

خواص و رفتار مهندسی سنگ

نویسنده:
لیان یانگ ژانگ

مترجمان:
دکتر مصطفی شریف‌زاده
(استادیار دانشگاه صنعتی امیرکبیر (پلی تکنیک تهران))

مهندس رضا نورانی
(کارشناس ارشد مکانیک سنگ)



سرشناسه: ژانگ، لیان یانگ Zhang, Lianyang
عنوان و نام پدیدآور: خواص و رفتار مهندسی سنگ‌ها/ نویسنده لیان یانگ ژانگ؛ ترجمه مصطفی شریف‌زاده، رضا نورانی
مشخصات نشر: تهران: مرکز نشر صدا، ۱۳۹۰.
مشخصات ظاهری: ۳۰۴ ص.: مصور، جدول.
شابک: ۹۷۸-۹۶۴-۳۵۹-۲۷۰-۷
وضعیت فهرست‌نویسی: فیا
یادداشت: عنوان اصلی: <i>Engineering Properties of Rocks, 2006</i> .
موضوع: سنگ‌ها -- مکانیک
موضوع: سنگ‌ها -- آزمایش
شناسه افزوده: شریف‌زاده، مصطفی، مترجم.
شناسه افزوده: نورانی، رضا، مترجم.
رده‌بندی کنگره: TAV ۰۶/۲:۹ ۱۳۹۰
رده‌بندی دیویی: ۶۲۴/۱۵۹۳۲
شماره کتابشناسی ملی: ۲۱۳۸۵۰۵

خواص و رفتار مهندسی سنگ‌ها

نویسنده: لیان یانگ ژانگ

مترجمان: دکتر مصطفی شریف‌زاده و مهندس رضا نورانی

نوبت چاپ: اول (۱۳۹۰)

شمارگان: ۱۰۰۰ نسخه

قیمت: ۹۵۰۰ تومان

ISBN: 978-964-359-270-7

شابک: ۹۷۸-۹۶۴-۳۵۹-۲۷۰-۷

«حق چاپ برای مرکز نشر صدا محفوظ است.»



مرکز نشر صدا: تهران، تقاطع خیابان ولی عصر و مظفری، خیابان منصور، شماره‌ی ۲۴

دورنگار: ۸۸۵۵۳۴۲۱ - ۸۸۵۳۴۲۰۳

نخن ناشر

مرکز نشر صدا در برنامه‌های جدید کوتاه‌مدت خود در نظر دارد برای دانشجویان مقاطع کارشناسی و کارشناسی ارشد رشته‌های فنی مهندسی با همکاری اساتید دانشگاه صنعتی امیرکبیر و دانشگاه صنعتی شریف، متون درسی - تخصصی ضروری و معتبر دانشگاه‌های دارای درجات علمی بالا را منتشر کند، و در درازمدت تولید اختصاصی متون آموزشی تحصیلات تکمیلی فنی - مهندسی رشته‌های مکانیک و معدن ادامه دهد.

این انتشارات تاکنون یک دوره دو جلدی مکانیک سیالات^۱ تألیف فرانک.ام. وایت را در ۴ نوبت چاپ کرده و چاپ پنجم آن را با ویرایش هفتم (۲۰۱۱)، رنگی و در قطع خشتی مطابق اصل کتاب در دست انتشار دارد. این دو جلد در سال ۱۳۷۳ کتاب برگزیده سال شده‌است.

روش‌های حفاری و مکانیک سازه‌ها با ۳ نوبت چاپ نیز از جمله کتاب‌های برگزیده مرکز نشر صدا است.

کتاب خواص و رفتار مهندسی سنگ‌ها بر اساس ویرایش ۲۰۱۱ یکی دیگر از مجموعه عناوین فنی - مهندسی مرکز نشر صدا و حاصل ۹ ماه تلاش و دقت نظر مترجمان و همکاران فنی - ادبی این مؤسسه است. نویسنده این کتاب لیان‌یانگ ژانگ مهندس و متخصص فنی مشاوره ICF است. او لیسانس معماری و مهندسی اقیانوس از دانشگاه ژیاوتانگ شانگهای و فوق لیسانس مهندسی ژئوتکنیک از دانشگاه تونکزی و فوق لیسانس عمران و محیط زیست است، و دکترای تخصصی رشته مهندسی ژئوتکنیک از دانشگاه ماساچوست دارد.

