

بِسْمِ اللَّهِ الرَّحْمَنِ الرَّحِيمِ



دانشکده مهندسی معدن، نفت و ژئوفیزیک

گروه مکانیک سنگ

پایان نامه کارشناسی ارشد

تعیین پارامترهای ژئومکانیکی و ظرفیت باربری مجاز پی‌های سنگی

مخازن سطحی نفت خام در جزیره خارک

سعید سلطانی محمدی

استاد راهنما :

دکتر شکراله زارع

استاد مشاور:

دکتر مجید نیکخواه

بهمن ۱۳۹۴

با ژرفترین سپاس ها :

تقدیم به...

عزیزانم

برای همه محبت ها و تشویق هایشان

تشکر و قدردانی

به رسم ادب و قدرشناسی، بر خود لازم می‌دانم از آقایان دکتر شکراله زارع، دکتر مجید نیکخواه و مهندس مهدی قنواتی نسب که صبورانه پشتیبان و راهنمای من بوده و در طول انجام این پروژه با راهنمایی‌های مفید و مساعدتهایشان مسیر را هموار نمودند، کمال تشکر و قدردانی را داشته باشم.

این تحقیق با همکاری "شرکت پایانه‌های نفتی ایران" انجام شده است. مولفان بر خود لازم می‌دانند مراتب تقدیر و تشکر خالصانه خود را از ریاست محترم پژوهش و توسعه شرکت پایانه‌های نفتی ایران جناب آقای مهندس حسنی و سایر همکاران ایشان اعلام نمایند.

تعهد نامه

اینجانب سعید سلطانی محمدی دانشجوی دوره کارشناسی ارشد رشته مهندسی معدن- مکانیک سنگ دانشکده مهندسی معدن، نفت و ژئوفیزیک دانشگاه صنعتی شاهرود نویسنده پایان نامه تعیین پارامترهای ژئومکانیکی و ظرفیت باربری مجاز پی‌های سنگی مخازن سطحی نفت خام در جزیره خارک تحت راهنمایی دکتر شکراله زارع متعهد می شوم.

- تحقیقات در این پایان نامه توسط اینجانب انجام شده است و از صحت و اصالت برخوردار است.
- در استفاده از نتایج پژوهشهای محققان دیگر به مرجع مورد استفاده استناد شده است.
- مطالب مندرج در پایان نامه تاکنون توسط خود یا فرد دیگری برای دریافت هیچ نوع مدرک یا امتیازی در هیچ جا ارائه نشده است.
- کلیه حقوق معنوی این اثر متعلق به دانشگاه صنعتی شاهرود می باشد و مقالات مستخرج با نام « دانشگاه صنعتی شاهرود » و یا « Shahrood University of Technology » به چاپ خواهد رسید.
- حقوق معنوی تمام افرادی که در به دست آمدن نتایج اصلی پایان نامه تأثیرگذار بوده اند در مقالات مستخرج از پایان نامه رعایت می گردد.
- در کلیه مراحل انجام این پایان نامه ، در مواردی که از موجود زنده (یا بافتهای آنها) استفاده شده است ضوابط و اصول اخلاقی رعایت شده است.
- در کلیه مراحل انجام این پایان نامه، در مواردی که به حوزه اطلاعات شخصی افراد دسترسی یافته یا استفاده شده است اصل رازداری ، ضوابط و اصول اخلاق انسانی رعایت شده است.

تاریخ

امضای دانشجو

مالکیت نتایج و حق نشر

- کلیه حقوق معنوی این اثر و محصولات آن (مقالات مستخرج، کتاب، برنامه های رایانه ای، نرم افزار ها و تجهیزات ساخته شده است) متعلق به دانشگاه صنعتی شاهرود می باشد. این مطلب باید به نحو مقتضی در تولیدات علمی مربوطه ذکر شود.
- استفاده از اطلاعات و نتایج موجود در پایان نامه بدون ذکر مرجع مجاز نمی باشد.

چکیده

در طراحی پی‌ها بر روی توده‌های سنگی، نیاز است که توده سنگ ساختگاه از جنبه‌های مختلف مورد بررسی قرار گیرد. یکی از این جنبه‌ها علاوه بر مساله نشست و ناپایداری، تعیین ظرفیت باربری پی سنگی است. پی‌های سنگی در مقایسه با پی‌های خاکی به دلیل ماهیت سنگی آن‌ها دارای مقاومت و صلبیت بیشتری بوده و به همین دلیل در مقابل بسیاری از بارهای وارده، باربری لازم را از خود نشان می‌دهند. اما عواملی از قبیل خردشدگی توده سنگ، وجود ناپیوستگی‌ها، هوازگی شدید، وجود حفرات کارستی، گسله‌داری و غیره موجب کاهش باربری آن‌ها می‌شود. با توجه به استقرار بسیاری از سازه‌ها بر روی پی‌های سنگی و مشکلات به وجود آمده در خصوص ناپایداری‌های مربوط به سازه‌های استقرار یافته بر روی پی‌های سنگی نامناسب، امروزه لزوم بررسی دقیق و جامع پی‌های سنگی و تخمین پارامترهای موثر در ظرفیت باربری آن‌ها از اهمیت فراوانی برخوردار است.

جزیره خارک یکی از مهم‌ترین پایانه‌های صادرات نفت ایران است. به منظور ذخیره‌سازی نفت خام، در مرتفع‌ترین نقطه جزیره خارک مخازن عظیمی با ظرفیت‌های متفاوت در زمینی به مساحت حدود ۱۲۰ هکتار احداث شده است. مخازن ذخیره‌سازی نفت به ویژه در مناطق بحران خیز، اهمیت فراوانی دارند. این مخازن نیاز به پی مناسب دارند که هم ظرفیت باربری کافی داشته و هم بتواند نشست را محدود کند. هرگونه ضعف در پی می‌تواند خسارت‌های جبران ناپذیری به وجود آورد.

در این پایان نامه پس از معرفی پی‌های سنگی و بررسی مکانیزم شکست در آن‌ها، روش‌های مختلف تعیین ظرفیت باربری شامل؛ استفاده از آیین‌نامه‌ها، روش‌های تجربی، روش‌های تحلیلی و روش عددی مورد بررسی قرار می‌گیرد. در ادامه ظرفیت باربری و نشست پی‌های سنگی مخازن ذخیره‌سازی نفت خام واقع در جزیره خارک توسط روش‌های مختلف تعیین می‌شود. در این ارتباط به منظور بررسی ناپیوستگی‌ها و عوامل ضعیف ساختاری از شاخص مقاومت زمین‌شناسی استفاده شده است. نتایج بررسی‌ها و مطالعات نشان می‌دهد که ناپیوستگی‌ها تاثیر زیادی در ظرفیت باربری

پی های سنگی دارد. ظرفیت باربری و نشست پی های جزیره خارک در حد مجاز بوده و برای ساخت مخازن مناسب است.

کلمات کلیدی: ظرفیت باربری- پی سنگی- روش های تجربی، تحلیلی و عددی

مقالات مستخرج از پایان نامه

سلطانی محمدی س، زارع ش و نیکخواه م، (تیر ۱۳۹۴)، "بررسی روش‌های تجربی و تحلیلی تعیین ظرفیت باربری پی‌های سنگی"، همایش بین‌المللی معماری، عمران و شهرسازی در هزاره سوم، تهران.

فهرست مطالب

عنوان	صفحه
۱- فصل اول: کلیات	۱
۱-۱- مقدمه	۲
۲-۱- مشخصات عمومی پروژه	۳
۳-۱- ضرورت انجام تحقیق	۵
۴-۱- سابقه پروژه‌های انجام شده	۶
۵-۱- اهداف پایان نامه	۹
۶-۱- روش انجام تحقیق	۱۰
۷-۱- ساختار پایان نامه	۱۰
۲- فصل دوم: ظرفیت باربری پی‌های سنگی	۱۳
۱-۲- مقدمه	۱۴
۲-۲- تعریف پی	۱۴
۳-۲- انواع پی	۱۵
۴-۲- پی‌های سنگی	۱۸
۵-۲- انواع سطح سنگ بستر	۱۹
۶-۲- حالت‌های شکست پی‌های سنگی	۲۱
۷-۲- انواع پی‌های سنگی	۲۳
۱-۷-۲- پی گسترده (پی مستقیم روی سنگ)	۲۳
۲-۷-۲- پایه فرو شده در سنگ	۲۴
۳-۷-۲- شمع‌ها	۲۵
۴-۷-۲- پی‌های کششی	۲۵
۸-۲- ظرفیت باربری پی‌های سنگی	۲۶

- ۲۸-۸-۱- تعیین ظرفیت باربری با استفاده از آیین نامه‌های ساختمانی.....
- ۳۰-۸-۲- تعیین ظرفیت باربری با استفاده از روابط تجربی و نیمه تجربی.....
- ۳۱-۸-۳- تعیین ظرفیت باربری سنگ شکسته (ترک‌دار).....
- ۳۵-۸-۴- تعیین ظرفیت باربری پی‌های مدفون (فرو رفته در سنگ).....
- ۳۶-۸-۵- تعیین ظرفیت باربری سنگ‌های ضعیف.....
- ۳۸-۸-۶- تعیین ظرفیت باربری پی‌های شیب‌دار.....
- ۴۰-۸-۷- تعیین ظرفیت باربری توده سنگ‌های حاوی دسته ناپیوستگی.....
- ۴۱-۸-۸- تعیین ظرفیت باربری سنگ‌های لایه‌ای.....
- ۴۴-۸-۹- ظرفیت باربری تشکیلات کارستی.....
- ۴۴-۸-۹-۱- مکانیزم انحلال.....
- ۴۸-۸-۹-۲- شناسایی حفرات کارستی.....
- ۴۹-۸-۹-۳- انواع پی در محیط‌های کارستی.....
- ۵۰-۸-۱۰- تعیین ظرفیت باربری با استفاده از روش سرانو و اولالا.....
- ۵۰-۸-۱۰-۱- قابلیت کاربرد روش.....
- ۵۱-۸-۱۰-۲- ظرفیت باربری نهایی براساس معیار اولیه هوک و براون (۱۹۹۴).....
- ۵۵-۸-۱۰-۳- ظرفیت باربری نهایی براساس معیار اصلاح شده هوک و براون (۲۰۰۰).....
- ۵۷-۸-۱۰-۴- ظرفیت باربری مجاز براساس روش سرانو و اولالا.....
- ۵۸-۸-۱۰-۵- ظرفیت باربری نهایی با در نظر گرفتن اثر وزن توده سنگ.....
- ۵۹-۸-۱۱- تعیین ظرفیت باربری با استفاده از روش کولهاوی و کارتر.....
- ۶۰-۸-۱۲- تعیین ظرفیت باربری با استفاده از روش عددی.....
- ۶۱-۲-۹- نتیجه گیری.....
- ۶۳-۳- فصل سوم: نشست و توزیع تنش در پی‌های سنگی.....
- ۶۴-۳-۱- مقدمه.....
- ۶۴-۳-۲- نشست در پی‌های سنگی.....

۶۵	۳-۲-۱- محاسبه نشست الاستیک سنگ
۶۷	۳-۲-۱-۱- سنگ‌های همگن و همسانگرد
۶۷	۳-۲-۱-۲- سنگ‌های لایه‌ای
۷۱	۳-۲-۱-۳- سنگ‌های همسانگرد عرضی
۷۴	۳-۲-۲- نشست غیرالاستیک سنگ
۷۴	۳-۳- توزیع تنش در سنگ
۷۵	۳-۱-۳- سنگ ایزوتروپ
۷۶	۳-۱-۱- بارهای توزیع شده و گسترده
۷۶	۳-۱-۲- بارهای خطی
۷۷	۳-۲- توزیع تنش در تشکیلات لایه‌ای
۷۸	۳-۴- نتیجه گیری
۷۹	۴- فصل چهارم: تعیین پارامترهای ژئومکانیکی ساختگاه مخازن نفت خام
۸۰	۴-۱- مقدمه
۸۰	۴-۲- جزیره خارک
۸۱	۴-۲-۱- زمین شناسی منطقه
۸۱	۴-۲-۱-۱- سنگ آهک مرجانی
۸۲	۴-۲-۱-۲- سازند آغاچاری
۸۳	۴-۲-۱-۳- رسوبات عهد حاضر جزیره خارک
۸۴	۴-۳- زمین شناسی ساختگاه مخازن
۸۴	۴-۱-۳- پروژه مخازن ذخیره سازی نفت خام جزیره خارک
۸۷	۴-۳-۲- پروژه مخازن یکصد هزار بشکه‌ای ذخیره سوخت در جزیره خارک
۸۹	۴-۳-۳- مطالعات میدانی در محدوده ساختگاه مخازن
۹۱	۴-۴- آشنایی با شرایط پروژه
۹۴	۴-۵- تعیین پارامترهای ژئومکانیکی ساختگاه مخازن

۴-۶- نتیجه گیری	۱۰۰
۵- فصل پنجم: تعیین ظرفیت باربری و نشست پی‌های سنگی در جزیره خارک.....	۱۰۱
۵-۱- مقدمه.....	۱۰۲
۵-۲- تعیین ظرفیت باربری پی مخازن ذخیره سازی نفت خام	۱۰۲
۵-۲-۱- تعیین ظرفیت باربری پی با استفاده از روش‌های تجربی.....	۱۰۳
۵-۲-۲- تعیین ظرفیت باربری پی با استفاده از روش‌های تحلیلی.....	۱۰۴
۵-۲-۳- تعیین ظرفیت باربری پی با استفاده از روش عددی.....	۱۰۸
۵-۳-۲-۱- روش تفاضل محدود.....	۱۰۸
۵-۳-۲-۲- مراحل حل مسئله در $FLAC^{3D}$	۱۰۹
۵-۳-۲-۳- هندسه سازی.....	۱۱۰
۵-۳-۲-۴- انتخاب مدل رفتاری و تعیین خصوصیات ماده.....	۱۱۱
۵-۳-۲-۵- شرایط مرزی و اولیه.....	۱۱۲
۵-۳-۲-۶- بارگذاری پی در مدل تفاضل محدود.....	۱۱۲
۵-۳-۲-۷- بررسی ظرفیت باربری پی مخازن در حالت خاص.....	۱۱۷
۵-۳- تعیین نشست پی مخازن ذخیره سازی.....	۱۱۹
۵-۳-۱- تعیین نشست با استفاده از روش تحلیلی.....	۱۱۹
۵-۳-۲- تعیین نشست با استفاده از روش عددی.....	۱۲۰
۵-۴- بررسی ظرفیت باربری و نشست پی مخازن ذخیره سازی نفت خام.....	۱۲۲
۵-۵- مطالعات پارامتری و تحلیل حساسیت.....	۱۲۵
۵-۵-۱- مطالعات پارامتری.....	۱۲۵
۵-۵-۱-۱- شاخص مقاومت زمین شناسی (GSI).....	۱۲۵
۵-۵-۱-۲- مقاومت فشاری تک محوره.....	۱۲۹
۵-۵-۱-۳- وزن مخصوص توده سنگ.....	۱۳۰
۵-۵-۱-۴- زاویه اصطکاک داخلی.....	۱۳۳

۱۳۴	۵-۵-۲- تحلیل حساسیت
۱۳۴	۵-۵-۲-۱- فاصله مخازن ذخیره سازی
۱۳۶	۵-۵-۲-۲- عمق لایه سنگ آهک
۱۳۷	۵-۵-۲-۳- عمق لایه خاک
۱۳۸	۵-۶- نتیجه گیری
۱۳۹	۶- فصل ششم: نتیجه گیری و پیشنهادات
۱۴۰	۶-۱- مقدمه
۱۴۰	۶-۲- نتایج تحقیق
۱۴۳	۶-۳- پیشنهادات
۱۴۴	فهرست منابع

فهرست اشکال

عنوان	صفحه
شکل ۱-۱- تصویر ماهواره‌ای جزیره خارک	۴
شکل ۱-۲- تعریف شماتیک پی	۱۵
شکل ۲-۲- انواع پی از نظر عمق	۱۶
شکل ۳-۲- پی منفرد نوعی پی سطحی	۱۶
شکل ۴-۲- انواع پی‌های سطحی	۱۸
شکل ۵-۲- انواع سطح سنگ بستر	۲۰
شکل ۶-۲- حالت‌های شکست پی‌های سنگی	۲۲
شکل ۷-۲- انواع پی‌های سنگی	۲۴
شکل ۸-۲- شالوده قرار گرفته روی سنگ	۳۲
شکل ۹-۲- تحلیل ظرفیت باربری سنگ شکسته	۳۴
شکل ۱۰-۲- ضرایب ظرفیت باربری برای پی‌های واقع بر سطح افقی	۳۷
شکل ۱۱-۲- مقادیر ضرایب ظرفیت باربری پی واقع بر سطح شیب‌دار	۳۹
شکل ۱۲-۲- ظرفیت باربری پی احداث شده روی سنگ حاوی دو دسته ناپیوستگی	۴۰
شکل ۱۳-۲- احداث پی گسترده روی لایه‌های سنگی (لایه فوقانی صلب و لایه تحتانی ضعیف‌تر است)	۴۳
شکل ۱۴-۲- مراحل تشکیل فروچاله‌ها	۴۷
شکل ۱۵-۲- انواع پی‌های سطحی و بهبود یافته در محیط کارستی	۴۹
شکل ۱۶-۲- پی عمیق در تشکیلات کارستی	۵۰
شکل ۱۷-۲- تاثیر مقیاس بر انتخاب مدل رفتار توده سنگ در طراحی پی‌های کم عمق واقع بر شیب‌های سنگی	۵۱

