بسم الله الرحمن الرحيم

**دانشگاه صنعتی اصفهان**

دانشکده مهندسی معدن

# تعیین مدول تغییر شکل پذیری توده سنگ به کمک آنالیز برگشتی با استفاده از مدل‌سازی عددی

پایان‌نامه کارشناسی ارشد مکانیک سنگ

**بهزاد مسگرمقدم**

استاد راهنما

**دکتر لهراسب فرامرزی**

**۱۳۹۳**

**دانشگاه صنعتی اصفهان**

دانشکده مهندسی معدن

پایان‌نامه کارشناسی ارشد رشته مکانیک سنگ آقای بهزاد مسگرمقدم

تحت عنوان

# تعیین مدول تغییر شکل پذیری توده سنگ به کمک آنالیز برگشتی با استفاده از مدل‌سازی عددی

در تاریخ توسط کمیته زیر مورد بررسی و تصویب نهایی قرار گرفت.

۱- استاد راهنمای پایان نامه دکتر لهراسب فرامرزی

۲- استاد مشاور پایان نامه مهندس سعید مهدوری

۳- استاد داور داخلی دکتر راحب باقرپور

۴- استاد داور خارجی دکتر محمدعلی روشن ضمیر

سرپرست تحصیلات تکمیلی دانشکده دکتر مرتضی طبائی

# تقدیر و تشکر

خداوند منان را شاکرم که این توفیق را نصیب بنده نمود تا پس از تلاش های فراوان و سختی های موجود در راه انجام این پایان نامه، این اثر را به سرانجام رسانم.

بدون شک اثری که ارائه شده است تنها حاصل تلاش فردی و شخص اینجانب نبوده و عوامل بسیاری از جمله مشاوره و راهنمایی های اساتید بزرگوار جناب آقای دکتر فرامرزی و جناب آقای مهندس مهدوری و همچنین دعای خیر و حمایت های بی دریغ خانواده ی عزیزم نقش بسزایی در آن داشته اند.

بدین وسیله از جناب آقای دکتر فرامرزی استاد راهنمای پایان نامه که در تمام مراحل انجام این تحقیق دلسوزانه راهنما و یاری رسان اینجانب بوده اند تشکر می نمایم.

همچنین از جناب آقای مهندس مهدوری به پاس مشاوره و راهنمایی های ارزشمند و راهگشای ایشان در انجام این پایان نامه کمال تشکر و قدردانی را دارم.

از اساتید گرانقدر جناب آقای دکتر روشن ضمیر و جناب آقای دکتر باقرپور به سبب قبول زحمت بازخوانی و داوری این اثر تشکر می نمایم.

از تمامی مسئولان و کارکنان دانشکده مهندسی معدن که در طول مدت تحصیل در این دانشکده کمال همکاری و مساعدت را با اینجانب داشته اند تشکر می نمایم و در نهایت از تمامی عزیزان، دوستان و هم کلاسی هایی که به هر نحو اینجانب را در انجام این پایان نامه یاری رساندند سپاسگزارم.

امید آنکه توانسته باشم با ارائه این اثر گوشه ای از زحمات تمامی این عزیزان را جبران نموده باشم.

بهزاد مسگر مقدم

شهریور ۱۳۹۳

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

تقدیم به :

# پدر و مادر عزیزم

که پس از خداوند متعال، خورشید هدایت و روشنی بخش زندگیم بوده و دعاهایشان همواره تکیه گاه تلاشهایم

# و آنانکه یادشان ترنم زندگیست

به امید آنکه شایسته فداکاری ها و قدردان محبت هایشان باشم

## فهرست مطالب

**عنوان** **صفحه**

فهرست مطالب.....هشت

فهرست شکل‌ها.....دوازده

فهرست جداول.....شانزده

چکیده..... ۱

**فصل اول: کلیات تحقیق**

۱-۱ مقدمه ..... ۲

۱-۲ مروری بر مطالعات گذشته ..... ۳

۱-۳ اهمیت موضوع و هدف از آن ..... ۶

۱-۴ محتوای فصل‌های بعدی ..... ۷

**فصل دوم: مدول تغییر شکل پذیری و روش‌های تعیین آن**

۲-۱ مقدمه..... ۸

۲-۲ اهمیت تعیین تغییر شکل پذیری در سنگ ..... ۸

۲-۳ مفهوم تغییر شکل پذیری در سنگ ..... ۹

۲-۴ روش‌های تعیین مدول در سنگ..... ۱۱

۲-۴-۱ روش‌های مستقیم..... ۱۱

۲-۴-۱-۱ آزمایش‌های آزمایشگاهی..... ۱۱

۲-۴-۱-۲ آزمایش‌های برجا..... ۱۱

۲-۴-۱-۳ عوامل مؤثر بر نتایج آزمایش‌های برجای تعیین مدول تغییر شکل پذیری ..... ۱۴
۲-۴-۲ روش‌های غیرمستقیم ..... ۱۵
۲-۴-۲-۱ روش‌های تحلیلی ..... ۱۵
۲-۴-۲-۲ روش‌های تجربی ..... ۱۹
۲-۴-۳ مقایسه بین مدول اندازه‌گیری شده برجا و تخمین غیر مستقیم (معادلات تجربی) بر مبنای نتایج *CSMRS* ..... ۲۱
۲-۴-۴ ارزیابی مدول تغییرشکل‌پذیری با استفاده از روابط تجربی ..... ۲۷

