

دانشگاه بین‌المللی امام خمینی



IMAM KHOMEINI  
INTERNATIONAL UNIVERSITY

دانشکده فنی

گروه معدن و نفت

پایان نامه کارشناسی ارشد مهندسی معدن گرایش استخراج

**عنوان:**

**بدست آوردن روابط تجربی جهت تعیین مدول تغییر شکل پذیری  
توده سنگ های جنوب غربی ایران**

**نگارش:**

مهدی علامی

**استاد راهنما:**

دکتر مهدی حسینی

**استاد مشاور صنعت:**

مهندس نعمت اله سلیم پور

مهندس غلامرضا شمسی

پاییز

۸۹

بِسْمِ اللَّهِ الرَّحْمَنِ الرَّحِيمِ

## تقدیم به:

تمام کسانی که مرا در ارائه این پایان نامه یاری نمودند.

## چکیده

مدول تغییرشکل پذیری توده سنگ یک پارامتر ورودی مهم در تجزیه و تحلیل رفتار توده سنگ در پروژه های مختلف از قبیل سد سازی می باشد. تعیین این پارامتر توسط آزمایش های برجا پر هزینه و زمان بر است؛ از اینرو، یک سری روابط تجربی توسط برخی از محققین جهت تخمین مقدار مدول تغییرشکل پذیری توده سنگ بر مبنای سیستم های طبقه بندی توده سنگ و اطلاعات بدست آمده از آزمایش های برجای انجام شده در نقاط مختلف جهان، پیشنهاد شده است. در این پایان نامه، با استفاده از داده های بدست آمده از آزمایش های دیلاتومتری انجام شده در ساختگاه هفت سد احداث شده در جنوب غرب ایران و با توجه به ضریب همبستگی، یک رابطه تجربی غیر خطی چندگانه (لجیستیک) جدید و مناسب از بین چندین رابطه از توابع مختلف، بر مبنای اندیس  $GSI$  و مدول الاستیسیته سنگ بکر ( $E_i$ ) جهت تعیین مدول تغییرشکل پذیری توده سنگ ( $E_d$ ) در این ناحیه ارائه می گردد.

کلمات کلیدی: آزمایش دیلاتومتری، جنوب غرب ایران، مدول تغییرشکل پذیری، مدول الاستیسیته، اندیس  $GSI$ ، رگرسیون چندگانه غیر خطی.

## فهرست مطالب

صفحه	عنوان
۱	فصل اول: مقدمه
۴	فصل دوم: مدول تغییر شکل پذیری
۵	۱-۲- مقدمه
۷	۲-۲- انواع مدول تغییر شکل پذیری توده سنگ
۱۱	۳-۲- انواع آزمایش های برجا جهت تعیین مدول تغییر شکل پذیری توده سنگ
۱۴	۲-۳-۱- آزمایش بارگذاری صفحه ای صلب
۱۴	۲-۳-۱-۱- مقدمه
۱۴	۲-۳-۱-۲- روش انجام آزمایش بارگذاری صفحه ای
۱۵	۲-۳-۱-۳- تجهیزات آزمایش
۱۷	۲-۳-۱-۴- عملیات آماده سازی
۲۰	۲-۳-۱-۵- محاسبات
۲۲	۲-۳-۲- آزمایش بارگذاری صفحه ای انعطاف پذیر
۲۴	۲-۳-۳- آزمایش دیلاتومتری
۲۴	۲-۳-۳-۱- مقدمه
۲۵	۲-۳-۳-۲- مشخصات فنی دستگاه دیلاتومتر
۲۶	۲-۳-۳-۳- روش انجام آزمایش دیلاتومتری
۳۱	۲-۳-۳-۴- قابلیت تعیین آنیزوتروپی و جهت نسبی درزه های منطقه
۳۲	۲-۳-۳-۵- محاسبات
۳۳	۲-۳-۳-۶- ارائه و معرفی بخش های مختلف نتایج و نمودارهای مربوطه
۳۵	۲-۳-۴- برآورد تجربی مدول تغییر شکل پذیری
۳۵	۲-۳-۴-۱- مقدمه
	۲-۳-۴-۲- روابط موجود بین مدول تغییر شکل پذیری و سیستم طبقه بندی ژئومکانیکی
۳۶	توده سنگ (RMR)
۵۱	۲-۳-۴-۳- روابط موجود بین مدول تغییر شکل پذیری و شاخص کیفی تونلزنی (Q)
۵۵	۲-۳-۴-۴- روابط موجود بین مدول تغییر شکل پذیری و سیستم طبقه بندی RMI
۵۷	۲-۳-۴-۵- روابط موجود بین مدول تغییر شکل پذیری و شاخص مقاومت زمین شناسی (GSI)
۶۵	۲-۳-۴-۶- روابط موجود بین مدول تغییر شکل پذیری و شاخص کیفی توده سنگ (RQD)

