



# یادداشت سردبیر

نشریات دانشجویی با قدمتی بیش از ۷۰ سال در ایران، همواره نقش مهمی را در تشکل‌ها، انجمن‌ها و کانون‌های دانشجویی ایفا کرده‌اند. نشریه علمی- تخصصی بلور، نمایه‌سازی شده در سایت سیویلیکا، از پرسابقه‌ترین نشریات حوزه مهندسی معدن در گرایش‌های مختلف بوده که زیر نظر انجمن علمی دانشکده مهندسی معدن دانشگاه صنعتی امیرکبیر (پلی‌تکنیک تهران)، از سال ۱۳۷۵ تا ۱۳۹۸ به‌طور مستمر در قالب فصلنامه و بعد از وقفه دوساله، به دلیل اپیدمی کووید-۱۹، از سال ۱۴۰۱ به‌صورت دوفصلنامه به چاپ رسیده است.

در شماره ۴۳ این نشریه که در تاریخ ۱ خرداد ۱۴۰۱ به چاپ رسید، هیئت تحریریه همکاری خود را با اعضای از اساتید دانشگاه‌های معدنی کشور و دانشجویان دکتری دانشگاه امیرکبیر آغاز کرد. در این جلسات، با مرور کارکرد نشریه در شماره‌های گذشته، اعضای هیئت تحریریه با پیشبرد اهداف تعیین شده گذشته و خط‌مشی‌گذاری‌های جدید، در زمان بسیار محدود به احیای نشریه پرداختند. در ادامه و پس از برگزاری همایش روز ملی معدن در ۱ خرداد ۱۴۰۱، اعضای هیئت تحریریه با انگیزه مضاعف جلسات خود را ادامه داده و به بالا بردن کیفیت مجله اهتمام ورزیدند. سرانجام، در دی‌ماه ۱۴۰۱ جلد حاضر (جلد ۴۴) آماده چاپ شد. رسالت مهم نشریه علمی- تخصصی بلور بدون شک آگاهی بخشیدن به مهندسين جوان در جهت رشد و بالندگی جامعه معدنی است.

در این راستا، لازم است از زحمات جناب آقای دکتر مرتضی اصانلو، مشاور علمی نشریه علمی- تخصصی بلور، برای راهنمایی‌ها و مساعدت‌های بی‌دریغشان و تمامی اعضای هیئت تحریریه، داوران محترم و گروه اجرایی نشریه سپاسگزاری کنم. آنچه مسلم است چاپ مجلد ۴۴ از نشریه بلور بدون همراهی این عزیزان میسر نبود.

مهرنوش حیدری

سردبیر نشریه علمی تخصصی بلور و

کاندیدای دکتری مهندسی معدن دانشگاه صنعتی امیرکبیر

۱۴۰۱/۱۱/۰۱





# سر مقاله

## نگارنده: مهرنوش حیدری

کاندیدای دکتری مهندسی استخراج معدن، دانشگاه صنعتی امیرکبیر (پلی تکنیک تهران)

سر دبیر نشریه علمی - تخصصی بلور

## Industry 4.0; Mine of the Future

Looking ahead, successful miners will be those that also mine for innovation

**با نگاهی به آینده، معدنکاران موفق در جستجوی تکنولوژی‌های جدید و به کارگیری نوآوری‌ها در مهندسی معدن هستند.**

انقلاب صنعتی چهارم<sup>۱</sup> یا صنعت نسل ۴ (I 4) به تغییرات سریع فناوری، صنایع و الگوهای اجتماعی و عملیاتی اشاره دارد که در طی قرن ۲۱ به منظور افزایش اتصال‌های متقابل و اتوماسیون هوشمند فراگیر شده‌است. انقلاب صنعتی چهارم مفهومی است که تلاش می‌کند صنایع، هوشمند، پویا و انعطاف‌پذیر شوند و به دنبال غلبه بر چالش‌های نوین همچون رقابت جهانی، بی‌ثباتی بازار و تقاضا، توسعه سفارشی‌سازی، خلق نوآوری و مدیریت چرخه عمر محصول است. به‌طور خلاصه، انقلاب صنعتی چهارم، با بهره‌مندی از فناوری‌هایی مانند اینترنت اشیا<sup>۲</sup>، رایانش ابری<sup>۳</sup> و هوش مصنوعی<sup>۴</sup>، درک ما را از دنیای پیرامونمان تغییر داده و بدون شک بر صنعت معدن نیز اثرگذار خواهد بود.

1- Industry 4.0

2- Internet of Things (IoT)

3- Cloud Computing (CC)

4- Artificial Intelligence (AI)



صنعت معدنکاری باتوجه به قدمت و بزرگی خود، از آخرین صنایعی به شمار می‌رود که وارد فاز دیجیتالی شدن می‌شود. در حال حاضر، برخی از معادن گام‌های مهمی را به سمت معدن دیجیتالی آینده برداشته‌اند و صنعت معدن به تدریج به دیدگاه‌های انقلاب صنعتی چهارم و معادن کاملاً خودکار و همچنین امکانات پیشرفته‌تر پردازش معدن نزدیک‌تر می‌شود. در I 4، معدن چهار (معدن ۴/۰)<sup>۱</sup> یک پروژه معدنی است که در آن، معدنکار متخصصی است که داده‌های پردازش سریع و وضعیت ماشین‌آلات هنگام حرکت در معدن را دنبال می‌کند. معدنکار در معدن ۴/۰، مشکلات را مستقیماً و با تعامل از راه دور با سایر اپراتورها، کارشناسان، تامین‌کنندگان و مشتریان در تیم‌های چندصلاحيتی حل می‌کند. کنترل تولید حتی می‌تواند در یک دوقلوی دیجیتال<sup>۲</sup> دور از معدن انجام شود. به‌طور خلاصه، معدن ۴/۰ یک معدنکار تقویت شده با حواس و حافظه گسترش یافته از طریق فناوری را در نظر می‌گیرد. این فناوری از مهارت‌های انسانی بهره برده، از آن‌ها پشتیبانی می‌کند و آگاهی موقعیتی را از طریق حسگرهایی مانند حسگرهای تعبیه شده بر روی جام شاول، کامیون، دیواره معدن و یا در لباس اپراتور افزایش می‌دهد و درعین‌حال، هوشیاری عملیات را حفظ می‌کند.

نیروی کار معدن نیرویی خواهد بود که از تحول دیجیتال استقبال کند. اگر نسل بعدی مدیران معدن به دنبال حفظ جایگاه خود در صنعت معدنکاری هستند، لازم است فارغ‌التحصیلان و استعدادهایی با سواد دیجیتالی را جذب و حفظ کنند تا از جایگاه خود در میان سایر شرکت‌های معدنی محافظت کنند. به عبارتی، شرکت‌های معدنی باید ظهور این نوآوری‌ها را پذیرفته و ایجاد فضای مناسب برای به‌کارگیری آن‌ها را در طرح‌های توسعه معدن بگنجانند.

سخن آخر اینکه در معادن دیجیتال، تمام جزئیات عملیاتی به هم متصل می‌شوند و ایمنی، بهره‌وری و کارایی را بهبود می‌بخشند. معادن آینده بدون دی‌اکسید کربن، دیجیتالی و مستقل هستند و محیطی پاک، ایمن و پایدار خواهند داشت.

1- Mining 4.0  
2- Digital Twin (DT)

# آینده معدنکاری و مشاغل آینده در معادن

آیا آموزش در دانشکده‌های معدن در راستای نیازهای آینده معدنکاری تنظیم شده است؟

مطالعه موردی: مدرسه معدن کلرادو و دانشکده‌های معدن ایران

## مهرنوش حیدری

کاندیدای دکتری مهندسی استخراج معدن، دانشکده مهندسی معدن، دانشگاه صنعتی امیرکبیر، تهران، ایران

### چکیده

معدنکاری در ایران و جهان از قدمت طولانی برخوردار است و سهم مهمی در رشد اقتصادی (GDP)، توسعه زیرساخت‌ها، تحولات فرهنگی جامعه، و توسعه پایدار داشته است. پیش‌بینی‌های نگارنده نشان می‌دهد که در سال ۲۰۴۰ حدوداً ۹۰ میلیارد تن کانی و فلز لازم است تا نیازهای بشر در صنایع مختلف تأمین شود. سؤال این است که آموزش و پژوهشی که در دانشکده‌ها و دانشگاه‌های فعلی معدن ایران و جهان اجرا می‌شود تا چه حد در راستای نیازهای بخش معدنکاری در آینده است؟ چالش‌های آینده معدنکاری شامل معدنکاری در راستای توسعه پایدار، استخراج مواد معدنی کم‌عیار و عمیق، استخراج از اقیانوس‌ها، دریاها، دریاچه‌ها، رودخانه‌ها و شط‌ها، استخراج از سیارات (ماه)، و استفاده از رباتیک، تکنولوژی‌های دیجیتال، هوش مصنوعی به جای هوش طبیعی خواهد بود. در این تحقیق ابتدا برنامه آموزشی و پژوهشی ده دانشگاه برتر جهان در رتبه‌بندی سال ۲۰۲۲ از وبسایت آن دانشگاه‌ها تهیه شد. اولین نکته مشخص این بود که هیچ‌یک از این دانشگاه‌ها برنامه درسی مشابه یکدیگر را ارائه نمی‌دهند. درحالی‌که در دانشگاه‌های ایران برنامه درسی یکسان در تمام دانشکده‌های مهندسی معدن ارائه می‌شود. تفاوت عمده دیگر دانشگاه‌های معدن ایران با دانشگاه‌های برتر جهان، جدا کردن رشته و گرایش به جای تخصص است. در برنامه درسی دانشگاه‌های ایران گرایش‌های جداگانه با عناوین استخراج معدن، اکتشاف معدن، فراوری مواد معدنی، و مکانیک سنگ تعریف شده است که چنین تقسیم‌بندی در دانشگاه‌های برتر جهان وجود ندارد. در ادامه، برنامه درسی برترین دانشگاه معدنی جهان در رتبه‌بندی جهانی QS در سال ۲۰۲۲، دانشگاه معدن کلرادو که مقام اول را از میان ۵۰ دانشکده معدن برتر جهان به خود اختصاص داده است و دانشگاه‌های معدن ایران ارائه و تحلیل شد. نتایج نشان داد که تعداد واحدهای درسی جهت کسب مدرک کارشناسی رشته مهندسی معدن در دانشگاه‌های معدن ایران ۱۴۰ واحد و در دانشگاه کلرادو ۱۳۲/۵ واحد است که ۱۲۳/۵ واحد آن دروس مشخص و یکسان برای کلیه دانشجویان مهندسی معدن جهت کسب مدرک کارشناسی است و دانشگاه با ارائه مجموعه متنوعی از دروس انتخابی، به دانشجویان این اختیار را می‌دهد تا با توجه به موضوع پایان‌نامه خود و با توجه به تخصصی که به آن علاقه‌مند هستند، ۹ واحد از بین این دروس اختیاری انتخاب کنند. با بررسی برنامه درسی این دانشگاه‌ها و مقایسه آن با نیازهای آینده صنعت معدنکاری مشخص شد که در مجموع ۲۴ واحد از ۱۳۲/۵ واحد ارائه شده در دانشگاه کلرادو، دروس مرتبط با شاخص‌های توسعه پایدار ۱۸ درصد از کل دروس را به خود اختصاص می‌دهد. درحالی‌که در دانشگاه‌های معدن ایران جمعاً ۳٪ از کل دروس ارائه شده مرتبط با شاخص‌های توسعه پایدار است. هیچ‌کدام از این دانشگاه‌ها دروس مرتبط با نیازهای آینده معدنکاری مانند آموزش استخراج از ذخایر عمیق و کم‌عیار، استخراج از عمق منابع آب را در سیلابس خود ندارند. اما در دانشگاه کلرادو یک گرایش فرعی با عنوان معدنکاری از سیارات ارائه شده است. همچنین می‌توان مشاهده کرد که در دانشگاه‌های معدن ایران و کلرادو واحدهای درسی مرتبط با آموزش تکنولوژی‌های جدید، طراحی ماشین‌آلات و تجهیزات معدنی مخصوص معادن بزرگ‌مقیاس و عمیق، آموزش روش‌های فراوری کنسنگ‌های کم‌عیار و یا دارای عناصر مزاحم، و فناوری‌های دیجیتال مورد استفاده در معدنکاری گنجانده نشده است.

کلمات کلیدی: سیلابس دانشگاه، آینده معدنکاری، توسعه پایدار، استخراج ذخایر عمیق و کم‌عیار، استخراج از سیارات



## ۱- مقدمه

آموزش و توسعه استانداردهای حرفه‌ای و تخصصی برای بخش معدن دارند که در برنامه درسی دانشگاه منعکس شده است.

طی مطالعه‌ای در بخش مهندسی معدن دانشگاه بریتیش کلمبیا<sup>۷</sup> (UBC) که در حال حاضر دهمین دانشگاه برتر جهان در موضوع آموزش مهندسی معدن است، از سال ۲۰۰۰ تا ۲۰۰۶ یک فرآیند یادگیری با هدف درک ماهیت و ارتباط ارزش‌های توسعه پایدار با بخش معدن و جوامع آن توسعه داد[۸]. این مطالعه نشان می‌دهد که چگونه توسعه پایدار باید به‌طور مؤثر در فرهنگ دانشگاهی گنجانده شود. مسائل اساسی در فرآیند یادگیری شامل موارد زیر است:

- ا. واکنش دانشگاه به افزایش آگاهی جامعه و همچنین مسئولیت‌های زیست‌محیطی در برنامه‌ریزی، طراحی، توسعه، بهره‌برداری و بستن معدن از سوی معدنکاران باید چگونه باشد؟
- ب. چه مدل آموزشی می‌تواند توانایی دانشکده‌های معدن را در راستای توسعه پایدار تقویت کند؟
- ج. چه ابزار تعاملی میان‌رشته‌ای می‌تواند به توسعه آموزشی و پژوهشی در دانشگاه‌ها و مؤسسات کمک کند؟
- د. مسئولیت‌پذیری اجتماعی شرکت‌های معدنی و مهندس معدن چیست؟

نیکیتوف<sup>۸</sup> (۲۰۱۱) نقش و جایگاه آموزش و پرورش را در توسعه نوآورانه اقتصاد بررسی کرد و به این نتیجه رسید که تغییرات اساسی در سیاست‌های آموزشی، نوسازی آموزش و پرورش از طریق ایجاد انواع جدید مؤسسات آموزشی، استفاده از فناوری‌های جدید و ایجاد همکاری بین دانشگاه‌ها و شرکت‌ها با حمایت دولت، کیفیت آموزش را تحت تأثیر قرار می‌دهد[۱۰].

فرولووا<sup>۹</sup> و همکاران (۲۰۱۷) نشان دادند که مدیران معدنکاری آینده به مهارت‌هایی نیاز دارند که در برنامه درسی سنتی دانشگاه‌های معدن ارائه نشده است، مانند مهارت‌های محیطی و اجتماعی. فرولووا سه مشکل اصلی را برای پرسنل مدرن در بخش معدن بیان می‌کند: (۱) عدم ارتباط نزدیک بین تولید، آموزش و علم، (۲) بودجه ناکافی برای تحقیق و توسعه، و (۳) کمبود پرسنل بسیار ماهر برای اطمینان از توسعه خلاقانه صنعت [۱۲].

برای اینکه سرفصل‌های درسی در مراکز آموزشی دارای محتوایی در راستای نیازهای صنعت در آینده باشد، محتوای سرفصل دروس مهندسی معدن باید شامل مباحث فنی، زیست‌محیطی و اجتماعی باشد. به این منظور، این مطالعه به بررسی واحدهای دانشگاهی مقطع کارشناسی در برترین دانشگاه معدنی جهان، یعنی دانشگاه مدرسه معدن کلرادو<sup>۱۰</sup> در ایالات متحده آمریکا، دارای رتبه اول جهان از میان ۵۰ دانشکده در رشته مهندسی معدن در سال ۲۰۲۲ بر اساس رتبه‌بندی جهانی QS<sup>۱۱</sup> [۱۳]، خواهد پرداخت تا مشخص شود آیا برنامه درسی برای تربیت مهندسان معدن واجد شرایط برای آینده معدنکاری است یا خیر. همچنین سیلابس درسی این دانشگاه با سیلابس دانشگاه‌های معدن ایران در سال

معدنکاری یکی از اساسی‌ترین صنایع موردنیاز بشر برای بهبود و رشد استانداردهای زندگی است. مصرف مواد معدنی از دیرباز و در دوران باستان (مانند عصر آهن و فولاد) مورد توجه بوده است. در دو دهه اخیر، نرخ افزایش سالانه ۱/۳ درصدی جمعیت جهان منجر به افزایش ۱/۵ درصدی مصرف مواد معدنی شده است [۱]. با افزایش مصرف مواد معدنی و کاهش معادن با عیار بالا و نزدیک به زمین، مهندسان معدن مواد معدنی را با عیار پایین‌تر و از اعماق بیشتر استخراج می‌کنند که منجر به تغییرات متعدد در شرایط معدن (تسریع اثرات زیست‌محیطی ناشی از فعالیت‌های معدنی [۲-۶] و تغییر تجهیزات و ماشین‌آلات مورد استفاده مانند به‌کارگیری سنگ‌شکن‌های درون پیت [۷]) شده است. چالش‌های اصلی که در حال حاضر شرکت‌های معدنی با آن مواجه هستند با مسائل پایداری مرتبط است: مشکلات زیست‌محیطی و اجتماعی - اقتصادی در منطقه معدن و جوامع مجاور. همچنین موضوع استخراج از اعماق بیش از ۱۰۰۰ متری، استخراج معادن در اعماق اقیانوس‌ها و دریاها<sup>۱</sup> و استخراج در ماه در میان کشورها در سال‌های اخیر رواج یافته است.

آنچه در این زمینه حیاتی است این است که آموزش و صنعت باید متناسب با یکدیگر رشد کرده باشند. برنامه‌های آموزشی باید شامل آموزش فن‌آوری‌های جدید، روش‌های جدید استخراج و پردازش، ایمنی منابع انسانی، معدنکاری سبز، و به‌طور کلی در راستای توسعه پایدار باشد و مدیران صنعتی نیز باید در به‌کارگیری دانش به‌روز پژوهشگران دانشگاهی کوشا باشند. در بعضی دیدگاه‌ها، تأکید بر آموزش بومی و متکی بر معدنکاری بومی است. این دیدگاه باعث می‌شود تا دانش‌آموختگان رشته مهندسی معدن از دستاوردهای علمی که حاصل تلاش پژوهشگران جهان در ۲۵۰ سال گذشته بوده است، محروم شوند؛ به عبارتی، در امر دسترسی به تازه‌های علمی متوقف شوند. در آینده استفاده از نیروی انسانی زیاد و کم‌مهارت جای خود را به انسان‌های آهنی یا همان رباتیک خواهد داد و به‌جای استفاده از هوش طبیعی، از هوش مصنوعی که دست‌ساز خود بشر است استفاده خواهد شد.

مراکز آموزشی مرتبط با حوزه معدن بهترین بستر برای تربیت افراد واجد شرایط کار در صنعت است. در نتیجه، همگام‌سازی نیازهای صنعت دانش‌محور امروزی با آموزش‌های ارائه‌شده به دانشجویان در مراکز علمی و دانشگاه‌ها و ارتباط دانشگاه و بازار کار از اهمیت ویژه‌ای برخوردار است.

آنچه از یک فارغ‌التحصیل مهندسی معدن در سراسر جهان انتظار می‌رود تقریباً در همه کشورها یکسان است و تفاوت‌ها بیشتر در شکل و الگوی آموزش و مدت‌زمان برنامه آموزشی دانشگاه‌های مختلف است. نهادهای بین‌المللی مانند IOM<sup>۲</sup>، ICMM<sup>۳</sup>، SME<sup>۴</sup> و دستورالعمل‌هایی مانند EIA<sup>۵</sup> و LCA<sup>۶</sup> نیز نقش اساسی در کیفیت

7- University of British Columbia  
8- Nikitov  
9- Frolova  
10- Colorado School of Mines  
11-QS world university ranking for mining engineering academic field

1- Marine Mining  
2-Society for Mining, Metallurgy, and Exploration  
3- Institute of Materials, Minerals & Mining  
4- International Council on Mining and Metals  
5- Environmental Impact Assessment  
6- Life Cycle Assessment



آنچه در ابتدای این تحقیق مشخص است، هیچ یک از دانشگاه‌های ایران در رتبه‌بندی جهانی جزو ۵۰ دانشگاه برتر جهان در رشته مهندسی معدن قرار ندارند. جدول ۲ نام و مکان ۱۰ دانشگاه برتر را نشان می‌دهد. بر اساس این جدول، ۴ دانشگاه از ۱۰ دانشگاه برتر جهان در استرالیا قرار دارند. ۳ دانشگاه در کانادا، ۱ دانشگاه در روسیه، ۱ دانشگاه در ایالات متحده و ۱ دانشگاه در شیلی.

#### ۱-۲- دانشگاه معدن کلرادو

دانشکده معدن کلرادو در سال ۱۸۷۴ تأسیس شد. در تمام رتبه‌بندی‌های دانشگاه‌های جهانی QS از سال ۲۰۱۶ تا ۲۰۲۲، این دانشگاه به‌عنوان برترین دانشکده مهندسی معدن رتبه‌بندی شده است.

جدول ۲- ده دانشگاه برتر مهندسی معدن جهان در سال ۲۰۲۲

رتبه	نام دانشگاه	کشور
۱	دانشگاه معدن کلرادو Colorado School of Mines	ایالات متحده
۲	دانشگاه کرتین Curtin University	استرالیا
۳	دانشگاه نیو ساوت ولز سیدنی The University of New South Wales (UNSW Sydney)	استرالیا
۴	دانشگاه کوئینزلند The University of Queensland	استرالیا
۵	دانشگاه استرالیای غربی The University of Western Australia (UWA)1	استرالیا
۶	دانشگاه مک‌گیل McGill University	کانادا
۷	دانشگاه معدن سنت پترزبورگ Saint Petersburg Mining University	روسیه
۸	دانشگاه شیلی Universidad de Chile	شیلی
۹	دانشگاه کوئینز در کینگستون Queen's University at Kingston	کانادا
۱۰	دانشگاه بریتیش کلمبیا University of British Columbia	کانادا

#### ۲-۲- دانشگاه کرتین

دانشگاه کرتین در سال ۱۹۶۶ به‌عنوان موسسه فن‌آوری استرالیای غربی (WAIT) تأسیس شد. کرتین بر اساس رتبه‌بندی دانشگاه‌های جهانی QS برای سال ۲۰۲۲، رتبه اول استرالیا و دومین در جهان را برای آموزش مهندسی معدن کسب کرده است.

۲۰۲۲ مقایسه خواهد شد. آنچه در این تحقیق اهمیت دارد یافتن پاسخ این سؤال است که آیا دانشکده مهندسی معدن دانشگاه‌های ایران سیلابس درسی مشابه با سیلابس بهترین دانشگاه معدنی جهان یعنی دانشگاه کلرادو دارد یا خیر و آیا براساس مشکل‌های آینده صنعت معدنکاری است یا خیر. آیا آموزش‌های موجود در دانشکده‌های معدن سراسر ایران و جهان، به پرورش نسلی برای مواجهه با چالش‌های معدنکاری در آینده می‌پردازند؟ به‌بیان‌دیگر، آیا مهندسی که از این مراکز آموزشی فارغ‌التحصیل می‌شوند، می‌توانند مشاغل متناسب با شرایط آینده معدنکاری را تصاحب کنند و در آن موفق باشند؟ به این منظور ابتدا به معرفی ۱۰ دانشگاه برتر معدن در جهان پرداخته و سپس آینده معدنکاری جهان بررسی خواهد شد. در بخش چهارم، با بررسی سیلابس درسی دانشگاه‌های کلرادو و دانشگاه‌های ایران و مقایسه دروس ارائه شده در این دو، نتایج بیان شده و بخش بعدی به بحث در مورد این نتایج می‌پردازد. در نهایت، جمع‌بندی ارائه خواهد شد.

#### ۲- روش تحقیق

برای شناسایی مدارس معدنی برتر دنیا، از رتبه‌بندی دانشگاه جهانی QS برای رشته دانشگاهی مهندسی معدن برای سال ۲۰۲۲ استفاده شده است. بر اساس این رتبه‌بندی، از ۵۰ دانشگاه برتر جهان برای برنامه مهندسی معدن، ۱۰ دانشگاه در اقیانوسیه، ۱۴ دانشگاه در آمریکای شمالی، ۴ دانشگاه در آمریکای لاتین، ۱۴ دانشگاه در اروپا، ۶ دانشگاه در آسیا و ۲ دانشگاه در آفریقا قرار دارند. جدول ۱ و شکل ۱ مکان ۵۰ دانشگاه برتر را بر اساس رتبه‌بندی دانشگاه‌های جهانی QS نشان می‌دهد.

جدول ۱- توزیع جغرافیایی ۵۰ دانشگاه برتر مهندسی معدن در سال ۲۰۲۲ بر اساس رتبه‌بندی جهانی دانشگاه‌ها

قاره	کشور	تعداد
اقیانوسیه	استرالیا	۱۰
آمریکا	ایالات متحده	۷
	کانادا	۷
	مکزیک، شیلی، کلمبیا، برزیل	۴
اروپا	بریتانیا	۲
	آلمان	۲
	روسیه	۲
	اسپانیا	۲
	ایتالیا	۲
	ترکیه	۲
	هلند، فرانسه	۲
	هندوستان	۳
آسیا	چین، عربستان، ژاپن	۳
آفریقا	آفریقای جنوبی	۲
جمع کل		۵۰

دانشگاه در سال ۱۸۴۲ تأسیس شد و قدیمی‌ترین دانشگاه در این کشور است. رتبه‌بندی QS در سال ۲۰۲۲، دانشگاه شیلی را به‌عنوان اولین دانشگاه آمریکای لاتین و هشتمین در سراسر جهان برای برنامه مهندسی معدن رتبه‌بندی می‌کند. رشته مهندسی معدن «مهندسی عمران در معدن» است که در دانشکده علوم فیزیکی و ریاضیات (Facultad de Ciencias Físicas y Matemáticas) طبقه‌بندی می‌شود. دانشگاه شیلی یک برنامه دوره ثابت برای دو سال اول همه رشته‌های مهندسی ارائه می‌دهد و دانشجویان دوره‌های مرتبط با مهندسی معدن را در سال سوم شروع می‌کنند.

### ۹-۲- دانشگاه کوئینز در کینگستون

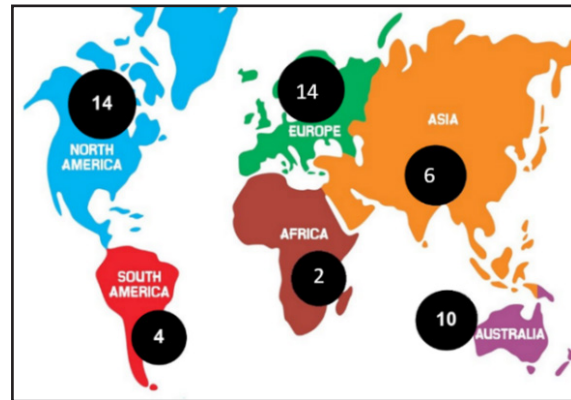
دانشگاه کوئینز در کینگستون در سال ۱۸۴۱ در انتاریو کانادا تأسیس شد. این دانشگاه، بر اساس رتبه‌بندی دانشگاه جهانی QS برای سال ۲۰۲۲، در رتبه نهم برای برنامه‌های مهندسی معدن در جهان و رتبه دوم در کانادا قرار دارد. دفتر پایداری کوئینز<sup>۱</sup> ایجاد شده در سال ۲۰۰۸ با برنامه اقتصاد سبز<sup>۲</sup> دانشگاه و ایجاد شناخت مسائل زیست‌محیطی مرتبط است. در سال ۲۰۰۹، با امضای دانشگاه‌های انتاریو متعهد به توافقنامه دنیای سبزتر، کوئینز موظف شد محوطه دانشگاه خود را به مدلی از مسئولیت زیست‌محیطی تبدیل کند. کوئینز دومین دانشگاه انتاریو بود که در سال ۲۰۱۰ بیانیه اقدام روسای دانشگاه‌ها و کالج‌ها در مورد تغییرات آب‌وهوایی کانادا را امضا کرد.

### ۱۰-۲- دانشگاه بریتیش کلمبیا (UBC)

دانشگاه بریتیش کلمبیا که در سال ۱۹۰۸ تأسیس شد، قدیمی‌ترین دانشگاه در بریتیش کلمبیا است. این دانشگاه در بین سه دانشگاه برتر کانادا قرار دارد. در این رتبه‌بندی، UBC برای برنامه‌های مهندسی معدن جایگاه ۱۰ را در سراسر جهان و جایگاه سه را در کانادا دارد. UBC یک برنامه دوره ثابت برای سال اول همه رشته‌های مهندسی ارائه می‌دهد و دانشجویان دوره‌های مرتبط با مهندسی معدن را در سال دوم شروع می‌کنند.

### ۳- آینده معدنکاری و معدنکاری در آینده

همان‌طور که در مقدمه به آن اشاره شد، با بررسی روند رشد جمعیت در دو دهه اخیر (بین سال‌های ۲۰۰۰ تا ۲۰۲۰)، مشخص شد که جمعیت جهان سالیانه ۱/۳ درصد افزایش می‌یابد و به دنبال آن، مصرف کانی‌ها و فلزات نیز افزایش چشمگیری خواهد داشت. تحقیقات نشان می‌دهد در سال ۲۰۴۰ جمعیت جهان به ۹/۲ میلیارد نفر خواهد رسید و این جمعیت به ۹۰ میلیارد تن فلز و کانی نیاز دارد و با توجه به کاهش ذخایر پرعیار و نزدیک سطح زمین، مهندسی معدن ناگزیر به استخراج مواد معدنی مورد نیاز بشر با استفاده از تکنولوژی‌های دیجیتال و رباتیک، از اعماق بیشتر و با عیار کمتر، از بستر دریاها و رودخانه‌ها، و یا از سیارات نزدیک به زمین خواهد بود. این امر همچنین منجر به مواجهه با آثار زیست‌محیطی متفاوت و جدید خواهد شد. آنچه امروز برای همه مهندسیین معدن مشخص است، لزوم توجه به شاخص‌های



شکل ۱- توزیع جغرافیایی ۵۰ دانشگاه برتر مهندسی معدن در جهان در سال ۲۰۲۲ بر اساس رتبه‌بندی جهانی دانشگاه‌ها

### ۳-۲- دانشگاه نیو ساوت ولز (UNSW Sydney)

دانشگاه نیو ساوت ولز (UNSW) توسط قانون پارلمان سیدنی نیو ساوت ولز در سال ۱۹۴۹ افتتاح شد. UNSW بر اساس رتبه‌بندی دانشگاه جهانی QS برای سال ۲۰۲۲، رتبه دوم را در استرالیا و سوم را در جهان برای آموزش مهندسی معدن دارد.

### ۴-۲- دانشگاه کوئینزلند (UQ)

دانشگاه کوئینزلند به‌طور رسمی در سال ۱۹۱۰ تأسیس شد. طبق رتبه‌بندی دانشگاه جهانی QS برای سال ۲۰۲۲، UQ چهارمین دانشگاه برای برنامه‌های مهندسی معدن در سطح جهان و سومین دانشگاه برتر مهندسی معدن در استرالیا است.

### ۵-۲- دانشگاه استرالیای غربی (UWA)

دانشگاه استرالیای غربی (UWA) در سال ۱۹۱۱ به رسمیت شناخته شد. UWA بر اساس رتبه‌بندی دانشگاه‌های جهانی QS برای سال ۲۰۲۲، رتبه چهارم در استرالیا و پنجم در جهان را برای آموزش مهندسی معدن دارد.

### ۶-۲- دانشگاه مک‌گیل

دپارتمان مهندسی معدن در دانشگاه مک‌گیل در سال ۱۸۷۱ ایجاد شد تا به قدیمی‌ترین مدرسه معدن در کانادا تبدیل شود [۱۴]. بر اساس رتبه‌بندی دانشگاه‌های جهانی QS برای سال ۲۰۲۲، مک‌گیل ششمین دانشگاه برای برنامه‌های مهندسی معدن در سراسر جهان و نخستین در کانادا است.

### ۷-۲- دانشگاه معدن سنت پترزبورگ

دانشگاه معدن سنت پترزبورگ در سال ۱۷۷۳ در سنت پترزبورگ، روسیه، تأسیس شد. بر اساس رتبه‌بندی دانشگاه‌های جهانی QS برای سال ۲۰۲۲، دانشگاه معدن سنت پترزبورگ هفتمین دانشگاه برای برنامه‌های مهندسی معدن در سطح جهانی است. آموزش در دانشکده مهندسی معدن دانشگاه سنت پترزبورگ به زبان روسی است.

### ۸-۲- دانشگاه شیلی

دانشگاه شیلی یک دانشگاه دولتی در سانتیاگو، شیلی است. این

1- Sustainable development office of Queens

2- Green Economy program





مسائل زیست‌محیطی باطله‌های معدن و آسیب‌های زیست‌محیطی معادن عمیق در پیش روی مهندسين آینده معادن خواهد بود.

توسعه پایدار در یک پروژه معدنی است. به‌طور خلاصه، چالش‌های آینده معدنکاری را می‌توان به‌عنوان زیر بیان کرد:

### ۳-۱- معدنکاری در راستای توسعه پایدار

مفهوم توسعه پایدار از گزارش برون‌تولد موسوم به «آینده مشترک ما» (۱۹۸۷) آغاز شد. پس از آن کنفرانس ریو دژانیرو (۱۹۹۲) با محوریت توسعه پایدار برگزار شد و بعد از این کنفرانس، مفهوم توسعه پایدار تقریباً در تمامی اسناد مربوط به محیط زیست نمود یافت. در معدنکاری نیز لزوم ارزیابی‌های مربوط به توسعه پایدار در سال‌های گذشته مورد توجه محققین و پژوهشگران بوده است. اما از آنجایی که معدنکاری در ذات خود در مفهوم توسعه پایدار نمی‌گنجد، یکی از چالش‌های آینده بخش معدنکاری، رعایت اصول توسعه پایدار در معدنی با عیار کمتر، عمق بیشتر، باطله‌های بیشتر و در نتیجه آسیب‌های منفی شدیدتر خواهد بود.

