

بِسْمِ اللَّهِ الرَّحْمَنِ الرَّحِيمِ



دانشگاه صنعتی اصفهان
دانشکده مهندسی معدن

تشخیص مکانی زلزله و شکل پذیری و ارزیابی آنی زوتروپی توده سنگ
ساختگاه سد خرسان-۲
با استفاده از آزمایش‌های برجا

پایان‌نامه کارشناسی ارشد مکانیک سنگ

کریم همتی بهرغانی

استاد راهنما

دکتر لهراسب فرامرزی



دانشگاه صنعتی اصفهان
دانشکده مهندسی معدن

پایان نامه کارشناسی ارشد مکانیک سنگ آقای کریم همتی بهرغانی

تحت عنوان

**تشخیص مکانیزم تگی ر شکل پذیری و ارزیابی آنی زوتروپی توده سنگ
ساختگاه سد خرسان-۲
با استفاده از آزمایش‌های برجا**

در تاریخ ۹۳/۱۰/۲۸ توسط کمیته تخصصی زیرمورد بررسی و تصویب نهایی قرار گرفت.

- | | |
|------------------------|-----------------------------|
| دکتر لهراسب فرامرزی | ۱- استاد راهنمای پایان نامه |
| دکتر محمود بهنیا | ۲- استاد داور داخلی |
| دکتر عباس اسلامی حقیقت | ۳- استاد داور خارجی |

تقدیر و تشکر

خداوند بزرگ را شاکرم که لطف خود را شامل حال من نمود تا بتوانم تحقیق خود را به پایان برسانم و بتوانم سهمی هر چند اندک، در راه توسعه علمی ایران عزیز بردارم که چو ایران نباشد، تن من مباد.

از جناب آقای دکتر فرامرز که در انجام این پایان نامه از راهنمایی ها و مساعدت های بی دریغ و دلسوزانه ایشان، همواره بهره مند بوده ام تشکر و قدردانی می نمایم. "من لم یشکر المخلوق لم یشکر الخالق".

همچنین از همکاری جناب آقای مهندس عزت اله قطره سامانی، عضو هیئت مدیره شرکت آزمونه فولاد که امکان تهیه اطلاعات این پایان نامه را فراهم نمودند بسیار سپاس گزارم، و آرزوی موفقیت از خداوند متعال برایشان خواستارم.

در پایان از خانواده عزیز و دوستان خوبم که در این مدت با صبر و شکیبایی کاستی های مرا نادیده گرفته و همواره مشوق من بوده اند، تشکر و سپاسگزاری می نمایم.

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

تقدیم به

به روح پدر بزرگوارم که نستوهی او کوه را به خاطر می آورد. او که ایمان و اعتقاد، ایثار و تلاش خستگی ناپذیر را به من آموخت.

آستان پر مهر مادرم، دامنی سبزتر از دامنه های کوهساران عالم و نگاهی پر مهرتر از بارش باران به سبزه زاران، که تمام رویشم به جانب خورشید پرفروغ روی اوست.

خواهر و برادرانم آنان که مشوق همیشگی در زندگی ام بوده اند، یاران پر محبتی که کلامشان صداقت می باشد و در قلب مهر بانیشان عطوفت موج می زند.

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

فهرست مطالب

صفحه	عنوان
هشت	فهرست مطالب
یازده	فهرست اشکال
چهارده	فهرست جداول
۱	چکیده
۲	فصل اول: کلیات
۲	۱-۱- مقدمه
۳	۲-۱- اهمیت تعیین مدول تغییر شکل پذیری
۴	۳-۱- هدف از انجام پروژه
۴	۴-۱- پیشینه تحقیق
۱۰	فصل دوم: تغییر شکل پذیری توده سنگ و روش های اندازه گیری آن
۱۰	۱-۲- مقدمه
۱۱	۲-۲- تغییر شکل پذیری
۱۱	۳-۲- انواع مدول
۱۱	۲-۳-۱- مدول الاستیسیته یا مدول یانگ (E)
۱۲	۲-۳-۲- مدول تغییر شکل پذیری توده سنگ (E_m)
۱۲	۳-۳-۲- مدول الاستیسیته توده سنگ (E_{em})
۱۲	۴-۳-۲- مدول باربرداری
۱۲	۵-۳-۲- مدول مماسی اولیه
۱۳	۲-۴- روش های تعیین تغییر شکل پذیری توده سنگ
۱۳	۲-۴-۱- آزمون های آزمایشگاهی
۱۴	۲-۴-۲- تخمین های غیر مستقیم مدول تغییر شکل پذیری
۱۷	۳-۴-۲- آزمون های برجها
۱۸	۵-۲- رابطه بین نتایج حاصل از آزمون های برجها
۲۰	فصل سوم: روش انجام آزمایش دیلاتومتری و عوامل موثر بر آن
۲۰	۱-۳- مقدمه
۲۰	۲-۳- روش تعیین مدول تغییر شکل پذیری توده سنگ با استفاده از دیلاتومتر انعطاف پذیری با اندازه گیری
۲۲	تغییر شکل شعاعی
۲۲	۳-۲-۱- کلیات
۲۲	۳-۲-۲- تجهیزات مورد نیاز

۲۳	..... روش کار	۳-۲-۳
۲۴	..... تئوری آزمایش	۳-۳
۲۸	..... محاسبات	۴-۳
۳۰	..... تحلیل آزمایش‌های دی‌لاتومتری در توده سنگ‌های ناهمسانگرد	۵-۳
۳۲	..... اثر ناهمسانگردی سنگ بکر بر روی مدول تغییری شکل	۳-۵-۱
۳۴	..... اثر ناهمسانگردی درزه الفای بی بر مدول تغییری شکل	۳-۵-۲
۳۷	..... عوامل موثر بر نتایج آزمایش‌های دی‌لاتومتری	۳-۶

