

بِسْمِ اللَّهِ الرَّحْمَنِ الرَّحِيمِ



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

تعیین ماتریس مشخصه رفتاری توده سنگ درزه دار با استفاده از روش عددی اجزا مجزا- مطالعه
موردی معدن زغال سنگ طزره

نگارنده: مهران کاویانی دزکی

استاد راهنما:

دکتر حسین میرزایی نصیرآباد

مشاور:

مهندس نادر زیاری

شهریور ۱۳۹۵

به پاس تعبیر عظیم و انسانی شان از کلمه ایثار و از خودگذشتگان

به پاس عاقله سرشار و گرمای امید بخش وجودشان که در این سردترین روزگار ان بهترین پشتیبان است

به پاس قلب های بزرگشان که فریاد رس است و سرگردانی و ترس در پناهنشان به شجاعت می کرلید

و به پاس محبت های بی دریغشان که هرگز فروکش نمی کند

این مجموعه را به پدر و مادر عزیزم تقدیم می کنم

شکر و قدردانی

شکرشایان نثار ایزدمنان که توفیق را رفیق را هم ساخت تا این پایان نامه را به پایان برسانم. از بزرگوار جناب آقای دکتر حسین میرزایی به

عنوان استاد راهنما که همواره محاذمه را مورد لطف و محبت خود قرار داده اند و همچنین کمک های بی دریغ مهندس نادر زیاری کمال شکر را دارم.

تعهد نامه

اینجانب مهران کاویانی دزکی دانشجوی دوره کارشناسی ارشد رشته مهندسی معدن گرایش استخراج معدن از دانشکده مهندسی معدن، نفت و ژئوفیزیک دانشگاه صنعتی شاهرود نویسنده پایان نامه کارشناسی ارشد تحت عنوان: تعیین ماتریس مشخصه رفتاری توده سنگ درزه دار با استفاده از روش عددی اجزا مجزا- مطالعه موردی معدن زغال سنگ طزره تحت راهنمایی جناب آقای دکتر حسین میرزایی نصیرآباد 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» یا «Shahrood University of Technology» به چاپ خواهد رسید.
- حقوق معنوی تمام افرادی که در به دست آمدن نتایج اصلی پایان نامه تاثیرگذار بوده اند، در مقالات مستخرج از این پایان نامه رعایت می گردد.
- در کلیه مراحل انجام این پایان نامه، در مواردی که از موجود زنده (یا بافتهای آنها) استفاده شده است، ضوابط و اصول اخلاقی رعایت شده است.
- در کلیه مراحل انجام این پایان نامه، در مواردی که به حوزه اطلاعات شخصی افراد دسترسی یافته یا استفاده شده است، اصل رازداری، ضوابط و اصول 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

پروژه‌های مرتبط به مهندسی سنگ نیاز به آگاهی از میزان خصوصیات مکانیکی توده‌سنگ می‌باشد. برای شناخت بهتر خصوصیات مکانیکی توده‌سنگ درزه‌دار روش‌های مختلف مستقیم و غیرمستقیم ارائه شده است، استفاده از روش‌های برجا مطمئن‌ترین روش در برآورد تغییر شکل‌پذیری سنگهاست اما انجام آنها مستلزم تخصیص وقت و هزینه بسیاری است. از روش‌های تحلیلی و عددی نیز می‌توان استفاده کرد که با توجه به در نظر گرفتن خصوصیات واقعی سیستم شکستگی‌ها در روش المان‌مجزا، این روش از برتری نسبی برخوردار است.

در این پایان‌نامه با استفاده از روش عددی سه بعدی المان‌مجزا ماتریس مشخصه رفتاری توده‌سنگ درزه‌دار محاسبه شده است. بدین منظور در ابتدا پس از برداشت ناپیوستگی‌ها با روش برداشت خطی از معدن زغال‌سنگ طزره، با استفاده از نرم‌افزار Dips دسته درزه‌ها تعیین شد. سپس با انجام مطالعات آزمایشگاهی خواص مکانیکی ماده‌سنگ منطقه مورد مطالعه تعیین شد. در مرحله بعد خواص هندسی برداشت شده از معدن طزره به صورت آماری پردازش شده و توابع توزیع احتمال حاکم بر خصوصیات هندسی مشخص شدند، در ادامه خواص هندسی ناپیوستگی‌ها و خصوصیات ژئومکانیکی توده‌سنگ در نرم افزار 3DEC وارد شد. سپس ابعاد المان حجم معرف توده‌سنگ تعیین و با استفاده از دستورالعمل پیشنهادی کی‌بوک‌مین طی بارگذاری‌های سه‌بعدی شبیه‌سازی شده عددی ماتریس مشخصه رفتاری توده‌سنگ درزه‌دار معدن طزره تعیین گردید. برخی از مولفه‌های حاصل با نتایج روابط تجربی مقایسه شد.

واژگان کلیدی: مدلسازی عددی، پارامترهای مکانیکی، روش المان‌مجزا، نماینده حجم معادل، ماتریس مشخصه رفتاری، توده‌سنگ درزه دار

فهرست مطالب

فصل اول: مقدمه..... ۱

۱-۱- کلیات ۲

۲-۱- رابطه تنش - کرنش ۲

۳-۱- ماتریس مشخصه رفتاری توده سنگ درزه دار ۵

۴-۱- هدف از انجام پایان نامه ۶

۵-۱- ضرورت انجام پایان نامه ۷

۶-۱- سابقه تحقیق ۸

۷-۱- روش انجام تحقیق ۱۱

۸-۱- ساختار گزارش ۱۳

فصل دوم: روابط تنش کرنش ۱۵

۱-۲- مقدمه ۱۶

۲-۲- ارتباط تنش با کرنش در مواد همسانگرد ۱۶

۱-۲-۲- تنش مسطح ۱۸

۲-۲-۲- کرنش مسطح ۱۹

۳-۲- روابط تنش - کرنش مواد ناهمسانگرد ۲۰

۱-۳-۲- ماتریس مشخصه مصالح ناهمسانگرد ۲۱

۲-۳-۲- ماتریس مشخصه مصالح مونوکلینیک ۲۲

۳-۳-۲- ماتریس مشخصه مصالح ارتوتروپیک ۲۴

۴-۳-۲- ماتریس مشخصه مصالح همسانگرد عرضی ۲۵

۴-۲- جمع بندی ۲۶

فصل سوم: مطالعات انجام شده برای تعیین ماتریس مشخصه رفتاری توده سنگ درزه دار..... ۲۹

۱-۳- مقدمه ۳۰

۲-۳- مطالعات تحلیلی برای تعیین ماتریس مشخصه رفتاری توده سنگ درزه دار..... ۳۰

۱-۲-۳- مقدمه ۳۰

۲-۲-۳- روابط تحلیلی ویتکه ۳۲

۳-۲-۳- روابط تحلیلی گودمن ۳۵

۳-۳- مطالعات عددی برای تعیین ماتریس مشخصه رفتاری توده سنگ درزه دار ۳۷

۳۷	..... مقدمه	۱-۳-۳
۳۹	..... مطالعات کی بوک مین	۲-۳-۳
۴۲	..... مطالعات لقای	۳-۳-۳
۴۲	..... مطالعات جیان پینگ یانگ	۴-۳-۳
۴۴	..... جمع بندی	۴-۳
فصل چهارم: تعیین خواص مکانیکی و توصیف هندسی توده سنگ معدن زغال سنگ طزره		
۴۵	..... مقدمه	۱-۴
۴۶	..... معرفی منطقه مورد مطالعه	۲-۴
۴۷	..... زمین شناسی عمومی منطقه	۳-۴
۴۸	..... منطقه طزره	۱-۳-۴
۴۹	..... معدن کلاریز	۱-۱-۳-۴
۴۹	..... معدن رزمجا	۲-۱-۳-۴
۵۰	..... معدن کلمدر	۳-۱-۳-۴
۵۰	..... چینه شناسی	۲-۳-۴
۵۱	..... تکتونیک	۳-۳-۴
۵۲	..... برداشت ناپیوستگی‌ها	۴-۴
۵۴	..... زمین شناسی مهندسی منطقه	۵-۴
۵۵	..... مطالعات آزمایشگاهی	۶-۴
۵۶	..... آزمایش مقاومت فشاری تک محوری	۱-۶-۴
۵۷	..... مراحل انجام آزمایش مقاومت فشاری تک محوری	۱-۱-۶-۴
۵۸	..... نتایج آزمایش مقاومت فشاری	۲-۱-۶-۴
۶۰	..... آزمایش چگالی و تخلخل	۲-۶-۴
۶۲	..... رده بندی توده سنگ	۷-۴
۶۲	..... شاخص کیفیت سنگ (RQD)	۱-۷-۴
۶۳	..... رده بندی ژئومکانیکی یا RMR	۲-۷-۴
۶۵	..... رده بندی Q	۳-۷-۴
۶۶	..... تخمین تجربی مدول دگرشکل پذیری	۸-۴
۶۶	..... تخمین مدول دگرشکل پذیری با استفاده از Q	۱-۸-۴
۶۷	..... تخمین مدول دگرشکل پذیری با استفاده از RMR و GSI	۲-۸-۴
۷۰	..... تخمین مدول دگرشکل پذیری با استفاده از RQD	۳-۸-۴

۷۱.....	۹-۴- جمع بندی
۷۳.....	فصل پنجم: مدل سازی سه بعدی و تعیین ماتریس مشخصه رفتاری توده سنگ درزه دار.....
۷۴.....	۵-۱- مقدمه
۷۴.....	۵-۲- معرفی ابزار مورد استفاده در مدلسازی سه بعدی
۷۶.....	۵-۳- فرآیند مدل سازی سه بعدی به روش المان مجزا
۷۶.....	۵-۳-۱- ساخت مدل بلوکی براساس شبکه شکستگی
۷۷.....	۵-۳-۲- پارامترهای مکانیکی مورد استفاده در مدلسازی
۷۸.....	۵-۳-۳- مدل رفتاری مربوط به سنگ بکر و ناپیوستگی
۷۹.....	۵-۳-۴- زون بندی بلوک های سنگی
۸۰.....	۵-۳-۵- اعمال شرایط مرزی با توجه به محدوده رفتار الاستیک
۸۵.....	۵-۳-۶- نحوه ی پایش مدل و اندازه گیری کرنش
۸۵.....	۵-۳-۷- نحوه محاسبه ماتریس مشخصه رفتاری توده سنگ درزه دار در سه بعد
۸۶.....	۵-۴- مقایسه نتایج حاصل از مدلسازی عددی و نتایج تجربی
۸۹.....	فصل ششم: نتیجه گیری و پیشنهادها
۹۳.....	منابع

فهرست اشکال

- شکل ۱-۱ رفتار الاستیک و غیر الاستیک مواد ۳
- شکل ۱-۲ تنش های نرمال وارد بر بلوک ۱۶
- شکل ۲-۲ تغییر محور $Ox3$ به $Ox'3$ ۲۳
- شکل ۳-۲ صفحات تقارن برای مواد ارتوتروپ ۲۴
- شکل ۴-۲ محور تقارن برای مصالح همسانگرد ۲۶
- شکل ۱-۳ تعریف ثابت الاستیک سنگ دست نخورده با ساختار دانه دو وجهی و متقاطع رفتار همسانگرد ۳۳
- شکل ۲-۳ نمایش توده سنگ درزه دار به صورت: الف) توده سنگ شکسته واقعی ب) مدل ساخته شده با المان محدود ج) مدل ساخته شده با المان مرزی د) مدل ساخته شده با المان مجزا ۳۸
- شکل ۳-۳ مفهوم حجم معرف اولیه ۴۰
- شکل ۴-۳ سه شرط مرزی مستقل برای تعیین درایه‌های مجهول ماتریس مشخصه رفتاری ۴۱
- شکل ۵-۳ تعیین ماتریس مشخصه رفتاری توده سنگ در دو بعد ۴۱
- شکل ۶-۳ نمایی از ۳ بارگذاری (الف) بارگذاری در راستای x . (ب) بارگذاری در راستای y . (ج) برش خالص ۴۴
- شکل ۱-۴ موقعیت جغرافیایی معادن زغالسنگ طزره. ۴۸
- شکل ۲-۴ نمایی از چین خوردگیهای منطقه ۵۰
- شکل ۳-۴ محدوده برداشت نمونه های بلوکی؛ (الف) زون A و (ب) زون B. ۵۳
- شکل ۴-۴ تصاویر استریوگراف حاصل از داده های خط برداشت در زون A. ۵۵
- شکل ۵-۴ نمونه های برداشت شده ۵۷
- شکل ۶-۴ فرآیند گرفتن مغزه از بلوک های سنگی. ۵۷
- شکل ۷-۴ مغزه های گرفته شده از زون A. ۵۸
- شکل ۸-۴ مغزه های آماده سازی شده بر اساس استاندارد ISRM. ۵۸
- شکل ۹-۴ تصویر نمونه ها قبل و بعد از آزمایش تک محوره (الف) A1 و (ب) A2. ۵۸
- شکل ۱۰-۴ نمودار تنش - کرنش محوری و جانبی نمونه های مختلف. ۵۹
- شکل ۱۲-۴ نمایی از مرحله اشباع نمونه ۶۱
- شکل ۱۳-۴ همبستگی بین مدول تغییر شکل و امتیازهای RMR یا GSI. ۶۹
- شکل ۱۴-۴ نمودار نسبت مدولی در برابر RQD ۷۰
- شکل ۱-۵ مدل های بلوکی با اندازه های متفاوت ۷۶
- شکل ۲-۵ تعیین المان حجم نماینده ۷۷
- شکل ۳-۵ مدل بلوکی با ابعاد هر ضلع ۱۰ متر ۸۰
- شکل ۴-۵ اعمال شرایط مرزی ۱ ۸۰

شکل ۵-۵ اعمال شرایط مرزی ۲	۸۱
شکل ۵-۶ اعمال شرایط مرزی ۳	۸۲
شکل ۵-۷ اعمال شرایط مرزی ۴	۸۳
شکل ۵-۸ اعمال شرایط مرزی ۵	۸۳
شکل ۵-۹ اعمال شرایط مرزی ۶	۸۴
شکل ۵-۱۰ نمایی از نقاط تعیین شده برای اندازه گیری کرنش بر روی یکی از وجوه بلوک	۸۵

فهرست جداول

- جدول ۱-۴ جهت یابی خطوط برداشت ۵۳
- جدول ۲-۴ نمونه های از جدول برداشت درزه ها ۵۳
- جدول ۳-۴ مقادیر میانگین ویژگی های مهندسی ناپیوستگی های مورد مطالعه ۵۴
- جدول ۴-۴ نتایج آزمایش فشاری تک محوره ۶۰
- جدول ۵-۴ نتایج اندازه گیری چگالی و تخلخل نمونه هایی از زون های A و B ۶۲
- جدول ۶-۴ طبقه بندی سنگ ها با استفاده از شاخص کیفیت سنگ ۶۲
- جدول ۷-۴ پارامترهای رده بندی ژئومکانیکی توده سنگ ۶۴
- جدول ۸-۴ مقادیر تعدیل ارزش عددی برای جهت یابی درزه ها ۶۴
- جدول ۹-۴ کلاس های مختلف توده سنگ و پارامترهای طراحی و خواص مهندسی مناظر ۶۴
- جدول ۱۰-۴ امتیاز ماسه سنگ طزره در رده بندی Q ۶۶
- جدول ۱۱-۴ نتایج مدول دگرشکل پذیری توده سنگ با استفاده از رابطه پیشنهادی بارتن ۲۰۰۲ ۶۷
- جدول ۱۲-۴ مقایسه مقادیر تخمینی مدول تغییرشکل پذیری با استفاده از روش های تجربی ۷۱
- جدول ۱-۵ پارامترهای مکانیکی سنگ بکر ۷۷
- جدول ۲-۵ پارامترهای مکانیکی درزه ها ۷۸
- جدول ۳-۵ تنش ها و کرنش های شرایط مرزی ۱ ۸۱
- جدول ۴-۵ تنش ها و کرنش های شرایط مرزی ۲ ۸۱
- جدول ۵-۵ تنش ها و کرنش های شرایط مرزی ۳ ۸۲
- جدول ۶-۵ تنش ها و کرنش های شرایط مرزی ۴ ۸۳
- جدول ۷-۵ تنش ها و کرنش های شرایط مرزی ۵ ۸۴
- جدول ۸-۵ تنش ها و کرنش های شرایط مرزی ۶ ۸۴
- جدول ۹-۵ مقادیر مدول دگرشکل پذیری در جهات X, Y, Z ۸۶
- جدول ۱۰-۵ مقادیر ضرایب پواسون در جهات X, Y, Z در اندازه نماینده حجم معادل ۸۶

فصل اول

مقدمه

۱-۱- کلیات

پارامترهای مکانیکی و دگرشکل پذیری، معرف رفتار مکانیکی توده‌سنگ‌های درزه‌دار بوده و از ملزومات طراحی، ساخت، اجرا و برآورد ایمنی ساختارهای سطحی و زیرسطحی در مهندسی سنگ، به ویژه در پروژه‌های مهندسی انجام گرفته برای ذخایر انرژی و حفظ محیط زیست مانند مخازن زیرزمینی دفن زباله‌های اتمی، مغارهای نگهداری آب، نفت و یا گاز و ذخایر زمین گرمایی، همچنین تونل‌های راه و انتقال آب، سدها، معادن و غیره به شمار می‌روند. در نتیجه تعیین صحیح این پارامترها برای توده سنگ‌های شکسته بسیار حائز اهمیت است و در روند انجام پروژه و مباحث اقتصادی و زمان تحویل این پروژه بسیار موثر است. توده‌سنگ‌های بلوکی که طبیعتاً محیط‌هایی ناپیوسته و پیچیده-اند، از ماتریکس سنگ بکر و شکستگی‌ها تشکیل شده و به خاطر هندسه پیچیده سیستم‌های شکستگی، محیط‌هایی ناپیوسته، ناهمگن، ناهمسانگرد و غیرالاستیک خطی (DLANE)^۱ بوده و در مقایسه با سنگ بکر معمولاً ضعیف‌تر، شکل پذیرتر و شدیداً ناهمسانگرد هستند [۱].

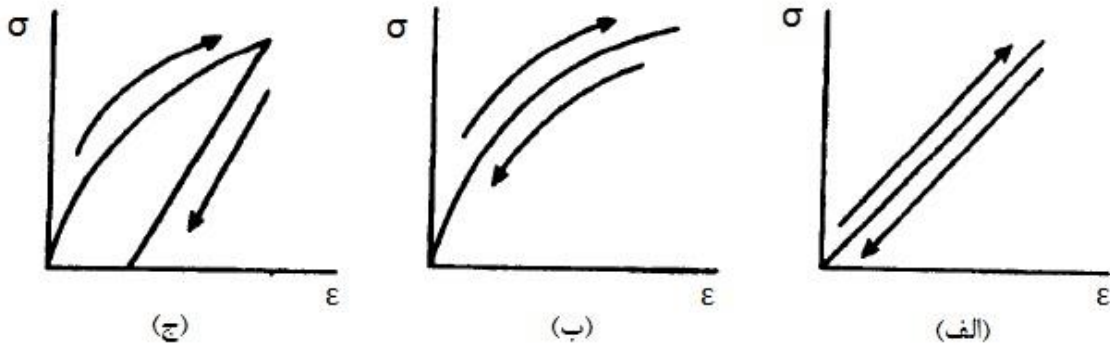
به طور کلی در توده‌سنگ‌های بلوکی که تغییر شکل پذیری سنگ بکر در مقایسه با تغییر شکل بسیار زیاد درزه‌ها، بسیار اندک است، رفتار مکانیکی توده‌سنگ‌ها عموماً متأثر از ناپیوستگی‌ها و مشخصات هندسی سیستم‌های شکستگی است. با توجه به اینکه پارامترهای هندسی شبکه شکستگی-ها مانند طول خط اثر، جهت‌گیری و موقعیت قرارگیری، شرایط برجای تنش در نزدیکی تقاطع درزه‌ها را تعیین می‌کند، وجود شبکه شکستگی‌ها منجر به عدم قطعیت بالایی در برآورد رفتار توده‌سنگ شکسته شده و شرایط کار بسیار دشوار می‌شود [۱].

۱-۲- رابطه تنش - کرنش

اطلاعات اصلی درباره رابطه تنش - کرنش برای هر ماده، از آزمایش مواد در آزمایشگاه بدست می‌آید. معمولاً ساده‌ترین و رایج‌ترین آزمایش‌های انجام شده، آزمایش‌های کششی و تراکمی یک

¹ Discontinuous Inhomogeneous Anisotropic Non-Linear Elastic

قطعه است. بنابراین به منظور تشریح رفتار مستقل یا وابسته به زمان مواد در یک مدل ساده بحث این قسمت بر پایه حالت تنش یک بعدی قرار خواهد گرفت [۲].



شکل ۱-۱ رفتار الاستیک و غیر الاستیک مواد [۳]

با توجه به نمودارهای شکل ۱-۱ (الف)، اگر نمودار تا حد الاستیک ماده به صورت یک خط راست باشد و بعد از باربرداری ماده به شکل اولیه خود باز گردد، چنین ماده‌ای را الاستیک خطی می‌نامند. از طرف دیگر اگر مسیر بارگذاری و باربرداری یکسان باشد و در باربرداری جسم به وضعیت هندسی اولیه خود بازگردد ولی این مسیر غیر خطی باشد، اصطلاحاً این ماده را الاستیک غیر خطی یا هیپرالاستیک می‌نامند [۲]. شکل ۱-۲ (ج) رفتار غیر الاستیک جسم را نشان می‌دهد که با حذف بار وارده تغییر شکل دائمی در جسم باقی می‌ماند.

در الاستیسیته خطی، یک رابطه یکتا بین تنش و کرنش وجود دارد به نام قانون هوک که نه به تاریخچه بارگذاری و نه به زمان وابسته است. ضمناً فرض می‌شود که کلیه تغییرات کرنش ناشی از تغییرات تنش آنی است و کاملاً قابل برگشت است بنابراین انرژی بارگذاری در حین باربرداری باز پس گرفته می‌شود [۲]. برای حالت یک محوری این رابطه را می‌توان به صورت زیر نوشت:

$$\varepsilon_x = \frac{\sigma_x}{E} \quad \text{یا} \quad \sigma_x = E \varepsilon_x \quad (1-1)$$

که E به مدول یا ضریب الاستیسیته معروف است.

در یک حالت عمومی وسیع‌تر معادله (۱-۱) را می‌توان به صورت زیر نوشت:

$$\{\sigma\} = [D] \{\varepsilon\} \quad (2-1)$$

که در آن $[D]$ ماتریس الاستیسیته، $\{\sigma\}$ شش مولفه تنش و $\{\epsilon\}$ شش مولفه کرنش می‌باشند. معادله (۳-۱) که ۶ مولفه تنش را به ۶ مولفه کرنش در یک نقطه از محیط پیوسته ارتباط می‌دهد، برای اولین بار توسط کوشی معرفی شد. این ۶ معادله بیان می‌کند که در هر نقطه محیط پیوسته هر مولفه تنش به صورت خطی با همه مولفه‌های کرنش ارتباط دارد. باید ضمناً دقت کرد که ماتریس D را می‌توان وارونه کرد و مولفه‌های کرنش را بر حسب مولفه‌های تنش نوشت. در نتیجه می‌توان گفت که هر مولفه کرنش نیز به صورت خطی تابعی از مولفه‌های تنش است. این روابط به عنوان قانون عمومی هوک معروف است [۲].

