

رفتار مهندسی سنگ‌ها

دکتر محمدرضا عطرچیان

مهندس غلامرضا نیازی

ترجمه

Engineering behaviour of rocks - Second Edition

IAN FARMER

سرشناسه	Farmer, I. W. (Ian William) م. ۱۹۳۵- : فارمر، ایان ویلیام
عنوان و نام پدیدآورنده	رفتار مهندسی سنگ‌ها / [ایان ویلیام فارمر]؛ محمدرضا عطرچیان، غلامرضا نیازی.
مشخصات نشر	تهران؛ محمدرضا عطرچیان، ۱۳۹۶.
مشخصات ظاهری	۲۲۰ ص.: مصور، جدول، نمودار.
شابک	۱ - ۸۳۶۶ - ۰۴ - ۶۰۰ - ۹۷۸ : ۲۳۰۰۰۰ ریال
وضعیت فهرست نویسی	فیپا
یادداشت	عنوان : Engineering behaviour of rock, 2nd ed, 1983
یادداشت	کتابخانه
موضوع	مکانیک سنگ : rock mechanic
موضوع	سنگ‌ها و صخره‌ها - آرایش‌ها : rocks - testing
شناسه افزوده	عطرچیان، محمدرضا، ۱۳۲۹ - ترجم
شناسه افزوده	نیازی، غلامرضا، ۱۳۶۲ - ترجم
شناسه افزوده	رحمانی، اشکان، ۱۳۶۸ -، ویراستا
رده‌بندی کنگره	۱۳۹۶ ف ۷/۲، TAY۰۶
رده‌بندی دیویی	۶۲۴/۱۵۱۳۲ :
شماره کتابشناسی ملی	۴۸۴۰۴۵۷ :
عنوان کتاب	رفتار مهندسی سنگ‌ها
لیتوگرافی	ولیعصر قم
ناشر	تهران؛ محمدرضا عطرچیان، ۱۳۹۶.
شمارگان	۱۵۰۰ جلد، چاپ اول؛ تابستان ۱۳۹۶
شابک	978-600-04-8366-1 :

مکانیک سنگ شاخه‌ای از علوم زمین است که با پاسخ سنگ و توده‌های سنگی نسبت به نیروهای میدانی ناشی از محیط فیزیکی و برجای سنگ سروکار دارد. در اثر عملیات مهندسی بر روی یا درون سنگ، بازتوزیع تنش و به تبع آن تغییرشکل در محدوده عملیات رخ می‌دهد که تحلیل و ارزیابی آنها و سپس ارائه تمهیدات لازم برای پایداری توده باقیمانده، از اهداف مکانیک سنگ و مهندسی سنگ به شمار می‌آید.

حوزه کاربرد مکانیک سنگ، امروزه بسیار گسترده شده و عمده پروژه‌های بزرگ و زیربنایی را در بر می‌گیرد. در علوم متعدد مثل زمین‌شناسی، ژئوفیزیک، مهندسی معدن، مهندسی نفت (بخش بالادستی نفت و گاز) و بالاخره در مهندسی عمران، مکانیک سنگ نقش کلیدی ایفاء می‌کند. خوشبختانه در کشور ما نیز طی بیست سال گذشته این رشته از رشد و توسعه چشمگیر برخوردار بوده و در بخش‌های مختلف در جمله در طراحی و اجرای سدها، راه‌ها، مغارهای برق‌آبی، در پایداری چاه‌های نفت، پایداری معادیلر غیره، متخصصین این رشته در ایران نقش‌آفرین بوده و هم تراز با کشورهای توسعه یافته فعالیت می‌کنند.

دانشگاه‌های ایران در پایندگی و توسعه این علم سهم بزرگی به عهده داشته‌اند و علاوه بر تربیت متخصصین مورد نیاز کشور در کنترل نظای و علمی مکانیک سنگ و مهندسی سنگ فعال بوده و موفق به نشر منابع علمی متعدد در این زمینه شده‌اند.

کتاب "رفتار مهندسی سنگ‌ها" - Enginnering Behavior of Rocks - تألیف دکتر فارمر از متخصصین برجسته مکانیک سنگ، از جمله منابع علمی معتبر است که حاوی بخش‌ها و مطالبی است که در سایر منابع مرتبط با مکانیک سنگ وجود نداشته و با کمتر مورد بحث و بررسی قرار گرفته است. این کتاب توسط آقای دکتر محمدرضا عطرچیان و همکارانشان مهندس غلامرضا نیازی به فارسی ترجمه شده است که گام مفیدی در جهت نشر و توسعه بیشتر علم مکانیک سنگ و مهندسی سنگ در ایران است. مطالعه این اثر به دانشجویان به ویژه دانشجویان کارشناسی ارشد و دکتری مهندسی ژئوتکنیک، مهندسی مکانیک سنگ و زمین‌شناسی مهندسی توصیه می‌شود.

