





دانشکده پردیس خوارزمی
رشته معدن گرایش استخراج
پایان نامه کارشناسی ارشد

مطالعه عددی تاثیر مقیاس و جهت بارگذاری در مقاومت و تغییرشکل پذیری توده سنگ درزه‌دار
مطالعه موردی معدن زغالسنگ طزره

نگارنده: میلاد عرب عامری

استاد راهنما:

دکتر حسین میرزایی نصیر آباد

مشاور:

مهندس نادر زیاری

شهریور ۱۳۹۵

شکر و قدردانی

در کرد آوری این پایان نامه یاری های فراوان استاد ارجمند جناب آقای دکتر حسین میرزایی به مثابه ی چراغ روشنی در

پیشرفت امر دسیری پرپیچ و خم بوده است. به همین منظور، به جاست که از زحمات بی بدیل ایشان و نیز همراهی

مهندس نادر زیاری نهایت سپاس را داشته باشم.

ماحصل آموخته ایم را تقدیم می‌کنم به آنان که مهر آسمانی شان آرام بخش آلام زمینی ام است

به استوارترین تکیه گاهم، دستان پر مهر پدرم

به سبزترین نگاه زندگیم، چشمان سبز مادرم

که هرچه آموختم در مکتب عشق شما آموختم و هرچه بگو شتم قطره ای از دریای بی کران مهربانیتان را سپاس توانم بگویم .

امروز، هستی ام به امید شماست و فردا گلید باغ به شتم رضای شما

بوسه بردستان پر مهرتان

تعهد نامه

اینجانب میلاد عرب عامری دانشجوی دوره کارشناسی ارشد رشته مهندسی معدن گرایش استخراج معدن از دانشکده

پردیس خوارزمی دانشگاه صنعتی شاهرود نویسنده پایان نامه کارشناسی ارشد تحت عنوان: **مطالعه عددی تاثیر**

مقیاس و جهت بارگذاری در مقاومت و تغییر شکل پذیری توده سنگ درزه دار- مطالعه موردی معدن

زغالسنگ طزره تحت راهنمایی جناب آقای دکتر حسین میرزایی نصیر آباد متعهد می شوم:

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

تاریخ

امضای دانشجو

مالکیت نتایج و حق نشر

- کلیه حقوق این اثر و محصولات آن (مقالات مستخرج، کتاب، برنامه‌های رایانه‌ای، نرم افزارها و تجهیزات ساخته شده) مربوط به دانشگاه صنعتی شاهرود می‌باشد. این مطلب باید به نحو مقتضی در تولیدات علمی مربوطه ذکر شود.
- استفاده از اطلاعات و نتایج موجود در پایان نامه بدون ذکر مرجع مجاز نمی‌باشد.

چکیده

آگاهی از میزان مقاومت و تغییرشکل‌پذیری توده‌سنگ‌های درزه‌دار از جمله ملزومات اساسی در اجرای پروژه‌های گوناگون ژئومکانیکی است. با این وجود، آزمون‌های آزمایشگاهی نمونه‌های بکر سنگ نمی‌تواند اطلاعاتی درباره مقاومت و تغییرشکل توده‌سنگ‌های شامل شکستگی‌هایی به ابعاد و جهت‌یابی‌های مختلف ارائه کند. از آزمون‌های آزمایشگاهی و برجا و همچنین روش‌های تجربی، تحلیلی و عددی می‌توان در این زمینه استفاده کرد. روش‌های عددی در قیاس با رویکردهای تجربی و تحلیلی دارای این مزیت هستند که با استفاده از آن‌ها می‌توان تاثیر مقیاس و جهت‌گیری درزه‌ها را به‌طور مستقیم در مدل‌سازی دخیل کرد.

در این پایان‌نامه رفتار مقاومتی و تغییرشکل توده‌سنگ درزه‌دار محدوده معدن زغالسنگ طزره مورد مطالعه قرار گرفته است. اطلاعات ناپیوستگی‌ها در محدوده معدن زغالسنگ طزره برداشت شده و سپس با استفاده از نرم‌افزار *dips* دسته درزه‌های غالب تعیین شده است. آزمون‌های فشاری تک محوره روی نمونه‌های گرفته شده از محدوده انجام شده و مقادیر تجربی مقاومت و مدول تغییرشکل‌پذیری توده‌سنگ مورد نظر با استفاده از نتایج آزمون‌های آزمایشگاهی سنگ بکر تخمین زده شده است. در مرحله بعد و پس از تحلیل آماری، تابع توزیع احتمال ناپیوستگی‌ها مشخص شده و وارد نرم‌افزار مدل‌سازی گردیده است. یک توده‌سنگ حاوی شبکه‌ای از دسته درزه‌های مجزا در محیط نرم‌افزار *3DEC* مدل‌سازی شده و رفتار آن تحت بارگذاری تک محوره در جهت محورهای مختصات عمومی بررسی شده است. در نهایت، رفتار مقاومتی و تغییرشکل‌پذیری مدل عددی شبیه‌سازی شده تحت بارگذاری تک محوره در این جهت‌ها و در ابعاد گوناگون مورد بررسی قرار گرفته است. بررسی تاثیر مقیاس با هدف تعیین حجم معرف اولیه توده‌سنگ در تحلیل‌های مقاومت و تغییرشکل‌پذیری تحت شرایط بارگذاری مذکور انجام شده و مشخص شده است که با افزایش ابعاد بلوک، مقاومت و مدول تغییرشکل‌پذیری توده‌سنگ درزه‌دار کاهش می‌یابد و مقدار تغییرات مقاومت و مدول تغییرشکل‌پذیری در شرایط بارگذاری مختلف متفاوت است. ابعاد حجم معرف توده‌سنگ در تحلیل مقاومت تک محوره برای بارگذاری در جهت مخالف محورهای x ، y و z به ترتیب برابر با ۳، ۲/۵ و ۳ متر و برای تحلیل تغییرشکل‌پذیری به ترتیب برابر با ۲، ۲ و ۴ متر به دست آمده است. همچنین، مقاومت تک محوری برای بارگذاری در جهت مخالف محورهای x ، y و z به ترتیب برابر با ۴۱، ۲۴ و ۲۵ مگاپاسکال و مدول تغییرشکل‌پذیری به ترتیب معادل ۱۶، ۲۲/۴ و ۲۱/۱ گیگاپاسکال بوده است. در پایان نتایج

حاصل از مدل‌سازی عددی با روش‌های تجربی مقایسه شده و مشاهده شده است که نتایج روش‌های تجربی مبتنی بر سیستم طبقه‌بندی Q تطابق بیشتری با نتایج مدل‌سازی عددی دارند.

کلمات کلیدی: مدول تغییرشکل، مقاومت، مدل‌سازی عددی، روش اجزای مجزا، توده‌سنگ درزه‌دار، شبکه شکستگی مجزا

فصل اول: مقدمه.....	۱
۱-۱- کلیات.....	۲
۲-۱- طرح مساله.....	۳
۳-۱- قلمرو تحقیق.....	۵
۴-۱- مروری بر فصول آتی.....	۶
فصل دوم: مروری بر مطالعات انجام شده در زمینه بررسی مقاومت و تغییرشکل توده سنگ	
درزه دار.....	۷
۱-۲- مقدمه.....	۸
۲-۲- روش های تجربی.....	۹
۳-۲- روش های تحلیلی.....	۱۵
۴-۲- روش های عددی.....	۲۴
۵-۲- جمع بندی.....	۳۰
فصل سوم: مطالعات آزمایشگاهی، میدانی و تجربی در محدوده معدن زغالسنگ طزره.....	
۱-۳- مقدمه.....	۳۴
۲-۳- معرفی منطقه مورد مطالعه.....	۳۴
۳-۳- زمین شناسی عمومی منطقه.....	۳۵
۱-۳-۳- منطقه طزره.....	۳۶
۱-۱-۳-۳- معدن کلاریز.....	۳۷
۲-۱-۳-۳- معدن رزمجا.....	۳۷
۳-۱-۳-۳- معدن کلمدر.....	۳۸
۲-۳-۳- چینه شناسی.....	۳۸
۳-۳-۳- تکتونیک.....	۳۹
۴-۳- برداشت ناپیوستگی ها.....	۴۰
۵-۳- زمین شناسی مهندسی منطقه.....	۴۳
۶-۳- مطالعات آزمایشگاهی.....	۴۴
۱-۶-۳- آزمایش مقاومت فشاری تک محوره.....	۴۵
۱-۱-۶-۳- آماده سازی نمونه.....	۴۵
۲-۱-۶-۳- نتایج آزمایش مقاومت فشاری.....	۴۸
۷-۳- رده بندی توده سنگ.....	۵۱
۱-۷-۳- شاخص کیفیت توده سنگ (RQD).....	۵۱

۵۲	..... رده‌بندی ژئومکانیکی یا <i>RMR</i>
۵۴	..... رده‌بندی <i>Q</i>
۵۵	..... تخمین تجربی مدول دگرشکل‌پذیری.....
۵۵	..... تخمین مدول دگرشکل‌پذیری با استفاده از <i>Q</i>
۵۶	..... تخمین مدول دگرشکل‌پذیری با استفاده از <i>RMR</i> و <i>GSI</i>
۵۹	..... تخمین مدول دگرشکل‌پذیری با استفاده از <i>RQD</i>
۶۰	..... تخمین تجربی مقاومت.....
۶۱	..... جمع‌بندی.....

فصل چهارم: مدل سازی عددی سه بعدی توده‌سنگ با هدف بررسی تاثیر مقیاس و جهت

۶۳	..... بارگذاری بر مقاومت و مدول تغییرشکل‌پذیری.....
۶۳	..... ۱-۴ مقدمه.....
۶۵	..... ۲-۴ نرم‌افزار مورد استفاده.....
۶۶	..... ۳-۴ مدل سازی توده‌سنگ درزه‌دار.....
۶۷	..... ۱-۳-۴ ساخت شبکه شکستگی‌های مرجع.....
۷۱	..... ۲-۳-۴ ساخت مدل‌های بلوکی.....
۷۴	..... ۳-۳-۴ اعمال شرایط مرزی و واسنجی مدل.....
۷۶	..... ۴-۳-۴ نحوه اندازه‌گیری تنش و کرنش.....
۷۷	..... ۴-۴ بررسی مقاومت توده‌سنگ.....
۷۷	..... ۱-۴-۴ تاثیر مقیاس بر مقاومت تک محوره.....
۷۸	..... ۲-۴-۴ تعیین حجم معرف اولیه براساس مقاومت توده‌سنگ.....
۸۱	..... ۳-۴-۴ تاثیر جهت بارگذاری بر مقاومت تک محوره.....
۸۳	..... ۴-۴-۴ تاثیر جهت بارگذاری بر حجم معرف مشخصه مقاومتی.....
۸۴	..... ۵-۴ بررسی تغییرشکل‌پذیری توده‌سنگ.....
۸۵	..... ۱-۵-۴ تعیین حجم معرف اولیه براساس مدول تغییرشکل‌پذیری.....
۸۶	..... ۶-۴ جمع‌بندی.....

فصل پنجم: نتیجه‌گیری و پیشنهادات.....

۸۸	..... ۱-۵ جمع‌بندی و نتیجه‌گیری.....
۹۱	..... ۲-۵ پیشنهادات.....

پیوست‌ها.....

۹۳	.....
۱۰۰	..... منابع.....

فهرست اشکال

- شکل ۱-۲: سیستم لایه‌های ارتورومبیک..... ۱۹
- شکل ۱-۳: موقعیت جغرافیایی معادن زغالسنگ طزره..... ۳۶
- شکل ۲-۳: نمایی از چین خوردگی های منطقه..... ۳۹
- شکل ۳-۳: محدوده مورد مطالعه؛ (الف) زون A و (ب) زون B ۴۲
- شکل ۴-۳: نگاره استریوگراف حاصل از داده های خط برداشت در زون A ۴۳
- شکل ۵-۳: (الف) نمایی از رخنمون ماسه سنگ؛ (ب) بلوک های سطحی..... ۴۶
- شکل ۶-۳: فرآیند گرفتن مغزه از بلوک های سنگی..... ۴۶
- شکل ۷-۳: مغزه‌های گرفته شده از زون A : (الف) بلوک ۱؛ (ب) بلوک ۲ و (ج) بلوک ۳..... ۴۷
- شکل ۸-۳: آماده سازی سطوح انتهایی نمونه ها..... ۴۷
- شکل ۹-۳: مغزه‌های آماده سازی شده بر اساس استاندارد $ISRM$ ۴۸
- شکل ۱۰-۳: تصویر نمونه ها قبل و بعد از آزمایش تک محوره (الف) AI و (ب) $A2$ ۴۸
- شکل ۱۱-۳: نمودار تنش - کرنش محوری نمونه های مختلف ماسه سنگ محدوده مورد مطالعه..... ۴۹
- شکل ۱۲-۳: نمودار تنش - کرنش جانبی نمونه های مختلف ماسه سنگ محدوده مورد مطالعه..... ۵۰
- شکل ۱۳-۳: محدوده همبستگی بین مدول تغییرشکل و امتیازهای RMR یا GSI برای ماسه سنگ طزره..... ۵۸
- شکل ۱۴-۳: نمودار نسبت مدولی در برابر RQD ۵۹
- شکل ۱-۴: شبکه شکستگی مرجع..... ۶۸
- شکل ۲-۴: واحدهای شدت درزه داری..... ۶۹
- شکل ۳-۴: مدل های درزه دار هم مرکز با ابعاد متفاوت..... ۷۱
- شکل ۴-۴: مفهوم حجم معرف اولیه..... ۷۲
- شکل ۵-۴: نحوه تخصیص خواص متفاوت به قسمت درونی و بیرونی یک شکستگی واقع در یک صفحه درزه..... ۷۳
- شکل ۶-۴: مدل عددی سنگ بکر..... ۷۵
- شکل ۷-۴: نمودار تنش - کرنش مدل عددی بکر..... ۷۵
- شکل ۸-۴: شرایط بارگذاری در راستای محورهای مختصات اصلی..... ۷۶
- شکل ۹-۴: مختصات نقاط برداشت جابجایی..... ۷۷
- شکل ۱۰-۴: منحنی تنش-کرنش محوری در هنگام بارگذاری در جهت Z ۷۸
- شکل ۱۱-۴۰: تعیین ابعاد REV براساس مقاومت در هنگام بارگذاری در جهت Z ۸۰
- شکل ۱۲-۴: منحنی تنش-کرنش محوری در هنگام بارگذاری در جهت: (الف) X و (ب) Y ۸۲
- شکل ۱۳-۴: تاثیر جهت بارگذاری بر ابعاد REV مشخصه مقاومتی..... ۸۳
- شکل ۱۴-۴۰: منحنی‌های تنش-کرنش برای بلوک به ابعاد ۳ متر..... ۸۴
- شکل ۱۵-۴: تعیین ابعاد REV براساس تغییرشکل پذیری..... ۸۵

فهرست جداول

- جدول ۱-۲: روابط تجربی مدول تغییر شکل پذیری توده سنگ ۱۲
- جدول ۲-۲: روابط تجربی مقاومت توده سنگ ۱۳
- جدول ۳-۲: پارامتر a برای فشارهای محصور کننده مختلف ۲۲
- جدول ۱-۳: جهت یابی خطوط برداشت ۴۳
- جدول ۲-۳: مقدار میانگین ویژگی های هندسی ناپیوستگی ها ۴۴
- جدول ۳-۳: نتایج آزمایش فشاری تک محوره ۵۰
- جدول ۴-۳: طبقه بندی با استفاده از شاخص کیفیت سنگ ۵۱
- جدول ۵-۳: پارامترهای رده بندی ژئومکانیکی ۵۳
- جدول ۶-۳: مقادیر تعدیل برای جهت یابی درزه ها ۵۳
- جدول ۷-۳: کلاس بندی توده سنگ در رده بندی ژئومکانیکی ۵۳
- جدول ۸-۳: امتیاز ماسه سنگ طزره در رده بندی Q ۵۵
- جدول ۹-۳: نتایج مدول دگرشکل پذیری با استفاده از رابطه بارتن ۲۰۰۲ ۵۶
- جدول ۱۰-۳: مقایسه مقادیر تجربی مدول دگرشکل پذیری ۶۰
- جدول ۱۱-۳: مقادیر تجربی مقاومت ماسه سنگ طزره ۶۱
- جدول ۱-۴: چگالی درزه ها در مدل مرجع ۷۰
- جدول ۲-۴: خواص مکانیکی ماسه سنگ بکر طزره ۷۳
- جدول ۳-۴: پارامترهای مکانیکی درزه ها ۷۴

فصل اول: مقدمه

۱-۱- کلیات

ناپیوستگی‌ها دارای مقادیر پایایی متفاوتی از چند میلیمتر تا چند کیلومتر بوده و از معمول‌ترین اجزای تشکیل دهنده توده‌سنگ‌ها هستند. ناپیوستگی‌های بزرگ مقیاس از قبیل گسل و زون‌های برشی در حین فعالیت‌های زمین‌شناسی و زمین‌ساختی تشکیل می‌شوند. ناپیوستگی‌های کوچک مقیاس اعم از درزه‌های ناپایا و شبکه ناپیوستگی‌های مجزا در پی تغییر و به هم خوردن حالت تنش توسط فعالیت‌های مهندسی و یا تکتونیکی شکل می‌گیرند و به طور معمول به شکل شکستگی‌هایی با توزیع تصادفی در ساختار توده‌سنگ مشاهده می‌شوند.

حضور ناپیوستگی‌ها خواص مکانیکی و هیدرولیکی توده‌سنگ را به شدت تحت الشعاع قرار می‌دهد. ناپیوستگی‌ها نسبت به سنگ بکر اجزای بسیار نرم‌تری بوده و همین امر سبب تفاوت رفتار توده‌سنگ در قیاس با سنگ بکر می‌شود. تغییرشکل‌پذیری شکستگی‌های سنگ به شدت غیرخطی بوده و در ترازهای تنش بالا صلبیت بیشتری از خود نشان می‌دهد. بنابراین، تغییرشکل توده‌سنگ‌های درزه‌دار وابسته به تنش است. با توجه به اهمیت تاثیر درزه‌ها در رفتار سنگ، مطالعات آزمایشگاهی بر روی ماده‌سنگ نمی‌تواند کمک شایانی به شناسایی رفتار توده‌سنگ‌های حاوی درزه‌های متعدد نماید. از این‌رو، روش‌های عددی برای مطالعه رفتار چنین محیط‌هایی مورد استفاده قرار گرفته‌اند.

تکنیک‌های مدل‌سازی عددی پیچیده‌تری با پیشرفت قابلیت‌های محاسباتی در سال‌های اخیر مورد استفاده قرار گرفته‌اند. بهره‌گیری از مدل‌های عددی پیشرفته مشارکت جنبه‌های بیشتری از رفتار توده‌سنگ را در مطالعات ممکن ساخته است. همواره توجه ویژه‌ای به مطالعه رفتار مکانیکی درزه‌ها و روش‌های مدل‌سازی آن‌ها همراه با روابط ساختاری حاکم بر رفتار توده‌سنگ معطوف بوده است. پیشرفت‌های مذکور در امر مدل‌سازی سبب ارائه روش‌های جدیدی در زمینه مدل‌سازی ناپیوستگی‌ها شده است که توانایی تعریف شبکه ناپیوستگی مجزا یکی از این پیشرفت‌هاست.

شبیه‌سازی تصادفی شبکه شکستگی‌ها از مطالعات هیدرولیکی صورت گرفته توسط رابینسون [۱] و سهیمی [۲] نشأت گرفته و در مهندسی سنگ در دهه ۱۹۸۰ توسط محققین مختلفی همچون لانگ^۱ و همکاران [۳]، بیکر^۲ [۴]، اندرسون^۳ و همکاران [۵]، درشویتز و اینشتین^۴ [۶] کاربرد گسترده‌تری یافت. رویکرد کلی عبارت از در نظر گرفتن پایایی، موقعیت، جهت‌یابی و دیگر خواص شکستگی‌ها به-عنوان متغیرهای آماری می‌باشد.

۱-۲- طرح مساله

روش‌های رایج در تخمین مقاومت و تغییرشکل‌پذیری توده‌سنگ‌های درزه‌دار را می‌توان به رویکردهای مستقیم و غیرمستقیم تقسیم‌بندی کرد. روش‌های مستقیم شامل آزمون‌های آزمایشگاهی و برجا هستند. نتایج حاصل از آزمون‌های آزمایشگاهی بر روی نمونه‌هایی که تنها حاوی ریزترک‌هایی در اندازه‌های بسیار کوچک هستند به دلیل این که این نمونه‌ها کل طیف اندازه‌های شبکه ناپیوستگی را نمی‌توانند در خود جای دهند، بسیار متفاوت از نتایج به‌دست آمده از بلوک‌های بزرگ مقیاس است. از این‌رو، روش‌های غیرمستقیم برای شبیه‌سازی شرایط واقعی درزه‌ها به کار می‌روند.

روش‌های غیرمستقیم به روش‌های تحلیلی ریاضی، تجربی و مدل‌سازی عددی تقسیم‌بندی می‌شوند. روش‌های تجربی تخمین مقاومت و تغییرشکل توده‌سنگ برپایه انجام همبستگی‌های تجربی استواراند [۷]. در این روش، خصوصیات توده‌سنگ با یکی از شاخص‌های طبقه‌بندی توده‌سنگ که نمایان‌گر کیفیت آن است، ترکیب می‌شود. از آنجایی که حاصل تمامی اندیس‌های طبقه‌بندی

¹Long

²Baecher

³Andersson

⁴Dershowitz and Einstein

پارامترهایی کمی هستند، بیان رفتار مکانیکی ناهمسانگرد و وابسته به مقیاس ناشی از شبکه شکستگی‌ها از طریق آن‌ها ممکن نیست.

در روش‌های تحلیلی همان‌طور که توسط سالامون^۱ [۸]، سینگ^۲ [۹]، مورلند^۳ [۱۰]، آمادئی و گودمن^۴ [۱۱]، جرارد^۵ [۱۲] و فوسوم^۶ [۱۳] عنوان شده است، توده‌سنگ به‌صورت ترکیبی از دو بخش سنگ بکر و درزه‌ها شناخته می‌شود. در این روش‌ها رفتار محیط با در نظر گرفتن رابطه ریاضی بین بار و تغییرشکل برمبنای جمع رفتار هریک از اجزای مذکور، ارزیابی می‌گردد. در استنتاج این روش‌ها سیستم‌های درزه‌داری ساده با پایایی نامتناهی، فاصله‌داری قطعی ثابت و جهت‌یابی مشخص درزه‌ها در نظر گرفته شده‌اند. اما در شرایط واقعی درزه‌ها طول محدودی داشته و پارامترهای هندسی آن‌ها به‌طور ذاتی توزیعی آماری دارند. از طرف دیگر، برهم‌کنش بین درزه‌ها نیز در این روش‌ها منظور نشده است. بنابراین، اقلان فرضیات این مدل‌ها در اغلب شرایط برجای توده‌سنگ بسیار دشوار است.

سومین روش غیرمستقیم موجود، تکنیک عددی است. در این روش با ترکیب خواص مقاومتی و تغییرشکل سنگ بکر و درزه‌ها رفتار متناظر توده‌سنگ محاسبه می‌گردد. این روش اجازه مشارکت هر نوع شبکه‌ای از درزه‌ها (از جمله شبکه شکستگی مجزا) را در توده‌سنگ داده و همچنین برهم‌کنش بین درزه‌ها و سنگ بکر را نیز در نظر می‌گیرد.

با توجه به مطالب فوق، استفاده از مدل‌سازی عددی برای مطالعه رفتار مقاومتی و تغییرشکل توده-سنگ‌های حاوی درزه‌های ناپایا روشی بسیار مفید در راستای درک چگونگی تاثیر پارامترهای هندسی

¹ Salamon

² Singh

³ Morland

⁴ Amadei and Goodman

⁵ Gerrard

⁶ Fossum

در پاسخ محیط به بارهای اعمالی است. بدین ترتیب، از این طریق می‌توان تاثیر مقیاس و خواص هندسی شبکه ناپیوستگی را در صورت در دست بودن خواص درزه‌داری در یک توده‌سنگ مفروض با پارامترهای ژئومکانیکی مشخص بررسی نمود.

۱-۳- قلمرو تحقیق

آگاهی از پارامترهای ژئومکانیکی توده‌سنگ درزه‌دار از جمله مقاومت فشاری و مدول تغییرشکل-پذیری و همچنین پارامترهای موثر بر آن‌ها در حوزه‌های مختلف مهندسی سنگ نظیر طراحی سیستم نگهداری فضاها، زیرزمینی، پایداری شیروانی‌ها، مطالعه ساختگاه سدها و ... ضروری می‌باشد. اندازه بلوک انتخابی از توده‌سنگ و نحوه قرارگیری درزه‌ها نسبت به جهت بارگذاری دو پارامتر موثر در مقدار خصوصیات ژئومکانیکی توده‌سنگ هستند. هدف این پایان نامه بررسی تاثیر مقیاس و جهت‌گیری درزه‌ها نسبت به بار اعمالی در رفتار مقاومتی و تغییرشکل توده‌سنگ درزه‌دار است. بدین منظور، اطلاعات ناپیوستگی‌ها در محدوده معدن زغالسنگ طزره برداشت و سپس با استفاده از نرم-افزار *dips* دسته درزه‌های غالب تعیین شد. در مرحله بعد ابتدا با استفاده از روش‌های تجربی، مقاومت و مدول تغییرشکل‌پذیری توده‌سنگ ارزیابی شده و سپس بعد از تحلیل آماری، تابع توزیع احتمال ناپیوستگی‌ها تعیین شده و اطلاعات وارد نرم‌افزار مدل‌سازی گردید. یک توده‌سنگ حاوی شبکه درزه‌های مجزا در محیط نرم‌افزار *3DEC 5.0* مدل‌سازی شده و رفتار آن تحت شرایط مختلفی از جهت بار اعمالی با تخصیص خصوصیات ژئومکانیکی واقعی بررسی شده است.

۱-۴- مروری بر فصول آتی

در این بخش مباحث مورد بررسی در هر کدام از فصل‌های پایان نامه حاضر به جهت ارائه دورنمایی مناسب از مطالب گنجانده شده در آن به اختصار آورده شده است. این پایان‌نامه به طریق زیر مشتمل بر ۵ فصل می‌شود:

فصل ۲ به مرور مطالعات انجام شده توسط پژوهشگران مختلف در زمینه تحلیل مقاومت و تغییرشکل-پذیری توده‌سنگ‌های درزه‌دار با تأکید بر شبکه شکستگی مجزا می‌پردازد. در این فصل مطالعات انجام شده در زمینه بررسی رفتار مکانیکی توده‌سنگ درزه‌دار ارائه شده و عوامل موثر بر رفتار مکانیکی توده‌سنگ تشریح شده اند.

فصل ۳ در بر گیرنده اطلاعات مربوط به محدوده مورد مطالعه است. در این فصل خواص توده‌سنگ در بر گیرنده لایه‌های زغالسنگ در معدن طزره بیان شده و مراحل تعیین خواص مکانیکی ماده‌سنگ و برداشت ناپیوستگی‌های واقع در منطقه مذکور توضیح داده شده است. در ادامه فصل ۳ مقاومت و مدول تغییرشکل‌پذیری توده‌سنگ درزه‌دار با استفاده از روش‌های تجربی مبتنی بر سیستم‌های رده-بندی سنگ تخمین زده می‌شود.

مراحل مدل‌سازی عددی توده‌سنگ درزه‌دار حاوی درزه‌های مجزا در فصل ۴ عنوان می‌شود. تکنیک مورد استفاده جهت مدل‌سازی در این تحقیق روش اجزای مجزا می‌باشد. اثر مقیاس بر رفتار مقاومتی و تغییرشکل مدل‌های عددی مورد بررسی قرار گرفته و ابعاد حجم معرف توده‌سنگ درزه‌دار به دست آمده است. تاثیر جهت بارگذاری بر مقاومت و مدول تغییرشکل‌پذیری حجم معرف توده‌سنگ نیز در این فصل بررسی شده و مقایسه‌ای بین نتایج تجربی و عددی انجام می‌شود.

فصل ۵ نیز ضمن جمع‌بندی مطالب شامل نتیجه‌گیری و پیشنهادات حاصل از این پژوهش می‌باشد. در این فصل همچنین تطابق نتایج انواع روش‌های تجربی و عددی بررسی می‌گردد.

فصل دوم: مروری بر مطالعات انجام شده در زمینه بررسی مقاومت و تغییر شکل توده سنگ

درزه دار

۲-۱- مقدمه

تلاش برای پی بردن به نحوه رفتار توده‌سنگ‌های درزه‌دار در برابر بارهای اعمالی تاریخچه‌ای طولانی دارد و رویکردهای عددی، تحلیلی و تجربی مختلفی در این زمینه پیشنهاد شده است. روش‌های تجربی یکی از روش‌های غیرمستقیم تخمین مقاومت و تغییرشکل‌پذیری توده‌سنگ است. در این روش با استفاده از سیستم‌های طبقه‌بندی همچون RMR ، RQD و Q که مبتنی بر تجارب مهندسی حاصل از پروژه‌های پیشین هستند، رفتار توده‌سنگ پیش‌بینی می‌شود.

رفتار توده‌سنگ در روش‌های تحلیلی با توجه به ساده‌سازی‌های هندسی و ترکیب رفتار مجزای سنگ بکر و درزه‌های سیستماتیک مورد مطالعه قرار می‌گیرد. نمونه این روش برای سنگ‌های دارای لایه-بندی [۸]، مجموعه درزه^۱ و درزه‌های متعامد^۱ [۱۱]، صفحات لایه‌بندی ارتورومبیک^۲ [۱۲] و توده‌سنگ‌های با درزه‌های تصادفی [۱۵] ارائه شده است.

روش‌های عددی را می‌توان با انعطاف بیشتر در تخصیص خواص مکانیکی و هندسی ناپیوستگی‌ها برای محاسبه مقاومت و تغییرشکل‌پذیری سنگ‌های درزه‌دار به‌کار برد. این روش‌ها با توجه به پیشرفت روز افزون در جنبه‌های مدل‌سازی محیط‌های پیوسته و ناپیوسته به‌منظور مطالعه رفتار مقاومتی و تغییرشکل توده‌سنگ مورد استفاده قرار می‌گیرند. روش‌های اجزای مجزا و اجزای محدود پرکاربردترین روش‌ها در مسائل مهندسی سنگ هستند. از آنجایی که فرمولاسیون روش اجزای محدود مبتنی بر فرضیات مربوط به یک محیط پیوسته عمومی است، تعریف تاثیر تعداد زیادی از درزه‌ها (که هر یک اندازه، جهت و رفتار خاص خود را دارند) در این روش با پیچیدگی‌هایی روبرو است.

