



بِسْمِ اللّٰهِ الرَّحْمٰنِ الرَّحِیْمِ

مقدمه ای بر

# مکانیک سنگ

Richard E. Goodman

نشر نو اور

مترجمان:

دکتر محمد رضا ملکی جوان

مهندس حسین ولی

تلفن: ۲-۶۶۴۸۲۱۹۱

سرشناسه	: گودمن، ریچارد
عنوان و نام پدیدآور	: E Goodman, Richard
مشخصات نشر	: مقدمه‌ای بر مکانیک سنگ / [مؤلف ریچارد گودمن]؛ مترجمین محمدرضا ملکی‌جوان، حسین ولی.
مشخصات ظاهری	: تهران: نوآور، ۱۳۹۱.
شابک	: ۴۸۰ ص.: مصور.
وضعیت فهرست نویسی	: ۹۷۸-۶۰۰-۱۶۸-۰۶۶-۳
یادداشت	: فیبا
یادداشت	: عنوان اصلی: mechanics Introduction to rock.
عنوان دیگر	: ویراست قبلی با عنوان مکانیک سنگ در سال ۱۳۷۴ به چاپ رسیده است.
موضوع	: مکانیک سنگ.
شناسه افزوده	: سنگ‌ها -- مکانیک
شناسه افزوده	: ملکی‌جوان، محمدرضا، ۱۳۵۶- مترجم
رده بندی کنگره	: ولی، حسین، ۱۳۶۲- مترجم
رده بندی دیویی	: ۱۳۹۱ م۷/ک۹م۶/ت۸۷
شماره کتابشناسی ملی	: ۱۵۱۳۲/۶۲۴
	: ۳۷۲۱۳۹۷

## مقدمه‌ای بر مکانیک سنگ

محمدرضا ملکی جوان - حسین ولی

نوآور

۱۰۰۰ نسخه

واحد رایانه نوآور

محمدرضا نصیرنیا

۹۷۸-۶۰۰-۱۶۸-۰۶۶-۳

مترجمان:

ناشر:

شمارگان:

حروف‌نگاری:

مدیر تولید:

نوبت چاپ:

شابک:



نمایشگاه دائمی و مرکز فروش:

نوآور: تهران - خ انقلاب، خ فخرآزی، خ شهدای ژاندارمری نرسیده به خ دانشگاه ساختمان ایرانیان، پلاک ۵۸.