### ۳-۲- به‌کارگیری تکنولوژی‌های دیجیتال مانند رباتیک و هوش مصنوعی

یکی از اصلی‌ترین چالش‌های آینده معدنکاری، به‌کارگیری و اعمال تکنولوژی‌های جدید مانند تکنولوژی‌های دیجیتال<sup>۱</sup>، رباتیک<sup>۲</sup> و یا هوش مصنوعی<sup>۳</sup> در فرایند معدنکاری خواهد بود. با پیشرفت روزافزون این تکنولوژی‌ها و کاربرد سریع و دقیق آن‌ها در صنایع مختلف، محققین در بخش مهندسی معدن نیز به پیشرفت‌های قابل توجهی در این زمینه دسترسی پیدا کردند. با این وجود، معادن محدودی در سراسر جهان این تکنولوژی‌ها را در مقیاس صنعتی به کار می‌گیرند. استفاده از هوش مصنوعی، دوقلمی دیجیتال<sup>۴</sup>، یادگیری ماشین<sup>۵</sup>، یادگیری عمیق<sup>۶</sup>، و رباتیک یکی از اصلی‌ترین پیشرفت‌های آینده معدنکاری خواهد بود.

### ۳-۳- استخراج از اعماق

در اعماق، به دلیل عیار کمتر مواد معدنی، اصلی‌ترین چالش پیش روی معدنکاران پیچیدگی‌های زیاد عملیات معدنکاری به دلیل شرایط دسترسی سخت خواهد بود. روش‌های استخراج سطحی و زیرزمینی همگی مشکلاتی در اعماق بیشتر از ۱۰۰۰ متر خواهند داشت. به‌عنوان مثال، در معادن سطحی که تا اعماق نزدیک به ۱۰۰۰ متر پیشروی داشتند و سپس به معدنکاری زیرزمینی تغییر روش دادند (مانند معدن چوکویکاماتا در شیلی، بینگهام کانیون در ایالات متحده، و گرسبرگ در اندونزی)، میزان تولید به دلیل شرایط متفاوت معدنکاری زیرزمینی به یک‌سوم قبل (یعنی زمانی که از روش استخراج روباز استفاده می‌شد) کاهش پیدا کرد. کاهش تولید به معنای کاهش درآمد و در ادامه آن، افزایش قیمت فلز مس خواهد بود. همچنین، استخراج از اعماق بیشتر و با عیار کمتر منجر به تولید باطله زیاد هم در بخش استخراج و هم در بخش فراوری خواهد شد. علاوه بر مشکلات مربوط به مدیریت باطله‌ها، یک مشکل اساسی مربوط به

### ۳-۴- استخراج از بسترهای آبی

منظور از استخراج از بسترهای آبی، استخراج مواد معدنی از بستر اقیانوس‌ها، دریاها، دریاچه‌ها، شط‌ها، و رودخانه‌ها است. با افزایش جمعیت جهان و کاهش ذخایر موجود در بخش خشکی زمین، مهندسين آینده لاجرم به سمت استخراج هر چه بیشتر از بسترهای آبی خواهند رفت. کف دریا، درست مانند خشکی، از رشته‌کوه‌ها، فلات‌ها، قله‌های آتش‌فشانی، دره‌ها و دشت‌های وسیع تشکیل شده است. بستر دریا شامل عناصر فلزی متنوعی مانند منگنز، مس، و نیکل است و امروزه مطالعات متعددی در زمینه استخراج آن‌ها از کف دریاها در حال انجام است. مواد معدنی و ذخایر بستر دریا عمدتاً تا ۶ کیلومتر زیر سطح اقیانوس واقع شده‌اند.

### ۳-۵- استخراج از سیارات

با کاهش ذخایر موجود در پوسته زمین، و با افزایش دانش و پیشرفت تکنولوژی، معدنکاری از سیارات نزدیک به زمین (که مهم‌ترین و نزدیک‌ترین آن‌ها سیاره ماه است)، امری اجتناب‌ناپذیر و ضروری خواهد بود. با این حال، چالش‌های فنی و اقتصادی متعددی در این زمینه مطرح شده است و محققین بر روی تکنولوژی‌های امکان‌پذیر برای رفع مشکلات استخراج از ماه در حال تحقیق و پژوهش هستند.

### ۴- نتایج

در این بررسی، برنامه درسی دوره کارشناسی دانشگاه‌های معدنی ایران و مدرسه معدن کلرادو برای سال تحصیلی ۲۰۲۳، مشاهده و ارزیابی و دروس و واحدهای درسی در مقطع کارشناسی رشته مهندسی معدن طبقه‌بندی شد. تعداد واحدهای درسی هر دسته با جمع‌آوری داده‌های برنامه درسی از وبسایت دانشگاه‌ها شمارش شد. جدول شماره ۳ برنامه درسی دانشگاه معدن کلرادو و جدول ۴ برنامه درسی دانشگاه‌های معدنی ایران را در سال ۲۰۲۲ به تفکیک هر ترم نشان داده است.

دانشگاه کلرادو در بخش برنامه درسی خود، سه رشته فرعی را برای رشته مهندسی معدن معرفی می‌کند: مهندسی معدن برای غیردانشجویان معدن، تونل‌سازی و فضاهای زیرزمینی و مهندسی انفجار، و استخراج از سیارات.

در گرایش استخراج از سیارات، دانشجویان دانشی از زمین‌شناسی سیاره‌ای، روش‌های اکتشاف، و برآورد و ارزش‌گذاری منابع/ذخایر، کاربرد تجهیزات مختلف لازم برای حفاری و تولید مواد اولیه موردنیاز برای ایجاد زیستگاه‌ها و زیرساخت‌های پایدار در فضا به دست خواهند آورد.

### ۵- بحث

۱. از مهم‌ترین یافته‌های این تحقیق می‌توان به این امر اشاره کرد که پس از بررسی سیلابس درسی ۱۰ دانشگاه برتر جهان در رشته مهندسی معدن در سال ۲۰۲۲ مشخص شد که هیچ‌کدام از این ۱۰ دانشگاه دارای سیلابس درسی مشابه یکدیگر نبودند. حتی دانشگاه‌های مکگیل، کوئینز، و بریتیش کلمبیا که هر سه در کانادا هستند یا دانشگاه‌های کرتین، نیوساوتولز، کوئینزلند، و استرالیای غربی که همگی در استرالیا قرار

- 1-Digital Technology
- 2- Robotic
- 3- Artificial Intelligence
- 4- Digital twin
- 5- Machine Learning
- 6- Deep Learning



۳. پس از بررسی برنامه درسی مدرسه معدن کلرادو و مقایسه آن با برنامه درسی دانشگاه‌های معدن ایران مشخص شد مدرسه معدن کلرادو ۱۳۲/۵ واحد درسی در برنامه کارشناسی خود ارائه می‌دهد که ۱۲۳/۵ واحد آن دروس مشخص و یکسان برای کلیه دانشجویان مهندسی معدن جهت کسب مدرک کارشناسی است و دانشگاه با ارائه مجموعه متنوعی از دروس انتخابی، به دانشجویان این اختیار را می‌دهد تا با توجه به موضوع پایان‌نامه خود و با توجه به تخصصی که به آن علاقه‌مند هستند، ۹ واحد از بین این دروس اختیاری انتخاب کنند. ۴. در دانشگاه‌های ایران، گذراندن ۱۴۰ واحد جهت اخذ مدرک کارشناسی ضروری است که تعداد واحدهای ثابت در برنامه درسی برای کلیه دانشجویان مهندسی معدن ۱۲۵ واحد است و دانشجویان پس از تعیین گرایش، ملزم به گذراندن ۱۵ واحد درسی از دروس انتخابی گرایش خود هستند. ۵. تفاوت دیگر در فراوانی دروس علوم مانند زمین‌شناسی، ژئوفیزیک و ژئوشیمی در میان دروس مهندسی معدن دانشگاه‌های ایران است که مقایسه با ۱۰ دانشگاه معدنی برتر جهان نشان می‌دهد که تعداد این دروس در دانشگاه‌های برتر جهان در حد یک الی دو درس است.

دارند نیز برنامه درسی مشابه یکدیگر ندارند. در حالی که در ایران، تمامی دانشکده‌های معدن دارای برنامه درسی یکسان و مشخص هستند. این امر منجر به از دست رفتن فرصت‌های بی‌شماری در دانشگاه‌های معدن ایران خواهد شد. به باور نویسنده، هر دانشگاه باید با توجه به سه عامل (۱) موقعیت جغرافیایی که در آن قرار دارد، (۲) شرایط و پتانسیل‌های معدنی منطقه و (۳) متخصصین بومی خود، برنامه آموزشی خود را تنظیم کند تا باعث پرورش پتانسیل‌های موجود در آن منطقه شود. داشتن یک برنامه ثابت برای کشوری مانند ایران که از شمال تا جنوب آن شرایط معدنکاری متفاوت و مواد معدنی متنوعی دارد، باعث نادیده گرفته شدن تخصص‌ها و خلاقیت‌ها می‌شود.

۲. یکی دیگر از تفاوت‌های اصلی بین دانشگاه‌های ایران با ده دانشگاه برتر معدنی جهان این بود که این دانشگاه‌ها گرایش‌های جداگانه‌ای تحت عنوان اکتشاف، استخراج، فراوری، و مکانیک سنگ برای رشته مهندسی معدن تعریف نکردند و دانشجویان همگی با یک تخصص یعنی مهندسی معدن از دانشگاه فارغ‌التحصیل می‌شوند. البته در تمامی دانشگاه‌ها، تنوع بالایی از دروس اختیاری ارائه می‌شود که هر دانشجو با توجه به تخصصی که به آن علاقه دارد، می‌تواند از بین این دروس اختیاری تعدادی را انتخاب کند.

جدول ۳- سیلابس درسی دانشگاه معدن کلرادو به تفکیک هر ترم برای سال ۲۰۲۲

Freshman سال اول دوره مهندسی معدن								واحد
ترم پاییز Fall	NATURE & HUMAN VALUES	CALCULUS FOR SCIENTISTS & ENGINEERS I	PRINCIPLES OF CHEMISTRY I	DESIGN I	FRESHMAN SUCCESS SEMINAR	PHYSICAL ACTIVITY COURSE		16
	4	4	4	3	۰/۵	۰/۵		
	طبیعت و ارزش‌های انسانی	حساب دیفرانسیل و انتگرال	مبانی شیمی ۱	طراحی ۱	سمینار موفقیت دانشجوی سال اول	تربیت بدنی		
ترم بهار SPRING	PHYSICS I - MECHANICS	CALCULUS FOR SCIENTISTS & ENGINEERS II	PRINCIPLES OF CHEMISTRY II (SC1)	EARTH & ENVIRONMENTAL SYSTEMS	PHYSICAL ACTIVITY COURSE			17
	۴/۵	4	4	4	۰/۵			
	فیزیک ۱ - مکانیک	حساب دیفرانسیل و انتگرال ۲	مبانی شیمی ۲	زمین و سیستم‌های زیست‌محیطی	تربیت بدنی			
Sophomore سال دوم دوره مهندسی معدن								واحد
ترم پاییز Fall	CALCULUS FOR SCIENTISTS & ENGINEERS III	PHYSICS II- ELECTROMAGNETISM & OPTICS	EARTH MATERIALS	STATICS	PHYSICAL ACTIVITY COURSE			15
	4	4/5	3	3	0/5			
	حساب دیفرانسیل و انتگرال ۲	فیزیک ۲- الکترومغناطیس و فیزیک نور	مواد زمین	استاتیک	تربیت بدنی			
ترم بهار SPRING	DIFFERENTIAL EQUATIONS	MECHANICS OF MATERIALS	PRINCIPLES OF ECONOMICS	INTRODUCTORY MINING	MINING GEOLOGY	DYNAMICS FOR MINING ENGINEERS	PHYSICAL ACTIVITY COURSE	16/5
	3	3	3	3	3	1	0/5	
	معادلات دیفرانسیل	مکانیک مواد	مبانی اقتصاد	مقدمات معدنکاری	زمین‌شناسی معدنی	دینامیک برای مهندسی معدن	تربیت بدنی	
ترم تابستان SUMMER	SUMMER FIELD SESSION	MINE SAFETY						4
	3	1						
	کارآموزی تابستانی	ایمنی معدن						

ادامه جدول ۳

Junior سال سوم دوره مهندسی معدن								واحد
ترم پاییز Fall	DESIGN II	MINE SAFETY & OPERATIONS	SURFACE MINE DESIGN	INTRODUCTION TO ROCK MECHANICS	GLOBAL STUDIES	Free Elective		17
	3	2	3	3	3	3		
	طراحی ۲	ایمنی معدن و عملیات	طراحی معدن سطحی	مقدمه‌ای بر مکانیک سنگ	مطالعات جهانی	دروس انتخابی		
ترم بهار SPRING	INTRODUCTION TO ELECTRICAL CIRCUITS, ELECTRONICS & POWER	UNDERGROUND MINE DESIGN	FLUID MECHANICS	HUMANITIES & SOCIAL SCIENCE (H&SS) MID-LEVEL RESTRICTED ELECTIVE	Free Elective			15
	3	3	3	3	3			
	مقدمه‌ای بر مدارهای الکتریکی، الکترونیک و برق	طراحی معدن زیرزمینی	مکانیک سیالات	رشته انتخابی علوم انسانی و اجتماعی	دروس انتخابی			
Senior سال چهارم دوره مهندسی معدن								واحد
ترم پاییز Fall	INTRODUCTION TO MINERAL PROCESSING & LABORATORY	MINE PLANT DESIGN	MINING ENGINEERING EVALUATION & DESIGN REPORT	GEOSTATISTICS	HUMANITIES & SOCIAL SCIENCE (ELECTIVE)	Free Elective		16
	3	3	1	3	3	3		
	مقدمه‌ای بر فرآوری مواد معدنی و آزمایشگاه	طراحی کارخانه فرآوری معدن	گزارش ارزیابی و طراحی مهندسی معدن ۱	زمین‌آمار	علوم انسانی و اجتماعی (دروس انتخابی)	دروس انتخابی		
ترم بهار SPRING	MINING ENGINEERING EVALUATION & DESIGN REPORT II	MINE SYSTEMS ANALYSIS I	MINE VALUATION	EXCAVATION PROJECT MANAGEMENT	MINE VENTILATION & THERMODYNAMICS	HUMANITIES & SOCIAL SCIENCE (H&SS) 400-LEVEL RESTRICTED ELECTIVE		16
	2	3	2	2	4	3		
	گزارش ارزیابی و طراحی مهندسی معدن ۲	تحلیل سیستم‌های معدن	ارزش‌گذاری معدن	مدیریت پروژه حفاری	تهویه معدن و ترمودینامیک	علوم انسانی و اجتماعی (دروس انتخابی)		
مجموع								132/5

جدول ۴- سیلابس درسی دانشگاه معدن ایران به تفکیک هر ترم برای سال ۲۰۲۲

Freshman سال اول دوره مهندسی معدن								واحد
ترم پاییز Fall	PRINCIPLES OF MATHEMATICS 1	PHYSICS 1 & LAB	PRINCIPLES OF CHEMISTRY I & LAB	PRINCIPLES of GEOLOGY	BASICS OF MINING ENGINEERING	GENERAL COURSE	ENGLISH 1	17
	3	4	4	2	1	2	1	
	ریاضی عمومی ۱	فیزیک ۱ و آزمایشگاه	شیمی عمومی ۱ و آزمایشگاه	زمین‌شناسی عمومی	مبانی مهندسی معدن	درس عمومی	زبان ۱	
ترم بهار SPRING	PRINCIPLES OF MATHEMATICS 2	PHYSICS 2 & LAB	STATIC	INDUSTRIAL DRAWING & CAD	MINERALOGY & LAB	PHYSICAL ACTIVITY COURSE	ENGLISH 2	18
	3	4	3	2	3	1	2	
	ریاضی ۲	فیزیک ۲ و آزمایشگاه	استاتیک	نقشه‌کشی صنعتی و CAD	کانی‌شناسی و آزمایشگاه	تربیت بدنی	زبان ۲	



ادامه جدول ۴

Sophomore سال دوم دوره مهندسی معدن									واحد
ترم پاییز Fall	DIFFERENTIAL EQUATIONS	STATISTICS & ENGINEERING PROBABILITIES	STRENGTH OF MATERIALS	PETROLOGY & LAB	STRUCTURAL GEOLOGY	GENERAL COURSE	PHYSICAL ACTIVITY COURSE	GENERAL WORK SHOP	18
	3	3	3	3	2	2	1	1	
	معادلات دیفرانسیل	آمار و احتمالات مهندسی	مقاومت مصالح	سنگ شناسی آزمایشگاه	زمین شناسی ساختاری	درس عمومی	تربیت بدنی ۲	کارگاه عمومی	
ترم بهار SPRING	PRINCIPLES OF COMPUTER PROGRAMMING	FLUID MECHANICS	ROCK MECHANICS & LABORATORY	CARTOGRAPHY & GEOLOGICAL SURVEY	ECONOMIC GEOLOGY	MINERAL PROCESSING & LAB	GENERAL COURSE	FIELD & MINE VISIT	19
	3	3	3	2	2	3	2	1	
	مبانی برنامه نویسی کامپیوتر	مکانیک سیالات	مکانیک سنگ و آزمایشگاه	کارتوگرافی و برداشت زمین	زمین شناسی اقتصادی	کانه آرای و آزمایشگاه	درس عمومی	بازدید معدن	
Junior سال سوم دوره مهندسی معدن									واحد
ترم پاییز Fall	MINERAL SURVEYING & OPERATION	GROUND CONTROL & SUPPORT SYSTEMS	MINE VENTILATION	DRILLING & BLASTING	ORE RESERVE ESTIMATION	EXPLORATORY & OPERATIONAL GEOPHYSICS	EXPLORATION DRILLING	GENERAL COURSE	18
	3	2	2	2	2	3	2	2	
	نقشه برداری معدنی و عملیات	کنترل زمین و نگهداری	تهویه در معادن	چالزنی و انفجار	ارزیابی ذخایر معدنی	ژئوفیزیک اکتشافی	حفاری اکتشافی	درس عمومی	
ترم بهار SPRING	SURFACE MINING	UNDERGROUND MINING	MINE ECONOMY	EXPLORATION GEOCHEMISTRY	HYDROGEOLOGY & DRAINAGE	REMOTE SENSING & GIS	FLOATION & LAB	PERSIAN	18
	2	3	2	2	2	2	2	3	
	معدنکاری سطحی	معدنکاری زیرزمینی	اقتصاد معدنی	ژئوشیمی اکتشافی	هیدروژئولوژی و زهکشی	دورسنجی و GIS	فلوتاسیون و آزمایشگاه	فارسی	
ترم تابستان SUMMER	SUMMER FIELD SESSION 1								1
	1								
	کارآموزی تابستانی ۱								
Senior سال چهارم دوره مهندسی معدن									واحد
ترم پاییز Fall	PRINCIPLES OF MINE PLANNING & DESIGN	PROJECT	GEOTECHNIQUES	FREE ELECTIVE	GENERAL COURSE				15
	2	3	2	6	2				
	اصول طراحی معدن	پروژه	ژئوتکنیک	درس انتخابی	درس عمومی				
ترم بهار SPRING	TECHNICAL SERVICES IN MINES	SAFETY, HEALTH & ENVIRONMENT	FREE ELECTIVE	GENERAL COURSE					15
	2	2	9	2					
	خدمات فنی در معدن	ایمنی، بهداشت و محیط زیست	درس انتخابی	درس عمومی					
ترم تابستان SUMMER	SUMMER FIELD SESSION 2								1
	1								
	کارآموزی تابستانی ۲								
مجموع									140

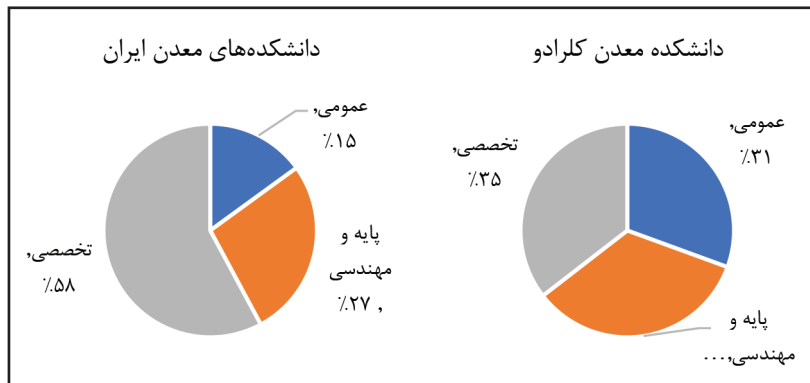


جدول ۵- مقایسه سهم هر دسته از دروس در سیلابس درسی دانشگاه‌های کلرادو و دانشکده‌های معدن ایران

دانشکده‌های معدن ایران (با احتساب دروس اختیاری)		دانشگاه کلرادو		
تعداد واحد	درصد سهم هر دسته از کل سیلابس	تعداد واحد	درصد سهم هر دسته از کل سیلابس	نام دسته
۲۱	٪۱۵	۳۱/۹	٪۲۴	عمومی
۳۸	٪۲۷	۴۵	٪۳۴	پایه و مهندسی
۸۱	٪۵۸	۵۶	٪۴۲	تخصصی
۱۴۰	٪۱۰۰	۱۳۲/۵	٪۱۰۰	کل

نیز نشان داد که دانشگاه‌های ایران هیچ برنامه درسی در مورد استخراج از ذخایر عمیق و کم‌عیار، استخراج از بسترهای آبی، استخراج از سیارات (ماه)، و به‌کارگیری تکنولوژی‌های دیجیتال مانند هوش مصنوعی و رباتیک، طراحی ماشین‌آلات و تجهیزات معدنی مخصوص معادن بزرگ‌مقیاس و عمیق، آموزش روش‌های فراوری کانسنگ‌های کم‌عیار و یا دارای عناصر مزاحم، و فناوری‌های دیجیتال تعریف نکردند. در مدرسه معدن کلرادو، یک تخصص فرعی تحت عنوان استخراج از سیارات ارائه می‌شود که بین دروس ارائه شده در آن، عناوین مرتبط با اکتشاف در فضا، استخراج از ذخایر در سیارات، و رباتیک گنجانده شده است.

چنانچه دروس مرتبط با شاخص‌های توسعه پایدار یعنی اقتصاد، اجتماع، و محیط زیست در برنامه درسی مدرسه معدن کلرادو و دانشگاه‌های معدنی ایران جستجو شود، نتایج نشان می‌دهد که دانشگاه کلرادو ۱۶ واحد درسی را به دروس مرتبط با مسئولیت‌پذیری در مقابل جامعه، ۸ واحد مربوط به اقتصاد، و ۱۰ واحد مربوط به محیط زیست ارائه می‌دهد. درحالی‌که در دانشگاه‌های معدن ایران، دروس مرتبط با شاخص جامعه ارائه نمی‌شود و در گروه شاخص‌های اقتصاد و محیط



شکل ۲- سهم هر دسته از دروس در سیلابس دانشگاه کلرادو و دانشکده‌های معدن ایران

زیست نیز تعداد دروس ارائه شده کمتر از دانشگاه کلرادو است (جدول ۶). در مجموع ۳۴ واحد از ۱۳۲/۵ واحد ارائه شده در دانشگاه کلرادو مرتبط با شاخص‌های توسعه پایدار است که ۲۶ درصد از کل دروس را به خود اختصاص می‌دهد. درحالی‌که در دانشگاه‌های معدن ایران جمعا

## ۶- نتایج

بررسی‌های انجام گرفته در برنامه درسی مدرسه معدن کلرادو و مدارس معدنی ایران در مورد ۵ چالش مطرح شده در بخش سوم مقاله

جدول ۶- مقایسه سهم دروس مرتبط به هریک از شاخص‌های توسعه پایدار در دانشگاه کلرادو و دانشکده‌های معدن ایران

دانشگاه‌های معدن ایران		دانشگاه کلرادو		گروه درسی مرتبط با شاخص‌های توسعه پایدار
درصد	تعداد واحد	درصد	تعداد واحد	
٪۰	۰	٪۱۲	۱۶	دروس مربوط به مسئولیت‌پذیری در مقابل جامعه
٪۱.۴	۲	٪۶	۸	دروس مربوط به اقتصاد
٪۱.۴	۲	٪۸	۱۰	دروس مربوط به محیط‌زیست
٪۳	۴	٪۲۶	۳۴	جمع دروس مرتبط با توسعه پایدار
	۱۴۰		۱۳۲/۵	جمع کل دروس دوره کارشناسی

۳٪ از کل دروس ارا

جدول ۷- دست‌بندی برنامه درسی دانشگاه کلاردو در سال ۲۰۲۲ در ۴ گروه عمومی، پایه، مهندسی، و تخصصی، جمع واحدها ۱۳۲۵

عمومی		پایه		مهندسی		تخصصی	
واحد	نام درس	واحد	نام درس	واحد	نام درس	واحد	نام درس
۴	طبیعت و ارزش‌های انسانی	۴	حساب دیفرانسیل و انتگرال	۳	استاتیک	۳	مواد زمین
۳	طراحی ۱	۴	مبانی شیمی ۱	۳	مکانیک مواد	۳	مبانی اقتصاد
۰/۵	سمینار موفقیت دانشجویی سال اول	۴/۵	فیزیک ۱ - مکانیک	۱	مقدمه‌ای بر مدارهای مهندسی معدن	۳	مقدمت معدنکاری
۲	تربیت‌پذیری	۴	حساب دیفرانسیل و انتگرال ۲	۳	مقدمه‌ای بر مدارهای الکتریکی، الکترونیک و برق	۲	زمین‌شناسی معدنی
۴	زمین و سیستم‌های زیست‌محیطی	۴	مبانی شیمی ۲	۳	مکانیک سیالات	۱	ایمنی معدن
۳	کارآموزی تابستانی	۴	حساب دیفرانسیل و انتگرال ۲	۱۳	جمع واحدها	۲	ایمنی معدن و عملیات
۲	طراحی ۲	۴/۵	فیزیک ۲ - الکترومغناطیس و فیزیک نور	۲	مکانیک سیالات	۲	طراحی معدن سطحی
۳	مطالعات جهانی	۳	مطالعات دیفرانسیل	۲	مکانیک سیالات	۳	مقدمه‌ای بر مکانیک سنگ
۹	رشته انتخابی علوم انسانی و اجتماعی	۳۲	جمع واحدها	۲	جمع واحدها	۳	طراحی ارزیابی و طراحی مهندسی معدن ۲
							مقدمه‌ای بر فراوری مواد معدنی و آزمایشگاه
							طراحی ارزیابی و طراحی مهندسی معدن ۱
							گزارش ارزیابی و طراحی مهندسی معدن ۱
							زمین‌آمار
							گزارش ارزیابی و طراحی مهندسی معدن ۲
							تحلیل سیستم‌های معدن
							ارزیابی‌گذاری معدن
							مدیریت پروژه حفاری
							تهویه معدن و ترمودینامیک
							دروس انتخابی
۳۱/۵	جمع واحدها						FREE ELECTIVE



جدول ۸- دسته‌بندی برنامه درسی دانشگاه‌های معدن ایران در سال ۲۰۲۲ (بدون احتساب دروس اختیاری) در ۴ گروه عمومی، پایه، مهندسی، و تخصصی. جمع واحدها ۱۴۰

عمومی		پایه		مهندسی		تخصصی	
واحد	نام درس	واحد	نام درس	واحد	نام درس	واحد	نام درس
۲	درس عمومی	۳	Mathematics. (I)	۲	استاتیک	۲	General Geology
۱	زبان ۱	۳	General Physics	۲	نقشه‌کشی صنعتی و CAD	۱	Introduction & Principles of Mining Engineering
۱	تربیت‌بدنی ۱	۱	آزمایشگاه فیزیک	۳	مقاومت مصالح	۲	Descriptive Mineralogy
۲	زبان ۲	۳	General Chemistry	۳	مبانی برنامه‌نویسی کامپیوتر	۱	Descriptive Mineralogy Lab
۲	درس عمومی	۱	General Chem. Lab	۳	مکانیک سیالات	۲	Petrology
۱	تربیت‌بدنی ۲	۳	Calculus for scientists & engineers ii	۱۴	جمع واحدها	۱	Laboratory Of Petrology
۱	کارگاه عمومی	۳	Physics			۲	Structural Geology
۲	درس عمومی	۱	آزمایشگاه فیزیک			۲	Rock Mechanics & Lab
۲	درس عمومی	۳	معادلات دیفرانسیل			۲	Cartography & Filed Study
۳	فارسی	۳	آمار و احتمالات مهندسی			۲	Economic Geology
۲	درس عمومی	۲۴	جمع واحدها			۳	Mineral Processing & Lab
۲	درس عمومی					۱	Field Geology & Mine Visit
۲	جمع واحدها					۲	Mine Surveying
						۲	Ground control
						۲	Mine Ventilation
						۲	Blasting & Drilling Engineering
						۲	Ore Reserve Evaluation
						۳	Geophysics exploration
						۲	Exploratory drilling
						۲	Surface Mining Methods
						۲	Underground Mining Methods
						۲	Geochemistry exploration
						۲	Hydrogeology
						۲	Remote Sensing & GIS
						۲	Flotation & laboratory
						۱	کارآموزی ۱
						۲	اصول طراحی معدن
						۳	پروژه
						۲	ژئوتکنیک
						۲	خدمات فنی در معدن
						۲	ایمنی، بهداشت و محیط‌زیست
						۹	دروس بسته اختیاری
						۲	اقتصاد معدنی
						۱	کارآموزی ۲
						۶۶	جمع واحدها

## جمع بندی

به کارگیری تکنولوژی‌های دیجیتال مانند هوش مصنوعی و رباتیک بی توجه بوده و دانشجویان را برای آینده این صنعت تربیت نمی‌کند. در مدرسه معدن کلرادو، یک تخصص فرعی تحت عنوان استخراج از سیارات ارائه می‌شود که بین دروس ارائه شده در آن، عناوین مرتبط با اکتشاف در فضا، استخراج از ذخایر در سیارات، و رباتیک گنجانده شده است. همچنین حدود ۲۷٪ از کل واحدها، دروس مرتبط با شاخص‌های توسعه پایدار هستند؛ اما، واحدهای درسی مرتبط با استخراج از ذخایر عمیق و کم‌عیار و استخراج از بسترهای آبی در بین دروس این دانشگاه دیده نشد.

آنچه مشخص است، در صورت داشتن مهندسی معدن با دانش به‌روز و مرتبط با آینده معدنکاری، آثار سوء فعالیت‌های معدنی در آینده جزئی خواهد بود. پیشنهاد می‌شود با تشکیل گروه‌هایی از متخصصین صنعت، اساتید دانشگاه، و مدیران و برنامه‌ریزان، بازنگری برنامه درسی دانشگاه در دستور کار قرار گیرد تا بتوان با آموزش هدفمند، در راستای تربیت متخصصین معدنی در راستای نیازهای آینده گام‌های اساسی برداشت.

## تقدیر و سیاست‌گذاری

از استاد و دانشمند گرانقدر، جناب آقای دکتر مرتضی اصانلو که در تدوین این مقاله با سعه صدر و گشاده‌رویی در کنار من بودند و از راهنمایی‌های علمی ایشان بهره جست‌ام، کمال تشکر و قدردانی را دارم.

یکی از اصلی‌ترین چالش‌های آینده معدنکاری در بخش خشک زمین به منظور تأمین فلز و کانی مورد نیاز بشر و کمبود ذخایر پرعیار نزدیک به سطح زمین و در نتیجه، مواجهه با شرایط ناشناخته استخراج از ذخایر کم‌عیار و در اعماق زیاد، ذخایر در بستر دریاها، و استخراج از ماه خواهد بود. آنچه در این زمینه اهمیت دارد دانستن این موضوع است که آیا برنامه‌های درسی دانشگاه‌های معدنی در راستای نیازهای صنعت، دانش کافی برای دانشجویان فراهم می‌کند؟

در این مطالعه به بررسی برنامه درسی دانشگاه معدن کلرادو به عنوان برترین دانشگاه معدنی جهان و دانشگاه‌های معدن ایران پرداخته شد تا بتوان به این سؤال پاسخ داد که آیا این دانشگاه‌ها دارای برنامه درسی مشابه یکدیگر هستند و آیا این برنامه درسی مرتبط با وضعیت آینده معدنکاری هست یا خیر. نتایج این تحقیق نشان داد که در دانشگاه کلرادو تعداد کل واحدهای لازم برای اخذ مدرک کارشناسی ۱۳۲/۵ واحد است. در حالی که تعداد واحدهای درسی در دانشگاه‌های معدن ایران برای اخذ مدرک کارشناسی ۱۴۰ واحد است.

همچنین، نتایج نشان داد که سیلابس درسی دانشگاه‌های معدن ایران نسبت به پنج چالش مطرح شده برای آینده صنعت معدنکاری، شامل معدنکاری در راستای توسعه پایدار، استخراج از ذخایر عمیق و کم‌عیار، استخراج از بسترهای آبی، استخراج از سیارات (ماه)، و

## منابع و مراجع

- literature review & research agenda. *International Journal of Mining, Reclamation & Environment*, 34(6), 430-457.
- [8] Veiga, M. M., Scoble, M. & McAllister, M. L. 2001. Mining with communities. *Natural Resources Forum*, 25(3), 191-202.
- [9] Cořta, S. & Scoble, M., 2006. An interdisciplinary approach to integrating sustainability into mining engineering education & research. *Journal of Cleaner Production*, 14(3-4), 366-373.
- [10] Nikitov, A., 2011. The role of education in the development of innovative economy. *Вестник Саратовского государственного социально-экономического университета*, 3, 87-90.
- [11] Zhironkin, S., Tyulenev, M., Zhironkina, O. & Hellmer, M. C., 2016. The global determinants of mining higher education development. *Metallurgical & Mining Industry*, 2, 62-67.
- [12] Henriksson, S. T. K., Muotka, Ragnar Ludvig. 1972. METHOD OF OPEN-PIT MINING. United States Patent Appl, 3692364. [Online]. Available: <https://www.freepatentsonline.com/3692364.html>
- [13] QS., 2020. QS University Rankings. <https://www.topuniversities.com/universities/subject/engineering-mineral-mining>.
- [14] McGill., 2020. Mining B.Sc. Program. <https://www.mcgill.ca/study/2020-2021/faculties/engineering/undergraduate/programs/bachelor-engineering-beng-mining-engineering>.

