

بِسْمِ اللّٰهِ الرَّحْمٰنِ الرَّحِیْمِ



دانشگاه شهید باهنر کرمان

دانشکده فنی و مهندسی

گروه مهندسی معدن

پایان نامه تخصصی برای دریافت درجه کارشناسی ارشد مهندسی معدن گرایش مکانیک سنگ

عنوان پایان نامه:

---

# تعیین مدول توده سنگ ساختمگاه سد تختیاری؛ براساس روش های تجربی و آزمایش بارگذاری صفحه ای

---

**اساتید راهنما:**

دکتر سعید کریمی نسب

دکتر حسین جلالی فر

**استاد مشاور:**

مهندس فرزاد رفیعا

**استاد مشاور صنعتی:**

مهندس علی محمد رادمان

**تهیه کننده:**

علی آخوندبابایی طبری

شهریورماه ۱۳۸۸

ب



دانشگاه شهید باهنر کرمان

این پایان نامه به عنوان یکی از شرایط احراز درجه کارشناسی ارشد به

**گروه مهندسی معدن**

**دانشکده فنی و مهندسی**

**دانشگاه شهید باهنر کرمان**

تسلیم شده است و هیچگونه مدرکی به عنوان فراغت از تحصیل دوره مزبور شناخته نمی شود.

دانشجو: **علی آخوند بابایی طبری**

استادان راهنما پروژه:

**دکتر کریمی نسب**

**دکتر حسین جلالی فر**

داور ۱: **دکتر منصوری**

داور ۲: **دکتر باقری پور**

معاونت پژوهشی و نماینده تحصیلات تکمیلی دانشکده: **دکتر صفاری پور**

حق چاپ محفوظ و مخصوص به دانشگاه است

شاید این صفحه همان پنجره رویایی است  
... که من از شیشه شفاف لغات،  
روی زیبای تو را می بینم.  
گاه تاییدن مهتاب حضور، و نسیمی که معطر به تو و شادابی است،  
می خورد بر تن این پنجره رویایی.  
واژه ها می خوانند، غزل مستی تو..... شعر بیتابی من  
و گل هر کلمه، رنگ عشقی دارد؛  
که در اندیشه من  
رنگ دیدار تو است.  
ای صدایت پر از آرامش روح،  
و دلت آینه پاک وجود،  
باورت هست که من نغمه وصل تو بر لب دارم؟  
و به یاد نامت همه شب تا به سحر بیدارم؟؟؟؟

تقدیم به ساحت مقدس و نورانی امام زمان (عج)

## تشکر و قدردانی:

اوراق زرین تاریخ تربیت، سیمای درخشان مریبان نام آوری چون ابراهیم، موسی، عیسی، محمد (ص)، علی (ع)، فاطمه (س) و ائمه معصومین (ع) را بر خود نقش ابدی زده است. آنان که با پیکار مقدس خویش، حماسه‌های شکوهمند و جاویدی در سازندگی انسان متعهد به وجود آوردند و با ترکیه و تعلم، کاخ بلند پایه‌ی علم و فضیلت را بنا نهاده و پرچم توحید را برافراشتند. که در این مسیر امروز نیز، معلمین و اساتید گرامی ادامه‌ی این نهضت عظیم را بر عهده گرفته‌اند. ضمن بزرگداشت خاطره تمامی معلمین و اساتید، در اینجا بر خود لازم می‌دانم از زحمات و تلاش‌های بی‌شائبه همه آنان که مرا یاری نمودند تشکر و قدردانی نمایم.

ابتدا از پدر، مادر و خانواده عزیزم که جوهر این حرکت را در وجود من جاری ساختند و اساسی‌ترین گام‌ها را پا به پای من برداشتند تشکر و قدردانی می‌نمایم.

از اساتید صبور و مهربانم جناب آقای دکتر سعید کریمی نسب و جناب آقای دکتر حسین جلالی فر، که اتمام این پایان نامه مرهون راهنمایی‌ها، تشویق‌ها و کمک‌های بی‌دریغ آنهاست، صمیمانه تشکر و قدردانی می‌نمایم.

از اساتید گروه مهندسی معدن کمال تشکر را دارم که راهنمایی‌ها و تجربه‌های ارزنده خود را در طول تحصیل در اختیار اینجانب قرار دادند.

از مهندس رفیعا و مهندس رادمان که راهنمایی‌ها و تجربه‌های ارزنده خود را در طول این پایان نامه در اختیار اینجانب قرار دادند و همچنین از همکاری آقایان بینازاده، همزه پور، چهره و هفتانی که در شرکت مشارکت طرح بختیاری امکان تهیه اطلاعات این پایان نامه را فراهم نمودند بسیار سپاسگزار بوده و آرزوی موفقیت از خداوند متعال را برایشان خواستارم.