احمد فهیمی‌فر

استاد دانشکده مهندسی عمران و محیط‌زیست

دانشگاه صنعتی امیرکبیر

فصل اول - تشریح سنگ‌ها از دیدگاه مهندسی

۳	۱-۱. آزمایش‌های سنگ
۷	۲-۱. مقاومت تک محوری یا محصور نشده
۱۴	۳-۱. آزمون آزمایشگاهی و آزمایش‌های صحرایی (در محل)
۱۸	۴-۱. پوکی (تخاخل) و نفوذپذیری
۲۵	۵-۱. سنگ نابسته

فصل دوم - تنش و کرنش در سنگ

۳۵	۱-۲. تنش نقطه‌ای
۳۹	۲-۲. فشار حفره‌ای و تنش بر
۴۵	۳-۲. کرنش نقطه‌ای
۴۶	۴-۲. نمایش تنش و کرنش
۴۹	۵-۲. رابطه بین تنش و کرنش
۵۳	۶-۲. تنش‌های ژئواستاتیک
۵۶	۷-۲. اندازه‌گیری تنش‌های برجا

فصل سوم - تغییر شکل پذیری سنگ

۶۱	۱-۳. آزمایش‌های فشاری سنگ‌ها
۶۷	۲-۳. تغییر شکل سنگ‌ها تحت فشار
۷۱	۳-۳. مکانیک ریزترک‌ها
۷۷	۴-۳. شکست بزرگ مقیاس سنگ‌ها
۸۰	۵-۳. منحنی کامل تغییر شکل پذیری سنگ

فصل چهارم - مقاومت و تسلیم سنگ

۸۵	۱-۴. معیار مقاومت سنگ
۸۹	۲-۴. معیار تسلیم (yield)
۹۳	۳-۴. مفهوم حالت بحرانی
۹۴	۴-۴. آزمایش سه محوری
۱۰۱	۵-۴. داده‌های کرنش حجمی و محوری
۱۱۶	۶-۴. سطح Hvorslev در سنگ‌ها

فصل پنجم - وابستگی رفتار سنگ به زمان

۱۲۴	۱-۵. کرنش خزشی
-----	----------------

- ۱۳۰ ۵-۲. مدل‌های پدیدارشناسی خزش
- ۱۳۳ ۵-۳. تغییر شکل وابسته به زمان
- ۱۳۷ ۵-۴. کاهش مقاومت وابسته به زمان
- ۱۴۱ ۵-۵. بارگذاری چرخه‌ای
- ۱۴۶ ۵-۶. بارگذاری سریع

فصل ششم - ناپیوستگی در توده سنگ

- ۱۵۲ ۶-۱. اندازه‌گیری ناپیوستگی
- ۱۵۴ ۶-۲. داده‌های جهت‌گیری و زاویه ناپیوستگی‌ها
- ۱۵۸ ۶-۳. مقاومت برشی سنگ حاوی ناپیوستگی
- ۱۶۶ ۶-۴. مقاومت برشی ناپیوستگی
- ۱۷۴ ۶-۵. مدل حالت بحرانی برای مقاومت ناپیوستگی سنگ
- ۱۷۶ ۶-۶. اندازه‌گیری مقاومت برشی ناپیوستگی

فصل هفتم - رفتار توده سنگی

- ۱۷۷ ۷-۱. فرکانس ناپیوستگی
- ۱۸۱ ۷-۲. سیستم طبقه‌بندی توده سنگ
- ۱۹۳ ۷-۳. معیار مقاومت توده سنگ
- ۱۹۸ ۷-۴. روابط مقاومت توده سنگ
- ۲۰۱ منابع