- [1] Osanloo, M., 2012. Future challenges in mining division, are we ready for these challenges? Do we have solid educational program?. *Cuprum: czasopismo naukowo-techniczne górnictwa rud*, 3, 61-70.
- [2] Wang, Z., Zhou, W., Jiskani, I. M., Ding, X. & Luo, H., 2022. Dust pollution in cold region Surface Mines & its prevention & control. *Environmental Pollution*, 292, 118293.
- [3] Tabelin, C. B., 2021. Copper & critical metals production from porphyry ores & E-wastes: A review of resource availability, processing/recycling challenges, socio-environmental aspects, & sustainability issues. *Resources, Conservation & Recycling*, 170, 105610.
- [4] Zhang W., 2021. Analyzing the environmental impact of copper-based mixed waste recycling-a LCA case study in China. *Journal of Cleaner Production*, 284, p125256.
- [5] Zhang, Z.-X., Hou, D.-F., Aladejare, A., Ozoji, T. & Qiao, Y., 2021. World mineral loss & possibility to increase ore recovery ratio in mining production. *International Journal of Mining, Reclamation & Environment*, 1-22.
- [6] Amirshenava, S. & Osanloo, M., 2021. Mined I& suitability assessment: a semi-quantitative approach based on a new classification of post-mining I& uses. *International Journal of Mining, Reclamation & Environment*, 1-21.
- [7] Osanloo, M. & Paricheh, M., 2020. In-pit crushing & conveying technology in open-pit mining operations: a





# بررسی پنجره ایمن گل حفاری با استفاده از ساخت یک مدل مکانیکی یک بعدی در ناحیه مخزنی یک چاه نفت

وحید زابلی زاده<sup>۱</sup>، سی سخت بهرام سلطانی سولگانی<sup>۲</sup>، آرش برجسته<sup>۳</sup>

۱- دانشجوی دکتری مکانیک سنگ، دانشکده مهندسی معدن، دانشگاه صنعتی امیرکبیر، تهران، ایران

۲- هیئت علمی دانشگاه صنعت نفت، اهواز، ایران

۳- هیئت علمی - صنعتی وزارت نیرو، اهواز، ایران

## چکیده

گل حفاری در عملیات حفاری چاه‌های نفت و گاز نقش مهمی را ایفا می‌کند و وظایف مهمی را به منظور بهبود فنی و اقتصادی عملیات حفاری بر عهده دارد. یکی از مهم‌ترین نقش‌های گل حفاری کنترل ریزش‌های دیواره چاه و جلوگیری از شکست سازند در اثر اعمال فشاری بیش از حد به آن است. به همین دلیل، طراحی گل حفاری با وزن مشخص در یک محدوده ایمن به صورتی که نه آنقدر کم باشد که منجر به رخداد ریختگی‌های داخل چاه شود و نه آنقدر زیاد باشد که شکست القایی در دیواره چاه رخ دهد، از مهم‌ترین بخش‌های طراحی عملیات حفاری است. این محدوده که وزن ایمن گل حفاری را نشان می‌دهد، پنجره ایمن گل حفاری نام دارد. در این پژوهش با استفاده از مدل‌سازی مکانیکی یک بعدی چاهی در یکی از میدادین جنوب غربی ایران، با استفاده از اطلاعات در دسترس از چاه مذکور، پنجره ایمن گل حفاری برای آن نشان داده شده است. در این مدل، وزن‌های مختلف گل حفاری برای رخداد پدیده‌های مختلف از بروز ریختگی‌های داخل چاه تا شکست القایی دیواره چاه و همچنین فوران سیال مخزنی به داخل چاه و هرزروی گل حفاری به درون سازند مشخص شده است. همچنین با مقایسه معیار موهر کولمب و مدل حد فشار کششی مشخص شده است که هرچند معیار حد فشار کششی رخداد شکستگی‌های کششی در ناحیه آهکی را بهتر پیش‌بینی می‌کند، ولی استفاده از معیار موهر کولمب در نواحی شیلی ایمنی بیشتری خواهد داشت.

**کلمات کلیدی:** تنش‌های درجا، تنش‌های القایی، ویژگی‌های مکانیکی، مدل مکانیکی، دیواره چاه، نمودارگیری، پایداری

## ۱- مقدمه

چاه باید باری را که پیش از آن توسط سنگ حفاری شده تحمل می‌شد، تحمل نماید. در نتیجه، تنش‌های برجای مجاور با محل حفاری تغییر می‌کنند که منجر به ایجاد وضعیت جدیدی از تمرکز تنش در اطراف محل حفاری شده می‌شود و تنش‌های القایی در اطراف دیواره چاه ایجاد خواهند شد [۳، ۱۲، ۱۳]. در اثر ایجاد وضعیت جدید رخ داده در اطراف دیواره چاه، در حین حفاری مشکلاتی ایجاد می‌شود که فروپاشی دیواره داخلی چاه<sup>۴</sup> و گسیختگی‌های کششی القایی<sup>۵</sup> در آن‌ها رخ خواهد داد. این گسیختگی‌ها می‌توانند مشکلات عمده فنی از جمله گیر لوله‌های حفاری و هرزروی گل حفاری را منجر شوند. این مشکلات اغلب با طراحی و انتخاب صحیح وزن گل حفاری در چاه حل می‌شوند و بنابراین با عدم رخداد این مشکلات، نیاز به استفاده از ابزار مانده‌یابی یا قطع جریان گل حفاری که منجر به بسته شدن چاه و قطع عملیات حفاری می‌شوند هم از بین خواهد رفت [۲، ۱۴، ۱۵].

در این مطالعه، با استفاده از داده‌های در دسترس برای یک چاه در یکی از میدانی جنوب غربی ایران، مدل مکانیکی یک‌بعدی ساخته شده و بر اساس نتایج حاصله ضمن ارائه پنجره ایمن گل حفاری، قسمت‌های مختلف آن نیز بررسی خواهد شد. ضمن آنکه با توجه به نوع حفاری فراتعادلی انجام گرفته حین حفاری ناحیه مخزنی، از اثر هیدرولیکی جریان سیال مخزن بر تغییرات تنش پیرامون حفره چاه صرف نظر شده است و فقط شبیه‌سازی بر اساس تنش‌های مؤثر انجام گرفته است.

## ۲- گل حفاری

گل حفاری عبارت است از سیال مورد استفاده در عملیات حفاری چاه‌های نفت و گاز که با توجه به امکان کنترل خواص آن توسط مهندسان، امکان کنترل هرچه بیشتر عملیات حفاری را فراهم می‌کند. گل حفاری طی فرایند عملیات حفاری وظایف مختلفی را بر عهده دارد. از جمله مهم‌ترین وظایف گل حفاری می‌توان به موارد زیر اشاره کرد [۱۶]:

- تمیز کردن ته چاه و انتقال کنده‌های حفاری به سطح زمین
- کنترل فشارهای زیرزمینی و جلوگیری از ریزش دیواره چاه
- جلوگیری از ورود سیال مخزن به درون چاه
- خنک کردن و روان کاری مته و لوله‌های حفاری
- اندود کردن دیواره چاه و جلوگیری از ریزش آن
- معلق نگه داشتن کنده‌ها و مواد افزوده شده به گل حین خاموشی

پمپ‌ها

- ترخیص شن و کنده‌های حفاری روی الک لرزان
- تحمل بخشی از وزن لوله‌های حفاری و جداری
- انتقال توان هیدرولیکی پمپ‌ها به مته

## ۲-۱- تأثیر وزن گل حفاری بر پایداری دیواره چاه

همان‌گونه که اشاره شد، گل حفاری وظایف مختلفی را در عملیات حفاری بر عهده دارد. یکی از وظایف مهم گل حفاری جلوگیری از ریزش دیواره چاه و کنترل فشارهای زیرزمینی بوده که وزن گل حفاری برای ایفای این وظیفه مهم، کلیدی است. شکل ۱ تأثیر وزن

مطالعات ژئومکانیک طی تمامی مراحل آنالیز مخازن هیدروکربوری از اکتشاف تا توسعه مخازن از اهمیت بالایی برخوردار هستند و امروزه این مطالعات نقش بسزایی در افزایش کارایی تولید از این مخازن ایفا می‌کنند. مواردی همچون بررسی پایداری دیواره چاه، انتخاب مته حفاری، طراحی لوله جداری، تراکم مخزن، نشست زیرسطحی ناشی از تخلیه مخازن، پیش‌بینی و کنترل تولید ماسه از چاه‌های نفت، طراحی عملیات تحریک مخازن از جمله شکاف هیدرولیکی و اسیدزنی و طراحی مشبک‌کاری و غیره از جمله مهم‌ترین مواردی هستند که مطالعات ژئومکانیک عمده‌ترین نقش را در آن‌ها ایفا می‌کنند. روش‌های ازدیاد برداشت که نیز در بسیاری از مخازن که عمر طبیعی خود را پشت سر گذاشته‌اند و برای تولید از آن‌ها نیاز به روش‌های هزینه‌بر با تکنولوژی‌های پیشرفته است، تحت تأثیر مطالعات و ارزیابی‌های ژئومکانیکی هستند. همه این موارد به خوبی ثابت‌کننده نقش مهم و تعیین‌کننده مطالعات ژئومکانیکی در مراحل مختلف عمر یک مخزن هستند که نهایتاً در بهبود راندمان اقتصادی آن تأثیرگذار خواهد بود [۱-۴].

مدل مکانیکی زمین<sup>۱</sup> به‌عنوان یک نمایشگر عددی از وضعیت تنش و سایر ویژگی‌های مکانیکی و فیزیکی سنگ در یک محدوده زمین‌شناسی از میدان یا حوضه نفتی تعریف شده است که قابلیت مطالعه و ارزیابی ناحیه مورد بررسی را فراهم می‌کند. این مدل که در تحقیقات مختلف وابسته به اهداف مطالعات، به صورت‌های یک یا سه‌بعدی ارائه شده، به عنوان یک ابزار قدرتمند جهت مطالعات ژئومکانیک که در برگزیده اطلاعات گسترده‌ای از چاه است، توسط محققان مختلف در مطالعات مخازن هیدروکربوری استفاده شده است [۳، ۵-۸]. یکی از مهم‌ترین کاربردهای مدل‌های مکانیکی کاربرد آن‌ها در ارائه وضعیت تنش‌های برجا و القاشده ناشی از عملیات حفاری است. به همین دلیل است که این مدل‌ها قابلیت خوبی در بررسی پایداری دیواره چاه حین حفاری، افزایش نرخ نفوذ مته حفاری، تعیین مسیر بهینه حفاری چاه، طراحی عملیات شکاف هیدرولیکی، افزایش کارایی تولید از سازندهای نفتی و مدیریت مؤثر مخزن را دارند [۹].

تنش‌های عمودی، افقی‌های کمینه و بیشینه سه تنش برجای درون زمین قبل از عملیات حفاری هستند که جهت و مقدار آن‌ها اهمیت زیادی دارند و غالباً همه مطالعات ژئومکانیکی را تحت تأثیر قرار می‌دهند. تنش عمودی معادل با فشار روباره بوده و بر اساس چگالی سنگ روباره محاسبه می‌شود. مشکلات اساسی در زمینه محاسبه این تنش‌ها مربوط به تنش‌های افقی بوده که اندازه‌گیری و تعیین آن‌ها سخت، هزینه‌بر و زمان‌بر است. روش‌های مستقیم و غیرمستقیم متعددی جهت اندازه‌گیری تنش‌های افقی وجود دارند. روش‌های مستقیم شامل روش‌هایی چون آزمایش لیک آف<sup>۲</sup>، داده‌های شکاف‌زنی هیدرولیکی و فشار حین حفاری<sup>۳</sup> هستند و این درحالیست که روابط تجربی پیشنهاد شده توسط محققان مختلف که عمدتاً بر اساس مقادیر تنش‌های برجای به دست آمده از روش‌های مستقیم پیشنهاد شده‌اند نیز روش‌های غیرمستقیم را شامل می‌شوند [۱۰-۱۲]. پایداری دیواره چاه با شرایط تنش‌های برجای قبل از حفاری ارتباط دارند. زمانی که چاه حفاری می‌شود، سنگ احاطه‌کننده

1- Mechanical Earth Model (MEM)

2- Leak off test (LOT)

3- Pressure while drilling (PWD)

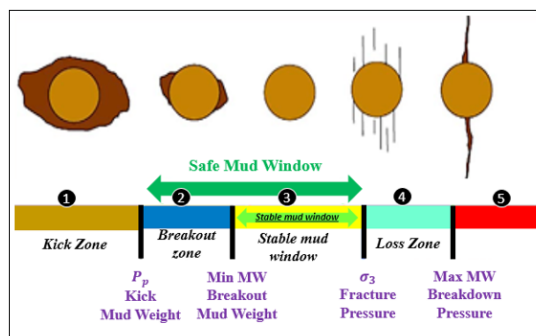
4- Borehole collapse

5- Induced tensile fractures



ترک‌های القایی ایجاد شوند و گسترش یابند، شرایط برای هرزروی شدید گل حفاری از درون چاه به سازند فراهم می‌شود که خطرات زیادی از جمله افت فشار هیدرواستاتیک درون چاه و فراهم شدن شرایط برای فوران چاه در نواحی پرفشار را به همراه خواهد داشت. از توضیحات ارائه شده در رابطه با ۵ قسمت مختلف شکل ۱ به خوبی اهمیت وزن گل حفاری و کنترل آن در عملیات حفاری مشخص است. کاملاً واضح است که کمتر یا بیشتر بودن وزن گل موجود در چاه از یک محدوده خاص تحت عنوان پنجره ایمن گل حفاری چه مشکلاتی را به همراه دارد و خصوصاً اینکه در صورت عدم توجه به کنترل وزن گل حفاری در هر دو حالت، با توجه به شرایط خاصی که برای از بین رفتن پایداری دیواره چاه با رخداد شکستگی‌های برشی و کششی در دیواره چاه ایجاد می‌شود، امکان فوران چاه و خطرات جانی و مالی جبران‌ناپذیر به شدت افزایش می‌یابد.

گل حفاری بر رخداد پدیده‌های مختلف در چاه را نشان می‌دهد [۱۷، ۱۸].



شکل ۱- قسمت‌های مختلف پنجره گل حفاری (برگرفته شده و اصلاح شده از [۱۷])

### ۳- تنش در اعماق

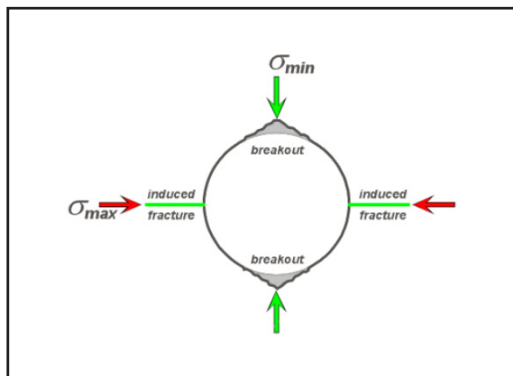
در مطالعات ژئومکانیک مخازن نفت در اعماق زمین و نواحی مخزنی، تنش‌های برجا و تنش‌های القایی که در اثر حفاری چاه در اطراف دیواره چاه به وجود می‌آیند، از اهمیت زیادی برخوردار هستند که در ادامه در رابطه با آن‌ها توضیحاتی ارائه خواهد شد.

شکل ۱ قسمت‌های مختلف پنجره گل حفاری را نشان می‌دهد که با توجه به آن ۵ قسمت عمده بر روی این تصویر مشخص است. بخش‌های مختلف این شکل در ادامه توضیح داده خواهند شد [۱۳، ۱۷، ۱۹].

#### ۱-۳- تنش‌های برجا

تنش عمودی و تنش‌های افقی کمینه و بیشینه، تنش‌های برجا در اعماق هستند که جهت و مقدار آن‌ها در مطالعات کاربردهای فراوانی دارد [۱۲]. از نقشه جهانی تنش برای تعیین جهت تنش‌های افقی استفاده می‌شود. این نقشه بر اساس چهار روش مکانیزم کانونی زلزله، ترک‌های القایی و ریختگی‌های دیواره چاه، اندازه‌گیری‌های تنش‌های برجا با روش‌هایی نظیر بیش‌مغزه‌گیری و شکاف هیدرولیکی و اطلاعات زمین‌شناسی چون فعالیت‌های آتشفشانی و آنالیز لغزش گسل جهت تنش‌های افقی در نقاط مختلف جهان را تعیین کرده است [۲۰].

ریختگی‌های دیواره چاه و شکستگی‌های القایی درون آن از جمله ابزارهای مناسب جهت پیش‌بینی جهت تنش‌های افقی هستند. ریختگی‌های دیواره چاه در جهت تنش افقی کمینه بوده و جهت تنش افقی بیشینه نیز عمود بر تنش افقی کمینه بوده و شکستگی‌های کششی القایی در جهت آن گسترش می‌یابند [۲۱-۲۳]. شکل ۲ به صورت شماتیک جهت تنش‌های افقی بر اساس گسیختگی‌های روی دیواره چاه را نشان می‌دهد [۲۳].



شکل ۲- شماتیک جهت تنش‌های افقی در ارتباط با گسیختگی‌های درون چاه [۲۳]

۱- این ناحیه مشخص‌کننده حالتی است که وزن گل حفاری کمتر از فشار منفذی است. در نتیجه، دیواره چاه به سمت داخل چاه شسته خواهد شد و حتی ممکن است در اثر جریان یافتن سیال مخزن به داخل چاه، فوران چاه نیز رخ دهد.

۲- این ناحیه معرف حالتی است که وزن گل حفاری از فشار منفذی بیشتر بوده ولی از فشار رخ داد ریختگی<sup>۱</sup> که معادل با حداقل وزن گل حفاری است، کمتر باشد. در واقع این ناحیه بیان‌کننده حداقل وزن گل حفاری برای جلوگیری از وقوع ریختگی دیواره چاه است. این ناحیه هرچند، بخشی از ناحیه ایمن وزن گل حفاری است، اما باید توجه شود که افزایش وقوع ریختگی‌ها می‌تواند پایداری دیواره چاه را به شدت متأثر نماید.

۳- این ناحیه نشان‌دهنده ایمن‌ترین حالت از وزن گل حفاری است. در واقع در این حالت وزن گل بین حداقل وزن لازم برای آن و فشاری است که در فشارهای بالاتر از آن در دیواره چاه ترک‌های کششی القا می‌شوند. بنابراین در عملیات حفاری، همواره تلاش بر این است که وزن گل حفاری در این محدوده قرار بگیرد تا از آسیب‌های ناشی از وزن‌های کمتر و بیشتر از این محدوده جلوگیری شود.

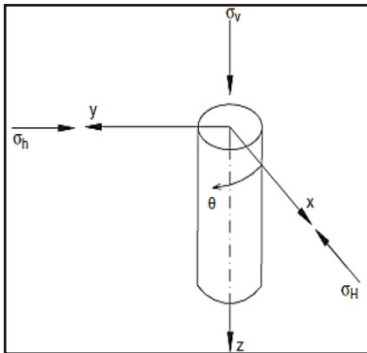
۴- این ناحیه بیانگر حالتی است که هرزروی گل حفاری به وقوع می‌پیوندد. در واقع، در اثر رخداد ترک‌های القایی به دلیل بیشتر بودن وزن گل حفاری از فشار ایجاد ترک در دیواره چاه، ترک‌های طبیعی روی دیواره چاه بزرگ‌تر شده و به سمت داخل سازند گسترش می‌یابند که در اثر به هم پیوستن این ترک‌ها و ایجاد ترک‌های بزرگ‌تر، مجرای مناسبی برای هدررفت جریان گل حفاری به داخل سازند ایجاد می‌شود.

۵- این ناحیه شرایطی را نشان می‌دهد که وزن گل حفاری درون چاه از فشار شکست سازند<sup>۲</sup> بیشتر بوده و در نتیجه آن شرایط برای القای ترک‌های هیدرولیکی روی دیواره چاه فراهم می‌گردد. چنانچه

- 1- Breakout
- 2- Formation breakdown pressure

### ۲-۱-۳- تنش‌های القایی در چاه عمودی

در اثر حفاری، وضعیت تنش‌های برجا به هم خورده و منجر به ایجاد تنش‌های القایی در اطراف دیواره چاه خواهد شد. در این صورت، با در نظر گرفتن شماتیک زیر تنش‌های عمودی، مماسی و شعاعی به عنوان تنش‌های القایی مشخص خواهند شد.



شکل ۳- وضعیت تنش‌های برجا و القایی در دستگاه مختصات برای یک چاه قائم [۲]

روابط کرش برای محاسبه تنش‌های القایی در هر نقطه در اطراف یک چاه قائم به صورت زیر است [۱۲، ۲۴].

$$\sigma_r = \frac{1}{2}(\sigma_H + \sigma_h)\left(1 - \frac{R^2}{r^2}\right) + \frac{1}{2}(\sigma_H - \sigma_h) \quad (۴)$$

$$\times \left(1 - \frac{4R^2}{r^2} + \frac{3R^4}{r^4}\right) \cos 2\theta + \frac{P_w R^2}{r^2}$$

$$\sigma_\theta = \frac{1}{2}(\sigma_H + \sigma_h)\left(1 + \frac{R^2}{r^2}\right) - \frac{1}{2}(\sigma_H - \sigma_h) \quad (۵)$$

$$\times \left(1 + \frac{3R^4}{r^4}\right) \cos 2\theta - \frac{P_w R^2}{r^2}$$

$$\sigma_z = \sigma_v - 2\nu(\sigma_H - \sigma_h) \cos 2\theta \quad (۶)$$

که:

$\sigma_r$ : تنش شعاعی

$\sigma_\theta$ : تنش مماسی

$\sigma_z$ : تنش قائم

$R$ : شعاع چاه

$r$ : فاصله از مرکز چاه

$P_w$ : فشار داخلی چاه

$\theta$ : زاویه با تنش افقی بیشینه

با ساده‌سازی روابط کرش روی دیواره چاه (یعنی  $R=r$ ) خواهیم داشت:

$$\sigma_\theta = (\sigma_H + \sigma_h) - 2(\sigma_H - \sigma_h) \cos 2\theta - P_w \quad (۷)$$

$$\sigma_r = P_w \quad (۸)$$

تنش عمودی بر اساس وزن روباره در هر عمق بر اساس رابطه انتگرالی زیر محاسبه می‌شود [۳، ۲۴]:

$$\sigma_v = \int_0^z \rho \cdot g \cdot dz \approx \bar{\rho} \cdot g \cdot z \quad (۱)$$

که:

$\rho$ : چگالی

$\bar{\rho}$ : چگالی متوسط سنگ روباره

$g$ : شتاب گرانش

$z$ : عمق مورد نظر

برای اندازه‌گیری تنش‌های افقی از روش‌های مستقیم و غیرمستقیم استفاده می‌شود که پیش از این به روش‌های غیرمستقیم اشاره شد. روش‌های مستقیم روابط و تئوری‌هایی هستند که توسط محققان مختلف بر اساس روش‌های غیرمستقیم کالیبره و ارائه شده‌اند [۲۵، ۲۶]. در ادامه تعدادی از روش‌های مستقیم ارائه خواهد شد.

در مخازن نفت، نسبت تنش افقی کمینه به تنش عمودی در محدوده ۰/۳ تا ۱/۵ در نظر گرفته می‌شود و نسبت تنش افقی بیشینه به تنش افقی کمینه نیز در محدوده ۱ تا ۲ در نظر گرفته می‌شود [۲۶].

روابط پوروالاستیک یکی از روش‌هایی است که توسط محققان زیادی استفاده شده و روابط مناسبی به منظور محاسبه تنش‌های افقی کمینه و بیشینه را به صورت زیر ارائه می‌دهد [۳، ۱۲].

$$\sigma_h = \frac{\nu}{1-\nu} \sigma_v + \frac{1-2\nu}{1-\nu} \alpha P_p + \frac{E}{1-\nu^2} \varepsilon_x + \frac{\nu E}{1-\nu^2} \varepsilon_y \quad (۲)$$

$$\sigma_H = \frac{\nu}{1-\nu} \sigma_v + \frac{1-2\nu}{1-\nu} \alpha P_p + \frac{E}{1-\nu^2} \varepsilon_y + \frac{\nu E}{1-\nu^2} \varepsilon_x \quad (۳)$$

که:

$\sigma_h$ : تنش افقی کمینه

$\sigma_H$ : تنش افقی بیشینه

$P_p$ : فشار منفذی

$\alpha$ : ضریب بایوت

$E$ : مدول یانگ

$\varepsilon_x$ ،  $\varepsilon_y$ : کرنش‌های ناشی از نیروهای تکتونیکی در جهت تنش‌های افقی کمینه و بیشینه یا ضرایب پوروالاستیک



وضعیت تنش‌های القایی، شرایط لازم جهت رخداد ریختگی‌های دیواره چاه و ایجاد گسیختگی‌های کششی القایی به صورت زیر است [۲۴، ۲۰، ۱۲].  
شرایط لازم برای رخداد ریختگی‌های دیواره چاه برقراری یکی از سه شرط زیر است:

$$\begin{aligned} \sigma_z &\geq \sigma_\theta \geq \sigma_r \\ \sigma_\theta &\geq \sigma_z \geq \sigma_r \\ \sigma_\theta &\geq \sigma_r \geq \sigma_z \end{aligned} \quad (15)$$

و شرایط لازم جهت ایجاد گسیختگی‌های کششی در دیواره چاه نیز برقراری یکی از سه حالت زیر است:

$$\begin{aligned} \sigma_r &\geq \sigma_\theta \geq \sigma_z \\ \sigma_r &\geq \sigma_z \geq \sigma_\theta \\ \sigma_z &\geq \sigma_r \geq \sigma_\theta \end{aligned} \quad (16)$$

به‌عنوان مثال، برای تشکیل ریختگی‌های درون چاه، چنانچه حالت اول در رابطه ۱۵ برقرار باشد، آنگاه:

$$\begin{aligned} \sigma_1 &= \sigma_z \\ \sigma_3 &= \sigma_r \end{aligned} \quad (17)$$

با در نظر گرفتن روابط ارائه‌شده برای حالتی که زاویه برابر با ۹۰ درجه است رابطه ۱۱ و جایگذاری رابطه ۱۷ در آن‌ها شرایط زیر بر اساس معیار موهر کولمب برقرار خواهد شد:

$$\sigma_v + (2\nu(\sigma_H - \sigma_h)) = C_o + q \cdot P_w \quad (18)$$

که از این رابطه می‌توان مقدار فشار گل حفاری یا همان فشار درون چاه را به دست آورد. این فشار معادل حداقل وزن گل برای جلوگیری از رخداد ریختگی دیواره چاه به درون چاه است.

با طی کردن فرایند بالا برای همه حالت‌های معرفی شده برای رخداد ریختگی‌های درون چاهی و گسیختگی‌های کششی القایی، جداول زیر بیانگر مقادیر کمینه و بیشینه وزن گل حفاری در این حالت‌ها خواهند بود.

جدول ۱- کمترین مقدار وزن گل حفاری بر اساس معیار موهر کولمب

case	$\sigma_1 \geq \sigma_2 \geq \sigma_3$	Minimum mud weight
(۱)	$\sigma_z \geq \sigma_\theta \geq \sigma_r$	$P_w = \frac{\sigma_v + (2\nu(\sigma_H - \sigma_h)) - C_o}{q}$
(۲)	$\sigma_\theta \geq \sigma_z \geq \sigma_r$	$P_w = \frac{3\sigma_H - \sigma_h - C_o}{q + 1}$
(۳)	$\sigma_\theta \geq \sigma_r \geq \sigma_z$	$P_w = 3\sigma_H - \sigma_h - C_o - q(\sigma_v + 2\nu(\sigma_H - \sigma_h))$

$$\sigma_z = \sigma_v - 2\nu(\sigma_H - \sigma_h) \cos 2\theta \quad (9)$$

همان‌طور که از روابط بالا مشخص است، تنش‌های مماسی و قائم توابعی از زاویه  $\theta$  هستند که بیانگر جهت تنش‌ها در اطراف حفره چاه هستند و مشخص است که مقادیر این دو تنش در زوایای  $\pm 90^\circ$  بیشینه بوده و در  $0^\circ$  و  $180^\circ$  درجه نیز کمینه خواهند بود. در واقع با در نظر گرفتن مقادیر بیشینه و کمینه می‌توان شرایط لازم برای رخداد گسیختگی کششی القایی را به صورت زیر ارائه داد [۲۴، ۱۲]:

$$\begin{aligned} \text{if } \theta &\rightarrow 0: \\ \sigma_r &= P_w \\ \sigma_\theta &= 3\sigma_h - \sigma_H - P_w \\ \sigma_z &= \sigma_v - (2\nu(\sigma_H - \sigma_h)) \end{aligned} \quad (10)$$

و شرایط لازم برای رخداد ریختگی داخل چاه نیز به صورت زیر خواهد بود [۲۴، ۱۲].

$$\begin{aligned} \text{if } \theta &\rightarrow 90: \\ \sigma_r &= P_w \\ \sigma_\theta &= 3\sigma_H - \sigma_h - P_w \\ \sigma_z &= \sigma_v + (2\nu(\sigma_H - \sigma_h)) \end{aligned} \quad (11)$$

### ۲-۳- معیار موهر کولمب و آنالیز پایداری

معیار شکست موهر-کولمب به عنوان ساده‌ترین معیار شکست موجود بین معیارهای شکست به‌طور گسترده‌ای در مطالعات مختلف استفاده می‌شود. این معیار بر اساس تنش‌های اصلی بیشینه و کمینه به صورت زیر است [۲، ۱۲]:

$$\sigma_1 = C_o + q\sigma_3 \quad (12)$$

که:

تنش اصلی بیشینه

$\sigma_3$ : تنش اصلی کمینه

$C_o$ : مقاومت فشاری تک‌محوره

و  $q$  نیز به صورت زیر است:

$$q = \tan^2\left(\frac{\pi}{4} + \frac{\phi}{2}\right) \quad (13)$$

$\phi$ : زاویه اصطکاک داخلی

با در نظر گرفتن مفهوم تنش موثر، معیار موهر-کولمب به صورت زیر خواهد بود:

$$(\sigma_1 - P_p) = C_o + q(\sigma_3 - P_p) \quad (14)$$

که:

$P_p$ : فشار منفذی

معیار کولمب برای تعیین کمترین و بیشترین حد وزن گل در حفاری چاه مورد استفاده قرار می‌گیرد. بر اساس مطالعات انجام گرفته، با توجه به

$$E = 1.34 \times 10^{10} \times \frac{\rho}{\Delta t_s^2} \left( \frac{3\Delta t_s^2 - 4\Delta t_p^2}{\Delta t_s^2 - \Delta t_p^2} \right) \quad (20)$$

که:

$E$ : مدول یانگ بر حسب psi  
 $\rho$ : چگالی سنگ بر حسب کیلوگرم بر سانتی متر مکعب  
 $\Delta t_s$ : مدت زمان گذر سرعت موج برشی بر حسب میکروثانیه بر فوت  
 $\Delta t_p$ : مدت زمان گذر سرعت موج فشاری بر حسب میکروثانیه بر فوت

و رابطه محاسبه ضریب پواسون نیز به صورت زیر است:

$$\nu = \frac{\Delta t_s^2 - 2\Delta t_p^2}{2(\Delta t_s^2 - \Delta t_p^2)} \quad (21)$$

روابط بالا مقادیر دینامیکی بوده که در مدل سازی ضریب پواسون برابر با مقدار محاسبه شده از رابطه ۲۱ در نظر گرفته شده است و مدول الاستیک دینامیکی با استفاده از رابطه زیر تبدیل به مدول الاستیک استاتیکی شده است:

$$E_s = 0.41E_d - 1.05 \quad (22)$$

که زیر نویس های s و d به ترتیب بیانگر مقادیر استاتیکی و دینامیکی هستند.

با توجه به داده های به دست آمده از آزمایش های مکانیک سنگی از مغزه های حاصله از مخزن مورد مطالعه، مقاومت فشاری تک محوره نیز با استفاده از رابطه زیر محاسبه شده است:

$$UCS = (3.4 \times E_s) + 3.64 \quad (23)$$

فشار ناشی از ستون گل حفاری نیز از رابطه زیر محاسبه شده است:

$$P_{wl} = \frac{9.81 \times Depth \times M_w}{62.4 \times 1000} \quad (24)$$

$M_w$ : وزن گل حفاری بر حسب pcf

که:

$Depth$ : عمق بر حسب متر

و فشار نیز بر حسب مگاپاسکال محاسبه می شود.  
 حفاری چاه به روش فراتعادلی انجام گرفته است. لازم به ذکر است که برای در نظر گرفتن تأثیر چگالی معادل گردش گل، بر اساس تجربه به دست آمده از چاه های مجاور چاه مورد مطالعه، مقدار ۰/۳ به فشار حاصله از ستون گل حفاری اضافه می شود و بنابراین فشار درون چاه خواهد بود:

جدول ۲- بیشترین مقدار وزن گل حفاری بر اساس معیار موهر کولمب

case	$\sigma_1 \geq \sigma_2 \geq \sigma_3$	Maximum mud weight
(۱)	$\sigma_r \geq \sigma_\theta \geq \sigma_z$	$P_w = C_o + q(\sigma_v - 2\nu \times (\sigma_H - \sigma_h))$
(۲)	$\sigma_r \geq \sigma_z \geq \sigma_\theta$	$P_w = \frac{C_o + q(3\sigma_h - \sigma_H)}{q + 1}$
(۳)	$\sigma_z \geq \sigma_r \geq \sigma_\theta$	$P_w = \frac{C_o - (\sigma_v - 2\nu(\sigma_H - \sigma_h))}{q} + 3\sigma_h - \sigma_H$

برای محاسبه بیشترین مقدار وزن گل حفاری معیار دیگری نیز بر اساس مقاومت کششی با عنوان معیار حد فشار کششی ارائه شده که به صورت زیر است:

$$P_{wcutoff} = 3\sigma_h - \sigma_H + T - P_p \quad (19)$$

که:

$T$ : مقاومت کششی

#### ۴- روش تحقیق

این پژوهش به منظور بررسی پنجره ایمن گل حفاری استفاده شده در حفاری یک چاه نفتی در ناحیه مخزنی آسماری یکی از میادین جنوب غربی ایران انجام گرفته است. به دلیل عدم وجود داده های معتبر تنش های درجا در محل مورد مطالعه، از داده های نمودارگیری موجود برای انجام مطالعه استفاده شده است. اطلاعات لازم از نمودارهای تصویرگر، نمودارهای تخلخل و چگالی، نمودارهای صوتی، نمودار کالیپر، اطلاعات زمین شناسی، داده های حاصله از عملیات حفاری چاه و چاه های مجاور و اطلاعات به دست آمده از آزمایش های مکانیک سنگی مربوط به سنگ های مختلف ناحیه مخزنی در میدان مورد مطالعه استفاده شده است. با توجه به روابط و مدل های ریاضی موجود جهت استخراج پارامترهای مورد نیاز برای ساخت مدل مکانیکی، پارامترهای لازم محاسبه و استخراج شدند و در نهایت با ساخت مدل مکانیکی و مطابقت آن با وقایع موجود در چاه از جمله هرزروی گل حفاری، ریختگی ها و شکستگی های کششی دیواره چاه پنجره ایمن گل حفاری برای چاه مذکور نشان داده شده است که می تواند به عنوان ابزاری مناسب در حفاری چاه های بعدی در ناحیه مخزنی میدان مورد مطالعه استفاده شود.

#### ۵- ساخت مدل مکانیکی در مطالعه حاضر

در این مطالعه با استفاده از داده های در دسترس از چاه مورد بررسی، پارامترهای لازم جهت ساخت مدل مکانیکی استخراج شدند. مدول یانگ و ضریب پواسون با استفاده از روابط زیر و داده های حاصل از نمودارگیری صوتی به دست آمدند [۱۸، ۱۲].