طبقه دوم، واحد ۶

تلفن مرکز پخش: ۹۲-۶۶۴۸۴۱۹۱-۰۹۱۲۶۰۶۲۳۸۳

www.noavarpub.com

حق چاپ و نشر برای ناشر محفوظ است

## فهرست

پیشگفتار مترجمان

پیشگفتار مولف

فصل اول / مقدمه

فصل دوم / رده‌بندی و خواص شاخص سنگ‌ها

فصل سوم / مقاومت سنگ و معیار گسیختگی

فصل چهارم / تنش‌های اولیه در سنگ‌ها و اندازه‌گیری آن‌ها

فصل پنجم / سطوح ضعف در سنگ‌ها

فصل ششم / شکل‌پذیری سنگ‌ها

فصل هفتم / کاربردهای مکانیک سنگ در مهندسی فضاهاى زیرزمینی

فصل هشتم / کاربردهای مکانیک سنگ در مهندسی شیب‌های سنگی

فصل نهم / کاربردهای مکانیک سنگ در مهندسی پی

پیوست ۱ / تنش‌ها

پیوست ۲ / کرنش‌ها

پیوست ۳ / معرفی سنگ‌ها و کانی‌ها

پیوست ۴ / اثبات معادلات

پیوست ۵ / استفاده از تصویر استریوگرافیک

نشر نوآور

تلفن: ۲-۶۶۴۸۴۱۹۱

## پیشگفتار مترجمان

درس مکانیک سنگ یکی از دروس اصلی رشته‌های تخصصی از قبیل مهندسی عمران، مهندسی معدن و زمین‌شناسی مهندسی می‌باشد. علیرغم این موضوع، نبود یک کتاب جامع و کاملی که بتواند به عنوان منبع آموزشی این واحد درسی، نیاز دانشجویان را پاسخ دهد کاملاً احساس می‌شود. محتوای این کتاب به نحوی است که علاوه بر جامعیت آن، برای رشته‌های تخصصی مختلف قابل استفاده می‌باشد و به عنوان یک کتاب کلاسیک برای تدریس درس مکانیک سنگ قابل استفاده است. مطالب کتاب به گونه‌ای است که استفاده‌کنندگان گوناگون در سطوح مختلف از مبتدی تا تخصصی به نحو مناسب می‌توانند از آن بهره بگیرند. همچنین کتاب هم در زمینه‌های کاربردی و هم در زمینه‌های آموزشی قابل بهره‌گیری است. در ترجمه این کتاب، مترجمین تمام تلاش خود را برای تهیه اثری بی‌نقص و در خور ارائه، به کار بسته‌اند ولی هیچ کاری عاری از نقص نبوده و نظرات و پیشنهادات خوانندگان محترم است که می‌تواند نواقص آن را در ویرایش‌های بعدی مرتفع سازد.

نشر نوآور

تلفن: ۲-۶۶۴۸۴۱۹۱

## پیشگفتار مؤلف

مکانیک سنگ حقیقتاً یک علم میان رشته‌ای است که در زمین‌شناسی، ژئوفیزیک، مهندسی معدن، مهندسی نفت و مهندسی عمران کاربرد دارد. این علم با فعالیت‌های بسیار مهمی از قبیل بازیافت و توسعه انرژی، ساخت خطوط حمل و نقلی، ذخیره آب و ساخت تاسیسات دفاعی، پیش‌بینی زمینلرزه و بسیاری از فعالیت‌های مهم دیگر ارتباط دارد. این کتاب جنبه‌هایی از مکانیک سنگ را مورد بررسی قرار می‌دهد که دارای کاربردهای اساسی در مهندسی عمران می‌باشند. دانشجویان مهندسی عمران و سطوح مبتدی و پیشرفته می‌توانند در این کتاب مجموعه‌ای از مفاهیم، تکنیک‌ها و کاربردهایی را بیابند که در حیطه کاری آن‌ها نقش حیاتی دارد مانند چگونگی ارزیابی فشار نگهدارنده مورد نیاز برای جلوگیری از انقباض سنگ‌های رسی در تونل‌ها، چگونگی ارزیابی زاویه بهینه حفاری در توده سنگ درزه‌دار و چگونگی تعیین ظرفیت باربری شمعی که در سنگ فرورفته است. دانشجویان رشته‌های دیگر نیز این اثر را مفید خواهند یافت زیرا در این کتاب فراهم آوردن یک پس زمینه و تکنیک‌هایی برای حل مسائل عملی مد نظر قرار گرفته است. یک کتاب مرجع عالی کتابی است که مباحث پایه‌ای موضوع را پوشش دهد آنچه باقی می‌ماند تنها این است که نحوه استفاده از مباحث پایه‌ای در مسائل عملی توضیح داده شود.

این کتاب در سه بخش تدوین شده است. بخش ۱ شامل ۶ فصل می‌باشد که روش‌های توصیف ویژگی‌های سنگ را شرح می‌دهد. این بخش شامل خواص شاخص جهت رده‌بندی مهندسی، مقاومت سنگ و خواص شکل‌پذیری، ویژگی‌ها و رفتار درزه‌ها و روش‌های تعیین وضعیت تنش در محل می‌باشد. بخش ۲ شامل فصول ۷، ۸ و ۹ می‌باشد که راجع به جنبه‌های کاربردی مکانیک سنگ برای حفاری‌های سطحی و زیرزمینی و پی‌سازی بحث می‌کند. بخش ۳ مجموعه‌ای از پیوست‌هاست. یکی از پیوست‌ها مربوط به اثبات معادلاتی می‌شود که از اثبات آن‌ها در داخل فصل مربوطه صرف‌نظر شده است. همچنین در این پیوست‌ها مباحثی راجع به تنش‌ها در دو و سه بعد و نیز اندازه‌گیری کرنش‌ها آمده است. پیوست ۳ یک طرح ساده را برای تشخیص سنگ‌ها و کانی‌ها آورده است. فرض ما بر این بوده که خواننده این کتاب با مفاهیم مقدماتی زمین‌شناسی آشنایی دارد و اصطلاحات کانی‌شناسی و سنگ‌شناسی که در این قسمت آمده تنها جهت تهیه یک طرح ساده نامگذاری برای مقاصد متعدد در مکانیک سنگ

بوده است.