**فصل سوم: تحلیل برگشتی و روش‌های بهینه سازی آن**

۳-۱ مقدمه ..... ۲۹
۳-۲ کلیات تحلیل برگشتی ..... ۳۰
۳-۳ تحلیل مستقیم در مقایسه با تحلیل برگشتی ..... ۳۱
۳-۴ هدف از تحلیل برگشتی ..... ۳۴
۳-۵ انواع تحلیل برگشتی ..... ۳۵
۳-۶ فرضیات نهایی در استفاده از تحلیل برگشتی ..... ۳۶
۳-۷ روش‌های بهینه‌سازی در تحلیل برگشتی ..... ۳۶
۳-۷-۱ الگوریتم بهینه‌سازی ..... ۳۸
۳-۷-۲ بررسی به‌وسیله‌ی نتایج منتشر شده‌ی تحقیقات جئون ..... ۴۰

**فصل چهارم: موقعیت جغرافیایی، مشخصات زمین شناسی و پارامترهای ژئومکانیکی منطقه مورد مطالعه**

۴-۱ مشخصات کلی ساختگاه ..... ۴۲
۴-۲ زمین‌شناسی عمومی ..... ۴۳
۴-۲-۱ زمین‌شناسی منطقه‌ای ..... ۴۳
۴-۲-۲ زمین‌شناسی ساختگاه سد ..... ۴۳
۴-۳ زمین‌شناسی ساختمانی ..... ۴۸
۴-۴ پارامترهای ژئومکانیکی توده سنگ ساختگاه سد بختیاری ..... ۵۰
۴-۴-۱ تعیین مدول تغییرشکل‌پذیری ..... ۵۰

۴-۴-۲ تعیین چسبندگی و زاویه اصطکاک داخلی ..... ۵۱
۴-۴-۳ محاسبه ضریب تنش ($K_0$) ..... ۵۱

**فصل پنجم: مدل‌سازی با استفاده از نرم افزار FLAC 3D و تحلیل نتایج**

۵-۱ مقدمه ..... ۵۴
۵-۲ انواع روش‌های عددی ..... ۵۴
۵-۳ معرفی نرم افزار ..... ۵۵
۵-۴ مدل‌های رفتاری ..... ۵۶
۵-۵ المان‌های ساختاری ..... ۵۶
۵-۶ مکانیسم استفاده ..... ۵۶
۵-۷ مدل‌سازی عددی ..... ۵۷
۵-۷-۱ مدل‌سازی منطقه مورد مطالعه ..... ۵۷
۵-۷-۲ هندسه مدل ..... ۵۸
۵-۷-۳ مدل رفتاری و پارامترهای ژئومکانیکی ..... ۶۰
۵-۷-۴ شرایط اولیه و شرایط مرزی ..... ۶۰
۵-۷-۵ حل اولیه مدل ..... ۶۰
۵-۷-۶ اعمال بار ..... ۶۴
۵-۸ تحلیل نتایج اولیه ..... ۶۴
۵-۹ تحلیل برگشتی ..... ۶۶
۵-۹-۱ تابع خطا و انتخاب روش بهینه ..... ۶۶
۵-۹-۱-۱ تحلیل نتایج با استفاده از روش کمترین مربعات ..... ۶۸
۵-۹-۱-۲ تحلیل نتایج روش کمینه کردن بیشینه خطا ..... ۷۹
۵-۱۰ تعیین مدول تغییر شکل پذیری با استفاده از نتایج تحلیل برگشتی ..... ۹۱

**فصل ششم: نتیجه‌گیری و پیشنهاد**

۶-۱ نتایج ..... ۹۳

۶-۲ پیشنهاد ..... ۹۴

منابع ..... ۹۵

## فهرست شکل‌ها

**عنوان** **صفحه**


شکل ۲- ۱ . نمودار تغییر شکل پذیری توده سنگ ثبت شده در آزمایش تغییر شکل‌پذیری..... ۱۰

شکل ۲- ۲ . تعاریف مختلف برای تغییر شکل پذیری توده سنگ..... ۱۰

شکل ۲-۳ . محدوده پیشنهادی برای کاربری انواع روش‌های برجا..... ۱۳

شکل ۲-۴ . اصول دو روش اندازه‌گیری تغییر شکل پذیری..... ۱۳

شکل ۲-۵ . برپا کردن آزمایش جک صفحه‌ای با نصب کشش سنج‌های چند نقطه‌ای در توده سنگ و اندازه‌گیری تغییر شکل پذیری در صفحات بارگذاری..... ۱۴

شکل ۲- ۶ . تغییر شکل پذیری در مقابل حجم مورد آزمایش توده سنگ..... ۱۶

شکل ۲- ۷ . مدول تغییر شکل پذیری توده سنگ در مقابل جهت درزه داری و حجم تحت آزمایش..... ۱۶

شکل ۲-۸ . روش‌های مختلف تعیین مدول و انواع آن..... ۱۶

شکل ۲- ۹ . مفهوم یک محیط معادل پیوسته در یک توده سنگ درزه‌دار..... ۱۸

شکل ۲- ۱۰ . رابطه بین $RMR$ و مدول تغییرشکل‌پذیری $Em$..... ۲۲

شکل ۲- ۱۱ . رابطه بین $Q$ و مدول تغییرشکل‌پذیری $Em$..... ۲۳

شکل ۲- ۱۲ . رابطه بین $RMi$ و مدول تغییرشکل‌پذیری $Em$..... ۲۴

شکل ۲- ۱۳ . مدول تغییرشکل‌پذیری توده سنگ متراکم محاسبه شده از آزمایشهای آزمایشگاهی، $RMR$، $Q$، $RMi$..... ۲۵