فصل چهارم: زمین‌شناسی و موقعیت جغرافیایی ساختگاه سد خرسان ۲..... ۴۱

۴۱	..... موقعیت جغرافیایی و راه‌های دسترسی	۱-۴
۴۲	..... زمین‌ریخت‌شناسی	۲-۴
۴۳	..... واحدهای سنگی	۳-۴
۴۳	..... 1-4-3 سازند گچساران (GS)	1-۴-۳
۴۳	..... 2-4-3 سازند آسماری (AS)	2-۴-۳
۴۴	..... زمین‌شناسی ساختمانی	۴-۴
۴۵	..... بررسی سی‌ستم ناپیوستگی‌های سطحی	۴-۵
۴۵	..... ۱-۵-۴ درزه‌های اصلی	۴-۵-۱

فصل پنجم: تشخیص مکانی‌زم تغییری شکل‌پذیری در طول انجام آزمایش‌های دی‌لاتومتری ۴۹

۴۹	..... مقدمه	۱-۵
۵۰	..... تفسیر نتایج آزمایش‌های دی‌لاتومتری و تشخیص مکانی‌زم‌های حاکم بر تغییری شکل‌پذیری توده سنگ در طول انجام آزمایش	۲-۵
۵۳	..... ۱-۲-۵ شکل نمودار فشار-تغییری شکل	۱-۲-۵
۵۸	..... ۲-۲-۵ تغییری شکل در هر سی‌کل بارگذاری و همچنین تغییری شکل و نرخ تغییری شکل در پی‌ک هر سی‌کل بارگذاری	۲-۲-۵
۶۹	..... ۳-۲-۵ نسبت تغییری شکل برگشت‌ناپذیری به تغییری شکل کل در هر سی‌کل بارگذاری-باربرداری و تغییرات آن در سی‌کل‌های پی در پی بارگذاری آزمایش و تغییری شکل کلی و برگشت‌ناپذیری هر آزمایش (بعد از ۳ سی‌کل بارگذاری)	۲-۲-۳
۷۳	..... ۴-۲-۵ بررسی پدیده شکست در توده سنگ حین انجام آزمایش‌های دی‌لاتومتری	۲-۲-۴

فصل ششم: ارزیابی ناهمسانگردی توده سنگ ساختگاه سد خرسان ۲ و ارائه رابطه تجربی جدید جهت تعینی مدول تغییری شکل‌پذیری با استفاده از داده‌های دی‌لاتومتری و بر مبنای شاخص مقاومت زمین‌شناسی ۷۹

۷۹	..... مقدمه	۱-۶
۸۰	..... معرفی آزمایش‌های دی‌لاتومتری سد خرسان ۲	۲-۶

- ۳-۶ - ارزیابی ناهمسانگردی توده سنگ ساختگاه ۸۱
- ۳-۶-۱ - ارزیابی ناهمسانگردی تکیه گاه چپ ۸۲
- ۳-۶-۲ - ارزیابی ناهمسانگردی تکیه گاه راست ۸۸

۹۴	.....	ارائه رابطه تجربی جدید با استفاده از داده‌های دیلاتومتری و بر مبنای شاخص مقاومت زمين شناسی	۴-۶
۹۴	.....	مقدمه	۱-۴-۶
۹۵	.....	اندیس مقاومت زمين شناسی (GSI)	۲-۴-۶
۹۸	.....	اعتبار سنجی رابطه بدست آمده	۳-۴-۶
۱۰۰	.....	فصل هفتم: نتایج گیری و پی‌شهادات	
۱۰۰	.....	نتیجه گیری	۱-۷
۱۰۱	.....	پی‌شهادات	۲-۷
۹۸	.....	مراجع	

فهرست اشکال

<u>عنوان</u>	<u>صفحه</u>
شکل ۱-۱- تنش برشی و کششی ایجاد شده در پی سد بتنی در اثر تغییری در شکل سازندها.....	۳
شکل ۱-۲- تغییری در مدول دیلاتومتری با زوایای مختلف بین راستای بارگذاری و شیستیستیته در سد جاوه.....	۷
شکل ۱-۳- رابطه بین مدول تغییری در شکل دیلاتومتری و تنش محصور در سد جاوه.....	۷
شکل ۱-۲- نمودار تیپیک تنش- تغییر شکل نمونه‌ای از توده سنگ.....	۱۲
شکل ۲-۲- تعاریف مختلف برای تغییر شکل پذیری توده سنگ. (۱) مدول مماسی اولیه، (۲) مدول مماسی الاستیک، (۳) مدول باربرداری و (۴) مدول تغییر شکل پذیری.....	۱۳
شکل ۳-۲- آزمایش مقاومت فشاری تک محوری روی سنگ.....	۱۴
شکل ۲-۴- محدوده پیشنهادی برای کاربری انواع روش‌های برجا.....	۱۸
شکل ۱-۳- نمای از تجهیزیات و نحوه انجام آزمایش دیلاتومتری.....	۲۱
شکل ۲-۳- تنش‌های وارد بر یک المان استوانه جدار ضخیم یا دیلاتومتر.....	۲۵
شکل ۳-۳- نحوه اعمال تنش در یک استوانه جدار ضخیم یا دیلاتومتر.....	۲۶
شکل ۳-۴- هندسه مسئله- گمانه در یک توده سنگ به صفحاتی از ناهمسانگردی حفر می‌شود.....	۳۱
شکل ۳-۵- نمای از نحوه بارگذاری در آزمایش دیلاتومتری.....	۳۲
شکل ۳-۶- چهار حالت از ناهمسانگردی زمانی که محور گمانه بر یک صفحه تقارن الاستیک عمود است- الف و ب (ارتوتروپیک). ج و د (ترانس ایزوتروپیک).....	۳۳
شکل ۳-۷- الف) فاصله ناپیوستگی‌ها کمتر از طول سلول دیلاتومتر ب) فاصله متوسط ناپیوستگی‌ها بیشتر از طول سلول دیلاتومتر.....	۳۷
شکل ۴-۱- نمایی از ساختگاه سد خرسان ۲ (نگاه به پایین دست).....	۴۳
شکل ۴-۲- نمودار منحنی‌های تراز مربوط به تمرکز قطب‌ها و متوسط موقعیت صفحات درزه و لایه‌بندی در تکیه‌گاه چپ.....	۴۷
شکل ۴-۳- نمودار منحنی‌های تراز مربوط به تمرکز قطب‌ها و متوسط موقعیت صفحات درزه و لایه‌بندی در تکیه‌گاه راست.....	۴۸
شکل ۵-۱- موقعیت گالری‌های اکتشافی در ساختگاه سد خرسان ۲.....	۵۱
شکل ۵-۲- نحوه قرارگیری سنسورها در آزمایش دیلاتومتر سد خرسان ۲.....	۵۱
شکل ۵-۳- سیکل‌های بارگذاری- باربرداری استفاده شده در آزمایش‌های دیلاتومتر ساختگاه سد خرسان ۲.....	۵۳
شکل ۵-۴- نمودارهای فشار- تغییری در شکل مربوط به الف) SENSOR1 برای آزمایش در عمق ۴۸ متری گمانه D1L2 ب) SENSOR2 برای آزمایش در عمق ۴۸ متری گمانه D1L2 ج) SENSOR3 برای آزمایش در عمق ۴۸ متری گمانه D1L2 د) SENSOR1 برای آزمایش در عمق ۹۱ متری گمانه D2L1 ه) SENSOR2 برای آزمایش در عمق ۹۱ متری گمانه D2L1 و) SENSOR3 برای آزمایش در عمق ۹۱ متری گمانه D2L1.....	۵۴
شکل ۵-۵- نمودارهای فشار- تغییری در شکل مربوط به الف) SENSOR1 برای آزمایش در عمق ۶۶ متری گمانه D2R1 ب) SENSOR2 برای آزمایش در عمق ۶۶ متری گمانه D2R1 ج) SENSOR3 برای آزمایش در عمق ۶۶ متری گمانه D2R1 د) SENSOR1 برای آزمایش در عمق ۹۳ متری گمانه D1R1 ه) SENSOR2 برای آزمایش در عمق ۹۳ متری گمانه D1R1 و) SENSOR3 برای آزمایش در عمق ۹۳ متری گمانه D1R1.....	۵۵

