بسم الله الرحمن الرحیم

دانشگاه صنعتی اصفهان
دانشکده مهندسی معدن

مدل‌سازی عددی تعیین دگرشکل پذیری و مقاومت توده‌سنگ درزه‌دار به صورت سه‌بعدی

پایان‌نامه کارشناسی ارشد مکانیک سنگ

مهناز لقائی

اساتید راهنما

دکتر علیرضا باغبانان

دکتر سید حمید هاشم الحسینی

۱۳۹۳

دانشگاه صنعتی اصفهان
دانشکده مهندسی معدن

پایان‌نامه کارشناسی ارشد رشته مکانیک سنگ خانم مهناز لقائی

تحت عنوان

مدل‌سازی عددی تعیین دگرشکل پذیری و مقاومت توده‌سنگ درزه‌دار بصورت سه‌بعدی

در تاریخ ۱۳۹۳/۱۰/۲۸ توسط کمیته تخصصی زیر مورد بررسی و تصویب نهایی قرار گرفت.

۱- استاد راهنمای اول — دکتر علیرضا باغبانان

۲- استاد راهنمای دوم — دکتر سید حمید هاشم الحسینی

۳- استاد داور داخلی — دکتر محمود بهنیا

۴- استاد داور خارجی — دکتر محمود هاشمی

۵-سرپرست تحصیلات تکمیلی دانشکده — دکتر مرتضی طبائی

کلیه حقوق مادی مترتب بر نتایج مطالعات، ابتکارات و نوآوری‌های ناشی از تحقیق موضوع این پایان‌نامه (رساله) متعلق به دانشگاه صنعتی اصفهان است.

تقدیم اثر

خدای را بسی شاکرم که از روی کرم، پدر و مادری فداکار نسیم ساخته تا در سایه درخت پربار وجودشان بیاسایم و از ریشه آنها شاخ و برگ گیرم و از سایه وجودشان در راه کسب علم و دانش تلاش نمایم. والدینی که بودنشان تاج افتخاری است بر سرم و نامشان دلیلی است بر بودنم، چرا که این دو وجود، پس از پروردگار، مایه هستی‌ام بوده اند دستم را گرفتند و راه رفتن را در این وادی زندگی پر از فراز و نشیب آموختند. نه میتوانم موهایشان را که در راه عزت من سفید شد، سیاه کنم و نه برای دستهای مهربانشان، مرهمی دارم. پس توفیقم ده که هر لحظه شکر گزارشان باشم و ثانیه های عمرم را در عصای دست بودنشان بگذرانم

و

آموزگارانی که برایم زندگی، بودن و انسان بودن را معنا کردند

تقدیم به وجود با ارزشتان...

تشکر و قدردانی

در آغاز خدا را شاکرم که توفیقی دیگر عنایت کرد تا مرحله‌ای دیگر از جاده‌ی پر پیچ و خم زندگانی را به فرجام رسانیده و گامی هرچند کوچک در راستای اعتلای علمی این مرز و بوم بردارم. بی‌شک یاد او بود که در تمامی مراحل تحصیل به ویژه در انجام این پایان نامه مرا مایه‌ی قوت قلب شد تا حتی یک لحظه هم احساس یأس و ناتوانی به من راه نیابد.

در اینجا بر خود لازم می‌دانم از تمامی اساتید بزرگوارم به ویژه اساتید دوره‌ی کارشناسی ارشد که در طول سالیان گذشته مرا در تحصیل علم و معرفت و فضائل اخلاقی یاری نموده‌اند تقدیر و تشکر نمایم.

از استاد گرامی و بزرگوار، جناب آقای **دکتر علیرضا باغبانان** که راهنمایی اینجانب را در انجام تحقیق، پژوهش و نگارش این پایان نامه تقبل نموده‌اند نهایت تشکر و سپاسگزاری را دارم.

همچنین بر خود لازم می‌دانم از جناب آقای **دکتر سید حمید هاشم الحسینی** که از آغاز بار، نمودهای ارزنده و مساعدت‌های بی منت و بی منتهای خویش مرا در این عرصه یاری رساندند تشکر و قدردانی نمایم.

و نیز از آقایان **دکتر محمود بهنیا** و **دکتر محمود هاشمی اصفهانیان** به عنوان اساتید داور داخلی و خارجی که زحمت باز خوانی، داوری و شرکت در جلسه‌ی دفاعیه را متحمل گردیدند ممنون و سپاسگزارم.

در پایان از مرکز ملی ابر رایانش شیخ بهائی به ریاست جناب آقای **دکتر اشرفی زاده** سپاسگزارم.

لازم می‌دانم از دوستان عزیزم که خاطرات سال‌های تحصیل من با آنان عجین شده تشکر و قدردانی نموده و برایشان موفقیت روز افزون، سعادت و بهروزی در آینده را از خدای منان مسألت دارم.

