بسم الله الرحمن الرحيم

دانشگاه صنعتی اصفهان

دانشکده مهندسی معدن

ارزیابی پارامترهای ژئومکانیکی توده سنگ ساختگاه سد چم شیر

پایان‌نامه کارشناسی ارشد مهندسی معدن- مکانیک سنگ

سید زانیار سید موسوی

اساتید راهنما

دکتر لهراسب فرامرزی

دکتر مرتضی طبائی

شهریور ۱۳۹۲

دانشگاه صنعتی اصفهان

دانشکده مهندسی معدن

پایان‌نامه‌ی کارشناسی ارشد رشته‌ی مکانیک سنگ آقای سید زانیار سید موسوی

تحت عنوان

ارزیابی پارامترهای ژئومکانیکی توده سنگ ساختگاه سد چم شیر

در تاریخ ۹۲/۶/۳۱ توسط کمیته‌ی تخصصی زیر مورد بررسی و تصویب نهایی قرار گرفت.

۱- استاد راهنمای پایان‌نامه	دکتر لهراسب فرامرزی
۲- استاد راهنمای پایان‌نامه	دکتر مرتضی طبائی
۳- استاد داور	دکتر مسعود چراغی
۴- استاد داور	دکتر احمدرضا مختاری
سرپرست تحصیلات تکمیلی دانشکده	دکتر راحب باقرپور

حمد و سپاس فراوان به درگاه خداوندی برم که دگر بار الطاف بیکران خود را شامل این حقیر نمود تا با استعانت از بارگاه احدیتش گامی دیگر در جهت کسب دانش بردارم و دری بر نادانسته‌های خود بگشایم و امید که در آینده نیز مشمول عنایات خاصه‌اش قرار گیرم.

بر دستان پدر و مادری که بذر عشق به آموختن را در وجودم نهادند بوسه می‌زنم و آن دو را که تجلی مهر و لطف خداوندی بر من هستند عاشقانه می‌ستایم. با تمام وجود از مقام شامخ اساتید گران مایه آقایان دکتر لهراسب فرامرزی و دکتر مرتضی طبائی که در نهایت لطف و بزرگواری تمامی سعی و تلاش خود را در جهت اعتلای واقعی ارزش‌های آموزشی در کالبد هدایت‌ها و رهنمودها نسبت به این جانب مبذول فرموده‌اند، کمال قدردانی را می‌نمایم. از آقایان دکتر چراغی و دکتر مختاری که زحمت بازخوانی و داوری این پایان‌نامه را پذیرفتند کمال تشکر و قدردانی را دارم.

از جناب آقای مهندس فاضل و تمامی پرسنل وزارت آب نیرو به خاطر زحمت‌های فراوانشان صمیمانه تشکر و قدردانی می‌کنم. از اساتید بزرگوار دانشکده معدن که در این مقطع از تحصیلم از آن‌ها بسیار آموختم، تشکر و قدردانی می‌نمایم.

یاد و خاطره تمامی دوستان عزیزم آقایان آرش مفتیان، شیرکو محمودی، خالد الهویسی، محمد محمدی، صنعان زارعی، لقمان سامانی، فرید دانشور، بابک رحیمی، هادی بهاری، جواد قاسم زاده و دیگر دوستانی که ذکر نام یکایک ایشان در این مجال نمی‌گنجد را گرامی داشته و برای تمامی آن‌ها سعادت، سلامت و پیروزی را آرزو دارم.

و در پایان شایسته است که بگویم:

رنگین‌کمان پاداش کسانی است که تا آخرین لحظه زیر باران می‌مانند.

سید زانیار سید موسوی

تابستان ۹۲

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

تقدیم به

پدر و مادرم که صبر و مهرشان پیمودن راه را برایم آسان می نماید،

و

برادر و خواهرم که عشق به آن ها امید بخش راهم می باشد.

فهرست مطالب

عنوان **صفحه**

فهرست مطالب ..... هشت

چکیده ۱

فصل اول: مروری بر کلیات و اهداف پایان نامه

۱-۱ مقدمه ۲

۱-۲ اهمیت تحقیق و هدف از انجام آن ۲

۱-۳ مجموعه فعالیت‌های انجام‌شده برای برآورد پارامترهای ژئومکانیکی توده سنگ ۴

۱-۳-۱ برداشت اطلاعات ناپیوستگی‌ها و سایر مشخصات ساختاری توده سنگ‌ها ۴

۱-۳-۲ روش‌های تجربی ۴

۱-۳-۳ حفاری‌های اکتشافی (حفر گمانه‌ها و گالریهای اکتشافی) ۱۱

۱-۳-۴ انجام آزمایش‌های آزمایشگاهی مکانیک سنگ ۱۱

۱-۳-۵ انجام آزمایش‌های برجای مکانیک سنگ ۱۲

۱-۴ معیار شکست ۱۴

فصل دوم: زمین شناسی عمومی منطقه

۲-۱ موقعیت جغرافیایی و راه‌های دسترسی ۱۵

۲-۲ زمین‌شناسی عمومی منطقه ۱۷

۲-۳ زمین ریخت‌شناسی ۱۸

۲-۴ سنگ چینه شناسی ۲۰

۲-۴-۱ سازند میشان(Mn) ۲۱

۲-۵ زمین‌شناسی ساختمانی ۲۳

۲-۵-۱ ناودیس چم شیر ۲۳

۲-۵-۲ گسل‌های محدوده ساختگاه ۲۴

۲-۶ سیستم ناپیوستگی‌ها ۲۵

۲-۶-۱ جناح چپ ۲۵

۲-۶-۲ جناح راست ۲۶

فصل سوم: تحلیل سینماتیکی شیب دیواره جناحین ساختگاه

۳-۱ مقدمه ۲۸

۳-۲ تشخیص نوع شکست با استفاده از تصاویر استریوگرافیک ۲۹

۳-۳ تحلیل سینماتیکی جهت تخمین حداکثر زاویه شیب ایمن دره سد با توجه به سه نوع شکست اصلی صفحه‌ای، گوه‌ای و واژگونی ۳۰