## چکیده:

یکی از پارامترهای کلیدی در تحلیل و طراحی پروژه‌های ژئومکانیکی و زیرزمینی، به ویژه در تونل‌های تحت فشار آب و سدها، تعیین مدول تغییر شکل می‌باشد. اما وجود ناپیوستگی‌های گوناگون، طبیعت ذاتا آماری پارامترهای ژئومکانیکی ناپیوستگی‌ها و ابهامات موجود در تخمین خواص ژئومکانیکی و هندسی توده سنگ‌ها، پیش بینی خواص تغییر شکل پذیری توده سنگ‌های درزه‌دار را پیچیده و مشکل می‌سازد. در این زمینه در اکثر مواقع آزمایش برجایی که برای تعیین مدول تغییر شکل توده سنگ از آن استفاده می‌شود، آزمایش بارگذاری صفحه‌ای است، که بر این اساس تعداد زیادی آزمایش برجا در سد بتن دو قوسی بختیاری، که بلندترین سد جهان خواهد شد، انجام شده است. اما محققین مختلف با توجه به زمانبر و پرهزینه بودن و مشکلات کاربردی روش‌های مستقیم، روش‌های غیرمستقیمی براساس سیستم‌های طبقه‌بندی و پارامترهای ژئومکانیکی توده سنگ برای تخمین مدول تغییر شکل پیشنهاد کردند. در این تحقیق با توجه به اینکه در روش‌های غیر مستقیم از پارامترهای ژئومکانیکی توده سنگ برای تخمین مدول تغییر شکل استفاده می‌شود، این پارامترها در ساختگاه سد بختیاری با دقت بیشتری مورد ارزیابی قرار گرفت، که نتیجه آن به پیشنهادهایی در زمینه تخمین RQD و فاصله‌داری ناپیوستگی‌ها منجر شد. علاوه بر این، با توجه به نتایج آزمایش‌های برجا و برداشت سیستم‌های شکستگی توده سنگ ساختگاه سد بختیاری، مقایسه‌ای بین روابط تجربی ارائه شده در زمینه تخمین مدول تغییر شکل صورت گرفته، و با توجه به آن و با استفاده از روش‌های آماری و رگرسیونی و بهره‌گیری از نرم افزار SPSS، سعی شده است که همبستگی‌ای بین مجموعه‌ای از آزمایش‌های بارگذاری صفحه‌ای و پارامترهای ژئومکانیکی‌ای همچون RMR، Q، RQD، WD، Jr، Ei و... برقرار شود.

## کلمات کلیدی:

مدول تغییر شکل، خواص ناپیوستگی، بارگذاری صفحه‌ای، روابط تجربی، روش رگرسیون، سد بختیاری.