فهرست شکل‌ها

صفحه

عنوان

- ۵ شکل ۱-۱. تاثیر شکل و اندازه نموده بر روی خصوصیات تغییر شکل سنگ مرمر Georgia Cherokee بارگذاری شده در آزمایش فشاری تک محوری با نرخ کرنش ثابت 10^{-5} 1/s
- ۹ شکل ۲-۱. تاثیر نسبت طول به قطر نمونه بر روی مقاومت فشاری تک محوری گرانیت (۱)، دولومیت (۲)، تراشیت (۳)، ماسه سنگ و soltstone (۴ الی ۸) و گرانیت اشباع (۹)
- ۱۱ شکل ۳-۱. رابطه بین میزان کوارتز و مقاومت فشاری تک محوری برای ماسه سنگ‌های زغال‌سنگی
- ۱۳ شکل ۴-۱. محدوده مدول برخی سنگ‌های Lias , Trias و chalk همراه با برخی مصالح مهندسی معمول و رس برای تکمیل یافته و رس بیش تحکیم یافته (Hobbs, 1974)
- ۱۴ شکل ۵-۱. دامنه مدول سنگ‌های آذرین و سنگ‌های رسوبی معمول
- ۱۴ شکل ۶-۱. نمونه مدول تغییر شکل طبق منحنی تنش-کرنش غیر خطی
- ۱۶ شکل ۷-۱. آزمایش شاخص مقاومت بار نقطه‌ای
- ۱۷ شکل ۸-۱. رابطه بین شاخص مقاومت بار نقطه‌ای و مقاومت فشاری تک محوری برای نمونه‌های استاندارد (Birniaewski, 1974) NX
- ۱۹ شکل ۹-۱. رابطه بین تعداد ضربات (انرژی) پاشش اشمیت و مقاومت فشاری تک محوری سنگ
- ۲۰ شکل ۱۰-۱. نمایش سنگ به عنوان یک ماده متناوب از ۳ فاز جامد و مایع و گاز
- ۲۴ شکل ۱۱-۱. رابطه بین عرض ترک (δ)، فاصله ($1/N$)، نفوذپذیری (k)، اندازه‌گیری شده در سنگ‌های ناپیوسته جاییکه جریان آب از میان ترک‌ها عبور می‌کند (Attewell anf Farmer, 1976)
- ۲۸ شکل ۱۲-۱. نمایش تنش‌های وارده بر یک المان، σ_d از مصالح اصطکاکی در بالای بازشدگی دو بعدی زمانی که جابجایی قائم امکان‌پذیر است
- ۳۰ شکل ۱۳-۱. رابطه بین مقاومت فشاری تک محوری و طول جانبی نمونه‌های سنگ‌های مختلف
- ۳۲ شکل ۱۴-۱. تاثیر نسبی پوکی ترک‌ها، η_f (%) و پوکی حفرات η_v (%) بر روی رابطه نسبت سرعت P اندازه‌گیری شده و محاسبه شده - C_p و مدول تغییر شکل اندازه‌گیری شده و محاسبه شده - E
- ۳۲ شکل ۱۵-۱. رابطه بین شاخص سرعت و RQD (Deer و همکارانش، ۱۹۶۶)
- ۳۴ شکل ۱۶-۱. رابطه بین ضریب جرم سنگ، γ و مقدار ترک در سنگ‌های ضعیف و قوی
- ۳۶ شکل ۱-۲. نمایش تنش در نقطه O در صفحه‌ای با زاویه دلخواه
- ۳۶ شکل ۲-۲. تنش در نقطه O در صفحه YZ در سیستمی با محورهای کارترین XYZ
- ۳۸ شکل ۳-۲. نمایش یک میدان تنش ۳ بعدی بواسطه مولفه‌های تنش روی وجوه یک المان مکعبی
- ۴۱ شکل ۴-۲. آزمایش‌های تراکم‌پذیری انجام شده توسط Zismann (۱۹۳۳) و Bridgeman (۱۹۲۸) بر روی نمونه‌های ماسه سنگ و مرمر jacketed و unjacketed
- ۴۶ شکل ۵-۲. نمایش کرنش برشی بی نهایت محدود. توجه شود که دوران زاویه‌ای، γ ، منجر به دوران جسم صلب 0.5γ می‌شود.
- ۴۷ شکل ۶-۲. نمایش صفحه‌ای در یک میدان تنش دو بعدی، که محور عمود بر آن با زاویه θ نسبت به