فهرست مطالب

عنوان | صفحه

فهرست مطالب.....هشت

فهرست جدول‌ها.....یازده

فهرست شکل ها.....دوازده

چکیده.....۱

فصل اول:مقدمه.....۲

۱-۱ پیشینه فعالیت و انگیزه مطالعه ۲

۱-۲ هدف مورد بررسی ۶

۱-۳ مروری بر فصول بعد ۷

فصل دوم: روش‌های برآورد پارامترهای مکانیکی توده سنگ درزه دار.....۹

۲-۱ مقدمه ۹

۲-۲ پارامترهای مقاومتی و دگرشکل پذیری توده‌سنگ ۱۰

۲-۳ روش‌های مستقیم ۱۰

۲-۴ روش‌های غیر مستقیم برآورد پارامترهای مقاومتی توده‌سنگ ۱۱

۲-۴-۱ روش‌های تجربی ۱۱

۲-۴-۲ روش‌های تحلیلی ۱۵

۲-۴-۳ روش‌های عددی ۲۱

فصل سوم: مدلسازی سه بعدی و تعیین پارامترهای مکانیکی توده‌سنگ درزه دار ۲۸

۳-۱ مقدمه ۲۸
۳-۲ معرفی ابزار مورد استفاده در مدلسازی سه بعدی ۲۹
۳-۳ ساخت شبکه شکستگی‌های مجزا ۳۰
۳-۳-۱ پارامترهای هندسی برداشت شده از شبکه شکستگی‌های مجزا ۳۰
۳-۳-۲ تولید آرایش های مختلف شبکه شکستگی‌ها ۳۳
۳-۳-۳ فرضیات مورد استفاده در تولید شبکه شکستگی سه بعدی ۳۵
۳-۳-۴ استخراج مدل های کوچکتر از شبکه شکستگی های والد ۳۹
۳-۳-۵ اختصاص پارامترهای مکانیکی به شکستگی‌های دایره‌ای ۴۰
۳-۴ فرآیند مدل سازی سه بعدی به روش المان مجزا ۴۲
۳-۴-۱ ساخت مدل بلوکی براساس شبکه شکستگی ۴۲
۳-۴-۲ پارامترهای مکانیکی مورد استفاده در مدلسازی ۴۳
۳-۴-۳ مدل رفتاری مربوط به سنگ بکر و ناپیوستگی ها ۴۳
۳-۴-۴ زون بندی بلوک های سنگی ۴۴
۳-۴-۵ اعمال شرایط مرزی با توجه به محدوده رفتار الاستیک ۴۵
۳-۴-۶ نحوه ی پایش مدل و اندازه گیری تنش و کرنش ۴۷
۳-۴-۷ نحوه محاسبه ماتریس عکس سختی توده‌سنگ درزه دار در سه بعد ۴۸
۳-۴-۸ تعیین شرایط مرزی برآورد مقاومت نهائی توده‌سنگ درزه دار ۴۹
۳-۴-۹ تعیین شرایط مرزی برای بررسی رفتار مقاومتی توده‌سنگ تحت تنش سه محوری ۵۱

فصل چهارم: برآورد پارامترهای مکانیکی توده‌سنگ درزه دار در سه بعد به روش شبکه شکستگی مجزا- المان مجزا ۵۳
۴-۱ مقدمه ۵۳
۴-۲ نتایج حاصل از بررسی رفتار دگرشکل پذیری توده‌سنگ ۵۴
۴-۲-۱ تعیین ماتریس عکس سختی برای نمونه سنگ بکر ۵۴
۴-۲-۲ تعیین ماتریس عکس سختی توده‌سنگ درزه دار ۵۴
۴-۲-۳ تعیین نماینده حجم معادل برای پارامترهای دگرشکل پذیری توده‌سنگ درزه دار ۵۵
۴-۲-۴ بررسی ناهمسانگردی در پارامترهای دگرشکل پذیری توده‌سنگ درزه دار ۵۹
۴-۳ نتایج حاصل از بررسی رفتار مقاومتی توده‌سنگ ۶۰
۴-۳-۱ بررسی تأثیر ابعاد بر مقاومت نهایی ۶۰
۴-۳-۲ تعیین نماینده حجم معادل برای مقاومت نهایی توده‌سنگ درزه‌دار ۶۲
۴-۳-۳ بررسی تأثیر تنش های جانبی بر مقاومت نهایی ۶۴
۴-۳-۴ مدلسازی شرایط سه محوری واقعی ۶۴
۴-۳-۵ برازش معیارهای شکست دو بعدی به نتایج حاصل از آزمایش سه محوری ۶۵
۴-۳-۶ برازش معیار شکست سه بعدی به نتایج حاصل از آزمایش های سه محوری ۷۰
۴-۳-۷ مقایسه نتایج حاصل از شرایط مختلف بارگذاری ۷۳
۴-۴ مقایسه نتایج بدست آمده با حالت دو بعدی ۷۷
فصل پنجم: نتیجه گیری و پیشنهادها ۷۹
منابع ۸۳