- شکل ۵-۶- باز شدگی ناپیوستگی‌ها در تکیه‌گاه چپ و راست. ۵۷
- شکل ۵-۷- نمودار هیستوگرام و نتایج آماری تنش محصور کننده در الف) تکیه‌گاه چپ ب) تکیه‌گاه راست. ۵۸
- شکل ۵-۸- نمودارهای تغییری شکل-زمان در سیکل سوم بارگذاری برای آزمایش دیلاتومتری انجام شده در الف) عمق ۴۸ متری گمانه D1L2 ب) عمق ۵۶/۴ متری گمانه D1L2 ج) عمق ۸۹ متری گمانه D1L1 د) عمق ۹۱ متری گمانه D2L1 در تکیه‌گاه چپ. ۵۹
- شکل ۵-۹- نمودارهای تغییری شکل-زمان در سیکل سوم بارگذاری برای آزمایش دیلاتومتری انجام شده در الف) عمق ۶۶ متری گمانه D2R1 ب) عمق ۹۵/۵ متری گمانه D2R1 ج) عمق ۸۲ متری گمانه D1R1 د) عمق ۹۳ متری گمانه D1R1 در تکیه‌گاه راست. ۶۰
- شکل ۵-۱۰- نمودارهای تغییری شکل-زمان در سیکل دوم بارگذاری برای آزمایش دیلاتومتری انجام شده در الف) عمق ۴۸ متری گمانه D1L2 ب) عمق ۵۶/۴ متری گمانه D1L2 ج) عمق ۸۹ متری گمانه D1L1 د) عمق ۹۱ متری گمانه D2L1 در تکیه‌گاه چپ. ۶۲
- شکل ۵-۱۱- نمودارهای تغییری شکل-زمان در سیکل دوم بارگذاری برای آزمایش دیلاتومتری انجام شده در الف) عمق ۶۶ متری گمانه D2R1 ب) عمق ۹۵/۵ متری گمانه D2R1 ج) عمق ۸۲ متری گمانه D1R1 د) عمق ۹۳ متری گمانه D1R1 در تکیه‌گاه راست. ۶۲
- شکل ۵-۱۲- نمودارهای تغییری شکل-زمان در سیکل سوم بارگذاری برای آزمایش دیلاتومتری انجام شده در الف) عمق ۴۸ متری گمانه D1L2 ب) عمق ۵۶/۴ متری گمانه D1L2 ج) عمق ۸۹ متری گمانه D1L1 د) عمق ۹۱ متری گمانه D2L1 در تکیه‌گاه چپ. ۶۳
- شکل ۵-۱۳- نمودارهای تغییری شکل-زمان در سیکل سوم بارگذاری برای آزمایش دیلاتومتری انجام شده در الف) عمق ۶۶ متری گمانه D2R1 ب) عمق ۹۵/۵ متری گمانه D2R1 ج) عمق ۸۲ متری گمانه D1R1 د) عمق ۹۳ متری گمانه D1R1 در تکیه‌گاه راست. ۶۴
- شکل ۵-۱۴- نمودارهای نرخ تغییری شکل-زمان در سیکل سوم بارگذاری برای آزمایش دیلاتومتری انجام شده در الف) عمق ۴۸ متری گمانه D1L2 ب) عمق ۵۶/۴ متری گمانه D1L2 ج) عمق ۸۹ متری گمانه D1L1 د) عمق ۹۱ متری گمانه D2L1 در تکیه‌گاه چپ. ۶۷
- شکل ۵-۱۵- نمودارهای نرخ تغییری شکل-زمان در سیکل سوم بارگذاری برای آزمایش دیلاتومتری انجام شده در الف) عمق ۶۶ متری گمانه D2R1 ب) عمق ۹۵/۵ متری گمانه D2R1 ج) عمق ۸۲ متری گمانه D1R1 د) عمق ۹۳ متری گمانه D1R1 در تکیه‌گاه راست. ۶۸
- شکل ۵-۱۶- نمودارهای نسبت تغییری شکل برگشت ناپذیری برای سیکل‌های بارگذاری آزمایش دیلاتومتری انجام شده در الف) عمق ۴۸ متری گمانه D1L2 ب) عمق ۵۶/۴ متری گمانه D1L2 ج) عمق ۸۹ متری گمانه D1L1 د) عمق ۹۱ متری گمانه D2L1 در تکیه‌گاه چپ. ۷۰
- شکل ۵-۱۷- نمودارهای نسبت تغییری شکل برگشت ناپذیری برای سیکل‌های بارگذاری آزمایش دیلاتومتری انجام شده در الف) عمق ۶۶ متری گمانه D2R1 ب) عمق ۹۵/۵ متری گمانه D2R1 ج) عمق ۸۲ متری گمانه D1R1 د) عمق ۹۳ متری گمانه D1R1 در تکیه‌گاه راست. ۷۱
- شکل ۵-۱۸- الف) تغییری شکل کل در تکیه‌گاه چپ ب) نسبت تغییری شکل برگشت ناپذیری در تکیه‌گاه چپ ج) تغییری شکل کل در تکیه‌گاه راست د) نسبت تغییری شکل برگشت ناپذیری در تکیه‌گاه راست. ۷۲
- شکل ۵-۱۹- مقادیری می‌انگین مدول تغییری شکل برای هر سنسور در تکیه‌گاه چپ و راست. ۷۳