جهت Z قرار دارد

- ۴۸ شکل ۷-۲. دایره موهر- نمایش تنش بر روی یک صفحه
- ۵۱ شکل ۸-۲. مسیر تنش نشان دهنده افزایش تنش در عمق (مسیر تنش K_0) و افزایش تنش محوری یا قائم (σ_v) در طی یک آزمایش سه محوری
- ۵۳ شکل ۹-۲. نمایش ایده آل تغییر شکل الاستیک مصالح ساخته شده از شبکه اتم‌های کروی، تحت تنش تک محوری σ_z
- ۵۴ شکل ۱۰-۲. رابطه بین تنش ژئواستاتیک قائم (کل) و عمق طبق داده‌های جمع‌آوری شده از منابع مختلف
- ۵۷ شکل ۱۱-۲. رابطه بین تنش ژئواستاتیک (کل) افقی و عمق، طبق داده‌های جمع‌آوری شده از منابع مختلف
- ۵۸ شکل ۱۲-۲. اثر ساختارها و سازه‌های ژئولوژیک بر روی مقادیر K_0 (Jamison and Cook 1979)
- تعداد اشاره در مورد مطالعه شناخته شده در منابع
- ۶۳ شکل ۱۰-۳. ترسیم تنش‌های مماسی در صفحه‌ای از یک نمونه استوانه‌ای با شعاع R و ارتفاع 2H با نسبت طول به قطر ۲ تحت فشار محوری واحد (σ_1) و فشار شعاعی (σ_3)
- ۶۴ شکل ۲-۳. کانتورهای تنش کششی محاسبه شده با رابطه McIntock-Walsh توسط Hawkes و Mellor (۱۹۶۱) برای یک نمونه استوانه‌ای محصور نشده در معرض تنش فشاری محوری واحد و فشار همه جانبه صفر "بواحی تنش کششی حداکثر با خط چین ترسیم شده است
- ۶۵ شکل ۳-۳. منحنی‌های خطی نیرو-جابجایی در یک ماشین آزمایش که با دو تکیه‌گاه صلب R و R'
- ۶۶ شکل ۴-۳. منحنی بارگذاری ناپایدار (ناله‌پنین) و پاراز (خط ممند) در یک سیستم آزمایش فشاری با کرنش کنترل شده
- ۶۷ شکل ۵-۳. منحنی‌های تنش-کرنش محوری برای نمونه‌های سنگ استوانه‌ای با بارگذاری محوری فشاری
- ۶۸ شکل ۶-۳. کرنش جانبی (ϵ_L) و کرنش محوری (ϵ_A) در یک نمونه استوانه‌ای از سنگ قوی تحت بارگذاری محوری فشاری
- ۶۹ شکل ۷-۳. منحنی تنش-کرنش حجمی نمونه‌های استوانه‌ای سنگ قوی تحت بارگذاری محوری فشاری
- ۷۰ شکل ۸-۳. منحنی‌های تنش-کرنش محوری برای نمونه‌های استوانه‌ای گرانیت of St Clair و مرمر Tennessee، تحت بارگذاری فشاری تک محوری تا وقوع گسیختگی
- ۷۲ شکل ۹-۳. نمودار تنش-کرنش محوری و فرکانس شکاف‌های ریز طی اعمال فشار تک محوری بر روی نمونه‌های گرانیت Westerly و Colorado Rhyolite Tuff
- ۷۲ شکل ۱۰-۳. نمودار کرنش حجمی غیر الاستیک در مقابل درصد تنش حداکثر یا تنش شکاف برای سه آزمایش فشاری محصور نشده بر روی گرانیت Westerly
- ۷۳ شکل ۱۱-۳. نمودار کرنش حجمی غیر الاستیک در مقابل درصد تنش شکاف و همچنین فرکانس تجمعی برای ۵ نوع سنگ
- ۷۴ شکل ۱۲-۳. ترک بیضوی در یک میدان تنش دو محوره
- ۷۷ شکل ۱۳-۳. دیاگرام شماتیک مکانیزم شروع برخی از ترک‌های مشاهده شده در مرمر Tennessees