¹ Orthogonal joints

² Orthorhombic

روش اجزای مجزا توسط کاندال^۱ [۱۶] ارائه شده و سپس به وسیله وی و همکارانش [۱۷] توسعه یافته است. این روش به دلیل مزیتی که در نمایش صریح هندسه سیستم درزه‌ها و رفتارهای ساختاری سنگ بکر و ناپیوستگی‌ها دارد، تکنیک قدرتمندی برای اجرای تحلیل تنش توده‌سنگ‌های بلوکی متشکل از چندین ناپیوستگی است. بنابراین، هر دو رویکرد قطعی و تصادفی را می‌توان در این قبیل ارزیابی‌ها توسط روش اجزای مجزا به کار برد. به دلیل این‌که سیستم درزه‌ها در توده‌سنگ از لحاظ هندسی پیچیده بوده و در زیر سطح زمین غیرقابل دسترسی هستند، توزیع تصادفی درزه‌ها مبتنی بر توابع توزیع آماری پارامترهای هندسی مورد نیاز اند [۱۴]. برخی از تحقیقات منتشره در زمینه مدل-سازی اجزای مجزا شامل پارک و همکاران [۱۹]، کریستینسن^۲ و همکاران [۲۰]، کیم و همکاران [۲۱]، نوئل و آرشامبولت^۳ [۲۲]، ژانگ و همکاران [۲۳]، کاندال و همکاران [۱۷]، سینگ و سینگ [۲۴]، اسماعیلی و همکاران [۲۵]، وو و کولاتیلاک^۴ [۲۶]، خانی و همکاران [۲۷] و بیدگلی و همکاران [۲۸] می‌شود.

۲-۲- روش‌های تجربی

روش‌های تجربی از جمله پر کاربردترین و ساده ترین روش‌های غیرمستقیم برآورد مقاومت و دگرشکل‌پذیری توده‌سنگ هستند. یکی از انواع روش‌های تجربی برمبنای شاخص درزه‌داری و فاکتور درزه بوده که براساس داده‌های حاصل از آزمایش بر روی نمونه‌های سنگ بدون درزه و درزه‌دار است. شاخص درزه‌داری به صورت شاخصی از نسبت بین طول نمونه به فاصله‌داری درزه‌ها یا تعداد بلوک‌های موجود در نمونه تعریف می‌شود. همچنین فاکتور درزه به عنوان فاکتوری که نسبت مقاومت را به

¹ Cundall

² Christianson

³ Noel and Archambault

⁴ Wu and Kulatilake

فراوانی، جهت‌گیری و مقاومت درزه مرتبط می‌سازد، تعریف شده است. بنابراین، استفاده از این روش -ها مستلزم دستیابی به اطلاعات پیرامونی موارد ذکر شده است که بسیار زمان بر و پرهزینه هستند [۲۹].

دسته‌ای از روش‌های تجربی که براساس طبقه‌بندی مهندسی سنگ توسعه یافته اند، روش‌هایی رایج و پر کاربرد در مسائل مهندسی می‌باشند که بر پایه تجربیات مهندسی حاصل از پروژه‌های گذشته استوار اند. بررسی رابطه بین مدول تغییرشکل‌پذیری و سیستم‌های طبقه‌بندی توده‌سنگ برای نخستین بار توسط بنیاوسکی در سال ۱۹۷۸ انجام شد و سپس توسط سرافیم و پیرا^۱ [۳۰]، نیکلسون^۲ و بنیاوسکی [۳۱] و میتری^۳ و همکاران [۳۲] تکمیل گردید.

به‌منظور ارزیابی روابط موجود و به‌دست آوردن روابط تجربی جدید آزمایشات متعددی در سال‌های اخیر توسط پایگاه مرکزی تحقیقات خاک و مواد (CSMRS) واقع در دهلی نو انجام شده است. رابطه بین نتایج به‌دست آمده توسط سازمان نامبرده و پارامترهای RMR ، Q و RMI مورد بررسی قرار گرفته و به این منظور مقادیری از مدول تغییرشکل‌پذیری که با اعمال فشار ماکزیمم در آزمایش محاسبه گردیده بودند، مورد استفاده قرار گرفته‌اند. زیرا در فشارهای بالا تاثیر درز و ترک‌ها بر روی آزمایش تا حد زیادی کاهش می‌یابد. مقادیر RMR ، Q و RMI نیز در هر منطقه با استفاده از توصیف منطقه، بررسی مغزه‌های گرفته شده و انجام آزمون‌های آزمایشگاهی محاسبه شده‌اند. به‌منظور حذف تاثیر صدمات ناشی از انفجار بر روی توده‌سنگ مورد آزمایش فاکتور تصحیح $F_f = 3$ در مقادیر E_m به-دست آمده تاثیر داده شده است.

¹ Serafim and Pereira

² Nicholson

³ Mitri

با بررسی رابطه بین مقادیر مدول تغییرشکل اندازه‌گیری شده توسط *CSMRS* و پارامتر *RMR* مشخص شده است که نتایج به‌دست آمده توسط *CSMRS* در حد واسط نتایج بنیادوسکی، سرافیم و پیرا و کلریسی قرار می‌گیرند. با برازش بهترین خط گذرنده از نتایج *CSMRS* و به‌دست آوردن معادله آن تفاوت چندانی با نتیجه به‌دست آمده توسط بنیادوسکی، سرافیم و پیرا مشاهده نشده است [۳۳]. بنابراین، این روابط به‌شرح زیر مورد پذیرش قرار گرفته‌اند:

$$\begin{aligned} E_m &= 2RMR - 100 & RMR > 55 \\ E_m &= 10^{(RMR-10)/40} & RMR < 60 \end{aligned} \quad (1-2)$$

هیوز در سال ۱۹۸۰ براساس مطالعات وسیع روی منابع و تحقیقات پیشین برای تعیین مدول تغییرشکل‌پذیری توده‌سنگ نتیجه گرفت که تغییرات مدول‌های تغییرشکل‌پذیری توده‌های سنگی بین ۲۰ تا ۶۰ درصد مدول الاستیسیته اندازه‌گیری شده سنگ بکر در آزمایشگاه می‌باشد. این بدین معنی است که وقتی مدول الاستیسیته سنگ بکر در آزمایشگاه مشخص می‌شود، می‌توان ۲۰ تا ۶۰ درصد آن را به‌عنوان مدول تغییرشکل‌پذیری توده‌سنگی آن لحاظ کرد [۳۴]. هوک و براون در سال ۱۹۸۰ یک معیار شکست تجربی برای توده‌سنگ ارائه داده‌اند که بر حسب مقادیر تنش‌های اصلی به-صورت رابطه (۲-۲) خواهد بود. تا کنون تلاش‌هایی نیز برای اصلاح معیار هوک و براون [۳۵] و حذف نقص‌های وارد بر آن، صورت گرفته است.

$$\sigma_1 = \sigma_r + \left(m_r \sigma_{cm} \sigma_r + s_r \sigma_{cm}^2 \right)^{1/5} \quad (2-2)$$

$$m_r = \exp\left(\frac{GSI - 100}{28}\right) m_i \quad (3-2)$$

$$s_r = \exp\left(\frac{GSI - 100}{9}\right) \quad (4-2)$$

در این روابط m_r پارامتر مربوط به توده سنگ و s_r مربوط به شکستگی‌ها است که مقادیر هر دوی آن‌ها بر حسب شاخص مقاومت زمین‌شناسی (GSI) توده سنگ مطابق با رابطه فوق قابل محاسبه است. σ_{cm} مقاومت فشاری تک محوری توده سنگ و m_i پارامتر مربوط به جنس سنگ بکر است.

تعداد دیگری از روابط ارائه شده توسط محققین مختلف برای تعیین مدول تغییرشکل پذیری توده سنگ با استفاده از روش‌های طبقه‌بندی توده سنگ در جدول ۱-۲ خلاصه شده است. از روش‌های طبقه‌بندی توده سنگ در تخمین مقاومت آن نیز استفاده شده است. پارامترهای متعددی در انواع روش‌های تجربی برای تعیین مقاومت فشاری تک محوری توده سنگ مورد استفاده قرار می‌گیرند. این پارامترها اغلب به سیستم طبقه‌بندی و ثوابت توده سنگ مربوط هستند. اما مقاومت فشاری سنگ بکر در اکثر روابط به کار می‌رود. برخی از این روابط تجربی در جدول ۲-۲ آورده شده است.

جدول ۱-۲: نمونه‌هایی از معادلات تجربی برآورد مدول تغییرشکل پذیری توده سنگ.

$E_{rm} = E_i / 100 \cdot (0.028 RMR^2 + 0.9 \exp(RMR/22/82))$ $E_i = 5 \cdot GPa$	نیکولسن و بنیاوسکی (۱۹۹۰)	RMR
$E_{rm} = E_i (0.5(1 - \cos(\pi RMR/100)))$ $E_i = 5 \cdot GPa$	میتری و همکاران (۱۹۹۴)	
$E_{rm} = 0.1(RMR/10)^2$	رید و همکاران (۱۹۹۹)	
$E_{rm} = (1 - D/2) \sqrt{\sigma_{ci} / 100} \times 10^{((RMR-10)/4)}$ $D = 0, \sigma_{ci} = 100 MPa$	هوک و همکاران (۲۰۰۲)	
$E_{rm} = E_i (s^a)^{-1/4}, E_i = 5 \cdot GPa$ $s = \exp((GSI - 100) / 9),$ $a = \sqrt{2} + \sqrt{6} (\exp(-GSI / 15)) - \exp(-20/3),$ $GSI = RMR$	سونمز و همکاران (۲۰۰۴)	
$E_{rm} = E_i \times 10^{[(RMR-10)(100-RMR)/4 \dots \exp(-RMR/100)]}$	سونمز و همکاران (۲۰۰۶)	
$E_{rm} = 7 \times (\pm 3) \sqrt{Q'}, Q' = 10 \cdot ((RMR - 44) / 21)$	دیدریش و کایزر (۱۹۹۹)	Q
$E_{rm} = 10 \cdot Q_c^{1/3}$ where $Q_c = Q \sigma_{ci} / 100, \sigma_{ci} = 100 MPa$	بارتن (۲۰۰۲)	
$E_{mass} = 5 / 6 \times RMI^{-1/25} (GPa)$ for $1 > RMI > 0.1$, Moderately Jointed Rock Mass	پالمستروم (۱۹۹۶)	RMi

$E_{mass} = \gamma \times RMI^{1/4} \text{ (GPa)}$ for $1 < RMI < 20$, Moderately Jointed Rock Mass	پالمستروم و سینگ (۲۰۰۱)	
$E_{rm} = 0.135 \left[\frac{E_i (1 + RQD/100)}{WD} \right]^{1/1.11}$	کایاباشی و همکاران (۲۰۰۳)	RQD
$E_{rm} = 0.101 \left[\frac{(E_i / \sigma_{ci})(1 + RQD/100)}{WD} \right]^{1/5.28}$	گوکچه اوغلو و همکاران (۲۰۰۳)	
$E_{mass} = \sqrt{\frac{\sigma_{ci}}{100}} \times 10^{\left(\frac{GSI-10}{40}\right)} \text{ (GPa)}$	هوک و براون (۱۹۹۷)	GSI
$E_{rm} = E_i s^{1/4}$, $E_i = 5 \cdot \text{GPa}$, $s = \exp((GSI - 100)/9)$	کاروالهو (۲۰۰۴)	
$E_{mass} = E_i \left(0.02 + \frac{1 - D/2}{1 + e^{(\epsilon + 15D - GSI)/11}} \right)$	هوک و دیدریش (۲۰۰۶)	

جدول ۲-۲: روابط تجربی برآورد مقاومت توده سنگ درزه دار.

$\sigma_{cm} / \sigma_{ci} = \exp\left[\gamma / 65 \left(\frac{RMR - 100}{100} \right)\right]$	یولبایر و همکاران (۱۹۸۳)
$\sigma_{cm} / \sigma_{ci} = \exp\left[\left(\frac{RMR - 100}{24} \right)\right]$	کالاماراس و بنیاوسکی (۱۹۹۳)
$\sigma_{cm} \text{ (MPa)} = 0.17 \gamma Q^{1/3}$, $\gamma \text{ (kN/m}^2\text{)}$	سینگ (۱۹۹۳)
$\sigma_{cm} \text{ (MPa)} = 0.55 \gamma (N)^{1/3} / B^{1/4}$, N = Q (with SRF = 1), B = tunnel width (m)	گوئل (۱۹۹۴)
$\sigma_{cm} = (\sigma_{ci} / 100) (0.17 \gamma Q^{1/3})$	بیزین و گرمشتاد (۱۹۹۶)
$\sigma_{cm} / \sigma_{ci} = \exp\left[\left(\frac{RMR - 100}{20} \right)\right]$	شئوری (۱۹۹۷)
$\sigma_{cm} / \sigma_{ci} = \left[\frac{RMR}{RMR + 6(100 - RMR)} \right]$	آیدان و دالگیچ (۱۹۹۸)
$\sigma_{cm} = \sigma_{ci} s^a$ $s = \exp[(GSI - 100) / (9 - 3D)]$ $a = 1/2 + (1/6)(e^{-GSI/15} - e^{-2/3})$	هوک و همکاران (۲۰۰۲)
$\sigma_{cm} = 0.5 \gamma Q_c^{1/3}$, $Q_c = Q \cdot \sigma_{ci} / 100$, $Q = Q \text{ (with RQD.)}$	بارتن (۲۰۰۲)
$\sigma_{cm} = \sigma_{ci} \exp\left[\left(\frac{RMR - 100}{25} \right)\right]$	رامامورتی (۲۰۰۴)

روابط ارائه شده توسط گوئل^۱ و سینگ مقادیر بالایی برای مقاومت توده‌سنگ برآورد می‌کنند، در حالی که معادلات ارائه شده توسط بارتون و یولبایر و همکاران مقادیر پایینی را تخمین می‌زنند. همچنین، با استفاده از برخی از این روابط مانند روابط ارائه شده توسط آیدان و دالگیچ^۲ در سال ۱۹۹۸ و بنیاوسکی در سال ۱۹۹۳ مقادیر متوسطی حاصل می‌شود. از طرف دیگر، به نظر می‌رسد که رابطه هوک و همکاران که در سال ۲۰۰۲ ارائه شده و به‌طور وسیعی در نرم‌افزارهای ژئوتکنیکی مورد استفاده قرار می‌گیرد، در پاره‌ای از موارد محافظه کارانه است.

به‌طور کلی مقاومت توده‌سنگ با تضعیف شرایط مقاومتی و پایداری توده‌سنگ کاهش می‌یابد که این امر در نتیجه تاثیر مستقیم مقاومت سنگ بکر و مقادیر به‌دست آمده از سیستم‌های طبقه‌بندی است [۳۶].

همچنین با توجه به این‌که برای توده‌سنگ‌های درزه‌دار معیار مقاومتی توسعه یافته‌ای با استفاده از روش‌های نظری صرف وجود ندارد، معیارهای شکست تجربی که معادلاتی براساس تحلیل داده‌های مربوط به انواع مختلف توده‌سنگ را شامل می‌شوند توسعه یافته و مورد استفاده قرار می‌گیرند. در طول سال‌های گذشته تعداد زیادی از این معیارهای تجربی که بیانگر ارتباط بین تنش‌های اصلی و یا برشی و نرمال عامل بر یک صفحه درزه معین در توده‌سنگ است، توسعه یافته اند. شئوری^۳ در سال ۱۹۹۷ تعدادی از پرکاربردترین معیارهای شکست را مورد مطالعه قرار داده است [۳۷].

گرچه استفاده از این روش‌ها برای برآورد مقاومت و دگرشکلی توده‌سنگ برای کاربردهای خاص طراحی به ویژه در تونل‌سازی مرسوم شده است، ما علاوه بر نیاز به تجربه کافی و دانش مرتبط، هنگام استفاده از این روش‌ها اغلب تخمین‌های بسیار محافظه‌کارانه‌ای در تعیین خواص سنگ ایجاد می‌کنند

¹ Goel

² Aydan and Dalgic

³ Sheorey

که از تعیین طبقه‌بندی شده پارامترها براساس مطالعات موردی سرچشمه می‌گیرد. اصلی‌ترین ضعف این طبقه‌بندی‌ها آن است که فاقد مبنای مکانیکی و ریاضی صحیحی برای برآورد پارامترهای معرف مورد نیاز در ایجاد مدل‌های رفتاری توده‌سنگ بوده و از این‌رو خواص هندسی پیچیده ناپیوستگی‌ها به‌طور قابل قبول و با یک منطق ریاضی درست از لحاظ کمی در این روش‌ها قابل نمایش نیست. به-علاوه ناهمسانگردی پارامترهای مکانیکی در قالب تانسوری که شرط پایه مکانیک پیوسته است، به‌طور مناسبی قابل نمایش نیست [۳۸].

به عبارت دیگر، توده‌سنگ در این روش‌ها یک محیط همسانگرد در نظر گرفته می‌شود، بنابراین مدول تغییرشکل‌پذیری یک مقدار منحصر به یک سنگ خاص است و مقدار آن در تمامی جهات برای این سنگ خاص برابر است. در نتیجه، برای سنگ‌های دارای لایه‌بندی و توده‌سنگ‌های دارای یک دسته ناپیوستگی پایا که مدول تغییرشکل‌پذیری آن در جهت عمود بر ناپیوستگی و موازی آن متفاوت است و یا در حالتی که درزه‌های ناپایا در داخل توده‌سنگ پراکنده باشند، روش‌های تجربی قابل کاربرد نخواهد بود.

۲-۳- روش‌های تحلیلی

بعضی از محققان بر روی ضریب توده‌سنگ که ضریبی بین مدول یانگ توده‌سنگ و مدول یانگ ماده-سنگ است، مطالعاتی انجام داده و دریافته‌اند که کاهش در مدول‌ها ناشی از حضور درزه‌ها در توده-سنگ، فاصله‌داری و دیگر ویژگی‌های مربوط به ناپیوستگی‌ها می‌باشد. آن‌ها انواع مختلف مدل‌های تئوری که می‌توان برای پیش‌بینی مقدار ضریب توده‌سنگ استفاده نمود را بررسی کرده‌اند.

تحقیقات سالامون بر روی محیط‌های سنگی متشکل از لایه‌های مختلف زغالی متمرکز بوده است که معمولاً به شدت لایه‌ای هستند و خواص کشسانی هر کدام از لایه‌ها متغیر است. در مدل سالامون با

وجود این که خود سنگ غیر یکنواخت است اما هر لایه را می توان کشسان، یکنواخت و همسانگرد عبوری فرض نمود [۸].

تحلیل وی برپایه آزمایش رفتاری دو مکعب بوده که هردو دارای ابعاد یکسان می باشند. یکی از این مکعب ها از توده سنگ جدا شده است و دیگری از محیط پیوسته معادلی که بصورت مصنوعی ساخته شده، بریده شده است. سطوح لایه بندی به موازات هم بوده و مکعب سنگ طوری بریده می شود که دو ضلع آن به موازات سطح لایه بندی باشد. مکعب ها دارای تقارن کشسانی بوده و رفتار آن ها نسبت به چرخش حول محوری عمودی بر صفحات لایه بندی ثابت است. از این رو سالمون نتیجه می گیرد که محیط معادل همسانگرد عبوری^۱ است [۸].

$$\sigma = \frac{1}{V} \int \sigma . dv \quad (۵-۲)$$

$$\varepsilon = \frac{1}{V} \int \varepsilon . dv \quad (۶-۲)$$

V : حجم مکعب برابر با l^3 .

روابط تنش- کرنش محیط معادل بر اساس این شرط که انرژی کرنشی ذخیره شده در مکعب های بریده شده از هردو محیط باید باهم برابر باشند، استنتاج می شود:

$$U_c = U_r \quad (۷-۲)$$

U_r : انرژی کرنشی مکعب بریده شده از سنگ

U_c : انرژی کرنشی مکعب بریده شده از محیط معادل

^۱ Transversely isotropic

بر این اساس، سالامون نشان داده‌است که ۵ ثابت کشسانی محیط پیوسته، یکنواخت و همسانگرد عبوری معادل را می‌توان برحسب خواص کشسانی و ضخامت هر کدام از لایه‌ها بیان نموده است. یعنی:

$$a) v_1 = f(v_{1i}, E_{1i}, h_i)$$

$$b) v_2 = f(v_{1i}, v_{2i}, h_i)$$

$$c) E_1 = f(v_{1i}, E_{1i}, h_i)$$

$$d) E_2 = f(v_{1i}, v_1, v_{2i}, v_2, E_{1i}, E_1, E_{2i}, h_i)$$

$$e) G_1 = f(G_{1i}, h_i)$$

$$f) G_2 = f(G_{2i}, h_i)$$

i : لایه i ام h_i : ضخامت لایه i ام

تاثیر درزه‌ها، لایه‌بندی و دیگر سطوح ناپیوستگی مشابه در مدل پیشنهادی سینگ در نظر گرفته شده است. در این مدل درزه‌ها به صورت یک سطح ناپیوسته در توده‌سنگ مورد مطالعه قرار می‌گیرند به طوری که جابجایی‌ها منحصراً در ارتباط با تنش‌های متناظر هستند. سینگ از تئوری کشسانی مواد مرکب به عنوان پایه‌ای برای توسعه ویژگی‌سنجی خود استفاده می‌نماید. تفاوت این مدل با مسائل مترادف تعیین رفتار کشسانی توده‌سنگ در این است که رفتار واقعی فاز درزه ناشناخته می‌باشد. سینگ اظهار می‌کند که توده‌سنگ را میتوان یک ماده مرکب متشکل از دو عنصر اصلی یعنی بلوک-های سالم و درزه‌ها یا سطوح ناپیوستگی در نظر گرفت. سینگ بیان کرده است که هر مسئله‌ای را می‌توان با تعیین ماتریس تمرکز تنش پیشنهادی وی و در قالب الاستیسیته مرکب حل کرد [۹]. رابطه انرژی سینگ به صورت زیر نشان داده می‌شود:

$$W = f([B_j]) \quad (۸-۲)$$

تحقیقاتی توسط آمادبی و گودمن با هدف ارزیابی رابطه‌ای ساختاری^۱ برای تشریح رفتار غیرخطی یک حجم همگن ناهمسانگرد ناپیوسته از سنگ که دارای حداکثر سه دسته درزه متعامد است، انجام گرفته است. در این مدل فرض بر این است که سنگ بکر رفتار الاستیک خطی و حداکثر تا ۳ صفحه تقارن متعامد موازی دسته درزه‌ها داشته باشد [۱۱]. برای هر دسته درزه، سختی قائم k_n برحسب تنش قائم وارد بر درزه و خواصی همچون چفت‌شدگی بیشینه^۲ و فشار اولیه^۳ بیان شده و توده‌سنگ درزه‌دار به صورت یک محیط پیوسته ناهمسانگرد معادل مورد بررسی قرار گرفته است. خط مشی اولیه مدل، جایگزین نمودن حجم درزه‌دار با یک محیط پیوسته ناهمسانگرد معادل است. به طوری که تغییرشکل‌های این حجم درزه‌دار باشد. در صفحه (n, t) محیط پیوسته معادل با دو مدول زیر بیان شده است:

$$\frac{1}{G_{nt}} = \frac{1}{G} + \frac{1}{k_s \times S} \quad (9-2)$$

که $G = E / 2(1+\nu)$ مدول برشی ماده‌سنگ و S فاصله بین دو دسته درزه است. شایان ذکر است که ضخامت درزه‌ها باید نسبت به فاصله درزه‌ها قابل صرف نظر کردن باشد. مدول E_n به صورت زیر خواهد بود:

$$\frac{1}{E_n} = \frac{1}{E} + \frac{1}{k_n \times S} \quad (10-2)$$

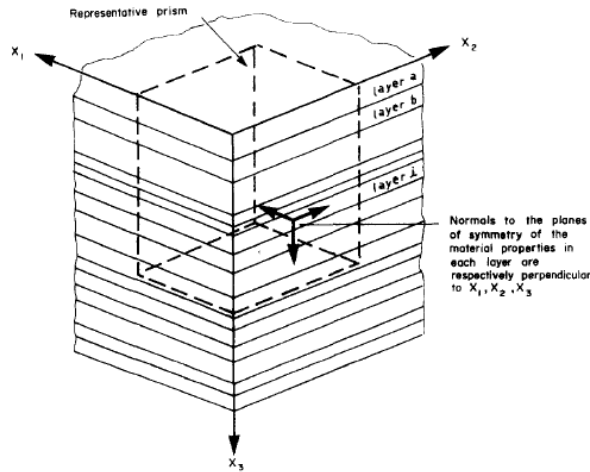
جرارد در راستای برآورد مدول کشسانی معادل برای توده‌سنگ‌های لایه‌ای ارتورومبیک، تحقیقات قبلی سالامون را برای سیستم لایه‌های همسانگرد عبوری پیگیری نموده است. در این بررسی خواص کشسانی معادل برای سیستمی از لایه‌های موازی که هر کدام از مواد کشسان، ارتورومبیک و

¹ Constitutive relation

² Maximum closure

³ Closure pressure

یکنواخت تشکیل شده، مشخص گردیده است [۱۲]. مشابه تحلیل سالامون مفروضاتی مانند بزرگ بودن مقیاس سیستم لایه‌ها در قیاس با ضخامت هر لایه و متغیر بودن ضخامت و خصوصیات ماده هر لایه نسبت به موقعیت نسبی آن‌ها درون سیستم در این مورد نیز اعمال شده است.



شکل ۱-۲: سیستم لایه‌های ارتورومبیک [۱۲].

جرارد با مساوی در نظر گرفتن انرژی کرنشی ذخیره شده در توده‌سنگ و حجم معرف، خصوصیات ماده ارتورومبیک معادل (شکل ۱-۲) را به شکل زیر ارائه نموده است:

$$\begin{aligned}
 v_{12} &= \frac{\zeta}{\alpha}; & v_{13} &= \chi - \frac{\lambda \zeta}{\alpha}; & v_{23} &= \lambda - \frac{\chi \zeta}{\alpha} \\
 E_1 &= \frac{\alpha \beta - \zeta^2}{\alpha}; & E_2 &= \frac{\alpha \beta - \zeta^2}{\beta} \\
 \frac{1}{E_3} &= \sum_i \frac{t_i}{E_{3i}} + \sum_i \left(\frac{v_{13}}{E_1} - \frac{v_{13i}}{E_{1i}} \right) \chi_i + \sum_i \left(\frac{v_{23}}{E_2} - \frac{v_{23i}}{E_{2i}} \right) \lambda_i \\
 G_{12} &= \sum_i t_i G_{12i}; & \frac{1}{G_{13}} &= \sum_i \frac{t_i}{G_{13i}}; & \frac{1}{G_{23}} &= \sum_i \frac{t_i}{G_{23i}}
 \end{aligned}$$

(۱۱-۲)

where

$$\begin{aligned}
 \alpha &= \sum_i \frac{t_i E_{2i}}{1 - v_{12i} v_{21i}} & \beta &= \sum_i \frac{t_i E_{1i}}{1 - v_{12i} v_{21i}} \\
 \zeta &= \sum_i \frac{t_i E_{2i} v_{12i}}{1 - v_{12i} v_{21i}} = \sum_i \frac{t_i E_{2i} v_{21i}}{1 - v_{12i} v_{21i}} \\
 \chi_i &= \sum_i \frac{t_i (v_{13i} + v_{12i} v_{23i})}{1 - v_{12i} v_{21i}} & \lambda_i &= \sum_i \frac{t_i (v_{23i} + v_{13i} v_{21i})}{1 - v_{12i} v_{21i}} \\
 \chi &= \sum_i \chi_i & \lambda &= \sum_i \lambda_i
 \end{aligned}$$

وی بیان کرده است که محاسبات توزیع تنش با استفاده از خصوصیات ماده معادل فوق و شرایط هندسی و مرزی خاص مسئله تخمینی از تنش $(\tau_{۳۳}, \tau_{۱۳}, \tau_{۲۳}, \sigma_{۳}, \sigma_{۲}, \sigma_{۱})$ موجود در ماده معادل را حاصل خواهد کرد. تبدیل این تنش‌ها به تنش‌های متناظر لایه‌های منفرد بررسی نزدیک شدن یا نشدن به شرایط تنش بحرانی را ممکن می‌سازد. این تبدیل را می‌توان با استفاده از روابط زیر انجام داد:

$$\begin{aligned}\sigma_{1i} &= \sigma_1 + C_i (E_{1i} A_i + \nu_{12i} E_{1i} B_i) \\ \sigma_{2i} &= \sigma_2 + C_i (\nu_{12i} E_{1i} A_i + E_{2i} B_i) \\ \sigma_{3i} &= \sigma_3 \\ \tau_{12i} &= \frac{G_{12i}}{G_{12}} \tau_{12}; \tau_{13i} = \tau_{13}; \tau_{23i} = \tau_{23}\end{aligned}\quad (۱۲-۲)$$

در روابط فوق:

$$\begin{aligned}A_i &= \left(\frac{1}{E_1} - \frac{1}{E_{1i}} \right) \sigma_1 - \left(\frac{\nu_{12}}{E_1} - \frac{\nu_{12i}}{E_{1i}} \right) \sigma_2 - \left(\frac{\nu_{13}}{E_1} - \frac{\nu_{13i}}{E_{1i}} \right) \sigma_3 \\ B_i &= - \left(\frac{\nu_{21}}{E_2} - \frac{\nu_{21i}}{E_{2i}} \right) \sigma_1 - \left(\frac{1}{E_2} - \frac{1}{E_{2i}} \right) \sigma_2 - \left(\frac{\nu_{23}}{E_2} - \frac{\nu_{23i}}{E_{2i}} \right) \sigma_3 \\ C_i &= \frac{1}{1 - \nu_{12i} \nu_{21i}}\end{aligned}$$

فوسوم با استفاده از نتایج تحقیقات آمادایی و گودمن، یک مدل ساختاری را برای توده‌سنگ‌هایی با توزیع تصادفی درزه‌ها ارائه کرده است. وی از روش میانگین‌گیری هندسی برای تعیین خواص ماده همسانگرد موثر استفاده نموده است [۱۳]. مقادیر E_{avg} و ν_{avg} به کمک K_{avg} و G_{avg} قابل محاسبه می‌باشند.

$$E_{avg} = \frac{(9 \times K_{avg} \times G_{avg})}{3 \times (K_{avg} + G_{avg})} \quad (۱۳-۲)$$

$$\nu_{avg} = \frac{(3 \times K_{avg} - 2 \times G_{avg})}{2 \times (3 \times (K_{avg} + G_{avg}))} \quad (۱۴-۲)$$

G و K تابعی از فاصله درزه‌ها، سختی درزه‌ها، ν و E ماده‌سنگ هستند [۱۳].

$$K_{avg} = \frac{E}{3(1-2\nu)} \qquad G_{avg} = \frac{E}{2(1+\nu)}$$

کای و هوری^۱ مفهومی را تحت عنوان المان حجمی معرف برای مطالعه رفتار توده‌سنگ درزه‌دار حاوی ترک‌های ناپایا معرفی کرده‌اند. بر این اساس، آن‌ها رفتار کلی المان حجمی معرف در یک نقطه را به عنوان نماینده رفتار کلی توده‌سنگ درزه‌دار در نظر گرفته‌اند. این مدل پاسخ درزه‌ها اعم از رفتار غیرخطی، اتساع، تاثیر تخریب دندانها و وابستگی به تاریخچه بار را پیش‌بینی می‌کند. تنش‌ها و کرنش‌های متوسط در المان حجمی معرف این مدل به شکل زیر تعریف می‌شوند [۳۹].

$$\bar{\sigma}_{ij} = \frac{1}{V} \int_V \sigma_{ij} dV \qquad (۱۵-۲)$$

$$\bar{\varepsilon}_{ij} = \frac{1}{V} \int_V \varepsilon_{ij} dV$$

رامامورتی^۲ پارامتری به نام فاکتور درزه را به صورت رابطه (۱۶-۲) که در آن J_n تعداد درزه در متر، پارامتر n مرتبط با شیب درزه و r پارامتر مقاومت برشی درزه می‌باشد را به عنوان تابعی از فراوانی درزه‌ها، شیب درزه و مقاومت برشی درزه تعریف کرده است. وی جهت تعیین پارامترهای دخیل در مدل خود جدول‌هایی را پیشنهاد کرده و دو روابطه نمایی برای محاسبه مقاومت توده‌سنگ و مدول تغییرشکل آن با استفاده از فاکتور درزه ارائه نموده است [۴۰].

$$J_f = \frac{J_n}{n.r} \qquad (۱۶-۲)$$

¹ Cai and Horii

² Rammamurthy

هوانگ^۱ و همکاران ثوابت ساختاری را برای توده‌سنگی شامل سه دسته درزه مبتنی بر فرمولاسیون محیط پیوسته، به طور صریح استنتاج کرده‌اند. آن‌ها صلبیت‌های نرمال و برشی و فاصله‌داری ثابتی را برای دو دسته درزه متقاطع در نظر گرفته‌اند [۴۱].