۳-۳-۱ تحلیل سینماتیکی ناحیه ۱ ..... ۳۰

۳-۳-۲ تحلیل پایداری شیب دیواره ساختگاه در ناحیه دوم ۳۳

فصل چهارم: بررسی ژئوتکنیکی توده سنگ ساختگاه

۴-۱ بررسی شکستگی‌ها در گمانه‌های ساختگاه ۴۰

۴-۱-۱ شاخص کیفی توده سنگ ۴۰

۴-۲ نفوذپذیری توده سنگ ساختگاه ۴۲

۴-۳ بررسی پرده آب بند آزمایشی جناح راست ساختگاه ۴۳

فصل پنجم: تعیین پارامترهای ژئومکانیکی توده سنگ ساختگاه

۵-۱ آزمایش‌های آزمایشگاهی ۵۱

۵-۱-۱ تعیین مشخصات فیزیکی : ۵۱
۵-۱-۲ آزمایش دوام ۵۳
۵-۱-۳ آزمایش مقاومت فشاری تک محوره ۵۳
۵-۱-۴ آزمایش مقاومت کششی ۵۴
۵-۱-۵ آزمایش مستقیم آزمایشگاهی (بر روی نمونه‌های سنگ بکر) ۵۴
۵-۱-۶ تعیین خواص مقاومتی سنگ بکر ۵۷
۵-۲ طبقه‌بندی مهندسی سنگ ۶۰
۵-۲-۱ طبقه‌بندی ژئومکانیکی سنگ (RMR) ۶۰
۵-۲-۲ طبقه‌بندی اندیس مقاومتی زمین‌شناسی(GSI) ۶۴
۵-۲-۳ طبقه‌بندی DMR ۶۵
۵-۲-۴ تعیین پارامترهای ژئومکانیکی با استفاده از طبقه‌بندی مهندسی سنگ ۷۲
۵-۲-۵ تعیین مدول تغییر شکل‌پذیری با استفاده از طبقه‌بندی مهندسی سنگ ۷۳
۵-۳ تعیین پارامترهای ژئومکانیکی با استفاده از معیار شکست هوک و براون و موهر-کولمب ۷۷
۵-۴ تحلیل نتایج آزمایشات برجا ۸۲
۵-۴-۱ آزمایش بارگذاری صفحه‌ای ۸۲

فصل ششم: نتیجه گیری و پیشنهادات

۶-۱ نتیجه‌گیری ۸۹
۶-۲ پیشنهادات ۹۱
مراجع ۹۳
چکیده انگلیسی ۹۶

چکیده

هدف اصلی از این تحقیق،تعیین پارامترهای ژئومکانیکی توده سنگ ساختگاه سد چم شیر واقع در شهرستان گچساران(از توابع استان کهکیلویه و بویراحمد) می‌باشد. هدف از احداث این سد، بهره‌برداری از منابع آب رودخانه زهره می‌باشد. از اهداف مهم طرح تأمین ۱۱۰ هزار هکتار از زمین‌های کشاورزی جنوب کشور و تأمین بخشی از برق مورد نیاز مناطق مجاور است. سد چم شیر با ارتفاع حدود ۱۴۰ متر و حجم مخزن حدود ۱،۷۰۰،۰۰۰،۰۰۰مترمکعب به صورت یک سد بتنی وزنی غلطکی ساخته می‌شود.

در زمان انجام طراحی پروژه‌های مهندسی ، علاوه بر اطلاعات توصیفی و کیفی که توسط بررسی‌های صحرایی و اکتشافی زیرزمینی گردآوری می‌شود، داده‌های کمی و عددی درباره ویژگی‌های ذاتی یا اکتسابی مصالح نیز مورد نیاز است. از این جهت سنگ را در آزمایشگاه یا در صحرا و بطور برجا، مورد آزمایش قرار می‌دهند. هدف از این بررسی‌ها، شناسایی و طبقه‌بندی سنگ و تعیین روابطی که میان ویژگی‌های مختلف مصالح وجود دارد می‌باشد. بررسی‌های دقیق در این مرحله، می‌تواند از بروز مشکلات در مرحله اجرا و بهره‌برداری سدها، جلوگیری نماید.