**فصل اول : کلیات**

- ۱-۱. مقدمه ۲

**فصل دوم: پیشینه‌ای در زمینه مدول تغییر شکل**

- ۱-۲. مقدمه ۵

- ۲-۲. روش مستقیم ۶

- ۳-۲. روش غیرمستقیم ۸

**فصل سوم: مجموعه سد و نیروگاه بختیاری**

- ۱-۳. مقدمه ۲۳

- ۲-۳. جزئیات زمین شناسی ساختگاه سد بختیاری ۲۳

- ۳-۳. ساختارهای زمین شناسی منطقه ۲۴

- ۴-۳. ناپیوستگی‌ها ۲۶

- ۵-۳. پارامترهای ژئومکانیکی توده سنگ ساختگاه سد ۲۹

- ۳-۵-۱. ویژگی‌های سنگ بکر ۲۹

- ۳-۵-۲. ویژگی‌های ناپیوستگی‌ها ۳۰

- ۶-۳. نتیجه‌گیری ۳۳

**فصل چهارم: تعیین مدول تغییر شکل توده سنگ با استفاده از سیستم‌های طبقه‌بندی**

- ۱-۴. مقدمه ۳۵

- ۲-۴. طبقه‌بندی مهندسی توده سنگ ۳۵

- ۳-۴. شاخص کیفیت توده سنگ ۳۶

- ۴-۴. تخمین مدول تغییر شکل با استفاده از سیستم‌های طبقه‌بندی ۴۵

- ۵-۴. نتیجه‌گیری ۵۳

**فصل پنجم: تعیین مدول تغییر شکل توده سنگ به روش برجا**

- ۱-۵. مقدمه ۵۵

- ۲-۵. تعیین مدول تغییر شکل پذیری توده سنگ در ساختگاه سد بختیاری ۵۷

- ۳-۵. نتیجه‌گیری ۷۳

**فصل ششم: تعیین مدول تغییر شکل ساختگاه سدبختیاری به روش رگرسیون چندمتغیره**

۷۵	۱-۶. مقدمه
۷۵	۲-۶. تحلیل آماری
	۳-۶. بررسی روابط موجود در زمینه تخمین مدول تغییر شکل براساس داده های به دست آمده از سد بختیاری
۷۷	
۸۰	۴-۶. تخمین مدول تغییر شکل ساختگاه سد بختیاری به روش رگرسیون چند متغیره
۸۰	۱-۴-۶. مقدمه
۸۰	۲-۴-۶. مدل های رگرسیونی ساده
۸۴	۳-۴-۶. مدل های رگرسیونی چند متغیره
۸۶	۴-۴-۶. فاصله های اطمینان در رگرسیون چند متغیره
۸۶	۵-۴-۶. آزمون معنی دار بودن رگرسیون
۸۶	۶-۴-۶. آزمون های مربوط به هر یک از ضرایب رگرسیون
۸۷	۷-۴-۶. ضرایب رگرسیونی استاندارد شده
۸۷	۸-۴-۶. شاخص های رگرسیونی و معیارهای مناسب مدل
۸۸	۱-۸-۴-۶. همبستگی بین دو متغیر
۸۸	۲-۸-۴-۶. ضریب تعیین چندمتغیره
۸۹	۹-۴-۶. معنادار بودن سطح آزمون
۸۹	۵-۶. روش های رگرسیونی گام به گام
۹۰	۱-۵-۶. انتخاب پیشرو
۹۴	۲-۵-۶. حذف پسرو
۹۷	۳-۵-۶. روش ENTER
۹۸	۴-۵-۶. روش REMOVE
۹۸	۶-۶. بررسی مدل های رگرسیون
۹۹	۷-۶. قواعد توقف در روش های گام به گام
۱۰۰	۸-۶. نتیجه گیری



## فهرست مطالب

صفحه	عنوان
	<b>فصل هفتم: نتایج و پیشنهادات</b>
۱۰۲	۱-۷. نتایج
۱۰۳	۲-۷. پیشنهادات
	<b>منابع و مآخذ:</b>
۱۰۵	منابع و مآخذ

## فهرست اشکال

صفحه

عنوان

۵	شکل (۱-۲) تغییر شکل سطح سنگ به صورت تابعی از فشار بارگذاری
۷	شکل (۲-۲) نحوه نصب اکستنسومترها در آزمایش بارگذاری صفحه ای
۸	شکل (۳-۲) رابطه بین مدولهای مماسی، وتری و بازیافتی
۱۰	شکل (۴-۲) رابطه بین مدول تغییر شکل و پارامتر ترکیبی کایاباسی
۱۰	شکل (۵-۲) همبستگی مدول با RMR
۱۱	شکل (۶-۲) همبستگی مدول با RQD
۱۱	شکل (۷-۲) همبستگی های جدید بین مدول تغییر شکل و RMR
۱۳	شکل (۸-۲) تغییرات مدول تغییر شکل نسبت به RMR بدون در نظر گرفتن فاکتور آشفستگی
۱۳	شکل (۹-۲) تغییرات مدول تغییر شکل نسبت به RMR با در نظر گرفتن فاکتور آشفستگی
۱۴	شکل (۱۰-۲) همبستگی مدول تغییر شکل برجا با معادله (۳-۲)
۱۵	شکل (۱۱-۲) تاثیر فاکتورهای انحراف در رابطه سرافیم و پیریرا برای $D = 0.5$
۱۵	شکل (۱۲-۲) تاثیر فاکتورهای انحراف در رابطه رد و همکارانش برای $D = 0.5$
۱۶	شکل (۱۳-۲) تاثیر فاکتورهای انحراف در رابطه (۳-۲) برای $D = 0.5$
۱۶	شکل (۱۴-۲) تاثیر فاکتورهای انحراف در رابطه (۴-۲) برای $D = 0.5$
۱۹	شکل (۱۵-۲) لایه های موازی در سیستم اورتورومبیک
۲۰	شکل (۱۶-۲) تاثیر فاصله داری در نسبت مدول برشی و مدول بالک توده سنگ به سنگ بکر
۲۵	شکل (۱-۳) عکس تهیه شده از تاقدیس سیاه کوه
۲۷	شکل (۲-۳) نقشه ۱/۲۰۰۰ زمین شناسی منطقه
۲۸	شکل (۳-۳) مقطعی از موقعیت ساختگاه سد بختیاری
۳۸	شکل (۱-۴) نمودار پراکنندگی فرکانس تخمین زده شده شکستگی و فرکانس اندازه گیری شده شکستگی
۳۹	شکل (۲-۴) تفاوت بین فرکانس های تخمین زده شده و اندازه گیری شده شکستگی نسبت به طول خط برداشت
۳۹	شکل (۳-۴) مدل های پیشنهادی پریست جهت تخمین تغییرات RQD با طول خط برداشت
۴۰	شکل (۴-۴) مدل های پیشنهادی چوی و پارک جهت تخمین تغییرات RQD با طول خط برداشت
۴۳	شکل (۵-۴) هیستوگرام فاصله داری ناپیوستگی ها در ساختگاه سد بختیاری
۴۴	شکل (۶-۴) رابطه بین $J_V$ و RQD
۴۶	شکل (۷-۴) تخمین مدول تغییر شکل بر جای توده سنگ
۵۳	شکل (۸-۴) همبستگی های جدید بین مدول تغییر شکل توده سنگ و RMR
۵۸	شکل (۱-۵) نحوه استقرار تجهیزات در آزمایش بارگذاری صفحه ای صلب
۵۹	شکل (۲-۵) نمونه ای از برداشت ناپیوستگی های سطح آزمایش، در ساختگاه سد بختیاری
۶۰	شکل (۳-۵) نمونه ای از لاگ چال های حفاری شده برای آزمایش PLT در ساختگاه بختیاری
۶۱	شکل (۴-۵) تغییر شکل سطحی سنگ نسبت به زمان