- شکل ۲-۱۸- شبکه مشخصه در زیر پی ۵۳
- شکل ۲-۱۹- مقدار ضریب بار (N_{β}) برحسب مقدار بار خارجی نرمالیزه شده وارد بر مرز ۱ و بار مورب اعمال شده روی مرز ۲ (برای زمین افقی)..... ۵۴
- شکل ۲-۲۰- ضریب ایمنی موضعی (Fp) پیشنهاد شده ۵۹
- شکل ۲-۲۱- راه حل حد پایین برای ظرفیت باربری پی‌های سنگی ۶۰
- شکل ۳-۱- روش‌های محاسبه نشست پی برای شرایط مختلف زمین شناسی ۶۶
- شکل ۳-۲- مدل یک توده سنگ ترک دار به سه دسته درزه عمود بر هم برای تعیین میزان نشست شالوده دایره‌ای در اثر بار عمودی ۷۳
- شکل ۳-۳- تنش‌ها در یک نیم فضای الاستیک از یک بار نقطه‌ای در سطح ۷۶
- شکل ۳-۴- کنترل‌های تنش برای پی‌های واقع بر نیم فضای الاستیک خطی ایزوتروپ ۷۷
- شکل ۴-۱- موقعیت گمانه‌ها در سایت و شیب موجود در منطقه ۸۴
- شکل ۴-۲- نمای قبل از تعیین مقاومت فشاری نمونه های سنگ اخذ شده از جزیره خارک ۸۶
- شکل ۴-۳- نمایی از ترانشه‌ها و دیواره‌های به جا مانده در محوطه مخازن خارک ۸۹
- شکل ۴-۴- وضعیت ناپیوستگی‌ها و توالی لایه‌ها در محوطه مخازن خارک ۸۹
- شکل ۴-۵- نمایی از محوطه مخازن ذخیره سازی نفت خام در جزیره خارک ۹۲
- شکل ۴-۶- تصویر پی نواری مخازن ذخیره سازی ۹۴
- شکل ۴-۷- نمونه‌ای از مغزه‌های به دست آمده از اعماق مختلف حفاری ۹۵
- شکل ۴-۸- نمودارهای تنش برشی-تنش نرمال و تنش اصلی حداقل-تنش اصلی حداکثر برای سنگ آهک مرجانی ۹۹
- شکل ۴-۹- نمودارهای تنش برشی-تنش نرمال و تنش اصلی حداقل-تنش اصلی حداکثر برای سنگ مارن ۹۹
- شکل ۵-۱- ظرفیت باربری نهایی توده سنگ بی وزن با استفاده از روش سرانو و اولالا ۱۰۶

- شکل ۵-۲- مدل هندسی و مش بندی ایجاد شده در نرم افزار $FLAC^{3D}$ ۱۱۱
- شکل ۵-۳- شرایط مرزی برای یک چهارم از مدل در آنالیز $FLAC^{3D}$ ۱۱۳
- شکل ۵-۴- نمودار تعیین ظرفیت باربری پی مخازن ذخیره سازی در مدل موهر-کولمب ۱۱۴
- شکل ۵-۵- نمودار تعیین ظرفیت باربری پی مخازن ذخیره سازی در مدل هوک-براون ۱۱۴
- شکل ۵-۶- تغییرات نیروی نامتعادل پس از بارگذاری در مدل موهر-کولمب ۱۱۶
- شکل ۵-۷- کنتورهای جابجایی پی مخازن در زمان ظرفیت باربری نهایی در مدل هوک-براون .. ۱۱۶
- شکل ۵-۸- کنتورهای میدان سرعت و بردار سرعت پی پس از بارگذاری در مدل موهر-کولمب .. ۱۱۷
- شکل ۵-۹- نمودار تعیین ظرفیت باربری در صورت وجود یک لایه ۳ متری خاک ۱۱۸
- شکل ۵-۱۰- کنتورهای نشست پی مخازن ذخیره سازی در مدل موهر-کولمب ۱۲۱
- شکل ۵-۱۱- کنتورهای نشست پی در صفحه ای قائم به فاصله ۴۰ متری از مرکز مخزن در مدل موهر-کولمب ۱۲۱
- شکل ۵-۱۲- جابجایی نقاط زیر پی مخازن پس از بارگذاری در مدل موهر-کولمب ۱۲۲
- شکل ۵-۱۳- جابجایی نقاط زیر پی مخازن پس از بارگذاری در مدل هوک-براون ۱۲۲
- شکل ۵-۱۴- ظرفیت باربری مجاز پی مخازن حاصل از روش‌های مختلف برای سنگ آهک بی وزن ۱۲۴
- شکل ۵-۱۵- ظرفیت باربری نهایی پی مخازن حاصل از روش‌های مختلف برای سنگ آهک وزن دار ۱۲۴
- شکل ۵-۱۶- ظرفیت باربری مجاز سنگ آهک مرجانی حاصل از مدل سازی عددی براساس تغییرات GSI با در نظر گرفتن وزن سنگ ۱۲۶
- شکل ۵-۱۷- مقایسه ظرفیت باربری نهایی سنگ آهک مرجانی با استفاده از روش های مختلف بدون در نظر گرفتن وزن توده سنگ ۱۲۷
- شکل ۵-۱۸- مقایسه ظرفیت باربری مجاز سنگ آهک مرجانی با استفاده از روش های مختلف بدون

- در نظر گرفتن وزن توده سنگ ۱۲۷
- شکل ۵-۱۹- فاکتور ظرفیت باربری توده سنگ بی وزن حاصل مدل سازی عددی برای مقادیر مختلف
GSI ۱۲۸
- شکل ۵-۲۰- نشست پی مخازن نسبت به تغییرات GSI با استفاده از مدل سازی عددی ۱۲۹
- شکل ۵-۲۱- ظرفیت باربری نهایی حاصل از مدل سازی عددی نسبت به تغییرات مقاومت فشاری تک
محوری سنگ آهک مرجانی ۱۳۰
- شکل ۵-۲۲- تغییرات ظرفیت باربری نهایی مدل سازی عددی براساس وزن مخصوص سنگ آهک
مرجانی ۱۳۱
- شکل ۵-۲۳- تغییرات فاکتور ظرفیت باربری پی مخازن با استفاده از مدل سازی عددی برای $GSI=10$
..... ۱۳۲
- شکل ۵-۲۴- تغییرات فاکتور ظرفیت باربری پی مخازن با استفاده از مدل سازی عددی برای $GSI=30$
..... ۱۳۲
- شکل ۵-۲۵- تغییرات فاکتور ظرفیت باربری پی مخازن با استفاده از مدل سازی عددی برای $GSI=50$
..... ۱۳۳
- شکل ۵-۲۶- تغییرات فاکتور ظرفیت باربری پی مخازن با استفاده از مدل سازی عددی برای $GSI=80$
..... ۱۳۳
- شکل ۵-۲۷- تغییرات ظرفیت باربری نهایی پی نسبت به تغییر زاویه اصطکاک داخلی سنگ آهک
مرجانی ۱۳۴
- شکل ۵-۲۸- مدل هندسی و کنتورهای میدان سرعت پی پس از بارگذاری برای دو مخزن با فاصله
۵۰ متر ۱۳۵
- شکل ۵-۲۹- تاثیر فاصله مخازن بر روی ظرفیت باربری نهایی پی با استفاده از مدل سازی عددی ۱۳۶
- شکل ۵-۳۰- تغییرات ظرفیت باربری نهایی پی نسبت به تغییرات عمق سنگ آهک با در نظر گرفتن

وزن سنگ با استفاده از مدل سازی عددی ۱۳۷

شکل ۵-۳۱- تغییرات ظرفیت باربری نهایی پی نسبت به تغییر عمق خاک با در نظر گرفتن وزن

سنگ در مدل موهر-کولمب ۱۳۷

فهرست جداول

عنوان	صفحه
جدول ۱-۲- مقادیر حداقل ضریب ایمنی	۲۸
جدول ۲-۲- ظرفیت باربری مجاز برای سنگ‌های تازه طبق آیین نامه‌های ساختمانی.....	۲۹
جدول ۳-۲- روابط تجربی تخمین ظرفیت باربری	۳۰
جدول ۴-۲- ضرایب تصحیح شکل پی (L طول و B عرض پی).....	۳۵
جدول ۵-۲- مقادیر ضریب $N\beta$ برای مقادیر مختلف توان n در یک زمین افقی با بارهای خارجی قائم	۵۷
جدول ۱-۳- ضریب شکل برای محاسبه نشست در حالت بارگذاری روی نیم فضای الاستیک.....	۶۸
جدول ۲-۳- مقادیر ضریب شکل (G_d') برای محاسبه میزان نشست در مرکز بارگسترده یکنواخت..	۶۹
جدول ۳-۳- ضریب تصحیح نشست الاستیک غیر یکنواخت.....	۷۰
جدول ۱-۴- مقاومت فشاری سنگ آهک مرجانی	۸۸
جدول ۲-۴- میانگین مشخصات ژئوتکنیکی پروژه احداث دو دستگاه مخزن یکصد هزار بشکه‌ای... ۸۸	
جدول ۳-۴- نتایج حاصل از آزمایش چکش اشمیت برای سنگ آهک مرجانی	۹۰
جدول ۴-۴- خصوصیات بتن مورد استفاده برای پی مخازن ذخیره سازی نفت خام در جزیره خارک	۹۱
جدول ۵-۴- مشخصات یک مخزن ذخیره سازی نفت خام.....	۹۳
جدول ۶-۴- پارامترهای ژئومکانیکی پی‌های سنگی مخازن ذخیره سازی نفت خام.....	۹۶
جدول ۷-۴- نمودار عمومی تخمین GSI با توجه به مشاهدات زمین شناسی	۹۷
جدول ۸-۴- پارامترهای ژئومکانیکی توده سنگ‌های ساختگاه مخازن.....	۹۸
جدول ۱-۵- ظرفیت باربری پی مخازن ذخیره سازی با استفاده از روش‌های تجربی.....	۱۰۳
جدول ۲-۵- مقادیر پارامترهای مورد استفاده در روش بل	۱۰۴

- جدول ۳-۵- مقادیر پارامترهای مورد استفاده در روش هوک-براون ۱۰۴
- جدول ۴-۵- مقادیر پارامترهای مورد استفاده در روش کولهاوی-کارتر ۱۰۵
- جدول ۵-۵- مقادیر پارامترها و ظرفیت باربری توده سنگ بی وزن در روش سرانو و اولالا ۱۹۹۴. ۱۰۵
- جدول ۶-۵- ادامه جدول قبل: مقادیر پارامترها و ظرفیت باربری توده سنگ بی وزن در روش سرانو و اولالا ۱۹۹۴ ۱۰۵
- جدول ۷-۵- مقادیر پارامترها و ظرفیت باربری توده سنگ بی وزن در روش سرانو و اولالا ۲۰۰۰ ۱۰۶
- جدول ۸-۵- ادامه جدول قبل: مقادیر پارامترها و ظرفیت باربری توده سنگ بی وزن در روش سرانو و اولالا ۲۰۰۰ ۱۰۶
- جدول ۹-۵- ظرفیت باربری نهایی پی مخازن با استفاده از روش‌های تحلیلی ۱۰۷
- جدول ۱۰-۵- ظرفیت باربری مجاز پی مخازن با استفاده از روش‌های تحلیلی ۱۰۷
- جدول ۱۱-۵- ظرفیت باربری پی مخازن ذخیره سازی نفت خام بدست آمده از تحلیل عددی ۱۱۵
- جدول ۱۲-۵- خصوصیات خاک مورد استفاده در زیر مخازن ذخیره سازی نفت خام ۱۱۸
- جدول ۱۳-۵- مقادیر پارامترها و نشست پی مخازن با استفاده از روش تحلیلی ۱۱۹

فهرست علائم و اختصارات:

A	مساحت سطح پی (m^2)	m	پارامتر هوک براون
B	عرض (قطر پی) (m)	$N\sigma$	فاکتور ظرفیت باربری
C_d	ضریب شکل پی	n	پارامتر هوک براون
C	چسبندگی توده سنگ (MPa)	q	بار اعمال شده بر پی (MPa)
CR	درصد بازیابی مغزه	q_a	ظرفیت باربری مجاز (MPa)
D	عمق پی (m)	q_u	ظرفیت باربری نهایی (MPa)
E	مدول الاستیسیته (MPa)	RQD	شاخص کیفی سنگ
FS	ضریب ایمنی	RMR	شاخص توده سنگ
F_p	ضریب ایمنی موضعی پارامترها	S	پارامتر هوک براون
F_m	ضریب ایمنی احتمال شکست پی	σ_c	مقاومت فشاری تک محوره (MPa)
GSI	شاخص مقاومت زمین شناسی	σ_1	تنش اصلی حداکثر (MPa)
Hs	شاخص میانگین سختی اشمیت	σ_3	تنش اصلی حداقل (MPa)
H	ضخامت لایه (m)	$\emptyset$	زاویه اصطکاک داخلی (Deg)
I	اینوریانت ریمن	γ	وزن مخصوص توده سنگ (gr/cm^3)
L	طول پی (m)	ν	ضریب پواسون
MR	نسبت مدولی	δ_v	نشست پی (Cm)

۱- فصل اول

کلیات

ایران به عنوان یکی از بزرگترین دارندگان ذخایر قطعی نفت خام، از موقعیت ممتاز استراتژیک و تاثیرگذاری به لحاظ تامین امنیت انرژی جهان برخوردار است. کوشش برای افزایش ذخایر در دسترس و حفظ ثبات تولید و تاثیرگذاری بیشتر در تعادل سطح عرضه و تقاضا می تواند ایران را در رده قوی ترین قطب نفتی خاورمیانه و یکی از سه کشور برتر تولید کننده نفت جهان قرار دهد. علاوه بر این، ثبات تولید و کاهش آسیب پذیری بازارهای داخلی و میزان صادرات، نیازمند برنامه مدرن تولید و نیز ذخیره سازی مقدار قابل توجهی نفت و فرآورده های نفتی برای مواقع مورد نیاز و ضروری است.

تاسیسات ذخیره سازی نفت و فرآورده های نفتی به ویژه در مناطق بحران خیز، اهمیت فراوانی دارند و نقش آن ها در عرضه یکنواخت، تامین نیازهای داخلی و صادرات، انکارناپذیر است. مخازن ذخیره سازی به صورت وسیع در بسیاری از صنایع به خصوص در صنایع پالایش، نفت و پتروشیمی به منظور نگهداری محصولات مختلف نفتی به کار می روند. مساله ی ظرفیت باربری پی ها یکی از مهم ترین ملاحظات طراحی سازه های مهندسی است. مخازن عظیم ذخیره سازی نیاز به پی مناسب دارند، که هم ظرفیت باربری کافی داشته و هم بتواند نشست را محدود کند. هرگونه ضعف در پی می تواند خسارت های جبران ناپذیری به وجود آورد.

از جمله گزینه های محتمل برای پی سازه های عظیم می توان به پی های واقع بر روی توده های سنگی اشاره کرد. یکی از شرایط عملکرد صحیح پی ها، تحمل بار وارده از سازه بر روی پی است یا به عبارت دیگر ظرفیت باربری پی پاسخگوی بار تحمیلی باشد. ظرفیت باربری پی سازه های بنا شده روی توده های سنگی نظیر سدها، پل ها و سازه های عظیم از اهمیت و جذابیت قابل توجهی برای مهندسين ژئوتکنیک برخوردار است. تعیین ظرفیت باربری پی ها از مسائل مهمی بوده که از دیرباز مورد توجه مهندسين ژئوتکنیک قرار گرفته و بنا به اهمیت آن روابط متعددی توسط محققین مختلف ارائه شده است. در هرکدام از این روابط عوامل مختلفی از جمله درزه ها و ناپیوستگی ها، چسبندگی

و اصطکاک داخلی توده سنگ، شاخص‌های طبقه بندی سنگ ها و غیره در نظر گرفته شده است. به طوری که تحت شرایط کاملاً برابر برای خصوصیات طبیعی و هندسه توده سنگ، نتایج محاسبه مقدار ظرفیت باربری برای پی از روش های مختلف یکسان نخواهد بود.

در مقایسه با خاک‌ها، اغلب سنگ ها مقاوم‌تر هستند و ظرفیت باربری بیشتری دارند و بار وارده از سازه بر سنگ معمولاً از نظر باربری مشکلی ایجاد نمی کند. با این وجود، بار سازه های بزرگ همانند سدها، آسمانخراش ها، مخازن عظیم سطحی یا پایه پل ها می توانند در موارد بحرانی و حساس مانند زلزله برای ظرفیت باربری سنگ های نسبتاً مقاوم مشکل زا باشند. در طبیعت اکثر توده‌سنگ ها دارای درزه و گسل می باشند. در صورتی که سنگ درزه دار و یا هوازده باشد دچار تغییر شکل‌های بیشتری می شود و در این حالت ظرفیت باربری نسبت به حالت بکر و سالم آن متفاوت می‌باشد. در نتیجه در طراحی پی‌های واقع بر روی بستر سنگی باید تمام پارامترهای ساختاری توده‌سنگ و شرایط محیطی را بررسی کرد [۱].