- شکل ۳-۱۴. توزیع نرمال متوسط و انحراف استاندارد طبق داده‌های فرکانس تجمعی شکل ۳-۱۰. ۷۸
- شکل ۳-۱۵. نمای جلو، بالا و از طرفین مقطع مرکزی نمونه آزمایش گرانیته Westerly جهت نمایش موقعیت ریز لرزه‌های رخ داده: الف) در یک رژیم ترک خوردگی استاتیکی زیر ۹۵٪ تنش ۷۹
- حداکثر یا تنش شکاف و ب) در یک رژیم ترک خوردگی دینامیکی بالای ۹۵٪ تنش شکاف ۸۰
- شکل ۳-۱۶. توصیف تغییر شکل سنگ‌ها (Price 1979) ۸۱
- شکل ۳-۱۷. مقطع با قطر ۷۵ میلیمتر از نمونه استوانه‌ای سنگ پرتلند، که آزمایش در تنش حداکثر متوقف شده است. ۸۲
- شکل ۳-۱۸. یک نمونه به قطر ۷۵ م.م. از سنگ پرتلند تحت فشار محوری با کرنش محوری ۱۰٪. ۸۲
- شکل ۴-۱. معیار گسیختگی کولومب - $\tau_f = c + \sigma_{nf} \cdot \tan \phi$ برای نمایش موقعیت زاویه صفحه گسیختگی بر روی دایره موهر ۸۷
- شکل ۴-۲. روش‌های جایگزین که با استفاده از آنها می‌توان پوش مقاومت حداکثر برای سنگ پرتلند را بر مبنای داده‌های شکل ۴-۱ ترسیم نمود ۸۸
- شکل ۴-۳. منحنی‌های تغییر شکل بارش - نرم شدگی و کرنش - سخت شدگی ۹۰
- شکل ۴-۴. یک نمونه از سنگ آهکی 'saccharoidal' در معرض کرنش محوری زیاد تحت فشار همه جانبه بالا ۹۱
- شکل ۴-۵. منحنی تنش محوری - کرنش حجمی - تنش محوری - کرنش محوری برای سنگ مرمر تحت بار فشاری سه محوری و فشارهای همه جانبه در حدود 400 MN/m^2 ۹۲
- شکل ۴-۶. نمودار مقاومت تحت کرنش محوری ۰/۱ و ریب پواسون و شیب منحنی تنش محوری - کرنش محوری طبق شکل ۴-۵ در مقابل فشار همه جانبه ۹۳
- شکل ۴-۷. مدل حالت بحرانی برای خاک‌ها ۹۴
- شکل ۴-۸. مسیرهای تنش - بارگذاری برای خاک‌های تحکیم یافته ۹۵
- شکل ۴-۹. منحنی‌های تسلیم کرنش حجمی ثابت ($\Delta V/V$) برای سنگ مرمر تحت آزمایش فشار سه محوری، محاسبه شده طبق داده‌های شکل ۴-۵ ۹۷
- شکل ۴-۱۰. سلول سه محوری ساخته شده توسط Hoek-Franklin برای آزمایش سه محوری ساده بر روی سنگ ۹۹
- شکل ۴-۱۱. مقطع میانی یک سلول سه محوری طراحی شده برای تطبیق با کرنش‌های محوری بزرگ و برای اندازه‌گیری کرنش حجمی با استفاده از relife valve برای رهاسازی جریان تحت یک فشار همه جانبه ثابت ۱۰۰
- شکل ۴-۱۲. سلول سه محوری، لودسل و دریچه تخلیه (اطمینان) نصب شده در ماشین آزمایش ۱۰۲
- شکل ۴-۱۳. منحنی‌های کرنش حجمی - کرنش محوری و تنش محوری - کرنش محوری برای نمونه‌های ماسه سنگ زغال سنگی تحت آزمایش سه محوری فشاری ۱۰۳
- شکل ۴-۱۴. منحنی‌های کرنش حجمی - کرنش محوری و تنش محوری - کرنش محوری برای نمونه‌های ماسه سنگ سیلتی زغال سنگی تحت آزمایش سه محوری فشاری ۱۰۴
- شکل ۴-۱۵. منحنی‌های کرنش حجمی - کرنش محوری و تنش محوری - کرنش محوری برای نمونه‌های سنگ پرتلند تحت آزمایش سه محوری فشاری ۱۰۵