- شکل ۵-۲۰- رفتارهای متفاوت سنگ در حین آزمایش دیلاتومتری. ۷۵.....
- شکل ۵-۲۱- نمودار فشار-تغییر شکل مربوط به سنسور ۱ در آزمایش انجام شده در عمق ۷۶/۶ متری گمانه DIL2. ۷۵.....
- شکل ۵-۲۲- نمودار تغییر شکل-زمان در طول سیکل سوم، مربوط به سنسور ۱ آزمایش انجام شده در عمق ۷۶/۶ متری گمانه . DIL2. ۷۶.....
- شکل ۵-۲۳- نمودار تغییر شکل-زمان در پیک سیکل سوم، مربوط به سنسور ۱ آزمایش انجام شده در عمق ۷۶/۶ متری گمانه DIL2. ۷۶.....
- شکل ۵-۲۴- نمودار نرخ تغییر شکل-زمان در طول سیکل سوم، مربوط به سنسور ۱ آزمایش انجام شده در عمق ۷۶/۶ متری گمانه DIL2. ۷۷.....
- شکل ۵-۲۵- نمودار نرخ تغییر شکل-زمان در پیک سیکل سوم، مربوط به سنسور ۱ آزمایش انجام شده در عمق ۷۶/۶ متری گمانه DIL2. ۷۷.....
- شکل ۶-۱- تعدادی از نمودارهای ناهمسانگردی برای آزمایش‌های دیلاتومتری انجام شده الف) عمق ۳۴/۵ متری گمانه DIL1 ب) عمق ۱۵/۵ متری گمانه DIL1 پ) عمق ۴۸ متری گمانه DIL2 ت) عمق ۸۹ متری گمانه DIL1 ث) عمق ۵۶/۴ متری گمانه DIL2 ج) عمق ۵۵/۵ متری گمانه DIL2 چ) عمق ۹۱ متری گمانه D2L1 ح) عمق ۵۹/۸ متری گمانه DIL2، در تکیه‌گاه چپ. ۸۳.....
- شکل ۶-۲- تغییر مدول تغییر شکل‌پذیری (شکل‌پذیری الف) برای سنسورهای آزمایش دیلاتومتری و ب) در سه جهت با زاویه ۱۲۰ درجه نسبت به هم، در نقاط مختلف گمانه DIL1. ۸۵.....
- شکل ۶-۳- تغییر مدول تغییر شکل‌پذیری نسبت الف) برای سنسورهای آزمایش دیلاتومتری و ب) در سه جهت با زاویه ۱۲۰ درجه نسبت به هم، در نقاط مختلف گمانه D2L1. ۸۶.....
- شکل ۶-۴- تغییر مدول تغییر شکل‌پذیری الف) برای سنسورهای آزمایش دیلاتومتری و ب) در سه جهت با زاویه ۱۲۰ درجه نسبت به هم، در نقاط مختلف گمانه DIL2. ۸۷.....
- شکل ۶-۵- تعدادی از نمودارهای ناهمسانگردی برای آزمایش‌های دیلاتومتری انجام شده الف) عمق ۷۷ متری گمانه DIR1 ب) عمق ۸۲ متری گمانه DIR1 پ) عمق ۹۳ متری گمانه DIR1 ت) عمق ۶۶ متری گمانه D2R1 ث) عمق ۸۷ متری گمانه D2R1 ج) عمق ۹۵/۵ متری گمانه D2R1 چ) عمق ۲۲ متری گمانه D2R2 ح) عمق ۳۰ متری گمانه D2R2، در تکیه‌گاه راست. ۸۸.....
- شکل ۶-۶- تغییر مدول تغییر شکل‌پذیری الف) برای سنسورهای آزمایش دیلاتومتری و ب) در سه جهت با زاویه ۱۲۰ درجه نسبت به هم، در نقاط مختلف گمانه DIR1. ۹۰.....
- شکل ۶-۷- تغییر مدول تغییر شکل‌پذیری الف) برای سنسورهای آزمایش دیلاتومتری و ب) در سه جهت با زاویه ۱۲۰ درجه نسبت به هم، در نقاط مختلف گمانه D2R1. ۹۱.....
- شکل ۶-۸- تغییر مدول تغییر شکل‌پذیری الف) برای سنسورهای آزمایش دیلاتومتری و ب) در سه جهت با زاویه ۱۲۰ درجه نسبت به هم، در نقاط مختلف گمانه DIR2. ۹۲.....
- شکل ۶-۹- تغییر مدول تغییر شکل‌پذیری الف) برای سنسورهای آزمایش دیلاتومتری و ب) در سه جهت با زاویه ۱۲۰ درجه نسبت به هم، در نقاط مختلف گمانه D2R2. ۹۳.....
- شکل ۶-۱۰- مقادیر RMSE برای رابطه پیشنهاد شده در این تحقیق و روابط تجربی. ۹۹.....
- شکل ۶-۱۱- مقایسه مقادیر مدول اندازه‌گیری شده و تخمین زده شده از روابط تجربی. ۹۹.....