ماتریس $[D]$ برای حالت عمومی می‌تواند به صورت زیر نوشته شود:

$$[D] = \begin{bmatrix} D_{11} & D_{12} & D_{13} & D_{14} & D_{15} & D_{16} \\ D_{21} & D_{22} & D_{23} & D_{24} & D_{25} & D_{26} \\ D_{31} & D_{32} & D_{33} & D_{34} & D_{35} & D_{36} \\ D_{41} & D_{42} & D_{43} & D_{44} & D_{45} & D_{46} \\ D_{51} & D_{52} & D_{53} & D_{54} & D_{55} & D_{56} \\ D_{61} & D_{62} & D_{63} & D_{64} & D_{65} & D_{66} \end{bmatrix} \quad (۳-۱)$$

از معادله (۳-۱) دیده می‌شود که برای ارتباط ۶ مولفه کرنش به ۶ مولفه تنش ۳۶ ضریب الاستیسیته وجود دارد. البته به واسطه تقارن تانسور تنش و کرنش ماتریس D نیز متقارن بوده و لذا دارای ۲۱ ضریب مجزا است. این ضرایب مستقل از یکدیگر و توابعی از محور مختصات هستند. البته این ضرایب معرف یک ماده ناهمسانگرد عام است. اما خواص مکانیکی بسیاری از مواد، مستقل از امتداد و جهات خاص است. هرگاه یک ماده دارای تقارن الاستیک باشد، یا به عبارتی، جهاتی در جسم وجود داشته باشد که خواص الاستیک آنها کاملاً مشابه باشد، تعداد ثابت‌های معادله (۳-۱) کاهش می‌یابد. به عنوان مثال اگر تقارن الاستیک نسبت به ۳ صفحه xy - yz - xz وجود داشته باشد، جسم را ارتوتروپیک می‌نامند. در این حالت ثابت‌های الاستیک به ۹ عدد $D_{11}, D_{12}, D_{13}, D_{22}, D_{23}, D_{33}$ را ارتوتروپیک می‌نامند. اگر تقارن نسبت به یک صفحه و حول محور عمود بر آن صفحه وجود داشته باشد، اصطلاحاً آن را همسانگرد عرضی می‌نامند و در این حالت فقط ۵ ضریب مستقل باقی

می‌ماند. در صورتی که تقارن نسبت به سه صفحه و حول سه محور وجود داشته باشد جسم را همسانگرد یا ایزوتروپیک می‌نامند که در این حالت فقط دو ضریب مستقل برای تعریف ماتریس D کفایت می‌کند [۲].

۳-۱- ماتریس مشخصه رفتاری توده سنگ درزه دار

ماتریس مشخصه رفتاری توده سنگ درزه‌دار یک رابطه بین تنش‌های وارده و کرنش‌های به وجود آمده است. پس از تعیین ماتریس مشخصه رفتاری می‌توان هر یک از کرنش‌ها (و جابجایی‌های مرتبط) را با آگاهی از تنش‌های وارده پیش‌بینی کرد [۱].

یک راه ساده برای شروع این است که فرض شود که هر جزء از تانسور کرنش یک ترکیب خطی از تمام اجزای تانسور تنش خواهد بود. به عنوان مثال برای ϵ_{xx} داریم:

$$\epsilon_{xx} = S_{11}\sigma_{xx} + S_{12}\sigma_{yy} + S_{13}\sigma_{zz} + S_{14}\tau_{xy} + S_{15}\tau_{yz} + S_{16}\tau_{zx} \quad (۴-۱)$$

از آنجا که شش مولفه مستقل از تانسور کرنش وجود دارد، شش معادله از این نوع وجود خواهد داشت. اگر تنش را فقط در راستای X در نظر بگیریم، رابطه (۴-۱) به این صورت کاهش می‌یابد:

$$\epsilon_{xx} = S_{11}\sigma_{xx} \quad (۵-۱)$$

این شکل از رابطه، که در آن کرنش طولی خطی با تنش طولی متناسب است، برای اولین بار توسط رابرت هوک در سال ۱۶۷۶ ارائه شد [۱].

در نهایت مجموعه‌ای کامل از روابط تنش کرنش را داریم [۱]:

$$\begin{aligned} \epsilon_{xx} &= S_{11}\sigma_{xx} + S_{12}\sigma_{yy} + S_{13}\sigma_{zz} + S_{14}\tau_{xy} + S_{15}\tau_{yz} + S_{16}\tau_{zx} \\ \epsilon_{yy} &= S_{21}\sigma_{xx} + S_{22}\sigma_{yy} + S_{23}\sigma_{zz} + S_{24}\tau_{xy} + S_{25}\tau_{yz} + S_{26}\tau_{zx} \\ \epsilon_{zz} &= S_{31}\sigma_{xx} + S_{32}\sigma_{yy} + S_{33}\sigma_{zz} + S_{34}\tau_{xy} + S_{35}\tau_{yz} + S_{36}\tau_{zx} \\ \epsilon_{xy} &= S_{41}\sigma_{xx} + S_{42}\sigma_{yy} + S_{43}\sigma_{zz} + S_{44}\tau_{xy} + S_{45}\tau_{yz} + S_{46}\tau_{zx} \\ \epsilon_{yz} &= S_{51}\sigma_{xx} + S_{52}\sigma_{yy} + S_{53}\sigma_{zz} + S_{54}\tau_{xy} + S_{55}\tau_{yz} + S_{56}\tau_{zx} \\ \epsilon_{zx} &= S_{61}\sigma_{xx} + S_{62}\sigma_{yy} + S_{63}\sigma_{zz} + S_{64}\tau_{xy} + S_{65}\tau_{yz} + S_{66}\tau_{zx} \end{aligned} \quad (۶-۱)$$

این روابط را به طور ساده‌تر می‌توان با استفاده از روابط ماتریس‌ها نوشت:

$$[\varepsilon] = [S][\sigma]$$

$$[S] = \begin{bmatrix} S_{11} & S_{12} & S_{13} & S_{14} & S_{15} & S_{16} \\ S_{21} & S_{22} & S_{23} & S_{24} & S_{25} & S_{26} \\ S_{31} & S_{32} & S_{33} & S_{34} & S_{35} & S_{36} \\ S_{41} & S_{42} & S_{43} & S_{44} & S_{45} & S_{46} \\ S_{51} & S_{52} & S_{53} & S_{54} & S_{55} & S_{56} \\ S_{61} & S_{62} & S_{63} & S_{64} & S_{65} & S_{66} \end{bmatrix} \quad \text{و} \quad [\sigma] = \begin{bmatrix} \sigma_{xx} \\ \sigma_{yy} \\ \sigma_{zz} \\ \tau_{xy} \\ \tau_{yz} \\ \tau_{zx} \end{bmatrix} \quad \text{و} \quad [\varepsilon] = \begin{bmatrix} \varepsilon_{xx} \\ \varepsilon_{yy} \\ \varepsilon_{zz} \\ \gamma_{xy} \\ \gamma_{yz} \\ \gamma_{zx} \end{bmatrix}$$

ماتریس [S]، ماتریس مشخصه رفتاری است که یک شکل از «انعطاف پذیری» و معکوس سختی است [۱].

برای تعمیم قانون هوک در حالت کلی لازم است تا هر مولفه تنش به تمام مولفه‌های کرنش و هر مولفه‌ی تغییر شکل نسبی به تمام مولفه‌های تنش مربوط شود که این مهم به وسیله‌ی ماتریس مشخصه رفتاری ارائه می‌گردد. تانسور مشخصه رفتاری^۱ که به نوعی معرف رفتار کلی دگرشکلی توده-سنگ است تاکنون از طریق روش‌های عددی از جمله روش شبکه شکستگی‌های مجزا – المان مجزا [۴] و روش المان مرکب [۵] تعیین گردیده و همینطور تاثیر چگالی درزه‌داری شبکه شکستگی و تنش اعمالی [۶] بر روی پارامترهای این تانسور مورد بررسی قرار گرفته است.

۱-۴-هدف از انجام پایان نامه

هدف از انجام این پایان نامه تعیین ماتریس مشخصه رفتاری برای توده‌سنگ درزه‌دار در حالت سه بعدی در ابعاد المان حجم معادل^۲ است.

بدین منظور با استفاده از روش عددی سه بعدی المان مجزا ماتریس مشخصه رفتاری توده‌سنگ درزه-دار محاسبه شده است. بدین منظور در ابتدا پس از برداشت ناپیوستگی‌ها با روش برداشت خطی از معدن زغال‌سنگ طزره، با استفاده از نرم‌افزار Dips دسته درزه‌ها تعیین شد. سپس با انجام مطالعات آزمایشگاهی خواص مکانیکی ماده‌سنگ منطقه مورد مطالعه تعیین شد. در مرحله بعد با خواص

¹ - Compliance Tensor

² Representative Elementry Volome

هندسی برداشت شده از معدن طزره به صورت آماری پردازش شده و توابع توزیع احتمال حاکم بر خصوصیات هندسی مشخص شدند، در ادامه خواص هندسی ناپیوستگی‌ها و خصوصیات ژئومکانیکی توده‌سنگ در نرم‌افزار 3DEC نسخه ۵ [۷] وارد شد. سپس ابعاد المان حجم معرف توده سنگ تعیین و با استفاده از دستورالعمل پیشنهادی کی‌بوک‌مین طی بارگذاری‌های سه بعدی شبیه‌سازی شده عددی ماتریس مشخصه رفتاری توده‌سنگ درزه‌دار معدن طزره تعیین گردید. برخی از مولفه‌های حاصل با نتایج روابط تجربی مقایسه شد.

۱-۵- ضرورت انجام پایان نامه

برای ارزیابی پایداری فضاهای زیرزمینی از جمله بازکننده‌ها و کارگاه‌های استخراج روش‌های مختلف استخراج زیرزمینی، اطلاع از رفتار مکانیکی توده‌سنگ در برگرفته فضاها ضروری می‌باشد. ماتریس مشخصه رفتاری مصالح سنگی از جمله مهم‌ترین خصوصیات ژئومکانیکی می‌باشد که برای برقراری ارتباط بین تانسور تنش و تانسور کرنش جهت حل معادلات حاکم بر رفتار مکانیکی محیط سنگی مورد نیاز می‌باشد. از این رو در معادن زیرزمینی برای تحلیل پایداری و در صورت نیاز تامین تمهیدات لازم، ضروری است خصوصیات ژئومکانیکی محیط به ویژه ماتریس مشخصه رفتاری محیط سنگی تعیین گردد.

توجه به این نکته ضروری است که دستیابی به جواب‌های حقیقی برای تعیین ماتریس مشخصه رفتاری توده‌سنگ، از نظر تئوری مستلزم آزمایش حجم بزرگی از سنگ دارای ناپیوستگی در سطوح تنش مطلوب است. اما در عمل وجود ناپیوستگی‌های متعدد در توده‌سنگ، پیچیدگی ذاتی پارامترهای هندسی آنها و دشواری‌های برآورد خصوصیات ژئومکانیکی و هندسی، اندازه‌گیری مستقیم پارامترهای مکانیکی در آزمایشگاه را دشوار می‌سازد.

آزمایش‌های رایجی که در آزمایشگاه بر روی نمونه‌های سنگ بکر در ابعاد کوچک صورت می‌گیرد، معمولاً در یک محیط پیوسته بوده و قادر به تعمیم به رفتار مکانیکی توده‌سنگ درزه‌دار در مقیاس

بزرگ که شامل درزه‌های متعدد در ابعاد، جهات و مکان‌های مختلف است، نمی‌باشد. از طرف دیگر آزمایش‌های برجای بزرگ مقیاس بر روی توده‌سنگ از نظر محدوده مورد بررسی و تجهیزات لازم دارای محدودیت بوده و از لحاظ اقتصادی پرهزینه هستند و اغلب در اعمال شرایط مرزی و اولیه بطور واقعی بر روی حجم مورد آزمایش، عملی نمی‌باشند. همچنین تعمیم پارامترهای حاصله از این روش‌ها به اندازه‌های بزرگ مقیاس جای سوال دارد.

بنابراین با توجه به قابلیت بالای روش المان مجزا، ضرورت دارد برای تعیین ماتریس مشخصه رفتاری توده‌سنگ درزه‌دار، روش المان مجزا به کار گرفته شود.

۱-۶- سابقه تحقیق

در سال ۱۹۸۶ آقایان لیوود، دوپل و سان، با استفاده از المان محدود چند لایه ناهمسانگرد مواد الاستوپلاستیک را تجزیه و تحلیل کردند [۸].

کولاتیلاکه و همکاران در سال ۱۹۹۳ [۹] به بررسی و تعیین پارامترهای دگرشکل‌پذیری توده-سنگ با درزه‌های محدود، درسه بعد پرداختند. در این روش چنین عنوان شد که از آنجایی که بسیاری از توده‌سنگ‌ها شامل درزه‌های غیرممتد بوده و برای این نوع درزه‌ها امکان تشکیل بلوک وجود ندارد، روش المان مجزا را نمی‌توان به طور مستقیم برای چنین سنگ‌هایی به کاربرد. بنابراین روشی برای مطالعه تاثیر هندسه شبکه شکستگی‌ها از جمله چگالی درزه‌داری، ابعاد درزه‌ها و جهت-گیری درزه‌ها، تحت عنوان مولفه‌های تانسور شکستگی 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 مساله 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. تغییر شکل‌پذیری این درزه‌ها با پارامترهایی از قبیل سختی نرمال و سختی برشی مشخص می‌شود. زمانی که درزه‌های ساختگی شبیه سنگ بکر رفتار کنند، می‌توان از

روش‌های تحلیلی برای محاسبه دگر شکل پذیری 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.

مین و جینگ^۱ در ۲۰۰۳ [۴] از روش شبکه شکستگی‌های مجزا - المان مجزا برای تعیین پارامترهای الاستیک معادل توده سنگ‌های درزه‌دار با نمایش صریح شبکه‌ی شکستگی‌ها و بررسی شرایط کاربرد روش محیط معادل پیوسته برای نمایش رفتار مکانیکی توده‌سنگ‌ها استفاده کردند. بدین منظور تعدادی شبیه‌سازی عددی دو بعدی از رفتار دگرشکل پذیری توده سنگ‌های درزه‌دار با آرایش‌های متعددی از شبکه‌ی شکستگی‌ها در ابعاد مختلف انجام گرفت. بنابراین نشان داده شد که پارامترهای الاستیک توده سنگ را تقریباً می‌توان به وسیله ماتریس مشخصه رفتاری معادل طی شبیه‌سازی‌های عددی تعیین کرد.

در سال ۲۰۰۴ کولاتیلاکه و همکاران^۲ [۱۰] یک مدل شبکه‌ی شکستگی تصادفی سه بعدی با استفاده از کد نوشته شده و روش درزه‌های ساختگی برای یک مکعب ۳۰ متری جهت برآورد مقاومت و دگرشکل پذیری بلوک سنگی با در نظر گرفتن ناهمسانگری در سه بعد توسعه دادند. این روش نیز علی‌رغم برتری نسبت به روش‌های دو بعدی، به دلیل در نظر گرفتن تعداد محدودی شکستگی و ایجاد درزه‌های ساختگی برای تشکیل بلوک‌های سنگی و همچنین عدم بررسی اثر تصادفی در ساخت شبکه‌ی شکستگی‌های مجزا معرف خوبی از رفتار توده‌سنگ شکسته در سه بعد نبوده است.

اکثر مطالعات انجام شده در این زمینه که به وسیله‌ی انواع روش‌های عددی بر روی توده‌سنگ درزه‌دار صورت گرفته است در مقیاس دو بعدی و عموماً در حالت کرنش صفحه‌ای بوده است. اما از آنجایی که توده سنگ در حقیقت فضایی سه بعدی است و در نظر گرفتن آن بصورت دو بعدی و تعمیم پارامترهای حاصله به بعد سوم، از فرضیات لازم برای ساده‌سازی موضوع بوده و تخمین‌های بر اساس

¹ - Min & Jing

² - Kulatilake et al

چنین روش‌هایی ممکن است دست بالا و محافظه کارانه و یا بالعکس دست پایین باشد، تصمیم‌گیری بر پایه آن‌ها دارای صحت و دقت کافی نیست. کد المان مجزا (3DEC) توسط کاندال و همکاران در ۱۹۹۸ برای غلبه بر این محدودیت در شبیه‌سازی رفتار توده‌سنگ‌های درزه‌دار توسعه داده شده است. بنابراین مدل‌سازی با استفاده از روش‌های سه بعدی دقیق‌تر بوده و نسبت به سایر روش‌ها به واقعیت مسئله نزدیک‌تر است.

چنانکه گفته شد مطالعات انجام شده با استفاده از روش شبکه‌ی شکستگی‌های مجزا – المان مجزا بیشتر به صورت دو بعدی انجام گرفته‌اند. بنابراین نیاز به مدل‌سازی توده‌سنگ درزه‌دار در حالت سه بعدی با این روش، که حل صحیح‌تری را ارائه می‌دهد دیده می‌شود. مطالعه انجام شده در این پایان نامه برای تعیین ماتریس مشخصه رفتاری توده‌سنگ از طریق یک روش عددی مشخص با استفاده از داده‌های شبکه‌ی شکستگی واقعی برداشت شده درک بنیادی ارائه می‌دهد که براساس آن نمایش حقیقی‌تری از توده سنگ با شبکه‌ی شکستگی‌های پیچیده در سه بعد بدست خواهد آمد.

مین و جینگ در سال ۲۰۰۳، برای ایجاد یک روش تعیین خواص الاستیک معادل توده سنگ شکسته، ماتریس مشخصه رفتاری توده سنگ شکسته را به صورت عددی با استفاده از روش المان مجزا بدست آوردند. همچنین مجموعه‌ای از شبیه‌سازی عددی تغییر شکل مکانیکی توده سنگ شکسته در مقیاس‌های مختلف با تعداد زیادی از DFN‌های مختلف با استفاده از برنامه UDEC ساخته شد [۴].

موگیلوسکی، وانگ و کروچ در ۲۰۰۶، یک الگوریتم عددی دو بعدی برای محاسبه خواص الاستیک کلی سنگ طراحی کردند که در این الگوریتم، سنگ به بلوک‌هایی تقسیم می‌شود. مدول موثر برای تمام بلوک می‌تواند به عنوان داده‌های ورودی برای یک المان محدود یا المان مرزی برای مدل‌سازی رفتار توده سنگ در مقیاس‌های متفاوت به عنوان مجموعه‌ای از بلوک‌های همگن از اشکال مختلف و خواص الاستیک استفاده می‌شود [۱۱].

در سال ۲۰۱۱ آقای چن و همکاران، ماتریس مشخصه رفتاری توده سنگ درزه‌دار را با ترکیب روش المان کامپوزیت با استفاده از روش تصادفی مونت کارلو بدست آوردند [۱۲].

خانی و همکاران در سال ۲۰۱۳ [۶، ۱۳] در تکمیل مطالعات گذشته از همین روش برای بررسی تاثیر چگالی شبکه‌ی شکستگی‌ها و تنش‌های جانبی بر پارامترهای دگر شکل‌پذیری و مقاومتی توده-سنگ درزه‌دار در حالت دو بعدی استفاده کرد و ماتریس مشخصه رفتاری توده‌سنگ را برای آزمایش-های متعدد شبکه شکستگی‌ها با ابعاد مختلف تعیین کردند. همچنین نماینده حجم معادل برای مدول دگرشکل‌پذیری و مقاومت الاستیک توده‌سنگ درزه‌دار در این حالت تعیین گردید.

نوریان بیدگلی و جین در ۲۰۱۳ [۱۴] با استفاده از همین روش به بررسی تغییرات مدول شکل-پذیری و ضریب پواسون توده‌سنگ با تنش‌های جانبی مختلف و فشار آب پرداختند. همچنین تاثیر بارگذاری محوری تنش ثابت و سرعت ثابت بر پارامترهای مقاومتی و منحنی تنش - کرنش را برای حالت دو بعدی مورد بررسی قرار داد.

آقایان یانگ و چن در سال ۲۰۱۴ تانسور الاستیک مشخصه رفتاری توده سنگ شکسته را با استفاده از المان محدود بدست آوردند [۱۵].

۱-۷- روش انجام تحقیق

روش‌های تعیین پارامترهای مکانیکی معادل برای توده‌سنگ‌های درزه دار و رفتار مکانیکی آنها ابتدا به وسیله اندازه‌گیری مستقیم در مقیاس بزرگ امکان پذیر می نماید ولی کاری پرهزینه، وقت‌گیر و نیازمند کنترل دقیق شرایط مرزی و همچنین میزان زیاد عدم قطعیت بدلیل عدم اطلاع کافی از شکستگی‌های پنهان می‌باشد. همچنین پس از استخراج داده‌ها باید تحلیل دقیقی نیز روی آنها صورت گیرد. با توجه به این مشکلات انواع روش‌های غیرمستقیم تحت عنوان روش‌های تجربی، تحلیلی و عددی به وجود آمده است.

امروزه روش‌های عددی قادرند خواص مکانیکی توده‌سنگ‌های درزه دار را با در نظر گرفتن آرایش نسبتاً واقعی‌تر شبکه شکستگی‌ها و برهم کنش سنگ بکر و ناپیوستگی‌ها، در صورتی که مدل رفتاری آنها به خوبی شناسایی شده باشد، محاسبه نمایند. از انواع روش‌های عددی ناپیوسته می‌توان به روش المان محدود^۱، المان مرزی^۲ و المان مجزا^۳ اشاره کرد. در بین روش‌های موجود، روش‌های المان محدود و المان مرزی معمولاً در توصیف و تعداد ناپیوستگی‌ها و همچنین شبیه سازی جابجایی‌ها و چرخش‌های بزرگ که عمدتاً در توده‌سنگ‌های شکسته رخ می‌دهند، دارای محدودیت هستند. روش المان مجزا که در سال ۱۹۷۱ توسط کاندال^۴ [۱۶] معرفی شده و پس از آن در ۱۹۸۵ توسط لموس^۵ و همکاران [۱۷] توسعه یافت، روش بسیار مفیدی است که بطور صریح هندسه پیچیده مدل‌های شبکه شکستگی‌های مجزا را همراه با مدل‌های رفتاری ساده یا پیچیده برای ماده سنگ و درزه‌ها شبیه‌سازی کرده و امکان تغییر شکل‌های بزرگ در ناپیوستگی‌ها را فراهم می‌کند [۱۸].

تاکنون مطالعاتی برای بررسی رفتار مکانیکی سنگ بکر بدون ناپیوستگی [۱۹]، محیط معادل پیوسته و یا توده‌سنگ در محیط ناپیوسته و دارای یک یا چند دسته درزه منظم و هندسه همسانگرد شبکه شکستگی‌ها و تحت فرضیات ساده انجام گرفته است [۲۰] و [۹]. این‌گونه روش‌ها اگر چه ساده بوده و به فهم مساله کمک می‌کنند و در بسیاری موارد نتایج بدست آمده از آنها به مقادیر بدست آمده از روش‌های تجربی نزدیک است، با توجه به اینکه محیط سنگی در حقیقت یک محیط بسیار پیچیده است، معمولاً نمایش مناسبی از هندسه توده‌سنگ واقعی ارائه نمی‌دهند. بنابراین یک نمایش واقعی‌تر از توده‌سنگ هنگامی میسر می‌شود که مدلسازی شبکه شکستگی‌های مجزا^۶ در محیطی ناپیوسته صورت گیرد و تاثیر تنش بر رفتار دگرشکل‌پذیری در نظر گرفته شود.

¹ -Finite Element Method

² -Boundary Element Method

³ -Discrete Element Method

⁴ -Cundall

⁵ -Lemos

⁶ - Discrete Fracture Network

در روش ترکیبی شبکه شکستگی مجزا – المان مجزا (DFN- DMN) یک مدل نزدیک‌تر به واقعیت ساخته شده و از یک حل دقیق‌تر عددی استفاده می‌شود. در مدل شکستگی مجزا (DFN) مشخصات هندسی درزه‌ها در سنگ‌ها شامل جهت‌داری، چگالی، طول اثر، گسترش و نحوه‌ی قرارگیری آنهاست با توجه به توابع توزیع احتمال آنها و روش شبیه‌سازی مونت کارلو مدل‌سازی می‌شود که نسبت به مدل‌های با درزه‌های موازی و یا محیط معادل، واقعی‌تر است. برنامه‌های توسعه یافته برای مدل‌سازی به روش عددی المان مجزا (UDE^۲ , 3DEC^۱) که دگرشکل‌پذیری و شکست همزمان درزه و سنگ بکر را مدل‌سازی می‌کند، نسبت به روش‌های مبتنی بر محیط پیوسته حل صحیح‌تری را نتیجه می‌دهد [۴].

در این مطالعه ابتدا با استفاده از روش‌های برداشت خط برداشت یا پنجره برداشت، ناپیوستگی‌های توده سنگ مورد مطالعه در معدن طزره برداشت شده و خصوصیات هندسی ناپیوستگی‌ها نظیر طول خط اثر، جهت‌داری (شیب و جهت شیب)، دانسیته و ... تعیین می‌شود. سپس تعداد دسته درزه‌ها مشخص شده و مدل سه بعدی هندسی توده سنگ شبیه‌سازی می‌شود. سپس پارامترهای ژئومکانیکی ماده سنگ نظیر نسبت پواسون و ضریب ارتجاعی طی مطالعات آزمایشگاهی تعیین می‌شود. در مرحله بعد با استفاده از نرم افزار اجزا مجزای 3DEC در راستاهای مختلف مدل‌هایی از توده سنگ تهیه و تحت بارگذاری قرار می‌گیرد و در نهایت ماتریس مشخصه رفتاری تعیین می‌گردد.

۱-۸- ساختار گزارش

مطالب این پایان‌نامه در شش فصل تدوین شده است:

در فصل اول کلیاتی از پایان‌نامه به همراه تعریف ماتریس مشخصه رفتاری توده سنگ و مروری

بر تحقیقات صورت گرفته آورده شده است.