شکل ۲- ۱۴ . رابطه بین‌مدول تغییرشکل‌پذیری و $RMR$..... ۲۶

شکل ۲- ۱۵ . رابطه بین مدول تغییرشکل‌پذیری و $GSI$..... ۲۶

شکل ۲- ۱۶ . مقایسه مقادیر مدول تخمین زده شده و اندازه‌گیری شده..... ۲۷

شکل ۳-۱ . تحلیل مستقیم در مقابل تحلیل برگشتی..... ۳۲

شکل ۳- ۲ . اطلاعات مربوط به شبیه‌سازی طبیعی ساخت تونل..... ۳۲
شکل ۳-۳ . رفتار کمیت اندازه‌گیری شده نسبت به مراحل ساخت..... ۳۴
شکل ۳-۴ . مراحل جستجوی نقطه‌ی بهینه..... ۳۷
شکل ۳-۵ . فلوچارت گام‌های محاسباتی..... ۳۸
شکل ۳-۶ . طرح اصلی روش جستجوی الگویی..... ۳۹
شکل ۳-۷ . طرح کلی مدل به‌کار رفته در مطالعات جئون..... ۴۰
شکل ۳-۸ . مراحل جستجو در هر روش در حالت اول در تحقیقات جئون..... ۴۱
شکل ۳-۹ . مراحل جستجو در هر روش در حالت دوم در تحقیقات جئون..... ۴۱
شکل ۴-۱ . موقعیت جغرافیایی ساختگاه سد بختیاری..... ۴۲
شکل ۴-۲ . محل ساختگاه احداث سد..... ۴۳
شکل ۴-۳ . مقطع زمین‌شناسی تکیه‌گاه سمت چپ سد و نیروگاه بختیاری..... ۴۴
شکل ۴-۴ . سازند $Sv5$ به همراه گرهگ‌های سیلیسی..... ۴۷
شکل ۴-۵ . سازند هفتم سروک $Sv7$ ..... ۴۸
شکل ۴-۶ . تاقدیس ایجاد شده در محل سد..... ۴۹
شکل ۴-۷ . تصویر شماتیک از آزمایش بارگذاری صفحه‌ای..... ۵۰
شکل ۴-۸ . سیکل اول و دوم نمودار شماتیک فشار بر حسب زمان عملیات شکست هیدرولیکی..... ۵۲
شکل ۵-۱ . هندسه کلی مدل ساخته شده..... ۵۹
شکل ۵-۲ . مش بندی اعمال شده به مدل..... ۵۹
شکل ۵-۳ . نمودار نیروهای نامتعادل‌کننده پس از حل اولیه مدل..... ۶۱
شکل ۵-۴ . وضعیت تنش‌ها در راستای z پس از حل اولیه مدل..... ۶۱
شکل ۵-۵ . هندسه مدل پس از حفر گالری داخلی..... ۶۲
شکل ۵-۶ . نمودار نیروهای نامتعادل‌کننده پس از حفر گالری داخلی..... ۶۳
شکل ۵-۷ . منحنی میزان جابجایی نسبت به تغییرات عمق در چهار بارگذاری مشخص..... ۶۵