حوزه تخصصی او شامل خصوصیات سنگ، پی‌های عمیق و روانگرایی زلزله است. دکتر ژانگ تعداد مقاله‌های بسیاری درباره ژئوتکنیک و زمین‌زیست محیط به چاپ رسانده‌است. او همچنین نویسنده کتاب چاه‌های حفاری شده در سنگ، تحلیل و طراحی است.

مدیریت نشر صدا از پیشنهادهای جدید، نقطه‌نظرها و انتقادهای استادان و دانشجویان رشته‌های فنی - مهندسی دانشگاه‌ها استقبال می‌کند. خواهشمند است به این منظور از طریق سایت نشر صدا (www.nashreseda.ir) و نشانی الکترونیکی مؤسسه (info@nashreseda.ir) با همکاران ارتباط برقرار کنید.

www.ketab.ir

مقدمه

هدف انتشارات الزویر از سری کتاب‌های مهندسی علوم زمین تهیه کتاب‌هایی با کیفیت مناسب با موضوعات گسترده علوم مهندسی زمین، به عنوان مثال زمین‌شناسی، مکانیک خاک، عمران، معدن، محیط زیست، مهندسی نفت و نظایر آن است. سه کتاب اول این سری با عناوین زیر تألیف و چاپ رسیده است:

❶ «تحلیل پایداری و مدلسازی حفریات زیرزمینی در سنگ‌های ضعیف» توسط ویشن ژو و جیان ژانو.

❷ «فرآیندهای توامان گرمایی - شیمیایی - هیدرو - مکانیکی در زمین» توسط اوه استیفنسون، جان هادسون و لائرو جینگ.

❸ «بهسازی زمین - مطالعات موردی» توسط بودهیم ایندراواتنا و ژیان چو. این سه کتاب شروع قابل تحسین و با کیفیتی برای این سری کتاب‌ها بودند. اکنون، اینجانب مشغولم تا چهارمین کتاب از این سری را معرفی نمایم:

❹ «خصوصیات و رفتار مهندسی سنگ‌ها» توسط لیانیانگ ژانگ. این کتاب اطلاعات مفید و روزآمدی درباره‌ی مکانیک سنگ و مهندسی سنگ برای مهندسين و جامعه دانشگاهی فراهم می‌کند. این کتاب مفید و کاربردی است چون جنبه‌های مهم و کلیدی مسائل مکانیک سنگ شامل: تنش سنگ، سبب شکست بکر، ناپیوستگی‌ها و توده سنگ، به همراه تغییر شکل پذیری، مقاومت و نفوذ پذیری را به طور منظم مطرح و تشریح می‌کند.

نویسنده در پیشگفتار خویش عنوان می‌کند که «مقادیر نمونه و همبستگی بین خصوصیات سنگ در کتاب‌های تخصصی، مراجع، گزارش‌ها و مقالات در مجلات تخصصی و مجموعه مقالات کنفرانس‌ها در دسترس است. اغلب تعیین خصوصیات ضروری مورد نیاز در یک پروژه خاص مشکل، زمان‌بر و حتی غیرممکن است.» نه تنها این موضوع تنها این موضوع صحیح است بلکه خصوصیات سنگ کلیدی برای طراحی مهندسی سنگ می‌باشد، خواه با روش‌های مدلسازی عددی - همانطور که از دو کتاب اول از این سری کتاب‌ها مشخص است.

مهندسی سنگ باید قدرت پیش‌بینی نتایج طراحی حفاری خاص را داشته باشد. این موضوع تنها با مدل مناسب قابل انجام است و تنها زمانی مدل مناسب خواهد بود که از مقادیر مناسب خصوصیات سنگ برای ساختن آن استفاده شود. بنابراین، مضمون این کتاب دارای ارزش بالایی است که توضیحات مستقیم مکانیک سنگ و خصوصیات سنگ را برتری می‌بخشد: این کتاب یکی از اصول و نکات کلیدی طراحی‌های مطلوب مهندسی سنگ را بیان می‌کند. اینجانب بسیار خوشنودم که مطالعه کل کتاب را پیشنهاد نمایم. ما امیدواریم که شما از مطالعه این کتاب استفاده کامل را ببرید. ما پذیرای عناوین جدیدی از این سری کتاب‌ها هستیم، لطفاً پیشنهادهای خود را به آدرس پستی اینجانب ارسال نمایید.