¹ - Universal Distinct Element Code

² - Three Dimensional Distinct Element Code

فصل دوم به بررسی روابط تنش- کرنش و مروری بر ماتریس مشخصه رفتاری برای انواع مصالح ناهمسانگرد پرداخته شده است.

در فصل سوم پایان نامه مطالعات مختلف انجام شده برای تعیین ماتریس مشخصه رفتاری توده- سنگ درزه دار بحث شده و قابلیت‌ها و محدودیت‌های روش‌های مختلف ذکر شده است.

در فصل چهارم اطلاعات مربوط به محدوده مورد مطالعه است. در این فصل در ابتدا به بررسی معدن زغال سنگ طزره پرداخته شده است، سپس خواص توده‌سنگ در بر گیرنده لایه‌های زغالسنگ در معدن طزره بیان شده و مراحل تعیین خواص مکانیکی ماده‌سنگ و برداشت ناپیوستگی‌های واقع در منطقه توضیح داده شده است. همچنین در این فصل روش تعیین دسته درزه‌های موجود با استفاده از نرم افزار Dips توضیح داده شده است.

فصل پنجم به معرفی نرم افزار مورد استفاده و سپس نحوه تولید شبکه‌ی شکستگی سه بعدی با استفاده از داده‌های برداشت شده، پارامترهای هندسی و توابع آن‌ها و سپس نحوه ساخت نمونه‌های بلوکی سه بعدی از توده‌سنگ و روش تعیین ماتریس مشخصه رفتاری توده‌سنگ و همچنین نماینده حجم معادل از طریق روش المان مجزا بیان شده است.

در فصل ششم نتایج حاصل از این مطالعه جمع‌بندی شده و پیشنهاداتی برای مطالعه‌های آتی در این زمینه ارائه شده است.

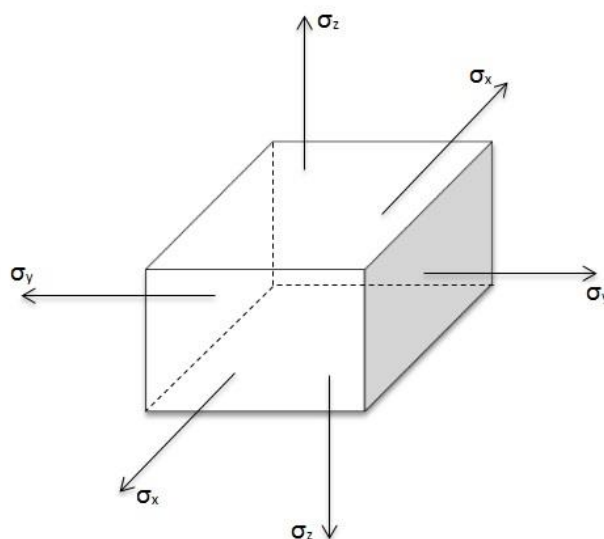
فصل دوم

روابط تنش کرنش

۲-۱- مقدمه

رفتار تنش-کرنش توده سنگ، اهمیت بسیاری در ثبات و طراحی و ساخت تونل و دیگر دهانه های زیرزمینی در سنگ دارد و از آنجایی که شناخت رفتار توده سنگ به عنوان محیطی که فعالیت های مرتبط با مهندسی سنگ بر روی آن و درون آن صورت می گیرد اجتناب ناپذیر است، لازم است تا پارامترهای مکانیکی توده سنگ که معرف رفتار آن در شرایط مختلف هستند تعیین شوند. در این میان روش های متعدد و متنوعی برای برآورد پارامترهای مکانیکی سنگ بکر و توده سنگ وجود دارند. در این فصل ابتدا روابط تنش کرنش را به اختصار بیان کرده و در ادامه به بیان ماتریس مشخصه رفتاری برای انواع مصالح ناهمسانگرد پرداخته می شود.

۲-۲- ارتباط تنش با کرنش در مواد همسانگرد



شکل ۲-۱ تنش های نرمال وارد بر بلوک [۲].

با توجه به مشاهدات و نتایج آزمایشگاهی می توان دریافت که با اعمال یک تنش σ_x در جهت محور x تغییر شکل هایی در جهت های y , z رخ خواهد داد. مشابه آن σ_y و σ_z تغییر شکل هایی در جهت کرنش برشی تولید کند [۲].

بنابراین:

$$\varepsilon_x = \frac{\sigma_x}{E} \quad \varepsilon_y = -\nu \frac{\sigma_x}{E} \quad \varepsilon_z = -\nu \frac{\sigma_x}{E} \quad (1-2)$$

که ν نسبت پواسون است.

به همین ترتیب:

$$\begin{aligned} \varepsilon_y &= \frac{\sigma_y}{E} & \varepsilon_x &= -\nu \frac{\sigma_y}{E} & \varepsilon_z &= -\nu \frac{\sigma_y}{E} \\ \varepsilon_z &= \frac{\sigma_z}{E} & \varepsilon_x &= -\nu \frac{\sigma_z}{E} & \varepsilon_y &= -\nu \frac{\sigma_z}{E} \end{aligned} \quad (2-2)$$

از ترکیب معادلات (1-2) و (2-2) سه مولفه کرنش ناشی از اعمال سه تنش عمودی به صورت زیر

بدست می آید.

$$\begin{aligned} \varepsilon_x &= \frac{1}{E} [\sigma_x - \nu (\sigma_y + \sigma_z)] \\ \varepsilon_y &= \frac{1}{E} [\sigma_y - \nu (\sigma_x + \sigma_z)] \\ \varepsilon_z &= \frac{1}{E} [\sigma_z - \nu (\sigma_x + \sigma_y)] \end{aligned} \quad (3-2)$$

اصل بر نهش استفاده شده در معادلات (3-2) فقط برای تغییر شکلها و کرنشهای متناظر

کوچک معتبر است. به همین ترتیب روابط تنش و کرنش برشی نیز به صورت زیر ارائه می شود:

$$\gamma_{xy} = \frac{\tau_{xy}}{G} \quad \gamma_{xz} = \frac{\tau_{xz}}{G} \quad \gamma_{zy} = \frac{\tau_{zy}}{G} \quad (4-2)$$

که G مدول برشی است.

به وسیله مکانیک جامدات می توان نشان داد که مدول برشی G و مدول حجمی K با روابط زیر

تعریف می شوند:

$$G = \frac{E}{2(1+\nu)} \quad K = \frac{E}{3(1-2\nu)} \quad (5-2)$$

معادله (3-2) و (4-2) را می توان به شکل ماتریس به صورت زیر نوشت:

$$\{\varepsilon\} = [D]^{-1} \{\sigma\} \quad (6-2)$$

زیرا داریم:

$$\{\sigma\} = [D] \{\varepsilon\}$$

می‌توانیم تنش را بر حسب مولفه‌های کرنش با استفاده از معادلات (۲-۳) به صورت زیر بنویسیم:

$$\sigma_x = \frac{\nu E}{(1+\nu)(1-2\nu)} \varepsilon + \frac{\nu E}{(1+\nu)} \varepsilon_x \quad (۷-۲)$$

جایی که

$$\varepsilon = \varepsilon_x + \varepsilon_y + \varepsilon_z$$

به همین ترتیب σ_y و σ_z می‌توانند بر حسب مولفه‌های کرنش نوشته شوند.

$$\tau_{xy} = G \gamma_{xy}$$

$$\tau_{yz} = G \gamma_{yz}$$

$$\tau_{zx} = G \gamma_{zx}$$

و با جایگزینی معادله (۷-۲) و (۲-۱۰):

$$\lambda = \frac{\nu E}{(1+\nu)(1-2\nu)}$$

$$\mu = \frac{E}{2(1+\nu)} \quad (۸-۲)$$

در آن صورت:

$$\begin{bmatrix} \sigma_x \\ \sigma_y \\ \sigma_z \\ \tau_{xy} \\ \tau_{yz} \\ \tau_{zx} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \lambda + 2\mu & \lambda & \lambda & 0 & 0 & 0 \\ \lambda & \lambda + 2\mu & \lambda & 0 & 0 & 0 \\ \lambda & \lambda & \lambda + 2\mu & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & D_{44} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & D_{55} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & D_{66} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \varepsilon_x \\ \varepsilon_y \\ \varepsilon_z \\ \gamma_{xy} \\ \gamma_{yz} \\ \gamma_{zx} \end{bmatrix} \quad (۹-۲)$$

در معادلات (۸-۲) و (۹-۲) λ و μ به عنوان ثابت‌های لامه شناخته می‌شوند. بنابراین:

$$D_{11} = \lambda + 2\mu \quad D_{12} = \lambda \quad D_{23} = \mu \quad (۱۰-۲)$$

بنابراین برای اجسام همسانگرد ما تنها به ۲ ثابت احتیاج داریم [۲].

تنش مسطح -۱-۲-۲

برای حالت تنش مسطح می‌توان نوشت:

$$\sigma_z = \tau_{yz} = \tau_{zx} = 0$$

بنابراین

$$\varepsilon_x = \frac{1}{E} [\sigma_x - \nu\sigma_y]$$

$$\varepsilon_y = \frac{1}{E} [\sigma_y - \nu\sigma_x] \quad (11-2)$$

$$\gamma_{xy} = \frac{\tau_{xy}}{G}$$

بنابراین ماتریس D به صورت زیر خواهد بود.

$$D = \frac{E}{1-\nu^2} \begin{bmatrix} 1 & \nu & 0 \\ \nu & 1 & 0 \\ 0 & 0 & \frac{1-\nu}{2} \end{bmatrix} \quad (11-2)$$

کرنش مسطح -۲-۲-۲

برای این حالت $\varepsilon_z = \gamma_{yz} = \gamma_{zx} = 0$ بنابراین:

$$\varepsilon_z = \frac{1}{E} [\sigma_z - \nu(\sigma_x + \sigma_y)] = 0 \quad (12-2)$$

یا

$$\sigma_z = \nu(\sigma_x + \sigma_y) \quad (13-2)$$

باید توجه کرد که $\sigma_z \neq 0$ است حتی اگر $\varepsilon_z = 0$ ، با جایگذاری σ_z از معادله (۱۳-۲) در معادله (۱۲-۲)-

(۳) روابط زیر بدست می‌آید [۲]:

$$\varepsilon_x = \frac{1}{E} [\sigma_x - \nu\sigma_y - \nu^2(\sigma_x + \sigma_y)]$$

$$\varepsilon_y = \frac{1}{E} [\sigma_y - \nu\sigma_x - \nu^2(\sigma_x + \sigma_y)] \quad (14-2)$$

$$\varepsilon_z = 0$$

بنابراین ماتریس الاستیسیته می‌تواند به صورت زیر نوشته شود:

$$D = \frac{E(1-\nu)}{(1+\nu)(1-2\nu)} \begin{bmatrix} 1 & \frac{\nu}{1-\nu} & 0 \\ \frac{\nu}{1-\nu} & 1 & 0 \\ 0 & 0 & \frac{1-2\nu}{2(1-\nu)} \end{bmatrix} \quad (15-2)$$

۲-۳- روابط تنش - کرنش مواد ناهمسانگرد

به طور کلی ثابت‌های الاستیک که مولفه‌های تنش و کرنش را به یکدیگر مرتبط می‌سازد تابع امتداد سیستم محوره‌های مختصات است. هرگاه خواص مادی جسم تابعی از محور مختصات باشد جسم را اصطلاحاً ناهمسانگرد می‌نامند. موادی مانند سنگ و چوب جزء این دسته از مواد هستند زیرا که خواص آنها در امتدادهای مختلف متفاوت است [۲۱].

با توجه به قانون عمومی هوک رابطه تنش کرنش در حالت کلی برابر است با:

$$\sigma_{ij} = C_{ijkl} \varepsilon_{kl} \quad (16-2)$$

در مولفه‌های C_{ijkl} ، چون هر یک از اندیس‌ها می‌تواند سه مقدار داشته باشد (تانسور از مرتبه ۴)، پس تعداد آنها ۸۱ عدد است. بنابراین برای تعیین رابطه بین تنش و کرنش در مواد ناهمسانگرد، نیاز به شناسایی ۸۱ مولفه است که البته ثابت خواهد شد که با استفاده از تقارن تانسورهای کرنش و تنش و تانسور C_{ijkl} ، این مولفه به ۲۱ تقلیل پیدا می‌کنند [۲۱].

با توجه به اینکه تانسور تنش متقارن است، به عبارت دیگر $\sigma_{kl} = \sigma_{lk}$ ، از این رو [۲۱]:

$$\begin{cases} \sigma_{kl} = C_{klmn} \cdot \varepsilon_{mn} \\ \sigma_{lk} = C_{lkmn} \cdot \varepsilon_{mn} \end{cases} \quad (17-2)$$

بدلیل این که دو رابطه مذکور به ازای کلیه مقادیر کرنش‌ها صادق می‌باشند، رابطه (۱۸-۲) برقرار

است [۲۱]:

$$C_{klmn} = C_{lkmn} \quad (18-2)$$

پس می‌توان نتیجه گرفت که در مولفه‌های C_{ijkl} ، زوج اول اندیس‌ها خاصیت جابجایی دارند. بدین ترتیب تعداد ۲۷ مولفه کاهش پیدا می‌کند [۲۱].

از طرف دیگر چون تانسور کرنش متقارن است به عبارت دیگر $\varepsilon_{mn} = \varepsilon_{nm}$ ، از این رو می‌توان نوشت:

$$C_{klmn} = C_{klnm} \quad (19-2)$$

به عبارت دیگر دومین زوج اندیس‌ها نیز در مولفه‌های C_{ijkl} ، خاصیت جابجایی دارند. بدین ترتیب تعداد ۱۸ مولفه دیگر کاهش می‌یابد و در نهایت تعداد مولفه‌های C_{ijkl} به ۳۶ عدد تقلیل می‌یابد. می‌توان نشان داد ماتریس C_{ijkl} با ۳۶ مولفه متقارن است، به عبارت دیگر دو زوج اندیس‌های اول و دوم خاصیت جابجایی دارند، در نتیجه تعداد مولفه‌های C_{ijkl} به ۲۱ کاهش می‌یابد [۲۱].

اکثر مواد دارای نوعی تقارن در ساختمان داخلی خود هستند و این تقارن باعث تقلیل تعداد مولفه‌های الاستیک C_{ijkl} ماده به کمتر از ۲۱ می‌شود. در قسمت بعد علاوه بر نمایش ماتریس مشخصه رفتاری برای انواع مصالح، تقارن در مصالح بررسی می‌شود تا روشن شود که با توجه به نوع تقارن تعداد مولفه‌های الاستیک تا چه تعداد تقلیل پیدا می‌کند.

۲-۳-۱- ماتریس مشخصه مصالح ناهمسانگرد

ماتریس مشخصه رفتاری برای مصالح ناهمسانگرد در فضای سه بعدی را می‌توان به فرمی پیچیده و از طریق اختصاص مفهوم فیزیکی به کلیه‌ی مولفه‌ها، صریحاً بصورت رابطه (۲-۲۰) بیان کرد [۴].

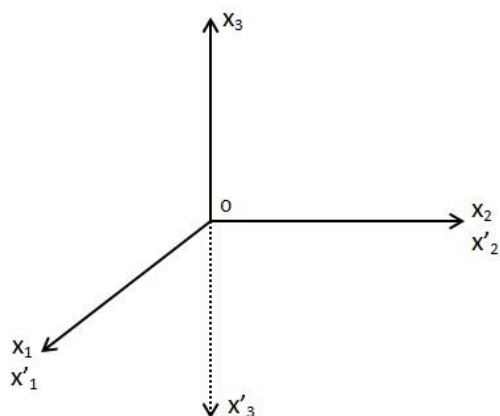
$$\begin{bmatrix} \varepsilon_x \\ \varepsilon_y \\ \varepsilon_z \\ \gamma_{yz} \\ \gamma_{xz} \\ \gamma_{xy} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{1}{E_x} & \frac{\nu_{yx}}{E_y} & \frac{\nu_{zx}}{E_z} & \frac{\eta_{x,yz}}{G_{yz}} & \frac{\eta_{x,xz}}{G_{xz}} & \frac{\eta_{x,xy}}{G_{xy}} \\ \frac{\nu_{xy}}{E_x} & \frac{1}{E_y} & \frac{\nu_{zy}}{E_z} & \frac{\eta_{y,yz}}{G_{yz}} & \frac{\eta_{y,xz}}{G_{xz}} & \frac{\eta_{y,xy}}{G_{xy}} \\ \frac{\nu_{xz}}{E_x} & \frac{\nu_{yz}}{E_y} & \frac{1}{E_z} & \frac{\eta_{z,yz}}{G_{yz}} & \frac{\eta_{z,xz}}{G_{xz}} & \frac{\eta_{z,xy}}{G_{xy}} \\ \frac{\eta_{yz,x}}{E_x} & \frac{\eta_{yz,y}}{E_y} & \frac{\eta_{yz,z}}{E_z} & \frac{1}{G_{yz}} & \frac{\mu_{yz,xz}}{G_{xz}} & \frac{\mu_{yz,xy}}{G_{xy}} \\ \frac{\eta_{xz,x}}{E_x} & \frac{\eta_{xz,y}}{E_y} & \frac{\eta_{xz,z}}{E_z} & \frac{\mu_{xz,yz}}{G_{yz}} & \frac{1}{G_{xz}} & \frac{\mu_{xz,xy}}{G_{xy}} \\ \frac{\eta_{xy,x}}{E_x} & \frac{\eta_{xy,y}}{E_y} & \frac{\eta_{xy,z}}{E_z} & \frac{\mu_{xy,yz}}{G_{yz}} & \frac{\mu_{xy,xz}}{G_{xz}} & \frac{1}{G_{xy}} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \sigma_x \\ \sigma_y \\ \sigma_z \\ \tau_{yz} \\ \tau_{xz} \\ \tau_{xy} \end{bmatrix} \quad (2-20)$$

در این رابطه E_i مدول دگرشکل پذیری در راستای i ام، ν_{ij} نسبت کرنش در جهت j به کرنش در جهت i در اثر تنش اعمالی در راستای i ، G_{ij} مدول برشی در صفحه ij ، $\eta_{ij,kl}$ ضریب چنستو^۱ (نشان دهنده‌ی برش در صفحه‌ی موازی صفحه‌ی ij که تنش مماسی در صفحه‌ی موازی kl را القا می‌کند)، $n_{k,ij}$ ضریب تاثیر متقابل نوع اول که بیانگر انبساط القاء شده در راستای k در اثر تنش برشی اعمال شده در نتیجه موازی صفحه ij و $n_{ij,k}$ ضریب تاثیر متقابل نوع دوم که بیانگر برش در صفحه‌ی موازی صفحه‌ی ij تحت تاثیر تنش نرمال اعمال شده در راستای k است [۴].

۲-۳-۲- ماتریس مشخصه مصالح مونوکلینیک

رفتار این مواد، دارای خاصیت تقارن نسبت با یک سطح با بردار یکه مشخص می‌باشد. فرض شود که رفتار ماده نسبت به یکی از سطوح محورهای مختصات مثلاً سطح Ox_1x_2 متقارن می‌باشد. این تقارن بدین معنی است که با تغییر دادن محور Ox_3 در خلاف آن، یا به عبارت دیگر تغییر محورهای $Ox_1x_2x_3$ به $Ox_1'x_2'x_3'$ مطابق شکل زیر، تغییری در ضرایب ایجاد نمی‌شود [۲۱].

¹ - Chenstov



شکل ۲-۲ تغییر محور Ox_3 به Ox'_3

کوسینوس‌های هادی محورهای جدید نسبت به قدیم عبارتند از:

$$n_{ij} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & -1 \end{bmatrix} \quad (21-2)$$

با توجه به رابطه:

$$C'_{mnpq} = n_{im} n_{jn} n_{kp} n_{lq} C_{ijkl} \quad (22-2)$$

باید داشته باشیم

$$C'_{1111} = n_{i1} n_{j1} n_{k1} n_{l1} C_{ijkl} = C_{1111}$$

که رابطه‌اش به ازای کلیه مقادیر i و j و k و l صحت دارد. چون فقط سه مؤلفه کوسینوس‌های

$$n_{33} = -1 \text{ و } n_{22} = 1 \text{ و } n_{11} = 1 \text{ یعنی داریم.}$$

از طرفی این رابطه باید برای کلیه درایه‌های غیر صفر صحیح باشد. اما برای درایه C_{1123} داریم:

$$C'_{1123} = n_{i1} n_{j1} n_{k2} n_{l3} C_{ijkl} = C_{1123}$$

که با توجه به $n_{i1} n_{j1} n_{k2} n_{l3} C_{ijkl} = n_{11} n_{11} n_{22} n_{33} C_{1123} = -C_{1123}$ صحیح نیست. بنابراین برای اینکه

ضرایب C_{ijkl} تغییر نیابد، باید بالاجبار C_{1123} مساوی صفر باشد. به همین ترتیب می‌توان ثابت کرد که

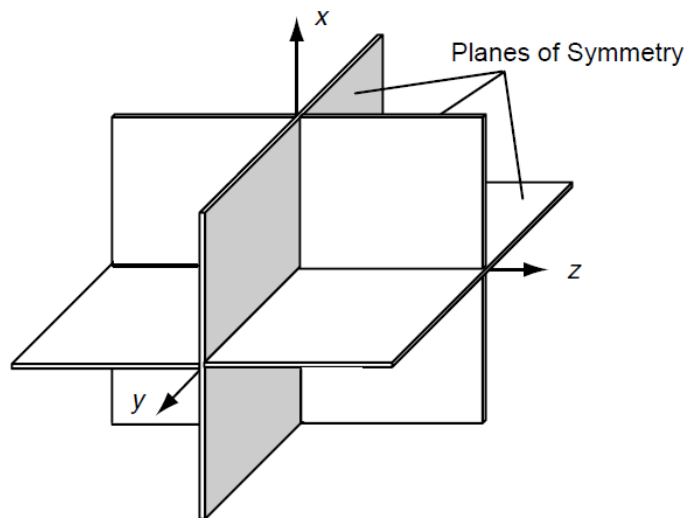
C_{1113} ، C_{2213} ، C_{2223} ، C_{3313} ، C_{1123} ، C_{3323} و C_{1223} باید مساوی صفر باشند و در نتیجه ضرایب C_{ijkl} در

این حالت به ۱۳ ضریب تقلیل می‌یابند. بنابراین ماتریس مشخصه رفتاری مصالح مونوکلینیک در زیر آورده شده است [۲۱]:

$$[S] = \begin{bmatrix} S_{1111} & S_{1122} & S_{1133} & S_{1112} & 0 & 0 \\ & S_{2222} & S_{2233} & S_{2212} & 0 & 0 \\ & & S_{3333} & S_{3312} & 0 & 0 \\ & & & S_{1212} & 0 & 0 \\ & & & & S_{1313} & S_{1323} \\ & & & & & S_{2323} \end{bmatrix} \quad (2-23)$$

۲-۳-۳- ماتریس مشخصه مصالح ارتوتروپیک

مواد ارتوتروپیک دارای دو یا سه محور تقارن عمود بر هم هستند و در حالت کلی، خواص مکانیکی ماده در طول هر کدام از این محورها با محور دیگر متفاوت است [۲۱].



شکل ۲-۳ صفحات تقارن برای مواد ارتوتروپ

در قسمت ۲-۳-۲ ثابت شد در صورتی که مصالح نسبت به Ox_1x_2 متقارن باشد، ماتریس مشخصه رفتاری دارای ۱۳ ثابت الاستیک به صورت رابطه (۲-۲۳) است. حال در صورتی که مصالح نسبت به محور Ox_2x_3 تقارن داشته باشد، می‌توان ثابت کرد ماتریس مشخصه رفتاری به صورت زیر است [۲۱]:

$$[S] = \begin{bmatrix} S_{1111} & S_{1122} & S_{1133} & 0 & 0 & S_{1123} \\ & S_{2222} & S_{2233} & 0 & 0 & S_{2223} \\ & & S_{3333} & 0 & 0 & S_{3323} \\ & & & S_{1212} & S_{1213} & 0 \\ & & & & S_{1313} & 0 \\ & & & & & S_{2323} \end{bmatrix} \quad (24-2)$$

در صورتی که مواد نسبت به محورهای Ox_1x_2 و Ox_2x_3 تقارن داشته باشد (ارتوتروپ)، S_{1123} ،

S_{2223} ، S_{3323} برابر صفر می‌شوند و در نهایت تعداد ضرایب به ۹ کاهش می‌یابد.