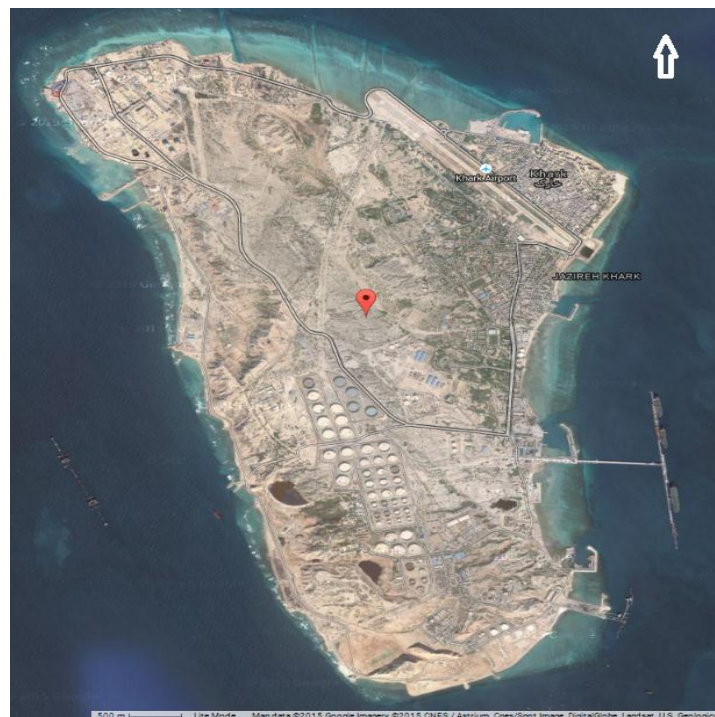
در این پایان نامه ظرفیت باربری و نشست پی مخازن ذخیره سازی نفت خام در جزیره خارک با استفاده از روش های تجربی، تحلیلی و عددی مورد بررسی قرار می گیرد و با استفاده از معیارهای موجود، پی ساختگاه مخازن از نظر نشست و توانایی تحمل بار ناشی از وزن مخازن نفت خام ارزیابی می شود. با بررسی سوابق پروژه های اجرا شده در منطقه و بررسی های میدانی صورت گرفته از محدوده مخازن ذخیره سازی در جزیره خارک با به کارگیری روابط موجود، پارامترهای ژئومکانیکی ساختگاه مخازن تعیین شده است. به منظور بررسی ناپیوستگی ها در توده سنگ از شاخص مقاومت زمین شناسی استفاده می شود و تحلیل های مختلفی با آن انجام می گیرد. در پایان نیز مطالعات پارامتری و تحلیل حساسیت پارامترهای طراحی انجام شده است.

۲-۱- مشخصات عمومی پروژه

جزیره خارک در جنوب غربی ایران و در استان بوشهر بزرگترین پایانه صادرات نفت کشور است.

این جزیره در حدود یک میلیون سال پیش در اثر حرکات و فشارهای تحت الارضی و درونی زمین به وجود آمده و حرکت طبقات مرجانی در سطح آن از چهارده هزار سال پیش تاکنون این جزیره را در پهنه‌ی خلیج فارس نمودار ساخته است. از نظر موقعیت جغرافیایی در ۲۹ درجه و ۱۵ دقیقه و ۲۵ ثانیه عرض شمالی و ۵۰ درجه و ۲۰ دقیقه و ۳۰ ثانیه طول شرقی قرار دارد [۲].

در چرخه تولید نفت خام بخصوص از میادین بزرگ نفتی برای تثبیت شرایط عملیاتی تولید و جلوگیری از نوسانات رسید و ارسال در کلیه مراحل عملیاتی مخازن ذخیره سازی نفت خام نصب و تعبیه می شوند. علاوه بر مخازن ذخیره عملیاتی، مخازن زیرزمینی نیز به عنوان مخازن ذخیره استراتژیک برای استمرار جریان نفت در شرایط اضطراری احداث می شوند.



شکل ۱-۱- تصویر ماهواره‌ای جزیره خارک [۴]

نفت خام تولیدی ایران توسط خطوط لوله به جزیره خارک وارد می شود. این خطوط، نفت خام سبک و سنگین ایران را به مخازن هدایت می کنند. به منظور ذخیره سازی نفت خام، در مرتفع ترین نقطه جزیره خارک مخازن عظیمی با ظرفیت های متفاوت احداث شده که علاوه بر ایجاد امکان مانور

عملیاتی در مواقع بحرانی که شرایط جوی برای پهلویی نفتکش های دریایی مساعد نیست و یا نفتکش در لنگرگاه حاضر نمی باشد امکان ذخیره سازی نفت خام را بدون وقفه در عملیات تولید نفت خام امکان پذیر می نماید. این مخازن که در مرتفع ترین نقطه خارک از سطح دریا قرار گرفته اند این امکان را می دهد که نفت خام با نیروی ثقل خود به سمت لنگرگاه ها هدایت شود. این مخازن از نوع فلزی و روزمینی بوده و از نوع سقف شناور و بعضا دوجداره می باشند [۳].

۱-۳- ضرورت انجام تحقیق

نفت و فرآورده های آن کالاهای استراتژیک به شمار می آیند و تولید و عرضه ی آن ها طبق برنامه ریزی های انجام شده، اهمیتی حیاتی در اقتصاد و امنیت کشور دارد. از این رو، ذخیره سازی نفت خام و فرآورده های آن به عنوان کالای استراتژیک در ذخیره، تولید و انتقال آن به پالایشگاه ها و بنادر و فرودگاه ها ضرورتی اجتناب ناپذیر است و نقش آن در کنترل عرضه و تقاضا، تثبیت قیمت ها و اقتدار نظامی کشور حیاتی است.

خارک بزرگترین پایانه نفتی ایران است که بخش عظیمی از صادرات نفتی ایران از این پایانه صورت می گیرد. در این شاهراه اصلی صادرات نفت خام ایران مخازن متعدد با ظرفیت ذخیره سازی حدود ۲۵/۹۵۲ میلیون بشکه نفت خام ایجاد شده است. براساس استانداردهای بین المللی باید به اندازه ۱۵ روز صادرات، نفت خام در جزیره موجود باشد [۵]. بنابراین برای رسیدن به استانداردهای روز دنیا نیاز به ساخت مخازن بیشتر وجود دارد. مطابق اطلاعات موجود پارامترهای ژئومکانیکی و ظرفیت باربری پی های سنگی در این جزیره بررسی نشده است. با توجه به هزینه بالای ساخت مخازن و اهمیت ویژه ی ذخیره سازی، باید شرایط بهینه برای ساخت این مخازن در نظر گرفته شود. از این رو علاوه بر رعایت استاندارد های روز دنیا برای ساخت این مخازن، پی هایی که این مخازن روی آن ها قرار می گیرند باید دارای ظرفیت باربری قابل قبولی بوده و از نظر ژئومکانیکی تایید شوند. از این رو ارزیابی پی های سنگی جزیره خارک به منظور احداث مخازن عظیم نفت خام مورد توجه قرار گرفت.

۱-۴- سابقه پروژه‌های انجام شده

محاسبه ظرفیت باربری از مباحث اصلی و قدیمی مهندسی ژئوتکنیک است که روش‌های مختلفی برای یافتن مقدار آن وجود دارد. اما در اکثر این روش‌ها مصالح پیش فرض خاک است. ظرفیت باربری پی‌های خاکی به طور گسترده مورد بررسی قرار گرفته است. از آنجا که توده سنگ‌ها ناهمگن و ناپیوسته هستند تلاش‌های کمی برای مطالعه‌ی ظرفیت باربری پی‌های سنگی خصوصاً در سنگ‌های درزه‌دار صورت گرفته است. در پی‌های سنگی با در نظر گرفتن فرضیه‌های ساده نوعی محاسبه در این زمینه ارائه شده است. در دو دهه‌ی اخیر با پیشرفت تدریجی علم مکانیک سنگ، تلاش‌هایی برای یافتن مقدار دقیق ظرفیت باربری توده سنگ‌ها انجام شده است.

در مواردی که سازه بر روی بستر سنگی قرار می‌گیرد در مقایسه با بستر خاکی شرایط دستخوش تغییراتی می‌شود. دو تفاوت اصلی در میان ساختارهای سنگی و خاکی وجود دارد، اول؛ توانایی سنگ به پایداری در برابر بارهای زیادتر از خاک و دوم؛ حضور ناپیوستگی‌های موجود در سنگ که سبب شده مقاومت آن با سنگ بکر متفاوت باشد. به دلیل مقاومت فشاری و کششی مناسب سنگ سازه‌های سبک تا متوسطی بر روی بستر سنگی قابل ساخت است. ولی برای سازه‌های سنگین و نیمه سنگین شرایط متفاوت است، در این صورت ممکن است که ناپیوستگی در سنگ سبب لغزش و شکست پی شود یا نشست در جهت عمود بر درزه‌ها سبب نشست کلی سازه شود [۱].

پک و هانسن^۱ (۱۹۷۴) معیاری برای تخمین ظرفیت باربری بر اساس شاخص کیفی سنگ ارائه دادند. این مولفین پیشنهاد کردند که مقادیر ارائه شده به طور کلی و بدون در نظر گرفتن جزئیات طراحی مثل ابعاد پی می‌باشد [۶].

کولهای و کارتر^۲ (۱۹۹۲) یک راه حل حد پایین ساده برای تعیین ظرفیت باربری توده سنگ‌ها

¹ Peck & Hanson

² Kullhawy & carter

براساس معیار شکست غیر خطی هوک و براون ارائه کردند [۷].

گودمن^۱ (۱۹۸۹) رابطه ظرفیت باربری نهایی را ارائه کرد که تاثیر فاصله بین درزه‌ها را در نظر گرفته بود. بولز^۲ (۱۹۹۷) با اصلاح رابطه ارائه شده توسط زینکویچ^۳ مقدار RQD را در روابط اثر داد [۹] و [۸].

سرانو و اولالا^۴ (۱۹۹۴) روشی را برای تعیین ظرفیت باربری نهایی سنگ درزه دار ارائه کردند که در آن از معیار هوک و براون استفاده شده است. این روش پی‌های مدفون، بارگذاری‌های مورب و قرارگیری پی بر روی سطوح شیب دار را در بر می‌گیرد. سرانو و اولالا در سال ۲۰۰۰ روش خود را براساس نسخه جدید معیار هوک و براون اصلاح کردند [۱۰].

یانگ^۵ و همکاران در سال (۲۰۰۳) یک راه حل کران پایین را برای محاسبه ظرفیت باربری پی نواری واقع بر توده سنگ ارائه کردند [۱۱].

پراسکو و کولهاوی^۶ (۲۰۰۴) راه حلی برای محاسبه ظرفیت باربری پی نواری واقع بر توده سنگ حاوی یک یا دو دسته درزه ارائه نمودند. در این روش مقاومت مصالح سنگ و نیز درزه‌ها از طریق معیار موهر-کولمب به دست آمده است. مقاومت جنس مصالح سنگ و درزه‌ها، تعداد درزه‌ها و شیب آن‌ها از عوامل در نظر گرفته شده در این مطالعه می‌باشند [۱۲].

یانگ و یین^۷ در سال (۲۰۰۵) راه حل کران بالا را برای ظرفیت باربری نهایی پی نواری واقع بر توده سنگ ارائه نمودند. ایده‌ی استفاده شده در این روش جایگزینی معیار هوک-براون با یک دامنهی بهینه‌ی موهر-کولمب است. برآوردهای کران بالا برای ظرفیت باربری در این روش از طریق اجرای

¹ Goodman

² Bowles

³ Zienkiewicz

⁴ Serrano & Olalla

⁵ Yang

⁶ Prakoso and Kulhawy

⁷ Yang & Yin

روش آنالیز حدی به دست می‌آید [۱۳].

سادا^۱ و همکاران در سال (۲۰۰۸) از طریق آنالیز حدی به محاسبه ظرفیت باربری پرداخته و نتایج خود را با نتایج مریفلد^۲ و همکاران و سرانو و اولالا مقایسه کردند. آن‌ها در این روش برخلاف یانگ و ین، برآورد حد بالای ظرفیت باربری را با حفظ معیار هوک و براون انجام دادند [۱۴].

چینگ^۳ و همکاران (۲۰۱۱) مطالعه آنالیز قابلیت اعتماد ظرفیت باربری پی‌ها روی توده سنگ را با استفاده از مطالعه موردی منطقه‌ای در تایوان انجام دادند و به این نتیجه رسیدند که شاخص مقاومت زمین شناختی سنگ و مقاومت فشاری تک محوری سنگ، دو پارامتر تاثیرگذار هستند [۱۵].

ایمانی و همکاران در سال (۲۰۱۲) ظرفیت باربری را براساس روش کران بالا و با توجه به اثر آب زیرزمینی و نیز فاصله درزه‌ها مورد بررسی قرار دادند [۱۶].

بایندلیش^۴ و همکاران در سال (۲۰۱۲) به مطالعه آزمایشگاهی ظرفیت باربری پی سنگی صلب واقع بر توده سنگ ناهمسانگرد، تحت شرایط کرنش مسطح پرداختند [۱۷].

کلوزن^۵ در سال (۲۰۱۳) ظرفیت باربری پی دایره‌ای واقع بر توده سنگی که مقاومت آن تابع معیار هوک-براون است را از طریق اجزا محدود محاسبه نموده است [۱۸].

فهیمی فر و همکاران (۲۰۱۳) پس از انجام مطالعاتی بر روی توده سنگ پی سد صفا در استان کرمان، ضمن محاسبه ظرفیت باربری پی سنگی با استفاده از روش‌های تجربی، تحلیلی و مدلسازی سه بعدی پی و تکیه گاه به وسیله نرم افزار ABAQUS، آنالیز تنش را در دو حالت محیط پیوسته برای توده سنگ و در نظر گرفتن دو دسته درزه در پی سنگ به صورت صفحات ضعیف نزدیک به هم انجام دادند. اختلاف بین ظرفیت باربری مجاز در این دو حالت حاکی از تاثیر قابل توجه درزه و ترک

¹ Saada

² Merifield

³ Ching

⁴ Bindlish

⁵ Clausen

در ظرفیت باربری پی است [۱۹].

اولالا در سال (۲۰۱۴) به بررسی کاربرد تئوری پلاستیسیته در رفتار انواع مختلف پی‌های سنگی پرداخته است. برای توصیف رفتار توده سنگ از معیار شکست اصلاح شده هوک و براون استفاده شده است. اولالا به بررسی ظرفیت باربری نهایی پی‌های سطحی و عمیق می‌پردازد. در این روش اثر وزن سنگ در ظرفیت باربری مورد توجه قرار گرفته است [۲۰].

جاوید و همکاران در سال (۲۰۱۵) به بررسی عددی ظرفیت باربری دو پی نواری مجاور هم واقع بر توده سنگ با استفاده از معیار شکست هوک-براون پرداختند. تاثیر پارامترهای مختلف هوک-براون شامل شاخص مقاومت زمین شناسی (GSI)، ثابت سنگ بکر (mi) و مقاومت فشاری تک محوره سنگ بکر (σ_c) بر ظرفیت باربری پی‌های مجاور در فواصل مختلف بررسی شده است. نتایج نشان می‌دهد، کاهش فاصله دو پی نواری مجاور هم باعث افزایش ظرفیت باربری پی می‌شود [۳۵].

۱-۵- اهداف پایان نامه

هدف از انجام این تحقیق تعیین پارامترهای ژئومکانیکی و ظرفیت باربری مجاز پی‌های سنگی مخازن سطحی نفت خام در جزیره خارک می‌باشد. پی‌های سنگی در مقایسه با پی‌های خاکی به دلیل ماهیت سنگی آن‌ها دارای مقاومت و صلبیت بیشتری بوده و به همین دلیل در مقابل بسیاری از بارهای وارده، باربری لازم را از خود نشان می‌دهند. اما عواملی از قبیل وجود ناپیوستگی و خردشدگی توده سنگ، وجود زون‌های خرد شده، هوازگی شدید، وجود حفرات کارستی، گسله داری و غیره موجب کاهش باربری این پی‌ها شده که علاوه بر ایجاد نشست‌های شدید، می‌توانند موجب بروز ناپایداری‌های ساختاری از قبیل واژگونی، لغزش و... شوند. با توجه به این موارد، لزوم انجام مطالعات زمین شناسی و ژئومکانیکی دقیق از توده سنگ‌های قرار گرفته در پی‌ها از اهمیت زیادی برخوردار است. این پروژه به پیشنهاد و حمایت اداره پژوهش و توسعه شرکت پایانه‌های نفتی ایران انجام شده است.

۱-۶- روش انجام تحقیق

در این پایان نامه پارامترهای ژئومکانیکی، ظرفیت باربری مجاز و نشست پی مخازن سطحی نفت خام واقع در جزیره خارک مورد بررسی قرار گرفته است. برای این منظور ظرفیت باربری پی‌های سنگی با روش‌های تجربی، تحلیلی و عددی متناسب با اطلاعات موجود و وضعیت زمین شناسی منطقه به منظور اطمینان از عدم ایجاد هرگونه گسیختگی، خردشدگی و نشست بیش از حد مجاز ارزیابی می‌شود. در ابتدا پارامترهای ژئومکانیکی در منطقه بررسی شده و با توجه به تحلیل‌های عددی و تجربی موجود در مورد ظرفیت باربری پی‌های سنگی برای مخازن عظیم ذخیره سازی نفت مطالعاتی صورت می‌گیرد. سپس با استفاده از مدلسازی مبتنی بر روش‌های عددی که با توجه به شرایط منطقه انتخاب می‌شود (نرم افزار FLAC)، مدلسازی صورت گرفته و ظرفیت باربری و نشست ارزیابی می‌شود. بنابراین بررسی می‌شود که پی سازه مورد نظر پاسخگوی بارهای وارده از سوی سازه استقرار یافته روی آن باشد و پی مناسب برای احداث این مخازن مشخص می‌شود. در نهایت در صورت عدم پاسخگویی پی از نظر ظرفیت باربری و نشست، نسبت به طرح بهسازی و یا تغییر نوع پی و رفتارنگاری آن راهکار ارائه خواهد شد. بنابراین ساخت مخازن ارزشمند نفت خام در شرایط مناسب‌تری صورت گرفته و ایمنی و کارایی بیشتر این مخازن تامین می‌شود.