پرفسور جان آ. هادسون

ویراستار سری کتاب‌های مهندسی علوم زمین

jah@rockeng.co.uk

www.ketab.ir

پیش‌گفتار نویسنده

به دلایل متعددی، اغلب به دست آوردن ویژگی‌های مطلوب طراحی برای مهندسان سنگ مشکل است. به عنوان یک گزینه، مهندسان از مقادیر متعارف و یا روابط تجربی در سنگ‌های مشابه برای تخمین ویژگی‌ها استفاده می‌کنند. برای مثال، مقاومت فشاری تک‌محوری سنگ بکر (UCS) به طور گسترده در طراحی سازه‌های سطحی و زیرزمینی استفاده می‌شود. انجمن آزمایش و مواد امریکا (ASTM)¹ و انجمن بین‌المللی مکانیک سنگ (ISRM)² فرآیند اندازه‌گیری UCS را استاندارد کرده‌اند. اگرچه روش پیشنهادی نسبتاً ساده است، اما زمان‌بر و گران‌قیمت بوده و به مغزه‌های سنگی مناسب نیاز دارد که آماده‌سازی آن‌ها اغلب در سنگ‌های ضعیف، دشوار و بعضی مواقع غیرممکن است.

بنابراین، اغلب آزمایش‌های غیرمستقیم و روابط تجربی مانند شاخص بارنقطه‌ای، چکش اشمیت، سرعت صوت و آزمایش‌های مقاومت در برابر ضربه برای تخمین مقاومت فشاری تک‌محوری سنگ بکر (UCS) به کار می‌روند. مثال دیگر، تعیین مدول تغییر شکل توده سنگ است. توده سنگ‌ها اغلب ناپیوستگی‌هایی دارند. برای به دست آوردن مقادیر واقعی مدول تغییر شکل توده سنگ به انجام آزمایش‌های برجا، مانند بارگذاری صفحه‌ای، جک تخت، سلول فشار، جکینگ در گمانه و آزمایش‌های دیلاتومتری نیاز است. به هر حال، آزمایش‌های برجا، زمان‌بر و گران‌قیمت، حتی در برخی مواقع، اجرای آن‌ها نیز غیرممکن است. بنابراین، اغلب از روابط غیرمستقیم مانند شاخص‌های طبقه‌بندی RQD³، RMR⁴ و Q⁵ برای تخمین مدول تغییر شکل توده سنگ استفاده می‌شود.

مقادیر نمونه و روابط بین ویژگی‌های سنگ در کتاب‌های تخصصی، مراجع، گزارش‌ها و مقالات مجلات تخصصی و مجموعه مقالات کنفرانس‌ها در دسترس است. تعیین ویژگی‌های ضروری مورد نیاز در یک پروژه‌ی خاص اغلب دشوار، زمان‌بر و حتی غیرممکن است. هدف اصلی این کتاب، ارائه‌ی خلاصه‌ای از روابط بین ویژگی‌های مختلف سنگ همراه مقادیر نمونه‌ای از آن است.

1. American Society for Testing and Materials
2. International Society for Rock Mechanics
3. Rock Quality Designation

4. Rock Mass Rating
5. Q-System
6. Geological Strength Index

این کتاب شامل هشت فصل است که به‌طور منطقی منظم شده‌اند. در فصل ۱، مقدمه‌ای کلی از مسائل مهندسی سنگ، روش‌های تعیین ویژگی‌های سنگ و در انتها مثال‌هایی از کاربرد روش‌های تجربی برای تخمین ویژگی‌ها ارائه شده‌است. در فصل ۲، تنش‌های برجای سنگ تشریح و روابط تجربی مختلفی برای تخمین آن‌ها ارائه می‌شود. در فصل‌های ۳ تا ۵، طبقه‌بندی سنگ بکر و توده سنگ و ویژگی‌های ناپیوستگی‌ها تشریح شده‌است. در فصل‌های ۶ تا ۸، مقادیر نمونه و روابط تغییرشکل‌پذیری، مقاومت و نفوذپذیری سنگ بکر، ناپیوستگی‌های سنگ و توده سنگ بیان شده‌است. باید توجه کرد که مقادیر نمونه و روابط همبستگی هرگز نباید جایگزین اجرای آزمایش‌ها شود و بهتر است که برای تکمیل و تصدیق اطلاعات پروژه از آن‌ها استفاده شود.

این کتاب برای افرادی که با مکانیک سنگ و مهندسی سنگ سروکار دارند، مفید است و برای تعیین ویژگی‌های لازم برای اجرای پروژه‌های مهندسی سنگ به‌کار می‌رود. از این کتاب می‌توان برای تدریس محدوده‌ی مقادیر ویژگی‌های مختلف سنگ‌ها و عوامل تأثیرگذار بر آن‌ها بهره‌برد. در مدل‌سازی عددی نیز می‌توان برای انتخاب مقادیر مناسب ویژگی‌های مواد از این کتاب استفاده کرد.