از چاپ ویراست اول در سال ۱۹۸۰ تا کنون توسعه راهکار هندسی در مکانیک سنگ را تحت عنوان تئوری بلوک داشته‌ایم. این تئوری بر اساس داده‌هایی که از بررسی‌های ساده زمین‌شناسی سوگیری و خواص درزه‌ها به دست می‌آید استوار می‌باشد. تئوری بلوک دست‌ورالعمل‌هایی را ارائه می‌دهد تا در حفاری سنگ‌های درزه‌دار بهترین شکل و مسیر حفاری را مشخص کنیم. ایده اصلی من در تهیه این ویراست معرفی تئوری بلوک و کاربردهای آن در حفاری‌های زیرزمینی و دامنه‌های سنگی بوده است. این مطلب به خوبی در فصول ۷ و ۸ و مسائل مربوطه بحث شده است. هدف دیگر از تهیه این ویراست بررسی مسائل جدید و موضوعاتی است که قبلاً نادیده گرفته شده و اکنون اثبات شده که از لحاظ عملی مهم می‌باشند.

توضیح: مطالب فوق در بردارنده پیشگفتار مؤلف در ویراست اول و دوم می‌باشد که در آن بخشی از مطالب که در ارتباط با مقایسه ویراست اول و دوم و همچنین قدردانی از همکاران بود به علت نبود نکات قابل توجه برای خوانندگان حذف شده است.

نشر نوآور

تلفن: ۲-۶۶۴۸۴۱۹۱

## مقدمه

با وجود آنکه آشنایی با مکانیک سنگ برای مهندسان عمران بسیار ضروری و حیاتی است، علم مکانیک سنگ از حدود سال ۱۹۶۰ به عنوان یک رشته درسی وارد برنامه‌ی آموزشی مهندسان شد. ضرورت فراگیری علم مکانیک سنگ را می‌توان از نتایج اجتناب‌ناپذیر فعالیت‌های نوین مهندسی در محیط‌های سنگی دانست. بدیهی است که فعالیت‌هایی از قبیل ایجاد تأسیسات پیچیده زیرزمینی، حفاری‌های عمیق به منظور ایجاد کانال تخلیه در سدها و معدن‌کاری به روش روباز در معادن بسیار بزرگ، نیازمند آشنایی با مکانیک سنگ است.

علم مکانیک سنگ با خواص سنگ سر و کار دارد و روش‌های ویژه‌ای را برای طراحی اجزای سنگی در پروژه‌های مهندسی به کار می‌گیرد. سنگ مانند خاک، به قدری با دیگر مواد مورد استفاده در مهندسی عمران تفاوت دارد که فرآیند طراحی در آن کاملاً ویژه و خاص می‌باشد. به عنوان مثال در ارتباط با ساخت یک سازه از جنس بتن مسلح روند طراحی این‌گونه است که ابتدا مهندسین بارهای خارجی وارد بر سازه را محاسبه می‌کنند، سپس ماده را با مقاومت مورد نیاز تهیه می‌کنند (بررسی‌هایی را به عمل می‌آورند تا از میزان مقاومت، اطمینان حاصل شود) و سرانجام با توجه به میزان بار و مقاومت، هندسه سازه را تعیین می‌کنند اما در سازه‌های سنگی بارهای خارجی بسیار کمتر از بار ناشی از توزیع مجدد تنش‌های اولیه می‌باشد و از آنجائی که سازه‌های سنگی مانند دالان‌های زیرزمینی در معرض مدهای گسیختگی مختلفی قرار می‌گیرند، تعیین مقاومت مواد بیش از آنکه به محاسبه نیاز داشته باشد، نیازمند قضاوت مهندسی است. در نتیجه هندسه سازه حداقل تا حدی تحت تأثیر ساختار زمین‌شناسی بوده و طراحان در این خصوص آزادی عمل ندارند. به علت وجود چنین مسائلی است که در مکانیک سنگ باید جنبه‌هایی را مد نظر قرار داد که شاید در هیچ یک از زمینه‌های دیگر مکانیک کاربردی نیازی به آن‌ها نباشد. ارجح بودن انتخاب ساختگاه بر اساس اطلاعات زمین‌شناسی نسبت به انتخاب بر اساس اطلاعات حاصل از کنترل خواص مواد، تعیین

تشنه‌های برجا و آنالیز مدهای گسیختگی مختلف با استفاده از بررسی‌های گرافیکی و مدلسازی، از جنبه‌های خاص مطالعاتی در مکانیک سنگ می‌باشد. بنابراین علم مکانیک سنگ با زمین‌شناسی و زمین‌شناسی مهندسی در هم آمیخته است.

