موثر و اندرکنش آن‌ها بر یکدیگر، در روش‌های موجود کمتر مورد توجه قرار گرفته است یا در صورت مدنظر قرار داده شدن چند عامل، تحلیل‌ها با فرضیات ساده کننده و همچنین نادیده گرفتن سایر اندرکنش‌ها همراه بوده است. با توجه به این مهم که راندمان نهایی روش تخریب توده‌ای متأثر از تمام عوامل فوق و اندرکنش متقابل آن‌ها است، بنابراین به‌کارگیری راهکاری مانند سیستم‌های مهندسی سنگ^۱ (RES) که توانایی تحلیل اندرکنش‌های هم‌زمان و پیچیده ژئومکانیکی را داشته باشد، در فرآیند امکان‌سنجی پیاده‌سازی این روش می‌تواند کارآمد باشد.

^۱ Rock Engineering Systems

با توجه به موارد مطرح شده در این پژوهش، شاخصی برای امکان پیاده‌سازی روش تخریب توده-ای با استفاده از ابزار سیستم‌های مهندسی سنگ ارایه خواهد شد. تمرکز اصلی در این تحقیق بر وارد کردن اکثر عوامل ژئومکانیکی موثر در قابلیت تخریب و خردشوندگی اولیه و ثانویه توده سنگ در یک سیستم اندرکنشی خواهد بود. در راستای موارد بیان شده، در این تحقیق به دو سوال اساسی پاسخ داده خواهد شد:

۱. عوامل موثر در امکان پیاده‌سازی روش تخریب توده‌ای کدامند؟
۲. وزن هر عامل چقدر است و حساسیت قابلیت تخریب به تغییر کدام یک از عوامل بیشتر است؟

۱-۳- ضرورت انجام پژوهش

در سال‌های اخیر تقاضای جهانی برای مواد معدنی افزایش یافته و به دلیل برداشت مواد معدنی از کانسارهای پر عیار سطحی، عیار ذخایر در معادن بزرگ در حال کاهش است. بنابراین، چالش بزرگ جهان در قرن حاضر کمبود مواد معدنی است. با توجه به کم‌عیار بودن بیشتر کانسارهای باقی‌مانده و همچنین قرارگیری آن‌ها در عمق، روش‌های زیرزمینی توسعه روزافزونی پیدا کرده‌اند. روش‌های تخریبی به خصوص روش تخریب توده‌ای، استخراج ذخایر عظیم با عیار پایین واقع در اعماق بیشتر را امکان‌پذیر می‌نماید. همچنین این روش پایین‌ترین هزینه و بالاترین نرخ تولید نسبت به سایر روش‌های زیرزمینی را دارد.

مطالعه‌ی امکان‌پذیری استخراج به روش تخریب توده‌ای مستلزم توجه به بازه‌ی گسترده‌ای از عوامل از جمله قابلیت تخریب و خردشوندگی مناسب، دسترسی به تولید برنامه‌ریزی‌شده، بازیابی مطلوب، پایداری حفاریات، تامین ایمنی و ملاحظات اقتصادی است. اما روش‌های موجود برای مطالعه‌ی امکان‌پذیری پیاده‌سازی روش تخریب توده‌ای، فقط تعداد محدودی از عوامل موثر بر روند تخریب را در نظر می‌گیرند. بنابراین نیاز به تعیین شاخصی برای برآورد امکان پیاده‌سازی روش

استخراج تخریب توده‌ای، با استفاده از رویکردی باقابلیت تحلیل توامان همه عوامل موثر به همراه اندرکنش آن‌ها و توانایی بررسی دقیق فرآیندهای تخریب و خردشوندگی توده سنگ، به‌وضوح احساس می‌شود.

۱-۴- هدف از انجام پژوهش

هدف از انجام این پژوهش ارزیابی شاخصی برای برآورد امکان پیاده‌سازی روش استخراج تخریب توده‌ای در یک توده سنگ با خصوصیات ژئومکانیکی مشخص با استفاده از رویکرد سیستم‌های مهندسی سنگ (RES) است. در برآورد این شاخص اکثر عوامل موثر در قابلیت تخریب و خردشوندگی توده سنگ به‌ویژه خصوصیات مکانیکی و هندسی توده سنگ مانند مقاومت مواد پرکننده، مقاومت ناپیوستگی‌ها و خصوصیات هندسی ناپیوستگی‌ها شامل فاصله‌داری، جهت‌داری، شیب، جهت شیب، بازشدگی و پایایی ناپیوستگی‌ها و همچنین تنش‌های برجا و آب‌های زیرزمینی و همچنین متغیرهای طراحی از قبیل ابعاد زیربرش، ارتفاع ستون تخلیه، سرعت تخلیه، فاصله و اندازه نقاط تخلیه و ضریب انباشتگی در نظر گرفته می‌شود. در اکثر کاربردهای رویکرد سیستم‌های مهندسی سنگ، تنها اندرکنش دو-دویی^۱ عوامل بر یکدیگر لحاظ شده‌اند. وقایع مکانیک سنگی طبیعی و همچنین وقایع مکانیک سنگی مهندسی شده، شامل فرایندهایی بیش از اثرات دو دویی مجزای بین عوامل سیستم یا متغیر A بر B هستند.

در یک فرایند مجموعه‌ای از مکانیزم‌ها به صورت مسیرهای متفاوتی از اثرات بین عوامل می‌تواند وجود داشته باشد. به عنوان مثال عامل A می‌تواند بر عامل B، عامل B بر عامل C، عامل C بر عامل D و سپس عامل D بر عامل A اثر گذارد یا در یک مسیر متفاوت، عامل A می‌تواند بر عامل C، عامل C بر عامل B، عامل B بر عامل D و عامل D بر عامل A اثر گذارد. هر دوی این مسیرها حلقه‌هایی از A به A هستند (Jiao & Hudson, ۱۹۹۵).

^۱ Binary

تسلسلی از مکانیزم‌ها در بین عوامل در یک سیستم عمل می‌کنند که در تحلیل یک سیستم باید همه آنها را در نظر بگیریم که از این پس به عنوان اندرکنش غیرمستقیم بین عوامل از آن نام برده شده است.

لذا در این تحقیق کدگذاری ماتریس اندرکنش عوامل موثر در دو مرحله بهبود یافته است. ابتدا به منظور کاهش عدم قطعیت، با کاربرد سیستم‌های فازی بر روی ماتریس‌های اندرکنش مستقیم اولیه، اجماع نظر کارشناسان به دست آمده است و سپس ماتریس حاصل با استفاده از روش تحلیل ساختاری PWP، به ماتریس اندرکنش فازی غیرمستقیم بین عوامل تبدیل شده است. در نهایت پس از نرمال سازی ماتریس مذکور، شاخص فازی غیرمستقیم امکان پذیری پیاده‌سازی روش تخریب توده‌ای (شاخص امکان پذیری) تعیین شده است. با مشخص شدن شدت اثرگذاری و اثرپذیری عوامل، می‌توان در صورت نیاز با تغییر یک یا چند عامل از عوامل فوق، شرایط لازم برای بهبود تخریب و خردشوندگی را با حداقل هزینه فراهم نمود.

۱-۵- نوآوری تحقیق

در مطالعاتی که تا به حال بر روی تخریب توده‌ای با استفاده از رویکرد سیستم‌های مهندسی سنگ انجام شده است، تنها به بررسی قابلیت تخریب توده سنگ پرداخته شده است. محمدخانی در سال ۲۰۱۴ با در نظر گرفتن هشت عامل موثر بر قابلیت تخریب توده سنگ، شعاع هیدرولیکی^۱ زیربرش مناسب برای شروع تخریب در روش تخریب توده‌ای را با استفاده از روش RES تعیین کرده است (Mohammad khani, ۲۰۱۴). در این خصوص رفیعی و همکاران در سال ۲۰۱۴، چهارده عامل مشتمل بر، ساختارهای زمین‌شناسی (فاصله‌داری درزه‌ها، جهت‌داری درزه‌ها، بازشدگی درزه‌ها، پیوستگی درزه‌ها، زبری درزه‌ها، پرشدگی درزه‌ها)، تنش‌های برجا و جهت آن‌ها، مقاومت تراکمی

^۱ شعاع هیدرولیکی از تقسیم مساحت زیر برش، بر محیط آن به دست می‌آید. در رابطه با تخریب، منظور حداقل سطح بدون نگهداری است که با ایجاد آن در زیر توده سنگ، القای تخریب در سقف زیر برش اتفاق می‌افتد.

تک‌محوره و آب به‌عنوان عوامل طبیعی و ارتفاع بلوک، شرایط زیر برش، شعاع هیدرولیکی، نرخ تخریب و خردشوندگی به‌عنوان عوامل القایی را عوامل موثر بر قابلیت تخریب ذکر نموده است و با استفاده از سیستم‌های مهندسی سنگ احتمالاتی، بر روی به دست آوردن شاخص قابلیت تخریب توده سنگ تمرکز نموده است (Rafiee, et al., ۲۰۱۴). سپس رفیعی و همکاران، با معرفی سیستم‌های مهندسی سنگ فازی، قابلیت تخریب توده سنگ را در معادن تخریب توده‌ای ارزیابی کرده‌اند (Rafiee, et al., ۲۰۱۵) و سپس شاخص قابلیت تخریب جدید توده سنگ را با استفاده از سیستم‌های مهندسی سنگ فازی به دست آورده‌اند (Rafiee, et al., ۲۰۱۵). در کلیه مطالعات انجام شده با استفاده از رویکرد RES تنها به بررسی قابلیت تخریب توده سنگ پرداخته شده است. در صورت قابلیت تخریب نامناسب می‌توان با تمهیداتی مانند انفجار و یا شکست هیدرولیکی تخریب را به توده سنگ القا کرد. لذا در این تحقیق علاوه بر بررسی قابلیت تخریب توده سنگ، مقوله‌ی پیچیده‌ی خردشوندگی سنگ در طول ستون تخلیه و ابعاد سنگ خردشده قابل تحویل در نقاط تخلیه بررسی و همچنین با منظور نمودن عوامل موثر بر قابلیت تخریب، خردشوندگی و خطرات عملیاتی، به بررسی امکان پیاده‌سازی روش تخریب توده‌ای پرداخته شده است.

در کاربردهای گذشته‌ی رویکرد سیستم‌های مهندسی سنگ تنها روابط مستقیم دو-دویی عوامل مورد نظر قرار گرفته است. لذا در این تحقیق ماتریس اندرکنش عوامل موثر بر امکان پیاده‌سازی روش تخریب توده‌ای با استفاده از روش تحلیل ساختاری PWP با عنوان ماتریس اندرکنش غیرمستقیم عوامل، تعیین شده و سپس شاخص امکان پیاده‌سازی تخریب توده‌ای با استفاده از ماتریس اندرکنش غیرمستقیم به دست آمده است.

۱-۶- ساختار رساله

با در نظر گرفتن اهداف تحقیق حاضر، این رساله در پنج فصل به شرح زیر تدوین شده است.

در **فصل اول**، کلیات موضوع رساله مورد بررسی قرار گرفته است.

در **فصل دوم**، به تشریح روش تخریب توده‌ای، روش‌های اجرای این روش و سازوکار تخریب و انواع آن پرداخته شده است. در ادامه این فصل روش‌های پیش‌بینی قابلیت تخریب، روش‌های تخمین خردشوندگی، مزایا، معایب و محدودیت‌های این روش‌ها مورد بررسی قرار گرفته است.

در **فصل سوم**، ابتدا به اصول کلی رویکرد سیستم‌های مهندسی سنگ پرداخته شده و سپس سابقه استفاده از این رویکرد در علوم مختلف بررسی شده است. آنگاه به معرفی برخی روش‌های پرکاربرد بررسی اندرکنش غیرمستقیم بین عوامل پرداخته شده و در نهایت روش ساختاری PWP برای تعیین اندرکنش غیرمستقیم عوامل مورد استفاده قرار گرفته است.

در **فصل چهارم**، ابتدا با استفاده از سیستم‌های فازی، ماتریس اندرکنش مستقیم فازی عوامل محاسبه و سپس ماتریس اندرکنش غیرمستقیم عوامل با استفاده از روش PWP تعیین شده است. سپس رتبه‌بندی عوامل موثر در امکان‌پذیری پیاده‌سازی روش تخریب توده‌ای انجام و با روش سیستم‌های مهندسی سنگ فازی مقایسه شده است. در نهایت شاخص امکان‌پذیری برای معادن کمث^۱، التنینت^۲ و ریزرو نورث^۳ (مطالعه موردی) تعیین و نتایج آن با نتایج خردشوندگی معادن مذکور مقایسه شده است.

در **فصل پنجم**، جمع‌بندی و نتیجه‌گیری انجام شده است و در نهایت پیشنهادهایی برای تحقیقات آتی ارائه شده است.

^۱ Kemess

^۲ Elteniente

^۳ Reserve Northe (ReNo)

فصل دوم

روش تخریب توده‌ای و سازو کار تخریب

۲-۱- مقدمه

به دلیل برداشت مواد معدنی از منابع پر عیار سطحی، عیار ذخایر در معادن بزرگ در حال کاهش است. از آنجا که در معادن روباز با افزایش عمق، هزینه‌های تولید به مقدار فراوانی افزایش می‌یابد، در سالیان اخیر استخراج منابع زیرسطحی (به نسبت کم عیارتر)، به وسیله روش‌های استخراج زیرزمینی مورد توجه بیشتری قرار گرفته است. با این نگرش، برای دستیابی به بالاترین نرخ تولید با صرف کمترین هزینه‌ها، رویکردهای تخریبی به ارجح‌ترین گزینه برای استخراج معادن توده‌ای بزرگ مقیاس تبدیل شده‌اند.

از دیدگاه فنی، روش‌های تخریبی قابلیت رشد و توسعه زیادی دارند و برخی از چالش‌های عمده صنعت معدنکاری مانند استخراج کانسنگ‌های عمیق، ذخایر کم عیارتر، تقاضا برای تولید بیشتر و با هزینه استخراج کمتر و استخراج کانسنگ‌های سخت‌تر در محیط‌های با شرایط تنش یا دمای بالا، با به‌کارگیری روش‌های استخراج تخریبی تا حد زیادی قابل حل خواهد بود.

در این میان، قابلیت تخریب توده سنگ یکی از عوامل مهم در مطالعات امکان‌سنجی روش‌های تخریبی و یک عامل اساسی در موفقیت این روش است، زیرا به‌طور مستقیم بر هزینه‌ها و بازیابی کانه تاثیرگذار است. با این که پیش‌بینی قابلیت تخریب توده سنگ یک موضوع پیچیده به شمار می‌آید، اما با برآورد مقدار هر یک از عوامل موثر بر قابلیت تخریب توده سنگ و کاربرد روش‌های تجربی موجود می‌توان به تخمینی اولیه از قابلیت تخریب توده سنگ دست‌یافت. در این شرایط، چنانچه نتیجه بررسی قابلیت تخریب منجر به عدم تخریب مناسب توده سنگ شود و یا ابعاد خاصی از سنگ‌های تخریب‌شده مورد نیاز باشد، باید روش‌های مصنوعی القای تخریب نظیر انفجار و شکست هیدرولیکی به‌عنوان راه‌حل به کار گرفته شود. در مقابل ممکن است در توده سنگی که دارای قابلیت تخریب بالایی است، تخریب ناخواسته فضاهای استخراجی نیز به وجود آید و موجب بروز خسارت و عدم موفقیت در عملیات معدنکاری زیرزمینی شود.

از سوی دیگر، در فرآیند بررسی امکان پیاده‌سازی معدن کاری تخریب توده‌ای نکته‌ای که کمتر مورد توجه قرار گرفته، این است که قابلیت تخریب باید هم‌راستا و به همراه نتایج خردشوندگی توده سنگ در محدوده‌ی تخریب مشخص شود. درجه خردشوندگی بر روی پیکربندی نقاط تخلیه، گزینش ماشین‌آلات، راهکارهای اجرا، پیش‌بینی بروز گیرافتادگی و نیاز به خردشوندگی ثانویه، نرخ تولید، تداخل عملیات و پیوستگی عملیات بسیار اثرگذار است. بنابراین، برآورد خردشوندگی توده سنگ در فرآیند طراحی و همچنین تخمین متغیرهای وابسته به آن بسیار ضروری است تا حدی که خردشوندگی نامناسب ممکن است از دست رفتن کل یا بخشی از بلوک معدنی را به همراه داشته باشد.

با توجه به توضیحات بیان‌شده، در این فصل به تشریح مفاهیم بنیادی روش تخریب توده‌ای به همراه دو عامل تاثیرگذار قابلیت تخریب و خردشوندگی پرداخته می‌شود. در ادامه سایر عوامل بحرانی موثر در راندمان و بهره‌وری رویکرد تخریب توده‌ای نیز مورد کنکاش قرار گرفته است.

۲-۲- توصیف روش تخریب توده‌ای

روش بزرگ‌مقیاس تخریب توده‌ای تنها روش استخراج زیرزمینی با تولید انبوه است که قابلیت رسیدن به تولید با هزینه‌ای نزدیک به هزینه معدنکاری سطحی را دارد و برای توده‌های بزرگ مواد معدنی به‌کاربرده می‌شود. در این روش هم کانسنگ و هم باطله هر دو تخریب می‌شوند. بنابراین کانسنگ و باطله باید هر دو قابلیت تخریب مناسبی داشته باشند (Julin, ۱۹۷۴).

این روش در حقیقت یک روش آمریکایی است که پس از جنگ جهانی اول برای استخراج کانسارهای مس پرفیری کم‌عیار و توده‌ای جنوب غرب آمریکا بکار برده شد و به‌سرعت در خارج از آمریکا نیز گسترش یافت. در حال حاضر این روش در بیشتر کشورها و برای بازه گسترده‌ای از کانسنگ‌ها به کار می‌رود. از موارد کاربرد این روش در معادن جهان می‌توان به معادن آندینا^۱،

^۱ Andina

چوکیویکاماتا^۱ و ال‌تنینت^۲ در شیلی، گراسبرگ^۳ در اندونزی، نورث‌پارکز^۴ در استرالیا، رزولوشن^۵ در آمریکا و سی‌بریج^۶ و نیو آفتون^۷ در کانادا اشاره نمود. در شکل ۱-۲، توزیع معادن تخریب توده‌ای سرتاسر دنیا، نشان داده شده است.



شکل ۱-۲: معادن تخریب توده‌ای مهم (Yubo, ۲۰۱۶)

در روش تخریب توده‌ای، برای تحریک کانسنگ به تخریب، زیربرشی با سطح مقطع بحرانی در توده‌ها، پهنه‌ها یا بلوک‌های کانسنگ ایجاد می‌شود. در اثر فشار وزن سنگ‌های بالای زیربرش و تغییر وضعیت تنش، شکستگی‌های طبیعی درون توده سنگ گسترش یافته و باعث تخریب و حرکت قطعه‌ی استخراجی موردنظر به سمت پایین می‌شود (SME, ۱۹۹۶). برای تخلیه کانسنگ خردشده،

^۱ Chuquicamata

^۲ El Teniente

^۳ Grasberg

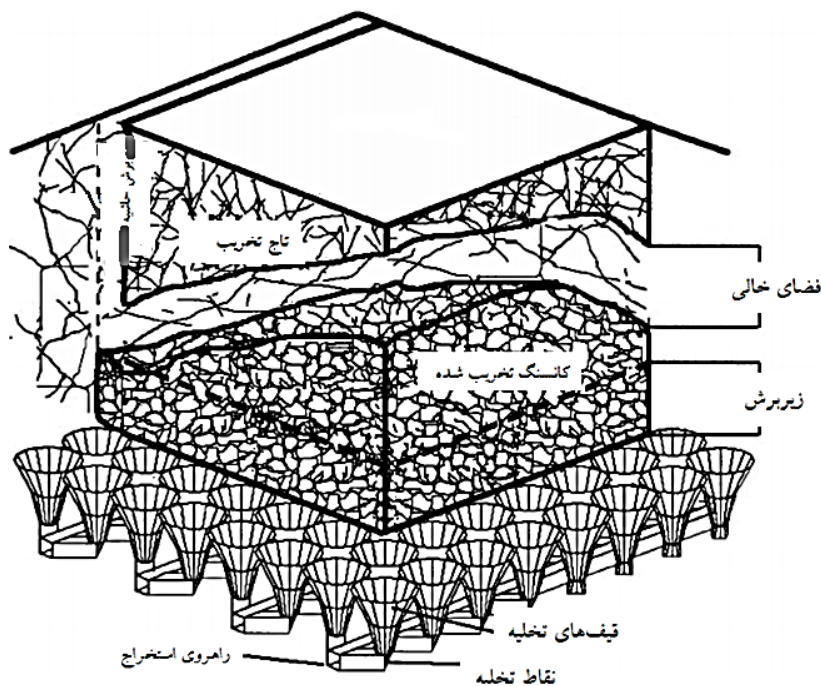
^۴ North Parkes

^۵ Resolution

^۶ Seabridge

^۷ New Afton

تراز زیربرش توسط قیف‌ها یا برش‌های وی شکل^۱ به تراز استخراج^۲ که در زیرتراز زیربرش^۳ ایجاد می‌گردد، متصل می‌شود. قیف‌ها با آتشباری دقیق در داخل کانسنگ یا سنگ‌های کم‌پایین کانسنگ به منظور اتصال تراز زیربرش و تراز استخراج (تخلیه) و انتقال مواد به تونل‌های باربری ایجاد می‌شوند. تراز استخراج شامل تونل‌های باربری موازی در امتداد قطعه توده سنگ و راهروهای تخلیه^۴ برای اتصال نقاط تخلیه^۵ (در پایین‌ترین بخش قیف‌های تخلیه) به تونل‌های باربری است. تخلیه یکنواخت کانسنگ تخریب‌شده از نقاط تخلیه در زیر بلوک، فضای لازم را برای تجمع و ذخیره بیشتر کانسنگ خردشده فراهم می‌کند و باعث می‌شود که تخریب به سمت بالا تا جایی که کل کانسنگ بلوک اصلی تخریب و تخلیه شود، ادامه یابد (Hartman, ۲۰۰۲). در شکل ۲-۲، نمایی از این روش نشان داده شده است.



شکل ۲-۲: نمایی از روش تخریب توده‌ای (Duplancic, et al., ۱۹۹۹)

^۱ V-Cut

^۲ Extraction Level

^۳ Undercut Level

^۴ Extraction Drift

^۵ Draw Point

کانسارهای توده‌ای و همچنین کانسارهای لایه‌ای یا رگه‌ای ضخیم با شیب زیاد برای استخراج با روش تخریب توده‌ای مناسب هستند. کانسنگ باید قابلیت خرد شدن به قطعات با اندازه مناسب را داشته باشد. گسترش عمودی کانسنگ باید به‌طور نسبی زیاد باشد تا با توجه به هزینه‌های آماده‌سازی بالای این روش، بتوان به تولید مناسب و اقتصادی دست‌یافت (اورعی، ۱۳۸۳).

تخریب توده‌ای مناسب‌ترین روش استخراج زیرزمینی برای تولید روزانه بالا است. این روش در معادنی با نرخ تولید بین ۱۸۰۰ تا ۸۰۰۰۰ تن در روز (معدن گراسبرگ اندونزی) به کار گرفته می‌شود (Chadwick, ۲۰۱۰). وجود شکستگی‌های ضعیف و استحکام بالای ماده معدنی می‌تواند سبب کندی تخریب و کاهش توان تولید شود. در این موارد از روش‌هایی مانند شکست هیدرولیکی^۱، انفجار محصور^۲ یا ترکیب هر دو روش برای بهبود شرایط تخریب استفاده می‌شود (Flores, ۲۰۱۴).

۲-۳- الزامات بنیادی پیاده‌سازی روش تخریب توده‌ای

اجرای معدنکاری تخریبی نیازمند آماده‌سازی و سرمایه‌گذاری بیشتری نسبت به سایر روش‌های معدنکاری زیرزمینی است. اگرچه روش تخریبی هزینه سرمایه‌گذاری اولیه بالایی را می‌طلبد. اما به نسبت سایر روش‌ها، روشی انعطاف‌ناپذیر است. شروع مناسب و پیوستگی فرآیند تخریب، کنترل‌کننده بهره‌وری اولیه و عملکرد اقتصادی معدنکاری تخریبی است. از این‌رو، پیش‌بینی قابلیت تخریب و خردشوندگی به همراه طراحی صحیح راهبرد اجرای زیربرش برای آغاز فرآیند تخریب و همچنین حفظ انسجام آن، یکی از پایه‌های اصلی موفقیت روش تخریب توده‌ای است.

برای به‌کارگیری روش تخریب توده‌ای باید شرایط ماده‌ی معدنی و سنگ‌های اطراف از قبل به‌طور کامل شناسایی شده باشد زیرا هرگونه تغییر در این شرایط باعث تغییر در شرایط قابلیت تخریب، توقف عملیات و بروز خسارت‌های مالی فراوان می‌شود.

^۱ Hydraulic Fracturing

^۲ Confined Blasting

کانساری که قرار است به روش تخریب توده‌ای استخراج شود، باید مقاومت کمی داشته باشد تا در اثر احداث زیربرش تخریب‌شده، قسمت عمده‌ی آن به صورت قطعاتی با ابعاد کوچک بشکند و فرو بریزد. از سوی دیگر، مقاومت و پایداری ماده‌ی معدنی باید در حدی باشد که فرصت برای انجام کامل عملیات زیربرش تا پیش از شروع تخریب فراهم شود. زیرا در هنگام احداث زیربرش از هیچ وسیله‌ی نگهداری برای پایدارسازی سقف و دیواره‌ها نمی‌توان استفاده کرد (اورعی، ۱۳۸۳). در صورتی که روش تخریب توده‌ای برای کاربرد در انواع سنگ سخت‌تر در نظر گرفته شود، قبل از انتخاب روش هر دو عامل قابلیت تخریب و چگونگی خردایش مواد تخریب‌شده، باید بقدر کافی بررسی شوند.

توده‌ی سنگ کمربالای واقع بر روی کانسنگ باید سست و کم مقاومت باشد. اگر مقاومت کمربالا کمی بیشتر از مقاومت توده‌ی ماده‌ی معدنی باشد، شرایط بسیار مناسب‌تر خواهد بود، زیرا در نتیجه‌ی آن ابعاد قطعات حاصل از شکست سنگ باطله بزرگ‌تر از ابعاد قطعات تخریب سنگ معدنی خواهد بود.

شیب کانسار باید بیش از ۶۰ درجه باشد و هرچه به قائم نزدیک‌تر باشد مطلوب‌تر خواهد بود. در صورتی که کانسار افقی ولی ضخیم و بعد قائم آن زیاد باشد نیز می‌توان روش تخریب توده‌ای را در آن اجرا کرد (اورعی، ۱۳۸۳).

عمق کمتر از ۱۰۰ متر در این روش مناسب نیست. بهترین عمق بین ۶۰۰ تا ۱۲۰۰ متر است، در واقع عمق کانسار باید در حدی باشد که فشار روباره بر مقاومت سنگ غلبه نماید و موجب تخریب آن شود (اورعی، ۱۳۸۳). به‌طور کلی باید توجه داشت که این روش برای کانسارهای عمیق‌تر تحت تنش بالاتر مناسب‌تر است و گستره‌ی کاربرد بیشتری دارد (Brown, ۲۰۰۳).

اگر مقاومت فشاری کانسار در بازه ۵۰ تا ۲۵۰ مگا پاسکال و RMR آن در بازه ۲۵ تا ۷۰ تغییر کند، می‌توان به قابلیت قابلیت تخریب آن و پایداری زیربرش قبل از تخریب امید بیشتری داشت.

فرآیند تخریب و نشست ناشی از آن در سطح زمین در روش استخراج تخریب توده‌ای تقریباً غیرقابل کنترل است. طبیعتاً با انجام عملیات زیربرش و شروع تخریب و تخلیه‌ی کانسنگ، فضای خالی بزرگی در داخل زمین ایجاد می‌شود. پدیده‌ی تخریب در سنگ‌های کمربالا و طبقات بالایی نیز صورت می‌گیرد و بدین ترتیب در سطح زمین نشست قابل ملاحظه‌ای پیش خواهد آمد، بنابراین کانسار باید در منطقه‌ای واقع شده باشد که محدودیتی از نظر تخریب و نشست در سطح زمین وجود نداشته باشد (Hustrulid, et al., ۲۰۰۱).

وجود تنش‌های قائم در روش استخراج تخریب توده‌ای مساله‌ای بسیار مهم است. برای جلوگیری از بروز مشکلات ناشی از تنش‌های ثقلی باید مطمئن شد که طراحی عملیات استخراجی به صورت اصولی انجام می‌شود. یعنی اولاً به همان اندازه که تخریب رخ می‌دهد تخلیه از مسیرهای تخلیه صورت گیرد، زیرا اگر میزان تخلیه با میزان مواد تخریب شده برابر نباشد وزن اضافی روی نقاط تخلیه و راهروها وارد خواهد شد و دوم این که کلیه‌ی راهروهای استخراجی به صورت محکم و موثری نگهداری شوند (اورعی، ۱۳۸۳).

همواره باید منطقه‌ی زیربرش را به طور کامل تخلیه نمود و از انباشته شدن مواد بر روی هم در هر بخشی از فضای زیربرش جلوگیری کرد. در غیر این صورت مواد انباشته شده به صورت پایه عمل کرده، باعث گیرکردن و فشرده شدن مواد خردشده می‌شوند.

بسته به نیاز و برای دستیابی به شرایط تخریب مناسب باید با افزایش یا کاهش نرخ تخلیه، مقدار تخلیه از هر یک از کارگاه‌های استخراج را کنترل کرد.

اگر قابلیت تخریب و خردشدگی کانسنگ بالا باشد و ماده‌ی معدنی به راحتی شکسته و خرد شود، ارتفاع زیربرش باید کم و در حدود یک متر در نظر گرفته شود، زیرا در صورت زیاد بودن ارتفاع زیربرش احتمال ریزش سقف در هنگام اجرای عملیات زیربرش افزایش می‌یابد. از سوی دیگر در صورتی که کانسنگ مقاومت نسبتاً خوبی داشته و قابلیت تخریب و خردشدگی آن پایین باشد

فصل دوم: روش تخریب توده‌ای و ساز و کار تخریب

ارتفاع زیربرش تا حدود ۲ متر افزایش داده می‌شود، تا شرایط برای خردشدگی مطلوب و مناسب در کانسنگ فراهم شود (Hustrulid, et al., ۲۰۰۱).

در برخی مواقع ممکن است تخریب اولیه‌ای ایجاد شود که در ادامه با ایجاد سقفی پایدار همراه باشد. در این حالت مساحت زیربرش باید افزایش یابد و لازم است دیگر روش‌ها مانند تضعیف مرزها، برای شروع دوباره تخریب به کار برده شوند. به هر حال با در نظر گرفتن اندازه کافی برای مساحت زیربرش، تخریب ممکن است در هر توده سنگی القا شود.

چنانچه فاصله‌ی محل‌های تخلیه از حد مناسب آن بیشتر شود احتمال توقف گسترش خط تخریب به سمت بالا زیاد است و در صورتی که این فاصله از حد لازم کمتر باشد مشکلاتی در پایداری قیف‌ها و راهروها به وجود می‌آید.

بهترین سیستم کنترل برای مسایل مربوط به میزان تولید، تخلیه و تخریب در این روش، طراحی محل‌های تخلیه هست. در واقع محل‌های تخلیه مانند یک شیر کنترل عمل می‌کنند (اورعی، ۱۳۸۳).

قابلیت تخریب و خردشوندگی، نه تنها از نظر قابلیت معدنکاری، بلکه از نظر اثرگذاری در هزینه‌های آتش کاری، بارگیری، حمل و نقل، سنگ‌شکنی و درصد بازیابی ماده معدنی نیز مهم هستند (Lorig, et al., ۱۹۹۵). همان‌طور که پیش از این بیان شد، در روش تخریب توده‌ای قابلیت تخریب و خردشوندگی سنگ روباره که در بالای کانسنگ قرار دارد، نیز باید مورد بررسی و ارزیابی قرار گیرد. تخریب در سنگ روباره، باید به منظور تأمین نیروی ثقل لازم برای تخریب و خردشوندگی کانسنگ و نیز برای پیشگیری از تشکیل فضای خالی^۱ بین کانسنگ و سنگ روباره در حین فرآیند استخراج کانسنگ، همچنان ادامه پیدا کند. این کار برای کنترل اختلاط و افت ماده‌ی معدنی و همچنین مهار انفجار هوا^۲ نیز ضروری است. همچنین کنترل جریان برای به حداقل رساندن ترقیق و

^۱ Air gap

^۲ Air Blast

محدود کردن حرکت ذرات سنگ روباره به درون جریان کانسنگ خردشده باید به طور بهینه طراحی شود (Mawdesley, ۲۰۰۲).

۲-۴- مفاهیم تخریب

تخریب در نتیجه تاثیر نیروی جاذبه و تنش‌های القایی در سقف زیربرش یا فضای پشت تخریب رخ می‌دهد. بر اساس نظریه کندورسکی^۱ شروع و انتشار موفق تخریب به حضور دسته ناپیوستگی‌ها با انتشار خوب و شیب کم وابسته است. مناسب‌ترین شرایط برای تخریب، وجود یک دسته ناپیوستگی با شیب کم به همراه دو دسته ناپیوستگی با شیب زیاد است (Brown, ۲۰۰۳).

اگر تنش‌های مماسی القاشده در سقف زیربرش کم باشد یا تمایل به کشش داشته باشد، بلوک-های سنگی ممکن است تحت نیروی جاذبه ریزش کنند یا در جهت شیب ناپیوستگی‌های پرشیب لغزش نمایند. این حالت زمانی اتفاق می‌افتد که مقدار تنش‌های افقی برجا ناچیز باشد یا در اثر وجود مرزهای ضعیف شده و ایجاد شکاف‌های قائم یا معدنکاری‌های قبلی، رهاسازی تنش‌ها و توزیع مجدد آن‌ها باعث کاهش شدت این تنش‌ها بر روی بلوک یا پهنه در حال استخراج شده باشد. حتی با این شرایط گاهی اوقات ممکن است یک سقف قوسی پایدار در سقف فضای خالی ایجاد شود، به خصوص اگر روند تخلیه نامناسب باشد (Brady, et al., ۲۰۰۵).

از طرف دیگر زمانی که مقدار تنش‌های مماسی القا شده در مقایسه با مقاومت فشاری توده سنگ و مقاومت برشی ناپیوستگی‌ها بیشتر باشد، ممکن است در مرزهای توده سنگ و بلوک‌ها یا نزدیک آن‌ها شکست و گسیختگی اتفاق افتد و بلوک‌ها یا تخته‌سنگ‌ها آزاد شده و در اثر نیروی وزن خود ریزش کنند. تحت این شرایط فرایند غالب شکست، شکست ترد سنگ سالم و لغزش در جهت ناپیوستگی‌ها است. این نحوه از تخریب در گروه تخریب تنشی جای می‌گیرد. دوپلانسیک^۲ و بردی^۳

^۱ Kendorski

^۲ Duplancic

^۳ Bardy

از سیستم کنترل لرزه‌ای برای مطالعه هر گام تخریب در معادن نورث‌پارک استفاده کرده‌اند و از روی داده‌های جمع‌آوری و تحلیل شده، مدلی مفهومی از تخریب را توسعه دادند که در شکل ۲-۳، نشان داده شده است. این مدل شامل پنج ناحیه است که به صورت زیر توصیف می‌شوند (Laubscher, ۲۰۰۰):

- ۱- منطقه تخریب^۱: این منطقه شامل بلوک‌های سنگی است که از سقف فضای استخراجی سقوط کرده‌اند. مواد تخریب شده در این منطقه به عنوان سیستم نگهداری دیوارهای فضای تخریب عمل می‌کنند.
- ۲- فضای خالی^۲: فضای خالی به فاصله بین سطح بالای ستون توده سنگ تخریب شده و سقف فضای استخراجی گفته می‌شود. در طول تخریب پیوسته، ارتفاع فضای خالی ایجاد شده تابعی از نرخ استخراج مواد از نقاط تخلیه است.
- ۳- منطقه سست شدگی^۳: منطقه‌ای است که جابجایی‌های بزرگ مقیاس سنگ در این ناحیه اتفاق می‌افتد. این منطقه به مدت طولانی پایداری مناسبی را فراهم نمی‌کند.
- ۴- منطقه لرزه‌ای^۴: جبهه فعال لرزه‌ای که در اثر لغزش روی درزه‌ها و شکست ترد سنگ اتفاق می‌افتد. این رفتار در اثر تغییر شرایط تنش که ناشی از پیشروی زیربرش و انتشار تخریب است، ایجاد می‌شود.
- ۵- محدوده شبه پیوسته: این محدوده در توده سنگ بالای جبهه فعال لرزه‌ای قرار دارد و در آن رفتار توده سنگ از نوع الاستیک است.

اگر تنش‌های برجای افقی و تنش‌های مماسی القا شده در سقف زیربرش یا فضای تخریبی به اندازه کافی برای ایجاد تنش‌های محصورکننده بزرگ باشند، ولی از مقاومت فشاری توده سنگ

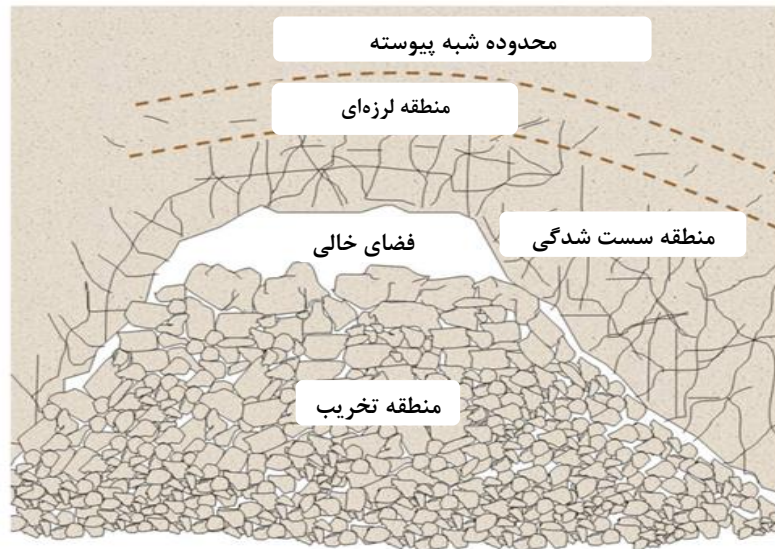
^۱ Cave zone

^۲ Air gap

^۳ Zone of loosening

^۴ Seismogenic zone

بیشتر نشوند، تخریب ممکن است متوقف شود و سقف قوسی شکل پایدار توسعه یابد. این حالت احتمال بروز مشکلاتی نظیر توقف تولید، احتمال آسیب دیدن کارکنان و تجهیزات، افزایش هزینه-های القای مجدد تخریب در توده سنگ را افزایش خواهد داد.



شکل ۲-۳: مدل مفهومی تخریب (Duplancic, et al., ۱۹۹۹)

شروع تخریب شامل اولین شکست یا بازشدگی در توده سنگ است که به طور مستقیم وابسته به قابلیت تخریب توده سنگ و نحوه احداث زیربرش است. زمانی که زیربری با حفاری و آتشیاری و انتقال کانسنگ خردشده، ایجاد می‌شود، ستون کانسنگ از زیر بدون نگهداری باقی مانده و شکست یا ریزش سنگ در فضای آزاد ایجاد شده، اتفاق می‌افتد، به این پدیده تخریب اولیه گفته می‌شود (Brown, ۲۰۰۳).

انتشار تخریب در اثر ریزش پیوسته ستون کانسنگ در فضای آزاد ایجاد شده، اتفاق می‌افتد. ابعاد زیربرش ایجاد شده برای رسیدن به تخریب اولیه و برای پیشگیری از وقوع و توسعه فضای قوسی شکل پایدار در سقف زیر برش نیاز به توسعه دارد. سقف قوسی شکل بزرگ‌ترین مانع برای انتشار تخریب در این روش است. تخریب پیوسته تا زمانی که فضای خالی در حین تخریب وجود داشته باشد اتفاق می‌افتد. زمانی که سطح زیربرش به اندازه کافی بزرگ باشد، از تشکیل سقف قوسی شکل

پایدار پیشگیری و تخریب پیوسته اتفاق خواهد افتاد. بدیهی است که نرخ انتشار تخریب، توسط نرخ و الگوی حرکت مواد شکسته شده، کنترل می‌شود (Mawdesley, ۲۰۰۲).

۲-۵- قابلیت تخریب توده سنگ

قابلیت تخریب مفهومی برای نشان دادن قابلیت شکسته شدن توده سنگ یک کانسار تحت شرایط محیطی خاص است. تخمین ابعاد مورد نیاز زیربرش - که با شعاع هیدرولیک بیان می‌شود - برای شروع فرآیند تخریب در یک توده سنگ با خواص مکانیکی معلوم، مساله اصلی برای برآورد قابلیت تخریب است. به‌طور صریح‌تر به توانایی شکست شدن توده سنگ برجا پس از ایجاد برش در زیر آن به‌گونه‌ای که در صورت شروع فرآیند تخریب با تخلیه کانسنگ خردشده، گسترش تخریب به‌صورت پیوسته ادامه یابد، قابلیت تخریب گفته می‌شود (Catalan, et al., ۲۰۱۰).

شروع و پیوسته بودن تخریب، کنترل‌کننده‌ی بهره‌وری اولیه و عملکرد اقتصادی روش تخریب توده‌ای است. در صورتی که قابلیت تخریب کانسنگ به‌درستی ارزیابی نشود، اقداماتی با هزینه‌های بالا و وقت‌گیر، برای شروع یا حفظ تخریب به بهره‌بردار معدن تحمیل خواهد شد. اهمیت این موضوع با توجه به افزایش قابل توجه به‌کارگیری روش‌های تخریبی در توده‌سنگ‌های مقاوم‌تر در حال افزایش است (Van As, et al., ۲۰۰۰). یک تخمین قابل اطمینان از قابلیت تخریب توده سنگ به شناسایی عوامل تاثیرگذار بر آغاز و انتشار تخریب و خصوصیات دقیق تنش‌های برجای توده سنگ نیاز دارد. در دو دهه گذشته چندین روش تجربی و عددی برای بررسی و پیش‌بینی قابلیت تخریب توده سنگ ارائه شده است.

قابلیت تخریب توده سنگ تابعی از عوامل طبیعی و محیطی است. کنترل یا اصلاح عوامل موثر در قابلیت تخریب توده سنگ دارای محدودیت‌های زیادی است. بهترین روند در بررسی قابلیت تخریب توده سنگ تعیین دقیق خصوصیات ژئومکانیکی توده سنگ است. این اطلاعات مبنای تفسیر چگونگی تخریب خواهد بود. تعیین محدوده‌های ژئوتکنیکی در تخریب یکی از عوامل حساس

بهینه‌سازی قابلیت تخریب بر مبنای عوامل القایی مانند طراحی زیربرش و جهت پیشروی است (Kendorski, ۱۹۷۸).

۲-۶- روش‌های تجربی بر آورد قابلیت تخریب

چالش عمده موجود در توسعه‌ی روش‌های تجربی برای پیش‌بینی قابلیت تخریب، ترکیب مقادیر کیفیت توده سنگ، خصوصیات زیربرش و تنش‌های القایی با یک وسیله ساده و درعین حال کارآمد است. از لحاظ تاریخی، تجربه، مهم‌ترین روش در تشخیص قابلیت تخریب توده سنگ بوده است و روش‌های تجربی که برای ارزیابی قابلیت تخریب توسعه‌یافته‌اند بر مبنای داده‌های تجربی حاصل از عملیات تخریب در معادن گوناگون بنا شده‌اند (Mawdesley, ۲۰۰۲).

۲-۶-۱- روش کینگ^۱

روش کینگ اولین روش تجربی پیش‌بینی قابلیت تخریب است که در سال ۱۹۴۵ برای معادن کلایمکس^۲ ارایه شده است. در این روش میزان قابلیت تخریب توده‌سنگ بر مبنای نوع سنگ، فاصله‌داری ناپیوستگی‌ها و کانی‌شناسی محاسبه‌شده است. این روش به دلیل این‌که بسیاری از خصوصیات ژئومکانیکی ناپیوستگی‌ها و سایر عوامل موثر بر قابلیت توده سنگ را در نظر نگرفته است، چندان قابل اتکا نیست (Mahtab, et al., ۱۹۷۷).

۲-۶-۲- روش شاخص قابلیت تخریب

در روش شاخص قابلیت تخریب، رابطه‌ای کمی بین RQD و سهولت تخریب بر مبنای تجربه‌های قبلی تخریب در معادن کلایمکس و یو راد^۳ توسعه داده شده است. عواملی مانند RQD و عامل سائیدگی (برای انفجار ثانویه)، برای تعریف شاخص قابلیت تخریب مورد استفاده قرار گرفته‌اند. همان‌طور که در شکل ۲-۴، مشاهده می‌شود، شاخص قابلیت تخریب، میزان سهولت در تخریب را با

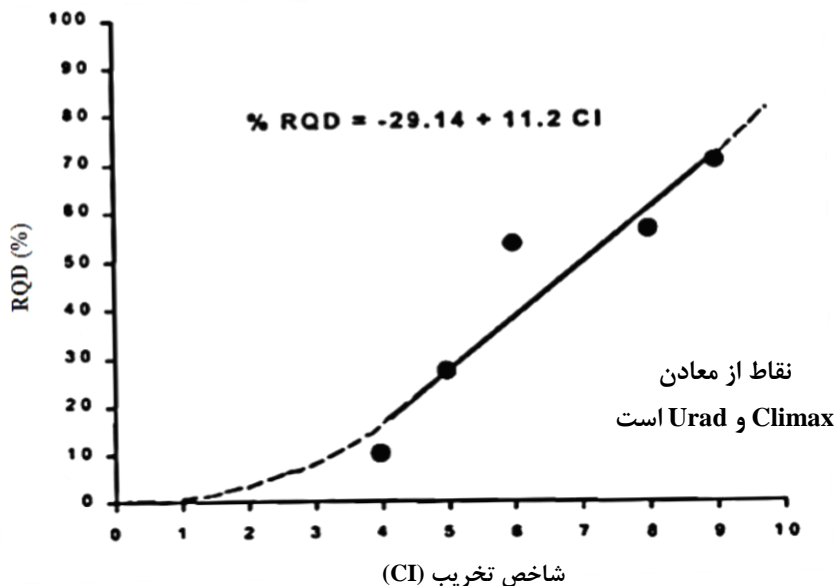
^۱ King

^۲ Climax

^۳ Urad

فصل دوم: روش تخریب توده‌ای و ساز و کار تخریب

استفاده از مقیاس خطی از یک تا ده تعریف می‌کند. شاخص تخریب از میان همه عوامل موثر بر تخریب، تنها فراوانی ناپیوستگی‌ها را در نظر گرفته است. این روش نیز به دلیل این‌که از بین عوامل موثر در تخریب توده سنگ تنها فراوانی ناپیوستگی‌ها (RQD) را در نظر گرفته است، چندان قابل اتکا نیست (McMahon, et al., ۱۹۶۹). شاخص ارایه‌شده برای استفاده محلی و فقط با در نظر گرفتن RQD برای بررسی قابلیت تخریب مورد استفاده قرار گرفته، از این‌رو نتایج حاصله چندان قابل اتکا نبوده و قابلیت تعمیم این روش به سایر معادن با شرایط متفاوت توده سنگ وجود ندارد (Mawdesley, ۲۰۰۲).



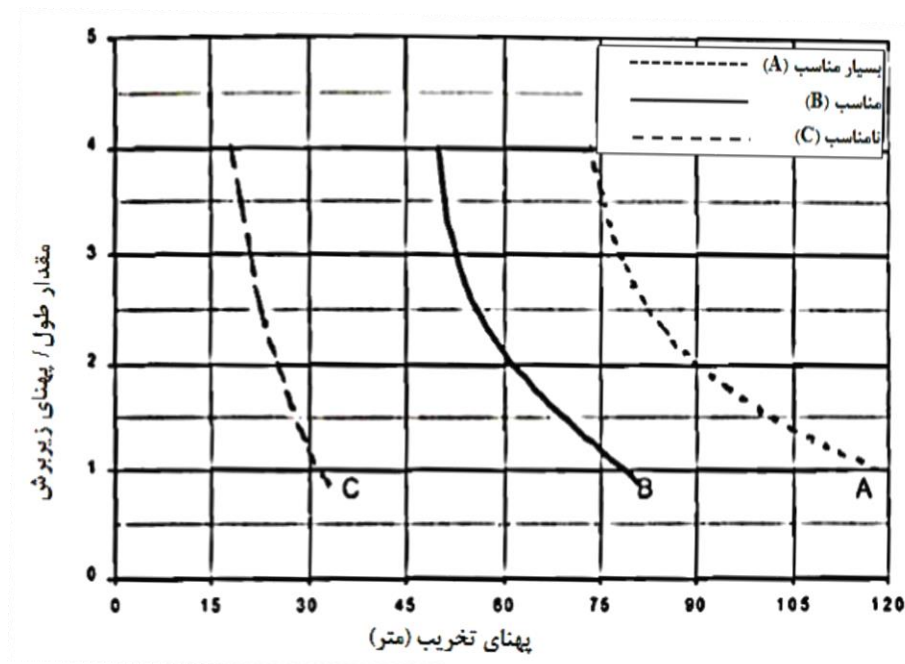
شکل ۲-۴: نمودار رابطه بین RQD و شاخص قابلیت تخریب (McMahon, et al., ۱۹۶۹)

۲-۶-۳- روش حداقل عرض زیر برش

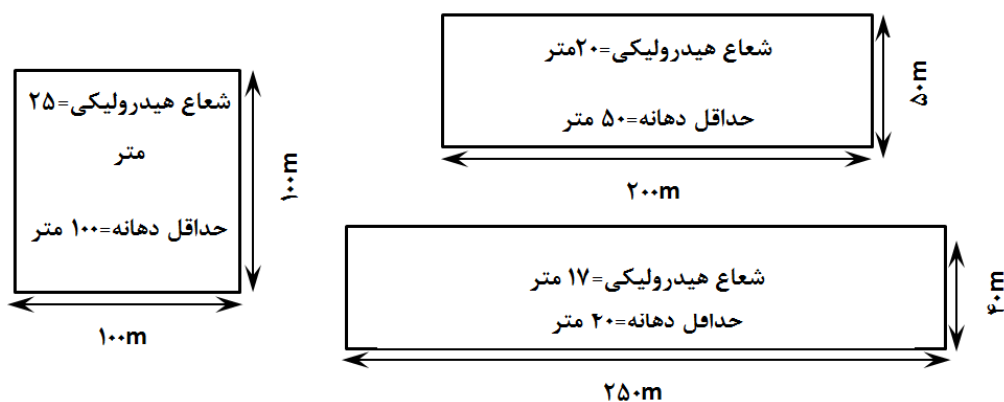
یکی از مشکلاتی که در ارتباط با قابلیت تخریب وجود دارد، تعیین اندازه‌ی عرض زیربرش است که معمولاً توسط هندسه کانسنگ محدود می‌شود. اگر عرض زیربرش به اندازه کافی بزرگ نباشد، باعث تشکیل سقف قوسی شکل در بالای زیربرش می‌شود. انواع مختلف توده سنگ، تمایل طبیعی به تشکیل سقف قوسی شکل دارند و دهانه قوس تشکیل شده به مقاومت سنگ و تنش‌های القایی وابسته است (Vera, ۱۹۸۱). لابسچر روشی را برای تخمین عرض زیربرش مورد نیاز برای تخریب

فصل دوم: روش تخریب توده‌ای و ساز و کار تخریب

پیوسته در شرایط مقاومت متغیر توده سنگ برای جلوگیری از تشکیل سقف قوسی شکل پیشنهاد داده است. در شکل ۲-۵، نمودار قابلیت تخریب بر مبنای نسبت ابعادی طول به عرض زیربرش به سه بخش بسیار مناسب، مناسب و نامناسب تقسیم شده است. تاثیر حداقل عرض زیربرش بر شعاع هیدرولیکی با مساحت‌های برابر در شکل ۲-۶، نشان داده شده است (Laubscher, ۲۰۰۰).



شکل ۲-۵: عرض زیربرش مورد نیاز برای تخریب پیوسته برای زیربرش‌های مستطیل شکل (Vera, ۱۹۸۱)



شکل ۲-۶: تاثیر تغییر حداقل عرض زیربرش بر شعاع هیدرولیکی در زیربرش‌هایی با مساحت برابر (Laubscher, ۲۰۰۰)

۲-۶-۴- روش نمودار تخریب لابسچر

به‌طور کلی اگر عرض زیربرش به حد کافی بزرگ باشد، در هر نوع توده‌سنگی با هر مقاومت و مشخصات مکانیکی، تخریب امکان‌پذیر خواهد بود. اما در حالت متعارف و معمول دو عامل زیر تعیین می‌کند که آیا باید از روش تخریب استفاده شود یا خیر (Heslop, et al., ۱۹۸۱).

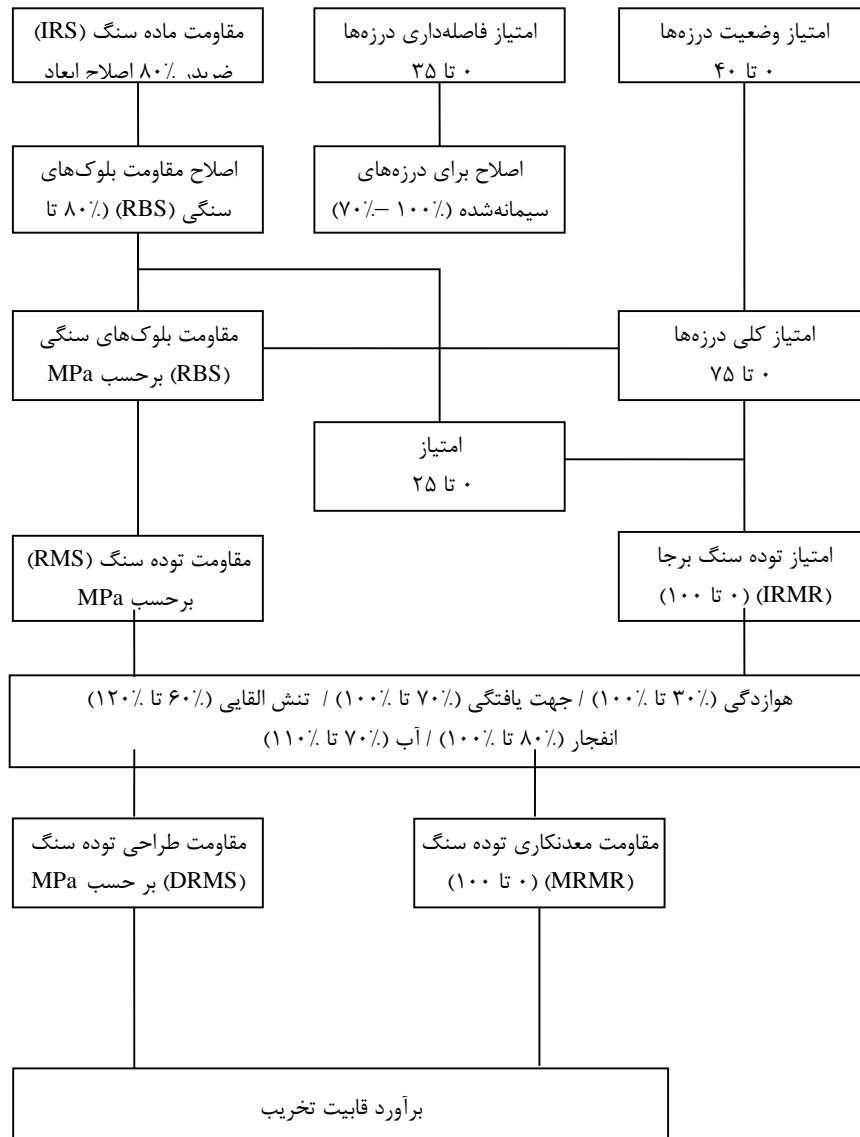
الف- درجه شکستگی‌های توده سنگی که قرار است تخریب شود. که این عامل در روش تخریب لابسچر با توجه به مقدار RQD برآورد می‌شود.

ب- امتیاز درزه که با توجه به مقادیر فاصله درزه‌ها، شرایط سطح درزه (زبری و هوازدهی)، پرشدگی درزه‌ها و شرایط آب زیرزمینی تعیین می‌شود. در واقع امتیاز درزه خصوصیات درزه را توصیف می‌کند.

در تلاش‌های انجام شده به منظور توسعه روشی تجربی برای پیش‌بینی قابلیت تخریب، لابسچر یک سیستم طبقه‌بندی به نام امتیاز معدنکاری توده سنگ (MRMR) ارائه کرده است. در این سیستم، مطابق فلوجارت شکل ۲-۷، امتیاز معدنکاری توده سنگ از ضرب RMR در عامل‌های تعدیل به دست می‌آید.

در روش لابسچر بر مبنای داده‌های موجود از معادن مختلف دو خط مرزی ترسیم می‌شود که نمودار را به سه محدوده‌ی پایدار، انتقالی و تخریب تقسیم می‌کند. منطقه انتقالی نشان دهنده امکان‌پذیر بودن شروع تخریب است، اما تخریب پیوسته اتفاق نمی‌افتد، در حالی که منطقه تخریب نشان‌دهنده تخریب کامل است که در آن تخریب پیوسته و پایا اتفاق می‌افتد (Laubscher, ۲۰۰۰). همان‌طور که در شکل ۲-۸، نشان داده شده، برای تعیین قابلیت تخریب توده سنگ از شعاع هیدرولیکی استفاده می‌شود. طبق این نمودارها، هر چه توده سنگ، امتیاز بیشتر و شعاع هیدرولیکی مقدار کمتری داشته باشد، توده سنگ پایدارتر بوده و قابلیت تخریب کمتری دارد. لذا برای داشتن قابلیت تخریب خوب، به شعاع هیدرولیکی زیاد و توده سنگ ضعیف‌تر نیاز است.

فصل دوم: روش تخریب توده‌ای و ساز و کار تخریب



شکل ۲-۷- نحوه تعیین MRMR (Laubscher, ۲۰۰۰)

معادن زیادی از روش نمودار تخریب لابسچر برای تخمین ابعاد زیر برش لازم برای القای تخریب پیوسته استفاده کرده‌اند. تعدادی از این معادن سازگاری خوبی را بین مدل پیش‌بینی شده و ابعاد واقعی زیر برش گزارش داده‌اند. باین حال لوریگ^۱ (۱۹۹۵)، ون‌اس^۲ و جفری^۳ (۲۰۰۰)، اسکوبار^۴

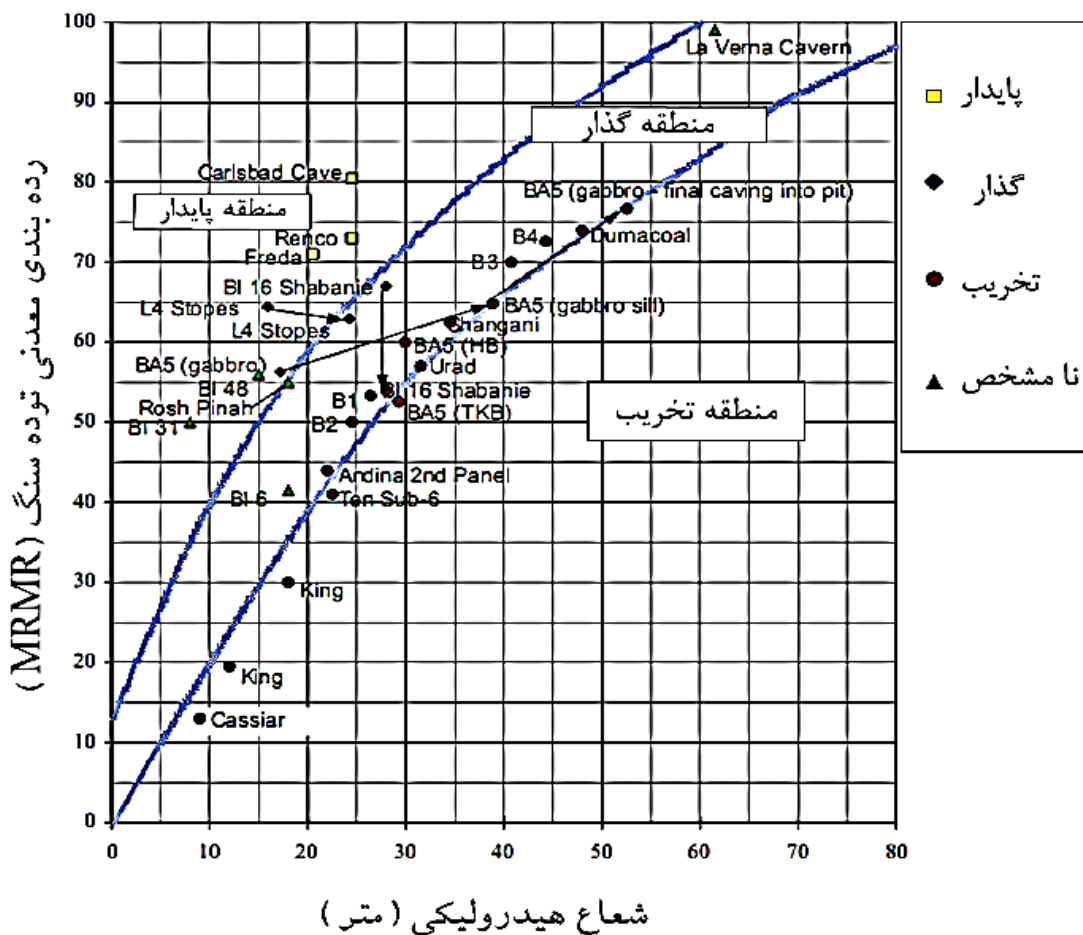
^۱ Lorig

^۲ Van As

^۳ Jeffrey

^۴ scobar

و فیش ویک^۱ (۲۰۰۰)، تفاوت‌های قابل توجهی را بین مدل واقعی ابعاد زیر برش و آنچه توسط نمودار لابسچر پیش‌بینی شده بود، گزارش داده‌اند. همچنین در دامنه توده‌سنگ‌های با مقاومت بیشتر، به علت کم بودن مطالعات موردی، تخمین‌های نادرست توسط نمودار لابسچر گزارش شده است. به بیان دیگر، موقعیت مرزها در نمودار تخریب لابسچر برای تخمین قابلیت تخریب توده‌سنگ‌های مقاوم با MRMR بالاتر از ۵۰ قابل اطمینان نیست (Sainsbury, et al., ۲۰۱۱). فقدان دستورالعمل‌های قابل فهم و روشن در استفاده از تعدیلات معدنی در تعیین مقدار MRMR به نوبه خود بر روی قابلیت اطمینان محاسبات MRMR تاثیر گذار است.



شکل ۲-۸: ارتباط بین طبقه‌بندی لابسچر، شعاع هیدرولیکی و قابلیت تخریب (Brown, ۲۰۰۳)

^۱ Fish Wick

تعداد محدود مطالعات موردی در نمودار تخریب لابسچر سه ناحیه پایداری مجزا را مشخص می‌کنند و عدم تأیید تعدادی از مطالعات موردی شک و تردید را در مورد صحت مناطق پایداری در نمودار تخریب بالا می‌برد. عدم قطعیت در تعیین ضریب‌های تعدیل در محاسبه MRMR بدین معنی است که بهبود نمودار تخریب لابسچر حتی با اضافه کردن سوابق موردی بیشتر دشوار است (Mawdesley, ۲۰۰۲).

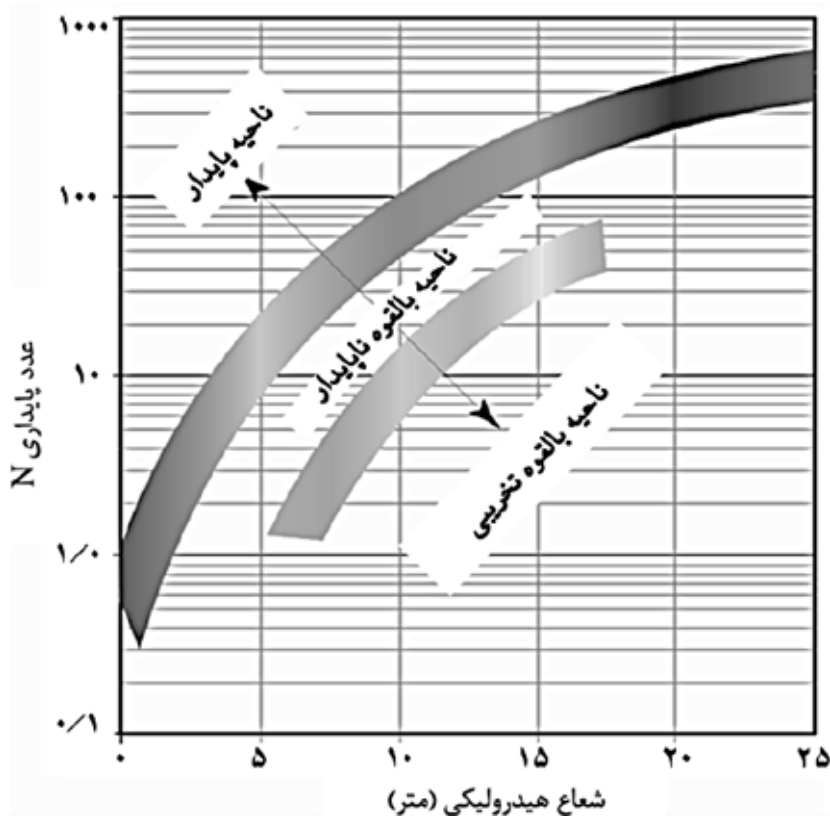
۲-۶-۵- روش نمودار پایداری ماتیوس

نمودار پایداری ماتیوس از نظر مفهومی بسیار شبیه به نمودار تخریب لابسچر است. ماتیوس این روش را برای طراحی کارگاه‌های باز^۱ و عمق کمتر از ۱۰۰۰ متر ارائه کرده است. طراحی در روش ماتیوس مطابق شکل ۲-۹، بر اساس برآیندی از دو عامل عدد پایداری (N) و ضریب شکل یا شعاع هیدرولیکی (S) انجام می‌شود. عدد پایداری نشان‌دهنده توانایی توده سنگ در حفظ پایداری تحت تنش‌های موجود است و ضریب شکل یا شعاع هیدرولیکی برای محاسبه هندسه سطح استفاده می‌شود. عدد پایداری در محور عمودی قرار می‌گیرد و برآوردی از کیفیت توده سنگ اطراف کارگاه را نشان می‌دهد.