شکل ۵-۸ . منحنی میزان جابجایی نسبت به تغییرات بار وارده در اعماق مشخص..... ۶۵
شکل ۵-۹ . مقادیر محاسبه شده‌ی تابع خطا به روش کمترین مربعات برای سه گام بارگذاری ۵۰۰، ۶۰۰ و ۷۵۰ ..... ۶۸
شکل ۵-۱۰ . تغییرات جابجایی نسبت به عمق تحت بار ۳ مگاپاسکال در دیواره سمت راست با گام بارگذاری ۷۵۰..... ۶۹
شکل ۵-۱۱ . تغییرات جابجایی نسبت به عمق تحت بار ۵ مگاپاسکال در دیواره سمت راست با گام بارگذاری ۷۵۰..... ۷۰
شکل ۵-۱۲ . تغییرات جابجایی نسبت به عمق تحت بار ۷ مگاپاسکال در دیواره سمت راست با گام بارگذاری ۷۵۰..... ۷۰
شکل ۵-۱۳ . تغییرات جابجایی نسبت به عمق تحت بار ۱۰ مگاپاسکال در دیواره سمت راست با گام بارگذاری ۷۵۰..... ۷۱
شکل ۵-۱۴ . تغییرات جابجایی نسبت به عمق تحت بار ۳ مگاپاسکال در دیواره سمت چپ با گام بارگذاری ۷۵۰..... ۷۱
شکل ۵-۱۵ . تغییرات جابجایی نسبت به عمق تحت بار ۵ مگاپاسکال در دیواره سمت چپ با گام بارگذاری ۷۵۰..... ۷۲
شکل ۵-۱۶ . تغییرات جابجایی نسبت به عمق تحت بار ۷ مگاپاسکال در دیواره سمت چپ با گام بارگذاری ۷۵۰..... ۷۲
شکل ۵-۱۷ . تغییرات جابجایی نسبت به عمق تحت بار ۱۰ مگاپاسکال در دیواره سمت چپ با گام بارگذاری ۷۵۰..... ۷۳
شکل ۵-۱۸ . تغییرات جابجایی نسبت به بار وارده در سطح بارگذاری در دیواره سمت راست با گام بارگذاری ۷۵۰..... ۷۴
شکل ۵-۱۹ . تغییرات جابجایی نسبت به بار وارده در عمق ۱ متر در دیواره سمت راست با گام بارگذاری ۷۵۰..... ۷۴
شکل ۵-۲۰ . تغییرات جابجایی نسبت به بار وارده در عمق ۱,۵ متر در دیواره سمت راست با گام بارگذاری ۷۵۰..... ۷۵
شکل ۵-۲۱ . تغییرات جابجایی نسبت به بار وارده در عمق ۲ متر در دیواره سمت راست با گام بارگذاری ۷۵۰..... ۷۵
شکل ۵-۲۲ . تغییرات جابجایی نسبت به بار وارده در عمق ۳ متر در دیواره سمت راست با گام بارگذاری ۷۵۰..... ۷۶
شکل ۵-۲۳ . تغییرات جابجایی نسبت به بار وارده در سطح بارگذاری در دیواره سمت چپ با گام بارگذاری ۷۵۰..... ۷۶
شکل ۵-۲۴ . تغییرات جابجایی نسبت به بار وارده در عمق ۱ متر در دیواره سمت چپ با گام بارگذاری ۷۵۰..... ۷۷
شکل ۵-۲۵ . تغییرات جابجایی نسبت به بار وارده در عمق ۱,۵ متر در دیواره سمت چپ با گام بارگذاری ۷۵۰..... ۷۷
شکل ۵-۲۶ . تغییرات جابجایی نسبت به بار وارده در عمق ۲ متر در دیواره سمت چپ با گام بارگذاری ۷۵۰..... ۷۸
شکل ۵-۲۷ . تغییرات جابجایی نسبت به بار وارده در عمق ۳ متر در دیواره سمت چپ با گام بارگذاری ۷۵۰..... ۷۸
شکل ۵-۲۸ . مقادیر محاسبه شده‌ی تابع خطا به روش کمینه کردن بیشینه خطا برای سه گام بارگذاری ۵۰۰، ۶۰۰ و ۷۵۰ ..... ۷۹
شکل ۵-۲۹ . مقادیر جابجایی در اعماق و بارهای مختلف در آزمایش بارگذاری صفحه‌ای انجام شده..... ۸۰

شکل ۵-۳۰ . تغییرات جابجایی نسبت به عمق تحت بار ۳ مگاپاسکال در دیواره سمت راست با گام بارگذاری ۵۰۰..... ۸۱
شکل ۵-۳۱ . تغییرات جابجایی نسبت به عمق تحت بار ۵ مگاپاسکال در دیواره سمت راست با گام بارگذاری ۵۰۰..... ۸۱
شکل ۵-۳۲ . تغییرات جابجایی نسبت به عمق تحت بار ۷ مگاپاسکال در دیواره سمت راست با گام بارگذاری ۵۰۰..... ۸۲
شکل ۵-۳۳ . تغییرات جابجایی نسبت به عمق تحت بار ۱۰ مگاپاسکال در دیواره سمت راست با گام بارگذاری ۵۰۰..... ۸۲
شکل ۵-۳۴ . تغییرات جابجایی نسبت به عمق تحت بار ۳ مگاپاسکال در دیواره سمت چپ با گام بارگذاری ۵۰۰..... ۸۳
شکل ۵-۳۵ . تغییرات جابجایی نسبت به عمق تحت بار ۵ مگاپاسکال در دیواره سمت چپ با گام بارگذاری ۵۰۰..... ۸۳
شکل ۵-۳۶ . تغییرات جابجایی نسبت به عمق تحت بار ۷ مگاپاسکال در دیواره سمت چپ با گام بارگذاری ۵۰۰..... ۸۴
شکل ۵-۳۷ . تغییرات جابجایی نسبت به عمق تحت بار ۱۰ مگاپاسکال در دیواره سمت چپ با گام بارگذاری ۵۰۰..... ۸۴
شکل ۵-۳۸ . تغییرات جابجایی نسبت به بار وارده در سطح بارگذاری در دیواره سمت راست با گام بارگذاری ۵۰۰..... ۸۶
شکل ۵-۳۹ . تغییرات جابجایی نسبت به بار وارده در عمق ۱ متر در دیواره سمت راست با گام بارگذاری ۵۰۰..... ۸۶
شکل ۵-۴۰ . تغییرات جابجایی نسبت به بار وارده در عمق ۱,۵ متر در دیواره سمت راست با گام بارگذاری ۵۰۰..... ۸۷
شکل ۵-۴۱ . تغییرات جابجایی نسبت به بار وارده در عمق ۲ متر در دیواره سمت راست با گام بارگذاری ۵۰۰..... ۸۷
شکل ۵-۴۲ . تغییرات جابجایی نسبت به بار وارده در عمق ۳ متر در دیواره سمت راست با گام بارگذاری ۵۰۰..... ۸۸
شکل ۵-۴۳ . تغییرات جابجایی نسبت به بار وارده در سطح بارگذاری در دیواره سمت چپ با گام بارگذاری ۵۰۰..... ۸۸
شکل ۵-۴۴ . تغییرات جابجایی نسبت به بار وارده در عمق ۱ متر در دیواره سمت چپ با گام بارگذاری ۵۰۰..... ۸۹
شکل ۵-۴۵ . تغییرات جابجایی نسبت به بار وارده در عمق ۱,۵ متر در دیواره سمت چپ با گام بارگذاری ۵۰۰..... ۸۹
شکل ۵-۴۶ . تغییرات جابجایی نسبت به بار وارده در عمق ۲ متر در دیواره سمت چپ با گام بارگذاری ۵۰۰..... ۹۰
شکل ۵-۴۷ . تغییرات جابجایی نسبت به بار وارده در عمق ۳ متر در دیواره سمت چپ با گام بارگذاری ۵۰۰..... ۹۰