فصل سوم: اندیس مقاومت زمین شناسی .....	۷۰
۱-۳- مقدمه .....	۷۱
۲-۳- روش های برآورد اندیس مقاومت زمین شناسی ( <i>GSI</i> ) .....	۷۲
۱-۲-۳- طبقه بندی <i>RMR</i> سال ۱۹۷۶ .....	۷۲
۲-۲-۳- طبقه بندی <i>RMR</i> سال ۱۹۸۹ .....	۷۳
۳-۲-۳- تخمین چشمی اندیس مقاومت زمین شناسی .....	۷۳
۴-۲-۳- تخمین اندیس مقاومت زمین شناسی با استفاده از نمودار کمی پیشنهاد شده توسط سومنز و اولوسای .....	۷۹
۵-۲-۳- تخمین اندیس مقاومت زمین شناسی با استفاده از نمودار کمی پیشنهاد شده توسط کای و دیگران .....	۸۳
۶-۲-۳- تخمین اندیس مقاومت زمین شناسی با استفاده از روش <i>GRS</i> .....	۸۹
فصل چهارم: تخمین تجربی مدول تغییرشکل پذیری توده سنگ های جنوب غربی ایران .....	۹۱
۱-۴- مقدمه .....	۹۲
۲-۴- مطالعات موردی .....	۹۶
۱-۲-۴- سد بازفت .....	۹۶
۲-۲-۴- سد بختیاری .....	۹۷
۳-۲-۴- سد خرسان ۲ .....	۹۷
۴-۲-۴- سد خرسان ۳ .....	۹۷
۵-۲-۴- سد کارون ۱ .....	۹۸
۶-۲-۴- سد تنگ معشوره .....	۱۰۰
۷-۲-۴- سد سیمره .....	۱۰۰
۳-۴- معرفی نرم افزار .....	۱۰۲
۴-۴- آنالیز آماری داده ها .....	۱۰۵
۵-۴- روابط تجربی ارائه شده .....	۱۰۶
۱-۵-۴- رابطه خطی .....	۱۰۶
۲-۵-۴- رابطه درجه ۲ .....	۱۰۷
۳-۵-۴- رابطه لگاریتمی .....	۱۰۷
۴-۵-۴- رابطه نمایی .....	۱۰۸
۵-۵-۴- رابطه <i>S</i> شکل .....	۱۰۹
۶-۵-۴- رابطه توانی .....	۱۱۰

---

۱۱۰	۴-۵-۷- رابطه لجیستیک
۱۱۲	۴-۶- اعتبار سنجی رابطه بدست آمده
۱۱۴	فصل پنجم: نتیجه گیری و پیشنهادها
۱۱۵	۵-۱- نتیجه گیری
۱۱۵	۵-۲- پیشنهادها
۱۱۷	منابع و ماخذ

۴.....	فصل دوم: مدول تغییر شکل پذیری
۶.....	شکل ۱-۲: تنش برشی ایجاد شده در پی سد بتنی در اثر تغییر سازندها
۷.....	شکل ۲-۲: تغییر شکل دائمی توده سنگ در اثر بار چرخه ای
۹.....	شکل ۳-۲: منحنی تنش - کرنش توده سنگ
۱۰.....	شکل ۴-۲: رابطه بین مدول های مماسی، وتری و بازگشتی
۱۰.....	شکل ۵-۲: تغییر شکل سطح سنگ به صورت تابعی از فشار بارگذاری
۱۳.....	شکل ۶-۲: محدوده پیشنهادی برای کاربری انواع روش های آزمایش برجا
۱۵.....	شکل ۷-۲: تصویر شماتیک از نحوه انجام آزمایش بارگذاری صفحه ای
۱۵.....	شکل ۸-۲: تصویری از صفحه بارگذاری
۱۶.....	شکل ۹-۲: الف) پمپ دستی، ب) پمپ برقی، مورد استفاده برای تغذیه جک های هیدرولیکی
	شکل ۱۰-۲: لوازم درون گمانه ای شامل الف) سنسور جابجایی سنج، ب) اکستنسومتر،
۱۶.....	ج) نگهدارنده های مرکزی، د) پکر مکانیکی
۱۷.....	شکل ۱۱-۲: تصویر صفحه نمایش قرائت نرم افزار بارگذاری صفحه ای
۱۸.....	شکل ۱۲-۲: نمونه سطح آماده شده با سنگ فرز پیش از سیمان کاری
۱۹.....	شکل ۱۳-۲: سطوح آماده شده برای آزمایش بارگذاری صفحه ای در حالت افقی و قائم
۱۹.....	شکل ۱۴-۲: مثال هایی از انتخاب آرایش نقاط اندازه گیری
۲۰.....	شکل ۱۵-۲: نحوه استقرار تجهیزات در آزمایش بارگذاری صفحه ای
۲۷.....	شکل ۱۶-۲: شماتیکی از اجزا و نحوه آزمایش دیلاتومتری نوع (مدل IF096)
۲۹.....	شکل ۱۷-۲: الف) نمایی از نرم افزار و ب) نموداری از تحلیل نتایج
	شکل ۱۸-۲: الف) نحوه قرار گرفتن دستگاه دیلاتومتر در گمانه ب) فاصله متوسط ناپیوستگی ها
۳۱.....	کمتر از طول سلول دیلاتومتر، ج) فاصله متوسط ناپیوستگی ها بیشتر از طول سلول دیلاتومتر
	شکل ۱۹-۲: منحنی کلی تنش - کرنش در آزمایش دیلاتومتری (راست) و نمونه سیکل های
۳۴.....	آزمایش (چپ)
۳۵.....	شکل ۲۰-۲: نمونه ای از گزارش نتایج خام آزمایش دیلاتومتری انجام شده در سد خرسان ۲
۳۷.....	شکل ۲۱-۲: رابطه بین $RMR$ و مدول تغییرشکل پذیری توده سنگ ارائه شده توسط بنیوسکی
	شکل ۲۲-۲: رابطه بین مدول تغییرشکل پذیری و سیستم طبقه بندی $RMR$ ارائه شده توسط
۳۸.....	بنیوسکی، سرافیم و پریرا
۳۹.....	شکل ۲۳-۲: رابطه بین سیستم طبقه بندی توده سنگ ( $RMR$ ) و فاکتور کاهش مدول
۴۱.....	شکل ۲۴-۲: فاکتور تصحیح برای تأثیر عمق بر مدول تغییرشکل پذیری توده سنگ