با توجه به قانون عمومی هوک ماتریس مشخصه رفتاری توده سنگ برای این مواد که دارای ۹

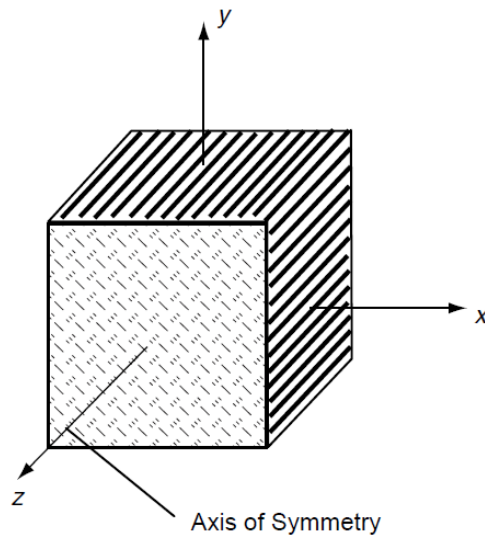
ثابت است عبارت است از [۲۱]:

$$[S] = \begin{bmatrix} \frac{1}{E_x} & -\frac{\nu_{yx}}{E_x} & -\frac{\nu_{zx}}{E_x} & 0 & 0 & 0 \\ -\frac{\nu_{yx}}{E_y} & \frac{1}{E_y} & -\frac{\nu_{zy}}{E_y} & 0 & 0 & 0 \\ -\frac{\nu_{zx}}{E_z} & -\frac{\nu_{zy}}{E_z} & \frac{1}{E_z} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & \frac{1}{G_{xy}} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & \frac{1}{G_{yz}} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \frac{1}{G_{zx}} \end{bmatrix} \quad (25-2)$$

۲-۳-۴- ماتریس مشخصه مصالح همسانگرد عرضی

این مواد دارای یک محور تقارن هستند و زمانی رخ می‌دهد که به طور مثال دو نوع سنگ به طور

منظم لایه بندی شده باشد [۲۱].



شکل ۲-۴ محور تقارن برای مصالح همسانگرد

ماتریس مشخصه رفتاری این مواد توسط پنج ثابت الاستیک مستقل مشخص می‌شود [۲۱].

$$[S] = \begin{bmatrix} \frac{1}{E_1} & -\frac{\nu_1}{E_1} & -\frac{\nu_2}{E_2} & 0 & 0 & 0 \\ -\frac{\nu_1}{E_1} & \frac{1}{E_1} & -\frac{\nu_2}{E_2} & 0 & 0 & 0 \\ -\frac{\nu_2}{E_2} & -\frac{\nu_2}{E_2} & \frac{1}{E_1} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & \frac{2.(1+\nu_1)}{E_1} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & \frac{1}{G_2} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \frac{1}{G_2} \end{bmatrix} \quad (2-29)$$

۲-۴- جمع بندی

در این فصل با توجه به اهمیت روابط تنش- کرنش این موضوع به تفصیل بررسی شد و روابط تنش-کرنش برای مصالح همسانگرد و ناهمسانگرد در حالت‌های تنش سطحی و کرنش سطحی بیان شد و در ادامه ماتریس مشخصه رفتاری توده سنگ برای انواع مصالح ناهمسانگرد ارائه گردید. در نهایت برای محاسبه ماتریس مشخصه رفتاری توده سنگ درزه دار ۳۶ درایه ماتریس باید محاسبه شود

در حالی که برای بدست آوردن ماتریس مشخصه رفتاری مصالح اورتوتروپ نیاز به ۹ ثابت و برای مصالح همسانگرد عرضی نیاز به محاسبه ۵ ثابت می‌باشد.

مطالعات انجام شده برای تعیین ماتریس

مشخصه رفتاری توده‌سنگ درزه‌دار

بدست آوردن پارامترهای مکانیکی توده سنگ از مهم‌ترین پارامترهای ورودی در همه‌ی روش‌های تحلیل رفتار توده‌سنگ دگرشکل یافته است، آزمایش‌های برجا برای تعیین مستقیم این پارامترها زمان‌بر و پرهزینه بوده و صحت نتایج آنها در پاره‌ای از موارد جای سوال دارد در نتیجه، بسیاری از محققین روش‌های غیرمستقیم را پیشنهاد داده‌اند [۱۹].

با توجه به اینکه معمولاً معتبرترین روش‌های تجربی فاقد اساس مکانیکی بوده و فراگیر نیستند. بنابراین روش‌های تحلیلی که تغییر شکل و پارامترهای مکانیکی را با روابط ریاضی و با استفاده از خصوصیات مقاومتی و دگرشکل‌پذیری سنگ بکر و شکستگی‌ها محاسبه می‌کنند توسعه یافته‌اند. روش‌های تحلیلی بسیار مفیدند زیرا زمانی که فرضیات در نظر گرفته شده برای دستیابی به جواب‌های تحلیلی به حد کافی واقعی باشند، نتایج حاصل از این روش‌ها تاثیر مهم‌ترین پارامترها یا متغیرهای تعیین کننده‌ی جواب را برجسته‌تر می‌کنند.

برای مدلسازی بر پایه واقعیت و همچنین در نظر گرفتن هندسه پیچیده و نامنظم درزه‌ها و همچنین کاهش عدم قطعیت، از روش‌های عددی برای تعیین ماتریس مشخصه رفتاری استفاده شده است. در این فصل به بررسی مطالعات صورت گرفته برای تعیین ماتریس مشخصه رفتاری توده‌سنگ پرداخته خواهد شد و روش‌های تحلیلی و عددی تعیین ماتریس مشخصه رفتاری بیان می‌شود.

۳-۲-مطالعات تحلیلی برای تعیین ماتریس مشخصه رفتاری توده‌سنگ درزه‌دار

تاکنون مطالعات گسترده‌ای برای یافتن راه حل‌های تحلیلی دستیابی به مدول الاستیک معادل [۲۲]، [۲۳]، [۲۴]، [۲۵] و [۲۲]، دگر شکل پذیری [۲۶]، رفتار مکانیکی [۲۷] و [۲۸]، و مقاومت

[۲۹] و [۳۰] و [۳۱]، و مدل‌های رفتاری [۳۲] توده‌سنگ با هندسه‌ی شکستگی‌های ساده و عمود بر هم صورت گرفته است.

در روش‌های تحلیلی تاثیر ناپیوستگی‌ها و پارامترهای ناپیوستگی در تغییرشکل پذیری توده‌سنگ در نظر گرفته می‌شود. اما به دلیل اینکه در یک توده‌سنگ درزه‌دار تعداد بسیار زیادی درزه با هندسه‌ی پیچیده وجود دارد و بدست آوردن ماتریس مشخصه رفتاری این چنین محیط‌هایی با روش‌های تحلیلی امری غیرممکن است، لذا بایستی صورت مساله را ساده کرد و فرض شود توده‌سنگ تنها از یک یا دو یا سه دسته درزه متعامد یا غیرمتعامد تشکیل شده است سپس تاثیر ناپیوستگی‌ها بر تغییر شکل پذیری توده‌سنگ بررسی شود.

در روش‌های تحلیلی با سنگ‌های درزه‌دار به عنوان یک محیط معادل پیوسته و ناهمسانگرد با یک، دو یا سه دسته درزه منظم رفتار می‌شود که تغییر شکل‌پذیری آن‌ها وابسته به خواص سنگ بکر و پارامترهای دسته درزه‌های موجود در آن‌ها از قبیل جهت‌گیری، فاصله داری درزه، سختی نرمال و سختی برشی بوده و ناپیوستگی‌ها بدون در نظر گرفتن مکان واقعی‌شان مشخص می‌شوند [۳۳]. روش-های تحلیلی برآورد پارامترهای مکانیکی علی‌رغم در نظر گرفتن ناهمسانگردی در توده سنگ، به دلیل فرضیات ساده‌سازی لازم، تنها برای شبکه‌های شکستگی با هندسه ساده کاربرد دارند [۳۳] و [۳۴] و [۳۵].

به عنوان یک محیط معادل پیوسته می‌توان بین تنش‌ها، کرنش‌ها، میزان فاصله‌داری، سختی نرمال و برشی درزه‌ها برای بدست آوردن تغییر شکل‌پذیری کلی توده‌سنگ ارتباط برقرار کرده و علت اختلاف مدول‌های دگرشکل‌پذیری سنگ‌هایی با جنس و هندسه مشابه را ناشی از پارامترهای هندسی و مکانیکی درزه‌ها دانست. همچنین برای یک توده‌سنگ با درزه‌های منظم اگر مقادیر فاصله‌داری و سختی‌های نرمال و برشی درزه‌ها به بی نهایت میل کند می‌توان رابطه‌ی ساختاری آن را با یک محیط بکر و همسانگرد معادل نمود [۳۳].

تغییر شکل پذیری یک محیط ناهمسانگرد، همگن، پیوسته با فرض رفتار الاستیک خطی، معمولاً با استفاده از قانون هوک توضیح داده می‌شود. عموماً تانسور کرنش (ϵ_{ij}) توسط رابطه ۱-۳ به تانسور تنش (σ_{kl}) ارتباط داده می‌شود.

$$\epsilon_{ij} = S_{ijkl} \sigma_{kl} \quad (1-3)$$

که در این رابطه S_{ijkl} ماتریس مشخصه رفتاری از مرتبه چهار با ۲۱ مولفه‌ی مجزا است. بیان ماتریسی رابطه بالا به صورت رابطه ۲-۳ قابل نمایش است.

$$\begin{bmatrix} \epsilon_x \\ \epsilon_y \\ \epsilon_z \\ \gamma_{yz} \\ \gamma_{xz} \\ \gamma_{xy} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} S_{11} & S_{12} & S_{13} & S_{14} & S_{15} & S_{16} \\ S_{21} & S_{22} & S_{23} & S_{24} & S_{25} & S_{26} \\ S_{31} & S_{32} & S_{33} & S_{34} & S_{35} & S_{36} \\ S_{41} & S_{42} & S_{43} & S_{44} & S_{45} & S_{46} \\ S_{51} & S_{52} & S_{53} & S_{54} & S_{55} & S_{56} \\ S_{61} & S_{62} & S_{63} & S_{64} & S_{65} & S_{66} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \sigma_x \\ \sigma_y \\ \sigma_z \\ \tau_{yz} \\ \tau_{xz} \\ \tau_{xy} \end{bmatrix} \quad (2-3)$$

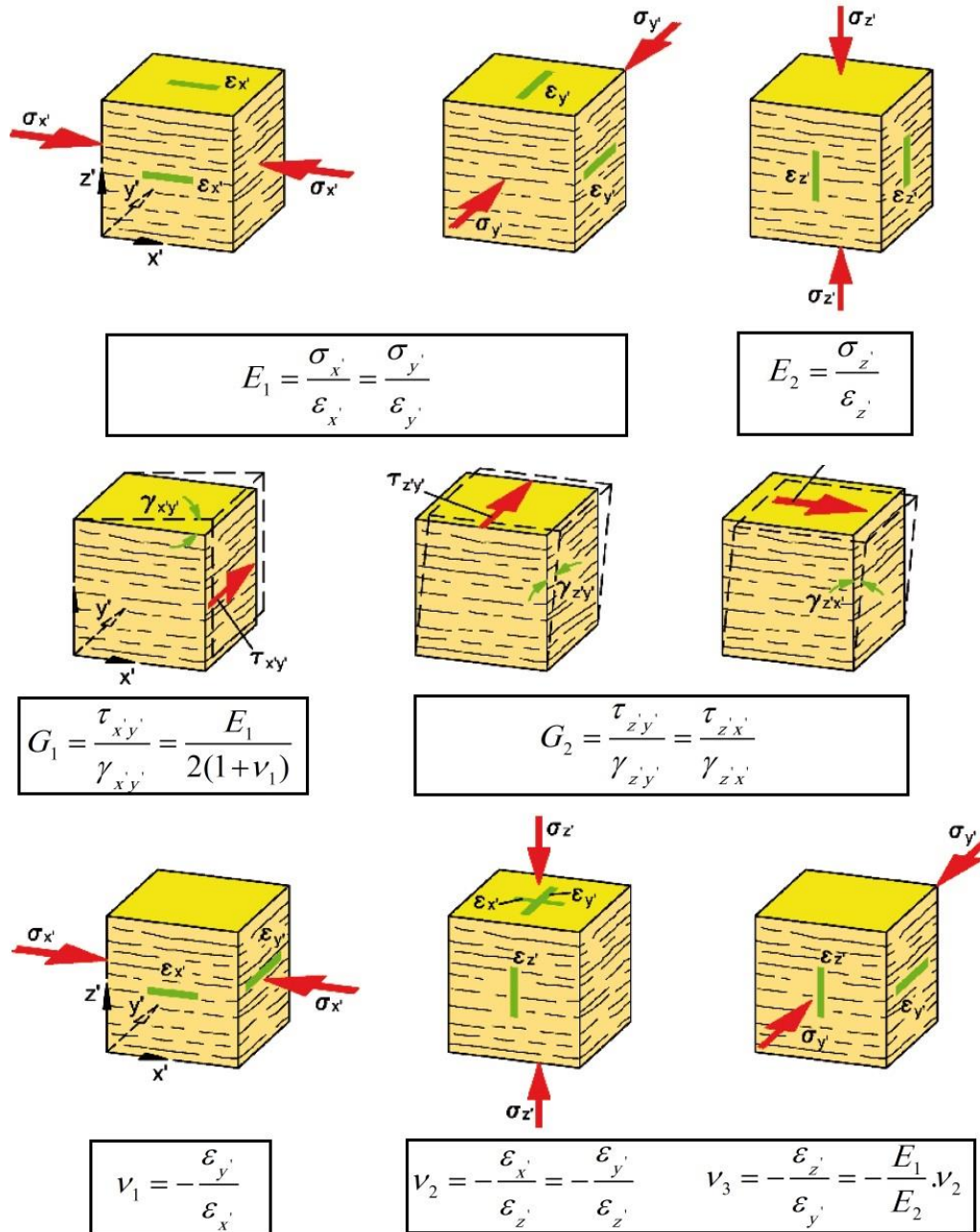
۳-۲-۲- روابط تحلیلی ویتکه

ویتکه با استفاده از روابط تحلیلی ماتریس مشخصه رفتاری توده سنگ درزه دار را برای موادی که دارای همسانگردی عرضی هستند محاسبه کرد. برای سنگ دست نخورده با ساختار دانه دو وجهی، فرض رفتار الاستیک همسانگرد معمولاً نشان دهنده یک ساده سازی قابل پذیرش نیست. از روی تجربه، سنگ دست نخورده با ساختار دانه دو وجهی مانند شیست، تخته سنگ و برخی از سنگ‌های رسی غالباً مدول یانگ عمود بر سطح ساختار^۱ بطور قابل توجهی پایین‌تر از موازی با آنها است [۳۶].

رفتار الاستیک این سنگ‌ها به طور معمول ناهمسانگرد است و می‌تواند به صورت همسانگردی عرضی باشد. چنین رفتار الاستیک توسط پنج ثابت الاستیک مستقل مشخص شده است. دو مدول یانگ E_1 و E_2 موازی و عمود بر سطح ساختار می‌باشد [۳۶]. ساختار این سنگ‌ها به موازات صفحه تغییر شکل‌پذیری همسانگرد فرض می‌شود. بنابراین صفحه ساختار یک صفحه ایزوتروپیک نامیده

¹ structure plane

می‌شود. G_2 مدول برشی توصیف تغییر شکل پذیری برای بارگذاری برشی موازی با صفحه همسانگرد است. علاوه بر این، دو نسبت پواسون ν_1 و ν_2 مورد نیاز است [۳۶].



شکل ۱-۳- تعریف ثابت الاستیک سنگ دست نخورده با ساختار دانه دو وجهی و متقاطع رفتار همسانگرد [۳۶]

در شکل ۱-۳ ثابت الاستیک در یک سنگ همسانگرد عرضی به وسیله تنش‌ها و کرنش‌های اعمال شده به یک نمونه به شکل مکعب با استفاده از یک سیستم مختصات دکارتی تعریف شده (x', y', z')

که مربوط به صفحه همسانگرد است، تعریف شده است. محور z' منطبق با جهت عمود بر سطح همسانگرد است [۳۶].

با توجه به شکل ۱-۳، علاوه بر E_1, E_2, G_2, ν_1 و ν_2 ثابت‌های الاستیک G_1 و ν_3 که وابسته به E_1 ، E_2 ، ν_1 و ν_2 هستند تعریف شده‌اند [۳۶].

در دستگاه مختصات (x', y', z') رابطه تنش-کرنش برای مصالح همسانگرد عرضی بیان می‌شود [۳۶]:

$$\{\sigma'\} = [D'] \cdot \{\varepsilon'\} \quad (3-3)$$

$$[D'] = \begin{bmatrix} E_1 \cdot \frac{1-n\nu_2^2}{(1+\nu_1)m} & E_1 \cdot \frac{1+n\nu_2^2}{(1+\nu_1)m} & E_1 \cdot \frac{\nu_2}{m} & 0 & 0 & 0 \\ E_1 \cdot \frac{1+n\nu_2^2}{(1+\nu_1)m} & E_1 \cdot \frac{1-n\nu_2^2}{(1+\nu_1)m} & E_1 \cdot \frac{\nu_2}{m} & 0 & 0 & 0 \\ E_1 \cdot \frac{\nu_2}{m} & E_1 \cdot \frac{\nu_2}{m} & E_1 \cdot \frac{1-\nu_1}{m} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & \frac{E_1}{2(1+\nu_1)} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & G_2 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & G_2 \end{bmatrix} \quad (4-3)$$

که در آن

$$\begin{aligned} n &= E_1 / E_2 \\ m &= 1 - \nu_1 - 2n\nu_2^2 \end{aligned} \quad (5-3)$$

با استفاده از معکوس رابطه (۳-۳) می‌توان ماتریس مشخصه رفتاری را محاسبه کرد:

$$\{\varepsilon'\} = [D']^{-1} \cdot \{\sigma'\} \quad (6-3)$$

$$[D']^{-1} = \begin{bmatrix} \frac{1}{E_1} & -\frac{\nu_1}{E_1} & -\frac{\nu_2}{E_2} & 0 & 0 & 0 \\ -\frac{\nu_1}{E_1} & \frac{1}{E_1} & -\frac{\nu_2}{E_2} & 0 & 0 & 0 \\ -\frac{\nu_2}{E_2} & -\frac{\nu_2}{E_2} & \frac{1}{E_1} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & \frac{2 \cdot (1 + \nu_1)}{E_1} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & \frac{1}{G_2} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \frac{1}{G_2} \end{bmatrix} \quad (7-3)$$

که رابطه (7-3) به عنوان ماتریس مشخصه رفتاری توده سنگ درزه دار نشان داده می شود [36].

۳-۲-۳ روابط تحلیلی گودمن

گودمن با استفاده از روابط تحلیلی ماتریس مشخصه رفتاری را برای مواد ارتوتروپ و همچنین همسانگرد عرضی بدست آورد.

اگر سنگ دارای ۳ دسته درزه عمود بر هم باشد یا به نوعی این مواد ارتوتروپیک باشند، در صورتی که x, y, z به موازات جهت تقارن ارتوتروپ انتخاب شود، با توجه به قانون عمومی هوک ماتریس مشخصه رفتاری توده سنگ برای این مواد عبارت است از [37]:

$$\begin{Bmatrix} \varepsilon_x \\ \varepsilon_y \\ \varepsilon_z \\ \gamma_{xy} \\ \gamma_{yz} \\ \gamma_{zx} \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{1}{E_x} & -\frac{\nu_{yx}}{E_x} & -\frac{\nu_{zx}}{E_x} & 0 & 0 & 0 \\ -\frac{\nu_{yx}}{E_y} & \frac{1}{E_y} & -\frac{\nu_{zy}}{E_y} & 0 & 0 & 0 \\ -\frac{\nu_{zx}}{E_z} & -\frac{\nu_{zy}}{E_z} & \frac{1}{E_z} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & \frac{1}{G_{xy}} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & \frac{1}{G_{yz}} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \frac{1}{G_{zx}} \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \sigma_x \\ \sigma_y \\ \sigma_z \\ \tau_{xy} \\ \tau_{yz} \\ \tau_{zx} \end{Bmatrix} \quad (8-3)$$

اگر سنگ در یک صفحه همسانگرد باشد (همسانگرد عرضی)، نه ثابت مستقل، به پنج ثابت کاهش می‌یابد. این زمانی رخ می‌دهد که توده سنگ به طور منظم لایه بندی شده باشد. همچنین در مورد زمانی که مواد معدنی مسطح مانند میکا، تالک، کلریت، گرافیت و یا سرپانتین به صورت موازی روی هم قرار گرفته باشند.

برای تعیین ماتریس مشخصه رفتاری توده سنگ درزه دار برای مواد همسانگرد عرضی، s و t هر دو جهت عمود بر صفحه محور تقارن (به عنوان مثال، در صفحه لایه مرز^۱) و n موازی جهت محور تقارن (به عنوان مثال، در جهت عمود بر لایه مرز) است [۳۷]. پس:

$$E_s = E_t$$

$$V_{st} = V_{ts} \quad (۹-۳)$$

بدین ترتیب ماتریس مشخصه رفتاری برای مواد دارای همسانگردی عرضی عبارت است از:

$$\begin{Bmatrix} \varepsilon_n \\ \varepsilon_s \\ \varepsilon_t \\ \gamma_{ns} \\ \gamma_{nt} \\ \gamma_{st} \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{1}{E_n} & -\frac{\nu_{sn}}{E_s} & -\frac{\nu_{sn}}{E_s} & 0 & 0 & 0 \\ -\frac{\nu_{sn}}{E_s} & \frac{1}{E_s} & -\frac{\nu_{st}}{E_y} & 0 & 0 & 0 \\ -\frac{\nu_{sn}}{E_s} & -\frac{\nu_{st}}{E_s} & \frac{1}{E_s} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & \frac{1}{G_{ns}} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & \frac{1}{G_{ns}} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \frac{2(1+\nu_{st})}{E_s} \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \sigma_n \\ \sigma_s \\ \sigma_t \\ \tau_{ns} \\ \tau_{nt} \\ \tau_{st} \end{Bmatrix} \quad (۱۰-۳)$$

¹ bedding plane

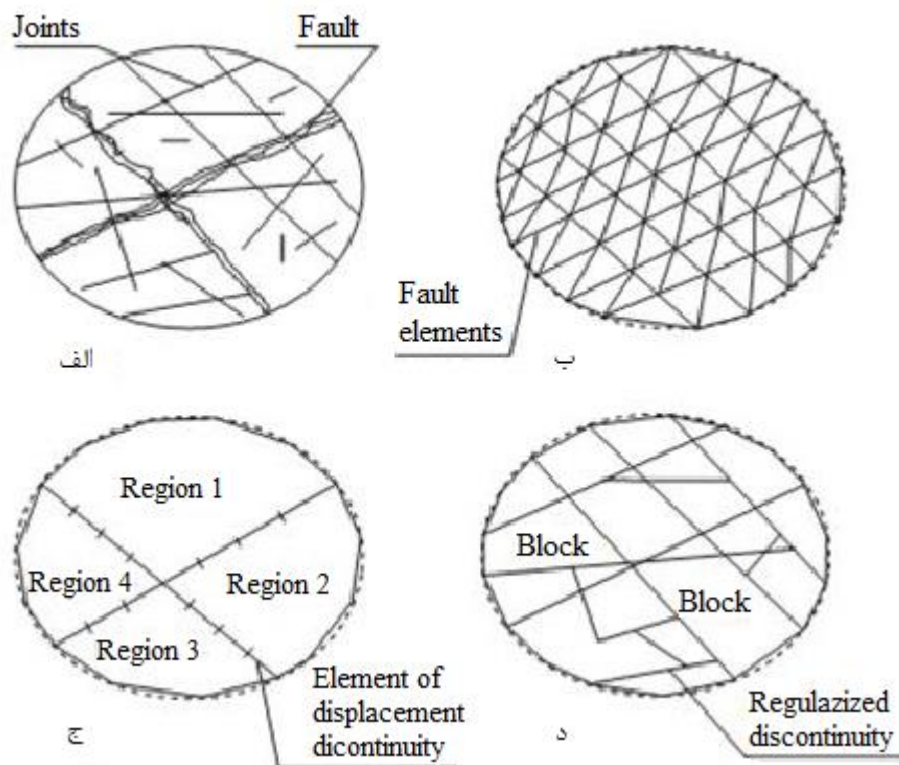
۳-۳- مطالعات عددی برای تعیین ماتریس مشخصه رفتاری توده‌سنگ درزه‌دار

۳-۳-۱- مقدمه

میزان عدم قطعیت که یک موضوع معمول در کلیه روش‌های تعیین پارامترهای مکانیکی توده‌سنگ است و به واسطه‌ی رفتار طبیعی و غیرقابل پیش‌بینی توده‌سنگ ایجاد می‌شود، به طور قابل ملاحظه- ای متاثر از شبکه‌ی پیچیده‌ی درزه‌هاست. بنابراین ارائه‌ی یک روش مناسب مطابق با شرایط و تجهیزات موجود با کم‌ترین میزان عدم واقعیت برحسب نتایج حاصله از وظایف اصلی مهندسی سنگ است [۶]. امروزه با بهبود روز افزون کارایی روش‌های حل و رشد سریع ظرفیت انجام محاسبات، روش‌های مدل‌سازی عددی توجه بیشتری را در زمینه‌ی تعیین پارامترهای مکانیکی توده‌سنگ درزه- دار و یا ایجاد روش‌های اصولی برای تعمیم به مقیاس بزرگ مجذوب خود می‌کنند. هدف اصلی در استفاده از روش عددی در توده‌سنگ درزه‌دار، مدل‌سازی بر پایه‌ی واقعیت، هندسه‌ی پیچیده و نامنظم درزه‌ها، برهم کنش بین ذره‌ها و بلوک‌ها و اختصاص مدل‌های رفتاری پیچیده برای سنگ بکر و درزه- هاست که از مزایای قطعی این روش نسبت به سایر روش‌های تجربی و تحلیلی در استخراج پارامترهای مکانیکی معادل توده‌سنگ است [۴]. به طور کلی روش‌های عددی را می‌توان در دو دسته- ی روش‌های پیوسته و ناپیوسته تقسیم بندی نمود. روش‌های حل پیوسته شامل روش‌های تفاضل محدود، المان محدود و المان مرزی و روش ناپیوسته شامل روش‌های مدل ذرات متصل^۱، تحلیل تغییر شکل ناپیوسته^۲ و المان مجزا و شبکه شکستگی‌های مجزا است. شکل ۲-۴ بیانگر تاثیر استفاده از هر یک از روش‌های عددی در مدل‌سازی توده‌سنگ درزه‌دار است.