برای در نظر گرفتن تنش‌های القایی و جهت استخراج باید از ضرایب تعدیل استفاده شود. نمودار پایداری ماتیوس به سه ناحیه‌ی پایدار، احتمالاً ناپایدار و تخریبی و نیز دو ناحیه‌ی گذار تقسیم می‌شود.

نمودار پایداری ماتیوس بر پایه تجزیه و تحلیل بیش از ۳۵۰ مطالعه موردی از معادن زیرزمینی کانادا استوار است و دربرگیرنده عوامل اصلی موثر بر طراحی کارگاه‌های باز است (Suorineni, et al., ۲۰۰۰).

^۱ Open stoping



شکل ۲-۹: نمودار پایداری ماتیوس (Mathews, et al., ۱۹۸۰)

۲-۶-۶- روش نمودار توسعه یافته ماتیوس

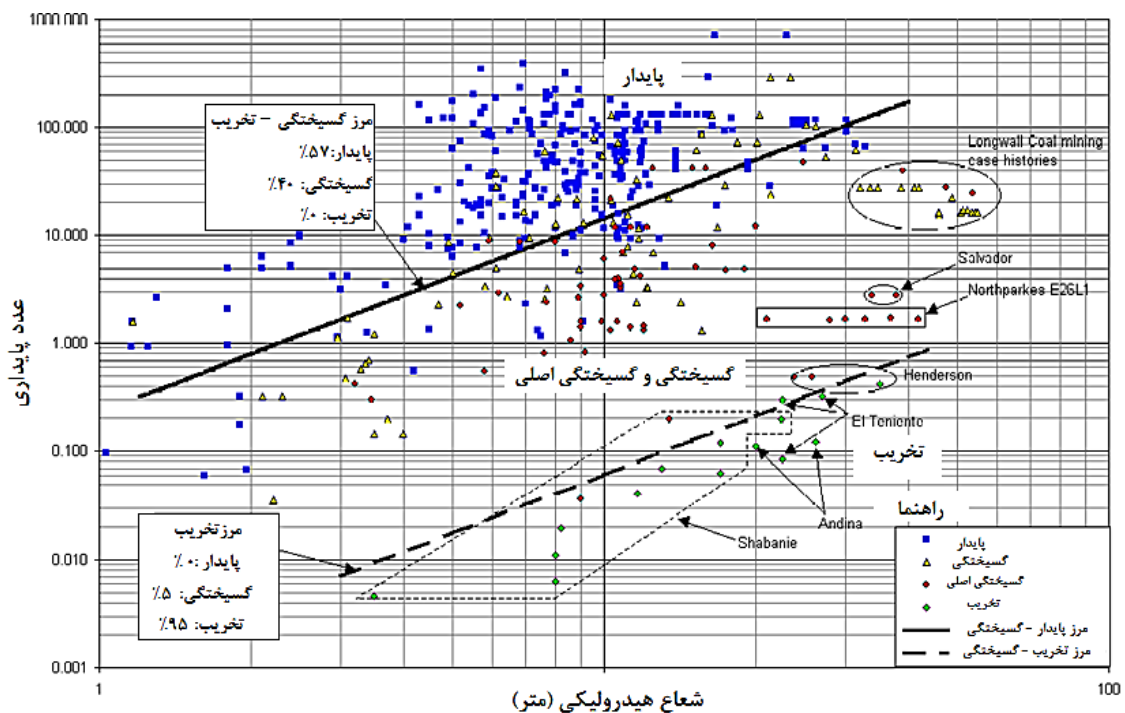
با افزایش مطالعات موردی در کاربرد نمودار پایداری ماتیوس، ترومن^۱ داده‌های مربوط به پایداری، گسیختگی‌های فرعی و اصلی مناطق مورد مطالعه را جمع‌آوری و روش ماتیوس را در دامنه وسیعی از کارگاه‌های باز و خصوصیات توده سنگ توسعه داده است (Trueman, et al., ۲۰۰۰). شکل ۲-۱۰، نمودار ماتیوس را با احتمال تخریب در مرزهای تعیین شده نشان می‌دهد. سپس ماودسلی و همکارانش، تحلیل رگرسیون منطقی^۲ برای تعریف مرزهای پایداری، گسیختگی‌های اصلی و فرعی و استفاده از نمودار اصلاح شده ماتیوس را ارائه نمودند، این نمودار بر اساس پایگاه داده‌ای متشکل از ۴۰۰ نمونه از معدن چارلوت^۳ و سایر معادن استرالیا ترسیم شده است

^۱ Trueman

^۲ Logistic regression

^۳ charlotte

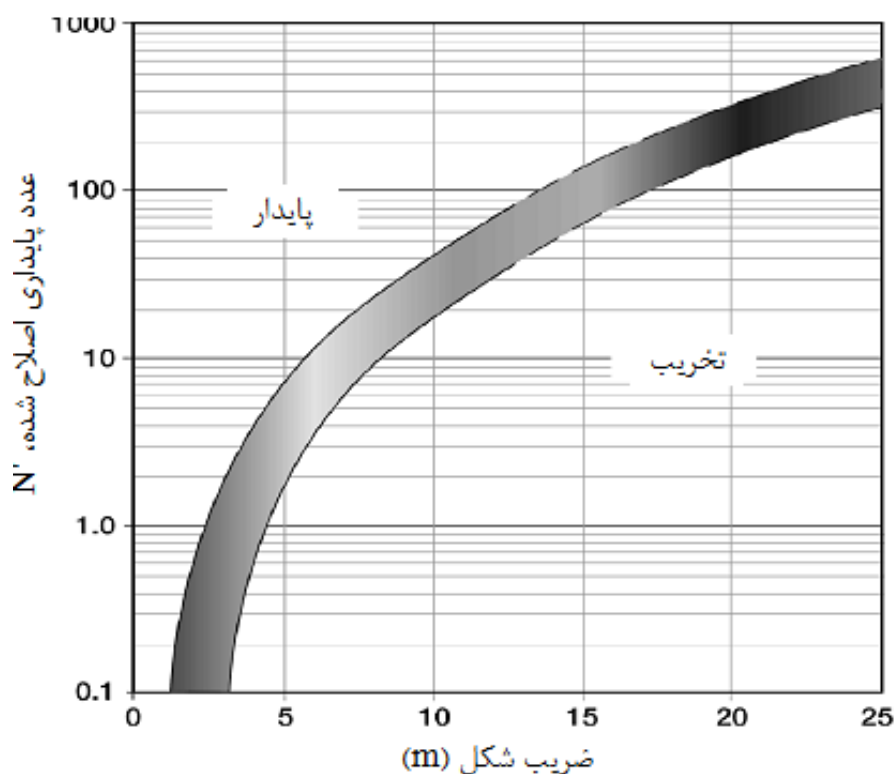
(Mawdesley, et al., ۲۰۰۱). روش ماتیوس دستورالعمل‌های دقیق‌تری نسبت به لابسچر برای تعیین ضرایب تعدیل ارایه کرده است. این کار باعث کاهش ذهنی‌گرایی موجود در تجربه‌های شخصی شده است. با این وجود هنوز مقدار قابل توجهی از ذهنیت‌گرایی در استفاده از روش‌های مبتنی بر طبقه‌بندی توده سنگ وجود دارد (Brown, ۲۰۰۳).



شکل ۲-۱۰: توسعه نمودار ماتیوس برای کارگاه‌های باز (Mawdesley, et al., ۲۰۰۱)

۲-۶-۷ - نمودار پاتوین

نمودار پاتوین در واقع یک نسخه اصلاح شده از نمودار پایداری ماتیوس است. بر اساس نمودار شکل ۲-۱۱، نمودار پاتوین، شامل دو ناحیه پایدار و تخریبی و یک ناحیه‌ی گذار است. این نمودار بر اساس بررسی ۱۷۵ مورد مطالعاتی بنا نهاده شده و صرفاً برای یک برآورد سرانگشتی مناسب است. نتایج حاصل از نمودار پایداری پاتوین در شرایطی که شعاع هیدرولیکی کوچک باشد، نسبت به نتایج حاصل از نمودار پایداری ماتیوس برای پیش‌بینی قابلیت تخریب محافظه‌کارانه‌تر است (Mawdesley, et al., ۲۰۰۱).

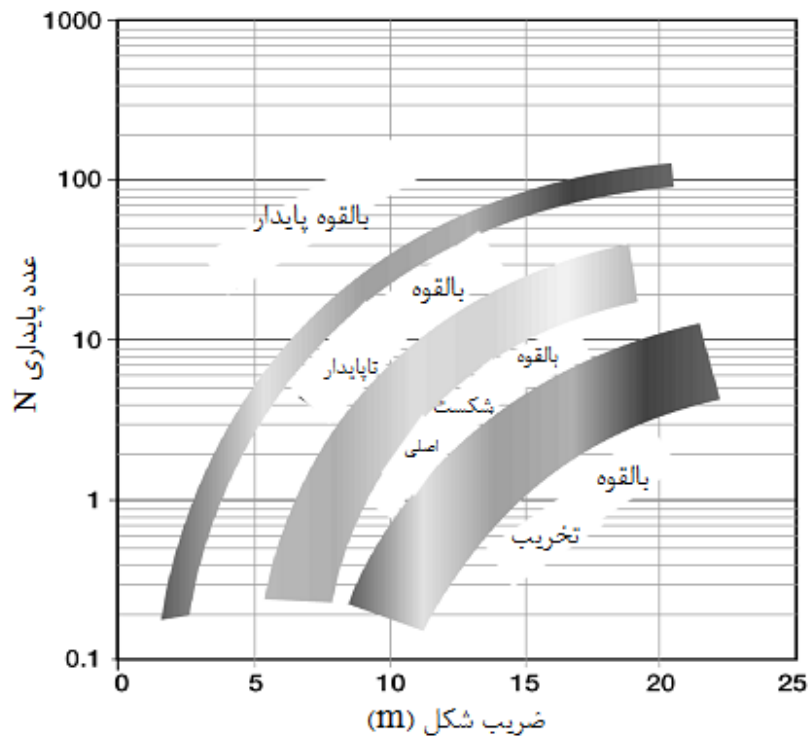


شکل ۲-۱۱: نمودار اصلاح‌شده‌ی پایداری توسط پاتوین (Potvin, ۱۹۸۹)

۲-۶-۸ - نمودار پایداری استوارت و فورسیت

نمودار پایداری استوارت و فورسیت نیز در راستای اصلاح نمودار پایداری ماتیوس ارائه‌شده است. مطابق شکل ۲-۱۲، در نمودار پایداری استوارت و فورسیت، چهار ناحیه‌ی احتمالاً پایدار، احتمالاً ناپایدار، دارای احتمال وقوع شکست بزرگ و احتمالاً تخریبی و سه ناحیه‌ی گذار وجود دارد.

در نمودار پایداری استوارت و فورسیت، ناحیه‌ی احتمالاً تخریبی بر مبنای نمودار تخریب لابسچر تقریب زده شده بود، اما از آنجا که داده‌ای برای اعتبارسنجی مکان قرارگیری خط تخریب وجود نداشت، استوارت و فورسیت با استفاده از تحلیل برگشتی نمونه‌هایی از معادن تخریب توده‌ای و پهنه‌ای، ناحیه‌ی تخریب را در نمودار، با قابلیت اطمینان بیش‌تر ترسیم کردند (Mawdesley, et al., ۲۰۰۱).



شکل ۲-۱۲: نمودار اصلاح‌شده‌ی پایداری ماتیوس توسط استوارت و فورسیت (Stewart, et al., ۱۹۹۵)

۲-۷- روش‌های عددی بر آورد قابلیت تخریب

تاریخچه مدل‌سازی عددی تخریب از سال ۱۹۷۳ که در آن اولین مدل‌سازی عددی تخریب

انجام شد، به شرح زیر است:

۲-۷-۱- مدل‌های الاستیک دوبعدی

پالما^۱ و اگاروال^۲ (۱۹۷۳) از دانشگاه کلمبیا، اولین مدل اجزای محدود الاستیک دوبعدی را برای مطالعه قابلیت تخریب معدن ال‌تنینت توسعه داده‌اند. این محققین تأکید کرده‌اند که تاثیر شبکه شکستگی‌های توده سنگ بر جا و جهت تنش اصلی در ارتباط با جهت زیربرش را باید بر روی قابلیت تخریب، جدی گرفت. در این شبیه‌سازی فرض شده است که تخریب فقط در اثر شکست کششی

اتفاق می‌افتد (Sainsbury, et al., ۲۰۱۱).

^۱ Palma
^۲ Agarwal

۲-۷-۲ - مدل‌های پلاستیک دوبعدی

در خلال کاربرد شبیه‌سازی دو بعدی اجزای محدود در معدن گریس^۱ در پنسیلوانیای^۲ آمریکا، بارلا^۳ (۱۹۸۰) برای نشان دادن تغییر و تبدیل سنگ‌های برجا به یک حالت به‌طور کامل ضعیف و خردشده در روند تخریب، یک مدل مواد نرم شونده را معرفی نمود. استفاده از این مدل مواد نشان داد که تخریب تنها در اثر سازوکار کششی اتفاق نمی‌افتد و تنش‌های فشاری نیز در این روند تاثیر دارند. رفتار نرم شونده در یک بازبینی دوره‌ای حالت شکست، برای منطقه‌های مختلف شبیه‌سازی شده است. اگر در یک منطقه در اثر هر یک از سازوکارهای کششی یا فشاری شکست اتفاق افتد، آنگاه چگالی و صلبیت در مدل به مقدار جدید باقی‌مانده کاهش می‌یابد. کار گزارش‌شده توسط بارلا و بوشکوو^۴ مفهوم دقیق‌تری از تغییر در مقاومت و چگالی در روند تخریب فراهم کرده و اهمیت توانایی نشان دادن روند مرحله به مرحله تخریب در مدل عددی را نشان داده است (Barla, et al., ۱۹۸۰).

در اوایل دهه ۱۹۹۰، رچ و لوریگ^۵ (۱۹۹۲)، تحلیل تفاضل محدود دو بعدی را با کد عددی FLAC برای معدن هندرسون در کلرادو انجام دادند. این اولین تلاش برای مرتبط کردن برنامه و تناژ تولید با پیشروی شبیه‌سازی شده تخریب است. در طی مطالعه بین‌المللی تخریب (ICS)، تاثیر عمق، تنش، ساختار، مقاومت توده سنگ و آب زیرزمینی، بر قابلیت تخریب از طریق یک تحلیل حساسیت با کد دوبعدی اجزای محدود Phase ۲، مورد توجه قرار گرفته است (Karzulovic, et al., ۲۰۰۳).

پیرس و لوریگ یک روش بهبود یافته را در مطالعه بین‌المللی تخریب^۶ توسعه داده‌اند که در آن پیشروی متوالی زیربرش با عرض ثابت شبیه‌سازی شده است تا افزایش شعاع هیدرولیکی را در طی عملیات شروع تخریب مدل کند. استخراج، با کاهش تنش ثابت در سطح زیربرش در مدل

^۱ Grace Mine

^۲ Pennsylvania

^۳ Barla

^۴ Boshkov

^۵ Rech

^۶ International Caving Study (ICS)

شبیه‌سازی شده است. برای هر افزایش در طول زیربرش، مدل باید به تعادل برسد و سپس دوباره زیربرش افزایش یابد. علاوه بر این در این روش با توجه به طبیعت دینامیک افزایش ابعاد زیربرش، یک تابع تعریف شده توسط کاربر که خصوصیات متغیر مواد و تنش‌ها را بر مبنای وضعیت پلاستیسیته و کرنش تعریف می‌کند، به کار برده شده است. با این روش شعاع هیدرولیکی بحرانی بر مبنای تنش‌های سه‌بعدی حقیقی توزیع شده در اطراف زیربرش، تعیین می‌شود (Sainsbury, et al., ۲۰۰۸).

۲-۷-۳- مدل‌های نرم شوندگی کرنش هم‌محور^۱

لوریگ (۲۰۰۰) و براون (۲۰۰۳) برای ارایه بهتر شکل سه بعدی زیربرش و منطقه تنش اطراف زیربرش، یک شبیه‌سازی از رشد تخریب، با نرم‌افزار FLAC انجام داده‌اند. در این تحقیق یک زیربرش استوانه‌ای در عمق‌های مختلف در نظر گرفته و حالت اولیه تنش، لیتوستاتیک و تنش‌های محیطی (یک فشار نگه‌دارنده) برای تأمین پایداری اولیه مدل فرض شده است. برای شبیه‌سازی معدنکاری، فشار نگه‌دارنده در سقف زیربرش به‌طور یکنواخت کاهش داده شده است. در این رویکرد اگرچه هندسه سه‌بعدی و تانسور تنش به‌صورت صحیحی ارایه نشده بود، ولی لوریگ (۲۰۰۰) توانست شعاع هیدرولیکی لازم برای شروع تخریب را پیش‌بینی کند که به نتایج نمودار لابسچر نزدیک و قابل‌مقایسه بود (Sainsbury, et al., ۲۰۱۱).

۲-۷-۴- مدل‌های اجزای مجزا

مدل‌های اجزای مجزای دوبعدی توسط لوریگ (۱۹۹۵) با ارایه کد PFC برای درک دقیق‌تر از شکست در توده سنگ برجا و پیش‌بینی بهتر شکل منطقه تخریب، توسعه داده شده است. مدل‌های مفهومی از تخریب در تنش‌های اولیه بالا با دو سازوکار اساسی شکست زیر تهیه شده است:

۱- شکست بلوک‌های سنگ بکر

^۱Axis-symmetric strain softening models

۲- لغزش در طول درزه‌های موجود

در خلال پروژه فناوری معدنکاری‌های بزرگ‌مقیاس،^۱ (MMT)، مدل‌سازی توده سنگ مصنوعی،^۲ (SRM)، برای بررسی دقیق تاثیر درزه‌های توده سنگ گسترش داده‌شده است. روش SRM از PFC_{۳D} برای نشان دادن شبکه شکستگی گسسته در بدنه سنگ بکر استفاده می‌کند. SRM به دست آمده، به طور صریح می‌تواند پل‌هایی از سنگ بکر بین شکستگی‌ها را مدل کند. از آنجا که استفاده از PFC_{۳D} برای شبیه‌سازی‌های بزرگ‌مقیاس، به علت حجم بالای عملیات محاسباتی، ممکن نیست، یک مدل توده سنگ درزه‌دار توسعه داده شده است تا رفتاری مبتنی بر PFC برای شبیه‌سازی بزرگ‌مقیاس ارائه دهد (Sainsbury, et al., ۲۰۰۸).

رفیعی و همکاران در سال ۲۰۱۸، مدل‌سازی عددی عوامل موثر بر قابلیت تخریب توده سنگ را با استفاده از نرم‌افزار مدل‌سازی المان مجزای PFC_{۳D} انجام داده‌اند. PFC یک کد ناپیوسته برای تحلیل، آزمودن و تحقیق در مسایلی است که نیاز به بررسی اندرکنش اجزای مجزای متعدد، تحت کرنش‌های بزرگ و توسعه درزه‌ها دارند. رفیعی در این مدل‌سازی حساسیت قابلیت تخریب نسبت به تغییر در عوامل مقاومت تراکم تک‌محوره، شعاع هیدرولیکی، ضریب اصطکاک، فراوانی درزه، پایایی درزه و تنش محصورکننده را بررسی کرده‌اند. آن‌ها تغییر در میزان کانه خارج‌شده از مدل را به‌عنوان معیار میزان قابلیت تخریب در نظر گرفته‌اند و در نهایت حساسیت قابلیت تخریب نسبت به تغییر عوامل شعاع هیدرولیکی و تنش‌های بر جا در مقایسه با سایر عوامل بیشتر بوده است (Rafiee, et al., ۲۰۱۸).

۲-۷-۵- روش‌های ترکیبی

اکثر روش‌های توصیف‌شده توده سنگ را ایزوتوپ در نظر گرفته‌اند، درحالی‌که در واقع رشد تخریب توسط مجموعه‌ای از درزه‌ها و ناپیوستگی‌ها و مقاومت سنگ بکر مدیریت می‌شود.

^۱ Mass Mining Technology

^۲ Synthetic Rock Mass

ویازمنسکی^۱ (۲۰۰۷) از یک کد ترکیبی اجزای محدود-اجزای مجزا (ELFEN) استفاده کرد تا شکستگی‌های فیزیکی که به تدریج به بلوک‌های مجزا تبدیل می‌شوند را داخل مش‌بندی اجزای محدود پیوسته وارد کند. خروجی مدل باید با مشاهدات و اندازه‌گیری‌های حقیقی اعتبارسنجی شود (Vyazmensky, et al., ۲۰۰۷). به علت پیچیدگی تنظیم مدل و حجم عملیات بالای محاسبات برای مسایل در مقیاس معدنی، این مدل ترکیبی به صورت دوبعدی استفاده می‌شود (Sainsbury, et al., ۲۰۰۸).

۲-۸- روش‌های تحلیلی

روش سیستم‌های مهندسی سنگ برای تحلیل قابلیت تخریب توده سنگ در معادن تخریب توده‌ای استفاده شده است. محمدخانی در سال ۲۰۱۴ با در نظر گرفتن هشت عامل موثر بر قابلیت تخریب توده سنگ، زیربرش با شعاع هیدرولیکی مناسب برای آغاز تخریب در روش تخریب توده‌ای را با استفاده از روش RES تعیین کرده است. رفیعی و همکارانش در سال ۲۰۱۵، با استفاده از سیستم‌های فازی امتیازدهی ماتریس اندرکنش در سیستم‌های مهندسی سنگ را بهبود بخشیده‌اند. رفیعی با در نظر گرفتن ۱۴ عامل موثر بر تخریب و استفاده از سیستم مهندسی سنگ فازی، قابلیت تخریب توده سنگ در معادن تخریب توده‌ای را ارزیابی کرده است. در این تحقیق عامل تنش‌های برجا به عنوان تعاملی‌ترین عامل در سیستم و عوامل جهت‌داری درزه‌ها و قابلیت تخریب به ترتیب غالب‌ترین و مغلوب‌ترین عوامل در سیستم تعیین شده‌اند.

رفیعی و همکاران در سال ۲۰۱۸ کاربرد سیستم مهندسی سنگ RES و سیستم تصمیم‌گیری آزمایشی DEMATEL را در سیستم‌های رفتاری قابلیت تخریب توده سنگ مقایسه کرده‌اند.

DEMATEL یک روش تصمیم‌گیری بر مبنای نظریه گراف است که قادر به تشخیص روابط

اتفاقی با تقسیم موارد مهم به گروه‌های علت و اثر است.

^۱ Vyazmensky

بررسی نتایج استفاده از این دو روش در تخمین قابلیت تخریب توده سنگ جامعیت بیشتر روش DEMATEL را در مقایسه با روش RES نشان می‌دهد.

DEMATEL مقادیر اثر خروجی و ورودی و اهمیت و رابطه عوامل موثر را نشان می‌دهد. علاوه بر آن علت و اثر و ساختار عوامل در یک گراف جهت‌دار را تعیین می‌کند. در حالی که خروجی RES مقادیر علت و اثر عوامل و شدت اندرکنش هر عامل در سیستم به‌علاوه تعیین عوامل غالب و مغلوب در سیستم است. بررسی دو مدل نشان می‌دهد که اثر و اندرکنش عوامل در هر دو روش با یکدیگر برابر هستند، با این وجود روش DEMATEL جامع‌تر و قابل‌اعتمادتر است (Rafiee, et al., ۲۰۱۸).

رونگزینک و همکاران در سال ۲۰۱۹ یک روش جامع ارزیابی فازی قابلیت تخریب توده‌سنگ بر اساس سیستم‌های طبقه‌بندی مهندسی توده‌سنگ ارائه کردند. آن‌ها با توجه به اینکه طبقه‌بندی‌های ژئومکانیکی توده سنگ از روش‌های ارزیابی تجربی مهندسی برای بررسی مقاومت سنگ در برابر تنش‌های وارده استفاده می‌کنند، عنوان کرده‌اند که طبقه‌بندی‌های مهندسی سنگ و عوامل تعیین‌کننده در آن‌ها فازی هستند؛ به‌عنوان مثال RQD، RMR، MRMR و سیستم طبقه‌بندی Q همه فازی هستند. انتخاب عوامل موثر و تعیین امتیازدهی توده سنگ نیز هر دو فازی هستند. از طرفی عوامل موثر بر قابلیت تخریب با یکدیگر اندرکنش داشته و روابط بین آن‌ها پیچیده است که منجر به ارزیابی‌های متفاوت توسط سیستم‌های طبقه‌بندی متفاوت می‌شود. رونگزینک و همکارانش عوامل موثر بر قابلیت تخریب را به ترتیب $IS_{(5)}$ ، RQD، J_r ، J_a ، J_f ، W_U و ISS (نسبت $IS_{(5)}$ به تنش برجا) در نظر گرفتند و با استفاده از جبر فازی و ترکیب سیستم‌های مهندسی سنگ میزان قابلیت تخریب را بر اساس اطلاعات زمین‌شناسی در معدن مس-مولیبدن لوبولینگ^۱ ارزیابی کرده‌اند (Rongxing, et al., ۲۰۱۹).

^۱ luoboling

۲-۹- خردشوندگی توده سنگ

به قابلیت تفکیک و خردشدن توده سنگ به بلوک‌ها و قطعات کوچک‌تر خردشوندگی گفته می‌شود. در معدنکاری تخریب توده‌ای مطابق شکل ۲-۱۳، سه سطح خردشوندگی تعریف شده است که عبارت‌اند از: خردشوندگی برجا، اولیه و ثانویه (Brown, ۲۰۰۳; Laubscher, ۲۰۰۰).

الف) خردشوندگی برجا: تفکیک توده سنگ به بلوک‌هایی که به‌طور طبیعی قبل از شروع عملیات معدنکاری وجود دارند، بیانگر خردشوندگی برجا است. این خردشوندگی به وسیله درزه‌هایی که از قبل موجود بوده‌اند، شکل گرفته است.

ب) خردشوندگی اولیه^۲: به محض ایجاد زیربرش و شروع عملیات تخریب، بلوک‌های مجاور فضای تخریب از کانسنگ جدا شده و خردشوندگی اولیه شکل می‌گیرد. خردشوندگی اولیه بر اندازه بلوک‌هایی که از توده سنگ جدا و وارد ستون تخلیه می‌شوند، دلالت دارد. عوامل موثر بر خردشوندگی اولیه مشتمل بر مقاومت سنگ سالم، ساختارهای زمین‌شناسی و نواحی درزه‌دار، تعداد و فاصله‌داری دسته‌درزه‌ها، امتیاز درزه، میدان تنش در منطقه‌ی معدن، جهت و شیب جبهه تخریب است (Laubscher, ۲۰۰۰).

ج) خردشوندگی ثانویه^۳: این خردشوندگی از زمان جدا شدن سنگ از سطح تخریب و در طول مسیر عبور از ستون تخلیه تا خروج از دهانه تخلیه رخ می‌دهد. به عبارت دیگر، کاهش اندازه قطعات سنگ حاصل از خردشوندگی اولیه در نتیجه‌ی حرکت آن‌ها به سمت پایین در طول ستون تخلیه را خردشوندگی ثانویه می‌گویند. فرایندهایی نظیر شکستن و گرد شدن گوشه‌ی بلوک‌ها بر اثر تنش‌های فشاری و برشی، تعیین‌کننده‌ی توزیع اندازه ذرات در نقاط تخلیه هستند. تغییرات گسترده در فراوانی درزه منجر به تغییرات زیاد در خردشوندگی ثانویه خواهد شد. مواد ریز تولید شده

^۱In situ Fragmentation

^۲Primary Fragmentation

^۳Secondary Fragmentation

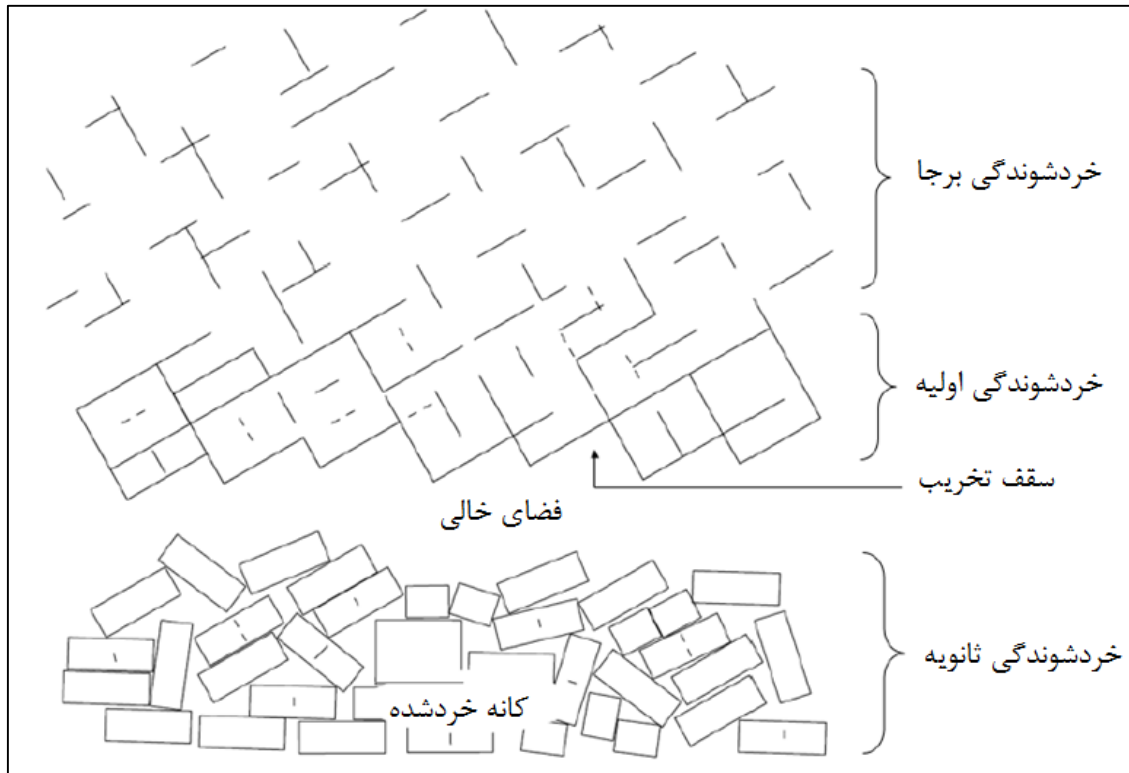
به صورت یک بالشتک برای بلوک‌های بزرگ‌تر عمل کرده و از ساییدگی^۱ بیشتر این بلوک‌ها جلوگیری می‌کنند. نرخ تخلیه آرام احتمال شکست وابسته به زمان را افزایش می‌دهد. خردشوندگی ثانویه عامل اصلی تعیین قابلیت تولید در نقاط تخلیه است (Laubscher, ۲۰۰۰).

اگرچه علاقه زیادی برای توسعه مبانی خردشوندگی ثانویه وجود دارد، ولی بعضی از موضوعات مرتبط با خردشوندگی ثانویه نظیر تاثیر ارتفاع سقوط بلوک، چرخش بلوک‌ها، ضربه سقوط سنگ، ارتفاع فضای خالی، مقاومت توده سنگ، ناپیوستگی‌های موجود در بلوک، آرایش اولیه بلوک‌های خردشده و اندرکنش بلوک‌ها، چگالی بلوک‌های خردشده و توزیع آن‌ها در ستون تخلیه، مواد نرمه و اثر بالشتکی آن‌ها تاکنون کمتر مورد توجه قرار گرفته است (Dorador, et al., ۲۰۱۴).

محققین متعددی بر روی فرایند خردشوندگی اولیه (قابلیت تخریب) و خردشوندگی ثانویه تمرکز کرده‌اند، اما تلاش‌های انجام‌شده، به علت پیچیدگی فرایند خردشوندگی تنها بخش کوچکی از ابهامات موجود را پاسخ داده است، در ادامه به مطالعات انجام‌شده در خصوص بررسی روند خردشوندگی پرداخته شده است.

درک بیشتر از خردشوندگی سنگ در طراحی معدنکاری تخریبی، تخمین متغیرهای وابسته به خردشوندگی سنگ و کارایی عملیات تخریب توده‌ای بسیار حیاتی است (Viera, et al., ۲۰۱۴). برآورد خردشوندگی سنگ در فرآیند تخریب، نیازمند شناخت کافی از خردشوندگی طبیعی توده سنگ، شناخت کافی از عوامل موثر بر خردشوندگی و فرآیند خردشوندگی است که در طول ستون تخلیه اتفاق می‌افتد.

^۱Attrition



شکل ۲-۱۳: مراحل خردشوندگی در روش تخریب توده‌ای (Dorador, ۲۰۱۶)

در فرآیند تخریب، چگونگی خردشوندگی بر اندازه و فاصله‌داری نقاط تخلیه، انتخاب تجهیزات، اختلاط ماده معدنی و باطله در ستون تخلیه، میزان تولید در نقاط تخلیه و چگونگی کنترل تخلیه، هزینه‌های آتش‌کاری ثانویه و سطوح دسترسی و تداخل عملیات تاثیر می‌گذارد (Laubscher, ۲۰۰۰).

۲-۹-۱- روش‌های آماری برآورد خردشوندگی

روش‌های متنوعی برای برآورد خردشوندگی برجا توسعه داده شده و چندین روش نیز برای برآورد خردشده مواد در طول ستون تخلیه پیشنهاد شده است. اما آزمایش و واسنجی این روش‌ها قبل از این‌که از آن‌ها در روند طراحی پروژه استفاده شود، بسیار مهم است. بر اساس نظریات مک کورمیک^۱، شکست قطعات سنگ در طول ۱۰۰ متر از مسیر تخلیه اتفاق می‌افتد. هوسترولاید

^۱ Mckormic

ادعا کرده است که خرد شدن مواد باید با تئوری سوم خرد شدن باند^۱ که نیروی ثقل انرژی لازم برای خرد شدن سنگ به قطعات کوچک‌تر را فراهم می‌کند، مرتبط باشد. سازوکار اولیه خرد شدن مواد، درزه‌دار شدن مکرر بلوک‌ها در طول ستون تخلیه بر مبنای این نظریه است که بلوک‌های با نسبت ابعادی بزرگ‌تر به بلوک‌های با نسبت ابعادی پایدارتر تقسیم می‌شوند. روش‌های برآورد توزیع اندازه خردشوندگی در معادن تخریب توده‌ای بر مبنای اطلاعات دسته‌درزه‌هایی بوده که از نقشه‌برداری ساختاری رخنمون‌ها و یا حفاریات در دسترس به‌دست‌آمده‌اند (Sainsbury, et al., ۲۰۱۱).

۲-۹-۱-۱- استفاده از DFN^۲

در چند سال گذشته با دستیابی به توانایی گسترده‌تر قدرت محاسباتی، روش‌های مدل‌سازی تصادفی شبکه درزه‌های مجزا برتری بیشتری یافته‌اند. امروزه مدل‌های DFN به‌عنوان ابزارهایی مفید برای بررسی مسایل ژئومکانیکی در ارتباط با طراحی سازه‌ها در توده سنگ‌های درزه‌دار معرفی شده‌اند. مزیت اصلی مدل‌های DFN در توانایی ارائه ناهمگنی و عدم قطعیت سیستم‌های درزه با تعریف تصادفی و واضح از درزه‌ها است. جنبه جالب دیگر روش مدل‌سازی DFN توانایی تشکیل بلوک‌ها توسط تعداد بسیار زیادی درزه است.

مدل‌های تصادفی شبکه درزه توسعه داده شده توسط بیچر و همکارانش در سال ۱۹۷۷ و ونزیانو در سال ۱۹۷۸ در دانشگاه MIT، جزء اولین مدل‌های ارائه شده در این زمینه هستند (Baecher, et al., ۱۹۷۷; Veneziano, ۱۹۷۸). مطالعات هادسون و لاپونته^۳ در سال ۱۹۸۰ و رابینسون^۴ در سال ۱۹۸۳ در زمینه تراوش و جریان سیال را می‌توان نقطه آغاز کاربرد این مدل‌ها دانست (Hudson, et al., ۱۹۸۰).

^۱ Third Bond Thorey

^۲ Distinct Fracture Network

^۳ Hudson and La pointe

^۴ Robinson

به‌منظور گروه‌بندی درزه‌های تولید شده در داخل دسته‌درزه‌هایی که از لحاظ ترتیب زایش با یکدیگر مرتبط هستند، مدل سلسله‌مراتبی^۱ دوبعدی توسط لی^۲ و همکارانش در سال ۱۹۹۰ توسعه داده شد (Lee, et al., ۱۹۹۰). پریست در سال ۱۹۹۳ مدل تصادفی سه‌بعدی‌ای را ارائه نمود که در آن درزه‌ها به‌صورت دیسک‌های دایره‌ای فرض شده‌اند. در این مدل مقادیر تصادفی برای قطر درزه نیز توسط الگوریتم‌های ارائه‌شده توسط پریست، از توزیع‌های مناسب تولید می‌شوند. پس از آن، ایوانووا^۳ و همکارانش در سال ۱۹۹۵ مدل دوبعدی سلسله‌مراتبی پیشرفته را به سه بعد توسعه دادند (Ivanova, et al., ۱۹۹۵). درشویتز و همکاران در سال ۱۹۹۸ نرم‌افزار تجاری FracMan را ارائه نمودند که تا به امروز در حال توسعه است و از پیشرفته‌ترین مولدهای DFN به شمار می‌آید. در این نرم‌افزار گستره‌ای از مدل‌های شبکه درزه مختلف را برای کاربردهای مهندسی در محیط‌های زمین-شناسی گوناگون جمع‌آوری شده است (Dershowitz, et al., ۱۹۹۸b).

کولاتیلاک^۴ و همکاران در سال ۲۰۰۴ اقدام به تهیه‌ی مدل شبکه درزه تصادفی سه‌بعدی برای توده‌سنگی از جنس دیوریت و ارائه فرآیند جدیدی برای تخمین مقاومت و تغییر شکل‌پذیری بلوک سنگی در سه بعد نمودند (Kulatilake, et al., ۲۰۰۴).

در بین سال‌های ۲۰۰۷ تا ۲۰۰۸ کاربردهای گسترده‌تری از مدل‌های DFN ارائه شده است. راجرز^۵ و همکاران در سال ۲۰۰۷ دریافتند که بهترین روش تشخیص فرآیند خردایش در معادن تخریب توده‌ای، از طریق تعریف دقیق خردایش برجای پیش از تخریب است. با توجه به این مطلب، آن‌ها اقدام به بررسی خردایش برجای سه‌بعدی توده‌سنگ با استفاده از تعریف شبکه درزه از طریق ساخت مدل‌هایی در FracMan نمودند (Rogers, et al., ۲۰۰۷). مفیت^۶ و راجرز در سال ۲۰۰۷

^۱ Hierarchical Model

^۲ Lee

^۳ Ivanova

^۴ Kulatilake

^۵ Rogers

^۶ Moffitt

مدل DFN را برای بهینه‌سازی حفاری و طراحی نگهداری تونل به کار بردند. گرزن و هاجیجورجیو^۱ در سال ۲۰۰۸ کاربرد مدل‌سازی شبکه درزه (DFN) به همراه تحلیل تعادل حدی را برای تحلیل پایداری شیروانی دیواره جاده مشرف به پل کوبک به کار بردند. آن‌ها از تولیدکننده سیستم درزه بر اساس مدل ونزیانو استفاده کردند (Esmaili, et al., ۲۰۱۰).

در چند سال اخیر نیز توسعه مدل تصادفی به منظور بررسی اثرات وابستگی بین توزیع بازشدگی و طول اثر درزه بر رفتار هیدرو مکانیکی و مکانیکی توده‌سنگ درزه‌دار، بر اساس مدل‌های پیشین، انجام گرفته است. مدل دوبعدی ارائه شده توسط باغبانان و جینگ^۲ (Baghbanan, et al., ۲۰۰۸) و همچنین مدل سه‌بعدی بنگ^۳ و همکارانش (Bang, et al., ۲۰۱۲) را می‌توان به‌عنوان نمونه‌هایی از این نوع برشمرد.

به‌عنوان یکی از مهم‌ترین و جدیدترین فعالیت‌های صورت گرفته در تهیه، ساخت و توسعه مدل DFN می‌توان به تهیه برنامه کامپیوتری DFN-FRAC^{3D} توسط نوروزی و همکاران اشاره نمود (Noroozi, et al., ۲۰۱۵). برنامه کامپیوتری DFN-FRAC^{3D} بر اساس مدل ونزیانو و به زبان برنامه‌نویسی ++C نوشته شده و متشکل از ۱۴ کلاس، ۱۱۰ تابع است.

تاکنون ارزیابی خردشوندگی اولیه و ثانویه به‌طور معمول با استفاده از روش‌های مبتنی بر اصول مهندسی و تجربه‌های شخصی انجام شده است (Esterhuizen, ۱۹۹۴). استفاده از روش‌های DFN می‌تواند در ارزیابی خردشوندگی شامل خردشوندگی برجا، اولیه و ثانویه موثر باشد (Rogers, et al., ۲۰۱۰). در سال‌های اخیر، روش‌های ترکیبی از مدل‌های DFN برای ارزیابی خردشوندگی پیشنهاد شده، اما هیچ‌یک از این روش‌ها نمی‌تواند ناهمگنی توده سنگ را به‌طور کامل مدل کنند (Rogers, et al., ۲۰۱۰).

^۱ Grenon and Hadjigeorgiou

^۲ Baghbanan and Jing

^۳ Bang

یکی از عوامل که برای ساخت مدل DFN استفاده می‌شود، شدت شکستگی حجمی (P_{32}) است. شدت شکستگی حجمی بیانگر سطح شکستگی‌ها در واحد حجم است. زمانی که این شدت محاسبه شد، می‌توان آن را به صورت فضایی مدل‌سازی نمود تا ویژگی‌های مدل بلوکی تحمیل شده از شدت شکستگی را در مقیاس معدنی فراهم کند. راجرز، حساسیت خردشوندگی سنگ را به ویژگی شدت شکستگی (P_{32}) بررسی کرده و اهمیت تعیین مقدار بحرانی شدت شکستگی حجمی (P_{32}) را که در آن انتقال از توده سنگ بکر به توده سنگ متحرک اتفاق می‌افتد، نشان داده است. P_{32} در یک مدل DFN به یک سلسله خصوصیات ژئومکانیکی مانند خردشوندگی، اندازه متوسط بلوک و سختی وابسته است، بنابراین با به دست آوردن مقدار P_{32} ، پیش‌بینی برخی خصوصیات ژئومکانیکی سنگ نظیر خردشوندگی، با توجه به رابطه اصولی P_{32} با این خصوصیات ژئومکانیکی امکان‌پذیر خواهد شد (Rogers, et al., 2014).

به‌هرحال با استفاده از یک مدل هندسی DFN و برآورد شدت شکستگی حجمی توده سنگ می‌توان در خصوص قابلیت تخریب و خردشوندگی ساختاری توده سنگ به یک قضاوت قابل قبول دست یافت.

۲-۱-۹-۲- نظریه فراکتال

مفهوم فراکتال برای برآورد خردشوندگی اولیه از طریق داده‌های حاصل از مغزه به‌کار برده می‌شود. مجتبابی (۱۹۸۸)، پولتون^۱ (۱۹۹۰) و هاردی^۲ (۱۹۹۷) گزارش کرده‌اند که نمودار تجمعی تعداد قطعات مغزه در مقابل بعد کروی معادل ذرات، یک رابطه فراکتال به‌صورت توانی را نشان می‌دهد. که از این رابطه می‌توان به یک رهیافت اولیه در مورد خردشوندگی توده سنگ دست‌یافت. در نظر گرفتن محدوده‌ی مشخصی از طول قطعات مغزه (بیانگر توزیع سه‌بعدی واقعی از

^۱ polton

^۲ Hardi

خردشوندگی)، فرض اصلی برای به‌کارگیری روش فراکتال برای توزیع اندازه خردشوندگی است (Sainsbury, et al., ۲۰۱۱).

۲-۱۰- نرم‌افزارهای برآورد خردشوندگی

روش‌های عددی به‌طور گسترده در حل مسایل مربوط به مقدار تنش‌ها و تغییر شکل‌های مرزی در معادن که روش‌های تحلیلی قادر به حل کردن آن نیستند، مورد استفاده قرار می‌گیرند. این حالت زمانی اتفاق می‌افتد که شرایط مرزها به وسیله فرمول‌های ریاضی قابل توصیف نباشد (Brown, ۱۹۸۷). در مدل‌سازی عددی تخریب، چگونگی شبیه‌سازی روند تخریب و ورود خصوصیات و مدل‌های رفتاری مواد به سیستم اهمیت بالایی دارد. اهمیت این موضوع سبب پیدایش تعداد زیادی نرم‌افزارهای برآورد خردشوندگی نظیر SimBlock, Make Block, Fracman, BCF^۱, JKFrag, Core۲Frag شده است. با توجه به عدم دسترسی به اطلاعات کافی در خصوص نرم‌افزارهای Fracman, MakeBlock, SimBlock و مقبولیت بیشتر نرم‌افزارهای JKFrag, BCF و Core۲Frag در ذیل به‌طور خلاصه به بررسی این نرم‌افزارها پرداخته شده است.

۲-۱۰-۱- نرم‌افزار BCF

BCF برنامه‌ای بر مبنای سیستم خبره^۲ برای برآورد اندازه خردشوندگی مواد در محل نقاط تخلیه، در روش تخریب توده‌ای است. مفهوم اولیه BCF توسط لابسچر با همکاری گوست^۳ و بارتلت^۴ برای کاربرد در معدن پریمیر^۵ آفریقای جنوبی گسترش یافته و برنامه‌نویسی آن توسط استرهویزن^۶ انجام شده است. برنامه بر پایه قواعد تحلیلی و تجربی توصیف‌کننده‌ی خردشوندگی و عوامل که در خردشوندگی تخریب توده‌ای نقش دارند بنا شده است (Esterhuizen, ۲۰۰۵). بیشتر قوانین تجربی

^۱ Block Cave Fragmentation

^۲ Expert System

^۳ Guest

^۴ Bartlet

^۵ primier

^۶ Esterhuizen

مورد استفاده در آن بر مبنای تجربیات لابسچر است این برنامه از سه بخش اصلی زیر تشکیل شده است:

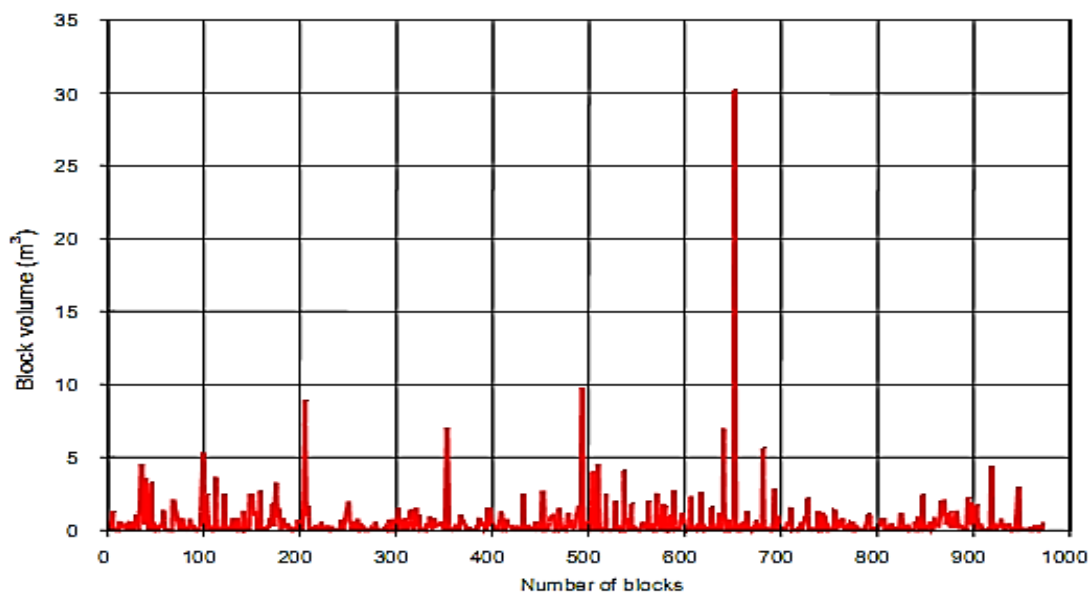
الف - خردشوندگی اولیه: بخش اول، خردشوندگی اولیه را بر مبنای اطلاعات دسته‌درزه‌ها، تنش‌های القایی، جهت تخریب و مقاومت سنگ محاسبه می‌کند. مطابق شکل ۲-۱۴، خروجی این بخش به صورت نمودارهایی است که تعداد بلوک‌ها را در مقابل حجم بلوک‌ها رسم کرده است.

ب - خردشوندگی ثانویه: مبنای بخش خردشوندگی ثانویه این است که احتمال خرد شدن بلوک‌های با نسبت ابعادی بزرگ به بلوک‌های کوچک‌تر از بلوک‌های با نسبت ابعادی کوچک، بیشتر است. خردشوندگی ثانویه بر مبنای نسبت ابعادی، حضور درزه‌ها، سرعت تخلیه، نسبت نرمه، ارتفاع ستون تخریب، فشار تخریب، خردشدگی گوشه بلوک‌ها و تاق‌زدگی محاسبه می‌شود.

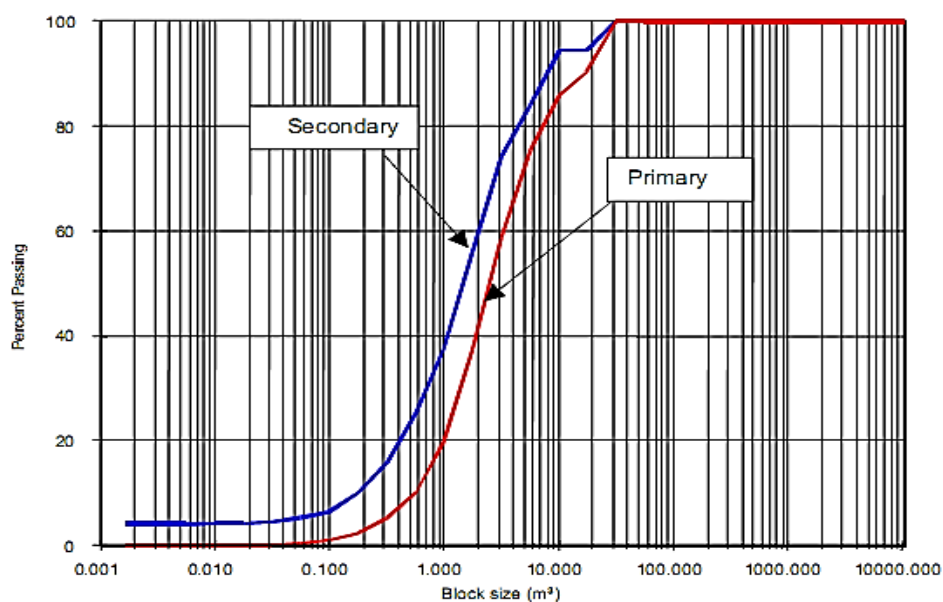
پ - ظرفیت گیرافتادگی (قفل‌شدگی): بخش سوم، خردشوندگی ثانویه را به عنوان ورودی در نظر گرفته و ظرفیت گیرافتادگی یا قفل‌شدگی در قیف‌های تخلیه را بررسی می‌کند. در برنامه فرض شده است اگر کمتر از ۲۵ بلوک برای پوشاندن ۴۰ درصد از سطح قیف‌های تخلیه لازم باشد، احتمال یک قفل‌شدگی وجود دارد.

شکل ۲-۱۵، نمونه‌ای از توزیع خردشوندگی اولیه و ثانویه را که توسط نرم‌افزار BCF به دست آمده، نشان می‌دهد.

داده‌های ورودی واقعی منتج به تخمین واقعی‌تر خردشوندگی خواهد شد و از آنجا که به‌طور معمول اطلاعات بر اساس تحلیل مغزه‌های حفاری به دست می‌آیند، بنابراین تخمین خردشوندگی توده سنگ بر اساس این چنین داده‌هایی کاری چالش برانگیز است (Jakubec, ۲۰۱۴).



شکل ۲-۱۴: مثالی از ابعاد بلوک‌ها در خردشوندگی اولیه، محاسبه شده به وسیله BCF (Brown, ۲۰۰۳)



شکل ۲-۱۵: نمودارهای توزیع ابعاد خردشوندگی اولیه و ثانویه محاسبه شده به وسیله BCF (Brown, ۲۰۰۳)

اطلاعات ورودی نرم افزار BCF را می توان در سه گروه اصلی اطلاعات زمین شناسی، اطلاعات تخریب، اطلاعات تخلیه مواد دسته بندی کرد. اطلاعات دو دسته ی اول برای محاسبه خردشوندگی اولیه و آخرین دسته از اطلاعات برای محاسبه خردشوندگی ثانویه و گیرافتادگی استفاده می شوند. اطلاعات زمین شناسی مشتمل بر نوع سنگ، MRMR، مقدار m در معیار هوک و براون، مقاومت

تراکمی تک‌محوره، فراوانی ترک‌های ریز در توده سنگ، مقاومت بلوک بکر، اطلاعات درزه‌ها، تعداد دسته‌درزه و خصوصیات درزه است.

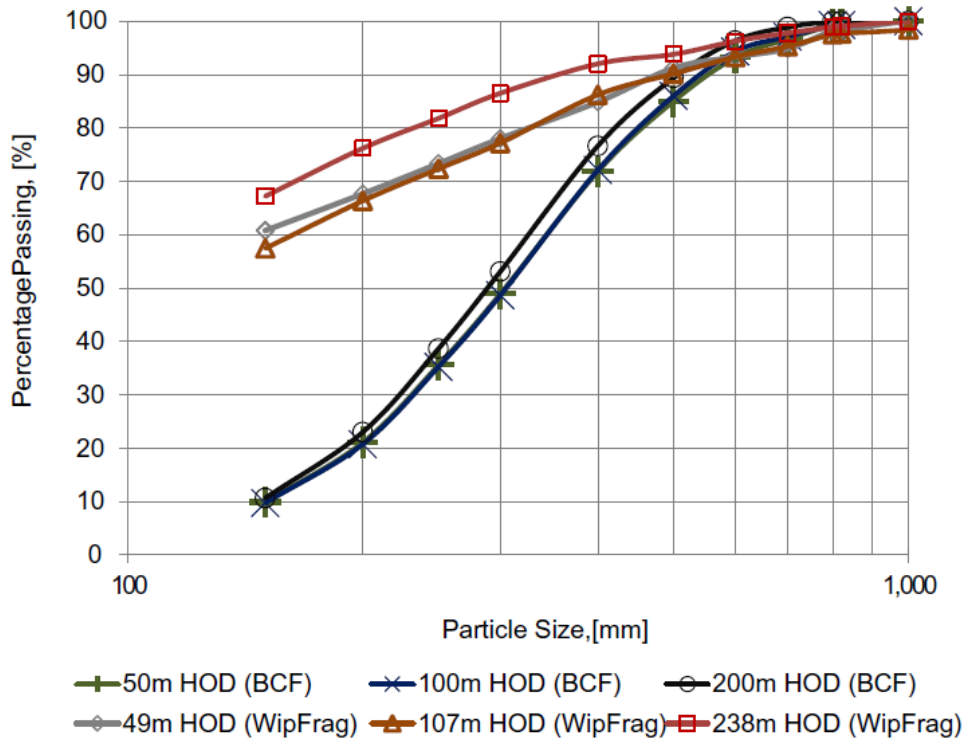
برای محاسبه خردشدگی اولیه علاوه بر اطلاعات زمین‌شناسی باید جدول اطلاعات تخریب، شامل جهت‌داری تخریب، شیب و جهت شیب جبهه تخریب، تنش‌ها، شیب و امتداد و تنش نرمال القایی برای سقف تخریب نیز تکمیل شود. در تحلیل خردشوندگی ثانویه و گیرافتادگی‌ها اطلاعات مربوط به تخلیه مشتمل بر ارتفاع ستون تخلیه، حداکثر ارتفاع تخریب، عرض زیربرش، ضریب تورم، چگالی سنگ، ضریب انباشتگی، سرعت تخلیه و اندازه قیف‌های تخلیه مورد نیاز است (Jakubec, 2014).

اگر چه روش BCF در موارد فراوانی استفاده شده است، اما نواقصی در رابطه با تخمین خردشوندگی ثانویه دارد، از جمله اینکه مکانیک شکست سنگ را در نظر نمی‌گیرد و یا زمان حرکت بلوک در طول ستون تخلیه تا رسیدن به نقاط تخلیه را در محاسبات خردشوندگی لحاظ نشده است. کاربرد BCF در تخمین خردشوندگی ثانویه معادن پریمایر و کودلکو با استفاده از داده‌های واقعی، نشان داده است که تخمین‌های انجام شده توسط این نرم‌افزار محافظه‌کارانه است (Ngidi, et al., 2010). نادولسکی و همکاران در سال 2018، اندازه‌گیری بلوک‌های خرد شده واقع در نقاط تخلیه B_1 و B_2 معدن نیوآفتون^۱ کانادا را با استفاده از نرم‌افزارهای WipFrag و Portametrics مبتنی بر پردازش تصویر، انجام داده‌اند. مقایسه نتایج حاصل با نتایج خردایش به دست آمده از نرم‌افزار BCF در شکل ۲-۱۶، نشان می‌دهد که خردشوندگی پیش‌بینی شده توسط نرم‌افزار BCF در مقایسه با خردشدگی واقعی کمتر است (Nadolski, et al., 2017).

تجربه نشان می‌دهد نرم‌افزار BCF ممکن است به علت محافظه‌کاری‌هایی در مرحله مطالعات امکان‌پذیری، تمرکز بر روی بلوک‌های بزرگ، مغزه‌گیری نامناسب، در نظر نگرفتن مواد نرم،

^۱ New Afton

هوازگی سنگ تخریب‌شده و نمونه‌برداری ناقص درزه‌ها، خردشوندگی را کمتر از مقدار واقعی تخمین بزند. بنابراین با در نظر گرفتن این عوامل می‌توان تخمین حاصل از نرم‌افزار را بهبود داد.



شکل ۲-۱۶: مقایسه خردایش واقعی و خردایش پیش بینی شده توسط BCF، (Nadolski, et al., ۲۰۱۷)

اگرچه روش‌های دیگری برای تخمین خردشوندگی وجود دارد، ولی این برنامه به علت سادگی در کاربرد و سرعت نسبی بالاتر، بیشتر مورد توجه صنعت معدنکاران قرار گرفته است. نتایج خردشوندگی حاصل از برنامه BCF می‌تواند برای تصمیم‌گیری در خصوص انتخاب بهترین جهت برای پیشروی زیربرش و دستیابی به خردشوندگی اولیه بهینه و تخریب حاصل از آن به‌کار برده شود (Jakubec, ۲۰۱۴).

۲-۱۰-۲- نرم افزار JKFrage

JKFrage نرم‌افزاری برای تعیین بلوک‌های برجا و پیش‌بینی خردشوندگی اولیه در معادن تخریب توده‌ای است که توسط ادی^۱ (۲۰۰۲)، بر مبنای مدل درزه سلسله مراتبی هاریس^۲ تهیه شده است. فرض اساسی استفاده شده در این نرم‌افزار این است که بلوک‌های برجا توسط شبکه‌ای از ناپیوستگی‌های موجود در توده سنگ تعیین می‌شوند. هر ناپیوستگی یک وجه بلوک احتمالی و تقاطع ناپیوستگی‌ها، گوشه‌های احتمالی بلوک‌ها هستند. برای شکل گرفتن یک بلوک، مجموعه‌ای از ناپیوستگی‌ها که به نحو مطلوبی باهم تقاطع دارند و یک منطقه بسته را تشکیل می‌دهند، لازم است. این نرم‌افزار همبستگی ناپیوستگی‌ها را در شبکه تصدیق و از روش موزاییکی برای تعیین بلوک‌های اولیه و خردشوندگی اولیه استفاده می‌کند. به‌رحال JKFrage نرم‌افزاری برای شبیه‌سازی هندسی ناپیوستگی‌ها و تعیین ابعاد بلوک‌های سنگی در یک توده سنگ است.

۲-۱۰-۳- نرم افزار CoreFrage

از آنجا که به‌طور معمول حجم بالایی از اطلاعات از مغزه‌های حفاری در مراحل مختلف اکتشاف و طراحی یک معدن تخریب توده‌ای موجود است، شرکت کال و نیکولاس (CNI)، با در نظر گرفتن جهت چال حفاری نسبت به جهت دسته‌درزه‌های اصلی، برنامه CoreFrage را برای پیش‌بینی شکل و حجم بلوک و تبدیل اطلاعات مغزه‌های حفاری به توزیع اندازه ذرات توسعه داده‌اند (Nicholas, et al., ۲۰۰۴).

فرض اولیه در توسعه توزیع اندازه خردشوندگی از مغزه‌های حفاری این است که هر تکه مغزه حفاری نشان‌دهنده یک بلوک برجا است. رابطه بین فاصله‌داری درزه‌ها و طول دسته‌درزه‌های مختلف، از طریق خصوصیات دسته‌درزه‌ها که از حفاریات در دسترس یا برنامه‌های حفاری جهت‌دار

^۱ - Eadie

^۲ - Harries

به دست آمده‌اند، ارزیابی شده و می‌تواند برای برآورد شکل بلوک‌های سنگی استفاده شود. در رابطه با یک توده سنگ درزه‌دار، شکل بلوک‌ها مرتبط با توزیع فاصله دسته‌درزه‌ها است. برآورد حجم بلوک از طول قطعات مغزه با فرض شکل مکعبی یا کروی برای بلوک‌ها، می‌تواند باعث برآورد کم اندازه بلوک شود. در این نرم‌افزار همه بلوک‌ها نسبت ابعادی برابر دارند و شکل بلوک توسط دسته‌درزه‌ها تعیین می‌شود.

این نرم‌افزار همچنین یک بخش خردشوندگی ثانویه دارد که در آن بلوک‌های اولیه با شکسته شدن به ابعاد کوچک‌تر به یک نسبت ابعادی پایدار می‌رسند. هر مرتبه که بلوک تقسیم می‌شود یک مقدار معین از ذرات ریز نیز تولید می‌شود. برنامه اندازه بلوک‌های ثانویه را ذخیره می‌کند تا در تحلیل‌های مرتبط با گیرافتادگی استفاده شود. در بخش گیرافتادگی این برنامه، پنج بلوک به‌طور اتفاقی از بلوک‌های ثانویه انتخاب می‌شود. بلوک‌ها می‌چرخند و از درون قیف‌های تخلیه می‌گذرند. اگر بلوک‌ها از داخل قیف عبور نکنند، یک گیرافتادگی گزارش می‌شود. نوع گیرافتادگی بستگی به محل آن دارد. بلوک‌های حاصل از خردشوندگی ثانویه از مرحله گیرافتادن می‌گذرند تا زمانی که مقدار مواد عبوری از قیف تخلیه به مقدار واقعی برسد.

۲-۱۱- عوامل موثر بر امکان‌پذیری پیاده‌سازی روش تخریب

توده‌ای

همان‌طور که قبلاً اشاره شد، موفقیت در اجرای روش تخریب توده‌ای مستلزم قابلیت تخریب مناسب توده سنگ (خردشوندگی اولیه) به همراه خردشوندگی مناسب در طول ستون تخلیه (خردشوندگی ثانویه) با کنترل مناسب خطرات عملیاتی است. خردشوندگی توده‌سنگ نقش عمده‌ای در طراحی روش تخریب توده‌ای، برنامه‌ریزی تولید و کانه‌آرایی دارد، اما به علت تعدد عوامل موثر و پیچیدگی رابطه‌ی بین این عوامل، دانش موجود در رابطه با خردشوندگی کم است (Brown, ۲۰۰۷). مهم‌ترین عامل در رابطه با پیچیدگی روند تخریب، اثرپذیری قابل توجه آن از عوامل متعددی

است که در این رساله پس از بررسی مطالعات موردی عوامل موثر بر روند تخریب به چهار گروه عوامل ژئومکانیکی، عوامل محیطی، عوامل هندسی و عوامل عملیاتی خطرات عملیاتی تقسیم شده است. دومین مساله پیچیده در رابطه با روند تخریب وابستگی اکثر متغیرها و عوامل موثر بر خردشوندگی بر یکدیگر است به طوری که جدا کردن و کمی کردن نقش ویژه هر عامل در روند خردشوندگی بسیار سخت است.

عوامل موثر بر امکان پذیری کاربرد روش تخریب توده‌ای، در نمودار شکل ۲-۱۷، نمایش داده شده است.