سیتارام و سریدوی^۲ بر پایه تحلیل آماری، مقاومت تک محوری فشاری و مدول تغییرشکل به دست آمده از آزمون‌های فشاری تک محوره و سه محوری سنگ درزه‌دار در فشارهای همه جانبه مختلف را به عنوان تابعی از فاکتور درزه و خواص سنگ بکر نمایش داده و بیان کرده‌اند که با اطلاع از ویژگی‌های سنگ بکر و فاکتور درزه می‌توان خواص مقاومتی و تغییرشکل را تخمین زد. بر این اساس، آن‌ها روابط زیر را برای تخمین مقاومت و مدول توده‌سنگ ارائه کرده‌اند [۴۰]. ضریب a در روابط زیر از جدول ۲-۳ و برحسب تنش حداقل تعیین می‌گردد.

$$\sigma_{cr} = \frac{\sigma_{cj}}{\sigma_{ci}} = \exp(-0.0065J_f) \quad (17-2)$$

$$E_r = \frac{E_j}{E_i} = \exp(-a \times J_f) \quad (18-2)$$

جدول ۲-۳: پارامتر a برای فشارهای محصور کننده مختلف.

ضریب a	فشار محصور کننده (MPa)
-۰/۰۱۱۳	۰
-۰/۰۰۶۴	۱
-۰/۰۰۸۲	۵
-۰/۰۱۰۳	۷

¹ Huang

² Sitharam and Sridevi

ژانگ^۱ جهت تعیین خواص تغییرشکل الاستیک یک توده‌سنگ به‌شدت درزه‌دار، یک روش متوسط-گیری هندسی ساده پیشنهاد کرده است. فرض وی بر این است که تمامی دسته درزه‌ها دارای فاصله-داری، صلبیت نرمال الاستیک و صلبیت برشی یکسان بوده و نقش هر دسته ناپیوستگی در ماتریس نرمی^۲ توده‌سنگ تنها به جهت‌یابی آن وابسته است [۱۵]. مدول E_m و G_m توده‌سنگ همسانگرد معادل بنابر نظر ژانگ برابر است با:

$$E_m = \frac{1}{\frac{1}{E_r} + \frac{1}{3} \left[\frac{21}{32k_n s} + \frac{11}{32k_s s} \right]} \quad (۱۹-۲)$$

$$G_m = \frac{1}{\frac{1}{G_r} + \frac{1}{3} \left[\frac{11}{32k_n s} + \frac{21}{32k_s s} \right]} \quad (۲۰-۲)$$

راه‌حل‌های تحلیلی بررسی شده بسیار خلاصه و ساده هستند و تاثیر ناهمسانگردی را نیز در نظر می‌گیرند، اما اغلب تنها برای حالت‌هایی که سیستم هندسی درزه‌ها منظم، متعامد و کاملاً پیوسته باشد، قابل استفاده اند. این راه‌حل‌ها برای درزه‌های نامنظم موجود در طبیعت نمی‌توانند به‌کار گرفته شوند. تنها استثناء در این نوع تحلیل‌ها، تئوری تانسور شکست^۳ می‌باشد که برای پیدا کردن خواص ناهمسانگردی کشسانی سیستم‌های درزه‌داری نامنظم که دارای خواص مکانیکی، جهت‌یابی و ابعاد و اندازه‌های مختلف هستند، به‌کار برده می‌شود [۴۲].

¹ Zhang

² Compliance Matrix

³ Fracture Tensor

۲-۴- روش‌های عددی

روش‌های تجربی و تحلیلی تخمین مقاومت و تغییرشکل‌پذیری توده‌سنگ به واسطه رفتار طبیعی و غیرقابل پیش‌بینی توده‌سنگ با عدم قطعیت‌هایی روبرو بوده و نتایج حاصل از آن‌ها به‌طور قابل ملاحظه‌ای متأثر از شبکه پیچیده درزه‌ها هستند. بنابراین، استفاده از روشی مناسب مطابق با شرایط و تجهیزات موجود با کم‌ترین میزان عدم قطعیت بر حسب نتایج حاصله از وظایف اصلی مهندسی سنگ است [۲۷].

روش‌های عددی با پیشرفت‌های روز افزون و رشدی که در ظرفیت انجام محاسبات وجود دارد، در تحلیل مسائل مختلف مورد توجه قرار گرفته‌اند. هدف اصلی در استفاده از روش عددی در توده‌سنگ شکسته، مدل‌سازی بر پایه شرایط واقعی، هندسه پیچیده و نامنظم درزه‌ها، برهم‌کنش بین درزه‌ها و بلوک‌ها و تخصیص مدل‌های رفتاری پیچیده برای سنگ بکر و درزه‌هاست که همین امر از مزایای قطعی این روش نسبت به سایر روش‌های تجربی و تحلیلی در استخراج پارامترهای مکانیکی معادل توده‌سنگ است.

دو روش عمده در ژئومکانیک محاسباتی^۱ جهت شبیه‌سازی مواد درزه‌دار مورد استفاده قرار گرفته‌اند: (۱) تکنیک‌هایی که صراحتاً طبیعت ناپیوسته ماده را مدل‌سازی می‌کنند، بعنوان مثال تحلیل جابجایی ناپیوسته^۲، روش المان مجزا^۳، همچنین روش المان محدود^۴ و تفاضل محدود^۵ که از یک المان مرزی

¹ Computational Geomechanics

² Discontinuous Deformation Analysis

³ Distinct Element Method

⁴ Finite Element Method

⁵ Finite Difference Method

بهره می‌گیرند؛ ۲) مدل پیوسته معادل و به‌کارگیری آن در روش المان محدود یا تفاضل محدود. روش المان درزه و تئوری بلوکی در دسته دوم قرار می‌گیرند [۴۲].

هر دو روش محیط پیوسته (به‌عنوان محیط معادل توده‌سنگ درزه‌دار) و محیط ناپیوسته برای شبیه‌سازی عددی رفتار مکانیکی توده‌سنگ‌ها به‌کار گرفته شده‌اند. در روش محیط پیوسته فرض بر این است که تا زمانی که روابط ساختاری و پارامترهای وابسته آن براساس قوانین پایه مکانیک محیط‌های پیوسته برقرار باشد، رفتار بزرگ مقیاس سنگ‌های درزه‌دار با اصول موجود در مکانیک محیط‌های پیوسته قابل بیان است. از این روش مدل‌سازی به‌طور معمول در زمینه مکانیک سنگ، هیدروژئولوژی و به خصوص در مسائل بزرگ مقیاس بهره‌گیری می‌شود [۱۴].

بنابر نظر لانگ و همکاران، برای توجیه استفاده از روش محیط پیوسته معادل برای توده‌سنگ بایستی دو شرط اقناع شود. اول این‌که یک حجم نماینده مشخص برای یک مسأله معین موجود باشد که بتوان پایه و اساس آماری معادلی بین نمونه توده‌سنگ و مدل عددی تخمین زد و پس از آن روش‌های میانگین‌گیری را برای استنتاج پارامترهای مکانیکی به‌کار برد. شرط دوم هم بیان تانسوری پارامترهای معادل را برای استفاده در معادلات رفتاری تحلیل پیوسته ضروری می‌داند [۱۴].

در میان انواع روش‌های عددی پیوسته موجود، روش المان محدود به‌عنوان یکی از پرکاربردترین روش‌ها مطرح است. در کاربرد این روش، مش‌بندی المان محدود درزه‌های با چگالی بالا یکی از اساسی‌ترین مشکلات در راه مدل‌سازی صحیح است [۴۳]. اسماعیلی و همکاران [۲۵] روشی کمی برای تخمین اندازه حجم معرف اولیه برای محدوده‌ای از توده‌های سولفیده واقع در معدن برونسویک ارائه نموده‌اند. پویا و قریشی [۴۴] ابزاری برای مش‌بندی توده‌سنگ‌های دارای شدت درزه‌داری بالا توسعه داده و رفتار مکانیکی توده‌سنگ را با استفاده از مدل‌سازی المان محدود با فرض رفتار الاستیک خطی و معیار شکست موهر کولمب به‌ترتیب برای سنگ بکر و درزه‌ها مورد مطالعه قرار داده‌اند. یانگ و همکاران در سال ۲۰۱۴ [۴۳] روش مش‌بندی متفاوتی پیشنهاد کرده و حجم معرف معادل و

تانسور سختی الاستیک^۱ را با فرض مدل الاستیک خطی برای سنگ بکر و درزه‌ها بررسی نموده اند. این روش همچنین برای مطالعه مقاومت [۴۴ و ۴۵]، رفتار مکانیکی [۳۹] و دگرشکل‌پذیری [۴۵] توده‌سنگ‌ها مورد استفاده قرار گرفته است.

جیان پینگ^۲ و همکاران در سال ۲۰۱۵ از روش المان محدود برای تعیین مقاومت و دگرشکل‌پذیری توده‌سنگ درزه‌دار به صورت دو بعدی با مدل‌سازی رفتار کرنش نرم شونده برای توده‌سنگ استفاده کرده و این روش را در مقابل روش‌های حل نظری اعتبارسنجی کرده اند. همچنین از این روش برای بررسی فرآیند شکست پیش‌رونده، تاثیر مقیاس و خواص ناهمسانگردی مقاومت فشاری تک محوری و مدول یانگ استفاده شده است [۴۵].

روش تفاضل محدود نیز از روش‌های عددی پیوسته است که برای مطالعه موضوعاتی از جمله مطالعه تاثیر درزه‌ها بر رفتار مقاومتی و تغییرشکل سنگ‌ها [۴۶]، بررسی تاثیر مقیاس بر مقاومت توده‌سنگ [۴۷] و تعیین پارامترهای مکانیکی معادل توده‌سنگ [۴۰] از آن بهره‌گیری شده است.

از آنجایی که پیوسته بودن سنگ فرض کلی مدل‌سازی در دو روش مذکور است، در نظر گرفتن تاثیر تعداد زیادی از شکستگی‌ها با ابعاد، جهات و رفتارهای متفاوت دشوار به نظر می‌رسد.

در روش‌های ناپیوسته از جمله روش المان مجزا و تحلیل تغییرشکل ناپیوسته، توده‌سنگ‌ها متشکل از بلوک‌های جدا و سیستم‌های درزه مجزا بوده و برهم‌کنش و ارتباط آن‌ها از فاکتورهای مهم موثر روی رفتار مکانیکی توده‌سنگ‌ها می‌باشد. به دلیل این حقیقت که سیستم درزه‌ها به‌طور صریح همراه با جزئیات در مدل‌های مجزا وارد می‌شود، این روش‌ها ابزار مناسب‌تری برای بررسی رفتار توده‌سنگ شکسته در مقیاس کوچک هستند. البته این مزیت سبب محدودیت ابعاد مسئله می‌شود. زیرا نمایش

¹ Elastic Stiffness Tensor

² JianPing

بلوک‌ها و درزه‌ها به صورت مجزا نیازمند رایانه‌های پرسرعت و دارای قدرت پردازش و حافظه بالا است. بنابراین علی‌رغم جامعیت روش مجزا کارایی آن در حل مسائل خاص چالش برانگیز است [۱۴].

روش المان مجزا به دلیل مزیتش در نمایش صریح هندسه شبکه ناپیوستگی و مدل‌های رفتاری شکستگی‌ها و سنگ بکر، شیوه‌ای قدرتمند برای تحلیل تنش توده‌سنگ‌های بلوکی درزه‌دار است. به دلیل هندسه پیچیده شبکه شکستگی‌ها در توده‌سنگ و ظاهر نشدن اکثر شکستگی‌ها بر روی رخنمون، الگوهای بسیار متعددی از شبکه درزه‌ها بر اساس توابع توزیع احتمال پارامترهای هندسی برای تحلیل آماری نتایج مدل‌سازی عددی توده‌سنگ مورد نیاز است [۴۸].

در حال حاضر دو کد المان مجزای تجاری *UDEC* و *3DEC* برای مسائل دو بعدی و سه بعدی سیستم‌های بلوکی *PFC2D* و *PFC3D* برای شبیه‌سازی جریان ذرات مواد دانه‌ای در سنگ شکسته مناسب هستند.

در سیستم‌های بلوکی مجزا، توده‌سنگ به عنوان مجموعه‌ای از بلوک‌های صلب و دگرشکل‌پذیر و شکستگی‌هایی که به صورت فصل مشترک مجزای نمایش دهنده برهم کنش بین بلوک‌ها تماس یافته اند، مدل‌سازی می‌شود. بنابراین برای مطالعه برهم کنش بلوک‌های سنگی و شکستگی‌ها از طریق محاسبه مقاومت و تغییرشکل توده‌سنگ تحت شرایط مرزی متفاوت مناسب‌تر به نظر می‌رسد. مدل‌سازی المان مجزا با استفاده از *UDEC* و *3DEC* برای برآورد پارامترهای مقاومتی و رفتار دگرشکل‌پذیری مواد سنگی متفاوت توسط افراد زیادی صورت گرفته است [۱۷، ۲۰، ۲۲ و ۲۴].

کریستنسن و همکاران [۴۹] خواص مقاومتی و تغییرشکل مواد سنگی را با استفاده از شبیه‌سازی عددی آزمون‌های آزمایشگاهی سه محوره، تک محوره و کششی در محیط نرم افزار *UDEC* مورد مطالعه قرار داده و پارامترهای معادل معیارهای شکست موهر کولمب و هوک براون را برای این مواد

به دست آورده اند. آن‌ها بیان می‌کنند که مقایسه نتایج عددی و آزمایشگاهی از روند مشابهی برخوردار هستند.

خانی و همکاران [۲۷] تاثیر اندازه مدل و تنش محصور کننده را بر روی مقاومت الاستیک توده‌سنگ درزه‌دار با شدت درزه‌داری متفاوت را با استفاده از روش شبکه شکستگی مجزا-اجزای مجزا بررسی نموده اند. نتایج تحقیق مذکور نشان دهنده تاثیر شگرف مقیاس بر مقاومت الاستیک سنگ شکسته بوده است. هر چه شدت درزه‌داری نیز افزایش می‌یابد میزان همگنی مدل‌های المان مجزا بیشتر می‌شود. آن‌ها همچنین اشاره می‌کنند که با افزایش تنش محصور کننده مقادیر بیشتری برای مقاومت سنگ حاصل شده و رفتار کرنش سختی غالب می‌شود.

کولاتیلاک و همکاران در سال ۱۹۹۳ [۴۹] به بررسی و تعیین پارامترهای دگرشکل‌پذیری توده‌سنگ با درزه‌های محدود در سه بعد پرداخته اند. در این روش چنین عنوان شده است که از آنجایی که بسیاری از توده‌سنگ‌ها شامل درزه‌های ناپایا بوده و برای این نوع درزه‌ها امکان تشکیل بلوک وجود ندارد، روش المان مجزا را نمی‌توان به‌طور مستقیم برای چنین سنگ‌هایی به کار برد. بنابراین روشی برای مطالعه تاثیر هندسه شبکه شکستگی‌ها از جمله شدت درزه‌داری، ابعاد درزه‌ها و جهت‌گیری آن‌ها تحت عنوان مولفه‌های تانسور شکست ارائه دادند. در یک شبیه‌سازی عددی می‌توان شکستگی‌های واقعی را با یک طرح تصادفی ایجاد کرد اما به منظور استفاده از روش المان مجزا باید حوزه مسأله به بلوک‌های مجزا تقسیم گردد. بنابراین در این روش درزه‌های مصنوعی ساخته شدند که از تقاطع با درزه‌های واقعی بلوک‌های مجزا را تشکیل می‌دادند. این درزه‌های مصنوعی باید رفتاری شبیه سنگ بکر داشته باشند. تغییرشکل‌پذیری این درزه‌ها با پارامترهایی از قبیل سختی نرمال و برشی مشخص می‌شود. زمانی که درزه‌های ساختگی شبیه سنگ بکر رفتار کنند، می‌توان از روش‌های تحلیلی برای محاسبه دگرشکل‌پذیری و مقاومت بلوک‌های سنگی استفاده کرد. مقادیر نسبت مدول برشی به سختی برشی درزه و نسبت سختی نرمال به سختی برشی درزه که سبب شده تا جواب‌های حاصل از

راه‌حل‌های تحلیلی و عددی به هم نزدیک شوند، به عنوان مقادیر معرف سختی برای این درزه‌ها در نظر گرفته می‌شوند.

بیدگلی و همکاران [۲۸] یک روش عددی سیستماتیک دو بعدی برای پیش‌بینی مقاومت و تغییرشکل‌پذیری سنگ‌های درزه‌دار با استفاده از روش اجزای مجزا را در ادامه کارهای انجام شده توسط مین و جینگ [۱۴] و باغبانان [۵۰] ارائه کرده‌اند. در تحقیق مذکور، آزمایشات عددی دو بعدی بر روی مدل‌های هندسی توده‌سنگ در اندازه‌های مختلف انجام شده است. نتایج حاصل از مطالعات برای برآزش معیارهای شکست موهر کولمب و هوک براون استفاده شده و پارامترهای تغییرشکل‌پذیری محاسبه شدند. بیدگلی و همکاران [۲۸] بیان می‌کنند که اگر ابعاد مدل کوچک‌تر از ابعاد حجم معرف توده‌سنگ مورد مطالعه باشد، نتایج نشان‌دهنده تاثیر شگرف اندازه مدل بر رفتار مقاومتی و تغییرشکل سنگ‌های درزه‌دار خواهد بود. هنگامی که ابعاد مدل به مقدار حجم معرف مورد نظر می‌رسد این تغییرات حداقل می‌شوند. از طرف دیگر، خواص شکل‌پذیری سنگ در فشارهای محصور کننده مختلف، متغیر است. با افزایش فشار محصور کننده مقاومت توده‌سنگ درزه‌دار افزایش یافته و رفتار تغییرشکل آن از یک مدل الاستوپلاستیک همراه با روند کرنش سختی پیروی می‌نماید. آن‌ها همچنین اظهار می‌کنند که هر دو معیار موهر کولمب و هوک براون تخمین مناسبی از مقاومت فشاری سنگ مورد مطالعه در تمامی شرایط مفروض حاصل می‌نمایند. از طرف دیگر، معیار هوک براون به‌طور ذاتی یک پوش شکست غیرخطی بوده و در تحلیل سیستم شکستگی‌های مختلف از انعطاف‌پذیری بیشتری برخوردار است.

وو و کولاتیلاک [۲۶] از $3DEC$ برای تعیین حجم معرف و خواص مکانیکی و تحلیل تنش توده‌سنگ واقع در ساختگاه سدی در چین استفاده کرده‌اند. آن‌ها از تئوری تانسور شکست برای ترکیب تأثیر تعداد دسته درزه‌ها، شدت و توزیع جهت‌یابی و اندازه دسته درزه‌ها بهره گرفته و از روشی که کولاتیلاک [۱۹۹۳] پیشنهاد کرده بود برای تعیین ابعاد حجم معرف استفاده نموده‌اند.

۲-۵- جمع بندی

مطالعات عددی صورت گرفته توسط مین و جینگ [۱۴]، باغبانان [۵۰]، خانی و همکاران [۲۷] و نوریان بیدگلی و جینگ [۲۸] اگرچه همگی با در نظر گرفتن شبکه نامنظم شکستگی‌ها به واقعیت توده‌سنگ نزدیک‌تر بوده و با استفاده از روش المان مجزا که از مناسب‌ترین روش‌های حل برای بررسی و تعیین پارامترهای مکانیکی توده‌سنگ و برهم‌کنش سنگ بکر و شکستگی‌هاست، بهره گرفته اند اما در اغلب آن‌ها توده‌سنگ به عنوان یک فضای دو بعدی در نظر گرفته شده است و پارامترهای مکانیکی با فرض کرنش صفحه‌ای محاسبه شده اند. لذا با توجه به این امر که توده‌سنگ در طبیعت محیطی پیچیده و سه‌بعدی است، نتایج حاصل از روش‌های حل دو بعدی علی‌رغم عمومیت و کمک به فهم مسأله، به دلیل در نظر نگرفتن تغییرات و پیچیدگی‌های بعد سوم، میزان عدم قطعیت نامشخصی داشته و چنین به نظر می‌رسد که تصمیم‌گیری بر مبنای روش‌های دو بعدی ممکن است سبب تخمینی محافظه کارانه یا حتی اشتباه گردد.

از طرف دیگر، فراهم آمدن امکان مدل‌سازی شبکه شکستگی مجزا در نرم‌افزارهای تجاری سبب عمومیت یافتن استفاده از این قابلیت در مسائل مهندسی سنگ شده است در حالی که بسیاری از مطالعات پیشین محدود به تلاشی برای معرفی یک برنامه منحصر به فرد در تولید درزه‌های مجزا در ساختار مدل‌های شبیه‌سازی شده می‌شد. از این‌رو، نیاز است تا تلاش‌هایی در جهت درک رفتار توده-سنگ درزه‌دار در مناطق تحت مطالعه یا کاربری انجام گیرد.

با توجه به اینکه مدل‌سازی توده‌سنگ درزه‌دار (که محیطی پیچیده را شامل می‌شود) و تحلیل پاسخ آن در شرایط مختلف در حال حاضر غیرممکن به نظر می‌رسد، چنین فرضیات ساده سازی از ملزومات مدل‌های اولیه است. اما لازم است تا در گام‌های بعدی مدل‌سازی به تدریج پیچیده شده تا جواب‌های حاصله به طبیعت واقعی توده‌سنگ درزه‌دار نزدیک‌تر گردند. برای مثال حجم مورد آزمایش، شرایط بارگذاری و آگاهی مناسب از هندسه سیستم درزه‌ها و رفتار مکانیکی آن‌ها نقشی

اساسی در طراحی آزمایشات آتی تخمین مقاومت و تغییرشکل پذیری سنگ‌های درزه‌دار دارد. بدین منظور در این مطالعه از روش شبکه شکستگی‌های مجزا در حالت سه بعدی برای تعیین مدول تغییرشکل پذیری و مقاومتی توده‌سنگ استفاده شده و تاثیر مقیاس و زاویه بارگذاری نسبت به درزه‌ها بررسی شده است.

فصل سوم: مطالعات آزمایشگاهی، میدانی و تجربی در محدوده معدن زغالسنگ طزره

۳-۱- مقدمه

درزه‌ها به عنوان شکستگی‌هایی در ساختار توده‌سنگ که در امتداد صفحه شکستگی جابجایی ندارند، در کنار عواملی از قبیل مقاومت سنگ بکر، تخلخل و شرایط ساختاری از مهمترین پارامترهای تعیین کننده رفتار مکانیکی توده‌سنگ می‌باشند. در مورد درزه‌ها جنبه‌های مختلفی مانند زبری سطح درزه، مقاومت برشی، نفوذپذیری و هوازگی سطح آن‌ها نیاز به مطالعه، بررسی و محاسبه دارند.

همان‌طور که بیان شد، ناپیوستگی‌ها مهمترین عامل بی نظمی و عدم امکان دسترسی به شرایط ایده-آل در محیط‌های سنگی محسوب می‌شوند. از این‌رو، مدل‌سازی ناپیوستگی‌ها در مسائل مختلف زیست محیطی، مهندسی و معدنی از جمله مدل‌سازی با هدف تحلیل تغییرشکل‌پذیری و مقاومت توده‌سنگ اهمیت ویژه‌ای دارد. مدل‌سازی عددی صحیح مستلزم جمع‌آوری داده‌های واقعی از شرایط هندسی درزه‌ها و مقاومتی سنگ در منطقه مورد مطالعه است.

در این فصل، در ابتدا شرایط زمین‌شناسی محدوده معدن زغالسنگ طزره مورد بررسی قرار می‌گیرد. سپس فرآیند برداشت خواص هندسی درزه‌های مجزا با هدف شبیه‌سازی ارائه می‌شود. سپس محاسبات انجام شده در زمینه پارامترهای کیفی و مقاومتی توده‌سنگ دربرگیرنده لایه‌های زغال با استفاده از روش‌های رده‌بندی مهندسی سنگ از جمله RMR و Q به همراه آزمایشات ژئومکانیکی لازم در این زمینه بیان می‌گردد.

۳-۲- معرفی منطقه مورد مطالعه

منطقه طزره با وسعت ۳۴ کیلومتر مربع بخشی از دامنه جنوبی رشته کوه البرز را تشکیل می‌دهد که در فاصله ۷۰ کیلومتری شمال غرب شاهرود واقع شده است. مجموعه معادن این منطقه شامل معادن موسوم به معدن بزرگ طزره، معدن کلاریز، معدن رزمجا می‌شوند. به‌طور کلی لایه‌های قابل استخراج

شامل لایه‌های *K5, K10, K19, K21, K23* و *P10* است. شیب لایه‌ها ۳۰ تا ۵۵ درجه و ضخامت

آن‌ها ۰/۴ تا ۱/۸ متر و جنس کمر بالا ماسه‌سنگ و جنس کمر پایین آن‌ها سیلت‌استون است.

شرایط محیطی که زغالسنگ در آن تشکیل شده معمولاً مناطقی را در بر می‌گیرد که یا نزدیک به سطح دریا بوده یا آن‌که نسبتاً از سطح دریا ارتفاع داشته‌اند، در این مناطق از نظر شرایط آب و هوایی فرصت مناسبی برای رشد گیاهان و تجمع آنها و جلوگیری از تخریب وجود داشته است. شواهد امر نشان می‌دهد که زغالسنگ‌ها اغلب در یک محیط یا منطقه باتلاقی یا مردابی، بالاخص مشرف به سواحل شکل و فرم گرفته‌اند. زغالسنگ ایران مربوط به دوره تریاس بالایی و ژوراسیک زیرین می‌باشد که در البرز به نام سازند شمشک معروف و در ایران مرکزی به نام هجدک می‌نامند [۵۱].

استخراج زغالسنگ عمدتاً به روش جبهه کار طولانی و پلکانی معکوس انجام گرفته و طول متوسط کارگاه استخراج حدود ۱۰۰ متر است. پس از استخراج مواد معدنی به وسیله نوار و لکوموتیو به بیرون برده می‌شوند. در حال حاضر بهره برداری از ذخایر معدن توسط بخش دولتی و خصوصی انجام می‌گیرد.

۳-۳- زمین‌شناسی عمومی منطقه

دنباله سلسله جبال البرز در منطقه شاهرود- دامغان سازند شمشک با گسترش حدوداً ۴۰ کیلومتری و تناوبی از لایه‌های زغالی، ماسه سنگی، سیلت‌استون و شیل بوده و مربوط به دوران دوم دوره‌های تریاس بالایی تا ژوراسیک میانی است. موقعیت جغرافیایی معادن طزره در شکل ۳-۱ نشان داده شده است. این سازند به علت گستردگی به چند منطقه کوچکتر تقسیم گردیده که از شرق به غرب عبارتند از:

- منطقه دهملا

گیرد. مارک‌های زغالی این منطقه کک شو، کک شو چرب و خاکستر متوسط ۴۵٪ است که ذخیره آن ۱۱ میلیون تن برآورد شده است و استخراج روزانه از آن حدود ۱۰۰۰ تن می باشد [۵۱].

در منطقه پشکلات جهت دسترسی به طبقات زیرین سطح زمین جمعا ۱۰۳ حلقه چاه در نقاط مختلف حفر گردیده است و همچنین تونلهای اکتشافی و استخراجی و تونل مادر زده شده که تونلهای ۱،۲،۱۰ و تونل مادر عمود بر لایه و بقیه موازی لایه زغالی حفر گردیده است. در قسمت جنوبی شرقی پشکلات به فاصله ۲۰ کیلومتری کارخانه زغالشویی جهت تغلیظ و پایین آوردن درصد خاکستر موجود در زغال تاسیس گردیده است.

آب و هوای منطقه کوهستانی است به صورتی که در تابستان خشک و اختلاف دما در شبانه روز ۱۰+ تا ۳۵ درجه و در زمستان سرد و اختلاف دما از ۱۰+ تا ۲۰- درجه می باشد. در قسمت غرب پشکلات منطقه زغال خیز کلاریز با وسعت ۷/۲ کیلومتر مربع و ذخیره زغالی ۸۳۵۰۰۰۰ تن برای ۱۱ لایه زغالی قرار دارد، تونلهای ۴ و ۵ برای استخراج زغال در این منطقه حفر گردیده است. منطقه رزمجا و ممدویه در قسمت شرق منطقه پشکلات قرار گرفته اند [۵۱].

۳-۳-۱-۱- معدن کلاریز

از سال ۶۸ در برنامه اول معدن کلاریز تونل ۳۰ با افق ۲۲۰۳+ با ذخیره ای بالغ بر ۱۰۰ هزار تن طراحی و آماده سازی آن شروع و از سال ۱۳۷۰ استخراج و هم اکنون ادامه دارد.

۳-۳-۱-۲- معدن رزمجا

عملیات عمده اکتشاف معدن رزمجا توسط کارشناسان ایرانی انجام شده و به سه بخش شرقی، مرکزی، غربی تقسیم شده است. از جوانترین معادن منطقه می باشد و قسمتهایی از آن تا چندی پیش در حال اکتشاف تکمیلی بود. تونلهایی با افقهای مختلف با ذخیره ای بالغ بر ۵۰۰ هزار تن

طراحی و آماده‌سازی و استخراج آن همزمان شروع شده و در حال تجهیز است. اوکلون تونل یک جهت رسیدن به لایه های $K5$ ، $K8$ ، $K10$ با ذخیره بالغ بر ۱۵۰۰۰۰ با افق ۲۱۲۸+ طراحی و آماده سازی آن در آخر برنامه اول شروع و از سال ۱۳۷۳ شروع به استخراج شده است.

۳-۱-۳-۳- معدن کلمدر

در محدوده کلمدر اوکلونی به نام برناکی با افق ۲۳۰۰+ در سال ۱۳۶۹ برای دستیابی به لایه $K19$ ، $K16$ ، $K14$ ، $K12$ و افق زیرین تونل برناکی لایه $K25$ با ذخیره ای بالغ بر ۱۳۵ هزار تن طراحی شده که هم زمان با آماده سازی استخراج آن شروع شده و ادامه دارد. در این منطقه شیب لایه های زغال از شرق به غرب زیاد می‌شود به طوری که در منطقه رزمجا شیب لایه ۳۰ درجه بوده و در قسمت مرکزی ۴۵ درجه و در کلاریز به ۶۰ تا ۷۰ درجه می‌رسد.