¹ - Bounded Partide Model

² - Discontinuous Deformation Analysis



شکل ۳-۲ نمایش توده سنگ درزه دار به صورت: الف) توده سنگ شکسته واقعی ب) مدل ساخته شده با المان محدود ج) مدل ساخته شده با المان مرزی د) مدل ساخته شده با المان مجزا [۱۸]

هر دو روش محیط پیوسته‌ی معادل و روش محیط مجزا برای شبیه‌سازی عددی رفتار مکانیکی توده‌سنگ‌ها بارها به کار رفته‌اند. در روش محیط پیوسته‌ی معادل فرض بر این است که تا زمانی که روابط بنیادی و پارامترهای وابسته‌اش، به درستی بر اساس قوانین پایه‌ای مکانیک محیط‌های پیوسته برقرار باشد، رفتار ماکروسکوپیک سنگ‌های درزه دار با اصول موجود در مکانیک محیط‌های پیوسته قابل بیان است. این روش یک روش مدل‌سازی معمول است که در زمینه‌های مکانیکی سنگ، هیدروژئولوژی و خصوصاً در مسائل بزرگ مقیاس استفاده شده است [۴].

در سال ۲۰۱۵ [۳۸] از روش المان محدود برای تعیین مقاومت و دگرشکل پذیری توده‌سنگ درزه دار بصورت دوبعدی با مدل‌سازی رفتار کرنش نرم شونده برای توده‌سنگ استفاده شده و این روش در مقابل روش‌های حل نظری اعتبارسنجی شده است. همچنین از این روش برای بررسی فرآیند شکست پیش‌رونده، تاثیر مقیاس و خواص ناهمسانگردی مقاومت فشاری تک محوری و مدول یانگ استفاده شد و نتایج حاصل از روش عددی نشان داد که برای توده‌سنگ مورد بررسی ابعاد المان حجم

نماینده برای مدول دگرشکل پذیری با ضریب تغییرات ۱۰٪ برابر ۱۲ متر بدست خواهد آمد. همچنین منحنی تنش-کرنش برای توده سنگ‌های با ابعاد بزرگ‌تر از نماینده حجم معادل شبیه یکدیگر خواهد بود و بین مقاومت فشاری تک محوری و مدول دگرشکل پذیری رابطه خطی برقرار است.

روش تفاضلات محدود FDM نیز از روش‌های عددی پیوسته است که برای مطالعه موضوعاتی از جمله مطالعه تاثیر درزه‌ها بر رفتار مقاومتی و تغییر شکل سنگ‌ها [۳۹]. بررسی تاثیر مقیاس بر مقاومت توده‌سنگ [۴۰] و تعیین پارامترهای مکانیکی معادل توده‌سنگ [۴۱] از آن بهره گرفته شده است.

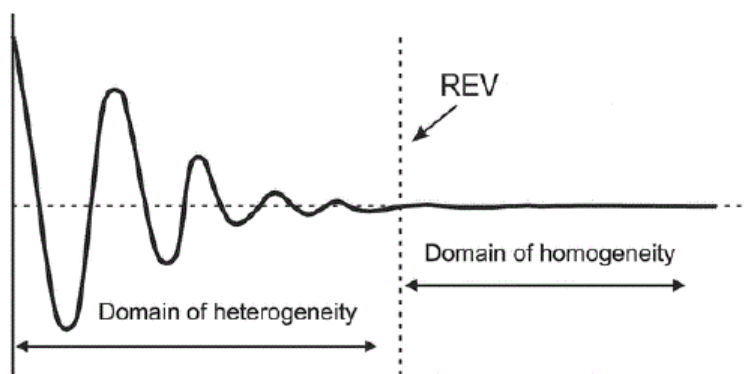
۳-۲-۳- مطالعات کی بوک مین

کی بوک مین برای توجیه شدن روش محیط معادل پیوسته برای توده‌های سنگی دو شرط زیر را در نظر گرفت [۴]:

- اولاً یک حجم نماینده مشخص برای یک مساله معین موجود باشد که بتوان پایه و اساس آماري معادلي بين نمونه‌ی توده سنگ و مدل عددی تخمین زد و پس از آن روش‌های میانگین‌گیری را برای استخراج پارامترهای مکانیکی به کار برد.
- ثانیاً پارامترهای معادل استخراج شده بایستی به منظور استفاده برای معادلات رفتاری تحلیل پیوسته به فرم تانسوری بیان شود.

در این مطالعه المان حجم نماینده به عنوان کوچکترین حجمی تعریف می‌شود که پس از آن

با تغییر ابعاد، پارامترها و خصوصیات ثابت بماند (مطابق شکل ۳-۳) [۴].



شکل ۳-۳ مفهوم حجم معرف اولیه [۴]

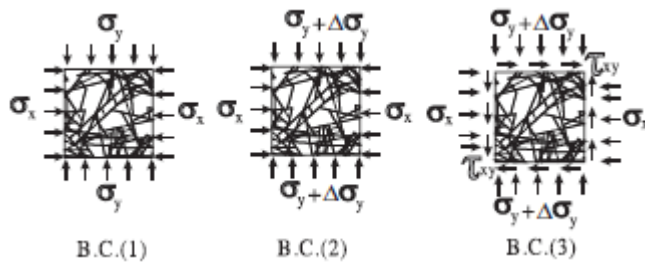
این امر منعکس کننده وابستگی پارامترهای توده سنگ به مقیاس است که نتیجه‌ی تعدد ناپیوستگی‌هاست. در مجموع با وجود REV، اگر پارامترهای الاستیک استخراج شده برای توده سنگ با یک تانسور انعطاف پذیری بیان شود، روش‌های عددی بر پایه اصول محیط‌های پیوسته می‌تواند به صورت ریاضی توجیه شود [۴].

زمانی که سیستم‌های درزه‌دار از لحاظ راستاهای شیب و امتداد نیز مورد توجه قرار گیرند، تانسور نماینده بایستی مشمول تاثیرات ناهمسانگردی نیز باشد و این با استفاده از روش‌های تجربی بدست نمی‌آید و با استفاده از روش‌های تحلیلی نیز فقط برای موارد محدودی با هندسه‌ی منظم درزه‌ها بدست می‌آید [۴].

کی بوک مین برای مدل سازی توده سنگ درزه دار از نرم افزار UDEC استفاده کرد. در نرم افزار UDEC درزه‌هایی که در محاسبه پارامترها و رفتار مدل‌ها تاثیری ندارند و به درزه‌های غیر ممتد^۱ معروفند، حذف می‌شوند.

برای بدست آوردن ماتریس مشخصه رفتاری توده سنگ درزه دار در حالت کرنش مسطح، کی بوک مین ۱۰ مدل شبکه شکستگی مجزا در نظر گرفت. همچنین برای بدست آوردن درایه‌های ماتریس در نظر گرفتن شرایط مرزی دارای اهمیت بالایی است. شکل ۳-۴ سه شرط مرزی مستقل برای بدست آوردن درایه‌های مجهول ماتریس مشخصه رفتاری را نشان می‌دهد.

¹ Non-persistent



شکل ۳-۴ سه شرط مرزی مستقل برای تعیین درایه‌های مجهول ماتریس مشخصه رفتاری [۴]

با توجه به کرنش سطحی ماتریس مشخصه رفتاری توده سنگ عبارت است از:

$$\begin{Bmatrix} \varepsilon_x \\ \varepsilon_y \\ \varepsilon_z \\ \gamma_{xy} \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} S_{11} & S_{12} & S_{13} & S_{16} \\ S_{21} & S_{22} & S_{23} & S_{26} \\ S_{31} & S_{32} & S_{33} & S_{36} \\ S_{61} & S_{62} & S_{63} & S_{66} \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \sigma_x \\ \sigma_y \\ \sigma_z \\ \tau_{xy} \end{Bmatrix} \quad (۱۱-۳)$$

$$\begin{pmatrix} \frac{1}{E_x} & -\frac{\nu_{yx}}{E_y} & \frac{\nu_{zx}}{E_z} & \frac{\eta_{x,yz}}{G_{yz}^+} & \frac{\eta_{x,xz}}{G_{xz}^+} & \frac{\eta_{x,xy}}{G_{xy}^+} \\ -\frac{\nu_{xy}}{E_x} & \frac{1}{E_y} & \frac{\nu_{zy}}{E_z} & \frac{\eta_{y,yz}}{G_{yz}^+} & \frac{\eta_{y,xz}}{G_{xz}^+} & \frac{\eta_{y,xy}}{G_{xy}^+} \\ \frac{\nu_{xz}}{E_x} & \frac{\nu_{yz}}{E_y} & \frac{1}{E_z} & \frac{\eta_{z,yz}}{G_{yz}^+} & \frac{\eta_{z,xz}}{G_{xz}^+} & \frac{\eta_{z,xy}}{G_{xy}^+} \\ \frac{\eta_{yz,x}}{E_x} & \frac{\eta_{yz,y}}{E_y} & \frac{\eta_{yz,z}}{E_z} & 1 & \mu_{yz,xz} & \mu_{yz,xy} \\ \frac{\eta_{xz,x}}{E_x} & \frac{\eta_{xz,y}}{E_y} & \frac{\eta_{xz,z}}{E_z} & \mu_{xz,yz} & 1 & \mu_{xz,xy} \\ \frac{\eta_{xy,x}}{E_x} & \frac{\eta_{xy,y}}{E_y} & \frac{\eta_{xy,z}}{E_z} & \mu_{xy,yz} & \mu_{xy,xz} & 1 \end{pmatrix}$$

با توجه به دو بعدی بودن مساله و استفاده از برنامه UDEC 2D قابل محاسبه نیستند

قابل محاسبه با توجه به تقارن و $E_z = E_{inact}, \nu_{zx} = \nu_{zy} = \nu_{inact}$

صفر- با توجه به شکستگی های موازی در امتداد محور z

شکل ۳-۵ تعیین ماتریس مشخصه رفتاری توده سنگ در دو بعد [۴]

در نهایت با اعمال شرایط مرزی بر مدل در نرم افزار UDEC کرنش‌ها بدست می‌آیند و با استفاده

از نرم افزار متلب کلیه مجهولات ماتریس مشخصه رفتاری محاسبه می‌شوند [۴].

۳-۳-۳ مطالعات لقایی

خانم مهناز لقایی در پایان نامه کارشناسی ارشد خود در سال ۱۳۹۳ تحت عنوان مدل سازی عددی تعیین دگرشکل پذیری و مقاومت توده سنگ درزه دار به صورت سه بعدی، ماتریس مشخصه رفتاری توده سنگ درزه دار را بر اساس نتایج برداشت دو بعدی صحرایی درزه‌های سایت سلافیلد انگلستان تعیین کرد. روش تعیین ماتریس مشخصه رفتاری توده‌سنگ درزه‌دار در این مطالعه بر اساس روش پیشنهادی آقای کی بوک مین است [۴۲].

ماتریس محاسبه شده در این مطالعه در زیر آورده شده است [۴۲]:

$$\begin{bmatrix} 2.198 & 0.132 & -0.318 & 2.19 & 2.9 & 2.18 \\ -0.764 & 2.941 & -0.00113 & -1.38 & -1.63 & -3.71 \\ -0.558 & -0.185 & 2.494 & -1.05 & -0.351 & -0.117 \\ 0.311 & -0.00000875 & 0.437 & 12.3 & 4.54 & 7.41 \\ 0.855 & -0.00177 & 0.62 & 0.649 & 13 & 7.46 \\ -0.489 & -0.000281 & -0.0519 & -0.11 & -1.51 & 7.87 \end{bmatrix} \times E - 11(1/Pa)$$

۳-۳-۴ مطالعات جیان پینگ یانگ

برای بدست آوردن ماتریس مشخصه رفتاری توده‌سنگ درزه‌دار، جیان پینگ در سال ۲۰۱۳، ماتریس را همسانگرد فرض کرده است و همچنین در حالت کرنش مسطح محاسبات را انجام داده است [۱۵].

در این مطالعه ماتریس مشخصه رفتاری توده سنگ درزه‌دار با استفاده از روش عددی المان محدود بدست آمده است.

با توجه به کرنش سطحی ماتریس مشخصه رفتاری توده سنگ عبارت است از:

$$\begin{Bmatrix} \varepsilon_x \\ \varepsilon_y \\ \varepsilon_z \\ \varepsilon_{xy} \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} S_{11} & S_{12} & S_{13} & S_{16} \\ S_{21} & S_{22} & S_{23} & S_{26} \\ S_{31} & S_{32} & S_{33} & S_{36} \\ S_{61} & S_{62} & S_{63} & S_{66} \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \sigma_x \\ \sigma_y \\ \sigma_z \\ \sigma_{xy} \end{Bmatrix} \quad (۱۲-۳)$$

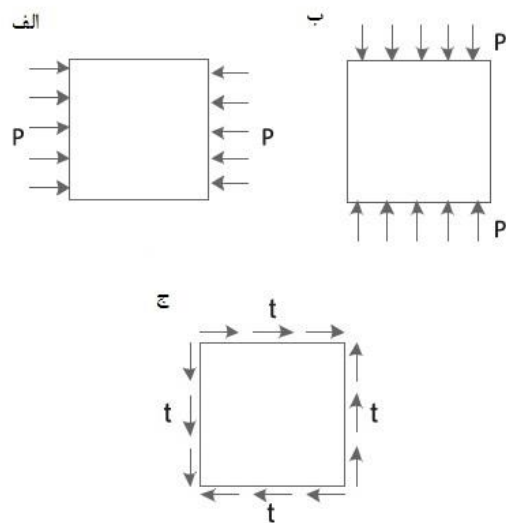
با توجه به مطالعات عددی انجام شده و با توجه به شرایط تقارن، $S_{13}=S_{31}=S_{23}=S_{32}=-\nu/E$ ، از آنجایی که تنش برشی σ_{xy} بر تغییر شکل در راستای Z تاثیری ندارد، می‌توان σ_{63} و σ_{36} را صفر در نظر گرفت. بنابراین، در نظر گرفتن سه شرط مرزی مستقل برای تعیین تمام اجزای ماتریس نشان داده شده در معادله کافی است [۱۵].

سه مجموعه بارگذاری در شکل ۳-۶ برای تعیین نه مجهول $S_{11}, S_{22}, S_{12}, S_{21}, S_{26}, S_{61}, S_{62}, S_{66}$ معادله ۳-۱۳ استفاده شده است. از لحاظ تئوری، با توجه به شرایط تقارن، $S_{16}=2S_{61}$ ، $S_{12}=S_{21}$ و $S_{26}=2S_{62}$ ، لازم است اشاره شود با توجه به استفاده ε_{xy} به جای γ_{xy} در معادله (۳-۱۲)، یک ثابت ۲ بین S_{16} ، S_{61} و S_{26} ، S_{62} وجود دارد. تعیین S_{26} و S_{16} نیاز به محاسبه کرنش نرمال به طور متوسط در جهت X و Y تحت تنش برشی خالص (بارگذاری (ج) در شکل ۳-۶)، که بسیار دقیق و آسان‌تر نسبت به محاسبه کرنش برشی به طور متوسط تحت تنش نرمال است (بارگذاری (الف) و (ب) در شکل ۳-۶). بنابراین، هفت جزء $S_{11}, S_{22}, S_{12}, S_{21}, S_{16}, S_{26}, S_{66}$ با آزمایش عددی تعیین می‌شود و S_{61} ، S_{62} از S_{26} ، S_{16} نتیجه گرفته می‌شود [۱۵].

$$\begin{aligned}\varepsilon_{xx} &= A_{11}\sigma_{xx} + A_{12}\sigma_{yy} + A_{16}\tau_{xy} \\ \varepsilon_{yy} &= A_{21}\sigma_{xx} + A_{22}\sigma_{yy} + A_{26}\tau_{xy} \\ \varepsilon_{xy} &= A_{61}\sigma_{xx} + A_{62}\sigma_{yy} + A_{66}\tau_{xy}\end{aligned}\tag{۳-۱۳}$$

که در آن

$$A_{ij} = S_{ij} - \frac{S_{i3}S_{j3}}{S_{33}} \quad (i, j = 1, 2)\tag{۳-۱۴}$$



شکل ۳-۶ نمایی از ۴ بارگذاری (الف) بارگذاری در راستای x . (ب) بارگذاری در راستای y . (ج) برش خالص [۱۵].
 از طریق اعمال بارگذاری (الف) در شکل ۳-۶، S_{11} و S_{21} می تواند با جایگزین تنش و کرنش در رابطه به دست آمده ۳-۱۳ محاسبه شود.

۳-۴- جمع بندی

برای تعیین ماتریس مشخصه رفتاری توده سنگ درزه دار، با توجه به اهمیت موضوع، مطالعات گسترده‌ای صورت گرفته است. این مطالعات به صورت تحلیلی و عددی انجام شده است که با توجه به پیچیدگی و ناهمگن بودن توده سنگ درزه دار مطالعات تحلیلی با اعمال فرض‌های ساده سازی برای توده سنگ‌هایی که همسانگردی عرضی یا ارتوتروپ هستند امکان پذیر بوده، در حالی که در مطالعات عددی ماتریس مشخصه رفتاری توده سنگ ناهمسانگرد در حالتی که کرنش مسطح باشد محاسبه شده است. در مطالعات عددی ماتریس مشخصه رفتاری توده سنگ درزه دار با استفاده از روش‌های المان مجزا و المان محدود محاسبه شده است.

فصل چهارم

تعیین خواص مکانیکی و توصیف هندسی

توده سنگ معدن زغال سنگ طزره

توده‌های سنگی، متشکل از قطعات سنگ بکری هستند که توسط ناپیوستگی‌هایی از هم جدا شده‌اند. رفتار توده‌های سنگی، متأثر از ناپیوستگی‌های موجود در آنها است. از این رو بررسی و برداشت ناپیوستگی‌های سنگ به همراه توصیف دیگر ساخت‌های موجود از جمله مقاومت سنگ بکر، تخلخل و شرایط ساختاری، پیش نیاز مطالعات مربوط به سنگ‌های درزه‌دار در بررسی‌های مهندسی است. در مطالعه درزه‌ها نیز بررسی جنبه‌های مختلفی مانند زبری سطح درزه، مقاومت برشی، نفوذپذیری و هوازدگی سطح آن‌ها ضروری است.

مدل‌سازی ناپیوستگی‌ها در مسائل مختلف زیست محیطی، مهندسی و معدنی از جمله مدل‌سازی با هدف تحلیل مدول دگرشکل‌پذیری و به طور کلی تعیین ماتریس مشخصه رفتاری توده‌سنگ درزه‌دار 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، به بررسی زمین‌شناسی محدوده معدن زغال‌سنگ طزره پرداخته خواهد شد. سپس فرآیند برداشت خواص هندسی درزه‌های مجزا با هدف شبیه‌سازی ارائه می‌شود. همچنین مطالعات آزمایشگاهی برای تعیین خواص مکانیکی ماده‌سنگ منطقه مورد مطالعه توضیح داده می‌شود.

۴-۲- 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 [۴۳].

شرایط محیطی که زغال سنگ در آن تشکیل شده معمولاً مناطقی را در بر می‌گیرد که یا نزدیک به سطح دریا بوده یا آن که 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 زیادی و بالاخره تشکیل پیت وجود داشته است. شواهد نشان می‌دهد که زغال سنگ‌ها اغلب در یک محیط یا منطقه باتلاقی یا مردابی، بالاخص مشرف به سواحل شکل و فرم گرفته اند. زغال سنگ 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 [۴۳].

استخراج زغال سنگ 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 [۴۳].

۳-۴- زمین شناسی عمومی منطقه

دنباله سلسله جبال البرز در منطقه شاهرود- دامغان سازند شمشک با گسترش حدوداً ۴۰ کیلومتری و تناوبی از لایه‌های زغالی، ماسه سنگی، سیلت استون 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 [۴۳]. این سازند به علت گستردگی به چند منطقه کوچکتر تقسیم گردیده که از شرق به غرب عبارتند از:

- منطقه دهملا

- منطقه ممدویه

- منطقه طزره که شامل سه معدن بزرگ به نام‌های رزمجا، پشکلات و کلاریز است.



شکل ۴-۱ موقعیت جغرافیایی معادن زغالسنگ طزره [۴۳].

۴-۳-۱- منطقه طزره

منطقه پشکلات در قسمت مرکزی معدن طزره قرار دارد که یال جنوبی سینکلینال میاناب را می-سازد. طزره بخشی از دامنه جنوبی البرز را تشکیل می دهد که در فاصله ۸۰ کیلومتری غرب شاهرود و ۴۰ کیلومتری شمال دامغان قرار گرفته است و از لحاظ تقسیمات اداری جزء استان سمنان به حساب می آید.

سازند شمشک در منطقه طزره بخشی از یال جنوبی یک ناودیس بزرگ به نام ژئوسینکلینال میاناب که امتداد شرقی- غربی داشته و بین ۹۰۰ الی ۳۰۰۰ متر ضخامت، ۸۲ لایه زغالی دارد. منشاء آن اتوکتونی برجا بوده و در حوزه زغالی یا رالیک قرار دارد. ضخامت لایه‌ها بین ۵۰ تا ۱۵۰ سانتی متر و شیب لایه‌ها از شرق به غرب از ۲۵ تا ۶۰ درجه متغییر است. گسترده‌ترین لایه‌های زغالی این منطقه، لایه‌های $P10$ ، $K19$ ، $K23$ بوده است و لایه $P10$ حدود ۵۰ درصد ذخایر این منطقه را در بر می‌گیرد. 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 [۴۳].

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 [۴۳].

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 [۴۳].

۱-۱-۳-۴ 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.

۲-۱-۳-۴ 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 قسمت هایی از آن تا چندی پیش در حال اکتشاف تکمیلی بود. تونلهایی با افق های مختلف با ذخیره ای بالغ بر ۵۰۰ هزار تن طراحی و آماده سازی 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 [۴۳].

۳-۱-۳-۴ 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 ذغال از شرق به غرب زیاد می شود 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 می رسد [۴۳].

۳-۳-۴-۲ چینه شناسی

منطقه پشکلات از مناطق زغال خیز تریاس-ژوراسیک طزره است و امتداد لایه های آن شرقی-غربی بوده از غرب به منطقه کلاریز و از شرق به منطقه رزمجا محدود می شود. از نظر چینه شناسی این منطقه خصوصیات کلی رسوبات طزره را حفظ کرده و تنها تغییر آن در ضخامت لایه ها است. نمایی از چین های 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 بخش های اکراسر، طزره ، شیرین دشت و دانسريت تقسیم می گردد [۴۳].



شکل ۲-۴-۲ نمایی از چین خوردگی های منطقه [۴۳].

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 [۴۳].

به‌طور کلی تشکیلات منطقه پشکلات رسوبات ساحلی (پارالیک) هستند که بیشتر از ماسه‌سنگ-های 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 ذغالی 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 کرده باشد [۴۳].