فهرست جدول‌ها

عنوان صفحه

جدول ۲-۱: برخی از معادلات تجربی ارائه شده برای برآورد مدول دگرشکل پذیری توده‌سنگ با استفاده از طبقه‌بندی‌های مهندسی سنگ ۱۳

جدول ۲-۲: روابط تجربی برآورد مقاومت توده‌سنگ درزه دار ۱۴

جدول ۳-۱:پارامترهای شکستگی مورد استفاده در تولید شبکه DFN ۳۰

جدول ۳-۲:شبکه شکستگی‌های مجزای سه بعدی با ۱۰ آرایش مختلف در ابعاد یک متری ۴۲

جدول ۳-۳: پارامترهای مکانیکی سنگ بکر ۴۳

جدول ۳-۴:پارامترهای مکانیکی شکستگی‌ها ۴۳

جدول ۳-۵: شمائی از اعمال شرایط مرزی شش گانه مستقل بر روی مدل یک متری از ششمین شبکه شکستگی(DFN 6) ۴۵

جدول ۴-۱:مقادیر میانگین مدول دگرشکل پذیری در جهات x,y,z در ابعاد نماینده حجم معادل برای توده‌سنگ درزه دار ۵۹

جدول ۴-۲: مقادیر میانگین ضرایب پواسون در جهات x,y,z در اندازه نماینده حجم معادل برای توده‌سنگ درزه دار.. ۵۹

جدول ۴-۳: پارامترهای مقاومتی محاسبه شده با معیارهای شکست موهر کولمب، هوک و براون تجربی و هوک و براون برازش شده ۶۹

جدول ۴-۴: پارامترهای مقاومتی محاسبه شده با معیارهای شکست سه بعدی موهر کولمب و موگی-کولمب ۷۳

فهرست شکل ها

عنوان | صفحه

شکل ۲-۱: نمایش توده‌سنگ درزه دار با سه دسته‌درزه منظم و عمود برهم در سه بعد ۱۸

شکل ۲-۲:نمایش توده‌سنگ درزه دار بصورت الف) توده‌سنگ شکسته واقعی ب) مدل ساخته شده با المان محدود ج) مدل ساخته شده با المان مرزی د) مدل ساخته شده با المان مجزا ۲۲

شکل ۲-۳: نمایش مفهوم نماینده حجم معادل ۲۳

شکل ۳-۱: نمودار فرآیند تولید شبکه شکستگی‌های مجزا ۳۴

شکل ۳-۲:نمایش فاصله بین مرز شبکه شکستگی‌های والد و شبکه شکستگی‌های مورد بررسی ۳۵

شکل ۳-۳:مقیاس های اندازه گیری چگالی درزه داری ۳۷

شکل ۳-۴: نمایش صفحه در نظر گرفته شده با جهت گیری مشخص در وسط مدل بلوکی برای کنترل چگالی دو بعدی شکستگی‌ها ۳۸

شکل ۳-۵: نمایش یکی از شبکه شکستگی‌های مجزای سه بعدی با ۴ دسته‌درزه در محدوده ۱۰ متری(تعداد شکستگی‌ها در این آرایش ۲۸۹۴۹ عدد است) ۳۹

شکل ۳-۶: فرآیند استخراج مدل های بلوکی کوچک از مرکز مدل های بزرگ برای شبکه های شکستگی اول تا دهم ۴۰

شکل ۳-۷: نحوه ایجاد شکستگی‌های نامحدود بر روی شبکه شکستگی‌های دایره‌ای شکل ۴۱

شکل ۳-۸: نمایش چگونگی اختصاص خواص متفاوت به گره های درون(سیاه رنگ) و بیرون(خاکستری رنگ) یک شکستگی دایره ای بر روی یک صفحه درزه ۴۱

شکل ۳-۹: نمایش مدل بلوکی مش بندی شده آرایش دوم(DFN 2) به طول ضلع یک متر ۴۴

شکل ۳-۱۰: نمودار تنش در جهت y نسبت به کرنش های نرمال برای نمونه یک متری از شبکه پنجم ۴۶

شکل ۳-۱۱:نمودارتنش در جهت y نسبت به کرنش های برشی برای نمونه یک متری از شبکه پنجم ۴۷

شکل ۳-۱۲: شمائی از نقاط تعبیه شده برای اندازه گیری کرنش بر روی یکی از وجوه نمونه مکعبی ۴۸

شکل ۳-۱۳: شمائی از اعمال شرایط مرزی از نوع بارگذاری با سرعت ثابت بر روی نمونه سنگ بکر ۴۹

شکل ۳-۱۴: نمودار تنش-کرنش مربوط به سنگ بکر ۴۹

شکل ۳-۱۵: مقطعی از کانتور بیشترین تنش برشی نمونه سنگ بکر پس از شکست در مرکز مدل در راستای عمود بر محور z ۵۰

شکل ۳-۱۶: مقطعی از کانتور بیشترین تنش برشی نمونه سنگ بکر پس از شکست در مرکز مدل در راستای عمود بر محور x ۵۰