۲-۱۱-۱- عوامل ژئومکانیکی

عوامل ژئومکانیکی شامل خصوصیات ژئومکانیکی سنگ بکر و خصوصیات ناپیوستگی به عنوان اصلی ترین عوامل موثر بر تخریب در سیستم توده سنگ به شمار می روند. از میان عوامل ژئومکانیکی توده سنگ می توان به موارد زیر اشاره کرد:

۲-۱۱-۱-۱- مقاومت تراکمی تک محوره

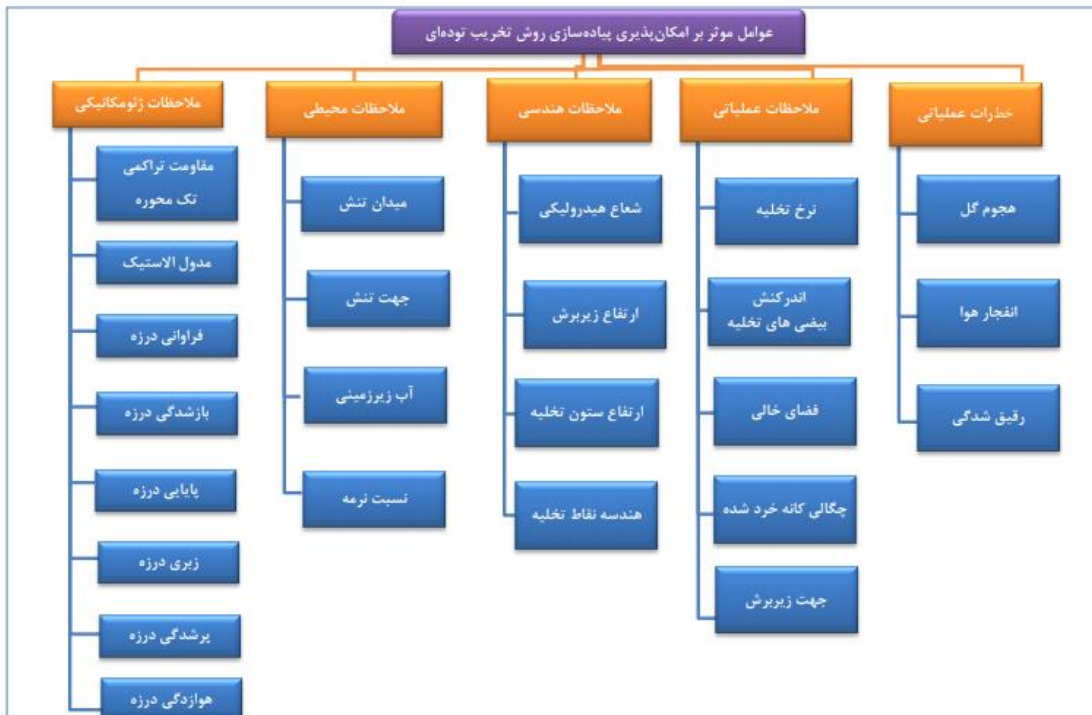
در روش های تخریبی، مقاومت سنگ یک عامل مهم محسوب می شود. مقاومت تراکمی (فشاری) تک محوره، معمولا توسط آزمایش و به صورت آزمایشگاهی به دست می آید. به طور معمول سنگ های با مقاومت تراکمی پایین تر دارای قابلیت تخریب بالاتری هستند. از آنجا که مقاومت تراکمی سنگ ها در محدوده مورد مطالعه متفاوت است، مقدار^۱ IRS برای سنگ سالم، باید به صورت مقداری میانگین محاسبه شود و از نمونه هایی که ارایه دهنده قوی ترین بخش های سنگ است، نباید استفاده شود. همچنین بخش هایی از بلوک سنگی که دارای اجزای ضعیف هستند، معمولا برای تعیین مقاومت سنگ سالم به کار نمی روند، همچنین لازم است در زمان بررسی قابلیت تخریب،

^۱ Intact rock Strength

فصل دوم: روش تخریب توده‌ای و ساز و کار تخریب

محدوده‌های عملیاتی به بخش‌هایی با خصوصیات مقاومتی مشابه تقسیم و تحلیل برای هر یک از

بخش‌ها به‌طور مجزا انجام شود (Brown, ۲۰۰۳).

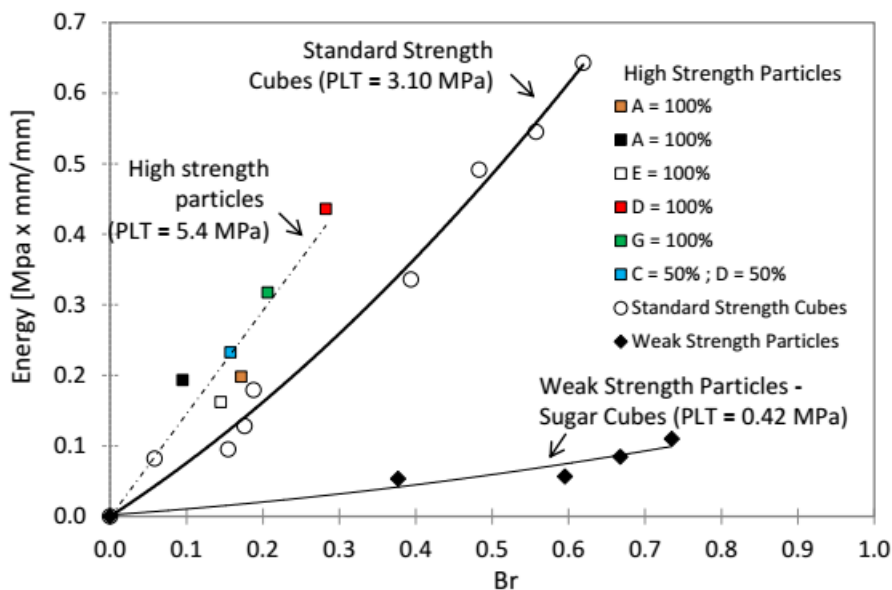


شکل ۲-۱۷: عوامل موثر بر امکان‌پذیری پیاده‌سازی روش تخریب توده‌ای

دورادور در تحقیق بر روی عوامل موثر بر خردشوندگی، آزمایش‌های متعددی بر روی بلوک‌های مصنوعی با مقاومت متفاوت انجام داده است. نتایج آزمایش‌های انجام شده بر روی نمونه‌های با مقاومت تراکمی تک‌محوره متفاوت، نشان می‌دهد با افزایش مقاومت تراکم تک‌محوره خردشوندگی سنگ کاهش می‌یابد (Dorador, ۲۰۱۶). در نمودار شکل ۲-۱۸، B_r خردشوندگی نسبی است. مفهوم خردشوندگی نسبی توسط هاردین (۱۹۸۵) به شرح زیر تعریف شده است.

$$B_r = \frac{B_t}{B_p} \quad (۳-۲)$$

که در آن، B_t سطح بین نمودار دانه‌بندی اولیه و دانه‌بندی نهایی بعد از آزمایش تراکم و B_p ظرفیت خردشوندگی معادل سطح بین نمودار دانه‌بندی اولیه و خط عمود عبور کرده از $d = ۰,۰۷۵$ است.



شکل ۲-۱۸: تاثیر مقاومت تراکمی تک‌محوره بر خردشوندگی

۲-۱۱-۱-۲- مدول الاستیک

مدول الاستیک سنگ نیز از آن جا که نشان‌دهنده تغییر شکل‌پذیری ماده سنگ است، همانند مقاومت تراکمی یکی از عوامل تعیین‌کننده در قابلیت تخریب به شمار می‌رود.

۲-۱۱-۱-۳-۲ فراوانی ناپیوستگی‌ها در توده سنگ

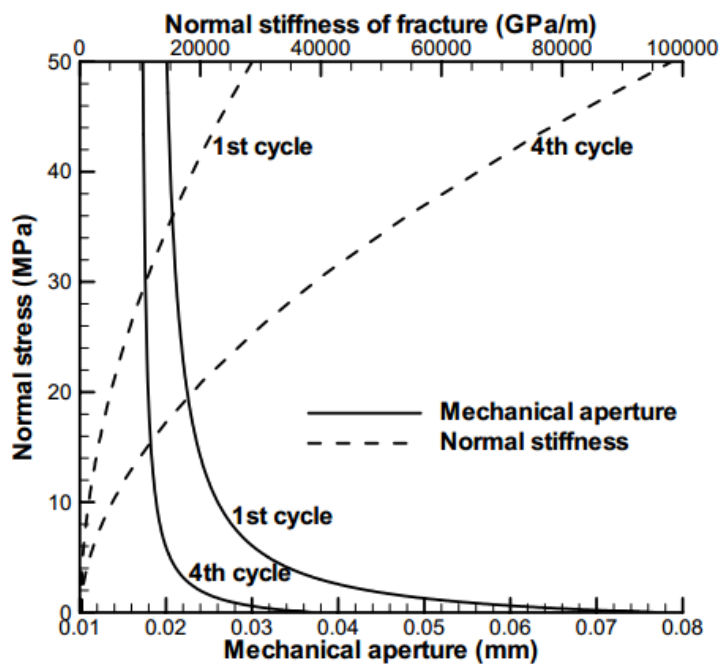
شدت ناپیوستگی‌های سنگ در اصل اندازه‌ای از ناپیوستگی‌ها بر واحد توده‌سنگ است که در آن واحد توده‌سنگ می‌تواند حجم، مساحت و یا طول باشد. شدت درزه در دو بعد، P_{21} ، به عنوان طول کلی درزه در داخل مساحت واحد تعریف می‌شود. P_{21} مستقل از مقیاس است، اما مقدار آن با جهت صفحه‌ای که اندازه‌گیری بر روی آن انجام می‌شود، تغییر می‌کند. عامل سه بعدی شدت درزه، P_{32} ، به صورت مساحت سطح کل درزه‌ها بر واحد حجم تعریف می‌شود، این عامل مانند P_{21} ، مستقل از مقیاس است و به عنوان یک عامل حجمی، مستقل از جهت نیز به شمار می‌رود. سنگ‌های دارای شدت ناپیوستگی بیشتر، دارای قابلیت تخریب بیشتری هستند همچنین تغییرات گسترده در فراوانی درزه منجر به تغییرات گسترده در اندازه خردایش خواهد شد. کارهای جدید حساسیت خردشوندگی توده سنگ را نسبت به شدت درزه‌داری حجمی (P_{32}) و اهمیت تعیین مقدار شدت بحرانی که در آن تغییر حالت از توده سنگ یکپارچه برجا به توده سنگی با قابلیت حرکت، تبدیل می‌شود را نشان می‌دهد (Rogers, et al., ۲۰۱۰).

فاصله‌داری یکنواخت درزه‌ها به تمرکز یا متغیر بودن چگالی درزه‌ها ترجیح داده می‌شود، چراکه این امر منجر به توسعه تخریب در طول مرزهای تخریب می‌شود. هرچه تعداد درزه‌ها بیشتر و فاصله‌ی آن‌ها از یکدیگر کمتر باشد، تخریب بهتری به وقوع خواهد پیوست.

فاصله‌داری کمینه و بیشینه درزه‌ها نیز از عوامل محسوب می‌شوند که ابعاد نهایی سنگ خردشده را مشخص می‌کنند. برای مثال، فاصله‌داری متوسط یک متر با کمینه ۰/۵ متر و بیشینه ۱/۵ متر بدین معنی است که اندازه‌ی بزرگ‌ترین بلوک احتمالاً کمتر از ۳ مترمکعب است، درحالی‌که اگر بیشینه فاصله‌داری ۳ متر باشد، آنگاه بزرگ‌ترین بلوک می‌تواند ۲۴ مترمکعب باشد (Laubscher, ۲۰۰۰). فاصله‌داری درزه‌ها در داخل کانسنگ به صورت نواحی مختلف باید تعریف شود. با تعریف نواحی مختلف، تحلیل خردایش دقیق‌تر می‌شود. در صورت در نظر گرفتن مقدار متوسط فاصله‌داری درزه برای تمام کانسنگ، ارزیابی خردایش کلی ممکن است به دور از واقعیت باشد.

۲-۱۱-۱-۴- بازشدگی درزه^۱

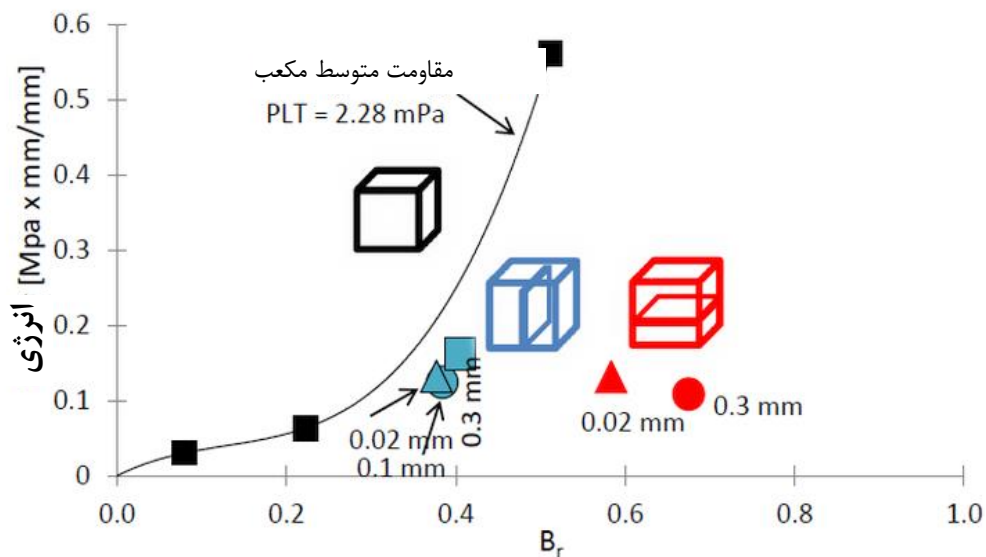
به فاصله بین دو دیواره ناپیوستگی که در جهت عمود بر صفحه اصلی اندازه‌گیری شود، بازشدگی می‌گویند. بازشدگی ممکن است، با موادی پر شود. میزان بازشدگی می‌تواند بر مقاومت برشی ناپیوستگی، میزان آبدزدی و در نتیجه بر قابلیت تخریب توده‌سنگ تاثیر داشته باشد. ناپیوستگی‌هایی با مقاومت برشی کم برای تخریب مناسب هستند، زیرا مقاومت کمی در مقابل تنش‌های برشی از خود نشان می‌دهند و تمایل بیشتری به بازشدگی دارند (Mahtab, et al., ۱۹۷۷). به‌طور کلی نتایج تحقیقات نشان می‌دهد بازشدگی بزرگ‌تر امکان ایجاد فشار آب بیشتر را افزایش داده و باعث ایجاد ترک‌های جدید می‌شود. همچنین تعداد دسته‌درزه بیشتر باعث تغییرپذیری بیشتر در بازشدگی درزه می‌شود. همان‌طور که در شکل ۲-۱۹، مشاهده می‌شود، تنش برجای نرمال بر ناپیوستگی‌های با بازشدگی بزرگ‌تر، کمتر است.



شکل ۲-۱۹: رابطه بین بازشدگی درزه و تنش نرمال بر روی درزه

^۱ Aperture

در شکل ۲-۲۰، تاثیر بازشدگی بر خردشوندگی نشان داده شده است. به طور کلی بدون توجه به جهت درزه‌ها نسبت به جهت بارگذاری، با افزایش بازشدگی، خردشوندگی بهبود یافته است، اما در درزه‌هایی که عمود بر جهت بارگذاری هستند، تاثیر اندازه بازشدگی بر روی خردشوندگی بیشتر است.



شکل ۲-۲۰: نتایج خردشوندگی در بررسی تاثیر بازشدگی درزه

جریان آب با تراوایی محیط متخلخل تعیین می‌شود که تراوایی توسط اندازه‌گیری‌های میدانی یا از طریق آزمایش‌های آزمایشگاهی و یا روابط تجربی یا نظری تعیین می‌شود. روابط متعددی برای تعیین تراوایی بسته به این که محیط بکر است یا دارای شبکه‌ای از درزه‌ها است، وجود دارد. تراوایی یک سنگ متخلخل تابع متغیری از تنش‌های القایی و درزه‌های جدید است. بنابراین علاوه بر تعیین تراوایی اولیه باید تغییرات ممکن ناشی از معدنکاری را نیز محاسبه کرد.

۲-۱۱-۱-۵- پایایی

پایایی به صورت گسترش یا اندازه واقعی ناپیوستگی در طول صفحه‌ی آن تعریف می‌شود. منظور از طول اثر طولی از درزه یک ناپیوستگی است که در یک رخنمون مشاهده می‌شود و از روی پایایی

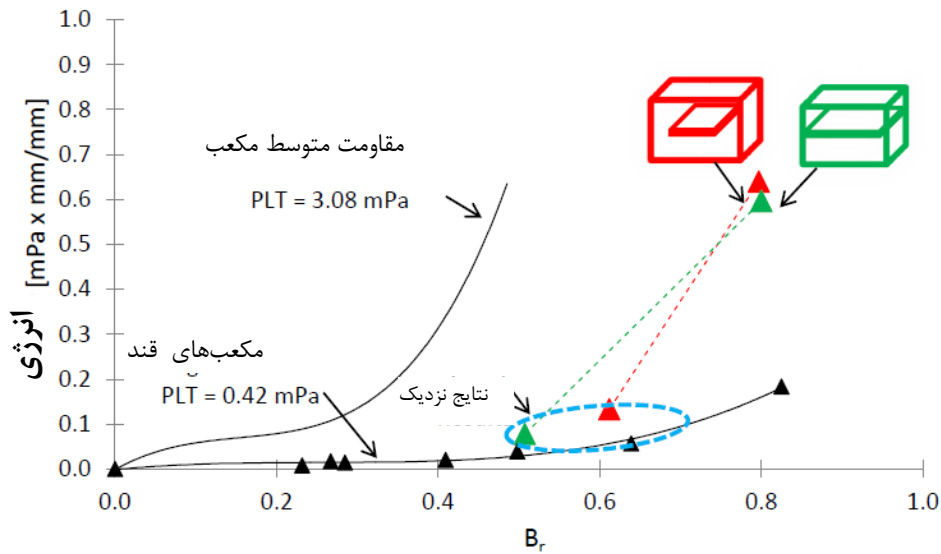
می‌توان معیاری تقریبی از گسترش فضایی ناپیوستگی در سنگ به دست آورد. پایان‌یابی^۱ ناپیوستگی در سنگ متراکم و سخت یا منتهی شدن به ناپیوستگی‌های دیگر، مقدار پایایی را تعیین می‌کند. (Einstein, et al., ۱۹۸۳).

پایایی ناپیوستگی در میان سایر عوامل هندسی آن دارای بیشترین تاثیر بر مقاومت توده‌سنگ است (Einstein, et al., ۱۹۸۳). پل‌های سنگ سالم واقع در بین صفحه‌های درزه، اساساً باعث افزایش مقاومت توده‌سنگ می‌شوند. از آنجا که برداشت پایایی در عمل تقریباً غیرممکن است، در نتیجه، اغلب به صورت محافظه‌کارانه پایایی به‌طور کامل در نظر گرفته می‌شود.

پایایی ناپیوستگی یکی از مهم‌ترین عامل‌های موثر بر رفتار توده سنگ است، زیرا به همراه فاصله‌داری درزه‌ها، اندازه بلوک‌های سنگی را تعیین می‌کنند، علاوه بر این ناحیه بکر کوچک بین ناپیوستگی‌های با پایایی کم، می‌تواند تاثیر مثبتی بر پایداری و تاثیر منفی بر قابلیت تخریب داشته باشد. رگه‌های موجود در بلوک‌ها، به‌طور خاص در سنگ‌های سخت‌تر، به‌طور قابل‌توجهی خردشوندگی ثانویه را تحت تاثیر قرار می‌دهند (Dorador, ۲۰۱۶).

برای بررسی این موضوع آزمون‌های متعددی بر روی بلوک‌های سیمانی با اندازه $۱۷ \times ۱۷ \times ۱۷$ میلی‌متر انجام شده است (Dorador, ۲۰۱۶). نتایج این تحقیق در شکل ۲-۲۱، نشان می‌دهد که وجود رگه در نمونه‌ها باعث افزایش خردشوندگی می‌شود. خط پر سیاه‌رنگ در شکل ۲-۲۱، نمایانگر مکعب‌های بدون درزه است. اما مقایسه نتایج آزمون‌های انجام‌شده بر روی مکعب‌های بارگه‌های ۸ و ۱۶ میلی‌متر نشان می‌دهد تفاوت فراوانی در خردشوندگی وجود ندارد.

^۱ Termination



شکل ۲-۲۱: نتایج خردشوندگی برای مکعب‌های با اندازه درزه متفاوت و بدون درزه (Dorador, ۲۰۱۶)

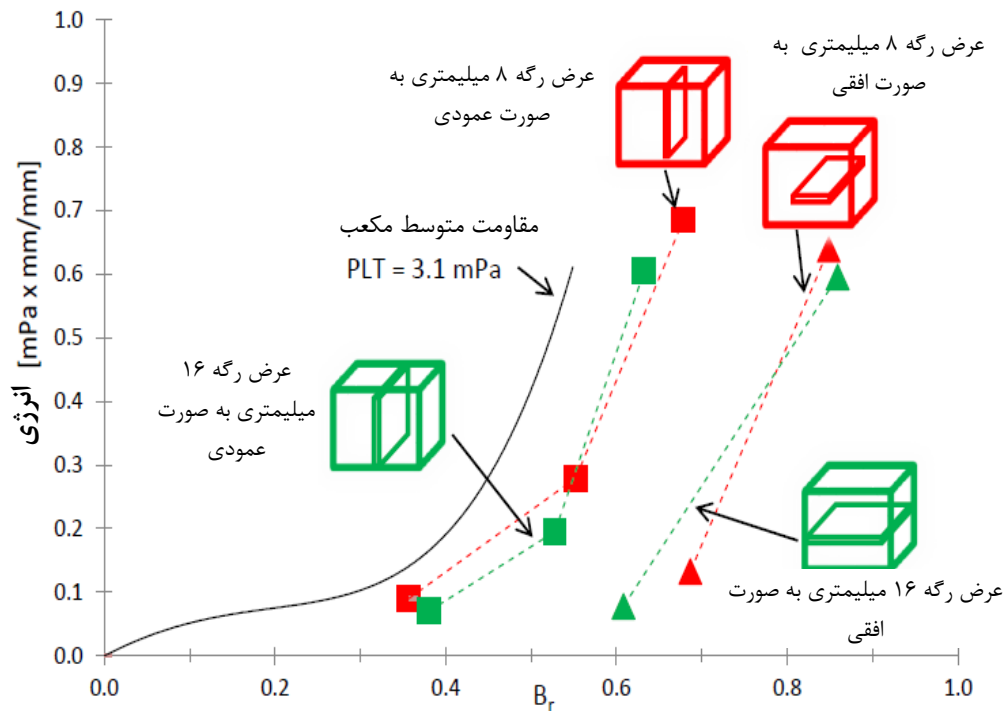
۲-۱۱-۱-۶- جهت‌داری ناپیوستگی

جهت‌داری عاملی است که وضع جانمایی درزه‌ها در فضا را نشان می‌دهد و با امتداد یا جهت شیب و شیب‌خط بزرگ‌ترین شیب در صفحه درزه تعریف می‌شود. وجود شکستگی‌هایی با شیب مطلوب، فاصله‌داری و مقاومت برشی کم در تخریب کانسنگ دارای اهمیت بسیاری است (Mahtab, et al., ۱۹۷۷). جهت‌داری دسته‌درزه‌های اصلی نسبت به تنش‌های برجا از عوامل بحرانی برای تعیین قابلیت تخریب و یکی از عوامل مهم در شکل‌گیری سقف قوسی شکل و قفل‌شدگی بلوک‌ها است (Kendorski, ۱۹۷۸). درزه‌هایی با زاویه کم باعث جابجایی عمودی مناسب سنگ در هنگام معدنکاری و منجر به شکست‌های وزنی و برشی مناسب می‌شوند (Laubscher, ۲۰۰۰).

اگر جهت ناپیوستگی‌های سنگ عمودی باشد تخریب به‌آسانی صورت نخواهد گرفت و حتی ممکن است در بین این ناپیوستگی‌ها پل‌زدگی نیز به وجود آید. از سوی دیگر اگر فقط ناپیوستگی‌های افقی وجود داشته باشد، تخریب صورت می‌گیرد ولی سنگ به قطعات بزرگ می‌شکند. خصوصیات ناپیوستگی‌ها با توجه به تاثیرات مهمی که در قابلیت تخریب دارد باید به‌دقت

اندازه‌گیری شود (Sainsbury, et al., ۲۰۱۱).

نتایج تحقیق دورادور (۲۰۱۵) بر روی تاثیر جهت‌داری درزه‌ها، نشان می‌دهد که بارگذاری به‌موازات درزه‌ها باعث تقسیم بلوک‌ها به دو بخش می‌شود که خردشوندگی بیشتر را محدود می‌کند. در حالی که بارگذاری عمود بر سطح درزه، باعث شکست فشاری بلوک‌ها می‌شود که در مقایسه باحالت قبل خردشوندگی بیشتری را نتیجه خواهد داد. همانطور که در شکل ۲-۲۲، مشاهده می‌شود در بلوک‌هایی که سطح درزه عمود بر جهت بارگذاری است میزان خردشوندگی بیشتر است.



شکل ۲-۲۲: بررسی رابطه جهت‌داری و اندازه درزه‌ها بر خردشوندگی (Dorador, ۲۰۱۶)

۲-۱۱-۱-۷- زبری سطح ناپیوستگی

زبری نشان‌دهنده‌ی میزان تموج و قابلیت اتساع سطوح ناپیوستگی است. ناپیوستگی‌های دارای مقاومت برشی کم برای تخریب مناسب هستند. زیرا تمایل بیشتری به بازشدگی و تخریب دارند (Mahtab, et al., ۱۹۷۷).

۲-۱۱-۱-۸- پرشدگی ناپیوستگی

پرشدگی ناپیوستگی‌ها بر قابلیت تخریب توده سنگ موثر هستند. زیرا این خصوصیات نقش بسیار مهمی در مقاومت توده‌سنگ دارند (Mahtab, et al., ۱۹۷۷). هرچه مصالح پرکننده مقاوم‌تر و درصد پرشدگی فضای خالی بین سطوح ناپیوستگی بیشتر باشد، مقاومت برشی ناپیوستگی بیشتر است. بالعکس هرچه این مواد پرکننده سست‌تر باشد، قابلیت تخریب افزایش می‌یابد و بلوک‌های خردشده مواد معدنی راحت‌تر از یکدیگر جدا می‌شوند.

۲-۱۱-۱-۹- هوازگی سطح ناپیوستگی

هوازگی و دگرسانی سطح درزه باعث کاهش زبری سطح درزه و در نتیجه باعث کاهش مقاومت برشی ناپیوستگی خواهد شد. بنابراین دگرسانی سطح درزه باعث افزایش ظرفیت حرکت بلوک‌ها بر روی یکدیگر و افزایش قابلیت تخریب و خردشوندگی می‌گردد.

۲-۱۱-۲- عوامل محیطی

اگرچه قابلیت تخریب توده سنگ تا حد زیادی تابعی از خصوصیات ژئومکانیکی و طبیعی سنگ است، ولی به‌طور قابل توجهی از عوامل محیطی نیز تاثیر می‌پذیرد. مهم‌ترین عوامل محیطی موثر در تخریب شامل آب‌های زیرزمینی و میدان تنش‌های برجا است.

۲-۱۱-۲-۱- میدان تنش‌های برجا

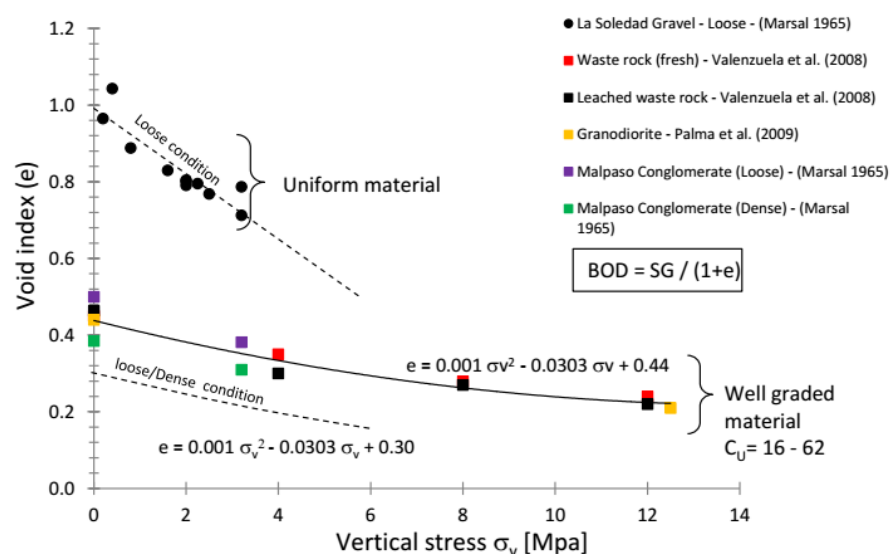
شدت و جهت تنش‌های برجا از عوامل تاثیرگذار بر روی قابلیت تخریب کانسار در روش‌های تخریب توده‌ای و تخریب طبقات فرعی هستند. نسبت تنش‌های برجای افقی به عمودی بر روی شدت تنش‌های القایی در فضای پشت تخریب، انتشار و نرخ تخریب تاثیر بسزایی دارد. باید توجه داشت که حتی اگر ساختار توده‌ی سنگ و خواص ژئومکانیکی آن برای وقوع و گسترش لغزش ایده‌آل باشد، وجود تنش‌های محدودکننده‌ی افقی بزرگ می‌تواند مانع گسیختگی و تخریب توده‌ی سنگ شود. مقدار بالای این تنش‌ها می‌تواند باعث قفل شدن بلوک‌ها در یکدیگر و پایداری

توده‌سنگ در مقابل گسترش تخریب در صورت عدم حضور ناپیوستگی‌ها با زاویه کم در توده‌سنگ شود (Kendorski, ۱۹۷۸).

به‌منظور رسیدن به تخریب، سطح بزرگی از کانسنگ باید زیربرش شود تا توده‌سنگ بشکند و تخریب گسترش پیدا کند. تنش‌های برجا در اطراف زیربرش، باز توزیع شده و در مرزهای پیشروی جایی که تنش‌های القایی بیشتر از تنش‌های منطقه‌ای هستند، تمرکز پیدا می‌کنند. شدت و جهت‌داری تنش‌های القایی در فضای پشت تخریب در نتیجه توسعه تخریب بر رفتار سنگ تسلط خواهد داشت. وقتی زیربرش استخراج می‌شود، تنش‌های اصلی در فضای پشت تخریب افزایش پیدا کرده و زمانی که این تنش‌ها بزرگ‌تر از نصف مقاومت توده‌سنگ شوند، نقش مهمی را در تخریب ایفا می‌کنند. تنش‌های القایی تابعی از شکل فضای پشت تخریب و تنوع در کیفیت و ساختار توده سنگ هستند. مقدار این تنش‌ها در فضای پشت تخریب باید برای ارتفاع‌های مختلف تخریب، کیفیت توده سنگ و هندسه تخریب محاسبه شود (Laubscher, ۲۰۰۰). قطعاً با اعمال ترفندهای منتهی به رهایی تنش، در توده‌ی قابلیت تخریب، پدیده‌ی پل‌زدگی اتفاق می‌افتد و چه‌بسا پایه‌های پل سنگی از محدوده‌ی مرزهای بلوک نیز فراتر رود. گسترش پل‌زدگی در توده‌ی سنگ تخریب‌شده پایداری مرزها را از بین می‌برد. اگر پل سنگی در تمام محدوده‌ی گسترش خود پایدار باقی بماند باعث بروز مشکلات عدیده‌ای خواهد شد. مثلاً ممکن است باعث انفجار هوا و یا لرزش زمین شده و عملیات تخریب را غیراقتصادی نماید (اورعی, ۱۳۸۳).

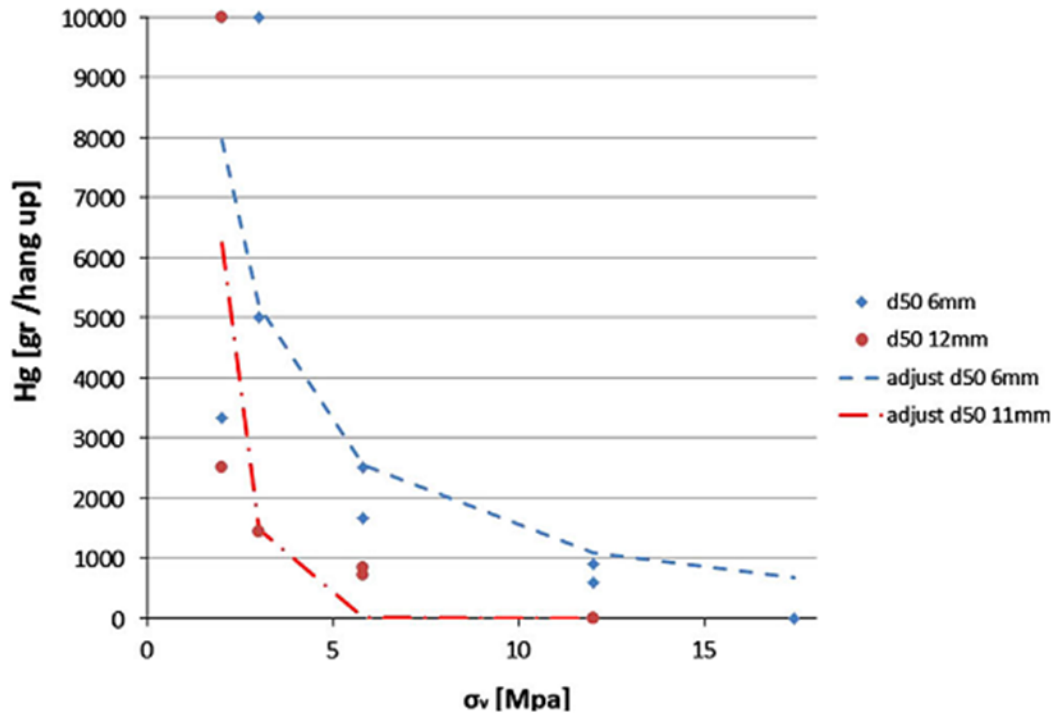
در خلال روند تخلیه بر اساس تغییر پیوسته تنش در ستون تخلیه، نسبت $\frac{\sigma_1}{\sigma_3}$ ثابت نخواهد بود. به‌طور کلی قابلیت تراکم در ستون تخلیه به‌طور عمده وابسته به فشارهای محصورکننده، چگالی اولیه سنگ‌های خردشده و توزیع اندازه بلوک‌ها است. همان‌طور که در شکل ۲-۲۳، مشاهده می‌شود با افزایش σ_v در ستون تخلیه شاخص فضای خالی کاهش و بنابراین چگالی کانسنگ خردشده افزایش خواهد یافت. همچنین در صورت دانه‌بندی خوب چگالی سنگ‌های خردشده، بیشتر خواهد بود.

کاسترو و همکارانش (۲۰۱۲)، در آزمایش‌هایی که بر روی یک مدل فیزیکی انجام دادند، دریافتند که در آزمایش‌هایی که از نقاط تخلیه، جریان متناوب مواد خردشده مشاهده شده است وقوع گیرافتادگی با مقدار بار قائم در ستون تخلیه ارتباط دارد. تاثیر تنش قائم بر فراوانی گیرافتادگی با اندازه‌گیری مقدار میانگین سنگ خردشده‌ای که قبل از هر گیرافتادگی بیرون کشیده شده است کمیت گذاری شده است. همان‌طور که در شکل ۲-۲۴، مشاهده می‌شود با افزایش تنش قائم مقدار مواد استخراج شده قبل از هر گیرافتادگی به صورت غیرخطی نمایی کاهش یافته است.

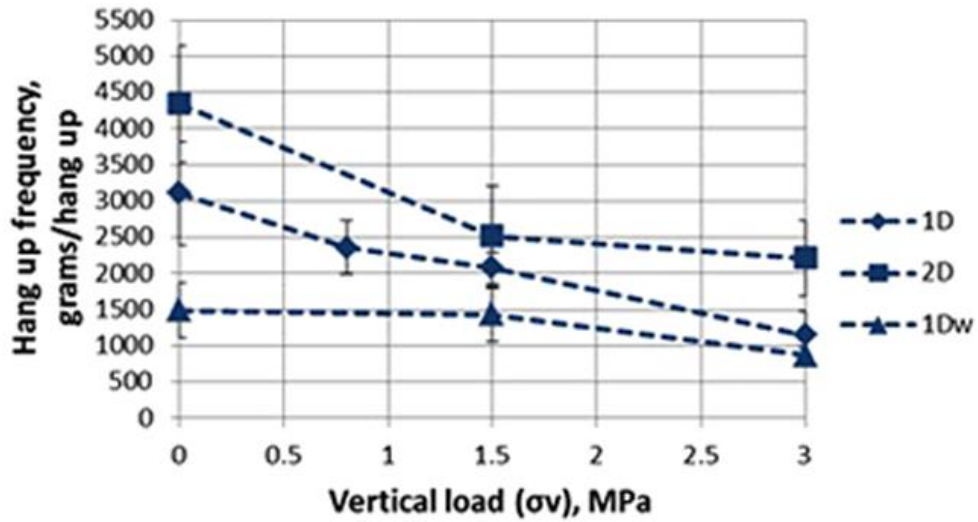


شکل ۲-۲۳: تاثیر تنش قائم بر چگالی سنگ خردشده (Castro, et al., ۲۰۱۸)

شکل ۲-۲۵، از نتایج تحقیق کاسترو (۲۰۱۸)، رابطه تنش قائم و گیرافتادگی را برای سه حالت یک نقطه تخلیه، یک نقطه تخلیه مرطوب و دو نقطه تخلیه را نشان می‌دهد. همان‌طور که در شکل ۲-۲۵، مشاهده می‌شود، افزایش رطوبت در ستون تخلیه باعث افزایش گیرافتادگی‌ها می‌شود. همچنین مشاهده می‌شود با تخلیه هم‌زمان از بیشتر از یک نقطه تخلیه فراوانی گیرافتادگی کاهش فراوانی خواهد داشت.



شکل ۲-۲۴: رابطه تنش قائم و گیرافتادگی (Castro, et al., ۲۰۱۸)



شکل ۲-۲۵: رابطه تنش قائم با گیرافتادگی (در شرایط تخلیه منفرد) (Castro, et al., ۲۰۱۸)

۲-۱۱-۲- آب‌های زیرزمینی

حضور آب در منطقه‌ی تخریب باعث کاهش اصطکاک بین درزه‌ها و افزایش فشار آب منفذی می‌شود که در روند تخریب موثر و قابلیت تخریب را افزایش می‌دهد. منبع آب می‌تواند از منابع آب زیرزمینی یا از بارندگی‌های فصلی باشد (Brown, ۲۰۰۳).

مشخصات مربوط به آب زیرزمینی در سازندهای موجود در منطقه‌ی تخریب از قبیل نفوذپذیری، تخلخل، مقدار جریان آب ورودی به سازند و... که در انتخاب روش استخراج موثر هستند را باید با انجام آزمایش‌های مربوط، محاسبه کرد. در بعضی از مواقع وجود یک جریان آب پیوسته در کانسار ممکن است حتی باعث عدم انتخاب روش‌های تخریبی شود (Hartman, ۲۰۰۲).

۲-۱۱-۲-۳- نسبت مواد نرمه

ذرات ریز در نتیجه شکسته شدن نواحی ضعیف یا شکستن گوشه‌های بلوک‌ها در هنگام حرکت به سمت پایین در ستون تخریب، به وجود می‌آیند. از آنجا که درصد بالای ذرات ریز اثرات شکست ثانویه را کاهش خواهد داد، نسبت ذرات ریز به درشت (نسبت نرمه)، باید در فرآیند طراحی در نظر گرفته شود. همچنین درصد بالای مواد نرم در ستون تخلیه، ریسک هجوم گل به داخل فضاها را استخراجی را در صورت وجود آب و شرایط خاص تنش افزایش می‌دهد (Laubscher, ۲۰۰۰).

۲-۱۱-۲-۳- عوامل هندسی

عوامل هندسی نظیر هندسه زیربرش، ارتفاع زیربرش و ارتفاع بلوک با تغییر دادن عوامل القایی که در قابلیت تخریب موثر هستند، باعث تغییر تنش‌های القایی در فضای پشت تخریب و انتشار تخریب می‌شوند.

۲-۱۱-۲-۱- شعاع هیدرولیکی

حفر زیربرش برای ایجاد شکست اولیه در تخریب از نظر قابلیت تخریب و رفتار نهایی توده سنگ در طول عمر تخریب بسیار مهم است. انفجار موفق زیربرش با شعاع هیدرولیکی مناسب، باعث

شکست و جابه‌جایی عمودی توده سنگ به سمت پایین و جریان یافتن مواد شکسته شده در قیف‌های استخراج در اندازه مناسب می‌شود. استخراج ضعیف زیربرش منجر به تغییر شکل پایه‌ها، تشکیل بلوک‌ها با ابعاد بزرگ و در نهایت می‌تواند منجر به عدم ایجاد تخریب اولیه شود (Kendorski, ۱۹۷۸).

رژیم تنش‌های برجا و کیفیت توده سنگ احتمال تشکیل سقف قوسی شکل را با توجه به دهانه زیربرش‌ها مشخص می‌کنند. زیربرش‌های باریک مستطیل شکل نسبت به سایر زیربرش‌ها برای تشکیل سقف‌های قوسی شکل مستعدتر هستند و از گسترش تخریب نسبت به زیربرش‌هایی با ابعاد یکسان جلوگیری می‌کنند (Laubscher, ۲۰۰۰).

زیربرش‌های دایره‌ای و مربعی دارای شعاع هیدرولیکی بالاتری نسبت به زیربرش‌های مستطیلی هستند. شکل جبهه زیربرش، برنامه‌ریزی زمانی زیربرش نسبت به آماده‌سازی تراز استخراج، فاصله قائم زیربرش و تراز استخراج، شعاع هیدرولیکی، جهت زیربرش و رژیم تنش‌های برجا بر روی تنش‌های القایی تراز استخراج، پایداری حفاریات تراز استخراج، نگهداری و هزینه‌های آن تاثیر دارد (Brown, ۲۰۰۳).

اگرچه ایجاد زیربرش برای القای تخریب ضروری است ولی ممکن است برای شروع و انتشار مناسب تخریب به‌خصوص در سنگ‌های سخت، علاوه بر زیربرش نیاز به راه‌کارهایی جهت القای بیشتر تخریب باشد. اطلاعات گردآوری شده توسط فلورز^۱ و کارزولوویک^۲ در سال ۲۰۰۳ نشان می‌دهد در بیش از ۵۰ درصد معادن تخریبی کنونی، از انفجار و برش‌های قائم برای کمک به تخریب استفاده شده است (Karzulovic, et al., ۲۰۰۳).

^۱ Flores

^۲ Karzulovic

۲-۱۱-۳-۲- ارتفاع زیربرش

ارتفاع زیربرش بر روی مقدار تنش‌های القایی، تراز استخراج، انتشار تخریب، جریان کانسنگ خردشده، زمان دسترسی به تولید اولیه، خردشوندگی و هزینه‌های اولیه تاثیر دارد (Laubscher, ۲۰۰۰).

اگر قابلیت تخریب و خردشدگی کانسنگ بالا باشد و ماده‌ی معدنی به‌راحتی شکسته و خرد شود ارتفاع زیربرش باید کم و در حدود یک متر در نظر گرفته شود، زیرا در صورت زیاد بودن ارتفاع زیربرش احتمال ریزش سقف در هنگام اجرای عملیات زیربرش افزایش می‌یابد. از سوی دیگر در صورتی که کانسنگ مقاومت نسبتاً خوبی داشته و قابلیت تخریب و خردشدگی آن پایین باشد ارتفاع زیربرش تا حدود ۲ متر افزایش داده می‌شود تا شرایط برای خردشدگی مطلوب و مناسب در کانسنگ فراهم شود (Hustrulid, et al., ۲۰۰۱).

۲-۱۱-۳-۳- ارتفاع ستون تخلیه

ارتفاع بلوک وابسته به هندسه کانسنگ، خردشوندگی کانسنگ و خصوصیات سنگ روباره است (Kendorski, ۱۹۷۸). خردشوندگی ثانویه مواد تخریب‌شده از طریق ساییدگی کانسنگی که به سمت پایین ستون تخلیه جریان دارد اتفاق می‌افتد. از این رو قابلیت تخریب کانسنگ، سنگ روباره و نتایج خردشوندگی در تعیین ارتفاع بهینه بلوک در فرایند طراحی معدن تاثیرگذار هستند. به‌طور آماری ارتفاع بلوک‌ها تا ۴۰۰ متر در نظر گرفته شده است. هرچند ارتفاع بلوک‌ها تا ۵۰۰ متر در معدن پالابورا^۱ و نورث‌پارک و ۱۰۵۰ متر در معدن کادیایست^۲ افزایش داده شده است (Cerrutti, et al., ۲۰۱۴).

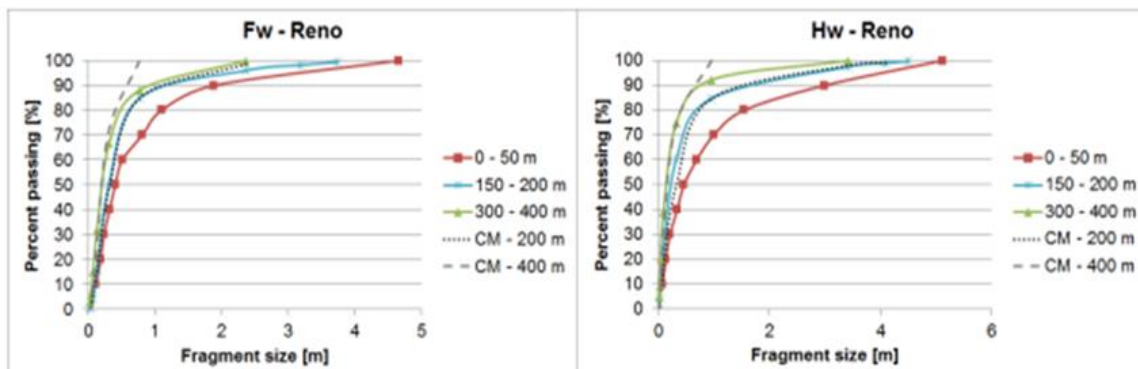
افزایش ارتفاع ستون تخلیه، باعث افزایش خردشوندگی ثانویه می‌شود. حرکت مواد تخریب شده به طرف پایین، منجر به شکست پل‌زدگی‌ها می‌شود و بار نقطه‌ای بلوک‌ها بر یکدیگر در پل‌زدگی‌ها

^۱ Palabora

^۲ Cadia East

سبب شکستن بلوک‌ها می‌شود. جایی که خردشوندگی با ابعاد درشت وجود دارد، ریزش یک پل‌شدگی منطقه وسیعی را تحت تاثیر قرار می‌دهد و مواد به داخل فضا جریان می‌یابند. این امر باعث مهاجرت جانبی مواد و تغییر خردشوندگی می‌شود (Dorador, et al., ۲۰۱۴).

در ستون‌های تخلیه بلند، مسافت طولانی‌تر بلوک‌ها از سقف تخریب تا رسیدن به نقاط تخلیه، باعث افزایش زمان حضور بلوک‌ها در ستون تخلیه شده و در نتیجه باعث خردشوندگی بیشتر می‌شود. هورتادو و همکارانش در سال ۲۰۰۷، در بررسی نتایج خردشوندگی معادن رنو-شیلی، تاثیر ارتفاع ستون تخلیه بر خردشوندگی را برای کمر بالا و کمر پایین معدن رنو بررسی کردند (Hurtado, et al., ۲۰۰۷). همان‌طور که در شکل ۲-۲۶، مشاهده می‌شود با افزایش ارتفاع ستون تخلیه، خردشوندگی افزایش می‌یابد.



شکل ۲-۲۶: بررسی تاثیر ارتفاع ستون تخلیه بر خردشوندگی (Hurtado, et al., ۲۰۰۷)

۲-۱۱-۳-۴- هندسه نقاط تخلیه

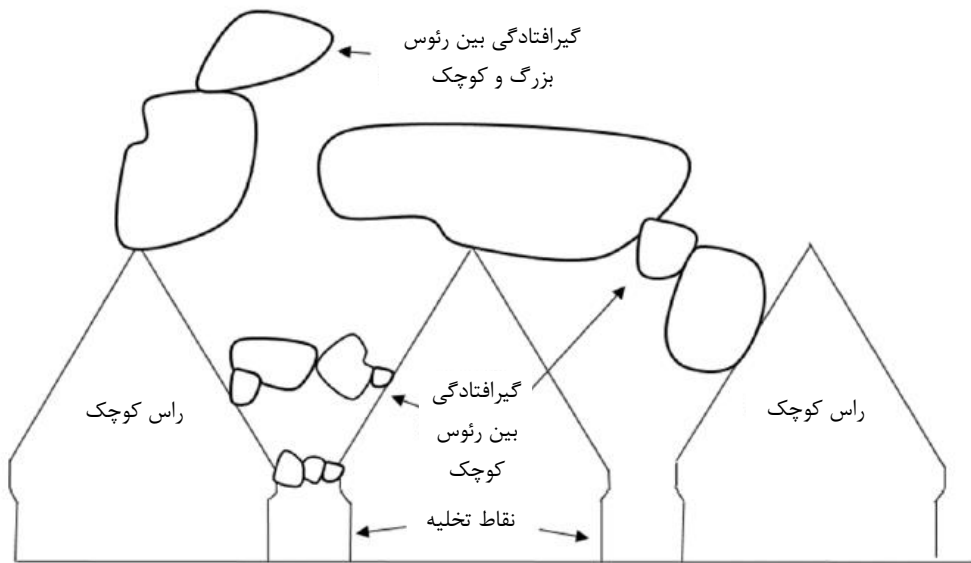
نقاط تخلیه در پایین‌ترین بخش در زیرستون تخلیه به عنوان محل تخلیه و بارگیری توده سنگ خردشده نقش اساسی در پیاده‌سازی روش استخراج تخریب توده‌ای دارند. اندازه نقاط تخلیه تحت تاثیر خردشوندگی کانسنگ، اندازه تجهیزات بارگیری و نیازمندی‌های آن‌ها و خصوصیات ژئومکانیکی کانسنگ است. به‌طور کلی اندازه نقاط تخلیه باید سه تا ۶ برابر بزرگ‌ترین بلوک کانسنگ خردشده

باشد. درصد بلوک‌های بزرگ‌تر از ۲ متر مکعب به عنوان یک شاخص برای تعیین احتمال تولید قطعات بزرگ به کار می‌رود (Laubscher, ۲۰۰۰).

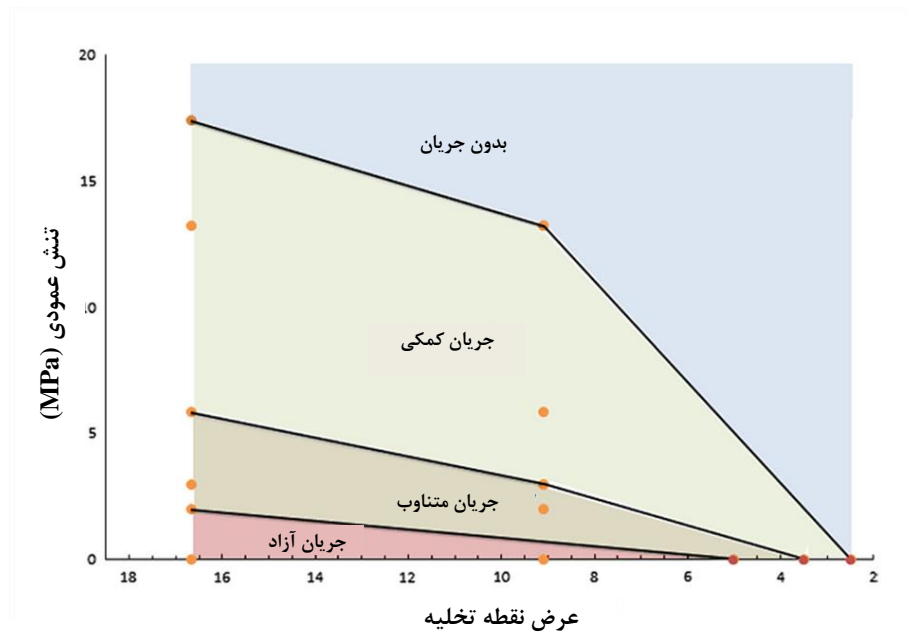
شکل تونل‌های تخلیه و میان‌برها برای کاهش تنش‌های القایی، به‌طور معمول به صورت نعل اسبی در نظر گرفته می‌شوند. در معدن هندرسون تونل‌های نقاط تخلیه با سقف مسطح ایجاد شده‌اند که تحت عنوان طرح هندرسون شناخته می‌شود. شکل قیف‌های تخلیه بر روی جریان کانسنگ خردشده، نرخ تولید و مقاومت پایه‌ها تاثیر دارد. از طرف دیگر شکل قیف تخلیه تحت تاثیر مقاومت توده سنگ، طرح و معماری زیربرش و حفاری و آتشیاری خواهد بود (Laubscher, ۲۰۰۰). فاصله‌داری نقاط تخلیه با توجه به تاثیر مستقیم آن‌ها بر نحوه تداخل بیضی‌های تخلیه بر روی خردشوندگی و رقیق‌شدگی تاثیر فراوانی دارند.

مطالعات انجام‌شده توسط لابسچر (۱۹۹۴) و براون (۲۰۰۷)، گیرافتادگی در نقاط تخلیه را به‌عنوان یک عامل بحرانی برای تعیین موفقیت در عملیات تخریب توده ای تعیین کرده‌اند. او همچنین تولید بلوک‌های بزرگ در نقاط تخلیه را مشکل عمده برای سیستم بارگیری عنوان کرده است. حالت‌های مختلف گیرافتادگی در شکل ۲-۲۷، توسط لابسچر ارائه شده است، این یافته‌ها توسط مشاهدات در چندین معدن تخریب توده‌ای نظیر پالابورا و DOZ تأیید شده است.

شکل ۲-۲۸، رابطه فراوانی گیرافتادگی و ابعاد نقاط تخلیه را نشان می‌دهد. همان‌طور که مشاهده می‌شود هر چه نسبت دهانه نقاط تخلیه به D_50 سنگ خردشده افزایش یابد مقدار فراوانی گیرافتادگی کاهش خواهد داشت.



شکل ۲-۲۷: حالت‌های مختلف گیر افتادگی در نقاط تخلیه (لابسچر، ۲۰۰۰)



شکل ۲-۲۸: منحنی قابلیت جریان سنگ‌های خردشده (Castro, et al., ۲۰۱۸)

۴-۱۱-۲ عوامل عملیاتی

در روش‌های استخراج تخریب توده‌ای و تخریب طبقات فرعی، قابلیت خردشوندگی به‌طور قابل توجهی از عوامل عملیاتی تأثیرپذیر است. عوامل عملیاتی بر اساس چگونگی معدنکاری شکل

می‌گیرند. این عوامل به‌طور مستقیم وابسته به خصوصیات طبیعی یا ژئومکانیکی کانسنگ و سنگ‌های اطراف نبوده و در روش‌های تخریب توده‌ای شامل هندسه زیربرش و ترتیب حفاری آن، میدان تنش‌های القایی و چگونگی تخلیه مواد می‌شود.

عوامل عملیاتی نیز از نظر فنی و اقتصادی بر روی امکان‌پذیری روش تخریب توده‌ای تاثیر می‌گذارند. انباشته شدن مواد بر روی رأس پایه، سادگی و سرعت آماده‌سازی، تخلیه مناسب مواد خردشده از طریق نقاط تخلیه، دسترسی و امکان مانور ماشین‌آلات و دسترسی کارگران و ماشین‌آلات در مواقع گیرافتادگی از عوامل عملیاتی موثر بر امکان‌پذیری روش‌های تخریبی هستند (Brown, ۲۰۰۳).

در تصمیم‌گیری برای استخراج یک کانسار، به روش استخراج تخریب توده‌ای باید به خطرات عملیاتی احتمالی توجه شود. خطرات مرتبط با معدنکاری تخریبی به‌وسیله هسلپ^۱ و سامرز^۲ در سال ۲۰۰۰ بررسی شده است. برخی خطرات عملیاتی نظیر سقوط سنگ‌های بزرگ، هجوم گل و انفجار هوا می‌تواند فرایند معدنکاری تخریبی را با مشکل مواجه کند. برخی از عوامل ایجاد خطر عبارت‌اند از:

- عدم کفایت داده‌های زمین‌شناسی که برای تعیین درست ساختار، شکل، اندازه و عیار کانسار استفاده می‌شود.
- عدم کفایت داده‌های ژئوتکنیکی شامل ساختارهای عمده، ناپیوستگی‌ها، خصوصیات سنگ، تنش‌های برجا، آب‌های زیرزمینی و سطحی باعث قابلیت تخریب کم، انتشار نامناسب تخریب، خردشوندگی نامناسب، ناپایداری حفاریات، محدودیت‌های زیست‌محیطی مانند تاثیر احتمالی بر روی آب‌های سطحی و زیرزمینی، تجمع زباله‌های معدنی، تاثیر احتمالی بر محیط‌زیست جانداران، نشست زمین، حقوق تملک زمین و حقوق اجتماعی می‌شود.

^۱ Heslop

^۲ Summers

۲-۱۱-۴-۱- نرخ تخلیه

کنترل جریان استخراج به‌طور قابل‌ملاحظه‌ای بر روی بهینه کردن بازیابی کانسنگ، حداقل کردن رقیق‌شدگی، تخریب و رفتار خردشوندگی کانسنگ تاثیر دارد (Brady, et al., ۲۰۰۵; Kendorski, ۱۹۷۸). نرخ تخلیه پایین، به علت قرار گرفتن بلوک‌های سنگی در معرض تنش‌های تخریبی، منتج به شکست وابسته به زمان می‌شود، این موضوع به‌ویژه، در مراحل اولیه، اگر خردشوندگی خوب مورد نیاز باشد، دارای اهمیت است. نرخ تخلیه عامل مهمی است که فضای تخریب را فراهم می‌کند. از طرفی کاهش سرعت تخلیه، احتمال تراکم و گیرافتادگی بلوک‌ها را زیاد می‌کند. افزایش سرعت تخلیه باعث افزایش فضای خالی، اختلاط بیشتر و در نتیجه از دست دادن منابع می‌شود. تخلیه متغیر از نقاط تخلیه، خردشوندگی ثانویه را افزایش و برعکس نرخ تخلیه یکسان از نقاط تخلیه باعث خردشوندگی ثانویه کمتر خواهد شد. ضعف در کنترل جریان استخراج، منجر به جا گذاشتن مرزی از سنگ شکسته شده در مجاور دیوارها می‌شود که می‌تواند از دیوارها نگهداری و اثرات ناشی از سطح زیربرش را کاهش دهد از این رو بر قابلیت تخریب تاثیرگذار است (Laubscher, ۲۰۰۰).

در مجموع، کنترل تخلیه و نرخ استخراج از نقاط تخلیه بر روی بازیابی، اختلاط، انتشار تخریب، سقوط سنگ‌های بزرگ، انفجار هوا، انفجار سنگ، تنش‌های القایی تراز استخراج، نشست سطح زمین، شکل سقف فضای استخراجی، فضای خالی، تعداد نقاط تخلیه مورد نیاز، لزوم آتشیاری ثانویه، خردشوندگی و گیرافتادگی تاثیر دارد (Brown, ۲۰۰۳). نرخ‌های متداول تخلیه (بر اساس تجارب موجود) در حدود ۰٫۳ تا ۰٫۶ متر ارتفاع بر روز است (Hustrulid, et al., ۲۰۰۱).

۲-۱۱-۴-۲- اندرکنش ستون‌های تخلیه

تخلیه نامنظم اغلب به علت وجود نواحی دارای خردشدگی مطلوب، برای تولید بیشتر از آن نقاط مورد توجه قرار می‌گیرد. مدیریت کنترل تخلیه نه‌تنها برای افزایش بازیابی بلکه برای بهبود خردشوندگی نیز ضروری است. نرخ تخلیه یکسان در کل منطقه معدنی به معنی حرکت نسبی کمتر

بین بلوک‌ها و خردشدگی کمتر است. نرخ تخلیه از نقاط تخلیه مجاور باید به نحوی باشد که علاوه بر حرکت به سمت پایین بلوک‌ها، در اثر اندرکنش بلوک‌ها در مرز بیضی‌های تخلیه حرکت چرخشی نیز در بلوک‌ها اتفاق افتد (Dorador, ۲۰۱۶). سوسااتا^۱ (۲۰۰۴)، از داده‌های واقعی برای تحقیق نتایج کار لابسچر استفاده کرد و سه مدل جریان مجزا^۲، جریان اندرکنشی^۳ مجزا و جریان اندرکنشی^۴ را ارائه نمود. با افزایش یا کاهش میزان تخلیه از نقاط تخلیه هر یک از مدل‌های جریان فوق می‌تواند به مدل دیگر تبدیل شود. هر چه تخلیه یکسان‌تر باشد، جریان بیشتر از نوع اندرکنشی بوده و رقیق‌شدگی کمتر خواهد بود (شکل ۲-۲۹). در شرایط جریان اندرکنشی، کانه خردشده تحت فشار ناهمسان خواهد بود که بر روی خردشوندگی ثانویه تاثیر دارد (Paredes, et al., ۲۰۱۴). تخلیه نامنظم از نقاط تخلیه می‌تواند حالت مخروط مانندی در سطح ستون کانه‌های خردشده ایجاد کند (Pierce, ۲۰۰۹).

اگر قطر ناحیه تخلیه مجزا، حداقل ۲۰ برابر متوسط اندازه ذرات باشد، در خلال جریان مواد خردشده یک زون تراکم در مرکز ستون تخلیه ایجاد می‌شود. همچنین در حاشیه بیضوی تخلیه ناحیه‌ای با نام زون برش ایجاد می‌شود (Pierce, ۲۰۰۹). میزان تخلخل در زون‌های برشی از ناحیه تراکمی بیشتر است. علاوه بر آن چرخش قابل توجه بلوک‌ها در این نوار برشی اتفاق می‌افتد.

در شکل ۲-۳۰، زون‌های برشی و تراکمی در بالای ستون تخلیه نمایش داده شده است. اگرچه بلوک‌ها دارای گوشه‌های گرد نیستند اما نیروی کمی لازم است تا بلوک‌ها پس از برخورد به سطح ستون کانه خردشده، بر روی سطح مخروط باز، غلتیده و به سمت مرکز منطقه تراکم هدایت شوند. این اتفاق باعث تفاوت در چگالی کانه خردشده در دو ناحیه تراکم و برش خواهد شد (Dorador, ۲۰۱۶).

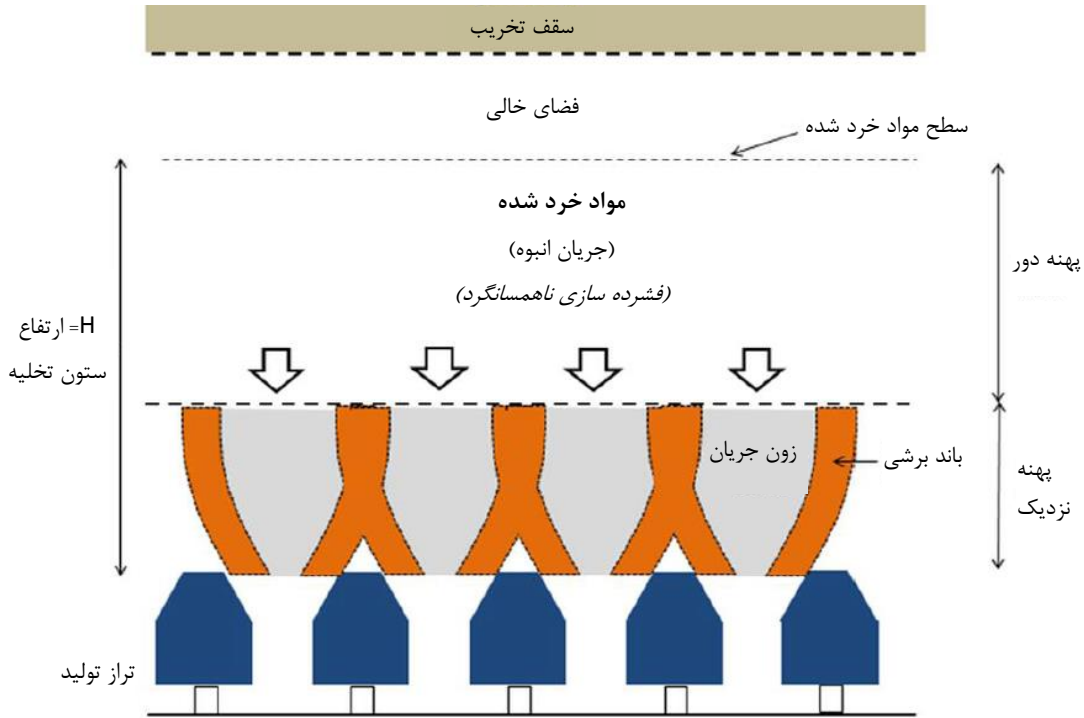
^۱ Susaeta

^۲ Isolated Flow

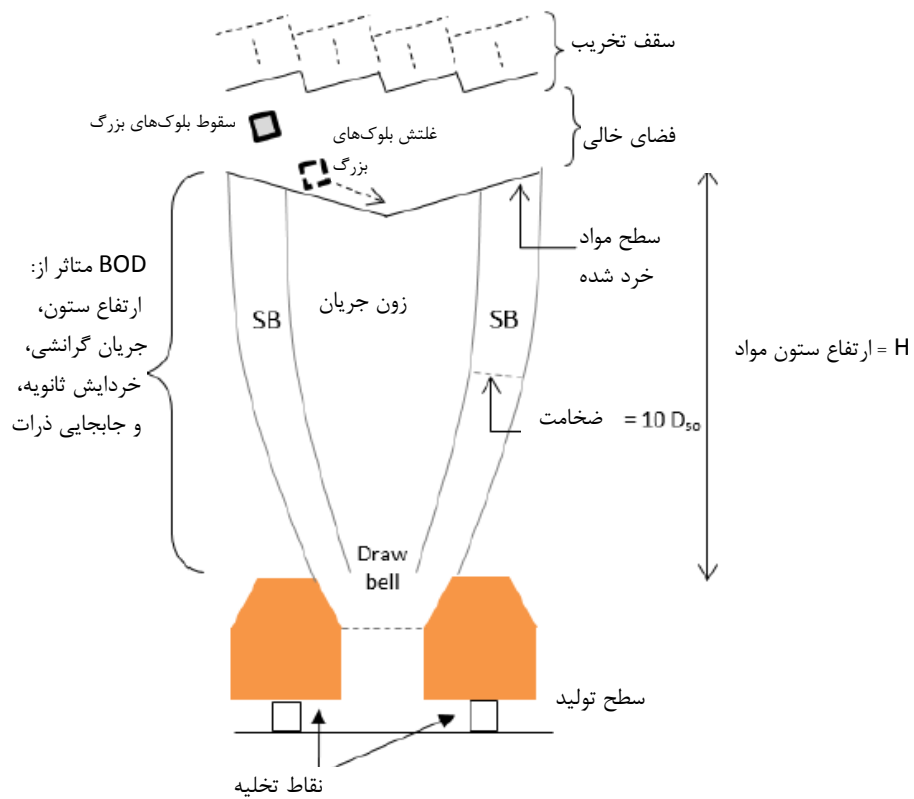
^۳ Isolated – Intractive Flow

^۴ Interactive Flow

فصل دوم: روش تخریب توده‌ای و ساز و کار تخریب



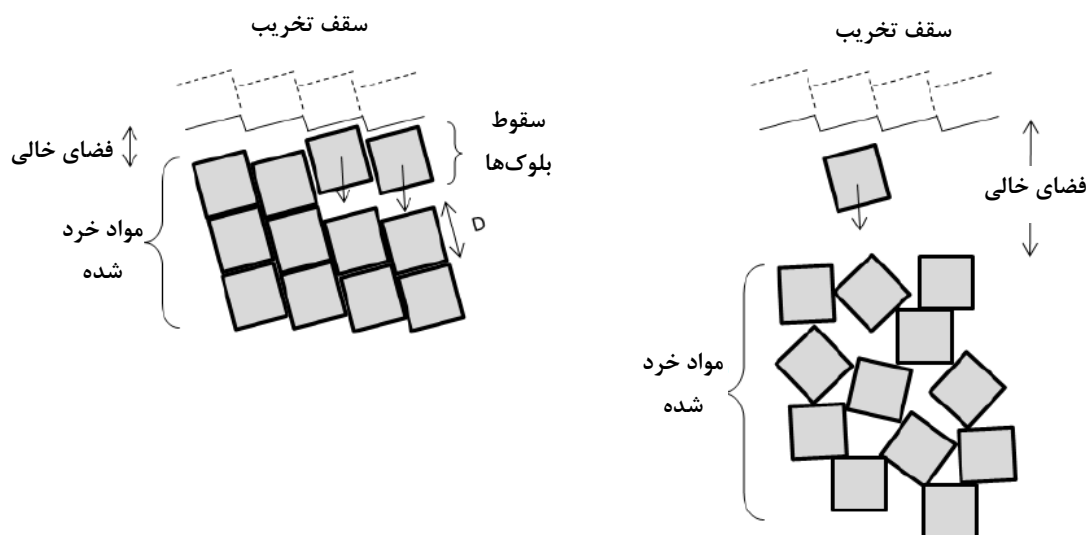
شکل ۲-۲۹: اندرکنش بیضوی‌های تخلیه و ناحیه برشی و تراکمی (Dorador, ۲۰۱۶)



شکل ۲-۳۰: کانه خرد شده تحت تاثیر زون‌های مختلف تنش در ستون تخلیه (Dorador, ۲۰۱۶)

۲-۱۱-۴-۳- فضای خالی

بلوک‌های منفرد جدا شده از سقف می‌توانند آرایش‌های مختلفی بعد از سقوط داشته باشند، ارتفاع فضای خالی یک عامل موثر در این خصوص است. در مواردی که ارتفاع فضای خالی کم است بلوک‌ها شده از سقف شانس کمتری برای چرخش دارد. بنابراین تماس خود را با بلوک‌های مجاور حفظ خواهد کرد که باعث فشردگی بیشتر و بنابراین ضریب تورم کمتری خواهد شد و شانس چرخش و حرکت نسبی کمتری به بلوک برای خردشوندگی ثانویه خواهد داد. فاصله فضای خالی بزرگ‌تر، باعث می‌شود بلوک قبل از برخورد به سطح ستون مواد خردشده، امکان چرخش داشته باشد و بنابراین ضریب تورم کانه خردشده بیشتر خواهد بود. علاوه بر این امکان ضربه بیشتر در زمان برخورد با ستون کانه خردشده را فراهم و در نتیجه خردشوندگی را بهبود می‌بخشد (Dorador, et al., ۲۰۱۴). در شکل ۲-۳۱، تاثیر فاصله فضای خالی بر میزان تراکم ذرات خرد شده نمایش داده شده است.