۳-۲-۳-۳- چینه شناسی

منطقه پشکلات از مناطق زغال خیز تریاس-ژوراسیک طزره است و امتداد لایه‌های آن شرقی-غربی بوده از غرب به منطقه کلاریز و از شرق به منطقه رزمجا محدود می‌شود. از نظر چینه شناسی این منطقه خصوصیات کلی رسوبات طزره را حفظ کرده و تنها تغییر آن در ضخامت لایه‌ها است. نمایی از چین‌های منطقه در شکل ۲-۳ به تصویر کشیده شده است. این منطقه بر روی رسوبات آهکی-دولومیتی سازند شمشک با شیبی به طرف شمال و امتدادی شرقی-غربی قرار گرفته است. رسوبات سازند شمشک به بخش‌های اکراسر، طزره ، شیرین دشت و دانسریت تقسیم می‌گردد.



شکل ۳-۲: نمایی از چین خوردگی‌های منطقه [۵۱].

۳-۳-۳- تکتونیک

همان‌طور که بیان شد تشکیلات رسوبی طزره یال جنوبی سینکلینال بزرگ بنام سینکلینال میاناب را تشکیل می‌دهد که این خود جزئی از چین خوردگی البرز است که در اواخر مزوزوئیک و در دوران سوم زمین‌شناسی اتفاق افتاده است. محور این ناودیس در ناحیه طزره افقی و امتداد آن تقریباً شرقی-غربی، شیب متوسط طبقات آن ۳۰ درجه و در غرب یعنی منطقه کلاریز نیز ۸۰ درجه می‌باشد.

به‌طور کلی تشکیلات منطقه پشکلات رسوبات ساحلی (پارالیک) هستند که بیشتر از ماسه‌سنگ‌های میکا و رس‌دار، شیل‌ها، آرژیلیت و زغال یعنی سنگ نرم و لغزنده تشکیل شده‌اند و این باعث شده است که نیروهای تکتونیکی تغییرات زیادی در آن‌ها به‌وجود آورند.

در حالی که آهک‌های سخت در گرومالم روی طبقات زغالی واقع است به واسطه مقاومت زیاد، گسل‌ها و چین خوردگی‌های بسیار کمتری را تحمل نموده به همین دلیل پیش‌بینی می‌شود که طبقات زغال‌دار دانسریت که زیر طبقات آهکی قرار دارد تغییرات تکتونیکی کمتری را نسبت به تشکیلات زغال‌دار زیربخش آلاشت و کلاریز داشته باشد.

رسوبات زغال‌دار منطقه پشکلات دارای امتداد شرقی-غربی و آزیموتی برابر ۲۲۰ تا ۳۶۰ درجه را دارا می‌باشد. شیب این طبقات از ۳۰ تا ۵۰ درجه در نوسان است به ترتیبی که شیب در جهت غرب افزایش می‌یابد. گسل‌های زیادی از نوع نرمال و معکوس همچنین گسل‌های هم شیب در منطقه مشاهده می‌شود که رسوبات زغال‌دار در بخش بزرگی از منطقه توسط این گسلها قطع شده است. با توجه به این که تعداد گسل‌های منطقه پشکلات از ۷۲ گسل کوچک و بزرگ تجاوز می‌کند برای هر کدام شماره‌هایی انتخاب گردیده که بر اساس حروف لاتین نامگذاری شده اند.

گسل *F1* بزرگترین گسل و مرز جنوبی منطقه را مشخص می‌نماید. این گسل در تمام منطقه از غرب به شرق امتداد دارد. طول این گسل حدود ۷ کیلومتر جابجایی آن ۳۰۰ تا ۶۰۰ متر و شیب آن به طرف شمال می‌باشد. به غیر از گسل *F1* گسل بزرگ دیگری به عنوان مرز غربی و حد فاصل منطقه پشکلات و کلاریز شناخته می‌شود. جابجایی همه گسل‌ها از ۲ الی ۳ متر بوده و شیب آنها ۵۵ تا ۸۵ درجه است. منطقه توسط این گسل‌ها به سه بلوک تکتونیکی غربی، مرکزی، شرقی تقسیم می‌شود [۵۱].

۳-۴- برداشت ناپیوستگی‌ها

برداشت ناپیوستگی‌ها و درزه‌نگاری توده‌سنگ در محدوده معدن طزره به منظور شناسایی سیستم درزه‌ها و شرایط مقاومتی و رفتار تغییرشکل توده‌سنگ برجا و نیز مطالعات و محاسبات تحلیل پایداری کارگاه‌های استخراج لازم و ضروری است. به‌علاوه، نتایج مربوط به برداشت‌های ژئومکانیکی هم از نظر تعیین پارامترهای کیفی توده‌سنگ و هم از لحاظ تعیین وضعیت سیستم درزه‌ها و توجیه فضایی آن‌ها در منطقه مورد نظر، بهسازی عملیات حفاری و ... مفید و کارآمد است.

در مرحله اول این پروژه، ابتدا برداشت درزه‌های دارای تداوم محدود در محدوده تحت مطالعه صورت گرفته و نتایج برداشت‌ها شامل روند عمومی درزه‌های منطقه و حداکثر فراوانی مربوط به هر یک از پارامترهای هندسی درزه‌های توده‌سنگ از طریق مطالعات آماری جمع‌بندی و خلاصه گردید.

روش‌های برداشت ناپیوستگی‌ها به دو روش زیرسطحی و سطحی تقسیم‌بندی می‌شوند. روش‌های زیرسطحی شامل استفاده از ژئوفیزیک انکسار موج لرزه‌ای و داده‌های حاصل از لاگینگ گمانه‌ها و تحلیل مغزه‌هاست. وضوح داده‌های استاندارد حاصل از روش لرزه‌ای انکساری برای شناسایی ساختارهایی با حداقل طول چند متری مناسب است. لذا با توجه به وضوح مورد نیاز برای بررسی شبکه شکستگی، استفاده از روش‌های درون گمانه‌ای مانند لاگ‌های صوتی برای برداشت‌های کوچک مقیاس و روش لرزه‌ای برای برداشت‌های بزرگ مقیاس پیشنهاد می‌شوند.

روش دیگر برداشت درزه‌ها برداشت از رخنمون‌های سطحی است که به دلیل سادگی عملیات به‌طور گسترده برای تخمین پارامترهای شکستگی‌ها مورد استفاده قرار می‌گیرند. هنگام استفاده از داده‌های حاصل از رخنمون‌های سطحی بایستی به نکاتی همچون درجه هوازدگی سطح زمین، روش برداشت مورد استفاده و میزان قابلیت رخنمون مورد نظر برای ارائه خصوصیات زیرسطحی توجه داشت. انواع روش‌های برداشت سطحی اعم از روش برداشت خطی و برداشت‌های فضایی از رخنمون‌ها، ترانسه‌ها و ... (از جمله روش پنجره برداشت) می‌باشند.

برای برداشت ناپیوستگی‌ها در معدن زغالسنگ طزره از روش برداشت خطی (*Scanline*) استفاده شد. امتداد ناپیوستگی‌ها و شیب آن‌ها توسط کمپاس اندازه‌گیری شد. سایر خواص ناپیوستگی‌ها شامل فاصله‌داری، دهانه بازشدگی، تداوم، زبری، موجداری سطح و مواد پرکننده نیز مورد بررسی قرار گرفت. زون‌های برداشت دو زون *A* و *B* را شامل می‌شوند که تصویر هوایی آن‌ها در شکل ۳-۳ ارائه شده است. مطابق با این شکل، زون *A* در نزدیکی تونل مادر و در عرض جغرافیایی $36^{\circ}24'24''/90$ شمالی

و طول جغرافیایی $54^{\circ}25'21''$ شرقی و زون B در عرض جغرافیایی $36^{\circ}24'22''/87$ شمالی و طول جغرافیایی $54^{\circ}23'20''$ شرقی و در نزدیکی اوکلون برناکی واقع است.

درزه‌ها در تعداد ۵ خط برداشت که جهت هر یک در جدول ۳-۱ آمده است، با مقدار تداومی در بازه $0/55$ تا ۲ متر و با شیب‌ها و امتدادهای متفاوت برداشت شدند. داده‌های مربوط به برداشت پارامترهای عنوان شده در پیوست الف ارائه شده اند. داده‌های شیب و جهت‌داری توسط نرم افزار *Dips* مورد پردازش قرار گرفت که نتایج آن در بخش بعدی ارائه می‌گردد. از آن جایی که محدوده زون A برای مدل‌سازی عددی انتخاب شده است، از میان درزه‌های برداشت شده درزه‌های واقع در این زون برای مدل‌سازی انتخاب شد.



(الف)



(ب)

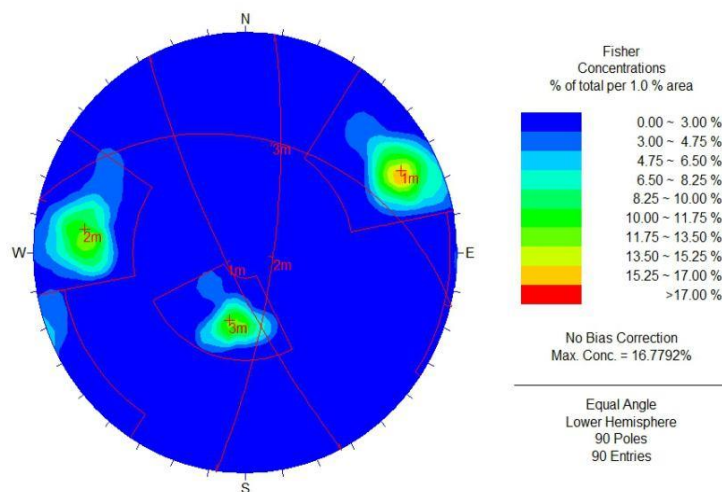
شکل ۳۰-۳: محدوده مورد مطالعه؛ (الف) زون A و (ب) زون B .

جدول ۳-۱: جهت‌یابی خطوط برداشت.

زون B		زون A			جهت‌یابی
خط برداشت ۵	خط برداشت ۴	خط برداشت ۳	خط برداشت ۲	خط برداشت ۱	
N115E	N125E	N80E	N80E	N5E	

۳-۵- زمین‌شناسی مهندسی منطقه

رفتار مکانیکی سنگ‌ها به شدت تحت تاثیر خصوصیات سیستم ناپیوستگی‌ها و تعداد دسته درزه‌ها است. از سوی دیگر رفتار مکانیکی توده سنگ تاثیر زیادی بر شرایط پایداری حاکم بر محیط دارد. بنابراین تحلیل دقیق وضعیت و خصوصیات سیستم درزه و شکستگی‌ها از مهم‌ترین مسائل در تحلیل پایداری شیب‌های سنگی می‌باشد. در این بخش با استفاده از اطلاعات حاصل از برداشت ناپیوستگی‌ها در محدوده، مقادیر غالب شیب و امتداد و همچنین ثابت آماری توزیع شیب درزه‌های برداشت شده به کمک نرم افزار *Dips* تعیین می‌شود. شیب دسته درزه‌ها به ترتیب برای دسته درزه ۱، ۲ و ۳ برابر با ۷۹/۱۱، ۳۴/۵۴ و ۷۴/۸۱ درجه و ثابت فیشر خروجی نرم‌افزار برای هر یک از آن‌ها به ترتیب معادل ۵۳/۳۱، ۱۹۴ و ۳۸/۴۷ به دست آمد. شکل ۳-۴ تصویر استریوگرافی ناپیوستگی‌های برداشت شده را به صورت نگاره‌های قطبی نشان می‌دهد.



شکل ۳-۴: نگاره استریوگراف حاصل از داده‌های خط برداشت در زون A.

توده سنگ این محدوده به نسبت درزه دار بوده و همان طور که در شکل ۳-۴ مشخص است، تحلیل آماری در نرم افزار *Dips* نشان از وجود سه دسته ناپیوستگی مجزا در ساختار توده سنگ دارد. نتایج بررسی خواص ناپیوستگی ها شامل شیب، جهت شیب، پایایی، دهانه بازشدگی، تداوم، زبری، موجداری سطح و مواد پرکننده در جدول ۳-۲ خلاصه شده است.

جدول ۳-۲: مقادیر میانگین ویژگی های هندسی ناپیوستگی های مورد مطالعه.

شماره دسته درزه	شیب (درجه)	جهت شیب (درجه)	پایایی (m)	ثابت فیشر	ضریب زبری	بازشدگی متوسط (mm)
۱	۷۹/۱۱	۲۴۲/۹	۰/۶-۱/۵	۵۳/۳۱	۲/۰۱۷	۲/۵۸۷
۲	۳۴/۵۴	۱۶/۵۴	۰/۵۵-۲	۱۹۴	۲/۱۵۶	۴/۰۹
۳	۷۴/۸۱	۹۹/۹۹	۰/۷-۱/۵	۳۸/۴۷	۲/۰۶۸	۲/۳۴

۳-۶- مطالعات آزمایشگاهی

شناخت خصوصیات مهندسی سنگ بکر در پروژه های مهندسی از اهمیت چشمگیری برخوردار است. در مطالعه حاضر برای دسترسی به خصوصیات مقاومتی و تغییر شکل سنگ بکر و به کارگیری آن ها در تحلیل رفتار توده سنگ از آزمون آزمایشگاهی مقاومت فشاری تک محوره بهره گیری شده است.

هنگامی که رابطه بین تنش- کرنش سنگ غیرخطی باشد، مدول الاستیسیته ثابت نخواهد بود و در هر نقطه از منحنی مزبور با رسم مماسی بر منحنی و با تعیین نقطه ای بر روی منحنی می توان شیب خطوط مزبور را به عنوان مدول الاستیسیته قبول کرد. لذا در مکانیک سنگ از مدول های مختلفی استفاده می شود که مدول مماسی، مدول متقاطع و مدول متوسط را در بر می گیرد. مدول مماسی شیب خط مماس بر منحنی تنش- کرنش در هر نقطه از منحنی است. معمولاً برای مقایسه ۵۰٪ مقاومت نهایی سنگ را برای رسم خط مماس انتخاب می نمایند. مدول متقاطع شیب خط واصل مبدا مختصات به هر نقطه بر روی منحنی تنش- کرنش است و معمولاً نقطه ای در ۵۰٪ مقاومت نهایی برای این منظور تعیین می شود. مدول متوسط نیز شیب قسمت مستقیم الخط منحنی تنش- کرنش

به‌عنوان مدول متوسط نامیده می‌شود. در این تحقیق از مدول متقاطع در نقطه ۵۰٪ مقاومت نهایی برای بیان مدول الاستیسیته و همچنین مدول تغییرشکل‌پذیری استفاده شده است.

۳-۶-۱- آزمایش مقاومت فشاری تک محوره

آزمایش مقاومت فشاری تک محوری یا محصور نشده مرسوم‌ترین آزمون آزمایشگاهی برای مطالعات مکانیکی سنگ بکر می‌باشد که با وجود سادگی در ظاهر مسأله، انجام دقیق آن بسیار مشکل است. این آزمایش به‌عنوان آزمایش پایه در اکثر پروژه‌های مهندسی انجام گرفته و به‌ندرت اتفاق می‌افتد که در پروژه‌های مقاومت فشاری تک محوری مورد نیاز نباشد. اگرچه این آزمایش به‌عنوان شاخصی برای مقایسه سنگ‌ها شناخته می‌شود، لیکن کاربردهای وسیع دیگری نیز در حل مسائل عملی مکانیک سنگ مانند برآورد زمان وقوع خرابی در اثر فشار یا بُرش، ارزیابی مقاومت پایه‌های سنگی در معادن زیرزمینی، تخمین مقاومت فشاری سه محوری با استفاده از معیارهای شکست و تعیین مدول تغییرشکل‌پذیری یافته است [۳۴].

مقاومت سنگ بکر همچنین به‌عنوان یک پارامتر اصلی در اکثر سیستم‌های طبقه‌بندی توده‌سنگ مورد توجه قرار گرفته است. مقاومت ماده سنگ حد بالای مقاومت توده‌سنگ می‌باشد. به عبارت دیگر، مقاومت توده‌سنگ به دلیل وجود صفحات ضعف در ساختار آن از سنگ بکری از همان جنس همواره کمتر است.

۳-۶-۱-۱- آماده‌سازی نمونه

در مطالعه حاضر به دلیل محدودیت‌های اقتصادی و مدیریتی موجود در حفر گمانه، نمونه‌های مورد نیاز برای آزمایش مقاومت فشاری تک محوره از طریق مغزه‌گیری از بلوک‌هایی از رخنمون‌های

سطحی در منطقه به دست آمده اند. شکل ۳-۵ رخنمون ماسه سنگ و نمونه‌های برداشت شده در نزدیکی تونل مادر (زون A) را به تصویر می‌کشد.



(ب)



(الف)

شکل ۳-۵: (الف) نمایی از رخنمون ماسه سنگ؛ (ب) بلوک‌های سطحی.

مغزه‌های مورد نیاز برای آزمایش پس از انتقال بلوک‌های سنگی به آزمایشگاه بر اساس استاندارد *ISRM* و با استفاده از دستگاه مغزه‌گیر آماده‌سازی شدند. فرآیند مغزه‌گیری آزمایشگاهی از بلوک‌های زون A در شکل‌های ۳-۶ و ۳-۷ نشان داده شده است.



شکل ۳-۶: فرآیند گرفتن مغزه از بلوک‌های سنگی.



(ج)

(ب)

(الف)

شکل ۳-۷: مغزه‌های گرفته شده از زون A: (الف) بلوک ۱؛ (ب) بلوک ۲ و (ج) بلوک ۳.

پس از استخراج مغزه‌ها از بلوک‌های سنگ، با توجه به استاندارد *ISRM* نیاز به تنظیم نسبت ارتفاع به قطر نمونه‌ها به اندازه‌ای برابر با $2/5$ تا 3 می‌باشد. بدین منظور از دستگاه فرز استفاده شد تا علاوه بر حصول نسبت طول به قطر مورد نیاز، میزان انحراف سطوح انتهایی نمونه‌ها نیز در محدوده دلخواه آزمایش قرار گیرد (شکل ۳-۸).



شکل ۳-۸: آماده سازی سطوح انتهایی نمونه‌ها.

از میان مغزه‌ها تعداد ۴ نمونه برای انجام آزمایش فشاری تک محوره انتخاب شد. تصویر نمونه‌های آماده‌سازی شده در شکل ۳-۹ ارائه شده است. نمونه‌ها بر اساس زون برداشت شده کد گذاری شده و

بدین ترتیب نمونه‌های با پیشوند A مربوط به زون A و نمونه‌های با پیشوند B مربوط به زون B هستند. نمونه‌های تحت آزمایش شامل $A1$ ، $A2$ ، $B2$ و $B4$ هستند.



شکل ۳-۹: مغزه‌های آماده‌سازی شده بر اساس استاندارد *ISRM*.

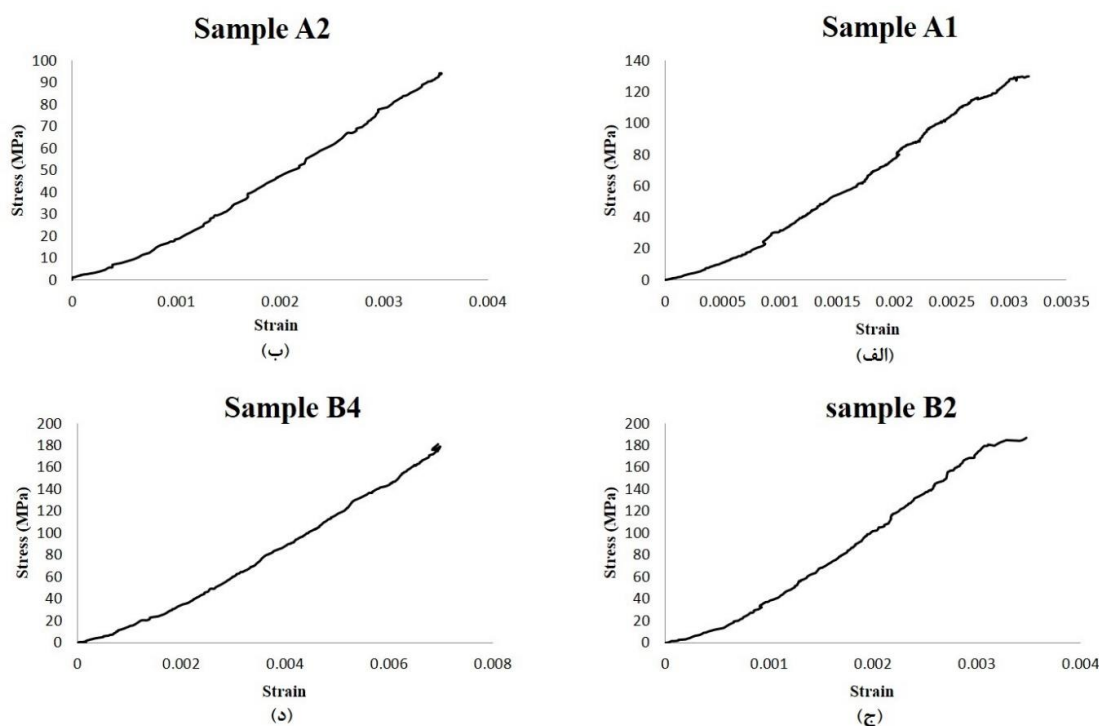
۳-۶-۱-۲- نتایج آزمایش مقاومت فشاری

آزمایش مقاومت تک محوره در آزمایشگاه مکانیک سنگ دانشگاه تربیت مدرس انجام شد. در طول آزمایش نمودارهای تنش محوری در برابر کرنش محوری و جانبی رسم شد. از نمونه‌های آزمایشی قبل و بعد از آزمایش تصویر برداری شده است. در شکل ۳-۱۰ دو مورد از مغزه‌ها ($A1$ و $A2$) قبل و بعد از آزمایش فشاری تک محوری نشان داده شده است.



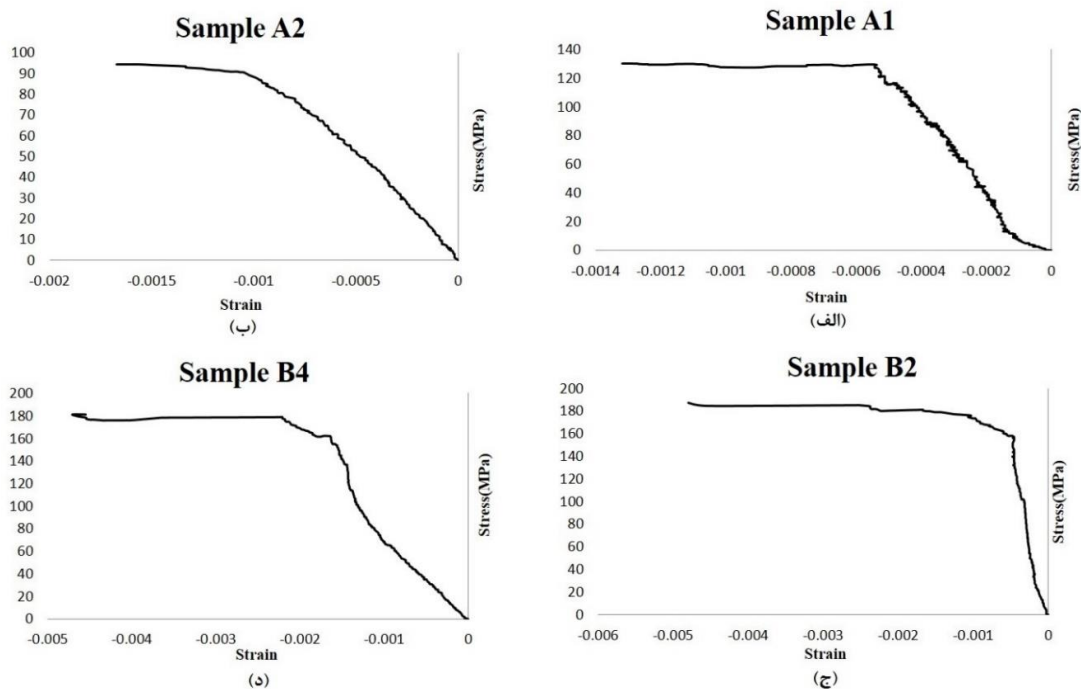
شکل ۳-۱۰: تصویر نمونه‌ها قبل و بعد از آزمایش تک محوره (الف) $A1$ و (ب) $A2$.

شکل ۳-۱۱ نمودارهای تنش کرنش حاصل از هر یک از نمونه‌های چهارگانه را نشان می‌دهد. همان‌طور که در این شکل مشاهده می‌شود مقادیر مقاومت فشاری نمونه‌ها برای زون A از ۹۰ تا ۱۳۰ و برای زون B از ۱۸۰ تا ۱۹۰ مگاپاسکال متفاوت است که نشان از کیفیت متغیر ماده سنگ در منطقه مورد مطالعه دارد. این تفاوت ممکن است ناشی از ناپیوستگی‌های داخلی، تفاوت ترکیب پتروگرافی یا پیچیدگی‌های ساختار ماسه سنگ باشد.



شکل ۳-۱۱: نمودار تنش - کرنش محوری نمونه‌های مختلف ماسه سنگ محدوده مورد مطالعه.

شکل ۳-۱۲ نمودارهای تنش در برابر کرنش جانبی در آزمایش فشاری تک محوره را برای هر یک از نمونه‌های آزمایشگاهی چهارگانه نشان می‌دهد. با استفاده از نسبت کرنش‌های جانبی به دست آمده از شکل زیر و کرنش محوری حاصل از نمودارهای شکل فوق نسبت پواسون محاسبه شد. توجه شود که شکل‌های ۳-۱۱ و ۳-۱۲ نشان دهنده منحنی تنش در برابر کرنش برای نمونه‌های ماده سنگی گرفته شده از منطقه مورد مطالعه بوده و این نمونه‌ها فاقد هر گونه ناپیوستگی در ساختار خود هستند.



شکل ۳-۱۲: نمودار تنش - کرنش جانبی نمونه‌های مختلف ماسه سنگ محدوده مورد مطالعه.

جدول ۳-۳: نتایج آزمایش فشاری تک محوره.

نمونه	قطر (mm)	طول (mm)	دانسیته (g/cm^3)	تخلخل (/.)	مقاومت فشاری (MPa)	مدول یانگ (GPa)	نسبت پواسون
A1	۵۴/۱۳-۲۴	۱۳۵/۴۰	۲/۴۸۹	۰/۹۸	۱۳۰	۳۸	۰/۲۴
	۵۴/۲۶-۲۶						
A2	۵۴/۲۲-۲۸	۱۳۷/۷۱	۲/۸۷۸	۰/۶۷	۹۵	۲۴/۵۵	۰/۳۱
	۵۴/۲۱-۲۳						
B2	۵۴/۲۵-۲۹	۱۳۸/۴۰	۲/۸۷۸	۰/۶۷	۱۸۰	۴۹/۱۲	۰/۲۵
	۵۴/۲۳-۲۳						
B4	۵۴/۲۶-۲۹	۱۳۶/۱۵	۲/۸۷۸	۰/۶۷	۱۸۰	۲۲/۱۸	۰/۲۱
	۵۴/۲۹-۳۱						
	۵۴/۲۹-۳۲						
	۵۴/۱۹-۲۲						
	۵۴/۲۱-۲۴						
	۵۴/۱۹-۲۰						

جدول ۳-۳ بیانگر نتایج آزمایش فشاری تک محوره ماده سنگ بر اساس استاندارد ISRM است که بر روی تعداد ۴ نمونه آزمایشگاهی از مغزه‌های حفاری شده در دو زون متفاوت در منطقه گرفته شده است.

۳-۷- رده‌بندی توده‌سنگ

در علم ژئومکانیک سنگ را به دو صورت بکر و توده‌سنگ رده‌بندی می‌کنند. رده‌بندی توده‌سنگ یکی از راه‌های طراحی سازه‌های سنگی در سالیان اخیر بوده است. به‌منظور تخمین مقاومت و مدول دگرشکل‌پذیری توده‌سنگ سنگ ابتدا دسته‌ای از پارامترها بایستی در قالب سیستم‌های طبقه‌بندی توده‌سنگ تعیین گردند.

۳-۷-۱- شاخص کیفیت توده‌سنگ (RQD)

دیپیر در سال ۱۹۶۰ معیاری از درصد مغزه بازیافتی ارائه کرد که بصورت نسبت مغزه‌های دارای طول بیشتر یا مساوی ۱۰ سانتیمتر به کل طول حفاری تعریف شده و شاخص کیفیت سنگ نام گرفته است. جدول ۳-۴ تقسیم‌بندی کیفی سنگ‌ها را براساس RQD نشان می‌دهد.

جدول ۳-۴: طبقه‌بندی سنگ‌ها با استفاده از شاخص کیفیت سنگ.

$RQD(\%)$	شرح کیفیت
۰-۲۵	خیلی ضعیف
۲۵-۵۰	ضعیف
۵۰-۷۵	متوسط
۷۵-۹۰	خوب
۹۰-۱۰۰	عالی

شاخص RQD را علاوه بر مغزه‌ها می‌توان با توجه به تعداد درزه‌های موجود در واحد حجم سنگ با استفاده از رابطه زیر محاسبه کرد:

$$RQD = 115 - 3/3 J_v \quad (1-3)$$

در این رابطه J_v تعداد درزه‌های موجود در یک متر مکعب از سنگ (چگالی حجمی درزه‌ها) است که اگر مقداری کمتر از $4/5$ داشته باشد RQD معادل 100 در نظر گرفته می‌شود. مقدار J_v با استفاده از رابطه (۲-۳) محاسبه می‌گردد [۵۲].

$$J_v = \frac{1}{S_1} + \frac{1}{S_2} + \dots + \frac{1}{S_n} \quad (2-3)$$

که در آن S_i فاصله داری دسته درزه i ام توده‌سنگ است. که در آن S_i فاصله داری دسته درزه i ام توده‌سنگ است. در رابطه فوق به دلیل فراوانی محدودی که دسته درزه دوم داشته است از آن صرف‌نظر می‌شود تا نتایج مدل عددی را نیز که در فصل بعد ارائه خواهد شد نیز تحت تاثیر قرار ندهد. با در نظر گرفتن دو دسته درزه برای توده‌سنگ با خواص مذکور در جدول ۲-۳، مقدار چگالی حجمی درزه‌داری برابر با $18/33$ محاسبه شده و متعاقب آن شاخص کیفیت سنگ برابر با $54/5$ خواهد بود که با توجه به جدول فوق توده سنگ در رده سنگ‌های متوسط قرار می‌گیرد.

۳-۷-۲- رده‌بندی ژئومکانیکی یا RMR

این رده‌بندی در سال ۱۹۷۳ توسط بنیاوسکی ارائه شده است. وی براساس مطالعات خود بر روی بیش از ۴۹ مورد خاص رده‌بندی خود را بر مبنای ۶ پارامتر مختلف پیشنهاد کرد. بایستی توجه کرد که امتیازهای ۵ پارامتر اول با هم جمع شده و پارامتر ششم به‌طور جداگانه تاثیر داده می‌شود. به هر حال برای پارامتر ششم در بهترین شرایط هیچ امتیازی بر امتیازات اولیه اضافه نمی‌شود. شش پارامتر مذکور عبارتند از: مقاومت فشاری تک محوره سنگ بکر، RQD ، فاصله‌داری درزه‌ها، شرایط ناپیوستگی، شرایط آب زیرزمینی، جهت و امتداد ناپیوستگی‌ها.