فهرست جداول

عنوان	صفحه
جدول ۱-۲ بر آورد تجربی مدول تغییری شکل توده سنگ با استفاده از سیستم های طبقه بندی	۱۵
جدول ۲-۲- طبقه بندی توده سنگ بر اساس مدول دیلاتومتر	۱۹
جدول ۱-۴- شیب و جهت شیب ناپیوستگی های اصلی تکیه گاه چپ	۴۷
جدول ۲-۴- شیب و جهت شیب ناپیوستگی های اصلی تکیه گاه راست	۴۷
جدول ۱-۵- جهت سنسورها با راستای ناپیوستگی های اصلی در تکیه گاه چپ	۵۲
جدول ۲-۵- جهت سنسورها با راستای ناپیوستگی های اصلی در تکیه گاه راست	۵۲
جدول ۳-۵- ارزیابی آماری تغییری شکل ایجاد شده در پیک سیکل دوم و سوم آزمایش های دیلاتومتری در تکیه گاه چپ	۶۵
جدول ۴-۵- ارزیابی آماری تغییری شکل ایجاد شده در پیک سیکل دوم و سوم آزمایش های دیلاتومتری در تکیه گاه راست	۶۶
جدول ۱-۶- آزمایش های دیلاتومتری انجام شده در ساختگاه سد خرسان ۲	۸۱
جدول ۲-۶- نتایج آنالیز رگرسیون بین داده های آزمایش دیلاتومتری و شاخص مقاومت زمینی شناسی (GSI)	۹۷

چکیده

مدول تغییری شکل‌پذیری توده سنگ، یکی از مهمترین پارامترهای طراحی در سازندهای سنگی است. این پارامتر قابلیت تغییری شکل‌پذیری سنگ قبل از مرحله گسیختگی را نشان می‌دهد. روش‌های متفاوتی برای تعین مدول تغییری شکل‌پذیری توده سنگ وجود دارد. آزمایش بارگذاری شعاعی درون گمانه (دیلاتومتری) یکی از روش‌های مرسوم برای اندازه‌گیری مدول تغییری شکل‌پذیری توده سنگ می‌باشد. نتایج حاصل از این آزمایش متاثر از ناپیوستگی‌های موجود در توده سنگ می‌باشد. نتایج حاصل از این تحقیق نشان داد که تغییری شکل نرمال و برشی ناپیوستگی‌ها و گسترش تنش‌های کششی در دیواره گمانه، به عنوان مکانیسم‌های حاکم بر تغییری شکل‌پذیری توده سنگ می‌باشند. با مقایسه نتایج حاصل از تغییری شکل‌پذیری در ساختگاه سد، تغییری شکل برشی به عنوان مکانیسم غالب در تکیه‌گاه چپ، و مکانیسم تغییری شکل نرمال به عنوان مکانیسم غالب در تکیه‌گاه راست تعین شد. در ادامه به منظور ارزیابی ناهمسانگردی توده سنگ ساختگاه، مدول تغییری شکل‌پذیری تمام آزمایش‌ها محاسبه شد و با نمودار تغییری رات مدول نسبت به عمق در سه جهت با زاویه ۱۲۰ درجه که با استفاده از نرم‌افزار Rock Works بررسی گردید. مقایسه شد. در پایان، مقدار GSI برای گمانه‌های آزمایش دیلاتومتری با استفاده از RMR₈₉ تعین شد و سپس یک رابطه تجربی برای تعین مدول تغییری شکل‌پذیری توده سنگ با روش تحلیلی رگرسیون بین مقادیر مدول اندازه‌گیری شده توسط دیلاتومتر و پارامتر GSI ارائه شد.

کلمات کلیدی: مدول تغییری شکل‌پذیری، آزمایش دیلاتومتری، مکانیسم تغییری شکل برشی، تغییری شکل نرمال،

فصل اول

کلیات

۱-۱- مقدمه

تغییر شکل‌پذیری به عنوان یکی از مهمترین پارامترهای ژئومکانیکی بدست آمده از رفتار توده سنگ شناخته می‌شود و مهمترین فاکتور در طراحی سازه‌ها می‌باشد [۱]. هنگامی که سنگ‌ها و توده سنگ‌ها برای اهداف ژئومکانیکی طبقه‌بندی می‌شوند لازم است که طبقه‌بندی توده سنگ‌ها براساس مقاومت یا مدول استاتیکی تغییر شکل صورت گیرد تا یک نشانه‌ی پایداری یا عکس العمل تغییر شکلی آن‌ها باشد. علاوه بر آن، مقاومت و مدول تغییر شکل‌پذیری پارامترهای ورودی لازم توده سنگ در استفاده از روش‌های عددی می‌باشند. در بسیاری از روش‌های طراحی از جمله روش‌های ریاضی و عددی در کاربردهای مکانیک سنگ نیاز به خصوصیات ارتجاعی و غیرارتجاعی توده سنگ است.