- شکل ۲-۲۵: رابطه ارائه شده بین  $RMR$  و مدول تغییرشکل پذیری توسط گگالو ..... ۴۳
- شکل ۲-۲۶: مقادیر داده های  $RMR$  و  $E_m$  براساس لیتولوژی ..... ۴۴
- شکل ۲-۲۷: روابط بین  $RMR$  و  $E_m$  ارائه شده توسط گالرا و همکارانش و مقایسه آن ها با رابطه سرافیم و پریرا ..... ۴۵
- شکل ۲-۲۸: رابطه بین  $RMR$  و  $E_i$  با نسبت مدول تغییرشکل پذیری توده سنگ ..... ۴۶
- شکل ۲-۲۹: مقایسه نمودارهای بدست آمده از روابط ارائه شده توسط سونمز و دیگران و نیکلسون و بنیاوسکی ..... ۴۷
- شکل ۲-۳۰: رابطه بین  $RMR$  و  $E_m$  ارائه شده توسط چان و همکارانش و مقایسه آن با روابط بنیاوسکی، سرافیم و پریرا، کیم و هوک و دیدریچز ..... ۴۸
- شکل ۲-۳۱: رابطه ارائه شده بین مقادیر مدول تغییرشکل پذیری و  $RMR Basic$  ..... ۴۹
- شکل ۲-۳۲: مقایسه روابط ارائه شده توسط توسل پور با یکدیگر ..... ۴۹
- شکل ۲-۳۳: رابطه بین  $RMR$  و مدول تغییرشکل پذیری ..... ۵۰
- شکل ۲-۳۴: نتایج شبکه  $RBF$  برای طبقه بندی داده ها در سد کارون ۴ ..... ۵۰
- شکل ۲-۳۵: تخمین مدول تغییر شکل پذیری توده سنگ با استفاده از دو سیستم طبقه بندی  $RMR$  و  $Q$  ..... ۵۲
- شکل ۲-۳۶: پیش بینی تغییرات مدول تغییرشکل پذیری برجا ( $E_m$ ) از طبقه بندی های  $RMR$  و  $Q$  ..... ۵۳
- شکل ۲-۳۷: رابطه بین  $Q$  و مدول تغییرشکل پذیری ( $E_m$ ) ..... ۵۴
- شکل ۲-۳۸: رابطه بین  $Q$  و مدول تغییرشکل پذیری ( $E_m$ ) ..... ۵۶
- شکل ۲-۳۹: رابطه ارائه شده بین مدول تغییرشکل پذیری ( $E_m$ ) و شاخص مقاومت زمین شناسی ( $GSI$ ) با استفاده مقاومت تراکم تک محوره سنگ بکر ( $\sigma_{ci}$ ) ..... ۵۹
- شکل ۲-۴۰: نمودار ارائه شده توسط هوک و دیگران برای محاسبه مدول تغییرشکل پذیری توده سنگ ..... ۶۰
- شکل ۲-۴۱: رابطه بین مدول تغییرشکل پذیری توده سنگ و شاخص مقاومت زمین شناسی ..... ۶۱
- شکل ۲-۴۲: تغییرات مدول های تغییرشکل پذیری اندازه گیری شده در چین و تایوان نسبت به مقادیر  $GSI$  (رسم شده توسط هوک و دیدریچز) ..... ۶۳
- شکل ۲-۴۳: منحنی اصلاح شده هوک و دیدریچز برای داده های چین و تایوان ..... ۶۴
- شکل ۲-۴۴: منحنی نرمالیزه شده رابطه ۲-۸۳ برای داده های چین و تایوان ..... ۶۴
- شکل ۲-۴۵: نمودار تغییرات  $E_m / E_r$  نسبت به مقادیر  $RQD$  ..... ۶۶