## ۱-۱- زمینه‌های کاربردی مکانیک سنگ

انسان‌ها از ماقبل تاریخ با سنگ سر و کار داشته‌اند. نوک پیکان‌ها، ابزارآلات روزمره، ظروف، استحکامات نظامی، منازل و تونل‌ها یا از سنگ و یا در درون سنگ ساخته می‌شدند. ساختمان‌ها و تندیس‌هایی از قبیل اهرام مصر و مجسمه ابوالهول نشان‌دهنده به کارگیری تکنیک‌هایی برای انتخاب، استخراج، برش و کار بر روی سنگ در گذشته می‌باشند. در قرون هجدهم و نوزدهم تونل‌های بزرگی به منظور تهویه و زهکشی معادن، تأمین آب، ایجاد کانال‌ها و حمل و نقل ریلی حفر شد.

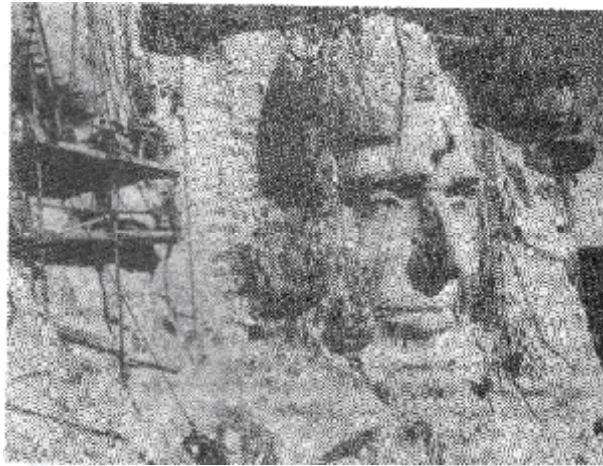
در عصر حاضر علیرغم تمایل مهندسان به استفاده از مواد دیگر، تندیس‌های بزرگ کوه راشمور (شکل ۱-۱) ماندگاری تصاویر حک شده‌ی عظیم گرانیتی را برای جهانیان در معرض نمایش گذاشته‌اند. در این عصر که مهندسان مواد قادر به ساختن آلیاژها و پلاستیک‌ها برای اهداف خاص می‌باشند، کارهای سنگی هنوز هم ذهن و توان صنعت و صنعتگران را به خود اختصاص داده‌اند. سولاتی در ارتباط با خواص و رفتار سنگ در مهندسی سازه‌ها، مسیرهای حمل و نقلی، صنایع دفاعی و تأمین انرژی جلوه مهمی یافته است.

جدول ۱-۱ برخی از فعالیت‌های مهندسی که تا حد زیادی با مکانیک سنگ سر و کار دارند را به طور خلاصه آورده است. در این جدول از میان طیف فعالیت‌های برنامه‌ریزی، طراحی و ساخت که در فعالیت‌های مهندسی صورت می‌گیرد، ۹ پارامتر مطرح شده است. این پارامترها ارتباط تنگاتنگی با مکانیک سنگ دارند و عبارتند از: ۱- ارزیابی کمی خطرات زمین‌شناسی ۲- انتخاب و آماده سازی مواد سنگی ۳- ارزیابی قابلیت برش و حفاری سنگ و طراحی ابزار برش و حفاری ۴- طرح و گزینش انواع سازه‌ها ۵- آنالیز تغییر شکل سنگ ۶- آنالیز پایداری سنگ ۷- نظارت و کنترل پروژه انفجار ۸- طراحی سیستم نگهدارنده ۹- شکست هیدرولیکی.

گاهی با توجه به طبیعت فعالیت مهندسی، این پارامترها از طرق مختلف پیگیری می‌شوند. به عنوان مثال سازه‌های مهندسی که در سطح زمین مستقر می‌شوند به طور معمول نیازی به مطالعه خواص سنگ و رفتار آن ندارند مگر در مواردی که سازه خیلی بزرگ و یا خاص باشد و یا اینکه سنگ تحت بارگذاری، خواص نامعمولی داشته باشد.