پروفسور هارون سونمز^۱ از دانشگاه حاج‌تپه^۲ ترکیه، داده‌های مدول تغییرشکل‌پذیری در شکل ۶-۱۴ را ارائه کرد که نویسنده از ایشان کمال تشکر را دارد.

دکتر اورت هوک^۳ مهندس مشاور شرکت اورت هوک از کانادا، مقالات خود را در اختیار نویسنده قرار داد و اطلاعات ارزشمندی از مقاومت توده‌سنگ ارائه شده در شکل ۱۱-۷ تهیه کرد. بخش‌هایی از فصل‌های ۴، ۶ و ۷ براساس تحقیقات رساله‌ی دکترای نویسنده است که در انتستیتیوی تکنولوژی ماساچوست (MIT) انجام شده‌است. نویسنده از حمایت‌ها و راهنمایی‌های پروفسور هربرت اینستین^۴ تقدیر می‌نماید.

درنهایت، نویسنده از دکتر فرانسیسکو سیلوا^۵ و آقای رالف کریسمالا^۶ از مشاوران ICF به‌دلیل حمایت‌های ایشان طی تکمیل این کتاب تشکر می‌نماید.

لیان‌یانگ ژانگ^۷

مشاور ICF

لگزینگتون، MA آمریکا

- | | |
|---------------------|--------------------|
| 1. Harun Sönmez | 5. Francisco Silva |
| 2. Hacettepe | 6. Ralph Grismala |
| 3. Evert Hoek | 7. Lianyang Zhang |
| 4. Herbert Einstein | 8. Lexington |

پیش‌گفتار مترجمان

با توجه به شرایط کوهستانی ایران، احداث پروژه‌های متعدد عمرانی، معدنی، انرژی و نفتی از قبیل تونل‌های راه، راه‌آهن، مترو، تونل‌های انتقال آب، فضا‌های زیرزمینی، نیروگاه‌های برق‌آبی، کودبرداری‌های عمیق، مخازن و چاه‌های نفتی، معادن زیرزمینی و روباز، کاربرد علم مکانیک سنگ و مهندسی سنگ روزبه‌روز افزایش می‌یابد. طراحی و ساخت پروژه‌های مختلف در سنگ و یا روی سنگ و همچنین، شرایط متغیر زمین، انجام تحقیقات فراوانی را به‌منظور ارزیابی ویژگی‌های سنگ بکر و شناخت رفتار توده سنگ ایجاب می‌کند. از طرف دیگر، طبیعت ناهمگن و ناهمسان سنگ‌ها و وجود ناپوستگی‌های ساختاری در توده سنگ‌ها باعث می‌شود تا دانش مکانیک سنگ از دیگر شاخه‌های دانش مکانیک جامدات متمایز شود. مطالعه، طراحی و ساخت دقیق و بهینه‌ی پروژه‌های مختلف، تنها با بررسی کامل خواص فیزیکی و مکانیکی سنگ بکر و ارزیابی صحیح رفتار توده سنگ‌ها قابل دستیابی است که این موضوع با تکیه بر روش‌های آزمایشگاهی و صحرایی و به کمک ابزارهای تحلیلی و عددی امکان‌پذیر خواهد بود.

این کتاب جلد چهارم از مجموعه کتاب‌های مهندسی زمین انتشارات الزویر است. هدف از این مجموعه کتاب‌ها تهیه‌ی متونی با کیفیت بالا در زمینه‌های مرتبط با مکانیک سنگ، مکانیک خاک، زمین‌شناسی مهندسی، معدن، عمران، محیط زیست و مهندسی نفت است. این کتاب، اطلاعات به‌روز و تخصصی در زمینه‌ی مکانیک سنگ و مهندسی سنگ برای اهداف مهندسی و دانشگاهی فراهم می‌کند و با روشی منطقی و مؤثر به ویژگی‌های کلیدی مسائل مکانیک سنگ از جمله سنگ بکر، تنش سنگ، ناپوستگی‌ها، توده سنگ، تغییر شکل‌پذیری، مقاومت و نفوذپذیری می‌پردازد.