- شکل ۲-۴۶: رابطه بین مدول تغییرشکل پذیری توده سنگ با نسبت مدول سنگ بکر،  
 ۶۷.....  $WD$  و  $RQD$
- شکل ۲-۴۷: نمودار پیش بینی مدول تغییرشکل پذیری توده سنگ، ارائه شده توسط  
 ۶۸..... گکاگلو و همکارانش در سال ۲۰۰۳
- شکل ۲-۴۸: روابط ارائه شده بین  $RQD$  و نسبت  $E_m/E_r$   
 ۶۹.....
- فصل سوم: اندیس مقاومت زمین شناسی**  
 ۷۰.....
- شکل ۳-۱: تخمین  $GSI$  براساس بررسی های چشمی شرایط زمین شناسی.....  
 ۷۵.....
- شکل ۳-۲: تخمین  $GSI$  براساس بررسی های چشمی شرایط زمین شناسی.....  
 ۷۶.....
- شکل ۳-۳: تعیین اندیس مقاومت زمین شناسی برای توده سنگ های ناهمگن از قبیل  
 ۷۷..... *Flysch* (رسوبات آواری دانه ریز)
- شکل ۳-۴: شاخص مقاومت زمین شناسی برای ماسه سنگ آهکی رس دار و متورق .....  
 ۷۸.....
- شکل ۳-۵: نمودار اصلاح شده هوک جهت تعیین  $GSI$ ، پیشنهاد شده توسط سونمز و دیگران .....  
 ۸۰.....
- شکل ۳-۶: امتیازبندی ساختار توده سنگ براساس شمارش حجمی درزه ها ( $J_V$ ) .....  
 ۸۱.....
- شکل ۳-۷: مقادیر امتیازات مربوط به هر یک از پارامترهای زبری، هوازدگی و پرشدگی درزه .....  
 ۸۱.....
- شکل ۳-۸: آخرین نسخه جدید نمودار سونمز و اولوسای .....  
 ۸۲.....
- شکل ۳-۹: نمودار اصلاح شده هوک، پیشنهاد شده توسط کای و همکارانش .....  
 ۸۴.....
- شکل ۳-۱۰: بلوک محدود شده توسط سه دسته درزه.....  
 ۸۵.....
- شکل ۳-۱۱: روابط بین روش های مختلف برای ی حجم بلوک .....  
 ۸۷.....
- شکل ۳-۱۲: محاسبه  $wJd$  (تراکم وزنی درزه ها) از خط پیمایش گمانه یا بلوک.....  
 ۸۸.....
- شکل ۳-۱۳: نمودار سه بعدی رابطه ۲۰-۳ جهت تعیین  $GSI$  .....  
 ۸۸.....
- شکل ۳-۱۴: رابطه هلالی شکل بین  $GSI$  و  $J_p$  .....  
 ۹۰.....
- شکل ۳-۱۵: نمودار جدید پیشنهاد شده توسط روسو جهت تعیین مقادیر  $GSI$  .....  
 ۹۰.....
- فصل چهارم: تخمین تجربی مدول تغییرشکل پذیری توده سنگ های جنوب غربی ایران**  
 ۹۱.....
- شکل ۴-۱: نمونه ای از نمودارهای رسم شده فشار- جابجایی در سد خرسان ۳.....  
 ۹۵.....
- شکل ۴-۲: موقعیت قرارگیری تعدادی از سدهای پیش بینی شده بر روی رودخانه  
 ۹۹..... کارون و دز نسبت به یکدیگر.....
- شکل ۴-۳: جانمایی تعدادی از سدهای پیش بینی شده بر روی رودخانه های دز و کارون .....  
 ۹۹.....
- شکل ۴-۴: موقعیت قرارگیری تعدادی از سدهای پیش بینی شده بر روی رودخانه کرخه  
 ۱۰۱..... نسبت به یکدیگر.....

- شکل ۴-۵: جانمایی تعدادی از سدهای پیش بینی شده بر روی رودخانه کرخه ..... ۱۰۲
- شکل ۴-۶: صفحه اپراتوری نسخه سه بعدی نرم افزار Table Curve ..... ۱۰۴
- شکل ۴-۷: نمونه ای از منحنی و معادلات برازش شده توسط نرم افزار Table Curve 2D ..... ۱۰۴
- شکل ۴-۸: مقادیر مدول تغییرشکل پذیری ( $E_d$ ) بر حسب سیستم طبقه بندی  $GSI$  برای محل های انجام آزمایش ..... ۱۰۵
- شکل ۴-۹: نمودار رابطه خطی درجه ۱ جهت تعیین مقادیر مدول تغییرشکل پذیری بر حسب مدول الاستیسیته سنگ بکر و سیستم طبقه بندی  $GSI$  ..... ۱۰۶
- شکل ۴-۱۰: نمودار رابطه درجه ۲ جهت تعیین مقادیر مدول تغییرشکل پذیری بر حسب مدول الاستیسیته سنگ بکر و سیستم طبقه بندی  $GSI$  ..... ۱۰۷
- شکل ۴-۱۱: نمودار رابطه لگاریتمی جهت تعیین مقادیر مدول تغییرشکل پذیری بر حسب مدول الاستیسیته سنگ بکر و سیستم طبقه بندی  $GSI$  ..... ۱۰۸
- شکل ۴-۱۲: نمودار رابطه نمایی جهت تعیین مقادیر مدول تغییرشکل پذیری بر حسب مدول الاستیسیته سنگ بکر و سیستم طبقه بندی  $GSI$  ..... ۱۰۹
- شکل ۴-۱۳: نمودار رابطه S شکل جهت تعیین مقادیر مدول تغییرشکل پذیری بر حسب مدول الاستیسیته سنگ بکر و سیستم طبقه بندی  $GSI$  ..... ۱۱۰
- شکل ۴-۱۴: نمودار رابطه توانی جهت تعیین مقادیر مدول تغییرشکل پذیری بر حسب مدول الاستیسیته سنگ بکر و سیستم طبقه بندی  $GSI$  ..... ۱۱۱
- شکل ۴-۱۵: نمودار رابطه لجیستیک جهت تعیین مقادیر مدول تغییرشکل پذیری بر حسب مدول الاستیسیته سنگ بکر و سیستم طبقه بندی  $GSI$  ..... ۱۱۱
- شکل ۴-۱۶: مقایسه رابطه لجستیک پیشنهاد شده در این پایان نامه با روابط گکاگلو و همکاران، سونمز و همکاران، کاروالهو، هوک و دیدریچز و گیوشاد و همکاران ..... ۱۱۳