## فهرست اشکال

صفحه	عنوان
۶۲	شکل (۵-۵) تغییر شکل سنگ به صورت تابعی از فشار بارگذاری در سقف گالری، آزمایش PLV۴L۱
۶۲	شکل (۶-۵) تغییر شکل سنگ به صورت تابعی از فشار بارگذاری در کف گالری، آزمایش PLV۴L۱
۶۳	شکل (۷-۵) تغییر شکل سنگ به صورت تابعی از فشار بارگذاری در دیواره چپ گالری، آزمایش PLH۳L۱
۶۳	شکل (۸-۵) تغییر شکل سنگ به صورت تابعی از فشار بارگذاری در دیواره راست گالری، آزمایش PLH۳L۱
۶۵	شکل (۹-۵) ۱مدول و تری ۲/۵۰، ۳مدول مماسی بارگذاری، ۳مدول مماسی باربرداری
۶۵	شکل (۱۰-۵) تغییرات ضریب کاهش مدول تغییر شکل نسبت به مدول تغییر شکل برجا در SV۲
۶۶	شکل (۱۱-۵) تغییرات ضریب کاهش مدول تغییر شکل نسبت به مدول تغییر شکل برجا در SV۳
۶۶	شکل (۱۲-۵) تغییرات ضریب کاهش مدول تغییر شکل نسبت به مدول تغییر شکل برجا در SV۴
۶۹	شکل (۱۳-۵) تغییرات ضریب پسماند نسبت به مدول تغییر شکل برجا در SV۲
۶۹	شکل (۱۴-۵) تغییرات ضریب پسماند نسبت به مدول تغییر شکل برجا در SV۳
۶۹	شکل (۱۵-۵) تغییرات ضریب پسماند نسبت به مدول تغییر شکل برجا در SV۴
۷۱	شکل (۱۶-۵) تغییرات مدول بسته به بار اعمالی
۷۱	شکل (۱۷-۵) تغییرات مدول نسبت به ارتفاع روباره در SV۲
۷۲	شکل (۱۸-۵) تغییرات مدول نسبت به ارتفاع روباره در SV۳
۷۲	شکل (۱۹-۵) تغییرات مدول نسبت به ارتفاع روباره در SV۴
۸۴	شکل (۱-۶) مدل فضای رگرسیونی با دو متغیر مستقل
۸۵	شکل (۲-۶) تعبیر شهودی برآورد حداقل مربعات در فضای سه بعدی