سد چم شیر در دره‌ای ساختاری – فرسایشی وU شکل در امتداد محور یک ناودیس واقع شده است. توده سنگ‌های ساختگاه سد شامل ۴ واحد سنگی (به ترتیب از سطح زمین به طرف پایین) میشان بالایی، میشان میانی، ناحیه انتقال و میشان زیرین است. در این پژوهش با استفاده از نتایج حاصل از گمانه‌های اکتشافی، مشاهدات صحرایی، آزمون‌های برجا و مطالعات آزمایشگاهی به ارزیابی پارامترهای ژئومکانیکی، ژئوتکنیکی و هیدرولیکی توده سنگ واحدهای مختلف ساختگاه سد چم شیر از جمله طبقه بندی مهندسی توده سنگ، مقاومت فشاری، زاویه اصطکاک، چسبندگی، نفوذپذیری، مدول تغییرشکل پذیری و .... پرداخته شده است و ارتباط بین این پارامترها(برای واحدهای مختلف) مورد بررسی قرار گرفته است و در پایان با مقایسه پارامترهای به‌دست آمده با پارامترهای ژئومکانیکی ساختگاه چند سد ساخته شده در داخل و خارج کشور، نتیجه شده است، که ساختگاه سد چم شیر از نظر پارامترهای ژئومکانیکی، ژئوتکنیکی و هیدرولیکی برای ساخت سد بتنی وزنی مناسب می‌باشد.

کلمات کلیدی: پارامترهای ژئومکانیکی، سد چم شیر، توده سنگ، طبقه بندی مهندسی سنگ، آزمایش های آزمایش

فصل اول

مروری بر کلیات و اهداف پایان نامه

۱-۱ مقدمه

از کارهای مهمی که در طراحی یک سازه، روی زمین باید انجام شود، بررسی رفتار مهندسی سنگ و تعیین خصوصیات ژئومکانیکی آن می‌باشد. رفتار مهندسی و خصوصیات توده سنگ به عوامل زیادی مانند زمین‌شناسی، عوامل محیطی، لیتولوژیکی، فیزیکی، هیدرولیکی و مکانیکی بستگی دارد. مطالعه و ارزیابی این عوامل در طراحی انواع مختلف سازه‌های مهندسی ضروری است[۱].

پیش‌بینی نزدیک به واقعیت شرایط زمین‌شناسی و خصوصیات مکانیکی و مقاومتی سنگ‌ها در مرحله مطالعات پروژه‌های عمرانی و معدنی، امکان طراحی مناسب و در نتیجه برآورد صحیح از امکانات و تمهیدات لازم اجرایی، متناسب با شرایط موجود رازمان اجرا فراهم می‌نماید. تحقق این امر، به دلیل ناهمگنی‌ها و پیچیدگی‌هایی که در شناخت خصوصیات مهندسی سنگ‌ها وجود دارد، علاوه بر اقدامات عملی (حفر گمانه و آزمایشات دقیق) نیازمند تعبیر و تفسیر واقع‌بینانه از نتایج می‌باشد.

پارامترهای ژئومکانیکی توده سنگ شامل مقاومت فشاری، مدول تغییرشکل پذیری، ثابت‌های هوک و براون، پارامترهای معیار موهر-کولمب و ..... پارامترهای ورودی مهمی در تحلیل رفتار توده سنگ هستند[۲].

۱-۲ اهمیت تحقیق و هدف از انجام آن

با توجه به اینکه مسئله کمبود آب در قرن اخیر و قرن‌های آینده یکی از مشکلات اساسی جامعه بشری خواهد بود و کشور ایران نیز از این مسئله مستثنی نیست، از این رو در کشور ما نیز حرکت‌های اساسی برای مهار آب‌های روان

به وسیله احداث سدها شروع شده است.یکی از این سدها ، سد مخزنی چم شیر در شهر گچساران از توابع استان چهارمحال بختیاری می باشد که هدف از آن بهره برداری از منابع آب رودخانه زهره می‌باشد. این رودخانه به دلیل سیستم هیدرولوژیکی (بارانی) و نزولات جوی درخور توجه، از آورد سالیانه قابل‌توجه و جریان پایه مناسبی برخوردار است. از اهداف مهم این طرح، تأمین آب کشاورزی ۱۱۰ هزار هکتار از اراضی کشاورزی جنوب کشور، تأمین برق مورد نیاز مناطق هم‌جوار و در صورت نیاز تأمین بخشی از مصارف شرب یا صنعت منطقه می‌باشد. سد چم شیر به صورت یک سد بتنی غلطکی وزنی با ارتفاع حدود ۱۴۰ متر و حجم مخزن حدود ۱،۷۰۰،۰۰۰،۰۰۰ مترمکعب ساخته می‌شود.

با توجه به اینکه اغلب پروژه‌های عمرانی بر روی توده‌های سنگ و یا در درون آن‌ها اجرا می‌گردند، آگاهی از خواص مهندسی سنگ‌ها برای طراحی و اجرای پروژه ضرورت می‌یابد و می‌توان رفتار مهندسی سنگ را پیش‌بینی نمود. در زمان انجام طراحی پروژه‌های مهندسی ، علاوه بر اطلاعات توصیفی و کیفی که توسط بررسی‌های صحرایی و اکتشافی زیرزمینی گردآوری می‌شود، داده‌های کمی و عددی درباره ویژگی‌های ذاتی یا اکتسابی مصالح نیز مورد نیاز است. از این جهت سنگ را در آزمایشگاه یا در صحرا و بطور برجا، مورد آزمایش قرار می‌دهند. هدف از این بررسی‌ها، شناسایی و طبقه‌بندی سنگ و تعیین روابطی که میان ویژگی‌های مختلف مصالح وجود دارد می‌باشد. توسعه روابط بین خصوصیات فیزیکی و مکانیکی سنگ‌ها در کاهش تعداد آزمایش‌ها مفید خواهد بود [۳]. بررسی‌های دقیق در این مرحله، از بروز مشکلات در مرحله اجرا و بهره‌برداری سدها، جلوگیری نماید.