- شکل ۴-۱۶. منحنی‌های کرنش حجمی- کرنش محوری و تنش محوری- کرنش محوری برای نمونه-
 ۱۰۷ های سنگ آهکی saccharoidal تحت آزمایش سه محوری فشاری
- شکل ۴-۱۷. منحنی‌های کرنش حجمی- کرنش محوری و تنش محوری- کرنش محوری نمونه‌های
 ۱۰۹ Coal Measures Mudstone تحت آزمایش سه محوری فشاری
- شکل ۴-۱۸. منحنی‌های کرنش حجمی- کرنش محوری و تنش محوری- کرنش محوری نمونه‌های
 ۱۱۰ مارنی (Marl) تحت آزمایش سه محوری فشاری
- شکل ۴-۱۹. منحنی‌های کرنش حجمی- کرنش محوری و تنش محوری- کرنش محوری نمونه‌های
 ۱۱۱ مارنی (Marl) تحت آزمایش سه محوری فشاری
- شکل ۴-۲۰. نمودار تنش- فشار همه جانبه برای سنگ‌های اشکال ۴-۱۳ الی ۴-۱۹
- شکل ۴-۲۱. پویا مقاومت حداکثر و پسماند در فضای p, q برای سنگ‌های اشکال ۴-۱۴ الی ۴-۱۹
- شکل ۴-۲۲. سیر تسلیم کرنش حجمی برای سنگ نمک بر مبنای داده‌های شکل ۴-۱۹
- شکل ۴-۲۳. کرنش‌های حجمی مختلف ترسیم شده در فضای p, q برای برش‌های پسماند در
 ۱۱۶ سنگ پورتلند محاسبه شده از داده‌های شکل ۴-۱۵
- شکل ۴-۲۴. بیان ساده مقاومت عمومی سنگ‌ها
- شکل ۴-۲۵. نمایش شرایط تسلیم در فضای p, q
- شکل ۴-۲۶. سطح Hvorslev در فضای p, q و $\delta\epsilon_v/\delta\epsilon_h$ برای
 ۱۲۱ (الف) سنگ نمک، (ب) مارن کارنالیس، (ج) مر Carrar، (د) مرمر
- شکل ۴-۲۷. شکل عمومی سطح Hvorslev
- شکل ۱-۱. نمودارهای تیپ کرنش خزشی حجمی- برشی و ریزترک‌های تجمع یافته در مقابل
 ۱۲۶ زمان، همراه با ترسیم ریزترک‌های نجمی در مقابل کرنش محوری، برای نمونه‌های استوانه‌ای ماسه
 سنگ Crab Orchard
- شکل ۵-۲. نمودارهای تیپ کرنش خزشی عرضی و محوری و ریزترک‌های تجمع یافته در مقابل
 ۱۲۸ کرنش محوری، برای نمونه‌های استوانه‌ای سنگ آهک هندی
- شکل ۵-۳. نمودار کرنش محوری- زمان برای نمونه‌های سنگ نمک با قطر ۱۵ و ۲۰، و نسبت عرض
 ۱۲۸ به طول ۲
- شکل ۵-۴. منحنی زمان- کرنش تحت ثابت نگه داشتن تنش
- الف) در مقدار خیلی زیاد، ب) در مقدار متوسط، ج) در مقدار زیاد
- شکل ۵-۵. نمونه‌هایی از مدل‌های rheological مشتمل بر المان‌های Newtonian, Hookean و
 ۱۳۱ St Venant که می‌توان برای ارزیابی پدیده خزش تحت بار ثابت فشاری محوری بکار برد
- شکل ۵-۶. خصوصیات تغییر شکل تحت نرخ بارگذاری سریع و آرام (یا نرخ بارگذاری نموی)
- شکل ۵-۷. اثر نرخ کرنش بر روی منحنی‌های تنش- کرنش، مقاومت تک محوری، مدول تغییر شکل
 ۱۳۵ و کرنش در لحظه گسیختگی، برای نمونه‌های ماسه سنگ در آزمایش فشاری تک محوری
- شکل ۵-۸. منحنی تنش انحرافی- کرنش محوری برای نمونه‌های سنگ نمک تحت آزمایش فشاری
 ۱۳۶ سه محوری