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 هم‌شیب 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 شده‌اند [۴۳].

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 FI 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 [۴۳].

۴-۴- برداشت ناپیوستگی‌ها

شبکه ناپیوستگی‌ها یکی از مهمترین پارامترهای تعیین کننده رفتار مکانیکی توده سنگ می‌باشند. برداشت ناپیوستگی‌ها و درزه‌داری 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 ابتدا با استفاده از روش برداشت خط برداشت (*Scanline*)، ناپیوستگی‌های توده سنگ مورد مطالعه در معدن طزره برداشت شده و خصوصیات هندسی ناپیوستگی‌ها نظیر طول خط اثر، جهت داری (شیب و جهت شیب)، دانسیته، دهانه بازشدگی، تداوم، زبری، موجداری سطح و مواد پرکننده و ... تعیین و مورد بررسی قرار گرفت.

برداشت‌های انجام شده در غالب دو زون A و B هستند که تصاویر هوایی آنها در شکل ۴-۳ نشان می‌دهد که 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.



(ب)



(الف)

شکل ۳-۴ محدوده برداشت نمونه‌های بلوکی؛ (الف) زون A و (ب) زون B.

درزه‌های برداشت شده در تعداد ۵ خط برداشت که جهت هر یک در جدول ۱-۴ آمده است، با مقدار تداومی در بازه ۰/۵۵ تا ۳ متر و با شیب‌ها و امتدادهای متفاوت برداشت شدند. داده‌های شیب و جهت‌داری توسط نرم افزار *Dips* مورد پردازش قرار گرفت که نتایج آن در بخش بعدی ارائه می‌گردد. در این مطالعه از داده‌های زون A برای تعیین ماتریس مشخصه رفتاری توده‌سنگ درزه‌دار استفاده شده است.

جدول ۱-۴ جهت‌یابی خطوط برداشت

زون B		زون A		
خط برداشت ۵	خط برداشت ۴	خط برداشت ۳	خط برداشت ۲	خط برداشت ۱
<i>N115E</i>	<i>N125E</i>	<i>N80E</i>	<i>N80E</i>	<i>N5E</i>

مجموعاً تعداد ۲۸۰ درزه از خط برداشت‌های زون A برداشت شده است. تعداد درزه‌های زون B نیز ۱۱۲ درزه می‌باشد. جدول ۲-۴ نمونه‌ای از برداشت درزه از زون A می‌باشد.

جدول ۲-۴ نمونه‌ای از جدول برداشت درزه‌ها

ردیف	نصف طول خط اثر بالا (cm)	شیب (درجه)	جهت شیب (درجه)	بازشدگی (mm)	زبری	وضعیت هوازدگی
۱	۲۴۰	۸۱	۲۴۳	۳	۱,۵	۰,۷۵
۲	۸۵	۷۷	۲۴۰	۳	۱,۵	۰,۷۵

۴-۵- زمین شناسی مهندسی منطقه

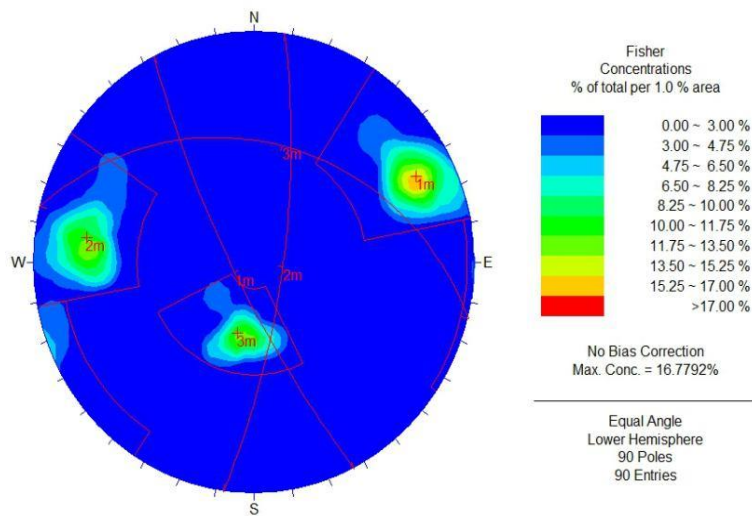
رفتار مکانیکی سنگ‌ها به شدت تحت تاثیر خصوصیات سیستم ناپیوستگی‌ها و تعداد دسته درزه‌ها است. از سوی دیگر رفتار مکانیکی توده سنگ تاثیر زیادی بر شرایط پایداری حاکم بر محیط دارد. بنابراین تحلیل دقیق وضعیت و خصوصیات سیستم درزه و شکستگی‌ها از مهم‌ترین مسائل در تحلیل پایداری شیب‌های سنگی می‌باشد. در این بخش با استفاده از اطلاعات حاصل از برداشت ناپیوستگی‌ها در محدوده، مقادیر غالب شیب و امتداد و همچنین ثابت آماري توزیع شیب درزه‌های برداشت شده به کمک نرم افزار *Dips* تعیین می‌شود.

توده سنگ این محدوده به نسبت درزه‌دار بوده و مطالعات میدانی نشان از وجود سه دسته ناپیوستگی مجزا در ساختار توده سنگ دارد. نتایج بررسی خواص ناپیوستگی‌ها شامل شیب، جهت شیب، پایایی، دهانه بازشدگی، تداوم، زبری، موجداری سطح و مواد پرکننده در جدول ۳-۴ گردآوری شده است.

جدول ۳-۴ مقادیر میانگین ویژگی‌های مهندسی ناپیوستگی‌های مورد مطالعه.

شیب (درجه)	جهت شیب (درجه)	پایایی (m)	ثابت فیشر	ضریب زبری	بازشدگی (mm)
۷۹/۱۱	۲۴۲/۹۴	۱,۵ - ۰,۶	۵۳/۳۱	۲/۰۱۷	۲/۵۸۷
۳۴/۵۴	۱۶/۵۴	۲ - ۰,۵۵	۱۹۴	۲/۱۵۶	۴/۰۹
۷۴/۸۱	۹۹/۹۹	۱,۵ - ۰,۷	۳۸/۴۷	۲/۰۶۸	۲/۳۴

در گام بعد سیستم درزه‌ها در منطقه مورد مطالعه مورد تحلیل قرار می‌گیرد. 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 نرم-افزار برای هر یک از آنها به ترتیب معادل ۵۳/۳۱، ۱۹۴ و ۳۸/۴۷ به دست آمد. شکل ۴-۴ تصویر استریوگرافی ناپیوستگی‌های برداشت شده را به صورت نگاره‌های قطبی نشان می‌دهد.



شکل ۴-۴ تصاویر استریوگراف حاصل از داده‌های خط برداشت در زون A.

با توجه به اینکه نرم افزار Dips درزه‌های هر دسته درزه را به صورت جداگانه دسته‌بندی می‌کند، به راحتی می‌توان انحراف معیار هر کدام از خصوصیات دسته‌درزه‌ها را مشخص کرد. جدول ۴-۴ انحراف معیار شیب، جهت شیب و فاصله داری درزه‌های هر کدام از دسته درزه‌های زون A را نشان می‌دهد.

جدول ۴-۴ انحراف معیار شیب، جهت شیب و فاصله داری درزه‌ها در زون A

فاصله داری		جهت شیب		شیب	
انحراف معیار	فاصله داری	انحراف معیار	جهت شیب	انحراف معیار	شیب میانگین
۸۳۳/۲	۳۲۵/۱	۹۳/۲۵	۹۴/۲۴۲	۴۶/۳	۱۱/۷۹
۲۳۱/۱	۰۱۸/۳	۵۴/۱۶	۱۳/۱۴	۹۳/۶	۵۴/۳۴
۸۴۷/۲	۶۶۶/۱	۰۵/۱۲	۹۹/۹۹	۵,۶۲	۸۱/۷۴

۴-۶- مطالعات آزمایشگاهی

شناخت خصوصیات مهندسی سنگ بکر در پروژه‌های مهندسی از اهمیت چشمگیری برخوردار است. در مطالعه حاضر برای دسترسی به خصوصیات مقاومتی و تغییرشکل سنگ بکر و به‌کارگیری آن‌ها در تحلیل رفتار توده‌سنگ از آزمون آزمایشگاهی مقاومت فشاری تک محوره بهره‌گیری شده است.

آزمایش مقاومت فشاری تک محوری یا نامحصور مرسوم‌ترین آزمون آزمایشگاهی برای مطالعات مکانیکی سنگ بکر می‌باشد که با وجود سادگی در ظاهر مسأله، انجام دقیق آن بسیار مشکل است. این آزمایش به عنوان آزمایش پایه در اکثر پروژه‌های مهندسی انجام گرفته و به ندرت اتفاق می‌افتد که در پروژه‌های مقاومت فشاری تک محوری مورد نیاز نباشد. اگرچه این آزمایش به عنوان 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، تعیین مدول تغییرشکل‌پذیری، تعیین مشخصات عملیات آتشکاری و ... یافته است [۴۴].

اگرچه ممکن است مقاومت سنگ به ترکیب کانی‌شناسی بستگی داشته باشد، اما عواملی چون ابعاد دانه‌ها، چگالی، شکل دانه‌ها، نحوه توزیع ریز ترک‌ها و ناهمسانگردی مهم‌ترین تاثیر را روی مقاومت دارند [۴۴].

مقاومت سنگ بکر همچنین به عنوان یک پارامتر اصلی در اکثر سیستم‌های طبقه‌بندی توده‌سنگ مورد توجه قرار گرفته است. مقاومت ماده سنگ حد بالای مقاومت توده‌سنگ می‌باشد [۴۴]. به عبارت دیگر، مقاومت توده‌سنگ به دلیل وجود صفحات ضعف در ساختار آن از سنگ بکری از همان جنس همواره کمتر است.

عوامل موثر بر مقاومت فشاری تک محوری سنگ‌ها را می‌توان به دو گروه عمده عوامل داخلی و خارجی تقسیم نمود. عوامل داخلی، عواملی هستند که به خصوصیات ذاتی سنگ بستگی دارند. عواملی مثل ترکیب کانی‌شناسی، چگالی، تخلخل، ابعاد و شکل دانه‌ها، شاخص پوکی و ناهمسانگردی از این قبیل عوامل می‌باشند. عوامل خارجی بستگی به روش آزمایش، دستگاه آزمایش، شرایط محیطی و شخص آزمایش‌کننده دارد. عواملی چون ابعاد نمونه، شکل هندسی نمونه، نسبت ارتفاع به

قطر، اصطکاک بین صفحات بارگذاری دستگاه و نمونه، سرعت بارگذاری و... از این عوامل می-باشند [۴۴].

۴-۶-۱-۱ مراحل انجام آزمایش مقاومت فشاری تک محوری

برای انجام آزمایش مقاومت فشاری تک محوره، نمونه‌های مورد نیاز به وسیله مغزه‌گیری از بلوک-هایی از رخنمون‌های سطحی در منطقه به دست آمده اند. شکل ۴-۵ نمونه‌های برداشت شده در نزدیکی تونل مادر (زون A) را نشان می‌دهد.



شکل ۴-۵ نمونه‌های برداشت شده

پس از انتقال بلوک‌های سنگی به آزمایشگاه، مغزه‌های مورد نیاز برای آزمایش بر اساس استاندارد *ISRM* آماده‌سازی شدند. مغزه‌گیری آزمایشگاهی از بلوک‌های زون A در شکل‌های ۴-۶ و ۴-۷ نشان داده شده است.



شکل ۴-۶ فرآیند گرفتن مغزه از بلوک‌های سنگی.



شکل ۴-۷ مغزه‌های گرفته شده از زون A.

از میان مغزه‌ها تعداد ۴ نمونه برای انجام آزمایش فشاری تک محوره انتخاب شد. تصویر نمونه‌های آماده‌سازی شده در شکل ۴-۸ ارائه شده است. نمونه‌های تحت آزمایش شامل A1، A2، B2 و B4 هستند.



شکل ۴-۸ مغزه‌های آماده‌سازی شده بر اساس استاندارد ISRM.

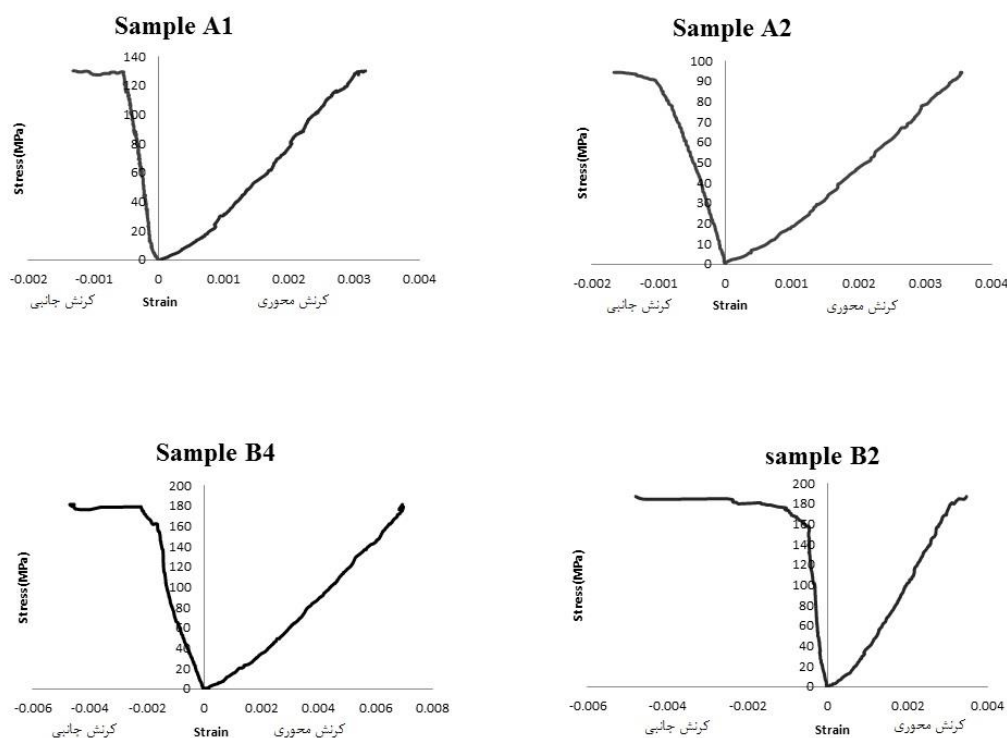
۴-۶-۱-۲ نتایج آزمایش مقاومت فشاری

از نمونه‌های آزمایشی قبل و بعد از آزمایش تصویر برداری شده است. در شکل ۴-۹ دو مورد از مغزه‌ها (A1 و A2) قبل و بعد از آزمایش فشاری تک محوری نشان داده شده است.



شکل ۴-۹ تصویر نمونه‌ها قبل و بعد از آزمایش تک محوره (الف) A1 و (ب) A2.

شکل ۴-۱۰ 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. همچنین شکل ۴-۱۰ نمودارهای تنش در برابر کرنش جانبی یا پیچیدگی‌های ساختار ماسه سنگ باشد. همچنین شکل ۴-۱۰ 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 ۴-۱۰ و ۴-۱۱ 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 ۴-۱۰ نمودار تنش - کرنش محوری و جانبی نمونه‌های مختلف.

جدول ۴-۵ 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.

جدول ۴-۵ نتایج آزمایش فشاری تک محوره.

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

۴-۶-۲- آزمایش چگالی و تخلخل

چگالی سنگ تابع منافذ، درزها، شکافها و سایر فضاهای باز موجود در سنگ می‌باشد. چگالی یک نمونه مشخص سنگ، با افزایش عمق بیشتر می‌شود. چرا که با افزایش عمق و در نتیجه فشار سنگ-های فوقانی، درزها و ترک‌های موجود در سنگ به تدریج بسته می‌شوند. هوازدگی سنگ‌ها بخاطر افزایش درزه و ترک در سنگ، تجزیه شیمیایی و تورم برخی از کانی‌ها باعث کاهش چگالی می‌شود. به

دلیل اینکه چگالی دانه‌ای اکثر کانی‌ها نزدیک به هم می‌باشد، تخلخل عامل اصلی اختلاف در سنگ‌ها است [۴۴].

آگاهی از چگالی سنگ‌ها نقش مهمی در طراحی مهندسی پروژه‌های عمرانی و معدنی ایفا می‌کند. مقادیر چگالی و تخلخل در ارزیابی ذخایر معدنی، انتخاب نوع وسایل حفاری، طراحی سیستم حمل و نقل، محاسبه میزان مواد منفجره مصرفی و همچنین برای تعیین تنش قائم ناشی از وزن سنگ‌های روباره در اعماق مختلف توده سنگ به کار می‌رود [۴۴].

تخلخل سنگ، بستگی به شکل و توزیع ابعاد دانه‌ها، استحکام دانه‌ها، سمت و سوی دانه‌ها، درجه تراکم و سیمان شدگی دانه‌ها دارد [۴۴].

برای انجام این آزمایش ابتدا نمونه‌ها شسته می‌شوند، سپس نمونه‌ها در داخل آب و در خلاء کمتر از ۸۰۰ پاسکال به طوری که حباب‌های هوای آن خارج شود اشباع می‌شود. شکل ۴-۱۲ نمایی از اشباع نمونه‌ها را نشان می‌دهد.



شکل ۴-۱۱ نمایی از مرحله اشباع نمونه

وزن نمونه اشباع شده اندازه‌گیری می‌شود و نمونه در گرم‌خانه خشک می‌شود و سپس وزن نمونه خشک نیز اندازه‌گیری می‌شود. در نهایت نتایج آزمایش فوق در جدول ۴-۶ نشان داده شده است.

جدول ۴-۶ نتایج اندازه گیری چگالی و تخلخل نمونه‌هایی از زون‌های A و B

نمونه	چگالی (gr/cm^3)	تخلخل (%)
نمونه A	۲/۴۸۹	۰/۹۸
نمونه B	۲/۸۷۸	۰/۶۷

۴-۷- 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.

۴-۷-۱- شاخص کیفیت سنگ (RQD)

دیر 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 ۴-۷ تقسیم‌بندی کیفی سنگ‌ها را براساس RQD نشان می‌دهد.

جدول ۴-۷ طبقه‌بندی سنگ‌ها با استفاده از شاخص کیفیت سنگ.

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

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

$$RQD = 115 - 3 / 3 J_v \quad (1-4)$$

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 [۴۵].

$$J_v = \frac{1}{S_1} + \frac{1}{S_2} + \dots + \frac{1}{S_n} \quad (2-4)$$

که در آن S_i فاصله داری دسته درزه i ام توده‌سنگ است. با در نظر گرفتن سه دسته درزه برای توده‌سنگ با خواص مذکور در جدول ۳-۴، 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.

۲-۷-۴- رده‌بندی ژئومکانیکی یا RMR

این رده‌بندی در سال ۱۹۷۳ توسط بنیائوسکی 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 ۴-۸ تا ۴-۱۰ ارائه شده است.

جدول ۴-۸ پارامترهای رده‌بندی ژئومکانیکی توده‌سنگ [۴۶].

Parameter		Range of values							
1	Strength of intact rock	Point-load strength index (MPa)	> 10	4-10	2-4	1-2	For this low range, unconfined compressive test is preferred		
		Unconfined compressive strength (MPa)	> 250	100-250	50-100	25-50	5-25	1-5	<1
	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 or	<10 or	10-25 or	25-125 or	>125 or		
		Ratio of joint water pressure to major principal stress	0 or	<0.1 or	0.1-0.2 or	0.2-0.5 or	>0.5 or		
		General conditions	Completely dry	Damp	Wet	Dripping	Flowing		
	Rating	15	10	7	4	0			

جدول ۴-۹ مقادیر تعدیل ارزش عددی برای جهت‌یابی درزه‌ها [۴۶].

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 ۴-۱۰ کلاس‌های مختلف توده‌سنگ و پارامترهای طراحی و خواص مهندسی متناظر [۴۶].

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 طرزه برابر با ۵۳ به دست آمد که در رده سوم یا متوسط این طبقه‌بندی 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 ، توده‌سنگ بایستی کاملاً خشک فرض شده و از امتیاز تعدیل جهت‌یابی درزه‌ها صرف نظر گردد [۴۶]. رابطه پیشنهادی برای تخمین GSI به صورت زیر تعریف می‌شود.

$$GSI = RMR - 5 \quad (3-4)$$

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

۳-۷-۴- رده‌بندی Q

این سیستم رده‌بندی توسط بارتن و همکاران در سال ۱۹۷۴ در انستیتو ژئوتکنیک نروژ ارائه گردید. به همین دلیل در بعضی منابع به‌عنوان رده‌بندی NGI نامیده شده است. این رده‌بندی براساس مطالعه بیش از ۲۰ تونل در منطقه اسکاندیناوی ارائه شده و یکی از رده‌بندی‌های کمی بوده که بیشتر برای مقاصد طراحی نگهداری مورد استفاده قرار می‌گیرد. این رده‌بندی 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.

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

در این رابطه RQD شاخص کیفی توده‌سنگ، 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 [۴۷] مراجعه کنند. پارامترهای فوق و همچنین مقدار Q برای ماسه‌سنگ معدن طزره در جدول ۱۱-۴ آمده است.

جدول ۱۱-۴ امتیاز ماسه‌سنگ طزره در رده‌بندی Q .

شاخص کیفیت سنگ (RQD)	۵۴/۵
J_n	۶
J_r	۳
J_a	۱/۵
J_w	۱
SRF	۱
Q	۱۲/۱۱

۴-۸- تخمین تجربی مدول دگرشکل‌پذیری

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

۴-۸-۱- تخمین مدول دگرشکل‌پذیری با استفاده از Q

بارتن و همکاران در سال ۱۹۸۰ روابط زیر را برای تخمین مدول تغییرشکل‌پذیری توده‌سنگ با استفاده از رده‌بندی پیشنهاد کردند. این روابط سه مقدار حدی بالا، متوسط و پایین برای مدول

$$E_m = 10 \log Q \quad (GPa) \quad (۴-۵) \text{ حد بالا}$$

$$E_m = 25 \log Q \quad (GPa) \quad (4-6) \text{ حد متوسط}$$

$$E_m = 4 \cdot \log Q \quad (GPa) \quad (4-7) \text{ حد پایین}$$

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:

$$E_m = 10 \left(Q \frac{\sigma_c}{100} \right)^{1/3} \quad (GPa) \quad (4-8)$$

که در این رابطه σ_c مقاومت فشاری تک محوره توده 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 گردآوری شده است.

جدول ۴-۱۲ 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

۴-۱-۲- تخمین مدول دگرشکل پذیری با استفاده از RMR و GSI

بنيواسکی در سال ۱۹۷۸ تعداد هفت پروژه را مطالعه کرده و رابطه همبستگی زیر را برای پیش-

بینی مدول تغییرشکل توده سنگ با استفاده از امتیاز RMR پیشنهاد نمود:

$$E_m = 2RMR - 100 \quad (GPa) \quad (4-9)$$

با استفاده از این رابطه مقدار مدول تغییرشکل ماسه‌سنگ طرزه 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.

$$E_m = 10^{(RMR-10)/40} \quad (GPa) \quad (10-4)$$

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 [۴۷].

گوکچه اوغلو و همکاران در سال ۲۰۰۳ با استفاده از یک پایگاه اطلاعاتی شامل ۱۱۵ داده به‌دست آمده از آزمایش‌های بارگذاری صفحه‌ای و دیلاتومتري همبستگی‌های زیر را براساس تجزیه و تحلیل رگرسیونی پیشنهاد نمودند:

$$E_m = 0.0736 e^{-0.755 RMR} \quad (GPa) \quad (11-4)$$

$$E_m = 0.1451 e^{-0.654 GSI} \quad (GPa) \quad (12-4)$$

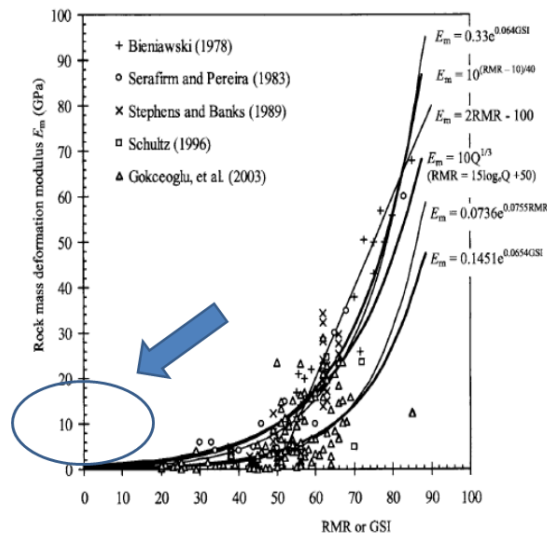
مدول دگرشکل‌پذیری ماسه‌سنگ با استفاده از همبستگی با RMR برابر با $4/0.24$ و با استفاده از همبستگی GSI معادل $3/349 \text{ GPa}$ به‌دست آمده است.