پارامترهای ژئومکانیکی توده سنگ شامل مقاومت فشاری، مدول تغییرشکل پذیری، ثابت‌های هوک و براون، پارامترهای معیار هوک و براون پارامترهای ورودی مهمی در تحلیل رفتار توده سنگ هستند.

پیش‌بینی نزدیک به واقعیت شرایط زمین‌شناسی و خصوصیات مهندسی سنگ‌ها در مرحله مطالعات پروژه‌های عمرانی معدنی، امکان طراحی مناسب و در نتیجه برآورد صحیح از امکانات و تمهیدات لازم اجرایی، متناسب با شرایط موجود را در زمان اجرا فراهم می‌نماید. تحقق این امر، به دلیل ناهمگنی‌ها و پیچیدگی‌هایی که در شناخت خصوصیات مهندسی سنگ‌ها وجود دارد، علاوه بر اقدامات عملی (حفر گمانه و آزمایشات دقیق) نیازمند تعبیر و تفسیر واقع‌بینانه از نتایج می‌باشد[۴].

بررسی‌های ژئومکانیکی ساختگاه سد برای برآورد پارامترهای رفتاری توده سنگ‌های تشکیل‌دهنده ساختگاه و توزیع آن‌ها از مراحل ابتدایی مطالعات آغاز می‌گردد. از آنجا که برآورد دقیق این پارامترها در بهینه‌سازی عملیات احداث سد نقشی اساسی دارد لذا این تحقیق با هدف افزایش دقت پارامترهای رفتاری و چگونگی گسترش آن‌ها انجام پذیرفته است.

در این تحقیق پارامترهای ژئومکانیکی برای هر یک از این واحدها در جناح چپ و راست ساختگاه و با استفاده از داده‌های آزمایشگاهی، روابط تجربی، نرم‌افزارهای عددی و آزمایشات برجا تعیین و در نهایت برای هر یک از پارامترها رنجی معین شده است.

۱-۳ مجموعه فعالیت‌های انجام‌شده براي برآورد پارامترهاي ژئومکانیکی توده سنگ

- برداشت اطلاعات ناپیوستگی‌ها و سایر مشخصات ساختاری توده سنگ‌ها
- استفاده از روابط تجربی
- حفر گمانه و گالریهای اکتشافی
- انجام آزمایش‌های آزمایشگاهی مکانیک سنگ
- انجام آزمایش‌های برجای مکانیک سنگ
- معیارهای شکست

۱-۳-۱ برداشت اطلاعات ناپیوستگی‌ها و سایر مشخصات ساختاری توده سنگ‌ها

یکی از عوامل موثر در کنترل رفتار مکانیکی،شکل فرسایش و مورفولوژی توده‌های سنگی تعداد و سیستم دسته درزه‌های متقاطع موجود در توده سنگی می‌باشد. به عبارت دیگر، هر چه دسته در زه‌های متقاطع در سنگ بیشتر باشد تغییر شکل سنگ ناشی از تنش‌های اعمالی آسان‌تر به وقوع می‌پیوندد. از طرف دیگر با داشتن داده‌های درزه ها و آنالیز معکوس ایجاد دسته درزه های سنگ می‌توان به رژیم تنش اعمالی به توده سنگ در داخل زمین پی برد[۲]. مهم‌ترین خصوصیات ناپیوستگی‌ها که از اهمیت زیادی برخوردارند، شامل مواردی نظیر جهت‌داری،تداوم و تکرار، فراوانی، هندسه سطحی، نوع ناپیوستگی و مواد پر کننده می‌باشد [۵].

۱-۳-۲ روش‌های تجربی

طبقه‌بندی مهندسی سنگ پایه و اساس روابط تجربی را تشکیل داده و بطور وسیعی در مهندسی سنگ به‌کاربرده می‌شوند. بررسی کیفیت تودهٔ سنگ، از پارامترهای مهمی است که نقش اساسی در طراحی و ساخت یک سد ایفا می‌کند. طبقه‌بندی توده سنگ در مرحلهٔ طراحی مقدماتی استفاده می‌شود و ابزاری مناسب برای برآورد پایداری توده‌ای در هر سنگ و پیش‌بینی برخی خصوصیات رفتاری سنگ می‌باشد [۶].

الف - شاخص کیفی توده سنگ

شاخص کیفی سنگ (RQD) که در سال ۱۹۶۷ توسط دیر[1] تعریف شد به عنوان یک شاخص کمی برای اندازه‌گیری درجه شکستگی و درزه شدگی بکار می رود[۷].

1 - Deer

ب- طبقه‌بندی مهندسی توده سنگ به روش RMR

طبقه‌بندی ژئومکانیکی یا امتیاز توده سنگ (RMR) اولین بار در سال ۱۹۷۴ توسط بینیاوسکی[1] ارائه شد. این طبقه‌بندی از زمان ارائه تا کنون چند بار اصلاح‌شده و در سال ۱۹۸۹ میلادی، بنیاوسکی اصلاحات اساسی را روی آن انجام داد و امروزه این سیستم اصلاح‌شده (RMR_{89})، مرجع رده‌بندی بشمار می‌آید[۷]. در این سیستم پنج پارامتر در تعیین طبقه‌بندی توده سنگ موثر هستند که شامل مقاومت فشاری تک محوری ماده سنگ(UCS)، شاخص کیفی سنگ (RQD)، فاصله‌داری ناپیوستگی‌ها،شرایط ناپیوستگی‌ها و آب زیرزمینی می‌شوند. ضمن آنکه ، شرایط ناپیوستگی‌ها، خود شامل: گسترش، بازشدگی دهانه، زبری سطح، مواد پرکننده و هوازدگی می‌گردد [۹،۱۰].