شکل ۳-۱۷: نمایش انواع شرایط مرزی الف)سه محوری قراردادی ب)سه محوری واقعی ج) سه محوری توسعه یافته . ۵۱

شکل ۴-۱: نمایش مقادیر حاصل از مدلسازی عددی، کمینه، بیشینه، میانگین و ضریب تغییرات مدول دگرشکل پذیری معادل در راستاهای الف) x ب) y ج) z برای مدل های سه بعدی با ابعاد مختلف ۵۸

شکل ۴-۲: منحنی های تنش-کرنش برای مدل دوم با طول ضلع ۰/۲۵ ، ۰/۵ و ۱ متری ۶۰

شکل ۴-۳: کانتور بیشترین تنش برشی برای نمونه ۰/۵ متری با آرایش دوم ۶۱

شکل ۴-۴: کانتور بیشترین تنش برشی برای نمونه یک متری با آرایش دوم ۶۱

شکل ۴-۵:نمایش مقادیر حاصل از مدلسازی عددی، کمینه، بیشینه، میانگین و ضریب تغییرات مقاومت نهائی معادل در راستای z برای مدل های سه بعدی با ابعاد مختلف ۶۳

شکل ۴-۶:منحنی تنش-کرنش مدل دوم با ابعاد یک متر تحت شرایط تنش های جانبی سه محوری قراردادی مختلف ۶۴

شکل ۴-۷: منحنی تنش-کرنش مدل دوم با ابعاد یک متری تحت شرایط تنش های جانبی سه محوری واقعی مختلف . ۶۵

شکل ۴-۸ : برازش خطی معیار موهر- کولمب به داده های حاصل از آزمایش سه محوری قراردادی ۶۶

شکل ۴-۹: برازش معیار خطی هوک و براون به داده های حاصل از آزمایش سه محوری قراردادی ۶۸

شکل ۴-۱۰: منحنی های موهر کولمب، هوک و براون برازش شده و هوک و براون تجربی ۶۹

شکل ۴-۱۱: برازش معیار موگی-کولمب به داده های حاصل از آزمایش های سه محوری ۷۱

شکل ۴-۱۲: برازش معیار موهر کولمب سه بعدی در فضای تنش میانگین و تنش انحرافی ۷۲

شکل ۴-۱۳: نمایش کانتور و بردارهای جابجایی نمونه یک متری پس از شکست طی آزمایش سه محوری قراردادی با تنش های جانبی ۱ مگاپاسکال ۷۴

شکل ۴-۱۴: نمایش کانتور و بردارهای جابجایی نمونه یک متری پس از شکست طی آزمایش سه محوری واقعی با تنش های جانبی ۱ و ۳ مگاپاسکال ۷۵

شکل ۴-۱۵: نمایش کانتور و بردارهای جابجایی نمونه یک متری پس از شکست طی آزمایش سه محوری قراردادی با تنش جانبی ۱ مگاپاسکال در راستای عمودی ۷۶

چکیده

گسترش روزافزون انواع پروژه‌های مرتبط با مهندسی سنگ نیازمند شناخت بهتری از خصوصیات دگرشکلی و مقاومتی توده‌سنگ‌هاست. در میان روش‌های متعدد مستقیم و غیرمستقیم تعیین پارامترهای مکانیکی توده‌سنگ، روش شبکه شکستگی مجزا- المان مجزا (DFN-DEM) به دلیل در نظر گرفتن واقعیت سیستم شکستگی‌ها و روش حل مبتنی بر اندرکنش سنگ بکر و شکستگی‌ها از برتری نسبی برخوردار است. مطالعات گسترده‌ای که تاکنون بصورت دو بعدی صورت گرفته است، در مقایسه با روش‌های سه بعدی اغلب سبب بروز فراتخمین در اندازه‌گیری این پارامترها می‌شود. در این مطالعه از یک روش اصولی عددی برای بدست آوردن پارامترهای الاستیک معادل و مقاومت توده‌سنگ‌های درزه‌دار در سه بعد با شبکه شکستگی‌های تصادفی و نامنظم استفاده شده است. بدین منظور آرایش‌های متفاوتی از شبکه شکستگی مجزا به روش شبیه‌سازی مونت کارلو و بر مبنای پارامترهای هندسی حاصل از برداشت، تولید شده و تنسور عکس سختی و نماینده حجم معادل(REV) برای پارامترهای دگرشکل پذیری و مقاومتی برای توده‌سنگ در حالت سه بعدی تعیین شده است. نتایج حاصل از مدلسازی عددی سه بعدی بیانگر ناهمسانگردی در پارامترهای دگرشکل پذیری توده‌سنگ در راستاهای مختلف است. مقدار مدول دگرشکل‌پذیری معادل توده سنگ در راستاهای قائم و افقی در مقایسه با مدول دگرشکل پذیری سنگ بکر به ترتیب ۴۸ و ۶۲ درصد کاهش یافته است، که بیانگر ناهمسانگردی در دو جهت مختلف است. ابعاد نماینده حجم معادل تعیین شده برای پارامترهای دگرشکل‌پذیری و مقاومتی توده سنگ در حالت سه بعدی برابر یک متر است که پیشتر با استفاده از مدلسازی دوبعدی برابر ۵ متر بدست آمده بوده است. مقاومت نهائی توده سنگ در مقایسه با مقاومت فشاری تک محوری سنگ بکر به میزان زیادی کاهش یافته است. مقایسه برازش چند معیار شکست دوبعدی و سه بعدی نشان می‌دهد، معیارهای شکستی که صرفاً مقاومت توده سنگ را با استفاده از روابط تجربی برآورد می‌کنند، مطابقت چندانی با نتایج حاصل از روش‌های عددی ندارد. معیارهای سه بعدی که تأثیر تنش اصلی متوسط را در نظر می‌گیرند، نسبت به معیارهای شکست دو بعدی مقادیر متفاوتی برای پارامترهای مقاومتی برآورد می‌کنند. همچنین بررسی تأثیر نوع شرایط بارگذاری بیانگر وابستگی شدید پدیده‌ی شکست توده سنگ به مسیر بارگذاری است.