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

$$E_m = 0.33 e^{-0.64 GSI} \quad (GPa) \quad (13-4)$$

مقدار مدول تغییرشکل‌پذیری توده‌سنگ مورد مطالعه با استفاده از این رابطه برابر با $7/122 \text{ GPa}$ برآورد می‌گردد. شکل ۴-۱۳ 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 به دست آمده اند.



شکل ۴-۱۲ همبستگی بین مدول تغییرشکل و امتیازهای RMR یا GSI .

همبستگی‌های تجربی دیگری نیز بین نسبت مدول تغییرشکل توده سنگ 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.

$$\frac{E_m}{E_r} = \frac{1}{100} \left(0.28 RMR^2 + 9 e^{RMR/22.82} \right) \quad (14-4)$$

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.

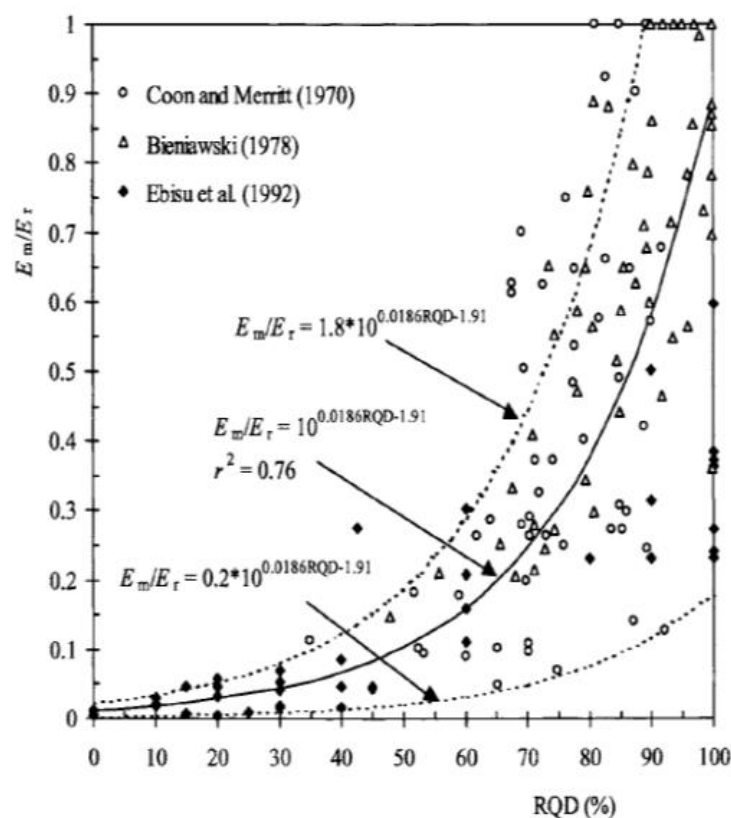
$$\frac{E_m}{E_r} = \frac{1 - \cos(\pi \times RMR / 100)}{2} \quad (15-4)$$

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.

۳-۸-۴ 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 ۴-۱۴ نمودار نسبت مدولی در برابر RQD و روابط ارائه شده توسط آن‌ها را نشان می‌دهد [۴۶].

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



شکل ۴-۱۳ نمودار نسبت مدولی در برابر RQD [۴۶].

جدول ۴-۱۳ نتایج حاصل از روش‌های تجربی به کار گرفته شده را در تخمین مدول تغییرشکل توده‌سنگ 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 ۴-۱۳ مقایسه مقادیر تخمینی مدول تغییر شکل 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)

۴-۹- 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. نتایج حاصل از رده بندی ماسه سنگ
 معدن طزره نشان می‌دهد که این توده سنگ در رده متوسط قرار می‌گیرد. پس از رده بندی توده سنگ،
 از روش‌های تجربی مبتنی بر روش‌های رده بندی برای تخمین مدول تغییر شکل پذیری استفاده شد.
 مقایسه نتایج به دست آمده با استفاده از روابط پیشنهادی محققین مختلف نشان از تفاوت در نتایج

تخمین تجربی مدول تغییرشکل پذیری 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 پنجم

مدل سازی سه بعدی و تعیین ماتریس

مشخصه رفتاری توده سنگ درزه دار

با توجه به مطالب گفته شده در فصل سوم، مزایای روش المان مجزا در مدل‌سازی توده‌سنگ درزه‌دار نسبت به سایر روش‌های موجود و همچنین اهمیت بررسی رفتار توده‌سنگ در سه بعد باعث شد این روش به عنوان روش مدل‌سازی مد نظر قرار گیرد. برای این کار نیاز است تا از ابزاری مناسب و توانمند بهره گرفته شود. در این فصل به معرفی ابزار مورد استفاده، نحوه‌ی مدل‌سازی در سه بعد با استفاده از پارامترهای هندسی پرداخته خواهد شد. در نهایت روش مدل‌سازی المان مجزا و شرایط مرزی تعیین شده برای برآورد ماتریس مشخصه رفتاری توده‌سنگ درزه‌دار به صورت سه بعدی آورده شده است و برخی از مولفه‌های حاصل با نتایج روابط تجربی مقایسه شد.

۵-۲- معرفی ابزار مورد استفاده در مدل‌سازی سه بعدی

با توجه به هدف مورد بررسی که مدل‌سازی عددی توده‌سنگ درزه‌دار به روش سه بعدی است، نرم‌افزار 3DEC [۷] به عنوان ابزار مورد استفاده انتخاب گردیده است. 3DEC یک نرم‌افزار المان گسسته بوده و در دسته‌ی روش‌های تحلیل محیط‌های ناپیوسته قرار دارد. بنیان این نرم‌افزار را فرمول بندی عددی آزمایش شده و به کار رفته در نرم‌افزار دو بعدی UDEC تشکیل می‌دهد. در این نرم‌افزار واکنش محیط ناپیوسته مانند یک توده‌سنگ درزه‌دار در معرض بارگذاری استاتیک یا دینامیک شبیه‌سازی می‌شود. به طوری که محیط ناپیوسته به صورت مجموعه‌ای از بلوک‌های مجزا نمایش داده می‌شود. ناپیوستگی‌ها به عنوان شرایط مرزی بین بلوک‌ها در نظر گرفته شده و جابجایی‌های بزرگ در امتداد آن‌ها و همین‌طور چرخش بلوک‌ها مجاز است. رفتار هر بلوک می‌تواند به صورت ماده‌ای صلب یا تغییر شکل‌پذیر باشد. بلوک‌های دگرشکل‌پذیر 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. نرم‌افزار تابع روابط خطی و یا غیرخطی نیرو-جابجایی برای حرکت در هر دو راستای عمودی و برشی است. نرم‌افزار 3DEC دارای چندین معادل رفتاری برای بلوک‌های سنگ بکر و ناپیوستگی‌ها بوده که شبیه‌سازی پاسخ معرف ناپیوستگی‌های زمین شناسی با موادی مشابه آن را ممکن می‌سازد [۷].

ویژگی‌های اختصاصی این نرم‌افزار به صورت خلاصه عبارتند از:

- توده‌سنگ به صورت مجموعه‌ای سه بعدی از بلوک‌های صلب و دگرشکل‌پذیر مدل‌سازی می‌شود.
- ناپیوستگی به عنوان مرز مجزای بر هم کنش بین این بلوک‌ها در نظر گرفته شده و رفتار درزه برای این بر هم کنش‌ها از پیش تعریف می‌شود.
- الگوهای درزه‌ای پیوسته و ناپیوسته بر مبنای روش‌های آماری قابل تولید است به طوری- که یک ساختار درزه را می‌توان مستقیماً با استفاده از برداشته‌های زمین شناسی ایجاد کرد.
- این نرم‌افزار یک الگوریتم حل زمانی صریح را به خدمت می‌گیرد که هم جابجایی‌های بزرگ و هم چرخش را تطبیق داده و محاسبات در حوزه زمان^۱ را ممکن می‌سازد.
- امکان تولید شبکه شکستگی‌های مجزا بصورت سه بعدی که از قابلیت‌هایی است که به نسخه جدید این نرم‌افزار اضافه شده است.
- برنامه‌نویسی به زبان FISH این امکان را فراهم می‌سازد تا انواع توابع و عملگرهایی که در نرم‌افزار از پیش تعریف نشده‌اند، بنا بر نیاز بصورت اختصاصی تعریف گردند. FISH قابلیت منحصر به فردی در سازماندهی تحلیل‌ها برای اهداف خاص فراهم می‌کند.

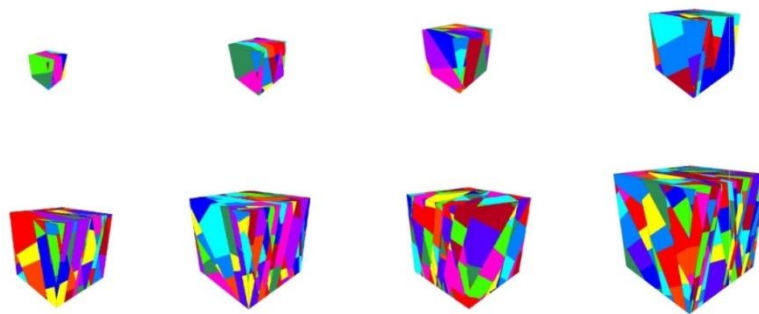
¹ time domain calculations

۵-۳- فرآیند مدل سازی سه بعدی به روش المان مجزا

برای شناخت بهتر توده سنگ درزه دار و درک رفتار آن پس از قرارگیری در معرض انواع تنش با مقادیر و جهات مختلف لازم است تا ماتریس مشخصه رفتاری توده سنگ درزه دار به صورت سه بعدی تعیین گردد. برای این منظور با توجه به آنچه گفته شد از روش المان مجزا استفاده می-شود. بدین ترتیب نمونه های مکعبی نمایش دهنده توده سنگ سه بعدی تولید شده، و با اختصاص پارامترهای مکانیکی مرتبط با سنگ بکر و درزه ها و اندازه گیری مقادیر تنش و جایجایی در نقاط مختلف در مدل، المان حجم نماینده^۱ و ماتریس مشخصه رفتاری توده سنگ درزه دار برای حالت سه بعدی تعیین می گردد.

۵-۳-۱- ساخت مدل بلوکی براساس شبکه شکستگی

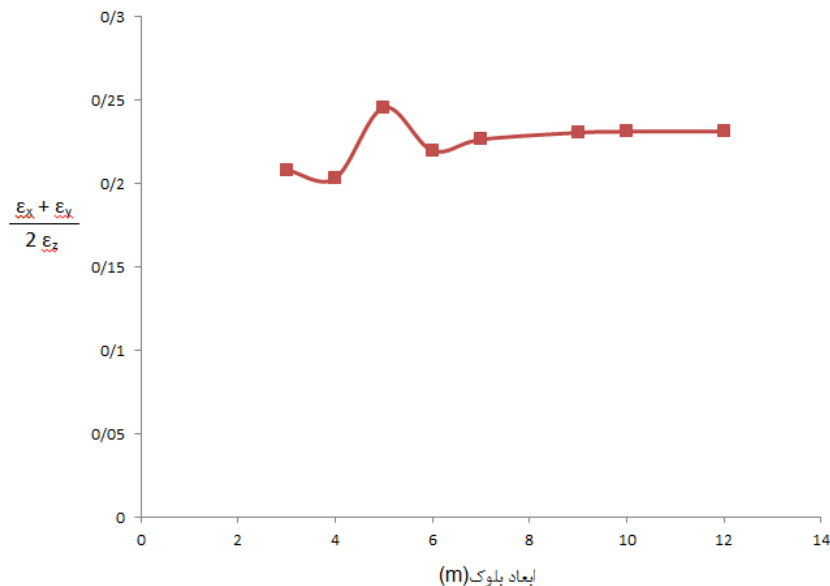
برای تعیین ماتریس مشخصه رفتاری توده سنگ درزه دار، با توجه به مدلسازی سه بعدی، مدل بلوکی تولید شده و پارامترهای مکانیکی در نظر گرفته می شود. سپس شرایط مرزی اعمال می-گردد. اما بهتر است اندازه بلوک ساخته شده بر اساس معیاری باشد. بر همین اساس برای مشخص شدن اندازه بلوک، هشت مدل بلوکی با اندازه های ۳، ۴، ۵، ۶، ۷، ۹، ۱۰ و ۱۲ متری ساخته شد که در شکل ۵-۱ آورده شده است. در نهایت المان حجم نماینده با توجه به نسبت پواسون در راستاهای مختلف بدست می آید [۴].



شکل ۵-۱ مدل های بلوکی با اندازه های متفاوت

¹ Representative Elementry Volome

برای بدست آوردن المان حجم نماینده میزان تنش ۱ مگاپاسکال به صورت تک محوره به بلوک-هایی با ابعاد ۳، ۴، ۵، ۶، ۷، ۹، ۱۰ و ۱۲ متری اعمال شد و کرنش در راستاهای مختلف اندازه گیری شد، با توجه به نمودار زیر المان حجم نماینده بلوکی با ابعاد ۱۰ متر می باشد.



شکل ۲-۵ تعیین المان حجم نماینده

۲-۳-۵ پارامترهای مکانیکی مورد استفاده در مدل سازی

پارامترهای مکانیکی مورد استفاده در مدل سازی سه بعدی که مربوط به نمونه دوم از زون A است در جدول ۱-۵ و ۲-۵ آورده شده است.

جدول ۱-۵ مربوط به مقادیر چگالی (P)، مدول الاستیک (E)، ضریب پواسون (V)، مقاومت فشاری تک محوری (σ_c)، چسبندگی (C)، زاویه اصطکاک داخلی (ϕ) سنگ بکر است. فرض بر این است که کلیه بلوک های سنگ بکر از یک جنس و همگن هستند.

جدول ۱-۵ پارامترهای مکانیکی سنگ بکر

چگالی (gr/cm ³)	مدول الاستیک (GPa)	ضریب پواسون	مقاومت فشاری تک محوری (MPa)	چسبندگی (MPa)	زاویه اصطکاک داخلی (°)
۲/۴۸۹	۲۴/۵۵	۰/۳۱	۹۵	۲۲	۳۵

مقادیر پارامترهای مربوط به درزه ها از جمله سختی نرمال (Jkn) ، سختی برشی (Jks) ، چسبندگی (G_j) ، زاویه اصطکاک (ϕ_j) در جدول ۴-۲ آورده شده است. برای کلیه درزه های موجود پارامترهای مکانیکی مشابه در نظر گرفته شده اند [۶] و [۱۴].

جدول ۲-۵ پارامترهای مکانیکی درزه ها [۶] و [۱۴].

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

۵-۳-۳- مدل رفتاری مربوط به سنگ بکر و ناپیوستگی

در مطالعات مربوط به تعیین پارامترهای دگرشکل پذیری و ماتریس مشخصه رفتاری توده سنگ درزه دار به صورت سه بعدی مدل رفتاری سنگ بکر به صورت الاستیک فرض شده است. همچنین با توجه به این حقیقت که شکست در توده سنگ های درزه دار تنها در درزه ها اتفاق نیفتاده و گاهی به دلیل قفل شدن درزه ها در یکدیگر و طبیعت ذاتاً ناپیوسته و کریستالی سنگ بکر، شکست در سنگ بکر رخ داده و پس از آن ادامه شکست به درزه ها می رسد و در امتداد درزه ها صورت می گیرد، بهتر است تا مدل رفتاری برای سنگ بکر در نظر گرفته شود که امکان شکست در آن وجود داشته باشد. همچنین مدل رفتاری ناپیوستگی ها مدل تماس سطحی الاستوپلاستیک با لغزش کولمب در نظر گرفته شده است.

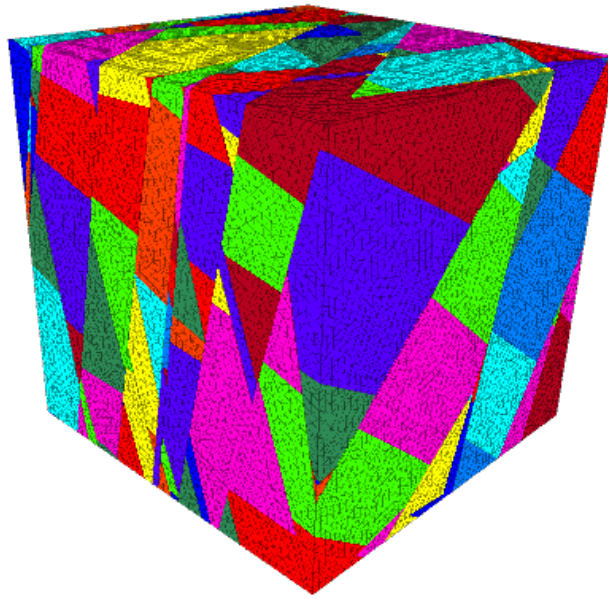
بر اساس ساده سازی و با توجه به حجم بالای محاسبات مانند آنچه برای حالت دوبعدی در نظر گرفته می شده است [۴]، مدل رفتاری درزه ها مستقل از تنش بوده و میزان دگرشکل پذیری قائم درزه ها به تنش وابسته نیست.

۵-۳-۴- زون بندی بلوک های سنگی

برای تحلیل در محیط ناپیوسته می توان مدل های بلوکی را صلب و یا تغییر شکل پذیر در نظر گرفت. اولین کدهای المان مجزا، بلوک ها را بصورت صلب در نظر می گرفتند، اما امروزه اهمیت تاثیر تغییر شکل بلوک های سنگ بکر به ویژه در مورد مسائل تحلیل پایداری و فضا های زیرزمینی و غیره شناخته شده است. بنابراین برای حل مساله در محیط ناپیوسته بلوک های سنگ بکر زون بندی شده و به صورت تغییر شکل پذیر در نظر گرفته شده اند. بدین منظور ابعاد المان های چهار وجهی^۱ که متشکل از چند وجهی های محدب هستند با توجه به ابعاد کوچکترین بلوک ها، بگونه ای تعریف شده اند که در هر یال از نمونه های مکعبی حداقل ۵۰ زون وجود داشته باشد.

در شکل ۳-۵ مدل بلوکی به طول ضلع ده متر با تعداد ۲۲۶۶۹۷ بلوک آورده شده است. چنانچه مشاهده می شود تعداد بالای بلوک ها و المان های چهار وجهی علی رغم آنکه دقت محاسبات را افزایش می دهند سبب افزایش قابل توجه زمان محاسبات برای بررسی رفتار دگرشکل پذیری توده سنگ به صورت سه بعدی می شوند. اما به منظور جلوگیری از کاهش دقت در محاسبات علاوه بر اینکه هیچگونه ساده سازی تحت عنوان کاهش تعداد شکستگی های تولید شده انجام نگرفته است بلکه هیچ یک از بلوک های هر چند با ابعاد کوچک تا حد امکان از مدل حذف نشده اند. همچنین ابعاد زون بندی در همه جای مدل یکنواخت بوده و تغییری در تراکم آن صورت نگرفته است.

¹ - Tetrahedral

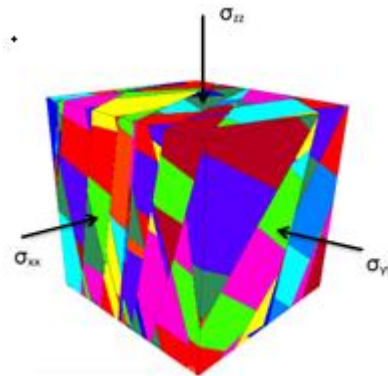


شکل ۳-۵ مدل بلوکی با ابعاد هر ضلع ۱۰ متر

۵-۳-۵ اعمال شرایط مرزی با توجه به محدوده رفتار الاستیک

به منظور دستیابی به کلیه ی مولفه های ماتریس مشخصه رفتاری توده سنگ درزه دار، شش نوع شرایط مرزی تنش مستقل خطی کافی به نظر می رسند.

در مرحله اول با توجه به شکل ۴-۵ نمونه از هر ۶ وجه به طور متقارن تحت تنش فشاری ثابت قرار می گیرد نتایج حاصل از اعمال شرایط مرزی در جدول ۳-۵ نشان داده شده است.

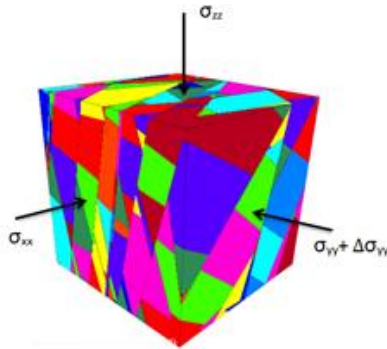


شکل ۴-۵ اعمال شرایط مرزی ۱

جدول ۳-۵ تنش‌ها و کرنش‌های شرایط مرزی ۱

کرنش‌ها	تنش‌های اعمالی	مرحله ۱
$\varepsilon_x = 0/00692213$	$\sigma_x = 2.5$	شرط مرزی ۱
$\varepsilon_y = 0/00443433$	$\sigma_y = 2$	
$\varepsilon_z = 0/00440556$	$\sigma_z = 2$	
$\gamma_{yz} = 0$	$\tau_{yz} = 0$	
$\gamma_{xz} = 0$	$\tau_{xz} = 0$	
$\gamma_{xy} = 0$	$\tau_{xy} = 0$	

در مرحله دوم همانطور که در شکل ۵-۵ نشان داده شده است با حفظ شرایط مرحله اول، تنش در جهت y به اندازه ۱ مگاپاسکال افزوده شده است.



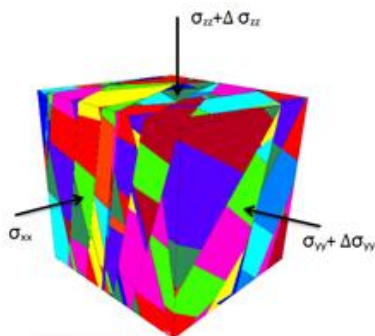
شکل ۵-۵ اعمال شرایط مرزی ۲

نتایج حاصل از اعمال شرایط مرزی ۲ در جدول ۴-۵ نشان داده شده است.

جدول ۴-۵ تنش‌ها و کرنش‌های شرایط مرزی ۲

کرنش‌ها	تنش‌های اعمالی	مرحله ۲
$\varepsilon_x = 0/00651031$	$\sigma_x = 2.5$	شرط مرزی ۲
$\varepsilon_y = 0/00818216$	$\sigma_y = 3$	
$\varepsilon_z = 0/00398813$	$\sigma_z = 2$	
$\gamma_{yz} = 0$	$\tau_{yz} = 0$	
$\gamma_{xz} = 0$	$\tau_{xz} = 0$	
$\gamma_{xy} = 0$	$\tau_{xy} = 0$	

در مرحله سوم مشابه آنچه در مورد جهت y گفته شد، برای جهت z انجام گرفته و تنش فشاری به اندازه ۱ مگا پاسکال افزایش می‌یابد. تنش‌های فشاری این مرحله در شکل ۵-۶ نشان داده شده است.



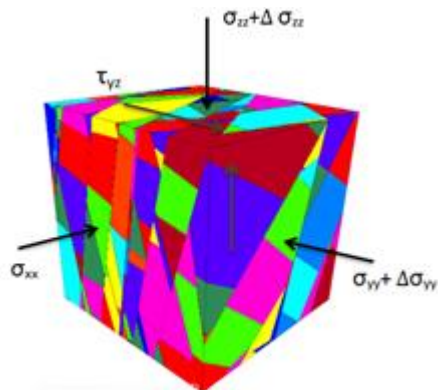
شکل ۵-۶ اعمال شرایط مرزی ۳

نتایج حاصل از اعمال شرایط مرزی ۳ در جدول ۵-۵ نشان داده شده است.

جدول ۵-۵ تنش‌ها و کرنش‌های شرایط مرزی ۳

کرنش‌ها	تنش‌های اعمالی	مرحله ۳
$\epsilon_x = 0/0058439$	$\sigma_x = 2.5$	شرط مرزی ۳
$\epsilon_y = 0/00742698$	$\sigma_y = 3$	
$\epsilon_z = 0/00723116$	$\sigma_z = 3$	
$\gamma_{yz} = 0$	$\tau_{yz} = 0$	
$\gamma_{xz} = 0$	$\tau_{xz} = 0$	
$\gamma_{xy} = 0$	$\tau_{xy} = 0$	

در مرحله چهارم با حفظ تنش‌های فشاری اعمال شده در مراحل قبل، این بار تنش برشی در جهت YZ بر روی صفحات موازی محور X اعمال می‌شود.