۱-۷- ساختار پایان نامه

این پایان نامه در شش فصل تنظیم شده است که به شرح زیر می‌باشد.

فصل اول: کلیات

فصل اول که فصل حاضر می‌باشد به کلیات موضوع تحقیق اختصاص دارد. در این فصل مقدمه، اهداف و روش تحقیق، مشخصات عمومی پروژه، سابقه تحقیقات انجام شده و ساختار پایان نامه معرفی شده است.

فصل دوم: ظرفیت باربری پی‌های سنگی

در منابع مختلف تعاریف گوناگونی از پی وجود دارد، در این فصل در ابتدا تعریف جامعی از پی ارائه شده است. در ادامه پی‌های سنگی و مکانیزم شکست آن‌ها به طور کامل مورد بررسی قرار می‌گیرد. روش‌های مختلف تعیین ظرفیت باربری پی‌های سنگی شامل؛ آیین نامه‌ها، روش‌های تجربی، روش‌های تحلیلی و روش‌های عددی به همراه ویژگی‌ها و جزئیات هر کدام در این فصل به طور کامل توصیف شده‌اند.

فصل سوم: نشست و توزیع تنش در پی‌های سنگی

علاوه بر مساله ظرفیت باربری، نشست و توزیع تنش در پی‌های سنگی از دیگر مسائلی بوده که بررسی آن‌ها حائز اهمیت است. در این فصل روش‌های تحلیلی تعیین نشست در پی‌های سنگی و نحوه توزیع تنش در آن‌ها به طور کامل بررسی می‌شود.

فصل چهارم: تعیین پارامترهای ژئومکانیکی ساختگاه مخازن ذخیره سازی نفت خام

در این فصل موقعیت و زمین شناسی ساختگاه مخازن ذخیره سازی نفت خام در جزیره خارک مورد بررسی قرار گرفته است. در ادامه براساس گزارش‌های زمین شناسی و ژئوتکنیکی پروژه‌های اجرا شده در محدوده ساختگاه مخازن و بازدید صورت گرفته از منطقه، وضعیت زمین شناسی و ژئوتکنیکی ساختگاه و پارامترهای ژئومکانیکی پی‌های سنگی مخازن تعیین شده است.

فصل پنجم: تعیین ظرفیت باربری و نشست پی‌های سنگی در جزیره خارک

در این فصل ظرفیت باربری و نشست پی‌های سنگی مخازن سطحی ذخیره سازی نفت خام در جزیره خارک با استفاده از روش‌های تجربی، تحلیلی و مدلسازی عددی با استفاده از نرم افزار $FLAC^{3D}$ بررسی شده است. به منظور بررسی ناپیوستگی‌ها در توده سنگ از شاخص مقاومت زمین‌شناسی استفاده می‌شود و تحلیل‌های مختلفی با آن انجام می‌گیرد. در پایان ظرفیت باربری و

نشست پی مخازن از نظر پارامترهای شاخص مقاومت زمین شناسی، وزن مخصوص، مقاومت فشاری تک محوره، زاویه اصطکاک داخلی و مدول الاستیسیته ارزیابی می شود. تحلیل حساسیت ضخامت لایه سنگ آهک مرجانی، عمق خاک موجود در زیر مخزن و فاصله مخازن از دیگر مسائلی است که در این فصل به آن پرداخته می شود.

فصل ششم: نتیجه گیری و پیشنهادات

در نهایت در این فصل نتیجه گیری های کلی به همراه پیشنهادها برای احداث مخازن سطحی ذخیره سازی نفت خام در جزیره خارک ارائه شده است.

۲- فصل دوم

ظرفیت باربری پی‌های سنگی

یکی از کاربردهای مهندسی مکانیک سنگ، تحلیل تنش، تغییر شکل و ظرفیت باربری پی سنگی سازه، از جمله سدها، پایه پل‌ها، مخازن سطحی و ... است. بارهای ایجاد شده توسط سازه‌های معمولی و سبک به اندازه‌ای است که حتی سنگ‌های نسبتاً ضعیف می‌توانند آن را تحمل کنند ولی اگر سنگ‌های نسبتاً سالم و یک دست تحت تاثیر تنش‌های ناشی از سازه‌های بزرگ قرار گیرند ممکن است به ظرفیت باربری خود نزدیک شوند. چنانچه این گونه سنگ‌ها حاوی نقاط ضعف باشند، تحت اثر بار ناشی از چنین سازه‌هایی دچار مشکلات مختلف از جمله تغییر شکل‌های قابل توجه خواهند شد.

سنگ‌هایی مثل گل سفید، ماسه سنگ‌های شکننده، توف و سنگ‌های آهکی با تخلخل بالا از این جمله هستند. کمتر توده سنگی را می‌توان یافت که بخش‌هایی از آن هوازده نبوده یا حاوی رگه‌ها و میان لایه‌هایی از سنگ‌های با خواص متفاوت نباشند. وجود درزه‌ها، شکاف‌ها، گسل‌ها و سطوح لایه بندی در توده سنگ‌ها و همچنین وجود لایه‌هایی از جنس سنگ‌های انحلال پذیر، موجب پیچیدگی زیاد در رفتار توده سنگ می‌شود. از آنجایی که اکثر پروژه‌های بزرگ و حساس روی بستر سنگی قرار می‌گیرند، هرگونه ضعف در پی می‌تواند خسارات جبران ناپذیری را ایجاد کند. بنابراین تخمین دقیق و مطمئن ظرفیت باربری توده سنگ‌ها از اهمیت فوق العاده‌ای برخوردار است.

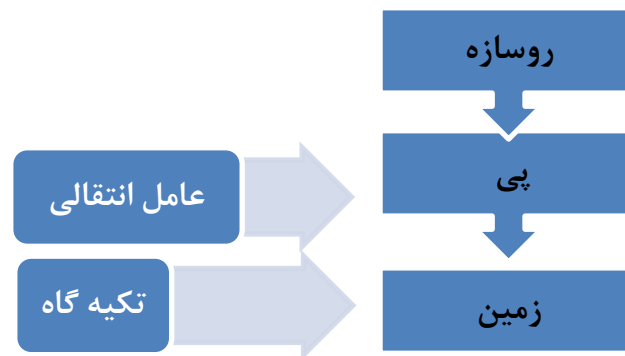
۲-۲- تعریف پی

کلیه سازه‌هایی که بر روی زمین بنا می‌شوند از جمله ساختمان‌ها، پل‌ها، خاکریزها و غیره از دو بخش تشکیل می‌شوند. یک بخش سازه فوقانی^۱ که قسمت نمایان سازه است و بخش دوم سازه زیرین^۲ که قسمت مدفون آن می‌باشد. بخش سازه‌ی زیرین به عنوان حایل بین سازه‌ی فوقانی و زمین تکیه گاه عمل می‌کند، یعنی بار سازه‌ی فوقانی را به زمین منتقل می‌کند. پایین‌ترین قسمت

^۱ Superstructure

^۲ Substructure

سازه (شامل المان‌های سازه‌ای و زمین زیر آن) که نیروها و لنگرهای ناشی از بخش فوقانی سازه و سرباره‌ها را طوری به خاک یا سنگ بستر زیرین منتقل می‌کند که تنش‌های بیش از حد و نشست‌های اضافی در زمین ایجاد نشود، پی نام دارد. پی همچنین پایداری سازه را در برابر لغزش و واژگونی تامین می‌کند. در واقع پی یک عامل انتقالی بین روسازه و زمین است و زمین نقش تکیه گاه را دارد. تعریف شماتیک پی در شکل (۱-۲) قابل مشاهده است [۲۱].



شکل ۱-۲- تعریف شماتیک پی [۲۱]

۳-۲- انواع پی

پی‌ها بر اساس عمق و نوع عملکرد طبقه بندی می‌شوند. در حالت کلی اگر لایه مقاوم در عمق کمی از سطح زمین قرار گرفته باشد، پی در نزدیکی سطح زمین بنا می‌شود. در غیر اینصورت برای رسیدن به لایه‌ی مقاوم عمق پی افزایش می‌یابد. پی‌ها را می‌توان متناسب با عمق قرارگیری یا محل انتقال بار آن‌ها به زمین به صورت زیر طبقه بندی کرد [۲۱]:

الف: پی‌های سطحی یا کم عمق^۱

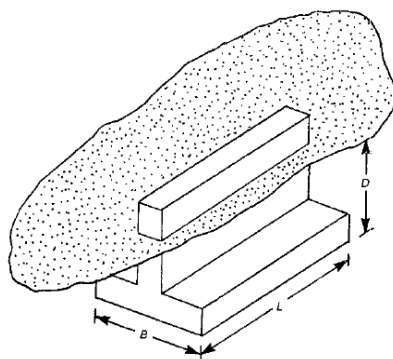
ب: پی‌های عمیق^۲

پی‌های سطحی از متداول‌ترین پی‌ها به خصوص برای پروژه‌های ساختمانی و دیوارها بوده و در عمق کم و نزدیک به سطح زمین اجرا می‌شوند. اگر طول و عرض پی به ترتیب با L و B و عمق پی

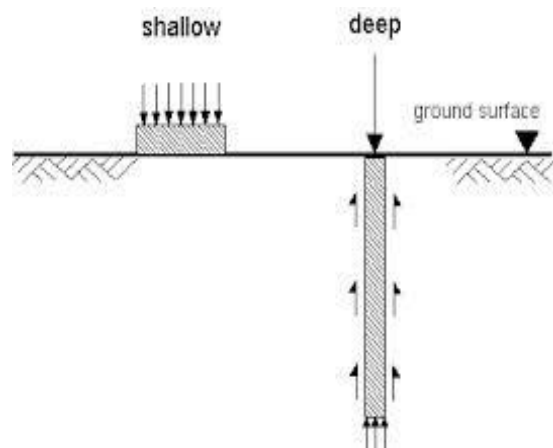
¹ Shallow Foundation

² Deep Foundation

(کمترین فاصله کف پی از سطح زمین) با D نشان داده شود، طبق نظر ترزاقی برای پی های سطحی عمق استقرار پی کوچکتر یا مساوی عرض آن است ($D/B < 1$). البته تحقیقات بعدی نشان دادند که این نسبت در پی های سطحی می تواند به بزرگی ۳ تا ۴ باشد. برای پی های عمیق نسبت D/B بیش از ۴ است. انواع پی از نظر عمق در شکل (۲-۲) دیده می شود. همچنین شکل (۳-۲) تصویری از یک پی منفرد را نشان می دهد. [۲۱].



شکل ۳-۲- پی منفرد نوعی پی سطحی [۲۱]



شکل ۲-۲- انواع پی از نظر عمق [۹]

معمولا پی های سطحی با توجه به نسبت ابعاد و تعداد ستون های واقع بر آن ها، به صورت زیر طبقه بندی می شوند (شکل ۴-۲) [۲۲]:

الف: پی منفرد^۱

ب: پی کلاف دار (باسکولی)^۲

ج: پی نواری^۳

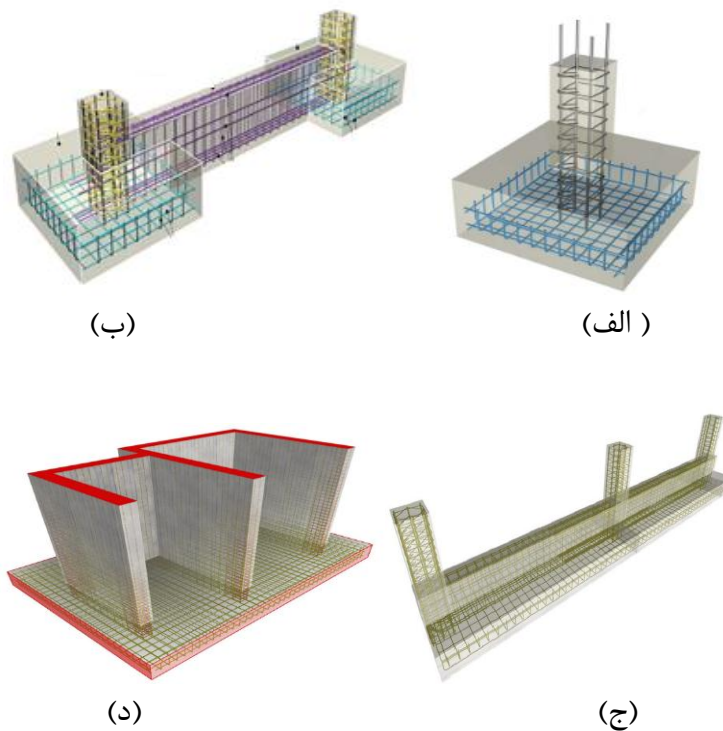
د: پی گسترده^۴

¹ Pad Footing
² Cantilever Footing
³ Strip Footing
⁴ Spread Footing

بر حسب قرارداد، برای پی‌های منفرد نسبت L/B کمتر از ۵، برای پی‌های مربعی شکل $B=L$ ، برای پی‌های دایره‌ای شکل $B=2R$ و در مورد پی‌های مستطیل شکل $B < L \leq 5B$ می‌باشد. برای پی‌های نواری عمدتاً نسبت L/B بزرگتر از ۵ و در حالت گسترده نسبت D/B معمولاً کمتر از یک خواهد بود [۲۲].

مقصود از پی سطحی پی‌هایی است که به آن دسترسی داریم. اما در مورد پی‌های عمیق مستقیماً به آن دسترسی وجود ندارد. معمول‌ترین پی‌های عمیق شمع‌ها یا محورهای حفاری شده هستند. از این پی‌ها زمانی استفاده می‌شود که زمین در اعماق سطحی دارای مقاومت باربری کافی نبوده و بارها باید به لایه‌های سخت‌ترین منتقل شوند. این پی‌ها به کمک وسایل و ماشین‌آلاتی که شمع‌ها، پایه‌ها یا صندوقه‌ها را احداث می‌کنند می‌توان اجرا کرد. پی‌های عمیق (شمع‌ها) نیز دارای انواع مختلفی بوده و تحلیل‌ها و روابط مخصوص به خود را دارند که در منابع مربوطه به طور کامل اشاره شده است [۲۲].

انتخاب پی بستگی به نوع و مقدار بارهای وارده و شرایط باربری زمین دارد. در مورد ساختمان‌های متعارف در صورت وجود لایه‌های مقاوم سطحی، از پی‌های سطحی استفاده خواهد شد. برعکس در مورد بارهای سنگین (پل‌ها، ساختمان‌های مرتفع)، در صورت وجود لایه‌های مقاوم در اعماق زمین، استفاده از پی‌های عمیق ترجیح داده می‌شود. به طور طبیعی زمانی که سنگ بستر در نزدیکی سطح است پی‌های سطحی را می‌توان مستقیماً بر روی سنگ بستر بنا نمود اما اگر سنگ بستر در عمق زیادی باشد، آنگاه صلبیت خاک فوقانی و بزرگی بارها تعیین می‌نماید که آیا لزومی وجود دارد که ساختمان مستقیماً یا غیر مستقیم بر روی سنگ بنا شود. در هر حال با توجه به اهمیت هزینه اجرایی (مخصوصاً در مورد پی‌های عمیق)، انجام یک بررسی فنی-اقتصادی برای انتخاب سیستم پی ضروری به نظر می‌رسد [۲۲].



شکل ۴-۲- انواع پی‌های سطحی [۲۱]
الف- پی منفرد ب- پی کلاف‌دار ج- پی نواری د- پی گسترده

۴-۲- پی‌های سنگی

در خصوص پی سازی روی سنگ، از آنجایی که مقاومت سنگ‌ها در مقابل بارگذاری بیش از خاک است، در پی سازی ترجیح داده می‌شود که فشار وارده از سازه‌های سنگین به سنگ بستر یا پی سنگی منتقل شود. در مواردی که عمق خاک روی پی سنگ کم باشد، از پی‌های کم عمق استفاده می‌شود. این گونه پی‌ها مستقیماً روی سطح زمین و روی سنگ قرار می‌گیرند و یا اینکه توسط پی‌های کم عمق بنا می‌شوند. پی‌های دال روی سطح، پی‌های منفرد و پی‌های نواری در دسته کم عمق و شمع‌ها، صندوقه‌ها و گودبرداری عمیق بستر در دسته عمیق قرار دارند [۲۲].