کلمات کلیدی: شبکه شکستگی‌های مجزا، روش المان مجزا، مدلسازی سه بعدی، پارامترهای مکانیکی، نماینده حجم معادل

فصل اول

مقدمه

۱-۱ پیشینه فعالیت و انگیزه مطالعه

پارامترهای مقاومتی و دگرشکل‌پذیری، معرف رفتار مکانیکی توده‌سنگ‌های درزه دار بوده و ازملزومات 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 و غیره به شمار می‌روند. در نتیجه تعیین صحیح این پارامترها برای توده‌سنگ‌های شکسته بسیار حائز اهمیت بوده و در روند انجام پروژه و مباحث اقتصادی و زمان تحویل پروژه بسیار موثر است. توده‌سنگ‌های دانه‌ای که طبیعتاً محیط‌هایی ناپیوسته و پیچیده‌اند، از ماتریکس سنگ بکر و شکستگی‌ها تشکیل شده و به خاطر هندسه پیچیده سیستم‌های شکستگی، محیط‌هایی ناپیوسته، ناهمگن، ناهمسانگرد و غیر الاستیک خطی (DIANE)[1] بوده و در مقایسه با سنگ بکر معمولاً ضعیف‌تر، شکل‌پذیرتر و شدیداً ناهمسانگرد هستند[۱].

به طور کلی در توده‌سنگ‌های دانه‌ای که تغییرشکل‌پذیری سنگ بکر در مقایسه با تغییرشکل بسیار زیاد درزه‌ها، بسیار اندک است، رفتار مقاومتی و دگرشکل‌پذیری توده‌سنگ‌ها عموماً متأثر از ناپیوستگی‌ها و مشخصات هندسی سیستم‌های شکستگی است. با توجه به اینکه پارامترهای هندسی شبکه شکستگی‌ها مانند طول اثر، جهت‌گیری و موقعیت

[1] Discontinuous Inhomogeneous Anisotropic Non-Linear Elastic

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 را بسیار دشوار می‌کند.

توجه به این نکته ضروری است که دستیابی به جواب‌های حقیقی برای رفتار مقاومتی و دگرشکل‌پذیری توده‌سنگ، ازنظر تئوری مستلزم آزمایش حجم بزرگی از سنگ دارای ناپیوستگی در سطوح تنش مطلوب است. اما در عمل حضور 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.

آزمایش های 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 دگرشکل پذیری و مقاومتی 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 توده سنگ از نظر محدوده مورد بررسی و تجهیزات لازم دارای محدودیت بوده واز 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.

تأثیر ابعاد مدل بر روی خواص مکانیکی توده‌سنگ مانند مقاومت و مدول یانگ از اهمیت بالائی برخوردار است[۲]. تا کنون روش‌های متعدد تجربی و عددی[۳] و [۴] برای بررسی تأثیر مقیاس بر پارامترهای مکانیکی توده‌سنگ مورد مطالعه قرار گرفته اند و نتایج حاصل از این مطالعات نشان می‌دهدکه در نظر گرفتن حجم‌های بزرگتری از توده‌سنگ برجا شامل تعداد زیادی شکستگی با ابعاد متنوع، در تغییر این پارامترها معمولاً به صورت کاهشی شرکت داشته و حتی اگر چگالی درزه‌داری ثابت بماند هنوز هم تغییر ابعاد بر روی خواص مکانیکی مؤثر است.