- 1- Tensile cut-off pressure
- 2- Caliper log

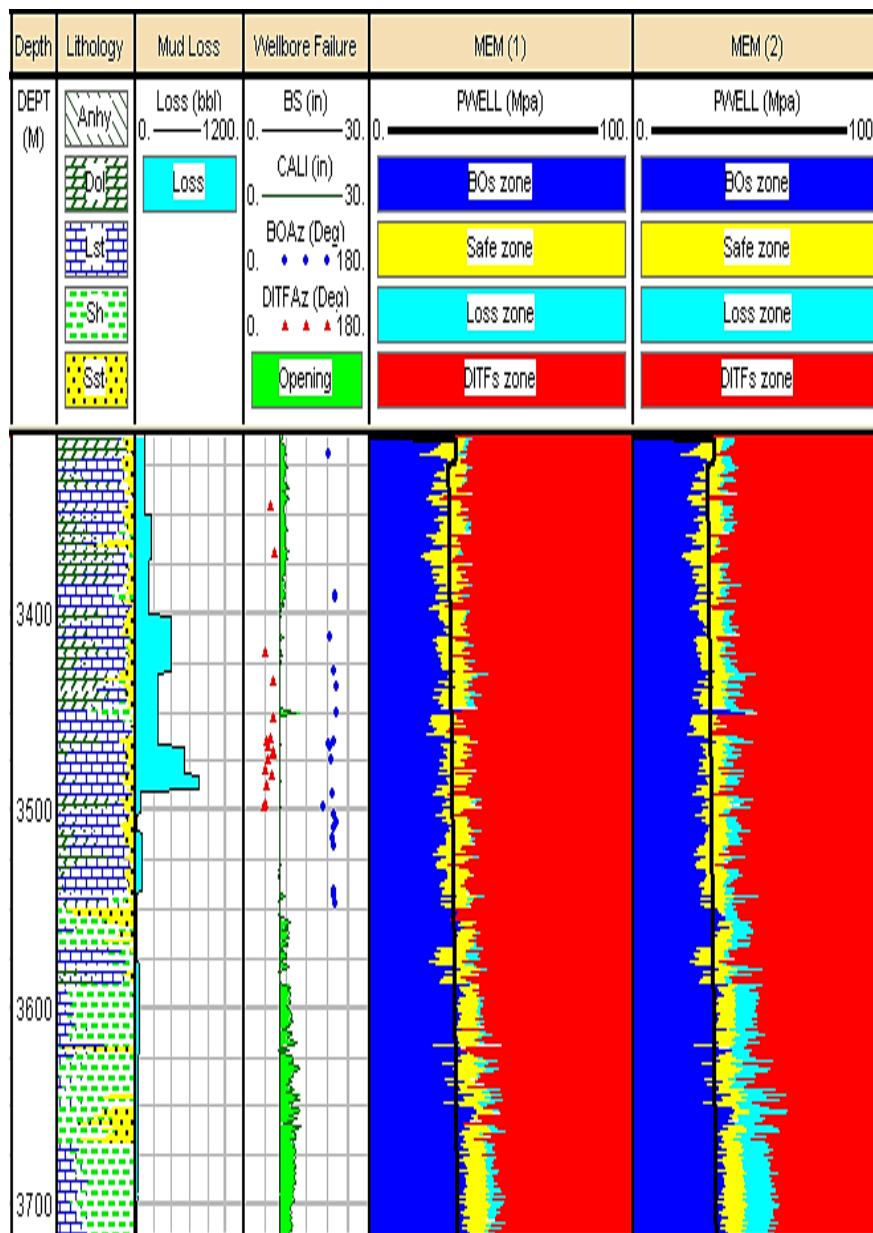


چاه مورد مطالعه تهیه شده است که در محدوده مورد مطالعه دو ناحیه غالب سنگ آهکی از عمق ۳۳۵۰ تا ۳۵۵۰ متری و غالب شیلی از عمق ۳۵۵۰ متری تا ۳۷۱۰ متری در آن مشخص است. دولومیت، آنیدریت و ماسه سنگ نیز در قسمت‌های مختلف دارای درصد‌های جزئی هستند. ستون سوم شبیه‌سازی نمایانگر هرزروی گل حفاری است که بر اساس گزارش‌های روزانه حفاری تهیه شده است. مشخص است که در نواحی که سنگ آهکی، هرزروی زیادی رخ داده که می‌تواند نشانه‌ای از رخداد گسیختگی‌های روی دیواره چاه و خصوصاً گسیختگی‌های القایی کششی باشد. این موضوع به عنوان شاخصی جهت حساس بودن وزن گل در این ناحیه مد نظر قرار می‌گیرد که امکان رخداد گسیختگی‌های کششی و برشی را افزایش می‌دهد. در ستون چهارم

$$P_w = P_{w1} + 0.3 \quad (25)$$

### ۶- نتایج و بحث

پس از تهیه پارامترهای لازم جهت ساخت مدل مکانیکی، این پارامترها در نرم‌افزار IP<sup>۱</sup> وارد شدند و مدل نهایی ساخته شد. با کنترل نتیجه نهایی و انطباق با واقعیت‌های موجود در چاه، شبیه‌سازی چاه مورد مطالعه انجام گرفت که نتیجه آن در شکل ۴ ارائه شده است. مدل ارائه شده دارای ۶ ستون مجزا است که ستون اول آن نشان‌دهنده عمق محدوده مورد مطالعه است. ستون دوم بر اساس اطلاعات به دست آمده از گزارش‌های زمین‌شناسی برای سازندهای حفاری شده تا عمق نهایی



1- Interactive Petrophysics

#### ۸- منابع و مراجع

- [1] Kok, M. V. & Uyar, T. T., 2014. A Geomechanical Wellbore Stability Assessment for Different Formations. Petroleum Fields. Journal of Petroleum Science technology, 32(19), 2355-2364.
- [2] Al-Ajmi, A. & Zimmerman, R., 2006. Stability analysis of vertical boreholes using the Mogi-Coulomb failure criterion. International journal of rock mechanics and mining sciences, 43(8), 1200-1211.
- [3] Zoback, M.D., Reservoir Geomechanics. 2010. Cambridge university press.
- [4] Bataee, M. & Irawan, S., 2014. Review of geomechanical application in reservoir modeling. Journal of applied sciences, (10)14, 981-990.
- [5] Afsari, M., Ghafoori, M., Roostaean, M. Haghshenas, A., Ataei, A., & Masoudi, R., 2009. Mechanical earth model (MEM): An effective tool for borehole stability analysis and managed pressure drilling (case study). SPE Middle East Oil and Gas Show and Conference.
- [6] Neeamy, A. K. & Selman, N. S., 2020. Building 1D Mechanical Earth Model for Zubair Oilfield in Iraq. Journal of engineering, 26(5), 47-63.
- [7] Zain., U. L. A. & Henk, M., 2020. Building 1D and 3D Mechanical Earth Models for Underground Gas Storage—A Case Study from the Molasse Basin, Energies, 13(21), 5722.
- [8] Wibowo, H. B., Julianto, C., Buntoro, A. & Subiatmono, P., 2021. Mud Weight Evaluation Based on Safe Mud Window in Drilling Well "X-1" to Overcome Caving and Partial Loss Problems in The Oil Field. IOP Conference Series: Earth and Environmental Science., IOP Publishing, 830(1).
- [9] Carnegie, A., Thomas, M., Efnik, M. S. & Hamawi, M., 2002. An advanced method of determining in-situ reservoir stresses: wireline conveyed micro-fracturing. Abu Dhabi International Petroleum Exhibition and Conference. OnePetro.
- [10] Afsari, M., Amani, M., Razmgir, S. M., Karimi, H. & Yousefi, S., 2010. Using drilling and logging data for developing 1d mechanical earth model for a mature oil field to predict and mitigate wellbore stability challenges. International Oil and Gas Conference and Exhibition in China.
- [11] Zoback, M., Barton, C.A., Brudy, M. & Castillo, D.A., 2003. Determination of stress orientation and magnitude in deep wells. International Journal of Rock Mechanics, 40(7-8), 1049-1076.
- [12] Fjaer, E., Holt, R. M., Horsrud, P. & Raaen, A. M., 2008. Petroleum related rock mechanics. Elsevier.
- [13] Zare, M., S. Shadizadeh, & B. Habibnia. 2010. Mechanical stability analysis of directional wells: a case study in Ahwaz oilfield. Nigeria Annual International Conference

اطلاعات به دست آمده از رانش ابزار نمودارگیری تصویری و اندازه گیری قطر یا ابزار کالیپر ارائه شده اند. نقاط دایره ای آبی رنگ نشان دهنده وقوع ریختگی های روی دیواره چاه و نقاط مثلثی قرمز رنگ نیز نشان دهنده ایجاد گسیختگی کششی القایی روی دیواره چاه هستند. ضمن آنکه ناحیه سبزرنگ گشادشدگی دیواره چاه در اثر ریزش را نشان می دهد که در ناحیه شیلی شدت آن افزایش یافته است. دو ستون آخر در شبیه سازی ارائه شده نیز بیانگر قسمت های مختلف پنجره گل حفاری هستند.

مدل مکانیکی اول ارائه شده در ستون پنجم شکل ۴، بر اساس معیار موهر کولمب ارائه شده است و مدل ارائه شده در ستون ششم بر اساس معیار حد فشار کششی به دست آمده است. با بررسی این دو مدل به خوبی مشخص است که هر دو مدل پنجره ایمن گل حفاری (ناحیه زرد رنگ) را یکسان پیش بینی کرده اند، ولی در ستون پنجم ناحیه مربوط به هرزروی گل حفاری، محدودتر شده است که این موضوع بیانگر آن است که معیار موهر کولمب نسبت به معیار حد فشار کششی محافظانه کارتر بوده و فشار شکست سازند (ناحیه قرمز) را کمتر پیش بینی کرده است. بنابراین معیار موهر کولمب نسبت به معیار حد فشار کششی ایمنی بیشتری را به همراه خواهد داشت. در ناحیه سنگ آهکی از محدوده مورد بررسی، معیار حد فشار کششی در برخی از نواحی شدت وقایع مورد انتظار بر دیواره چاه را بیشتر پیش بینی کرده است که این موضوع نیز می تواند حکایت از تفاوت های دو مدل داشته باشد. مثلاً در عمق ۳۴۵۰ متری ناحیه آهکی از مخزن مورد بررسی در چاه مورد مطالعه، بر اساس اطلاعات ستون سوم و چهارم، گشادشدگی چاه، هرزروی گل حفاری و رخداد شکستگی های کششی و برشی همه در کنار هم رخ داده اند. با مقایسه نتایج به دست آمده از هر دو معیار، مشخص است که معیار حد فشار کششی در این ناحیه شدت وقایع را بیشتر پیش بینی کرده است. به طور کلی، پیشنهاد می شود که برای شبیه سازی پایداری چاه های بعدی در میدان مورد مطالعه، وزن گل حفاری بیشینه در نواحی آهکی با معیار حد فشار کششی و در نواحی شیلی با معیار موهر کولمب محاسبه شود.

#### ۷- جمع بندی

در این پژوهش به منظور بررسی اثر گل حفاری استفاده شده در چاه بر تشکیل گسیختگی های مختلف در دیواره چاه از ساخت مدل مکانیکی یک بعدی زمین در ناحیه مخزنی آسماری در چاهی در یکی از میادین جنوب غربی ایران استفاده شده است. اطلاعات مختلف زمین شناسی، حفاری، آزمایشگاهی و نمودارگیری های چاه جمع آوری شدند و پارامترهای لازم جهت ساخت مدل از آن ها استخراج شدند. بر اساس توزیع تنش های القایی در اطراف دیواره چاه و معیار موهر کولمب و حد فشار کششی، دو مدل برای چاه مورد بررسی ساخته شد که نتایج شبیه سازی انطباق مناسبی با واقعیت های رخ داده درون چاه، از جمله شکستگی های کششی و برشی تشخیص داده شده توسط نمودارهای تصویرگر، هرزروی گل حفاری و افزایش قطر یا گشادشدگی دیواره چاه داشتند. با مقایسه نتایج به دست آمده توسط این دو معیار، معیار موهر کولمب محتاطانه تر عمل کرده و فشار رخداد شکست سازند را که منجر به هرزروی شدید گل حفاری به درون سازند می شود، کمتر پیش بینی می کند.





- [21] Lawani, K. O., 2007. Rock stress orientation from borehole breakouts and its correlation to drill parameters and geology: results from boreholes KFM01A and KFM05A of the Forsmark site investigation, Sweden.
- [22] Rajabi, M., Sherhati, S., Bohloli, B. & Tingay, M., 2010. Subsurface fracture analysis and determination of in-situ stress direction using FMI logs: An example from the Santonian carbonates (Ilam Formation) in the Abadan Plain, Iran. *Tectonophysics*, 492(1-4), 192-200.
- [23] Tingay, M., Reinecker, J. & Muller, B., 2008. Borehole breakout and drilling-induced fracture analysis from image logs. *World stress map project*, 1, 8.
- [24] Gholami, R., Moradzadeh, A., Rasouli, V. & Hanachi, J., 2014. Practical application of failure criteria in determining safe mud weight windows in drilling operations. *Journal of Rock Mechanics and Geotechnical Engineering*, 6(1), 13-25.
- [25] Peng, S. & J. Zhang., 2007. *Engineering geology for underground rocks*. Springer Science & Business Media.
- [26] Chen, X., Tan, C. P., & Chris, M., 2002. A comprehensive, practical approach for wellbore instability management. *SPE drilling and completion*, 17(04), 224-236
- and Exhibition.
- [14] Mohammed, A. K. & Selman, N. S., 2020. Building 1D Mechanical Earth Model for Zubair Oilfield in Iraq. *Journal of Engineering*, 26(5), 47-63.
- [15] Aslannezhad, M. & Jalalifar, H., 2016. Determination of a safe mud window and analysis of wellbore stability to minimize drilling challenges and non-productive time. *Journal of Petroleum Exploration Production Technology*, 6(3), 493-503.
- [16] Bourgoyne, A. T., Millheim, K.K., Chenevert, M.E. & Young, F.S., 1986. *Applied drilling engineering*. Vol. 2. Society of Petroleum Engineers Richardson.
- [17] Abdideh, M. & Fathabadi, M.R., 2013. Analysis of stress field and determination of safe mud window in borehole drilling (case study: SW Iran). *Journal of petroleum exploration*, 3(2), 105-110.
- [18] Perchikolaee, R. S., Shadizadeh, S. R., Shahryar, K. & Kazemzadeh, E., 2010. Building a Precise Mechanical Earth Model and its Application in Drilling Operation Optimization: A Case Study of Asmari Formation in Mansuri Oil Field. *International Oil and Gas Conference and Exhibition in China*.
- [19] Rasouli, V., Pallikathekathil, Z. & Mawuli, E., 2010. Optimum well trajectory design in a planned well in Blacktip field, Australia: a case study. *APPEA journal*, 50(1), 535-548.
- [20] Zoback, M. L., 1992. First-and second-order patterns of stress in the lithosphere: The World Stress Map Project. 97(B8), 11703-11728.



# بررسی روش‌های مرسوم ارزیابی قابلیت انفجارپذیری سنگ‌ها در فضاهاى زیرزمینی

محمد غفوری مقدم<sup>۱</sup>، سینا رستم‌آبادی<sup>۲</sup>، جعفر خانی<sup>۳</sup>

۱- کارشناسی ارشد، دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه تربیت مدرس، تهران، ایران

۲- کارشناس ارشد، عضو پیوسته انجمن تونل ایران (کمیته تونل‌های عمیق و طویل)، تهران، ایران

۳- دانشجوی دکتری، دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه تربیت مدرس، تهران، ایران

## چکیده

در دنیای امروز با توجه به گسترش شهرها و ایجاد توسعه پایدار در زیرساخت کشورها، ساخت فضاهاى زیرزمینی امری اجتناب‌ناپذیر است. در بین روش‌های مختلف ساخت تونل‌ها، یکی از روش‌های مرسوم حفاری و انفجار است. در فرآیند ساخت تونل به روش حفاری و انفجار یکی از اساسی‌ترین مسائل در طراحی بهینه‌الگوی آتشکاری، ارزیابی قابلیت انفجارپذیری سنگ‌ها است. قابلیت انفجارپذیری توده‌سنگ بیانگر میزان آسیب‌پذیری توده‌سنگ در مقابل انفجار یا میزان آسانی خرد شدن توده‌سنگ است. عوامل متعددی بر روی قابلیت انفجارپذیری توده‌سنگ تأثیر می‌گذارد. در مقاله حاضر مهم‌ترین پارامترهای تأثیرگذار بر قابلیت انفجارپذیری مرتبط با توده‌سنگ و روش‌های مرسوم ارزیابی قابلیت انفجارپذیری سنگ‌ها در فضاهاى زیرزمینی بررسی شده است. تلاش‌هایی که تاکنون در این زمینه صورت گرفته، قابلیت کاربرد وسیع در عملیات آتشکاری را ندارند؛ زیرا برای عملیاتی کردن این سیستم‌های طبقه‌بندی، نیاز به بررسی یک سری از خصوصیات توده‌سنگ است که برآورد آنها زمان زیادی را میطلبد. از طرفی در روش‌های ارائه شده برای طراحی الگوی چالزنی و آتشکاری تونل‌ها تأثیر قابلیت انفجارپذیری توده‌سنگ به‌طور کامل لحاظ نشده است.

کلمات کلیدی: تونل، قابلیت انفجارپذیری، طراحی الگوی حفاری و آتشکاری، خرج ویژه

## ۱- مقدمه

پارامترهای مؤثر در آتشکاری را می‌توان به سه گروه تقسیم‌بندی کرد: پارامترهای غیرقابل کنترل، پارامترهای نیمه‌قابل کنترل و پارامترهای قابل کنترل. پارامترهای قابل کنترل، پارامترهایی هستند که می‌توانند تصحیح شوند و یا تغییر داده شوند (مانند ماده منفجره مورد کاربرد و یا روش آتشکاری مورد نظر). پارامترهای تقریباً قابل کنترل پارامترهایی مانند هندسه تونل و پارامترهای عملیاتی هستند. پارامترهای غیرقابل کنترل پارامترهایی هستند که طراح قادر به کنترل آنها نیست، مانند خصوصیات ژئومکانیکی سنگی که باید آتشکاری شود. با مطالعه دقیق خصوصیات ژئومکانیکی می‌توان عوامل قابل کنترل مانند ماده منفجره و الگوی آتشکاری را به درستی طراحی و انتخاب کرد که در اقتصادی کردن عملیات آتشکاری تونل نقش بسزایی دارند [۱].

## ۲- قابلیت انفجار پذیری

هنگامی که در دو توده‌سنگ مختلف با الگوی آتشکاری و نوع ماده منفجره یکسان، انفجار انجام می‌شود، علت این است که توده‌سنگ‌ها مقاومت متفاوتی در برابر خرد شدن به وسیله انفجار دارند. این خاصیت را قابلیت انفجار پذیری<sup>۱</sup> می‌نامند. انفجار پذیری توده‌سنگ بیانگر میزان آسیب‌پذیری توده‌سنگ در مقابل انفجار یا میزان آسانی خرد شدن توده‌سنگ است.

قابلیت انفجار پذیری توده‌سنگ، بازتابی جامع و کامل از خصوصیات فیزیکی و مکانیکی توده‌سنگ، کارایی و عملکرد مواد منفجره و فرایند انفجار است. این پارامتر ترکیبی از خصوصیات ذاتی سنگ است که در فرآیند انفجار اثر خود را نشان می‌دهد. از عوامل اصلی تأثیرگذار بر خاصیت انفجار پذیری علاوه بر خصوصیات فیزیکی و مکانیکی سنگ، عوامل بیرونی مانند نوع و شکل ماده منفجره، میزان خرج، روش شارژ، نوع آغازگر، فاصله بین چال‌ها و موقعیت سطح آزاد است. بدیهی است که ویژگی‌های توده‌سنگ مهم‌ترین پارامترهای تأثیرگذار در قابلیت انفجار پذیری هستند، زیرا این پارامترها غیرقابل تغییر هستند و فرآیند انفجار بر اساس آنها طراحی می‌شود [۱]. پارامترهای مورد نیاز برای شناخت رفتار سنگ در برابر انفجار در ادامه به تفکیک بررسی شده‌اند.

## ۳- مشخصات فیزیکی توده سنگ

### ۱-۳- جرم مخصوص سنگ

مقاومت سنگ‌ها معمولاً به چگالی آن کاملاً مرتبط است. طبق یک قانون سرانگشتی هرچه جرم مخصوص سنگ بیشتر باشد، انرژی مورد نیاز برای خرد کردن آن بیشتر است. سنگ‌های دارای خلل و فرج هرچند که چگالی کمتری دارند، اما به علت وجود خلل و فرج، خرد کردن آنها مشکل‌تر است [۳]. در یک نمونه مشخص از سنگ با افزایش عمق، جرم مخصوص نیز افزایش پیدا می‌کند، زیرا با بیشتر شدن عمق، در اثر فشار وارده از سنگ‌های فوقانی، درزه‌ها و شکاف‌ها به تدریج بسته‌تر می‌شود. از طرف دیگر، هوازدگی سنگ‌ها نیز در نزدیکی رخنمون‌ها، جرم مخصوص را کاهش می‌دهد.

## ۳-۲- بافت

کانی‌ها، مواد اصلی سازنده سنگ‌ها هستند، زمانی که کانی‌ها ریزتر باشند، سنگ، جرم مخصوص بالاتری داشته و قفل‌شدگی کانی‌ها بهتر بوده و در نتیجه، شکست سنگ با مواد منفجره دشوارتر خواهد بود. این موضوع دلیل دشوار بودن شکست سنگ‌های آذرین با انفجار است. برای انفجار پذیری سنگ‌های رسوبی، علاوه بر ترکیب کانی‌ها، اندازه قطعات و ترکیب سیمان بین ذرات نیز مؤثر است. به عنوان مثال سنگ رسوبی خوب دانه‌بندی شده با سیمان سیلیسی، مقاوم بوده و سخت منفجر می‌شود. سنگ‌های رسوبی با سیمان حاوی اکسیدهای آهن در درجه بعدی بوده و سنگ‌های رسوبی حاوی سیمان آهنکی و رس از مقاومت کمتری در برابر انفجار برخوردارند. ترکیب و بافت سنگ‌های دگرگونی پیچیده است و انفجار پذیری آن‌ها وابسته به درجه دگرگونی سنگ است. به‌طور کلی، سنگ‌های با درجه دگرگونی بالاتر و بافت متراکم‌تر، قوی‌تر بوده و شکستن آن‌ها با انفجار سخت‌تر است [۲].

## ۳-۳- سختی

سختی به صورت مقاومت لایه سطحی سنگ در برابر نفوذ جسم دیگر (دارای سختی بیشتر) تعریف می‌شود. بر اساس یک قانون سرانگشتی می‌توان گفت که هرچه سنگ سخت‌تر باشد، انرژی ویژه بیشتری برای خرد کردن آن لازم است [۳].

## ۳-۴- شاخص چقرمگی

چقرمگی را مقاومت سنگ در برابر رشد ترک و یا توسعه آن در توده‌سنگ تعریف می‌کنند. نظر به اینکه فرآیند انفجار در سنگ در حقیقت با ایجاد ترک و یا گسترش ریزترک‌های موجود در سنگ موجب خردایش آن می‌شود، این پارامتر برای طراحی آتشکاری بسیار مهم و حیاتی است [۴].

## ۳-۵- تخلخل

تخلخل (روزنه‌داری) عبارت است از نسبت حجم کل منافذ یک نمونه سنگ به حجم کل همان نمونه که بر حسب درصد بیان می‌شود. سنگ‌های متخلخل، شامل دو نوع تخلخل دانه‌ای یا اولیه و ثانویه (درزه و شکاف) هستند. تخلخل بین‌دانه‌ای دارای توزیع نرمالی در سنگ بوده و باعث میرایی انرژی موج کرنشی و کاهش مقاومت فشاری سنگ می‌شود. خردشدگی سنگ‌های متخلخل در اثر انرژی حاصل از انبساط گازها است و باید از ماده منفجره‌ای مانند آنفو (تولید گاز زیادتر) استفاده شود. در تخلخل ثانویه معمولاً حجم فضاهای خالی بزرگ‌تر بوده و توزیع آن نسبت به تخلخل بین‌دانه‌ای، غیریکنواخت‌تر است. اگر این حفره‌ها توسط چال قطع شوند، باعث بروز مشکلاتی در امر حفاری می‌شوند و تأثیرات نامطلوبی بر راندمان آتشکاری می‌گذارند؛ به‌ویژه اگر از مواد منفجره فله‌ای و پمپ‌شونده استفاده شود. این حفرات در حین حفاری باعث گیر کردن مته حفاری نیز می‌شوند. در حفره‌هایی که حتی به وسیله چال قطع نمی‌شوند، راندمان آتشکاری کاهش خواهد یافت [۳ و ۵].

## ۳-۶- رطوبت

آب اشباع‌کننده به‌طور محسوسی سبب افزایش سرعت انتقال امواج انفجاری می‌شود، زیرا به واسطه پر شدن خلل و فرج و شکستگی‌ها با

1- Blastability Index

به‌طور طبیعی، سنگ و خاک در مقابل تنش‌های فشاری مقاومت بیشتری دارند، مقاومت برشی سنگ از مقاومت فشاری کمتر بوده و مقاومت کششی کمترین مقدار مقاومت سنگ است. بنابراین، تا جایی که ممکن است باید سنگ در شرایط تنش کششی و برشی قرار گیرد تا خرد شدن سنگ تسهیل شود و انفجار بهبود پیدا کند.

جدول ۱- تناسب بین مقاومت سنگ‌ها و قابلیت حفاری آن‌ها [۷]

نوع سنگ	معیارهای شناسایی	مقاومت فشاری تک محوری Psi	سرعت موج لرزه‌ای ft/s	خصوصیات حفاری
خیلی نرم	سنگ با ضربه محکم نوک تیز چکش زمین‌شناسی خرد می‌شود؛ با چاقو کنده می‌شود؛ قطعات با ضخامت تا ۳ سانتی‌متر با فشار انگشت می‌شکنند.	۲۵۰-۴۴۰	۱۵۰۰-۴۰۰۰	کندن راحت
نرم	با چاقو تنها خراش انداخته می‌شود؛ با ضربه محکم نوک چکش زمین‌شناسی حفراتی با عمق ۱ تا ۳ میلی‌متر در نمونه ایجاد می‌شود.	۴۴۰-۱۵۰۰	۴۰۰۰-۵۰۰۰	کندن سخت
سخت	با چاقو خراشیده نمی‌شود؛ نمونه دستی با یک ضربه چکش زمین‌شناسی می‌شکند.	۱۵۰۰-۲۹۰۰	۵۰۰۰-۵۹۰۰	کندن بسیار سخت
خیلی سخت	نمونه دستی با بیش از یک ضربه چکش زمین‌شناسی می‌شکند.	۲۹۰۰-۱۰۰۰۰	۵۹۰۰-۷۰۰۰	کندن بی‌نهایت سخت یا انفجار
فوق‌العاده سخت	نمونه با ضربات زیاد چکش زمین‌شناسی می‌شکند.	< ۱۰۰۰۰	< ۷۰۰۰	انفجار

با توجه به اینکه سنگ‌ها یک محیط کاملاً الاستیک نیستند، بخشی از موج کرنشی که از میان آنها عبور کرده در اثر مکانیزم‌های مختلف میرا می‌شود و به نام اصطکاک داخلی<sup>۲</sup> یا ظرفیت خفه‌کنندگی ویژه<sup>۳</sup> نامیده می‌شوند. این پارامتر مبین توانایی سنگ در میرا کردن امواج کرنشی حاصل از انفجار است. مقدار ظرفیت خفه‌کنندگی ویژه بر حسب نوع سنگ می‌تواند بسیار متفاوت باشد. این مقدار برای گرانیت‌ها ۰/۰۲ تا ۰/۰۶ و برای ماسه سنگ ۰/۰۷ تا ۰/۳۳ است. با افزایش تخلخل، نفوذپذیری، درزه‌داری، هوازدگی و آبداری مقدار ظرفیت خفه‌کنندگی ویژه نیز افزایش می‌یابد. با کاهش ظرفیت خفه‌کنندگی ویژه مقدار

آب یک محیط خوب برای انتقال امواج الاستیک پدید می‌آید و موجب کاهش میرایی امواج می‌شود. همچنین، آب به علت کاهش اصطکاک داخلی بین اجزاء سنگ سبب کاهش مقاومت‌های کششی و فشاری سنگ می‌شود. برخی از مواد منفجره مانند آنفو به حضور آب حساس هستند و قدرت ماده منفجره با حضور آب کاهش محسوسی می‌یابد. عبور جریان آب از داخل چال‌هایی که با مواد منفجره ضدآب مانند امولسیون‌ها خرج‌گذاری شده‌اند، مشکل‌آفرین می‌شود؛ زیرا در این حالت آب از بین ستون خرج مسیری را برای خود باز می‌کند. لذا، این بخش از ستون خرج قادر نخواهد بود موج انفجار را به خوبی منتقل کند و انفجار خرج، ناقص انجام می‌گیرد [۴].

### ۳-۷- سرعت انتشار موج در سنگ‌ها

برای انتقال انرژی انفجار به سنگ باید سرعت انفجار و سرعت امواج صوتی در سنگ به هم نزدیک باشند. سرعت امواج در یک سنگ ثابت است و نمی‌توان آن را تغییر داد؛ اما، به علت تنوع مواد منفجره می‌توان ماده منفجره‌ای انتخاب کرد که سرعت انفجار آن به سرعت امواج صوتی سنگ نزدیک باشد [۶].

هرچه سنگ دارای چسبندگی بیشتری باشد یکپارچه‌تر و سرعت امواج صوتی در آن بیشتر است و انرژی انفجار بیشتر انتقال می‌یابد.

### ۴- خصوصیات و رفتار مکانیک سنگی

رفتار سنگ در اثر نیروی خارجی به صورت‌های مختلفی است. سنگ‌های الاستوپلاستیک مانند سنگ رس به‌سختی منفجر می‌شوند، اما سنگ‌های شکننده و الاستیک - شکننده مانند زغال سنگ ترد به‌راحتی قابل انفجار هستند. به‌طور کلی، در انفجار، ترد و شکننده بودن سنگ، مفیدترین رفتار است.

مدول تغییرشکل‌پذیری توده‌سنگ ( $E_m$ ) در واقع نسبت تنش به کرنش متناظر آن و یکی از پارامترهای مهم در طراحی سازه‌ها درون محیط‌های سنگی می‌باشد. این پارامتر نشان‌دهنده میزان تغییر شکل توده‌سنگ در پاسخ به هرگونه بارگذاری یا باربرداری می‌باشد. ظرفیت تغییرشکل‌پذیری سنگ، میزان انرژی لازم جهت خرد شدن را تعیین می‌کند. هرچه مدول تغییرشکل‌پذیری بالاتر باشد، انرژی بیشتری برای تغییر حجم دادن سنگ و خرد کردن آن موردنیاز است [۵].

نسبت پواسون بیانگر نسبت کرنش جانبی ( $\epsilon_p$ ) به کرنش محوری ( $\epsilon_a$ ) سنگ است. ضریب پواسون نشان می‌دهد که سنگ‌ها چطور انرژی را ذخیره و همچنین آزاد می‌کنند. این پارامتر بر روی خردایش حاصل از انفجار تأثیر مستقیم دارد. سنگ‌های دارای نسبت پواسون کوچک، خردایش بهتری را می‌دهند. به‌طور کلی، سنگی با نسبت پواسون بالاتر، انرژی بیشتری را جذب و ذخیره می‌کند و لذا انرژی بیشتری برای خرد کردن آن نیاز است و به ماده منفجره قوی‌تر نیازمند است.

مقاومت سنگ اثر بسیار مهمی روی نتایج انفجار دارد و طراحی الگوی آتشکاری بدون در نظر گرفتن آن ممکن نیست. سنگ‌های با مقاومت فشاری بیشتر، نیازمند مقدار ماده منفجره بیشتری برای خردایش هستند. اگر در یک سنگ با مقاومت زیاد، خرج‌گذاری کمتر از مقدار موردنیاز باشد، سنگ شکسته می‌شود، اما جابه‌جا نمی‌شود؛ در نتیجه، پس از انفجار، توده‌های از سنگ شکسته درجا به وجود خواهد آمد که حفر چال در آن بسیار مشکل و یا حتی غیر ممکن است.

2- Internal friction

3- Specific damping capacity

درزه‌های تولیدشده در اثر موج کرنشی بیشتر می‌شود [۳].

## ۵- مشخصات ناپیوستگی‌های توده‌سنگ

سنگ به دلیل ناپیوستگی‌هایی از قبیل درزه‌ها، سطوح لایه‌بندی، چین‌ها، زون‌های برشی و گسل‌ها که باعث نقص‌های ساختاری می‌شود، با سایر مواد مهندسی تفاوت دارد.

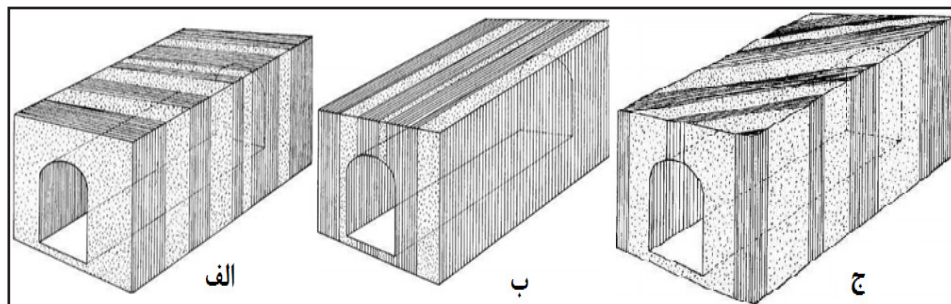
خواص مهندسی توده‌سنگ بیشتر از آن که به خواص مقاومتی آن سنگ وابسته باشد، به ضعف ساختاری آن بستگی دارد. این بدان معناست که در نهایت این ناپیوستگی‌ها هستند که رفتار سنگ‌ها را در زمان انفجار مشخص می‌کنند. بنابراین، از نقطه‌نظر طراحی الگوی چالزنی و آتشکاری، داشتن اطلاعات کافی درباره نوع و فراوانی ناپیوستگی‌ها مهم‌تر از داشتن اطلاعات درباره خود سنگ است. از این‌رو، تعیین خواص ناپیوستگی‌ها باید با دقت انجام شود.