۱۲	جدول (۱-۲) آشفستگی ناشی از انفجار در مدول تغییر شکل برجا
۲۴	جدول (۱-۳) توصیف لیتولوژی واحدهای سروک
۲۸	جدول (۲-۳) شیب و جهت شیب در ساختگاه سد بختیاری
۳۰	جدول (۳-۳) خصوصیات سنگ بکر در محدوده ساختگاه سد بختیاری
۳۱	جدول (۴-۳) ویژگی های ناپیوستگی ها در ساختگاه سد بختیاری
۳۲	جدول (۵-۳) خلاصه نتایج برداشت درزه ها
۳۲	جدول (۶-۳) نمونه ای از نتایج مدول تغییر شکل ساختگاه سد بختیاری
۳۶	جدول (۱-۴) سیستم های رده بندی توده سنگ
۴۲	جدول (۲-۴) حداقل خط برداشت مورد نیاز جهت کاهش اختلاف بین RQD تخمین زده شده و تئوری تا حد ۱٪
۴۲	جدول (۳-۴) حداقل مقدار $R_L$ برای کاهش اثر خط برداشت بر روی RQD
۴۳	جدول (۴-۴) حداقل طول مورد نیاز خط برداشت جهت کاهش انحراف معیار RQD تخمین زده شده تا حد ۵٪
۴۷	جدول (۵-۴) نتایج RMR و مدول تغییر شکل آزمایش های بار گذاری صفحه ای سد بختیاری
۴۸	جدول (۶-۴) نتایج RMR و مدول تغییر شکل
۵۱	جدول (۷-۴) مقادیر ریشه میانگین مربع خطا و انحراف معیار روابط تجربی
۵۶	جدول (۱-۵) متداول ترین روش های بر جای تعیین مدول تغییر شکل
۶۴	جدول (۲-۵) مدول اوج تا اوج آزمایش های برجا
۶۷	جدول (۳-۵) مدول مماسی، وتری و ضریب کاهش مدول
۶۸	جدول (۴-۵) مدول صحرایی، آزمایشگاهی و ضریب کاهش مدول
۷۰	جدول (۵-۵) مدول بازیافتی، مماسی و ضریب پسماند
۷۵	جدول (۱-۶) آنالیز آماری توده سنگ Sv۲
۷۶	جدول (۲-۶) آنالیز آماری توده سنگ Sv۳
۷۶	جدول (۳-۶) آنالیز آماری توده سنگ Sv۴
۷۸	جدول (۴-۶) مقادیر آماری روابط بیناوسکی، سرافیم و پیریرو و گالرا و همکارانش
۷۸	جدول (۵-۶) مقادیر آماری روابط نیکلسون و بیناوسکی و میتری و همکارانش
۷۸	جدول (۶-۶) مقادیر آماری روابط کایاباسی و همکارانش و گوکس اوگلو و همکارانش
۷۸	جدول (۷-۶) مقادیر آماری رابطه هوک و دیدریچ
۷۹	جدول (۸-۶) میزان همبستگی و معنادار بودن نتایج حاصل از روابط با مدول تغییر شکل برجا
۸۲	جدول (۹-۶) روابط و ضریب همبستگی پارامترهای موثر در مدول تغییر شکل

## فهرست جداول

صفحه	عنوان
۸۲	جدول (۶-۱۰) پارامترهای ژئومکانیکی استفاده شده در تحلیل‌ها
۹۲	جدول (۶-۱۱) ضرایب، ضریب همبستگی، انحراف معیار، نتایج آزمون t و میزان معناداری مدل در روش پیشرو
۹۲	جدول (۶-۱۲) نتایج تست فیشر برای بررسی معنادار بودن رگرسیون به دست آمده از روش پیشرو
۹۳	جدول (۶-۱۳) تریب انتخاب متغیرها در مدل پیشرو
۹۴	جدول (۶-۱۴) ضرایب همبستگی مراحل ایجاد مدل
۹۵	جدول (۶-۱۵) ضریب همبستگی، انحراف معیار، نتایج آزمون t و میزان معناداری مدل در روش پسرو
۹۶	جدول (۶-۱۶) نتایج تست فیشر برای بررسی معنادار بودن رگرسیون به دست آمده از روش پسرو
۹۷	جدول (۶-۱۷) ضرایب، ضریب همبستگی، انحراف معیار، نتایج آزمون t و میزان معناداری مدل در روش ENTER
۹۸	جدول (۶-۱۸) ضرایب، ضریب همبستگی، انحراف معیار، نتایج آزمون t و میزان معناداری مدل در روش REMOVE