با توجه به اینکه دگرشکل‌پذیری و مقاومت کلی توده‌سنگ نه تنها از خصوصیات هندسی شبکه شکستگی‌ها، بلکه از حالات و تحولات میدان تنش تأثیر می‌پذیرد، لازم است تا نماینده حجم معادل[1] (REV) که بصورت کوچکترین حجم یک نمونه که پس از آن خصوصیات مکانیکی و هیدرولیکی عمدتاً ثابت می‌ماند تعریف می‌شود[۵] در ابتدا تعیین گردد. سپس تأثیر تنش بر خصوصیات مکانیکی در ابعادی به اندازه REV را می‌توان توسط روش‌های مدلسازی عددی مورد بررسی قرار داد [۶]و[۷].

روش‌های تعیین پارامترهای مکانیکی معادل برای توده‌سنگ های درزه دار و رفتار مکانیکی آنها ابتدا به وسیله اندازه‌گیری مستقیم در مقیاس بزرگ امکان پذیر می‌نماید ولی کاری پرهزینه ، وقت‌گیر و نیازمند کنترل دقیق شرایط مرزی و همچنین میزان زیاد عدم قطعیت بدلیل عدم اطلاع کافی از شکستگی‌های پنهان می‌باشد. در عین حال پس ازاستخراج داده‌ها بایستی تعبیر و تفسیر دقیقی نیز روی آنها صورت گیرد. با توجه به این مشکلات انواع روش‌های غیرمستقیم تحت عنوان روش‌های تجربی، تحلیلی و عددی بوجود آمده و توسعه یافتند.

[1]Representative Elementary Volume

پاسخ‌های حاصل ازروابط تجربی برای تعیین مدول دگرشکل پذیری و مقاومت توده‌سنگ‌های همسانگرد براساس انواع سیستم‌های رایج طبقه‌بندی مهندسی سنگ [۸] و[۹] و یا بر پایه‌ی آزمایش‌های برجا [۲]، نسبت به نتایج حاصل ازروش‌های تحلیلی که در آنها توده سنگ به عنوان یک محیط پیوسته و ناهمسانگرد در نظر گرفته می‌شود و تغییرشکل‌پذیری مفهوم تانسوری دارد [۱۰] و [۱۱] عدم قطعیت بالاتری داشته و با مقادیر واقعی تفاوت بیشتری دارد. روش‌های تحلیلی برآورد پارامترهای مکانیکی علی‌رغم در نظر گرفتن ناهمسانگردی در توده سنگ، به دلیل فرضیات ساده سازی لازم، تنها برای شبکه‌های شکستگی با هندسه ساده کاربرد دارند.

امروزه روش‌های عددی قادرند تا مقاومت و دگرشکل‌پذیری توده‌سنگ‌های درزه دار با در نظر گرفتن آرایش نسبتاً واقعی‌تر شبکه شکستگی‌ها و برهم‌کنش سنگ بکر و ناپیوستگی‌ها ،در صورتی که مدل رفتاری آنها به خوبی شناسایی شده باشد، محاسبه نمایند. از انواع روش‌های عددی ناپیوسته می‌توان به روش‌های 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 وتعداد ناپیوستگی‌ها و همچنین شبیه‌سازی جابجایی‌ها و چرخش‌های بزرگ که عمدتاً در توده‌سنگ‌های شکسته رخ می‌دهند، دارای محدودیت هستنند. روش المان مجزا که در سال ۱۹۷۱ توسط کاندال[۴] [۱۲] معرفی شده و پس از آن در ۱۹۸۵ توسط لموس[۵] و همکاران [۱۳]توسعه یافت، روش بسیار مفیدی است که بطور صریح هندسه پیچیده مدل‌های شبکه شکستگی‌های مجزا[۶] را همراه با مدل‌های رفتاری ساده یا پیچیده برای ماده سنگ و درزه‌ها شبیه‌سازی کرده و امکان تغییرشکل‌های بزرگ در ناپیوستگی‌ها را فراهم می‌کند [۱۴].

تاکنون مطالعاتی برای بررسی رفتار مکانیکی سنگ بکر بدون ناپیوستگی [۱۵]، محیط معادل پیوسته و یا توده‌سنگ در محیط ناپیوسته و دارای یک یا چند دسته‌درزه منظم و هندسه همسانگرد شبکه شکستگی‌ها و تحت فرضیات ساده انجام گرفته است [۱۶] و [۱۷] و [۱۱]. اینگونه روش‌ها اگرچه ساده بوده و به فهم مسأله 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 در محیطی ناپیوسته صورت گیرد و تأثیر تنش بر رفتار دگرشکل‌پذیری در نظر گرفته شود.

در روش ترکیبی شبکه شکستگی مجزا- المان مجزا (DFN-DEM) 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 که شامل جهت‌داری، چگالی، طول اثر، گسترش و نحوه ی 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.

---

[1] Finite Element Method
[2] Boundary Element Method
[3] Discrete Element Method
[4] Cundall
[5] Lemos
[6] Discrete Fracture Network

برنامه‌های توسعه یافته برای مدلسازی به روش عددی المان مجزا (UDEC[1]و 3DEC[2]) که دگرشکل‌پذیری و شکست همزمان درزه و سنگ بکر را مدلسازی می‌کند ، نسبت به روش‌های مبتنی بر محیط پیوسته حل صحیح‌تری را نتیجه می‌دهد.