در حفاری تونل، شکل مقطع نهایی تونل به شدت وابسته به خواص ساختاری توده‌سنگ است. اگر ناپیوستگی‌ها عمود بر محور تونل باشند، معمولاً نتایج آتشکاری خوب خواهد بود. اگر ناپیوستگی‌ها به موازات محور تونل باشند، میزان پیشروی رضایت‌بخش نبوده و شکل مقطع نیز صاف نخواهد بود. حال اگر ناپیوستگی‌ها نسبت به محور تونل حالت موربی داشته باشند، آتشکاری در یک سمت تونل راحت‌تر از سمت دیگر صورت می‌پذیرد (شکل ۱) [۱].

انفجار بدون انجام انبساط آبی و بدون انجام هیچ‌گونه کار مفیدی در فرآیند خردایش، محیط انفجار را از طریق درزه‌های باز ترک می‌کنند. همین امر باعث کاهش شدید خردایش و به دنبال آن، باعث افزایش پرتاب سنگ می‌شود. وجود پرکننده‌ها برای جلوگیری از خروج گازهای انفجار و افزایش زمان حبس گاز در چال بسیار سودمند است. درکل، چنین نتیجه‌گیری می‌شود که هم از نظر انتقال موج ضربه و هم از نظر فشار چال، در درزه‌های دارای بازشدگی، وجود پرکننده سودمندتر از عدم وجود آن است [۸].

## ۵-۱- تأثیر پارامترهای مربوط به خرج‌گذاری بر روی قابلیت انفجارپذیری

فرآیند انفجار، پراکندگی امواج، شکستن و خرد شدن توده‌سنگ بسیار پیچیده بوده و تعیین قابلیت انفجارپذیری توده‌سنگ‌ها کار آسانی نیست. علاوه بر ویژگی‌های زمین‌شناسی و پارامترهای مربوط به توده‌سنگ، پارامترهای مختلفی نظیر الگوی چالزنی و آتشکاری (بارسنگ، فاصله‌داری بین چال‌ها، کیفیت گل‌گذاری، تأخیرهای استفاده شده و غیره)، نوع ماده منفجره مورد استفاده (چگالی، سرعت انفجار، فشار ناشی از انفجار و مقدار گاز تولیدی و غیره) و نحوه انفجار بر قابلیت انفجارپذیری توده‌سنگ مؤثر است [۲]. به عنوان مثال، جهت انفجار از بار سنگ به سمت سطح آزاد، جهت غالب شکستگی و حرکت سنگ است. همچنین فاصله بین چال‌ها، میزان خردشدگی را کنترل



شکل ۱- اثر جهت‌داری درزه‌ها بر آتشکاری تونل؛ الف- درزه‌های عمود بر جهت تونل، برای پیشروی مناسب هستند. ب- پیشروی کم در زمانی که درزه‌ها با جهت تونل موازی هستند. ج- دیواره سمت راست بیشتر در معرض شکستگی است و آتشکاری در سمت چپ راحت‌تر است [۱].

می‌کند. اگر بارسنگ یا فاصله جانبی بین چال‌ها بیش از حد زیاد باشد، ممکن است قطعات بزرگی ایجاد شود یا در کف و دیواره تونل مقداری از سنگ باقی بماند که نشان‌دهنده بد بودن کیفیت آتشکاری است. کیفیت انسداد نیز مستقیماً بر روی میزان استفاده از انرژی انفجار تأثیر می‌گذارد. انسداد خوب می‌تواند از فرار زودرس گازهای حاصل جلوگیری کرده و باعث بهبود خردایش شود. همچنین توالی انفجار و فواصل زمانی تأخیرها نیز تأثیر مهمی در قابلیت انفجارپذیری سنگ و نتیجه آتشکاری دارد.

باید در نظر داشت که خرج‌گذاری چال با مواد منفجره می‌تواند به صورت جفت شده (تماس کامل چال با دیواره)، جفت نشده، پیوسته یا منقطع باشد که با توجه به خصوصیات زمین‌شناسی و الزامات مهندسی، یکی از این روش‌ها انتخاب می‌شود. زمانی که خرج‌گذاری چال به گونه‌ای است که خرج به‌طور کامل با دیواره در تماس است، فشار انفجار شدید بوده و سنگ به‌طور قابل‌توجهی در اثر انفجار آسیب

فاصله ناپیوستگی‌ها نقش مهمی در خردایش توده‌سنگ ایفا می‌کند. با افزایش اندازه بلوک و یا به عبارت دیگر کم شدن کثرت درزه‌ها، بر مقاومت توده‌سنگ افزوده می‌شود. مقدار بازشدگی و پرشدگی درزه‌ها از فاکتورهای تأثیرگذار روی آتشکاری به حساب می‌آیند. هنگامی که درزه‌ها دارای بازشدگی زیاد باشند، به دلیل جدایش سطح دو طرف درزه، انتقال انرژی از یک بلوک به بلوک دیگر به‌دشواری انجام می‌گیرد و انرژی حاصل از انفجار در عبور از فضای خالی درزه (دهانه) دچار افت شدیدی می‌شود. در صورتی که دهانه درزه‌ها توسط خاک یا مواد سنگی پر شده باشد، به دلیل کاهش اختلاف امپدانس بین سنگ و محیط بین درزه انرژی کمتری تلف می‌شود. همچنین، میزان بازشدگی و پرکننده درزه، فشار چال را به شدت تحت تأثیر قرار می‌دهد تا جایی که هیچ عاملی به این اندازه فشار چال ناشی از انفجار را تحت‌الشعاع قرار نمی‌دهد. با افزایش بازشدگی دهانه درزه‌ها، زمان حبس گازهای حاصل از انفجار به شدت کم می‌شود و در نتیجه گازهای حاصل از

ادامه جدول ۲

سرعت انتشار امواج لرزه‌ای	Heynen and Dimock	1976	۱۰
فراوانی، زاویه اصطکاک و زاویه زبری درزه‌ها	Ashby	1977	۱۱
استفاده از فاکتوری که تأثیر سنگ را نشان می‌دهد.	Langfors	1978	۱۲
ارتفاع پله، چگالی خرج، سرعت انفجار، ارتفاع گل‌گذاری، مقاومت فشاری تک‌محوری ماده‌سنگ، ثابتی که به وسیله بارگیری بستگی دارد.	Praillet	1980	۱۳
فاکتور آلتراسیون، RQD	Borquez	1981	۱۴
جرم مخصوص سنگ، سرعت موج طولی، مدول الاستیک، مقاومت فشاری و مقاومت کششی تک‌محوری سنگ، متوسط بعد واحد ساختار طبیعی، خصوصیات و درجه بازشدگی درزه	Rakishev	1982	۱۵
RQI	Leighton	1982	۱۶
RQI اصلاح شده	Lopez	1984	۱۷
نسبت امیدانس سنگ، چگالی سنگ، سرعت موج طولی	قابلیت انفجار توسعه‌یافته توسط دانشگاه شرقی چین	1985	۱۸
توصیف توده‌سنگ، فاصله‌داری و جهت‌داری درزه‌ها، سختی و جرم مخصوص	Lilly	1986	۱۹
جرم مخصوص، فاصله‌داری و جهت‌داری درزه‌ها، مقاومت بار نقطه‌ای، عمق چال، بارسنگ و وضعیت سطح آزاد	Ghose	1988	۲۰
بارسنگ مؤثر، شاخص مقاومت پروتودیاکنف	Gupta et al	1990	۲۱
مقاومت فشاری تک‌محوری ماده‌سنگ، جرم مخصوص، مدول یانگ، میانگین اندازه بلوک درجا، شرایط آب زیرزمینی و فاکتورهای تعدیل مقاومت فشاری و مقاومت کششی تک‌محوری ماده‌سنگ	JKMRC	1996	۲۲
اندیس بار نقطه‌ای، سرعت صوت در سنگ	روش سه در یک	1996	۲۳
مقاومت فشاری تک‌محوری، مقاومت کششی، چگالی، مدول الاستیسیته، سرعت موج، سختی اشمیت، متوسط اندازه بلوک درجا	Lutham and Lu	1999	۲۴
مجموع طول شکستگی‌ها، میانگین فاصله شکستگی، مقاومت فشاری دینامیکی سنگ، مدول الاستیک دینامیک سنگ، اندازه میانگین خردایش، درصد بلوک کامل	Jiang Han et al	2000	۲۵
جرم مخصوص، مقاومت فشاری ماده‌سنگ، فاصله‌داری ناپیوستگی‌ها		2002	۲۶
توصیف توده‌سنگ، فاصله‌داری و جهت‌داری درزه‌ها، بازشدگی ناپیوستگی‌ها، مقاومت فشاری تک‌محوری ماده‌سنگ	Moomivand	2005	۲۷
جرم مخصوص سنگ، سرعت موج طولی و عرضی در سنگ، شاخص ناهمسانگردی سنگ و سرعت ماده منفجره	(Zare (SPR	2007	۲۸
فازی‌سازی روش پیشنهادی Lutham and Lu	Azimi and Osanloo	2010	۲۹
مقاومت فشاری	Mohamed et al	2015	۳۰
جرم مخصوص، مقاومت، بافت سنگ	Scott and Onederra	2015	۳۱

می‌بیند. در چال‌های جفت‌نشده (مانند چال‌های محیط در روش آتشکاری کنتوری)، میزان فشار وارد شده به سنگ کاهش پیدا کرده و سنگ آسیب کمتری می‌بیند.

هنگامی که در یک نوع توده‌سنگ از مواد منفجره مختلفی استفاده شود، شاخص انفجاری‌پذیری سنگ نیز ممکن است بسیار متفاوت باشد. ضریب امیدانس سنگ به چگالی سنگ ( $\rho_p$ ) و سرعت موج طولی در سنگ ( $I_p$ ) بستگی دارد. امیدانس ماده منفجره نیز به چگالی ماده منفجره ( $\rho_e$ ) و سرعت انفجار ( $I_e$ ) آن وابسته است. زمانی که نسبت امیدانس ماده منفجره به امیدانس سنگ برابر است.  $(\rho_e \times I_e = \rho_p \times I_p)$ ، هیچ بازتاب موجی بین سنگ و ماده منفجره وجود نخواهد داشت و تطبیق کامل وجود دارد، در این حالت، بیشترین مقدار انرژی ماده منفجره به سنگ منتقل شده و بهترین نتیجه از نظر انفجار اتفاق می‌افتد. ضریب امیدانس پارامتر بسیار مهمی در قابلیت انفجاری‌پذیری سنگ است. مقدار ضریب امیدانس مواد منفجره صنعتی با ضریب امیدانس سنگ‌ها تفاوت دارد و اینکه این دو ضریب کاملاً با همدیگر تطابق داشته باشند، بسیار مشکل است. به همین دلیل، در حالت کلی برای سنگ‌هایی با چگالی بیشتر، ضریب الاستیسیته بالاتر و ضریب پواسون کمتر، لازم است که ماده منفجره‌ای با سرعت انفجار و چگالی بالاتر انتخاب شود. برای سنگی با مقاومت متوسط، ماده منفجره‌ای با سرعت موج و چگالی متوسط مناسب بوده و در سنگ‌های درزه‌دار یا سنگ‌های نرم و سنگ‌های تغییرشکل‌پذیر، ماده منفجره‌ای با سرعت انفجار و چگالی کم مناسب است [۲].

۵-۲- طبقه‌بندی توده‌سنگ بر اساس قابلیت انفجاری‌پذیری

تاکنون طبقه‌بندی‌های مختلفی برای قابلیت انفجاری‌پذیری توده سنگ‌ها توسط افراد مختلف ارائه شده است. خلاصه‌ای از انواع روش‌های کاربردی قابلیت انفجاری‌پذیری موجود در (جدول ۲) قابل مشاهده است.

جدول ۲- خلاصه‌ای از روش‌های قابلیت آتشکاری موجود

ردیف	سال ارائه	ارائه‌دهنده	پارامترهای استفاده شده
۱	1926	Protodyakonov	سفتی سنگ
۲	1954	Frankel	ارتفاع و قطر خرج، عمق چال، بارسنگ پیشینه
۳	1959	Hino	مقاومت فشاری و مقاومت کششی تک‌محوری ماده‌سنگ
۴	1963	Aleksandrov	فاصله متوسط ناپیوستگی‌ها
۵	1967	Mosinets	مقاومت فشاری، سرعت موج طولی
۶	1968	Hansen	ارتفاع سطح آزاد، بارسنگ، ثابت سنگ
۷	1969	Hanukaev	چگالی سنگ، سرعت موج طولی
۸	1974	Sassa and Lot	خصوصیات سنگ و فراوانی شکستگی‌ها
۹	1974	Kutuzov	وزن مخصوص، مقاومت فشاری، فرکانس شکستگی‌ها



به‌طور کلی، مطالعات انجام شده را می‌توان به ۳ گروه زیر تقسیم‌بندی کرد:

**گروه اول:** مطالعاتی که بر پایه پارامترهای طراحی یا قابل کنترل مبتنی هستند. مطالعاتی مانند فرانکل (۱۹۵۴) و هانسن (۱۹۶۸) در این گروه قرار دارد. می‌توان گفت روش‌های پیشنهادی با تعریفی که از قابلیت انفجارپذیری بیان شد تا حدودی مغایرت دارد؛ زیرا اساساً هدف از تعیین قابلیت انفجارپذیری یک توده‌سنگ دست یافتن به این نکته است که چه مقدار انرژی برای شکستن یک توده‌سنگ لازم است. به بیان دیگر، چه مقدار خرج ویژه برای شکستن یک توده‌سنگ مورد نیاز است. از این طریق می‌توان تا حدودی به الگوی آتشکاری مورد نظر دست یافت. اینکه از روی الگوی حفار شده و ارزیابی نتایج پس از آتشکاری در مورد قابلیت انفجارپذیری، قضاوت صورت پذیرد، به نظر امری اشتباه است؛ مگر اینکه هدف تحلیل برگشتی برای رسیدن به الگوی مناسب باشد، که در این صورت نیز نیازی به تعیین قابلیت انفجارپذیری از این طریق نیست و با بررسی نتایج انفجارهای انجام شده و سعی و خطا نیز می‌توان به الگوی مناسب و بهینه دست یافت.

**گروه دوم:** مطالعاتی که با توجه به داده‌های حفاری انجام شده است. مطالعات صورت گرفته توسط افرادی مانند لایتون (۱۹۸۲) و لویز (۱۹۸۴) در این گروه جای دارند. ایراد اساسی این روش این است که تنها برای شرایط خاصی از محیط و دستگاه قابل کاربرد است و زیاد قابل تعمیم به دیگر شرایط نیست و از طرفی وزن پارامترهای ذاتی ماده‌سنگ و توده‌سنگ در امتیاز نهایی مشخص نیست و بیان نمی‌کند که کدام یک از پارامترها باعث تغییر غیرعادی امتیاز کسب شده است. به نظر می‌رسد استفاده از این روش‌ها در کنار روش‌هایی که در گروه سوم قرار می‌گیرند، نسبت به استفاده از این روش‌ها به طور مستقیم در طراحی، می‌تواند بیشتر مفید باشد.

**گروه سوم:** مطالعاتی که بر اساس پارامترهای ذاتی ماده‌سنگ و توده‌سنگ (یا غیر قابل کنترل)، صورت گرفته است. افرادی همچون هینو (۱۹۵۹)، الکساندروف (۱۹۶۳)، موسینتس (۱۹۶۷)، هانو کایف (۱۹۶۹)، ساسا و لات (۱۹۷۴)، کوتوزوف (۱۹۷۴)، هنین و دیماک (۱۹۷۶)، اشی (۱۹۷۷)، بورخس (۱۹۸۱)، راکیشف (۱۹۸۲)، لیلی (۱۹۸۶)، گوس (۱۹۸۸)، گوپتا (۱۹۹۰)، موسسه تحقیقات کانی جولیوس کرشنت (۱۹۹۶)، لاتهام و لو (۱۹۹۹)، جیانگ هان و همکارانش (۲۰۰۰)، کیبو (۲۰۰۲)، عظیمی و اصائلو (۲۰۱۰) و اسکات و اوندرا (۲۰۱۵) در این گروه قرار می‌گیرند. این گروه از مطالعات به دلیل درگیر بودن مستقیم پارامترهای ذاتی سنگ در تعیین قابلیت انفجارپذیری و اهمیت این پارامترها در فرآیند انفجار، از مهمترین و بهترین روش‌های تعیین قابلیت انفجارپذیری است.

سلمی و سلرز<sup>۴</sup> (۲۰۲۱) به بررسی جامع روش‌های موجود به‌منظور ارزیابی قابلیت انفجارپذیری پرداختند و به این نتیجه رسیدند که بیش از ۲۰ پارامتر توده‌سنگ می‌تواند در قابلیت انفجارپذیری مؤثر باشد که متداولترین آن‌ها پارامترهای ژئومکانیکی مؤثر در مکانیزم خردایش شامل داده‌های آزمایشگاهی مانند مدول یانگ، جرم مخصوص، سرعت موج فشاری، مقاومت کششی و فشاری و شرایط زمین‌شناسی توده‌سنگ مانند تعداد، فاصله‌داری و خصوصیات درزه‌ها و بلوک‌ها است. البته باید در نظر داشت که لازم نیست که تمامی این پارامترها

در یک روش ارزیابی لحاظ شود، زیرا که بسیاری از آنها با هم مرتبط هستند. آن‌ها نتیجه گرفتند که مقاومت، جرم مخصوص و توزیع آماری بلوک‌های درجا که ناشی از وضعیت درزه‌هاست، کنترل‌کننده رفتار توده‌سنگ در انفجار است و در یک روش ارزیابی قابلیت انفجارپذیری مطلوب باید این پارامترها لحاظ شده باشد [۹].

اکثر این مطالعات در خصوص انفجار در فضای روباز بوده، اما در خصوص قابلیت انفجارپذیری در تونل‌ها نیز تلاش‌هایی صورت گرفته و نتایجی نیز ارائه شده است، که در ادامه خلاصه‌ای از تحقیقات انجام گرفته به‌منظور بررسی انفجارپذیری توده‌سنگ‌ها در تونل ارائه شده است.

### ۵-۳- شاخص انفجارپذیری سنگ (BI)

لیلی<sup>۵</sup>، محقق استرالیایی، در سال ۱۹۸۶ اندیس قابلیت انفجارپذیری BI را تعریف کرد. این ضریب، قابلیت خوبی در بیان انفجارپذیری توده‌سنگ داشته و مشابه سیستم‌های طبقه‌بندی سنتی RMR و Q است که به‌طور گسترده‌ای در حفاری تونل‌ها استفاده می‌شود. ایراد این روش آن است که خرج ویژه را برآورد نکرده و برای محاسبه خرج ویژه لازم است با انجام چند انفجار آزمایشی، رابطه بین BI و خرج ویژه در هر محل را به‌طور اختصاصی پیدا کرد. شاخص انفجارپذیری ناشی از مشاهدات لیلی در زمینه خردایش سنگ‌ها بوده و اطلاعات ژئوتکنیکی مفیدی از توده‌سنگ را شامل می‌شود و به مهندسی برای ارزیابی واکنش توده‌سنگ در برابر انرژی وارده از انفجار مواد منفجره کمک می‌کند. لیلی دریافت که پنج پارامتر اساسی وجود دارند که در کارایی آتشکاری نقش اساسی ایفا می‌کنند. این پارامترها عبارتند از: ماهیت ناپیوستگی‌های توده‌سنگ<sup>(RMD)</sup>، فاصله‌داری درزه‌ها (JPS)، جهت‌داری صفحات درزه (JPO)، وزن مخصوص<sup>(SGI)</sup> و سختی سنگ‌ها (H). رابطه ۱ برای محاسبه شاخص انفجارپذیری توده‌سنگ توسط لیلی ارائه شده است که پارامترهای آن طبق جدول ۳ امتیازدهی می‌شوند [۱۰].

$$BI = 0.5 \times (RMD + JPS + JPO + SGI + H) \quad (1)$$

جدول ۳- مقادیر متغیرهای انتخاب شده برای محاسبه شاخص قابلیت انفجارپذیری پیشنهادی لیلی [۱۰]

امتیاز	پارامترهای توده سنگ	
۱۰	پودری	توصیف توده سنگ RMD
۲۰	بلوکی	
۵۰	کاملاً یکپارچه	
۱۰	نزدیک ( $0.1m >$ )	فاصله صفحات درزه JPS
۲۰	متوسط ( $0.1 - 1m$ )	
۵۰	دور ( $1m <$ )	

5- Lilly  
6- Rock Mass Discontinuity  
7- Specific Density

4- Salmi and Sellers

ادامه جدول ۳

امتیاز	پارامترهای توده سنگ	
۱۰	افقی	
۲۰	شیب به سمت بیرون سطح آزاد	
۳۰	امتداد عمود بر سطح آزاد	
۴۰	شیب به سمت درون سطح آزاد	
۲۵-۵۰	بر حسب تن بر متر مکعب	
۱-۱۰	سختی موس	

ناپیوستگی‌ها را تشخیص داد. همچنین، سختی توده‌سنگ را با استفاده از چکش اشمیت می‌توان تخمین زد. در آخرین مرحله ساختار و شرایط سطح به‌منظور برآورد شاخص GSI و RMR ترکیب شده و در نهایت با استفاده از مقادیر BI به‌دست‌آمده از نمودارهای BQS (شکل ۲) می‌توان خرج ویژه مناسب را از طریق روابط تجربی انتخاب کرد [۹].

سیستم BQS برای ارزیابی انفجارپذیری توده‌سنگ در ترانسه‌ها و تونل‌های عمرانی در اعماق کم که معمولاً سنگ‌ها هوازده و ضعیف هستند، ایجاد شده است [۹]. این سیستم به مهندسی تونل کمک می‌کند تا با استفاده از داده‌های جمع‌آوری شده از سینه‌کار به‌آسانی قابلیت انفجارپذیری توده‌سنگ را ارزیابی کرده و الگوی آشکاری را متناسب با شرایط موجود ارائه کنند؛ به‌طوری‌که طبق مشاهدات به‌دست آمده از وضعیت توده‌سنگ و ساختارهای موجود، مقادیر GSI و RMR قابل برآورد است.

باید خاطر نشان کرد این روش دارای معایبی نیز است. از آنجایی که این روش مبتنی بر RMR است، در مواردی تعیین RMR با ایراداتی همراه است. گاهی دو توده‌سنگ متفاوت می‌توانند RMR یکسان داشته باشند، ولی ویژگی‌های مربوط به ماده‌سنگ و مشخصات درزه آنها متفاوت باشد.

باتوجه به اینکه RMR یک طبقه‌بندی به منظور تعیین سیستم نگهداری است، لذا این عوامل در تعیین قابلیت انفجار می‌توانند بی‌اثر و یا بیش از حد تأثیرگذار باشند. از طرفی، در برخی از سنگ‌ها با توجه به شرایط توده‌سنگ و بر اساس طبقه‌بندی‌های تجربی ارائه شده، به دلیل عدم پایداری تونل، امکان پیشروی به روش حفاری و انفجار وجود ندارد؛ اما، در این روش برای این نواحی نیز مقادیری پیشنهاد شده است.

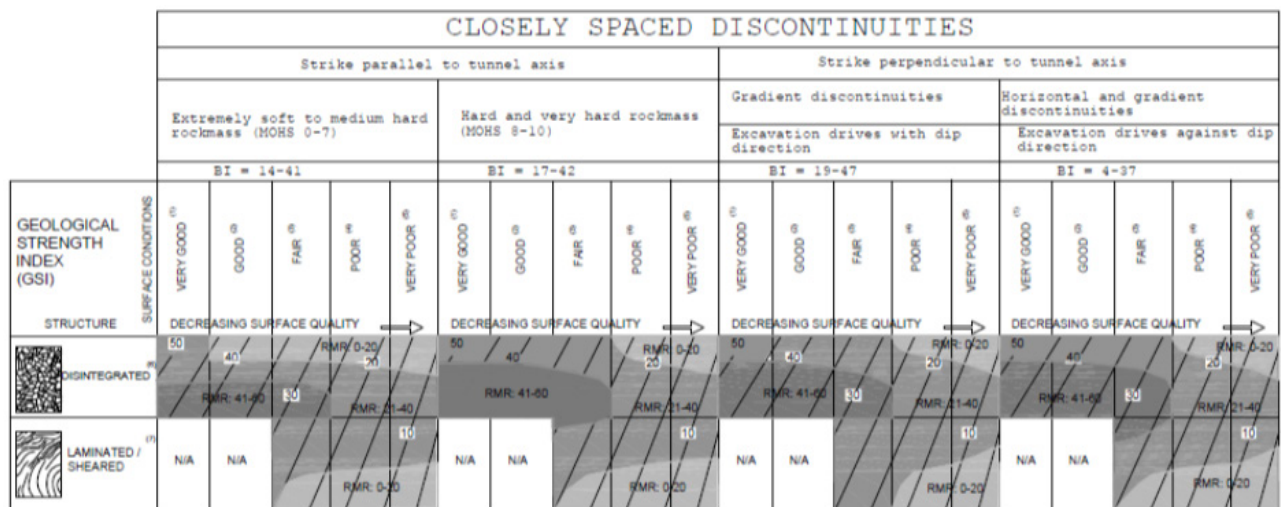
بازه اعداد ارائه شده توسط این محققین به‌گونه‌ای است که امکان ارائه خرج ویژه مناسب براساس BI ارائه‌شده توسط این نمودارها دشوار است. از طرفی، در این روش ارتباط مستقیمی بین مقدار BI و میزان خرج ویژه بیان نشده است و ایجاد ارتباط بین این دو پارامتر، نیازمند انجام چندین انفجار در تونل است.

#### ۵-۴- سیستم کیفیت انفجار (BQS)

کریستراس و چاتزیانگلو<sup>۸</sup> با استفاده از رابطه قابلیت انفجارپذیری توسعه داده شده توسط لیلی و ارتباط بین این شاخص با سیستم رده‌بندی RMR، سیستم کیفیت انفجار توده‌سنگ را معرفی کردند. آن‌ها معتقدند که سیستم طبقه‌بندی GSI<sup>۹</sup> نیز در داخل سیستم BI گنجانده شده است. بنابراین، می‌توان از این روش به‌عنوان یک روش عملی جمع‌آوری داده‌هایی که در فرآیند طراحی آشکاری به کار می‌روند، استفاده کرد [۱۱].

این سیستم یک روش مفید شامل خصوصیات مؤثر توده‌سنگ است که به‌راحتی به‌صورت درجا تخمین زده می‌شود. تشکیلات سنگی با فاصله‌داری متوسط، فاصله‌داری زیاد و فاصله‌داری کم در این سیستم در نظر گرفته شده است. نتایج به‌صورت نمودار خلاصه شده است که می‌تواند برای ارزیابی سریع قابلیت انفجارپذیری توده‌سنگ بر اساس RMR، GSI، امتداد ناپیوستگی‌ها، شرایط ناپیوستگی‌ها و سختی، به‌جای معادله لیلی استفاده شود.

در مرحله اول، فاصله ناپیوستگی‌ها مشخص شده و در مرحله دوم، جهت ناپیوستگی‌ها علاوه بر سختی توده‌سنگ توصیف می‌شود. با تکمیل طبقه‌بندی فوق، مقدار محدوده BI به‌راحتی قابل تخمین است. با بازدید میدانی از توده‌سنگ، به‌راحتی می‌توان فاصله‌داری و جهت‌داری



شکل ۲- دیاگرام تخمین شاخص BI برای توده‌سنگ دارای درزه با فاصله‌داری نزدیک به هم [۱۱]

8- Christaras and Chatziangelou

9- Geological Strength Index





## ۵-۵- قابلیت انفجارپذیری تونل (TBI)

ویژه با TBI برای برش گوه‌ای و برش موازی در این معادن به ترتیب به صورت روابط زیر ارائه شده است که در آنها  $q_{\text{Parallel}}$  و  $q_{\text{Wedge}}$  به ترتیب خرج ویژه در برش گوه‌ای و موازی و H عمق چال بر حسب متر است [۱۳].

$$q_{\text{Wedge}} = 2.137 + 0.0054 \text{TBI} - (0.82) \sqrt{H} \quad r^2 = 0.85 \quad (7)$$

$$q_{\text{Parallel}} = 1.735 + 0.1 \text{TBI} \quad r^2 = 0.72 \quad (8)$$

بیشترین مقدار طول چال در این دو معدن ۱/۵ متر و ماده منفجره مورد استفاده، ژلاتین انفجاری ۸۰ درصد بوده است. باید در نظر داشت که برش موازی تنها در یکی از این دو معدن زیرزمینی اجرا شده و اثر عمق در روش موازی بررسی نشده است. طبق مشاهدات چاکرابورتی (۱۹۹۸) مقدار خرج ویژه و حفاری ویژه با سطح مقطع تونل ارتباط دارد. در تونلهایی با سطح مقطع کمتر از ۱۰ مترمربع این ارتباط بیشتر بوده و در سطح مقطع‌های با مساحت بیشتر از ۳۰ متر مربع

در سال ۱۹۹۴، چاکرابورتی<sup>۱۰</sup> به کمک مفهوم قابلیت انفجارپذیری تونل<sup>۱۱</sup> (TBI)، مقدار خرج ویژه مورد نیاز برای انفجار توده‌سنگ را به مقدار Q توده‌سنگ ارتباط داد. قابلیت انفجارپذیری تونل در واقع میزان مقاومت توده‌سنگ در برابر شکست ناشی از انفجار را بیان می‌کند. بدین منظور، برای برآورد مقدار خرج ویژه در تونل‌ها، ابتدا امتیاز مقاومت SR، بر اساس مقاومت فشاری تک محوره سنگ، مطابق جدول ۴ به دست می‌آید. این امتیاز بیانگر پایداری سنگ نسبت به شکست ناشی از انفجار است. در نهایت، شاخص آتشکاری تونل (TBI) به صورت حاصل جمع دو پارامتر امتیاز مقاومت SR و شاخص کیفیت توده‌سنگ (Q) به دست می‌آید [۱۲]:

$$\text{TBI} = \text{Q} + \text{SR} \quad (9)$$

مقدار SR در جدول شماره ۴ ارائه شده است.

در تونلهایی که سینه‌کار تونل از سازندهای مختلفی تشکیل شده است، این تغییر ماهیت بر انرژی ضربه‌ای حاصل از ماده منفجره تأثیر

جدول ۴- امتیاز مقاومت SR بر اساس مقاومت فشاری تک‌محوره سنگ [۱۳]

مقاومت فشاری تک‌محوره سنگ (MPa)	1-10	10-20	20-30	30-40	40-50	50-100	100-200
امتیاز مقاومت (SR)	1	5	10	20	40	60	80

تغییرات خرج و حفاری ویژه با میزان سطح مقطع کمتر است. برای دقیق‌تر شدن روابط تجربی ارائه‌شده توسط چاکرابورتی و همکاران، لازم است اثر سطح مقطع، قطر چال، قطر چال هوا و نوع ماده منفجره بررسی شود [۱۳].

چاکرابورتی در سال ۲۰۰۴ نیز مدل‌هایی را برای پیش‌بینی نتایج آتشکاری بر اساس یک رویکرد جامع توسعه داد. پارامترهای مختلف مؤثر بر نتایج آتشکاری تحت تجزیه و تحلیل رگرسیون خطی چندگانه قرار گرفتند تا هفت پارامتر موجود زیر بر نتایج انفجار حاکم باشد [۱].

الف) پارامترهای توده‌سنگ (سرعت موج طولی  $V_p$ ) بر حسب متر بر ثانیه، تعداد سطوح تماس در سینه‌کارهای با چند نوع سازند زمین‌شناسی (n)، شاخص کیفی توده‌سنگ (RQD) (ب) پارامترهای هندسی تونل (مساحت تونل (A) بر حسب مترمربع، تمایل و شیب تونل نسبت به به جهت قائم به سمت

بالا (I) بر حسب رادیان) ج) پارامترهای طراحی الگوی آتشکاری (کتابخانه زاویه چال‌های برش نسبت به سینه کار  $C_a$ )، میزان جفت‌شدگی ماده منفجره و قطر چال ( $R_c$ )

به این ترتیب، قابلیت انفجارپذیری تونل (TBI) با استفاده از پارامترهای مؤثر ذکر شده به صورت رابطه ۹ تعریف می‌شود؛ که در آن پارامترهای توده‌سنگ، پارامترهای هندسی تونل و پارامترهای طراحی الگوی آتشکاری از روابط ۱۰، ۱۱ و ۱۲ به دست می‌آید.

باید در نظر داشت که در هر پروژه حفاری تونل با استفاده از چالزنی و آتشکاری باید بین قابلیت انفجارپذیری تونل (TBI) محاسبه شده با

منفی گذاشته و موج حاصل را میرا می‌کند. چاکرابورتی و همکاران (۱۹۹۷) در یک تونل با سینه‌کارهای مختلط تحقیقاتی را انجام داده و بیان کرده‌اند که در این شرایط مقدار Q و SR باید میانگین مقادیر لایه‌های مختلف سنگی باشد. چاکرابورتی و همکاران (همان) بر اساس مطالعاتی که برای یک تونل با سینه‌کاری با سازندهای مختلف انجام داده‌اند، رابطه‌ای برای محاسبه مقدار خرج ویژه میانگین در هر ۵۰ متر تونل به صورت رابطه ۶ را ارائه کرده‌اند [۱۲].

$$q = 0.1 \times n = 0.677 + 0.005 \times \text{TBI} \quad (6)$$

که در آن q خرج ویژه متوسط بر حسب کیلوگرم بر متر مکعب، n تعداد صفحات ساختاری موجود در ۵۰ متر تونل و TBI نیز میانگین قابلیت انفجارپذیری توده‌سنگ در ۵۰ متر طول تونل است. لازم به ذکر است این روابط برای مواد منفجره ژلاتینی انفجاری ۸۰ درصد ارائه شده است و با توجه به اینکه این فرمول از مطالعات یک تونل حاصل شده است، برای ایجاد همبستگی بهتر نیازمند بررسی در تونل‌های مختلفی است [۱۲].

در سال ۱۹۹۸ چاکرابورتی و همکاران در دو تونل معدن فلزی که دارای سطح مقطع مستطیلی با سطح مقطع کوچکی ( $2/4 \times 2/1$ ) بوده‌اند، با انجام آزمایش‌های مختلف به روش زاویه‌ای و موازی (برش چهار مقطعی) رابطه‌ای برای محاسبه خرج ویژه بر اساس شاخص قابلیت آتشکاری تونل ارائه کرده‌اند. فرمول‌های همبستگی بین خرج

10- Chakraborty  
11- Tunnel Blast Index

خرج در چال، قطر چال، تأخیر و شکل مقطع نادیده گرفته شده و برای تعمیم به مناطق دیگر نیازمند تحقیقات بیشتری است.