a: ثابت سنگ

D: فاکتور آشفستگی

E<sub>1</sub>: مدول تغییر شکل در صفحه ایزوتروپی

E<sub>2</sub>: مدول تغییر شکل در امتداد عمود بر صفحه ایزوتروپی

E<sub>i</sub>: مدول تغییر شکل در صفحه ایزوتروپی

E<sub>2i</sub>: مدول تغییر شکل در امتداد عمود بر صفحه ایزوتروپی

E<sub>d</sub>: مدول دینامیکی

*e<sub>i</sub>*: باقی مانده

E<sub>i</sub>: مدول سنگ بکر

E<sub>m</sub>: مدول توده سنگ

E<sub>pp</sub>: مدول اوج تا اوج

ER: فاکتور انحراف بیش تخمین

ER\*: فاکتور انحراف کم تخمین

E<sub>rm</sub>: مدول توده سنگ

E(y/x): میانگین توزیع متغیر مستقل

F<sub>n</sub>: ورودی آماره تست فیشر

F<sub>out</sub>: خروجی آماره تست فیشر

G: مدول برشی سنگ بکر

$\bar{G}$ : مدول برشی توده سنگ

GSI (Geological Strength Index): شاخص مقاومت زمین شناسی

H: ارتفاع روباره

H<sub>0</sub>: فرض صفر

H<sub>1</sub>: فرض یک

H<sub>p</sub>: فاکتور بار سنگ

h<sub>i</sub>: ضخامت لایه  $\lambda$ ام

J<sub>a</sub>: ضریب مربوط به دگرسانی درزه‌ها

J<sub>n</sub>: ضریب مربوط به تعداد درزه‌ها

J<sub>r</sub>: زبری درزه

- Jv: تعداد کل درزه ها در واحد حجم
- Jw: ضریب مربوط به کاهش آب درزه ها
- K: مدول بالک سنگ بکر
- $\bar{K}$ : مدول بالک توده سنگ
- L: ضخامت مجموع لایه ها
- mi: ثابت سنگ
- MR: نسبت مدولی
- $MS_E$ : میانگین مربعات باقی مانده
- N: تعداد دسته درزه ها
- Q (Rock Mass Quality System): شاخص کیفیت تونلسازی
- R: همبستگی
- $R^2$ : ضریب تعیین چند گانه
- $\bar{R}_2$ : ضریب تعیین چند گانه تعدیل یافته
- Rc: مقاومت فشاری تک محوره
- RMI (Rock Mass Index): شاخص توده سنگ
- RMR (Rock Mass Rating): شاخص رده بندی ژئومکانیکی سنگ
- RMSE: ریشه میانگین مربع خطاها
- RQD (Rock Quality Designation): ضریب کیفیت سنگ
- RSR: امتیاز ساختاری سنگ
- s: ثابت سنگ
- SFRS: شاکریت تقویت شده با فایبرهای فولادی
- Sig: ضریب معناداری
- Spacing: فاصله داری
- SRF: ضریب مربوط به کاهش تنش
- $SS_E$ : مجموع مربعات باقی مانده
- $SS_R$ : مجموع مربعات رگرسیون
- ST.DEV: انحراف معیار
- $S_{yy}$ : مجموع مربعات کل