همانطور که گفته شد دو جنبه‌ی تشخیص برای پی‌های سنگی وجود دارد، اولاً، قابلیت تاب‌آوری سنگ خیلی بیش‌تر از خاک‌ها بوده، ثانیاً وجود ضعف و نقص در سنگ باعث کاهش قابل ملاحظه

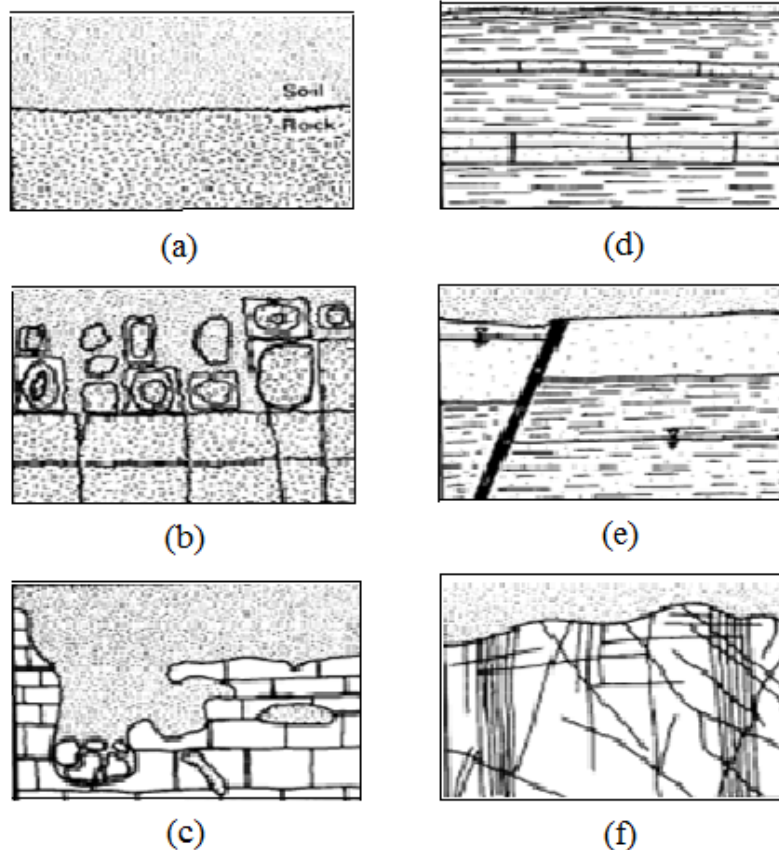
مقاومت توده سنگ نسبت به سنگ بکر می‌شود. مقاومت فشاری سنگ در محدوده‌ای کمتر از ۵ MPa تا بیشتر از ۲۰۰ MPa قرار می‌گیرد. از آنجایی که قابلیت سنگ‌ها در تحمل بارهای کششی و برشی خیلی بیشتر از خاک‌ها است، تعداد سازه‌های بیشتری را می‌توان بر روی آن‌ها بنا کرد [۱].

در صورتی که پی سنگی مستحکم و قوی باشد بارهای سازه اغلب می‌توانند بدون ایجاد مشکل و مساله خاصی تحمل شوند، اما وجود یک شکستگی با مقاومت اندک با جهت یافتگی خاص، ممکن است باعث لغزش کامل شکستگی پی شود. در عین حال برخلاف شرایط ظاهراً پایدار سازه‌های واقع بر روی سنگ‌های مستحکم، متأسفانه نمونه‌هایی از شکست در آن‌ها دیده می‌شود. شکست ممکن است شامل نشست بیش از حد به واسطه حضور لایه‌های ضعیف، آسیب دیدن سنگ در طول زمان و ریزش ناشی از حرکت بلوک سنگ در پی باشد. عوامل موثر بر پایداری پی‌های سنگی شامل زمین‌شناسی ساختمانی پی سنگی، فشارهای آب زیرزمینی، روش اجرای حفاری و تقویت و نگهداری سنگ است. کامل‌ترین مدارک شکستگی پی‌های سنگی در خصوص پی‌سدها می‌باشد زیرا پیامد شکست آن‌ها غالباً فاجعه‌آمیز بوده و شرایط بارگذاری در آن‌ها معمولاً شدیدتر از سازه‌های دیگر است [۱].

۵-۲- انواع سطح سنگ بستر

انواع سطح سنگ بستر در خصوص پی‌سازی روی سنگ در شکل (۵-۲) نشان داده شده است. شکل (۵-۲) (a) وضعیت ایده‌آل استفاده از سنگ مستحکم و نسبتاً بدون درزه را نشان می‌دهد. در این حالت سطح سنگ بستر همواره افقی و کاملاً مشخص است. در مقابل سطح بستر شکل (۵-۲) (b) هوازده بوده و ویژگی‌های سنگ در فواصل و جهات مختلف تغییرات گسترده‌ای دارد. بنابراین باعث اغتشاش در پیش‌بینی ارتفاع پی و مقادیر باربری مجاز می‌شود. سنگ آهک کارستی (شکل ۵-۲) (c) به دلیل ناهمواری سطح، داشتن رس لایه‌ها و حفره‌های فراوان و همچنین کیفیت غیر قابل پیش‌بینی سنگ، به عنوان یک پی نامطمئن در نظر گرفته می‌شود. شکل (۵-۲) (d) پی سنگی

لایه‌ای که تناوبی از لایه‌های سخت (ماسه سنگ) و نرم (گل سنگ) است را نشان می‌دهد که میتواند در پی‌سازی مشکل ایجاد کند. گسل‌ها به دلیل ایجاد ناپیوستگی و دگرسانی در سنگ، وجود سنگ خرد شده‌ی تراکم‌پذیر و جداکردن آب زیر زمینی، مشکلات دیگری برای پی‌سازی به وجود می‌آورند (شکل ۲-۵(e)) [۸].



شکل ۲-۵- انواع سطح سنگ بستر [۸]

a- سنگ پیوسته و متراکم b- سنگ هوازده c- آهک کارستی
d- تناوب لایه‌های شیل و رس e- اثر گسل بر روی سنگ f- سنگ پر درز و شکاف

دسته‌ی دیگری از مشکلات پی در سنگ‌های حاوی کانی‌های ناپایدار و انبساط‌پذیر مانند شیل‌های رسی مونت‌موریلونیتی، بازالت‌های نونترونیت‌دار و سنگ‌های کانی‌سازی شده با پیروتیت، مارکازیت یا برخی سولفیدی‌های دیگر، بروز می‌کند. اسید سولفوریک تولید شده ضمن اکسیداسیون کانی‌های سولفور، باعث خوردگی بتن می‌شود. در مناطقی که پی در یک محیط پر آب

نظیر مجاورت چاه ها و زهکشی های فعال یا در مورد سد ها ساخته می شوند باید به وجود سنگ های انحلال پذیر مانند گچ و نمک توجه خاصی داشت. همچنین در مورد سازه هایی که بر روی کارگاه های استخراج زغال سنگ، گوگرد، نمک یا مواد معدنی دیگر بنا می شوند باید تحقیقات ویژه و روند عملیاتی پر هزینه ای را در پیش گرفت [۸].

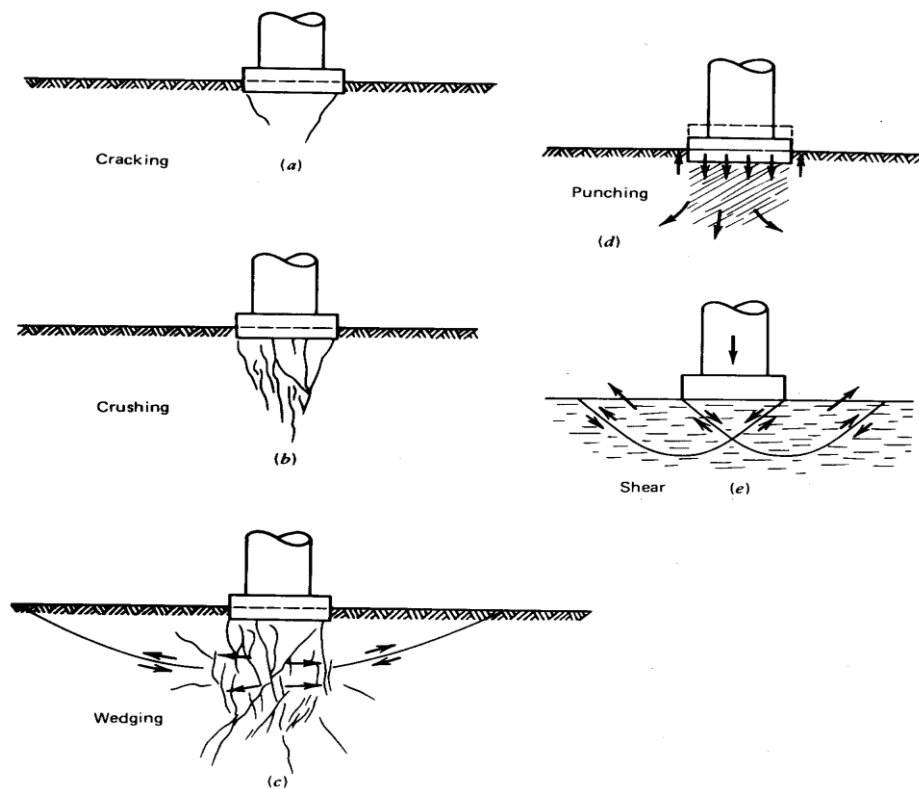
۶-۲- حالت های شکست پی های سنگی

اگر بار وارد بر یک پی سنگی از مقدار بار مجاز بیشتر باشد، پی سنگ ممکن است دچار شکست شده و در نتیجه پی تخریب شود. این عمل ممکن است در اثر گذشت زمان های طولانی، حتی توسط بارهای کمتر از حد مجاز انجام گیرد. پی های سنگی تحت مکانیزم های گوناگونی همانگونه که در شکل (۶-۲) نشان داده شده است، شکسته می شوند. در این تقسیم بندی که توسط لادانی^۱ (۱۹۷۲) ارائه شد، حالت های شکست پی های سنگی شامل رشد ترک، خرد شدن سنگ، سوراخ شدن (مگنه شدن) و شکست برشی می باشد. در شکل های (۶-۲) (a-c)، توسعه ی شکستگی از طریق رشد ترک و خرد شدن پی سنگ زیرین باعث شکست می شود. در شکل (۶-۲) (d) سوراخ شدن یا مگنه شدن از طریق بسته شدن فضاهای خالی و در شکل (۶-۲) (e) شکست برشی نشان داده شده است. [۸].

شکست در پی های سنگی تحت تاثیر عوامل مختلفی ایجاد می شود. شکست ظرفیت باربری در صورت غالب بودن برش پلاستیک در اثر بار بیش از حد در پی های خاکی اتفاق می افتد، این حالت از تغییر شکل تنها در زیر پی های به شدت بارگذاری شده بر روی شیل های رسی می تواند رخ دهد. شکست های تحکیمی در مورد سنگ های هوازده ای که پی بر روی آن ها قرار دارد رایج است. سنگ های غیر هوازده در اثر فشار پی فشرده می شوند و چون پرکننده ی رس موجود در ترک ها مقاومت برشی کمی دارد، این سنگ ها می شکنند. این مکانیزم سوراخ شدن یا مگنه شدن نام دارد. یک سنگ متخلخل ممکن است در اثر این مکانیزم شکسته شود. لغزش ناپایداری یکی دیگر از

¹ Ladanyi

مکانیزم های شکست پی می باشد، به طوری که بنا کردن پی در لبه یا نزدیک شیب های طبیعی با ریسک زیادی همراه خواهد بود و به مطالعات دقیق پایداری شیب نیاز دارد [۸]



شکل ۲-۶- حالت های شکست پی های سنگی [۸]

- (a-c) توسعه ی شکستگی از طریق رشد ترک و خرد شدن پی سنگ زیرین
- (d) سوراخ شدن یا منگنه شدن از طریق بسته شدن فضاهای خالی (شکست سنبه ای)
- (e) شکست برشی

نقش منفی حفره های زیر زمینی در پی سازی و اثرات آن در پی کاملاً آشکار و انکار ناپذیر است. این حفره ها با سست کردن سنگ ها و کاهش دادن مقاومتشان، باعث بروز ریزش هایی می شوند که گاهی اثرات آن ها تا سطح زمین نیز ادامه دارد. در پی سازی علاوه بر توجه به حفره ها، باید به پی سنگ هایی که قابلیت انحلال و حفره پذیری دارند نیز توجه خاصی داشت. ژئوپس، سنگ نمک و سنگ آهک انحلال پذیرترین سنگ ها هستند و در جاهایی که در عمق کم قرار دارند، اغلب با مشکل فرونشست همراه اند. البته در پروژه های مهندسی به ندرت اتفاق می افتد که در طول عمر یک سازه، مکانیزم انحلال باعث ایجاد حفره در پی سنگ شود [۸].

۷-۲- انواع پی‌های سنگی

براساس تعریف و طبقه بندی ارائه شده در منابع موجود پی های سنگی را می توان به چهار دسته زیر تقسیم بندی کرد [۸۱]:

الف: پی‌های گسترده (پی مستقیم روی سنگ)^۱

ب: پایه‌های فرو شده در سنگ^۲

ج: شمع‌ها^۳

د: پی‌های کششی^۴

انتخاب هر کدام از این پی ها به مقدار و جهت بارگذاری و شرایط ژئوتکنیکی ناحیه باربری بستگی دارد. شکل (۷-۲) نمونه‌ای از این چهار نوع پی را به همراه توصیف مختصری از مشخصات اصلی هر کدام نشان می دهد. شرایط ژئوتکنیکی مورد نیاز برای طراحی هر کدام از این پی ها شامل زمین شناسی ساختاری، خصوصیات مقاومتی سنگ و شرایط آب زیرزمینی منطقه می باشد [۱].

۷-۲-۱- پی گسترده (پی مستقیم روی سنگ)

در مواردی که ضخامت خاک روی پی سنگ به اندازه ای است که عملیات خاکبرداری هزینه چندانی ندارد، پی را مستقیماً روی سنگ بنا می کنند. برای این منظور خاکبرداری برای رسیدن به سطح سنگ ادامه می یابد و سپس پی سنگ را مورد آزمون های لازم قرار می دهند. ساخت نهایی پی براساس روابط تجربی یا عددی تعیین می شود. گودبرداری باید زهکشی و تمیز گردد تا بتن بتواند پیوستگی خوبی را ایجاد نماید. هرچه بار ناشی از سازه بیش تر باشد محاسبات و ارزیابی ها باید با دقت بیشتری صورت گیرد. پی های منفرد که عمومی ترین نوع پی ها بوده و کمترین هزینه ساخت را نیز دارند می توانند در سطحی که دارای ظرفیت باربری و نشست مناسب است مستقیماً بر روی

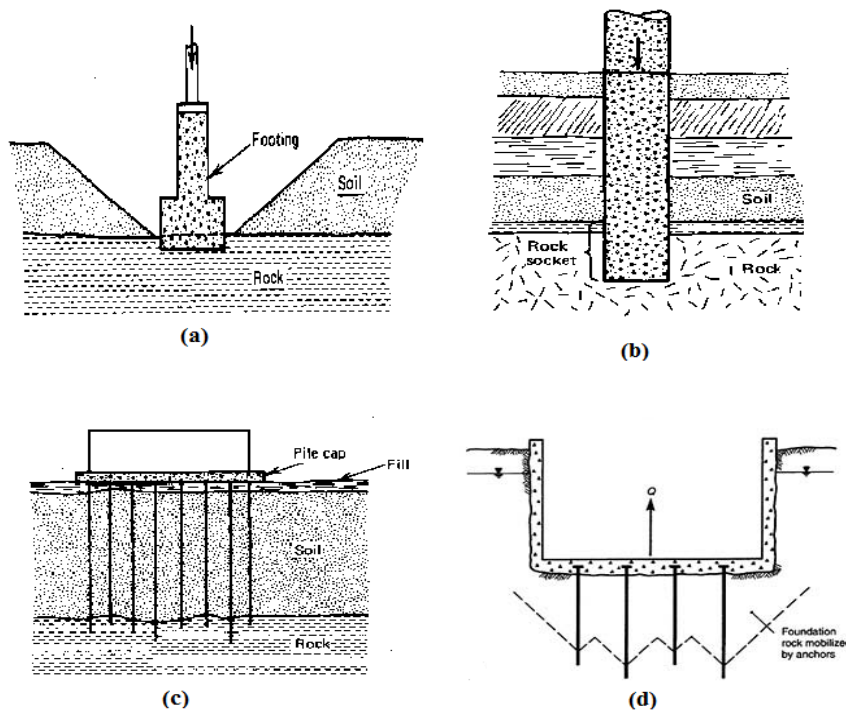
¹ Spread footings

² Socketed piers

³ piles

⁴ Tension foundations

سنگ اجرا شوند. سطح باربر ممکن است مایل بوده بنابراین در چنین شرایطی احتمالا نصب داول‌های فولادی یا مهارهای تنیده شده برای ایمن کردن پی بر روی سنگ ضروری می باشد. برای پی‌های واقع در پاشنه یا ستیغ شیب‌های تند، پایداری شیب با احتساب بارهای اعمال شده توسط سازه باید در نظر گرفته شود [۱].



شکل ۲-۷- انواع پی‌های سنگی [۸ و ۱]

(a) پی گسترده (b) پایه فرو شده در سنگ (c) شمع (d) پی کششی

۲-۷-۲- پایه فرو شده در سنگ

در صورتی که بارهای وارد بر پی‌های منفرد خیلی زیاد باشند و سطح باربری دارای ظرفیت باربری مناسب نباشد ممکن است اجرای یک پایه فرو شده در سنگ لازم باشد. همچنین بار سازه‌های سنگین را نمیتوان توسط شمع به سنگ منتقل کرد. برای این منظور اعمال بار به سنگ سالم زیرین از طریق پایه فرو شونده در سنگ اجرا می شود. تفاوت بین شمع و پایه حفر شده در سنگ در روش ساخت آنها می باشد. شمع ها از طریق کوبیدن یا لرزش اعضای سازه‌ای و جایگزینی زمین نصب می شوند در حالی که پایه‌ها از طریق حفر چال هایی که با بتن پر می شوند اجرا می شوند. نگهداری انجام شده

توسط پایه‌ها شامل مقاومت برشی اطراف محیط چال و انتهای باربری در ته چال می باشد. پایه‌های فروشونده را می توان به منظور تاب آوردن و تحمل نمودن بارهای عمودی اعم از فشاری و کششی و همچنین بارهای افقی با حداقل جابجایی طراحی نمود[۱].