## فهرست جداول

صفحه

عنوان

---

۴.....	<b>فصل دوم: مدول تغییر شکل پذیری</b>
جدول ۱-۲: مقایسه بین مدول های بدست آمده از آزمایشگاه و مدول های حاصل از روش بارگذاری صفحه ای و جک گمانه ای شعاعی در سه پروژه مهندسی مختلف.....	۱۲
جدول ۲-۲: معادلات تجربی برای برآورد مدول تغییرشکل پذیری توده سنگ ( $E_m$ ).....	۵۵
جدول ۳-۲: خلاصه ای از روابط تجربی ارائه شده برای برآورد مدول تغییرشکل پذیری توده سنگ ( $E_m$ ).....	۵۷
جدول ۴-۲: مقادیر مربوط به مقاومت تراکم تک محوری و مدول الاستیسیته سنگ بکر برخی از سنگ ها به همراه نسبت مدول آن ها.....	۵۸
۹۱.....	<b>فصل چهارم: تخمین تجربی مدول تغییرشکل پذیری توده سنگ های جنوب غربی ایران</b>
جدول ۱-۴: آزمایش های دیلاتومتری انجام شده در پروژه های جنوب غرب ایران.....	۹۳
جدول ۲-۴: مشخصات دیلاتومتر IF096.....	۹۳
جدول ۳-۴: نمونه ای از جدول مدول های محاسبه شده در سد خرسان ۳.....	۹۶

# فصل اول

مقدمه

مدول تغییر شکل پذیری توده سنگ، یکی از پارامترهای مهم ژئومکانیکی می باشد که نقش اساسی در تجزیه و تحلیل رفتار توده سنگ و آنالیز عددی حفریات زیرزمینی ایفا می کند. از این رو، تعیین مقدار این پارامتر لازم و ضروری است، زیرا صحت نتایج روش های عددی به اعتبار داده های ورودی آن بستگی دارد. برای تعیین مدول تغییر شکل پذیری روش های مختلفی وجود دارد که شامل (۱) اندازه گیری مستقیم با استفاده از آزمایش های برجا (۲) تعمیم دادن نتایج آزمون های آزمایشگاهی برای توده سنگ (۳) تخمین بر اساس روابط حاصل شده از نتایج آزمایش های برجا انجام شده در پروژه های مختلف، می شود. از آنجایی که برآورد این پارامترها بوسیله آزمایش های برجا وقت گیر و پرهزینه بوده و مشکلات عملیاتی خاص خود را دارند، لذا استفاده از روش های تجربی، صحیح و منطقی به نظر می رسد.

از اینرو، روابط تجربی مختلفی توسط برخی از محققین، بر مبنای پارامترهای ژئومکانیکی و سیستم های طبقه بندی توده سنگ و با استفاده از نتایج آزمایش های برجا انجام شده در نقاط مختلف دنیا جهت تعیین مدول تغییر شکل پذیری توده سنگ ارائه شده است. اما معمولاً داده هایی که برای بدست آوردن این روابط مورد استفاده قرار گرفته، به چند کشور خاص محدود می شود؛ که در صورت استفاده از این روابط در کشورهای دیگر از قبیل ایران، نتایج بدست آمده به علت نا همگن بودن سنگ ها، شرایط تکتونیکی متفاوت و همچنین متغیر بودن شرایط سنگ شناسی و چینه شناسی، دارای خطا می باشد و نمی تواند تخمین مناسبی از مدول تغییر شکل پذیری ارائه دهد. بنابراین، ضروری است که برای مناطق مختلف کشور ایران، روابط تجربی جدیدی بر اساس سیستم های طبقه بندی توده سنگ و با استفاده از نتایج آزمایش های برجا انجام شده در آن کشور، جهت تعیین مدول تغییر شکل پذیری توده سنگ ارائه گردد.

هدف از این تحقیق نیز ارائه یک سری روابط تجربی جهت برآورد مدول تغییر شکل پذیری توده سنگ با استفاده از نتایج آزمایش های برجا انجام شده در جنوب غرب ایران می باشد. بدین منظور از روش رگرسیون گیری چندگانه و نرم افزار TableCurve 3D در این تحقیق استفاده شده است. در جنوب غرب ایران سه رودخانه بزرگ و پر آب کارون، دز و کرخه جریان دارند. از سال های گذشته سرمایه گذاری های وسیعی از طرف دولت برای ساخت چندین سد و نیروگاه برقابی بر روی این سه رودخانه به منظور کنترل سیلاب، آبیاری مزارع، تولید برق، تأمین آب آشامیدنی و حقایب های پایین دست، انجام شده است. از آنجایی که در طراحی سد از پارامتر مدول تغییر شکل پذیری استفاده می شود لذا در تمام این پروژه ها، این پارامتر با استفاده از روش ها و آزمایش های مختلف برجا از قبیل آزمایش دیلاتومتری تعیین گردیده است. در این تحقیق از نتایج آزمایش های دیلاتومتری سدهای تنگ معشوره، خرسان ۳، خرسان ۲، سیمره، بختیاری، کارون ۱ (شهید عباسپور) و سد بازفت استفاده شده است.