#### ۵-۶- قابلیت آتشکاری در روش NTNU

در طراحی الگوی چالزنی به روش نروژی، قابلیت آتشکاری سنگ به وسیله اندیس انفجارپذیری سنگ (SPR) تعریف می‌شود. SPR به صورت میزان ماده منفجره (کیلوگرم بر مترمکعب) لازم برای شکستن سنگ درحالی که ۵۰ درصد از سنگ‌های خردشده زیر ۲۵۰ میلی‌متر باشد، تعریف می‌شود و از رابطه ۱۴ به دست می‌آید.

$$SPR = \frac{0.736 \times I_a^{0.6} \times \rho_{exp}^{0.7}}{\left(\frac{C}{1000}\right)^{0.4} \times \left(\frac{VOD}{C}\right)^{0.25} \times \rho_r^{0.2}} \quad (14)$$

آن VOD سرعت انفجار ماده منفجره برحسب متر بر ثانیه،  $\rho_{exp}$  جرم مخصوص خرج‌گذاری شده ماده منفجره (مقدار ماده منفجره به ازای واحد حجم چال حفاری) برحسب گرم بر سانتی‌مترمکعب و  $\rho_r$  وزن مخصوص سنگ برحسب گرم بر سانتی‌مترمکعب است. همچنین  $C$  و  $I_a$  (برحسب متر بر ثانیه) به ترتیب ناهمسانگردی و سرعت موج صوتی خشک است که از روابط ۱۵ و ۱۶ به دست می‌آیند.

$$I_a = \frac{C_p}{C_n} \quad (15)$$

$$C = \frac{C_p + C_n}{2} \quad (16)$$

در آن  $C_p$  و  $C_n$  به ترتیب سرعت موج صوتی خشک در حالت عمود و موازی لایه‌بندی برحسب متر بر ثانیه است. اندیس انفجارپذیری سنگ، قابلیت آتشکاری سنگ را توصیف می‌کند که به ناهمسانگردی، وزن مخصوص، سرعت موج صوتی، کانی‌شناسی و بافت دانه، وزن مخصوص و سرعت انفجار ماده منفجره بستگی دارد. قابل توجه است که اندیس انفجارپذیری سنگ، درزه‌ها و جهت‌داری آن‌ها را در نظر نمی‌گیرد. قابلیت آتشکاری سنگ از جدول ۵ به دست می‌آید [۱۵].

$$TBI = \frac{V_p + \left(\frac{RQD}{10}\right)}{(A-r) \times (C_\alpha + R_c)} \quad (9)$$

$$V_p + n + \left(\frac{RQD}{10}\right) \quad (10)$$

$$A - r = \text{پارامترهای هندسی تونل} \quad (11)$$

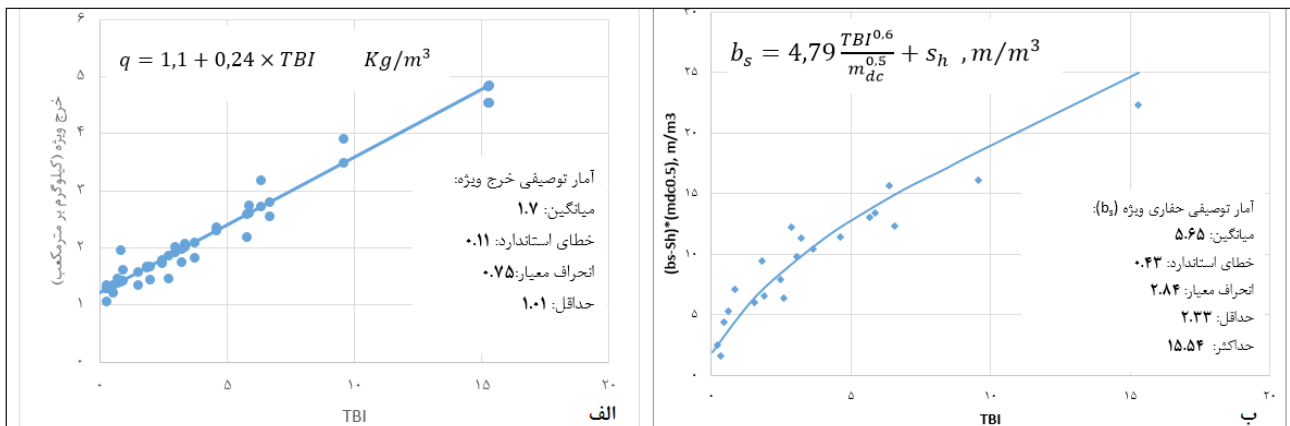
$$C_\alpha + R_c = \text{پارامترهای طراحی الگوی آتشکاری} \quad (12)$$

رابطه ۹ و خرج ویژه و حفاری ویژه مشاهده شده در حین عملیات چالزنی و آتشکاری ارتباط برقرار کرد. در همین راستا، چاکرابورتی و همکاران (همان) در تونلهایی با شرایط هندسی و سنگی متنوع (در یک معدن زغال، تونل‌های ورودی دو معدن فلزی و یک تونل پروژه برق آبی) تحقیقات میدانی انجام دادند. ارتباط بین میزان خرج ویژه و TBI طبق نظر چاکرابورتی و همکاران (همان) برای این تونل‌ها در رابطه ۱۳ ارائه شده است [۱۵].

$$q = 1.1 + 0.24 \times TBI \quad (13)$$

باتوجه به اینکه در روش آتشکاری کننتوری به دلیل نزدیکی چال‌های محیط به یکدیگر، حفاری بیشتری انجام می‌شود؛ چاکرابورتی و همکاران (همان) پارامتری با نماد mdc به صورت نسبت فاصله‌داری به بارسنگ چال‌های محیط تعریف کردند تا این اثر حفاری اضافی در نظر گرفته شود. از طرفی در محیط تونلی با سقف قوسی شکل، تعداد چال بیشتری نسبت به سقف صاف موردنیاز است؛ برای در نظر گرفتن تأثیر این نکته در میزان حفاری ویژه، آن‌ها پارامتری تحت عنوان Sh در نظر گرفتند که به صورت نسبت عرض تونل به قطر انحناى سقف تعریف می‌شود. این فاکتور برای تونل با سطح مقطع D کامل برابر با یک و برای تونل چهارگوش صفر است؛ بنابراین مقدار این فاکتور باید بین صفر تا یک باشد. چاکرابورتی و همکاران (همان) با تعریف این دو پارامتر ارتباط بین میزان حفاری ویژه و TBI را با محاسبه حفاری اضافه به دلیل آتشکاری کننتوری و شکل قوسی تونل به صورت شکل ۳- ب ارائه کردند [۱۵].

باید در نظر داشت که مدل‌های توسعه‌یافته توسط چاکرابورتی و همکاران بر اساس تحقیقات انجام‌گرفته از تعداد محدودی تونل به دست آمده است. همچنین در این تونل‌ها میزان پیشروی زیر ۳ متر بوده و اثر خصوصیات ماده منفجره، نوع و نحوه خرج‌گذاری، تمرکز

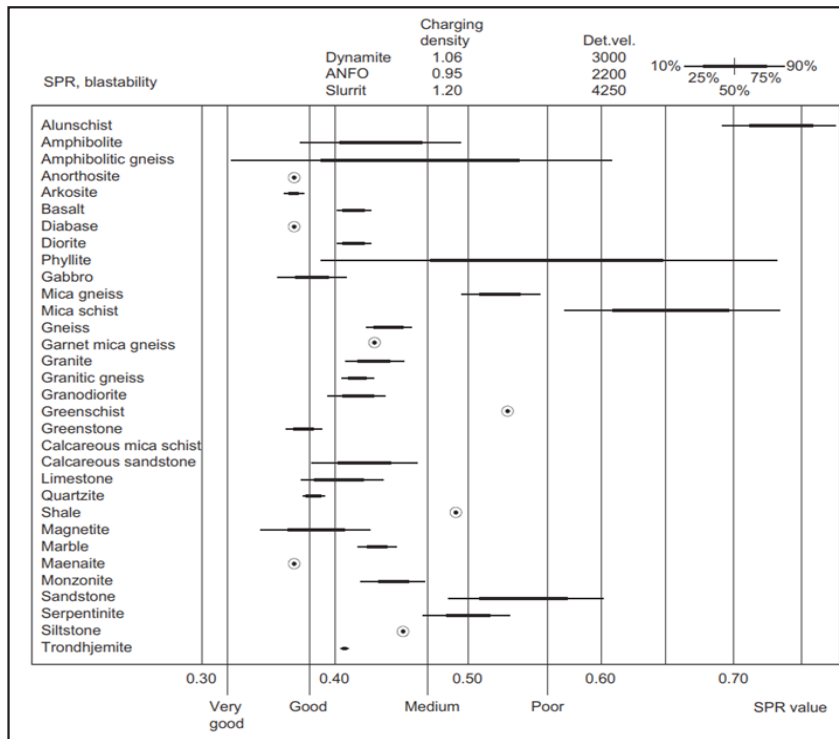


شکل ۳- الف- ارتباط خرج ویژه و TBI، ب- ارتباط حفاری ویژه و TBI با محاسبه حفاری اضافه به دلیل آتشکاری کننتوری و شکل قوسی تونل [۱۵]



جدول ۵- طبقه‌بندی قابلیت آتشکاری سنگ‌های مختلف [۱۵]

نوع سنگ	اندیس انفجارپذیری سنگ	قابلیت آتشکاری
گرانیت‌های همگن دانه‌درشت، سینیت‌ها و دیوریت‌های کوارتزی، به‌عنوان مثال، گرانیت سوئدی	38/0	خوب
به‌عنوان مثال، گنایس	47/0	متوسط
سنگ‌های دگرگونی با ساختار شیستوزیته، اغلب دارای محتوای زیاد میکا و مقاومت فشاری کم، به‌عنوان مثال میکا شیست در منطقه رانا <sup>۱</sup> در نروژ	56/0	ضعیف



شکل ۴- مقادیر SPR برای نمونه‌های آزمایش‌شده در آزمایشگاه زمین‌شناسی مهندسی در NTNU [۱۵]

NTNU توسط بخش مهندسی عمران و حمل‌ونقل دانشگاه NTNU (۱۹۷۰ و ۱۹۹۵) ارائه شده است که یک مدل تجربی طراحی آتشکاری با استفاده از چال‌های موازی است.

در جدول شماره ۶ مقایسه‌ای بین روش‌های ارائه شده برای طراحی الگوی چالزنی و آتشکاری در تونل‌ها ارائه شده است.

### ۷- بحث و جمع‌بندی

پرواضح است ساختار و خصوصیات توده‌سنگ بر میزان خرج ویژه و حفاری ویژه تأثیرگذار است. سنگ‌های متراکم و توده‌ای به خرج ویژه و حفاری ویژه بالاتری نیاز دارند و سنگ‌های ضعیف و سست با خرج ویژه کم به‌خوبی شکسته می‌شوند. هدف از تعیین قابلیت انفجارپذیری یک توده‌سنگ، دست یافتن به این نکته است که چه مقدار خرج ویژه برای شکستن توده سنگ مورد نیاز است و باتوجه به این شاخص، جانمایی و نحوه خرج‌گذاری باید تعیین شود. همان‌طور که از جدول شماره ۶ مشخص است، در خیلی از این روش‌ها مانند روش‌های گوستافسون،

مقادیر SPR برای نمونه‌های آزمایش‌شده در آزمایشگاه زمین‌شناسی مهندسی NTNU در شکل ۴ نشان داده شده است [۱۶].

### ۶- روش‌های مرسوم طراحی و تأثیر پارامترهای توده‌سنگ بر آنها

چگونگی جانمایی و نحوه خرج‌گذاری چال‌ها، مهم‌ترین پارامتر قابل کنترل در آتشکاری‌های زیرزمینی است. روش‌های مختلفی برای طراحی الگوی آتشکاری سینه‌کارهای تونلی وجود دارد که عموماً به دو صورت طراحی با برش موازی و برش زاویه‌ای توسعه یافته‌اند. می‌توان گفت اولین تلاش‌ها برای طراحی الگوی مناسب آتشکاری در سال ۱۹۶۳ توسط لانگفورد با ارائه روش سوئدی که یک روش تجربی است، آغاز شد و پس از آن توسط افراد دیگری نظیر هلمبرگ (۱۹۸۲)، افسون (۱۹۹۰) و کونیا (۱۹۹۵) توسعه داده شد. تئوری انتقال انرژی روش دیگری است که توسط افرادی نظیر ماگان (۱۹۸۰) و برتا (۱۹۹۰) پیشنهاد شده است. همچنین، مدل طراحی آتشکاری

جدول ۶- مقایسه‌ای کلی بین روش‌های طراحی الگوی چالزنی و آشکاری در تونل

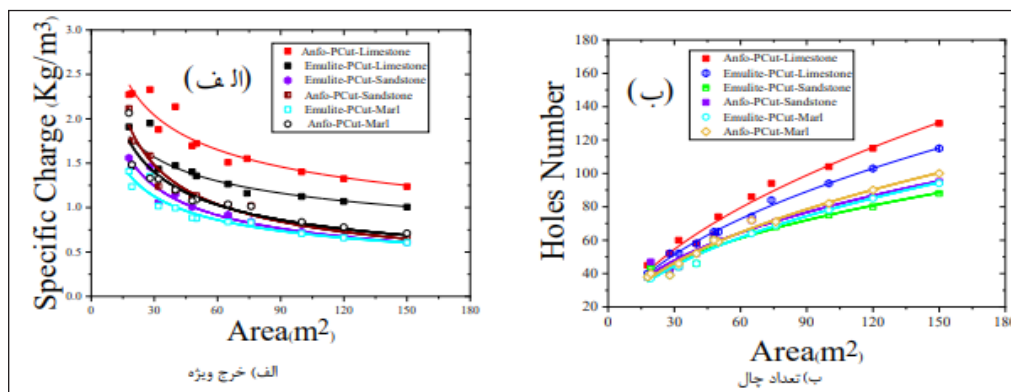
روش	اساس	فرض پیشروی نسبت به طول چال	ارائه‌دهنده	تأثیر شرایط توده‌سنگ	عوامل تأثیرگذار
انتقال انرژی	تئوری	۹۵ درصد	-	سرعت عبور موج از سنگ و تأثیر آن بر ضریب امپدانس	امپدانس سنگ و ماده منفجره، قطر چال و قطر خرج، ضریب خردایش، میزان خردایش موردنیاز
نروژی	تجربی	۹۰ درصد در چال‌های با قطر ۴۸ میلی‌متر و ۹۶ درصد در چال‌های با قطر ۶۴ میلی‌متر	دانشگاه NTNU	اندیس انفجارپذیری سنگ و تأثیر آن بر قابلیت آشکاری	قابلیت آشکاری توده‌سنگ، قطر چال خالی، طول چال خالی، قطر چال انفجاری، سطح مهارت کارکنان، نوع ماده منفجره (آنفو)
سوئدی	تئوری - تجربی	۹۰ تا ۹۵ درصد	هلمبرگ و پرسون	ثابت سنگ	قطر چال خالی و چال انفجاری، ثابت سنگ، قدرت وزنی ماده منفجره نسبت به آنفو، انتخاب قطر خرج باتوجه به تراکم خرج مجاز، ضریب تصحیح
			گوستافسون	-	قطر چال انفجاری
			الفسون	-	قطر چال خالی، قطر خرج، چگالی ماده منفجره
			لوپز	-	قطر چال انفجاری و پارامترهای مؤثر در روش هلمبرگ و پرسون (الگوی چال‌های پیشروی، کف و محیط مانند روش هلمبرگ و پرسون)
			کونیا	چگالی سنگ	قطر خرج، چگالی سنگ و چگالی ماده منفجره

نکته‌ای که وجود دارد این است که با اینکه می‌توان فرض کرد که پارامترهای مربوط به چگالی، مقاومت و شرایط درزه‌داری بر روی سرعت عبور موج تأثیرگذار هستند، اما میزان تأثیر هرکدام در آن مشخص نبوده و از طرفی به دست آوردن سرعت موج نیز یک کار آزمایشگاهی است که برآورد آنها زمان‌بر است و امکان استفاده آسان از این روش‌ها در محل پروژه وجود ندارد.

در شکل ۵ تأثیر نوع ماده منفجره و نوع سنگ در میزان خرج ویژه و تعداد چال بر اساس سطح مقطع در الگوهای طراحی شده به روش انتقال انرژی با برش موازی ارائه شده است.

همان‌طور که مشخص است و در این مقاله نیز توضیح داده شد، کیفیت انفجارپذیری به نوع ماده منفجره نیز وابسته است. از طرفی، در یک نوع ماده منفجره، میزان خرج ویژه و تعداد چال برای سطح مقطع‌های مختلف با تغییر شرایط سنگ تا حدود ۵۰ درصد تغییرات داشته است.

الفسون و لوپز ویژگی‌های توده‌سنگ هیچ تأثیری در طراحی الگوی چالزنی و آشکاری ندارد. در روش هلمبرگ و پرسون یک پارامتر تحت عنوان ثابت سنگ برای لحاظ کردن شرایط توده‌سنگ در طراحی لحاظ شده است که عبارت است از حداقل ماده منفجره مورد نیاز برای سست کردن یک مترمکعب از سنگ که بین ۰/۳ تا ۰/۴ کیلوگرم بر مترمکعب در نظر گرفته می‌شود. باتوجه به این موضوع که توضیح خاصی در خصوص انتخاب این عدد هم ارائه نشده است، پارامتر ارائه شده در این روش نیز نمی‌تواند معیار مناسبی برای تأثیر انفجارپذیری توده‌سنگ باشد. در روش کونیا تنها پارامتر توده‌سنگ که در طراحی لحاظ شده، چگالی سنگ است و اثر شرایط ناپویستگی و مقاومت توده‌سنگ در نظر گرفته نشده است؛ بنابراین، این پارامتر هم نمی‌تواند به عنوان شاخصی در ارزیابی قابلیت انفجارپذیری تعریف شود. در روش انتقال انرژی، اثر توده‌سنگ به صورت تأثیر سرعت عبور موج و تأثیر آن بر ضریب امپدانس لحاظ شده است.



شکل ۵- نمودارهای روش انتقال انرژی با برش موازی بر اساس طرح مقطع تونل؛ الف: خرج ویژه، ب: تعداد چال [۱۷]



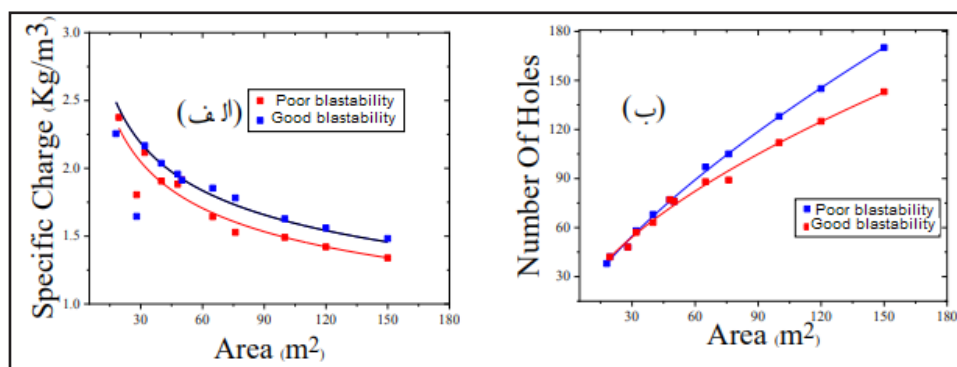
## ۸- نتیجه گیری

یکی از نکات مهم در بررسی روش های ارزیابی قابلیت انفجارپذیری این است که چگونه می توان از این اطلاعات استفاده کرد. آیا امکان شناسایی مقاومت سنگ و شرایط ساختاری تونل با استفاده از روش های ساده وجود دارد؟ مهم ترین مسئله از دیدگاه یک طراح انفجار این است آیا می توان از آن برای طراحی استفاده کرد؟ نکته حائز اهمیت دیگر، استفاده آسان از این روش ها در محل پروژه است. علی رغم توسعه روش های مختلف در زمینه تعیین قابلیت آتشکاری و با اینکه تلاش های صورت گرفته در این زمینه در برخی موارد منجر به ارائه روابطی نیز شده است، اما هنوز رابطه یا سیستم طبقه بندی جامعی به منظور پیش بینی این قابلیت توده سنگ ارائه نشده است. تلاش هایی که تاکنون در این زمینه صورت گرفته، قابلیت کاربرد وسیع در عملیات آتشکاری را ندارند؛ زیرا برای عملیاتی کردن این سیستم های طبقه بندی، نیاز به بررسی یک سری از خصوصیات توده سنگ است که برآورد آنها زمان زیادی را می طلبد. درحالی که در صنعت تونل سازی وقت و سرعت بسیار حائز اهمیت است و این مسئله سیستم طبقه بندی توده سنگی را می طلبد که به سرعت بتواند خصوصیات توده سنگ را در رابطه با قابلیت آتشکاری آن توصیف کند و از طرفی نیز قابلیت ایجاد رابطه با پارامترهای طراحی و مواد منفجره را دارا باشد.

تنها روشی که در طراحی الگوی چالزنی و آتشکاری در تونل، پارامتری تحت عنوان قابلیت انفجارپذیری توده سنگ تعریف کرده است، روش نروژی است. پارامتر تعریف شده در این روش در بخش های قبل توضیح داده شد.

طبق پیشنهاد زارع (۲۰۰۶) قابلیت آتشکاری به دو دسته خوب و ضعیف تقسیم می شود و برای قسمت متوسط باید درون یابی شود. اساس روش نروژی استفاده از آنفو به عنوان ماده منفجره است. در شکل ۶ تأثیر نوع سنگ در میزان خرج ویژه و تعداد چال بر اساس سطح مقطع در الگوهای طراحی شده به روش نروژی برای دو نوع سنگ با قابلیت انفجارپذیری خوب و بد ارائه شده است. بر اساس این نمودارها میزان خرج ویژه و تعداد چال برای سطح مقطع های مختلف با تغییر قابلیت انفجارپذیری تا حدود ۴۰-۳۰ درصد تغییرات داشته است.

در روش ارزیابی انفجارپذیری NTNU، آزمایش ها بر روی نمونه های سنگی در مقیاس کوچک انجام می شود؛ تست های آزمایشگاهی در مقیاس کوچک نمایانگر ویژگی های توده سنگ درزه دار و غیرهمگن نخواهد بود. این ممکن است در سنگ های فاقد درزه مانند گرانیت های توده ای که اغلب در اسکاندیناوی مشاهده می شود، قابل قبول باشد، اما در ایران توده سنگ همگن و عاری از درزه و شکاف وجود ندارد و



شکل ۶- نمودارهای روش نروژی بر اساس سطح مقطع؛ الف: خرج ویژه، ب: تعداد چال [۱۷]

در هیچ کدام از روش های طراحی، قابلیت انفجارپذیری که بتوان به راحتی از آن استفاده کرد وجود ندارد. با توجه به روش های ارائه شده برای ارزیابی قابلیت انفجارپذیری، به نظر روش لایلی به دلیل اینکه از پارامترهایی شبیه پارامترهای موجود در سیستم های طبقه بندی توده سنگ استفاده می کند، امکان استفاده آسان تری در پروژه ها را دارد. بنابراین پیشنهاد می شود در هر پروژه با استفاده از پارامترهای مربوط به جهت داری و شرایط ناپیوستگی ها، میزان مقاومت و چگالی توده سنگ، یک ارزیابی کیفی از قابلیت انفجارپذیری انجام گیرد و نتایج حاصل از طراحی به روش های مرسوم بر اساس قابلیت انفجارپذیری تعدیل شود. تعدیل صورت گرفته هم به گونه ای باشد که مقادیر حاصل از نتایج طراحی برای حالت متوسط در نظر گرفته شود و برای قابلیت انفجارپذیری کم و زیاد تا ۲۵ درصد تغییرات اعمال شود. به این صورت که در تونلی که توده سنگ آن به راحتی منفجر می شود، فاصله بین چال ها نسبت به حالت متوسط افزایش یافته و میزان خرج نیز کاهش یابد. در تونل های با توده سنگی که به سختی منفجر می شود، فاصله بین چال ها نسبت به حالت متوسط کاهش یافته و میزان خرج افزایش یابد. در نمودارهایی که

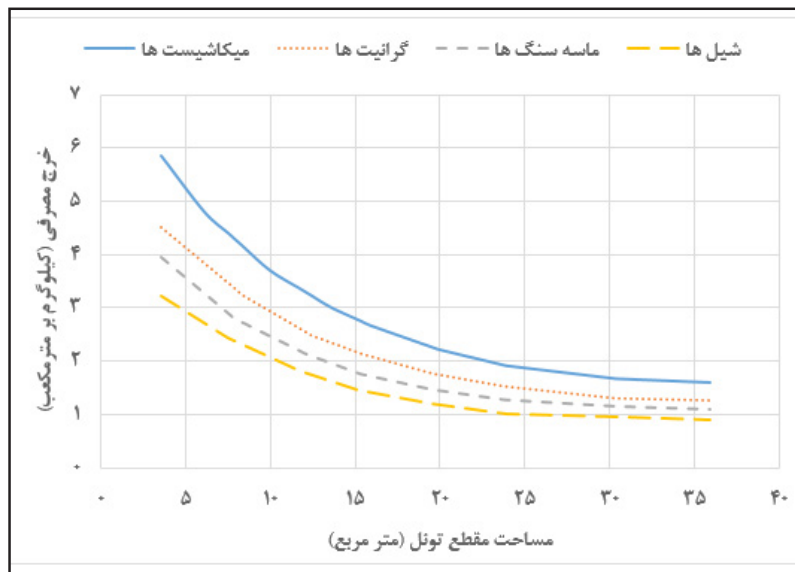
بنابراین چنین روشی نمی تواند معرف قابلیت انفجارپذیری خوبی باشد؛ چراکه اثر درزه به عنوان یک پارامتر مهم در آن لحاظ نشده است. علاوه بر این، اندازه گیری سرعت موج عرضی (P) به تجهیزات آزمایشگاهی خاصی نیاز دارد که به راحتی نمی توان این آزمایش ها را در محل انفجار انجام داد.

بنابراین می توان بیان کرد که با وجود تلاش های انجام شده در خصوص تعیین قابلیت انفجارپذیری توده سنگ و با توجه به این نکته که هدف از تعیین این قابلیت، در نظر گرفتن شرایط توده سنگ در طراحی است، اما هنوز یک طبقه بندی مورد قبول برای لحاظ کردن شرایط توده سنگ در طراحی ها وجود ندارد. از طرفی، در برخی از روش های ارائه شده برای طراحی الگوی چالزنی و آتشکاری تونل ها تأثیر شرایط توده سنگ نادیده گرفته می شود و در برخی اثر شرایط توده سنگ به طور کامل و درست لحاظ نمی شود. این مساله باعث می شود که طراحی های صورت گرفته با حالت بهینه تفاوت های محسوسی داشته باشد.

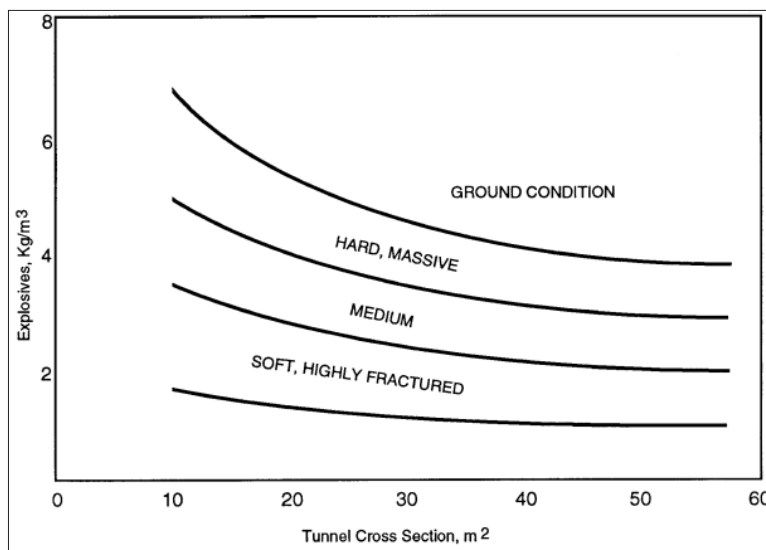
مقاله حاضر بر این است که امکان به دست آوردن روشی بین‌المللی برای تعیین قابلیت انفجار و ایجاد ارتباط نزدیکی با خرج ویژه برای شرایط متفاوت ژئومکانیکی وجود دارد و این امر برای مهندسی این حوزه در دسترس خواهد بود. پیشنهاد می‌شود که ارزیابی‌های آینده به صورت پیش‌بینی خردایش و قابلیت انفجارپذیری براساس داده‌های حاصل از آتشکاری، داده‌های زمین آماری و روش‌های نوین زمین‌شناسی به خصوص تکنولوژی MWD (که پارامترهای توده‌سنگ را در حین چالزنی اندازه‌گیری می‌کند) باشد.

به‌صورت تجربی توسط افراد مختلف ارائه شده، این مساله در نظر گرفته شده است. نمونه‌ای از نمودارهای ارائه شده برای پیش‌بینی مقدار خرج ویژه و حفاری ویژه برای شرایط مختلف سنگی در شکل‌های ۷ و ۸ نمایش داده شده است.

تحقیقات برای رسیدن به یک طبقه‌بندی برای قابلیت انفجارپذیری واحد جهانی که طراحی آتشکاری و عملکرد مؤثر را مشخص کند، هنوز ادامه دارد. پژوهش‌های اساسی بر روی طراحی آتشکاری و توصیف توده‌سنگ و مشاهده عملیات انفجار در جریان است. اعتقاد پژوهشگران



شکل ۷- ارتباط بین خرج ویژه و سطح مقطع تونل (قطر چال حدود ۴۰ میلیمتر) بر اساس جنس سنگ [۲]



شکل ۸- ارتباط بین خرج ویژه و سطح مقطع تونل بر اساس شرایط توده‌سنگ [۲۰]



classification of rock mass quality and blast ability for intermediate spaced formations. *International Journal of Engineering and Innovative Technology*, 52-61.

[19] Chatziangelou, M., & Christaras, B., 2016. A Geological Classification of Rock Mass Quality and Blast Ability for Widely Spaced Formations. *Journal of Geological Resource and Engineering*, 160-174.

[20] USACE., 1997. *Engineering and Design Tunnels and Shafts in Rock*. Engineering Manual EM 1110-2-2901, US Army Corps of Engineers.

[1] Singh, B., & Goel, R. K., 2006. *Tunnelling in Weak Rocks*. Elsevier Geo-Engineering Book Series, Volume 5.

[2] Zou, D., 2017. *Theory and Technology of Rocks Excavation for Civil Engineering*. Springer.

[3] Lopez, J., & Carcedo, F. J., 1995. *Drilling and Blasting of Rocks*. Balkema.

[4] Palacios, R. F., 2015. *Infelunce of the Rock Mass Parameters in Optimal Design of Rock Blasting*. Madrid (SPAIN): Technical University of Madrid.

[5] Soldo, L. M.; A., Eusebio., 2019. *Tunnels Design and Geological Studies*. *Tunnelling and Underground Space Technology*, 82-98.

[۶] استوار، ر.، (۱۳۹۴). آتشباری در معادن، جلد سوم. جهاد دانشگاهی واحد صنعتی امیرکبیر

[7] USACE., 2018. *Engineering and Design Blasting for Rock Excavations*. US Army Corps of Engineers.

[8] Bhandari, S., 1997. *Engineering Rock Blasting Operations*.

[9] Salmi, E. F., 2020. A Review of the Method to Incorporate the Geological and Geotechnical Characteristics of Rock Masses in Blasability Assessments for Selective Blast Design. *Engineering Geology*.

[10] Lilly, P. A., 1986. *An Emprical Method of assessing Rock Mass Blastability*. The Aus.

[11] Chatziangelou, M. a., 2017. A new development of BQS for closely spaced formation. *Journal of geological resource and engineering*, 24-37.

[12] Chakraborty, A. K., 1997. Prediction powder factor in mixed-face condition: development of a correlation based on investigation in a tunnel through basaltic. *Engineering Geology*, 31-41.

[13] Chakraborty, A. K., 1998. Blast performance in small tunnels-a critical evaluation in underground metal mines. *Tunnelling and underground space technology*, 331-339.

[14] Chakraborty, A. K., 2004. Development of rational models for tunnel blast prediction based on a parametric study. *Geotechnical & geological engineering* , 477-496.

[15] Zare, S., 2007. *Drill and Blast Tunnelling Blast Design*. NTNU University.

[16] Zare, S., & Bruland., a. A., 2006. Comparison of tunnel blast design models. *Tunnelling and underground space technology*, 533-541.

[۱۷] صالحی، احسان، غفوری مقدم، محمد، خانی، جعفر، حاجی حسینی، محسن، رستم‌آبادی، سینا (۱۴۰۰). بررسی روش‌های طراحی الگوی بهینه چال‌زنی و آتش‌کاری تونل در برش‌های موازی تحت تأثیر تغییرات شاخص‌های اقتصادی طرح. *مهندسی تونل و فضاهای زیرزمینی*، ۱۰(۴)، ۴۱۳-۴۳۴. doi: ۱۰.۲۲۰۴۴/۱۰.۲۲۰۴۴.tuse/۱۰.۲۲۰۴۴-۲۰۲۲

[18] Chatziangelou, M., & Christaras, B., 2015. A geological



# آشنایی با نظریه بازی‌ها

## امیر فضلی اله آبادی

۱- دانشجوی کارشناسی ارشد مهندسی استخراج معدن، دانشکده مهندسی معدن و متالورژی، دانشگاه صنعتی امیر کبیر، تهران، ایران

### چکیده

تعاملات، مذاکرات و تصمیم‌گیری‌های مرتبط با حوزه مهندسی، پیچیده و چندوجهی است. نظریه بازی‌ها یک زبان ریاضی است که به بررسی چگونگی تصمیم‌گیری بازیکنان در وضعیت‌های تعاملی می‌پردازد. از مهم‌ترین مفاهیم نظریه بازی‌ها می‌توان به مفاهیم استراتژی، عقلانیت، قواعد بازی و تعادل موجود در یک بازی اشاره کرد. به دلیل گستردگی شاخه‌های نظریه بازی‌ها، راه‌حل یکتایی برای حل تمامی مسائل وجود ندارد. بدین منظور، در این تحقیق پس از معرفی نظریه بازی‌ها، مفاهیم و تقسیم‌بندی‌های روش بررسی گردید. علاوه بر این، پس از معرفی کامل نظریه بازی‌ها برای درک بهتر مفاهیم گفته شده، بازی غیرمشارکتی و تصادفی جنگ تانک‌ها معرفی شد. این بازی به وسیله نرم‌افزار ونسیم شبیه‌سازی و اجرا گردید. سپس، بعد از خروجی گرفتن از نرم‌افزار معلوم شد که بازی پس از ۴ اجرا به اتمام می‌رسد و پیروز بازی در انتهای ۴ اجرا تانک A خواهد بود.