در این کتاب، روش‌های مختلفی برای تعیین ویژگی‌های سنگ بکر، ناپوستگی‌ها و توده سنگ معرفی و سپس مثال‌هایی از کاربرد روش‌های تجربی برای تخمین ویژگی‌ها

ارائه می‌شود تا مهندسان در تکمیل و تصدیق اطلاعات، طراحی، مدل‌سازی و اجرای پروژه‌های مختلف از آن استفاده کنند. دانشجویان و محققان مقاطع کارشناسی و کارشناسی ارشد در رشته‌های مکانیک سنگ، معدن، عمران، نفت و زمین‌شناسی مهندسی می‌توانند از فصل‌های مختلف کتاب بهره‌ببرند.

در این کتاب با بررسی دقیق ترجمه‌ی متن، تلاش مترجمان بر این بوده‌است تا مفاهیم به درستی و رعایت امانتداری به فارسی ارائه‌شود.

در تهیه‌ی این کتاب، افراد مختلفی ما را یاری داده‌اند؛ از جمله مدیر محترم مرکز نشر صدا و همکاران ایشان سرکار خانم لیلا پورفولادی، سرکار خانم مهری تقی‌پور و برخی دانشجویان رشته مکانیک سنگ ورودی ۱۳۸۷ دانشگاه صنعتی سهند تبریز که ترجمه‌ی اولیه‌ی بخش‌هایی از این کتاب را به‌عهده داشتند و همچنین آقای مهندس جعفر عباسی که در اولین مراحل ویرایشی دخالت داشتند سپاسگزاری می‌شود.

باوجود تلاش‌های فراوان، ترجمه‌ی حاضر خالی از اشکال و ایراد نیست. بنابراین، از تمام اساتید، صاحب‌نظران، کارشناسان و دانشجویان متواضعانه تقاضا می‌شود تا با نظریات و پیشنهادات سازنده‌ی خود ما را در رفع کمبودها یاری فرمایند.

مترجمان

بهار ۱۳۹۰



	مقدمه	-۱
۱	مسائل مهندسی سنگ	-۱-۱
۵	تعیین ویژگی‌های مهندسی سنگ‌ها	-۲-۱
۷	مثال‌هایی درباره‌ی تعیین ویژگی‌های مهندسی سنگ‌ها	-۳-۱
۱۲	محتویات کتاب	-۴-۱
	تنش‌های برجا	-۲
۱۵	مقدمه	-۱-۲
۱۷	راهکارهای تخمین تنش‌های برجای سنگ	-۲-۲
۱۹	تغییرات تنش برجا در عمق	-۳-۲
۱۹	۱-۳-۲ تنش‌های قائم	
۲۰	۲-۳-۲ تنش‌های افقی	
۲۶	نقشه‌ی تنش جهانی (WSM)	-۴-۲
۲۷	توضیحات	-۵-۲
	سنگ بکر	-۳
۳۱	مقدمه	-۱-۳
۳۱	طبقه‌بندی سنگ بکر	-۲-۳
۳۱	۱-۲-۳ طبقه‌بندی زمین‌شناسی	
۳۴	۲-۲-۳ طبقه‌بندی مهندسی	
۳۷	خواص شاخص سنگ بکر	-۳-۳
۳۷	۱-۳-۳ تخلخل	
۳۹	۲-۳-۳ چگالی	
۴۲	۳-۳-۳ سرعت موج	
۴۲	۴-۳-۳ شاخص بار نقطه‌ای	
۴۳	۵-۳-۳ عدد بازگشت چکش اشمیت	
۴۴	۶-۳-۳ شاخص دوام وارتگی	
۴۴	۷-۳-۳ روابط بین خواص شاخص مختلف	