برای تعمیم قانون هوک در حالت کلی لازم است تا هر مولفه تنش به تمام مؤلفه‌های کرنش و هر مؤلفه‌ی تغییرشکل نسبی به تمام مولفه‌های تنش مربوط شود که این مهم بوسیله ی تانسور عکس سختی[3] ارائه می‌گردد. تانسور عکس سختی که به نوعی معرف رفتار کلی دگرشکلی توده‌سنگ است تاکنون از طریق روش‌های عددی از جمله روش شبکه شکستگی‌های مجزا- المان مجزا [۱۸] و روش المان مرکب [۱۹] تعیین گردیده و همینطور تأثیر چگالی درزه‌داری شبکه شکستگی و تنش اعمالی [۲۰] بر روی پارامترهای این تانسور مورد بررسی قرار گرفته است.

مین و جینگ[4] در ۲۰۰۳ [۱۸] از روش شبکه شکستگی‌های مجزا- المان مجزا برای تعیین پارامترهای الاستیک معادل توده‌سنگ‌های 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 دگرشکل‌پذیری توده‌سنگ‌های درزه‌دار با آرایش‌های متعددی از شبکه‌ی شکستگی‌ها در ابعاد مختلف انجام گرفت. بنابراین نشان داده شد که پارامترهای الاستیک توده‌سنگ را تقریباً می توان به وسیله ماتریس عکس سختی معادل طی شبیه‌سازی‌های عددی تعیین کرد. ولی در این مطالعه رفتار مقاومتی مورد مورد بررسی قرار نگرفت.

باغبانان در سال ۲۰۰۸ [۲۱] از روش DFN-DEM بصورت دو بعدی برای بررسی رفتار مقاومتی توده‌سنگ درزه‌دارتحت تنش‌های جانبی مختلف، زمانی که طول اثر درزه‌ها با دهانه‌ی بازشدگی همبستگی داشته باشند استفاده کرده و اندازه نماینده حجم معادل را برای مقاومت نهایی توده سنگ تعیین نمود.

خانی و همکاران در سال ۲۰۱۳ [۲۰، ۲۲] در تکمیل مطالعات گذشته از همین روش برای بررسی تأثیر چگالی شبکه‌ی شکستگی‌ها و تنش‌های جانبی بر پارامترهای دگرشکل‌پذیری و مقاومتی توده‌سنگ درزه‌دار در حالت دو بعدی استفاده کرده و ماتریس عکس سختی را برای آرایش‌های 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 جینگ در ۲۰۱۳ [۲۳] با استفاده از همین روش به بررسی تغییرات مدول دگرشکل پذیری و ضریب پواسون توده‌سنگ با تنش های جانبی مختلف و فشار آب پرداختند. همچنین تأثیر بارگذاری محوری تنش ثابت و سرعت ثابت بر پارامترهای مقاومتی و منحنی تنش-کرنش را برای حالت دو بعدی مورد بررسی قرار داد.

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 توده‌سنگ در حقیقت

[1]Universal Distinct Element Code
[2]Three Dimensional Distinct Element Code
[3]Compliance Tensor
[4] Min & Jing

فضایی سه بعدی است و در نظر گرفتن آن بصورت دوبعدی و تعمیم پارامترهای حاصله به بعد سوم ، از فرضیات لازم برای ساده‌سازی موضوع بوده و تخمین‌های براساس چنین روش‌هایی ممکن است دست بالا و محافظه کارانه و یا بلعکس دست پائین باشد، تصمیم گیری برپایه آن‌ها از صحت و دقت کافی برخوردار نیست. کد المان مجزا(3DEC)توسط کاندال و همکاران در ۱۹۸۸ برای غلبه بر این محدودیت در شبیه سازی رفتار توده‌سنگ‌های درزه دار توسعه داده شده است. بنابراین مدلسازی با استفاده روش‌های سه بعدی دقیق‌تر بوده و نسبت به سایر روش‌ها به واقعیت مسئله نزدیک‌تر است.

درسال ۲۰۰۴ کولاتیلاکه و همکاران[1] [۲۴] 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 دگرشکل‌پذیری بلوک سنگی با در نظر گرفتن ناهمسانگردی 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 شکستگی های مجزا معرف خوبی از رفتار توده سنگ شکسته در سه بعد نبوده است.

چنانچه گفته شد مطالعات انجام شده با استفاده از روش شبکه‌ی شکستگی‌های مجزا-المان مجزا بیشتر به صورت دو بعدی انجام گرفته اند. 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 شناخت بهتر رفتار مقاومتی و دگرشکل‌پذیری 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 توده‌سنگ با شبکه‌ی شکستگی‌های پیچیده در سه بعد بدست خواهد آمد.