دامنه تغییرات امتیاز *RMR* از صفر تا ۱۰۰ بوده و هر کدام از رده‌ها دارای یک دامنه ۲۰ امتیازی هستند. نحوه امتیازدهی به پارامترهای مختلف و همچنین نحوه تعدیل آن‌ها و تاثیر جهت و امتداد ناپیوستگی‌ها در جداول ۳-۵ تا ۳-۷ ارائه شده است.

جدول ۳-۵: پارامترهای رده‌بندی ژئومکانیکی توده‌سنگ [۵۳].

Parameter		Range of values					
1	Strength of intact rock	> 10	4-10	2-4	1-2	For this low range, unconfined compressive test is preferred	
	Point-load strength index (MPa)	> 250	100-250	50-100	25-50	5-25 | 1-5 | <1	
	Unconfined compressive strength (MPa)	15	12	7	4	2 | 1 | 0	
Rating		15	12	7	4	2 | 1 | 0	
2	Drill core quality RQD (%)	90-100	75-90	50-75	25-50	< 25	
	Rating	20	17	13	8	3	
3	Spacing of discontinuities (m)	> 2	0.6-2	0.2-0.6	0.06-0.2	< 0.06	
	Rating	20	15	10	8	5	
4	Conditions of discontinuities	Very rough surfaces, Not continuous, No separation, Unweathered wall rock	Slightly rough surfaces, separation < 1 mm, Slightly weathered walls	Slightly rough surfaces, separation < 1 mm, Highly weathered walls	Slickensided surfaces or Gouge < 5 mm thick or Separation 1-5 mm continuous	Soft gouge > 5 mm thick or Separation > 5 mm Continuous	
	Rating	30	25	20	10	0	
5	Ground water	Inflow per 10 m tunnel length (l/min)	None	<10	10-25	25-125	>125
		Ratio of joint water pressure to major principal stress	0	<0.1	0.1-0.2	0.2-0.5	>0.5
		General conditions	Completely dry	Damp	Wet	Dripping	Flowing
	Rating	15	10	7	4	0	

جدول ۳-۶: مقادیر تعدیل ارزش عددی برای جهت‌یابی درزه‌ها [۵۳].

Strike and dip orientations of discontinuities		Very favorable	Favorable	Fair	Unfavorable	Very Unfavorable
Ratings	Tunnels and mines	0	-2	-5	-10	-12
	Foundations	0	-2	-7	-15	-25
	Slopes	0	-5	-25	-50	-60

جدول ۳-۷: کلاس‌های مختلف توده‌سنگ و پارامترهای طراحی و خواص مهندسی متناظر [۵۳].

Class No.	I	II	III	IV	V
RMR	100 - 81	80 - 61	60 - 41	40 - 21	< 20
Description	Very Good	Good	Fair	Poor	Very poor
Average stand-up time	20 years for 15 m span	1 year for 10 m span	1 week for 5 m span	10 hours for 2.5 m span	30 minutes for 1 m span
Cohesion of rock mass (MPa)	> 0.4	0.3 - 0.4	0.2 - 0.3	0.1 - 0.2	< 0.1
Internal friction angle of rock mass (°)	> 45	35 - 45	25 - 35	15 - 25	< 15
Deformation modulus (GPa) ^{a)}	> 56	56 - 18	18 - 5.6	5.6 - 1.8	< 1.8

با استفاده از جداول فوق مقدار امتیاز ژئومکانیکی ماسه‌سنگ معدن طزره برابر با ۵۳ به دست آمد که در رده سوم یا متوسط این طبق‌بندی قرار می‌گیرد. با استفاده از امتیاز *RMR* می‌توان شاخص مقاومت زمین‌شناسی توده‌سنگ (*GSI*) را نیز تخمین زد. در هنگام استفاده از امتیاز *RMR* برای

برآورد GSI ، توده سنگ بایستی کاملاً خشک فرض شده و از امتیاز تعدیل جهت یابی درزه‌ها صرف نظر گردد [۵۳]. رابطه پیشنهادی برای تخمین GSI به صورت زیر تعریف می‌شود:

$$GSI = RMR - 5 \quad (3-3)$$

بدین ترتیب مقدار عددی شاخص مقاومت زمین شناسی در مطالعه حاضر برابر با ۴۸ به دست آمد.

۳-۷-۳- رده بندی Q

این سیستم رده بندی توسط بارتن و همکاران در سال ۱۹۷۴ در انستیتو ژئوتکنیک نروژ ارائه گردید. به همین دلیل در بعضی منابع به عنوان رده بندی NGI نامیده شده است. این رده بندی براساس مطالعه بیش از ۲۰ تونل در منطقه اسکاندیناوی ارائه شده و یکی از رده بندی های کمی بوده که بیشتر برای مقاصد طراحی نگهداری مورد استفاده قرار می‌گیرد. این رده بندی براساس استفاده از ۶ پارامتر مختلف است و این پارامترها به صورت سه کسر ارائه شده اند که هر یک مفهوم خاصی دارند. پس از به دست آوردن مقادیر کمی هر یک از پارامترها مقدار Q از رابطه زیر حساب می‌شود که دامنه تغییراتی از ۰/۰۰۱ تا ۱۰۰۰ دارد.

$$Q = \left(\frac{RQD}{J_n} \right) \cdot \left(\frac{J_r}{J_a} \right) \cdot \left(\frac{J_w}{SRF} \right) \quad (4-3)$$

در این رابطه RQD شاخص کیفی توده سنگ، J_n عدد مربوط به تعداد گروه درزه، J_r عدد مربوط به زبری درزه، J_a عدد مربوط به دگرسانی درزه، J_w عدد مربوط به کاهش فشار آب درزه و SRF عدد مربوط به کاهش تنش است. خوانندگان برای اطلاع از نحوه تعیین هر یک از پارامترها می‌توانند به منبع [۵۳] مراجعه کنند. پارامترهای فوق و همچنین مقدار Q برای ماسه سنگ معدن طزره در جدول ۸-۳ آمده است.

جدول ۸-۳: امتیاز ماسه سنگ طزره در رده بندی Q .

شاخص کیفیت سنگ (RQD)	۵۴/۵
J_n	۶
J_r	۲
J_a	۱/۵
J_w	۱
SRF	۱
Q	۱۲/۱۱

۳-۸- تخمین تجربی مدول دگرشکل پذیری

همان طور که در فصل‌های قبل اشاره شد تمامی روش‌های اندازه‌گیری برجای مدول تغییرشکل پذیری توده‌سنگ که امروزه مورد استفاده قرار می‌گیرند، زمان بر، پرهزینه و دارای مشکلات عملیاتی خاص خود هستند، لذا استفاده از سیستم‌های طبقه‌بندی توده‌سنگ به منظور به دست آوردن یک مقدار تخمینی از این پارامتر در سال‌های اخیر مورد توجه محققین قرار گرفته است. استفاده از سیستم‌های طبقه‌بندی توده‌سنگ نظیر RMR ، GSI و Q توسط محققین مورد مطالعه قرار گرفته و رابطه این پارامترها با مدول تغییرشکل پذیری به صورت تجربی ارائه گردیده است.

۳-۸-۱- تخمین مدول دگرشکل پذیری با استفاده از Q

بارتن و همکاران در سال ۱۹۸۰ روابط زیر را برای تخمین مدول تغییرشکل پذیری توده‌سنگ با استفاده از رده‌بندی Q پیشنهاد کردند. این روابط سه مقدار حدی بالا، متوسط و پایین برای مدول تغییرشکل پذیری ارائه می‌نمایند [۵۳].

$$E_m = 10 \cdot \log Q \quad (GPa) \quad \text{حد بالا (۵-۳)}$$

$$E_m = 25 \cdot \log Q \quad (GPa) \quad \text{حد متوسط (۶-۳)}$$

$$E_m = 40 \cdot \log Q \quad (GPa) \quad \text{حد پایین (۷-۳)}$$

روابط فوق در صورتی قابل استفاده هستند که مقدار Q بیشتر از ۱ (سنگ سخت) باشد. با استفاده از روابط پیشنهادی بارتن (۱۹۸۰) مقادیر حد بالا، متوسط و پایین مدول دگرشکل پذیری توده سنگ مورد مطالعه به ترتیب برابر با ۱۰/۸۳۱، ۲۷/۰۷۹ و ۴۳/۳۲۶ گیگاپاسکال به دست آمد.

بارتن در سال ۲۰۰۲ رابطه زیر را برای برآورد مدول تغییرشکل پذیری توده سنگ‌ها پیشنهاد نمود:

$$E_m = 10 \left(Q \frac{\sigma_c}{100} \right)^{1/2} \quad (GPa) \quad (8-3)$$

که در این رابطه σ_c مقاومت فشاری تک محوره ماده سنگ است. با توجه به این که تعداد ۴ آزمایش فشاری تک محوره در مطالعه حاضر انجام شده است، برآورد مدول تغییرشکل پذیری با استفاده از نتایج حاصل از هر یک از این آزمایش‌ها انجام گرفته و در جدول زیر ارائه شده است.

جدول ۳-۹: نتایج مدول دگرشکل پذیری توده سنگ با استفاده از رابطه پیشنهادی بارتن ۲۰۰۲.

نمونه	مقاومت تک محوره (MPa)	مدول دگرشکل پذیری (GPa)
A1	۱۳۰	۲۵/۰۴۰
A2	۹۵	۲۲/۵۵۶
B2	۱۸۰	۲۷/۹۱۰
B4	۱۸۰	۲۷/۹۱۰

۳-۸-۲- تخمین مدول دگرشکل پذیری با استفاده از RMR و GSI

بناوسکی در سال ۱۹۷۸ تعداد هفت پروژه را مطالعه کرده و رابطه همبستگی زیر را برای پیش‌بینی مدول تغییرشکل توده سنگ با استفاده از امتیاز RMR پیشنهاد نمود:

$$E_m = 2RMR - 100 \quad (GPa) \quad (9-3)$$

با استفاده از این رابطه مقدار مدول تغییرشکل ماسه سنگ طوره معادل $6 GPa$ برآورد می‌گردد که با مقادیر برآورد شده توسط روابط بارتن اختلاف دارد. نقیصه وارد بر این رابطه این است که رابطه

مذکور برای مقادیر RMR کمتر از ۵۰ قابل کاربرد نیست. مطالعات تکمیلی انجام شده بر روی بازه وسیعی از کیفیت سنگ‌ها توسط سرافیم و پیرا در سال ۱۹۸۳ منجر به ارائه رابطه زیر شد.

$$E_m = 10^{(RMR-10)/40} \quad (GPa) \quad (10-3)$$

مقدار مدول تغییرشکل‌پذیری توده‌سنگ با استفاده از این رابطه برابر با $12/95 \text{ GPa}$ برآورد می‌شود. رابطه پیشنهادی سرافیم و پیرا برای سنگ‌های دارای کیفیت خوب کاربرد قابل قبولی دارد. اما این رابطه برای سنگ‌های ضعیف مقادیر مدول دگرشکل‌پذیری بیش از مقادیر واقعی را تخمین می‌زند [۵۳].

گوکچه اوغلو و همکاران [۵۴] با استفاده از یک پایگاه اطلاعاتی شامل ۱۱۵ داده به‌دست آمده از آزمایش‌های بارگذاری صفحه‌ای و دیلاتومتری همبستگی‌های زیر را براساس تجزیه و تحلیل رگرسیونی پیشنهاد نمودند:

$$E_m = 0.0736 e^{0.755 RMR} \quad (GPa) \quad (11-3)$$

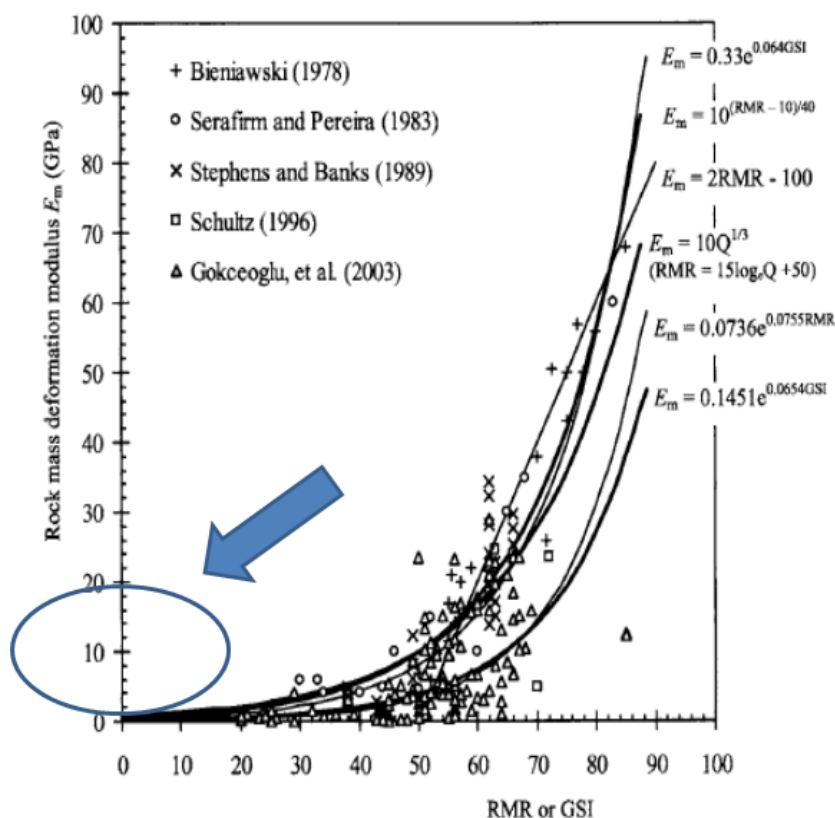
$$E_m = 0.1451 e^{0.654 GSI} \quad (GPa) \quad (12-3)$$

مدول دگرشکل‌پذیری ماسه‌سنگ با استفاده از همبستگی با RMR برابر با $4/0.24$ و با استفاده از همبستگی GSI معادل $3/349 \text{ GPa}$ به‌دست آمده است.

هوک در سال ۲۰۰۴ همبستگی زیر را برای تخمین مدول تغییرشکل توده‌سنگ با استفاده از شاخص مقاومت زمین‌شناسی (GSI) ارائه نمود [۵۳]:

$$E_m = 0.33 e^{0.64 GSI} \quad (GPa) \quad (13-3)$$

مقدار مدول تغییرشکل‌پذیری توده‌سنگ مورد مطالعه با استفاده از این رابطه برابر با $7/122 \text{ GPa}$ برآورد می‌گردد. شکل ۳-۱۳ مقایسه روابط تجربی موجود و نتایج آزمایشگاهی را نشان می‌دهد. محدوده مشخص شده بر روی محور عمودی مربوط به مقادیری است که توسط محققین مختلف برای RMR مساوی با ۵۳ و یا GSI برابر با ۴۸ به‌دست آمده‌اند.



شکل ۳-۱۳: محدوده همبستگی بین مدول تغییرشکل و امتیازهای RMR یا GSI برای ماسه‌سنگ طرز (نمودار بر گرفته از [۵۳]).

همبستگی‌های تجربی دیگری نیز بین نسبت مدول تغییرشکل توده‌سنگ به مدول تغییرشکل سنگ بکر و امتیاز RMR ارائه شده است. یکی از این روابط در سال ۱۹۹۰ توسط نیکلسن و بنیاوسکی پیشنهاد شده است [۵۳].

$$\frac{E_m}{E_r} = \frac{1}{100} \left(0.28 RMR^2 + 9 e^{RMR/22/82} \right) \quad (۳-۱۴)$$

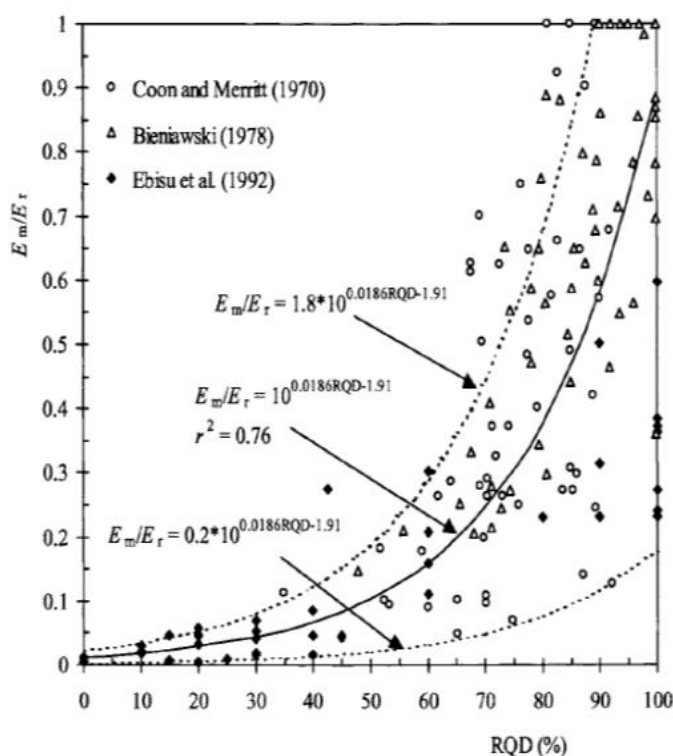
رابطه دیگری توسط میتری و همکاران در سال ۱۹۹۴ پیشنهاد شده که با انجام رگرسیون بر روی نسبت مدول و RMR به دست آمده است [۵۳].

$$\frac{E_m}{E_r} = \frac{1 - \cos(\pi \times RMR / 100)}{2} \quad (۳-۱۵)$$

نسبت مدول ماسه سنگ به دست آمده در حالت توده‌ای به سنگ بکر با استفاده از این روابط به ترتیب برای رابطه نیکلسن و میتری برابر با ۰/۵۴۵ و ۰/۱۷ بوده است.

۳-۸-۳- تخمین مدول دگرشکل پذیری با استفاده از RQD

ژانگ و اینشتین در سال ۲۰۰۴ با جمع‌آوری داده‌های مربوط به رابطه بین شاخص کیفیت سنگ (RQD) و نسبت مدولی توده‌سنگ روابطی برای تعیین حد بالا، میانگین و پایین این نسبت توسعه دادند. شکل ۳-۱۴ نمودار نسبت مدولی در برابر RQD و روابط ارائه شده توسط آن‌ها را نشان می‌دهد [۵۳].



شکل ۳-۱۴: نمودار نسبت مدولی در برابر RQD [۵۳].

با توجه به روابط ارائه شده در این شکل، حد بالا، متوسط و پایین نسبت مدول تغییرشکل ماسه سنگ طزره با استفاده از شاخص کیفیت توده‌سنگ به ترتیب برابر با ۰/۲۲۹، ۰/۱۲۷ و ۰/۰۲۵ تخمین زده شد.

جدول ۳-۱۰ نتایج حاصل از روش‌های تجربی به کار گرفته شده را در تخمین مدول تغییرشکل توده-سنگ معدن طزره با یکدیگر مقایسه می‌نماید. در این جدول مشاهده می‌شود که مقادیر مدول

تغییر شکل تجربی به دست آمده از روش‌های مختلف پراکندگی قابل توجهی دارند. این پراکندگی به-
 طور خاص در روابط ارائه شده توسط بارتن مشاهده می‌شود.

جدول ۳-۱۰: مقایسه مقادیر تخمینی مدول دگرشکل پذیری با استفاده از روش‌های تجربی.

نسبت E_m/E_r	مدول تغییر شکل پذیری (GPa)	روش تجربی
	۱۲/۹۵	سرافیم و پیرا (۱۹۸۳)
	۶	بنیاوسکی (۱۹۷۸)
	۷/۱۲	هوک (۲۰۰۴)
	۳/۹۷۵	RMR گوکچه اوغلو (۲۰۰۳)
	۳/۳۱۶	GSI گوکچه اوغلو (۲۰۰۳)
	۱۰-۴۳	بارتن (۱۹۸۰)
	۲۲-۲۸	بارتن (۲۰۰۲)
۰/۱۷		نیکلسن و بنیاوسکی (۱۹۹۰)
۰/۵۴۷		میتری (۱۹۸۰)
۰/۰۲۵۴-۰/۲۲۹		ژانگ و اینشتین (۲۰۰۴)

۳-۹- تخمین تجربی مقاومت

مقاومت توده سنگ به دلیل وجود ناپیوستگی‌ها نسبت به ماده سنگ مقدار بسیار کمتری خواهد داشت. تخمین مقاومت تک محوره توده سنگ به دلیل این که نمونه آزمایشگاهی بایستی دست نخورده بوده و برای نشان دادن شرایط واقعی ناپیوستگی‌ها به اندازه کافی بزرگ باشد، دشوار است. در این بخش با استفاده از روابط تجربی ارائه شده در بخش ۲-۲، مقاومت فشاری تک محوره توده سنگ معدن طزره برآورد شده و در جدول ۳-۱۱ خلاصه شده است.

جدول ۳-۱۱: مقادیر تجربی به دست آمده برای مقاومت ماسه سنگ طزره.

مقاومت تک محوره توده سنگ (MPa)				روش تجربی
B4	B2	A2	A1	
۴/۹۹	۴/۹۹	۲/۶۴	۳/۶۱	یودبیر (۱۹۸۳)
۲۵/۵۵	۲۵/۵۵	۱۳/۴۸۴	۱۸/۴۵۲	کلاماراس (۱۹۹۳)
۴۵/۳۵	۴۵/۳۵	۳۹/۲۲	۳۹/۲۲	سینگ (۱۹۹۳)
۸۱/۶۳	۸۱/۶۳	۳۷/۲۶	۵۰/۹۸	بیزین (۱۹۹۶)
۱۷/۲۹	۱۷/۲۹	۹/۱۲	۱۲/۴۹	شئوری (۱۹۹۷)
۲۸/۴۸	۲۸/۴۸	۱۵/۰۳	۲۰/۵۷	آیدان (۱۹۹۸)
۳۹/۴	۳۹/۴	۲۷/۵۴	۳۰/۵۷	بارتن (۲۰۰۲)
۲۷/۶۲	۲۷/۶۲	۱۴/۵۸	۱۹/۹۵	رامامورتی (۲۰۰۴)
۳۱/۹۴	۳۱/۹۴	۱۶/۸۶	۲۳/۰۷	هوک (۲۰۰۴)

۳-۱۰- جمع بندی

از آنجایی که اغلب پارامترهای موثر در مهندسی سنگ با یکدیگر در اندرکنش هستند، با افزایش تعداد پارامترهای موثر، فرآیند تجزیه و تحلیل پیچیده شده و دستیابی به یک قضاوت مهندسی صحیح در خصوص رفتار توده سنگ را با مشکل مواجه می‌کند. سیستم‌های رده‌بندی مهندسی سنگ ابزار قدرتمندی در تجزیه و تحلیل همزمان پارامترها و تخمین مقاومت و تغییرشکل پذیری توده سنگ هستند. نتایج حاصل از رده‌بندی ماسه سنگ معدن طزره نشان می‌دهد که این توده سنگ در رده متوسط قرار می‌گیرد. پس از رده‌بندی توده سنگ، از روش‌های تجربی مبتنی بر روش‌های رده‌بندی برای تخمین مدول تغییرشکل پذیری و مقاومت آن استفاده شد. مقایسه نتایج به دست آمده با استفاده از روابط پیشنهادی محققین مختلف نشان از تفاوت در نتایج تخمین تجربی مدول تغییرشکل و مقاومت به خصوص در روابطی است که اساس آن‌ها بر پایه رده‌بندی Q است. دلیل این امر را می‌توان در دخیل بودن پارامترهای مرتبط با طراحی سازه‌های زیرزمینی در این رده‌بندی و بازه تغییرات وسیع در نظر گرفته شده در آن دانست.

نکته‌ای که باید در نظر داشت این است که روش‌های تجربی با وجود این که به وفور مورد استفاده قرار می‌گیرند اما ناهمسانگردی توده‌سنگ بر اثر ناپیوستگی‌ها را در نظر نگرفته و همچنان که مشاهده شد، اغلب مقادیر متفاوتی با استفاده از روابط تجربی مختلف برای یک توده‌سنگ مفروض حاصل می‌شود. از این‌رو، در مواردی که ناهمسانگردی تاثیر ویژه‌ای بر رفتار توده‌سنگ دارد، استفاده از روش‌های مدل‌سازی عددی پیشنهاد می‌گردد.

فصل چهارم: مدل سازی عددی سه بعدی توده سنگ باهدف بررسی تاثیر مقیاس و جهت

بارگذاری بر مقاومت و مدول تغییر شکل پذیری

۴-۱- مقدمه

پیش‌بینی کمی خواص مکانیکی توده‌سنگ‌های درزه‌دار حتی به کمک آزمایش‌های برجای بزرگ مقیاس و گران قیمت به دلیل پیچیدگی رفتار آن‌ها دشوار است. پارامترهای حاصل از آزمون‌های آزمایشگاهی یا صحرایی در مقیاس‌های بسیار محدودی از سطوح درزه و بلوک‌های سنگ صادق می‌باشند. این مقیاس در بیشتر موارد به چند متر محدود می‌شود. از سوی دیگر، خصوصیات کلی معادل توده‌سنگ‌های بزرگ مقیاس اغلب از طریق اندازه‌گیری مستقیم در دست نیست. پیش‌بینی رفتار مقاومتی و تغییرشکل توده‌سنگ درزه‌دار به وسیله مدل‌سازی عددی به منظور مطالعه تأثیر بارگذاری، رفتار ماده، درزه‌ها و توده‌سنگ مفید واقع شده و کاربردهای امیدبخش بسیاری یافته است.

روش‌های عددی در مقایسه با خط‌مشی‌های تجربی و تحلیلی بیان شده در فصل قبل دارای این مزیت اند که در استنتاج خواص معادل توده‌سنگ میتوان تأثیر نامنظم بودن هندسه سیستم درزه-داری مدل‌های ساختاری پیچیده ماده‌سنگ و درزه‌ها را بطور مستقیم در مدل‌سازی شامل نمود [۱۴]. به بیان دیگر، در این مدل‌ها می‌توان از سیستم درزه‌های نامنظمی استفاده کرد که در روابط تحلیلی امکان بهره‌گیری از آن‌ها وجود ندارد.

دو روش عمده در ژئومکانیک محاسباتی جهت شبیه‌سازی مواد درزه‌دار مورد استفاده قرار گرفته‌اند: (۱) تکنیک‌هایی که به صراحت طبیعت ناپیوسته ماده را مدل‌سازی می‌کنند، بعنوان مثال تحلیل جابجایی ناپیوسته (*DDA*)، روش المان مجزا (*DEM*)، همچنین روش المان محدود (*FEM*) و تفاضل محدود (*FDM*) که از یک المان مرزی بهره می‌گیرند؛ (۲) مدل پیوسته معادل و به‌کارگیری آن در *FEM* یا *FDM*. روش المان درزه و تئوری بلوکی در دسته دوم قرار می‌گیرند [۵۵].

با توجه به مباحث ارائه شده در فصل دوم مزایای روش المان مجزا در مدل‌سازی توده‌سنگ درزه‌دار نسبت به سایر روش‌های مذکور و همچنین اهمیت بررسی رفتار توده‌سنگ در سه بُعد سبب شد تا در

تحقیق حاضر از این روش برای منظور کردن شبکه مجزای شکستگی‌های برداشت شده بهره‌گیری شود. در این فصل نحوه ساخت شبکه شکستگی مجزا در سه بعد با استفاده از پارامترهای هندسی و توابع توزیع مرتبط با آن‌ها و همچنین مفروضات مد نظر در تولید شبکه‌های متعدد و مراحل ساخت شبکه‌های شکستگی پرداخته خواهد شد. به منظور مدل‌سازی توده‌سنگ درزه‌دار حاوی شبکه درزه-های مجزایی با خصوصیات هندسی و مکانیکی برداشت شده از محدوده معدن طزره از نرم‌افزار اجزای مجزای سه بُعدی 3DEC 5.0 استفاده شده است. در ادامه، ابعاد حجم معرف اولیه برای مسئله مورد نظر با توجه به خصوصیات مقاومتی و تغییرشکل توده‌سنگ تعیین شده و تاثیر مقیاس بر مقاومت و مدول تغییرشکل‌پذیری بررسی شده است. سپس با استفاده از ابعاد حجم معرف اولیه به دست آمده در مرحله قبل، تاثیر جهت بارگذاری بر رفتار مقاومتی و تغییرشکل توده‌سنگ مورد بررسی قرار می‌گیرد.

۴-۲- نرم‌افزار مورد استفاده

مطابق با آنچه که در بخش قبل بیان شد، در این تحقیق از نسخه ۵ نرم‌افزار 3DEC به منظور ساخت و تحلیلی مدل عددی توده‌سنگ حاوی دسته درزه‌های مجزا استفاده شده است. این نرم‌افزار بر مبنای روش اجزای مجزا نوشته شده است. روش اجزای مجزای معرفی شده توسط کاندال [۱۶] و گسترش آن توسط لموس و همکاران [۵۶]، کاندال [۱۷] و هارت و همکاران [۵۷] تکنیکی قدرتمند در انجام تحلیل تنش در توده‌سنگ‌های بلوکی متشکل از ناپیوستگی‌های ممتد است [۱۸]. در این روش، توده‌سنگ به عنوان مجموعه‌ای از بلوک‌های صلب و یا تغییرشکل‌پذیر مدل می‌شود. ناپیوستگی‌ها به صورت اتصالات مرزی بین بلوکی فرض می‌شوند؛ رفتار درزه برای این اتصالات تجویز می‌شود. الگوریتم اجزای مجزا نه تنها نمایش تئوری بلوک‌ها بلکه قوانین نیرو-جابجایی و قانون حرکتی که حرکت هر بلوک را ناشی از نیروهای نامتعادل کننده روی بلوک مشخص می‌سازد نیز دربر می‌گیرد. بلوک‌های تغییرشکل‌پذیر به شبکه‌ای از المان‌های تفاضل محدود تقسیم‌بندی شده و هر

المان بر طبق قانون تنش - کرنش خطی یا غیرخطی از پیش تعریف شده، واکنش نشان می‌دهد. حرکت نسبی ناپیوستگی‌ها نیز تابع روابط خطی و یا غیرخطی نیرو - جابجایی برای حرکت در هر دو راستای عمودی و برشی است. روش المان مجزا با احتساب برهم‌کنش سنگ‌های بکر و درزه‌ها می‌تواند بطور موثر رفتار مکانیکی سیستم‌های بلوکی تحت شرایط تنش و تغییرشکل مرزی مختلف را محاسبه نماید. این روش یک پروسه راه‌حل صریح و روشن را به کار می‌گیرد. یکی از مزایای استفاده از روش صریح این است که به دلیل این که ماتریس‌ها هیچ‌گاه شکل نمی‌گیرند، جابجایی‌های بزرگ، چرخش‌ها و شبیه‌سازی رفتار بنیادین پیچیده سنگ بکر و درزه‌ها بدون هیچ‌گونه زحمت محاسباتی اضافه، ممکن خواهد بود. ساختار نرم‌افزار 3DEC 5.0 حاوی چند مدل رفتاری مختلف برای سنگ بکر و درزه‌هاست که شبیه‌سازی پاسخ معرف بلوک‌ها و ناپیوستگی‌ها را ممکن می‌سازد و بسته به شرایط مسئله می‌توان از یک یا چند نوع از آن‌ها استفاده کرد. در کنار موارد گفته شده امکان استفاده از روش‌های آماری در تعریف الگوی درزه‌داری پیوسته و ناپیوسته، امکان تعریف عملگرها و توابع از پیش تعریف نشده توسط زبان برنامه نویسی *FISH* و همچنین اضافه شدن امکان تولید شبکه شکستگی‌های مجزا به صورت سه‌بعدی در نسخه حاضر شرایطی را برای این نرم‌افزار فراهم می‌آورد که ابزاری مناسب جهت بهره‌گیری در مطالعه مورد نظر باشد.