# فهرست جداول

**عنوان** **صفحه**


جدول۱-۱ . برخی روابط تجربی برای تعیین مدول تغییر شکل پذیری توده سنگ..... ۵

جدول ۱-۲ . برخی مطالعات صورت گرفته توسط محققان..... ۶

جدول ۲- ۱. مهم‌ترین روابط تجربی موجود برای تخمین مدول تغییرشکل‌پذیری توده سنگ..... ۲۰

جدول ۲- ۲. مقادیر متفاوت مدول تغییرشکل‌پذیری در توده سنگ متراکم..... ۲۵

جدول ۲-۳ . رابطه‌بین‌مدول‌تغییر شکل‌پذیری‌برجاوپارامترهای $RMR$ و $GSI$..... ۲۵

جدول ۲-۴ . مقادیر $RSME$ و تعداد داده‌های به‌کار گرفته شده برای تخمین مدول تغییرشکل‌پذیری از معادلات تجربی موجود..... ۲۸

جدول۲-۵ . مقایر $RMSE$ برای تخمین مدول تغییرشکل‌پذیری برای معادلات تجربی..... ۲۸

جدول ۴-۱ . پارامترهای ژئومکانیکی توده سنگ تکیه‌گاه چپ سد بختیاری..... ۵۱

جدول ۴-۲ . پارامترهای استحکام برشی توده سنگ دیواره چپ سد..... ۵۱

جدول ۴-۳ . نتایج حاصل از آزمایش شکست هیدرولیکی در تکیه‌گاه چپ سد..... ۵۳

جدول ۵-۱ . مشخصات هندسی مدل..... ۶۰

جدول ۵-۲ . عمق نقاط در نظر گرفته شده در مدل و در آزمایش برجا..... ۶۷

جدول ۵-۳ . مقادیر محاسبه شده و اختصاص یافته مدول تغییر شکل پذیری در حالات مختلف..... ۹۱

## چکیده

مدول تغییر شکل پذیری توده سنگ یکی از پارامترهای مهم در طراحی سازه‌ها درون محیط های سنگی می باشد. پارامتر تغییر شکل پذیری نشان دهنده‌ی میزان تغییر شکل توده سنگ در پاسخ به هرگونه بارگذاری یا باربرداری می‌باشد. تعیین این پارامتر بصورت مستقیم از آزمایش‌های برجا و بصورت غیرمستقیم به کمک روابط تجربی و تحلیلی انجام می‌گیرد. آزمایش بارگذاری صفحه‌ای یکی از پرکاربردترین آزمایش‌های تعیین مدول تغییر شکل پذیری توده سنگ می‌باشد. این آزمایش شامل یک یا چند جک هیدرولیکی است که بار را در سطح توده سنگ اعمال می‌کنند. جابجایی توده سنگ از طریق کشش‌سنج‌هایی که روی سطح صفحات نصب می‌شوند اندازه-گیری می‌شود. معمولاً پنج سنسور جابجایی‌سنج پشت صفحه بارگذاری در گالری حفر شده داخل توده سنگ با فواصل مختلف نصب می‌شود. آزمایش در چند مرحله بارگذاری و بار برداری تا رسیدن به تنش مطلوب انجام می‌شود. به‌طور کلی روش‌های تحلیل برگشتی را می‌توان به دو دسته معکوس و مستقیم تقسیم کرد. در تحقیق حاضر از روش مستقیم برای تحلیل برگشتی استفاده شده است. در این روش با استفاده از روش سعی و خطا اختلاف بین مقادیر محاسبه شده از مدل‌سازی آزمایش بارگذاری صفحه‌ای و اندازه‌گیری شده از آزمایش برجا به حداقل ممکن کاهش یافته و مجهولات مورد نظر ارزیابی می‌شوند. در تحقیق حاضر از نرم افزار *FLAC 3D* برای مدل‌سازی عددی آزمایش بارگذاری صفحه‌ای استفاده شده است. با اعمال شرایط واقعی توده سنگ منطقه مورد مطالعه به مدل و شبیه‌سازی آزمایش بارگذاری صفحه‌ای، نتایج اولیه استخراج گردید. پس از انجام تحلیل‌های برگشتی مختلف مشخص گردید که گام‌های بارگذاری ۵۰۰ ، ۶۰۰ و ۷۵۰ نزدیک‌ترین نتایج را به مقادیر واقعی آزمایش برجا دارند. به منظور بررسی و مقایسه نتایج حاصل از تحلیل‌های برگشتی و انتخاب مناسب‌ترین حالت، توابع خطا تشکیل و با یکدیگر مقایسه شدند که برای این منظور در تحقیق حاضر از روش‌های کمترین مربعات و روش کمینه کردن بیشینه خطا استفاده شده است. گام بارگذاری ۷۵۰ در روش کمترین مربعات و گام بارگذاری ۵۰۰ در روش کمینه کردن بیشینه خطا مناسب‌ترین نتایج را داشتند. با مقایسه‌ی گام‌های بارگذاری ۷۵۰ و ۵۰۰ در هر سیکل بارگذاری مشخص می شود که گام بارگذاری ۵۰۰ نتایج بهتر و دقیق‌تری را ارائه می‌دهد چراکه اختلاف میان مقادیر حاصل از آزمایش برجا، مدل‌سازی و روش نظری در این روش در قیاس با نتایج حاصل از گام بارگذاری ۷۵۰ کمتر هستند. در نهایت مشخص گردید که بیشترین مطابقت بین نتایج آزمایش برجا و مدل‌سازی صورت گرفته با اعمال ۵۰۰ گام در هر مرحله از بارگذاری به مدل حاصل می‌شود. با انجام این عمل مدول تغییر شکل پذیری منطقه مورد مطالعه با اعمال تحلیل برگشتی بر روی نتایج حاصل از مدل‌سازی تعیین گردید که تطابق مناسبی با مدول اولیه‌ی در نظر گرفته شده برای منطقه دارد.