۲-۷-۳- شمع‌ها

در این روش بار ناشی از سازه توسط شمع های بتنی یا فولادی به پی سنگ منتقل می شود. در خاک ها، سنگ های خرد شده هوازده و نیز سنگ های سست مثل گل سفید، توف و رس و همچنین در مواقعی که طول شمع کوتاه است عملیات پایدار سازی زمین توسط شمع کوبی صورت می گیرد. بدین ترتیب شمع پیش ساخته از سطح زمین توسط ضرباتی به داخل زمین کوبیده و رانده می شود. این روش درمورد سنگ‌های سخت عملی نبوده و نتیجه مطلوبی ندارد، مگر اینکه شمع ها به نقاط رانش فولادی سخت مجهز باشند. در مورد سنگ های سخت که امکان شمع کوبی در آن ها وجود ندارد همانطور که گفته شد، ابتدا چال هایی تا عمق مورد نظر حفر کرده و سپس بتن در آن ها تزریق می کنند[۸].

۲-۷-۴- پی های کششی

این پی ها معمولا برای سازه هایی که پی آن ها تحت فشار رو به بالا قرار دارند، استفاده می شوند. برای سازه هایی که بارهای دائمی یا بارهای بالا برنده گذرا ایجاد می کنند نگهداری میتواند به وسیله وزن سازه و در صورت لزوم، مهارهای ته گیردار تزریق شده به سنگ های زیرین تامین شود. ظرفیت بالا برنده یک مهار به وسیله مقاومت برشی چسبندگی دوغاب-سنگ و وزن مخروطی از سنگ که به وسیله مهار گسترش یافته تعیین می شود. ابعاد این مخروط به وسیله طول مهار ایجاد شده و زاویه راس مخروط تعریف می گردد. موقعیت راس معمولا در وسط طول مهار فرض می شود و زاویه راس می تواند از حدود ۶۰ تا ۱۲۰ درجه متفاوت باشد. زاویه راس ۶۰ درجه در جایی که شکستگی های پیوسته، موازی با جهت بارگذاری وجود دارند مورد استفاده قرار می گیرد در حالی

که زاویه ۱۲۰ درجه برای سنگ توده ای یا سنگ با شکستگی های پیوسته عمود بر جهت بارگذاری به کار می رود [۱].

در محاسبه ظرفیت بالا برنده یک فرض خیلی محافظه کارانه میتوان در نظر گرفت که مخروط از سنگ های احاطه کننده جدا باشد. با این وجود، اگر مهاری در توده سنگ با الگوی شکستگی مخروطی شکل نصب شود، مقاومت بالا برنده زیادی توسط مقاومت سنگ در سطح مخروط تامین خواهد شد. مقدار این مقاومت بسته به مقاومت سنگ در سطح مخروط تامین خواهد شد و این مقاومت به مقاومت کششی توده سنگ و جهت یافتگی ساختار زمین شناسی در خصوص سطح مخروط بستگی دارد [۱].

۸-۲- ظرفیت باربری پی های سنگی

ظرفیت باربری یکی از مباحث حائز اهمیت در مهندسی پی می باشد و در رابطه با پی های سنگی عمدتاً دارای مقادیر بالایی است. برای تعداد زیادی از پی های سنگی به علت قوی تر بودن سنگ از بتنی که پی ها از آن ساخته می شوند، تعیین ظرفیت باربری چندان اهمیتی ندارد. با این حال مسائل ظرفیت باربری توده سنگ به جزئیات زمین شناسی ارتباط زیادی دارد و ناپیوستگی ها به طور قابل ملاحظه ای ظرفیت باربری را کاهش می دهند.

تاکنون تعیین دقیق ظرفیت باربری سنگ زیر پی میسر نشده است، ولی با در نظر گرفتن فرضیات ساده کننده نوعی محاسبه مشابه ظرفیت باربری خاک البته برای شرایط خاصی در مورد پی های سنگی ارائه شده است. باید در نظر داشت که به علت اینکه ظرفیت باربری سنگ ها برای ساختمان ها و بارهای معمولی اصولاً کافی می باشد در طراحی موارد معمولی جای نگرانی وجود ندارد. با این حال تحت بارهای سنگین و پروژه های ویژه، تعیین ظرفیت باربری توده سنگ الزامی است. آنچه که در بررسی ظرفیت باربری سنگ ها دارای اهمیت ویژه است، طرز لایه بندی، وجود درزه ها و گسل ها، عدم یکنواختی و غیر ایزوتروپی می باشد. ناهمواری سطح سنگ، وجود آب زیرزمینی، وجود رگه های

تورم‌زا مانند رس‌ها و حضور کانی‌های ناپایدار و اکسید شونده همگی از مواردی هستند که هرکدام به نحوی در کاهش ظرفیت باربری ممکن است تاثیر بسزایی داشته باشد. ظرفیت باربری به دو صورت ظرفیت باربری نهایی و ظرفیت باربری مجاز بیان می‌شود. این دو اصطلاح نیاز به تعریف دارد که به آن می‌پردازیم [۲۳]:

الف) ظرفیت باربری نهایی: ظرفیت باربری نهایی به عنوان میانگین بار در واحد سطح که برای ایجاد شکست از طریق گسیختن خاک تقویت شده یا توده سنگ مورد نیاز است تعریف می‌شود.

ب) ظرفیت باربری مجاز: ظرفیت باربری مجاز به عنوان بیشترین فشار مجاز بر روی یک پی خاکی یا توده سنگ با رعایت تمامی فاکتورهای مربوطه از جمله رعایت ایمنی مناسب در برابر شکست توده خاک یا توده سنگ و رعایت جابجایی پی به گونه‌ای که آنقدر بزرگ نباشد که باعث تخریب سازه شود، بیان می‌شود. ظرفیت باربری مجاز (q_a) براساس مقاومت توده سنگ، به صورت ظرفیت باربری نهایی تقسیم بر یک ضریب ایمنی تعریف می‌شود:

$$q_a = \frac{q_u}{FS} \quad 1-2$$

به عنوان یک معیار برای بررسی پی، تنش میانگینی که بر پی اعمال می‌شود می‌بایست مطابق رابطه (۲-۲) برابر یا کمتر از ظرفیت باربری مجاز باشد.

$$Q/A \leq q_a \quad 2-2$$

در این رابطه Q بار اعمال شده بر پی و A مساحت سطح پی است. برای بیشتر پی‌ها، حداقل ضریب ایمنی قابل قبول با احتساب یک بار سازه‌ای شامل تمام بارهای زنده و مرده ۳ می‌باشد. مقادیر ضریب ایمنی مورد نظر برای شرایط مختلف در جدول (۱-۲) آمده است.

جدول ۱-۲- مقادیر حداقل ضریب ایمنی [۱]

مقدار	طبقه بندی	حالت شکست
۱/۳-۱/۵	سازه های سطحی	برشی
۱/۵-۲	سازه های زیر سطحی، حفريات	
۲-۳	پی	

در مسائل مهندسی ژئوتکنیک، ارزیابی ظرفیت باربری پی براساس کسری از مقاومت فشاری تک محوری صورت می گیرد. برای این منظور نسبت ظرفیت باربری نهایی به مقاومت فشاری تک محوری به عنوان فاکتور ظرفیت باربری (N_σ) تعریف می شود و داریم [۲۴]:

$$N_\sigma = \frac{q_u}{\sigma_c} \quad ۳-۲$$

روش متداول برای تعیین فشار باربری مجاز، استفاده از جداول و آیین نامه های منتشر شده است، اما در شرایطی که شرح آن در آیین نامه ها وجود ندارد، اغلب از روش های حدی و عددی یا ترکیب مناسبی از آن ها استفاده می شود. روش مورد استفاده به عواملی مثل رواداری^۱ جابجایی و پیچیدگی شرایط زمین شناسی محل بستگی دارد. از روش آزمون های بارگذاری برجا به دلیل گران بودن و تعمیم ندادن به کل محیط به دلیل مشخص نبودن اثر مقیاس^۲ در تعیین ظرفیت باربری کمتر استفاده می شود [۱].

۲-۸-۱- تعیین ظرفیت باربری با استفاده از آیین نامه های ساختمانی

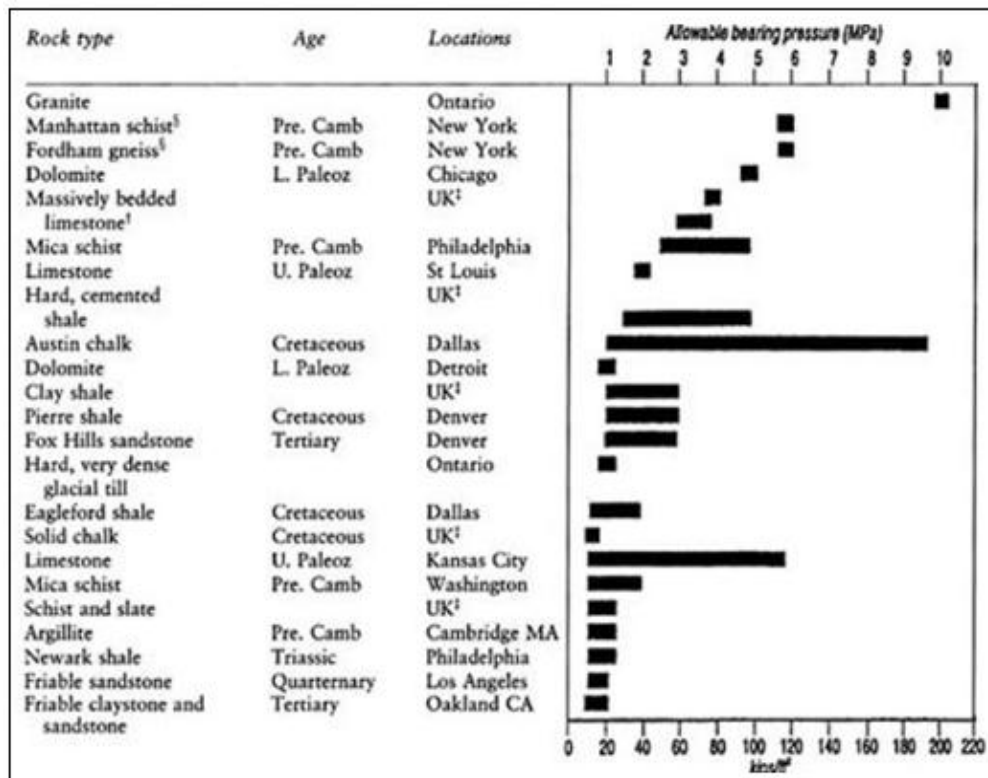
برای بسیاری از سازه ها، ابعاد مورد نیاز ناحیه ی باربری پی از حد جداول منتشر شده یا آیین نامه های ساختمانی که در آن ها فشار باربری مجاز انواع سنگ ها درج شده، به دست می آید. جدول (۲-۲) فشار باربری مجاز را برای انواع شرایط زمین شناسی سنگ ها، بسته به نوع و سن آن ها

¹ Tolerances

² Scale effects

ارائه می نماید. فشارهای باربری ارائه شده در این جدول بر اساس مشاهده سازه‌های پایدار و اعمال فاکتور ایمنی کافی به منظور تامین حداقل نشست تهیه شده‌اند [۱].

جدول ۲-۲- ظرفیت باربری مجاز برای سنگ‌های تازه طبق آیین نامه‌های ساختمانی [۱]



به هر حال مقادیر فشارهای باربری داده شده به مقدار زیادی به مقاومت سنگ مرتبط است و باید در خصوص سنگ‌های هوازده شکسته، غیر همگن و سنگ‌هایی که شامل لایه‌های ضعیف و متلاشی شده هستند، کاهش داده شوند. به این منظور طبق نظر پک و همکاران (۱۹۷۴) اگر سنگ شکستگی داشته باشد، فشار باربری مجاز ارائه شده در جدول را باید بر اساس RQD اصلاح نمود. به این صورت اگر $RQD > 90\%$ باشد، کاهش ظرفیت باربری لازم نیست. اگر $50\% < RQD < 90\%$ باشد در این صورت ظرفیت باربری با اعمال ضریبی حدود 0.75 تا 0.7 کاهش می‌یابد و اگر $RQD < 50\%$ باشد، ظرفیت باربری با اعمال ضریبی در حدود 0.1 تا 0.25 کاهش می‌یابد [۱].

۲-۸-۲- تعیین ظرفیت باربری با استفاده از روابط تجربی و نیمه تجربی

اغلب روابط تجربی و نیمه تجربی بر اساس ارتباط ظرفیت باربری نهایی و مقاومت تراکمی نامحصور سنگ بکر پیشنهاد شده‌اند. در جدول زیر نمونه‌هایی از این روابط دیده می‌شود [۲۵].

جدول ۳-۲- روابط تجربی تخمین ظرفیت باربری [۲۵]

ارائه دهنده و سال	رابطه تجربی
روش تنگ ^۱ (۱۹۶۲)	$q_u = (5 - 8)\sigma_c$
روش کوتز ^۲ (۱۹۶۷)	$q_u = 3\sigma_c$
روش رو و آرمیتاج ^۳ (۱۹۸۷)	$q_u = 2.7\sigma_c$
روش آرگما ^۴ (۱۹۹۲)	$q_u = 4.5\sigma_c$

همانطور که در جدول (۳-۲) ملاحظه می‌شود روابط مذکور همگی خطی بوده و اثر ناپیوستگی‌ها و مقاومت توده سنگ در آن‌ها لحاظ نشده است. بنابراین روابطی ارائه شد که در آن‌ها تاثیر ناپیوستگی‌ها در توده سنگ در نظر گرفته شد. در این راستا آیین نامه آشتو^۵ (۱۹۸۹) برای پل‌های بزرگ راه‌ها رابطه زیر را به منظور تخمین ظرفیت باربری نهایی توصیه نمود.

$$q_u = N_{ms} \cdot \sigma_c \quad ۴-۲$$

N_{ms} ضریبی است که مقدار آن تابع کیفیت توده سنگ و نوع آن می‌باشد. کیفیت توده سنگ تاثیر بیشتری را نسبت به نوع سنگ دارد به طوری که برای یک نوع سنگ، N_{ms} برای کیفیت توده سنگ عالی بیش تر از ۲۵۰ برابر کیفیت توده سنگ ضعیف می‌باشد. در حالی که برای یک نوع توده سنگ مقدار N_{ms} نسبت به انواع سنگ‌ها تغییر بسیار کمتری را دارد.

انجمن ژئوتکنیک کانادا (۱۹۸۵) نیز جهت تعیین ظرفیت باربری نهایی استفاده از رابطه زیر را

¹ Teng
² Coates
³ Rowe and Armitage
⁴ Argmma
⁵ Asshto

پیشنهاد نموده است [۲۵]:

$$q_u = 3\sigma_c K_{sp} \cdot D \quad ۵-۲$$

$$K_{sp} = [3 + S/B] / [10 \left(1 + \frac{300g}{S}\right)^{0.5}] \quad ۶-۲$$

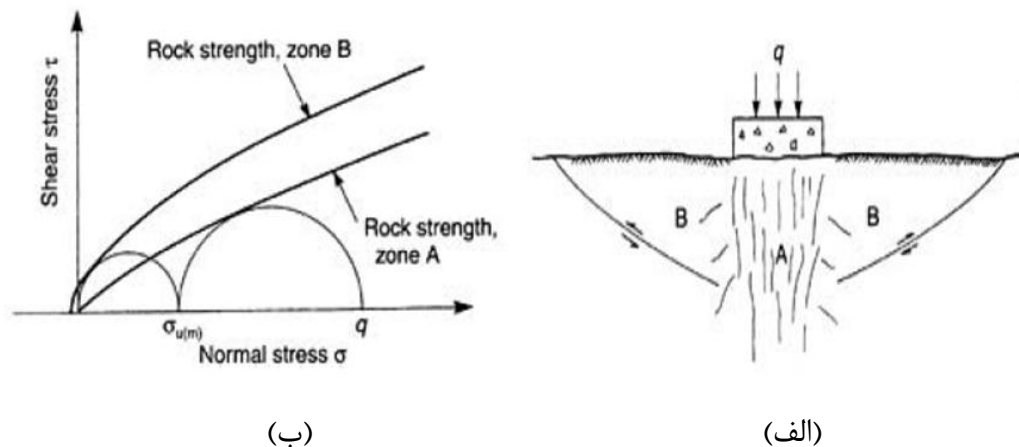
در روابط فوق K_{sp} فاکتور تجربی بوده که بین ۰/۱ تا ۰/۴ می باشد، S فاصله داری ناپیوستگی ها، B عرض یا قطر پی، g بازشدگی ناپیوستگی ها، D فاکتور عمق $(D=1+ 0/42 (L/B) \leq ۳/۴)$ و L طول پی فرو شده در سنگ می باشد. عموماً این روش برای نسبت های S/B بین ۰/۰۵ تا ۲ و g/s بین صفر تا ۰/۰۲ به کار برده می شود.