- شکل ۵-۹. نمونه‌های سنگ نمک بعد از آزمایش سه محوری فشاری
- شکل ۵-۱۰. پوش‌های مقاومت- تسلیم ترسیم شده در فضای p , q طبق داده‌های شکل ۵-۸ تحت کرنش محوری ۲٪، ۴٪ و ۱۰٪
- شکل ۵-۱۱. تقاطع تنش انحرافی با خط حالت بحرانی در شکل ۵-۱۰ در مقابل لوگاریتم نرخ کرنش و تکمیل آن با اضافه نمودن داده‌های آنالیز برگشتی آزمایش‌هایی با نرخ کرنش متفاوت توسط Farmer و Gilbert
- شکل ۵-۱۲. انواع تغییرشکل مشاهده شده در طی آزمایش اشکال ۵-۸، در قالب فشار همه جانبه و لوگاریتم نرخ کرنش
- شکل ۵-۱۳. انواع تغییرشکل‌های مشاهده شده در ستون‌های سنگی تحت عمقی حدود ۱۱۰۰ متر
- شکل ۵-۱۴. منحنی خستگی یا منحنی $S-N$ برای یک سنگ یا بتن- ارتباط بین مقاومت خستگی، σ_{max} با مقاومت فشاری σ_{cf} ، تحت تعداد چرخه بارگذاری معین
- شکل ۵-۱۵. تاثیر تغییرات تنش چرخه‌ای تحت فرکانس ثابت بر روی کرنشی بعنوان تابعی از زمان برای نمونه‌های دولومیتی
- شکل ۵-۱۶. تاثیر فرکانس چرخه‌ای تنش بر روی نمونه‌های دولومیتی در معرض تنش‌های متوسط و دامنه تنش بارگذاری چرخه‌ای مشابه
- شکل ۵-۱۷. رابطه بین رژیم بارگذاری چرخه‌ای و منحنی تنش- کرنش با کرنش کنترل شده برای سنگ
- شکل ۶-۱. نمایش انتقال از سنگ سالم به توده سنگی با شدت درزدار توام با افزایش اندازه نمونه در اطراف یک حفاری (Hoek and Brown 1980b)
- شکل ۶-۲. نمایش اثرات متفاوت المان‌های کوچک و ناپیوستگی‌های بزرگ بر روی پتانسیل پایداری پایه و فونداسیون سد
- شکل ۶-۳. سیستم طبقه‌بندی ناپیوستگی‌ها، پیشنهاد شده توسط Londe (۱۹۷۰)
- شکل ۶-۴. الف) دیاگرام، صفحه‌ای با زاویه برخورد ۱۲۰ درجه و جهت شیب ۵ درجه را نشان می‌دهد که به اختصار با عنوان شیب $120^\circ/50^\circ$ بیان می‌شود.
- شکل ۶-۵. نمودار قطب‌ها برای ناپیوستگی‌های بدست آمده از خط اسکن معدن ایکسپوز سنگ Cambrian.
- شکل ۶-۶. نمایش شرایط لغزش در امتداد یک ناپیوستگی، توسط صفحاتی که محور نرمال آنها زاویه β نسبت به محور تنش‌های اصلی بزرگ دارد
- شکل ۶-۷. شرایط لغزش در امتداد یک ناپیوستگی که بیانگر صفحه‌ای است که محور نرمال آن زاویه β نسبت به محور تنش‌های اصلی بزرگ دارد
- شکل ۶-۸. رابطه بین "تنش انحرافی تحت گسیختگی" با "زاویه شکافتگی" و "جهت ناهمسانگردی" با "جهت تنش‌های اصلی بزرگ یا جهت محور نمونه"
- شکل ۶-۹. نمودار سه بعدی نسبت مدول به مقاومت، مقاومت فشاری، مدول تغییرشکل و کرنش

برای نمونه مرمر Blair Atholl، نرمالیزه شده با حداقل مقادیر در هر مورد

- ۱۶۷ شکل ۶-۱۰. اثر تنش‌های اصلی متوسط بر روی پایداری برشی ناپیوستگی که با دو حالت حدی (الف) $\sigma'_1 > \sigma'_2 = \sigma'_3$ و (ب) $\sigma'_1 = \sigma'_2 > \sigma'_3$ نشان داده شده است، جاییکه $\sigma'_1/\sigma'_3 = 0.2$ می‌باشد.
- ۱۶۸ شکل ۶-۱۱. آرایش پیشنهادی برای یک آزمایش برش مستقیم آزمایشگاهی بر روی یک ناپیوستگی منفرد
- ۱۶۹ شکل ۶-۱۲. نمودار مقاومت برشی ناپیوستگی - کرنش برشی، و کرنش نرمال - کرنش برشی، طی آزمایش برشی در امتداد یک ناپیوستگی
- ۱۷۰ شکل ۶-۱۳. مدل یک سطح ناپیوستگی در قالب یک سری از ناهمواری‌های منظم
- ۱۷۲ شکل ۶-۱۴. بیان و نمایش پوش‌های برشی برای ناپیوستگی تحت تنش‌های نرمال مختلف
- ۱۷۳ شکل ۶-۱۵. نمایش رابطه تجربی Barton و همکارانش (۱۹۷۴) بین مقاومت برشی ناپیوستگی و تنش نرمال، برای ناپیوستگی با مقادیر زبری متفاوت
- ۱۷۵ شکل ۶-۱۶. مدل عمومی برای مقاومت برشی ناپیوستگی مرتبط با حالت بحرانی
- ۱۷۹ شکل ۷-۱. هیستوگرام حاصل از رستگاری بدست آمده از خطوط اسکن تونل
- ۱۸۰ شکل ۷-۲. مقایسه مدل RQD اندازه‌گیری شده و محاسبه شده توسط Priest و Hudson (۱۹۷۴) طبق داده‌های فرکانس ناپیوستگی جمع‌آوری شده توسط Deere (۱۹۶۸)
- ۱۸۴ شکل ۷-۳. نمایش سیستم رتبه‌بندی بر اساس جنس سنگ استفاده شده برای تعیین فواصل rib برای مقاطع قوسی، فواصل بولت و ضخامت ساتنریت متعلق
- ۱۸۷ شکل ۷-۴. مقایسه روش ژئومکانیکی (آفرتای - مویی و روش کیفیت توده سنگ (اسکاندیناوی) در طبقه‌بندی سنگ‌ها، با استفاده از تخمین زمان استایر-تریست Lauffer (۱۹۵۸) و دهانه‌های بدون پشتیبانی بر مبنای مشاهدات در تونل‌های آلباین (آلبا) اتریش
- ۱۹۳ شکل ۷-۵. رابطه بین طبقه‌بندی ژئومکانیک (RMR) و طبقه‌بندی کیفیت توده سنگ (Q) بر مبنای مطالعات موردی مختلف
- ۱۹۴ شکل ۷-۶. رابطه بین بعد معادل و q همراه با پوش پیشنهادی برای سایر تریست
- شکل ۷-۷. ترسیم داده‌های دولومیت سنگ آهک، و مرمر بر مبنای پارامترهای رابطه ۷-۸، با کیفیت‌های سنگی ذکر شده در جدول ۷-۵. توجه کنید که با استفاده از معیار انعطاف‌پذیری Mogi (۱۹۶۶) $\sigma_1 = 3.4\sigma_3$