ج- اندیس مقاومت زمین ساختی GSI

معیار هوک و براون[2] برای ارتباط دادن خصوصیات زمین‌شناسی با خصوصیات مقاومتی، از سیستم طبقه‌بندی RMR استفاده می‌نمود. درحالی‌که این سیستم برای سنگ‌های درزه دار کاربردی نداشت [۲].لذا هوک در سال ۱۹۹۴ یک سیستم طبقه‌بندی مبتنی بر مشاهدات زمین‌شناسی با نام اندیس زمین ساختی، GSI را معرفی کرد. GSIبرای تخمین میزان کاهش مقاومت توده سنگ در شرایط مختلف زمین‌شناسی استفاده می‌شود [۱۱].

این سیستم روشی برای برآورد کاهش مقاومت توده سنگ در شرایط مختلف زمین‌شناسی بوده که مقدار آن با مشاهدات صحرایی تعیین می‌گردد. ولی نقطه قوت این سیستم طبقه‌بندی، به عقیده کای و همکارانش(Cai et al., 2004)، رابطه مستقیم این سیستم با پارامترهای مقاومتی توده سنگ هست[۱۲]. در طی دهه گذشته اکثر روابط پارامترهای مقاومتی توده سنگ بر مبنای سیستم GSI نوشته شده است. این عوامل باعث شده که این سیستم به سرعت گسترش‌یافته و حتی از حالت توصیفی مطلق خارج شده است. از این سیستم طبقه‌بندی برای تعیین پارامترهای مقاومتی توده سنگ محل سد استفاده شده است [۱۳].

تاریخچه :

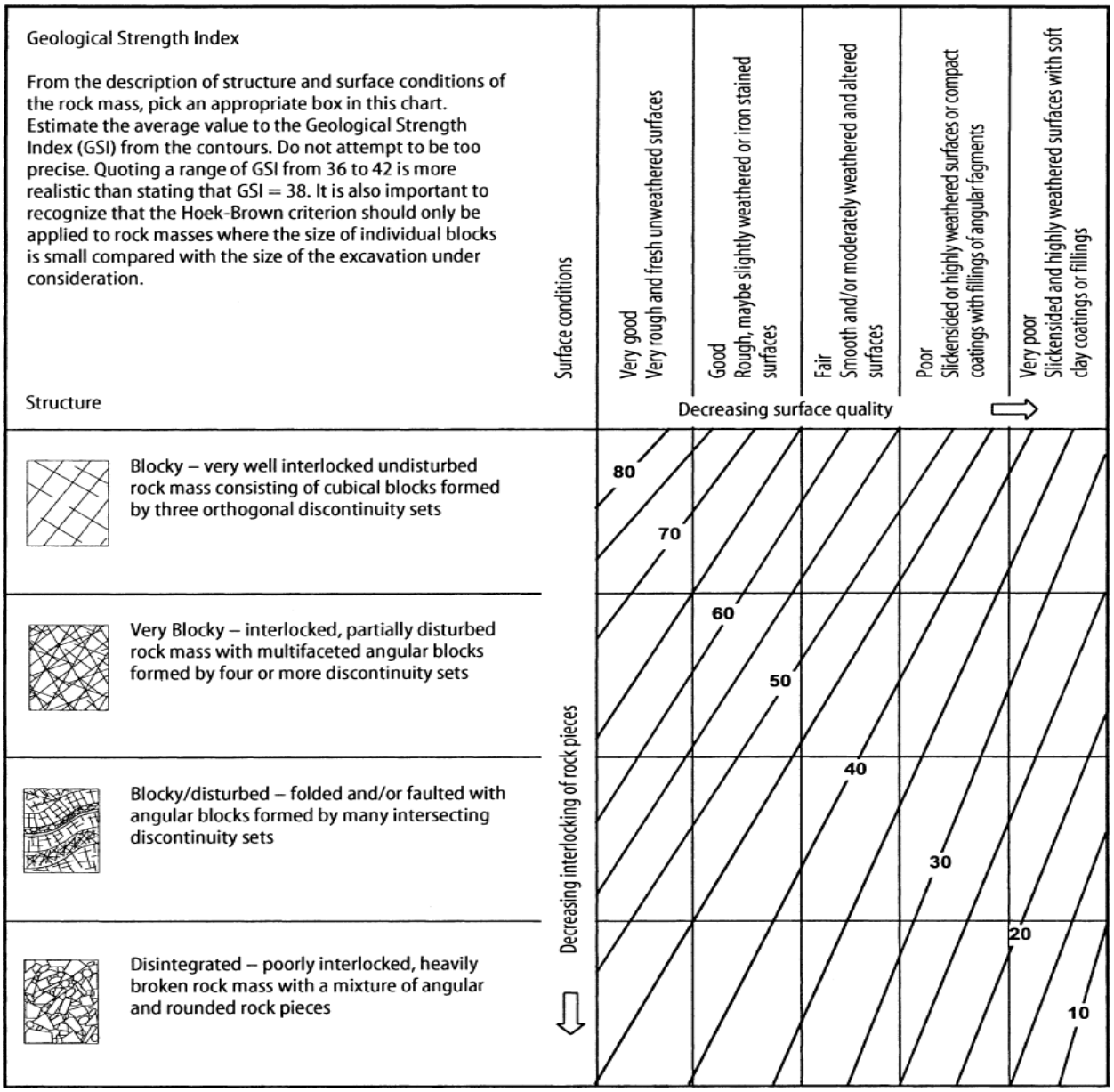
سال۱۹۹۴: در این سال هوک پارامتر GSI را به جای RMR در معیار خود استفاده کرد. مقدار GSI از طریق نمودار شماتیک ارائه‌شده انتخاب می‌شد. این نمودار بر اساس تعداد دسته درزه ها و ارتباط بین بلوک‌های تشکیل‌شده و شرایط سطح درزه ها و هوازدگی آن‌ها به ۲۰ محدوده تقسیم‌بندی شد. مقدار GSI در این نمودار در محدوده‌ای بین ۱۰ تا ۸۵ قرار می‌گرفت. شکل (۱-۱) نمودار شماتیکی است که هوک در این سال برای انتخاب GSI پیشنهاد کرد [۲].