شکل ۵-۷ اعمال شرایط مرزی ۴

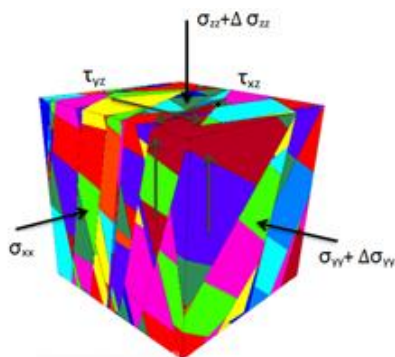
نتایج حاصل از اعمال شرایط مرزی ۴ در جدول ۵-۶ نشان داده شده است.

جدول ۵-۶ تنش‌ها و کرنش‌های شرایط مرزی ۴

کرنش‌ها	تنش‌های اعمالی	مرحله ۴
$\varepsilon_x = 0/0060341$	$\sigma_x = 2.5$	شرط مرزی ۴
$\varepsilon_y = 0/00708976$	$\sigma_y = 3$	
$\varepsilon_z = 0/00680112$	$\sigma_z = 3$	
$\gamma_{yz} = 0/00675814$	$\tau_{yz} = 1$	
$\gamma_{xz} = 0$	$\tau_{xz} = 0$	
$\gamma_{xy} = 0$	$\tau_{xy} = 0$	

در مرحله پنجم توجه به شکل ۵-۸ با حفظ تنش‌های فشاری و برشی اعمال شده در مراحل قبل،

این بار تنش برشی در جهت xz بر روی صفحات موازی محور y اعمال می‌شود.



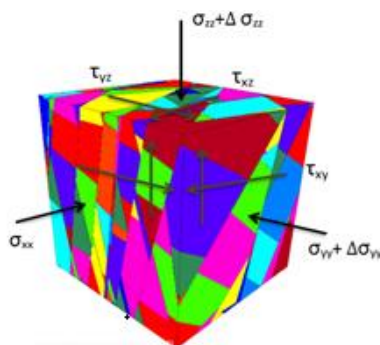
شکل ۵-۸ اعمال شرایط مرزی ۵

نتایج حاصل از اعمال شرایط مرزی ۵ در جدول ۵-۷ نشان داده شده است.

جدول ۵-۷ تنش‌ها و کرنش‌های شرایط مرزی ۵

کرنش‌ها	تنش‌های اعمالی	مرحله ۵
$\varepsilon_x = 0/00620042$	$\sigma_x = 2.5$	شرط مرزی ۵
$\varepsilon_y = 0/00731575$	$\sigma_y = 3$	
$\varepsilon_z = 0/00645478$	$\sigma_z = 3$	
$\gamma_{yz} = 0/00624721$	$\tau_{yz} = 1$	
$\gamma_{xz} = 0/00620181$	$\tau_{xz} = 1$	
$\gamma_{xy} = 0$	$\tau_{xy} = 0$	

در مرحله ششم نیز با حفظ شرایط مرحله قبل تنش برشی در جهت xy مشابه حالت قبل بر روی صفحه z مربوطه اعمال می‌گردد.



شکل ۵-۹ اعمال شرایط مرزی ۶

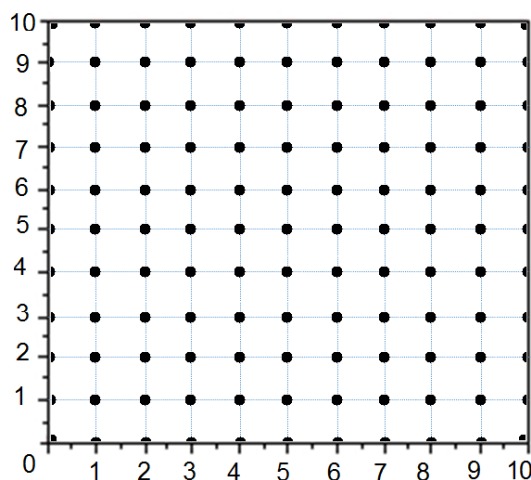
نتایج حاصل از اعمال شرایط مرزی ۶ در جدول ۵-۸ نشان داده شده است.

جدول ۵-۸ تنش‌ها و کرنش‌های شرایط مرزی ۶

کرنش‌ها	تنش‌های اعمالی	مرحله ۶
$\varepsilon_x = 0/00541645$	$\sigma_x = 2.5$	شرط مرزی ۶
$\varepsilon_y = 0/00629826$	$\sigma_y = 3$	
$\varepsilon_z = 0/00620169$	$\sigma_z = 3$	
$\gamma_{yz} = 0/00610053$	$\tau_{yz} = 1$	
$\gamma_{xz} = 0/00613987$	$\tau_{xz} = 1$	
$\gamma_{xy} = 0/00630616$	$\tau_{xy} = 1$	

۵-۳-۶- نحوه ی پایش مدل و اندازه گیری کرنش

برای اندازه گیری جابجایی نسبی نقاط و محاسبه نرخ کرنش های برشی و نرمال پس از هر مرحله بارگذاری، بر روی هر یک از وجوه مدل به طور متقارن نقاط به گونه ای تعبیه شده اند که بر روی هر یک از یال های مکعب، ۱۱ نقطه و در نهایت بر روی هر وجه ۱۲۱ نقطه وجود داشته باشد. شکل ۵-۱۰ الگویی از مکان نقاط تعبیه شده بر روی یکی از وجوه مدل را نشان می دهد.



شکل ۵-۱۰- نمایشی از نقاط تعیین شده برای اندازه گیری کرنش بر روی یکی از وجوه بلوک

بدین ترتیب میزان کرنش های نرمال (ϵ_{xx} و ϵ_{yy} و ϵ_{zz}) و کرنش (γ_{yz} و γ_{xz} و γ_{xy}) طی هر یک از مراحل بارگذاری محاسبه شده و میانگین آن پس از هر یک از مراحل بارگذاری ثبت می گردد. کرنش های نرمال از تقسیم میزان جابجایی نقاط متقابل نسبت به مکان های ابتدایی شان و کرنش های برشی از طریق رابطه ۵-۱ محاسبه می شوند [۴].

$$\epsilon_{ij} = \frac{1}{2}(u_{i,j} + u_{j,i}) \quad i, j = x, y, z \quad (1-5)$$

۵-۳-۷- نحوه محاسبه ماتریس مشخصه رفتاری توده سنگ درزه دار در سه بعد

برای محاسبه پارامترهای ماتریسی مشابه ماتریس معادله ۲-۲۰ از نظر ریاضی لازم است تا ۳۶ مجهول موجود از طریق حل ۳۶ معادله بدست آیند. با توجه به آنچه در مورد مراحل ۶ گانه اعمال

شرایط مرزی گفته شد، پس از هر یک از مراحل، با داشتن تنش‌ها و کرنش‌های مربوط به هر یک از جهات، ۶ معادله بدست می‌آید که در نهایت با اعمال هر یک از مراحل مجموعاً ۳۶ معادله بدست خواهد آمد که با حل این دستگاه ۳۶ معادله و ۳۶ مجهولی، کلیه مولفه‌های ماتریس معین می‌گردند.

$$\begin{bmatrix} 3.6314 & -0.4118 & -0.6664 & 0.1902 & 0.1663 & -0.7839 \\ -0.6203 & 3.7478 & -0.7551 & -0.3372 & 0.2259 & -1.0174 \\ -0.4982 & -0.4174 & 3.2430 & -0.4300 & -0.3463 & -0.2530 \\ 0 & 0 & 0 & 6.7581 & -0.5109 & -0.1466 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 6.2018 & -0.0619 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 6.3061 \end{bmatrix} \times E - 11(1/Pa)$$

با توجه با ماتریس مشخصه رفتاری حاصله مقادیر مدول دگرشکل پذیری در جهت‌های مختلف در ابعاد المان حجم معرف در جدول ۵-۹ آورده شده است.

جدول ۵-۹ مقادیر مدول دگرشکل پذیری در جهات x,y,z

E_x (GPa)	E_y (GPa)	E_z (GPa)
۲۷,۵	۲۶,۶	۳۰,۸

همچنین مقادیر مربوط به ضرایب پواسون در راستاهای مختلف برای توده سنگ درزه‌دار در ابعاد المان حجم معرف، در جدول ۵-۱۰ آورده شده است. با توجه به مقادیر بدست آمده می‌توان نتیجه گرفت که توده سنگ مورد مطالعه دارای ناهمسنگردی در تمام جهات می‌باشد.

جدول ۵-۱۰ مقادیر ضرایب پواسون در جهات x, y, z در اندازه نماینده حجم معادل

V_{yx}	V_{xy}	V_{zx}	V_{xz}	V_{yz}	V_{zy}
۰/۱۰۹	۰/۱۷۰	۰/۲۰۵	۰/۱۳۷	۰/۱۱۱	۰/۲۳۲

با توجه به طبیعت پیچیده و ناهمگن توده سنگ درزه‌دار، ماتریس محاسبه شده متقارن نیست و برای بدست آوردن ماتریس کاملاً متقارن می‌توان از رابطه ۲-۵ استفاده کرد که در آن S_{ij}^T ماتریس مشخصه رفتاری توده سنگ درزه دار بدست آمده است [۴].

$$S_{ij} = \frac{1}{2}(S_{ij} + S_{ij}^T) \quad (۵-۲)$$

۵-۴- مقایسه نتایج حاصل از مدلسازی عددی و نتایج تجربی

با توجه با آنچه در فصل قبل به آن اشاره شد مقایسه نتایج به دست آمده با استفاده از روابط پیشنهادی محققین مختلف نشان از تفاوت در نتایج تخمین تجربی مدول تغییرشکل پذیری به دلیل دخیل بودن پارامترهای مرتبط با طراحی سازه‌های زیرزمینی در این رده‌بندی و بازه تغییرات وسیع در نظر گرفته شده در آن است. با این حال مدول تغییرشکل پذیری توده‌سنگ درزه‌دار محاسبه شده با مدلسازی عددی مقدار نزدیکی به روش تجربی بارتن و همکاران دارد.

فصل ششم

نتیجه‌گیری و پیشنهادها

برای ارزیابی پایداری فضاهای زیرزمینی از جمله بازکننده‌ها و کارگاه‌های استخراج روش‌های مختلف استخراج زیرزمینی، اطلاع از رفتار مکانیکی توده سنگ در برگیرنده فضاها ضروری می‌باشد. در نتیجه تعیین صحیح پارمترهای مکانیکی برای توده سنگ‌های درزه‌دار بسیار حائز اهمیت است و در روند انجام پروژه و مباحث اقتصادی و زمان تحویل این پروژه بسیار موثر است. ماتریس مشخصه رفتاری مصالح سنگی از جمله مهم‌ترین خصوصیات ژئومکانیکی می‌باشد که برای برقراری ارتباط بین تانسور تنش و تانسور کرنش جهت حل معادلات حاکم بر رفتار مکانیکی محیط سنگی مورد نیاز می‌باشد. از این رو در معادن زیرزمینی برای تحلیل پایداری و در صورت نیاز تامین تمهیدات لازم، ضروری است خصوصیات ژئومکانیکی محیط به ویژه ماتریس مشخصه رفتاری محیط سنگی تعیین گردد.

در این پایان نامه رفتار مکانیکی توده سنگ درزه‌دار تحت شرایط مختلف تنش مورد بررسی قرار گرفت و با استفاده از روش عددی سه بعدی المان مجزا ماتریس مشخصه رفتاری توده سنگ درزه‌دار محاسبه شده است. در ابتدا با استفاده از برداشت‌های دو بعدی، ناپیوستگی‌ها با روش برداشت خطی از منطقه طزره برداشت شد و در با استفاده از نرم‌افزار Dips دسته درزه‌ها تعیین شد. همچنین با آزمایش‌های صورت گرفته در آزمایشگاه بر روی سنگ بکر، خواص مکانیکی ماده سنگ تعیین شد. در مرحله بعد با پردازش‌های آماری بر روی خواص هندسی برداشت شده و تعیین توابع توزیع احتمال حاکم بر خصوصیات هندسی، مدل عددی توده سنگ درزه‌دار در نرم‌افزار 3DEC ساخته شد. نهایتاً با تعیین المان حجم معرف توده سنگ و اعمال شرایط مرزی شش‌گانه و حل دستگاه ۳۶ معادله ۳۶ مجهول در نرم‌افزار متلب ماتریس مشخصه رفتاری توده سنگ درزه‌دار معدن طزره در اندازه بلوک ۱۰ متری تعیین گردید.

با توجه به توضیحات ارائه شده نتایج زیر حاصل گردیده است.

- طبیعت بسیار پیچیده توده‌سنگ به عنوان محیطی ناپیوسته و ناهمگن با وجود انواع ناپیوستگی‌ها در ابعاد و جهات مختلف سبب می‌شود تا مدل‌سازی به روش المان مجزا، نسبت به سایر روش‌های برجا، آزمایشگاهی، تجربی و تحلیلی برتری نسبی داشته باشد.
- در روش مدل‌سازی المان مجزا این امکان وجود دارد که بر روی یک نمونه تعداد بیشتری آزمایش نسبت به سایر روش‌ها انجام شود، در حالی که در روش‌های دیگر در این زمینه محدودیت وجود دارد.
- با توجه به این که در طبیعت ناپیوستگی‌ها به صورت سه بعدی وجود دارند، مدل‌سازی به صورت سه بعدی نسبت به مدل‌سازی دو بعدی که شکستگی‌ها به گونه‌ای مدل می‌شوند که تنها در جهت عمود بر صفحه مدل امتداد دارند دارای دقت عمل بیشتری است.
- در این مطالعه با استفاده از برنامه 3DEC دسترسی به کلیه مولفه‌های ماتریس مشخصه رفتاری توده‌سنگ درزه‌دار فراهم شده است. با داشتن ماتریسی که نشان دهنده رفتار تغییرشکل پذیری توده سنگ باشد، می‌توان میزان تغییر شکل تحت تنش در راستاهای مختلف را تعیین کرد.
- روش‌های تجربی ارائه شده برای تعیین مدول الاستیسیته توده سنگ درزه دار محیط سنگی را ایزوتروپ فرض کرده و یک مقدار اسکالر برای رفتار محیط سنگی پیشنهاد کرده. نتایج حاصل از مدل‌سازی سه بعدی در مقایسه با روش‌های تجربی مطلوب می‌باشد.

برای فعالیت‌های آینده پیشنهادات زیر ارائه می‌شود:

- تاثیر چگالی درزه‌داری بر پارامترهای مکانیکی توده‌سنگ درزه‌دار مورد بررسی قرار گیرد.
- ماتریس مشخصه رفتاری توده‌سنگ درزه‌دار با استفاده از مدل‌سازی سه بعدی و با امکان فیش نویسی هندسه توده‌سنگ به صورت شبکه شکستگی مجزا در نرم‌افزار 3DEC تعیین شود.

- برای تعیین عدم قطعیت در پارامترهای مکانیکی و همچنین تاثیر انتخاب مدل رفتاری برای سنگ بکر و درزه‌ها برای پارامترهای مکانیکی آنالیز حساسیت صورت گیرد.
- تاثیر وجود آب و فشار آب بر پارامترهای ماتریس مشخصه رفتاری توده‌سنگ درزه‌دار بررسی شود.
- برای بررسی اعتبار روش مدل‌سازی انجام شده، لازم است آزمایش‌هایی در مقیاس‌های بزرگ آزمایشگاهی یا برج‌ها بر روی نمونه‌های توده سنگ با ابعاد بزرگ و شامل شکستگی انجام شود.
- برای تعیین المان حجم معرف روش‌های متفاوتی وجود دارد، با توجه به اینکه در این مطالعه از روش نسبت پواسون استفاده شده است پیشنهاد می‌شود المان حجم معرف نسبت به سایر خواص مکانیکی نیز محاسبه شود.

منابع

- [1] Harrison, J. P., Hudson, J. A., "Engineering rock mechanics _an introduction to the principles", Elsevier, 2000.
- [۲] کلانتری، ف.، (۱۳۸۰)، "مکانیک محیط های پیوسته"، چاپ سوم، انتشارات دانشگاه گیلان.
- [۳] راستگو، ع.، هیهات، م.، م.، (۱۳۸۵)، "مکانیک محیط های پیوسته برای مهندسين"، چاپ سوم، انتشارات دانشگاه تهران.
- [4] Min K., -B., Jing, L., "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: 795-816, 2003.
- [5] Chen, S., He, J., Shahrour, I., "Estimation of elastic compliance matrix for fractured rock element method", *International Journal of Rock Mechanics & Mining Sciences*, 49: 156-164, 2012.
- [6] Khani A., Baghbanan A., Hashemolhosseini H., "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: 104-112, 2013.
- [7] ITASCA, "3DEC Version 5 User Manual", *Itasca Consulting Group*, Minneapolis, NM, 2013.
- [8] Leewood, R. A., Doyle, F. J., Sun, T. C., "Finite element program for analysis of laminated anisotropic elastoplastic materials", *Computers & structures Vol 25. no. 5. pp 749-758, 198.*
- [9] Kulatilake P., Wang S., Stephansson O., "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): 479-501, Elsevier, 1993.

- [10] Kulatilake P., Park, J., Um, J.-g., “Estimation of rock mass strength and deformability in 3-D for a 30m cube at a depth of 485 m at Aspo hard rock laboratory”, *Geotechnical & Geological engineering*, 22: 313-330, 2004.
- [11] Mogilevskaya, S.G., Wang, J., Croucha, S.L., “Numerical evaluation of the effective elastic moduli of rocks”, *International Journal of Rock Mechanics & Mining Sciences* 44: 425–436, 2007.
- [12] Chen, S.H., He, J., Shahrour, I., “Estimation of elastic compliance matrix for fractured rock masses by composite element method”, *International Journal of Rock Mechanics & Mining Sciences*, 2011
- [13] Khani A., Baghbanan A., Norouzi, S., Hashemolhosseini H., “Effects of fracture geometry and stress on the strength of a fractured rock mass”, *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, 60: 345-352, 2013.
- [14] Noorian Bidgoli M., Zhao Z., Jing, L., “Numerical evaluation of strength and deformability of fractured rocks”, *Journal of Rock Mechanics and Geotechnical Engineering*, 5:419-430, 2013.
- [15] Yang, J.-P., Chen, W.-Z., Dai, Y., Yu, H.-D., “Numerical determination of elastic compliance tensor of fractured rock masses by finite element modeling”, *International Journal of Rock Mechanics & Mining Sciences*, 2014.
- [16] Cundall, P., “A computer model for simulating progressive large-scale movements in block rock mechanics”, Proc. Symp. Int. Soc. Rock mech. Nancy, 2 Springer-Vetlag, 1971.
- [17] Lemos, J. V., Hart, R., D., Cundall, P. A., “A generalized distinct element program for modelling jointed rock mass”, *International Symposium on Fundamentals of Rock Joints*, Bjokliden, 335-343, 1985.
- [18] Jing L., Stephansson O., “*Fundamentals of Discrete Element Methods for Rock Engineering: Theory and Applications*” Elsevier, 2007.
- [19] Sonmez, H., Gokceoglu C., Ulusay, R., “Indirect determination of the modulus of deformation of rock masses based on the GSI system”, *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, 41:5: 849-857, 2004.

- [20] Gerrard C. M., "Equivalent Elastic Moduli of a Rock Mass Consisting of Orthorhombic Layers", *International Journal of Rock Mechanics and Mining Science and Geomechanical Abstract*, 19: 9-14, 1982.
- [21] Sadd M. H., "Elasticity", Elsevier, 2005.
- [22] Salamon M. D. G., "Elastic Moduli of a Stratified Rock Mass", *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, 5: 519-527, 1968.
- [23] Morland L., "Elastic anisotropy of regularly jointed media", *Rock Mechanics*, 8: 35-48, 1976.
- [24] Fossum A., F., "Effective Elastic Properties for a Randomly Jointed Rock Mass", *International Journal of Rock Mechanics & Mining Sciences*, 22: 6: 467-470, 1985.
- [25] Kemeny, J., Cook, N.M., "Effective moduli, non-linear deformation and strength of cracked elastic solid", *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences & Geomechanics Abstracts*, 23(2): 107-118, Elsevier, 1986.
- [26] Zhang L., "Method for Estimating the Deformability of Heavily Jointed Rock Masses", *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, 136: 9: 1242-1250, 2010.
- [27] Singh, B., "Continuum Characterization of Jointed Rock Masses", *International Journal of Rock Mechanics and Mining Science and Geomechanical Abstract*, 10: 311-335, 1973.
- [28] Oda, M., "A method for evaluating the effect of crack geometry on the mechanical behavior of cracked rock masses", *Mechanics of Materials*, 2:163-171, 1983.
- [29] Zhang, H., Zhu, J., Liu, Y., Xu, B., Wang, X., "Strength properties of jointed rock masses based on the homogenization method", *Acta Mechanica Solida Sinica*, 25:177-185, 2012.
- [30] Single, B., Goel, R., Mehrota, V., Gang, S., Allu, M., "Effect of intermediate principal stress on strength of anisotropic rock mass", *Tunneling and Underground Space Technology*, 13:71-79, 1998.
- [31] Trivedi, A., "Strength and dilatancy of jointed rocks with granular fill", *Acta Geotechnica*, 5:15-31, 2010.

- [32] Cai M., Horii H., "A Constitutive Model of Highly Jointed Rock Masses", *Mechanics of Materials*, 13: 217-246, 1992.
- [33] Amadei, B., Savage, W., "Effect of joints on rock mass strength and deformability", *Comprehensive Rock Engineering*, 1: 331-365, 1993.
- [34] Huang T., H., Chang C., S., Yang Z., Y., "Elastic Moduli for Rock Mass", *Rock Mechanics and Rock Engineering*, 28: 135-144, 1995.
- [35] Amadei, B., "Strength of a regularly jointed rock mass under biaxial and axisymmetric loading conditions", *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences & Geomechanics Abstracts*, 25(1): 3-13, 1998.
- [36] Wittke, W., "Rock mechanics based on an anisotropic jointed rock model", Wilhelm Ernst & Sohn, 2014.
- [37] Goodman, E. R., "Introduction to rock mechanics", University of California at Berkeley, 1989.
- [38] JianPing Y. et al. "Numerical determination of strength and deformability of fractured rock mass by FEM modeling" *Computers and Geotechnics*, 64: 20-31, 2015.
- [39] Sainsbury B., Pierce M., Mars Ivars D. "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, 2008.
- [40] Priest S., D. "Discontinuity analysis for rock engineering", Springer, 1993.
- [41] Sitharam, T. G. "Equivalent continuum analyses of jointed rock mass: Some case studies" *International Journal of the JCRM*, 5, 1, pp 39-51, 2009.
- [۴۲] لقایی، م. پایان نامه دوره کارشناسی ارشد، مدلسازی عددی تعیین دگرشکل پذیری و مقاومت توده سنگ درزه دار به صورت سه بعدی، دانشکده مهندسی معدن، دانشگاه صنعتی اصفهان، ۱۳۹۳.
- [۴۳] گزارش کار آموزشی معدن زغالسنگ طزره، شرکت معادن زغالسنگ البرز شرقی.
- [44] Hudson J., A., "Comprehensive rock engineering", Pergamon Press, Chapter 14, 1993.

- [45] Palmstrom A. “Insitu Characterization of Rocks”, Chapter 2, AA *BALKEMA*, 2001.
- [46] Zhang L., “*Engineering properties of rocks*”, Elsevier, 2005.

Abstract:

Related to rock engineering projects need to be aware of the mechanical properties of the rock mass. Different direct and indirect methods are presented to better understand the mechanical characteristics of jointed rock mass. Using the most reliable method for estimating in situ methods rock deformability, but these methods require more time and cost allocation. Analytical and numerical methods can be used. Discrete element method with consideration of the true nature of the fracture system is superior analytical methods. In this thesis, compliance matrix for fractured rock mass calculated using 3-D Discrete Element Method. At first, after removal of discontinuities with the scan line method of coal mine Tazareh, using software Dips joints were determined. The mechanical properties of rock material was determined by conducting laboratory studies. Next, the geometric properties of harvested and processed for statistical probability distribution functions of the geometric characteristics were determined. The following geometric properties and geomechanical properties of the rock mass discontinuities 3DEC entered in the software. The Representative Elementry Volome of the rock mass was determined and Min proposed using the instructions during the loading of three-dimensional numerical simulation of jointed rock mass compliance matrix determined Tazareh mine. Some components of empirical equations were compared with the result.

Keywords: Numerical modelling, mechanical properties, discrete element method, Representative Elementry Volome, compliance matrix , Jointed rock mass



Shahrood University of Technology
Faculty of Mining, Petroleum and Geophysics
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: Mehran Kaviani Dezaki

Supervisor:
Dr. Hossein Mirzaei

Advisor:
Mr. Nader Ziari

September 2016