۳-۸-۲- تعیین ظرفیت باربری سنگ شکسته (ترک دار)

شکل (۲-۸) پی قرار گرفته بر روی سطح افقی سنگی را نشان می دهد. در فشارهای به مراتب کمتر از ظرفیت باربری نهایی سنگ، رفتار سنگ الاستیک بوده و نشست پی را میتوان از روابط تئوری الاستیسیته محاسبه نمود. اما با نزدیک شدن فشار به ظرفیت باربری نهایی سنگ، ترک ها به مرور گسترش یافته و گوه ها یا مناطق خرد شده را تشکیل می دهند (شکل ۲-۸-الف). این شرایط باعث اتساع سنگ و ایجاد ترک های شعاعی می شود. سرانجام این ترک ها به سطح رسیده و یک گوه سنگی را تشکیل می دهند. جابجایی چنین گوه ای ممکن است باعث گسیختگی ناگهانی پی شود [۱].

در شکل (۲-۸-ب)، پوش گسیختگی موهر مربوط به سنگ ضعیف شده ی منطقه A در مقایسه با سنگ منطقه B نشان داده شده است. همانطور که در شکل پیداست، سنگ واقع در زیر سازه در حالت تنش فشاری سه محوری است. تنش اصلی بزرگتر برابر با فشار باربری (q) و تنش اصلی کوچکتر برابر با فشار محصور کننده ای است که توسط سنگ های اطراف وارد می شود. حداکثر فشاری که سنگ های اطراف می توانند ایجاد کنند برابر با مقاومت فشاری تک محوری توده سنگ در منطقه (B) می باشد (یعنی $\sigma_{u(m)}$). این شرایط در حالتی اتفاق می افتد که سطح ضعیف مشخصی

برای گسیختگی توده سنگ وجود نداشته باشد و یا این که سنگ متخلخل بوده و بتواند تحت بارگذاری پی متراکم شود.



شکل ۸-۲- شالوده قرار گرفته روی سنگ [۱]

الف- تشکیل منطقه خرد شده در زیر سازه و تشکیل گوه سنگی ب- پوش گسیختگی موهر مناطق A و B

محاسبه ظرفیت باربری سنگ های شکسته با توجه به تشکیل گوه های متحرک و مقاوم در سنگ زیر پی ها را می توان با روشی مشابه روش های مورد استفاده در مکانیک خاک انجام داد. این روش تحلیل که توسط بل^۱ ارائه و توسط ترزاچی^۲ توسعه یافت، روش ساده و محافظه کارانه ای است که سطح گسیختگی در زیر پی را تخمین می زند. در حالت ساده شده تحلیل، پوش گسیختگی به صورت خطی فرض شده و از وزن سنگ صرف نظر می شود. همچنین تنش هایی که در طول فصل مشترک عمودی دو گوه گسترش می یابند در نظر گرفته نمی شوند.

تحلیل بر مبنای این فرض صورت می گیرد که گوه های فعال و منفعل در پی سنگ توسط خطوط مستقیم ایجاد می شوند. همچنین پارامترهای مقاومت برشی این سطوح مشابه پارامترهای توده سنگ است (شکل ۸-۲- الف). برای تعیین ظرفیت باربری یک پی با طول نامحدود روی سطح افقی سنگ، فرض می شود که پی سنگ در حالت فشاری و مشابه نمونه ی قرار گرفته تحت شرایط

¹ Bell

² Terzaghi

سه محوری است. اگر از وزن سنگ صرف نظر شود، تنش اصلی بزرگتر در منطقه A (σ_{1A}) با فشار پی (q) برابر است. ناحیه B در حالت تنش فشاری سه محوره با تنش اصلی بزرگتر (σ_{1B}) که به صورت افقی عمل می نماید و تنش اصلی کوچکتر (σ_{3B}) که به صورت عمودی عمل می کند، می باشد. زمانی که پی بر روی سطح زمین قرار دارد، تنش اصلی کوچکتر در ناحیه B (σ_{3B}) برابر صفر خواهد بود، در حالی که اگر پی در سنگ فرو رفته باشد، فشار روباره (q_s) برابر با میانگین تنش قائم ایجاد شده توسط وزن سنگ در بالای سطح پی می باشد [۱].

در لحظه‌ی شکست پی، هر دو منطقه به طور همزمان برش خورده و تنش اصلی کوچکتر در منطقه A (σ_{3A}) برابر با تنش اصلی بزرگتر در منطقه B (یعنی σ_{1B}) خواهد بود. تنش اصلی کوچکتر در منطقه A توسط مقاومت منطقه B در مقابل فشردگی به وجود می آید و برابر با مقاومت فشاری تک محوره توده سنگ است (شکل (۲-۸) ب). مقاومت در فشار سه محوری (σ_3, σ_1) را می توان با معیار هوک - براون توصیف نمود. بر اساس این معیار مقاومت سنگ ترک دار به صورت زیر است [۱]:

$$\sigma_1 = (m\sigma_c\sigma_3 + S\sigma_c^2)^{1/2} + \sigma_3 \quad ۷-۲$$

در این رابطه m و s ثابت های مرتبط با نوع سنگ و درجه شکستگی سنگ است. $\sigma_{u(r)}$ مقاومت فشاری تک محوری سنگ بکر و σ_1 و σ_3 به ترتیب تنش های اصلی بزرگ و کوچک هستند.

تنش اصلی بزرگ وارد بر منطقه A (یعنی σ_{1A}) از رابطه (۷-۲) بدست می آید. تنش اصلی کوچک منطقه A (یعنی σ_{3A})، مقاومت سنگ منطقه B بوده و برابر با مقاومت فشاری تک محوری توده سنگ (در حالتی که فشار روباره صفر است) می باشد. مقاومت فشاری تک محوری توده سنگ از رابطه زیر به دست می آید:

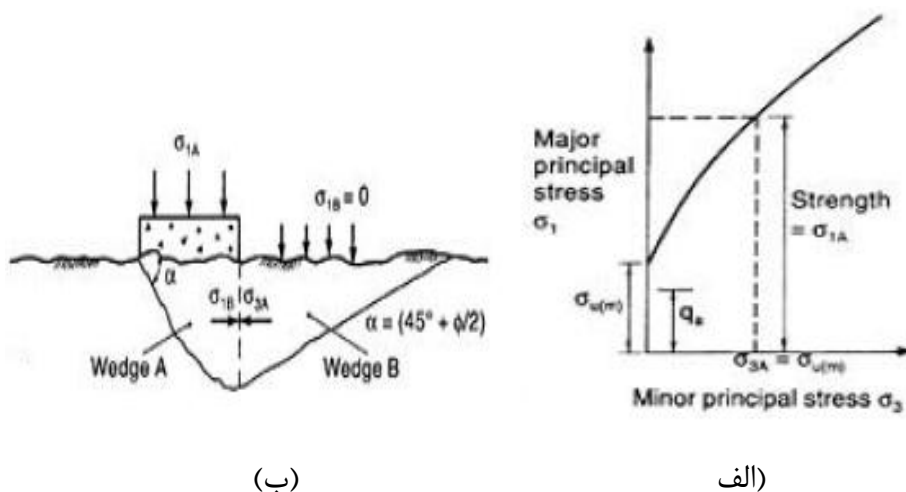
$$\sigma_{u(m)} = (S\sigma_c^2)^{1/2} \quad ۸-۲$$

ظرفیت باربری در این حالت برابر با تنش اصلی بزرگتر در منطقه A می باشد که از رابطه (۹-۲) به دست می آید:

$$\sigma_1 = \left(m\sigma_c(S\sigma_c^2)^{\frac{1}{2}} + S\sigma_c^2 \right)^{\frac{1}{2}} + (S\sigma_c^2)^{\frac{1}{2}} = S^{1/2}\sigma_c[1 + (mS^{-1/2} + 1)^{1/2}] \quad ۹-۲$$

شکل ((۹-۲)-الف) رابطه مقاومت سنگ و فشار جانبی را نشان می دهد. همان طور که این نمودار نشان می دهد با کمی افزایش در فشار جانبی، ظرفیت باربری افزایش قابل ملاحظه ای می یابد. ظرفیت باربری مجاز (q_a) در ارتباط با مقاومت توده سنگ و با اعمال فاکتور ایمنی و ضریب تصحیح Cf_1 عبارتست از [۱]:

$$q_a = \frac{Cf_1 S^{1/2} \sigma_c [1 + (mS^{-1/2} + 1)^{1/2}]}{FS} \quad ۱۰-۲$$



شکل ۹-۲- تحلیل ظرفیت باربری سنگ شکسته [۱]

الف- گوه های فعال (A) و مقاوم (B) در پی، ب- پوش مقاومت توده سنگ

در بیشتر شرایط بارگذاری روی سنگ سالم میتوان با ریسک کمی از فاکتور ایمنی بین ۲ تا ۳ استفاده نمود. فاکتور ایمنی ۳ در حالت بارگذاری مرده همراه با حداکثر بار زنده مورد استفاده قرار می گیرد. اگر بخشی از بار زنده موقتی باشد (مثل باد و زمین لرزه) می توان از فاکتور ایمنی ۲ استفاده

کرد. در روابط مورد استفاده برای تعیین ظرفیت باربری سنگ های ترک دار با استفاده از پوش مقاومتی غیر خطی، ضروری است که مقاومت فشاری سنگ بکر و توده سنگ از هم تمیز داده شوند. مقاومت سنگ بکر از آزمون های آزمایشگاهی به دست می آید، در حالی که مقاومت سنگ ترک دار توسط روابط ارائه شده قبلی قابل محاسبه است [۱].

ضریب تصحیح Cf_1 بر اساس شکل پی در محاسبات تعیین ظرفیت باربری مجاز از جدول (۲-۴) به دست می آید.

جدول ۲-۴- ضرایب تصحیح شکل پی (L طول و B عرض پی) [۱]

Cf ₁	Cf ₂	شکل پی	
1.0	1.0	L/B>6	نواری
1.12	0.9	L/B=2	مستطیلی
1.05	0.95	L/B=5	
1.25	0.85	مربعی	
1.2	0.7	دایروی	

۲-۸-۴- تعیین ظرفیت باربری پی های مدفون (فرو رفته در سنگ)

در حالتی که پی سازه در عمق سنگ استقرار یابد، لازم است معادله ی بدست آمده در حالت قبل را اصلاح نمود و تاثیر افزایش تنش ناشی از تنش محصور کننده (q_s) در سطح زمین را به حساب آورد. در این حالت تنش اصلی کوچک تر (σ_{3B}) برابر با q_s در رابطه اصلاح شده فشار باربری مجاز برای پوش های مقاومتی غیر خطی در رابطه (۲-۱۱) آمده است [۱]:

$$q_a = \frac{C_{f1}[(m\sigma_c\sigma_3 + S\sigma_c^2)^{1/2} + \sigma_3]}{FS} \quad ۱۱-۲$$

که در آن:

$$\sigma_3 = (m\sigma_c q_s + S\sigma_c^2)^{1/2} + q_s \quad ۱۲-۲$$

۵-۸-۲- تعیین ظرفیت باربری سنگ‌های ضعیف

برای تعیین ظرفیت باربری سنگ‌های ضعیف با ترک داری بسیار کم از روش بل استفاده می‌شود. اصول مورد استفاده در این روش مانند اصولی است که در مورد سنگ‌های ترک دار استفاده می‌شود. در این روش تحلیل، وزن سنگ در گوه فعال و همچنین محصوریت ایجاد شده سنگ‌های اطراف در محاسبات منظور می‌گردد. ظرفیت باربری مجاز در این روش از رابطه زیر محاسبه می‌شود [۱]:

$$q_a = \frac{C_{f1} C N_c + C_{f2} (B\gamma/2) N_\gamma + \gamma D N_q}{FS} \quad ۱۳-۲$$

در این رابطه B عرض پی، D عمق فرورفتگی پی در زمین، C چسبندگی توده سنگ، C_{f1} و C_{f2} ضرایب تصحیح سنگ پی و N_c و N_γ و N_q ضرایب ظرفیت باربری بوده که از روابط زیر محاسبه می‌شوند:

$$N_c = 2N_\theta^{1/2}(N_\theta + 1) \quad ۱۴-۲$$

$$N_\gamma = 0.5N_\theta^{1/2}(N_\theta^2 - 1) \quad ۱۵-۲$$

$$N_q = N_\theta^2 \quad ۱۶-۲$$

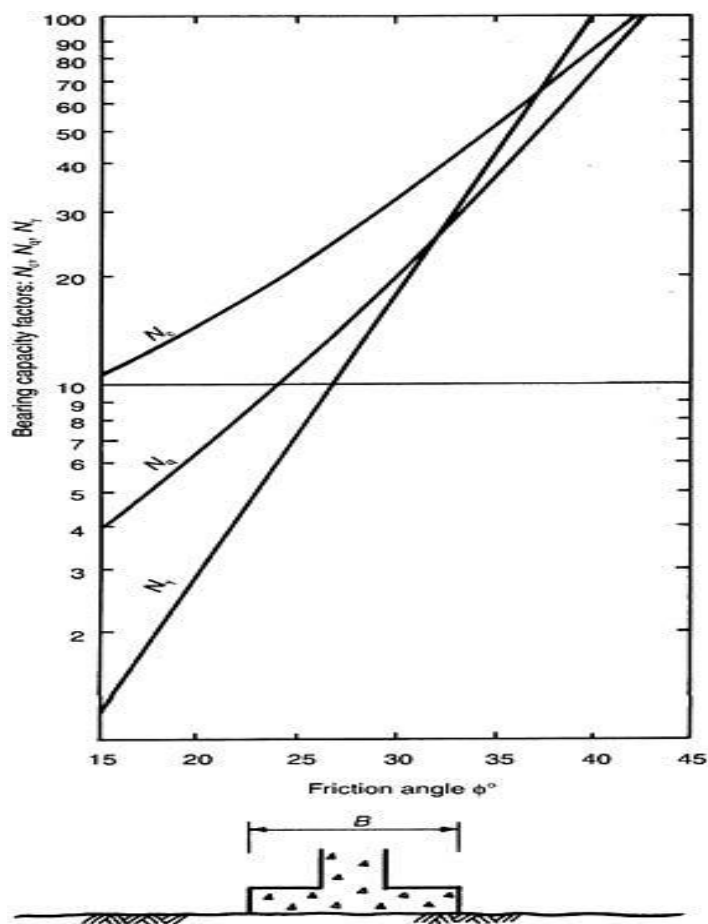
$$N_\theta = \tan^2(45 + \theta/2) \quad ۱۷-۲$$

ضریب N_c تاثیر چسبندگی را نشان می‌دهد، ضریب N_γ نشان دهنده تاثیر وزن خاک و عرض پی و ضریب N_q نشان دهنده تاثیر روباره است.

همانطور که در مورد سنگ‌های شکسته نیز عنوان شد، تحلیل گوه‌های فعال و منفعل، روشی ساده و محافظه کارانه است. از طرف دیگر مقادیر ضرایب ظرفیت باربری به دست آمده از آزمون‌های آزمایشگاهی نشان می‌دهد که مقادیر عملی به مراتب بیش‌تر از مقادیر تئوری است (به‌خصوص در مورد سطوح باربری زیر و زوایای اصطکاک بالا). شکل (۲-۱۰) نمودار مربوط به تعیین ضرایب ظرفیت

باربری براساس زاویه اصطکاک را برای حالت سه گوه ای (ارائه شده توسط ترزاقی ۱۹۴۳) نشان می‌دهد. این مقادیر تجربی کمتر از مقادیر واقعی مربوط به پی بوده و ممکن است با مقادیر محاسبه شده به روش بل نیز متفاوت باشد. فرضیات مربوط روابط بل و این نمودار به شرح زیر است [۱]:

- ۱- بارگذاری عمودی و متمرکز است.
- ۲- عمق مدفون (D) کمتر یا برابر با (B) است.
- ۳- توده سنگ تا عمق مشخصی در زیر سطح برش احتمالی، همگن و یکنواخت است.
- ۴- سطح آب، پایین‌تر از عمق سطح برش است.
- ۵- زاویه اصطکاک و چسبندگی سنگ مشخص است.
- ۶- از اصطکاک و چسبندگی سطوح عمودی پی صرف نظر می‌شود.



شکل ۲-۱۰- ضرایب ظرفیت باربری برای پی‌های واقع بر سطح افقی [۱]

قابل توجه است که رابطه ارائه شده توسط بل را می توان در صورت صرف نظر کردن از وزن سنگ ساده نمود (با شرط $Q_s=0$). به دلیل اینکه وزن سنگ بخش کوچکی از بار پی را به خود اختصاص می دهد، صرف نظر کردن از آن قابل توجیه است. تحت این شرایط این رابطه بل را میتوان به شکل زیر ساده کرد [۱]:

$$q_a = \frac{C_{f1} c N_c}{FS} \quad ۱۸-۲$$

۲-۸-۶- تعیین ظرفیت باربری پی های شیب دار

در حالتی که پی سازه بر روی سطح شیب دار زمین قرار می گیرد، لازم است که ضرایب ظرفیت باربری را به خاطر کاهش فشار جانبی در سمت پایین شیب تصحیح نمود. در مورد شیروانی های کم شیب (با زاویه شیبی کمتر از $\phi/2$)، ظرفیت باربری و نشست، کنترل کننده بار موثر مجاز پی محسوب می شود. در شیروانی های با شیب بیش از $\phi/2$ عمدتاً نیازی به محاسبه ظرفیت باربری نیست، چرا که پایداری شیروانی عامل کنترل کننده بوده و از حساسیت بیش تری برخوردار است (شکل (۲-۱۱)) [۱].