در مجموع این پایان نامه شامل ۵ فصل می باشد. در فصل دوم این پایان نامه، روش های اندازه گیری مدول تغییر شکل پذیری مورد بحث و بررسی قرار می گیرد؛ سپس در فصل سوم سیستم طبقه بندی

*GSI* به همراه تکنیک های محاسبه آن شرح داده می شود. در فصل چهارم نیز روابط پیشنهاد شده توسط نگارنده جهت تخمین مدول تغییرشکل پذیری ( $E_d$ ) توده سنگ های جنوب غرب ایران بر مبنای مدول الاستیسیته سنگ بکر ( $E_i$ ) و سیستم طبقه بندی *GSI* ارائه می گردد و در نهایت در فصل پنجم نتایج و پیشنهاد ها بیان می گردد.

# فصل دوم

مدول تغییر شکل پذیری



تغییر شکل پذیری<sup>۱</sup> در توده سنگ، نشان دهنده میزان تغییر شکل ایجاد شده در توده سنگ، تحت تاثیر بارگذاری یا باربرداری می باشد که به صورت یک مدول مشخص می گردد [۱]. این پارامتر در طراحی پروژه هایی که حتی نسبت به تغییر شکل های کم نیز حساس هستند اهمیت زیادی دارد. پروژه هایی همچون نیروگاه های هسته ای، سدهای قوسی، تونل های تحت فشار و برج های مسکونی از جمله پروژه هایی هستند که باید در طول عمر مفیدشان حداقل تغییر شکل در آن ها اتفاق بیافتد. در این نوع سازه ها، حتی زمانی که خطر گسیختگی وجود ندارد، تغییر شکل سنگ بسیار نگران کننده است؛ چرا که تغییر شکل ناهمگن (حتی به مقدار جزئی) می تواند باعث افزایش شدید تنش در سازه گردد. شکل ۱-۲، سدی را نشان می دهد که روی پی سنگی با ویژگی های تغییر شکل پذیری ناهمگن قرار گرفته است؛ که به دلیل جابجایی غیر یکنواخت سنگ پی، تنش های برشی و کششی در آن ایجاد می گردد. با آگاهی از تغییر شکل پذیری چنین توده سنگی می توان سد را بگونه ای طراحی نمود که این وضعیت بحرانی را تحمل نماید [۲].

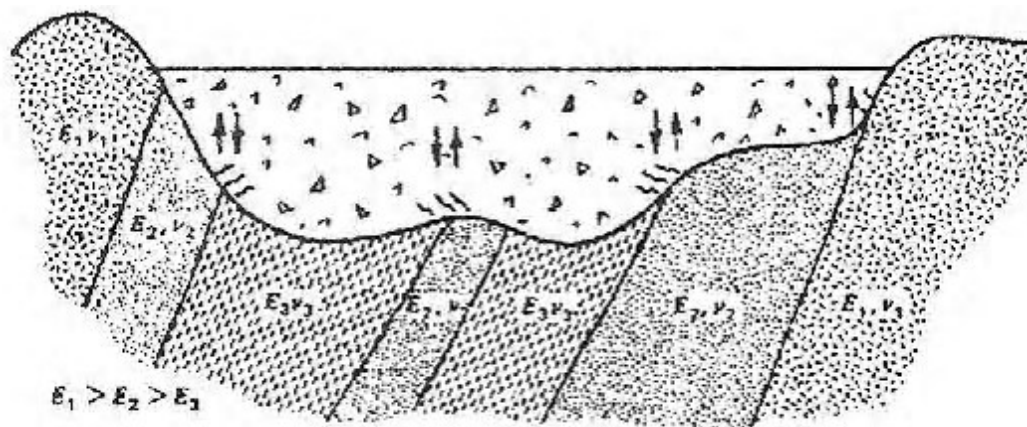
ایجاد تغییر شکل در توده سنگ، ناشی از بسته شدن درز و ترک ها و تغییر شکل های الاستیک و پلاستیک ماده سنگ تشکیل دهنده آن ها می باشد. شاخص و معیار تغییر شکل پذیری در سنگ بکر مدول الاستیسیته و در توده سنگ مدول تغییر شکل پذیری<sup>۲</sup> است. مدول تغییر شکل پذیری از

مهمترین پارامترهای مکانیکی توده سنگ می باشد که برای تحلیل و محاسبه جابجایی های توده سنگ به کار برده می شود. در واقع مدول تغییر شکل پذیری ترکیبی از تغییر شکل پلاستیک  $\delta_p$  (ناشی از بسته شدن درز و ترک ها) و تغییر شکل الاستیک  $\delta_e$  (تغییر شکل ناشی از ادامه تنش پس از بسته شدن درزها) می باشد. دیر و همکارانش<sup>۳</sup> با استفاده از رابطه  $\frac{\delta_e}{\delta_p + \delta_e}$  کیفیت توده سنگ را ارزیابی نمودند [۲، ۱].