۴-۳- مدل‌سازی توده‌سنگ درزه‌دار

درک بهتر رفتار توده‌سنگ درزه‌دار تحت شرایط بارگذاری مختلف مستلزم به کارگیری روش‌های مدل‌سازی عددی در کنار روش‌های تجربی برای برآورد مقاومت و تغییرشکل‌پذیری توده‌سنگ است. بدین منظور مطابق با توضیحات ارائه شده در بخش قبل از روش اجزای مجزا در سه بعد برای انجام مدل‌سازی و تحلیل مقاومت و تغییرشکل استفاده می‌شود. در ابتدا، شرایط هندسی دسته درزه‌های ناپایای برداشت شده در قالب شبکه ناپیوستگی مجزا (*DFN*) مدل‌سازی شده، خواص ژئومکانیکی برگرفته از

آزمون‌های آزمایشگاهی و نیز دیگر مطالعات انجام شده در این زمینه به توده‌سنگ تخصیص داده شده و بارگذاری تک محوره در سه جهت محور مختصات اعمال می‌شود. در نهایت نیز تاثیر اندازه و جهت بار اعمالی بر مقاومت و تغییر شکل پذیری بلوک‌های توده‌سنگ بررسی می‌گردد.

۴-۳-۱- ساخت شبکه شکستگی‌های مرجع

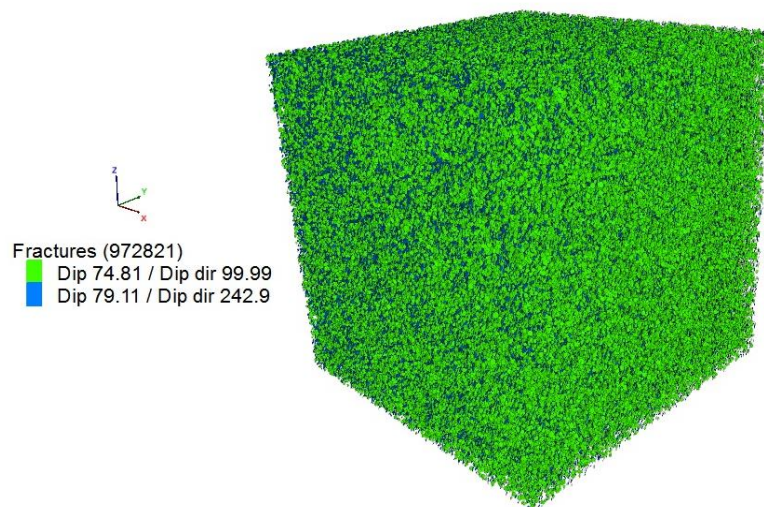
شبکه شکستگی مورد مطالعه با استفاده از داده‌های برداشت شده از معدن طزره که با استفاده از نرم افزار *dips* مورد تحلیل قرار گرفته و نتایج آن در فصل ۳ ارائه شد، تولید می‌گردد. حداقل پارامترهای هندسی مورد نیاز برای مدل‌سازی شبکه شکستگی شامل طول اثر، جهت‌یافتگی (شیب و جهت شیب صفحه شکستگی) و نحوه قرارگیری مرکز شکستگی‌ها می‌شود. با توجه به این که تنها روش تولید شبکه شکستگی مجزا استفاده از داده‌های برداشت صحرایی از سطح برونزاد توده‌سنگ است، بنابراین ساخت شبکه شکستگی سه بعدی بر اساس داده‌های برداشت شده یک یا دو بعدی صورت می‌پذیرد.

توزیع اندازه شکستگی‌ها در *3DEC* از یک تابع احتمالاتی که معرف قطر درزه‌های دیسکی شکل است، تعیین می‌گردد. توابع توزیع اندازه موجود در ساختار نرم افزار شامل تابع توزیع یکنواخت، نرمال، قانون توانی و بوت استرپ می‌شود. در مطالعه حاضر از تابع توزیع قانون توانی استفاده شده است به این دلیل که باور عمومی بر تبعیت فراوانی شکستگی‌های طبیعی از این تابع توزیع استوار است [۱۸]. موقعیت درزه‌ها را نیز با توجه به قابلیت‌های نرم‌افزار می‌توان با استفاده از توزیع‌های یکنواخت، گوسی و بوت استرپ تعریف کرد که در این تحقیق از تابع توزیع یکنواخت برای تعریف موقعیت درزه‌ها استفاده شده است. در کنار این توابع توزیع می‌توان با بهره‌گیری از قابلیت برنامه‌نویسی *FISH* و تدوین یک برنامه پیچیده توابع توزیع دیگری نیز به نرم افزار افزود.

جهت‌یابی درزه‌ها با استفاده از توزیع‌های یکنواخت، گوسی و فیشر تعریف کرد. همانند موارد فوق در این مورد هم قابلیت تعریف یک برنامه *FISH* برای تعیین تابع توزیع جهت‌یابی وجود دارد. توزیع




فیشر در فضای سه بعدی نظیر متقارن توزیع نرمال بوده و اغلب برای مدل‌سازی جهت‌یابی ترجیحی با پراکندگی مفروض حول یک مقدار میانگین به کار گرفته می‌شود [۱۸]. از این‌رو، پیرو رویکردی که در تحلیل انجام شده در فصل قبل ارائه شد از تابع توزیع فیشر برای تعریف پراکندگی شیب و جهت شیب درزه‌ها در مدل عددی استفاده می‌گردد.

چگالی شبکه شکستگی یکی از پارامترهای مورد نیاز برای مدل‌سازی عددی *DFN* است. در صورتی که ابعاد محدوده شبکه شکستگی مرجع ایجاد شده نسبت به محدوده بلوک مورد تحلیل به مقدار کافی بزرگ نباشد، اثر مرزی نتایج شبیه‌سازی را تحت تاثیر قرار خواهد داد. این پدیده از این حقیقت ناشی می‌شود که مراکز درزه‌های تولید شده ممکن است خارج از محدوده بلوک توده‌سنگ واقع شود. بروز اثر مرزی سبب پایین بودن چگالی شکستگی‌ها در مدل‌های ساخته شده خواهد شد. محققین پیشنهاد داده اند که برای از بین بردن اثر مرزی، فاصله بین مرز بلوک و شبکه شکستگی مرجع بایستی بزرگتر از نصف بزرگترین طول اثر درزه‌های واقع در شبکه مرجع باشد [۱۴]. از این‌رو برای این مطالعه ابعاد ۱۰۰ متری برای شبکه شکستگی مرجع که در شکل ۴-۱ نشان داده شده است، انتخاب شد.



شکل ۴-۱: شبکه شکستگی مرجع.

شدت درزه‌داری مورد استفاده در مدل عددی با توجه به نحوه برداشت پارامترهای هندسی درزه‌ها متفاوت است. انواع واحدهای شدت درزه‌داری یک، دو و سه بعدی در شکل ۴-۲ ارائه شده است. این شکل بیان‌گر پارامتر قابل استفاده برای تعریف فراوانی درزه‌ها با توجه به بعد شکستگی و نحوه اندازه‌گیری می‌باشد. معمول‌ترین پارامترهای کاربردی در این زمینه P_{10} یا تعداد شکستگی‌های متقاطع در واحد طول خط برداشت (معادل چگالی یک بعدی)، P_{21} یا مجموع طول شکستگی‌ها بر مساحت واحد سطح برداشت و P_{32} یا مجموع مساحت شکستگی‌ها بر حجم واحد توده‌سنگ هستند.

		Dimension of Feature				
		Number of Fractures	Fracture Trace Length 	Fracture Area 	Fracture Volume 	
		0	1	2	3	
Dimension of Sampling Region	Point	P_{00} [-] Number of fracture samples per point sample of rock mass				Point Measures
	Line (Borehole)	P_{10} [1/m] Number of fractures per unit length of scanline (frequency or linear density)	P_{11} [-] Total fracture aperture per unit length of scanline (lineal porosity)			Linear Measures
	Area (Traceplane)	P_{20} [1/m²] Number of trace centers per unit area of sampling surface (areal density or trace density)	P_{21} [1/m] Length of fracture traces per unit area of sampling surface (areal intensity or trace intensity)	P_{22} [-] Area of fractures per unit area of sampling plane (areal porosity)		Areal Measures
	Volume	P_{30} [1/m³] Number of fracture centers per unit volume of rock mass (volumetric density)		P_{32} [1/m] Area of fractures per unit volume of rock mass (volumetric intensity)	P_{33} [-] Volume of fractures per unit volume of rock mass (volumetric porosity)	Volumetric Measures
			Density	Intensity	Porosity	

شکل ۴-۲: واحدهای شدت درزه‌داری [۱۸].

با توجه به مطالب مذکور، شدت درزه‌داری را می‌توان براساس هریک از واحدهای عنوان شده و داده‌های برداشت شده تعریف نمود. با این وجود، اختصاص شدت درزه‌داری به‌صورت سه‌بعدی به‌دلیل مفهوم حجمی معرف آن دقیق‌تر به نظر می‌رسد. در تحقیق حاضر نظر به این‌که تا کنون روش دقیقی برای محاسبه چگالی سه بعدی درزه‌داری پیشنهاد نشده است، از روابط مرتبط کننده چگالی یک -

بعدی و سه بعدی استفاده می‌شود. کیلس و دمارسیلی^۱ مقیاس‌های یک، دو و سه بعدی را با در نظر گرفتن یک سری مفروضات و ساده‌سازی‌ها با استفاده از روابط زیر به هم مرتبط ساختند که برای محاسبه فرکانس سه بعدی درزه‌داری از این روابط استفاده شد [۵۸].

$$d_1 = \frac{d_r}{2} \quad (1-4)$$

$$d_r = \frac{\pi \cdot d_r}{2} \quad (2-4)$$

در این روابط d_1 چگالی یک بعدی، d_r دو بعدی و d_r سه بعدی درزه‌ها هستند. مقادیر شدت درزه-داری حاصله برای سه دسته درزه ۱، ۲ و ۳ در جدول ۱-۴ ارائه شده است.

جدول ۱-۴: چگالی سه بعدی درزه‌ها در مدل مرجع.

دسته درزه	شیب	جهت شیب	چگالی (m^{-1})
۱	۷۹/۱۱	۲۴۲/۹	۰/۳۲
۲	۳۴/۵۴	۱۶/۵۴	۰/۲۶
۳	۷۴/۸۱	۹۹/۹۹	۰/۰۱

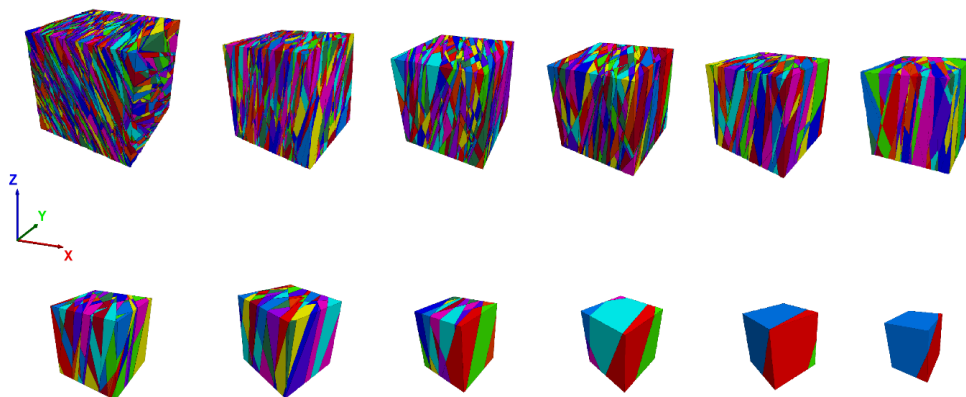
در این تحقیق، به دلیل فراوانی کم دسته درزه سوم، این دسته درزه در مدل‌سازی عددی شبکه ناپیوستگی مجزای ماسه‌سنگ طزره در نظر گرفته نشد. شبکه شکستگی مجزا عموماً توسط الگوریتم مونت کارلو و با اختصاص توابع توزیع احتمال به صورت تصادفی برای پارامترهای هندسی شکستگی‌ها تولید می‌گردد. بر این اساس با در اختیار داشتن یک سری توابع توزیع و پارامترهای معین برای یک شبکه، هر بار آرایش جدیدی به وجود می‌آید. با این وجود، در صورتی که عدد ورودی برای تولید تصادفی درزه‌ها معین گردد می‌توان تولید آرایش‌های متفاوت را کنترل نمود. در این تحقیق نیز برای جلوگیری از اثرگذاری آرایش تصادفی درزه‌ها بر نتایج انتهایی از دو روش بهره‌گیری شده است.

¹ Chiles and De Marsily

نخست این که با تخصیص عدد ورودی مشخص برای تولید کننده شبکه درزه مجزا (با استفاده از کد دستوری *set random*) تولید آرایش تصادفی درزه‌ها کنترل شد و دوم، چند آزمایش عددی برای هر یک از اندازه بلوک‌ها در شرایط یکسان برای اطمینان از اعتبار نتایج انجام گرفت.

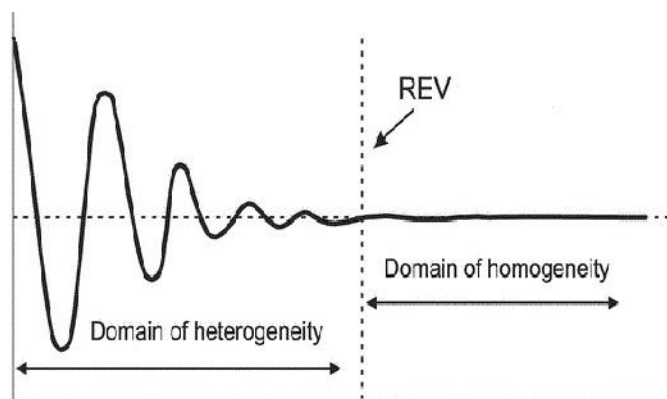
۴-۳-۲- ساخت مدل‌های بلوکی

یکی از اهداف عمده این مطالعه بررسی تاثیر ابعاد بلوک‌های توده‌سنگ درزه‌دار بر روی رفتار مقاومتی و تغییرشکل آن در سه بعد است. نیل به این هدف مستلزم تولید مدل‌های بلوکی در ابعاد مختلف می‌باشد. از این‌رو، بلوک‌های مورد نظر به صورت هم مرکز با شبکه شکستگی مرجع تولید و مورد تحلیل قرار می‌گیرند. تعداد ۱۲ مدل بلوکی با ابعاد ۰/۵، ۱، ۱/۵، ۲، ۲/۵، ۳، ۳/۵، ۴، ۵، ۶، ۸ و ۱۰ متر به منظور ارزیابی تاثیر اندازه و جهت بارگذاری بر مقاومت و مدول تغییرشکل‌پذیری توده‌سنگ از مرکز شبکه شکستگی مرجع استخراج شد. شکل ۴-۳ مدل‌های کوچک برگرفته از مرکز مدل‌های بزرگ‌تر را برای شبکه شکستگی ساخته شده در بخش قبل نشان می‌دهد. همان‌طور که انتظار می‌رود، با کاهش طول یال نمونه‌ها، تعداد بلوک‌های ایجاد شده از تقاطع دسته درزه‌های مجزا کاهش می‌یابد.



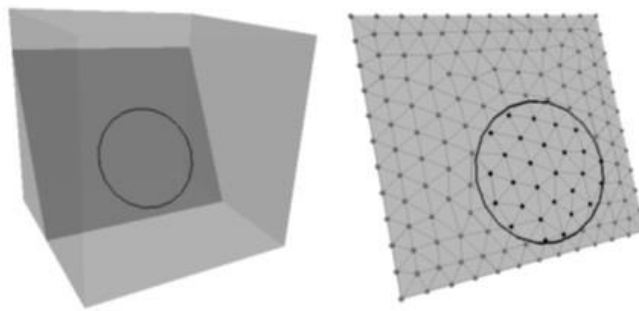
شکل ۴-۳: مدل‌های درزه‌دار هم مرکز با ابعاد متفاوت.

فرآیند مدل‌سازی با انتخاب یک بلوک با ابعادی کوچک به عنوان پیش‌فرض شروع شده و سپس با توجه به رفتار بلوک، ابعاد آن تا جایی افزایش می‌یابد که به ازای افزایش طول بیشتر از آن، خصوصیات تغییر شکل‌پذیری و مقاومتی توده‌سنگ تغییر چندانی نداشته باشد. این مقدار حدی حجم معرف اولیه نام دارد که چگونگی تعیین آن در هنگام مطالعه یک ویژگی خاص از ماده در شکل ۴-۴ به تصویر کشیده شده است.



شکل ۴-۴: مفهوم حجم معرف اولیه [۳].

شکستگی‌های ناپایا در نرم افزار به صورت دایره‌ای و با گسترش محدود مدل‌سازی می‌شوند. با این وجود، امکان قطع بخشی بلوک‌ها توسط ناپیوستگی‌ها در *3DEC* داده نشده است. بدین ترتیب، تمامی صفحات درزه در نرم‌افزار بایستی به ناچار بزرگ‌تر از شبکه شکستگی مجزا باشند. این امر در صورت تخصیص پارامترهای مربوط به شکستگی به کل صفحه درزه رفتار مدل را تحت تاثیر قرار خواهد داد. از این رو، امکان تخصیص خواص مختلف برای نواحی داخل شکستگی‌های دایروی و خارج از آن (در قسمت بلوکی سنگ) وجود دارد. از این طریق به نواحی بیرونی مقادیری تخصیص می‌یابد تا رفتاری شبیه به سنگ داشته باشند. مفهوم این فرآیند در شکل ۴-۵ بیان شده است.



شکل ۴-۵: نحوه تخصیص خواص متفاوت به قسمت درونی و بیرونی یک شکستگی واقع در یک صفحه درزه [۱۸]. از نتایج آزمایش مقاومت فشاری انجام شده بر روی نمونه A2 برای تعریف پارامترهای ژئومکانیکی مورد استفاده برای سنگ بکر در مدل‌سازی عددی توده‌سنگ استفاده شده است. این نتایج در فصل ۳ ارائه شد. برای تعیین دیگر پارامترها نیز از منابع موجود [۲۷، ۲۸ و ۳۸] استفاده شد. پارامترهای مکانیکی سنگ بکر در جدول ۴-۲ آورده شده است.

جدول ۴-۲: خواص مکانیکی ماسه‌سنگ بکر طزره.

زاویه اصطکاک (°)	چسبندگی (MPa)	مقاومت تک محوره (MPa)	نسبت پواسون	مدول یانگ (GPa)	چگالی (g/cm^3)
۳۵	۲۲	۹۵	۰/۳۱	۲۴/۵۵	۲/۴۸۹

ساختار نرم‌افزار 3DEC حاوی چند مدل رفتاری مختلف برای سنگ بکر و درزه‌هاست که بسته به شرایط مسئله می‌توان از یک یا چند نوع از آن‌ها استفاده کرد. در بیشتر مطالعات مربوط به تعیین مدول دگرشکل‌پذیری و مقاومت توده‌سنگ درزه‌دار قسمت بکر سنگ الاستیک فرض شده است. این فرض با توجه به این‌که گسیختگی توده‌سنگ درزه‌دار تنها از طریق صفحات درزه اتفاق نمی‌افتد و تاثیر شکست قسمت بکر سنگ را نیز باید در بررسی‌ها لحاظ کرد، خلاف واقع به نظر می‌رسد. از این-

رو، مدل رفتاری الاستوپلاستیک موهر کولمب به عنوان مدل رفتاری سنگ بکر در نظر گرفته شده است.

مقادیر پارامترهای مربوط به خصوصیات مکانیکی درزه‌ها شامل سختی نرمال و برشی، چسبندگی و زاویه اصطکاک در جدول ۳-۴ ارائه شده است. لازم به توضیح است که مقادیر صلبیت نرمال و برشی مورد استفاده در مدل‌سازی از منابع موجود [۲۷] برداشت شده است. همچنین، مدل رفتاری مورد استفاده برای درزه‌ها مدل سطح تماس الاستوپلاستیک موهر کولمب است.

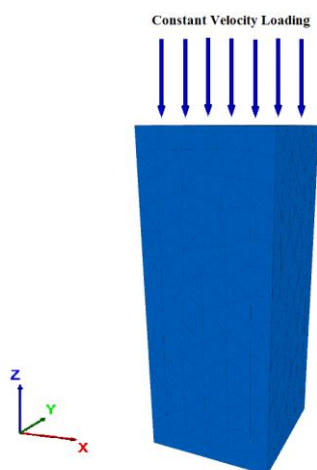
جدول ۳-۴: پارامترهای مکانیکی درزه‌ها.

صلبیت نرمال (GPa/m)	صلبیت برشی (GPa/m)	چسبندگی (MPa)	زاویه اصطکاک ($^{\circ}$)
۴۳۴	۴۳۴	۲/۵	۲۵

۴-۳-۳- اعمال شرایط مرزی و واسنجی^۱ مدل

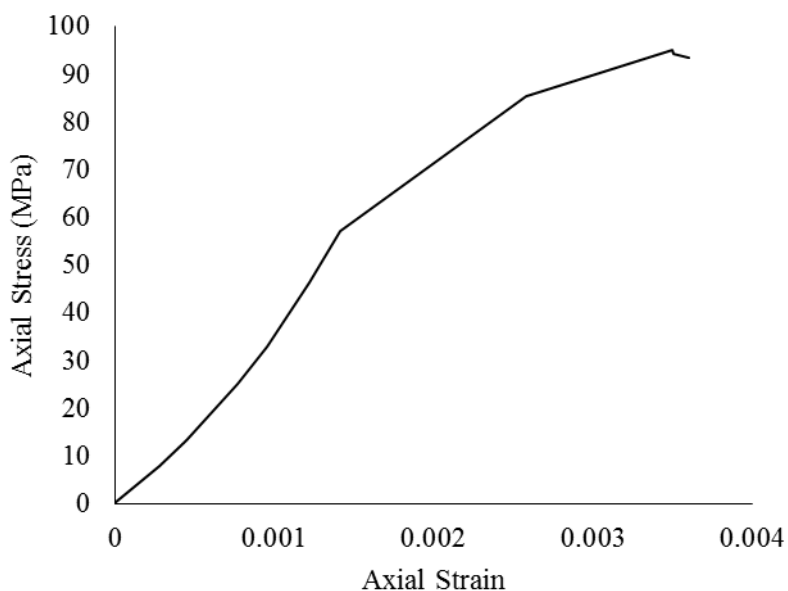
به منظور محاسبه مقاومت فشاری تک محوره و مدول تغییرشکل پذیری توده سنگ ابتدا باید سرعت مناسب بارگذاری در آزمایش عددی مشخص شود. در این مطالعه با توجه به در دست بودن نتایج مربوط به سنگ بکر محدوده طزره، سرعت بارگذاری مورد نیاز از طریق شبیه‌سازی نمونه بکری با خصوصیات مکانیکی مشابه سنگ بکر منطقه و واسنجی نتایج حاصله تعیین می‌شود. برای این منظور، یک نمونه عددی مستطیلی از سنگ بکر با ابعادی نزدیک به نمونه‌های استوانه‌ای آزمایشگاهی (در ابعاد $۱۳۷ \times ۵۴ \times ۵۴$ میلیمتر) ساخته شده و به صورت محوری تحت بارگذاری فشاری با سرعت ثابت قرار می‌گیرد. مدل عددی سنگ بکر مورد استفاده در آزمایش مقاومت فشاری تک محوره در شکل ۴-۶ نشان داده شده است.

^۱ Calibration



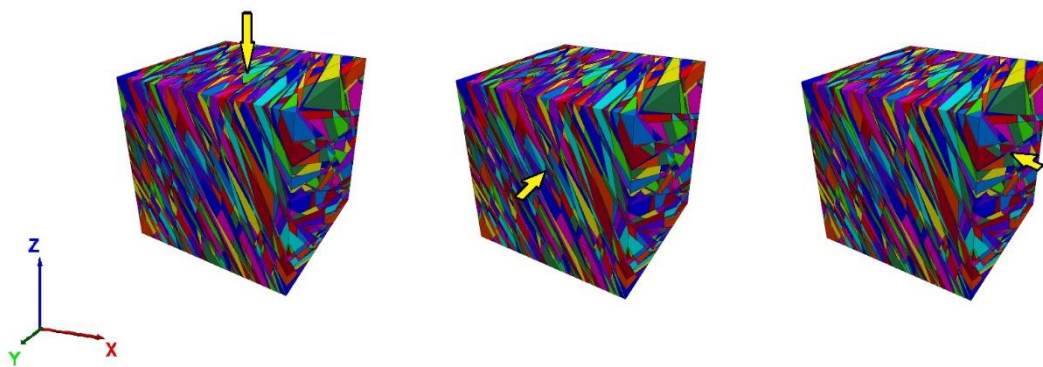
شکل ۴۰-۶: مدل عددی سنگ بکر.

شرایط بارگذاری مناسب با تکرار آزمایش مشروحه تحت سرعت‌های بارگذاری متفاوت و مقایسه نمودار تنش کرنش با نمونه آزمایشگاهی به دست می‌آید. در شکل ۴۰-۷ نمودار تنش کرنش مدل عددی بکر را مشاهده می‌کنید. به این ترتیب، سرعت مورد استفاده برابر با 0.25 m/s تعیین می‌گردد.



شکل ۴۰-۷: نمودار تنش - کرنش مدل عددی بکر.

پس از واسنجی مدل و تعیین سرعت بارگذاری مناسب برای آزمایش مقاومت فشاری تک محوری، شرایط بارگذاری در جهات مختلف تعریف می‌شود. برای مطالعه تاثیر جهت بارگذاری بر مقاومت و تغییرشکل توده‌سنگ، پس از طی مراحل ذکر شده در بخش‌های فوق، پاسخ نمونه به بارگذاری فشاری تک محوره در جهت منفی محور x و y نیز مورد ارزیابی قرار می‌گیرد. در این شرایط نیز مشابه شرایط بارگذاری اولیه که در آن جابجایی کف نمونه محدود شده بود، از جابجایی صفحه‌ای از مدل که به ترتیب عمود بر محور x و y بوده و در طرف دیگر نمونه قرار دارد جلوگیری به عمل می‌آید. شرایط سه گانه بارگذاری در شکل ۴-۸ نشان داده شده است.

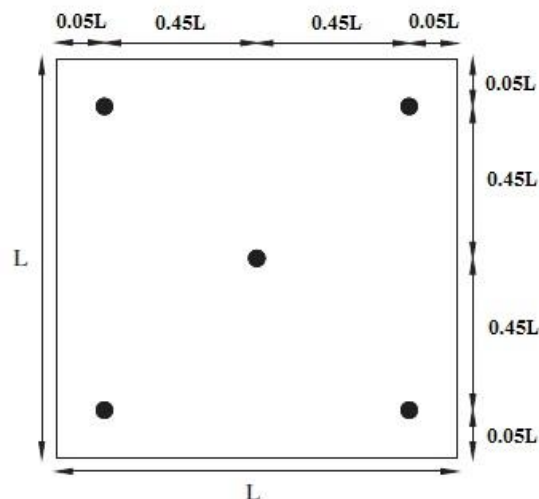


شکل ۴-۸: شرایط بارگذاری در راستای محورهای مختصات اصلی.

۴-۳-۴- نحوه اندازه‌گیری تنش و کرنش

هنگامی که بلوک‌ها در معرض بارگذاری با سرعت ثابت قرار گرفتند، جابجایی‌های محوری نقاط مورد بررسی در تمام صفحات عمود بر جهت تنش اعمالی ثبت شدند. با توجه به طبیعت تصادفی بودن قرارگیری درزه‌ها در داخل بلوک و تفاوت مقادیر جابجایی در نقاط مختلف از آن، تعداد ۵ نقطه به شرح شکل ۴-۹ به عنوان نقاط برداشت بر روی هریک از وجه‌های عمود بر جهت بارگذاری انتخاب می‌شوند. در مرحله بعد با توسعه یک تابع *FISH* اختصاصی و اعمال آن در نرم افزار در هر مرحله از محاسبات، میزان کرنش متوسط در این نقاط از روی مقادیر جابجایی محاسبه و به کل بلوک نسبت

داده می‌شود. برای اندازه‌گیری تنش اعمالی بر مدل نیز از میانگین تنش‌های وارد بر تمامی زون‌های هر بلوک استفاده شده است.

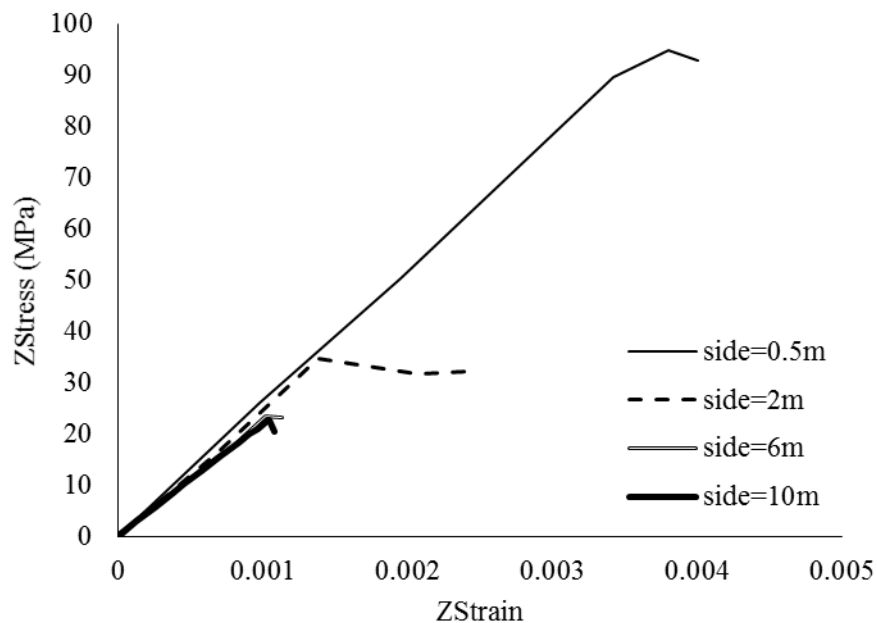


شکل ۴۰-۹: مختصات نقاط برداشت جابجایی.