شکل ۲-۳۱: تاثیر ارتفاع فضای خالی بر تراکم ذرات خردشده (Dorador, ۲۰۱۶)

۲-۱۱-۴-۴- چگالی کانسنگ شکسته شده

چگالی کانه شکسته شده که به‌طور معمول وابسته به ضریب تورم است یک عامل مهم در طراحی تخریب توده‌ای است. ضریب تورم به مقدار زیادی به خصوصیات توده سنگ، وجود فضای خالی و تغییرات ارتفاع ستون تخلیه وابسته است. شکل بلوک و نسبت ابعادی بلوک و فضای خالی نیز عوامل موثر بر تورم اولیه هستند. عوامل متعددی نظیر ارتفاع ستون تخلیه، میزان تخلیه و چگالی کانسنگ خردشده به ضریب تورم وابسته هستند (Ross, et al., ۲۰۱۲).

چگالی ستون کانه در نزدیکی نقاط تخلیه، به علت تخلیه مواد خردشده و توسعه ناحیه ضعیف شدگی که به‌واسطه استخراج کانه به وجود می‌آید، کاهش می‌یابد. افزایش ارتفاع ستون تخلیه، باعث افزایش خردشوندگی ثانویه می‌شود. بنابراین ذرات ریز داخل ستون تخلیه افزایش و با حرکت مواد به سمت پایین چگالی کانه شکسته شده نیز افزایش می‌یابد. به‌بیان دیگر، خردشوندگی ثانویه بر روی چگالی اثرگذار است. زیرا با خرد شدن بیشتر، فشردگی مواد بیشتر می‌شود. حرکت ذرات ریز نیز با پر کردن فضاهای خالی بر روی چگالی تاثیرگذار است. بنابراین با تخلیه برنامه‌ریزی شده می‌توان به چگالی مناسب رسید (Dorador, et al., ۲۰۱۴; Rogers, et al., ۲۰۱۰).

همان‌طور که قبلاً بحث شد، بسته به بزرگی فضای خالی، کانه شکسته شده در بالای ستون تخلیه می‌تواند متراکم، دارای تراکم متوسط و یا با تراکم کم باشد. به‌منظور بررسی تاثیر BOD^۱ بر روی خردشوندگی آزمون‌های متعددی انجام شده است. دورادور^۲ در سال ۲۰۱۶ در تحقیق بر روی عوامل موثر بر توزیع اندازه بلوک‌ها در نقاط تخلیه، برای بررسی تاثیر چگالی کانسنگ خرد شده بر روی خردشوندگی، بلوک‌های کوچک با مقاومت متفاوت را در یک سلول تحت تراکم محوری قرار داد. او برای شبیه‌سازی میزان تراکم کانسنگ، بلوک‌ها را با آرایش‌های متفاوت بر روی یکدیگر قرار داده است و در هر آزمایش با اعمال نیروی مشخص بر بلوک‌ها میزان شکست در بلوک‌ها را با استفاده

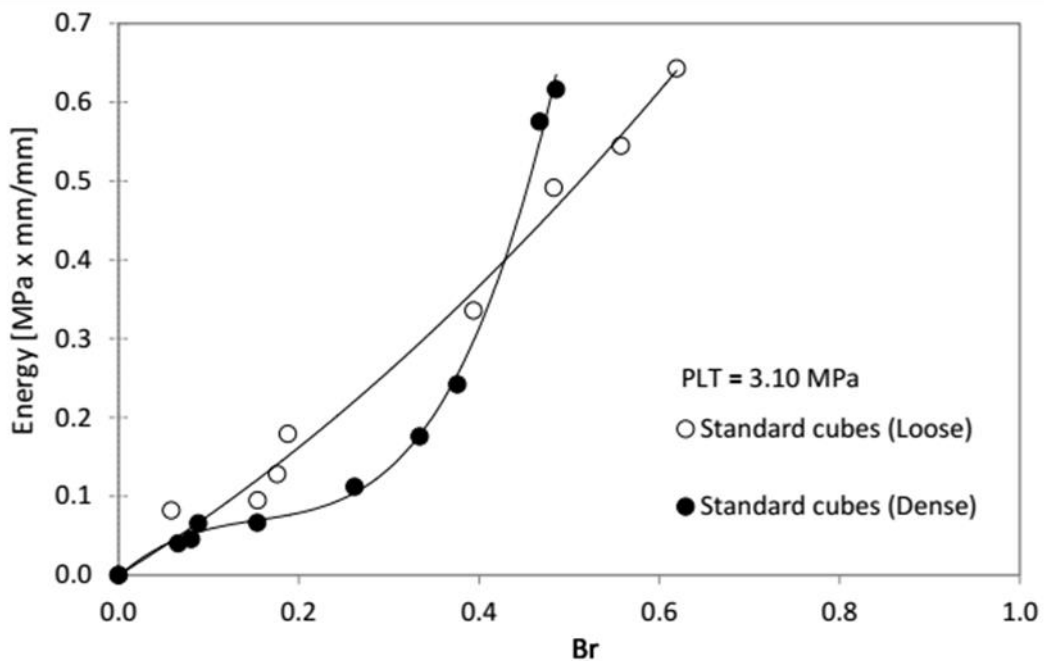
^۱ Broken Ore Density

^۲ Dorador

از دانه بندی مشخص نموده است. تراکم نحوه چیدمان مکعب‌ها، شرایط تراکم بالا را شبیه‌سازی می‌کند، اما فضای خالی بین دیواره سیلندر و مکعب‌ها نیز می‌تواند بیانگر زون برشی باشد.

نتایج شکل ۲-۳۲، تفاوت رفتاری قابل توجهی بین دو حالت چگالی ذرات خردشده متراکم و کم تراکم را نشان می‌دهد.

در شرایط تراکم پایین، خردشوندگی متناسب با انرژی خارجی وارده بر نمونه‌ها افزایش می‌یابد، اما در حالت متراکم ابتدا خردشوندگی بیشتری برای همان سطح از انرژی بروز می‌نماید، اما با شیب تندی منحنی برای خردشوندگی بیشتر نیاز به انرژی بیشتری را نشان می‌دهد.



شکل ۲-۳۲: نتایج خردشوندگی تحت شرایط تراکم متفاوت در ستون تخلیه

۲-۱۱-۴-۵- جهت زیربرش

هندسه زیربرش و راه‌کارهای استخراج از طریق تشدید تنش‌های القایی توسعه‌یافته در فضای بالای تخریب، بر روی قابلیت تخریب توده سنگ تاثیرگذار است. از طرفی تنوع در شرایط توده سنگ بر روی راه‌کارهای استخراج زیربرش تاثیرگذار است. در روند استخراج زیربرش به عنوان مثال می‌توان یک منطقه با مقاومت برشی بالا را برای افزایش تولید اولیه و جلوگیری از ایجاد تخریب دودکشی

تخریب دودکشی باعث کاهش تنش‌های برشی بر روی ساختارهای افقی می‌شود) و یا کاهش تنش‌های افقی محصورکننده در فضای پشت تخریب، در ابتدا زیربرش نمود. این راه‌کار برای حالت‌هایی که در فضای پشت تخریب ناپیوستگی‌های کم شیب حضور ندارند یا کم مقدار هستند، مناسب است.

شکل کانسار، توزیع عیار در کانسار، میدان تنش‌های برجا، تفاوت مقاومت کانسنگ در ناحیه‌های مختلف، ساختارهای عمده و جهت‌داری آن‌ها در کانسار و نیز وجود مناطق تخریب شده قبلی در مجاورت بلوک، بر روی انتخاب نقطه آغاز و جهت پیشروی زیربرش تاثیر دارند. در صورتی که در سطح افقی، کانسار طولانی و باریک باشد، به ناچار جهت پیشروی در جهت طولی کانسار خواهد بود. در مواردی که گسترش طولی و عرضی کانسار تا حدودی برابر هستند، تخریب از سمت یک برش قائم در حاشیه کانسار شروع و به‌طور مورب در کانسار گسترش می‌یابد (Laubscher, ۲۰۰۰).

نقطه آغاز تخریب می‌تواند به‌طور تقریبی در مرکز کانسار باشد (مانند معدن پالابورا) و زیربرش به صورت مورب به سمت حاشیه‌های کانسار توسعه یابد. مقدار و جهت تنش‌های برجا بر روی محل شروع و جهت پیشروی تخریب تاثیرگذار هستند. جهت زیربرش باید از سمت سنگ‌های ضعیف‌تر به سمت سنگ‌های قوی‌تر باشد. برای کاهش تنش‌های محصورکننده در فضای پشت تخریب، زیربرش‌ها به‌طور معمول در جهت تنش‌های اصلی حفاری می‌شوند (Laubscher, ۲۰۰۰). ساختارهای اصلی نظیر گسل‌ها تاثیر عمده‌ای بر روی شروع تخریب، انتشار تخریب، پایداری زیربرش و حفاریات تراز استخراج دارند. در معادن بزرگ که از چند بلوک تشکیل شده‌اند، جهت تخریب باید از سمت بلوک‌های تخریب‌شده قبلی به سمت مرزهای قطعه‌ی معدنی باشد. جهت پیشروی زیربرش نسبت به جهت‌داری تنش‌های اصلی در شدت تنش‌های مرزی موثر است. به همین دلیل برای کاهش تنش‌های محصورکننده در فضای پشت تخریب، زیربرش‌ها به‌طور معمول در جهت تنش‌های اصلی حفاری می‌شوند (Laubscher, ۲۰۰۰). پیشروی زیربرش در جهت تنش‌های اصلی منجر به

ایجاد تنش‌های پایه‌ای^۱ قابل توجه می‌شود که در نهایت بر تخریب تاثیر گذاشته و خردایش اولیه را بهبود می‌بخشد، اما در عین حال ممکن است منجر به تخریب سطوح تولید و زیربرش شود. با احداث زیربرش‌های پیش‌رونده می‌توان از بروز برخی از این مشکلات جلوگیری کرد (Laubscher, ۲۰۰۰). جهت جبهه تخریب، نحوه گسترش تخریب را تغییر نخواهد داد. اما جهت جبهه تخریب که درزه‌ها و تنش‌ها بر آن اثر می‌گذارند، تاثیر مهمی بر خردایش اولیه دارد. شیب جبهه تخریب می‌تواند از یک مقدار کم در شروع فرآیند تخریب آغاز و مرتباً تا مراحل آخر آن که تخریب تا سطح می‌رسد، افزایش یابد (Laubscher, ۲۰۰۳).

نتایج خردایش حاصل از اجرای برنامه^۲ BCF (که برای تعیین خردایش اولیه و ثانویه توسعه داده شده است) می‌تواند برای تصمیم‌گیری در خصوص انتخاب بهترین جهت برای پیشروی زیربرش و دستیابی به خردایش اولیه بهینه و تخریب منتج از آن به کار برده شود (Laubscher, ۲۰۰۳).

۲-۱۱-۴-۶- سرعت پیشروی زیربرش

تعیین سرعت پیشروی بهینه کار آسانی نیست. زیرا سرعت نامناسب پیشروی زیربرش، راندمان و اقتصاد معدن را به خطر می‌اندازد. پس از شروع تخریب پیوسته، سرعت پیشروی زیربرش تحت تاثیر ارتفاع ستون کانسنگ، معماری تراز استخراج و میزان تولید است. افزایش سرعت زیربری می‌تواند پیامدهایی به شرح زیر داشته باشد: افزایش سرعت زیربری احتمال ایجاد انفجار سنگ را افزایش می‌دهد. افزایش سرعت زیربری بازگشت سرمایه و سوددهی را سرعت می‌بخشد. در تنش‌های بالا افزایش سرعت زیربری باعث افزایش آسیب به حفاریات تراز استخراج می‌شود. سرعت زیربری بر جریان کانسنگ خردشده تاثیر دارد (Brown, ۲۰۰۳).

^۱ Abutment stresses

^۲ Block Caving Fragmentation

طراحی و اجرای درست زیربرش یکی از مهم‌ترین عوامل در قابلیت تخریب در روش تخریب توده‌ای است. طراحی، پیاده‌سازی و مدیریت ضعیف در اجرای زیربرش می‌تواند موفقیت نهایی، تولید و اقتصادی بودن عملیات را به خطر اندازد. اجرای موفقیت‌آمیز زیربرش وابسته به طراحی صحیح مراحل آماده‌سازی زیربرش و تراز استخراج، انتخاب مناسب فاصله و موقعیت نسبی پیشانی زیربرش با کارهای آماده‌سازی تراز استخراج، نقطه شروع و جهت پیشروی زیربرش، سرعت پیشروی زیربرش و شکل زیربرش در سطح افقی و مقطع قائم است (Laubscher, ۲۰۰۰).

نتایج بررسی‌های انجام‌شده در معادن مختلف و نتایج تحلیل‌های عددی نشان می‌دهند که راهبردهای زیربری تاثیر عمده‌ای بر روی قابلیت تخریب، میدان تنش‌های القایی، پایداری تراز استخراج و انتشار و گسترش تخریب دارند (Laubscher, ۲۰۰۰). به‌طور پایه، سه راهکار کلی برای زیربری وجود دارد:

۱- ایجاد زیربرش پیش از حفر تراز استخراج (پیش‌زیربری)

۲- ایجاد زیربرش پس از حفر تراز استخراج (پس‌زیربری)

۳- زیربرش پیشرو

۲-۱۱-۵- مخاطرات عملیاتی

هجوم گل، انفجار سنگ و رقیق شدگی سه مورد از مخاطراتی هستند که ممکن است حین عملیات تخریب بروز نمایند.

۲-۱۱-۵-۱- هجوم گل

یکی از مهم‌ترین مخاطرات عملیاتی در معدنکاری تخریبی هجوم گل است. هجوم گل را می‌توان به صورت جریان ناگهانی ذرات نرم اشباع شده از نقاط تخلیه یا سایر بازکننده‌های معدن تعریف کرد (Butcher, et al., ۲۰۰۰). معدنکاری تخریبی به‌طور ذاتی در معرض هجوم گل قرار دارد. به علت طبیعت تخریب، همواره ظرفیت جمع شدن آب از طریق منافذ ناشی از نشست و ذرات نرم ناشی از

جریان استخراج و خردشوندگی وجود دارد. حضور هم‌زمان این دو عامل می‌تواند باعث هجوم گل شود (Jakubec, et al., ۲۰۱۲). هجوم گل عامل مرگ تعداد زیادی از معدن‌کاران و همچنین صدمات بسیار بزرگ به زیرساخت‌ها بوده است (Butcher, et al., ۲۰۰۵). ال‌تنینت یکی از معادنی است که سوابق متعددی از هجوم گل دارد. برای کاهش خطر هجوم گل در معدن ال‌تنینت، کاهش میزان استخراج و بستن مناطقی که وجود گل در نقاط تخلیه آن‌ها گزارش شده بود، در دستور کار معدن قرار گرفت. این راهکار تاثیر عمده‌ای بر کاهش میزان استخراج و بازیابی داشت، ولی کاهش هجوم گل را به همراه داشته است (Ferrada, ۲۰۱۱).

هجوم گل در اثر وجود چهار عامل آب، ذرات نرم، تحریک و اغتشاش ناشی از جریان تخلیه و فضای مناسب برای جریان گل (نقاط تخلیه) اتفاق می‌افتد (Butcher, ۲۰۰۰).

امروزه معادن دارای خطر هجوم گل، برای کاهش اثرات هجوم گل از راهکارهای زیر استفاده

می‌کنند:

- کنترل تخلیه برای اطمینان از تخلیه یکسان از نقاط تخلیه (Butcher, ۲۰۰۰)
- کاهش ارتفاع ستون تخلیه با کاهش کانسنگ انباشته‌شده (Butcher, ۲۰۰۰)
- زهکشی برای کاهش ظرفیت تولید گل (Call, et al., ۱۹۹۸)
- محدود کردن میزان استخراج و بستن نواحی دارای گل (Ferrada, ۲۰۱۱).

هجوم گل یک مساله پایداری نیز به شمار می‌آید. تفاوت در میزان آب محتوی و شرایط تنش می‌تواند سبب افزایش فشار منفذی و بنابراین ظرفیت شکست ناگهانی و هجوم گل شود. آب محتوی کانسنگ، شعاع هیدرولیکی زیربرش، عمق معدنکاری، زاویه اصطکاک داخلی توده سنگ، وجود ذرات ریز در قسمت‌های شکسته شده و میزان تنش برجا در هجوم گل موثر هستند (Valencia, et al., ۲۰۱۴). والنسیا و همکارانش در سال ۲۰۱۴ یک مدل رگرسیون منطقی برای تخمین خطر هجوم

گل بر اساس داده‌های تاریخی گردآوری شده از معدن دیابلو رژیمینتو^۱ توسعه داده‌اند. همچنین در همین سال توسط والچاس^۲ و همکارانش نیز یک مدل برای تعیین مقاومت برشی گل به صورت تابعی از وزن حجمی گل و آب محتوی برای تخمین پتانسیل هجوم گل از دیدگاه ژئومکانیکی، توسعه داده شده است. آن‌ها با در نظر گرفتن چگالی گل، حضور آب و وزن و فشار مواد تخریب‌شده، احتمال وقوع پدیده هجوم گل را برآورد کرده‌اند. در تحقیق دیگری بسرا^۳ در سال ۲۰۱۱ بر اساس آب محتوی و حضور ذرات ریز، خطر هجوم گل را طبقه‌بندی کرده است (Valencia, et al., ۲۰۱۴).

۲-۱۱-۵-۲- انفجار سنگ

انفجار سنگ به علت تخلیه انرژی کرنشی ذخیره شده در طی یک رویداد لرزه‌ای اتفاق می‌افتد. در زمان یک رویداد لرزه‌ای بخشی از انرژی کرنشی ذخیره‌شده صرف ریزش عامل رویداد و باقیمانده انرژی کرنشی به صورت امواج تنشی در توده سنگ منتشر می‌شود. موج‌های تنشی بسته به شکل و انرژی آن، می‌توانند پس از رسیدن به حفاریات زیرزمینی باعث شکست ناگهانی و پرتاب توده سنگ خردشده به داخل فضا شوند (Cerrutti, et al., ۲۰۱۴).

با کنترل میزان تخلیه و سرعت زیربرش می‌توان خطر انفجار سنگ را کاهش داد، همچنین با شکست هیدرولیکی می‌توان شدت تنش‌های لرزه‌ای را کاهش داد. در سنگ‌های ترد و شکننده زمانی که تمرکز تنش بالایی وجود داشته باشد، احتمال انفجار سنگ بالا است. در طی مطالعه جهانی تخریب یک راهکار برای مدیریت ریسک در معادن توده‌ای با عنوان خطر تخریب^۴ پیشنهاد شده است که خطرات عمده عملیاتی، نظیر انفجار سنگ را بررسی می‌کند (Espinosa, et al., ۲۰۱۴).

^۱ Diabolo regimiento

^۲ Valejas

^۳ Becerra

^۴ Cave risk

۲-۱۱-۵-۳- رقیق‌شدگی

کنترل رقیق‌شدگی، یکی از عوامل بحرانی در مدیریت عملیات معدنکاری تخریبی است. رقیق‌شدگی جنبه‌های مختلف عملیات از اقتصاد تا ایمنی معدن را تحت تاثیر قرار می‌دهد. محققین متعددی بر روی عوامل موثر بر رقیق‌شدگی تحقیق کرده‌اند. لابسچر (۱۹۹۴)، رقیق‌شدگی را به‌صورت رابطه‌ای شامل عوامل موثر، ارتفاع اندرکنش ستون تخلیه، ضریب تورم و میزان هماهنگی کنترل تخلیه بیان کرده است. بر اساس تجربیات لابسچر هر چه میزان تخلیه از نقاط تخلیه هماهنگ‌تر و یکسان‌تر باشد، رقیق‌شدگی کمتر است. سوسااتا^۱ (۲۰۰۴)، از داده‌های واقعی برای تحقیق نتایج کار لابسچر استفاده کرد و سه مدل جریان مجزا^۲، جریان اندرکنشی^۳ مجزا و جریان اندرکنشی^۴ را ارایه نمود. با افزایش یا کاهش میزان تخلیه از نقاط تخلیه هر یک از مدل‌های جریان فوق می‌تواند به مدل دیگر تبدیل شود. هر چه تخلیه یکسان‌تر باشد، جریان بیشتر از نوع اندرکنشی بوده و رقیق‌شدگی کمتر خواهد بود (Paredes, et al., ۲۰۱۴).

یکی از اهداف طراحی و کنترل تخلیه در معدنکاری تخریبی افزایش بازیابی معدن با کاهش میزان رقیق‌شدگی است. مدل‌های جریان ثقلی موجود احتمال ورود ذرات باطله از جوانب را در نظر نمی‌گیرند. پاردس و همکارانش (۲۰۱۴)، با فرض این‌که مواد باطله موجود در یک پانل استخراج شده مجاور به داخل پانل در حال استخراج حرکت می‌کنند، ورود جانبی مواد باطله را بررسی و تحلیل کرده‌اند (Paredes, et al., ۲۰۱۴).

^۱ Susaeta

^۲ Isolated Flow

^۳ Isolated – Intractive Flow

^۴ Interactive Flow

۲-۱۲- بحث و جمع‌بندی

بررسی عوامل موثر بر امکان پیاده‌سازی روش تخریب توده‌ای نشان می‌دهد که فارغ از مسایل طراحی و نگهداری فضاها، استخراج زیرزمینی، امکان پیاده‌سازی روش تخریب توده‌ای به میزان زیادی به شروع تخریب و خردشوندگی مناسب که منتج به دریافت کانه‌ی خرد شده با ابعاد مناسب در نقاط تخلیه شود، وابسته است. به طوری که حتی مخاطرات عملیاتی به صورت مستقیم متأثر از قابلیت تخریب و خردشوندگی توده سنگ است.

خردشوندگی (اولیه و ثانویه) از مهم‌ترین عوامل در پیاده‌سازی تخریب توده‌ای است و اطمینان از اندازه‌گیری صحیح خردشوندگی در نقاط تخلیه و اندازه‌گیری عوامل که در برنامه‌های پیش‌بینی خردشوندگی استفاده می‌شوند یک موضوع کلیدی برای بهبود برآورد خردشوندگی است (Van As, et al., ۲۰۰۸). به علت تاثیراتی که خردشدگی ضعیف یا خردشدگی غیرمتناسب با حد مورد انتظار می‌تواند بر عملیات تخریب داشته باشد، تعیین توزیع احتمالی خردشدگی توده سنگ در نقاط تخلیه یکی از بحرانی‌ترین اجزای معدنکاری تخریبی است (Rogers, et al., ۲۰۱۰).

خردشوندگی ثانویه در اثر سازوکارهای متنوعی اتفاق می‌افتد که همه آن‌ها به‌خوبی شناخته شده نیستند. اگرچه علاقه زیادی به توسعه پایه و اساس ساز و کار تخریب وجود دارد اما بعضی از موضوعات مرتبط با آن مانند اثر ارتفاع سقوط بلوک، چرخش بلوک و ضربه سقوط بلوک بر روی توده سنگ تخریب‌شده، رگه‌ها، مقاومت سنگ، درزه‌های غیر پیوسته در بلوک، آرایش اولیه بلوک‌های تخریب‌شده و اندرکنش بلوک‌ها، وزن حجمی سنگ خردشده و توزیع آن در محل تخلیه، عملکرد بالشتکی مواد نرمه، رقیق‌شدگی، هجوم گل و گیرافتادگی‌ها کمتر مورد توجه قرار گرفته است. برخی از این عوامل تحت تاثیر توزیع اندازه بلوک‌ها و تغییرات آن نسبت به زمان در ارتفاع ستون تخلیه هستند.

به‌رحال همان‌طور که اشاره شد، روش‌های متعددی برای پیش‌بینی قابلیت تخریب و خردشوندگی توده سنگ به عنوان تعیین‌کننده‌ترین عوامل موثر بر امکان پیاده‌سازی روش تخریب

توده‌ای وجود دارد. مبنای روش‌های تجربی بیشتر تجربه و بررسی‌های انجام‌گرفته در معادن مختلف و پروژه‌های تحقیقاتی بوده است. در روش‌های تجربی آن طور که پیش‌تر بررسی شد، ذهنیت‌گرایی و عدم قطعیت قابل توجهی وجود دارد. در روش‌های عددی نیز تغییرات بسیار ناچیز در خصوصیات مواد یا ابعاد و نوع مش‌بندی و اعمال شرایط مرزی، تغییرات بزرگی را در نتیجه خروجی مدل‌سازی ایجاد می‌کند. همچنین انجام مدل‌سازی عددی برای یک پروژه بزرگ مقیاس معدنی، فرآیندی بسیار پیچیده و زمان‌بر است.

از طرفی در همه روش‌های ذکر شده، تاثیر هر عامل به صورت مستقل از سایر عوامل بر روی سیستم بررسی و اعمال شده است. هادسون در سال ۱۹۹۲ رویکرد جدیدی در مهندسی سنگ مطرح نمود که در مسایل پیچیده مهندسی کاربرد بسیاری داشته است. این رویکرد به دلیل استفاده از نظریه تحلیل سیستمی قادر به در نظر گرفتن عوامل متعدد موجود در سیستم بوده و از این لحاظ در این‌گونه مسایل بسیار مورد استقبال قرار گرفته است. در فصل بعد به‌طور مختصر، ابتدا سیستم مهندسی سنگ و کاربردهای آن و سپس روش‌های تحلیل اندرکنش غیرمستقیم عوامل مورد بررسی قرار خواهد گرفت.

فصل سوم

سیستم‌های مهندسی سنگ (RES) و

روش‌های تحلیل اندرکنش غیرمستقیم عوامل

۳-۱- مقدمه

در زمان طراحی یک پروژه مهندسی سنگ برای اهداف معدنی و یا عمرانی، به منظور اطمینان از ایمنی و استفاده مفید از امکانات و منابع، بهره‌مندی از دانش کافی ضروری است. بنابراین در طراحی یک سازه که قرار است در یک توده سنگ اجرا شود علاوه بر بررسی مجزای عوامل نظیر مقاومت سنگ بکر، خصوصیات ناپیوستگی‌ها و تنش‌ها، نیاز است نحوه تاثیر متقابل این عوامل بر روی هم نیز در نظر گرفته شود. حصول اطمینان از این که همه متغیرهای مورد نیاز و موثر در یک سیستم در نظر گرفته شده و اثرات متقابل بین این متغیرها به درستی درک شده است، یک جنبه مهم از مدل‌سازی و طراحی مهندسی سنگ است. اما این مهم بدون استفاده از یک روش راهنما ممکن نیست (Hudson, ۱۹۹۲).

هادسون در سال ۱۹۹۲، روش سیستم‌های مهندسی سنگ را به عنوان ابزاری برای بررسی اثرات متقابل عوامل موثر در سیستم توسعه داد. برای کاهش خطرات به یک سطح قابل قبول لازم است عدم قطعیت شناختی که به علت کمبود شناخت از یک فرآیند، به وجود می‌آید، کاهش داده شود. عدم قطعیت شناختی به طور قابل توجهی با استفاده از سیستم‌های مهندسی سنگ کاهش می‌یابد. برای غلبه بر چنین مشکلی می‌توان از رویکرد سیستمی مبتنی بر سیستم‌های مهندسی سنگ (RES) بهره برد.

۳-۲- سیستم‌های مهندسی سنگ (RES)

استفاده از رویکرد سیستم‌های مهندسی سنگ زمانی ضروری است که مسایلی با پیچیدگی زیاد مطرح است، آن‌چنان که روش‌های مرسوم به تنهایی و به سادگی قادر به حل آن‌ها نیستند (Jiao, ۱۹۹۵). در این رویکرد از یک ماتریس به منظور بررسی تاثیر تمامی اندرکنش‌ها استفاده می‌شود. در چنین ماتریس‌هایی عوامل اصلی مساله در امتداد قطر اصلی قرار گرفته و اندرکنش‌های همه‌ی این عوامل در درایه‌های دیگر قرار دارند. سپس برای مشخص شدن تاثیرات و کمی‌سازی آن‌ها،

اندرکنش‌ها با استفاده از اعداد مشخصی کدگذاری می‌شوند و با انجام محاسباتی بر روی ستون‌ها و سطرها می‌توان نتیجه را مشخص نمود.

۳-۲-۱- ماتریس‌های اندرکنش

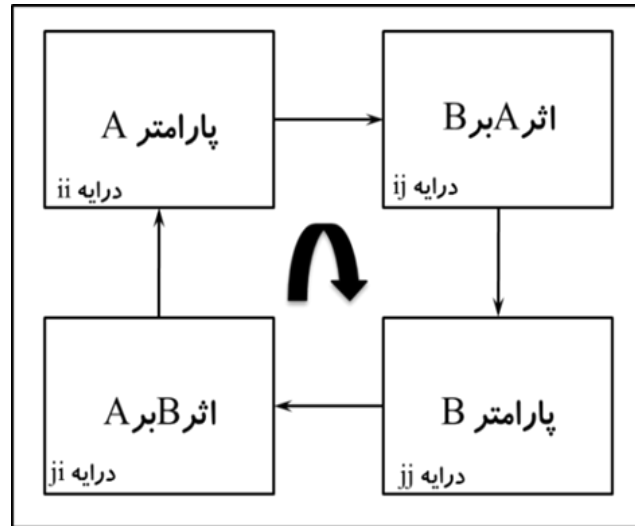
سیستم‌ها در کاربردهای مختلف به طور معمول به صورت ماتریس‌هایی با نام ماتریس آن سیستم نشان داده می‌شوند. این ماتریس‌ها تمام خصوصیات یک سیستم اعم از اجزا، اندرکنش‌ها و مرزهای مشخص را دارا هستند. در سیستم‌های مهندسی سنگ نیز ابتدا ماتریس اندرکنش تعیین می‌شود، به طوری که عوامل اصلی که یک رویداد ویژه مانند پایداری شیب، حفر تونل و یا انفجار را کنترل می‌کنند، انتخاب می‌شوند. سپس عوامل موثر بر روی قطر اصلی یک ماتریس مربعی قرار گرفته و اندرکنش هر جفت از عوامل در درایه‌ای که از تلاقی سطر و ستون عبور کرده از این عوامل می‌گذرد درج می‌شود. با این شیوه ارزیابی جامع عوامل موثر و اندرکنش بین آن‌ها امکان‌پذیر می‌شود. همان‌طور که در شکل ۳-۱، نشان داده شده است، عامل A در درایه بالا سمت چپ و عامل B در درایه پایین سمت راست قرار گرفته‌اند. درایه بالا سمت راست نشان‌دهنده تاثیر A بر روی B و درایه پایین سمت چپ نشان‌دهنده تاثیر B روی A است (Hudson, ۱۹۹۲). در شکل ۳-۲ مثالی از چگونگی ایجاد ماتریس اندرکنش نشان داده شده است. در این مثال یک توده سنگ درزه‌دار با سه عامل اصلی شامل ساختار سنگ، تنش در سنگ و جریان آب در آن در نظر گرفته شده است، با جانمایی این عوامل بر روی قطر اصلی ماتریس، یک ماتریس 3×3 تشکیل می‌شود که در روی قطر اصلی آن عوامل اصلی و در سایر درایه‌ها اندرکنش بین این سه عامل قرار می‌گیرد. به این ترتیب شش ترکیب دوتایی از این سه عامل حاصل می‌شود که به نام اندرکنش‌ها شناخته می‌شوند (Hudson, et al., ۱۹۹۷).

۳-۲-۲- کدگذاری ماتریس‌های اندرکنش

به منظور کمی سازی اندرکنش عوامل بر یکدیگر و تشکیل ماتریس نیاز به کدگذاری آن‌ها است. طبق نظر هادسون، ارایه‌دهنده رویکرد RES، پنج روش مختلف برای کدگذاری ماتریس اندرکنش

وجود دارد (Hudson, ۲۰۱۳). این روش‌ها عبارت‌اند از: روش دوتایی، نیمه عددی خیره، شیب

نمودار عوامل، روش حل عددی و روش صریح^۱.



شکل ۳-۱: مفهوم ماتریس اندرکنش برای سیستمی شامل دو عامل A و B (Hudson, ۱۹۹۲)

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

شکل ۳-۲: ماتریس اندرکنش ۳×۳ برای عوامل مکانیک سنگی (Hudson, et al., ۲۰۰۰)

^۱.Explicit

الف- روش دو-دویی (باینری)

در این شیوه کدگذاری، اندرکنش بین دو عامل به صورت یکی از دو حالت روشن یا خاموش در نظر گرفته می‌شود، در صورتی که روشن باشد درایه مورد نظر مقدار واحد و در صورتی که اندرکنش موردنظر به حالت خاموش در نظر گرفته شود، مقدار صفر در درایه مربوط به آن قرار می‌گیرد. روش باینری به طور طبیعی روشی محدود است و فقط می‌تواند اتصال‌های عمده و درجه اتصال مکانیزم‌ها را به یکدیگر نشان دهد (Jiao, et al., ۱۹۹۵).

ب- روش نیمه عددی خبره (ESQ^۱)

در واقع این روش توسعه یافته روش دو-دویی است که دارای پنج کلاس کدگذاری از صفر تا ۴ است. مفهوم هر یک از این اعداد در جدول ۳-۱، نشان داده شده است. این روش نسبت به روش دو-دویی از حساسیت بیشتری برخوردار است. در این روش، عمل کدگذاری توسط یک کارشناس یا خبره^۲ و یا گروهی از کارشناسان انجام می‌گیرد که این مساله باعث ذهن‌گرایی^۳ کدگذاری‌ها و نتایج به دست آمده می‌گردد.

روش ESQ برای سیستم‌هایی مفید است که نمی‌توانند به صورت کمی صریح بیان شوند، اما تخمینی از میزان اهمیت آن‌ها وجود دارد. از این روش برای تعیین شدت اندرکنش و شدت وابستگی عوامل از روی ماتریس اندرکنش باینری استفاده شده است. این نوع کاربرد از RES چکیده‌ی روش سیستم‌های نرم است. تکنیک یا روش نرم به طور خاص زمانی به کار می‌رود که عوامل مهندسی زمین‌شناسی و مهندسی سنگ در یک ماتریس اندرکنش BIM^۴ منظور شده‌اند و یک توصیف ریاضی واضح بین عوامل، شناخته شده نیست (Jiao, et al., ۱۹۹۵).

^۱ Expert Semi-Quantitative

^۲ Expert

^۳ Subjectivity

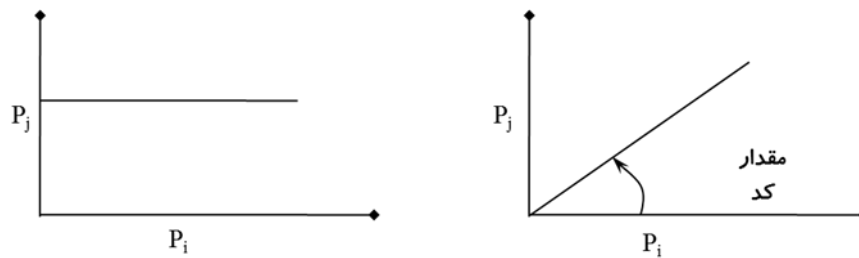
^۴ Binary Interaction Matrix

جدول ۳-۱: مفاهیم کدگذاری بر اساس روش ESQ

مفهوم کد	کد کمی سازی
بدون تاثیر	۰
تاثیر کم	۱
تاثیر متوسط	۲
تاثیر زیاد	۳
تاثیر خیلی زیاد	۴

پ- روش شیب نمودار عوامل

مطابق شکل ۳-۳، در این روش از شیب نمودار عوامل برای کدگذاری استفاده می‌شود، اگر نمودار $P_i - P_j$ به صورت خط افقی باشد، در این صورت P_j به P_i وابسته نیست. ولی اگر رابطه‌ای خطی مابین آن‌ها وجود داشته باشد، اندرکنش مربوطه می‌تواند توسط شیب خط کدگذاری شود. عدم خطی بودن روابط میان عوامل مشکلی است که در بسیاری از موارد وجود خواهد داشت.



شکل ۳-۳: کدگذاری ماتریس اندرکنش با استفاده از شیب نمودار در رویکرد RES (Hudson, ۱۹۹۲)

ت- روش حل عددی معادلات مشتق جزئی

در این روش فرض بر این است که تمام اندرکنش‌ها در درایه‌های ماتریس اندرکنش می‌توانند به صورت یک معادله مشتقات جزئی^۱ (PDE) بیان شود. با وجود این که اعمال معادلات مشتقات

^۱ Partial Differential Equation

جزئی مرتبه دوم راه‌حل مناسبی به نظر می‌رسد، ولی در ماتریس‌های بزرگ عملی بسیار سخت و پیچیده خواهد بود، در این روش سیستم معادلات مشتق جزئی با استفاده از روش‌های عددی کامپیوتری حل می‌شود.

ث- روش صریح

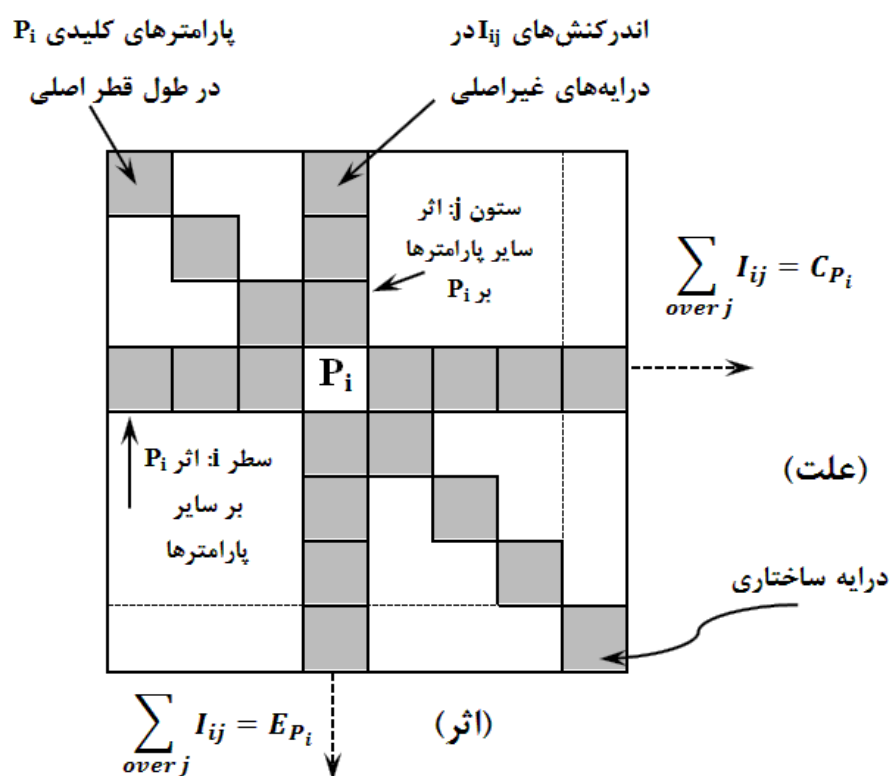
در این روش فرض می‌شود که چنان آگاهی کاملی از کل مکانیزم‌های ماتریس وجود دارد که امکان تحلیل عددی آن‌ها فراهم است و می‌توان رفتار واقعی اندرکنش‌ها را مورد سنجش قرارداد. روش ESQ در میان روش‌ها، با وجود ضعف‌های آشکار تا حدی زیادی موفق بوده و تاکنون (حداقل به دلیل ساده‌تر بودن و سهولت در دسترسی به جواب‌ها) از بیشترین کاربرد برخوردار بوده است.

۳-۲-۳- نمودار علت- اثر^۱

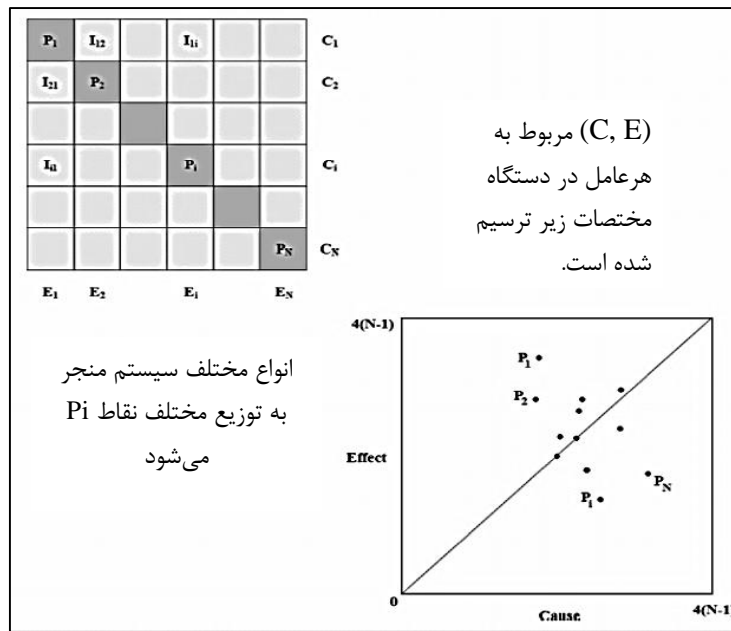
با استفاده از ماتریس اندرکنش، می‌توان نمودار علت- اثر عوامل را به دست آورد. در نمودار علت- اثر، اثر یک عامل بر روی سیستم «علت» و اثر سیستم بر روی عامل «اثر» نامیده می‌شود. بعد از کدگذاری ماتریس اندرکنش همانطور که در شکل ۳-۴، مشاهده می‌شود، اثرگذاری عامل P_i بر روی سیستم «علت»، از مجموع مقادیر کدها در ردیفی که از آن عامل می‌گذرد به دست می‌آید و اثر سیستم بر روی عامل P_i ، از مجموع مقادیر ستونی که از آن عامل می‌گذرد به دست می‌آید، این مقادیر را بر روی محور مختصات به ترتیب با C و E می‌توان نشان داد. با این روش امکان شناسایی عوامل غالب در طراحی و شدت اندرکنش هر یک بر رفتار سیستم مشخص می‌شود. شکل ۳-۵، چگونگی اثرگذاری یک عامل و همچنین تاثیرپذیری آن از سیستم در غالب یک دستگاه مختصات علت- اثر نشان داده است (Hudson, ۱۹۹۲). پس از کدگذاری ماتریس مقادیر علت و اثر تمام عوامل محاسبه و بر روی نمودار علت- اثر رسم می‌شوند. موقعیت هر نقطه در فضای (C/E) وضعیت

^۱ Cause-Effect Plot

اندرکنش آن عامل را مشخص می‌کند. بدیهی است هرچه مقدار عددی حاصل جمع (C+E) عامل مورد نظر بیشتر باشد، شدت اندرکنش آن با کل سیستم بیشتر بوده و هرچه مقدار عددی تفاضلی (C-E) بیشتر باشد، میزان غلبه عامل بر سیستم کمتر است. همچنین مقدار منفی برای (C-E) نشان‌دهنده غلبه سیستم بر عامل مورد نظر است. مقادیر محورها برای هر عامل می‌تواند بر روی نمودار علت-اثر انتقال یابد. در شکل ۳-۵، نمودار (C/E) تعمیم داده شده به N عامل قابل مشاهده است. در این مورد عوامل به صورت ابر مانند در فضای C و E درآمده و از سیستمی پیچیده حکایت دارند. توجه به موقعیت این نقاط که در واقع نماینده عوامل اصلی سیستم هستند، در توسعه و سودمندی نظریه سیستمی ارایه شده در این بخش از اهمیت بسیاری برخوردار است.



شکل ۳-۴: نحوه شکل‌گیری محورهای علت و اثر در ماتریس اندرکنش (Hudson, ۱۹۹۲)



شکل ۳-۵: نمودار (C-E) تعمیم داده شده به N عامل (Hudson, ۱۹۹۲)

۳-۳- سابقه استفاده از رویکرد سیستم‌های مهندسی سنگ در کاربردهای

مختلف

سیستم‌های مهندسی سنگ از زمان معرفی آن تاکنون یکی از پرکاربردترین رویکردهای سیستمی در زمینه‌های مختلف بوده است. در مسایلی که تعداد عوامل موثر بر سیستم زیاد باشد، این رویکرد قابلیت استفاده بسیار خوبی نسبت به سایر روش‌های مرسوم، نشان می‌دهد.

در سال ۱۹۹۲، هادسون و همکاران با استفاده از روش ارزیابی شده با ارزیابی عوامل موثر بر چند پروژه مهندسی سنگ، ریسک این پروژه‌ها را مورد تحلیل قرار دادند (Hudson, ۱۹۹۲).

با گذشت حدود سه دهه از زمان معرفی این رویکرد، موارد متعددی از کاربرد سیستم‌های مهندسی سنگ در حوزه‌های مختلف مهندسی گزارش شده است که به‌طور خلاصه در جدول ۳-۲، لیست شده است.

جدول ۳-۲: مطالعات موردی انجام شده با استفاده از روش سیستم‌های مهندسی سنگ از سال ۱۹۹۲ تا

۲۰۱۹

نوع پروژه مهندسی و کشور	پژوهشگر - سال	روش کدگذاری	تعداد متغیرها	برخی از متغیرهای اصلی
انفجار روباز - انگلستان	لو و لاتهام - ۱۹۹۹	CQC	۱۲	بدون متغیرهای واضح و مشخص
انفجار روباز - ایتالیا	فرامزی - ۲۰۱۳	ESQ	۱۶	قطر چال، RMR، جهت‌داری شکستگی، ارتفاع پله و سرعت انفجار
ناپایداری در شیب - ایتالیا	مازاکولا و هادسون ۱۹۹۶	ESQ	۲۰	گسل‌ها، ساختارهای زمین‌شناسی، تعداد دسته‌درزه
زلزله ناشی از ناپایداری در شیب - ایتالیا	کاستالدینی و همکاران - ۱۹۹۸	ESQ	۲۱	گسل‌های فعال و غیرفعال، سنگ‌شناسی، مقاومت سنگ بکر، جهت ناپیوستگی‌ها
ناپایداری در شیب - بنگلادش	علی و حسن - ۲۰۰۲	ESQ	۱۴	بارندگی، لیتولوژی، گسل، چین‌خوردگی، جهت‌داری شیب
ناپایداری در شیب - یونان	روزاس و همکاران - ۲۰۰۸	ESQ	۱۳	گسل‌های فعال، سنگ‌شناسی و ...
ارزیابی ریزش سنگ - چین	ژانگ و همکاران - ۲۰۰۴	ESQ	۱۰	گسل‌های فعال، هندسه بلوک‌ها، سنگ-شناسی، مقاومت سنگ بکر، جهت ناپیوستگی‌ها
منطقه بندی زمین‌شناسی مهندسی - چین	شانگ و همکاران - ۲۰۰۵	ESQ	۲۰	گسل‌ها، سنگ‌های رسوبی و دگرگونی و آذرین، زمین‌لرزه
زمین لغزش - یونان	سایاتاکاکیس و همکاران - ۲۰۱۲	ESQ	۱۰	بارندگی، شرایط آب و هوایی
زمین لغزش ساحلی - ایتالیا	بودتا و همکاران - ۲۰۰۸	ESQ	۱۲	درزه‌داری، امواج، بارندگی
ریزش در شیب‌های طبیعی - ترکیه	سریان - ۲۰۰۸	ESQ	۹	شرایط آب، فاصله گسل‌ها و فراوانی ناپیوستگی‌ها
ریزش در شیب‌های طبیعی - یونان	روزوس - ۲۰۰۸	ESQ	۱۱	سنگ‌شناسی، شیب، هندسه ناپیوستگی، بارندگی
ریزش شیب جاده‌ای - ایران	خالوکاکایی و همکاران - ۲۰۱۲	PESQ	۱۷	گسل‌ها، چین‌خوردگی‌ها، زمین‌شناسی، تعداد دسته‌درزه، بارندگی
ریزش شیب جاده‌ای - ایران	نقده‌ای و همکاران - ۲۰۱۱	ESQ	۱۰	گسل‌ها، زمین‌شناسی، مقاومت سنگ بکر، هوازدگی، ارتفاع شیب
انفجار زیرزمینی - کانادا	آندریوکس و همکاران - ۲۰۰۸	ESQ	۹	انرژی ویژه ماده منفجره و تراکم مواد منفجره
عملکرد TBM - یونان	بناردوس و همکاران ۲۰۰۴	ESQ	۸	RMR، RQD، آب زیرزمینی، هوازدگی

فصل سوم: سیستم‌های مهندسی سنگ (RES) و روش‌های تحلیل اندرکنش غیرمستقیم عوامل

نوع پروژه مهندسی و کشور	پژوهشگر - سال	روش کدگذاری	تعداد متغیرها	برخی از متغیرهای اصلی
پایداری تونل‌های مترو- کره	کیم و همکاران - ۲۰۰۸	ESQ	۷	RQD, تنش و آب زیرزمینی
جاده معادن زغال - چین	یانگ و ژانگ - ۱۹۹۷	ESQ	۱۲	SRF, RQD, چگالی, نوع سنگ
شاخص ریزش تونل- کره	شین و همکاران ۲۰۰۹	ANN	۱۳	-
ویژگی‌های ساختاری و فرایندهای رادیواکتیو - سوئد	اسکاگیوس- ۱۹۹۷	ESQ	۱۳	-
سازمان‌دهی عوامل زیست‌کره- اسپانیا	آگوارا- ۲۰۰۸	ESQ	۹	-
شاخص فرسایش سنگ	هیل و همکاران- ۱۹۹۸	ESQ	۸	بدون کاربرد
بازنگری محل نیروگاه- کلی	شانگ و همکاران - ۲۰۰۰	ESQ	۱۱	گسل‌ها، سنگ‌شناسی، درزه‌ها، ساختار سنگ، زمین‌شناسی
بازنگری محل نیروگاه - چین	شانگ و همکاران - ۲۰۰۰	ESQ	۷	گسل‌ها، سنگ‌شناسی، دسته‌درزه‌ها
مهاجرت بلندمدت سزیم در جنگل	آویلا و موبیرگ - ۱۹۹۹	ESQ	۹	برگ درختان، اتمسفر، خاک
مدل‌سازی باطله‌های رادیواکتیو زیست‌کره	ون دراپ - ۱۹۹۹	ESQ	۱۱	-
نشت دی اکسیدکربن از چال‌ها-کانادا	کوندورا و اصغری - ۲۰۰۹	ESQ	۶	ترکیب آب، ترکیب گاز
آلودگی ناشی از ترافیک - انگلیس	ماوارولیدو- ۲۰۰۴	ESQ	۷	ساختمان‌ها، توپوگرافی، ترافیک
آلودگی ناشی از ترافیک - انگلیس	ماوارولیدو- ۲۰۰۷	ESQ	۶	-
نوآوری سیستم‌های کشاورزی - آذربایجان	تمل - ۲۰۰۲	ESQ	۹	اعتبار مالی، اطلاعات، مشاوره خصوصی، اقتصاد آزاد
شبکه عصبی برای سیستم مهندسی سنگ دینامیک	یانگ و ژانگ- ۱۹۹۸	NN	۱۷	بر اساس فرضیات
شبکه عصبی و سیستم خبره در نگهداری مغار - چین	کای و همکاران- ۱۹۹۶	NN	۸	بر اساس فرضیات
ارزیابی ظرفیت احتراق خودبه خودی زغال	صفاری و همکاران- ۲۰۱۴	ESQ	۱۵	درصد پیریت، انتشار گاز، روش استخراج، جهت پیشروی، ضخامت لایه
قابلیت تخریب-سیستم مهندسی سنگ احتمالاتی	رفیعی و همکاران - ۲۰۱۴	PESQ	۱۴	خصوصیات ناپیوستگی‌ها، تنش برجا، آب، ارتفاع بلوک، زیر برش
سیستم فازی مهندسی سنگ برای ارزیابی قابلیت تخریب	رفیعی و همکاران - ۲۰۱۵	FESQ	۱۴	خصوصیات ناپیوستگی، تنش برجا، زیر برش، آب، مقاومت سنگ
عوامل موثر رسوب‌گذاری بر توسعه	رفیعی و همکاران- ۲۰۱۶	ESQ	۷	شکل کریستال، اندازه کریستال، تخلخل،

نوع پروژه مهندسی و کشور	پژوهشگر - سال	روش کدگذاری	تعداد متغیرها	برخی از متغیرهای اصلی
ترک				ادخال های انیدرید
بهبود کدگذاری سیستم مهندسی سنگ با اعداد فازی	رفیعی و همکاران - ۲۰۱۶	FESQ	۱۴	تنش برجا، خصوصیات ناپیوستگی، زیربرش، آب، مقاومت سنگ
تحلیل سیستمهای رفتاری سنگ، مقایسه نتایج RES و DEMATEL	رفیعی و همکاران - ۲۰۱۸	FESQ	۱۳	تنش برجا، خصوصیات ناپیوستگی، زیربرش، آب، مقاومت سنگ

رفیعی و همکاران در سال ۲۰۱۴ در تلاشی برای تعیین شاخص قابلیت تخریب در روش تخریب توده‌ای از رویکرد سیستم‌های مهندسی سنگ استفاده کردند. رفیعی عوامل موثر بر قابلیت تخریب سنگ را به دو دسته کلی عوامل طبیعی و عوامل القایی تقسیم کرده است.

عوامل طبیعی شامل ساختارهای زمین‌شناسی (فاصله‌داری درزه‌ها، جهت‌داری درزه‌ها، بازشدگی درزه‌ها، پیوستگی درزه‌ها، زبری درزه‌ها، پرشدگی درزه‌ها)، تنش‌های برجا و جهت آن‌ها، مقاومت تراکمی تک‌محوره و آب است. عوامل القایی موثر بر قابلیت تخریب شامل ارتفاع بلوک، شرایط زیربرش، شعاع هیدرولیکی، نرخ تخریب و خردشوندگی است (Rafiee, et al., ۲۰۱۴). رفیعی پس از تشکیل ماتریس اندرکنش عوامل موثر بر قابلیت تخریب، امتیازدهی ماتریس اندرکنش را به‌منظور کاهش عدم قطعیت، با استفاده از سیستم‌های فازی و اعداد فازی بهبود بخشیده و در نهایت شاخص فازی قابلیت تخریب توده‌سنگ را ارائه نموده است. نتایج تحقیق رفیعی نشان داد که:

- همه عامل‌های در نظر گرفته شده بر یکدیگر و بر سیستم تاثیر متقابل دارند.
- عامل تنش‌های برجا دارای بالاترین احتمال اثر متقابل در سیستم است درحالی‌که عامل‌های مقاومت تراکمی تک‌محوره و جهت‌داری درزه کمترین احتمال تاثیر متقابل را دارند.

- عامل‌های مقاومت تراکمی تک‌محوره و تنش‌های برجا عامل‌هایی هستند که بالاترین تاثیرگذاری بر سیستم را دارند در حالی که خردشوندگی و قابلیت تخریب بالاترین احتمال اثرپذیری از سیستم را دارند.

۳-۴- روش‌های تحلیل سیستم‌های پیچیده

چالش عمده در بررسی سیستم‌های پیچیده، شناسایی همه عوامل موثر در سیستم و همچنین شناسایی کلیه اندرکنش‌های موجود بین عوامل است. به علت حجم بالای اطلاعات، عدم شناخت دقیق از رابطه بین عوامل و همچنین چگونگی تعامل هر متغیر در سیستم با سایر متغیرها، تحلیل و پیش‌بینی خروجی سیستم کار بسیار دشواری است. بنابراین محققین متعددی در راستای حل مسایل و چالش‌های موجود روش‌های متنوعی را برای شناسایی و رتبه‌بندی میزان اهمیت و وزن عوامل موثر در تعیین نتیجه سیستم، توسعه داده‌اند. یکی از ابزارهای شناخته شده برای شناسایی و رتبه‌بندی میزان اهمیت عوامل موثر در یک سیستم، روش RES است. در روش RES اندرکنش بین عوامل به صورت روابط دو-دویی در نظر گرفته شده است. در مقایسه با روش RES، روش‌های تحلیل ساختاری روابط بین عوامل را به صورت شبکه‌ای از اثرات متقاطع و به شکل روندی از بازتاب‌های پیوسته بین عوامل در نظر گرفته‌اند. در این راستا در این فصل به معرفی روش‌های تحلیل سیستم‌های پیچیده و معرفی بعضی کاربردهای آن‌ها پرداخته شده است.

۳-۴-۱- تحلیل ساختاری^۱

تحلیل ساختاری روشی برای تعیین عوامل کلیدی است که می‌تواند به شکل روند بازتاب‌های پیوسته برای ساخت نمایی از آینده توصیف شود (Ambrosio, et al., ۲۰۰۸). تحلیل ساختاری ابزاری قدرتمند و مناسب برای اشتراک و انتقال دانش و تجربه ارایه می‌کند. تحلیل ساختاری را می‌توان به‌سادگی برای مسایلی که به صورت ماتریسی طراحی شده‌اند و همچنین برای مطالعات کیفی

^۱ Structural Analysis

به کار برد. امکان مطالعه روابط بین عوامل و تعیین عوامل تاثیرگذار و وابسته در سیستم، با در نظر گرفتن نظرات و تفکرات کارشناسان با استفاده از تحلیل ساختاری امکان پذیر است.

این روش ساختار ارتباط، وابستگی و پویایی بین عوامل سیستم را نشان داده، عوامل موثر در ارتقای سیستم را مشخص و در نهایت مهم ترین متغیرها را که می توانند نتیجه را تغییر دهند، تعیین می کند (Guzman, et al., ۲۰۰۵).

استفاده از تحلیل ساختاری از اواسط دهه ۱۹۸۰ میلادی در حوزه های مختلف کاربردی تجاری و اجتماعی افزایش یافته است. علی رغم استفاده گسترده از روش های تحلیل ساختاری هنوز برخی معایب در کاربرد این روش ها وجود دارد. از جمله:

۱. اطلاعات به کار رفته در این روش ها از نظرات کارشناسان مختلف به دست می آید.

۲. اطلاعات حاصل ماهیت کاملاً ذهنی دارند.

۳. بین نظر کارشناسان مختلف اجماع کافی وجود ندارد.

به هر حال، کاربرد روش های تحلیل ساختاری می تواند تا حدودی میزان عدم قطعیت را کم کند (Villacorta, et al., ۲۰۱۴).

کارشناسان و متخصصان پس از تعیین عوامل موثر، ارتباط مستقیم بین هر جفت عامل را تعیین می کنند. تاثیر یک عامل بر روی عامل دیگر می تواند به صورت تاثیر مستقیم و یا غیرمستقیم باشد. تاثیر یک عامل بر روی عامل دیگر مستقیم است، اگر عامل A بر روی عامل B تاثیر داشته باشد. اگر عامل A بر روی عامل B و عامل B بر روی عامل C تاثیر داشته باشد، در این صورت عامل A دارای تاثیر غیرمستقیم بر روی C است.

ماتریس اندرکنش غیرمستقیم بین عوامل با انجام اعمال ریاضی ساده بر روی ماتریس اندرکنش مستقیم اولیه تعیین می شود. توان های پی در پی ماتریس اندرکنش، ما را به سمت رده بندی عوامل مختلف بر مبنای کل تاثیرات هدایت شده یا دریافت شده از هر عامل هدایت می کند (Ambrosio, et al., ۲۰۰۸).

روش تحلیل ساختاری می‌تواند به عنوان تأیید یک تصمیم‌گیری، ارزیابی آینده‌های متفاوت، برنامه‌ریزی عملیاتی و در تعیین استراتژی‌های مختلف در مطالعه یک سیستم بسیار سودمند باشد (Guzman, et al., ۲۰۰۵).

به‌طور کلی انواع روش‌های مختلف برنامه‌ریزی و طرح ریزی آینده^۱ را می‌توان به دودسته کلی روش‌های کمی و روش‌های کیفی تقسیم کرد (Amer, et al., ۲۰۱۳). در میان پرتعدادترین روش‌های کمی می‌توان روش‌های شبیه‌سازی اندرکنش اثرات متقاطع، شبیه‌سازی آینده متقاطع، نقشه‌های شناخت فازی^۲ (FCM)، تجزیه و تحلیل اثر روند^۳ (TIA) و تجزیه و تحلیل اثرات متقاطع^۴ (CIA) را نام برد (Villacorta, et al., ۲۰۱۴).

۳-۴-۲- نگاشت‌های شناخت فازی

نگاشت شناخت فازی (FCM)^۵، نگاشتی است که در آن برای تعیین روابط بین عناصر (مثلاً مفاهیم، حوادث، منابع پروژه) از یک «چشم‌انداز ذهنی» برای محاسبه «قدرت اثر» این عناصر استفاده می‌شود. نگاشت شناخت فازی توسط بارت کوزکو^۶ در سال ۱۹۸۶ معرفی شد (Kosko, ۱۹۸۶).

صفحات گسترده یا جداول برای نگاشت FCM در قالب ماتریس و برای سهولت در محاسبات مورد استفاده قرار می‌گیرند (Perusich, ۲۰۱۰). نقشه شناخت فازی یک فن است که برای کسب دانش تصادفی و بازپرداخت دانش علمی استفاده می‌شود. این فن، از فرایند استدلال دانش سببی پشتیبانی می‌کند و متعلق به سیستم فازی عصبی است که هدف آن حل مسایل تصمیم‌گیری، مدل‌سازی و شبیه‌سازی سیستم‌های پیچیده است (Salmeron, ۲۰۱۲). الگوریتم‌های

^۱ Senario Planing

^۲ Fuzzy Cognitive Mapping

^۳ Trend Impact Analysis

^۴ Cross Impact Analysis

^۵ Fuzzy Cognitive Map

^۶ Bart kosko

یادگیری برای آموزش و به‌روزرسانی وزن‌ها در نقشه‌های شناخت فازی بیشتر بر اساس ایده‌های حاصل از زمینه‌ی شبکه‌های عصبی مصنوعی پیشنهاد شده است. روش‌های سازگاری و یادگیری برای تطبیق مدل و تنظیم وزن در نقشه‌های شناخت فازی استفاده می‌شوند. دیکرسون و کوزکو (Dickerson, et al., ۱۹۹۵). الگوریتم‌های یادگیری برای غلبه بر کاستی‌هایی که در نقشه‌های شناخت فازی سنتی وجود دارد به کار می‌رود. به عنوان مثال الگوریتم‌های مبتنی بر الگوریتم اولیه هببین^۱، همچنین الگوریتم‌هایی در زمینه الگوریتم‌های ژنتیکی، هوش مصنوعی و محاسبات تکاملی ارایه شده است که می‌تواند منجر به کاهش مداخله‌ی انسان شده و یا در زمان هر بار اجرا، با فعال کردن عوامل که دارای بیشترین ارتباط هستند منجر به ساخت مدل‌های شفاف‌تر و پویاتر شوند.