بسیاری از سنگ ها در مقیاس آزمایشگاهی الاستیک تلقی می شوند، اما در مقیاس صحرایی به دلیل حضور درز و ترک ها، صفحات لایه بندی، مناطق دگرگون شده و لایه های رسی دارای ویژگی های پلاستیک هستند [۲]. طبق تعریف انجمن بین المللی مکانیک سنگ (*ISRM*) مدول تغییر شکل پذیری توده سنگ عبارت است از نسبت تنش اعمال شده به کرنش ایجاد شده در اثر بارگذاری توده سنگ، که شامل رفتار الاستیک و غیر الاستیک می باشد. همچنین مدول الاستیک توده سنگ عبارت است از نسبت تنش اعمال شده به کرنش ایجاد شده در توده سنگ که تنها شامل رفتار الاستیک می شود. با توجه به تعاریف فوق مدول تغییر شکل پذیری در بارگذاری و مدول الاستیک در مرحله باربرداری به دست می آید [۳].

1- Deformation  
2- Deformaton Modulus

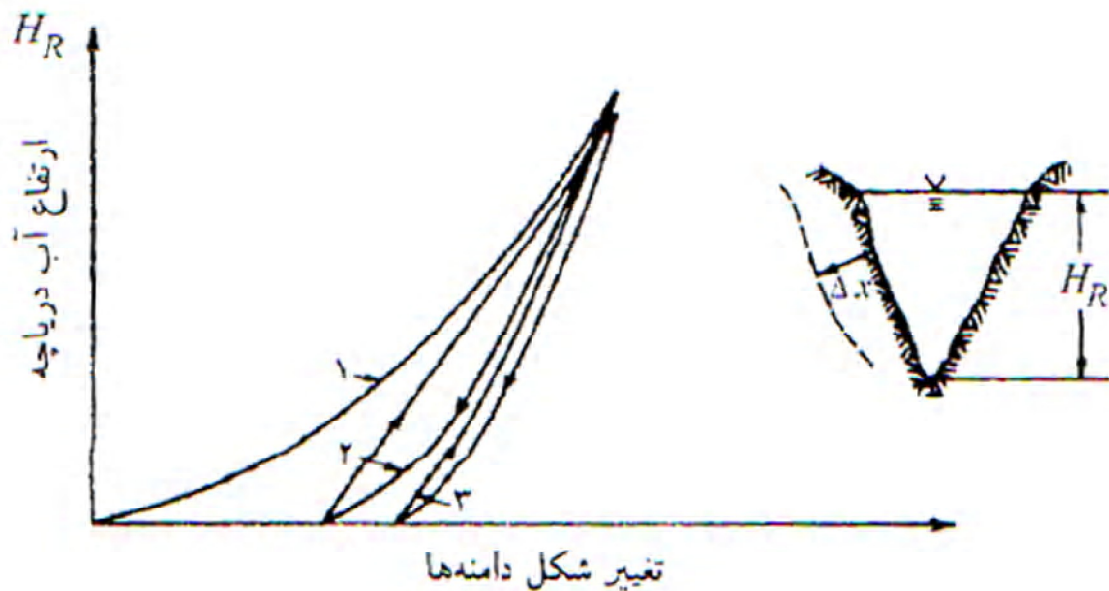
3- Deer et al.



شکل ۱-۲: تنش برشی ایجاد شده در پی سد بتنی در اثر تغییر سازندها [۲]

میزان تغییر شکل غیر قابل برگشت توده سنگ در طراحی دارای اهمیت فراوانی است. در شکل ۲-۲، یک نمونه منحنی بارگذاری - باربرداری توده سنگ و تغییر شکل های غیر قابل برگشت آن مشاهده می شود. با بالا آمدن آب در پشت سد قوسی، توده سنگ رفتاری مشابه منحنی شماره ۱ از خود نشان می دهد. انحنای رو به بالای این منحنی مربوط به بسته شدن گستگی های سنگ در ابتدای بارگذاری است. با کاهش سطح آب مخزن و باربرداری توده سنگ، رفتار مطابق با مسیر ۲ خواهد بود. از طرفی بدنه سد نیز به پیروی سنگ، در اثر باربرداری دچار بازگشت الاستیک می گردد. اما به دلیل اینکه بدنه سد نسبت به سنگ پی از خاصیت الاستیسیته بیشتری برخوردار است، از آن جدا می شود. این فرآیند باعث ایجاد درز و ترک در سنگ، بتن و یا محل اتصال آن ها می گردد. در شکل ۲-۲ نحوه ایجاد حلقه های پس ماند<sup>۱</sup> در اثر چرخه های بارگذاری و باربرداری نشان داده شده است. برخی از مناطق به دلیل داشتن پسماند زیاد، برای احداث سد بتنی قابل قبول نیستند (حتی اگر مدول الاستیسیته ماده سنگی در حد قابل قبولی باشد) [۲].

مدول تغییر شکل پذیری سنگ به عوامل متعددی از جمله مقدار تنش وارد بر سنگ، مدول الاستیسیته، ضریب پواسون، حجم تحت بارگذاری، عمق بارگذاری و غیره بستگی دارد. به این ترتیب مشخص است که حتی در یک سنگ با محل خاص نیز مدول تغییر شکل پذیری ثابت نیست. در اکثر توده های سنگی به دلیل توزیع ناهمسانگرد ناپیوستگی ها، مدول تغییر شکل پذیری در جهات و نقاط مختلف تغییر می کند. از آنجایی که تعیین مدول تغییر شکل پذیری توده سنگ در مرحله طراحی صورت می گیرد، بنابراین آزمون های صحرائی برای تعیین این مدول بایستی طوری اجرا گردند که از نظر مقدار بارگذاری شبیه به شرایط واقعی پروژه باشد [۱،۴].