۴-۴- بررسی مقاومت توده‌سنگ

۴-۴-۱- تاثیر مقیاس بر مقاومت تک محوره

بلوک‌های مدل‌سازی شده توده‌سنگ در ابعاد مختلف به منظور بررسی رفتار مقاومتی هر بلوک در شرایط مرزی مشروحه در بخش‌های قبل در جهت مخالف محور z تحت بارگذاری با سرعت ثابت قرار گرفته و مقادیر تنش و کرنش ناشی از این بارگذاری اندازه‌گیری می‌گردد. منحنی‌های تنش محوری - کرنش محوری بلوک‌های به ابعاد 0.5 ، 2 ، 6 و 10 متر به نمایندگی از تمامی ابعاد مورد تحلیل برای مقایسه تاثیر مقیاس در مقاومت تک محوره بلوک‌های درزه‌دار در هنگام بارگذاری در جهت z در شکل ۴-۱۰ ارائه شده‌اند. نمودارهای مربوط به بلوک‌های دیگر در پیوست ارائه شده است.



شکل ۴-۱۰: منحنی تنش- کرنش محوری در هنگام بارگذاری در جهت z.

همان‌گونه که در شکل ۴-۱۰ مشاهده می‌گردد با افزایش ابعاد بلوک و تعداد درزه‌های واقع در آن مقاومت تک محوری توده‌سنگ به میزان قابل توجهی کاهش می‌یابد. از طرف دیگر، با تغییر ابعاد از ۶ تا ۱۰ متری مقدار مقاومت تغییر چندانی نکرده است. پدیده دیگری که در حین مدل‌سازی بارگذاری تک محوره مشاهده شد، نوساناتی بود که در برخی از نمودارهای تنش-کرنش ثبت شده است که می‌توان آن را به ناپایداری برخی از بلوک‌ها در حین بارگذاری نسبت داد. به همین دلیل برای مقایسه مقدار مقاومت نهایی بلوک‌های درزه‌دار، نوسانات نمودارهای تنش-کرنش پالایش شده است تا روند کلی منحنی‌ها مدنظر قرار گیرد.

۴-۴-۲- تعیین حجم معرف اولیه براساس مقاومت توده‌سنگ

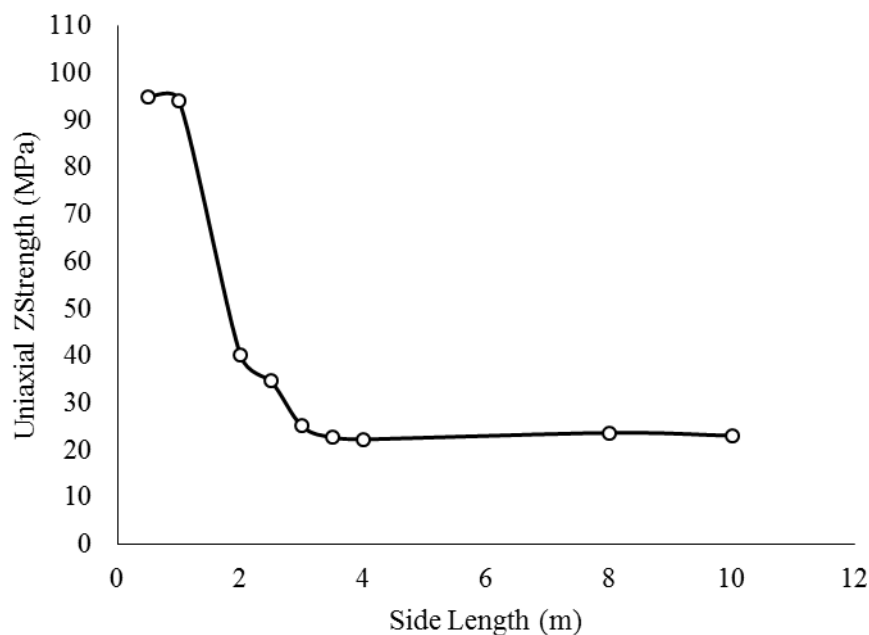
یک ویژگی مفروض از پیکره توده‌سنگ فراتر از یک حجم حداقل معین نسبت به تاثیر شکستگی‌ها به‌طور قابل توجهی تغییر نمی‌کند. این حداقل حجم را می‌توان به‌عنوان اندازه المان جهت نمایش

توده معادل حجم توده‌سنگی که از دید آماری همگن بوده و شامل تعداد قابل توجهی شکستگی است، به کار برد. این حجم را می‌توان به‌عنوان حجم معرف اولیه (*REV*) نامگذاری کرد که دارای اهمیت زیادی در مقاصد مهندسی باشد. هر توده‌سنگ می‌تواند مقدار حجم معرف اولیه متفاوتی داشته باشد. برای برخی از توده‌سنگ‌ها احتمال دارد که اندازه این حجم در قیاس با اندازه مورد دلخواه مسئله کوچک باشد. در این‌گونه موارد، اندازه‌ها و خصوصیات حجم معرف اولیه برای کاربردهای مهندسی بسیار مفید خواهند بود. برای موارد دیگری نیز، امکان بزرگ بودن اندازه‌های حجم معرف اولیه در مقایسه با اندازه مسئله وجود دارد. در این موارد، آگاهی از چگونگی تغییرات خصوصیت مدنظر توده-سنگ نسبت به پارامترهای هندسی درزه‌ها و اندازه بلوک در هنگام سروکار داشتن با طبقه‌بندی‌های مهندسی توده‌سنگ مفید واقع می‌گردد. بایستی در نظر داشت که میزان تغییرات یگ و ویژگی خاص از توده‌سنگ در اندازه حجم معرف [و یا بیشتر از ابعاد آن] نسبت به تغییرات این خصوصیت در اندازه-های کمتر از ابعاد حجم معرف کمتر خواهد بود. اگر حجم نمونه به‌منظور اجازه دادن به ورود ناپیوستگی‌های بزرگ به آن بیشتر افزایش یابد، ویژگی توده‌سنگ متفاوت خواهد بود که منعکس-کننده تاثیر ناپیوستگی‌های بزرگ است. به‌طور خلاصه، اندازه *REV* و خواص مکانیکی یا هیدرولیکی متناظر با آن می‌تواند برای نشان دادن رفتار محیط پیوسته معادل مرکب از ناپیوستگی‌ها و سنگ بکر مورد استفاده قرار گیرد. ناپیوستگی‌های اصلی را به‌منظور تکمیل تعریف توده‌سنگ می‌توان به‌صورت مشخصه‌های منفرد به این سیستم افزود [۲۶].

از آنجایی که تحلیل‌های محیط پیوسته زیادی برای مسائل مکانیکی توده‌سنگ درزه‌دار انجام می‌گیرد، نیاز به بررسی‌های نظام‌مندتری در خصوص کاربرد روش محیط پیوسته معادل برای این نوع سنگ‌ها وجود دارد [۱۴].

کولاتیلاک و همکاران [۴۹] ترکیبی از رویکرد مجزا - محیط پیوسته معادل که در ادامه شرح داده خواهد شد را جهت انجام تحلیل تنش بلوک‌های حجم معرف در سه‌بعد توسعه دادند که در این بخش

برای برآورد ابعاد حجم معرف اولیه براساس مقاومت تک محوره بلوک‌ها در هنگام بارگذاری در جهت z از این رویکرد استفاده می‌شود. این تحلیل که نتایج آن در شکل ۴-۱۱ آمده است، از بلوک‌های کوچک شروع شده و پس از عبور از بلوک‌های اندازه متوسط به بلوک‌های بزرگ موردنیاز می‌رسد تا مقادیر مقاومت برای هریک از بلوک‌های دوازده‌گانه و مقادیر تغییرات آن‌ها به ازای افزایش ابعاد بلوک بررسی شود.



شکل ۴-۱۱: تعیین ابعاد REV براساس مقاومت در هنگام بارگذاری در جهت z .

همان‌طور که قبلاً در این فصل نیز اشاره شد به دلیل طبیعت تعریف تصادفی شبکه شکستگی درزه‌ها تنها در صورتی که عدد ورودی برای تولید تصادفی درزه‌ها معین گردد، امکان تکرار نتایج یکسان از طریق مدل‌سازی ممکن خواهد بود. در این پژوهش نیز از همین رویه در جهت تکرار نتایج یکسان برای مقاومت و تغییرشکل بلوک‌ها استفاده شده است و برای بررسی صحت تکراری بودن نتایج، چند آزمایش عددی برای هریک از دوازده بلوک انجام شد که تمامی آن‌ها نتایج مشابهی تولید کردند.

در شکل فوق، تغییرات نتایج حاصل از مدل‌سازی عددی برای مقاومت تک محوره بلوک‌های درزه‌دار با افزایش ابعاد بلوک مشخص است. روند تغییرات نشان از کمینه شدن تغییر در مقدار مقاومت بلوک‌ها در ابعاد بزرگ‌تر از ۳ متر دارد. بنابراین، در این آزمایش می‌توان بلوک دارای اضلاعی به اندازه ۳ متر را به‌عنوان حجم معرف اولیه برای مطالعه مقاومت ماسه‌سنگ درزه‌دار طزره در جهت محور z در نظر گرفت (برای اطلاع از نحوه جهت‌گیری محورهای مختصات به شکل ۴-۳ رجوع شود).

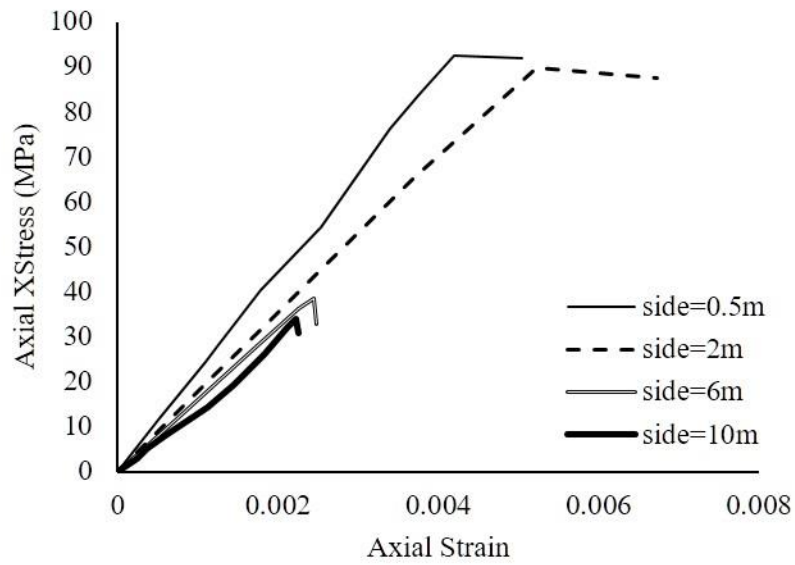
۴-۳-۴- تاثیر جهت بارگذاری بر مقاومت تک محوره

رفتار توده‌سنگ‌های درزه‌دار به دلیل ناهمسانگردی خواص ژئومکانیکی معادل آن‌ها همواره متاثر از جهت بار اعمالی متغیر است. در این قسمت، با توجه به این اصل رفتار ماسه‌سنگ درزه‌دار طزره در برابر بارهای تک محوره اعمالی در جهت محورهای x و y مورد بررسی قرار می‌گیرد.

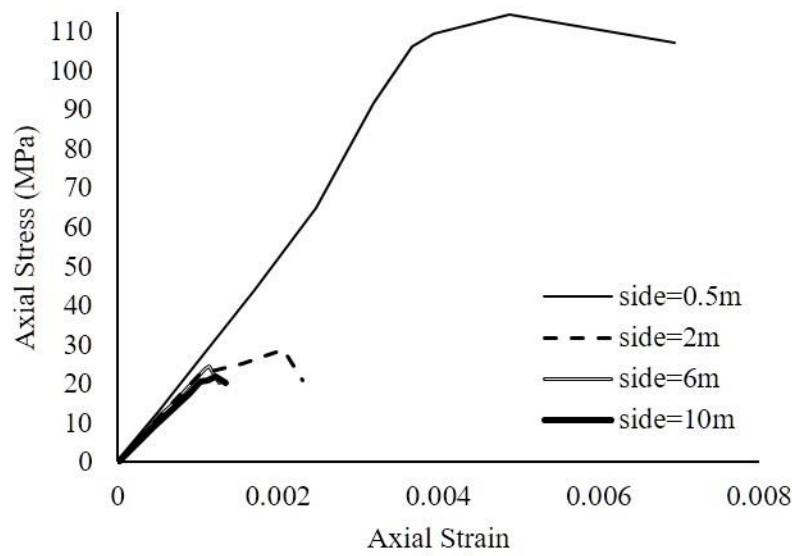
شکل ۴-۱۲ منحنی‌های تنش محوری - کرنش محوری بلوک‌های به ابعاد ۰/۵، ۲، ۶ و ۱۰ متر را به نمایندگی از تمامی ابعاد مورد تحلیل برای مقایسه تاثیر مقیاس در مقاومت تک محوره بلوک‌های درزه‌دار در هنگام بارگذاری در جهت x و y نشان می‌دهد. نمودارهای تنش محوری - کرنش محوری مربوط به بلوک‌های دارای طول بُعد ۱، ۲/۵، ۳، ۳/۵، ۴ و ۸ نیز در پیوست ارائه شده است.

نکته جالب توجه در شکل ۴-۱۲ (ب) مقدار مقاومتی است که برای کوچکترین بلوک ثبت شده است که از دو جهت دیگر بیشتر است. از طرف دیگر، مقایسه شکل ۴-۱۲ (الف) با نمودار تنش-کرنش در دو حالت دیگر بارگذاری نشان از حساسیت بیشتر رفتار تغییرشکل بلوک نسبت به تغییر ابعاد در بارگذاری در جهت x دارد. همانطور که در این شکل مشخص است، با افزایش ابعاد بلوک شیب منحنی تنش-کرنش در شرایط بارگذاری در جهت x تغییر بیشتری نسبت به بارگذاری در جهت y و z می‌یابد. با این وجود مقاومت بزرگترین بلوک‌ها در این شرایط مرزی به نسبت بیشتر است. در

شرایط مرزی شکل ۴-۱۲ نیز مشاهده می‌شود که مقاومت نهایی بلوک در ابعاد بزرگتر و با افزایش تعداد درزه‌ها به مقدار معینی همگرا می‌گردد.



(الف)

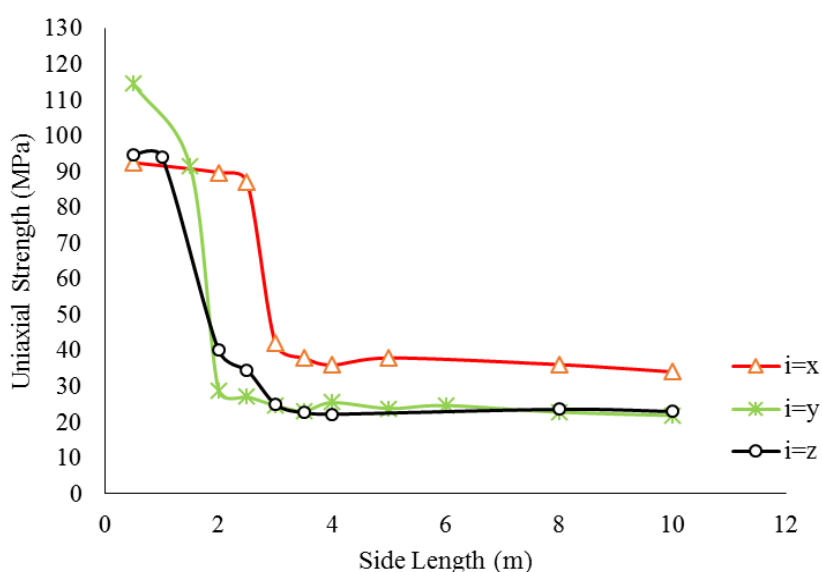


(ب)

شکل ۴۰-۱۲: منحنی تنش- کرنش محوری در هنگام بارگذاری در جهت: (الف) x و (ب) y .

۴-۴-۴- تاثیر جهت بارگذاری بر حجم معرف مشخصه مقاومتی

در قسمت ۲-۴-۴ حجم معرف ماسه سنگ طزره با توجه داده‌های برداشت شده براساس مقاومت آن بدست آمد. در اینجا، تاثیر جهت بارگذاری در برآورد حجم معرف اولیه مقاومتی مورد بررسی قرار می‌گیرد. شکل ۴-۱۳ نتایج آزمایش‌های عددی را برای ابعاد مختلف توده سنگ به ترتیب در شرایط مرزی بارگذاری در جهت مخالف x ، y و z نشان می‌دهد.

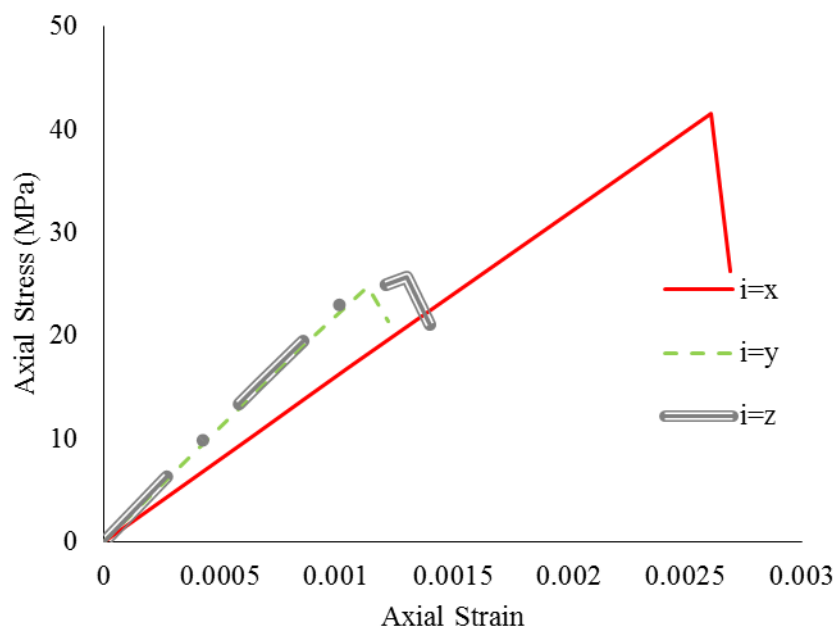


شکل ۴-۱۳: تاثیر جهت بارگذاری بر ابعاد REV مشخصه مقاومتی.

تاثیر جهت بارگذاری بر مقاومت توده سنگ درزه دار در ابعاد مختلف و نیز در تعیین حجم معرف اولیه براساس مقاومت در شکل فوق کاملاً مشهود است. مطابق با این شکل، ابعاد REV برای بارگذاری در راستای x و z برابر با ۳ متر و برای بارگذاری در جهت y برابر با ۲/۵ متر برآورد می‌گردد.

در مرحله بعد به مقایسه روند منحنی تنش-کرنش توده سنگ به ترتیب در بارگذاری در هر یک از جهت‌های مخالف محورهای مختصات عمومی پرداخته می‌شود. برای این منظور و با هدف این که نتایج مقایسه انجام شده قابل اتکا باشد از منحنی تنش-کرنش بلوکی استفاده می‌شود که ابعاد آن در محدوده حجم معرف اولیه در هر سه مورد از شرایط مرزی قرار داشته باشد. بدین ترتیب از بلوک ۳

متری برای مقایسه بهره‌گیری شده است. منحنی تنش-کرنش بلوک درزه‌دار ۳ متری در شرایط بارگذاری در سه جهت مخالف محورهای مختصات اصلی در شکل ۴-۱۴ ارائه شده است. تفاوت مقاومت نهایی و نیز مدول تغییرشکل‌پذیری بلوک تحت شرایط مختلف بارگذاری در این شکل مشخص است.



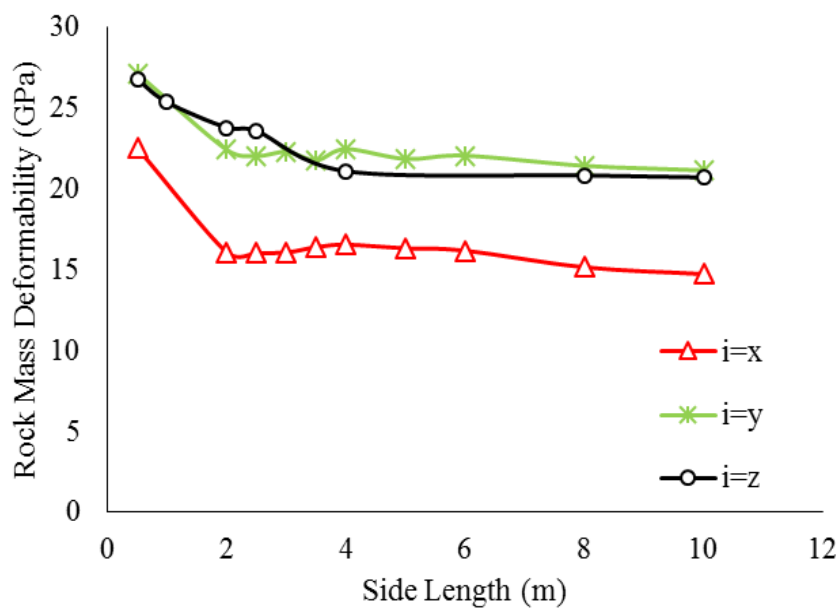
شکل ۴-۱۴: منحنی‌های تنش-کرنش برای بلوک به ابعاد ۳ متر.

۴-۵- بررسی تغییرشکل‌پذیری توده‌سنگ

همان‌طور که در شکل ۴-۱۰ مشاهده شد، مقاومت توده‌سنگ درزه‌دار تحت تاثیر ابعاد بلوک‌های نمونه قرار دارد. از طرف دیگر، در این شکل مشاهده می‌شود که شیب نمودار تنش - کرنش نیز که معرف مدول تغییرشکل‌پذیری توده‌سنگ است با تغییر ابعاد بلوک‌ها تغییر می‌کند. در این بخش به بررسی تاثیر مقیاس و جهت بارگذاری بر مدول تغییرشکل‌پذیری و برآورد حجم معرف مشخصه آن پرداخته می‌شود.

۴-۵-۱- تعیین حجم معرف اولیه براساس مدول تغییرشکل پذیری

رویکرد مشروحه در بخش قبل در اینجا برای تعیین ابعاد حجم معرف اولیه توده سنگ درزه دار براساس نتایج مدول تغییرشکل پذیری مورد استفاده قرار گرفت. بدین ترتیب، نتایج مدل سازی عددی برای مدول تغییرشکل در برابر افزایش ابعاد بلوک های در شکل ۴-۱۵ به تصویر کشیده شده است. مدول تغییرشکل پذیری بلوک ها با انجام تحلیل بر روی نمودارهای تنش - کرنش هر بلوک و با استفاده از ۵۰٪ مقاومت نهایی بلوک و تغییرشکل متناظر آن بر پایه مدول تغییرشکل پذیری تانژانتی محاسبه می شود. در شکل ۴-۱۴ نتایج تغییرشکل پذیری بلوک در برابر افزایش ابعاد آن به ترتیب در شرایط بارگذاری در جهت مخالف محور x ، y و z آمده است.



شکل ۴-۱۵: تعیین ابعاد REV براساس تغییرشکل پذیری.

مطابق با شکل فوق با افزایش ابعاد بلوک مدول تغییرشکل پذیری کاهش می یابد تا جایی که از بلوک های به اندازه یال مشخص به بعد این تغییرات به حداقل مقدار خود می رسد. این اندازه یال برای حالت بارگذاری در جهت مخالف محور x و y معادل ۲ متر و z برابر با ۴ متر است.

۴-۶- جمع بندی

رفتار مقاومتی و تغییرشکل پذیری توده سنگ های درزه دار به دلیل وجود ناپیوستگی ها در ساختار آن ها ناهمسانگرد بوده و تحت تاثیر عوامل مختلفی همچون مقیاس و جهت بارگذاری می باشد. در این فصل توده سنگ مدل سازی شده با توجه به داده های آزمایشگاهی و برداشت های میدانی تحت شرایط مرزی مختلف تحت بارگذاری قرار گرفته و تاثیر مقیاس و جهت بارگذاری بر مقاومت و تغییرشکل پذیری آن مورد بررسی قرار گرفت. همچنین، با توجه به نتایج حاصله و فرضیات در نظر گرفته شده، ابعاد حجم معرف اولیه در هریک از شرایط بارگذاری ارزیابی شد.

مقاومت تک محوری توده سنگ در ابعاد حجم معرف اولیه در راستای x برابر با ۴۱ مگاپاسکال، در راستای y معادل ۲۴ مگاپاسکال و در راستای z برابر با ۲۵ مگاپاسکال به دست آمد. مقایسه این مقادیر با مقادیر تجربی مقاومت فشاری نشان از نزدیکی محدوده نتایج تجربی مبتنی بر رده بندی Q با مقادیر عددی به دست آمده برای REV دارد. مدول تغییرشکل پذیری توده سنگ در ابعاد REV برای منطقه طزره در راستای x برابر با ۱۶ گیگاپاسکال، در راستای y معادل ۲۲/۴ گیگاپاسکال و در راستای z برابر با ۲۱/۱ گیگاپاسکال به دست آمده است. در این مورد هم مقادیر تجربی حاصل از روابط مبتنی بر رده بندی Q تطابق بیشتری با مقادیر حاصل از مدل سازی عددی دارند. بررسی نتایج نشان از اختلاف در مقادیر مقاومتی و تغییرشکل در هریک از شرایط آزمایش داشته است.

فصل پنجم: نتیجه گیری و پیشنهادات

تمرکز این پایان‌نامه بر روی بررسی رفتار مکانیکی توده‌سنگ‌های درزه‌دار تحت ابعاد و شرایط مختلف بارگذاری بوده است. به این منظور در ابتدا پارامترهای هندسی درزه‌های واقع در ساختار ماسه سنگ از طریق عملیات برداشت میدانی از محل معدن زغالسنگ طزره تعیین شد، سپس نمونه‌های استوانه‌ای برای تعیین خواص مکانیکی سنگ بکر تحت آزمون آزمایشگاهی مقاومت فشاری تک محوره قرار گرفت. در گام بعدی با استفاده از روابط تجربی مقادیر مقاومت فشاری تک محوره و مدول تغییرشکل‌پذیری ماسه‌سنگ تخمین زده شد. در مرحله بعد نیز مقادیر مقاومت فشاری و مدول تغییرشکل‌پذیری توده‌سنگ درزه‌دار از طریق مدل‌سازی عددی اجزای مجزا مورد ارزیابی قرار گرفت. با توجه به این که روابط تجربی تاثیر مقیاس و جهت بارگذاری را در تخمین مقاومت و مدول تغییرشکل‌پذیری در نظر نمی‌گیرند، این عامل نیز با استفاده از مدل‌سازی عددی بررسی شد.

تحلیل رفتار مقاومتی و تغییرشکل توده‌سنگ درزه‌دار در حالت سه بعدی با هدف برآورد ابعاد حجم معرف اولیه توده‌سنگ به‌ترتیب براساس تحلیل مقاومت تک محوره و تحلیل مدول تغییرشکل‌پذیری انجام گرفت و در این راستا تاثیر جهت بارگذاری نیز بر روی ابعاد حجم معرف تخمینی بررسی شد. در این فصل نتایج حاصله از انواع روش‌های تجربی و روش عددی برای مقاومت و تغییرشکل‌پذیری توده‌سنگ درزه‌دار مورد مطالعه با یکدیگر مقایسه شده و نتایج کلی حاصل از تحقیق و پیشنهاداتی برای مطالعات آتی ارائه می‌گردد.

۵-۱- جمع‌بندی و نتیجه‌گیری

- نتایج آزمون‌های آزمایشگاهی حتی برای نمونه‌های گرفته شده از یک منطقه متفاوت بوده است که این تفاوت ممکن است به دلیل ناپیوستگی‌های داخلی، تفاوت ترکیب پتروگرافی یا پیچیدگی‌های ساختار ماسه سنگ باشد.

- روابط تجربی تخمین مقاومت و مدول تغییرشکل‌پذیری توده‌سنگ از سیستم‌های رده‌بندی مهندسی سنگ در برآورد پارامترهای رفتاری آن بهره می‌گیرند. از میان روابط تجربی ارائه شده، روش‌هایی که بر پایه رده‌بندی RMR و GSI هستند مقادیر کمتر و آن‌هایی که بر پایه سیستم رده‌بندی Q هستند مقادیر بیشتری را برای مقاومت ماسه‌سنگ طرزه تخمین زده اند.
- روابط تجربی تخمین مدول تغییرشکل‌پذیری توده‌سنگ نیز بر اساس سیستم‌های رده‌بندی RMR ، GSI و Q ارائه شده اند. تخمین مدول تغییرشکل‌پذیری ماسه‌سنگ طرزه نیز نشان از تخمین مقادیر بالاتر مدول تغییرشکل‌پذیری توسط روش‌های مبتنی بر رده‌بندی Q و مقادیر پایین‌تر توسط روش‌های مبتنی بر RMR و GSI دارد.
- روش‌های تجربی با وجود این که به وفور مورد استفاده قرار می‌گیرند اما ناهمسانگردی توده‌سنگ بر اثر ناپیوستگی‌ها، تاثیر مقیاس و بسیاری از عوامل دیگر را در نظر نگرفته و اغلب مقادیر متفاوتی با استفاده از روابط تجربی مختلف برای یک توده‌سنگ مفروض حاصل می‌شود.
- در مواردی که ناهمسانگردی تاثیر ویژه‌ای بر رفتار توده‌سنگ دارد، استفاده از روش‌های مدل-سازی عددی پیشنهاد می‌گردد. در این روش‌ها می‌توان شرایط واقعی درزه‌ها را مدل‌سازی و عکس‌العمل توده‌سنگ درزه‌دار را در شرایط مختلفی از بارگذاری بررسی نمود.
- استفاده از محیط دو بعدی برای مدل‌سازی مستلزم اعمال ساده‌سازی‌هایی در تحلیل مساله از جمله در نظر گرفتن انحراف امتداد درزه‌ها از حالت عمود بر صفحه است. چنین مفروضاتی کاربرد مدل‌سازی دو بعدی را محدود کرده و از این‌رو استفاده از مدل‌سازی سه بعدی به‌منظور نمایش هندسه واقعی ناپیوستگی‌ها اجتناب ناپذیر خواهد بود.
- مقاومت توده‌سنگ درزه‌دار تابعی از مقیاس مورد بررسی است. در تحلیل‌های عددی انجام شده بر روی ماسه‌سنگ طرزه مشاهده شد که با افزایش ابعاد بلوک مقاومت آن کاهش می‌یابد تا جایی که از یک اندازه معین به بعد میزان تغییرات حداقل می‌شود.