	ناپیوستگی‌ها	-۴
۵۳	مقدمه	-۱-۴
۵۳	انواع ناپیوستگی	-۲-۴
۵۵	توصیف ناپیوستگی‌ها	-۳-۴
۵۶	توجیه فضایی (جهت‌گیری) ناپیوستگی‌ها	-۴-۴
۶۱	شدت ناپیوستگی	-۵-۴
۶۱	۱-۵-۴ فاصله‌داری و فراوانی خطی ناپیوستگی‌ها	
۶۴	۲-۵-۴ شاخص کیفیت سنگ (RQD)	
۶۹	۳-۵-۴ فراوانی سطحی و حجمی	
۷۲	۴-۵-۴ اندازه‌ی بلوک	
۷۴	۶-۴ پایایی، طول خط اثر و اندازه‌ی ناپیوستگی	
۷۴	۱-۶-۴ پایایی ناپیوستگی	
۷۸	۲-۶-۴ طول خط اثر ناپیوستگی	
۸۴	۳-۶-۴ شکل ناپیوستگی	
۸۵	۴-۶-۴ اندازه‌ی ناپیوستگی‌ها	
۹۲	۷-۴ تانسور شکست	
۹۳	۸-۴ زبری ناپیوستگی	
۹۵	۹-۴ بازشدگی ناپیوستگی	
۹۶	۱۰-۴ مواد پرکننده‌ی ناپیوستگی‌ها	
	نوده سنگ	-۵
۹۹	مقدمه	-۱-۵
۹۹	طبقه‌بندی نوده سنگ‌ها	-۲-۵
۹۹	۱-۲-۵ طبقه‌بندی کیفی سنگ (RQD)	
۱۰۰	۲-۲-۵ طبقه‌بندی ژئومکانیکی نوده سنگ (RMR)	
۱۰۴	۳-۲-۵ شاخص کیفی نوده سنگ (Q)	
۱۱۰	۴-۲-۵ شاخص مقاومت زمین‌شناسی (GSI)	
۱۱۴	۳-۵ ارتباط بین طبقه‌بندی‌های مختلف	
۱۱۵	۴-۵ طبقه‌بندی هوازدگی سنگ‌ها	
	تغییر شکل پذیری	-۶
۱۱۹	مقدمه	-۱-۶
۱۲۰	تغییر شکل پذیری ماده سنگ	-۲-۶
۱۲۵	تغییر شکل پذیری ناپیوستگی‌های سنگ	-۳-۶
۱۲۵	۱-۳-۶ سختی قائم	
۱۳۵	۲-۳-۶ سختی برشی	
۱۳۶	۳-۳-۶ اتساع ناپیوستگی‌ها	
۱۳۷	تغییر شکل پذیری نوده سنگ	-۴-۶
۱۳۷	۱-۴-۶ روابط تجربی برای تخمین مدول تغییر شکل پذیری نوده سنگ	
۱۴۶	۲-۴-۶ روش پیوسته‌ی معادل برای تخمین مدول تغییر شکل پذیری نوده سنگ	

۱۶۸	تأثیر مقیاس بر روی تغییر شکل پذیری توده سنگ	۵-۶
۱۶۹	تأثیر تنش های محصورکننده (جانبی) بر مدول تغییر شکل پذیری توده سنگ	۶-۶
۱۷۱	ناهمسانگردی در تغییر شکل پذیری سنگ	۷-۶
	مقاومت	۷-
۱۷۵	مقدمه	۱-۷
۱۷۵	مقاومت سنگ بکر	۲-۷
۱۷۵	۱-۲-۷- مقاومت فشاری تک محوری سنگ بکر	
۱۸۷	۲-۲-۷- مقاومت کششی سنگ بکر	
۱۹۲	۳-۲-۷- معیارهای تجربی شکست سنگ بکر	
۱۹۶	۴-۲-۷- پارامترهای موهر- کولمب در سنگ بکر	
۱۹۶	۳-۷- مقاومت ناپیوستگی های سنگ	
۱۹۶	۱-۳-۷- مدل موهر- کولمب	
۱۹۸	۲-۳-۷- مدل مقاومت برشی دو خطی	
۱۹۹	۲-۳-۷- مدل پارتن	
۲۰۲	۴-۳-۷- مقاومت برشی ناپیوستگی های پر شده	
۲۰۲	۴-۷- مقاومت توده سنگ	
۲۰۲	۱-۴-۷- مقاومت فشاری تک محوری توده سنگ	
۲۰۵	۲-۴-۷- مقاومت کششی توده سنگ	
۲۰۶	۳-۴-۷- معیارهای مقاومتی تجربی توده سنگ	
۲۱۰	۴-۴-۷- پارامترهای موهر- کولمب توده سنگ	
۲۱۲	۵-۴-۷- دیدگاه پیوسته ی معادل برای تخمین مقاومت توده سنگ	
۲۲۳	تأثیر مقیاس روی مقاومت سنگ	۵-۷
۲۲۶	ناهمسانانی مقاومت سنگ	۶-۷
	نفوذ پذیری	۸-
۲۳۱	مقدمه	۱-۸
۲۳۲	نفوذ پذیری سنگ بکر	۲-۸
۲۳۳	نفوذ پذیری ناپیوستگی ها	۳-۸
۲۳۷	نفوذ پذیری توده سنگ	۴-۸
۲۳۸	تأثیر تنش در نفوذ پذیری توده سنگ	۵-۸
۲۴۲	تغییر نفوذ پذیری سنگ با عمق	۶-۸
۲۴۵	تأثیر درجه حرارت بر نفوذ پذیری سنگ	۷-۸
۲۴۶	تأثیر مقیاس روی نفوذ پذیری سنگ	۸-۸
۲۵۱	ارتباط داخلی ناپیوستگی ها	۹-۸
۲۵۱	ناهمسانگردی نفوذ پذیری سنگ	۱۰-۸
۲۵۳	مراجع	
۲۷۷	واژه نامه	