فهرست جداول

صفحه	عنوان
۶	جدول ۱-۱. دسته‌بندی آزمایش‌های سنگ (Brown 1981)
۱۰	جدول ۲-۱. دسته‌بندی سنگ‌ها بر مبنای مقاومت فشاری محصور نشده
۱۲	جدول ۳-۱. تقسیم‌بندی رایج مقاومت سنگ‌ها (MN/m^2)
۲۲	جدول ۴-۱. وزن واحد حجم و پوکی - سنگ‌ها و خاک‌ها
۲۴	جدول ۵-۱. نفوذپذیری سنگ (Rispin and Cooper, 1972) و خاک
۲۷	جدول ۶-۱. توصیف شرایط سنگ‌ها (ترزاقی - ۱۹۴۶)
۲۸	جدول ۷-۱. بارهای سنگ از منظر طبقه‌بندی ترزاقی (۱۹۴۶)
۳۱	جدول ۸-۱. گروه‌بندی RQD حاصل
۳۳	جدول ۹-۱. رابطه بین RQD و i
۴۲	جدول ۱۰-۲. تراکم‌پذیری تحت فشار $p = 10 \text{ kN/m}^2$ و $C_w = 480 \cdot 10^{-6} \text{ m}^2/\text{kN}$
۴۴	جدول ۲۰-۲. پارامترهای فشار آب جفرا A و B در سنگ‌های اشباع
۵۹	جدول ۳۰-۲. روش‌های اندازه‌گیری تنش‌های برجا
۷۱	جدول ۱۰-۳. توصیف سنگ‌های استفاده شده توسط Scholze (۱۹۶۸)
۱۳۲	جدول ۱۰-۵. تعدادی از قوانین معمول خزش (Mirza, 1978)
۱۴۸	جدول ۲۰-۵. سرعت موج P در سنگ‌های متفاوت
۱۷۱	جدول ۱۰-۶. مقادیر R_i ناپیوستگی‌های صاف و مقادیر R_0 پرشدگی‌ها (Hoek 1970)
۱۷۸	جدول ۱۰-۷. طبقه‌بندی بر اساس فواصل ناپیوستگی (Deere, ۱۹۶۸)
۱۸۲	جدول ۲۰-۷. پارامترهای سیستم رتبه‌بندی ساختار سنگ (Wickham و همکارانش، ۱۹۷۲)
۱۸۵	جدول ۳۰-۷. طبقه‌بندی ژئومکانیکی توده‌های سنگی در زردار
۱۸۸	جدول ۴۰-۷. رتبه‌بندی برای طبقه‌بندی کیفی توده‌های سنگی (بارتون و همکارانش، ۱۹۷۲)
۱۹۷	جدول ۵۰-۷. مقادیر S و m (Hoek and Brown 1980b)