**کلمات کلیدی:** مدول تغییر شکل پذیری، آزمایش بارگذاری صفحه‌ای، تحلیل برگشتی، تابع خطا، مدل‌سازی عددی، *FLAC 3D*

# فصل اول

# کلیات تحقیق

## ۱-۱مقدمه

مدول تغییر شکل پذیری توده سنگ یکی از پارامترهای مهم در طراحی سازه‌ها درون محیط‌های سنگی می باشد. تعیین این پارامتر بصورت مستقیم از آزمایش‌های برجا و بصورت غیرمستقیم به کمک روابط تجربی انجام می‌گیرد. در پروژه‌های بزرگ ژئوتکنیکی مدول تغییر شکل پذیری توده سنگ به عنوان مهمترین پارامتر کنترل کننده‌ی تغییر شکل سازه در نظر گرفته می‌شود. آزمایش بارگذاری صفحه‌ای یکی از پرکاربردترین آزمایش‌های تعیین مدول تغییر شکل پذیری توده سنگ می‌باشد. تعیین این پارامتر از آزمایش بارگذاری صفحه‌ای ساده به‌نظر می‌رسد، اگرچه تفسیرنتایج حاصل ازین آزمایش بسیار پیچیده می‌باشد[۱].

آزمایش بارگذاری صفحه‌ای به دو صورت صلب و انعطاف پذیر انجام می‌پذیرد. این آزمایش شامل یک یا چند جک هیدرولیکی است که بار را در سطح توده سنگ اعمال می‌کنند. جابجایی توده سنگ از طریق کشش‌سنج‌هایی[۱] که روی سطح صفحات نصب می‌شوند اندازه‌گیری می‌شود. معمولاً پنج سنسور جابجایی سنج پشت صفحه بارگذاری در گالری حفر شده داخل توده سنگ با فواصل مختلف نصب می‌شود. آزمایش در پنج مرحله بارگذاری و بار برداری تا رسیدن به تنش مطلوب انجام می‌شود[۲]. عواملی چون جابجایی خود صفحات، بسته شدن فاصله بین صفحه و توده سنگ و بسته شدن ترک‌های ایجاد شده در اثر انفجار باعث ایجاد خطا دراین آزمایش می‌شوند. نتایج آزمایش بارگذاری صفحه‌ای صلب، زمانی قابل اعتماد است که جابجایی‌ها در عمق، در پشت صفحات بارگذاری اندازه‌گیری شوند. ازاینرو تغییرشکل‌ها بایستی تاجای ممکن توسط کشش‌سنج‌های چند نقطه‌ای اندازه‌گیری شوند[۳]. شرایط آزمایش بارگذاری صفحه‌ای انعطاف‌پذیر دقیقاً مانند آزمایش بارگذاری صفحه‌ای صلب می‌باشد با این تفاوت که صفحات بکار رفته در این آزمایش از نوع انعطاف‌پذیر بوده و تنش به‌صورت یکنواخت به توده سنگ اعمال می‌شود. در نتیجه بایستی جابجایی‌ها در زیر صفحات بارگذاری اندازه‌گیری شوند. تحلیل برگشتی به عنوان یک روش جدید، تکنیک مناسبی برای ارزیابی پارامترهای توده‌ی سنگ و خاک و پیش‌بینی رفتار مکانیکی آنهاست. اغلب تکنیک‌های تحلیل برگشتی در مسائل مهندسی ژئوتکنیک، بر مبنای روش‌هایی پایه‌گذاری شده‌اند که از داده‌های پردازش شده‌ی

[۱] Extensometer

تنش،کرنش و جابجایی استفاده می‌کنند. این تکنیک یکی ازمهم‌ترین مراحل در طراحی و ارزیابی پایداری پروژه-های ژئوتکنیکی است و در حقیقت برای ارزیابی پارامترهای طراحی ضروری به‌نظر می‌رسد[۴].

### ۱-۲ مروری بر مطالعات گذشته

یکی از روش‌های تعیین مدول تغییرشکل پذیری انجام آزمایش‌های برجاست و روش دیگر استفاده از روابط تجربی است که توسط محققین مختلفی ارائه شده است.آزمایش‌های برجا هم زمان بر و هم از نظر هزینه گران هستند، بنابراین معادلات تجربی برای تخمین ویژگی‌های توده سنگ توسعه یافته است.