نگاشت‌های شناخت فازی (FCMs) با توجه به توانایی آن‌ها در ارایه دانش ساختاری و مدل‌های پیچیده در زمینه‌های مختلف، علاقه بسیاری به تحقیقات در این زمینه را به خود جلب کرده‌اند. این علاقه رو به رشد منجر به پیشرفت و ایجاد مدل‌های قابل اطمینان‌تر می‌شود که می‌توانند وضعیت واقعی را بهتر نشان دهند. اولین کاربرد ساده نقشه‌های شناخت فازی در کتاب ویلیام تیلور^۲ توصیف شده است. در این مورد، جنگ در افغانستان و عراق مورد تحلیل قرار گرفته است. در کتاب «تفکر فازی» بارت کازکو (Kosko, ۱۹۹۳)، چندین نمودار از کاربرد نقشه‌های شناخت فازی نشان داده شده است.

اگرچه نقشه‌های شناخت فازی با کاربردهایی در علوم اجتماعی به عموم معرفی شده است، اما نقشه‌های شناخت فازی در طیف وسیعی از برنامه‌های کاربردی استفاده می‌شوند که همه با ایجاد استفاده از مدل‌های عدم قطعیت و فرایندهای پیچیده و سیستم‌ها مرتبط هستند. به‌عنوان مثال:

^۱ Hebbian Learning

^۲ Hebbian

^۳ William Taylor

فصل سوم: سیستم‌های مهندسی سنگ (RES) و روش‌های تحلیل اندرکنش غیرمستقیم عوامل

در کسب و کار نقشه‌های شناخت فازی می‌توانند برای برنامه‌ریزی محصول و حمایت از تصمیم‌گیری‌ها استفاده شوند.

در اقتصاد، نقشه‌های شناخت فازی از نظریه بازی، در اصلاحات پیچیده‌تر استفاده می‌کنند. در آموزش و پرورش از نقشه‌های شناخت فازی برای مدل‌سازی عوامل موثر در موفقیت و عوامل بحرانی در سیستم‌های مدیریت یادگیری استفاده می‌شود.

در پزشکی نقشه‌های شناخت فازی برای مدل‌سازی سیستم‌های تشخیص کمک می‌کنند و سیستم‌های پشتیبانی تصمیم‌گیری و ارزیابی پزشکی را بهبود می‌دهند.

در مهندسی به‌طور عمده برای مدل‌سازی و کنترل در سیستم‌های پیچیده و مهندسی قابلیت اطمینان به کار می‌رود.

در برنامه‌ریزی پروژه، نقشه‌های شناخت فازی به تجزیه و تحلیل وابستگی متقاطع بین منابع پروژه کمک می‌کنند.

در رباتیک نقشه‌های شناخت فازی، ماشین‌آلات را پشتیبانی کرده تا مدل‌های فازی محیط‌های خود را توسعه دهند و از این مدل‌ها برای تصمیم‌گیری‌های سریع استفاده کنند.

در سیستم‌های کمک‌آموزشی کامپیوتری، نقشه‌های شناخت فازی امکان بررسی اینکه آیا دانش‌آموزان درس‌های خود را درک می‌کنند و نقاط ضعف و قوت هر دانش‌آموز چیست را به کامپیوترها می‌دهند.

در مدیریت فناوری اطلاعات، روش‌های مبتنی بر نقشه‌های شناخت فازی به مدل‌سازی موفقیت‌آمیز طرح‌ریزی‌های فناوری اطلاعات و تحلیل و ارزیابی ریسک، کمک می‌کند. در این راستا ابزارهایی برای تحلیل نقشه‌های شناخت فازی ارائه شده است.

FCM Mappers ابزاری ساده و شناخته‌شده، مبتنی بر مایکروسافت اکسل است که توسط انجمن آنلاین بین‌المللی تجزیه و تحلیل و تجسم نگاشت شناخت فازی، ارائه شده است که توانایی

بررسی و تجزیه و تحلیل نقشه‌های شناخت فازی را دارد. خروجی این کد می‌تواند در نرم‌افزارهای Pajek و یا Visone نمایش داده شود (Gray, et al., ۲۰۱۳).

۳-۴-۳- روش تحلیل اثر روند

یکی دیگر از روش‌های تحلیل ساختاری، روش تحلیل اثرات روند است که برای پیش‌بینی آینده نیاز به بررسی روند تغییرات در گذشته دارد. بنابراین در هر مرحله از اجرا، حجم بالایی از اطلاعات باید تحلیل شود. روش تحلیل اثرات روند، روشی پیش‌بینی است که در آن با استفاده از برون‌یابی روند، طرح ریزی پایه ساخته شده و رویدادهای آینده که ممکن است روی این طرح ریزی اثر بگذارد، بر اساس احتمال وقوع و میزان تاثیر آن‌ها شناسایی و ارزیابی می‌شوند، سپس اثر ترکیبی این وقایع بر روی طرح ریزی پایه اعمال شده تا طرح‌های آینده ایجاد شود.

۳-۴-۴- تجزیه و تحلیل اثر متقاطع

تجزیه و تحلیل اثر متقاطع روشی است که توسط تئودور گوردون^۱ و اولاف هلمر^۲ در سال ۱۹۶۶ برای کمک به تعیین چگونگی تاثیر روابط بین عوامل و نتایج ناشی از آن و کاهش عدم اطمینان در آینده ایجاد شده است (Gordon, et al., ۱۹۹۴). آژانس اطلاعات مرکزی آمریکا (CIA) در اواخر دهه ۱۹۶۰ و اوایل دهه ۱۹۷۰ به عنوان یک روش تحلیلی برای پیش‌بینی چگونگی تاثیر عوامل مختلف و متغیرها بر تصمیمات آینده به این روش علاقه نشان داد. در اواسط دهه ۱۹۷۰، آینده‌پژوهان استفاده از این روش را در موارد کاربردی متعدد به عنوان وسیله‌ای برای پیش‌بینی احتمال وقوع رویدادها و تعیین تاثیر عوامل مرتبط بر یکدیگر، آغاز کردند (Gordon, et al., ۱۹۹۴). تا سال ۲۰۰۶، تجزیه و تحلیل اثرات متقاطع به صورت تعدادی از روش‌های مرتبط توسعه و برای بررسی‌های کاربردی در مشاغل مختلف و بررسی جوامع و همچنین کاربرد توسط آینده‌پژوهان و تحلیلگران اطلاعات، استفاده شد.

^۱ Gordon

^۲ Olaf Helmer

اصول اساسی تجزیه و تحلیل اثر متقاطع به اواخر دهه ۱۹۶۰ باز می‌گردد، اما روند اصلی تشکیل این تفکر نسبتاً ساده و مبتنی بر طراحی یک بازی بوده است. سرانجام، فن‌های پیشرفته، روش‌ها و برنامه‌ها برای به‌کارگیری اصول تحلیل اثر متقاطع توسعه داده شد و روش اصلی اکنون در اتاق‌های فکر آینده، تنظیمات تجاری و جامعه اطلاعاتی استفاده می‌شود.

تئودور گوردون معتقد است که تحلیل اثرات متقاطع نتیجه یک سؤال است: آیا می‌توان پیش‌بینی آینده را مبتنی بر ادراکاتی دانست که چگونه رویدادهای آینده ممکن است باهم اندرکنش داشته باشند؟

اولین استفاده از این روش در بازی با عنوان «آینده»^۱ بود که در آن رویدادها با احتمالات، یک قالب و تاثیرات ناشی از رویدادهای گذشته مشخص می‌شدند. قالب اولیه بازی تجزیه و تحلیل اثر متقاطع در سال ۱۹۶۸ در کامپیوترهای دانشگاه UCLA^۲ برنامه‌ریزی شد (Gordon, et al., ۱۹۹۴). با گسترش تجزیه و تحلیل اثر متقاطع در اوایل دهه ۱۹۷۰، محققان و آینده‌نگرها اصول اساسی را برای بهبود در این روش اصلاح کردند. در سال ۱۹۷۲، محققان مؤسسه آینده، زنجیره‌های زمانی را به جای قطعه زمان اضافه کردند، نورمن دالکی^۳ از احتمالات شرطی استفاده کرد و جولیس کین^۴ "KSIM" را توسعه داده یک روش شبیه‌سازی است که از تعامل بین متغیرهای سری زمانی به‌جای وقایع استفاده می‌کند (Gordon, et al., ۱۹۹۴). در سال ۱۹۷۴، دوپیرین و گودت برای بررسی مطالعات پیش‌بینی آینده در فرانسه، سیستم‌های ماتریس Cross Impact (یا SMIC) را در فرانسه توسعه دادند (Duperrin, et al., ۱۹۷۳).

^۱ Future

^۲ University of California, Los Angeles

^۳ Norman Dalkey

^۴ Julius Kane

پیشرفت در مدل‌های شبیه‌سازی تا دهه ۱۹۸۰ ادامه داشت. سیلوین انزر^۱ در سال ۱۹۸۰، در دانشگاه کالیفرنیا تجزیه و تحلیل اثر متقاطع را در یک روش شبیه‌سازی موسوم به Interax ترکیب کرد در سال ۱۹۸۴، فن دلفی با تحلیل اثرات متقاطع (CIA) ترکیب شد (Gordon, et al., ۱۹۹۴). پس از ایجاد مدل‌ها و روش‌های شبیه‌سازی برای تجزیه و تحلیل اثر متقاطع، تحلیل‌گران شروع به توسعه طیف وسیعی از موضوعاتی کردند که می‌توان به آن‌ها پرداخت. پس از آن استفاده از تحلیل اثرات متقاطع برای حل مسایل دنیای واقعی آغاز شد، به طوری که جان استور^۲ از این روش برای شبیه‌سازی اقتصاد اروگوئه استفاده کرد. با این حال، استفاده از این روش در مسایل واقعی در دهه ۱۹۹۰ به سرعت پیشرفت کرد. در بازه‌ی سال ۱۹۹۳ تا سال ۲۰۰۰ از SMIC^۳ برای تحلیل موضوعاتی مانند صنعت هسته‌ای، سیر تحول ژئوپلیتیکی جهان و فعالیت‌ها و مشاغل شرکت‌ها تا سال ۲۰۰۰ استفاده شد (Gordon, et al., ۱۹۹۴). در سال ۱۹۹۹، پس از آن که انگلیس از کنترل خود بر جمهوری خلق چین چشم‌پوشی کرد، رابرت بلنینگ^۴ و بروس رینینگ^۵ از دانشکده مدیریت ارشد اوون در دانشگاه وندربیل^۶ از یک شکل اصلاح شده از تحلیل اثرات متقاطع برای تعیین آینده اقتصادی هنگ کنگ استفاده کردند (Blanning, et al., ۱۹۹۹). تجزیه و تحلیل اثر متقاطع بر این فرض استوار است که وقایع و فعالیت‌ها در یک خلأ و بدون اثرپذیری از سایر رویدادها اتفاق نمی‌افتد و محیط اطراف می‌تواند به‌طور قابل‌توجهی احتمال وقوع برخی وقایع را تحت تاثیر قرار دهد. تجزیه و تحلیل اثر متقاطع سعی در ایجاد ارتباط بین رویدادها و متغیرها دارد. پس از آن این روابط به عنوان مثبت یا منفی نسبت به یکدیگر رده‌بندی می‌شوند و برای تعیین اینکه کدام یک از

^۱ Selwyn Enzer

^۲ John Astor

^۳ Cross-Impact Matrices and Systems

^۴ Blanning

^۵ Bruce Reinig

^۶ Vanderbilt

فصل سوم: سیستم‌های مهندسی سنگ (RES) و روش‌های تحلیل اندرکنش غیرمستقیم عوامل

وقایع یا طرح ریزی‌ها محتمل‌ترین هستند و ممکن است در یک بازه زمانی خاص اتفاق می‌افتند استفاده می‌شوند (Gordon, et al., ۱۹۹۴).

مزایای زیر را می‌توان برای روش‌های تحلیل اثر متقاطع در نظر گرفت. استفاده از نظر گروه‌های خبره اطمینان می‌دهد که عوامل که ارزش توجه داشته‌اند در محاسبات گنجانده شده‌اند. کاربرد ریاضیات در محاسبه احتمالات بیانگر این است که نتایج به همان اندازه دقیق هستند که یک محقق بتواند آن‌ها را رقم بزند. علاوه بر این، در مقایسه با سایر روش‌های تحلیلی، روش تحلیل اثرات متقاطع، به‌عنوان یک روش کمی، نتایج و اطلاعات بیشتری در مقایسه با روش‌های تحلیل کیفی دیگر می‌دهد. انطباق نسبی روش‌ها، رسیدن به نتایج مشابه توسط تحلیل‌گران مختلف را تضمین می‌کند (Gordon, et al., ۱۹۹۴).

سطح بالای محاسبات ریاضی در این روش منجر به تأخیرهای طولانی می‌شود، زیرا باید طرح‌ریزی‌ها اجرا شوند تا از صحت ریاضی احتمالات، اطمینان حاصل شود (Gordon, et al., ۱۹۹۴). این روش، مشتمل بر چندین زیر مجموعه است که در زیر به مهم‌ترین آنها اشاره شده است.

۳-۴-۱- روش MICMAC

یکی از روش‌های شناخته‌شده تحلیل اثر متقاطع است که توسط گودت و داپرین در سال ۱۹۷۱ پیشنهاد شده است MICMAC است (Godet, ۲۰۰۰). MICMAC در اصل یک روش تحلیل ساختاری است به‌طوری‌که ساختار، به صورت سیستمی که در آن اجزای سیستم با یکدیگر اندرکنش دارند در نظر گرفته شده است (Mojica, ۲۰۰۵). علاوه بر آن قابلیت در نظر گرفتن متغیرهای کیفی و کشف آینده‌های نامعلوم متفاوت را می‌دهد (Benjumea-Arias, et al., ۲۰۱۶). گودت استفاده از MICMAC را برای اولین مرحله از روند برنامه‌ریزی سناریو، پیشنهاد می‌کند.

هدف از به کارگیری روش MICMAC تعیین مهم‌ترین عوامل از میان عواملی است که توسط گروهی از خبرگان تعیین شده‌اند. در این روش، پس از تعریف مساله، فهرستی از عوامل داخلی و

خارجی موثر بر سیستم تعیین می‌شود. سپس ماتریسی مربعی که در آن ارزش هر درایه بیان‌کننده میزان ارتباط بین دو عامل است، تشکیل می‌شود. وزن‌گذاری ارتباط بین عوامل بر اساس وابستگی و پویایی عوامل و توسط کارشناسان و متخصصان انجام می‌شود. تاثیر بین عوامل نه با احتمالات بلکه با استفاده از اعداد طبیعی بین صفر تا ۳ بیان می‌شود.

خصوصیت عمده این روش در توانایی آن در مشخص کردن اندرکنش مستقیم و غیرمستقیم بین عوامل است.

در سال ۱۹۹۲، نرم‌افزار Micmac توسط انستیتو نوآوری‌های انفورماتیک^۱ تحت راهنمایی ابداع‌کننده‌ی این روش در آزمایشگاه تحقیق در استراتژی‌ها و تشکیلات موثر در آینده^۲ توسعه داده شده است (Godet, ۲۰۰۰). MICMAC اهمیت دسته‌ای از عوامل را از طریق ماتریسی که شامل تاثیر دودویی هر عامل بر عامل دیگر است، بررسی می‌کند (Godet, ۲۰۰۰). این روش با در نظر گرفتن همه اثرات متغیر بین عوامل، ماتریسی از ضرایب ارایه می‌کند که در آن هر درایه بیانگر اثر کاملاً تجمع شده از عامل X_i بر عامل X_j هست.

در این روش اگر D ماتریس مربعی اثرات مستقیم عوامل بر یکدیگر باشد، اثرات غیرمستقیم عوامل بر روی یکدیگر به صورت ماتریس مربعی T خواهد بود، به طوری که:

$$T=D^k \quad (۱-۳)$$

که در آن K یک عدد طبیعی مثبت کوچک است. بردار اثرگذاری غیرمستقیم عوامل به صورت $C=(c_1, \dots, c_n)$ و بردار اثرپذیری غیرمستقیم عوامل به صورت $e=(e_1, \dots, e_n)$ خواهد بود که در آن مقادیر c_j و e_j به صورت زیر محاسبه می‌شوند.

$$c_j = \sum_{i=1}^n T_{ji} \quad (۲-۳)$$

^۱ Institute of Innovation Informatique

^۲ Laboratory for investigation in prospective strategy and organization

$$e_j = \sum_{i=1}^n T_{ij} \quad (3-3)$$

بنابراین (c_j, e_j) برابر با درجه (اثرپذیری، اثرگذاری) عامل j در گراف اثرات غیرمستقیم هستند. Micmac به‌طور موفق در زمینه‌های مختلف به‌کاربرده شده است. بعضی از کاربردهای این روش در ادامه لیست شده است. گوپو^۱ و همکارانش (۲۰۱۱)، یک روش نوآورانه چهار مرحله‌ای برای تحلیل و توسعه، چهارچوب ساختار سلسله مراتبی برای دانش‌آموزانی که از سیستم‌های ارتباط کامپیوتری برای آموزش استفاده می‌کنند، ارائه کرده‌اند. در این تحقیق از MICMAC برای تجزیه و تحلیل مشوق‌ها و قدرت وابستگی برای هر روش ارتباطی با استفاده از دلایل و تعیین روابط پنهان و غیرمستقیم بین دلایل استفاده شده است (Guo, et al., ۲۰۱۱). همچنین در یک پروژه تحقیقاتی، دایابات و گوویندان^۲ یک مدل از مدیریت زنجیره تأمین سبز ارائه کردند. اعتبار مدل ارائه شده در یک مطالعه موردی با استفاده از MICMAC تأیید شده است (Diabat, et al., ۲۰۱۱).

کتکار و همکارانش^۳ (۲۰۱۲)، به بررسی مشوق‌ها و موانع بانکداری اینترنتی در هند پرداخته‌اند. کادام و همکارانش (۲۰۱۲)، MICMAC را برای تعیین عوامل موثر بر لقسدگی دینامیکی^۴ یک زانوی پیچ شده به‌کار برده‌اند. در تحقیقی در سال ۲۰۱۱، لو و همکارانش، از MICMAC برای تحلیل اثرگذاری و اثرپذیری اجزای طراحی و بررسی گراف شبکه ارتباطات توزیع در سیستم استفاده کرده‌اند.

MICMAC و بعضی دیگر از روش‌های تجزیه و تحلیل اثر متقاطع، ابزارهای موفقی بوده‌اند، اما هنوز یکسری اشکال دارند.

ابهام موجود در اطلاعات به‌طور کامل توسط این روش‌ها برطرف نمی‌شود، زیرا در این روش نظرات کارشناسان که به صورت یکسری اعداد طبیعی ارائه شده‌اند تجمیع و تحلیل می‌شود که

^۱Guo

^۲ Diabat and Govindan

^۳ katcar

^۴ Dynamic loosening

نمی‌تواند با عدم قطعیت مقابله کند. اشکال دیگر ناشی از همان واقعیت‌ها عدم قابلیت تفسیر کامل نتایج است و در آن مقادیر عددی فاقد معنی عمیق هستند.

۳-۴-۲- روش امتیاز صفحه^۱

روش مشهور امتیاز صفحه، برای محاسبه وابستگی غیرمستقیم انقلابی در دنیای موتورهای جستجوی اینترنت، از طریق موفقیت چشمگیر آن در موتور جستجوی گوگل ایجاد کرده است. این روش در سال ۱۹۹۸ توسط گوگل (Brin, et al., ۱۹۹۸) ثبت و کاملاً در رابطه با کاربرد آن در جستجوی صفحات وب شناخته شده است (Langville, et al., ۲۰۰۴).

ساختار و پایه ریاضی کدگذاری روش امتیاز صفحه به‌طور شگفت‌آوری ساده است. سه تفاوت عمده بین روش امتیاز صفحه و MICMAC وجود دارد.

- نرمال‌سازی تاثیرات، یعنی استفاده از ماتریس تصادفی ستونی
- استفاده از گراف‌های کامل، یعنی گراف‌هایی که ماتریس مرتبط با آن‌ها هیچ داده و درایه حذف شده‌ای ندارند.
- استفاده از ظرفیت‌های نامحدود ماتریس‌ها

در روش امتیاز صفحه، اثرات بین عوامل نرمال شده است و وابستگی‌ها، مرتبط بودن و یا اهمیت نسبی صفحات وب را نشان می‌دهند. اگر D ماتریس اثرات مستقیم باشد (که ورودی‌های آن بایستی اعداد حقیقی غیر منفی باشند و جمع هر ستون باید صفر یا یک باشد) ماتریس اثرات غیرمستقیم با استفاده از رابطه (۳-۴)، به دست می‌آید.

$$T(D) = \lim_{k \rightarrow \infty} [pD' + (1-p)E_n]^k \quad (۳-۴)$$

^۱ Page Rank

که در آن، D' ماتریسی است که با جاگذاری درایه‌های ستون صفر با مقدار $\frac{1}{n}$ به دست می‌آید، E_n ماتریسی است با درایه‌هایی با مقدار $\frac{1}{n}$ و عامل p عددی بین صفر و یک و نزدیک به یک که معمولاً 0.86 در نظر گرفته می‌شود.

در شبکه وب، عوامل صفحات وب هستند و بین A و B ارتباط وجود دارد، اگر در B هایپرلینکی وجود داشته باشد که به A هدایت کند. ماتریس اندرکنش مستقیم به صورت رابطه (۵-۳)، تعریف می‌شود:

$$D_{AB} = \begin{cases} \frac{1}{\cdot(B)} & \text{if there is an edge from B to A} \\ \cdot & \text{Otherwise} \end{cases} \quad (5-3)$$

به طوری که $\cdot(B)$ درجه خروجی از عامل B است.

رده‌بندی صفحه وب A ، متناسب با وابستگی غیرمستقیم آن است. رتبه بالاتر به معنی این است که در جستجوی صفحات وب در مرتبه بالاتری (زودتر) به نمایش درآمده است (Diaz, et al., 2015).

۳-۴-۳- روش هیت کرنل^۱

این روش در سال ۲۰۰۷ به وسیله چانگ^۲ معرفی شده است. اگر D ماتریس اندرکنش مستقیم عوامل باشد، آنگاه T ماتریس اندرکنش غیرمستقیم از رابطه (۶-۳)، به دست می‌آید.

$$T(D) = e^{\lambda(D-I)} = \sum_{k=0}^{\infty} (D-I)^k \frac{\lambda^k}{k!} \quad (6-3)$$

که در آن، I ماتریس یکه، معادل اندازه ماتریس D و λ یک مقدار حقیقی ثابت مثبت است. در روش هیت کرنل نیز اندرکنش هر عامل بر خودش در نظر گرفته شده است، به طوری که وقتی $D=0$ یعنی در صورت عدم هرگونه اندرکنش مستقیم بین عوامل، ماتریس اندرکنش غیرمستقیم

^۱ Heat Kernel

^۲ Chung

$T=T(0)$ یک ماتریس صفر نخواهد بود، زیرا هر عامل بر روی خودش تاثیر می‌گذارد، در این صورت $T(0)$ از رابطه (۷-۳)، به دست می‌آید.

$$T=T(0)=e^{-\lambda I} \quad (7-3)$$

۳-۴-۴-۴- روش تحلیل ساختاری PWP

روش PWP در سال ۲۰۰۹ توسط دیاز^۱ به‌عنوان روشی برای اندازه‌گیری تاثیر غیرمستقیم عوامل بر یکدیگر در یک شبکه پیچیده معرفی شد. مقدار ماتریس اندرکنش غیرمستقیم به ماتریس اثرات مستقیم عوامل که توسط گروهی از خبره‌ها تهیه شده و نیز مقدار λ که یک مقدار صحیح مثبت است، بستگی دارد.

یکی از مهم‌ترین مسایل در نظریه‌ی شبکه‌ها، تعیین رده‌بندی عوامل شبکه است. رده هر عامل نشان‌دهنده میزان اهمیتی است که آن عامل در شبکه دارد. بنابراین در رابطه با شبکه‌های جهت‌دار وزن‌دار شده باید به دنبال نقشه‌ای بود که گراف جهت‌دار وزن‌دار را به یک رده‌بندی بین عوامل تبدیل کند.

اولین رویکرد برای رفع این مشکل استفاده از تابع مجموع تاثیرات است که عوامل را بر اساس مجموع کل ارزش‌های آن‌ها (جمع وزن‌های دریافت شده یا ارسال شده توسط یک عامل) مرتب می‌کند. در این سیستم رده‌بندی، عواملی که بیشترین میزان اتصال به سایر عوامل را دارند در سیستم دارای اهمیت بیشتری هستند.

از دیدگاه شبکه‌های تاثیر، تابع مجموع تاثیرات، رده‌بندی عوامل را بر اساس اهمیت مستقیم آن‌ها تعیین می‌کند. اگرچه ممکن است این روش در رابطه با در نظر گرفتن بعضی تاثیرات مستقیم (در صورتی که بر روی یک عامل خنثی عمل کند)، با شکست مواجه شود. همچنین در صورتی که بر روی یک عامل با تاثیر بالا اعمال شود، ممکن است باعث افزایش اثرات مستقیم شود. بنابراین

¹Diaz

اگرچه ماتریس اثرات مستقیم نباید نادیده گرفته شود، نباید به‌عنوان پاسخ منحصر به فرد و یا نهایی نیز در نظر گرفته شود.

برای حل معنی‌دارتر و بهتر مسایل لازم است اثرات غیرمستقیم عوامل نیز در نظر گرفته شود. برای این منظور باید تابعی که پس از اعمال بر روی ماتریس اندرکنش مستقیم عوامل، ماتریسی وزن‌دار از اندرکنش غیرمستقیم عوامل تولید نماید، تعیین شود. بر این اساس، در روش PWP برای تعیین اندرکنش غیرمستقیم عوامل اصول اولیه زیر در نظر گرفته شده است:

- ۱- تاثیرات غیرمستقیم ناشی از جمع متوالی مقاطع اثرات مستقیم است.
- ۲- وزن تاثیرات غیرمستقیم هر عامل متناسب با وزن تاثیرات مستقیم آن عامل است.
- ۳- به‌عنوان یک اصل هر چه تعداد دفعات تاثیرات مقاطع یک عامل قبل از رسیدن به تعادل، بیشتر باشد، میزان تاثیرات غیرمستقیم اعمال شده توسط آن عامل کمتر است.
- ۴- تابع باید همگرا باشد.

خروجی روش PWP یک ماتریس مربعی $n \times n$ است که از طریق اعمال تابع (۳-۸)، بر روی یک ماتریس مربعی $n \times n$ مشتمل بر اثرات مستقیم هر عامل بر عامل دیگر به دست می‌آید.

$$M_n(R) \xrightarrow{T} M_n(R)$$

$$T(D, \lambda) = \frac{e_+^{\lambda D}}{e_+^{\lambda}} = \frac{e^{\lambda D} - I}{e^{\lambda} - 1} = \frac{\sum_{k=1}^{\infty} D^k \frac{\lambda^k}{k!}}{\sum_{k=1}^{\infty} \frac{\lambda^k}{k!}} \quad (۸-۳)$$

ماتریس D ، ماتریس اندرکنش مستقیم عوامل موثر و λ و K اعداد طبیعی مثبت بزرگ‌تر از یک هستند. تکرار عملیات تابع T زمانی متوقف می‌شود که سیستم به تعادل برسد به‌گونه‌ای که رده‌بندی اثرگذاری، اثرپذیری (وابستگی) و اندرکنش عوامل در ماتریس خروجی با رده‌بندی عوامل در خروجی مجاور (یکسان) باشد. تابع T همه اصول در نظر گرفته شده را برآورده می‌کند، به‌طوری‌که:

از آنجا که ورودی D^K مسیرهای وزن دار با طول K را در نظر می‌گیرد، شرایط یک و دو برآورده شده است. یعنی تسلسلی از K تاثیر مستقیم وجود دارد.

گنجاندن عامل $\frac{\lambda^k}{k!}$ شرط ۳ را توجیه می‌کند.

شرط ۴ با اعمال فاکتور $\frac{1}{k!}$ تضمین شده است.

روش‌های متعدد دیگری برای تعیین اندرکنش غیرمستقیم عوامل وجود دارد. به عنوان مثال: شاخص کتز^۱ (Katz, ۱۹۵۳)، روش امتیاز صفحه توسط گوگل (Brin, et al., ۱۹۹۸)، روش MICMAC ارایه شده توسط گودت (Godet, ۲۰۰۰)، هیت کرنل توسط چانگ (Chung, ۲۰۰۷) و روش ارتباط پذیری توسط استرادا و هاتانو (Strada, et al., ۲۰۰۸). مقایسه روش PWP با این روش‌ها نشان می‌دهد که علی‌رغم این که در کاربردهای متفاوت به خوبی آزموده شده‌اند، اما بعضی از شروط فوق را برآورده نمی‌کنند.

شاخص کتز درحالی که به‌طور وسیعی برای شبکه‌های وزن دار نرمال به کار رفته و اکثر شرایط را برآورده می‌کند، اما از درجه همگرایی مطلوبی برخوردار نیست، دلیل اصلی که ضریب $\frac{1}{k!}$ در PWP گنجانده شده است، برآورده کردن شرط همگرایی است.

در MICMAC (دهه ۷۰)، مسیرهایی با تعداد تکرار ثابت K در نظر گرفته می‌شود، بنابراین شرط ۱ را برآورده نمی‌کند.

پیچ رنک (۱۹۹۹) تاثیرات غیرمستقیم را با اولین تبدیل ماتریس اثرات مستقیم به ماتریس مارکو D محاسبه می‌کند، بنابراین روش امتیاز صفحه، شرط دوم را برآورده نمی‌کند.

هیت کرنل ۲۰۰۷، خیلی به برآورده کردن شروط فوق نزدیک است. اما هیت کرنل تاثیر غیرمستقیم یک عامل بر خودش را در نظر نمی‌گیرد. بنابراین شرط دوم در هیت کرنل ارضا نشده است. دلیل عمده برای استفاده از تابع e^x به جای تابع e^x اعمال اثر غیرمستقیم عامل بر خود است.

^۱ Katz

روش ارتباط پذیری (۲۰۰۷) بعد از نرمال‌سازی باحالت $\lambda=1$ روش هیت کرنل مطابقت دارد، بنابراین همان ضعف روش هیت کرنل در رابطه با این روش وجود دارد. توجه به این نکته ضروری است که در هر دو مورد هیت کرنل و ارتباط پذیری با حذف یا تضعیف تاثیرات مستقیم عوامل، تاثیر غیرمستقیم آن عامل حذف یا تضعیف نمی‌شود. در مقایسه در روش شاخص کتز و PWP، در غیاب تاثیر مستقیم، تاثیر غیرمستقیم عامل تمایل به کم شدن و حذف پیدا می‌کند.

در هر ماتریس اندرکنش مستقیم و با هر رده‌بندی اولیه بر اساس اثرات مستقیم عوامل، پس از کاربرد PWP رده‌بندی جدیدی به دست می‌آید که اندرکنش غیرمستقیم عوامل در آن اعمال شده است.

رده‌بندی بر اساس کل اندرکنش عامل (C+E) که به آن رده‌بندی بر اساس اهمیت غیرمستقیم گفته می‌شود.

رده‌بندی بر اساس درجه خروجی عامل (C) که به آن رده‌بندی بر مبنای اثرگذاری غیرمستقیم گفته می‌شود.

رده‌بندی بر اساس درجه ورودی عامل (E) که به آن رده‌بندی بر مبنای وابستگی غیرمستقیم گفته می‌شود. به طوری که برای یک ماتریس اندرکنش مستقیم (D)، رتبه مربوط به عامل متناسب است با مقدار توابع

$$C_i = \sum_{j=1}^n T_{ij}, \quad E_i = \sum_{j=1}^n T_{ji} \quad \text{and} \quad I_i = \sum_{j=1}^n (T_{ij} + T_{ji}) \quad (9-3)$$

که بر اساس ماتریس اندرکنش غیرمستقیم $T=T(D)$ محاسبه شده است.

در کاربردهای این روش، تطابق خوبی بین نتایج حاصل از روش PWP و خروجی‌های سیستم مشاهده شده است.

دiaz و گومز در سال ۲۰۱۵، تاثیرات غیرمستقیم تجارت یک کشور بر تجارت بین‌المللی را با استفاده از PWP بررسی کرده‌اند (Diaz, et al., ۲۰۱۵). در سال ۲۰۱۹، Diaz و وارگاس^۱ پایداری PWP را نسبت به تغییرات در داده‌های اولیه و همچنین نسبت به تغییرات در متغیرهای K و λ بررسی کرده‌اند (Diaz, et al., ۲۰۱۹). آن‌ها همچنین پایداری PWP را با روش‌های MICMAC و Heat Kernel مقایسه کرده‌اند.

در این تحقیق، از میان روش‌های تحلیل غیرمستقیم عوامل، روش PWP به دلیل مزایای بیان شده این روش نسبت به سایر روش‌های مشابه برای تعیین ماتریس اندرکنش غیرمستقیم استفاده شده است.

به منظور محاسبه شاخص امکان پذیری، ابتدا لازم است که ماتریس اندرکنش مستقیم عوامل موثر توسط متخصصین حوزه‌ی تخریب توده‌ای کدگذاری شود. تعیین کارشناسان و دقت در امتیازدهی ماتریس اندرکنش یکی از عوامل بحرانی در تحلیل سیستم است.

همان‌طور که پیش‌تر نیز اشاره شد، روش‌های مختلفی برای کدگذاری ماتریس اندرکنش وجود دارد. در کاربردهای مختلف روش سیستم‌های مهندسی سنگ روش ESQ بیشترین کاربرد را داشته است. در روش ESQ امتیازدهی با قضاوت مهندسی کارشناسان بر پایه تجربیات و دانش خبره در رابطه با موضوع مورد نظر انجام می‌شود. ارایه کد دقیق، نیاز به دانش عمیق از روابط بین عوامل دارد، بنابراین در سیستم‌های پیچیده نظیر تخریب توده‌ای، به علت تعدد عوامل و پیچیدگی‌های خصوصیات و روابط بین عوامل، تعیین کد دقیق که نماینده شدت اثر هر عامل بر عامل دیگر باشد بسیار دشوار است. علاوه بر این احتمال اختلاف نظر بین کارشناسان با توجه به پیچیدگی روابط، بالا است.

در این رساله به منظور رسیدن به نتایج واقعی‌تر و کاهش عدم قطعیت، در مرحله اول، ماتریس اندرکنش مستقیم عوامل شامل ۳۲ عامل موثر بر روند تخریب، توسط ۱۲ متخصص روش تخریب

^۱ Vargas

فصل سوم: سیستم‌های مهندسی سنگ (RES) و روش‌های تحلیل اندرکنش غیرمستقیم عوامل

توده‌ای با استفاده از روش نیمه عددی خبره (ESQ) امتیازدهی شده است. تعداد عوامل ماتریس اندرکنش پس از بررسی نظرات کارشناسان به ۲۳ عامل کاهش داده شده است. در اکثر کاربردهای گذشته‌ی روش RES، محاسبه‌ی برآیند نظر کارشناسان از طریق میانگین حسابی انجام شده است، استفاده از میانگین حسابی برای تعیین برآیند نظر کارشناسان، در رابطه با بعضی از عوامل که به‌طور کامل شناخته‌شده نیستند و تفاوت معنی‌داری بین نظر کارشناسان وجود دارد، می‌تواند منجر به تولید خروجی‌های غیر واقعی شود.

رفیعی و همکاران (۲۰۱۴ و ۲۰۱۹)، امتیازدهی ماتریس اندرکنش عوامل موثر بر قابلیت تخریب توده سنگ را با استفاده از روش سیستم‌های فازی و همچنین روش اعداد و جبر فازی بهبود بخشیده‌اند. بررسی نتایج به‌دست‌آمده بهبود خروجی سیستم را در مقایسه با سایر کاربردهای RES نشان می‌دهد. بنابراین در این روش به‌منظور محاسبه‌ی برآیند نظرات کارشناسان، روش سیستم‌های فازی بر روی ماتریس‌های اولیه اعمال شده است. سپس ماتریس حاصل به‌عنوان ورودی روش PWP استفاده شده است.

۳-۴-۵- جمع‌بندی

در این فصل به اصول کلی رویکرد سیستم‌های مهندسی سنگ، ماتریس اندرکنش بین عوامل و چگونگی تشکیل آن، انواع روش‌های امتیازدهی، بهبودهای انجام شده در رابطه با امتیازدهی ماتریس، نحوه محاسبه شدت اثر و شدت وابستگی و نمودارهای شدت اثر و شدت وابستگی و توجیه آن پرداخته شد. در ادامه به کاربردهای مختلف روش سیستم‌های مهندسی سنگ تا زمان حال اشاره شده است. در اکثر کاربردهای RES به‌جز چند مورد محدود از روش رایج RES استفاده شده است، علاوه بر این به‌جز یک مورد در همه موارد کاربرد این روش، رابطه بین عوامل یک رابطه دو دویی در نظر گرفته شده است و تاثیر غیرمستقیم عوامل بر یکدیگر در نظر گرفته نشده است. بنابراین به منظور بهبود نتایج روش RES ماتریس اندرکنش غیرمستقیم عوامل و شاخص غیرمستقیم فازی تخریب در فصل بعد معرفی و محاسبه شده است.

فصل ۴

بر آورد شاخص امکان‌پذیری پیاده‌سازی روش

استخراج تخریب توده‌ای

۴-۱- مقدمه

همان‌طور که پیش‌تر گفته شد، در همه کاربردهای روش سیستم‌های مهندسی سنگ، تنها به بررسی روابط بین تک‌تک عوامل بر روی یکدیگر پرداخته شده است و اندرکنش غیرمستقیم عوامل مورد بررسی قرار نگرفته است. در راستای بهبود این روش، برخی از مهم‌ترین روش‌های تحلیل غیرمستقیم روابط بین عوامل در فصل ۳ بررسی شد. در این فصل ابتدا ماتریس اندرکنش RES عوامل موثر بر امکان‌پذیری پیاده‌سازی روش تخریب توده‌ای، با استفاده از میانگین حسابی تشکیل و مقادیر علت و اثر هر عامل تعیین شده است. از آنجا که امتیازدهی ماتریس اندرکنش مستقیم عوامل موثر در روش RES بر اساس نظر کارشناسان خبره انجام می‌شود، بنابراین ماهیتی کاملاً ذهنی دارد. در این تحقیق به منظور کاهش عدم قطعیت موجود در امتیازدهی ماتریس اندرکنش و تعیین ماتریس برآیند نظر کارشناسان، امتیازدهی ماتریس اندرکنش عوامل موثر بر امکان‌پذیری پیاده‌سازی روش تخریب توده‌ای با استفاده از سیستم‌های فازی انجام شده است. در این راستا ابتدا شرح مختصری از سیستم‌های فازی ارائه شده و ماتریس اندرکنش عوامل موثر با استفاده از رویکرد سیستم‌های فازی به دست آمده است. در ادامه، ماتریس اندرکنش غیرمستقیم عوامل موثر بر امکان‌پذیری پیاده‌سازی روش تخریب توده‌ای با استفاده از روش ساختاری PWP تعیین و در نهایت شاخص امکان‌پذیری معرفی و تعیین شده است.

۴-۲- تعیین ماتریس اندرکنش سیستم‌های مهندسی سنگ

پس از بررسی مطالعات انجام شده، ابتدا ۳۲ عامل موثر بر امکان‌پذیری پیاده‌سازی روش تخریب توده‌ای شناسایی و پرسش‌نامه‌هایی به صورت ماتریس ۳۲×۳۲ برای کارشناسان حوزه‌ی تخریب ارسال شده است. امتیازدهی مولفه‌های ماتریس اندرکنش عوامل موثر بر امکان‌پذیری پیاده‌سازی روش تخریب توده‌ای، توسط ۱۲ کارشناس روش تخریب توده‌ای و بر اساس دانش و تجربه آن‌ها و با استفاده از روش ESQ انجام شده است (پیوست). پس از بررسی ماتریس‌های اندرکنش و مشاوره با

بعضی از کارشناسان دارای تجربه کاری بیشتر در زمینه تخریب توده‌ای، ۹ عامل موثر به علت پراکندگی زیاد نظرات کارشناسان حذف گردیده است و تحلیل بر روی ماتریس‌های اندرکنش 23×23 انجام شده است. ماتریس اندرکنش عوامل موثر بر امکان‌پذیری پیاده‌سازی روش تخریب توده‌ای و مقادیر علت و اثر مستقیم هر یک از عوامل در جدول ۴-۱، درج شده است، که در آن مقدار هر یک از درایه‌های ماتریس اندرکنش، میانگین حسابی اعداد اختصاص داده شده توسط کارشناسان برای آن درایه است.

جدول ۴-۱: ماتریس اندرکنش مستقیم عوامل موثر بر امکان‌پذیری پیاده‌سازی روش تخریب توده‌ای

عوامل ژئومکانیکی	عوامل																																																	
	عوامل محیطی										عوامل هندسی					عوامل عملیاتی					سیستم																													
۴۱	۳۷,۱	۴۹,۱	۳۴,۶	۳۳,۳	۲۰,۴	۲۴,۴	۲۸,۳	۴۳,۸	۳۴,۵	۳۴,۳	۲۲,۸	۲۲,۵	۲۴,۶	۲۵	۲۱,۸	۲۹,۵	۲۵,۱	۱۷,۴	۱۲,۴	۲۴,۸	۲۴,۵	۲۳,۱	۱۴,۴	۱۶,۹	۱۴,۴	۱۴,۹	۱۵,۲	۱۵,۱	۲۹,۷	۱۵,۲	۲۶	۳۹,۶	۳۶	۲۶,۷	۳۵,۵	۳۸,۷	۱۳,۳	۴۴,۲	۳۶,۲	۴۰,۳	۳۱,۳	۲۸,۸	۵۲,۷	۵۳,۳						
علت	P_1	P_2	P_3	P_4	P_5	P_6	P_7	P_8	P_9	P_{10}	P_{11}	P_{12}	P_{13}	P_{14}	P_{15}	P_{16}	P_{17}	P_{18}	P_{19}	P_{20}	P_{21}	P_{22}	P_{23}	P_{24}	P_{25}	P_{26}	P_{27}	P_{28}	P_{29}	P_{30}	P_{31}	P_{32}	P_{33}	P_{34}	P_{35}	P_{36}	P_{37}	P_{38}	P_{39}	P_{40}	P_{41}	P_{42}	P_{43}	P_{44}	P_{45}	P_{46}	P_{47}	P_{48}	P_{49}	P_{50}

P_1 : مقاومت تراکمی تک‌محوره، P_2 : نسبت مدولی، P_3 : فراوانی ناپیوستگی، P_4 : بازشدگی ناپیوستگی، P_5 : پایایی ناپیوستگی، P_6 : زبری ناپیوستگی، P_7 : پرشدگی ناپیوستگی، P_8 : هوازدهی ناپیوستگی، P_9 : میدان تنش، P_{10} : جهت تنش، P_{11} : آب زیرزمینی، P_{12} : نسبت نرمة، P_{13} : شعاع هیدرولیکی، P_{14} : ارتفاع زیر برش، P_{15} : ارتفاع بلوک، P_{16} : هندسه نقاط تخلیه، P_{17} : نرخ تخلیه، P_{18} : اندرکنش نقاط تخلیه، P_{19} : فضای خالی، P_{20} : چگالی کانه‌ی خردشده، P_{21} : جهت زیر برش، P_{22} : قابلیت تخریب، P_{23} : خردشوندگی

با بررسی مقادیر علت و اثر عوامل در جدول ۴-۱، مشاهده می‌شود که عوامل فراوانی درزه و میدان تنش به ترتیب بیشترین اثرگذاری و عوامل چگالی کانه خرد شده و فضای خالی کمترین اثرگذاری را بر سایر عوامل دارند. همچنین عوامل نرخ تخلیه و ارتفاع فضای خالی به ترتیب بیشترین تاثیرپذیری از سیستم را دارند. علاوه بر این، عوامل نرخ تخلیه و میدان تنش بیشترین اندرکنش را با سیستم دارند.

در بررسی ماتریس‌های اندرکنش تکمیل شده توسط کارشناسان، اختلاف نظر در رابطه با امتیازدهی برخی عوامل موثر بر امکان‌پذیری پیاده‌سازی روش تخریب توده‌ای، مشاهده می‌شود. این اختلاف نظرات ناشی از پیچیدگی‌های فرایند تخریب و دانش کم در رابطه با تاثیر برخی عوامل بر یکدیگر و فرایند تخریب است. روش فازی به عنوان یک روش مرسوم در تحلیل مسایلی که دارای ابهام و عدم قطعیت هستند، شناخته شده است. در بخش بعد، پس از معرفی سیستم‌های فازی، به منظور کاهش اثر اختلاف نظر کارشناسان و کاهش عدم قطعیت، ماتریس اندرکنش عوامل موثر بر امکان‌پذیری پیاده‌سازی روش تخریب توده‌ای با استفاده از رویکرد فازی، ارایه شده است.

۴-۳- سیستم‌های فازی

در مواجهه با بسیاری از مسایل، لازم است که استنتاجاتی بر روی داده‌هایی که از دنیای واقعی به دست آمده‌اند، انجام شود. اما بسیاری از این داده‌ها، داده‌های قطعی نیستند. منطق فازی یک راه حل برای چنین مسایلی پیشنهاد می‌کند. در منطق فازی گزاره‌ها کاملاً درست یا کاملاً غلط نیستند. منطق فازی برای بازنمایی ابهام در زبان طبیعی به کار می‌رود.

منطق فازی می‌تواند مفاهیم مبهم را نشان دهد و به عنوان منطق پایه در سیستم‌های خبره فازی^۱ استفاده شود. منابع متعددی نشان می‌دهند که سیستم‌های فازی تقریب‌های جهانی هستند (Ross, 2010). همین دلیل سبب شده است که سیستم‌های فازی به عنوان راه‌حل‌های اساسی

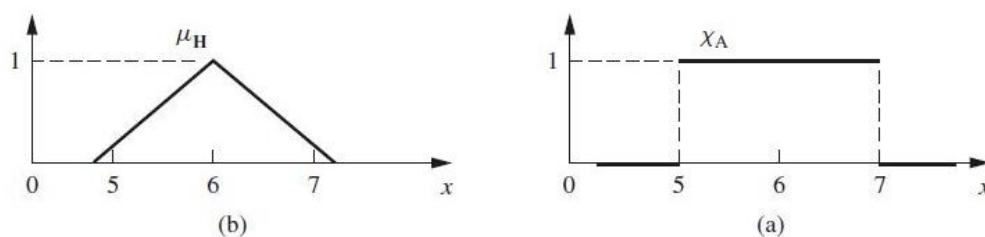
^۱ Fuzzy Expert Systems

محبوبیت بیشتری در علوم مختلف کسب نمایند. البته این بدان معنی نیست که نیازی به یافتن ابزارهای دیگری نیست و می‌توان جستجوی علم را متوقف ساخت، اما بدان معنی است که در مقابل جبر موجود رویکرد دقیق‌تری را ارایه می‌نماید (Ross, ۲۰۱۰).

ایده‌ی مجموعه‌های عضویت در واقع کلید تصمیم‌گیری در شرایط مواجهه با عدم قطعیت است. به عنوان نمونه برای مجموعه‌های ترد^۱، عضو x در مجموعه مرجع X به صورت کاملاً ترد یا عضویت دارد یا ندارد (Ross, ۲۰۱۰). مساله عضویت دودویی را می‌توان با عملگر ریاضی (۱-۴)، نشان داد:

$$\chi_A(x) = \begin{cases} 1, & x \in A \\ 0, & x \notin A \end{cases} \quad (1-4)$$

مفهوم عضویت‌پذیری برای پذیرش درجات مختلف عضویت توسعه داده شده است و به صورت پیوسته در محدوده بین $[0, 1]$ تغییر می‌نماید و از آن تحت عنوان مجموعه‌های فازی یاد می‌شود. به عنوان مثال اگر یک مجموعه متشکل از ارتفاعات نزدیک به ۶ متری در نظر گرفته شود چون از واژه ارتفاعات نزدیک، سخن به میان آمده است، باید از مجموعه‌ای فازی استفاده کرد. در این وضعیت تحلیلگر سیستم باید تصمیم بگیرد که از چه تابع عضویتی برای این مجموعه استفاده نماید. در شکل ۱-۴، انواع مختلف تابع عضویت نشان داده شده است (Ross, ۲۰۱۰).

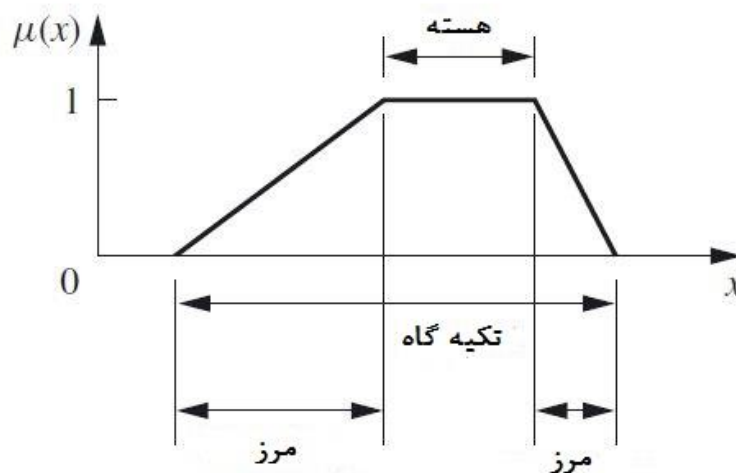


شکل ۱-۴: تابع عضویت ارتفاع ۶ متری (a - مجموعه ترد - b) مجموعه فازی (Ross, ۲۰۱۰)

^۱ Crisp set

۴-۳-۱- تابع عضویت

از آنجا که همه اطلاعات موجود در مجموعه‌های فازی توسط تابع عضویت توصیف می‌شود، لذا بسط یک فرهنگ از اصطلاحات برای توصیف ویژگی‌های مختلف این تابع مفید به نظر می‌رسد. برای این منظور همه توابع در اشکال به صورت پیوسته نشان داده می‌شوند. اما باید در نظر داشت که این شرایط برای هر دو مجموعه فازی گسسته و پیوسته کاربرد دارد. شکل ۴-۲، به توضیح این مطلب و تشریح اصطلاحات مرسوم در این زمینه کمک می‌کند (Ross, ۲۰۱۰).



شکل ۴-۲: هسته، مرز و تکیه‌گاه در مجموعه فازی (Ross, ۲۰۱۰)

هسته^۱ تابع عضویت برای مجموعه فازی به عنوان ناحیه‌ای از مجموعه تعریف می‌شود که عضویت آن به صورت کامل و مقدار آن برابر با یک است.

بخشی از مجموعه‌ی اعضای مجموعه‌ی مرجع که عضویت آن‌ها غیر صفر باشد به عنوان تکیه‌گاه^۲ تابع فازی در نظر گرفته می‌شوند.

قسمتی از تابع عضویت که دارای عضویت بزرگ‌تر از صفر و کوچک‌تر از ۱ باشد به عنوان مرز^۱ تابع فازی در نظر گرفته می‌شود.

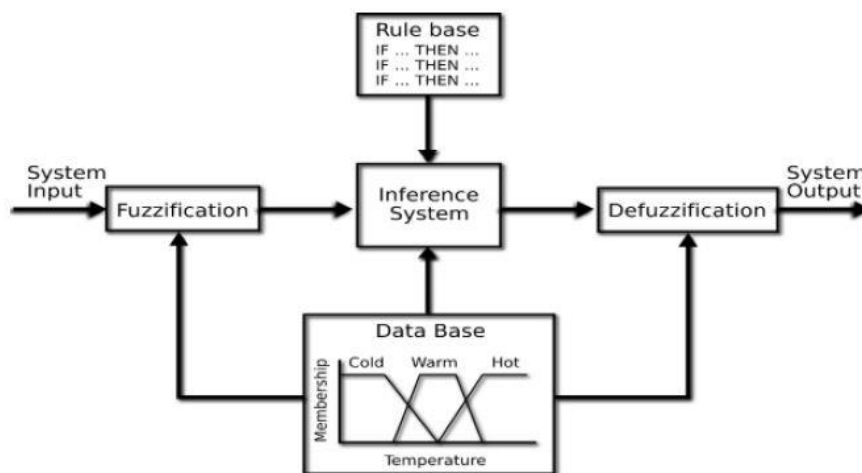
^۱ core

^۲ support

مجموعه فازی طبیعی^۲ به مجموعه‌ای اطلاق می‌شود که ارتفاع آن برابر با یک باشد، در غیر این صورت به‌عنوان مجموعه فازی غیرطبیعی^۳ در نظر گرفته می‌شود (Ross, ۲۰۱۰).

یک سیستم فازی حداقل دارای چهار بخش زیر است که در شکل ۳-۴، نشان داده شده است:

۱. فازی کننده^۴
۲. پایگاه قواعد^۵
۳. موتور استنتاج^۶
۴. غیر فازی کننده^۷



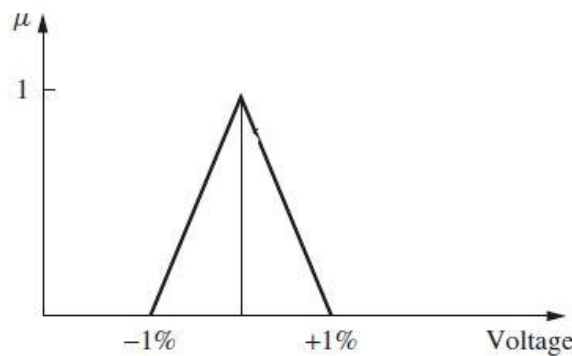
شکل ۳-۴: اجزای سیستم فازی (Ross, ۲۰۱۰)

در سیستم فازی با استفاده از متغیرهای زبانی، پس از فازی‌سازی ورودی‌ها و اعمال قوانین فازی، خروجی‌های حاصل با استفاده از غیر فازی کردن حاصل خواهند شد.

^۱ Boundary
^۲ Normal
^۳ Sub-normal
^۴ Fuzzifier
^۵ Rule Base
^۶ Inference Engine
^۷ Defuzzifier

فصل چهارم: برآورد شاخص امکان‌پذیری پیاده‌سازی روش استخراج تخریب توده‌ای

وظیفه فازی سازی، تبدیل یک عدد غیر فازی به یک عدد فازی است که معمولاً با توجه به شکل مجموعه‌های فازی تعریف شده انجام می‌شود (عطایی، ۱۳۸۹). در واقع به رسمیت شناختن بسیاری از کمیت‌هایی که در منطق کلاسیک با آن‌ها به صورت واضح و قطعی برخورد می‌شود، سبب افزایش عدم قطعیت خواهد شد. در اصطلاح اگر شکل عدم قطعیت در مساله‌ای وجود داشته باشد، در این صورت می‌توان از توابع عضویت استفاده کرد. به عنوان مثال در دنیای واقعی دستگاهی همچون ولت-متر دیجیتال به صورت قطعی داده نمایش می‌دهد، اما این داده‌ها در واقعیت در معرض خطای آزمایشگاهی قرار دارند. در شکل ۴-۴، محدوده خطای ممکن نشان داده شده است که می‌توان آن را در ارتباط با تابع عضویت خطا در نظر گرفت.



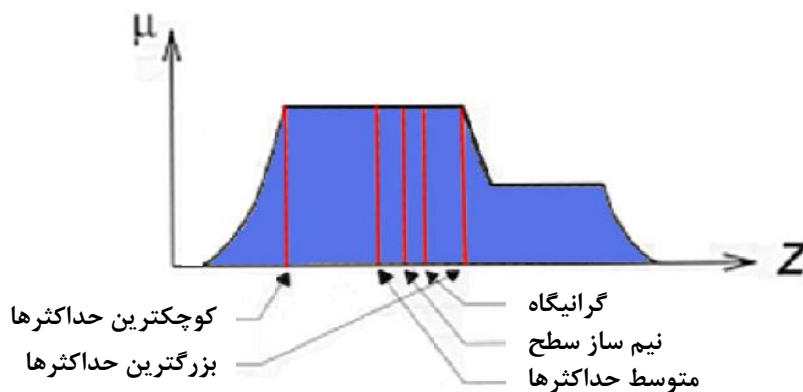
شکل ۴-۴: تابع عضویت نشان‌دهنده مقدار ترد ولتاژ به عنوان فازی ساز (Ross, ۲۰۱۰)

قلب یک سیستم فازی یک پایگاه قواعد فازی است که از قواعد اگر، آنگاه، تشکیل شده است (عطایی، ۱۳۸۹). قواعد فازی بر اساس تجربه‌های انسانی، روش‌های تکاملی و یا بر اساس شرایط ریاضی ایجاد می‌گردند. موتور استنتاج فازی به این معنی است که میزان تطابق ورودی سیستم را با هر کدام از قواعد معین نماید. میزان تطابق عددی بین صفر و یک است که عددی به معنی تطابق کامل ورودی با یک قاعده و صفر به معنی عدم تطابق کامل هست و به مجموعه قواعد یک سیستم فازی پایگاه قواعد می‌گویند. این مجموعه قواعد به نحوی ایجاد می‌گردند که بیانگر یک توصیف انسانی و یا یک استنتاج انسانی از سیستم مورد نظر باشند. معمولاً پایگاه قواعد به نحوی ایجاد می‌گردند که کلیه ترکیبات ممکن از حالت‌های مختلف ورودی را شامل شده و مشخص کنند که در

هر حالت، خروجی چه باید باشد و قواعد فازی در موتور استنتاج فازی مورد استفاده قرار می‌گیرند تا پاسخ مناسب ایجاد گردد. معمولا در یک سیستم به تعداد حاصل ضرب مجموعه‌های فازی ورودی‌ها در یکدیگر، قاعده فازی وجود دارد.

برای غیرفازی کردن روش‌های مختلفی وجود دارد که مهم‌ترین آن‌ها مطابق شکل ۴-۵، عبارت‌اند از:

- روش گرانیگاه که در آن، گرانیگاه سطح اصلی محاسبه و روی محور افقی تصویر می‌شود. این روش دقیق‌ترین روش غیرفازی سازی است.
- روش نیم ساز سطح که در آن، نقطه‌ای تعیین می‌شود که سطح را به دو بخش مساوی تقسیم نماید.
- روش میانگین حداکثرها که در این روش میانگین مقادیر با بالاترین مقدار عضویت به‌عنوان خروجی در نظر گرفته می‌شود.
- روش کوچک‌ترین حداکثرها که در آن، کم‌ترین مقدار از تمام مقادیر با بالاترین درجه عضویت به عنوان خروجی در نظر گرفته می‌شود.
- روش بزرگ‌ترین حداکثرها که مبتنی بر بزرگ‌ترین مقدار از تمام مقادیر با بالاترین درجه عضویت است.



شکل ۴-۵: نمای شما تیک از روش‌های مختلف غیرفازی سازی

در این تحقیق از غیر فازی ساز گرانیگاه برای غیر فازی کردن ماتریس اندرکنش استفاده شده است.

۴-۴ - تعیین ماتریس اندرکنش با نگرش فازی

همان طور که در مقدمه اشاره شد به علت عدم دانش کافی در رابطه با بعضی از فرایندها در روند تخریب، به خصوص در بخش خردشوندگی ثانویه، در رابطه با اندرکنش بعضی از عوامل بر یکدیگر، بین کارشناسان اختلاف نظر وجود دارد. در این تحقیق برای کاهش عدم قطعیت موجود در اندرکنش بین عوامل، از سیستم‌های فازی استفاده شده است.

ابتدا ورودی‌های سیستم فازی تعیین شده است. برای تعیین ورودی برای هر درایه ماتریس، تعداد کارشناسانی که هر یک از اندرکنش‌های صفر تا ۴ را انتخاب کرده‌اند، تعیین شده است. سپس این مقادیر نرمال شده است. به عنوان مثال، اگر از بین ۱۲ کارشناس ۶ کارشناس، حالت بدون اندرکنش، ۲ کارشناس اندرکنش ضعیف و ۴ کارشناس اندرکنش متوسط را برای تاثیر عامل A بر B انتخاب کرده باشند، در این صورت ورودی نرمال شده برای اندرکنش A بر B به صورت $\{0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0\}$ خواهد آمد. در مرحله بعد دو مجموعه فازی ضعیف^۱ و قوی^۲ مطابق شکل ۴-۶، در نظر گرفته شده است. هر یک از اعداد نرمال شده می‌تواند تابع عضویتی شامل دو حالت را در برگیرد که آیا کارشناسان احتمال قوی را برای آن اندرکنش در نظر گرفته‌اند یا احتمال ضعیف. به عنوان مثال اگر N روی مجموعه فازی «ضعیف» قرار گیرد یعنی این که اکثر کارشناسان بر این که اندرکنش دو عامل بر یکدیگر عددی غیر از صفر است اتفاق نظر دارند. برای فازی سازی تعداد نظر کارشناسان مبنا قرار داده شده و دو مجموعه فازی قوی و ضعیف برای آن تعریف شده است. پس از

^۱ Low

^۲ High

نرمال سازی برای هر عامل مجموعه‌هایی بین صفر تا ۱ حاصل می‌شود برای هر درایه از ماتریس اندرکنش تعداد انتخاب‌های هر یک از اعداد اندرکنش به شکل زیر تعیین می‌شود:

N : تعداد کارشناسانی که بدون اندرکنش را انتخاب نموده‌اند.

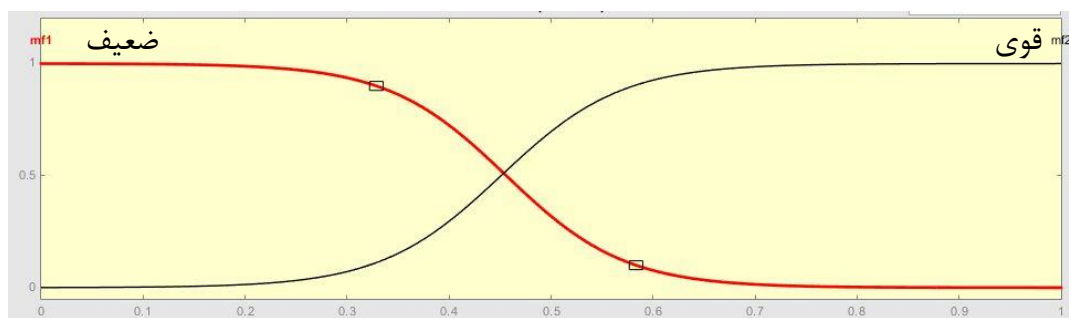
N_1 : تعداد کارشناسانی که اندرکنش ضعیف را انتخاب نموده‌اند.

N_2 : تعداد کارشناسانی که اندرکنش متوسط را انتخاب نموده‌اند.

N_3 : تعداد کارشناسانی که اندرکنش قوی را انتخاب نموده‌اند.

N_4 : تعداد کارشناسانی که اندرکنش بحرانی را انتخاب نموده‌اند.

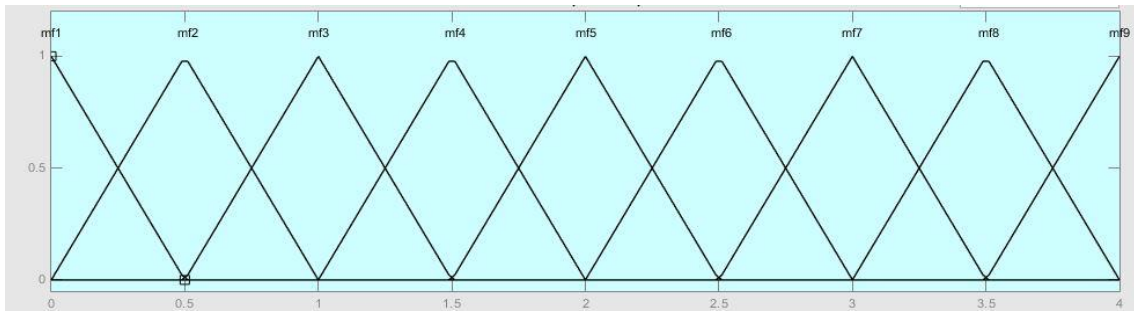
به عنوان نمونه اگر N_4 مطابق با قوی باشد به معنای احتمال بالا برای اندرکنش بحرانی بین عوامل خواهد بود. برای هر درایه ماتریس ۵ ورودی وجود خواهد داشت.



شکل ۴-۶: مجموعه فازی تعریف شده

خروجی سیستم فازی، اندرکنش محاسبه‌شده توسط سیستم فازی است. بدین ترتیب یک ماتریس خروجی 23×23 که برآیند نظر کارشناسان است وجود خواهد داشت. برای بیان دقیق‌تر اندرکنش بین عوامل، ۹ تابع عضویت مطابق شکل ۴-۷، تعیین شده است.