- تغییر در ابعاد بلوک علاوه بر تغییر مقاومت سبب تغییر شیب منحنی تنش-کرنش توده‌سنگ و مدول تغییرشکل‌پذیری آن نیز می‌شود. تغییرات مدول تغییرشکل‌پذیری نیز از یک حد معین به بعد کمینه می‌گردد. این ابعاد حدی را حجم معرف اولیه می‌نامند.
- ابعاد حجم معرف اولیه توده‌سنگ درزه‌دار از عوامل مختلفی همچون جهت بارگذاری، پارامتر مورد بررسی و خواص ژئومکانیکی محیط تاثیر می‌پذیرد. به همین دلیل، هریک از ابعاد برآورد شده تنها برای یک مورد خاص قابل کاربرد هستند و نیز ابعاد REV برای مناطق مختلف، متفاوت خواهد بود.
- ابعاد حجم معرف اولیه توده‌سنگ بر اساس تحلیل مقاومت تک محوره در راستای x و z برابر با ۳ متر و برای بارگذاری در جهت y برابر با ۲/۵ متر برآورد شده است.
- برای تحلیل مدول تغییرشکل‌پذیری المان حجمی معرف برای حالت بارگذاری در جهت مخالف محور x و y دارای اندازه یالی معادل ۲ متر و برای حالت بارگذاری در جهت مخالف z برابر با ۴ متر است.
- مقاومت تک محوری توده‌سنگ در ابعاد حجم معرف اولیه در راستای x برابر با ۴۱ مگاپاسکال، در راستای y معادل ۲۴ مگاپاسکال و در راستای z برابر با ۲۵ مگاپاسکال است. مقایسه این مقادیر با مقادیر تجربی مقاومت فشاری نشان از نزدیکی محدوده نتایج تجربی مبتنی بر رده‌بندی Q با مقادیر عددی به‌دست آمده برای REV دارد.
- مدول تغییرشکل‌پذیری توده‌سنگ در ابعاد REV برای منطقه طزره در راستای x برابر با ۱۶ گیگاپاسکال، در راستای y معادل ۲۲/۴ گیگاپاسکال و در راستای z برابر با ۲۱/۱ گیگاپاسکال به‌دست آمده است. در این مورد هم مقادیر تجربی حاصل از روابط مبتنی بر رده‌بندی Q تطابق بیشتری با مقادیر حاصل از مدل‌سازی عددی دارند.

۵-۲- پیشنهادات

موارد زیر برای توسعه تحقیق حاضر و مطالعات آتی پیشنهاد می‌گردند:

- رفتار مقاومتی و تغییرشکل ماسه‌سنگ طزره در شرایط بارگذاری سه محوره بررسی شود.
- تحلیل هیدرولیکی و هیدرومکانیکی برای ارزیابی تاثیر فشار آب بر مقاومت و تغییرشکل پذیری توده‌سنگ با توجه به در اختیار داشتن پارامتر بازشدگی درزه‌ها قابل انجام است. امکان بررسی تاثیر جهت بارگذاری و مقیاس بر نتایج تحلیل هیدرومکانیکی نیز وجود دارد.
- زوایای بارگذاری مختلف را می‌توان برای بررسی تاثیر زاویه بارگذاری بر رفتار مقاومتی و تغییرشکل پذیری توده‌سنگ درزه‌دار اعمال کرد.
- به‌منظور مقایسه پاسخ استاتیکی و دینامیکی توده‌سنگ، بارگذاری به‌صورت دینامیکی انجام شود.
- نتایج بارگذاری سه محوره را جهت برآزش بهترین معیار شکست در شرایط مساله به‌کار گرفت.
- ثوابت الاستیک ماسه‌سنگ طزره با اعمال شرایط مرزی مختلف قابل محاسبه است.
- تولید شبکه شکستگی مجزا بدون در نظر گرفتن عدد ورودی یکسان برای آن و به‌صورت تصادفی تکرار ناپذیر انجام شده و نتایج با نتایج تحلیل حاضر مقایسه شود.
- مطالعات عددی برای زون B با توجه به در دست بودن نتایج آزمون آزمایشگاهی بر روی نمونه سنگ بکر گرفته شده از این زون قابل انجام و نتایج آن با نتایج به‌دست آمده برای زون A قابل مقایسه است.

پیوست‌ها

جدول پ.۱: داده‌های برداشت خطی درزه‌ها

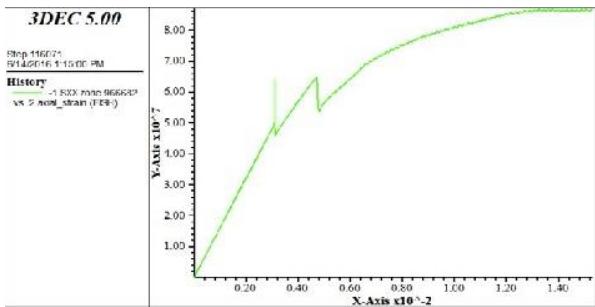
dip	dd	per	ope	jrc	wether
81	243	45	3	3	0.65
81	243	53	0	2	0.6
77	240	100	3	2	1
79	255	7	0	1	0.75
80	240	85	1	2	1.5
73	250	41	0	2	1
74	225	57	1	2	0.75
74	225	50	1	3	0.75
75	225	40	2	3	0.75
82	240	21	0	2	0.75
64	250	90	3	1.5	1.5
88	75	120	5	2	4
70	244	71	0	2	0.75
75	247	110	0	1	1
75	247	20	0	1	0.75
88	73	130	3	1.5	2
80	226	123	0	2	0.75
76	240	84	1	2	0.75
76	241	115	11	3	1
76	240	130	4	2	2
83	249	100	2	1.5	1
83	249	75	4	2	1
79	238	110	3	1.5	2
83	249	90	4	1.5	0.75
83	249	95	6	4	0.6
84	70	115	13	1.5	0.75
72	241	170	2	2	0.65
74	250	35	0	3	0.6
87	60	130	3	1.5	1

ادامه جدول پ.۱: داده‌های برداشت خطی درزه‌ها.

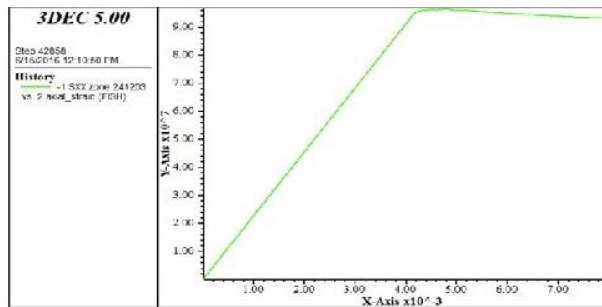
dip	dd	per	ope	jrc	wether
45	25	60	1	3	2
75	240	40	0	3	2
64	250	100	3	4	1
86	275	130	1	1.5	0.75
79	244	13	0	1.5	0.75
39	377	120	3	1.5	4
62	255	90	15	3	8
39	370	65	2	3	4
87	250	90	10	3	4
59	225	70	0	3	1
68	240	110	30	4	8
87	249	160	0	1	0.75
72	249	105	4	3	8
84	238	60	2	2	8
76	210	200	12	2	8
58	244	70	30	3	8
42	30	40	0	2	0.75
70	240	30	0	1.5	0.75
73	250	23	0	2	0.75
71	212	110	1	1	0.75
67	235	123	2	2	4
36	20	95	0	1.5	1
79	84	30	3	2	0.75
85	68	30	0	1.5	1
65	79	150	4	1	0.75
74	103	35	5	2	4
38	375	42	1	2	0.75
55	120	70	0	3	1
51	86	45	0	2	0.75
63	120	50	2	1	0.75
49	94	105	0	1.5	0.75
88	90	75	0	1.5	1

ادامه جدول پ.۱: داده‌های برداشت خطی درزه‌ها.

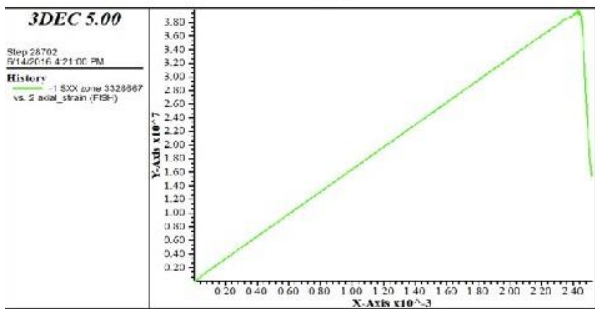
dip	dd	per	ope	jrc	weather
80	105	100	5	4	4
76	85	100	0	1	0.75
68	110	25	1	3	0.7
75	100	155	3	3	1
86	85	67	4	2	1
75	100	100	2	4	1
75	100	30	3	4	4
68	90	54	1	4	0.75
70	90	45	2	1	0.75
70	90	50	2	1	0.75
75	90	35	1	1	0.75
70	90	60	3	1.5	1
70	90	60	3	1.5	1
75	120	60	1	1.5	1
67	110	90	2	2	1
70	115	37	1	1.5	1
71	100	45	2	4	0.7
73	102	73	1	1.5	0.75
75	97	70	3	2	1
72	85	83	2	1	0.75
81	105	100	8	2	1
86	95	70	3	1.5	1
85	95	55	1	1.5	1
81	120	32	0	1.5	0.75
76	93	80	1	1.5	1
80	96	105	0	2	4
85	91	100	13	2	0.75
75	127	75	0	2	0.7
69	127	140	0	1.5	0.7



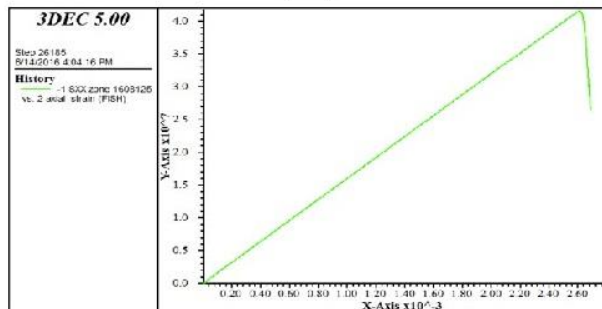
(ب)



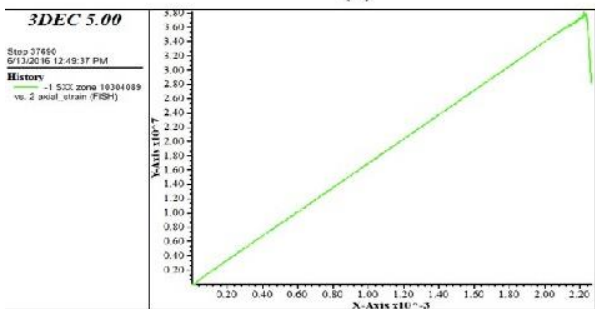
(الف)



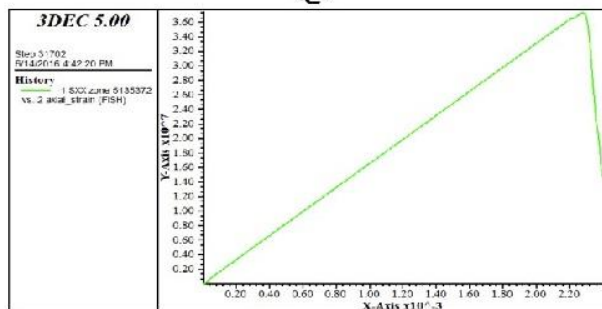
(د)



(ج)



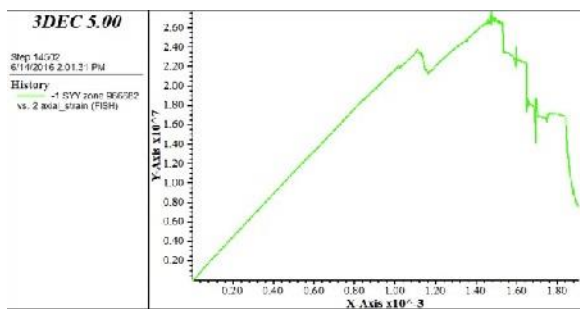
(و)



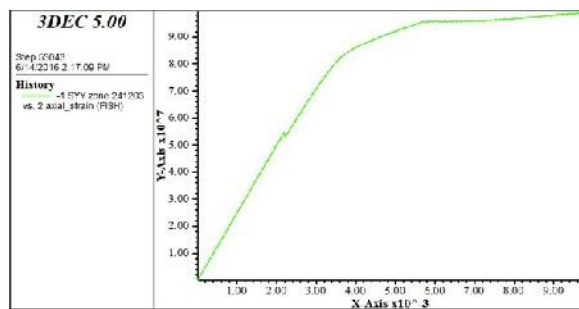
(ه)

شکل پ-۱: نمودارهای تنش کرنش در هنگام بارگذاری در جهت x برای نمونه‌های با طول یال: (الف) ۱؛

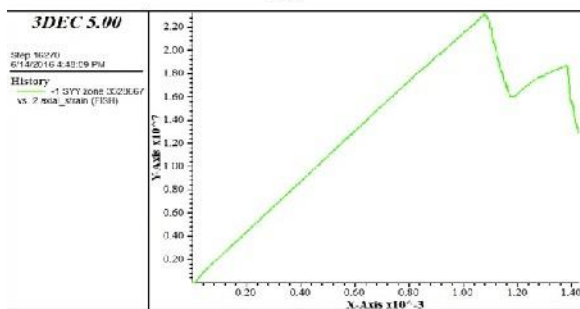
(ب) ۲/۵؛ (ج) ۳؛ (د) ۳/۵؛ (ه) ۴ و (و) ۸ متر.



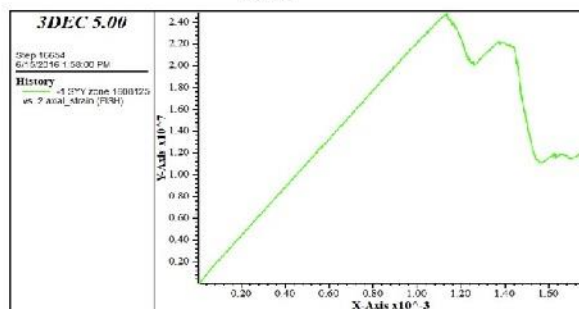
(ب)



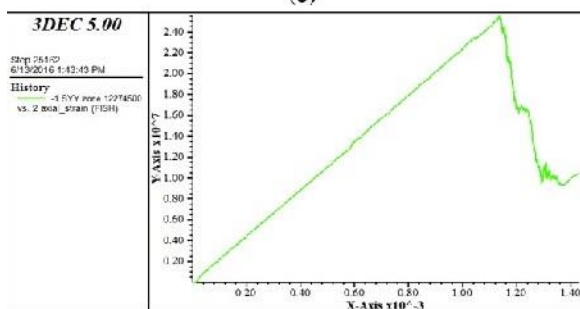
(الف)



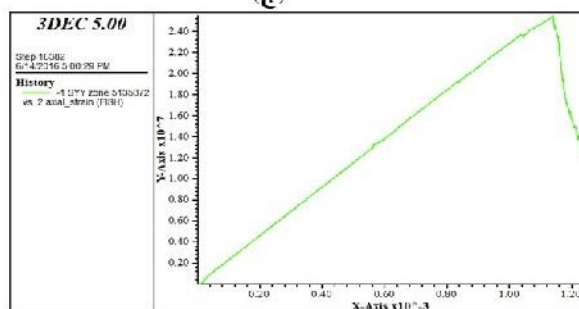
(د)



(ج)

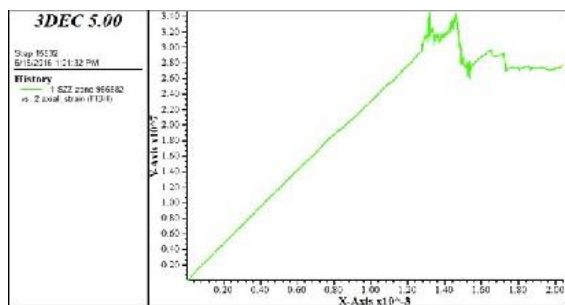


(و)

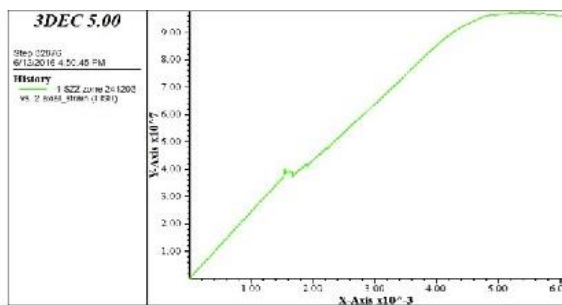


(ه)

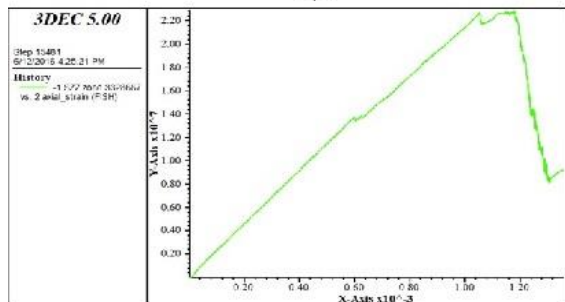
شکل پ-۲: نمودارهای تنش کرنش در هنگام بارگذاری در جهت لای برای نمونه‌های با طول یال: (الف) ۱؛ (ب) ۲/۵؛ (ج) ۳؛ (د) ۳/۵؛ (ه) ۴ و (و) ۸ متر.



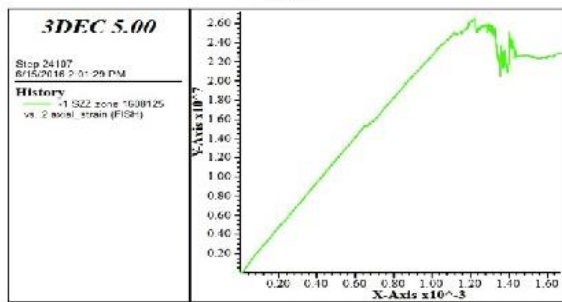
(ب)



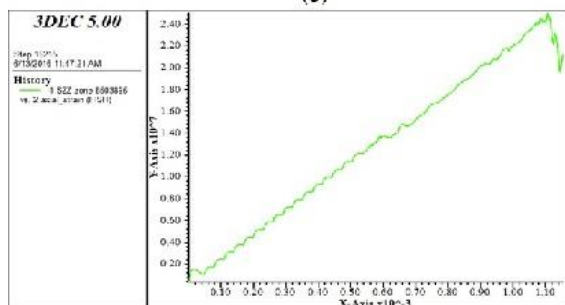
(الف)



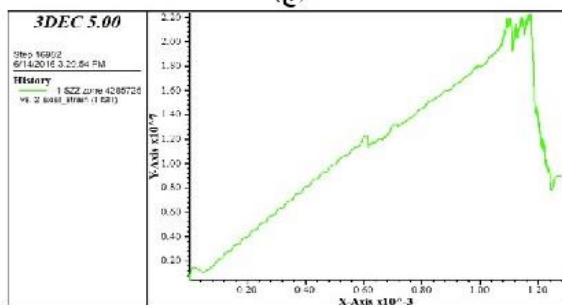
(د)



(ج)



(و)



(ه)

شکل پ-۳: نمودارهای تنش کرنش در هنگام بارگذاری در جهت Z برای نمونه‌های با طول یال: (الف) ۱؛ (ب) ۲/۵؛ (ج) ۳؛ (د) ۳/۵؛ (ه) ۴ و (و) ۸ متر.

- [1] Robinson P. C. (1983). "Connectivity of fracture systems- a percolation theory approach" *Journal of Physics A: Mathematical and General*, 16, pp 605-614.
- [2] Sahimi M. (1993) "Flow phenomena in rocks: from continuum models to fractals, percolation, cellular automata and simulated annealing" *Reviews of Modern Physics*, 65 , 4, pp 1393-1534.
- [3] Long J., Remer J., Wilson C., Witherspoon P. (1982) "Porous media equivalents for networks of discontinuous fractures" *Water Resources Research*, 18, pp 645-658.
- [4] Baecher G. B. (1983) "Statistical analysis of rock mass fracturing" *Mathematical Geology*, 15, 2, pp 329-348.
- [5] Andersson J., Shapiro A., M., Bear J. (1984) "A stochastic model of fractured rock conditioned by measured information" *Water Resources Research*, 20, pp 79-88.
- [6] Dershowitz W. S., Einstein H. H. (1988) "Characterizing rock joint geometry with joint system models" *Rock Mechanics and Rock Engineering*, 21, 1, pp 21-51.
- [7] Hoek E., Brown E. T. (1997) "Practical estimates of rock mass strength" *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, 34, 8, pp 1165-1186.
- [8] Salamon M. D. G. (1968) "Elastic Moduli of a Stratified Rock Mass" *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, 5, pp 519-527.
- [9] Singh B. (1973) "Continuum Characterization of Jointed Rock Masses" *International Journal of Rock Mechanics and Mining Science and Geomechanics Abstract*, 10, pp 311-335.
- [10] Morland L. (1976) "Elastic anisotropy of regularly jointed media" *Rock Mechanics*, 8, pp 35-48.

- [11] Amadei B., Goodman R. E. (1981) "A 3-D Constitutive Relation for Fractured Rock Masses" Proc. Int. Symp. On the Mechanical Behavior of Structured Media, Ottawa, pp 249-268.
- [12] Gerrard C. M. (1982) "Equivalent Elastic Moduli of a Rock Mass Consisting of Orthorhomic Layers" International Journal of Rock Mechanics and Mining Science and Geomechanics Abstract, 19, pp 9-14.
- [13] Fossum A. F. (1985) "Effective Elastic Properties for a Randomly Jointed Rock Mass" International Journal of Rock Mechanics & Mining Sciences, 22, 6, pp 467-470.
- [14] Min K. -B., Jing, L. (2003) "Numerical determination of the equivalent elastic compliance tensor for fractured rock masses using the distinct element method" International Journal of Rock Mechanics & Mining Sciences, 40, pp 795-816.
- [15] Zhang L. (2010) "Method for Estimating the Deformability of Heavily Jointed Rock Masses" Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, 136, 9, pp 1242-1250.
- [16] Cundall P. (1971) "A computer model for simulating progressive large-scale movements in block rock mechanics" Proc. Symp. Int. Soc. Rock Mech., Nancy, 2 Springer-Verlag.
- [17] Cundall P., Pierce M., Mas Ivars D. (2008) "Quantifying the size effect of rock mass strength", Proceedings, 1st southern Hemisphere International Rock Mechanics Symposium, Perth, Australian Centre for Geomechanics, Nedlands, Western Australia.
- [18] ITASCA (2013), "3DEC Version 5 User Manual", Itasca Consulting Group, Minneapolis, NM.
- [19] Park E., Jeon Y., Ryu C., Martin C., Christiansson, R. (2006) "Numerical approach for a rock mechanics descriptive model" Tunnelling and Underground Space Technology, 21, pp 446-447.
- [20] Christianson M. C., Board M. P. (2006) "UDEC Simulation of triaxial testing of lithophysal tuff" Proceedings of the 41st U.S. Symposium on Rock Mechanics (USRMS) and 50th Anniversary of the U.S. Rock Mechanics Association, 6: 968.

- [21] Kim BH, Cai M., Kaiser P. K., Yang H. S. (2007) “Rock mass strength with non-persistent joint” Proceedings of the 1st Canada-US Rock Mechanics Symposium, Taylor and Francis Group, pp 241-248.
- [22] Noel J. F., Archambault G. (2007) “Boundary conditions effects on the formation of kink bands in fractured rock masses” Proceedings of the 1st Canada-US Rock Mechanics Symposium, Taylor and Francis Group, pp 27-31.
- [23] Zhang Z. G., Qiao C. S., Li X. (2007) “Study on the strength of jointed rock mass” Journal of Key Engineering Materials, 353 , 1, pp 381-384, 2007.
- [24] Singh M. and Singh B. (2008) “Laboratory and numerical modelling of a jointed rock mass” Proceedings of the 12st International Conference of International Association for computer Methods and Advances in Geomechanics (IACMAG), India Institute of Technology, Bombay, pp 1373-1380.
- [25] Esmaili K., Hadjigeorgiou J., Grenon, M. (2010) “Estimating geometrical and mechanical REV based on synthetic rock mass models at Brunswick Mine” International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences, 47, pp 915-926.
- [26] Wu, Q. and Kulatilake P. H. S. W. (2012) “REV and its properties on fracture system and mechanical properties, and an orthotropic constitutive model for a jointed rock mass in a dam site in China.” Computers and Geotechnics, 43, pp 124-142.
- [27] Khani A., Baghbanan A., Hashemolhosseini H. (2013) “Numerical investigation of the effect of fracture intensity on deformability and REV of fractured rock masses” International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences, 63, pp 104-112.
- [28] Noorian Bidgoli M., Zhao Z., Jing, L. (2013) “Numerical evaluation of strength and deformability of fractured rocks” Journal of Rock Mechanics and Geotechnical Engineering, 5, pp 419-430.
- [29] Aydan O., Ulusay R., Kawamoto T. (1997) “Assessment of rock mass strength for underground excavations” International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences, 34, 18.
- [30] Serafim J. L., Pereira J. P. (1983) “Considerations on the geomechanical classification of Bieniawski” Proc. Int. Symp. On Eng. Geol. and Underg. Const., Lisbon, Portugal, I(II), pp 33-44.

[31] Nicholson G., Bieniawski Z. T. (1990) "A non-linear deformation modulus based on rock mass classification" International Journal of Mining and Geological Engineering, 8, pp 181-202.

[32] Mitri H. S., Edrissi R., Henning J. (2000) "Rock-support interaction analysis based on numerical modelling" Geotechnical and Geological Engineering, 18, 1, pp 23-37.

[۳۳] توسل پور، ا.، (۱۳۸۴)، پایان نامه دوره کارشناسی ارشد، تخمین مدول تغییرشکل پذیری برجا با استفاده از پارامتر ژئومکانیکی توده سنگ، دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه تربیت مدرس.

[34] Hudson J. A. (1993) "Comprehensive rock engineering", Pergamon Press, Chapter 14.

[35] Hoek E. (1998) "Reliability of Hoek-Brown estimates of rock mass properties and their impact on design" International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences, 35, pp 63-68.

[36] Hashemi M., Moghaddas S., Ajalloeian R. (2010) "Application of rock mass characterization for determining the mechanical properties of rock mass: A comparative study", Rock Mechanics and Rock Engineering, 43, pp 305-320.

[37] Sheorey P. R. (1997) "Empirical rock failure criteria", AA Balkema.

[۳۸] لقائی، م.، (۱۳۹۳)، پایان نامه دوره کارشناسی ارشد، مدل سازی عددی تعیین دگرشکل پذیری و مقاومت توده سنگ درزه دار به صورت سه بعدی، دانشکده مهندسی معدن، دانشگاه صنعتی اصفهان.

[39] Cai M. and Horii H. (1992) "A Constitutive Model of Highly Jointed Rock Masses" Mechanics of Materials, 13, pp 217-246.

[40] Sitharam, T. G. (2009) "Equivalent continuum analyses of jointed rockmass: Some case studies" International Journal of the JCRM, 5, 1, pp 39-51.

[41] Huang T. H., Chang C. S., Yang Z. Y. (1995) "Elastic Moduli for Rock Mass" Rock Mechanics and Rock Engineering, 28, pp 135-144.

[۴۲] مزرعه لی، م.، (۱۳۹۴)، پایان نامه دوره کارشناسی ارشد، بررسی تاثیر تغییر زاویه شیب و زاویه امتداد دسته درزه ها در برآورد خواص تغییرشکل پذیری محیط های پیوسته معادل، دانشکده مهندسی معدن و متالورژی، دانشگاه صنعتی امیرکبیر (پلی تکنیک تهران).

[43] Yang J. -P., Chen W. -Z., Dai Y. -H., Yu H. -D. (2014) "Numerical determination of elastic compliance tensor of fractured rock masses by finite

element modeling” International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences, 70, pp 474-482.

[44] Pouya A. and Ghoreychi M. (2001) “Determination of rock mass strength properties by homogenization” International Journal for Numerical and Analytical Methods in Geomechanics, 25, pp 1285-1303.

[45] JianPing Y., weiZhong C., DianSen Y., JingQiang Y. (2015) “Numerical determination of strength and deformability of fractured rock mass by FEM modeling” Computers and Geotechnics, 64: 20-31.

[46] Wang X. (2005) “Joint inclination effect on strength, stress-strain curve and strain localization of rock in plane strain compression” Materials Science Forum, 495, pp 69-76.

[47] Sainsbury B., Pierce M., Mars Ivars D. (2008) “Simulation of rock mass strength anisotropy and scale effects using a Ubiquitous Joint Rock Mass (UJRM) model”, Proceedings of First International FLAC/UDEC Symposium on Numerical Modelling, pp 25-27.

[48] Priest S., D. (1993) “Discontinuity analysis for rock engineering”, Springer.

[49] Kulatilake P., Wang S., Stephansson O. (1993) “Effect of finite size joints on the deformability of jointed rock on three dimensions”, International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences & Geomechanics Abstracts, 30 , 5, pp 479-501, Elsevier.

[50] Baghbanan A. (2008), PhD. Thesis, “Scale and stress effects on hydro-mechanical properties of fractured rock masses”, KTH, Stockholm.

[۵۱] گزارش‌های زمین‌شناسی تهیه شده توسط شرکت البرز شرقی.

[52] Palmstrom A. (2001) “Insitu Characterization of Rocks”, Chapter 2, AA BALKEMA.

[53] Zhang L. (2005) “Engineering properties of rocks”, Elsevier.

[54] Gokceoglu C., Sonmez H., Kayabasi A. (2003) “Predicting the deformation moduli of rock masses”, International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences, 4, 5, pp 701-710.

[55] Riahi Dehkordi A. (2008), PhD. Dissertation “3D Finite Element Cosserat Continuum Simulation of Layered Geomaterials”, University of Toronto.

[56] Lemos J. V., Hart R. D., Cundall P. A. (1985) “A generalized distinct element program for modelling jointed rock mass” International Symposium on Fundamentals of Rock Joints, Bjokliden, pp 335-343.

[57] Hart R. D. (1991) “An introduction to Distinct Element Modelling for rock engineering”, International Society for Rock Mechanics 7th Congress , Aachen.

[58] Jing L., Stephansson O. (2007) “Fundamentals of Discrete Element Methods for Rock Engineering: Theory and Applications”, Elsevier.

Abstract:

Awareness of uniaxial compressive strength (UCS) and deformability values of jointed rock masses are inevitable parts of geomechanics-related concerns. However, Laboratory tests can not be helpful to capture the behavior of large-scaled rock masses. Deformability of a rock mass with stochastic joint sets is potentially anisotropic and is mainly governed by joints mechanical and geometrical characteristics. In situ tests are often conducted to determine the deformability properties of a rock mass. Numerical and analytical methods also can be used, alternatively.

The available models for the deformation analysis of rock masses can be divided into two general categories: continuum models and discontinuum models. In discontinuum models, the joints are simulated explicitly. However, when the number of joints in a model increases, the explicit definition of all joints becomes difficult and, in some cases, impractical. Besides, due to the dependency of numerical discretization on joint spacing and orientation, the size of a discontinuum model increases considerably as the number of joints increases within the model. The constitutive equivalent continuum relations can be used as a rule of thumb which is an alternative to discontinuum models for the deformation analysis of jointed rocks.

In this thesis, strength and deformation behavior of jointed rock masses is evaluated. Field surveys through scanline method are used to collect sandstone joints spatial features on the rock surface at Tazareh coal mine. A statistical evaluation is conducted on field data using Dips software. A rock mass containing two networks of discrete joints is modelled using 3DEC, and its behavior is analyzed in some cases with different loading directions and block sizes to obtain Representative Elementary Volume (REV) in Tazareh mine. Empirical values of UCS and deformability modulus are compared with values obtained by discrete modelling and proficiency of the empirical solutions is investigated.

Keywords: Deformability modulus, Strength, Numerical modelling, Distinct Element Method, Jointed rock mass, Discrete Fracture Network



Shahrood University of Technology
Faculty of Kharazmi International Campus
MSc Thesis in Mining Extraction

Numerical Study of Size and Loading Direction Effect on the Strength and
Deformability of Jointed Rock Mass –Case Study: Tazareh Coal Mine

By: Milad Arab Ameri

Supervisor:
Dr. Hossein Mirzaei

Advisor:
Mr. Nader Ziari

September 2016