۱ مقدمه

۱.۱ مسائل مهندسی سنگ

در طول تمدن بشری، سنگ همواره به عنوان یک مصالح ساختمانی استفاده می شده است. سازه های مختلفی با استفاده از سنگ و یا در سنگ ساخته شده اند که از آن جمله می توان به خانه ها، پل ها، سدها، تونل ها و مزارها اشاره نمود (بیناویسکی، ۱۹۸۴؛ گودمن، ۱۹۸۹؛ براون، ۱۹۹۳؛ فیرهارست، ۱۹۹۳؛ هادسون، ۱۹۹۳؛ هادسون و هریسون، ۱۹۹۷؛ هوک، ۲۰۰۰). در جدول ۱.۱ بعضی انواع سازه های ساخته شده از سنگ یا در سنگ و زمینه های کاربرد آنها ارائه شده است. براون (۱۹۹۳) این جدول را با اضافه کردن سازه های سطحی عمرانی به جدولی در کتاب بیناویسکی (۱۹۸۴) با عنوان طراحی مکانیک سنگی در معدن کاری و تونل سازی تهیه کرد.

سنگ به دلیل ناپیوستگی هایی از قبیل درزها، سطوح لایه بندی، چین ها، زون های برشی و گسل ها که باعث نقص های ساختاری می شود، با سایر مواد مهندسی تفاوت دارد. به همین دلیل، باید بین سنگ بکر یا ماده ی سنگ با توده سنگ تفاوت قائل شد. سنگ بکر را به عنوان یک جامد چندبوری یا پیوسته که از تجمع کانی ها یا دانه ها در حد فاصل ناپیوستگی ها شکل گرفته، در نظر می گیرند. این درحالی است که توده سنگ به عنوان یک محیط برجا و متشکل از بلوک های مجرای سنگ بکر همراه با ناپیوستگی هایی از قبیل درزها، صفحات لایه بندی، چین ها، زون های برشی و گسل ها در نظر گرفته می شود. ویژگی های سنگ بکر تابع ویژگی های فیزیکی مواد تشکیل دهنده ی آن و چگونگی به هم پیوستن این مواد به یکدیگر است. توده های سنگ ناپیوسته بوده و اغلب ویژگی های ناهمسانگردی و ناهمگنی دارند.

توده های سنگ در طبیعت به صورت ناپیوسته و متغیر هستند؛ بنابراین، انتخاب محدودی مناسبی که نماینده ی رفتار توده سنگ اطراف سازه ی مورد تحلیل باشد، اهمیت ویژه ی دارد. شکل ۱.۱ نمایش ساده ای از نحوه ی انتخاب مدل رفتاری توده سنگ را با توجه به فاصله داری ناپیوستگی و ابعاد دامنه ی مسأله یا پروژه نشان می دهد. اگر دامنه ی مسأله خیلی کوچک تر از بلوک های سنگی در توده سنگ باشد (حفاری سنگ با چالزنی)، رفتار ماده سنگ در نظر گرفته می شود. اگر ابعاد بلوک، هم اندازه ی سازه ی مورد تحلیل باشد یا یکی از دسته درزها به طور چشم گیر ضعیف تر از دیگر ناپیوستگی ها باشد، پایداری سازه باید با بررسی مکانیزم های شکست، شامل لغزش یا دوران بلوک ها و گوه های متشکل از تقاطع شکستگی های ساختاری تحلیل شود.

اگر سازه‌ی مورد نظر خیلی بزرگ‌تر از بلوک‌های سنگی شکل گرفته در اثر ناپیوستگی‌ها باشد، می‌توان توده سنگ را به عنوان یک محیط پیوسته‌ی معادل در نظر گرفت (بردی و براون^۱؛ ۱۹۸۵؛ براون، ۱۹۹۳؛ هوک، ۲۰۰۰).