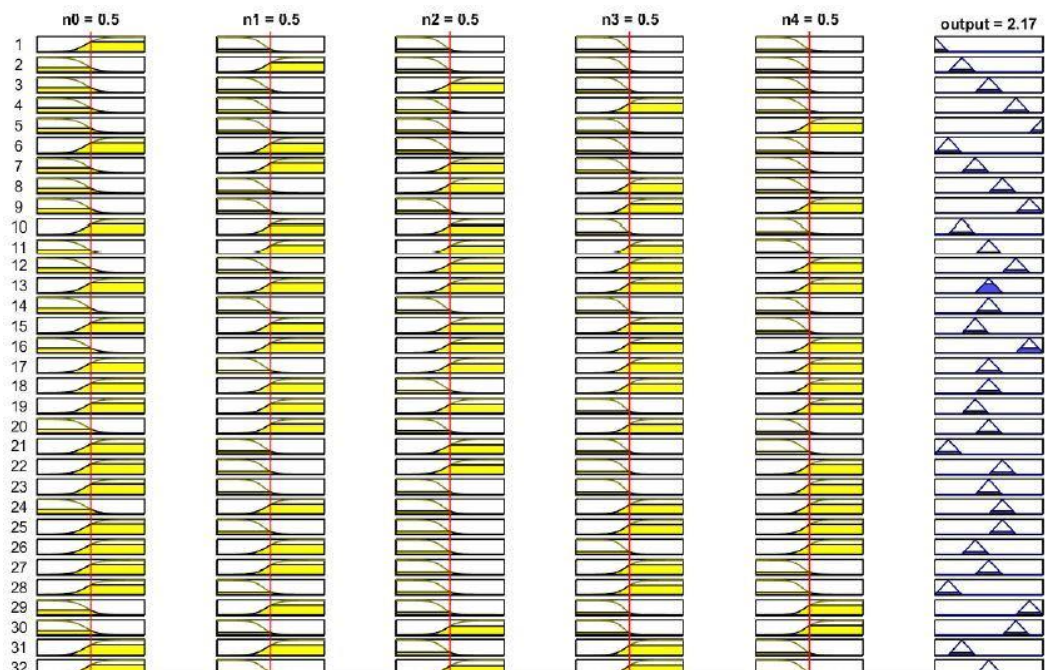
فصل چهارم: برآورد شاخص امکان پذیری پیاده سازی روش استخراج تخریب توده ای



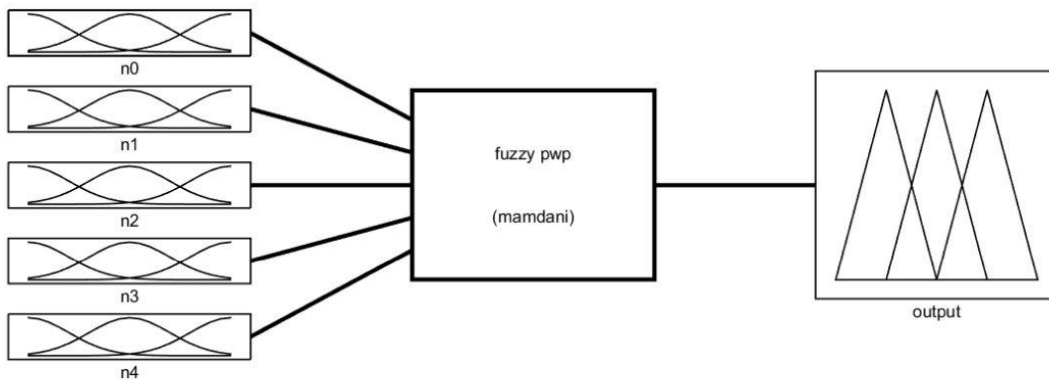
شکل ۴-۷: تابع عضویت خروجی

همچنین برای طراحی سیستم فازی باید پایگاه قوانین فازی مشخص گردد. بر اساس تعداد ورودی‌ها (۵ مورد) و مجموعه حالات ممکن برای آن‌ها (که هر ورودی دو تابع عضویت قوی و ضعیف دارد) تعداد ۳۲ قانون (۲^۵) می‌تواند در پایگاه داده آن نوشته شود. در شکل ۴-۸، نمونه قوانین فازی برای عامل P_1 نمایش داده شده است.

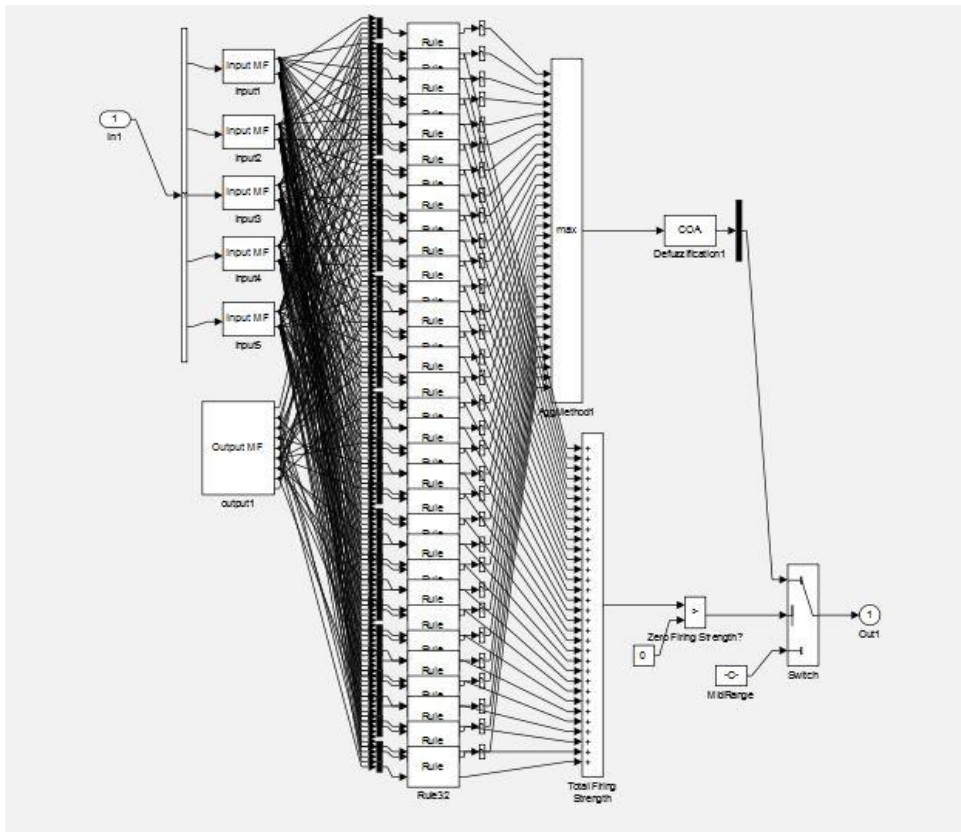
سیستم فازی طراحی شده با ۵ ورودی، ۳۲ قانون فازی و یک خروجی به شکل ۴-۹، است. که شکل گسترده آن در شکل ۴-۱۰، ارایه شده است.



شکل ۴-۸: قوانین طرح شده برای عامل P_1

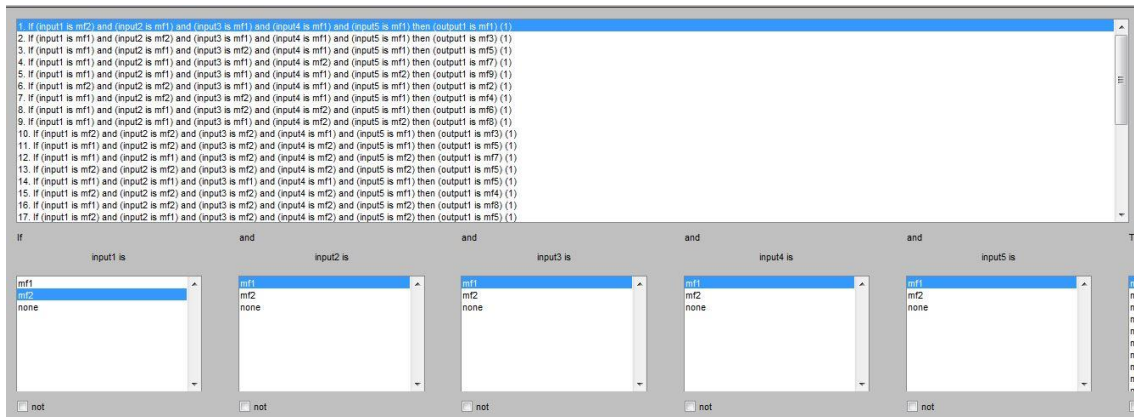


شکل ۴-۹: سیستم فازی شامل ۵ ورودی و یک خروجی



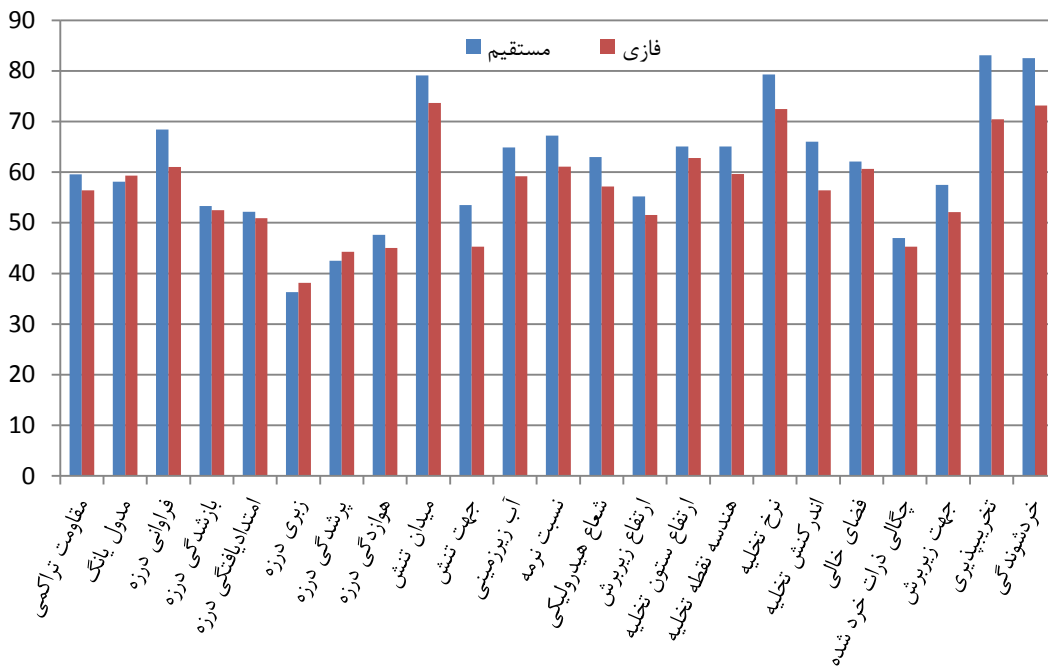
شکل ۴-۱۰: باز شده سیستم فازی شامل ورودی، قوانین و خروجی

همچنین تصویری از قوانین فازی نوشته شده در متلب در شکل ۴-۱۱، ارائه شده است.



شکل ۴-۱۱: نمونه‌ای از قوانین فازی نوشته شده در سیستم فازی

با اعمال سیستم فازی فوق، بر روی داده‌های اولیه، ماتریس اندرکنش مستقیم فازی عوامل موثر بر امکان‌پذیری روش تخریب توده‌ای مطابق جدول ۴-۲، به دست آمده است. سپس با محاسبه‌ی علت و اثر هر عامل، هیستوگرام بررسی ویژگی‌های ماتریس اندرکنش فازی، در مقابل ماتریس اندرکنش مستقیم در شکل ۴-۱۲، ترسیم شده است. همانطور که در شکل ۴-۱۲، مشاهده می‌شود، اگر چه رتبه‌بندی عوامل موثر بر امکان‌پذیری پیاده‌سازی روش تخریب توده‌ای بر اساس شدت اندرکنش عوامل، در دو روش کلاسیک و فازی تغییر قابل توجهی نکرده است، اما میزان اندرکنش بعضی از عوامل در دو روش، تفاوت قابل ملاحظه‌ای داشته است. به عنوان مثال، اندرکنش عوامل فراوانی درزه، میدان تنش، آب زیرزمینی، نسبت نرمه و نرخ تخلیه در نتایج حاصل از ماتریس فازی، کاهش چشمگیری نسبت به اندرکنش همین عوامل در روش مستقیم کلاسیک داشته است. تفاوت نتایج در مقادیر شدت اندرکنش این عوامل در دو روش، به معنای اختلاف نظر بین کارشناسان در رابطه با میزان تاثیر این عوامل بر یکدیگر است، به طوری که میانگین حسابی نظرات کارشناسان، به علت پراکندگی نظرات آن‌ها، با مقدار خروجی سیستم فازی تفاوت دارد.



شکل ۴-۱۲: هیستوگرام بررسی ویژگی‌های ماتریس اندرکنش فازی، در مقابل ماتریس اندرکنش مستقیم

فصل چهارم: برآورد شاخص امکان پذیری پیاده سازی روش استخراج تخریب توده‌ای

جدول ۴-۲: ماتریس اندرکنش مستقیم فازی عوامل موثر بر امکان پذیری پیاده سازی روش تخریب توده‌ای

P ₁	۲/۸۳	۲/۷۷	۲/۷۷	۳/۷۲	۲/۱۷	۲/۱۷	۲/۷۲	۳/۷	۱/۱۲	۰/۶۶	۳/۲۷	۲/۸۳	۲/۸۳	۳/۷	۲/۸۳	۲/۷۱	۱/۱۸	۳/۸۳	۲/۷۲	۲/۷۲	۳/۸۳	۲/۷۲	۳/۸۳
۲/۸۳	P ₂	۲/۷۷	۲/۷۲	۳/۷۲	۲/۷۲	۲/۷۲	۲/۷۲	۱/۳۱	۰/۳۵	۱/۱۲	۲/۸۳	۲/۸۳	۲/۸۳	۲/۷	۲/۷۱	۱/۱۸	۳/۸۳	۲/۷۲	۲/۷۲	۳/۸۳	۲/۷۲	۳/۸۳	۲/۷۲
۰/۶۶	۲/۱۷	P ₃	۱/۸۸	۳/۷۲	۱/۱۸	۱/۱۸	۲/۷	۲/۷	۲/۷۲	۲/۸۳	۲/۶۴	۲/۷	۲/۷۱	۳/۷۹	۳/۷۲	۱/۱۸	۳/۸۳	۲/۷۲	۲/۷۲	۳/۸۳	۲/۷۲	۳/۸۳	۲/۷۲
۰/۳۵	۱/۳۱	۱/۱۸	P ₄	۲/۷۲	۲/۷۲	۲/۸۳	۱/۸۸	۰/۹۳	۲/۸۳	۲/۷	۱/۰۲	۱/۰۱	۱/۰۲	۱/۰۲	۱/۰۲	۱/۳۱	۲/۷۱	۱/۸۸	۱/۳۱	۲/۷۷	۱	۳/۸۳	۳/۸۳
۰/۶۶	۲/۱۷	۲/۷۷	۲/۷۲	P ₅	۱/۰۲	۱/۴۹	۲/۷۱	۱/۴۹	۱/۸۸	۳/۲۷	۲/۸۳	۱/۳۱	۱/۴۹	۱/۱۸	۱/۸۸	۰/۹۳	۱/۱۲	۰/۹۳	۲/۷۱	۲/۷۱	۲/۷۱	۲/۷۱	۲/۷۱
۰/۳۵	۲/۱۷	۱/۱۲	۳/۷	۱/۱۸	P ₆	۲/۷۹	۲/۷۱	۱/۰۲	۰/۴۱	۳/۲۷	۲/۷۷	۱/۱۸	۱/۱۸	۰/۹۳	۱/۱۲	۱/۱۲	۰/۹۳	۱/۱۸	۰/۹۳	۲/۷۱	۲/۷۱	۲/۷۱	۲/۷۱
۲/۱۷	۲/۷۲	۰/۱۹	۲/۷۲	۱/۱۸	۳/۷	۲/۷۱	P ₇	۲/۷	۱/۰۲	۲/۷	۱/۴۹	۱/۱۸	۱/۱۸	۱/۴۹	۱/۱۸	۰/۹۳	۱/۱۸	۱/۱۸	۱/۱۸	۲/۱۷	۱/۱۸	۳/۸۳	۲/۸۳
۳/۲۷	۱/۸۸	۳/۷۹	۱/۴۹	۲/۷۲	۰/۴۱	۱/۱۸	۰/۴۱	P ₈	۱/۰۲	۰/۴۱	۲/۷۱	۱/۳۱	۱/۳۱	۲/۷	۲/۸۳	۲/۶۴	۲/۷۲	۲/۶۴	۲/۷۲	۲/۷۲	۲/۶۴	۲/۷۲	۲/۷۲
۱/۱۸	۱/۱۸	۱/۴۹	۱/۴۹	۱/۸۸	۰/۴۱	۱/۱۸	۰/۱۷	P ₉	۱/۳۱	۱/۳۱	۲/۷۱	۲/۷۱	۲/۷۱	۲/۸۳	۲/۸۳	۲/۶۴	۲/۶۴	۲/۶۴	۲/۷۲	۲/۷۲	۲/۶۴	۲/۷۲	۲/۷۲
۱/۴۹	۲/۷۷	۱/۸۸	۳/۲۷	۱/۳۱	۳/۷	۲/۸۳	۲/۷۲	P ₁₀	۰/۳۵	۰/۳۵	۱/۴۹	۲/۸۳	۲/۸۳	۲	۲/۸۳	۲/۷۲	۲/۷۲	۲/۸۳	۲/۸۳	۲/۸۳	۲/۸۳	۲/۷۲	۲/۷۲
۰/۱۹	۰/۳۵	۰/۱۷	۰/۱۶	۰/۱۶	۰/۱۷	۰/۳۵	۰/۹۳	P ₁₁	۱/۴۹	۱/۴۹	۲/۸۳	۲/۸۳	۲/۸۳	۲/۷	۲/۷۱	۱/۸۸	۱/۱۸	۱/۱۸	۲/۷۱	۲/۷۱	۲/۷۱	۲/۷۱	۲/۷۱
۰/۱۷	۰/۱۶	۰/۱۹	۰/۱۶	۰/۱۶	۰/۱۶	۱/۸۸	۰/۳۵	P ₁₂	۱/۳۱	۱/۳۱	۱/۱۸	۱/۱۸	۱/۱۸	۲/۷	۲/۷۱	۲/۷۲	۲/۷۲	۲/۷۲	۲/۷۲	۲/۷۲	۲/۷۲	۲/۷۲	۲/۷۲
۰/۱۶	۰/۱۷	۰/۱۹	۰/۱۷	۰/۱۷	۰/۱۶	۲/۷۷	۱/۱۲	P ₁₃	۰/۹۳	۰/۹۳	۲/۷	۲/۷	۲/۷	۱	۲/۷	۲/۷۲	۲/۷۲	۲/۷۲	۲/۷۲	۲/۷۲	۲/۷۲	۲/۷۲	۲/۷۲
۰/۱۶	۰/۱۷	۰/۱۶	۰/۱۷	۰/۱۶	۰/۱۶	۱/۱۲	۰/۹۳	P ₁₄	۲/۸۳	۲/۸۳	۲/۷۷	۲/۷۷	۲/۷۷	۲/۷۲	۲/۶۴	۲/۶۴	۲/۶۴	۲/۶۴	۲/۶۴	۲/۶۴	۲/۶۴	۲/۶۴	۲/۶۴
۰/۱۶	۰/۱۷	۰/۱۷	۰/۱۷	۰/۱۶	۰/۱۶	۲/۷۷	۱/۱۲	P ₁₅	۱/۴۹	۱/۴۹	۱/۸۸	۱/۸۸	۱/۸۸	۲/۷۲	۲/۸۳	۲/۸۳	۲/۸۳	۲/۸۳	۲/۸۳	۲/۸۳	۲/۸۳	۲/۸۳	۲/۸۳
۰/۱۶	۰/۱۷	۰/۴۱	۰/۴۱	۰/۱۷	۰/۱۶	۲/۸۳	۰/۴۱	P ₁₆	۲/۸۳	۲/۸۳	۲/۷۲	۲/۷۲	۲/۷۲	۲/۸۳	۲/۸۳	۲/۸۳	۲/۸۳	۲/۸۳	۲/۸۳	۲/۸۳	۲/۸۳	۲/۸۳	۲/۸۳
۰/۱۶	۰/۱۷	۰/۱۷	۰/۱۷	۰/۱۷	۰/۱۶	۳/۸۳	۰/۹۳	P ₁₇	۲/۸۳	۲/۸۳	۲/۷۲	۲/۷۲	۲/۷۲	۲/۸۳	۲/۸۳	۲/۸۳	۲/۸۳	۲/۸۳	۲/۸۳	۲/۸۳	۲/۸۳	۲/۸۳	۲/۸۳
۰/۱۶	۰/۱۷	۰/۱۷	۰/۱۷	۰/۱۷	۰/۱۶	۱/۱۲	۰/۹۳	P ₁₈	۲/۸۳	۲/۸۳	۲/۷۲	۲/۷۲	۲/۷۲	۲/۸۳	۲/۸۳	۲/۸۳	۲/۸۳	۲/۸۳	۲/۸۳	۲/۸۳	۲/۸۳	۲/۸۳	۲/۸۳
۰/۱۶	۰/۱۷	۰/۳۵	۰/۱۷	۰/۱۷	۰/۱۶	۱/۱۲	۰/۹۳	P ₁₉	۱/۳۱	۱/۳۱	۱/۳۱	۱/۳۱	۱/۳۱	۱/۳۱	۱/۳۱	۱/۳۱	۱/۳۱	۱/۳۱	۱/۳۱	۱/۳۱	۱/۳۱	۱/۳۱	۱/۳۱
۰/۱۷	۰/۴۱	۰/۱۶	۰/۱۶	۰/۱۶	۰/۱۶	۲/۷۷	۰/۴۱	P ₂₀	۲/۷۷	۲/۷۷	۲/۷۷	۲/۷۷	۲/۷۷	۲/۷۷	۲/۷۷	۲/۷۷	۲/۷۷	۲/۷۷	۲/۷۷	۲/۷۷	۲/۷۷	۲/۷۷	۲/۷۷
۰/۱۶	۰/۱۷	۱/۱۲	۰/۱۷	۰/۱۷	۰/۱۶	۳/۲۷	۱/۰۲	P ₂₁	۱/۰۲	۱/۰۲	۱/۰۲	۱/۰۲	۱/۰۲	۱/۰۲	۱/۰۲	۱/۰۲	۱/۰۲	۱/۰۲	۱/۰۲	۱/۰۲	۱/۰۲	۱/۰۲	۱/۰۲
۰/۱۹	۰/۱۷	۰/۴۱	۰/۱۷	۰/۱۷	۰/۱۶	۲/۷۲	۰/۶۶	P ₂₂	۲/۷۲	۲/۷۲	۲/۷۷	۲/۷۷	۲/۷۷	۲/۷۷	۲/۷۷	۲/۷۷	۲/۷۷	۲/۷۷	۲/۷۷	۲/۷۷	۲/۷۷	۲/۷۷	۲/۷۷
۰/۳۵	۰/۴۱	۰/۱۶	۰/۱۷	۰/۱۷	۰/۱۶	۱/۱۸	۰/۳۵	P ₂₃	۳/۷۲	۳/۷۲	۳/۷۲	۳/۷۲	۳/۷۲	۳/۷۲	۳/۷۲	۳/۷۲	۳/۷۲	۳/۷۲	۳/۷۲	۳/۷۲	۳/۷۲	۳/۷۲	۳/۷۲

P₁: مقاومت تراکمی تک‌محوره، P₂: نسبت مدولی، P₃: فراوانی ناپیوستگی، P₄: بازتابی ناپیوستگی، P₅: پایداری ناپیوستگی، P₆: زبری ناپیوستگی، P₇: پرشدگی ناپیوستگی، P₈: هوازدهگی ناپیوستگی، P₉: میدان تنش، P₁₀: جهت تنش، P₁₁: آب زیرزمینی، P₁₂: نسبت نرمه، P₁₃: ضعیف هیدرولیکی، P₁₄: ارتفاع زیر برش، P₁₅: ارتفاع بلوک، P₁₆: هندسه نقاط تخلیه، P₁₇: نرخ تخلیه، P₁₈: اندرکنش نقاط تخلیه، P₁₉: فضای خالی، P₂₀: چگالی کانه خردشده، P₂₁: جهت زیر برش، P₂₂: قابلیت تخریب، P₂₃: خوردشدگی.

۴-۵- تعیین ماتریس اندرکنش غیر مستقیم به روش تحلیل

ساختاری

همان طور که پیش تر در متن رساله عنوان شده است، در اکثر کاربردهای روش سیستم‌های مهندسی سنگ، اندرکنش مستقیم عوامل در نظر گرفته شده است. در هر دو روش مستقیم و فازی استفاده شده در بخش قبل، اثرات غیر مستقیم عوامل بر یکدیگر در نظر گرفته نشده است. در این راستا، ماتریس اندرکنش غیرمستقیم عوامل موثر بر امکان‌پذیری پیاده‌سازی روش تخریب توده‌ای، با استفاده از روش تحلیل ساختاری PWP محاسبه شده است. به منظور محاسبه‌ی ماتریس اندرکنش غیرمستقیم، یک کد متلب تهیه شده است. در زمان اجرای کد مقدار اولیه λ در رابطه (۳-۸)، عدد ۳ در نظر گرفته شده^۱ و فرایند اجرای برنامه به این صورت است که ابتدا مقادیر شدت اثرگذاری و شدت وابستگی و شدت اندرکنش برای هر عامل در ماتریس اندرکنش مستقیم فازی (ورودی) محاسبه شده است. سپس رتبه‌بندی عوامل بر اساس شدت اثرگذاری، شدت وابستگی و شدت اندرکنش به صورت سه لیست مجزا انجام شده است. با اعمال عدد یک برای متغیر K ، تغییری در رتبه‌بندی عوامل ایجاد نخواهد شد. بنابراین برای اولین مرحله از اجرا، به K مقدار ۲ اختصاص داده می‌شود. سپس مجدد رتبه‌بندی عوامل به صورت سه لیست مجزا انجام می‌شود. تطابق رتبه‌بندی عوامل در دو روش مستقیم و غیرمستقیم در مرحله اول محاسبات ($K=2$)، به معنی عدم تاثیر غیرمستقیم عوامل بر یکدیگر و توقف محاسبه‌ی ماتریس اندرکنش غیرمستقیم است. در صورت عدم تطابق نتایج رتبه‌بندی در این مرحله، محاسبات با افزایش متوالی K تا زمان به تعادل رسیدن سیستم، ادامه می‌یابد.

شرط تعادل و توقف محاسبات این است که رتبه‌بندی شدت اثرگذاری، شدت وابستگی و شدت اندرکنش عوامل در دو سری متوالی از محاسبات (k و $k-1$)، یکسان باشد. در محاسبه‌ی ماتریس

^۱ رجوع شود به بند ۳-۴-۴

فصل چهارم: برآورد شاخص امکان‌پذیری پیاده‌سازی روش استخراج تخریب توده‌ای

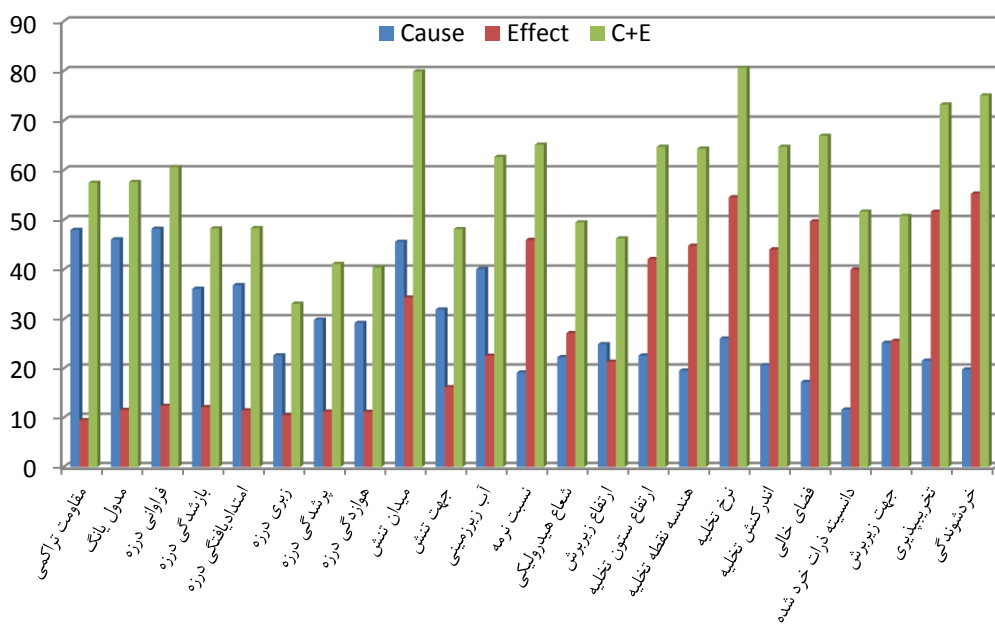
اندرکنش غیرمستقیم، در K برابر با عدد ۹، سیستم به تعادل رسیده و عملیات محاسبه متوقف شده است. ماتریس نهایی اندرکنش غیرمستقیم عوامل موثر بر خردشوندگی محاسبه و در جدول ۳-۴، ارائه شده است. همان‌طور که در جدول ۳-۴، مشاهده می‌شود درایه‌های واقع بر قطر اصلی ماتریس اندرکنش غیرمستقیم، ارقام مخالف صفر دریافت کرده‌اند که نشان‌دهنده اثرگذاری هر عامل بر خودش است و بزرگی آن، نشان‌دهنده شدت تاثیراتی است که آن عامل از طریق تاثیرات متقاطع از مسیر عوامل دیگر دریافت کرده است.

جدول ۳-۴: ماتریس اندرکنش غیرمستقیم عوامل موثر بر روند تخریب با استفاده از روش PWP

P_1	P_2	P_3	P_4	P_5	P_6	P_7	P_8	P_9	P_{10}	P_{11}	P_{12}	P_{13}	P_{14}	P_{15}	P_{16}	P_{17}	P_{18}	P_{19}	P_{20}	P_{21}	P_{22}	P_{23}	P_{24}	
۰.۷	۰.۸	۰.۹	۰.۹	۰.۸	۰.۸	۰.۸	۰.۸	۰.۸	۲.۵	۱.۲	۱.۶	۳.۳	۲	۱.۶	۳	۳.۲	۳.۹	۳.۲	۳.۶	۲.۹	۱.۹	۳.۷	۴	۴۸.۲
۰.۷	۰.۸	۰.۹	۰.۹	۰.۸	۰.۷	۰.۸	۰.۸	۰.۸	۲.۴	۱.۱	۱.۶	۳.۲	۱.۹	۱.۵	۲.۹	۳.۱	۳.۷	۳	۳.۴	۲.۷	۱.۸	۳.۶	۳.۸	۴۶.۱
۰.۷	۰.۸	۰.۹	۰.۹	۰.۸	۰.۸	۰.۸	۰.۸	۰.۸	۲.۵	۱.۲	۱.۶	۳.۳	۲	۱.۵	۳	۳.۲	۳.۹	۳.۲	۳.۶	۲.۹	۱.۹	۳.۷	۴	۴۸
۰.۵	۰.۶	۰.۷	۰.۷	۰.۶	۰.۶	۰.۶	۰.۶	۰.۶	۱.۸	۰.۹	۱.۲	۲.۵	۱.۵	۱.۲	۲.۳	۲.۴	۲.۹	۲.۴	۲.۷	۲.۱	۱.۴	۲.۸	۳	۳۶.۱
۰.۵	۰.۷	۰.۷	۰.۷	۰.۶	۰.۶	۰.۶	۰.۶	۰.۶	۱.۹	۰.۹	۱.۳	۲.۵	۱.۵	۱.۲	۲.۳	۲.۵	۳	۲.۴	۲.۷	۲.۲	۱.۴	۲.۹	۳.۱	۳۶.۸
۰.۳	۰.۴	۰.۴	۰.۴	۰.۴	۰.۴	۰.۴	۰.۴	۰.۴	۱.۲	۰.۵	۰.۸	۱.۶	۰.۹	۰.۷	۱.۴	۱.۵	۱.۸	۱.۵	۱.۷	۱.۴	۰.۹	۱.۸	۱.۹	۲۲.۷
۰.۴	۰.۵	۰.۶	۰.۶	۰.۵	۰.۵	۰.۵	۰.۵	۰.۵	۱.۵	۰.۷	۱	۲	۱.۲	۱	۱.۹	۲	۲.۴	۱.۹	۲.۲	۱.۸	۱.۲	۲.۳	۲.۵	۲۹.۹
۰.۴	۰.۵	۰.۶	۰.۶	۰.۵	۰.۵	۰.۵	۰.۵	۰.۵	۱.۵	۰.۷	۱	۲	۱.۲	۱	۱.۸	۲	۲.۴	۱.۹	۲.۲	۱.۷	۱.۱	۲.۳	۲.۴	۲۹.۲
۰.۶	۰.۸	۰.۹	۰.۸	۰.۸	۰.۷	۰.۸	۰.۸	۰.۸	۲.۴	۱.۱	۱.۵	۳.۱	۱.۹	۱.۵	۲.۹	۳.۱	۳.۷	۳	۳.۴	۲.۷	۱.۸	۳.۵	۳.۸	۴۵.۶
۰.۵	۰.۶	۰.۶	۰.۶	۰.۶	۰.۵	۰.۵	۰.۵	۰.۵	۱.۷	۰.۸	۱.۱	۲.۲	۱.۳	۱	۲	۲.۲	۲.۶	۲.۱	۲.۴	۱.۹	۱.۲	۲.۵	۲.۷	۳۱.۹
۰.۶	۰.۷	۰.۸	۰.۸	۰.۷	۰.۷	۰.۷	۰.۷	۰.۷	۲.۱	۱	۱.۴	۲.۸	۱.۷	۱.۳	۲.۵	۲.۷	۳.۲	۲.۶	۳	۲.۴	۱.۵	۳.۱	۳.۳	۴۰.۱
۰.۳	۰.۳	۰.۴	۰.۳	۰.۳	۰.۳	۰.۳	۰.۳	۰.۳	۱	۰.۵	۰.۶	۱.۳	۰.۸	۰.۶	۱.۲	۱.۳	۱.۶	۱.۳	۱.۴	۱.۲	۰.۷	۱.۵	۱.۶	۱۹.۲
۰.۳	۰.۴	۰.۴	۰.۴	۰.۴	۰.۳	۰.۴	۰.۴	۰.۴	۱.۲	۰.۵	۰.۸	۱.۶	۰.۹	۰.۷	۱.۴	۱.۵	۱.۹	۱.۵	۱.۷	۱.۴	۰.۹	۱.۷	۱.۹	۲۲.۳
۰.۳	۰.۴	۰.۵	۰.۴	۰.۴	۰.۴	۰.۴	۰.۴	۰.۴	۱.۳	۰.۶	۰.۸	۱.۷	۱	۰.۸	۱.۶	۱.۷	۲.۱	۱.۷	۱.۹	۱.۵	۱	۱.۹	۲.۱	۲۴.۹
۰.۳	۰.۴	۰.۴	۰.۴	۰.۴	۰.۳	۰.۴	۰.۴	۰.۴	۱.۲	۰.۶	۰.۸	۱.۶	۰.۹	۰.۷	۱.۴	۱.۵	۱.۹	۱.۵	۱.۷	۱.۴	۰.۹	۱.۸	۱.۹	۲۲.۶
۰.۳	۰.۳	۰.۴	۰.۳	۰.۳	۰.۳	۰.۳	۰.۳	۰.۳	۱	۰.۵	۰.۷	۱.۴	۰.۸	۰.۶	۱.۲	۱.۳	۱.۶	۱.۳	۱.۵	۱.۲	۰.۷	۱.۵	۱.۶	۱۹.۶
۰.۴	۰.۴	۰.۵	۰.۵	۰.۴	۰.۴	۰.۴	۰.۴	۰.۴	۱.۳	۰.۶	۰.۹	۱.۸	۱.۱	۰.۸	۱.۷	۱.۸	۲.۲	۱.۸	۲	۱.۶	۱	۲	۲.۲	۲۶.۱
۰.۳	۰.۳	۰.۴	۰.۴	۰.۳	۰.۳	۰.۳	۰.۳	۰.۳	۱.۱	۰.۵	۰.۷	۱.۴	۰.۸	۰.۶	۱.۳	۱.۴	۱.۷	۱.۴	۱.۶	۱.۳	۰.۸	۱.۶	۱.۷	۲۰.۷
۰.۲	۰.۳	۰.۳	۰.۳	۰.۳	۰.۳	۰.۳	۰.۳	۰.۳	۰.۹	۰.۴	۰.۶	۱.۲	۰.۷	۰.۵	۱.۱	۱.۲	۱.۴	۱.۲	۱.۳	۱.۱	۰.۷	۱.۳	۱.۴	۱۷.۲
۰.۲	۰.۲	۰.۲	۰.۲	۰.۲	۰.۲	۰.۲	۰.۲	۰.۲	۰.۶	۰.۳	۰.۴	۰.۸	۰.۵	۰.۴	۰.۷	۰.۸	۱	۰.۸	۰.۹	۰.۷	۰.۴	۰.۹	۱	۱۱.۷
۰.۴	۰.۴	۰.۵	۰.۴	۰.۴	۰.۴	۰.۴	۰.۴	۰.۴	۱.۳	۰.۶	۰.۹	۱.۷	۱	۰.۸	۱.۶	۱.۷	۲.۱	۱.۷	۱.۹	۱.۵	۱	۲	۲.۱	۲۵.۲
۰.۳	۰.۴	۰.۴	۰.۴	۰.۴	۰.۳	۰.۴	۰.۳	۱.۱	۰.۵	۰.۷	۱.۵	۰.۹	۰.۷	۱.۴	۱.۵	۱.۸	۱.۵	۱.۶	۱.۳	۰.۸	۱.۷	۱.۸	۲۱.۶	
۰.۳	۰.۳	۰.۴	۰.۳	۰.۳	۰.۳	۰.۳	۰.۳	۱	۰.۵	۰.۷	۱.۴	۰.۸	۰.۶	۱.۳	۱.۳	۱.۶	۱.۳	۱.۵	۱.۲	۰.۸	۱.۵	۱.۶	۱۹.۸	
۹.۵	۱۱.۶	۱۲.۴	۱۲.۱	۱۱.۵	۱۰.۵	۱۱.۲	۱۱.۲	۳۴.۳	۱۶.۲	۲۲.۶	۴۶	۲۷.۲	۲۱.۴	۴۲.۱	۴۴.۱	۵۴.۶	۴۴.۱	۴۹.۷	۴۰	۲۵.۶	۵۱.۶	۵۵.۳	اثر	

P_1 مقاومت تراکمی تک‌محوره، P_2 نسبت مدولی، P_3 فراوانی ناپیوستگی، P_4 بازشدگی ناپیوستگی، P_5 پایایی ناپیوستگی، P_6 زبری ناپیوستگی، P_7 پرشدگی ناپیوستگی، P_8 هوازدگی ناپیوستگی، P_9 میدان تنش، P_{10} جهت تنش، P_{11} آب زیرزمینی، P_{12} نسبت نرمه، P_{13} شعاع هیدرولیکی، P_{14} ارتفاع زیر برش، P_{15} ارتفاع بلوک، P_{16} هندسه نقاط تخلیه، P_{17} نرخ تخلیه، P_{18} اندرکنش نقاط تخلیه، P_{19} فضای خالی، P_{20} چگالی کانه خردشده، P_{21} جهت زیر برش، P_{22} قابلیت تخریب، P_{23} خردشوندگی.

همان طور که مشاهده می‌شود به علت اثرات متقاطع بین عوامل، مقادیر اندرکنش عوامل در روش غیر مستقیم با مقادیر اندرکنش عوامل متناظر در روش مستقیم متفاوت است. در شکل ۴-۱۳، هیستوگرام شدت اثرگذاری، شدت وابستگی و اندرکنش غیرمستقیم عوامل موثر بر خردشوندگی ترسیم شده است. همان طور که در شکل ۴-۱۳، مشاهده می‌شود، فراوانی ناپیوستگی‌ها، مقاومت تراکمی تک‌محوره، میدان تنش‌های برجا، مدول الاستیک، پایایی و بازشدگی درزه به ترتیب اثرگذارترین عوامل در سیستم هستند. همچنین چگالی سنگ‌های خردشده، ارتفاع فضای خالی و نسبت نرمه به ترتیب کمترین اثرگذاری را بر سیستم دارند. بیشترین غلبه سیستم بر عوامل مربوط به گروه‌های عوامل هندسی و عملیاتی است. عوامل نرخ تخلیه، میدان تنش، فضای خالی، نسبت نرمه، ارتفاع ستون تخلیه و هندسه نقاط تخلیه بیشترین اندرکنش را با سیستم دارند.



شکل ۴-۱۳: هیستوگرام شدت اثرگذاری، وابستگی و اندرکنش عوامل موثر بر امکان پذیری پیاده‌سازی روش تخریب توده‌ای، در روش غیرمستقیم

سهم هر عامل از کل شدت اثرگذاری، وابستگی و اندرکنش عوامل موثر بر خردشوندگی توده سنگ و مقدار درصد تغییر سهم آن‌ها در مقایسه‌ی دو روش مستقیم فازی و روش غیرمستقیم فازی محاسبه و در جدول ۴-۴، ارایه شده است. برای سهولت مقایسه، تغییرات مثبت، به رنگ سبز نمایش داده شده است. همان‌طور که در جدول ۴-۴، مشاهده می‌شود، شدت اثرگذاری کلیه عوامل ژئومکانیکی در روش غیرمستقیم افزایش داشته است. شدت اثرگذاری غیرمستقیم اکثر عوامل محیطی به‌استثنای نسبت نرمه نسبت به روش مستقیم افزایش یافته است. در کلیه موارد از گروه عوامل هندسی و عوامل عملیاتی، به‌جز جهت زیربری، کاهش اثرگذاری مشاهده شده است.

سهم وابستگی کلیه عوامل ژئومکانیکی در روش غیرمستقیم فازی نسبت به روش مستقیم کاهش قابل ملاحظه‌ای داشته است که به‌طور دقیقی بیانگر بهبود مدل نسبت به حالت مستقیم و تایید‌کننده تاثیرپذیری کم عوامل ژئومکانیکی از عوامل انسانی و عملیاتی است. سهم شدت وابستگی اکثر عوامل محیطی افزایش داشته است به‌جز آب زیرزمینی که نسبت به حالت مستقیم ۴/۸ درصد کاهش سهم داشته است.

در بررسی اندرکنش عوامل در جدول ۴-۴، مشاهده می‌شود سهم اندرکنش اکثر عوامل محیطی، هندسی و عملیاتی در روش غیرمستقیم به‌طور قابل ملاحظه‌ای نسبت به حالت مستقیم، افزایش یافته است. از آنجا که عوامل گروه هندسی و عملیاتی با تغییر در طراحی، قابلیت تغییر و بازبینی در کلیه مراحل استخراج را دارند. بنابراین می‌توان با تغییر در عوامل این دو گروه میزان خردشوندگی توده سنگ را بهبود بخشید.

در شکل ۴-۱۴، هیستوگرام سهم شدت اندرکنش عوامل موثر بر خردشوندگی در دو روش فازی RES و روش غیرمستقیم فازی با یکدیگر مقایسه شده است. مقایسه سهم اندرکنش مستقیم و غیرمستقیم عوامل در شکل ۴-۱۴، نشان می‌دهد که سهم اندرکنش عوامل نرخ تخلیه، اندرکنش بیضی‌های تخلیه، ارتفاع فضای خالی، چگالی کانه خرد شده، هندسه نقاط تخلیه و ارتفاع ستون تخلیه از گروه عوامل هندسی و عملیاتی به‌طور قابل ملاحظه‌ای نسبت به روش مستقیم افزایش

داشته است. مقدار اندرکنش تمامی عوامل ژئومکانیکی در روش غیرمستقیم تعدیل شده است و اندرکنش عوامل ژئومکانیکی نسبت به حالت مستقیم کاهش اندکی داشته است. عوامل ژئومکانیکی جزو خصوصیات ذاتی توده سنگ هستند و عملاً تغییر در آن‌ها با بعضی روش‌های القایی پرهزینه، نظیر شکست هیدرولیکی امکان‌پذیر است و به‌طور معمول از سایر عوامل کمتر تاثیر می‌پذیرند و به همین دلیل در روش غیرمستقیم که علاوه بر روابط مستقیم بین عوامل، روابط غیرمستقیم و کاملاً مرتبط عوامل را در نظر می‌گیرد، اندرکنش آن‌ها کمتر شده است.

جدول ۴-۴: مقایسه سهم شدت اثرگذاری، شدت وابستگی و شدت اندرکنش هر عامل در دو روش مستقیم و غیرمستقیم

عوامل	اثرگذاری			وابستگی			اندرکنش		
	مستقیم	غیرمستقیم	تغییر (%)	مستقیم	غیرمستقیم	تغییر (%)	مستقیم	غیرمستقیم	تغییر (%)
عوامل ژئومکانیکی	مقاومت تراکمی تک‌محوره	۶,۸۸	۷,۲۵	۵,۲	۱,۷۴	۱,۴۳	۸,۶۲	۸,۶۸	۰,۶
	مدول الاستیک	۶,۵۷	۶,۹۲	۵,۳	۲,۵	۱,۷۴	۹,۰۸	۸,۶۶	-۴,۵
	فراوانی درزه	۷	۷,۲۱	۳	۲,۳۳	۱,۸۷	۹,۳۴	۹,۰۸	-۲,۷
	بازشدگی ناپیوستگی	۵,۲۱	۵,۴۳	۴,۲	۲,۸۲	۱,۸۳	۸,۰۲	۷,۲۶	-۹,۷
	پایایی	۵,۱۹	۵,۵۴	۶,۷	۲,۵۹	۱,۷۳	۷,۷۸	۷,۲۶	-۶,۷
	زبری سطح ناپیوستگی	۳,۲۸	۳,۴	۳,۹	۲,۵۵	۱,۵۷	۵,۸۲	۴,۹۸	-۱۴,۶
	پرشدگی ناپیوستگی	۴,۱۹	۴,۴۹	۷,۳	۲,۵۸	۱,۶۹	۶,۷۶	۶,۱۸	-۸,۶
	شرایط سطح ناپیوستگی	۴,۱۸	۴,۳۹	۵,۲	۲,۷	۱,۶۸	۶,۸۸	۶,۰۸	-۱۱,۶
عوامل محیطی	میدان تنش	۶,۵۵	۶,۸۵	۴,۵	۴,۷۱	۵,۱۶	۱۱,۲۶	۱۲	۶,۶
	جهت تنش‌ها	۴,۶۶	۴,۸	۲,۹	۲,۲۶	۲,۴۳	۶,۹۲	۷,۲۴	۴,۵
	آب زیرزمینی	۵,۴۸	۶,۰۳	۱۰	۳,۵۷	۳,۳۹	۹,۰۴	۹,۴۲	۴,۲
	نسبت نرمه	۳,۲۲	۲,۸۸	-۱۰,۴	۶,۱۲	۶,۹۱	۱۲,۸	۹,۸	۴,۸
عوامل هندسی	شعاع هیدرولیکی	۳,۶۳	۳,۳۵	-۷,۶	۵,۱۱	۴,۰۹	۸,۷۴	۷,۴۴	-۱۴,۸
	ارتفاع زیر برش	۳,۹۹	۳,۷۴	-۶,۱	۳,۸۹	۳,۲۱	۷,۸۸	۶,۹۶	-۱۱,۷
	ارتفاع ستون تخلیه	۳,۷۴	۳,۴	-۹,۱	۵,۸۶	۶,۳۳	۹,۶	۹,۷۲	۱,۴
	هندسه نقاط تخلیه	۳,۲	۲,۹۴	-۸,۱	۵,۹۲	۶,۷۳	۹,۱۲	۹,۶۸	۶,۱
عوامل عملیاتی	نرخ تخلیه	۴,۲۵	۳,۹۲	-۷,۹	۶,۸۲	۸,۲	۱۱,۰۸	۱۲,۱۲	۹,۴
	اندرکنش نقاط تخلیه	۳,۵۵	۳,۱	-۱۲,۵	۵,۰۷	۶,۶۲	۸,۶۲	۹,۷۲	۱۲,۸
	ارتفاع فضای خالی	۲,۷۶	۲,۵۹	-۶,۲	۶,۵۱	۷,۴۷	۹,۲۸	۱۰,۰۶	۸,۵
	چگالی کانه خردشده	۱,۸۸	۱,۷۵	-۶,۹	۵,۰۴	۶,۰۱	۶,۹۲	۷,۷۶	۱۲,۲
سیستم	جهت زیر بری	۳,۶۹	۳,۷۹	۲,۸	۴,۲۸	۳,۸۵	۷,۹۶	۷,۶۴	-۴,۱
	قابلیت تخریب	۳,۴۹	۳,۲۴	-۷,۱	۷,۲۸	۷,۷۶	۱۰,۷۶	۱۱	۲,۲
	خردشوندگی	۳,۴۱	۲,۹۷	-۱۲,۹	۷,۷۸	۸,۳۱	۱۱,۱۸	۱۱,۲۸	۰,۸

کاهش اندرکنش غیرمستقیم عوامل ژئومکانیکی به معنی نفی اثرات عمده و بحرانی این عوامل در فرایند تخریب نیست بلکه به این معنی است که در یک سیستم تعاملی پویا، کنترل طراحان معدن بر روی این عوامل کمتر است و در نتیجه برای بهبود شرایط تخریب، طراحان بهتر است با تغییر در عوامل که بیشترین اندرکنش را در سیستم دارند و از طرفی با هزینه کمتر قابل اجرا هستند، سیستم را بهبود بخشند.

نکته‌ی قابل توجه در بررسی نمودار میله‌ای شکل ۴-۱۴، عدم تغییر قابل توجه در اندرکنش مقاومت تراکمی سنگ بکر در دو روش است، به طوری که میزان اندرکنش در روش غیرمستقیم تنها ۰/۶ درصد افزایش داشته است. این اتفاق تأییدی بر صحت عملکرد سیستم اندرکنش غیرمستقیم است. زیرا همان طور که انتظار می‌رود مقاومت تراکمی سنگ بکر، عاملی است که اگرچه تاثیر قابل توجهی در خردشوندگی توده سنگ دارد، اما در طول فرایند تخریب میزان آن ممکن است تنها به مقدار کمی به واسطه افزایش ریزترک‌های میکروسکوپی کاهش یابد.

اندرکنش غیرمستقیم عوامل ارتفاع زیربرش و جهت حفر زیربرش با سایر عوامل، کاهش اندکی را در مقایسه با روش مستقیم نشان می‌دهد. علت کاهش در رابطه با این دو عامل این است که این دو عامل پس از طراحی اولیه به ندرت توسط کارشناسان تغییر داده می‌شوند و عملاً جزو عوامل طراحی اولیه معدن به حساب می‌آیند، بنابراین از دید کارشناسان بیشتر به عنوان عوامل تاثیرگذار در نظر گرفته شده‌اند، تا عوامل دریافت‌کننده‌ی تاثیر و از آنجا که در مکاتبات با کارشناسان بر این نکته تأکید شده که در پاسخ به سؤالات، سیستم به عنوان یک سیستم پویا در نظر گرفته شود، نتیجه حاصل تأکید دوباره بر بهبود امتیازدهی سیستم غیرمستقیم است.

به طور کلی در میزان اندرکنش غیرمستقیم اکثر عوامل محیطی، هندسی و عملیاتی نسبت به روش مستقیم افزایش مشاهده می‌شود. گفتنی است که عوامل که بیشتر قابلیت کنترل و تغییر دارند، افزایش بیشتری را تجربه کرده‌اند.

در گروه عوامل محیطی، اندرکنش غیرمستقیم عوامل، افزایش کمی نسبت به اندرکنش مستقیم داشته است. لذا با توجه به میانگین بالای سهم اندرکنش این عوامل در سیستم در صورت نیاز می توان با تمهیداتی نظیر شکست هیدرولیکی، ایجاد برش های قائم مرزی، آبکشی و ...، با تغییر در این عوامل، تغییرات قابل ملاحظه ای در خردشوندگی توده سنگ ایجاد کرد. در گروه عوامل هندسی و عملیاتی اکثر عوامل، افزایش قابل توجه میزان اندرکنش غیرمستقیم را در مقایسه با اندرکنش مستقیم نشان می دهند. تنها دو عامل شعاع هیدرولیکی و ارتفاع زیربرش با کاهش سهم ۱۴٫۸ و ۱۱٫۷ درصدی نسبت به حالت مستقیم مواجه شده اند. بنابراین با تغییر عوامل هندسی و عملیاتی به خصوص با تغییر در سرعت تخلیه و کنترل تخلیه از نقاط تخلیه مجاور که دارای بالاترین اندرکنش با سیستم هستند، می توان میزان خردشوندگی را کنترل کرد.

در جدول ۴-۵، مقایسه ی رتبه بندی شدت اثرگذاری، شدت وابستگی و شدت اندرکنش عوامل ارایه شده است. همان طور که مشاهده می شود RES و PWP موثر بر خردشوندگی در دو روش رتبه بندی عوامل در دو روش با یکدیگر متفاوت است. به عنوان مثال رتبه ی اندرکنش بیضوی های تخلیه در روش غیرمستقیم با ۶ رتبه افزایش نسبت به روش مستقیم در جایگاه هشتم اهمیت در بین عوامل موثر بر خردشوندگی قرار گرفته است. همچنین عامل ارتفاع زیربرش با ۳ رتبه افت در روش غیرمستقیم در جایگاه ۲۰ اهمیت قرار گرفته است.

جدول ۴-۶، به تفکیک گروه های چهارگانه ذکر شده، عوامل دارای بیشترین سهم، کمترین سهم، میانگین سهم عوامل در هر گروه و مجموع سهم کلیه ی عوامل بر اساس میزان شدت اثرگذاری، شدت وابستگی و شدت اندرکنش مشخص شده است.

همان طور که در

جدول ۴-۶، مشاهده می شود عامل P۳ با سهم ۷/۲۴ درصد و عامل P۲۰ با سهم ۱/۷۵ درصد بیشترین و کمترین سهم شدت اثرگذاری بر عوامل را در همه گروه ها دارند. در رابطه با شدت وابستگی بالاترین و کمترین شدت اثرپذیری مربوط به عوامل P۱۷ با ۸٫۲ درصد و عامل P۱ با ۱٫۴۳

فصل چهارم: برآورد شاخص امکان‌پذیری پیاده‌سازی روش استخراج تخریب توده‌ای

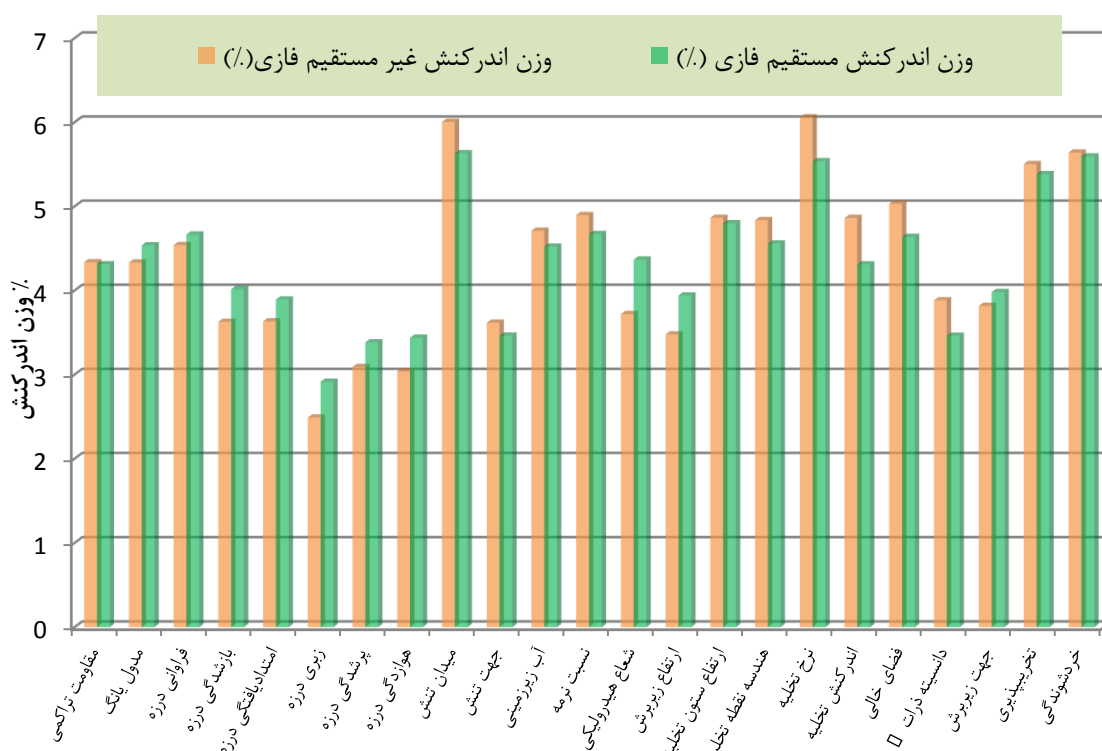
درصد سهم است. در بخش اندرکنش عوامل موثر بر خردشوندگی عامل P_{17} با 6.06% درصد و P_6 با سهم 2.49% درصد، بیشترین و کمترین سهم اندرکنش را در سیستم دارا هستند. در رابطه با سهم هر عامل در هر گروه، گروه عوامل ژئومکانیکی با میانگین 3.64 و عوامل عملیاتی با سهم 4.97% درصد به ترتیب کمترین و بیشترین اندرکنش میانگین را بر سیستم دارا هستند.

جدول ۴-۵: مقایسه‌ی رتبه‌بندی عوامل موثر بر خردشوندگی در دو روش مستقیم و غیرمستقیم

رتبه‌بندی بر مبنای اندرکنش			رتبه‌بندی بر مبنای اثرگذاری			رتبه‌بندی بر مبنای وابستگی		
مستقیم فازی	ترتیب	غیرمستقیم	مستقیم فازی	ترتیب	غیرمستقیم	مستقیم فازی	ترتیب	غیرمستقیم
SF	۱	D _{Ra}	FF	۱	FF	Frg	۱	Frg
Frg	۲	SF	UCS	۲	UCS	Cav	۲	D _{Ra}
D _{Ra}	۳	Frg	EM	۳	EM	D _{Ra}	۳	Cav
Cav	۴	Cav	SF	۴	SF	AG	۴	AG
DCH	۵	AG	GW	۵	GW	FMR	۵	FMR
FMR	۶	FMR	Di _{Ap}	۶	Di _{Per}	DPG	۶	DPG
FF/m	۷	DCH	Di _{Per}	۷	Di _{Ap}	DCH	۷	MDI
AG	۸	MDI	S _{Dir}	۸	S _{Dir}	HR	۸	DCH
DPG	۹	DPG	D _{Ra}	۹	Di _{Fill}	MDI	۹	BOD
EM	۱۰	GW	Di _{Fill}	۱۰	Di _{Alt}	BOD	۱۰	SF
GW	۱۱	FF/m	Di _{Alt}	۱۱	D _{Ra}	SF	۱۱	HR
HR	۱۲	UCS	UH	۱۲	U _{Dir}	U _{Dir}	۱۲	U _{Dir}
UCS	۱۳	EM	DCH	۱۳	UH	UH	۱۳	GW
MDI	۱۴	BOD	U _{Dir}	۱۴	Di _{Rou}	GW	۱۴	UH
Di _{ap}	۱۵	U _{Dir}	HR	۱۵	DCH	Di _{Ap}	۱۵	S _{Dir}
U _{Dir}	۱۶	HR	MDI	۱۶	HR	Di _{Alt}	۱۶	FF
UH	۱۷	Di _{Per}	Cav	۱۷	Cav	Di _{Per}	۱۷	Di _{Ap}
Di _{Per}	۱۸	Di _{ap}	Frg	۱۸	MDI	Di _{Fill}	۱۸	EM
S _{Dir}	۱۹	S _{Dir}	Di _{Rou}	۱۹	Frg	Di _{Rou}	۱۹	Di _{Per}
BOD	۲۰	UH	FMR	۲۰	DPG	EM	۲۰	Di _{Fill}
Di _{Alt}	۲۱	Di _{Fill}	DPG	۲۱	FMR	FF	۲۱	Di _{Alt}
Di _{Fill}	۲۲	Di _{Alt}	AG	۲۲	AG	S _{Dir}	۲۲	Di _{Rou}
Di _{Rou}	۲۳	Di _{Rou}	BOD	۲۳	BOD	UCS	۲۳	UCS

جدول ۴-۶: مقایسه میزان تاثیر عوامل در بین گروه‌های مختلف عوامل موثر

گروه	شدت اثرگذاری بر سیستم (%)				شدت اثرپذیری از سیستم (%)				شدت اندرکنش با سیستم (%)			
	بیشترین	کمترین	میانگین	کل گروه	بیشترین	کمترین	میانگین	کل گروه	بیشترین	کمترین	میانگین	کل گروه
عوامل ژئومکانیکی	(P_{12}) ۷,۲۴	(P_{11}) ۳,۴۰	۵,۵۸	۴۴,۶۴	(P_{11}) ۱,۸۷	(P_{12}) ۱,۴۳	۱,۶۹	۱۳,۵۳	(P_{12}) ۴,۵۴	(P_{11}) ۲,۴۹	۳,۶۴	۲۹,۱
عوامل محیطی	(P_{12}) ۶,۸۵	(P_{11}) ۲,۸۸	۵,۱۴	۲۰,۵۶	(P_{11}) ۶,۹۱	(P_{12}) ۲,۴۳	۴,۴۷	۱۷,۹۰	(P_{12}) ۶,۰۰	(P_{11}) ۳,۶۲	۴,۸۱	۱۹,۲۳
عوامل هندسی	(P_{11}) ۳,۷۴	(P_{12}) ۲,۹۴	۴,۳۴	۱۷,۳۵	(P_{12}) ۶,۷۳	(P_{11}) ۳,۲۱	۵,۱۰	۲۰,۳۶	(P_{12}) ۴,۸۶	(P_{11}) ۳,۴۸	۴,۲۲	۱۶,۹۰
عوامل عملیاتی	(P_{11}) ۳,۹۱	(P_{12}) ۱,۷۵	۳,۰۳	۱۵,۱۵	(P_{11}) ۸,۱۹	(P_{12}) ۳,۸۵	۶,۴۳	۳۲,۱۵	(P_{12}) ۶,۰۶	(P_{11}) ۳,۸۱	۴,۹۷	۲۹,۱۵



شکل ۴-۱۴: مقایسه‌ی هیستوگرام شدت اندرکنش عوامل موثر بر خردشوندگی در روش مستقیم و غیرمستقیم

به‌طور کلی مشاهده می‌شود، در رابطه با عواملی که بیشترین امکان تغییر از دیدگاه مهندسی را دارند، تفاوت در مقادیر مربوط به اندرکنش بین عوامل قابل‌ملاحظه است. از طرفی تغییرات انجام‌گرفته کاملاً منطقی و قابل توجیه است.

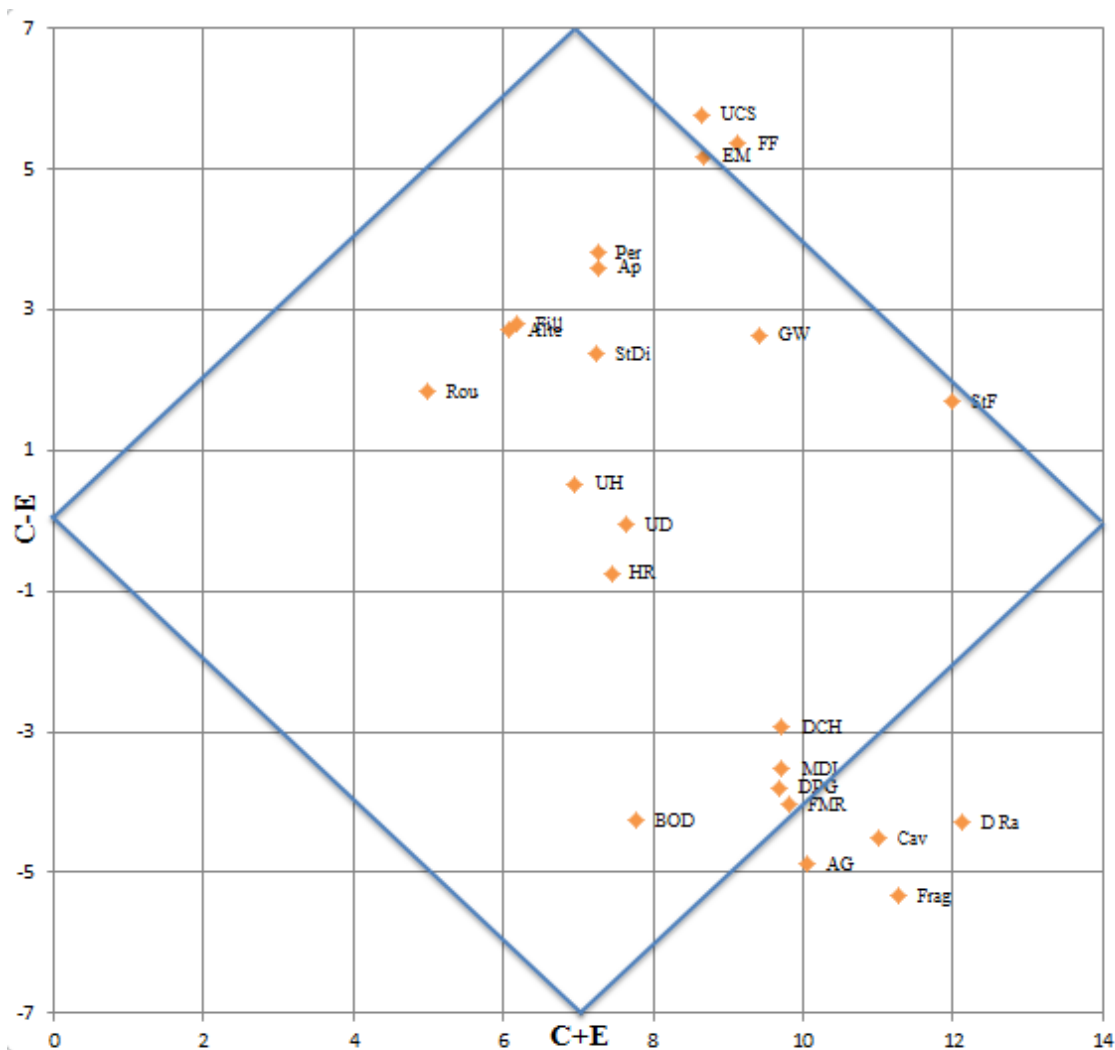
به‌منظور دید بهتر، نمودار علت-اثر برای ماتریس اندرکنش غیرمستقیم فازی در شکل ۴-۱۵، ارائه شده است.

عوامل که دارای مقادیر بالاتر (C-E) هستند بر سیستم غالب^۱ هستند و بر عکس عاملی که کمترین مقدار (C-E) را داشته باشد، بیشتر تحت تاثیر سیستم (مغلوب)^۲ قرار دارد. در شکل ۴-۱۵، مشاهده می‌شود عوامل ژئومکانیکی دارای بیشترین مقادیر (C-E) هستند. این عوامل با توجه به اینکه از عامل‌های ذاتی توده سنگ هستند، تاثیرپذیری کمتری از سیستم و سایر عوامل دارند و بیشتر غالب هستند تا اثرپذیر. در نقطه مقابل عوامل عملیاتی و هندسی در سیستم بیشتر اثر پذیر هستند. عامل‌های مقاومت تراکمی تک‌محوره، فراوانی درزه‌ها و مدول الاستیک به ترتیب غالب‌ترین عوامل بر سیستم هستند و عوامل خردشوندگی، ارتفاع فضای خالی، قابلیت تخریب و نرخ تخلیه به ترتیب مغلوب‌ترین (اثرپذیرترین) عوامل در سیستم هستند. همچنین مشاهده می‌شود نرخ تخلیه و میدان تنش بیشترین اندرکنش و عامل زبری درزه کمترین اندرکنش را در سیستم دارند.