سال ۱۹۹۸:در این سال با مطالعاتی که بر روی شیست ها در شهر آتن انجام گرفت، یک کلاس به نام توده سنگ «ورقه شده» و یک کلاس به نام «سنگ توده ای» به نمودار GSI اضافه شد [۲].

1 - Bieniawski
2 - Hoek & Brown

سال ۲۰۰۰ و ۲۰۰۱:هوک و مارینوس[1] در این سال خصوصیات جزئی زمین‌شناسی را در سیستم GSI وارد نمودند و تعیین مقدار GSI را برای سنگ‌های غیر همگن ضعیف بررسی نمودند و از این طریق یک جدول جدید برای GSI معرفی نمودند [۱].

سال ۲۰۰۵:هوک و مارینوس در این سال در مورد توده سنگ‌هایی که نسبت به هوازدگی حساسیت بالایی دارند بحث نمودند و دو نمودار GSI برای تونل‌ها و سازه‌های سطحی معرفی نمودند [۲].



شکل ۱-۱ نمودار شماتیک برای انتخاب مقدار GSI بر اساس مشاهدات زمین‌شناسی [۱۴].

1 - Hoek & Marinus

محاسبه GSI با استفاده از امتیاز ساختار (SR) و امتیاز سطح (SCR):

روشی که کای و همکارانش در سال ۲۰۰۴ پیشنهاد کردند و بر اساس حجم بلوک و شرایط درزه مقدار GSI را محاسبه می‌کرد، محدودیت‌هایی داشت که سونمز و همکارانش به آن‌ها اشاره نمودند. از جمله آن‌ها بلوک‌های مختلف با شکل‌های متفاوت می‌توانند حجم یکسان داشته باشند اما بلوکی که از تعداد سطوح بیشتری تشکیل شده باشد آسان‌تر تغییرشکل می‌دهد. از طرفی برای بعضی از کلاس‌های موجود در نمودار GSI کاربرد ندارد چون بیشتر از سه دسته درزه آن‌ها را قطع نموده است. هرچه تعداد صفحات تشکیل‌دهنده یک بلوک افزایش یابدکرویت آن نیز افزایش می‌یابد و در نتیجه مقاومت آن کم می‌شود [۱۴].