۱-۲ هدف مورد بررسی

ساختار پیچیده‌ی توده‌سنگ درزه‌دار و فقدان آگاهی دقیق از توزیع هندسی شبکه شکستگی در طبیعت سبب شده تا هنوز هم بدون انجام آزمایش‌های آزمایشگاهی بزرگ مقیاس بر روی سنگ شکسته با ابعادی بزرگتر از نماینده حجم معادل، درک مفهومی حقیقی و جامعی از رفتار مقاومتی و دگرشکل‌پذیری توده‌سنگ ممکن نباشد. اما روش‌های مدلسازی عددی و به ویژه DEM در ارزیابی موضوعات مهمی مانند ناهمسانگردی مقاومت و دگرشکل‌پذیری در ابعاد REV ،که بر رفتار مکانیکی توده‌سنگ شکسته تأثیر گذارند، تواناترند. این امر از آنجا ناشی می‌شود که آزمایش‌های آزمایشگاهی بر روی چنین نمونه‌های عظیمی در حال حاضر و در آینده‌ی نزدیک امکان پذیر نبوده ولی شناخت چنین پدیده‌هایی از ملزومات مهندسی سنگ است که هدف پایان نامه حاضر نیز پرداختن به این مباحث است.

[1] Kulatilake et al

برای انجام مطالعه‌ی بنیادی رفتار مقاومتی و دگرشکل‌پذیری توده‌سنگ درزه‌دار از روش مدلسازی عددی استفاده شده است.بدین منظور بر روی تعدادی از مدل‌های سه بعدی با آرایش‌های شبکه‌ی شکستگی متفاوت، تأثیر تنش بر پارامترهای مقاومتی و دگرشکل پذیری بررسی شده است.

اهداف ویژه‌ی این پایان نامه عبارتند از :

- توسعه‌ی یک روش عددی به منظور تعیین پارامترهای دگرشکل‌پذیری توده‌سنگ درزه‌دار در سه بعد
- تعیین ماتریس عکس سختی میانگین برای توده‌سنگ شکسته در حالت سه بعدی و در ابعاد نماینده حجم معادل
- برآورد نماینده حجم معادل برای مقاومت نهایی توده‌سنگ شکسته در سه بعد
- بررسی تأثیر نوع و میزان تنش‌های جانبی در حالت تنش سه محوری قراردادی و واقعی و توسعه یافته بر روی مقاومت توده‌سنگ درزه‌دار و بررسی ناهمسانگردی رفتار مقاومتی
- تعیین پارامترهای مقاومتی معادل برای توده‌سنگ شکسته در حالت سه بعدی با استفاده از معیارهای شکست موهر-کلمب و هوک و براون تجربی و برازش شده و همچنین معیارهای سه بعدی و بررسی تفاوت این روش‌ها در برازش به پارامترهای مقاومتی

بدین منظور با استفاده از داده‌های مربوط به شکستگی‌های برداشت شده از منطقه سلافیلد[1] انگلستان، شبکه‌ی شکستگی‌های مجزا با استفاده از نرم افزار 3DEC نسخه ۵ [۲۵] با آرایش‌های مختلف تولید می‌شود و مدلسازی سه بعدی بر این اساس صورت می‌گیرد.

تابحال مطالعات و تحقیقاتی که در این زمینه صورت گرفته اکثراً بصورت دو بعدی بوده است که پارامترهای بدست آمده از این روش‌ها گرچه درست بوده و به فهم مسئله کمک می‌کنند اما نسبت به مدل‌های سه بعدی که به واقعیت نزدیک‌ترند، از میزان عدم قطعیت بالاتری برخوردارند. بنابراین طی این تحقیق تلاش براین است تا برای اولین بار با مدلسازی توده‌سنگ درزه دار به صورت سه بعدی و اعمال شرایط مرزی مناسب، پارامترهای مکانیکی توده‌سنگ در جهات مختلف و به کمک روش حل عددی تعیین گردد.

۱-۳ مروری بر فصول بعد

برای ارائه‌ی دور نمایی مناسب‌تر از مطالب گنجانده شده در قالب این پایان‌نامه، مباحث بررسی شده در هرکدام از ۴ فصل به اختصار آورده شده است. در فصول اول و دوم به ترتیب مختصری از پیشینه فعالیت و اهداف مورد بررسی ضمن این مطالعه و مروری مقایسه‌ای بر روش‌های تعیین پارامترهای مکانیکی توده‌سنگ درزه‌دار که تا به امروز ارائه شده‌اند آورده شده است. فصل سوم به معرفی نرم‌افزار مورد استفاده و سپس نحوه‌ی تولید شبکه‌ی شکستگی‌های مجزای سه بعدی با استفاده از داده‌های برداشت شده، پارامترهای هندسی و توابع توزیع آن‌ها و همچنین اعتبار سنجی شبکه‌های ایجاد شده و فرضیات مورد استفاده در ساخت شبکه‌های سه بعدی و سپس نحوه ساخت نمونه‌های بلوکی سه بعدی از

[1] Sellafield