شکل ۲-۲: تغییر شکل دائمی توده سنگ در اثر بار چرخه ای (در دامنه های دریاچه سد) [۲]

## ۲-۲- انواع مدول تغییر شکل پذیری توده سنگ

انواع مدول را که می توان با استفاده از داده های بدست آمده از آزمایش های برجا محاسبه نمود، به شرح زیر می باشد [۴،۲]:

### الف- مدول بارگذاری اولیه<sup>۱</sup>

مدول بارگذاری اولیه معرفی مدولی از توده سنگ می باشد که برای نخستین بار تحت بارگذاری تا سطح مشخصی از فشار قرار گرفته است. به عنوان مثال اگر محدوده بارگذاری در سیکل اول ۲۰-۵ بار و در سیکل دوم ۴۰-۵ بار در نظر گرفته شود، مدول بارگذاری اولیه برای سیکل اول مربوط به اعمال فشار از ۵ تا ۲۰ بار بوده و برای سیکل دوم، مدول در محدوده ۴۰-۲۰ بار محاسبه می گردد. زیرا در سیکل دوم، فشار ۵-۲۰ بار برای بار دوم به توده سنگ اعمال گردیده و تنها محدوده فشار ۴۰-۲۰ بار برای نخستین بار به توده سنگ اعمال می گردد. به همین ترتیب مدول بارگذاری اولیه برای سایر سیکل ها نیز محاسبه می گردد.

### ب- مدول بارگذاری مجدد<sup>۲</sup>

این مدول معرف مدولی از توده سنگ است که مربوط به اعمال فشار مجدد به توده سنگ در یک-

1- First Loading Modulus  
2- Reloading Modulus

محدوده مشخص می باشد. در مثال بالا، در سیکل دوم مدول محاسبه شده مربوط به اعمال فشار از ۵ تا ۲۰ بار همان مدول بارگذاری مجدد می باشد. زیرا توده سنگ در سیکل اول نیز تحت چنین فشاری قرار گرفته است. واضح است که سیکل اول فاقد مدول بارگذاری مجدد می باشد و در گزارش نتایج به صورت خط تیره مشخص می شود.

### ج- مدول تغییر شکل پذیری<sup>۱</sup>

این مدول شاخص و معیار تغییر شکل پذیری در توده سنگ می باشد و برای کل محدوده اعمال فشار در هر سیکل محاسبه می گردد.

مشابه مدول الاستیسیته آزمایشگاهی، برای تعیین مدول تغییر شکل پذیری توده سنگ نیز می توان از روش های وتری (تانژانتی)، مماسی (سکانتی) و میانگین استفاده نمود. در ادامه انواع مدول های تغییر شکل پذیری معرفی شده است [۲]:

#### ۱- مدول تغییر شکل وتری ( $E_{sm}$ )

شیب خطی که مبداءاً مختصات را به هر نقطه از منحنی تنش - کرنش متصل می کند (شکل ۲-۳). مدول وتری به شدت تحت تأثیر بسته شدن درز و ترک ها قرار دارد و با افزایش میزان بسته شدگی کاهش می یابد.

#### ۲- مدول تغییر شکل پذیری مماسی ( $E_{tm}$ )

عبارتند از شیب خط مماس بر منحنی تنش - کرنش در بخش کوچکی از منحنی بارگذاری که بهترین معرف برای رفتار الاستیک باشد. بهتر است که اختلاف تنش در طول قسمت انتخابی حداقل باشد. مدول مماسی را می توان هم از روی منحنی بارگذاری و هم از روی منحنی باربرداری تعیین نمود. معمولاً مدول مماسی در حالت باربرداری بیشتر از حالت بارگذاری بوده و در حالت ایده آل با مدول الاستیسیته سنگ بکر ( $E_t$ ) برابری می کند. در شکل ۲-۳ نحوه محاسبه مدول های تغییر شکل پذیری وتری و مماسی در یک چرخه بارگذاری و باربرداری نشان داده شده است.

نسبت مدول وتری به مدول مماسی در مرحله باربرداری، شاخصی برای نشان دادن میزان افت الاستیسیته توده سنگ در اثر حضور درز و ترک ها می باشد. این پارامتر تحت عنوان «ضریب کاهش مدول<sup>۲</sup>» یا «آسیب تنش<sup>۳</sup>» شناخته می شود [۲].

#### ۳- مدول تغییر شکل پذیری باربرداری<sup>۴</sup>

مدول مماسی مربوط به منحنی تنش - کرنش مرحله باربرداری را مدول باربرداری یا مدول بازیافتی<sup>۵</sup> و یا مدول بازگشتی گویند. این مدول معمولاً بیشتر از سایر مدول ها بوده و در محاسبات مربوط به مرحله باربرداری مورد استفاده قرار می گیرد. علت این اختلاف، بسته شدن درزه و ترک ها در محل

1- Deformation Modulus

2- Reduction factor of modulus

3- Stress damaged

4- Unloading Modulus