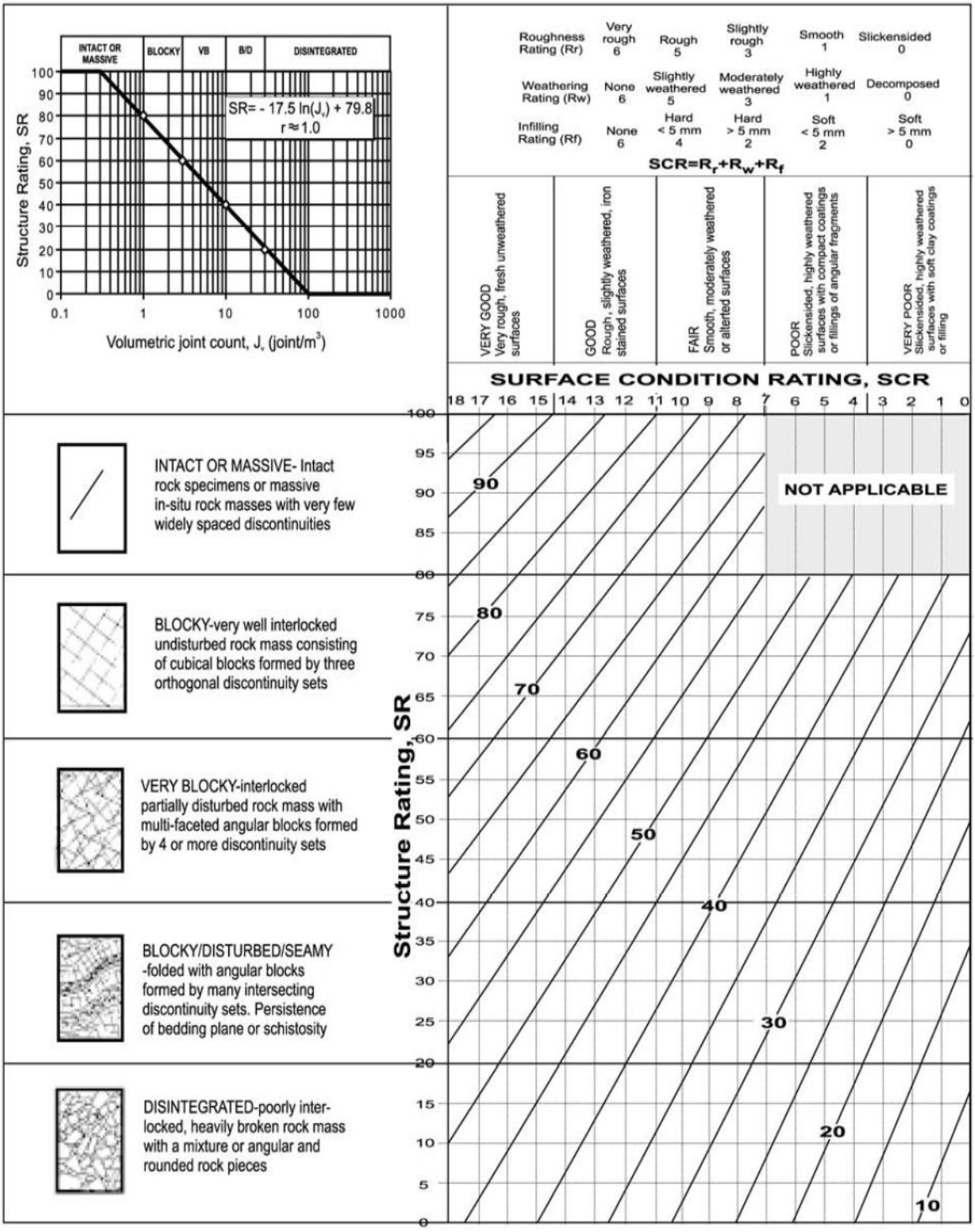
در روشی که سونمز و همکارانش پیشنهاد کردند با استفاده از پارامترهای عددی امتیاز ساختار (SR) و امتیاز شرایط سطح (SCR) می‌توان مقدار GSI را محاسبه نمود. امتیاز ساختار که مربوط به حضور درزه ها در توده سنگ است را می‌توان از رابطه تجربی که سونمز پیشنهاد کرد، بدست آورد [۱۴].

$$SR= -17.5\ln (J_v) +79.8 \qquad (۱-۱)$$

که در آن (J_v) ضریب حجم بلوک می‌باشد. امتیاز شرایط سطح (SCR) نیز از مجموع سه پارامتر طبق رابطه (۱-۲) بدست می‌آید.

$$SCR= R_r + R_w + R_f \qquad (۱-۲)$$

که در آن R_r امتیاز زبری سطح درزه، R_w امتیاز هوازدگی سطح درزه و R_f امتیاز پرشدگی درزه می‌باشد. امتیاز شرایط سطح عددی بین صفر تا ۱۸ می‌باشد. حدود مقادیر پارامترهای فوق در بالای نمودار GSI در شکل(۱-۲) آمده است. با معلوم بودن SCR و SR می‌توان مقدار GSI را بدست آورد [۱۴].



شکل ۲-۱ نمودار شماتیک برای انتخاب مقدار GSI بر اساس روش سونمز و همکارانش [۱۴].

ج- طبقه‌بندی DMR

طبقه‌بندی در واقع نوع سازگارشدهٔ RMR برای پی سدها است که در سال ۲۰۰۴ توسط رومانا[1] ارائه شده است. از آنجا که بعضی موارد، مانع استفاده موثر از طبقه‌بندی RMR برای پی سد می‌شود، رده‌بندی DMR سازگارسازی RMR برای راهنمایی در مورد بعضی جنبه‌های مهندسی سد می‌باشد و در مورد ارزیابی مقدماتی پی سنگ سد شامل پایداری در مقابل لغزش، مقدار عمق لازم برای حفاری شالوده، اهمیت نسبت مدول الاستیسیتهٔ پی سنگ نسبت به بدنه سد، اثر انیزوتروپی سنگ و اشباع شدن سنگ از آب کاربرد دارد [۱۵].

DMR با استفاده از معادله زیر محاسبه می‌شود:

$$DMR_{STA}=RMR_{BD}+CF*R_{STA} \qquad (۳-۱)$$

R_{STA} در این رابطه: فاکتور تعدیل برای پایداری سداست که از جدول زیر محاسبه می‌شود:

جدول۱-۱ نحوه بدست آوردن R_{STA} [۱۶].

نوع سد	VF خیلی مناسب	F مناسب	FA متوسط	U نامناسب	VU خیلی نامناسب
خاکی و سنگریزه‌ای	حالات دیگر	10-30 DS	0-10 A	-	-
بتنی وزنی	10-60 DS	30-60 US 60-90 A	10-30 US	0-10 A	-
بتنی قوسی	30-60 DS	10-30 DS	30-60 US 60-90 A	10-30 US	0-10 A
امتیاز R_{STA}	0	-2	-7	-15	-25

که در آن:

DS: شیب به سمت پایین‌دست

US: شیب به سمت بالادست

1 - Rommana

A: تنها شیب ناپیوستگی‌های اصلی توده سنگ (جهت آن مهم نیست) می‌باشد.