**کلمات کلیدی:** نظریه بازی‌ها، بازی غیرمشارکتی، بازی تصادفی، جنگ تانک‌ها، نرم‌افزار ونسیم.





**(ب) تابع پرداخت (درآمد):** مقدار برد یا باخت و آنچه در انتهای یک بازی عاید بازیکنان می‌شود با تابع پرداخت (تابع درآمد) بیان می‌شود. به عبارتی، تابع پرداخت (درآمد) میزان سود و زیانی را مشخص می‌کند که بازیکن در بازی به دست می‌آورد.

**(ج) عقلانیت:** هدف نهایی هر یک از بازیکنان در بازی، رسیدن به بالاترین یا بهترین تابع پرداخت ممکن است. به دنبال این هدف، مدل باید از توان محاسبه استراتژی بازیکنان مطلع شود و بداند بازیکنان در چه حد قادرند در عمل از استراتژی‌های تبیین شده خود تبعیت کنند. اغلب در نظریه بازی‌ها فرض بر این است که افراد به خوبی توان محاسبه‌ی استراتژی و تبعیت از آن‌ها را دارند. این فرض اساسی عقلانیت نام دارد.

**(د) قواعد بازی:** فرض می‌شود که قوانین بازی را همه‌ی بازیکنان یک بازی می‌دانند. در نظریه بازی‌ها قاعده بازی شامل لیست بازیکنان، استراتژی‌های هر بازیکن و تابع پرداخت ترکیبی بازیکنان است و فرض رفتاری این است که هر بازیکن به‌طور عقلانی در صدد بهینه‌سازی منافع خود است.

**(ه) تعادل:** وقتی بازی شروع شد، این سوال پیش می‌آید که هر بازیکن چه اقدام یا عملی را از مجموعه استراتژی‌های خود انتخاب خواهد کرد؟ پاسخ این سوال را می‌توان در قالب تعادل بیان کرد. یعنی در یک تعادل، هر بازیکن آن استراتژی را به کار می‌برد که بهترین پاسخ به استراتژی‌های انتخابی سایر بازیکنان باشد. در تعادل لزوماً بازیکنان به بیشترین پیامد دست پیدا نمی‌کنند. ممکن است تعادل در نقطه‌ای اتفاق افتد که برای همه بازیکنان نتیجه‌ای بدتر داشته باشد. یافتن تعادل در همه‌ی بازی‌ها به سهولت صورت نمی‌گیرد؛ زیرا وقتی تعداد بازیکنان یا تعداد استراتژی‌ها افزایش یابد، حل کردن و یافتن تعادل نیز پیچیده‌تر می‌شود.

## ۲-۲- تقسیم‌بندی بازی‌ها

بازی‌ها را می‌توان از جهات مختلفی دسته‌بندی نمود. در یک دسته‌بندی جامع می‌توان بازی‌ها را به سه دسته کلی بازی‌های مهارتی، بازی‌های شانسی و بازی‌های استراتژیک تقسیم‌بندی کرد [۸-۱۲].

### ۲-۲-۱- بازی‌های مهارتی

بازی‌های مهارتی از نوع بازی یک‌نفره است که مشخصه اصلی آن‌ها وجود تک‌بازیگری است که کنترل کاملی بر همه پیامدها دارد. به‌طور مثال، جلسه امتحان یک نوع بازی مهارتی به حساب می‌آید.

### ۲-۲-۲- بازی‌های شانسی

بازی‌های شانسی بازی‌های یک‌نفره‌ای در برابر طبیعت هستند. طبیعت بازیکنی است که نمی‌خواهد هیچ تابع پرداختی را حداکثر کند و استراتژی‌ها را با احتمالاتی که برای سایرین معلوم و یا نامعلوم است انتخاب می‌کند. برخلاف بازی‌های مهارتی در بازی‌های شانسی، بازیگر کنترل کاملی بر پیامدها ندارد و انتخاب‌های استراتژیک به پیامدهای خاصی منجر نمی‌شوند. بازی‌های شانسی به‌طور معمول به بازی‌های خطرپذیر و بازی‌های عدم قطعیت تقسیم‌بندی می‌شوند.

در دنیای واقعی هر فردی در تصمیم‌گیری‌های خود با عکس‌العمل دیگران مواجه است. پیامد موقعیت‌هایی که فرد در آن قرار می‌گیرد از یک طرف بستگی به تصمیمات خود و از طرف دیگر، بستگی به تصمیمات دیگران دارد. از این‌رو، افراد در تصمیم‌گیری، همواره با حالاتی مواجه‌اند که می‌تواند با دیگران هم‌سویی یا تضاد داشته باشد. این ویژگی‌ها عامل مهمی برای توجه صاحب‌نظران به نظریه بازی‌ها بوده است. آن‌ها به دنبال این بودند تا نشان دهند چگونه بازی‌ها، تصمیم‌ها، رفتارهای اقتصادی و سایر فعالیت‌ها در اتخاذ تصمیمات استراتژیک با هم مشابهت دارند. کاربرد این نظریه در مواردی همچون تأثیر معادن بر آلودگی محیط زیست، ایمنی معادن زغال‌سنگ، تأثیرات آب‌وهوایی معادن و تأثیرات معادن بر جوامع محلی مشهود است. در بخش مدیریت زیست‌محیطی با استفاده از نظریه بازی‌ها، مسائلی همچون انتشار گازهای گلخانه‌ای، آلودگی آب‌ها و محیط‌های اطراف معادن تجزیه‌وتحلیل شده است. در ادامه کاربرد نظریه بازی‌ها در حل مسائل ایمنی معادن زغال‌سنگ یکی از پرکاربردترین موضوعاتی است که با استفاده از این روش بررسی شده است. در این تحقیق سعی شده علاوه بر بیان مفاهیم و اصطلاحات نظریه بازی‌ها، تقسیم‌بندی‌های بازی‌های موجود نیز معرفی شود. در ادامه، برای درک بهتر موضوعات بررسی شده، بازی جنگ تانک‌ها در نرم‌افزار ونسیم شبیه‌سازی و حل شده است.

## ۲- نظریه بازی‌ها

آنچه در نظریه بازی‌ها به آن بازی اطلاق می‌شود عبارت است از تعاملاتی (روابط متقابل) که در آن بین تصمیم دو طرف وابستگی و ارتباط متقابل وجود داشته باشد [۱]. به عبارت دیگر، هر گاه بتوان گفت سود، درآمد، رفاه و هر آنچه که فرد به دنبال آن است، نه تنها متأثر از تلاش و تصمیم خود او باشد، بلکه تحت تأثیر تلاش و تصمیم طرف دیگر نیز باشد، به آن بازی گفته می‌شود. ویژگی عمده‌ی تصمیم‌گیری در شرایط بازی این است که هر بازیکن قبل از تصمیم‌گیری و انتخاب باید عمل و عکس‌العمل دیگران را نسبت به انتخاب و تصمیم خود تجزیه‌وتحلیل کند و آنگاه تصمیمی را اتخاذ کند که برایش بهترین است [۲]. به تعبیر دیگر برای او باید بیشترین عایدی را با در نظر گرفتن واکنش طرف مقابل داشته باشد [۳].

نظریه بازی‌ها تلاش می‌کند تا رفتار ریاضی حاکم بر یک موقعیت استراتژیک که منافع شرکت‌کنندگان در تضاد می‌باشد را مدل‌سازی کند [۴]. این موقعیت زمانی پدید می‌آید که موفقیت یک فرد وابسته به راهبردهایی است که خود و دیگران انتخاب می‌کنند. هدف نهایی این نظریه، یافتن راهبرد بهینه برای بازیکنان است [۵].

## ۱-۲- مفاهیم و اصطلاحات

در ادامه برای آشنایی با نظریه بازی‌ها لازم است واژگان اصلی مورد استفاده تعریف شود. مهم‌ترین اصطلاحات مربوط به این روش در زیر آورده شده است [۶-۷]:

**(الف) استراتژی:** استراتژی هر بازیکن عبارت است از آن مجموعه رفتارهایی که بازیکن می‌تواند از میان آن‌ها یکی را برای یک بار انتخاب کند. به عبارت دیگر، استراتژی، انتخاب‌های موجود و پیش روی یک بازیکن در یک بازی است.

### ۳-۲- بازی‌های استراتژیک

بازی‌های استراتژیک، بازی‌هایی شامل دو یا چند بازیکن هستند و هر کدام کنترلی جزئی روی نتایج دارند. در این نوع بازی‌ها چون بازیکنان نمی‌توانند احتمال انتخاب‌های دیگران را مشخص کنند، با عدم قطعیت همراه هستند. در یک جمع‌بندی بازی‌های استراتژیک را می‌توان به صورت زیر تقسیم‌بندی کرد.

**الف) بازی‌های ایستا و پویا:** در دنیای واقعی، بازی‌ها ترکیبی از شرایط ایستا و پویا هستند. در بازی‌های ایستا حرکت بازیکنان به صورت ترتیبی بوده و ابتدا یک بازیکن شروع می‌کند و در ادامه بازیکن دیگر به بازی می‌پردازد (مانند بازی شطرنج). در بازی پویا، بازی با حرکت هم‌زمان بازیکنان دنبال می‌شود (مانند یک مزایده). نکته قابل توجه در بازی پویا این است که بازیکنان در مورد نحوه بازی حریف مقابل اطلاعی ندارند.

**ب) بازی‌های مشارکتی و غیرمشارکتی:** یکی از ملاک‌های مهم در تقسیم‌بندی بازی‌ها این است که آیا پیش از انجام بازی بین بازیکنان مذاکره‌ای صورت می‌گیرد یا نه. اگر بین بازیکنان مذاکره‌ای صورت گیرد و توافقی هم به وجود بیاید و اجرا شود، اصطلاحاً به آن بازی مشارکتی می‌گویند؛ اما اگر چنین مذاکره‌ای وجود نداشته باشد و یا به یک توافق قابل اجرا منجر نشود، آن را بازی غیرمشارکتی می‌گویند. در واقع، در بازی مشارکتی (توافقی) بازیکنان این امکان را دارند تا با هم ارتباط برقرار کرده و با هم مذاکره نمایند تا به یک قرارداد قابل اجرا برسند. برای مثال، مدیریت و نظارت بر رفتار کارکنان یک بازی مشارکتی است، به این دلیل که ناظرین و شرکت‌کنندگان طبق قوانینی با یکدیگر به توافق می‌رسند؛ ولی در مسائل بهره‌برداری از منابع مشترک، بازیکنان شرکت‌کننده در بازی به دنبال بیشینه‌سازی سود خود هستند. این نوع مسائل به دلیل تفاوت استراتژی‌ها و توابع پرداخت (درآمد)، به یک توافق همگانی بین بازیکنان منجر نمی‌شود و یک بازی غیرمشارکتی به حساب می‌آید.

**ج) بازی با اطلاعات:** بازی با اطلاعات کامل بازی است که هر یک از بازیکنان هر گاه تصمیمی بگیرد، بر همه حرکت‌های پیشین که توسط سایر بازیکنان انجام شده است، وقوف کامل دارد. برای مثال، شطرنج یک بازی متوالی با اطلاعات کامل است، چراکه در هر مرحله از فرایند تصمیم‌گیری، هر بازیکن از همه حرکت‌های قبلی که خود و رقیبش انجام داده‌اند، اطلاع دارد. اما اگر بازیکنان مجموعه‌ای از اطلاعات را بنا به دلایلی در اختیار نداشته باشند، آن را بازی با اطلاعات ناقص می‌نامند.

**د) بازی با اطلاعات متقارن و نامتقارن:** در بازی با اطلاعات متقارن هیچ‌یک از بازیکنان مزیت اطلاعاتی نسبت به بقیه ندارند و همچنین با جابه‌جا کردن استراتژی دو بازیکن پیامدهای آن‌ها تغییر نمی‌یابد. ولی در بازی با اطلاعات نامتقارن، تعدادی از بازیکنان اطلاعاتی دارند که به طور لزوم دیگران ندارند. برای مثال، در بازی سنگ، کاغذ و قیچی هر دو بازیکن به یک اندازه از قوانین بازی مطلع و آگاه هستند. بازی سنگ، کاغذ و قیچی یک بازی با اطلاعات متقارن به حساب می‌آید. در ادامه اگر خریدوفروش یک وسیله بازی فرض شود، فروشنده به دلیل داشتن اطلاعات بیشتر نسبت به خریدار، در اطلاعات موجود در بازی برتری دارد و به این نوع بازی، بازی با اطلاعات نامتقارن گفته می‌شود.

**ه) بازی‌های دونفره و چندنفره:** در بازی‌های دونفره تنها دو بازیکن با همدیگر مشغول بازی هستند. ولی در بازی‌های چندنفره، گروهی از افراد در حال بازی با یکدیگر هستند.

**و) بازی‌های مجموع صفر و مجموع غیرصفر:** بازی‌های با مجموع صفر بازی‌هایی هستند که تابع پرداخت (درآمد) بازی در طی بازی ثابت می‌ماند و کاهش یا افزایش پیدا نمی‌کند. در این بازی‌ها سود یک بازیکن با زیان بازیکن دیگر همراه است. اما در بازی‌های مجموع غیرصفر راهبردهایی موجود است که برای همه بازیکنان سومند است. برای مثال، اگر شرط برد بازیکن در بازی شطرنج مثبت یک فرض شود و باخت حریف برابر با منفی یک باشد، در نهایت مجموع توابع پرداخت (درآمد) دو بازیکن در انتهای بازی برابر با صفر می‌شود. ولی در بازی مانند فوتبال، در صورت برد یک بازیکن تابع پرداخت (درآمد) یکی از آن‌ها مقدار سه و دیگری مقدار صفر می‌شود. در این صورت مجموع توابع پرداخت (درآمد) بازیکنان عددی غیر صفر می‌باشد.

**ز) بازی‌های تصادفی و غیرتصادفی:** بازی‌های تصادفی شامل عناصر تصادفی مانند ریختن تاس هستند ولی در بازی‌های غیرتصادفی بازیکنان راهبردهایی منطقی را دنبال می‌کنند. شطرنج با وجود قوانین مشخص یک نمونه از بازی غیرتصادفی می‌باشد.

**ح) بازی‌های گسسته و پیوسته:** اگر در یک بازی مجموعه استراتژی‌های بازیکنان یک مجموعه گسسته (مجموعه‌ای شمارا) باشد آن را بازی گسسته گویند. به‌طور مثال، بازی سنگ، کاغذ و قیچی یک بازی گسسته به حساب می‌آید و شامل سه استراتژی انتخابی می‌باشد. ولی اگر در یک بازی مجموعه استراتژی‌های بازیکنان مجموعه‌ای پیوسته (یک بازه و یا اجتماع چند بازه) باشد آن را بازی پیوسته گویند. به‌طور مثال، در بازی شطرنج با انتخاب استراتژی توسط یک بازیکن، بازیکن دوم بازه‌ای پیوسته، از استراتژی‌ها را در اختیار دارد.

### ۳-۲-۳- فرم نرمال بازی

فرم نرمال یک بازی نشان‌دهنده تعداد بازیکنان، مجموعه استراتژی‌های هر بازیکن و توابع پرداخت (درآمد) هر یک از بازیکنان می‌باشد [۱۳]:

فرض کنید  $n$  بازیکن به شماره‌های ۱، ۲، ... و  $n$  وجود دارد. در این صورت، مجموعه بازیکنان عبارت است از:

$$N = \{1, 2, \dots, n\} \quad (1)$$

مجموعه تصمیماتی که بازیکن  $i$  می‌تواند اتخاذ کند، مجموعه استراتژی فضای استراتژی بازیکن  $i$  ام گفته می‌شود. مجموعه استراتژی بازیکن  $i$  ام با  $S_i$  نمایش داده می‌شود که عبارت است از:

$$S_i = \{S_{i1}, S_{i2}, \dots, S_{im}\} \quad (2)$$

بنابراین بیانگر استراتژی  $i$  ام بازیکن  $i$  ام و  $m$  تعداد کل استراتژی‌های بازیکنان  $i$  ام می‌باشد. با توجه به اینکه  $n$  بازیکن وجود دارد، در نتیجه، مجموعه استراتژی‌های تمامی بازیکنان عبارت است از:



تمامی نتایج ممکن برای دو پیمانکار در جدول ۱ آمده است.

جدول ۱- تابع پرداخت دو پیمانکار

		پیمانکار j	
		L	H
پیمانکار i	L	۳۰۰ و ۳۰۰	۰ و ۴۰۰
	H	۴۰۰ و ۰	۱۰۰ و ۱۰۰

در جدول ۱ رقم اول، میزان درآمد بازیکن  $i$  و رقم دوم میزان درآمد بازیکن  $j$  می باشد. برای مثال، اگر پیمانکار  $i$  استراتژی  $L$  و پیمانکار  $j$  استراتژی  $H$  را انتخاب کند، در این صورت درآمد پیمانکار  $i$  برابر صفر و درآمد برابر با ۴۰۰ است.

بنابراین، در اینجا یک بازی دو نفره داریم که فضای استراتژی آن به صورت زیر نمایش داده می شود.

$$G = \{S_i, S_j, u_i(s_i, s_j), u_j(s_i, s_j)\}$$

$$s_2, S_j, s_1, S_i, S_i = S_j = \{H, L\}$$

### ۳- جنگ تانک‌ها

در ادامه برای درک بهتر مفهوم نظریه بازی‌ها، بازی غیرمشارکتی و تصادفی جنگ تانک‌ها بررسی شده است. سه تانک A، B، C را در نظر بگیرید که به سوی هم شلیک می کنند. پس از هر شلیک،  $\gamma$  ثانیه طول می کشد تا تانک‌ها سلاح خود را مجدداً خرج گذاری و آماده شلیک سازند. در هر شلیک احتمال این که یک تانک هر یک از دو تانک دیگر را هدف گیری کند  $0/5$  است. احتمال اینکه هر شلیک به هدف اصابت کند نیز است. در ادامه فرض می شود که مهمات تانک‌ها نامحدود است و برای شروع در  $\gamma$  ثانیه نخست، ابتدا تانک A، سپس B و نهایتاً C شلیک می کند. (اگر B و C در شلیک قبلی منهدم نشده باشند).

در ابتدا باید احتمال انتخاب هدف را برای هر کدام از تانک‌ها مشخص کرد. در جدول ۲ احتمال انتخاب هدف برای هر یک از تانک‌ها مشخص شده است.

جدول ۲- احتمال انتخاب هدف برای هر یک از تانک‌ها

	تانک A	تانک B	تانک C
تانک A	.	(۰, ۰/۵)	(۰/۵, ۱)
تانک B	(۰, ۰/۵)	.	(۰/۵, ۱)
تانک C	(۰, ۰/۵)	(۰/۵, ۱)	.

با توجه به وجود سه تانک، تعداد بازیکنان موجود در بازی  $N$  برابر سه خواهد بود.

$$S = \{S_1, S_2, \dots, S_n\}$$

(۳)

از طرف دیگر، تابع پرداخت (درآمد) بازی برای بازیکن  $i$  با پارامتر  $u_i$  نمایش داده می شود. تابع پرداخت (درآمد) بیانگر سود، مطلوبیت و هر چه که بازیکن در پایان بازی نصیب می شود، می باشد. به طور کلی، تابع پرداخت (درآمد) هر بازیکن بستگی به استراتژی‌های انتخاب شده توسط تمامی بازیکنان دارد. بدین منظور، تابع پرداخت (درآمد) بازیکن  $i$  به صورت رابطه (۴) نشان داده می شود.

$$u_i = u_i(s_1, s_2, \dots, s_n) \quad (4)$$

$S_i$  استراتژی انتخابی توسط بازیکن  $i$  است که از مجموعه  $S_i$  انتخاب شده است. در واقع  $s_i$  بیانگر هر عنصر دلخواهی از مجموعه  $S_i$  است که  $S_i \in S_i$  نشان دهنده یک استراتژی از مجموعه استراتژی بازیکن  $i$  می باشد. همچنین ترکیب استراتژی انتخاب شده توسط بازیکنان برش استراتژی  $i$  نامیده می شود. بدین ترتیب، فرم نرمال یک بازی  $n$  نفره نشان دهنده فضای استراتژی بازیکنان  $(s_1, s_2, \dots, s_n)$  و توابع پرداخت (درآمد) آن‌ها  $(u_1, u_2, \dots, u_n)$  می باشد که به صورت  $G = \{S_1, S_2, \dots, S_n, u_1, u_2, \dots, u_n\}$  نشان داده می شود.

در ادامه برای درک بهتر فرم نرمال بازی فرض کنید معدنی در اختیار دو پیمانکار است که سهم استخراجی برابر از معدن دارند. فرض شود که ماشین آلات معدنی تأثیری بر کل مقدار فروش یا کل تقاضا ندارد؛ اما پیمانکار برای استخراج بیشتر می تواند از دو نوع کامیون استفاده کند. کامیون با حجم بالا (H) و کامیون با حجم کم (L). سهم هر پیمانکار از کل تقاضای بازار بستگی به بهره گیری ماشین آلات وی و رقیبش دارد. بنابراین، مجموعه استراتژی‌های هر بازیکن (تولید کننده) می تواند به دو صورت زیر باشد [۱۳]:

$$S_i = \{H, L\}$$

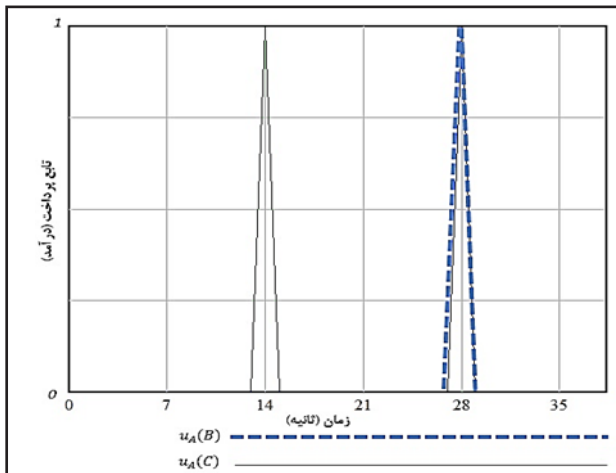
$$S_j = \{H, L\}$$

فرض کنید  $u_i$  سود کل بازار بدون توجه به هزینه ماشین آلات باشد. در واقع  $u_i$  مجموع مبلغی است که نصیب این دو بازیکن می شود. فرض کنید هزینه‌های کامیون  $C_L$  و  $C_H$  باشد که متناسب با استراتژی‌های  $L$  و  $H$  هستند. از طرف دیگر، بدیهی است که سهم هر پیمانکار از  $u_i$  بستگی به ماشین آلات او دارد بدین منظور، فرض کنید که  $u_{kn}$  سهم پیمانکار  $i$  است که ناشی از استراتژی  $k$  ام خودش و  $n$  ام رقیبش می باشد. در آن صورت، تابع پرداخت (درآمد) پیمانکار  $i$  عبارت است از:

$$k, n \in \{L, H\}$$

$$u_i(s_k, s_n) = m_{kn} u_i - C_k$$

برای مثال، فرض کنید که  $C_L = 200$ ,  $C_H = 400$ ,  $u_i = 1000$  و همچنین  $m_{HH} = 0/8$  و  $m_{LL} = 0/2$ ,  $m_{HH} = m_{LL} = 0/5$  بدین ترتیب،



شکل ۱- نتیجه شبیه‌سازی در نرم‌افزار ونسیم

پس از پایان شبیه‌سازی، بازی غیرمشارکتی و تصادفی جنگ تانک‌ها در نرم‌افزار ونسیم اجرا شد. خروجی نرم‌افزار در شکل ۱ آورده شده است. با مشاهده نمودار شکل ۱ می‌توان نتیجه گرفت که با تغییر تابع پرداخت (درآمد) از صفر به یک، استراتژی اصابت کردن شلیک تانک موفقیت‌آمیز بوده است. باتوجه به این مفهوم می‌توان چنین نتیجه گرفت که در ثانیه ۱۴ و ۲۸ تانک A موفق شده به ترتیب تانک C و تانک B را نابود کند.

#### ۴- جمع‌بندی

نظریه بازی‌ها، یک ابزار تصمیم‌گیری ساختاریافته برای تجزیه و تحلیل سناریوهای متعدد است. با استفاده از این راهکار، بسیاری از مشکلات موجود در صنعت معدن با کمک تعیین توافقات بین بازیکنان حل می‌شود. در این تحقیق سعی شد تا اصول نظریه بازی‌ها در حوزه مهندسی معرفی شود. برای درک بهتر مفاهیم در این تحقیق یک نمونه بازی غیرمشارکتی و تصادفی بررسی شد. بازی یادشده بازی جنگ تانک‌ها است که در نرم‌افزار ونسیم شبیه‌سازی و اجرا شد. این بازی شامل سه بازیکن و یک استراتژی خرج‌گذاری و شلیک است. در مرحله بعد بازی با ایجاد دو سری داده تصادفی و گزاره شرطی برای احتمال انتخاب هدف و احتمال اصابت نهایتاً به دو نتیجه صفر و یا یک خواهد رسید. در ادامه پس از مشاهده خروجی نرم‌افزار مشخص شد که تانک A در ۴ اجرا (ثانیه ۲۸) پیروز بازی است و پس از این زمان توابع پرداخت (درآمد) برای تمامی بازیکنان به دلیل وجود یک بازیکن در بازی صفر خواهد بود.

#### ۵- منابع و مراجع

[1] von Neumann, J., Morgenstern, O., 1944. Theory of Games and Economic Behavior Princeton University Press, Princeton, NJ.

[2] Debnath, A., Bandyopadhyay, A., Roy, J., Kar, S., 2018. Game theory based multi criteria decision making problem

$$N = \{1,2,3\}$$

با توجه به فرضیات مثال، استراتژی بازیکنان تنها به صورت خرج‌گذاری و شلیک است. در این مثال، تابع پرداخت (درآمد) همان نتیجه برخورد شلیک به هدف است که با مقدار یک نمایش داده می‌شود. در مقابل، عدم اصابت گلوله نیز با مقدار صفر به نمایش در می‌آید. دو مقدار ذکر شده از احتمال برخورد شلیک به هدف به دست می‌آید. جدول ۳ احتمال اصابت و یا عدم اصابت شلیک به هدف را مشخص می‌کند.

جدول ۳- احتمال اصابت و یا عدم اصابت شلیک به هدف

	احتمال اصابت شلیک به هدف	احتمال عدم اصابت شلیک به هدف
بازه	(۰, ۰/۸۳)	(۰/۸۳, ۱)
نتیجه	۰	۱

بنابراین در اینجا یک بازی سه‌نفره داریم که فضای استراتژی آن باتوجه به وجود تک استراتژی خرج‌گذاری و شلیک به صورت زیر نمایش داده می‌شود.

$$G = \{S_A, S_B, S_C, u_A(s_1), u_B(s_1), u_C(s_1)\}$$

$$s_1 \in S_A, s_1 \in S_B, s_1 \in S_C = \{\text{shoot strategy}\}$$

در ادامه برای شبیه‌سازی مثال از نرم‌افزار ونسیم استفاده شد. برای وارد کردن اطلاعات تانک‌ها به دو سری داده تصادفی نیاز است. اعداد تصادفی اول برای تعیین هدف تانک‌ها و اعداد تصادفی دوم برای مشخص کردن احتمال اصابت گلوله به تانک مورد هدف می‌باشد. بدین منظور، در نرم‌افزار ونسیم ابتدا دستور ساخت دو سری داده تصادفی داده شد.

برای ایجاد حالات موجود تقابل تانک‌ها با یکدیگر ۶ پارامتر در نرم‌افزار ونسیم ایجاد شد. این ۶ حالت شامل تقابل تانک A با تانک B ( $u_A(B)$ )، تانک A با تانک C ( $u_A(C)$ )، تانک B با تانک A ( $u_B(A)$ )، تانک B با تانک C ( $u_B(C)$ )، تانک C با تانک A ( $u_C(A)$ )، تانک C با تانک B ( $u_C(B)$ ) است. سپس با استفاده از گزاره‌های شرطی مشخص شد که هدف هریک از شلیک‌ها کدام یک از تانک‌ها می‌باشد، برای این امر از جدول ۲ استفاده شد. در قدم بعدی، احتمال اصابت و یا عدم اصابت باتوجه به جدول ۳ با مقدار خروجی صفر و یا یک بررسی شد.

برای مثال، اگر در قسمت تولید اعداد تصادفی برای تعیین هدف تانک A مقدار ۰/۶ خروجی تصادفی نرم‌افزار باشد، می‌توان باتوجه به جدول ۲ فهمید که هدف تانک A، تانک C است. در قسمت بعد فرض می‌شود که خروجی نرم‌افزار برای احتمال اصابت و یا عدم اصابت شلیک به هدف ۰/۹ باشد، در این صورت، باتوجه به جدول ۳ می‌توان گفت میزان تابع پرداخت (درآمد) تانک A یک می‌شود.



- [7] Benyoucef, L., Hennet, J.-C., Tiwari, M.K. (Eds.), 2014. Applications of Multi-Criteria and Game Theory. under uncertainty: a case study on Indian tea industry. J. Bus. Econ. Manag, 19, 154-175.
- [8] E. C. Fink, S. Gates, B.D. Humes, 2005. Game theory Topics, (Incomplete information, Reported Games, and N-player Games), Springer, Berlin.
- [9] ا. احمدی و ع. معماربانی، ۱۳۸۵، نظریه بازی.
- [۱۰] دریجانی، ع، ۱۳۸۱. نظریه بازی‌های دونفره تک هدفه و چند هدفه در حالت معمولی و فازی، پایان‌نامه کارشناسی ارشد، دانشکده ریاضی و کامپیوتر، دانشگاه شهید باهنر کرمان.
- [۱۱] موسوی جهرمی، ی، ۱۳۸۸، مبانی علم اقتصاد، انتشارات دانشگاه پیام نور.
- [۱۲] سعیدی فرد، س، امینیان، ه، ۱۳۸۷، آمار و احتمال، انتشارات علوی فرهیخته
- [۱۳] سوری، ع، ۱۳۸۶، نظریه بازی‌ها و کاربردهای اقتصادی، دانشکده علوم اقتصادی، انتشارات نور علم.
- [3] Ascough, J. C., Maier, H. R., Ravalico, J. K., Strudley, M. W., 2008. Future research challenges for incorporation of uncertainty in environmental and ecological decision-making. Ecol. Model, 219, 383-399. <https://doi.org/10.1016/j.ecolmodel.2008.07.015>.
- [4] Cole, S., Izmalkov, S., Sjöberg, E., 2014. Games in the Arctic: applying game theory insights to Arctic challenges. Polar Res, 33 <https://doi.org/10.3402/polar.v33.23357>.
- [5] Kaitala, V., Pohjola, M., 1995. Sustainable international agreements on greenhouse warming - a game theory study. In: Carraro, C., Filar, J.A. (Eds.), Control and Game Theoretic Models of the Environment. Springer, New York, pp. 67-87.
- [۶] جلالی نائینی، س، غ، نوذری، ح، عمرانی، پ، جعفری اسکندری، م، ۱۳۹۳، نظریه بازی‌ها.

# مروری بر روش‌های تحلیلی، تجربی و عددی بررسی رفتار برشی ناپیوستگی‌های موجود در سنگ

هومن روحانی<sup>۱</sup>، حسین سالاری‌راد<sup>۲</sup>

۱- دانشجوی کارشناسی ارشد مکانیک سنگ، دانشکده مهندسی معدن، دانشگاه صنعتی امیرکبیر، تهران، ایران  
۲- استادیار، دانشکده مهندسی معدن، دانشگاه صنعتی امیرکبیر، تهران، ایران

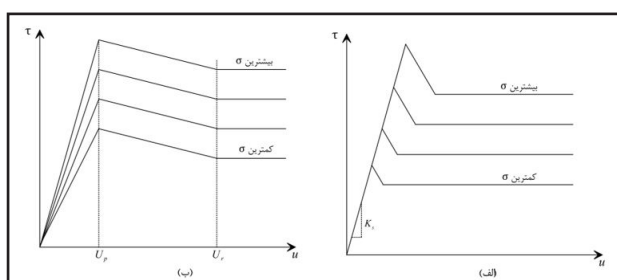
## چکیده

در این مقاله روش‌های تجربی و تحلیلی پیش‌بینی رفتار برشی درزه‌ها و ناپیوستگی‌ها مرور و بررسی شده‌اند، سپس با استفاده از مدل‌سازی عددی با روش اجزای مجزا، و مدل رفتاری لغزش کولمب، آزمایش برش مستقیم شبیه‌سازی شده و نتایج حاصل از مدل‌سازی عددی با نتایج حاصل از روش‌های تحلیلی و تجربی مقایسه شده است. ابتدا دو روش جابه‌جایی ثابت و سختی ثابت گودمن ارائه شده؛ سپس مدل ساب و آمادگی ارائه و در رابطه با شرایط CNL و CNS در مسائل مهندسی سنگ بحث شده است. پس از ارائه دو مدل گودمن و ساب و آمادگی، دو مدل تحلیلی و تجربی ارائه شده توسط یوسف‌زاده و سالاری‌راد، ارائه و رفتار برشی درزه در شرایط مختلف با استفاده از این مدل‌ها بررسی شده است. سپس آزمایش برش مستقیم با استفاده از روش عددی اجزای مجزا مدل‌سازی شده و تحلیل به کمک مدل رفتاری لغزش کولمب انجام شده است. در پایان، نتایج حاصل از مدل‌های مختلف با یکدیگر مقایسه شده است. با توجه به نتایج حاصل شده، مشاهده شد که نتایج حاصل از مدل عددی مطابقت قابل قبولی با نتایج حاصل از روش‌های تحلیلی و تجربی دارند.

کلمات کلیدی: رفتار برشی درزه، آزمایش برش مستقیم، روش اجزای مجزا، مدل لغزش کولمب

$$\tau = \tau_r \quad u > u_r \quad (3)$$

که در رابطه فوق بیانگر تنش برشی و  $u$  بیانگر میزان جابه‌جایی برشی است. زیروندهای  $P$  و  $r$  نیز به ترتیب بیانگر مقادیر حداکثر و باقی‌مانده هستند. لازم به ذکر است که در مدل سختی ثابت، سختی برشی<sup>۷</sup> پیش از مقدار حداکثر<sup>۸</sup> و شیب قسمت پس از مقدار حداکثر مستقل از مقادیر تنش قائم هستند؛ در حالی که در مدل جابه‌جایی ثابت، مقادیر جابه‌جایی برشی در نقطه حداکثر و شروع ناحیه باقی‌مانده، تحت مقادیر متفاوت تنش قائم برابر هستند [۴].