به‌طور کلی، همان‌طور که در هیستوگرام شکل ۴-۱۴، مشخص است اکثر عوامل ژئومکانیکی و محیطی بر سیستم غالب هستند و سایر عوامل مغلوب هستند. عوامل هندسی و پس از آن عوامل محیطی، عملیاتی و سیستم به ترتیب دارای بالاترین اندرکنش در سیستم هستند.

^۱ Dominant

^۲ Sobordinate



شکل ۴-۱۵: نمودار اثرگذاری-اثرپذیری عوامل موثر بر قابلیت معدنکاری روش تخریب توده‌ای

۴-۶- شاخص امکان‌پذیری پیاده‌سازی روش تخریب توده‌ای

در این بخش شاخص امکان‌پذیری با استفاده از سیستم مهندسی سنگ بهبود یافته، ارائه می‌شود. همان طور که پیش‌تر نیز اشاره شد، منظور از امکان‌پذیری پیاده‌سازی روش تخریب توده‌ای، امکان‌پذیری فنی بدون در نظر گرفتن مباحث اقتصادی است. از دیدگاه فنی، امکان‌پذیری پیاده‌سازی روش تخریب توده‌ای به معنی قابلیت تخریب توام با خردشوندگی اولیه و ثانویه مناسب توده سنگ است، به طوری که ابعاد قطعات سنگ در نزدیکی نقاط تخلیه نه آن قدر بزرگ باشند که

باعث گیرافتادگی در قیف‌های تخلیه شوند و نه آن قدر ریز که باعث هجوم گل و یا اثر بالشتکی بین بلوک‌ها در ستون تخلیه شوند.

بعد از تهیه ماتریس اندرکنش و به دست آوردن مقادیر $C+E$ (شدت اثرگذاری) می‌توان شاخصی که دربرگیرنده همه عوامل اثرگذار بر سیستم باشد را به دست آورد.

به‌طور کلی هر چه یک سیستم بیشتر تحت تاثیر اندرکنش عوامل باشد، ناپایدارتر خواهد بود. چون با تغییر اندک در یک عامل، احتمال این‌که رفتار سیستم به طور قابل‌توجهی تغییر پیدا کند، وجود خواهد داشت.

با مشاهده هیستوگرام شدت اثرگذاری عوامل در شکل ۴-۱۳، مشاهده می‌شود که در اکثر عوامل مقدار شدت اندرکنش ($C+E$)، بالاتر از حد میانه است، بنابراین لازم است همه‌ی عوامل در محاسبه شاخص امکان‌پذیری مورد توجه قرار گیرند.

برای تعیین شاخص امکان‌پذیری، ابتدا طبقه‌بندی عوامل موثر بر روند تخریب انجام شده است. واضح است که طبقه‌بندی عوامل موثر بر سیستم به دلیل تاثیر مستقیم بر نتایج از اهمیت بسیاری برخوردار است. بنابراین مطالعه گسترده‌ای بر روی محدوده تغییرات عوامل انتخاب شده در معادن تخریب توده‌ای انجام شده است.

بر مبنای سیستم‌های طبقه‌بندی سنگ و نظرات کارشناسان، رده‌بندی عوامل موثر بر خردشوندگی در جدول ۴-۷، تنظیم شده است. در این طبقه‌بندی، عوامل به ۵ رده تقسیم شده‌اند و رده هر عامل از صفر تا ۴ تغییر می‌کند. در رابطه با عامل جهت زیربرش در جدول ۴-۷، رده‌بندی به‌صورت کیفی انجام شده است. تعیین رده کیفی تاثیر جهت زیربرش، در جدول ۴-۸، ارائه شده است. برای نشان دادن کاربرد شاخص امکان‌پذیری، معادن دیابلو رجیمنت، رنو و معدن کمث به عنوان مطالعات موردی در نظر گرفته شده‌اند.

جدول ۴-۷: رده‌بندی عوامل موثر بر خردشوندگی

ردیف	عوامل	واحد	رده‌بندی				
			۴	۳	۲	۱	۰
۱	مقاومت تراکمی	مگا پاسکال	<۲۵	۴۰ تا ۲۵	۷۰ تا ۴۰	۱۰۰ تا ۷۰	۱۰۰ <
۲	نسبت مدولی	-	<۴۰۰	۴۰۰ تا ۳۰۰	۳۰۰ تا ۲۰۰	۲۰۰ تا ۱۰۰	۱۰۰ <
۳	فراوانی ناپیوستگی‌ها	بر متر	۸ <	۸ تا ۵	۵ تا ۳	۳ تا ۱	۱ >
۴	بازشدگی	میلی‌متر	>۵	۵ تا ۳	۳ تا ۱	<۱	بدون بازشدگی
۵	پایایی	متر	>۵	۵ تا ۳	۳ تا ۱٫۵	۱٫۵ تا ۰٫۵	۰٫۵ >
۶	زبری ناپیوستگی (JRC)	-	<۲	۵ تا ۲	۱۰ تا ۵	۱۵ تا ۱۰	۲۰ تا ۱۵
۷	پرشده‌گی	میلی‌متر	پرشده‌گی نرم و بسیار نرم <۵ میلی‌متر	پرشده‌گی نرم > ۵ میلی‌متر	بدون پرشده‌گی	پرشده‌گی سخت < ۵ میلی‌متر	پرشده‌گی بسیار سخت
۸	هوازده‌گی	-	به شدت هوازده	هوازده	به طور نسبی هوازده	هوازده‌گی جزئی	بدون هوازده‌گی
۹	تنش‌های برجا	مگا پاسکال	>۲۰	۲۰ تا ۱۵	۱۵ تا ۱۰	۱۰ تا ۵	۵ >
۱۰	جهت تنش‌ها	درجه	به موازات دسته ناپیوستگی	با زاویه ۲۰ تا ۴۵ درجه نسبت به ناپیوستگی	با زاویه ۴۵ تا ۶۳ درجه نسبت به ناپیوستگی	با زاویه ۶۳ تا ۸۰ درجه نسبت به ناپیوستگی	عمود بر دسته ناپیوستگی
۱۱	آب زیرزمینی	-	با جریان زیاد	با جریان کم	در حال چکیدن	مرطوب	خشک
۱۲	نسبت نرمه	درصد	<۵	۱۰ تا ۵	۱۵ تا ۱۰	۲۰ تا ۱۵	۲۰ <
۱۳	شعاع هیدرولیکی	متر	>۶۰	۶۰ تا ۴۵	۴۵ تا ۳۰	۳۰ تا ۱۵	۱۵ >
۱۴	ارتفاع زیربرش	متر	>۱۲	۱۲ تا ۸	۸ تا ۶	۶ تا ۴	۴ >
۱۵	ارتفاع ستون تخلیه	متر	>۲۰۰	۲۰۰ تا ۱۵۰	۱۵۰ تا ۱۰۰	۱۰۰ تا ۵۰	۵۰ >
۱۶	هندسه نقاط تخلیه	S_{up}/S_{to}	>۶	۶ تا ۴	۴ تا ۳	۳ تا ۲	۲ >
۱۷	سرعت تخلیه ^۱	میلی‌متر بر روز	کمتر از ۱۰۰	۱۵۰ تا ۱۰۰	۲۰۰ تا ۱۵۰	۲۵۰ تا ۲۰۰	بیشتر از ۲۵۰
۱۸	اندرکنش بیضوی تخلیه	-	تخلیه هم‌زمان با ۸ قیف مجاور	تخلیه هم‌زمان با ۶ قیف مجاور	تخلیه هم‌زمان با ۴ قیف مجاور	تخلیه هم‌زمان با ۲ قیف مجاور	تخلیه منفرد
۱۹	ارتفاع فضای خالی	متر	>۶	۶ تا ۴	۴ تا ۲	۲ >	ناچیز
۲۰	چگالی کانه خردشده		>۱٫۸	۱٫۸ تا ۱٫۶	۱٫۶ تا ۱٫۴	۱٫۴ تا ۱٫۲	۱٫۲ >
۲۱	جهت زیر برش	-	بسیار مطلوب	مطلوب	متوسط	نامطلوب	بسیار نامطلوب
۲۲	قابلیت تخریب		بسیار مطلوب	مطلوب	متوسط	نامطلوب	بسیار نامطلوب
۲۳	خردشوندگی		بسیار مطلوب	مطلوب	متوسط	نامطلوب	بسیار نامطلوب

۱- سرعت تخلیه بسیار کند باعث پر شدن فضای تخریب و در نتیجه مانع از گسترش مناسب تخریب می‌شود

۴-۶-۱- معادن مورد مطالعه

معادن بخش ریزرو نورث^۱ (رنو) و دیابلو رجیمنت^۲ از مجموعه معادن التینیت^۳ و معدن کمث^۴ به دلیل تفاوت در ساختار زمین‌شناسی و ویژگی‌های توده سنگ و در نتیجه تفاوت در خردشوندگی آن‌ها به‌عنوان مطالعات موردی انتخاب شده‌اند. در این بخش معادن مذکور به‌طور اختصار معرفی شده‌اند.

التینیت بزرگ‌ترین کانسار پورفیری مولیبدن-مس شناخته شده‌ی دنیا در ۷۰ کیلومتری جنوب شرقی سانتیاگو در شیلی قرار دارد. عمق واقعی کانی‌سازی مس در کانسار التینیت ناشناخته است و گسترش آن تا عمق بیش از ۱۳۰۰ متر اثبات شده است. کل ذخیره مس با عیار بالاتر از ۰/۸۲ درصد، بیش از ۷۴ هزار میلیون تن برآورد شده است.

تولید روزانه معدن التینیت، ۱۴۰ هزار تن است. همان‌طور که در شکل ۴-۱۶، مشاهده می‌شود، به علت گسترش زیاد، کانسار التینیت در بخش‌های متعددی به روش‌های تخریب توده‌ای و یا تخریب پهنه‌ای استخراج می‌شود. از میان بخش‌های مختلف این معدن بخش ریزرو نورث (رنو) و بخش دیابلو رجیمنت برای بررسی خردشوندگی انتخاب شده‌اند (Brazovic, ۲۰۱۰).

جدول ۴-۸: ارزیابی شرایط زیربرش در معادن تخریب توده‌ای

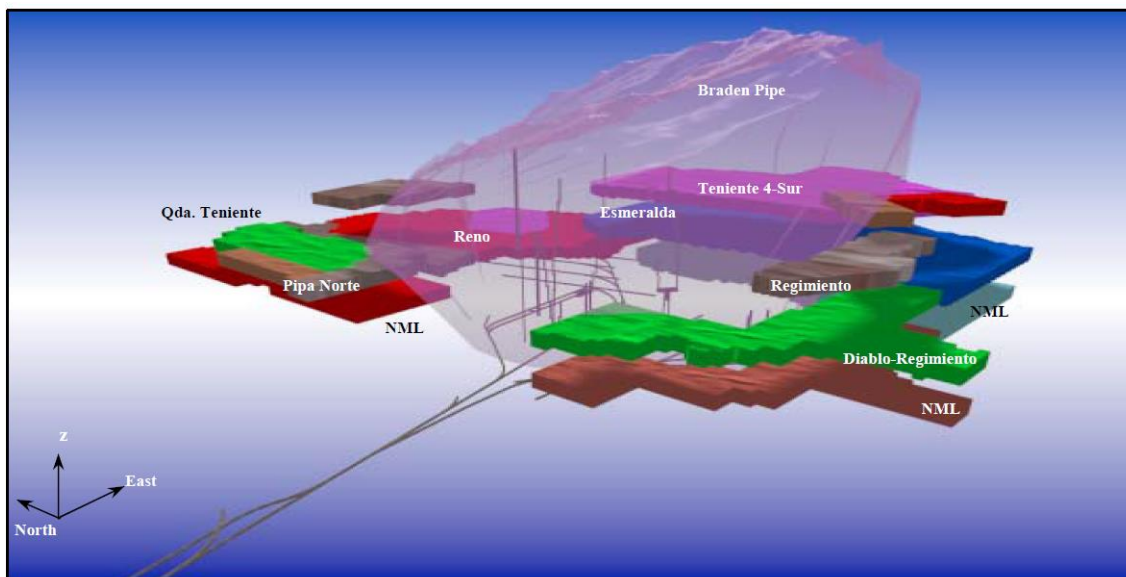
بسیار نامطلوب	نامطلوب	متوسط	مطلوب	بسیار مطلوب
زیربری در جهت تنش مخالف تنش اصلی حداکثر، از سمت سنگ‌های سخت به سمت سنگ‌های نرم با پیشانی نامنظم	زیربری در جهت مخالف تنش اصلی حداکثر، از سمت سنگ‌های سخت به سمت سنگ‌های نرم با پیشانی منظم	زیربری بدون توجه به جهت تنش اصلی حداکثر و از سمت سنگ‌های ضعیف به سمت سنگ‌های سخت و یا از سمت بلوک‌های قبلی استخراج شده	زیربری در جهت مخالف تنش اصلی حداکثر، از سمت سنگ‌های سخت به سمت سنگ‌های نرم با پیشانی منظم	زیربری در جهت تنش اصلی حداکثر و از سمت سنگ‌های ضعیف به سمت سنگ‌های سخت در حاشیه کانسار

^۱ Reserve north

^۲ Diablo Regimente

^۳ Elteniente

^۴ Kemess



شکل ۴-۱۶: تصویر جانمایی فضایی بخش‌های مختلف معدن التنینت (Brazovic, ۲۰۱۰)

الف) معدن دیابلو رجیمنت: معدن دیابلو رجیمنت در بخش جنوبی کانسار التنینت و در پایین دست معدن فور رجیمنت^۱ و در مجاورت معدن اسمرلدا^۲ واقع شده است. حداکثر ارتفاع قابل برداشت برجا در این معدن ۱۵۰ متر است، به جز بخش انتهایی شمالی که دارای ارتفاع حدود ۶۰۰ متر است. میزان استخراج روزانه از این بخش ۲۸ هزار تن در روز با نرخ تخلیه ۰٫۳ تا ۰٫۶ تن بر روز بر مترمربع و با نرخ زیربرش ۳۰ هزار مترمربع در سال است. متوسط مقاومت تراکمی سنگ بکر ۱۱۶ مگا پاسکال و مدول الاستیک متوسط ۶۰ گیگا پاسکال است. سه دسته‌درزه اصلی در منطقه کانسار شناسایی شده است که مشخصات آن‌ها در جدول ۴-۹، گزارش شده است.

^۱ 4 Regimiente

^۲ Esmerelda

جدول ۴-۹: مشخصات ناپیوستگی‌های اصلی در معدن دیابلو رجیمنت (Brazovic, ۲۰۱۰)

شماره دسته‌دروزه	جهت درزه	شیب درزه
۱	$N66W \pm 20$	$66N \pm 20$
۲	$N22E \pm 12$	90 ± 8
۳	$N74W \pm 13$	$28N \pm 9$

اکثر درزه‌های برداشت‌شده حاوی مواد پرکننده بوده به طوری که ۸۰/۳ درصد درزه‌ها با مواد نرم نظیر کلریت و انیدرید و باقی‌مانده درزه‌ها، به جز ۱۶ درزه از هزار درزه‌ی برداشت‌شده، با مواد سخت (پیریت) پر شده‌اند.

در جدول ۴-۱۰، مقادیر شاخص طبقه‌بندی محاسبه شده برای توده سنگ حاوی کانی به روش‌های لابیچر، Q، IRMR، RMR و GSI ارایه شده است.

جدول ۴-۱۰: مقادیر شاخص طبقه بندی سنگ معدن دیابلو رجیمنت (Brazovic, ۲۰۱۰)

طبقه‌بندی	RMR _{Jubscher}	IRMR _(۲۰۰۰)	RMR	Q	GSI
مقدار	۵۵-۵۸	۵۳-۵۴	۶۸-۷۰	۷,۲	۷۰-۸۵

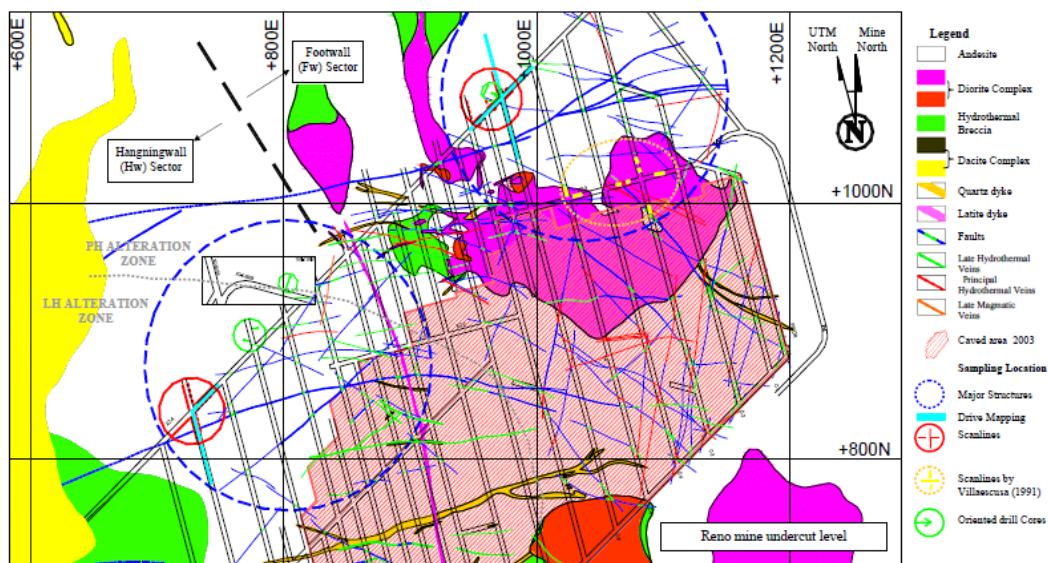
(ب) معدن رنو: معدن ریزرو نورث (رنو) در بخش شمالی کانسار التینت و در مجاورت بخش - های داسیتا^۱ و پولار نورث^۲ قرار دارد. سه نوع سنگ میزبان کانی شامل داسیت‌ها، دیوریت‌ها و آندزیت‌ها در منطقه وجود دارد. کانسار به دو بخش کمر بالا و کمر پایین تقسیم شده است که در شکل ۴-۱۷، مشاهده می‌شود. زیربرش به دو صورت زیربرش پیش‌رونده و زیربرش مرسوم استخراج

^۱ Dacita

^۲ Polar North

نواری اجرا شده است. زیربرش ایجادشده حدود ۲۷ هزار مترمربع با شعاع هیدرولیکی ۳۶ است که به علت شدت بالای اتفاقات لرزه‌ای تخلیه از سطح فعال ۱۱ هزار مترمربع با شعاع هیدرولیک ۲۵ آغاز شده است. ارتفاع ستون تخریب به‌طور متوسط ۱۹۰ متر بوده است (Brazovic, ۲۰۱۰).

در منطقه ریزرو نورث، وزن حجمی متوسط سنگ‌های کمربالا و کمرپایین به ترتیب ۲٫۸۴ و ۲٫۸ و مقاومت تراکمی تک‌محوره سنگ‌ها به ترتیب ۱۱۵ و ۱۱۰ مگا پاسکال به دست آمده است. مشخصات ژئومکانیکی سنگ بکر منطقه تخریب در جدول ۴-۱۱، ارائه شده است.



شکل ۴-۱۷: ژئولوژی منطقه و نمایی از نقاط نمونه‌گیری در تراز زیربرش (Brazovic, ۲۰۱۰)

جدول ۴-۱۱: مشخصات ژئومکانیکی سنگ‌های معدن رزرو نورته (Brazovic, ۲۰۱۰)

سنگ کمربالا	سنگ کمرپایین	عوامل
۲٫۸۴	۲٫۸	γ (ton/m ^۳)
۰٫۲۷	۰٫۲۷	v_i
۶۰	۶۰	E_i (GPa)
۱۲	۱۲	m_i
۱۱۵	۱۱۰	σ_{Ci} (MPa)
۵۷۰۰	۵۲۰۰	V_p (m/s)
۳۴۰۰	۳۶۰۰	V_s (m/s)

معدن کمث: معدن کمث یک کانسار پورفیری حاوی کانی‌های مس، طلا و نقره، در منطقه‌ای کوهستانی در شمال مرکزی ایالت بریتیش کلمبیا^۱ کانادا و در حدود ۲۵۰ کیلومتری شمال شهر اسمیترز^۲ است. همان طور که در شکل ۴-۱۸، دیده می‌شود در مدل آلتراسیون منطقه که از تحلیل داده‌های حاصل از ۷۲ گمانه اکتشافی عمیق به دست آمده به ترتیب از سطح زمین به سمت پایین، سه زون آلتراسیون، شامل منطقه سولفات، فیلیک و پتاسیک دیده می‌شود. از نقطه نظر لیتولوژی بلوک معدنی به دو بخش اصلی تکلا^۳ و بلک لیک^۴ تقسیم شده است. زیربرش در منطقه Black lake واقع شده است. محدوده‌ی کانی‌دار در عمق ۲۰۰ تا ۵۵۰ متری از سطح زمین قرار دارد. در این معدن از نرم‌افزار PCBC از مجموعه بسته‌های نرم‌افزاری شرکت Geovia(Gem Com)، به منظور تعیین تراز زیربرش بهینه، برای دستیابی به NPV حداکثر استفاده شده است (Jakubec, et al., ۲۰۱۶).

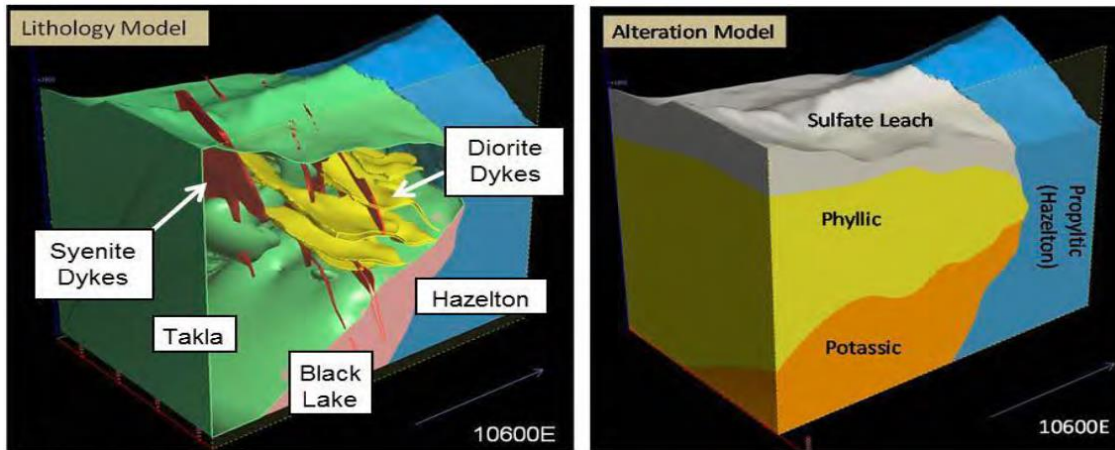
تراز زیربرش بهینه برای معدن کمث، با استفاده از نرم‌افزار PCBC در عمق ۵۵۰ متری، با ابعاد تقریبی ۵۵۰ متر در امتداد شرقی- غربی و ۹۰ تا ۳۰۰ متر در امتداد شمالی- جنوبی برآورد شده است. کانسار شامل یک محدوده‌ی کم‌عیار در عمق ۱۵۰ متری در بخش غربی و یک محدوده‌ی با عیار بالاتر در عمق ۳۰۰ تا ۵۵۰ متری در بخش شرقی است. طراحی این معدن بر مبنای تولید سالانه ۹ میلیون تن انجام شده است (Jakubec, et al., ۲۰۱۶). نمای سه‌بعدی بلوک معدن در شکل ۴-۱۹، ارایه شده است. برای تخمین خردشوندگی معدن کمث در فاز امکان‌سنجی، از نرم‌افزار خردشوندگی تخریب توده‌ای (BCF) استفاده شده است (Jakubec, et al., ۲۰۱۶).

^۱ British columbia

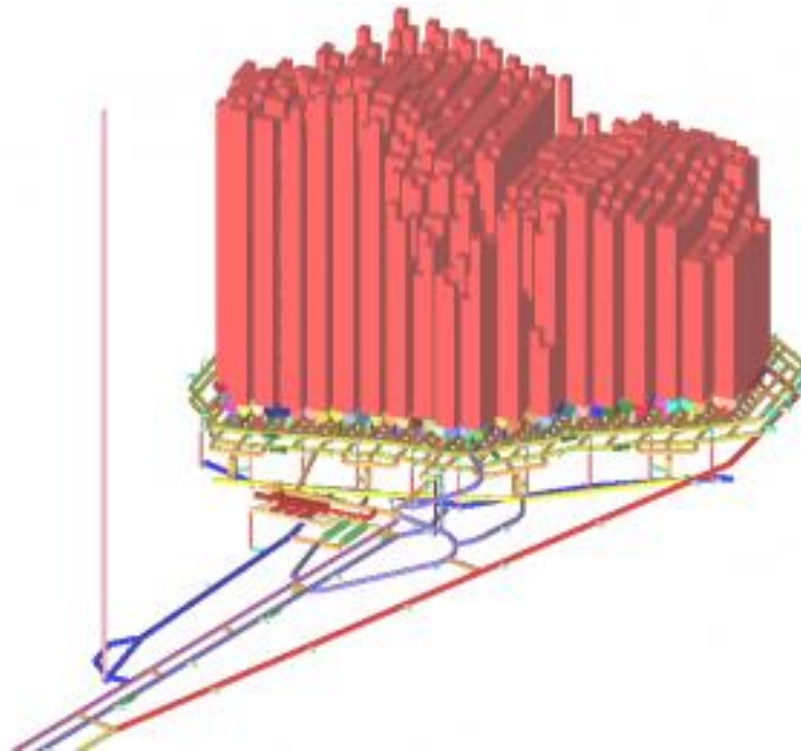
^۲ Smithers

^۳ Takla

^۴ Black Lake



شکل ۴-۱۸: موقعیت نسبی زون‌های لیتولوژی و آلتراسیون در کانسار کمث (Jakubec, et al., ۲۰۱۶)



شکل ۴-۱۹: نمای سه بعدی طرح معدن کمث، شامل زیربرش، قیف‌های تخلیه و دررفت‌های باربری (Jakubec, et al., ۲۰۱۶)

سایر اطلاعات معادن مورد مطالعه در جدول ۴-۱۲، برای محاسبه شاخص امکان‌پذیری لیست

شده است.

فصل چهارم: برآورد شاخص امکان‌پذیری پیاده‌سازی روش استخراج تخریب توده‌ای

جدول ۴-۱۲: امتیاز عوامل موثر بر خردشوندگی در مطالعات موردی

ردیف	عوامل	واحد	معدن رنو		دیابلو رجیمنت		معدن کمث	
			مقدار	امتیاز	مقدار	امتیاز	مقدار	امتیاز
۱	مقاومت تراکمی	مگا پاسکال	۱۲۰	۰	۱۱۶	۰	۱۰۶	۰
۲	نسبت مدولی	-	۴۵۰	۴	بیشتر از ۵۰۰	۴	۲۹۵	۲
۳	فراوانی ناپیوستگی-	بر متر	۶,۵۳	۳	۲	۱	۳,۴	۲
۴	بازشدگی	میلی‌متر	کمتر از ۲	۲	بیشتر از ۳	۳	۵-۱	۳
۵	پایایی	متر	۲,۴۶	۲	۱,۶۰	۲	شبه پیوسته	۴
۶	زبری ناپیوستگی	-	زبر	۱	زبر	۱	به‌طور نسبی	۲
۷	پرشدگی	میلی‌متر	خیلی سخت	۰	نرم > ۵	۳	مواد نرم	۳
۸	هوازدگی	-	جزئی	۱	جزئی	۱	جزئی	۱
۹	تنش‌های برجا	MPa	۳۵	۴	۲۵	۴	۲۰-۱۵	۳
۱۰	جهت تنش‌ها	درجه	زاویه ۲۰ تا ۴۵	۳	زاویه ۲۰ تا ۴۵	۳	با زاویه کم	۳
۱۱	آب زیرزمینی	-	خشک	۰	مرطوب	۱	۱۳ لیتر بر ثانیه، خیس	۴
۱۲	نسبت نرمه	درصد	۳۰	۱	۳۰	۱	۳۰	۱
۱۳	شعاع هیدرولیکی	متر	۳۶	۲	۳۸	۲	۳۳	۲
۱۴	ارتفاع زیر برش	متر	۴	۱	۴	۱	۱۸	۴
۱۵	ارتفاع ستون تخلیه	متر	۱۹۰	۳	۱۰۹	۲	۱۰۰	۱
۱۶	هندسه نقاط تخلیه	S_{up}/S_{low}	۴,۸۶	۳	۴,۱	۳	۴	۳
۱۷	سرعت تخلیه	Mm/day	۱۰۰-۷۰	۴	۲۴۰	۱	۲۰۰	۲
۱۸	اندرکنش بیضوی تخلیه	-	کامل	۴	کامل	۴	کامل	۴
۱۹	ارتفاع فضای خالی	متر	۱۰	۴	۱۰	۴	۱۰	۴
۲۰	چگالی کانه خردشده	-	۱,۴	۲	۱,۴	۲	۱,۴	۲
۲۱	جهت زیر برش	-	موافق	۴	متوسط	۲	موافق	۴
۲۲	قابلیت تخریب	-	مناسب	۳	مناسب	۳	مناسب	۳
۲۳	خردشوندگی	-	مناسب	۳	مناسب	۳	مناسب	۳

۲-۶-۴- برآورد شاخص امکان پذیری پیاده‌سازی در معادن مورد مطالعه

در این مرحله، با استفاده از مقادیر «شدت اثرگذاری» و «شدت اثرپذیری» غیرمستقیم عوامل در جدول ۳-۴، وزن اندرکنش غیرمستقیم هر عامل، محاسبه می‌شود.

در هر پروژه مبتنی بر RES، بدون در نظر گرفتن مقدار واقعی هر عامل، هر یک از عوامل دارای سهم یا وزن مشخصی بر اساس ماتریس اندرکنش هستند. وزن یا سهم عامل P_i از رابطه (۴-۴)، محاسبه می‌شود:

$$W_{P_i} = \frac{(C + E)_i}{\sum_{i=1}^n (C + E)_i} \times 100 \quad (2-4)$$

با تقسیم سهم هر عامل بر بزرگ‌ترین امتیازی که آن عامل در سیستم امتیازدهی ماتریس اندرکنش می‌تواند داشته باشد، وزن نرمال آن عامل مطابق رابطه (۴-۴)، به دست می‌آید:

$$a_i = \frac{1}{MP_{ij}} * \frac{(C + E)_i}{\sum_{i=1}^n (C + E)_i} \times 100 \quad (3-4)$$

که در آن:

W_{P_i} : وزن یا سهم عامل P_i برحسب درصد

MP_{ij} : بزرگ‌ترین امتیازی که عامل در سیستم امتیازدهی می‌تواند دریافت کند.

$(C + E)_i$: مجموع امتیازهای اثرگذاری و اثرپذیری عامل i ام

سپس برای هر بلوک معدنی، امتیاز مرتبط به هر عامل بر اساس کمیت یا کیفیت آن عامل و با

استفاده از جدول ۴-۷، تعیین می‌گردد.

در نهایت پس از محاسبه وزن نرمال هر عامل، مقدار شاخص امکان پذیری پیاده‌سازی (W_i)، از

رابطه (۴-۴)، محاسبه می‌شود.

$$W_i = \sum_{i=1}^n a_i * p_{ij} \quad (4-4)$$

بر اساس ویژگی‌های توده‌سنگ و اطلاعات معادن مورد مطالعه و بر مبنای جدول ۴-۷، امتیاز

همه عوامل موثر بر امکان‌پذیری کاربرد روش تخریب توده‌ای، به تفکیک برای هر سه مورد مطالعاتی

در جدول ۴-۱۲، تعیین شده است. امتیاز عوامل اندرکنش بیضوی تخلیه، چگالی کانسنگ خردشده

و ارتفاع فضای خالی، به علت عدم دسترسی به اطلاعات دقیق در گزارش‌های موجود، برای هر سه مورد مطالعاتی، حد میانه (امتیاز ۲) در نظر گرفته شده است.

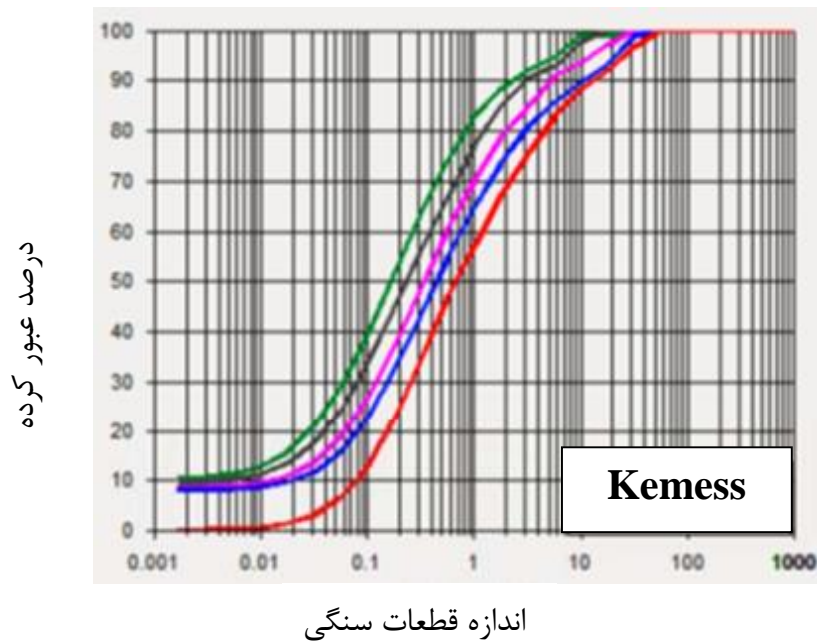
محاسبات تعیین شاخص امکان‌پذیری برای هر سه مورد مطالعاتی مطابق جدول ۴-۱۳، انجام و مقادیر شاخص امکان‌پذیری معادن رنو، دیابلو رجیمنت و کمث به ترتیب ۶۲٫۷۶، ۵۷٫۲۲ و ۶۵٫۴۸ به دست آمده است. همان‌طور که مشاهده می‌شود، معدن کمث دارای بیشترین مقدار شاخص امکان‌پذیری و معدن دیابلو رجیمنت دارای کمترین مقدار شاخص امکان‌پذیری است. با فرض این‌که در زمان طراحی و استخراج، به منظور افزایش هر چه بیشتر خردشوندگی، عوامل عملیاتی به گونه‌ای برنامه‌ریزی می‌شوند تا شرایط تخریب و خردشوندگی بهبود یابد، با احتساب حد بالای امتیاز برای عوامل اندرکنش بیضوی تخلیه، چگالی کانسنگ خردشده و ارتفاع فضای خالی (امتیاز ۴)، مقادیر شاخص خردشوندگی برای سه معدن رنو، دیابلو رجیمنت و کمث به ترتیب اعداد ۶۵٫۹۱، ۶۱٫۵۹ و ۷۱٫۰۶ به دست آمده است.

برای طبقه‌بندی شاخص ارایه شده، مقادیر شاخص به دست آمده برای معادن مذکور، با نتایج خردشوندگی آن معادن مقایسه شده است.

شکل ۴-۲۰، نتایج نمودار توزیع اندازه خردشوندگی معدن کمث را برای ارتفاع‌های متفاوت ستون تخلیه‌ی ۵۰، ۱۰۰، ۱۵۰ و ۲۰۰ متر و نرخ تخلیه ۱۰ سانتی‌متر بر روز، نشان می‌دهد. منحنی قرمز نشان‌دهنده‌ی خردشوندگی اولیه، منحنی آبی نشان‌دهنده‌ی خردشوندگی ثانویه برای ارتفاع تخلیه‌ی ۵۰ متر تا منحنی سبز که بیانگر خردشوندگی ثانویه برای ستون تخلیه با ارتفاع ۲۰۰ متر است. مقادیر درصد تجمعی بلوک‌های بزرگ‌تر از ۱ متر مکعب و ۲ متر مکعب با توجه به منحنی متناظر با ستون تخلیه با ارتفاع ۱۰۰ متر (رنگ بنفش)، به ترتیب ۳۲ درصد و ۲۱ درصد به دست آمده است.

جدول ۴-۱۳: محاسبه شاخص خریدشوندگی موارد مطالعاتی به روش مستقیم و غیرمستقیم

شاخص ها	P_1	P_2	P_3	P_4	P_5	P_6	P_7	P_8	P_9	P_{10}	P_{11}	P_{12}	P_{13}	P_{14}	P_{15}	P_{16}	P_{17}	P_{18}	P_{19}	P_{20}	P_{21}	P_{22}	P_{23}
$P_i = \frac{(C+E)_i}{\sum_{i=1}^n (C+E)_i}$ سهام عامل (.)	۴,۳۴	۴,۳۴	۴,۵۴	۳,۶۳	۳,۶۳	۲,۴۹	۳,۰۹	۳,۰۴	۳,۶۲	۴,۷۱	۴,۹	۳,۷۲	۳,۷۲	۳,۴۸	۴,۸۶	۴,۸۶	۶,۰۶	۴,۸۶	۵,۰۳	۳,۸۸	۳,۸۲	۵,۵	۵,۶۴
$\frac{1}{MP_i} \cdot \frac{(C+E)_i}{\sum_{i=1}^n (C+E)_i}$ سهام نرمال عامل (a_i)	۱,۰۹	۱,۰۹	۱,۱۳	۰,۹۱	۰,۹۱	۰,۶۲	۰,۷۷	۰,۷۶	۰,۹	۱,۱۸	۱,۲۲	۱,۲۲	۰,۹۳	۰,۸۷	۱,۲۲	۱,۲۱	۱,۵۱	۱,۲۲	۰,۹۷	۰,۹۷	۰,۹۵	۱,۳۸	۱,۴۱
P_{ij} امتیاز جدول ۸ بر اساس جدول ۸	۰	۲	۲	۳	۴	۲	۳	۱	۳	۴	۱	۱	۲	۴	۱	۳	۲	۴	۴	۲	۴	۳	۳
سهام عامل در شاخص خریدشوندگی غیرمستقیم	۰	۲,۱۸	۲,۲۷	۲,۷۲	۳,۶۳	۱,۲۴	۲,۳۲	۰,۷۶	۴,۵	۲,۷۱	۴,۷۱	۱,۲۲	۱,۸۶	۳,۴۸	۱,۲۲	۳,۶۳	۳,۰۳	۴,۸۶	۵,۰۳	۱,۹۴	۳,۸۲	۴,۱۳	۴,۳۳
شاخص خریدشوندگی معدن	$W_{I_j} = \sum_{i=1}^n a_i \cdot P_{ij}$ ۶۵,۴۸																						
P_{ij} امتیاز جدول ۸ بر اساس جدول ۸	۰	۴	۱	۳	۲	۱	۳	۱	۴	۳	۱	۱	۲	۱	۲	۳	۱	۴	۴	۲	۲	۳	۳
سهام عامل در شاخص خریدشوندگی غیرمستقیم	۰	۴,۳۳	۱,۱۳	۲,۷۳	۱,۸۲	۰,۶۲	۲,۳۲	۰,۷۶	۶	۲,۷۱	۱,۱۸	۱,۲۲	۱,۸۶	۰,۸۷	۲,۴۳	۳,۶۳	۱,۵۱	۴,۸۶	۵,۰۳	۱,۹۴	۱,۹۱	۴,۱۳	۴,۳۳
شاخص خریدشوندگی معدن	$W_{I_j} = \sum_{i=1}^n a_i \cdot P_{ij}$ ۵۷,۳۲																						
P_{ij} امتیاز جدول ۸ بر اساس جدول ۸	۰	۴	۳	۲	۲	۱	۰	۱	۴	۳	۰	۱	۲	۱	۳	۳	۴	۴	۴	۲	۴	۳	۳
سهام عامل در شاخص خریدشوندگی غیرمستقیم	۰	۴,۳۳	۳,۴	۱,۸۱	۱,۸۲	۰,۶۲	۰	۰,۷۶	۶	۲,۷۱	۰	۱,۲۲	۱,۸۶	۰,۸۷	۳,۶۵	۳,۶۳	۶,۰۶	۴,۸۶	۵,۰۳	۱,۹۴	۳,۸۲	۴,۱۳	۴,۳۳
شاخص خریدشوندگی معدن	$W_{I_j} = \sum_{i=1}^n a_i \cdot P_{ij}$ ۶۲,۷۶																						



شکل ۴-۲: نمودار توزیع خردشوندگی اولیه و ثانویه در معدن کمث با استفاده از نرم افزار BCF (Jakubec, et al., ۲۰۱۶)

در بررسی گزارش تحلیل برگشتی خردشوندگی در معادن رنو و دیابلو رجیمنت درصد تجمعی بلوک های بزرگ تر از یک مترمکعب و دو مترمکعب در معادن رنو و دیابلو رجیمنت، مطابق جدول ۴-۱۴، گزارش شده است (Hurtado, et al., ۲۰۰۷).

همان طور که در جدول ۴-۱۴، مشاهده می شود، معدن کمث با ۲۱ درصد بلوک های بزرگ تر از ۲ مترمکعب دارای بیشترین ظرفیت خردشوندگی است، البته نیاز به شکست هیدرولیکی برای شروع تخریب در این معدن گزارش شده است. پس از معدن کمث، معادن رنو و دیابلو رجیمنت با ۲۶ و ۳۳ درصد بلوک های بزرگ تر از ۲ مترمکعب، در رده های بعدی ظرفیت خردشوندگی قرار می گیرند.

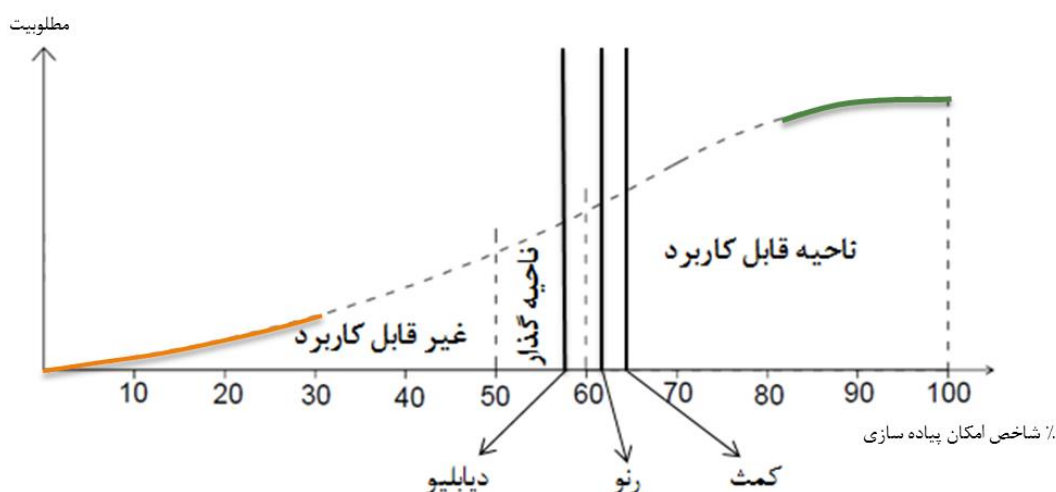
جدول ۴-۱۴: اطلاعات خردشوندگی معادن موارد مطالعاتی

اندازه قطعات در محل نقاط تخلیه		معدن	ردیف
> ۱ m ^۳	> ۲ m ^۳		
٪۳۱	٪۲۶	معدن رنو	۱
٪۳۵	٪۳۳	معدن دیابلو رجیمنت	۲
٪۳۲	٪۲۱	معدن کمث	۳

فصل چهارم: محاسبه شاخص غیر مستقیم فازی امکان تخریب

با استفاده از نظر کارشناسان و بررسی خردشوندگی و مخاطرات عملیاتی گزارش شده در معادن مورد مطالعه، طبقه‌بندی شاخص امکان پذیری پیاده‌سازی مطابق شکل ۴-۲۱ به صورت ۳ ناحیه «قابل کاربرد»، «ناحیه گذار» و «ناحیه غیر قابل کاربرد» انجام شده است.

با توجه به این که معادن مورد مطالعه، دارای خردشوندگی قابل قبولی هستند، با مقایسه شاخص امکان‌پذیری معادن مذکور با نتایج خردشوندگی این معادن، مرزهای نواحی گذار و ناحیه قابل کاربرد به صورت تقریبی، تعیین شده است. هورتادو، به استفاده از القای تخریب با استفاده از شکست هیدرولیکی در ۴۵ متر ابتدای تخریب در معدن دیابلو اشاره کرده است (Hurtado, et al., ۲۰۰۷). بنابراین با توجه به این موضوع، شاخص امکان‌پذیری معدن دیابلو رجیمنت (۵۷)، در ناحیه‌ی گذار در نظر گرفته شده است. همچنین بررسی نتایج خردشوندگی معادن رنو و کمث در گزارش‌های موجود و نظر کارشناسان در رابطه با قابلیت مطلوب تخریب و خردشوندگی در این معادن، نسبت به بعضی معادن فعال دیگر، قرار گرفتن شاخص امکان‌پذیری معادن رنو و کمث را در ناحیه قابل کاربرد با مرز شاخص ۶۰٪ توجیه می‌کند.



شکل ۴-۲۱: طبقه‌بندی شاخص امکان‌پذیری پیاده‌سازی روش تخریب توده‌ای

تعیین دقیق‌تر مرزهای طبقه‌بندی شاخص امکان‌پذیری پیاده‌سازی روش تخریب توده‌ای، نیاز به دسترسی به اطلاعات کامل معادن تخریب توده‌ای موفق و ناموفق دارد. با محاسبه‌ی شاخص امکان‌پذیری پیاده‌سازی روش تخریب توده‌ای برای مطالعات موردی بیشتر و مقایسه نتایج تخریب-پذیری و خردشوندگی این معادن با عدد شاخص به دست آمده، مرزهای طبقه‌بندی دقیق‌تر خواهد شد.

۴-۷- جمع بندی

در این فصل پس از تعیین ماتریس اندرکنش مستقیم عوامل موثر بر امکان‌پذیری پیاده‌سازی روش تخریب توده‌ای، به منظور کاهش عدم قطعیت، ماتریس اندرکنش فازی عوامل موثر با استفاده از رویکرد سیستم‌های فازی تشکیل و سپس با استفاده از روش تحلیل ساختاری ماتریس اندرکنش غیر مستقیم عوامل تهیه شده است. سپس اندرکنش عوامل در دو روش با یکدیگر مقایسه و نتایج ماتریس اندرکنش غیر مستقیم بررسی شده است.

عوامل ژئومکانیکی با حدود ۴۴/۶۴ درصد سهم، بالاترین سهم اثرگذاری بر سیستم هستند. بالاترین سهم شدت اثرگذاری مربوط به عامل فراوانی درزه‌ها از گروه عوامل ژئومکانیکی و پایین‌ترین سهم شدت اثرگذاری مربوط به عامل چگالی کانسنگ خردشده از گروه عوامل عملیاتی است. در رابطه با شدت اثرپذیری، عوامل عملیاتی با سهم کل حدود ۳۲/۱۵ درصد بالاترین سهم اثرپذیری و پس از آن عوامل هندسی، محیطی و ژئومکانیکی به ترتیب با سهم‌های ۲۰/۳۶، ۱۷/۹۰ و ۱۳/۵۳ درصد در رده‌های بعدی قرار می‌گیرند.

عوامل عملیاتی با ۲۹/۱۵ درصد سهم، دارای بالاترین سهم اندرکنش با سیستم هستند و عوامل ژئومکانیکی با فاصله کمی بعد از گروه عملیاتی در رده دوم اندرکنش قرار دارد. عوامل هندسی با سهم کل ۱۸/۱۴ درصد، کمترین اندرکنش با سیستم را دارند. عوامل ژئومکانیکی و محیطی در حالت کلی غیرقابل کنترل بوده و تنها در موارد خاص با در نظر گرفتن تمهیدات ویژه، نظیر شکست

فصل چهارم: محاسبه شاخص غیر مستقیم فازی امکان تخریب

هیدرولیکی و ایجاد برش‌های عمودی در مرزهای کانسار می‌توان تغییرات محدود در بعضی از عوامل این دو گروه اعمال کرد. بنابراین به‌منظور افزایش خردشوندگی توده سنگ باید در مراحل طراحی و بازطراحی معدن، بر روی عوامل هندسی و عملیاتی متمرکز شد. با توجه به اینکه میانگین سهم اندرکنش هر عامل در گروه عوامل عملیاتی ۴/۹۷ است که نسبت به سایر گروه‌ها بالاتر است. بنابراین با تغییر در طراحی و برنامه تولید و به‌طور کلی ایجاد تغییرات در عوامل هندسی و عملیاتی امکان تغییر در خردشوندگی توده سنگ وجود دارد.

سپس شاخص امکان‌پذیری پیاده‌سازی روش تخریب توده‌ای برای معادن رنو، دیابلو و کمث تعیین شده است. در مرحله بعد با استفاده از نتایج واقعی معادن مورد مطالعه و نظر کارشناسان حوزه تخریب، نمودار شاخص امکان‌پذیری تهیه و به سه ناحیه قابل کاربرد، ناحیه گذار و ناحیه غیر قابل کاربرد تقسیم شده است. برای تعیین دقیق‌تر مرزهای رده‌بندی پیشنهاد شده نیاز است، روش RES ترکیبی غیرمستقیم، برای معادن تخریب توده‌ای متفاوت پیاده‌سازی و با مقایسه نتایج واقعی و خروجی مدل RES ترکیبی، امتیازدهی و همچنین رده‌بندی شاخص امکان‌پذیری رفته‌رفته تعدیل گردد.

فصل پنجم

نتیجه‌گیری و پیشنهادها

۵-۱- نتیجه‌گیری

امروزه معدنکاری تخریبی و به طور خاص معدنکاری به روش تخریب توده‌ای، با کاهش منابع پرعیار سطحی و اکتشاف رو به رشد ذخایر عظیم اما کم عیار زیرزمینی، به عنوان روشی اقتصادی و کم هزینه مورد توجه خاص معدنکاران و طراحان معدن قرار گرفته است.

به علت هزینه‌های بالای آماده‌سازی این روش، چالش عمده پیش روی طراحان، پیش‌بینی امکان‌پذیری استخراج ماده معدنی به روش تخریب توده‌ای است. در موضوع امکان‌پذیری اجرای روش تخریب توده‌ای، با توجه به پیشرفت و توسعه روش‌های حفر و نگهداری فضاهای زیرزمینی، مسایلی از قبیل حفر و نگهداری دررفت‌ها و شفت‌ها و سایر فضاهای تراز استخراج به علت شناخت کافی از عوامل موثر بر آنها، قابل کنترل است. اما چالش‌های عمده در روش تخریب توده‌ای، شروع و گسترش تخریب (خردشوندگی اولیه) و کاهش ابعاد بلوک‌های سنگ به ابعاد قابل تحویل در نقاط تخلیه (خردشوندگی ثانویه) با حداقل مخاطرات عملیاتی است.

بسیاری از متغیرهای کلیدی روش تخریب توده‌ای از جمله الگوی طراحی و پیشروی زیربرش، پیکربندی دهانه‌های تخلیه، ارتفاع ستون تخلیه و سرعت تخلیه تابعی از قابلیت تخریب و خردشوندگی توده سنگ هستند، از طرف دیگر این متغیرهای کلیدی نقش بسیار مهمی در تخریب اولیه، آغاز و تداوم تولید و ارایه محصول با خردشدگی مناسب ایفا می‌کنند. بنابراین، با توجه به این اندرکنش دوجانبه، در امکان‌سنجی پیاده‌سازی روش تخریب توده‌ای علاوه بر قابلیت تخریب، خردشوندگی و سایر عوامل موثر نیز باید مدنظر قرار گیرند.

روش‌های مرسوم برآورد قابلیت تخریب و خردشوندگی به علت تعداد زیاد عوامل موثر و عدم اطلاع کافی از نحوه ارتباط این عوامل با یکدیگر و اندرکنش بین آنها، تاکنون قادر به تخمین دقیقی از قابلیت تخریب و خردشوندگی نبوده‌اند. اولین گام در رابطه با برآورد امکان‌پذیری پیاده‌سازی روش تخریب توده‌ای، شناخت عوامل موثر بر روند تخریب و آگاهی از نحوه اندرکنش این عوامل است.

رویکرد سیستم‌های مهندسی سنگ RES، یک رویکرد شناخته‌شده برای تحلیل مسایل پیچیده است که کاربردهای متعددی از آن گزارش شده است. در اکثر کاربردهای این روش از سیستم امتیازدهی نیمه عددی خبره ESQ استفاده شده که مبتنی بر نظر کارشناسان بوده و به علت اختلاف نظر کارشناسان ناشی از پیچیدگی‌های روش و عدم اطلاع کافی از روابط بین عوامل موثر، اغلب توصیف دقیقی از عوامل ارایه نمی‌کند. از طرفی در این روش، روابط بین عوامل به صورت دو-دویی و مستقیم در نظر گرفته شده است و توجهی به روابط پیچیده از طریق چرخه‌ای از تاثیرات متقاطع نشده است.

در این رساله به ارایه راه‌کارهایی برای رفع این مشکل پرداخته شده است. ابتدا به منظور کاهش عدم قطعیت در نظر کارشناسان، با استفاده از سیستم‌های فازی، ماتریس اندرکنش مستقیم فازی عوامل به دست آمده است. به این منظور سیستم فازی شامل ۵ ورودی، ۳۲ قانون فازی و یک خروجی طراحی شده و سپس با کاربرد آن بر روی ماتریس اندرکنش مستقیم عوامل (۲۳ عامل)، ماتریس اندرکنش فازی مستقیم به دست آمده است.

در مرحله دوم، با استفاده از روش تحلیل ساختاری PWP، ماتریس اندرکنش غیر مستقیم فازی عوامل موثر به دست آمده و سپس محاسبات علت و اثر عوامل و ترسیم نمودارهای مربوطه انجام شده است. با توجه به تحلیل جداول و نمودارهای مربوطه مشاهده شد، اندرکنش غیر مستقیم فازی عوامل نسبت به اندرکنش مستقیم فازی بهبود یافته است.

عوامل نرخ تولید و میدان تنش، بالاترین اندرکنش را در سیستم و عوامل زبری، پرشدگی و هوازگی کمترین اندرکنش را در سیستم دارند. عوامل فراوانی درزه، مقاومت تراکمی تک محوره و میدان تنش غالب‌ترین عوامل و عوامل خردشوندگی، نرخ تخلیه و قابلیت تخریب به ترتیب مغلوب-ترین عوامل سیستم هستند. در رابطه با اندرکنش بین عوامل، گروه عوامل عملیاتی با سهم ۲۹/۱۵ درصد و میانگین ۴/۴۸ درصد در سهم اندرکنش هر عامل، بالاترین میانگین اندرکنش را در

بین عوامل سیستم دارد، عوامل محیطی با اندکی فاصله، دومین گروه از عوامل با اندرکنش بالا هستند.

مقایسه هیستوگرام، اندرکنش عوامل در دو روش مستقیم و غیر مستقیم نشان داد که میزان اندرکنش عوامل در دو روش با یکدیگر متفاوت است. میزان اندرکنش عامل مقاومت تراکمی در دو روش مستقیم و غیر مستقیم تقریباً یکسان است. این عدم تغییر نشان می‌دهد که به علت این که مقاومت تراکمی، عاملی ذاتی است و وابستگی کمی به تغییرات سایر عوامل سیستم دارد، در نتیجه تاثیر متقاطع و غیر مستقیم ناچیزی دریافت کرده است. عدم تغییر سهم اندرکنش عامل مقاومت تراکمی، نشان می‌دهد عملکرد سیستم غیر مستقیم، قابل قبول است.

کاهش سهم اندرکنش عوامل ژئومکانیکی و افزایش سهم اندرکنش عوامل عملیاتی، هندسی و محیطی در روش غیر مستقیم نشان می‌دهد که روش غیر مستقیم، از طریق جمع اثرات متقاطع بین عوامل، عواملی را که بیشتر قابلیت کنترل توسط مهندسان و مجریان را دارند تشخیص داده، متمایز کرده و افزایش سهم این عوامل را نسبت به روش مستقیم رقم زده است، که بیانگر بهبود امتیازدهی ماتریس اندرکنش در روش غیر مستقیم است.

به طور کلی گروه عوامل عملیاتی و هندسی با توجه به قابل کنترل بودنشان و اندرکنش بالا، نقش عمده‌ای در کنترل خردشوندگی و تولید پیوسته معدن ایفا خواهند کرد.

در مرحله سوم و به عنوان اصلی‌ترین بخش رساله، با استفاده از ماتریس اندرکنش بهبود یافته، شاخص غیرمستقیم امکان‌پذیری پیاده‌سازی تخریب توده‌ای آرایه شده است. سپس شاخص امکان‌پذیری برای مطالعات موردی استفاده و نتایج حاصل با نتایج واقعی مقایسه شده است. در این تحقیق شاخص امکان‌پذیری معادن رنو، دیابلو رجیمنت و کمث به ترتیب در حدود ۶۲/۸، ۵۷/۲ و ۶۵/۵ به دست آمده است که با نتایج واقعی گزارش شده در این معادن تطابق دارد. در نهایت، رده‌بندی شاخص امکان‌پذیری با استفاده از نظر کارشناسان و مقایسه نتایج مطالعات موردی پیشنهاد شده است.

۵-۲- پیشنهادها

در این تحقیق تلاش شده است که امتیازدهی ماتریس اندرکنش عوامل موثر بر امکان‌پذیری پیاده‌سازی روش تخریب توده‌ای، بهبود داده شود. اگر چه نتایج حاصل نشان از بهبود امتیازدهی سیستم‌های مهندسی سنگ دارد، اما با گردآوری اطلاعات بیشتر از معادن تخریب توده‌ای، هنوز ظرفیت زیادی برای توسعه‌های بیشتر وجود دارد، در این راستا پیشنهادهای زیر برای ادامه فعالیت در این حوزه ارائه می‌شود.

✓ در این تحقیق، کدگذاری غیرمستقیم اندرکنش عوامل موثر ارائه شد و برای تحلیل روند تخریب مورد استفاده قرار گرفته است. کاربرد این روش در سایر علوم که نیاز به آینده پژوهی دارند و توسعه مدل در این راستا، پیشنهاد می‌شود.

✓ در این رساله ابتدا کلیه عوامل موثر بر روند تخریب معرفی شدند، اما به علت اطلاعات محدود در رابطه با بعضی عوامل، آن عوامل از لیست عوامل موثر حذف شده‌اند. در صورت دسترسی به اطلاعات بیشتر، می‌توان تاثیر این گونه عوامل را در نظر گرفته و سیستم را بهبود بخشید.

✓ برای برآورد دقیق‌تر مرزهای طبقه‌بندی عوامل موثر بر تخریب، لازم است شاخص و طبقه‌بندی مورد نظر در طول عمر معدن با استفاده از داده‌های جدید و بررسی نتایج خردشوندگی واقعی معدن به روز شود.

✓ شاخص را برای مطالعات موردی بیشتر، به خصوص معادن با تجربه ناموفق استفاده کند.

✓ در این رساله شاخص غیرمستقیم امکان‌پذیری پیاده‌سازی روش تخریب توده‌ای ارائه شده است و برای اعتبار سنجی، از داده‌های معادن دیابلو رجیمنت، رنو و کمث استفاده شده است، که نتایج قابل قبولی است. اما با کاربرد این روش در سایر معادن و تحلیل

نتایج می‌توان مدل را توسعه داد. قطعاً گسترش مدل با داده‌های واقعی بیشتر، آن را به ابزاری قدرتمند (سیستم طبقه‌بندی) برای پیش‌بینی و برآورد امکان‌پذیری پیاده‌سازی روش تخریب توده‌ای تبدیل خواهد کرد.

فهرست منابع:

- Ambrosio, M., & Delgado_Serano, M. (۲۰۰۸). Understanding rural areas dynamics from a complex perspective. An application of Prospective Structural Analysis. *European Association of Agricultural Economists*. Ghent.
- Amer, M., Daim, T., & Jetter, A. (۲۰۱۳). A review of Scenario planning. *Futures*, vol. ۴۶, p. ۲۳-۴۰.
- Baecher, G. B., Einstein, H. H., & Lanney, N. A. (۱۹۷۷). Statistical description of rock properties and sampling. *Energy resources and excavation technology, The 11th U.S. symposium on rock mechanics*, p. ۱-۸. Golden: Colo. Sch. Mines Press.
- Baghbanan, A., & Jing, L. (۲۰۰۸). Hydraulic properties of fractured rock masses with correlated fracture length and aperture. *International Journal of Rock Mechanics & Mining Sciences*, vol. ۴۴, p. ۷۰۴-۷۱۹.
- Bang, S. H., Jeon, S., & Kwon, S. (۲۰۱۲). Modeling the hydraulic characteristics of a fractured rock mass with correlated fracture length and aperture: application in the underground research tunnel at Kaeri. *Nuclear Engineering and Technology* vol. ۴۴ (۶).
- Barla, G., Boshkov, S., & Pariseau, W. (۱۹۸۰). *Numerical modeling of block caving at the Grace Mine*. Turin, Italy: Geomechanics applications in underground hard rock mining.
- Benjumea-Arias, M., Castañeda, L., & Valencia-Arias, A. (۲۰۱۶). Structural Analysis of Strategic Variables through MICMAC Use: Case Study. *Mediterranean Journal of Social Sciences*, vol. ۷(۴), p. ۱۱-۱۹.
- Bieniawski, Z. (۱۹۸۹). *Engineering rock mass classifications*. New York. New York: Wiley.
- Blanning, R., & Bruce, R. (۱۹۹۹). Cross-impact analysis using group decision support systems: an application to the future of Hong Kong.
- Brady, B., & Brown, E. (۲۰۰۵). *Rock Mechanics for underground mining, Third edition*. Springer Science + Business Media, Inc.
- Brazovic, A. (۲۰۱۰). *Characterization of primary copper ore for block caving at El Teniente mine*. PHD Thesis, Australia: Curtin University of Technology.

- Brin, S., Page, L., Motwani, R., & Winograd, T. (۱۹۹۸). The Anatomy of a Large-Scale Hyper textual Web Search Engine. *Computer Networks and ISDN Systems*, vol. ۳۰, p. ۱۰۷-۱۱۷.
- Brown, E.(۱۹۸۷). *Introduction. Analytical and Computational Methods in Engineering Rock Mechanics*. London. Allen and Unwin. London: Allen and Unwin.
- Brown, E. (۲۰۰۳). *Block Caving Geomechanics*. Australia: Julius Kruttschnitt Mineral Research Centre.
- Brown, E. (۲۰۰۷). Rock Mechanics - the Basic Mining Science: Challenges In Underground Mass Mining. *11th ISRM Congress*. Lisbon, Portugal: International Society for Rock Mechanics and Rock Engineering.
- Butcher, R., Stacey, T., & Joughin, W. (۲۰۰۵). Mudrushes and methods of combating them. *vol. 1۰۵*, p. ۸۱۷-۸۲۴.
- Butcher, R. (۲۰۰۰). Block Cave Undercutting Aims, Strategies, Methods and Management. *Massmin*, p. ۴۰۵-۴۱۴. Brisbane, Australia.
- Butcher, R., Joughin, W., & Stacey, T. (۲۰۰۰). *Methods of Combating Mudrushes in Diamond and Base Metal Mines*. Braamfontein: SRK Consulting, The Safety in Mines Research Advisory Committee (SIMRAC).
- Call, & Nicholas. (۱۹۹۸). *IOZ Wet Muck Study, Freeport McMoRan Copper and Gold Inc. and Hydrologic Consultants*.
- Castro, R., Arancibia, L., Guzman, D., & Henriquez, J. (۲۰۱۸). Experiments and simulation of gravity flow in block caving through FlowSim. *Fourth International Symposium on Block and Sublevel Caving*, p. ۳۱۳-۳۲۲. perth: Australian Centre for Geomechanics.
- Catalan, A., Rogers, S., Elmo, D., & Webb, G. (۲۰۱۰). A DFN based approach to defining insitu, primary and secondary Fragmentation distributions for the Cadia East panel cave project. *2nd int. symp. On block and sublevel caving*, p. ۴۲۵-۴۳۹. Perth: Australian Centre for Geomechanics.
- Cerrutti, C., Ovalle, A., & Vergara, Y. (۲۰۱۴). How high a draw column in Block Caving? *Third International Symposium on Block and Sublevel Caving*. Santiago, Chile.
- Chadwick, K. (۲۰۱۰). *Grasberg Block Cave Feasibility Update Presentation*. Freeport McMoRan Copper and Gold Inc.