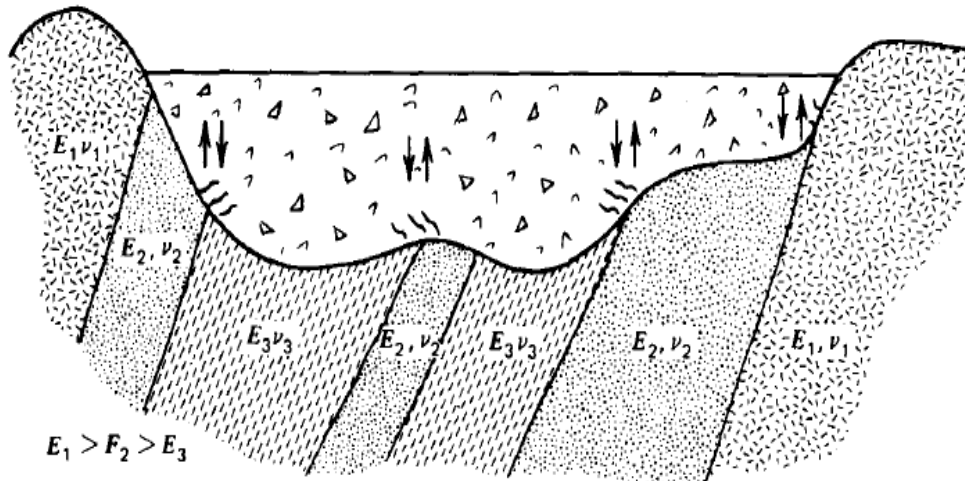
تعیین مدول تغییر شکل‌پذیری توده سنگ، از طریق آزمایش‌های بارگذاری و یا باربرداری برجا، آزمون‌های آزمایشگاهی، روش‌های مبتنی بر روابط تجربی صورت می‌گیرد. هر یک از این روش‌ها محاسن و معایب خاص خود را دارند. کاربرد آزمون‌های برجا، از جمله، جک صفحه‌ای، بارگذاری صفحه‌ای، جک شعاعی، جک تخت، دیلاتومتر و غیره نیاز به مراحل دشوار دارد و انجام آن‌ها مستلزم صرف هزینه و وقت زیادی است. از این رو هر نوع تحقیقی برای بهینه‌سازی این آزمایش‌ها و همچنین تفسیر صحیح نتایج بدست آمده، حائز اهمیت است، چرا که از طریق این نتایج می‌توان با عوامل تاثیرگذار بر نتایج این آزمایش‌ها بیشتر آشنا شده و در آزمایش‌های مشابه بعدی از نتایج حاصل از هر تحقیق برای تفسیر بهتر زمین استفاده نمود [۱].

تغییر شکل توده سنگ درزه‌دار در ارتباط با دو مولفه است: ۱- تغییر شکل سنگ بکر که معمولاً رفتار الاستیک خطی نشان می‌دهد و ۲- تغییر شکل ناپیوستگی‌ها که ممکن است رفتار ناهمسانگردی و غیر خطی و رفتار پلاستیکی نشان دهد. بسته به اینکه کدام مولفه غالب باشد مکانیسم‌های متفاوتی می‌تواند بر تغییر شکل توده سنگ حاکم باشد [۲]. در این تحقیق به منظور تشخیص مکانیسم‌های حاکم بر تغییر شکل توده سنگ در طول آزمایش دی‌لاتومتری نتایج ۶۱ آزمایش دی‌لاتومتری انجام شده در ساختگاه سد خرسان ۲ به طور دقیق مورد تجزیه و تحلیل قرار گرفت و چهار مکانیسم به عنوان مکانیسم‌های حاکم بر تغییر شکل توده سنگ ارائه شد. همچنین با محاسبه مدول تغییر شکل پذیری و رسم نمودارهای ناهمسانگردی برای هر آزمایش، ناهمسانگردی توده سنگ ساختگاه به صورت جداگانه برای تکیه‌گاه چپ و راست مورد ارزیابی قرار گرفت، و در نهایت با استفاده از روش رگرسیون گیری یک رابطه تجربی جدید جهت برآورد مدول تغییر شکل پذیری توده سنگ ساختگاه ارائه گردید.

۱-۲- اهمیت تعیین مدول تغییر شکل پذیری

پارامتر تغییر شکل پذیری نشان دهنده میزان قابلیت تغییر شکل توده سنگ در پاسخ به هر گونه بارگذاری یا باربرداری می‌باشد. این پارامتر در طراحی پروژه‌هایی که نسبت به تغییر شکل‌های کم حساس هستند از اهمیت بیشتری برخوردار است. پروژه‌هایی همچون نیروگاه‌های زیرزمینی، سدها، تونل‌ها و برج‌های مسکونی از جمله پروژه‌هایی هستند که باید در طول عمر مفیدشان حداقل تغییر شکل در آنها اتفاق بیفتد. در این نوع سازه‌ها، حتی زمانی که خطر گسیختگی وجود ندارد نیز تغییر شکل سنگ بسیار حائز اهمیت و گاهی نگران کننده است، چراکه تغییر شکل ناهمگن (حتی به مقدار جزئی) می‌تواند موجب افزایش تغییرات شدت تنش در سازه گردد.

شکل ۱-۱ سدی را نشان می‌دهد که روی پی سنگی با ویژگی‌های تغییر شکل پذیری ناهمگن قرار گرفته است. بدلیل جابجائی غیر یکنواخت توده سنگ پی، تنش‌های برشی و کششی در آن ایجاد می‌گردد. با آگاهی از تغییر شکل پذیری چنین توده سنگی می‌توان سد را بگونه‌ای طراحی نمود که این وضعیت بحرانی را تحمل نماید [۳].



شکل ۱-۱: تنش برشی و کششی ایجاد شده در پی سد بتنی در اثر تغییر شکل سازندها [۳].

۳-۱- هدف از انجام پروژه

بسیاری از روش‌های طراحی، مانند روش‌های عددی و تحلیلی در کاربردهای مکانیک سنگ نی‌ازمند مشخصات الاستیک و شکست سنگ می‌باشند. در بین مشخصات توده سنگ، مدول تغییر شکل پذیری شکل‌پذیری اهمیت حیاتی برای طراحی و اجرای موفق پروژه‌های مهندسی سنگ دارد، زیرا مدول تغییر شکل‌پذیری بهترین پارامتر نشان‌دهنده رفتار مکانیکی قبل از شکست سنگ می‌باشد.