تغییر شکل پذیری توده سنگ به‌وسیله‌ی انواع مختلف آزمایش‌های بارگذاری[۵]، آزمایش‌های بارگذاری صفحه-ای[۶]، آزمایش‌های جک تخت کوچک و بزرگ[۷]، آزمایش‌های جک شعاعی[۶]و آزمایش‌های گسترش گمانه [۸,۹] تعیین می شود.

باید به این نکته توجه نمود که اغلب روش‌های تجربی در مهندسی سنگ مقادیر میانگین را ارائه می‌دهندکه ممکن است دارای دامنه تغییرات و اختلاف شاخصی باشند. محققان بسیاری روابط تجربی مختلفی را برای تخمین مدول تغییرشکل پذیری با استفاده از سیستم‌های طبقه‌بندی $RMR$ ، $Q$ ، $GSI$ و $RQD$ ارائه نموده‌اند که از آنها می توان به بینیاوسکی[۱] (۱۹۷۸)[۱۰]، سرافیم و پریرا [۲] (۱۹۸۳)[۱۱]، نیکولسن و بینیاوسکی[۳] (۱۹۹۰)[۱۲]، مهروترا[۴] (۱۹۹۲)[۱۳] ، گریمستاد و بارتون[۵] (۱۹۹۳)[۱۴]، میتری و همکاران[۶] (۱۹۹۶)[۱۵]، هوک و براون[۷] (۱۹۹۷)[۱۶]، پالمستروم و سینگ[۸] (۲۰۰۱)[۱۷]، بارتون[۹] (۲۰۰۲)[۱۸]،گالرا و همکاران[۱۰] (۲۰۰۵)[۱۹]، هوک و دیدریچ[۱۱] (۲۰۰۶)[۲۰]و شن و همکاران[۱۲] (۲۰۱۲)[۲۱] اشاره نمود. محمدی و رحمان نژاد (۲۰۰۹)[۲۲]و خبازی (۲۰۱۲)[۲۳]، مدول تغییرشکل پذیری توده سنگ را با استفاده ازآنالیز رگرسیون و شبکه‌های عصبی مصنوعی و یک سیستم طبقه بندی سنگ تخمین زدند. ژانگ و اینشتین[۱۳] (۲۰۰۴)، مدول تغییرشکل پذیری توده سنگ را با استفاده از $RQD$ تخمین

---

[۱] Bieniawaski

[۲] Serafim and Pereira

[۳] Nicholson and Beiniawski

[۴] Mehrotra

[۵] Grimstad and Barton

[۶] Mitri et al

[۷] Hoek and Brown

[۸] Palmstrom and Sing

[۹] Barton

[۱۰] Galera et al

[۱۱] Hoel and Diederichs

[۱۲] Shen et al

[۱۳] Zhang and Einstein

زدند[۲۴]. سانمز همکاران[۱] (۲۰۰۴)، یک مدل تجربی برای محاسبه‌ی مدول تغییرشکل پذیری توده سنگ بر مبنای سیستم *GSI* ارائه دادند[۲۵].

چان و همکاران[۲] مدلی را جهت تخمین مدول تغییرشکل پذیری بر مبنای آنالیز رگرسیون چندگانه و چند متغیره‌ی سیستم *RMR* ارائه دادند[۲۶].

در سال ۲۰۰۸ پنج آزمایش بارگذاری صفحه‌ای در گالری نیروگاه برق‌آبی فلدسی[۳] در اتریش به‌منظور تعیین مدول تغییر شکل پذیری توده سنگ توسط رادونکیچ و همکاران[۴] انجام گرفته است. توده سنگ مذکور یکپارچه، بدون هوازدگی و پیوسته است. جابجایی‌های صورت گرفته در فواصل ۳۰،۵۰ ، ۱۲۵و۲۳۰ سانتی‌متری از صفحه‌ی بارگذاری در داخل توده‌سنگ اندازه‌گیری شده‌اند[۲۷]. تحلیل عددی این گالری توسط خدابخشی و شمس الدین سعید(۱۳۹۱)، با استفاده از نرم افزار تفاضل محدود *FLAC 3D* انجام و شرایط اولیه و مرزی مشابه شرایط واقعی محل اعمال شده است. در این تحلیل عددی منحنی بار-جابجایی برای ۱۰ نقطه در داخل توده سنگ رسم و مدول تغییر شکل پذیری محاسبه شده است. در مورد پروژه فوق، دامنه‌ی وسیع مدول بدست آمده در تحلیل عددی به دلیل دامنه‌ی گسترده‌ی بارگذاری، ارزیابی شده است[۲۸].

در مدل‌سازی عددی، ویژگی‌های توده‌ی سنگ بسیار مهم هستند. علاوه برآن،کنترل نتایج مدل‌ها به‌وسیله‌ی تحلیل برگشتی از اهمیت بالایی برخوردار است. برخی روابط تجربی برای تعیین مدول تغییر شکل پذیری توده سنگ در جدول ۱-۱ آورده شده است[۱]. مطالعات ونتایج مدل‌سازی‌های عددی بر مبنای معادلات تجربی باید توسط اندازه-گیری های برجا تایید شوند. با مقایسه‌ی نتایج حاصل از مدل‌سازی عددی و اندازه‌گیری‌های برجا میزان کارایی مدول تغییر شکل پذیری که از طریق روابط تجربی به‌دست آمده است، حاصل می‌شود.