- Chung, F. (۲۰۰۷). The heat kernel as the pagerank of a graph, *Proc. Natl. Acad. Sci. U.S.A.* vol. ۱۰۴, ۱۹۷۳۵-۱۹۷۴۰.
- Dershowitz, W. S., Lee, G., Geie, J., & LaPointe, P. R. (۱۹۹۸). *FracMan: Interactive discrete feature data analysis. Geometric modelling and exploration simulation. User Documentation.*
- Diabat, A., & Govindan, K. (۲۰۱۱). An analysis of the drivers affecting the implementation of green supply chain management. *Resources Conservation and Recycling*, vol. ۵۵, p. ۶۵۹-۶۶۷.
- Diaz, R., & Gomez, L. (۲۰۱۵). Indirect Influences in International Trade. *Networks and Hetrogeneous*, vol. ۱۰ (۱), p. ۱۴۹-۱۶۵.
- Diaz, R., & Vargas, A. (۲۰۱۹). *On The Stability of PWP, Advances in Matematics Research*, Vol. ۲۶. Nova print.
- Dickerson, & Kosko, B. (۱۹۹۵). Virtual Worlds as Fuzzy Cognitive Maps. *Conference on Fuzzy Systems*, p. ۲۲۸۱-۲۲۸۸. Newyork: IEEE.
- Dorador, L. (۲۰۱۶). *Experimental investigation of the effect of broken ore properties on secondary fragmentation during block caving.* Vancouver: University of British Columbia.
- Dorador, L., Eberhardt, E., Elmo, D., & Norman, B. (۲۰۱۴). Influence of secondary fragmentation and column height on block size distribution and fines migration reaching drawpoints. *۳rd International Symposium on Block and Sublevel Caving*. Santiago, Chile.
- Duperrin, C., & Godet, M. (۱۹۷۳). Methode de hierarchisation des elements d un sisteme. *Rapport Economique du CEA*, p. ۴۱-۴۵.
- Duplancic, P., & Brady, B. H. (۱۹۹۹). Characterisation of caving mechanisms by analysis of seismicity and rock stress. *Proc. ۹th Congr., Int. Soc. Rock Mech*, p. ۱۰۴۹-۱۰۵۳. Paris.
- Einstein, H. H., & Baecher, G. B. (۱۹۸۳). Probabilistic and statistical methods in engineering geology. *Rock Mechanics and Rock Engineering*, ۱۶, p. ۳۹-۷۲.
- Escobar, N., & Fishwick, M. (۲۰۰۰). An underground airblast, CODELCO Chile, Division Salvador. *proceedings of Massmin ۲۰۰۰*. ۷, p. ۲۷۹-۲۸۸. The Australian Institute of Mining and Metallurgy.

- Esmaili, K., Hadjigeorgiou, J., & Grenon, M. (۲۰۱۰). Estimating geometrical and mechanical REV based on synthetic rock mass models at Brunswick mine . *International Journal of Rock Mechanics and Mining Science*, vol. ۴۷ (۶), p. ۹۱۵-۹۲۶.
- Espinosa, A., Fuentes, R., & Moscoso, S. (۲۰۱۴). Seismic risk management for underground mining projects - Codelco Chile Division El Teniente. Proceedings of the Third International Symposium on Block and Sublevel Caving, Santiago, Chile.
- Esterhuizen, G. (۱۹۹۴). *A program to predict block cave fragmentation.*
- Esterhuizen, G. S. (۲۰۰۵). *A program to predict block cave fragmentation, technical reference and user's guide.* Venetia.
- Ferrada, M. (۲۰۱۱). Gravity flow under moisture conditions, Control and management of drawpoint mudflow. *۳۵th APCOM Symposium*. Wollongong.
- Flores, G. (۲۰۱۴). Future challenges and why cave mining must change. . *Proceedings of the Third International Symposium on Block and Sublevel Caving*. Santiago, Chile.
- Godet, M. (۲۰۰۰). The art of scenarios and strategic planning: Tools and pitfalls. *Technological Forecasting and Social Change*, vol. ۶۵ (۱), p. ۳-۲۲.
- Gordon, T., & Theodore, J. (۱۹۹۴). Cross Impact Method. *United Nations University Millennium Project*.
- Gray, S., Cox, L., & Shepard, H. (۲۰۱۳). Mental modeler: A fuzzy-logic cognitive mapping modeling tool for adaptive environmental management. . *Proceedings of the ۴۹th International Conference on Complex Systems*, p. ۹۶۳-۹۷۳.
- Guo, Z., Lu, X., & Li, Y. (۲۰۱۱). A framework of students' reasons for using CMC media in learning contexts: A Structural approach. *Journal of the American Society for Information Science and Technology*, vol. ۶۲ (۱۱), p. ۲۱۸۲-۲۲۰۰.
- Guzman, A., Malaver, M., & Rivera, H. (۲۰۰۵). Structural Analysis Prospective technique.
- Hartman, H. (۲۰۰۲). *Introductory Mining Engineering, ۲nd edition*. Wiley, New York.
- Heslop, T., & Laubscher, D. (۱۹۸۱). *Draw control in caving operations on Southern African Chrysotile Asbestos mines*. (Ed. D.R. Stewart. SMEAIME, Ed.) New York: in Design and Operation of Caving and Sublevel Stopping Mines.

- Hudson, J. (٢٠١٣). A review of Rock Engineering Systems (RES) applications over the last ٢٠ years. *Rock characterization*.
- Hudson, J. A. (١٩٩٢). *Rock Engineering Systems. Theory and Practice*. Chichester: Ellis Horwood Ltd.
- Hudson, J. A., & Harrison, J. P. (٢٠٠٠). *Engineering rock mechanics: an introduction to the principles*. Oxford: Elsevier.
- Hudson, J. A., & Pointe, L. (١٩٨٠). Printed circuits for studying rock mass permeability. *International journal of rock mechanics and mining sciences and geomechanics abstracts*, vol. ١٧ (٥), p. ٢٩٧-٣٠١.
- Hudson, J., & Harrison, J. (١٩٩٧). *Engineering rock mechanics: an introduction to the principles*. Oxford: Elsevier Science.
- Hurtado, J. P., Camoos, R., & Pereira, J. (٢٠٠٧). *Final report back analysis of fragmentation of Reno, DiabloRegiment and Sur tonalita Mines. Chile*.
- Hustrulid, W. A., Bullock, R. L., & Bullock, R. C. (٢٠٠١). *Underground Mining Methods: Engineering Fundamentals and International Case Studies*. SME.
- Ivanova, V., Xiaomeng, Y., Veneziano, D., & Einstein, H. H. (١٩٩٥). *Development of stochastic models for fracture systems*. Balkema, Rotterdam: Rock Mechanics.
- Jakubec. (٢٠١٤). Fragmentation estimates using BCF software, Experiences and pitfalls. *Proceedings of the Third International Symposium on Block and Sublevel Caving*. Santiago.
- Jakubec, J., Clayton, R., & Guest, A. (٢٠١٢). Mudush Risk Evaluation, Proceedings of Massmin ٢٠١٢, Subdury.
- Jakubec, J., Lakaviev, L., & Major, K. (٢٠١٦). *Technical report for the kemess underground project and kemess east estimate*. AuRico Metals Inc.
- Jiao, J., & Hudson, J. (١٩٩٥). The Fully-Coupled Model for Rock Engineering systems. *Int. J. Rock Mech. Min Sci and Geomechanics*, vol. ٣٢ (٥), p. ٤٩١-٥١٢.
- Julin, D. E. (١٩٧٤). Future developments in block caving. *Skilling's Mining Review*.
- Karzulovic, A., & Flores, H. (٢٠٠٣). *Geotechnical guidelines for a transition from open pit to underground mining*. Report to International Caving Study.
- Katz, L. (١٩٥٣). A new status index derived from sociometric analysis. *Psych metrika*, vol. ١٨, p. ٣٩-٤٣.

- Kendorski, F. S. (۱۹۷۸). Cavability of ore deposits. *Mining Engineering*, p. ۶۲۸-۶۳۱.
- Kosko, B. (۱۹۸۶). Fuzzy Cognitive Maps. *Man-Machine Studies*, vol. ۲۴, p. ۶۵-۷۵.
- Kosko, B. (۱۹۹۳). *Fuzzy thinking: the new science of fuzzy logic*. Newyork: Hyperion.
- Kulatilake, P.H.S.W., Park, J., & Um, J. G. (۲۰۰۴). Estimation of rock mass strength and deformability In ۳-D for a ۳۰ m cube at a depth of ۴۸۵ m at Aspo Hard Rock Laboratory. *Geotechnical and Geological Engineering*, vol.۲۲, p. ۳۱۳-۳۳۰.
- Langville, A., & Meyer, C. (۲۰۰۴). Deeper Inside PageRank. *Internet Math*, vol. ۱, p. ۳۳۵-۴۰۰.
- Laubscher. (۲۰۰۰). *A practical manual on block caving*. Julius Kruttschnitt Mineral Research Centre, University of Queensland. Australia: International Caving Study.
- Laubscher, D. (۲۰۰۳). *Cave Mining Handbook. De Beers*. Johannesburg, South Africa.
- Lee, J. S., Veneziano, D., & Einstein, H. H. (۱۹۹۰). Hierarchical fracture trace model. *Rock mechanics, contributions and challenges, The ۳rd U.S. symposium*, p. ۲۶۱-۲۶۸. Rotterdam: A. A. Balkema.
- Lorig, L. J., Board, M. P., Potyondy, D. O., & Coetzee, M. J. (۱۹۹۵). Numerical modelling of caving using continuum and micro-mechanical models. *۳rd canadian conference on computer application in the mineral industry*. Montreal, Qubec, canada.
- Mawdesley, C., Trueman, R., & Whiten, W. (۲۰۰۱). Extending the Mathews stability graph for open-stope design. vol. ۱۱۰, p. ۲۷-۳۹.
- Mahtab, M. A., & Dixon, J. D. (۱۹۷۷). Influence of rock fractures and block boundary weakening on cavability. *Trans Soc of Mining Engineers of the AIME*, p. ۶-۱۲.
- Mathews, K. E., Hoek, E., Stewart, S. B., & Wyllie, D. C. (۱۹۸۰). *Prediction of stable excavation spans for mining at depths below ۱۰۰۰ metres in hard rock*. Ottawa: Golder Associates Report Canada Centre for Mining and Energy Technology.
- Mawdesley, C. (۲۰۰۲). Prediction of rock mass cavability in block caving mines. PHD Thesis, Australia: University of Queensland.
- McMahon, B. K., & Kendrick, R. F. (۱۹۶۹). *Predicting the Block Caving Behavior of Ore Bodies*. New york: AIME.

- Mohammad khani, M. (۲۰۱۴). *Application of rock engineering systems to block caving*. PHD Thesis, Australia: School of Civil Engineering of the university of Queensland.
- Mojica, F. (۲۰۰۵). *Future construction. Concept and model of strategic, territorial and technology foresight*. Santafé de Bogotá: Universidad Externado de Colombia.
- Nadolski, S., Munkhchuluun, M., Klein, B., Elmo, D., & Hart, C. (۲۰۱۷). Cave fragmentation in a cave-to-mill context at the New Afton Mine part I: fragmentation and hang-up frequency prediction.
- Ngidi, S., & Pretorius, D. (۲۰۱۰). Impact of poor fragmentation on cave management. *Proceedings of the ۲nd international symposium on block and sublevel caving*, p. ۵۹۳-۶۰۱. Perth.
- Nicholas, D., & Srikant, A. (۲۰۰۴). Assesment of primary fragmentation from drill core data. *Proceedings of Massmin ۲۰۰۴*, p. ۵۵-۵۹, Santiago, chile,.
- Noroozi, M., Kakaie, R., & Jalali, S. E. (۲۰۱۵). ۳D stochastic rock fracture modeling related to strike-slip faults. *Journal of Mining and Environment*, vol. ۶ (۲), p. ۱۶۹-۱۸۱.
- Paredes, P., & Pineda, M. (۲۰۱۴). An analysis of the lateral dilution entry mechanisms in Panel Caving. *Third International Symposium on Block and Sublevel Caving*. Santiago, Chile.
- Perusich, K. (۲۰۱۰). System Diagnosis using fuzzy cognitive maps. *cognitive maps Intech*.
- Pierce, M. (۲۰۰۹). *A model for gravity flow of fragmented rock in block caving mines*. University of Queensland. Brisbane: Ph.D thesis, University of Queensland.
- Potvin, Y. H. (۱۹۸۹). Design guidelines for open stope support. *CIM bulletin*, vol. ۸۲, ۵۳-۶۲.
- Rafiee, R., Ataei, M., & KhalooKakaie, R. (۲۰۱۵). A new cavability index in block caving mines using fuzzy rock engineering system. *Int. J. Rock Mech. Min. Sci*, vol. ۷۷, p. ۶۸-۷۶.
- Rafiee, R., Ataei, M., Khalokakaei, R., Jalali, S. E., & Sereshki, F. (۲۰۱۴). Determination and Assessment of Parameters Influencing Rock Mass Caveability in Block Caving Mines Using the Probabilistic Rock Engineering System. *International Journal of Rock Mechanics and Rock Engineering*.

- Rafiee, R., Ataei, M., KhaloKakaie, R., & Jalali, S. (۲۰۱۵). A fuzzy rock engineering system to assess rock mass cavability in block caving mines. *Neural Comput & Applic.*
- Rafiee, R., Ataei, M., KhalooKakaie, R., Jalali, S., Sereshki, F., & Noroozi, M. (۲۰۱۸). Numerical modeling of influence parameters in cavability of rock mass in block caving mines. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, Vol. ۱۰۵, p. ۲۲-۲۷.
- Rafiee, R., Khalookakaiea, R., Ataeia, M., Jalalia, S., Sereshki, F., & Azarfar, A. (۲۰۱۶). Improvement of rock engineering system coding using fuzzy numbers. *Journal of Intelligent & Fuzzy Systems*, vol. ۳۰, p. ۷۰۵-۷۱۵.
- Rafiee, R., Mohammadi, S., Ataei, M., & Khalookakaie, R. (۲۰۱۸). Application of fuzzy RES and fuzzy DEMATEL in the rock behavioral systems under uncertainty. *Geosystem Engineering*.
- Rafiei, M., Rahimpour-Bonab, H. (۲۰۱۶). Quantifying sedimentary and diagenetic controls on fracturing: an application in rock engineering systems. *J. Geophys. Eng*, vol. ۱۳, p. ۹۲۸-۹۳۹.
- Rogers, S. F., Kennard, D. K., Dershowitz, W. S., & Van As, A. (۲۰۰۷). *Characterizing the in situ fragmentation of a fractured rock mass using a discrete fracture network approach*. London: Rock Mechanics: Meeting Society's Challenges and Demands, Taylor & Francis Group.
- Rogers, S., Elmo, D., Webb, G., & Catalan, A. (۲۰۱۰). A DFN based approach to defining insitu, primary and secondary Fragmentation distributions for the Cadia East panel cave project. , perth, Aust. *Proceedings of ۲nd int. symp. On block and sublevel caving*, perth., p. ۴۲۵-۴۳۷.
- Rogers, S., Elmo, D., Webb, G., & Catalan, A. (۲۰۱۴). Volumetric Fracture Intensity Measurement for Improved Rock Mass Characterisation and Fragmentation Assessment in Block Caving Operations. *Rock Mechanics and Rock Engineering*.
- Rongxing, H., Huan, L., Fengyu, R., Guanghui, L., & Zhang, J. (۲۰۱۹). A Fuzzy Comprehensive Assessment Approach and Application of Rock Mass Cavability in Block Caving Mining, *Mathematical Problems in Engineering*.
- Ross, T. (۲۰۱۰). *Fuzzy Logic With Engineering Applications*. New Mexico: John Wiley and Sons.
- Ross, T., Van As, A. (۲۰۱۲) Major hazards associated with block caving. In ۶th International Conference and Exhibition on Mass Mining, Sudbury, Canada

- Sainsbury, B., Pierce, M., & Mas Ivars, D. (۲۰۰۸). Analysis of Caving Behaviour Using a Synthetic Rock Mass: Uniquitous Joint Rock Mass Modelling Technique., *Proceedings of the 1st Southern Hemisphere International Rock Mechanics Symposium (SHIRMS)*.
- Sainsbury, D. P., & Pierce, M. E. (۲۰۱۱). A historical review of the development of numerical cave propagation simulations. *۲nd International FLAC/DEM Symposium*. Melbourne.
- Salmeron, J. (۲۰۱۲). Fuzzy cognitive maps for artificial emotions forecasting. *Applied Soft Computing*, vol. ۱۲(۱۲), p. ۳۷۰۴-۳۷۱۰.
- SME. (۱۹۹۶). *Mining Engineering Handbook*, (Vols. ISBN ۰-۸۷۳۳۵-۱۰۰-۲). Colorado: ۲nd Edition (Ed H.L. Hartman), Published by Society for Mining, Metallurgy, and Exploration, Inc. Littleton.
- Stewart, S. V., & Forsyth, W. W. (۱۹۹۵). The Mathews method for open stope design. *CIM Bull*, p. ۴۵-۵۳.
- Strada, E., & Hatano, N. (۲۰۰۸). Communicability in complex networks. *Physica A: Statistical Mechanics and its Applications*, vol. ۳۸۸ (۵), p. ۷۶۴-۷۷۴.
- Suorineni, F., Kaiser, P., & Tannant, D. (۲۰۰۰). Unifying application of the stability graph for open stope design. *CIM Bulletin*.
- Trueman, R., Mikula, P., Mawdesley, C., & Harries, N. (۲۰۰۰). *Experience in Australia with the application of the Mathews method for open stope design*. CIM Bulletin.
- Valencia, M. E., Basaure, K., & Castro, R. (۲۰۱۴). Towards an understanding of mud rush behaviour in block-panel caving mines. *Proceedings of the Third International Symposium on Block and Sublevel Caving*. Santiago, Chile.
- Van As, A., & Jeffrey, R. G. (۲۰۰۰). Hydraulic fracturing as a cave inducement technique at Northparkes Mines. *MassMin ۲۰۰۰*. Brisbane.
- Van As, A., & Van Hout, G. (۲۰۰۸). Implications of widely spaced drawpoints. *In ۵th International Conference and Exhibition on Mass Mining, MassMin*, p. ۱۴۷-۱۵۴, Luleå, Sweden.
- Veneziano, D. (۱۹۷۸). *Probabilistic models of joints in rock*. Research report, Department of Civil and Environmental Engineering, Massachusetts Institute of Technology, Cambridge, MA.

- Vera, S. G. (۱۹۸۱). Caving at Climax. In D. Stewart, *SME Mining Engineering Handbook*, ۱۵۷-۱۷۶. New York: Society of Mining Engineers of the American Institute of Mining, Metallurgical, and Petroleum Engineers.
- Viera, E., & Diez, E. (۲۰۱۴). Analysis of hangup frequency in Block ۱.۲ Esmeralda Sur Mine. *Proceedings of the Third International Symposium on Block and Sublevel Caving*. Santiago.
- Villacorta, P., Masegosa, A., Castellanos, D., & Lamata, M. (۲۰۱۴). A new fuzzy linguistic approach to qualitative cross impact analysis. *Applied soft computing*, vol. ۲۴, p. ۱۹-۳۰.
- Villaescusa, E. (۱۹۹۱). *A three dimensional model of rock jointing*. Brisbane: University of Queensland.
- Villaescusa, E., & Brown, E. T. (۱۹۹۲). Maximum likelihood estimation of joint size from trace length measurements. *Rock Mech. Rock Eng.*, vol. ۲۵, p. ۶۷-۸۷.
- Vyazmensky, A., Elmo, D., & Stead, D. (۲۰۰۹). Role of Rock Mass Fabric and Faulting in the Development of Block Caving Induced Surface Subsidence. *Rock Mechanics and Rock Engineering*, vol. ۴۳, p. ۵۳۳-۵۵۶.
- Vyazmensky, A., Elmo, D., Stead, D., & Rance, J. (۲۰۰۷). Combined finite-discrete element modeling of surface subsidence associated with block caving mining. *Proceedings of 1st Canada -U.S. Rock Mechanics Symposium*, p. ۴۶۷-۴۷۵. Vancouver.
- Wang, L. G., Yamashita, S., Sugimoto, S., & Pan, C. (۲۰۰۳). A Methodology for Predicting the In Situ Size and Shape Distribution of Rock Blocks. *Rock Mech. Rock Eng.*, vol. ۳۶(۲), p. ۱۲۱-۱۴۲.
- Warburton, P. M. (۱۹۸۱). Vector stability analysis of an arbitrary polyhedral rock block with any number of free faces. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, vol. ۱۸ (۵), p. ۴۱۵-۴۲۷.
- Witte, A., Bostwick, C., Skrecky, G., Bent, H., Jakubec, J., Volk, J., & Major, K. (۲۰۱۳). *Technical Report for the Kemess Underground Project*. Vancouver: AuRico Gld Inc.
- Wright, G., & Goodwin, P. (۲۰۰۹). Decision making and planning under low levels of predictability: Enhancing the scenario method. *International Journal of Forecasting*, vol. ۲۵ (۴), p. ۸۱۳-۸۲۵.

- Yang, Y., & Zhang, Q. (۱۹۹۸). The application of artificial neural networks to rock engineering system (RES). *International Journal of Rock Mechanics and Mining Science*, p. ۷۲۷-۷۴۵.
- Younessi, A., & Rasouli, V. (۲۰۱۰). A fracture sliding potential index for wellbore stability analysis. *International Journal of Rock Mechanics & Mining Sciences*, p. ۹۲۷-۹۳۹.
- Yubo, L. (۲۰۱۶). *Characterisation of Block Cave Mining Secondary Fragmentation*. THE FACULTY OF GRADUATE AND POSTDOCTORAL STUDIES. University of British Columbia.
- Zare Naghadehi, M., Jimenez, R., Khalokakaie, R., & Jalali, S. E. (۲۰۱۱). A probabilistic systems methodology to analyze the importance of factors affecting the stability of rock slopes. *Eng Geol*, vol. ۱۱۸ (۳), p. ۸۲-۹۲.
- Zimmermann, H. (۲۰۰۱). *Fuzzy Set Theory -and its applications*. New york: Springer Science+Business Media.
- اورعی, ک. (۱۳۸۳). *روش های استخراج زیرزمینی معادن فلزی*. انتشارات دانشگاه صنعتی امیرکبیر
- زارع نقدهی, م. (۲۰۱۲). *بهبود رویکرد سیستمهای مهندسی سنگ به منظور ارزیابی ناپایداری شیب معادن سنگی روباز*. شاهرود: دانشگاه صنعتی شاهرود
- عطائی, م. (۱۳۸۹). *تصمیم گیری چند معیاره فازی شاهرود: دانشگاه صنعتی شاهرود*

ماتریس‌های اندرکنش مستقیم عوامل موثر امکان‌پذیری پیاده‌سازی تخریب توده‌ای

کارشناس شماره ۱																						
P _۱	۲	.	.	.	.	.	.	۲	۱	.	.	۱	۱	۱	۱	۱	۱	.	.	۱	۱	۱
۲	P _۲	.	.	.	.	.	.	۱	.	.	.	۱	۱	۱	۱	۱	۱	۱	.	۱	۱	۱
.	.	P _۳	.	.	.	.	۱	۲	۲	۱	۳	۴	۲	۲	۳	۲	۲	۳	۲	۲	۴	۴
.	.	.	P _۴	.	.	۳	۱	۱	۱	۱	۲	۲	۱	۱	۱	۱	۱	۲	۱	۱	۲	۲
.	.	.	.	P _۵	.	.	۱	۱	۱	.	۲	۳	۲	۲	۱	۱	۱	۲	۱	۱	۳	۳
.	.	.	.	.	P _۶	۳	۲	۱	۱	۱	۲	۳	۲	۱	۲	۲	۱	۱	۱	۱	۳	۳
.	.	.	۲	.	۳	P _۷	۲	۱	۱	۱	۲	۲	۲	۱	۱	۲	۱	۱	۱	۱	۳	۲
.	.	.	۲	.	۳	۳	P _۸	۱	۱	.	۱	۱	۱	۲	۲	۲	۱	۲	۲	۱	۱	۲
۲	۲	.	.	.	.	.	.	P _۹	۲	۲	۲	۴	۲	۲	۳	۳	۳	۳	۲	۴	۴	۳
۱	۱	.	.	.	.	.	.	۱	P _{۱۰}	۱	۱	۲	۱	۲	۱	۲	۲	۱	۲	۴	۳	۲
۱	۱	.	.	.	۳	۳	۳	۲	۱	P _{۱۱}	۱	۲	۱	۱	۱	۱	۱	۱	۴	۱	۲	۱
.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	P _{۱۲}	۱	۲	۲	۴	۴	۱	۲	۲	۱	۲	۳
.	.	.	.	.	.	.	.	۲	۱	۱	۱	P _{۱۳}	۳	۱	۱	۱	۲	۱	۱	۳	۴	۴
.	.	.	.	.	.	.	.	۱	۱	۱	۳	۱	P _{۱۴}	۴	۴	۳	۲	۲	۲	۱	۲	۳
.	.	.	.	.	.	.	.	۲	۱	.	۲	.	۳	P _{۱۵}	۳	۳	۱	۱	۲	۱	۲	۲
.	.	.	.	.	.	.	.	۲	۱	۱	۲	۱	۲	۲	P _{۱۶}	۴	۳	۲	۲	۱	۱	۳
.	.	.	.	.	.	.	.	۱	۱	۱	۲	۱	۱	۲	۲	P _{۱۷}	۲	۲	۲	.	۱	۲
.	.	.	.	.	.	.	.	۱	۱	۱	.	.	۱	.	.	.	P _{۱۸}	.	.	.	۱	۱
.	.	.	.	.	.	.	.	۱	۱	.	۱	.	۱	۱	۱	۱	.	P _{۱۹}	۱	.	۱	۱
.	.	.	.	.	.	.	.	۱	۱	۲	۲	.	۲	۱	۳	۲	۱	۱	P _{۲۰}	۱	.	.
.	.	.	.	.	.	.	.	۳	۳	۱	۱	۲	۱	۲	۲	۱	۱	.	۲	P _{۲۱}	۳	۱
.	.	.	.	.	.	.	.	۳	۳	۱	۲	.	۲	۲	۲	۱	۱	۱	۱	.	P _{۲۲}	۳
.	.	.	.	.	.	.	.	۱	۱	۱	۳	.	۳	۲	۴	۲	۱	۲	۱	.	۱	P _{۲۳}

کارشناس شماره ۲																						
P _۱	۳	۲	۲	۳	۳	۳	۲	۳	۰	۲	۳	۳	۱	۲	۱	۰	۲	۲	۲	۲	۳	۳
۲	P _۲	۲	۲	۲	۳	۲	۲	۱	۰	۱	۲	۲	۱	۱	۱	۰	۱	۲	۱	۲	۳	۳
۴	۳	P _۳	۱	۱	۱	۱	۳	۲	۰	۳	۴	۲	۱	۰	۰	۰	۱	۲	۲	۳	۴	۴
۴	۳	۱	P _۴	۰	۴	۴	۲	۲	۰	۳	۴	۲	۱	۰	۰	۰	۱	۲	۲	۱	۴	۴
۴	۲	۲	۰	P _۵	۱	۲	۲	۲	۱	۳	۴	۲	۱	۰	۰	۰	۱	۱	۲	۳	۴	۳
۲	۲	۱	۱	۱	P _۶	۲	۱	۱	۰	۱	۲	۲	۱	۰	۰	۰	۱	۱	۱	۱	۴	۱
۱	۳	۱	۲	۱	۳	P _۷	۲	۱	۰	۲	۳	۲	۱	۰	۰	۰	۱	۱	۲	۱	۴	۳
۴	۳	۴	۴	۳	۳	۱	P _۸	۲	۰	۳	۴	۲	۱	۱	۱	۱	۲	۲	۳	۲	۴	۳
۲	۱	۲	۱	۰	۱	۱	۰	P _۹	۰	۲	۳	۳	۳	۳	۳	۱	۳	۲	۳	۴	۳	۳
۱	۲	۱	۱	۰	۱	۱	۰	۱	P _{۱۰}	۰	۰	۳	۲	۲	۲	۱	۲	۲	۲	۴	۲	۲
۱	۲	۲	۲	۰	۲	۱	۴	۳	۰	P _{۱۱}	۱	۳	۲	۲	۱	۰	۱	۱	۴	۱	۳	۱
۲	۱	۱	۰	۰	۱	۱	۲	۱	۰	۲	P _{۱۲}	۲	۴	۲	۳	۴	۲	۳	۴	۱	۲	۱
۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۱	۰	۱	۰	P _{۱۳}	۱	۱	۰	۰	۱	۱	۱	۲	۱	۲
۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۲	۰	۰	۳	۳	P _{۱۴}	۰	۳	۲	۳	۱	۴	۱	۱	۱
۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۲	۰	۱	۱	۴	۱	P _{۱۵}	۳	۳	۲	۱	۴	۲	۳	۲
۰	۰	۱	۱	۰	۰	۰	۰	۲	۰	۲	۳	۰	۳	۲	P _{۱۶}	۴	۴	۲	۴	۲	۴	۴
۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۱	۰	۳	۱	۰	۳	۲	۱	P _{۱۷}	۴	۲	۳	۱	۲	۲
۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۱	۰	۲	۲	۰	۲	۱	۱	۲	P _{۱۸}	۱	۲	۲	۳	۳
۱	۱	۰	۰	۰	۰	۰	۱	۰	۰	۱	۱	۰	۱	۱	۲	۱	۲	P _{۱۹}	۲	۲	۲	۱
۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۱	۱	۰	۳	۱	۰	۰	۱	۴	۱	۱	۱	P _{۲۰}	۲	۲	۱
۰	۰	۱	۱	۰	۰	۰	۰	۲	۰	۳	۲	۰	۲	۲	۳	۱	۳	۲	۳	P _{۲۱}	۴	۴
۰	۰	۱	۱	۰	۰	۰	۱	۲	۰	۴	۳	۰	۴	۳	۴	۳	۳	۲	۴	۱	P _{۲۲}	۴
۱	۱	۰	۰	۰	۰	۱	۲	۱	۰	۳	۴	۰	۳	۳	۴	۴	۲	۴	۴	۰	۲	P _{۲۳}

کارشناس شماره ۳																							
P _۱	۴	۱	۲	۱	۰	۰	۰	۴	۲	۲	۴	۴	۴	۲	۴	۳	۳	۳	۳	۴	۴	۴	
۳	P _۲	۱	۲	۱	۰	۰	۰	۴	۲	۲	۳	۴	۳	۲	۴	۳	۳	۳	۳	۴	۴	۴	
۴	۴	P _۳	۲	۴	۰	۰	۰	۲	۲	۲	۴	۴	۴	۴	۳	۲	۴	۲	۲	۲	۴	۴	
۱	۱	۲	P _۴	۲	۲	۲	۲	۱	۱	۲	۱	۱	۱	۱	۱	۱	۱	۱	۱	۱	۱	۲	
۴	۳	۴	۲	P _۵	۱	۱	۱	۳	۳	۱	۱	۱	۱	۱	۱	۱	۱	۱	۱	۱	۱	۱	
۲	۱	۱	۲	۱	P _۶	۱	۱	۱	۱	۰	۱	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۱	۱	۱	
۴	۴	۰	۲	۱	۲	P _۷	۱	۱	۱	۰	۲	۱	۰	۰	۱	۰	۰	۰	۰	۱	۱	۱	
۴	۴	۰	۲	۱	۱	۳	P _۸	۱	۱	۰	۲	۱	۰	۰	۱	۰	۰	۰	۰	۱	۱	۱	
۲	۱	۲	۱	۳	۰	۱	۱	P _۹	۲	۱	۳	۴	۳	۳	۴	۲	۴	۲	۲	۴	۴	۴	
۲	۱	۲	۱	۳	۰	۱	۱	۲	P _{۱۰}	۱	۱	۲	۲	۳	۴	۲	۴	۲	۱	۴	۲	۲	
۴	۳	۳	۲	۳	۲	۲	۲	۴	۴	P _{۱۱}	۳	۲	۱	۴	۴	۴	۴	۲	۲	۲	۳	۳	
۰	۲	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۱	۰	۲	P _{۱۲}	۱	۰	۲	۴	۴	۲	۱	۴	۰	۲	۴	
۱	۰	۲	۰	۰	۰	۰	۰	۲	۲	۱	۰	P _{۱۳}	۲	۴	۴	۲	۲	۳	۲	۲	۴	۴	
۰	۱	۲	۱	۱	۰	۰	۰	۲	۲	۱	۰	۲	P _{۱۴}	۲	۲	۰	۰	۱	۱	۲	۴	۳	
۰	۱	۰	۱	۱	۰	۰	۰	۲	۲	۱	۴	۴	۰	P _{۱۵}	۴	۳	۳	۳	۳	۰	۴	۳	
۰	۱	۱	۱	۱	۰	۰	۰	۲	۲	۱	۴	۱	۰	۴	P _{۱۶}	۴	۴	۲	۲	۲	۲	۲	
۰	۱	۱	۱	۱	۰	۰	۰	۲	۲	۱	۴	۰	۰	۲	۴	P _{۱۷}	۳	۴	۴	۰	۴	۳	
۰	۱	۱	۱	۱	۰	۰	۰	۲	۲	۱	۴	۰	۰	۲	۴	۲	P _{۱۸}	۴	۴	۰	۴	۴	
۰	۱	۲	۰	۱	۰	۰	۰	۲	۲	۱	۲	۰	۰	۲	۳	۲	۳	P _{۱۹}	۴	۰	۴	۴	
۰	۱	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۲	۱	۱	۲	۰	۰	۲	۳	۳	۴	۲	P _{۲۰}	۰	۳	۳	
۰	۱	۲	۰	۱	۰	۰	۰	۲	۲	۱	۱	۲	۲	۱	۱	۱	۱	۱	۰	P _{۲۱}	۴	۱	
۲	۱	۱	۰	۱	۰	۰	۰	۲	۲	۱	۱	۴	۳	۴	۳	۳	۲	۲	۱	۴	P _{۲۲}	۳	
۲	۱	۰	۱	۱	۰	۰	۰	۲	۲	۱	۴	۴	۳	۴	۴	۳	۴	۳	۳	۰	۳	P _{۲۳}	

کارشناس شماره ۴																						
P _۱	۳	۳	۱	۲	۰	۰	۳	۱	۰	۰	۲	۳	۲	۴	۳	۰	۳	۲	۳	۰	۳	۳
۱	P _۲	۱	۲	۲	۱	۲	۳	۱	۰	۱	۰	۳	۲	۲	۳	۰	۲	۱	۲	۰	۳	۲
۰	۴	P _۳	۰	۴	۲	۲	۳	۱	۰	۴	۴	۳	۳	۳	۴	۱	۲	۳	۳	۱	۳	۳
۰	۳	۰	P _۴	۳	۳	۳	۲	۰	۰	۴	۱	۳	۱	۲	۳	۰	۱	۰	۱	۰	۲	۳
۰	۲	۲	۱	P _۵	۱	۲	۲	۰	۰	۳	۳	۳	۲	۲	۱	۰	۳	۲	۲	۱	۳	۲
۰	۲	۰	۰	۰	P _۶	۱	۰	۲	۰	۱	۱	۲	۲	۱	۱	۱	۱	۱	۱	۰	۳	۲
۰	۲	۱	۲	۲	۲	P _۷	۲	۱	۰	۳	۳	۲	۱	۱	۱	۰	۲	۱	۲	۰	۱	۲
۰	۱	۰	۰	۱	۲	۱	P _۸	۱	۰	۴	۳	۳	۳	۲	۲	۱	۲	۳	۳	۰	۲	۲
۳	۳	۳	۴	۳	۰	۲	۰	P _۹	۰	۳	۲	۴	۳	۴	۳	۲	۳	۱	۲	۴	۳	۳
۱	۱	۲	۲	۱	۰	۱	۰	۰	P _{۱۰}	۲	۰	۴	۳	۳	۲	۰	۲	۱	۲	۳	۲	۲
۳	۲	۱	۲	۱	۲	۲	۳	۳	۰	P _{۱۱}	۰	۲	۱	۲	۳	۲	۰	۱	۴	۰	۲	۲
۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	P _{۱۲}	۰	۰	۰	۲	۴	۰	۴	۴	۰	۱	۳
۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	P _{۱۳}	۱	۳	۲	۰	۲	۰	۱	۰	۴	۳
۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۳	۰	۰	۲	۰	P _{۱۴}	۱	۲	۲	۰	۲	۲	۰	۱	۳
۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۲	۰	۱	P _{۱۵}	۴	۳	۲	۱	۳	۰	۰	۳
۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۱	۲	۰	۱	۳	۱	۰	۲	P _{۱۶}	۴	۴	۳	۳	۰	۱	۳
۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۲	۰	۰	۴	۱	۰	۲	۴	P _{۱۷}	۳	۳	۳	۰	۱	۴
۰	۰	۱	۰	۰	۰	۰	۲	۰	۰	۰	۴	۰	۰	۲	۳	۰	P _{۱۸}	۳	۳	۰	۱	۳
۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۱	۰	۰	۳	۳	۳	۰	P _{۱۹}	۲	۰	۰	۳
۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۱	۱	۰	۰	۰	۰	۰	۲	۴	۱	۰	۲	P _{۲۰}	۰	۰	۳
۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۴	۰	۰	۰	۰	۰	۱	۲	۰	۱	۰	۰	P _{۲۱}	۳	۲
۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۱	۰	۲	۳	۲	۱	۲	۳	۰	۴	۴	۰	۰	P _{۲۲}	۳
۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۳	۰	۰	۳	۴	۳	۳	۳	۳	۰	۳	P _{۲۳}

کارشناس شماره ۵																						
P _۱	۲	۱	۱	۲	۲	۲	۱	۲	۱	۰	۳	۳	۲	۲	۲	۰	۲	۳	۳	۰	۲	۲
۲	P _۲	۳	۱	۳	۲	۱	۱	۲	۱	۰	۲	۲	۲	۲	۲	۰	۲	۲	۲	۰	۲	۳
۰	۰	P _۳	۳	۳	۱	۱	۰	۱	۱	۳	۱	۴	۱	۲	۲	۰	۳	۳	۱	۰	۳	۳
۰	۰	۱	P _۴	۳	۱	۱	۳	۲	۱	۴	۰	۲	۱	۱	۱	۰	۳	۱	۲	۰	۲	۱
۰	۰	۱	۲	P _۵	۲	۱	۲	۱	۰	۳	۰	۲	۱	۱	۰	۰	۲	۱	۲	۰	۲	۱
۰	۰	۱	۰	۱	P _۶	۱	۰	۱	۰	۱	۱	۲	۱	۱	۱	۰	۱	۱	۱	۰	۱	۱
۰	۰	۰	۱	۱	۰	P _۷	۱	۲	۰	۳	۲	۱	۱	۱	۱	۰	۱	۰	۲	۰	۱	۱
۲	۲	۰	۱	۱	۲	۱	P _۸	۱	۰	۱	۱	۱	۱	۱	۱	۰	۱	۰	۲	۰	۱	۲
۰	۰	۲	۱	۱	۱	۱	۱	P _۹	۰	۱	۱	۱	۱	۰	۱	۲	۲	۰	۱	۴	۱	۱
۰	۰	۱	۱	۱	۱	۲	۰	۲	P _{۱۰}	۲	۰	۲	۲	۲	۰	۰	۱	۰	۱	۳	۲	۲
۱	۱	۱	۲	۲	۱	۱	۱	۱	۰	P _{۱۱}	۱	۲	۲	۱	۲	۱	۱	۰	۴	۰	۱	۱
۰	۰	۰	۰	۰	۰	۲	۱	۱	۰	۱	P _{۱۲}	۱	۱	۰	۳	۲	۱	۲	۳	۰	۱	۱
۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۱	۰	۰	۱	P _{۱۳}	۱	۱	۲	۰	۱	۱	۱	۰	۳	۲
۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۱	۱	۱	۱	۱	P _{۱۴}	۱	۳	۲	۱	۱	۱	۰	۱	۱
۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۱	۱	۰	P _{۱۵}	۲	۴	۲	۱	۱	۰	۱	۱
۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۱	۱	۱	۱	۱	۱	۱	P _{۱۶}	۲	۲	۲	۱	۰	۱	۱
۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۲	۰	۰	۳	۰	۰	۰	۲	P _{۱۷}	۰	۰	۰	۰	۰	۰
۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۱	۰	۰	۱	۰	۰	۰	۲	۰	P _{۱۸}	۱	۱	۰	۴	۲
۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۳	۰	۰	۰	۲	۲	۱	P _{۱۹}	۲	۰	۱	۱
۰	۰	۰	۱	۱	۰	۱	۱	۱	۰	۱	۰	۰	۰	۰	۲	۱	۰	۲	P _{۲۰}	۰	۲	۲
۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۲	۰	۰	۰	۲	۰	۱	۲	۰	۱	۱	۰	P _{۲۱}	۳	۲
۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۱	۱	۰	۰	۰	۳	۰	۳	۲	۲	۰	P _{۲۲}	۲
۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۱	۰	۱	۱	۰	۰	۰	۳	۰	۳	۱	۲	۰	۲	P _{۲۳}

کارشناس شماره ۶																							
P _۱	۱	۳	۲	۲	۲	۲	۳	۱	۰	۰	۰	۳	۲	۲	۱	۱	۳	۱	۰	۴	۳	۳	
۴	P _۲	۲	۲	۲	۲	۲	۳	۱	۰	۰	۰	۳	۲	۲	۱	۱	۲	۱	۰	۳	۳	۲	
۰	۰	P _۳	۱	۳	۱	۱	۳	۳	۳	۴	۴	۴	۳	۲	۴	۴	۴	۲	۱	۴	۴	۴	
۰	۰	۱	P _۴	۱	۳	۳	۴	۰	۱	۴	۳	۳	۲	۱	۱	۱	۲	۲	۱	۱	۳	۴	
۰	۰	۱	۲	P _۵	۱	۱	۱	۱	۲	۳	۰	۳	۲	۱	۲	۱	۳	۲	۰	۲	۳	۴	
۰	۰	۰	۲	۰	P _۶	۲	۰	۰	۰	۰	۲	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۱	۲	
۰	۰	۰	۱	۰	۳	P _۷	۲	۰	۰	۱	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۲	۳	
۰	۰	۰	۰	۰	۱	۳	P _۸	۰	۰	۰	۳	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۲	۰	۱	۲	
۰	۰	۲	۲	۲	۰	۰	۰	P _۹	۱	۱	۱	۴	۳	۴	۳	۲	۴	۰	۰	۴	۴	۴	
۰	۰	۱	۲	۲	۰	۰	۰	۰	P _{۱۰}	۱	۱	۴	۳	۴	۳	۳	۴	۰	۰	۴	۴	۳	
۰	۰	۰	۰	۰	۱	۳	۴	۰	۰	P _{۱۱}	۳	۱	۲	۰	۱	۰	۰	۰	۴	۱	۱	۲	
۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	P _{۱۲}	۰	۰	۲	۴	۳	۰	۲	۳	۰	۱	۳	
۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۱	P _{۱۳}	۴	۲	۴	۲	۴	۰	۰	۰	۴	۳	
۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۴	۲	P _{۱۴}	۰	۴	۴	۳	۰	۱	۲	۳	۴	
۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۱	۱	P _{۱۵}	۴	۴	۲	۰	۰	۰	۱	۲		
۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۲	۲	۲	۴	۱	۴	۴	P _{۱۶}	۴	۳	۱	۱	۱	۳	۴	
۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۱	۱	۰	۲	۰	۴	۳	۴	P _{۱۷}	۳	۱	۱	۲	۲	۲	
۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۴	۱	۰	۰	۰	۰	۰	۱	۲	P _{۱۸}	۰	۰	۱	۳	۱	
۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	P _{۱۹}	۱	۰	۰	۰	
۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	P _{۲۰}	۰	۱	۲	
۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۴	۴	۱	۱	۱	۱	۳	۳	۳	۳	۳	۰	۱	P _{۲۱}	۴	۳
۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۴	۴	۰	۰	۰	۰	۰	P _{۲۲}	۰	۰
۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	P _{۲۳}	۰

کارشناس ۷																						
P ₁	۳	۰	۲	۱	۰	۰	۲	۲	۱	۰	۲	۴	۴	۳	۳	۱	۲	۳	۳	۳	۲	۱
۲	P ₂	۱	۱	۲	۱	۲	۰	۱	۱	۱	۱	۲	۴	۱	۱	۲	۲	۴	۲	۰	۳	۴
۱	۲	P ₃	۰	۳	۳	۳	۳	۲	۱	۳	۳	۳	۲	۴	۳	۲	۳	۳	۳	۳	۴	۴
۲	۱	۱	P ₄	۰	۲	۴	۴	۳	۰	۴	۲	۲	۰	۰	۱	۰	۲	۱	۲	۱	۲	۳
۲	۱	۱	۲	P ₅	۳	۰	۱	۰	۲	۴	۰	۲	۱	۲	۲	۱	۰	۳	۲	۳	۴	۰
۰	۰	۱	۱	۰	P ₆	۰	۱	۲	۰	۰	۳	۳	۰	۳	۲	۰	۰	۰	۰	۰	۴	۱
۰	۱	۳	۲	۴	۰	P ₇	۰	۲	۰	۰	۰	۲	۲	۳	۲	۲	۲	۱	۱	۱	۲	۲
۱	۱	۰	۲	۱	۴	۴	P ₈	۱	۱	۱	۳	۱	۲	۱	۱	۱	۰	۱	۱	۰	۱	۳
۴	۰	۱	۰	۰	۰	۲	۰	P ₉	۲	۱	۰	۴	۳	۳	۲	۲	۲	۰	۰	۴	۴	۳
۱	۱	۲	۲	۲	۲	۱	۰	۳	P ₁₀	۱	۲	۴	۳	۴	۲	۰	۲	۰	۳	۳	۴	۰
۴	۱	۲	۴	۰	۰	۲	۲	۲	۲	P ₁₁	۲	۴	۰	۳	۳	۰	۲	۱	۲	۰	۱	۱
۰	۱	۰	۰	۰	۰	۱	۱	۱	۰	۰	P ₁₂	۱	۱	۲	۳	۲	۱	۲	۱	۱	۲	۳
۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۳	۰	۰	۰	P ₁₃	۳	۴	۰	۳	۱	۳	۱	۱	۴	۴
۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۴	۰	۰	۱	۲	P ₁₄	۱	۲	۰	۱	۲	۰	۲	۲	۲
۰	۰	۰	۱	۱	۰	۰	۰	۳	۰	۰	۳	۰	۰	P ₁₅	۳	۴	۲	۲	۱	۰	۰	۳
۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۲	۰	۰	۱	۰	۰	۱	P ₁₆	۴	۴	۳	۳	۳	۲	۳
۰	۰	۱	۱	۰	۰	۰	۱	۱	۱	۲	۲	۰	۰	۰	۱	P ₁₇	۳	۴	۲	۱	۳	۳
۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۱	۰	۲	۰	۰	۲	۱	۰	P ₁₈	۳	۳	۰	۴	۰	۰
۰	۰	۱	۰	۱	۰	۰	۰	۱	۰	۰	۰	۰	۰	۴	۲	۲	P ₁₉	۴	۰	۲	۴	۰
۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۱	۰	۰	۱	۰	۱	۰	۱	۱	۰	P ₂₀	۰	۱	۳	۰
۰	۰	۲	۰	۰	۰	۰	۰	۲	۳	۰	۰	۰	۲	۰	۲	۰	۰	۰	۰	P ₂₁	۴	۳
۱	۱	۲	۰	۰	۰	۰	۰	۳	۱	۳	۳	۱	۰	۲	۲	۲	۱	۱	۱	۳	P ₂₂	۴
۱	۱	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۲	۰	۱	۲	۰	۰	۳	۲	۳	۴	۲	۲	۰	۱	P ₂₃

کارشناس ۸																						
P ₁	۳	۳	۰	۲	۱	۱	۱	۲	۱	۰	۲	۰	۰	۲	۱	۱	۲	۲	۱	۲	۳	۴
۴	P ₂	۱	۲	۰	۰	۰	۳	۳	۱	۰	۰	۳	۰	۳	۲	۲	۱	۰	۲	۱	۴	۲
۲	۱	P ₃	۱	۰	۱	۱	۲	۲	۰	۲	۴	۴	۳	۱	۳	۱	۳	۲	۳	۱	۴	۴
۰	۰	۱	P ₄	۳	۱	۱	۲	۱	۳	۲	۲	۱	۲	۰	۰	۳	۱	۳	۲	۲	۳	۰
۲	۰	۳	۱	P ₅	۰	۴	۱	۳	۱	۳	۴	۱	۴	۱	۲	۱	۱	۰	۲	۰	۰	۴
۱	۱	۱	۲	۲	P ₆	۴	۱	۲	۰	۰	۱	۱	۰	۰	۱	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۱
۰	۰	۱	۱	۰	۲	P ₇	۲	۴	۰	۰	۳	۱	۱	۲	۴	۳	۳	۲	۰	۲	۱	۴
۰	۰	۱	۲	۳	۰	۰	P ₈	۰	۱	۱	۲	۲	۱	۲	۲	۳	۰	۰	۱	۰	۱	۱
۱	۰	۲	۲	۲	۰	۰	۰	P ₉	۰	۳	۳	۳	۲	۲	۰	۳	۳	۳	۲	۴	۳	۲
۰	۰	۱	۱	۱	۰	۲	۰	۰	P ₁₀	۳	۰	۴	۴	۲	۳	۲	۰	۴	۱	۴	۳	۲
۰	۲	۰	۲	۱	۱	۳	۲	۲	۰	P ₁₁	۲	۳	۳	۱	۱	۴	۰	۰	۳	۰	۱	۲
۱	۰	۰	۰	۰	۱	۰	۰	۰	۰	۱	P ₁₂	۱	۱	۲	۳	۴	۴	۲	۴	۱	۲	۴
۱	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	P ₁₃	۳	۱	۴	۱	۰	۲	۰	۰	۴	۴
۰	۰	۱	۰	۰	۰	۰	۰	۱	۰	۰	۱	۱	P ₁₄	۱	۱	۱	۱	۴	۰	۱	۳	۳
۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۳	۱	۱	۴	۴	۰	P ₁₅	۲	۴	۳	۳	۲	۳	۲	۲
۰	۱	۱	۱	۱	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۱	۰	۳	P ₁₆	۳	۳	۱	۱	۱	۱	۳
۰	۰	۱	۱	۰	۰	۰	۰	۳	۱	۱	۳	۰	۰	۴	۳	P ₁₇	۳	۲	۲	۲	۱	۲
۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۴	۲	۱	۱	۰	۱	۳	۴	P ₁₈	۲	۰	۳	۴	۴
۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۱	۲	۲	۰	۰	۰	۰	۰	۰	P ₁₉	۰	۰	۴	۰	۰
۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۱	۰	۰	۱	۳	۲	۲	۲	P ₂₀	۰	۱	۳
۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۳	۲	۱	۳	۳	۰	۲	۰	۲	۰	۴	۰	P ₂₁	۳	۰
۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۲	۲	۰	۰	۰	۰	۰	۳	۲	۲	۴	۰	۱	P ₂₂	۱
۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۱	۱	۱	۰	۴	۰	۰	۱	۳	۲	۳	۴	۲	۰	۲	P ₂₃

کارشناس ۹																						
P ₁	۳	۲	۲	۲	۳	۳	۱	۳	۰	۲	۳	۳	۱	۲	۱	۰	۲	۲	۲	۲	۳	۳
۲	P ₂	۲	۲	۲	۳	۲	۲	۲	۰	۱	۲	۲	۱	۱	۲	۰	۱	۲	۱	۲	۳	۳
۴	۳	P ₃	۱	۱	۱	۱	۲	۲	۰	۳	۳	۳	۱	۰	۲	۱	۱	۲	۲	۲	۴	۴
۴	۳	۱	P ₄	۰	۴	۴	۲	۲	۰	۳	۲	۲	۱	۰	۰	۰	۱	۲	۲	۱	۴	۴
۴	۲	۲	۰	P ₅	۱	۲	۲	۲	۱	۳	۴	۲	۱	۰	۰	۰	۱	۱	۲	۳	۴	۳
۲	۲	۱	۱	۱	P ₆	۲	۱	۱	۰	۱	۲	۲	۱	۰	۰	۰	۱	۱	۱	۱	۴	۱
۱	۳	۱	۲	۱	۳	P ₇	۲	۱	۰	۲	۳	۲	۱	۰	۰	۰	۱	۱	۲	۱	۳	۱
۴	۳	۴	۲	۳	۳	۱	P ₈	۲	۰	۳	۳	۲	۱	۱	۱	۱	۲	۲	۳	۲	۴	۳
۲	۱	۲	۱	۰	۱	۱	۰	P ₉	۰	۲	۳	۳	۳	۲	۳	۱	۳	۲	۳	۴	۳	۳
۱	۲	۱	۱	۰	۱	۱	۰	۱	P ₁₀	۰	۰	۳	۲	۲	۲	۱	۲	۲	۲	۴	۱	۲
۱	۲	۲	۲	۰	۲	۱	۴	۳	۰	P ₁₁	۱	۳	۲	۲	۱	۰	۱	۱	۴	۱	۳	۲
۲	۱	۱	۰	۰	۱	۱	۲	۱	۰	۲	P ₁₂	۲	۳	۱	۳	۴	۲	۳	۴	۱	۲	۱
۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۱	۰	۱	۰	P ₁₃	۱	۱	۰	۰	۲	۱	۱	۲	۱	۲
۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۲	۰	۰	۳	۲	P ₁₄	۰	۳	۲	۳	۱	۴	۱	۱	۱
۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۲	۰	۱	۱	۴	۱	P ₁₅	۳	۳	۲	۱	۴	۲	۳	۲
۰	۰	۱	۱	۰	۰	۰	۰	۲	۰	۲	۳	۰	۳	۲	P ₁₆	۴	۴	۲	۴	۲	۴	۴
۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۱	۰	۲	۱	۰	۳	۲	۱	P ₁₇	۲	۲	۳	۱	۲	۲
۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۱	۰	۲	۲	۰	۲	۰	۱	۲	P ₁₈	۱	۲	۲	۳	۳
۱	۱	۰	۰	۰	۰	۰	۱	۰	۰	۱	۱	۰	۱	۱	۲	۱	۲	P ₁₉	۲	۲	۲	۱
۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۱	۱	۰	۳	۱	۰	۰	۱	۴	۱	۱	۲	P ₂₀	۲	۲	۱
۰	۰	۱	۱	۰	۰	۰	۰	۲	۰	۳	۲	۰	۲	۲	۳	۱	۳	۲	۳	P ₂₁	۴	۳
۰	۰	۱	۱	۰	۰	۰	۱	۲	۰	۴	۳	۰	۴	۳	۲	۳	۳	۲	۴	۱	P ₂₂	۳
۱	۱	۰	۰	۰	۰	۱	۲	۱	۰	۳	۴	۰	۳	۳	۲	۲	۲	۴	۴	۰	۲	P ₂₃

کارشناس ۱۰																							
P ₁	۱	۲	۱	۲	۲	۲	۲	۲	۰	۰	۰	۳	۲	۲	۱	۱	۳	۱	۰	۳	۳	۳	
۴	P ₂	۲	۲	۲	۲	۱	۳	۱	۱	۱	۱	۳	۳	۲	۲	۱	۲	۱	۰	۳	۳	۲	
۰	۰	P ₃	۱	۳	۱	۱	۱	۲	۳	۳	۳	۴	۴	۲	۴	۳	۴	۲	۱	۳	۴	۴	
۰	۰	۱	P ₄	۱	۳	۳	۴	۰	۱	۴	۳	۳	۲	۱	۱	۱	۲	۲	۱	۱	۳	۴	
۰	۰	۱	۲	P ₅	۱	۱	۱	۱	۲	۳	۰	۳	۲	۱	۲	۱	۳	۲	۰	۲	۳	۴	
۰	۰	۰	۲	۰	P ₆	۲	۰	۰	۰	۰	۲	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۱	۲	
۰	۰	۰	۱	۰	۳	P ₇	۲	۰	۰	۱	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۱	۰	۰	۰	۲	۲	
۰	۰	۰	۰	۰	۱	۳	P ₈	۰	۰	۰	۳	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۲	۰	۱	۲	
۰	۰	۲	۲	۲	۰	۰	۰	P ₉	۱	۱	۱	۴	۳	۳	۳	۲	۴	۰	۰	۴	۴	۴	
۰	۰	۱	۲	۲	۰	۰	۰	۰	P ₁₀	۱	۱	۴	۳	۴	۳	۳	۴	۰	۰	۴	۲	۳	
۰	۰	۰	۰	۰	۱	۳	۴	۰	۰	P ₁₁	۲	۱	۲	۰	۱	۰	۰	۰	۴	۱	۱	۲	
۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	P ₁₂	۰	۰	۲	۴	۳	۰	۳	۳	۰	۱	۳	
۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	P ₁₃	۴	۲	۴	۲	۴	۰	۰	۰	۴	۳	
۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۴	۲	P ₁₄	۱	۴	۴	۳	۰	۱	۲	۳	۴	
۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۱	۱	P ₁₅	۴	۴	۲	۰	۰	۰	۱	۲	
۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۲	۲	۲	۴	۱	۴	۴	P ₁₆	۴	۳	۱	۱	۱	۳	۴
۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۱	۱	۰	۲	۰	۴	۳	۴	P ₁₇	۳	۱	۱	۲	۲	۲
۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۴	۱	۰	۰	۰	۰	۰	۱	۲	P ₁₈	۰	۰	۱	۳	۱
۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	P ₁₉	۱	۰	۰	۰	۰
۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۲	۰	۰	۱	P ₂₀	۰	۱	۲	۰
۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۴	۳	۱	۱	۱	۱	۳	۳	۲	۳	۰	۱	P ₂₁	۴	۳
۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۴	۴	۱	۱	۰	۰	۰	P ₂₂	۲	۰
۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۳	۱	۰	۰	۰	۰	۰	۱	P ₂₃

کارشناس ۱۱																						
P ₁	۳	۰	۲	۱	۰	۰	۲	۲	۱	۰	۲	۴	۴	۳	۳	۱	۱	۳	۳	۳	۳	۲
۲	P ₂	۱	۱	۲	۱	۱	۰	۱	۰	۰	۲	۲	۳	۱	۱	۲	۲	۴	۲	۰	۳	۴
۱	۲	P ₃	۰	۳	۳	۳	۲	۲	۱	۳	۴	۳	۲	۴	۱	۲	۳	۳	۲	۲	۴	۴
۲	۱	۱	P ₄	۰	۲	۴	۴	۳	۰	۴	۲	۲	۰	۰	۱	۰	۲	۱	۲	۱	۲	۳
۲	۱	۱	۲	P ₅	۳	۰	۱	۰	۲	۴	۰	۲	۱	۲	۲	۱	۰	۳	۲	۳	۴	۰
۰	۰	۱	۱	۰	P ₆	۰	۱	۲	۰	۰	۳	۳	۰	۳	۲	۰	۰	۰	۰	۰	۴	۱
۰	۱	۳	۲	۴	۰	P ₇	۰	۲	۰	۰	۰	۲	۲	۳	۲	۲	۲	۲	۱	۱	۳	۳
۱	۱	۰	۲	۱	۴	۴	P ₈	۱	۱	۱	۲	۱	۲	۱	۱	۱	۰	۱	۱	۰	۱	۳
۴	۰	۱	۰	۰	۰	۲	۰	P ₉	۲	۱	۰	۴	۳	۳	۲	۲	۲	۰	۰	۴	۴	۳
۱	۱	۲	۲	۲	۲	۱	۰	۳	P ₁₀	۱	۲	۴	۳	۴	۲	۰	۲	۰	۳	۳	۴	۰
۴	۱	۲	۴	۰	۰	۲	۲	۲	۲	P ₁₁	۲	۴	۰	۳	۳	۰	۲	۱	۳	۰	۱	۱
۰	۱	۰	۰	۰	۰	۱	۱	۱	۰	۰	P ₁₂	۱	۱	۱	۳	۳	۱	۱	۱	۱	۲	۳
۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۳	۰	۰	۰	P ₁₃	۳	۴	۰	۳	۱	۲	۱	۱	۴	۴
۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۴	۰	۰	۱	۱	P ₁₄	۱	۲	۰	۱	۲	۰	۲	۲	۲
۰	۰	۰	۱	۱	۰	۰	۰	۳	۰	۰	۳	۰	۰	P ₁₅	۳	۴	۲	۲	۱	۰	۰	۳
۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۲	۰	۰	۱	۰	۰	۱	P ₁₆	۴	۴	۳	۳	۳	۲	۳
۰	۰	۱	۱	۰	۰	۰	۱	۱	۲	۲	۲	۰	۰	۰	۱	P ₁₇	۴	۴	۲	۱	۳	۳
۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۱	۰	۲	۰	۰	۱	۱	۰	P ₁₈	۳	۳	۰	۴	۰
۰	۰	۱	۰	۱	۰	۰	۰	۱	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۴	۲	۲	P ₁₉	۴	۰	۲	۴
۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۱	۰	۰	۱	۰	۱	۰	۱	۱	۱	۰	P ₂₀	۰	۱	۲
۰	۰	۲	۰	۰	۰	۰	۰	۲	۳	۰	۰	۰	۲	۰	۲	۱	۰	۰	۰	P ₂₁	۴	۴
۱	۱	۲	۰	۰	۰	۰	۰	۳	۱	۳	۳	۱	۰	۲	۲	۱	۲	۱	۱	۳	P ₂₂	۴
۱	۱	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۲	۰	۱	۲	۰	۰	۳	۳	۲	۴	۲	۲	۰	۲	P ₂₃

کارشناس ۱۲																						
P ₁	۲	۳	۱	۲	۱	۱	۱	۲	۱	۲	۲	۳	۲	۲	۱	۲	۲	۱	۲	۲	۱	۲
۳	P ₂	۲	۱	۲	۱	۱	۲	۱	۰	۱	۱	۳	۲	۲	۳	۱	۲	۲	۲	۲	۳	۳
۲	۲	P ₃	۱	۲	۱	۱	۱	۲	۱	۳	۴	۳	۳	۲	۳	۱	۳	۲	۲	۲	۴	۴
۲	۲	۱	P ₄	۱	۳	۳	۳	۱	۱	۳	۱	۲	۱	۱	۱	۱	۱	۲	۲	۱	۳	۳
۲	۱	۲	۱	P ₅	۱	۲	۱	۲	۱	۳	۲	۲	۲	۱	۱	۱	۱	۱	۲	۲	۳	۲
۱	۱	۱	۱	۱	P ₆	۲	۱	۱	۰	۰	۲	۱	۱	۱	۱	۰	۰	۰	۰	۰	۲	۱
۱	۲	۱	۲	۲	۲	P ₇	۱	۲	۰	۱	۲	۱	۱	۱	۱	۱	۱	۲	۱	۱	۲	۲
۲	۲	۱	۱	۲	۲	۲	P ₈	۱	۰	۲	۲	۲	۱	۱	۱	۱	۱	۱	۲	۱	۲	۲
۲	۱	۲	۲	۱	۰	۱	۰	P ₉	۱	۲	۲	۴	۳	۳	۳	۲	۳	۱	۲	۴	۳	۳
۱	۱	۱	۱	۱	۱	۱	۰	۱	P ₁₀	۱	۱	۳	۳	۳	۳	۱	۲	۲	۲	۴	۳	۲
۲	۲	۱	۲	۱	۱	۲	۳	۲	۱	P ₁₁	۲	۳	۲	۲	۲	۱	۱	۱	۳	۱	۲	۲
۱	۱	۰	۰	۰	۰	۰	۱	۱	۰	۱	P ₁₂	۱	۱	۱	۴	۴	۲	۳	۳	۱	۲	۳
۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۱	۰	۰	۰	P ₁₃	۲	۲	۲	۱	۳	۰	۱	۱	۳	۳
۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۲	۰	۰	۲	۲	P ₁₄	۱	۳	۲	۲	۲	۲	۱	۲	۲
۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۲	۰	۱	۲	۲	۱	P ₁₅	۳	۳	۲	۲	۲	۱	۲	۲
۰	۰	۱	۱	۰	۰	۰	۰	۲	۱	۱	۳	۱	۱	۳	P ₁₆	۴	۴	۲	۳	۲	۲	۳
۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۲	۱	۱	۲	۰	۱	۲	۳	P ₁₇	۳	۳	۳	۱	۲	۳
۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۱	۱	۱	۲	۰	۱	۱	۲	۲	P ₁₈	۲	۲	۱	۳	۳
۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۱	۱	۱	۱	۰	۰	۱	۲	۱	۱	P ₁₉	۲	۱	۲	۲
۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۱	۰	۱	۱	۰	۰	۱	۳	۱	۱	۲	P ₂₀	۱	۱	۲
۰	۰	۱	۰	۰	۰	۰	۰	۳	۱	۱	۱	۱	۱	۲	۲	۱	۲	۱	۱	P ₂₁	۴	۲
۰	۰	۱	۰	۰	۰	۰	۰	۲	۱	۲	۲	۱	۲	۳	۳	۱	۳	۲	۱	۱	P ₂₂	۳
۱	۱	۰	۰	۰	۰	۰	۱	۱	۰	۱	۳	۱	۱	۲	۳	۲	۳	۳	۳	۰	۲	P ₂₃

Abstract

As the operation depth of large-scale open-pit mines increases, the cost of production increases accordingly. Therefore, the need for reducing the costs drives design engineers to adopt less costly underground approaches. Among the underground methods, Block caving method can have the lowest operating cost for extraction of deep and large mass deposits. On the other hand, the high cost of block caving developments, engineers should be ensure that this method can be implemented before beginning of the project. Technically, the challenge of cavability, especially for high strength ore deposits, has always been addressed by designers. Many of the key variables of the block caving method such as undercut design draw point geometry draw column height and draw rate are a function of rock mass fragmentation. These variables play an important role in initiation of cavability, its continuation and crop production with appropriate fragmentation. So there are complex interactions between parameters. In this study, all the factors affecting the feasibility of this method have been explained. Rock engineering systems (RES) have been used as a power full approach for examining the interaction of these factors with each other by coding the interaction matrix of the rock engineering system, focusing on indirect influences of parameters. For reducing the uncertainty in ESQ coding of interaction matrix, the fuzzy system have been applied. Thereafter establishing the indirect interaction matrix is done, using structural analysis method PWP. Finally, after analyzing the improved interactions matrix, the indirect fuzzy index for workability of block caving method has been developed. For this purpose, ۲۳ affecting factors on workability of block caving method are classified into four main groups of geomechanical, environmental, geometrical and operational factors based on the results of previous studies. Finally, using Indirect Fuzzy Interaction Matrix, the workability index of the proposed block caving Method was calculated and its values fo ESQ r Diablo Regiment and Reserve Northe and kemess were calculated. In order to complete the study, the results were compared with the data obtained from the reports of the mines, indicating that the proposed method was well adapted to estimate the workability of the block caving method.

Keywords:

Block caving, Fragmentation, Workability index, Rock Engineering System, Indirect interaction



Faculty of Mining, Petroleum and Geophysics Engineering

PhD Thesis in Mineral Exploitation

**Evaluation of a Geomechanical Feasibility index for block
caving mining using Rock Engineering Systems Approach**

By:

Amir Azadmehr

Supervisor:

Dr. Seyed Mohammad Esmaeel Jalali

September ۲۰۱۹