t: مقدار آستانه ای جهت محاسبه RQD

$t_i$ : ضخامت لایه  $i$ ام

UCS: مقاومت فشاری تک محوره

VAR: واریانس

$V(y/x)$ : واریانس توزیع متغیر مستقل

WD: درجه هوازگی

$w_d$ : تغییر شکل الاستیک و غیرالاستیک توده سنگ

$w_e$ : تغییر شکل الاستیک توده سنگ

$\bar{X}$ : میانگین متغیر مستقل

y: متغیر وابسته

$y_i$ : مقادیر مشاهده ای متغیر وابسته

$\bar{Y}$ : میانگین متغیر وابسته

$\hat{y}_i$ : مقدار برازش شده متغیر وابسته

$\beta_0$ : عرض از مبدا

$\beta_1$ : ثوابت نامعلوم

$\hat{\beta}_1$ : برآورد حداقل مربعات  $\beta_1$

$\varepsilon$ : خطای تصادفی

$\theta_{si}$ : زاویه بین خط برداشت و خط نرمال برنایپوستگی  $i$ ام

$\lambda_s$ : فرکانس ناپیوستگی ها

$\lambda_i$ : فرکانس ناپیوستگی  $i$ ام

$V$ : ضریب پواسون

$V_{12}$ : ضریب پواسون در صفحه شامل  $X_1$  و  $X_2$

$V_{13}$ : ضریب پواسون در صفحه شامل  $X_1$  و  $X_3$

$V_{21}$ : ضریب پواسون در صفحه شامل  $X_1$  و  $X_2$

$V_{23}$ : ضریب پواسون در صفحه شامل  $X_2$  و  $X_3$

$V_{12i}$ : ضریب پواسون در صفحه شامل  $X_1$  و  $X_2$  در لایه  $i$ ام

$V_{13i}$ : ضریب پواسون در صفحه شامل  $X_1$  و  $X_3$  در لایه  $i$ ام

$V_{21i}$ : ضریب پواسون در صفحه شامل  $X_1$  و  $X_2$  در لایه  $i$ ام



$V_{23i}$ : ضریب پواسون در صفحه شامل  $X_2$  و  $X_3$  در لایه  $i$ ام

$\hat{\sigma}_2$ : برآورد واریانس خطا

$\sigma_c$ : مقاومت فشاری تک محوره

## مقدمه

امروزه در نتیجه افزایش تعداد سازه‌های بزرگ همچون نیروگاه‌های هسته‌ای، سدهای قوسی، تونل‌های تحت فشار و برج‌های مسکونی، تعیین خواص توده سنگ از مهمترین مراحل طراحی و ساخت در مهندسی سنگ می باشد. در این زمینه مدول تغییرشکل یکی از پارامترهای کلیدی است که می تواند معرف رفتار مکانیکی سنگ و توده سنگ، به ویژه در فضاهای زیرزمینی باشد. تعیین مستقیم این پارامتر در اکثر مواقع، زمان‌بر، پرهزینه و با مشکلات کاربردی همراه است؛ و علاوه بر این، قابلیت اعتماد نتایج آن نیز گاهی اوقات جای سوال دارد. یک چنین مشکلاتی سبب شده است که تعدادی از محققین به بررسی روش‌های غیرمستقیم مقرون به صرفه، برای تعیین این پارامتر پرداخته و مدل‌های تجربی‌ای براساس سیستم‌های طبقه‌بندی توده سنگ ارائه دهند. [۱]

اولین مدل تجربی برای تخمین مدول تغییرشکل توده‌های سنگی، به وسیله بیناوسکی<sup>۱</sup> [۲] ارائه شده است. بعد از معادله تجربی بیناوسکی روابط تجربی دیگری به وسیله بارتون<sup>۲</sup> و همکارانش [۳]، سرافیم و پریرا<sup>۳</sup> [۴]، نیکلسون<sup>۴</sup> و بیناوسکی [۵]، میتری<sup>۵</sup> و همکارانش [۶]، هوک و براون<sup>۶</sup> [۷]، رد<sup>۷</sup> و همکارانش [۸]، بارتون [۹]، کایاباسی<sup>۸</sup> و همکارانش [۱۰] و گالرا<sup>۹</sup> و همکارانش [۱۱] برای تخمین مدول تغییرشکل توده سنگ پیشنهاد شده است؛ که علت ارائه همه این مدل‌ها به نوعی فرآیند خاص و هزینه بالای تعیین مدول به روش برجا می باشد. [۱۲] در این راستا، تحقیق حاضر در سه مرحله و به منظور تخمین غیرمستقیم مدول تغییرشکل توده سنگ ساختگاه سد بختیاری انجام پذیرفته است:

- مرحله اول: تعیین خواص توده سنگ با استفاده از برداشت ساختاری و آزمایش‌های برجا.  
 مرحله دوم: تحلیل داده‌های بدست آمده از برداشت صحرایی و تعیین پارامترهای ژئومکانیکی توده سنگ.  
 مرحله سوم: تحلیل آماری و رگرسیونی داده‌ها و برقراری همبستگی بین پارامترهای ژئومکانیکی توده سنگ و برداشت‌های برجای ناشی از آزمایش‌های بارگذاری صفحه‌ای.

<sup>۱</sup> Bieniawski

<sup>۲</sup> Barton

<sup>۳</sup> Serafim & Pereira

<sup>۴</sup> Nicholson

<sup>۵</sup> Mitri

<sup>۶</sup> Hoek & Brown

<sup>۷</sup> Read

<sup>۸</sup> Kayabasi

<sup>۹</sup> Galera

در این تحقیق با توجه به پیشنهاداتی که توسط پرست<sup>۱</sup> [۱۳]، چوی و پارک<sup>۲</sup> [۱۴] و پالمستروم<sup>۳</sup> [۱۵]، در زمینه محاسبه RQD براساس خطوط برداشت ارائه شده، مقداری از ابهامات موجود در محاسبه RQD برطرف و براساس آن سیستم‌های طبقه‌بندی RMR و Q با دقت بیشتری محاسبه شده است. داده‌های استفاده شده در این تحقیق از ۶ گالری حفاری شده در تکیه‌گاه‌های سد بختیاری بدست آمده است. براساس برداشت‌های ساختاری، توده سنگ ساختگاه سد بختیاری طبقه‌بندی شده و پارامترهای مورد نیاز برای تخمین مدول تغییر شکل به روش تجربی محاسبه شده است. در ادامه بین نتایج ناشی از آزمایش‌های بارگذاری صفحه‌ای و مدول تغییر شکل تجربی همبستگی برقرار شده است. در اینجا به خلاصه‌ای از فصولی که در این تحقیق آمده است، اشاره می‌شود.