شکل ۱- مدل الف) سختی ثابت و ب) جابه‌جایی ثابت گودمن [۴]

### ۳- روش ساب و آمادئی

روش ساب و آمادئی نیز برای دو حالت جابه‌جایی ثابت و سختی ثابت توسعه یافته است. بر اساس این روش تحلیلی، جابه‌جایی‌های برشی و قائم تحت تنش برشی  $\tau$  و تنش قائم  $\sigma_n$  مطابق رابطه ۴ قابل محاسبه هستند [۴].

$$\begin{bmatrix} d\sigma_n \\ d\tau \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} k_{mn} & k_{ni} \\ k_{m} & k_{u} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} dv \\ du \end{bmatrix} \quad (4)$$

که در رابطه فوق  $v$  بیانگر جابه‌جایی قائم است و چهار مولفه ماتریس سختی موجود در رابطه فوق، مطابق روابطی که در ادامه ارائه شده است، قابل محاسبه هستند. روابط ۵ و ۶ به منظور محاسبه دو مقدار  $k_{mn}$  و  $k_{ni}$  برای هر دو حالت سختی ثابت و جابه‌جایی ثابت ارائه شده است.

$$k_{mn} = \frac{\partial \sigma_n}{\partial v} = \frac{1}{\frac{-u \cdot k_2}{\sigma_T} \left(1 - \frac{\sigma_n}{\sigma_T}\right)^{(k_2-1)} \cdot \tan i_0 + \frac{k_{ni} \cdot V_m^2}{(k_{ni} \cdot V_m - \sigma_n)^2}} \quad (5)$$

$$k_{ni} = \frac{\partial \sigma_n}{\partial u} = \frac{-\left(1 - \frac{\sigma_n}{\sigma_T}\right)^{k_2} \cdot \tan i_0}{\frac{-u \cdot k_2}{\sigma_T} \left(1 - \frac{\sigma_n}{\sigma_T}\right)^{(k_2-1)} \cdot \tan i_0 + \frac{k_{ni} \cdot V_m^2}{(k_{ni} \cdot V_m - \sigma_n)^2}} \quad (6)$$

7-Shear Stiffness

8-Peak

بررسی رفتار برشی درزه‌ها و ناپیوستگی‌ها، به منظور تحلیل پایداری شیروانی‌های سنگی، طراحی حفاریات زیرزمینی در توده‌سنگ حاوی ناپیوستگی و ارزیابی پایداری پی سدهای بتنی، از مهم‌ترین حوزه‌های مهندسی سنگ محسوب می‌شوند [۱]. به همین دلیل، مدل‌های تحلیلی و تجربی بسیاری به منظور پیش‌بینی رفتار برشی درزه توسط محققین ارائه شده است [۲]-[۵]. در ابتدا گودمن<sup>۱</sup> در سال ۱۹۷۶ دو مدل سختی ثابت<sup>۲</sup> و جابه‌جایی ثابت<sup>۳</sup> به منظور محاسبه مقادیر جابه‌جایی‌های برشی ناشی از تنش برشی و تحت مقادیر مختلف تنش قائم ارائه نمود [۲].

سپس ساب و آمادئی<sup>۴</sup> در سال ۱۹۹۲ یک مدل تحلیلی و با در نظر گرفتن ماتریس سختی نامتقارن ارائه نمودند [۴]. همچنین دو مدل تحلیلی و تجربی غیرخطی، بر اساس مدل‌های گودمن و ساب و آمادئی نیز توسط یوسف‌زاده و سالاری‌راد در سال ۲۰۱۳ توسعه یافت و سپس صحت مدل مذکور با استفاده از نتایج آزمایش‌های برش مستقیم<sup>۵</sup>، بررسی شد [۳]. از دیگر مدل‌های ارائه‌شده به منظور بررسی رفتار برشی درزه‌ها، می‌توان به مدل ارائه‌شده توسط لین و همکاران در سال ۲۰۱۹ اشاره کرد. مدل مذکور، یک مدل رفتاری بر اساس تحلیل آماری است که قادر به در نظر گرفتن کمیت تخریب به منظور پیش‌بینی بهتر رفتار غیرخطی، نرم‌شوندگی و اثر اندازه است [۵]. همچنین، برخی محققین سعی کرده‌اند تا آزمایش برش مستقیم را به منظور بررسی رفتار برشی درزه، با استفاده از روش‌های عددی اجزای مجزا<sup>۶</sup> و با در نظر گرفتن رفتار دانه‌های سنگ، با استفاده از نرم‌افزارهای PFC2D و PFC3D شبیه‌سازی کنند [۶]، [۷].

در این مقاله، ابتدا روش گودمن ارائه شده و سپس رفتار برشی درزه با استفاده از روش جابه‌جایی ثابت بررسی شده است. در بخش‌های بعدی، به‌طور مختصر به روش ساب و آمادئی و روش یوسف‌زاده و سالاری‌راد اشاره شده است. سپس آزمایش برش مستقیم با استفاده از نرم‌افزار 3DEC و به روش اجزای مجزا شبیه‌سازی شده است. در نهایت، بین نتایج حاصل از مدل‌های تحلیلی، تجربی و عددی مقایسه انجام شده است.

### ۲- روش گودمن

دو مدل سختی ثابت و جابه‌جایی ثابت توسط گودمن ارائه شده است. نمودار جابه‌جایی برشی در مقابل مقادیر متفاوت تنش برشی تحت مقادیر متفاوت تنش قائم در دو مدل سختی ثابت و جابه‌جایی ثابت گودمن به ترتیب مطابق شکل ۱-الف و ۱-ب نمایش داده شده است. همچنین، رابطه ارائه شده توسط گودمن به منظور بررسی رفتار برشی درزه برای هر دو مدل جابه‌جایی ثابت و سختی ثابت، مطابق روابط ۱ تا ۳ ارائه شده است.

$$\tau = k_s \cdot u \quad \left(k_s = \frac{\tau_p}{u_p}\right) \quad u < u_p \quad (1)$$

$$\tau = \left(\frac{\tau_p - \tau_r}{u_p - u_r}\right) u + \left(\frac{\tau_r u_p - \tau_p u_r}{u_p - u_r}\right) \quad u_p < u < u_r \quad (2)$$

1- Goodman

2- Constant Stiffness

3- Constant Displacement

4- Saeb-Amadei

5- Direct Shear Test

6- Discrete Element Method (DEM)

لازم به ذکر است که مقدار  $k_{mn}$  در رابطه ۱۲، متناظر با مقدار این کمیت در  $u = u_r$  است.

### ۳-۲- روش سختی ثابت ساب و آمادگی

مقادیر  $k_m$  و  $k_{tt}$  برای جابه‌جایی‌های برشی  $u < u_p$  و روش سختی ثابت مطابق روابط ۱۴ و ۱۵ ارائه شده است.

$$k_m = \frac{\partial \tau}{\partial v} = 0 \quad (14)$$

$$k_{tt} = \frac{\partial \tau}{\partial u} = \frac{\tau_p}{u_p} \quad (15)$$

همچنین مقادیر  $k_m$  و  $k_{tt}$  برای جابه‌جایی‌های برشی  $u_p < u < u_r$  و  $\sigma_n < \sigma_T$  مطابق روابط ۱۶ و ۱۷ ارائه شده است.

$$k_m = \frac{\partial \tau}{\partial v} = k_{mn} \frac{\partial \tau_p}{\partial \sigma_n} \frac{1}{\tau_p} \left( \frac{u_p \tau_r - u_r \tau_p}{u_p - u_r} \right) \quad (16)$$

$$k_{tt} = \frac{\partial \tau}{\partial u} = \frac{\tau_p - \tau_r}{u_p - u_r} + k_{mn} \frac{\partial \tau_p}{\partial \sigma_n} \frac{1}{\tau_p} \left( \frac{u_p \tau_r - u_r \tau_p}{u_p - u_r} \right) \quad (17)$$

مقادیر  $k_m$  و  $k_{tt}$  برای جابه‌جایی‌های برشی  $u > u_r$  و  $\sigma_n < \sigma_T$  برای روش سختی ثابت، مشابه روش جابه‌جایی ثابت است و مطابق روابط ۱۲ و ۱۳ قابل محاسبه است. همچنین  $\partial \tau_p / \partial \sigma_n$  در روابط فوق، مطابق رابطه ۱۸ قابل محاسبه است [۴].

(۱۸)

$$\frac{\partial \tau_p}{\partial \sigma_n} = (1 - a_s) \tan(\phi_u + i) - \frac{\sigma_n (1 - a_s) k_2}{\sigma_T \cos^2(\phi_u + i)} \frac{1}{1 + \left(1 - \frac{\sigma_n}{\sigma_T}\right)^{2k_2} \tan^2 i_0} \tan i_0 \left(1 - \frac{\sigma_n}{\sigma_T}\right)^{k_2} - \frac{\sigma_n k_1 \tan(\phi_u + i) \left(1 - \frac{\sigma_n}{\sigma_T}\right)^{k_1 - 1}}{\sigma_T} + \frac{s_r k_1 \left(1 - \frac{\sigma_n}{\sigma_T}\right)^{k_1 - 1}}{\sigma_T} + a_s \tan \phi_0$$

که در رابطه فوق،  $a_s$  بیانگر نسبت سطح برش خورده درزه به کل سطح است و مقادیر آن بین ۰ و ۱ متغیر است. همچنین  $\phi_u$  بیانگر زاویه اصطکاک لغزش بر روی سطح درزه است. کمیت‌های  $k_1$ ،  $s_r$  و  $\phi_0$  نیز به ترتیب بیانگر کمیت ثابت برابر با مقدار ۱/۵، مقاومت برشی دندانها که برابر با مقاومت ماده سنگ است و زاویه اصطکاک ماده سنگ هستند [۴].

9- Maximum Joint Closure

10- Transitional Stress

11- Asperities

12- Dilatancy

که در روابط فوق،  $V_m$  بیانگر حداکثر میزان بازشدگی دهانه ترک،  $k_{ni}$  سختی قائم اولیه درزه،  $k_2$  یک ضریب تجربی است که مقدار آن برابر با ۴ پیشنهاد شده است. همچنین  $\sigma_T$  و  $i_0$  نیز در روابط فوق، به ترتیب بیانگر تنش قائم انتقالی<sup>۱</sup> و زاویه دندانهای<sup>۱۱</sup> درزه پیش از اعمال تنش قائم هستند. برای مقادیر تنش قائم اعمالی برابر  $\sigma_T$  یا بزرگ‌تر از آن اتساع<sup>۱۲</sup> از بین خواهد رفت و دندانهای سطح درزه کاملاً از بین رفته و به صورت مسطح تبدیل می‌شوند [۴]. روابط ۵ و ۶ برای حالتی که مقدار  $u \leq u_r$  و  $\sigma_n / \sigma_T < 1$  باشد، صادق است. زمانی که مقدار  $u > u_r$  و  $\sigma_n / \sigma_T < 1$  باشند، مقدار  $k_{mn}$  برابر صفر می‌شود و مقدار  $k_m$  برابر مقدار متناظر با  $u = u_r$  قرار می‌گیرد. همچنین، برای مقادیر  $\sigma_n / \sigma_T \geq 1$  نیز مقدار  $k_{mn}$  برابر صفر می‌شود، اما مقدار  $k_m$  مطابق رابطه ۷ قابل محاسبه است [۴].

$$k_m = \frac{\partial \sigma_n}{\partial v} = \frac{(k_{ni} V_m - \sigma_n)^2}{k_{ni} V_m^2} \quad (7)$$

### ۳-۱- روش جابه‌جایی ثابت ساب و آمادگی

مقادیر  $k_m$  و  $k_{tt}$  برای جابه‌جایی‌های برشی  $u < u_p$  و روش جابه‌جایی ثابت مطابق روابط ۸ و ۹ ارائه شده است.

$$k_m = \frac{\partial \tau}{\partial v} = \frac{u}{u_p} k_{mn} \frac{\partial \tau_p}{\partial \sigma_n} \quad (8)$$

$$k_{tt} = \frac{\partial \tau}{\partial u} = \frac{u}{u_p} k_{mn} \frac{\partial \tau_p}{\partial \sigma_n} + \frac{\tau_p}{u_p} \quad (9)$$

همچنین مقادیر  $k_m$  و  $k_{tt}$  برای جابه‌جایی‌های برشی  $u_p < u < u_r$  و  $\sigma_n < \sigma_T$  مطابق روابط ۱۰ و ۱۱ ارائه شده است.

(۱۰)

$$k_m = \frac{\partial \tau}{\partial v} = \frac{k_{mn}}{u_p - u_r} \left\{ \frac{\partial \tau_p}{\partial \sigma_n} (u - u_r) + (u_p - u) \left[ \frac{\partial \tau_p}{\partial \sigma_n} \left( B_0 + \frac{1 - B_0}{\sigma_T} \sigma_n \right) + \frac{\tau_p}{\sigma_T} (1 - B_0) \right] \right\} \quad (11)$$

$$k_{tt} = \frac{\partial \tau}{\partial u} = \frac{\tau_p - \tau_r}{u_p - u_r} + \frac{k_{mn}}{u_p - u_r} \left\{ \frac{\partial \tau_p}{\partial \sigma_n} (u - u_r) + (u_p - u) \left[ \frac{\partial \tau_p}{\partial \sigma_n} \left( B_0 + \frac{1 - B_0}{\sigma_T} \sigma_n \right) + \frac{\tau_p}{\sigma_T} (1 - B_0) \right] \right\}$$

که در روابط فوق،  $B_0$  بیانگر نسبت مقاومت برشی باقی مانده به مقاومت برشی حداکثر، تحت تنش قائم صفر است. مقادیر  $k_{mn}$  و  $k_{tt}$  برای جابه‌جایی‌های برشی  $u > u_r$  و  $\sigma_n < \sigma_T$  مطابق روابط ۱۲ و ۱۳ ارائه شده است [۴].

$$k_m = \frac{\partial \tau}{\partial v} = k_{mn} \left\{ \frac{\partial \tau_p}{\partial \sigma_n} \left( B_0 + \frac{1 - B_0}{\sigma_T} \sigma_n \right) + \frac{\tau_p}{\sigma_T} (1 - B_0) \right\} \quad (12)$$

$$k_{tt} = \frac{\partial \tau}{\partial u} = k_{mn} \left\{ \frac{\partial \tau_p}{\partial \sigma_n} \left( B_0 + \frac{1 - B_0}{\sigma_T} \sigma_n \right) + \frac{\tau_p}{\sigma_T} (1 - B_0) \right\} \quad (13)$$





$$\tau = (\tau_p - \tau_r) \left( \frac{u_p}{u} \right)^n + \tau_r \quad u > u_p \quad (21)$$

که در رابطه فوق مقدار  $n$  وابسته به مقادیر  $u_p$  است. مقدار  $n$  برای  $u_p \leq 1$  میلی متر برابر ۱ و برای مقادیر  $u_p > 1$  برابر ۱/۵ است و مقدار این کمیت با استفاده از تحلیل برگشتی با استفاده از نتایج آزمایشگاهی حاصل می شود [۳].

#### ۲-۴- روش تحلیلی یوسفزاده و سالاری راد

روش تحلیلی یوسفزاده و سالاری راد مشابه روش جابه جایی ثابت ساب و آمادگی توسعه یافته است. در روش تحلیلی یوسفزاده و سالاری راد نیز مشابه روش تجربی ارائه شده توسط آن ها، رفتار برشی درزه در دو بخش پیش و پس از مقدار حداکثر ارائه شده است. مقادیر  $k_{in}$  و  $k_{out}$  برای  $u \leq u_p$  مطابق روابط ذیل ارائه شده است [۳].

$$k_{in} = \frac{\partial \tau}{\partial v} = k_{in} \frac{\partial \tau_p}{\partial \sigma_n} \left( 1 - \left( 1 - \frac{u}{u_p} \right)^2 \right) \quad (22)$$

$$k_{out} = \frac{\partial \tau}{\partial u} = k_{out} \frac{\partial \tau_p}{\partial \sigma_n} \left( 1 - \left( 1 - \frac{u}{u_p} \right)^2 \right) + 2 \frac{\tau_p}{u_p} \left( 1 - \frac{u}{u_p} \right) \quad (23)$$

همچنین، مقادیر  $k_{in}$  و  $k_{out}$  برای  $u > u_p$  در روش تحلیلی یوسفزاده و سالاری راد، مطابق روابط ذیل ارائه شده است.

$$k_{in} = \frac{\partial \tau}{\partial v} = k_{in} \left\{ \frac{\partial \tau_p}{\partial \sigma_n} \left[ \left( \frac{u_p}{u} \right)^n + \left( B_0 + \frac{1-B_0}{\sigma_r} \sigma_n \right) \left( 1 - \left( \frac{u_p}{u} \right)^n \right) \right] + \tau_p \left( \frac{1-B_0}{\sigma_r} \right) \left( 1 - \left( \frac{u_p}{u} \right)^n \right) \right\} \quad (24)$$

$$k_{out} = \frac{\partial \tau}{\partial u} = k_{out} \left\{ \frac{\partial \tau_p}{\partial \sigma_n} \left[ \left( \frac{u_p}{u} \right)^n + \left( B_0 + \frac{1-B_0}{\sigma_r} \sigma_n \right) \left( 1 - \left( \frac{u_p}{u} \right)^n \right) \right] + \tau_p \left( \frac{1-B_0}{\sigma_r} \right) \left( 1 - \left( \frac{u_p}{u} \right)^n \right) \right\} - n \tau_p \frac{u_p^n}{u^{n+1}} \left( 1 - \left( B_0 + \frac{1-B_0}{\sigma_r} \sigma_n \right) \right) \quad (25)$$

لازم به ذکر است که مدل ارائه شده توسط یوسفزاده و سالاری راد در پیش بینی رفتار برشی درزه تحت شرایط مرزی، از روابط ارائه شده توسط ساب و آمادگی که مطابق رابطه ۱۹ ارائه شده است، تبعیت می کند [۳].

#### ۵- پیش بینی رفتار برشی درزه به روش عددی

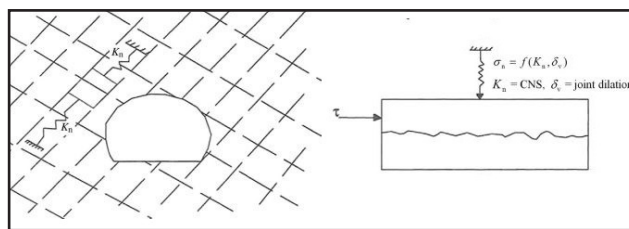
در این مقاله، رفتار برشی درزه طی آزمایش برش مستقیم و به روش عددی اجزای مجزا و با استفاده از یکی از مجموعه نرم افزارهای شرکت ITASCA تحت عنوان نرم افزار 3DEC شبیه سازی شده است. داده های مسئله مطابق جدول ۱ ارائه شده است. لازم به ذکر است که داده های ذیل، داده های واقعی نیستند و فقط به منظور مقایسه انواع روش ها استفاده شده اند.

### ۳-۳- رفتار برشی درزه تحت مقادیر متفاوت سختی ناشی از شرایط مرزی

مدل ارائه شده توسط ساب و آمادگی همچنین قادر است رفتار برشی درزه را تحت شرایط متفاوت سختی خارجی و اعمال شده توسط انواع شرایط مرزی با استفاده از رابطه ۱۹ در نظر بگیرد [۴].

$$d\tau = \left( \frac{k_{in} \cdot k_{out}}{K - k_{in}} + k_{out} \right) du \quad (19)$$

که در رابطه فوق،  $K$  بیانگر سختی خارجی است که در شرایط مرزی تنش قائم ثابت<sup>۱۳</sup> یا CNL برابر صفر و در شرایط جابه جایی ثابت برابر بی نهایت است [۴]. مصداق بارز شرایط CNL در مهندسی سنگ، مسئله لغزش بدون محدودیت یک بلوک سنگی بر روی سطح یک درزه در تحلیل پایداری یک شیروانی سنگی است. همچنین، شرایط سختی قائم ثابت<sup>۱۴</sup> یا CNS نیز مطابق شکل ۲ معرف شرایط حاکم بر مسئله جابه جایی یک بلوک ناپایدار در سقف یا دیواره یک حفیره زیرزمینی است [۱].



شکل ۲- شرایط مرز سختی قائم ثابت حاکم بر لغزش گوه ناپایدار در حفیریات زیرزمینی [۱]

### ۴- روش یوسفزاده و سالاری راد

#### ۱-۴- روش تجربی یوسفزاده و سالاری راد

روش تجربی یوسفزاده و سالاری راد بر اساس نتایج آزمایش های برش مستقیم و به منظور رفع برخی از ایرادات و کاستی های مدل گودمن ارائه شده است. از جمله کاستی های مدل گودمن می توان به پیش بینی ضعیف رفتار برشی درزه در شرایطی که سختی برشی درزه کم است، اشاره کرد. همچنین، مدل گودمن از سه بخش به منظور پیش بینی رفتار برشی درزه استفاده می کند که شامل ناحیه پیش از مقدار حداکثر، ناحیه بین مقدار حداکثر و مقدار باقی مانده و ناحیه پس از مقدار باقی مانده است؛ در حالی که روش یوسفزاده و سالاری راد، رفتار برشی درزه را در دو بخش پیش و پس از مقدار حداکثر پیش بینی می کند و به این ترتیب، مشکلات موجود در روش گودمن در این روش اصلاح شده است [۳].

مدل تجربی ارائه شده در روش یوسفزاده و سالاری راد، مطابق روابط ذیل ارائه شده است.

$$\tau = \left( -\frac{\tau_p}{u_p^2} \right) (u - u_p)^2 + \tau_p \quad u \leq u_p \quad (20)$$

13-Constant Normal Stress

14-Constant Normal Stiffness

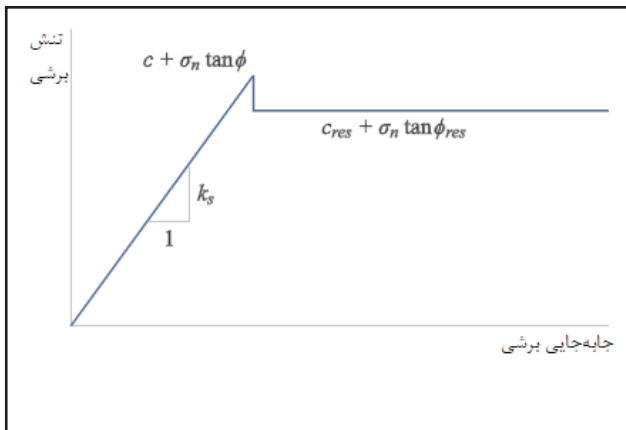
جدول ۱- مقادیر کمیت‌های موجود در مسئله

$B_0$	$i_0 (^{\circ})$	$\sigma_T$ (MPa)	$k_{ni}$ (MPa/mm)	$V_m$ (mm)	$\phi_u (^{\circ})$	$S_r$ (MPa)	$\phi_r (^{\circ})$	$u_p$ (mm)	$u_r$ (mm)
۰/۷۵	۱۲	۱۱	۲	۰/۲	۳۰	۱۵	۳۲	۱/۵	۵/۵

مدل، به محض این که مقدار تنش برشی به مقدار حداکثر برسد، مقاومت برشی مطابق شکل ۴، به صورت ناگهانی نزول می‌کند و از آن پس، مقدار مقاومت برابر با مقاومت باقی‌مانده است و مقدار مقاومت از مقدار مذکور بیشتر نخواهد شد. مقدار مقاومت باقی‌مانده مطابق رابطه ۲۷ قابل محاسبه است [۸].

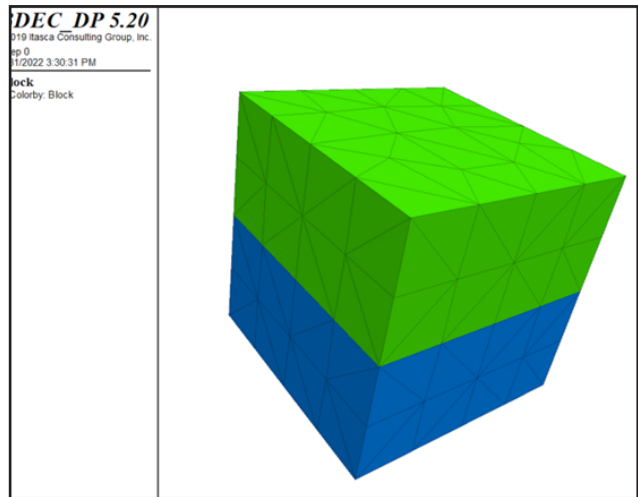
$$S_F^{Res} = \sigma_n \tan \phi_{res} + c_{res} \quad (27)$$

که در رابطه فوق،  $c_{res}$  برابر با چسبندگی باقی‌مانده و  $\phi_{res}$  بیانگر زاویه اصطکاک باقی‌مانده است.



شکل ۴- نمودار تنش برشی، جابه‌جایی برشی بر اساس مدل رفتاری لغزش کولمب [۸]

مطابق شکل ۳ هندسه آزمایش برش مستقیم شبیه‌سازی شده است و مش با ابعاد ۲۵ سانتی‌متر، سرتاسر مدل را در بر گرفته است. سپس خواص مواد و مصالح تشکیل‌دهنده بلوک‌ها و مدل رفتاری مربوط به رفتار درزه‌ها و همچنین مدل رفتاری مربوط به تغییر شکل بلوک‌ها تخصیص یافته است. مدل رفتاری مربوط به تغییر شکل بلوک‌ها به صورت ساده و الاستیک در نظر گرفته شده است و به منظور مدل‌سازی رفتار مربوط به درزه‌ها، از مدل لغزش کولمب<sup>۱۵</sup> که در ادامه توضیح داده شده، استفاده شده است. سختی درزه‌ها برابر با سختی مدل جابه‌جایی ثابت روش گودمن در سطح تنش قائم ۱۱ مگاپاسکال در نظر گرفته شده است.



شکل ۳- هندسه و مش آزمایش برش مستقیم

## ۵-۲- اعمال شرایط مرزی و حل مدل

پس از ساخت هندسه و تعیین و تخصیص خصوصیات مربوط به رفتار مواد و مصالح و ایجاد شبکه مش و تقسیم هندسه مدل به ریزالمان‌ها، شرایط مرزی متناظر با آزمایش برش مستقیم بر روی بلوک آبی رنگ تحتانی اعمال شده و این بلوک در تمام جهات ثابت و بدون حرکت در نظر گرفته شده است. پس از اعمال شرایط مرزی، مدل به تعادل رسیده و نمودار نیروی نامتعادل کننده<sup>۱۶</sup> بر حسب تعداد حلقه حل، مطابق شکل ۵ نمایش داده شده است.

## ۶- بحث و نتایج

در پایان، نتایج حاصل از روش جابه‌جایی ثابت گودمن، روش تحلیلی یوسف‌زاده و سالاری‌راد در شرایط CNL، روش ساب و آمادئی در شرایط CNL و روش تجربی یوسف‌زاده و سالاری‌راد، مطابق نمودار شکل ۶ با نتایج حاصل از مدل‌سازی عددی به روش اجزای مجزای سه‌بعدی مقایسه شده است.

## ۵-۱- مدل رفتاری لغزش کولمب

مدل لغزش موهر کولمب مدلی است که بر اساس رفتار خطی سختی، حد جاری شدن، سختی الاستیک و با در نظر گرفتن خواص مقاومتی نظیر اصطکاک، چسبندگی، مقاومت کششی و خواص اتساعی متناظر با رفتار درزه و ناپیوستگی توسعه یافته است. همچنین، این مدل، با کاهش چسبندگی و مقاومت کششی، قادر به شبیه‌سازی رفتار کاهش مقاومت متناسب با جابه‌جایی است. در این مدل رفتاری، تنش‌های قائم و برشی تا رسیدن به مقدار حداکثر، به صورت الاستیک افزایش می‌یابند. مقدار تنش برشی حداکثر مطابق رابطه ۲۶ قابل محاسبه است [۸].

$$S_F^{Peak} = \sigma_n \tan \phi + c \quad (26)$$

که در رابطه فوق،  $S_F^{Peak}$  مقدار حداکثر مقاومت برشی،  $c$  مقدار چسبندگی و باقی‌کمیت‌ها پیش از این توضیح داده شده است. در این



مطابق نتایج جدول فوق مشاهده می‌شود که مقادیر پیش‌بینی شده توسط تمامی روش‌ها قابل قبول است، اما روش تحلیلی یوسفزاده و سالاری‌راد بیشترین میزان خطا را داراست. همچنین، مطابق نمودار ترسیم‌شده در شکل ۶ مشاهده می‌شود که نتایج حاصل از مدل‌سازی عددی منطبق با نتایج حاصل از دیگر روش‌ها است که همین امر حاکی از توانایی روش عددی در تحلیل رفتار برشی درزه‌ها و ناپیوستگی‌ها است.

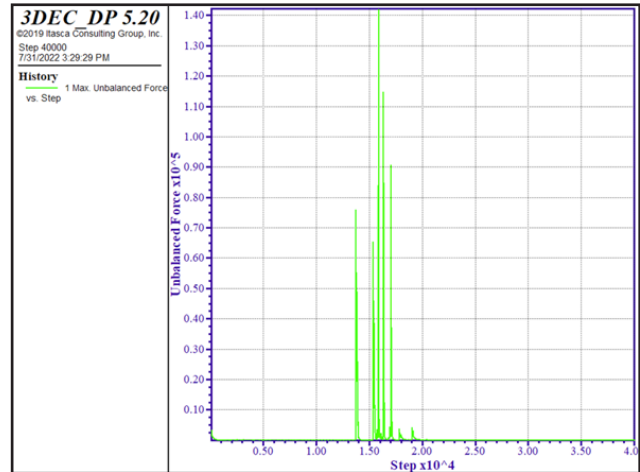
## ۷- نتیجه‌گیری و پیشنهادات

در این مقاله رفتار برشی درزه‌ها و ناپیوستگی‌ها با استفاده از سه روش تحلیلی، تجربی و عددی بررسی و بحث شده است. به همین منظور، آزمایش برش مستقیم به روش اجزای مجزا سه‌بعدی شبیه‌سازی شده و نتایج حاصل از مدل عددی با نتایج حاصل از دیگر روش‌ها مقایسه شده است. از مقایسه بین انواع روش‌ها می‌توان به ترتیب ذیل نتیجه‌گیری کرد: روش عددی اجزای مجزا سه‌بعدی روش مناسب و قدرتمندی به منظور پیش‌بینی رفتار برشی درزه‌ها است، به‌خصوص در مسائل مهندسی با هندسه پیچیده همچون تحلیل پایداری شيروانی‌های سنگی که شرایط CNL بر مسئله حاکم است و روش‌های تجربی و تحلیلی قادر به تحلیل هندسه پیچیده مسئله نیستند.

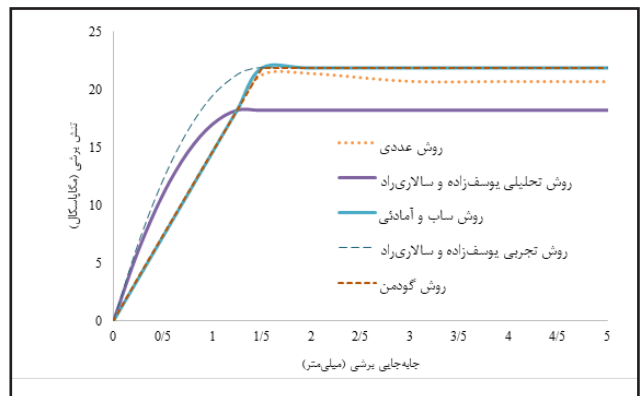
روش تجربی ارائه شده توسط یوسفزاده و سالاری‌راد قادر به پیش‌بینی رفتار غیرخطی درزه‌ها و ناپیوستگی‌ها است. روش تحلیلی یوسفزاده و سالاری‌راد مقادیر تنش برشی حداکثر و باقی‌مانده را کمتر از مقادیر حاصل شده توسط دیگر روش‌ها پیش‌بینی می‌کند و به نظر می‌رسد روش یادشده نیاز به اصلاح دارد. روش گودمن تنها قادر به پیش‌بینی رفتار برشی درزه‌ها به صورت خطی است؛ اما به دلیل سادگی مدل یادشده، می‌توان از این روش در تحلیل‌های ساده و مسائل کم‌اهمیت‌تر استفاده نمود.

## ۸- منابع و مراجع

- [1] S. Thirukumar and B. Indraratna, 2016. A review of shear strength models for rock joints subjected to constant normal stiffness. *J. Rock Mech. Geotech. Eng.*, 8(3), 405–414, doi: 10.1016/j.jrmge.2015.10.006.
- [2] T. S. Gaginella, J. F. Kachur, and R. E. Goodman, 1976. *Methods of geological engineering in discontinuous rocks*. West Group, 256(1), doi: 10.1152/ajpgi.1989.256.1.g1.
- [3] A. Usefzadeh, H. Yousefzadeh, H. Salari-Rad, and M. Sharifzadeh, 2013. Empirical and mathematical formulation of the shear behavior of rock joints. *Eng. Geol.*, 164, 243–252, doi: 10.1016/j.enggeo.2013.07.013.
- [4] S. Saeb and B. Amadei, 1992. Modelling rock joints under shear and normal loading. *International journal of rock mechanics and mining sciences & geomechanics abstracts*, 29(3), 267–278, doi: 10.1016/0148-9062(92)93660-C.



شکل ۵- نمودار نیروی نامتعادل کننده بر حسب تعداد حلقه حل



شکل ۶- مقایسه نتایج حاصل از روش‌های تحلیلی و تجربی با نتایج حاصل از روش عددی اجزای مجزا سه‌بعدی در پیش‌بینی مقادیر تنش برشی نسبت به جابه‌جایی برشی در شبیه‌سازی آزمایش برش مستقیم

جدول ۲- مقایسه مقادیر تنش برشی حداکثر پیش‌بینی شده توسط انواع روش‌ها

روش	جابه‌جایی ثابت گودمن	تحلیلی یوسفزاده و سالاری‌راد (CNL)	ساب و آمادئی (CNL)	روش عددی
تنش برشی حداکثر (مگا پاسکال)	۲۱/۸۷	۱۸/۲۳	۲۱/۸۷	۲۱/۳۵
خطا (%)	۰	۹/۰۸	۰	۱/۲۰



[7]M. Bahaaddini, G. Sharrock, and B. K. Hebblewhite, 2013. Numerical direct shear tests to model the shear behaviour of rock joints. *Comput. Geotech.*, 51, 101–115, doi: 10.1016/j.compgeo.2013.02.003.

[8]<http://docs.itascacg.com/3dec700/3dec/docproject/source/theory/mohrcoulomb/mohrcoulomb.html?node2178>

[5]H. Lin, S. Xie, R. Yong, Y. Chen, and S. Du, 2019. An empirical statistical constitutive relationship for rock joint shearing considering scale effect. *Comptes Rendus Mécanique*, 347(8), 561–575.

[6]J.-W. W. Park and J.-J. J. Song, 2009. Numerical simulation of a direct shear test on a rock joint using a bonded-particle model. *Int. J. Rock Mech. Min. Sci.*, 46(8), 1315–1328, doi: 10.1016/j.ijrmms.2009.03.007.