البته مهندسان همیشه مراقب خطرات زمین‌شناسی از قبیل گسل‌های فعال یا زمین‌لغزش‌های موجود در محدوده ساختگاه سازه هستند. یک مهندس زمین‌شناس مسئولیت کشف خطرات را بر عهده خواهد داشت که در این باره استفاده از علم مکانیک سنگ می‌تواند





شکل ۱-۱ ساخت تندیس روزولت و لینکلن بر روی کوه راشمور. گاتزن بورگلوبم ساختگاه را انتخاب نمود و کنده کاری و تناسب تندیس را تا آخرین اینچ به انجام رساند. سنگ هوازده به وسیله انفجارهای کنترل شده با دینامیت، زدوده شد. خرج انفجار و فاصله چال‌های انفجاری مرتباً کاهش یافت تا اینکه سطح نهایی به دست آمد. آخرین اینچ‌ها با مته کاری و قلمزنی حکاکی شد. (عکس توسط چارلز دی امری . باز تولید با مجوز لینکلن بورگلوب و کی.سی. ڈون. از داستان پشت صحنه کوه راشمور، مقالات کی.سی. ۱۹۷۸).

راهگشا باشد و گاهاً می‌تواند در کاهش ریسک، کمک شایانی را ارائه نماید. به عنوان مثال در مورد تراژدی ساختمان‌های نزدیک به پای صخره‌ها در **ریو دی ژانیرو** (که عامل به وجود آورنده این تراژدی صفحات سست گرانیب هوازده بود) نیاز طراحی مهندسی سیستم راک بولت یا اصلاح ساختگاه توسط انفجار کنترل شده وجود داشت که این امر با استفاده از علم مکانیک سنگ امکان‌پذیر بود.

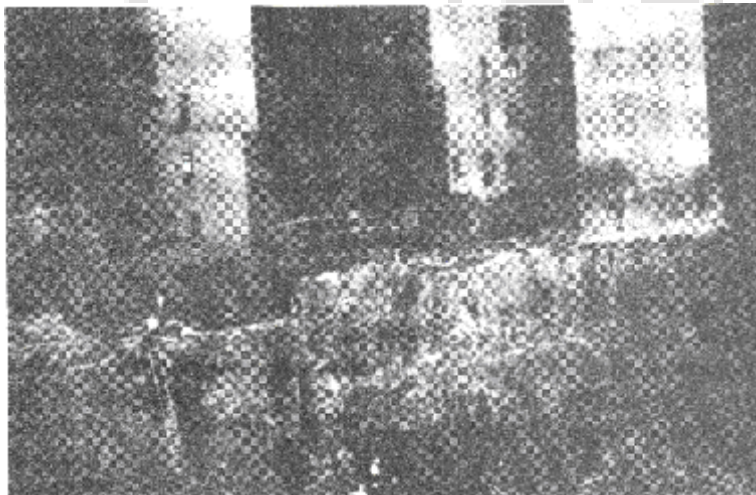
در خصوص پارامترهای جدول ۱-۱ در مورد سازه‌های سبک مانند منازل شخصی، مکانیک سنگ ممکن است تنها در مورد بررسی قابلیت تورم پی‌های شیلی به کار رود. در مورد ساختمان‌های بسیار بزرگ، پل‌ها، کارخانجات و ... آزمایشاتی برای تعیین نشست الاستیک و ثانویه سنگ تحت تاثیر بارهای وارده مورد نیاز خواهد بود. در مواردی که سیستم‌های کارستی آهکی وجود دارد و یا ذغال معدنی در اعماق دیده می‌شود برای حصول اطمینان از پایداری سازه بررسی‌های گسترده و پی‌هایی با طراحی‌های خاص مورد نیاز است.

جنبه‌ای از فعالیت مهندسی در مورد ساختمان‌های بلند، که با مکانیک سنگ نیز سر و کار دارد عبارت است از: کنترل انفجار؛ به طوری که ارتعاشات حاصل از انفجار به سازه‌های مجاور آسیب نرساند و باعث آزار ساکنان محلی نشود (شکل ۱-۲).

در شهرها، پی ساختمان‌های جدید ممکن است به سازه‌های قدیمی‌تر بسیار نزدیک باشد. جهت جلوگیری از لغزش و جدایی بلوک‌های سنگی در گودبرداری‌های موقت، ممکن است طراحی سیستم‌های نگهدارنده از قبیل سیستم حفاظت کابلی مورد نیاز باشد.