چون معمولاً درزه ها امتداد موازی محور سد ندارند, خطر لغزش در اثر هندسه درزه ها کم می‌شود که این حالت را می‌توان به وسیله فاکتور تصحیح هندسی (CF) طبق معادله زیر اصلاح کرد [۱۶].

$$CF=(1-Sin(\alpha_d-\alpha_j))^2 \longrightarrow (\alpha_d> \alpha_j) \quad (۴-۱)$$

$$CF=(1-Sin(\alpha_j-\alpha_d))^2 \longrightarrow (\alpha_d< \alpha_j) \quad (۵-۱)$$

α_d: جهت شیب بالادست و پایین دست بستر رودخانه در محل محور سد

α_j: جهت شیب درزهٔ اصلی موثر بر ناپایداری شالوده سد

در سال‌های اخیر روابط مختلفی جهت تخمین پارامترهای ژئومکانیکی توسط دانشمندانی همچون هوک، بنیاوسکی و ... ارائه شده است. تعدادی از این روابط که برای محاسبه مدول تغییرشکل پذیری ارائه شده‌اند عبارتند از :[۱۷]

$E_m= 2RMR - 100$ For RMR>50 (Bieniawski,1978) (۶-۱)

$Em = 10^{(\frac{RMR_10}{40})}$ برای RMR<50 (Serafim and Pereira, 1983) (۷-۱)

این روابط تا تحقیقاتی توسط هوک و دیدریچ در سال ۲۰۰۶ با استفاده از داده‌های چین و تایوان برای تخمین مدول تغییرشکل پذیری توده سنگ انجام شده است ادامه داشته است [۱۸].

$$Em(MPa) = 100000\left(\frac{1-\frac{D}{2}}{1+e^{(\frac{75+25D-GSI}{11})}}\right) \quad (۸-۱)$$

بنیاوسکی در سال ۱۹۸۹ روابط زیر را جهت محاسبه پارامترهای مقاومت برشی توده سنگ ارائه کرده است [۱۹]:

$$\emptyset = 0.5RMR + 5 \quad (۹-۱)$$

$$C= 0.05RMR \quad (۱۰-۱)$$

هوک و براون در سال ۱۹۹۴ رابطه (۱-۱۱) را جهت محاسبه مقاومت فشاری تک محوره توده سنگ ارائه کردند [۱۹]:

$$\frac{\sigma_{Cm}}{\sigma_{Ci}} = \sqrt{\exp((RMR - 100)/9)} \qquad (۱۱-۱)$$

۱-۳-۳ حفاری‌های اکتشافی (حفر گمانه‌ها و گالریهای اکتشافی)

اطلاعاتی که از گمانه‌های حفاری بدست می‌آید شامل توصیف لیتوژی موجود، کل طول مغزه بازیابی شده، شاخص کیفیت توده سنگ(RQD)، تداوم ناپیوستگی(درزه بر متر) و توصیف ناپیوستگی‌ها مانند شیب، بازشدگی، زبری سطح درزه و شرایط درزه [۲۰].

در گالریهای اکتشافی علاوه بر انجام آزمایش‌های برجای مکانیک سنگ ، حفر گمانه‌های دیلاتومتری، اندازه‌گیری‌های ژئوفیزیکی و برداشت اطلاعات ناپیوستگی‌ها نیز صورت گرفته است [۱۹].

۱-۳-٤ انجام آزمایش‌های آزمایشگاهی مکانیک سنگ

تنها معدودی از آزمایش‌های آزمایشگاهی را می‌توان مرتبط با کاوش‌های صحرایی به شمار آورد، زیرا رفتار توده سنگ بوسیله طبیعت ناپیوستگی‌ها و جهت آن‌ها کنترل می‌شود، حال آنکه نمونه‌هایی که به آزمایشگاه ارسال می‌شوند به طور عموم از مصالح مقاومتری هستند. با این وجود ، بنا به دو دلیل آزمایش‌های آزمایشگاهی روی نمونه های سنگ ضروری است. نخست آنکه ، رفتار قطعات کوچک مصالح سنگ می‌تواند نشانه‌هایی را از مسایل و مشکلاتی به دست دهد که در توده سنگ ساختگاه در مقیاس کامل احتمال وقوع دارند. در واقع، مصالح سنگ یک مدل کوچک مقیاس از توده سنگ به شمار می‌آید زیرا همان مراحل تاریخی زمین‌شناسی و تکتونیکی را طی کرده است، بنابراین آزمایش روی نمونه کوچکی از سنگ سالم نشانه‌ای مفید از شاخص شناسایی مفیدی را به دست می‌دهد که می‌تواند کمک بسیار ارزنده‌ای در ارزیابی مهندسی توده سنگ باشد. دومین دلیل برای آزمایش‌های آزمایشگاهی این است که عموماً اندازه‌گیری مقاومت مخصوص ناپیوستگی‌ها در برابر تغییرشکل ضروری است و بهترین محل برای انجام این کار آزمایشگاه است، مشروط بر آنکه نمونه‌های مناسبی تهیه گردد [۲،۱۹].

آزمایش‌های آزمایشگاهی مکانیک سنگ روی نمونه‌های حاصل از مغزه های حفاری گمانه‌های اکتشافی به منظور شناسایی خصوصیات رفتاری سنگ بکر انجام می‌گیرد. آزمایش‌ها شامل دو گروه شاخص و مقاومتی است ، آزمایش‌های شاخص شامل دانسیته ، تخلخل ، درصد رطوبت ، شاخص دوام، سرعت امواج و آزمایش‌های مقاومتی شامل مقاومت فشاری تک محوره،مقاومت برشی، مقاومت کششی غیرمستقیم و مقاومت فشاری محصور می‌باشند [۲].