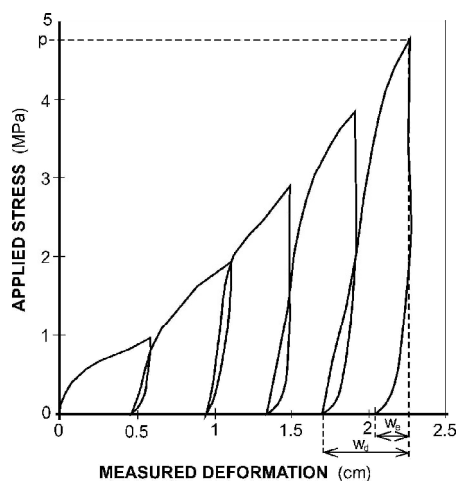
تاریخچه‌ای از کارهای انجام شده در نقاط مختلف جهان در زمینه تعیین مدول تغییر شکل توده سنگ در فصل دوم آورده شده است. در فصل سوم، خلاصه‌ای از سد و نیروگاه بختیاری آورده شده و در ادامه آن، مشخصات هندسی ناپیوستگی‌ها در محدوده ساختگاه سد بختیاری با انجام عملیات درزه‌نگاری گالری‌های اکتشافی تعیین می‌شود. با توجه به مطالب فصل دوم، یکی از روش‌های تعیین مدول تغییر شکل توده سنگ، استفاده از سیستم‌های طبقه‌بندی توده سنگ می‌باشد، لذا در فصل چهارم با استفاده از سیستم طبقه‌بندی RMR توده سنگ ساختگاه سد بختیاری طبقه‌بندی شده و براساس آن و با استفاده از داده‌های بیناوسکی (۱۹۷۸)، سرافیم و پریرا (۱۹۸۳) و لابریه<sup>۴</sup> و همکارانش (۲۰۰۴)، روابطی در زمینه تخمین مدول تغییر شکل توده سنگ ارائه می‌شود. در فصل پنجم روش‌های برجای تعیین مدول تغییر شکل بررسی و با تفسیر روش بارگذاری صفحه‌ای، مدول‌های ناشی از نمودارهای تنش-کرنش استخراج شده است. در فصل ششم ابتدا تحلیل آماری ساده‌ای بر روی داده‌های سد بختیاری انجام شد. سپس با توجه به داده‌های سد بختیاری روابط موجود در زمینه تخمین مدول تغییر شکل ارزیابی و در پایان فصل نیز پس از معرفی مختصر روش تحلیل رگرسیونی خطی یک متغیره و چند متغیره، مدل‌ای تجربی‌ای برای پیش‌بینی مدول تغییر شکل ارائه و بهترین مدل نیز معرفی شده است. در نهایت فصل هفتم شامل نتایج و پیشنهادهایی است که از این تحقیق استنباط می‌شود.

---

<sup>۱</sup>Preist<sup>۲</sup>Choi & Park<sup>۳</sup>Palmstrom<sup>۴</sup>Labrie

## ۲-۱. مقدمه

مدول تغییر شکل استاتیکی از جمله پارامترهایی است که رفتار مکانیکی سنگ و توده سنگ را به ویژه در فضاهای زیرزمینی نشان می‌دهد و لذا اکثر روش‌های عددی محدود و تحلیل‌های المان مرزی برای مطالعات تنش و توزیع تغییر شکل در اطراف فضاهای زیرزمینی، براساس این پارامتر می‌باشد. [۱۶] بسیاری از سنگ‌ها در مقیاس آزمایشگاهی الاستیک تلقی می‌شوند اما در مقیاس صحرایی به دلیل حضور درز و ترک‌ها، صفحات لایه‌بندی، مناطق دگرگون شده و لایه‌های رسی دارای ویژگی‌های پلاستیک هستند. میزان تغییر شکل غیر قابل برگشت توده سنگ در طراحی دارای اهمیت فراوانی است. در شکل (۱-۲) نمونه‌ای از منحنی بارگذاری و باربرداری توده سنگ و تغییر شکل‌های غیر قابل برگشت آن مشاهده می‌شود. مدول تغییر شکل پذیری توده سنگ با انجام آزمایش‌های برجا که طی آن سنگ تحت چند چرخه بارگذاری و باربرداری قرار می‌گیرد، بدست می‌آید. این چرخه‌ها شبیه‌سازی رفتار توده سنگ در طول اجرای پروژه و پس از آن می‌باشد. مدول تغییر شکل سنگ به عوامل متعددی از جمله مقدار تنش وارده به سنگ، عمق، مدول الاستیسیته، ضریب پواسون و در آزمایش بارگذاری صفحه‌ای به شعاع صفحات بارگذاری و فاصله از محل بارگذاری بستگی دارد. دو مورد اخیر نشان می‌دهد که حتی در یک سنگ یا محل خاص نیز مدول تغییر شکل پذیری ثابت نیست [۱۷].



شکل (۱-۲) تغییر شکل سطح سنگ به صورت تابعی از فشار بارگذاری،

$W_e$  تغییر شکل الاستیک توده سنگ،  $W_d$  تغییر شکل الاستیک و غیرالاستیک توده سنگ [۱۶]