طی مطالعات صورت گرفته در کشور ترکیه توسط اُکای آکسوی و همکاران[۵] در سال ۲۰۱۲ بر روی ۱۲ تونل نیروگاه برق‌آبی و ۳ تونل مترو در شرایط متفاوت سنگی، مدول تغییر شکل پذیری توده سنگ توسط روابط تجربی مختلف مورد ارزیابی قرار گرفت. نتایج مدل‌سازی عددی که در آن از مدول تغییر شکل پذیری محاسبه شده استفاده شده و همچنین نتایج اندازه‌گیری‌های برجا، باهم مقایسه شده ونتایج زیر حاصل شده اند[۱]:

۱- مدول‌های تغییرشکل پذیری به‌دست آمده از رابطه‌ی تجربی بارتون(۲۰۰۲) بزرگتر از سایر روابط تجربی هستند. در نتایج مدل عددی تغییر شکل پذیری کمتری با توجه به مقادیر تغییر شکل پذیری اندازه گیری شده برجا، به‌دست آمده است.

---

[۱] Sonmez et al

[۲] Chun et al

[۳] Feldsee

[۴] Radoncic et al

[۵] Okay Aksoy et al

جدول۱-۱ . برخی روابط تجربی برای تعیین مدول تغییر شکل پذیری توده سنگ . [۱].

| Researchers | Equation | Notes |
|---|---|---|
| Bieniawski (1978) | $E_{mass}=2\,RMR-100\ (GPa)$ | For RMR>50 |
| Sefarim and Pereira (1983) | $E_{mass}=10^{(RMR-10)/40}\ (GPa)$ | For RMR<50 |
| Nicholson and Bieniawski (1990) | $E_{mass}=\frac{E_i}{100}\left[0.0028\,RMR^2+0.9\exp\left(\frac{RMR}{22.82}\right)\right]$ | |
| Mitri et al. (1994) | $E_{mass}=E_i\left[0.5\left\{1-\cos\left(\pi\frac{RMR}{100}\right)\right\}\right]$ | |
| Palmström (1996) | $E_{mass}=5.6\,RMi^{0.375}\ (GPa)$ | For 1>RMi>0.1, moderately jointed rock mass |
| Palmstrom and Singh (2001) | $E_{mass}=7\,RMi^{0.4}\ (GPa)$ | For 1<RMi<30, moderately jointed rock mass |
| Hoek and Brown (1997) | $E_{mass}=\sqrt{\frac{\sigma_{ci}}{100}}\,10^{\left(\frac{GSI-10}{40}\right)}(GPa)$ | For $\sigma_{ci}$<100 MPa |
| Read et al. (1999) | $E_{mass}=0.1\left(\frac{RMR}{10}\right)^3\ (GPa)$ | |
| Barton (2002) | $E_{mass}=10\,Q_c^{\frac{1}{3}}\quad Q_c=Q\,\sigma_{ci}/100$ | |
| Kayabasi et al. (2003) | $E_{mass}=0.135\left[\frac{E_i(1+RQD/100)}{WD}\right]^{1.1811}$ | |
| Gokceoglu et al. (2003) | $E_{mass}=0.001\left[\frac{(E_i/\sigma_{ci})\ (1+RQD/100)}{WD}\right]^{1.5528}$ | |
| Sonmez et al. (2004) | $E_{mass}=E_i(s^a)^{0.4}\quad s=\exp[(RMR-100)/9]$<br>$a=0.5+1/6[\exp(-GSI/15)-\exp(-20/3)]$ | |
| Sonmez et al. (2006) | $E_{mass}=E_i10^{[((RMR-100)(100-RMR)/4000\exp(-RMR/100))]}$ | $s=\exp[(RMR-100)/9]$ |
| Hoek and Diederichs (2006) | $E_{mass}=E_i\left(0.02+\frac{1-D/2}{1+e^{(60-15\,D-GSI)/11}}\right)$ | If there is no deformation measurement on intact rock material: $E_i=MR\cdot\sigma_{ci}$ |

۲- مدول تغییر شکل پذیری محاسبه شده از طریق رابطه‌ی پیشنهادی پالمستروم و سینگ (۲۰۰۱)، نتایج واقعی-تری را در تونلی که توده سنگ سخت و بلوک‌های با ابعاد بزرگ دارد ارائه می‌دهد.

۳- مدول تغییرشکل پذیری محاسبه شده از رابطه‌ی پیشنهادی سانمز و همکاران(۲۰۰۴) و هوک و دایدریچز(۲۰۰۶) بسیار نزدیک به یکدیگر هستند. هرچند مقادیر تغییر شکل بدست آمده از رابطه‌ی پیشنهادی سانمز و همکاران(۲۰۰۴)، نسبت به رابطه‌ی پیشنهادی هوک و دیدریش(۲۰۰۶)، در سنگ-های سخت و با ابعاد بلوک بزرگ،کوچک‌تر و در سنگ‌های ضعیف با ابعاد بلوک کوچک، بزرگ‌تر هستند.

۴- کاربرد رابطه‌ی پیشنهادی سانمز و همکاران (۲۰۰۴)، برای محاسبه‌ی مدول تغییر شکل پذیری توده سنگ در مدل‌سازی عددی منجر به حصول نتایج واقعی‌تری شده است.

در رابطه با روش‌های تجربی و مباحث و روابط مربوط به آنها در فصل دوم بحث خواهد شد. در جدول ۱-۲ نیز برخی مطالعات صورت گرفته در رابطه با مدول تغییرشکل پذیری آورده شده است.