مدول تغییر شکل‌پذیری توده سنگ را می‌توان با انجام آزمایش‌های برجا که طی آن‌ها سنگ تحت چند چرخه بارگذاری و باربرداری قرار می‌گیرد بدست آورد. این چرخه‌ها شبیه‌سازی رفتار توده سنگ در طول اجرای پروژه و پس از آن می‌باشند. تعیین مدول تغییر شکل‌پذیری توده سنگ در مرحله طراحی صورت می‌گیرد. آزمایش‌های صحرائی برای تعیین این مدول حتی الامکان طوری اجرا می‌گردند که از نظر مقدار فشار و جهت بارگذاری شبیه به شرایط واقعی پروژه باشند. همچنین حجم سنگی که مورد آزمایش قرار می‌گیرد باید متناسب با پروژه مورد نظر باشد [۴]. در این پایان‌نامه برای تشخیص مکانیسم‌های حاکم بر تغییر شکل توده سنگ در طول انجام آزمایش‌های دیلاتومتری، آزمایش‌ها در داخل گروهای بر اساس ارتباط جهت سنسورها با جهت درزه‌های اصلی ساختگاه دسته‌بندی می‌شوند. و مکانیسم‌های اصلی کنترل‌کننده تغییر شکل توده سنگ در طول آزمایش‌های دیلاتومتری معرفی می‌شوند. زیرا با شناخت مکانیسم‌های تغییر شکل علاوه بر طراحی مناسب، در صورت لزوم می‌توان برای جلوگیری از تغییر شکل‌های غیرمجاز تدبیر مناسبی اندیشید. ارزیابی ناهمسانگردی توده سنگ ساختگاه سد و ارائه رابطه تجربی جدید با توجه به داده‌های بدست آمده از آزمایش‌های دیلاتومتر از دیگر اهدافی هستند که در این تحقیق دنبال می‌شوند.

۴-۱- پیشینه تحقیق

آقارزی در سال ۲۰۰۳ با مدلسازی آزمایش‌های دیلاتومتری نشان داد که میدان تنش برجایک عامل تأثیرگذار بر نتایج مدول تغییر شکل دیلاتومتری است و تأثیر میدان تنش ثقلی وابسته به K (نسبت تنش افقی به قائم) است و با کاهش این ضریب از تأثیر میدان تنش بر نتایج آزمایش‌ها کاسته می‌شود. همچنین وی برای نشان دادن تأثیر درزه در آزمایش‌های دیلاتومتری با استفاده از مدلسازی عددی (روش اجزای مرزی) و استفاده از نرم‌افزار EXAMINE، آزمایش‌های دیلاتومتری با فشار ۱۰ مگاپاسکال در گمانه‌ای به شعاع ۰/۱ متر در توده سنگ را تحت مطالعه قرار داد، و تأثیر وجود یک درزه در اطراف محل آزمایش با فواصل مختلف را مورد بررسی قرار داد. نتایج نشان داد که فقط وجود درزه در حجمی از توده سنگ که از بار ناشی از این آزمایش متاثر می‌شود بر نتایج تأثیرگذار و با دور شدن از گمانه از شدت آن کاسته می‌شود. در فاصله‌ای تقریباً ۳ برابر شعاع گمانه، حضور درزه بر نتایج آزمایش بی‌تأثیر می‌شود. از این رو در مورد آزمایش‌های انجام شده در توده سنگ‌های حاوی دسته درزه‌هایی با فاصله‌داری بیش از ۳ برابر قطر گمانه، می‌توان از تأثیر درزه‌ها بر نتایج آزمایش صرف‌نظر کرد. اما در عین حال باید به محل انجام آزمایش از نظر مجاورت با درزه دقت نمود [۴].

گالرا^۱ و همکارانش در سال ۲۰۰۵ به مقایسه بین مدول‌های تغییری شکل بدست آمده از آزمایش دیلاتومتر و طبقه‌بندی RMR و خصوصیات سنگ بکر مانند مقاومت فشاری تک‌محوره و مدول یانگ پرداخته‌اند. در این تحقیق بیش از ۷۰۰ داده از مقالات مختلف و همچنین برخی پروژه‌ها استفاده شده است. در این تحقیق از نتایج توده سنگ‌هایی که درجه هوازدگی آنها بیشتر از ۴ بوده و همچنین از مدول تغییری شکل‌های کمتر از ۰/۵GPa صرف‌نظر شد. و در نهایت ۴۳۶ داده با مقادیر مشخص مدول تغییری شکل و الاستیسیته و مقاومت فشاری تک‌محوره سنگ بکر و RMR باقی‌ماند. این اطلاعات از سنگ‌های مختلف رسوبی، آذری و دگرگونی بدست آمد[۵].

گالرا و همکارانش در این تحقیق بیان کردند که در میان روش‌های برجا برای تعیین مدول تغییری شکل سنگ، آزمایش‌های اتساع گمانه، مخصوصاً آزمایش دیلاتومتر انعطاف‌پذیری نتایج بهتری بدست می‌دهد. همچنین آنها بیان کردند که از میان پارامترهای تجربی RMR و RQD پارامتر RMR نتایج بهتر و واقعی‌تری بدست می‌دهد چرا که خود RMR دربرگیرنده مقدار RQD نیز است. همچنین نتایج بدست آمده از تخمین مدول با RMR نسبت به RQD کمتر است. آنها در این تحقیق همچنین با بررسی روابط تجربی مختلف دریافتند که بیشتر رابطه‌های تجربی برای تخمین مدول، مقادیر بالاتری از مدول را نسبت به مقدار واقعی تخمین می‌زنند. آنها همچنین با بررسی داده‌های موجود دریافتند که بهترین ضریب همبستگی برای RMR=۵۰ برقرار است و توصیه کردند که برای مقادیر کمتر از ۵۰ از رگرسیون خطی و برای مقادیر RMR بیشتر از ۵۰ از رگرسیون چند جمله‌ای استفاده شود. در ادامه این محققان، یک رابطه تجربی جدید بین RMR و نسبت $\frac{E_m}{E_i}$ به صورت رابطه ۱-۱ بیان کردند[۵].