پرچالش‌ترین سازه‌های سطحی از نظر علم مکانیک سنگ سدهای بزرگ هستند؛ به ویژه انواع قوسی و پشت‌بند دار که بار سازه و فشار آب تنش‌های زیادی را به پی‌ها و تکیه‌گاه‌های سنگی وارد می‌سازند. علاوه بر چالش‌هایی که گسل‌های فعال در پی سد به وجود می‌آورند، خطرات زمین‌لغزش‌های احتمالی در مخزن سد نیز باید به دقت ارزیابی شود. فاجعه اخیر سد وایونت در ایتالیا در اذهان باقی مانده است؛ هنگامی که توده لغزشی باعث سرریز شدن آب از روی سد و کشته شدن بیش از ۲۰۰۰ نفر از مردم در پایین دست رودخانه گردید. انتخاب مصالح جهت محافظت از شیب خاکریزها در برابر فرسایش امواج، تهیه بتن، انتخاب مصالح فیلتر و مصالح سنگریزه‌ای نیز با مکانیک سنگ در ارتباط است. برای تعیین دوام و خصوصیات مقاومتی چنین موادی لازم است که آزمایشاتی بر روی سنگ‌ها انجام شود. از آنجایی که سدهای مختلف رژیم‌های تنشی مختلفی را به سنگ وارد می‌آورند، مکانیک سنگ به تعیین نوع سد مناسب برای ساختگاه مورد نظر نیز، کمک می‌کند. پس از تعیین نوع سد آنالیز تغییرشکل و پایداری سنگ نیز قسمت مهمی از مطالعات طراحی مهندسی را در بر می‌گیرد.

در مورد سدهای بتنی پارامترهای تغییر شکلی سنگ‌های پی و تکیه‌گاه که از آزمایشات برجا و آزمایشگاهی به دست آمده در مطالعات مدلسازی یا آنالیزهای عددی تنش‌های وارده، به کار گرفته می‌شود. ایمنی گوه‌های سنگی بزرگ و کوچک در زیر سد با مطالعات استاتیکی محاسبه می‌شود. چنانچه لازم باشد سیستم‌های نگهدارنده کابلی یا بولتی برای پیش‌تنیده نمودن سنگ یا تماس سنگ و سد طراحی می‌شود.



شکل ۱-۲ حفاری در سنگ در مجاورت ساختمان‌های دیگر یک مشکل عمده برای ساخت و ساز در شهرها می‌باشد. (عکس از ای.جی. هندرون، شیست ژوراسیک منهن، کالج هانتز، نیویورک)

جدول ۱-۱: برخی حوزه‌های کاربردی مکانیک سنگ  
(فعالیت‌هایی که انجام آن‌ها مستلزم داده‌های مکانیک سنگی می‌باشد)

پروژه	ارزیابی مخاطرات زمین‌شناسی	انتخاب مصالح	ارزیابی قابلیت برش و حفاری	جانمایی و انتخاب انواع سازه‌ها
سازه‌های سطحی مناطق مسکونی	(۲) زمین لغزش‌ها، گسل‌ها			
پل‌ها، ساختمان‌های بلند، نیروگاه‌ها سدها	(۲) زمین لغزش‌ها، گسل‌ها	(۲) سنگ‌های نما، مصالح بتنی	(۱) شفت‌های حفاری شده برای پی‌های شمعی	(۲) محل ساختگاه پایدار
	(۱) زمین لغزش‌های داخل مخازن، گسل‌ها	(۱) مصالح سنگدانه‌ای، مصالح ریپ‌رپ		(۱) انتخاب نوع وزنی، قوسی و یا خاکی
مسیرهای حمل و نقل و انتقال بزرگراه‌ها، خطوط ریلی	(۱) زمین لغزش‌ها	(۲) خاکریز، مصالح بستر، ریپ‌رپ		(۱) جهت و شیب برش‌ها
کانال‌ها، خطوط لوله	(۱) زمین لغزش‌ها	(۲) خاکریز، مصالح بستر، ریپ‌رپ		(۱) جهت و شیب برش‌ها
مجراهای تخلیه	(۱) زمین لغزش‌ها			(۱) مجرای سطحی، تونل‌های پوشش‌دار و فاقد پوشش
حفاری‌های سطحی برای مقاصد دیگر معادن سنگ و گودال‌های معدنی	(۲) زمین لغزش‌ها		(۱) کانسارهای تاکونیتی و دیگر سنگ‌های سخت	(۱) شیب‌ها، مسیرهای ترابری، ساختمان‌ها
سرریزها	(۱) زمین لغزش‌ها			(۲) دامنه جانبی، تونل، سرایشی‌ها

(۱) بسیار قابل توجه  
(۲) تا حدی قابل توجه

مشترک‌نوآور

تلفن: ۲-۶۶۴۸۴۱۹۱