جدول ۱.۱ بعضی انواع سازه‌های ساخته شده از سنگ یا در سنگ (براون، ۱۹۹۳)

زمنه‌ی کاربرد	انواع سازه‌های ساخته شده از سنگ یا در سنگ
معدن‌کاری	معدن‌کاری سطحی - پایداری شیب؛ قابلیت حفاری توده سنگ؛ چالزنی و آتشیاری؛ خردشدگی. معدن‌کاری زیرزمینی - چاه، پایه، طراحی کارگاه استخراج و تونل امتداد لایه؛ چالزنی و انفجار؛ خردشدگی؛ قابلیت حفاری سنگ و کانه؛ بهبود انفجار سنگ؛ استخراج مکانیزه، بازیابی برجا.
توسعه‌ی انرژی	نیروگاه‌های زیرزمینی (برقایی و هسته‌ای)؛ مخزن زیرزمینی ذخیره‌ی نفت و گاز؛ مخزن ذخیره‌ی انرژی (مخزن بومی یا مخزن هوای فشرده)؛ پی‌سدها؛ تونل‌های فشار؛ انبارهای زیرزمینی برای دفن زباله‌های اتمی؛ بهره‌برداری از انرژی زمین گرمایی؛ پیشرفت در صنعت نفت شامل حفاری، شکست هیدرولیکی، پایداری گمانه‌ی چاه.
حمل و نقل	ترانشه‌های بزرگراه‌ها و راه آهن، تونل‌ها و پی‌ها؛ کانال‌ها و آبراهه‌ها؛ ایستگاه‌ها و تونل‌های حمل و نقل سریع شهری؛ خطوط لوله.
امکانات زندگی	پی‌سدها؛ پایداری شیب مخازن؛ تونل‌های آبرسانی (انتقال آب)، تونل‌های تخلیه‌ی فاضلاب؛ کارخانه‌های بازیافت زباله‌های شهری و صنعتی؛ امکانات فرهنگی و ورزشی و انبارهای زیرزمینی؛ پی‌ها و ایستگاه‌های برق سطحی.
ساختمان‌سازی	پی‌ها؛ پایداری حفاری‌های روباز عمیق؛ مراکز و پناهگاه‌های سطحی یا زیرزمینی.
نظامی	اتاق‌های زیرزمینی بزرگ برای استحکامات دفاع شهری و تأسیسات نظامی؛ کاربرد انفجارهای هسته‌ای؛ پایگاه‌های عمیق موشک‌های استراتژیک.

هادسون (۱۹۹۳) یک شیوه‌ی عمومی سه لایه‌ای برای تمام مسائل مهندسی سنگ را مطابق شکل ۲.۱ ارائه داد. مسائل اصلی شامل پروژه‌هایی از قبیل پی‌ها، شیب‌های سنگی، چاه‌ها، تونل‌ها و مغارها هستند که در داخل دیاگرام سه حلقه‌ای نشان داده شده‌اند. عبارت‌های مربوط به حلقه‌ها در بالای دیاگرام، ورود به طراحی مسئله را نشان می‌دهد. کل پروژه با یک هدف ویژه در حلقه‌ی خارجی عنوان می‌شود، ارتباط داخلی بین اجزای مختلف موضوع کلی در حلقه‌ی میانی و جنبه‌های منحصر به فرد هر پروژه در حلقه‌ی داخلی بیان می‌شود. عبارت‌های مربوط به حلقه‌ها در قسمت پایین دیاگرام چگونگی اجرای بخش‌های مختلف طراحی را نشان می‌دهد. روش‌های مختلفی از قبیل سیستم هوشمند بر پایه‌ی داده‌ها، تحلیل ماتریس‌های اندرکنش مکانیک سنگی و تحلیل‌های عددی برای بررسی موضوع استفاده می‌شوند. نکته‌ی مهم این است که برای هر پروژه‌ی مورد بررسی و هر روش طراحی مورد استفاده، ویژگی‌های مواد (که در شکل ۲.۱ به صورت ماده‌ی سنگ، ناپیوستگی‌ها و نفوذپذیری مشخص شده‌است) و شرایط مرزی (نکات مهمی مانند تنش برجا و رژیم جریان آب‌های زیرزمینی در شکل ۲.۱) باید به درستی شناخته شوند. بنابراین، تعیین ویژگی‌های مهندسی سنگ‌ها (شامل شرایط مرزی) یک بخش ضروری در همه‌ی موضوعات مهندسی سنگ است.