$$E_m = E_i e^{\frac{(RMR-100)}{36}} \quad 1-1$$

توسل پور در سال ۲۰۰۵ با بررسی نتایج ۸ آزمایش بارگذاری صفحه‌ای و ۳۵ آزمایش دیلاتومتری انجام شده در سد گنوند و انجام یک سری عملیات آماری رگرسیونی به ارائه روابط جدیدی برای تخمین مدول تغییری شکل سنگ با استفاده از پارامتر RMR پرداختند و در نهایت با بررسی مدل‌های مختلف رگرسیونی از داده‌های موجود بیان کردند، که بالاترین ظرفیت پیش‌بینی مدول تغییری شکل‌پذیری با استفاده از پارامتر RMR Basic مربوط به مدل چند جمله‌ای درجه ۳ است. همچنین موثرترین عوامل در میزان پراکندگی مقادیر RMR، پارامتر مقاومت فشاری تک‌محوری سنگ و شرایط آب‌زی‌رزمینی است، که در صورت حذف این عوامل از امتیاز RMR معادلات جدید برحسب RMR قدرت تخمین بالاتری را دارا خواهند بود. به منظور بدست آوردن روابط دقیق‌تر بر حسب RMR بهتر است RMR به بازه‌های جدا تقسیم شده و برای هر بازه رابطه جداگانه تعریف شود. با توجه به ضعف روابط موجود برای تخمین مدول در RMRهای کمتر از ۳۵ بهتر است در این شرایط از روش‌های آزمایشگاهی برای تخمین مدول استفاده شود[۶].

حقی‌ر چهره‌قانی و همکارانش در سال ۲۰۰۸ با استفاده از نتایج بیش از ۱۰۰ آزمایش دیلاتومتری و حدود ۵۰ آزمایش جک صفحه‌ای انجام شده در ساختگاه سد آق‌چای، سیاه‌بی‌شه و گنوند به ارزیابی روابط تجربی پرداختند. ایشان با استفاده از نتایج می‌انگین مقادیر RMR در مناطق مورد مطالعه، مدول تغییری شکل را به کمک برخی

¹Galera

روابط تجربی موجود تخمین زدند. سپس با در نظر گرفتن مقدار تعینی شده مدول، از آزمایش برجا و با استفاده از روش شاخص می‌انگین قدرمطلق خطا، به مقایسه نتایج، و برآورد خطای حاصل از روابط تجربی پرداختند. با توجه به نتایج، بیان کردند که هر یک از روابط تنها در محدوده معینی از امتیاز توده سنگ دارای کارایی مناسب هستند [۷].

شاهوردی‌لو در سال ۲۰۰۸، ۴۳ آزمایش دیلاتومتری انجام شده در دو گمانه حفر شده در پروژه سد سیاه‌بی‌شه را مورد بررسی قرار داد. به منظور یک مشاهده کلی از ناهمسانگردی به همراه هر آزمایش، یک آزمایش با آزمون ۱۵۲ درجه (آزمون نیروگاه) و دیگری با آزمون ۶۲ درجه (عمود بر اولی) انجام شد. از آنجا که باید دو نقطه از منحنی بارگذاری - باربرداری را برای انجام محاسبات مربوطه انتخاب کرده و مدول را مطابق فرمول مربوطه محاسبه نمود، این احتمال وجود دارد که این دو نقطه به درستی انتخاب نشود که این موجب خطا در مقدار مدول می‌شود. مطابق با مشخصات فنی پروژه سیاه‌بی‌شه یک روش برای اندازه‌گیری کلی منحنی الاستیک و تغییر شکل‌پذیری در حداقل ۴ سیکل بارگذاری و باربرداری پیشنهاد کرد. که در آن مقدار ΔP_i و ΔD مورد نیاز برای معادله، به صورت رابطه ۱-۲ آمده است [۸].

$$\Delta P_i = P_{75} - P_{25} \quad \Delta D = D_{75} - D_{25} \quad 2-1$$

P_{75} : ۷۵ درصد از فشار در هر سیکل باربرداری D_{75} : قطر گمانه متناظر با P_{75}

P_{25} : ۲۵ درصد از فشار در هر سیکل بارگذاری D_{25} : قطر گمانه متناظر با P_{25}

نزدیکی به ۸۰ درصد از موقعیت آزمایش‌ها دارای RQD کمتر از ۴۵ بودند از این رو رابطه ۱-۳ نتایج بهتری بدست داد.

$$E_d = (1+v)D_0 \left[(1-v) \ln \left[\frac{P_i}{P_0} \right] + 1 \right] \quad 3-1$$

نسبت پواسون در اندازه‌گیری مدل‌ها ۰/۳۵ در نظر گرفته شد که ضروری است برای سنگ‌های با کیفیت بهتر ۰/۲۵ استفاده شود.

علی‌اصغری و هاشمی در سال ۲۰۰۸ با توجه به نتایج بدست آمده از ۴۲ آزمایش دیلاتومتری و ۹ آزمایش بارگذاری صفحه‌ای و ۶ آزمایش برشی در ساختگاه سد ژاوه در نزدیکی شهر سنندج و در ناحیه زمین‌شناسی سنندج - سیرجان، به بررسی اثر ناپیوستگی و تنش محصور بر مدول تغییر شکل‌پذیری پرداختند. برای بررسی اثر ناپیوستگی نتایج آزمایش‌هایی که در اعماق و شرایط زمین‌شناسی مشابه بدست آمده‌اند، مد نظر قرار گرفت. بعد از بدست آوردن مقدار ناهمسانگردی و با توجه به نتایج مشخص شد، که مدول معمولاً در جهت موازی ساختار بی‌شتر است و در آن اندازه ناهمسانگردی از ۱ تا ۳ تغییر می‌کند. همچنین، حداقل مقدار مدول تغییر شکل زمانی بدست می‌آید که امتداد تنش اصلی زوایای ۳۵ تا ۵۵ درجه با امتداد شیستوزیته ساخته و بی‌شترین مقدار تغییر شکل زمانی بدست آمد که امتداد تنش اصلی موازی محور بارگذاری است. شکل (۱-۲) [۹].

به منظور بررسی اثر تنش محصور بر نتایج مدول برجا تنها نتایجی از آزمایش دیلاتومتر در نظر گرفته شد که در