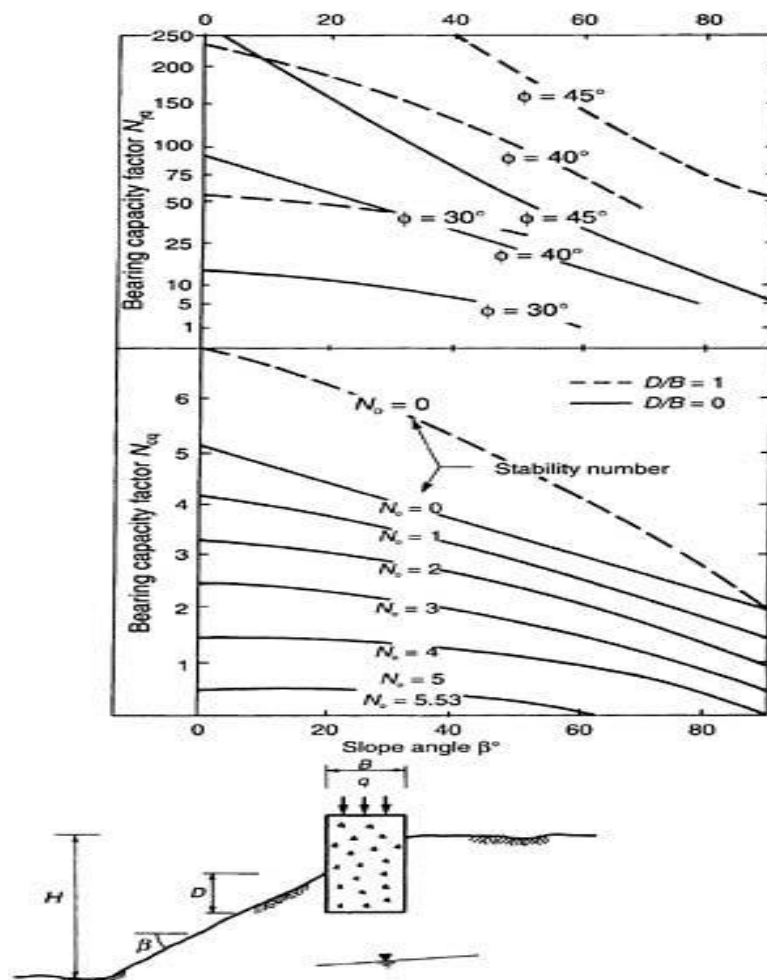
ظرفیت باربری مجاز پی های احداث شده روی سطوح شیب دار از رابطه زیر محاسبه می شود.

$$q_a = \frac{C_{f1} c N_{cq} + (C_{f2} B \gamma / 2) N_{\gamma q}}{FS} \quad ۱۹-۲$$

در این رابطه N_{cq} و $N_{\gamma q}$ ضرایب ظرفیت باربری و C_{f1} و C_{f2} ضرایب تصحیح شکل پی می باشد که در جدول (۲-۴) تعریف شده اند. ضریب N_{cq} بستگی به عدد پایداری (N_0) دارد که از رابطه زیر به دست می آید:

$$N_0 = \frac{\gamma H}{c} \quad ۲۰-۲$$

که در آن γ چگالی سنگ، C چسبندگی توده سنگ و H ارتفاع شیب است.



شکل ۱۱-۲- مقادیر ضرایب ظرفیت باربری پی واقع بر سطح شیب‌دار [۱]

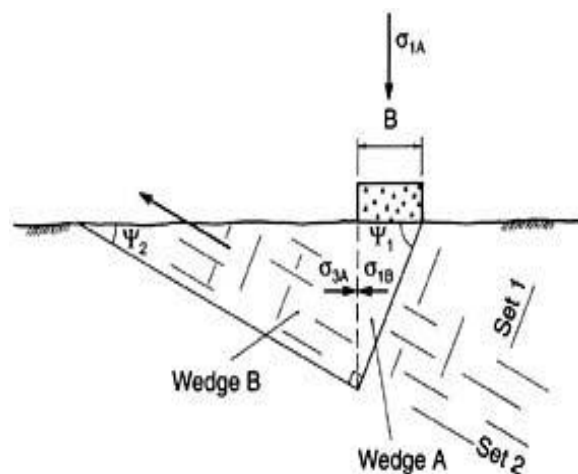
فرض مرتبط با روابط فوق این است که سطح آب زیرزمینی نسبت به سطح پی در عمقی حداقل برابر با عرض پی قرار گرفته است. اگر سطح بالاتر از این حد باشد، تحلیل پایداری را باید با در نظر گرفتن فشار آب منفذی انجام داد. در مورد پی‌هایی که روی سطح صاف تاج یک شیروانی قرار دارند، اگر پی با لبه شیروانی فاصله ای کمتر از ۶ برابر عرض خود در پشت تاج داشته باشد، باید ظرفیت باربری مجاز را کاهش داد. برای پی‌هایی که در خارج از تاج قرار گرفته باشند، در چنین حالتی باید از روش‌های تحلیل پایداری شیروانی‌ها با فاکتور ایمنی ۲ تا ۳ استفاده کرد، بنابراین تغییر شکل‌ها به حداقل خواهد رسید [۱].

۷-۸-۲- تعیین ظرفیت باربری توده سنگ‌های حاوی دسته ناپیوستگی

در تحلیل ارائه شده برای تعیین ظرفیت باربری سنگ‌های شکسته، مکانیزم گسیختگی شامل تشکیل یک گوه منفعل در سنگ بود که تنشی محصور کننده را به گوه فعال اعمال می نمود. مقدار این تنش محصور کننده بستگی به مقاومت توده سنگ (ناشی از سنگ بکر یا قطعات سنگی سالم) دارد. چنانچه توده سنگ حاوی چندین دسته ناپیوستگی باشد و این سطوح یک یا چند وجه گوه را تشکیل دهند، ظرفیت باربری پی به دو دلیل کاهش خواهد یافت. اول این که شکل گوه توسط جهت‌داری ناپیوستگی‌ها تعیین شده و ابعاد و مساحت سطح گوه ممکن است محدود شود. دوم این که مقاومت برشی ناپیوستگی‌ها به مقدار قابل ملاحظه‌ای کمتر از مقاومت توده سنگ است. این شرایط در اثر جابجایی گوه منفعل منجر به گسیختگی پی خواهد شد [۱].

شکل (۱۲-۲) توده سنگی حاوی دو دسته درزه عمود برهم با شیب ψ_1 و ψ_2 را نشان می دهد که به ترتیب تشکیل دهنده کف یک گوه فعال (A) و یک گوه منفعل (B) هستند. تنش اصلی کوچکتر (σ_{3A}) به صورت افقی روی گوه منفعل عمل می کند و به صورت زیر است:

$$\sigma_{3A} = \left(\frac{\gamma B}{2 \tan \psi_1} \right) N_{\phi 2} + \left(\frac{C_2}{\tan \phi_2} \right) (N_{\phi 2} - 1) \quad ۲۱-۲$$



شکل ۱۲-۲- ظرفیت باربری پی احداث شده روی سنگ حاوی دو دسته ناپیوستگی [۱]

با استفاده از این رابطه میتوان ظرفیت باربری مجاز را به صورت زیر تعیین نمود:

$$q_a = \frac{[\sigma_{3A} N_{\phi 1} + (c_1 / \tan \phi_1)(N_{\phi 1} - 1)]}{FS} \quad 22-2$$

در این رابطه B عرض پی، ψ_1 شیب دسته ناپیوستگی ۱، C_1 و C_2 چسبندگی دسته ناپیوستگی‌های ۱ و ۲ و $N_{\phi 1}$ و $N_{\phi 2}$ به صورت زیر محاسبه می شوند:

$$N_{\phi 1} = \tan^2(45 + \phi_1/2) \quad 23-2$$

$$N_{\phi 2} = \tan^2(45 + \phi_2/2) \quad 24-2$$

در روابط فوق ϕ_1 و ϕ_2 به ترتیب زاویه اصطکاک دسته ناپیوستگی‌های ۱ و ۲ هستند.

در حالتی که پی در عمق زمین قرار می گیرد (حالت مدفون)، به خاطر فشار محصور کننده ی گوه منفعل، ظرفیت باربری افزایش می یابد. در چنین حالتی فشار روباره (q_s) در تحلیل وارد شده و رابطه ظرفیت باربری به شکل زیر تصحیح می شود:

$$\sigma_{3A} = \left(q_s + \frac{\gamma B}{2} \tan \psi_1 \right) N_{\phi 2} + \left(\frac{c_2}{\tan \phi_2} \right) (N_{\phi 2} - 1) \quad 25-2$$

۸-۸-۲- تعیین ظرفیت باربری سنگ‌های لایه‌ای

در مواردی که پی بر روی سنگ بستر لایه ای قرار می گیرد، به طوری که لایه زیرین آن ضخامت قابل ملاحظه‌ای داشته و از مقاومت کمتری برخوردار است، احتمال وقوع سه مکانیزم گسیختگی وجود خواهد داشت. پی سازه به داخل لایه مقاوم تر فرو رفته^۱ و یا این که لایه فوقانی به داخل لایه تحتانی شکسته شده یا خمش پیدا کند. در تمام این حالات، اگر لایه تحتانی ظرفیت باربری کمی داشته باشد، ممکن است لایه فوقانی به صورت ناگهانی گسیخته شود [۱].

در شرایطی که لایه فوقانی، دارای مدول الاستیسیته‌ای به مراتب بالاتر از لایه تحتانی باشد، لایه

¹ Punching

فوقانی بخش اعظم بار را تحمل کرده و پایداری پی در درجه اول به ظرفیت باربری این لایه وابسته است. در این حالت روش مرسوم در اولین مرحله طراحی این است که فرض شود لایه فوقانی کل بار را تحمل می کند. این یک فرض محافظه کارانه در طراحی است. در صورتی که بتوان مدول هر دو نوع مصالح را به دقت تعیین نمود، می توان از تحلیل اجزا محدود برای تعیین توزیع تنش در لایه ها استفاده کرد.

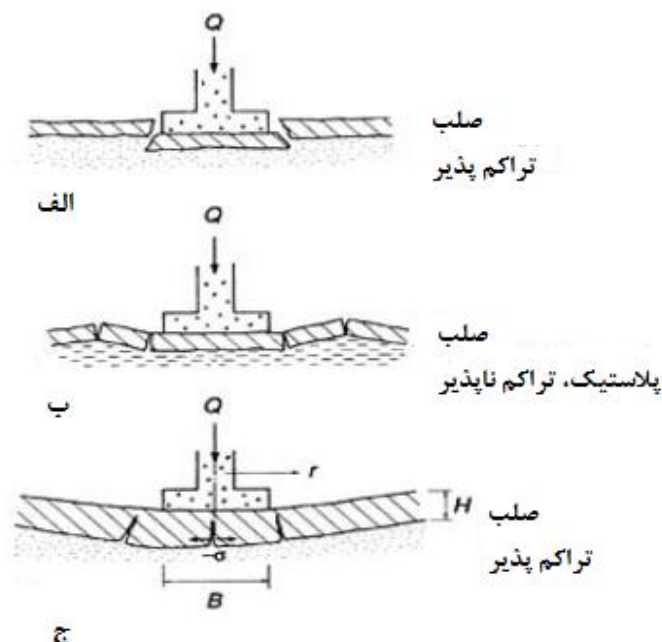
حالت گسیختگی لایه فوقانی بستگی به خصوصیات توده سنگ هر دو لایه و نسبت ضخامت لایه فوقانی (H) به عرض پی (B) دارد. اگر نسبت H/B پایین بوده و لایه تحتانی تراکم پذیر باشد (مثل سنگ هوازده یا متخلخل)، شکست پانچی اتفاق خواهد افتاد. اما اگر این نسبت کم بوده و لایه تحتانی پلاستیک و تراکم ناپذیر باشد (مثل رس یا شیل نرم)، لایه فوقانی کمانش^۱ خواهد نمود. برای مقادیر بیش تر H/B و در صورتی که لایه تحتانی تراکم پذیر باشد، لایه فوقانی خمش خواهد نمود. این سه مکانیزم در شکل (۲-۱۳) قابل مشاهده است. در حالت شکست پانچی، نیروی لازم برای گسیختگی پی حاصل ضرب مقاومت برشی لایه بالایی در مساحت سطح گسیختگی است. این سطح را می توان استوانه ای با مساحتی معادل حاصل ضرب محیط پی در ضخامت لایه در نظر گرفت [۱].

مقاومت برشی لایه فوقانی را میتوان با آزمایش برش مستقیم تعیین نمود. برای این کار نیاز به دستگاهی با ظرفیت بالا می باشد که بتواند سنگ بکر را برش دهد. روش دیگر تعیین مقاومت برشی انجام آزمایش سه محوری و ترسیم پوش موهر است. در بخش هایی از توده سنگ که حالت تنش خمشی وجود دارد، پایداری پی با مقایسه مقاومت کششی سنگ و مقدار تنش کششی موجود در سطح پایینی لایه سنگی ارزیابی می شود. به لحاظ تئوری، تنش های کششی در سطح پایینی لایه فوقانی را میتوان با روش روارک و یانگ^۲ (۱۹۷۰) محاسبه نمود. در این روش فرض شده که لایه باربر به شکل دایره ای بوده و فقط لبه های آن دارای تکیه گاه است (یعنی از طرف لایه تحتانی نگهداری

¹ Buckling

² Roark & Young

نمی شود). تنش کششی (σ_t) در مرکز سطح پایینی یک لایه دایره ای که با بار یکنواخت Q در سطحی با قطر $B/2$ بارگذاری شده از این رابطه تعیین می شود [۱]:



شکل ۲-۱۳- احداث پی گسترده روی لایه های سنگی (لایه فوقانی صلب و لایه تحتانی ضعیف تر است) [۱]
الف- شکست پانچی ب- شکست کمانشی ج- شکست خمشی

$$\sigma_t = \frac{6M}{H^2} \quad ۲۶-۲$$

در این رابطه M لنگر حداکثر در مرکز لایه سنگی بارگذاری شده است و داریم:

$$M = \frac{Q}{4\pi} [(1+\nu) \log_e \left(\frac{r}{r_0}\right) + 1] \quad ۲۷-۲$$

در رابطه بالا Q بار یکنواخت، r شعاع لایه سنگی تحت بار، H ضخامت لایه، ν ضریب پواسون سنگ است. پارامتر r_0 بستگی به نسبت قطر سطح بارگذاری (B) به ضخامت لایه (H) دارد، بنابراین:

$$\text{IF } B > H \quad \text{then} \quad r_0 = \frac{B}{2} \quad ۲۸-۲$$

$$\text{IF } B < H \quad \text{then} \quad r_0 = \left[1.6 \left(\frac{B}{2} \right)^2 + H^2 \right]^{1/2} - 0.675 H \quad 29-2$$

برای استفاده از رابطه اخیر لازم است که مقدار مناسبی برای شعاع لایه (r) در شرایطی که توسط شرایط زمین شناسی و توپوگرافی محل تعیین نمی شود، در نظر گرفت. انجام یک تحلیل حساسیت نشان می دهد که با افزایش شعاع، سطح تنش به مقداری پیش بینی شده خواهد رسید. این همان مقدار تنشی است که باید در طراحی مورد استفاده قرار گیرد.

۲-۸-۹- ظرفیت باربری تشکیلات کارستی

طراحی پی در تشکیلات کارستی یکی از چالش های اصلی پی سازی سنگی است و متأسفانه همچنان نگرانی های زیادی در رابطه با انحلال سنگ های آهکی و تشکیل فروچاله ها وجود دارد. این نوع گسیختگی ها ممکن است به خاطر وجود کارست های کشف نشده در زیر سازه و یا گسترش آن ها بعد از احداث اتفاق افتد. طراحی موفقیت آمیز پی در تشکیلات کارستی منوط به رعایت دو موضوع می باشد؛ یکی تعیین دقیق محل قرارگیری حفرات بوده و دیگری تعیین مقادیر صحیح ظرفیت باربری و روش اجرای مناسب است [۱].

۲-۸-۹-۱- مکانیزم انحلال

تشکیل کارست ها نتیجه انحلال شیمیایی سنگ آهک توسط آب های نفوذی حاوی دی اکسید کربن (CO₂) غیر محلول است. این آب ها خاصیت اسیدی داشته و به مرور باعث انحلال و خوردگی سنگ آهک می شوند. در مراحل اولیه انحلال، حفرات در امتداد درزه ها و سطوح لایه بندی نفوذپذیر تشکیل شده و در نتیجه الگوی تقریباً منظمی دارند. با پیشروی فرآیند انحلال و بزرگ تر شدن حفرات و تبدیل شدن آن ها به غار ها، تخمین محل و شکل آن ها غیر ممکن می شود. بنابراین در مبحث پی سازی در این نوع تشکیلات نیاز به برنامه مطالعاتی تفصیلی و دقیق است. متداول ترین انواع عوارض که در اثر انحلال به وجود می آید در ادامه تشریح شده اند [۱].

۱- شکاف ها و ستون های سنگی^۱: شکاف ها حفراتی باریک و مسطح هستند که در امتداد عوارضی همچون درزه ها و سطوح لایه بندی تشکیل شده و معمولا ستون های سنگی بین آن ها باقی می ماند (شکل (۲-۱۴)-الف). این عوارض در اثر انحلال سنگ در امتداد ترک های قائم و سپس حرکت جانبی آب زیرزمینی در قاعده شکاف ها به وجود می آید. معمولا حداکثر عرض شکاف ها ۱ تا ۲ متر بوده و عمق آن ها به ۱۰ متر هم می رسد. از لحاظ طولی شکاف ها می توانند صد ها متر گسترش داشته باشند. قله های ستون های سنگی اغلب گرد و گنبدی هستند. شکاف ها و ستون های سنگی در چین خوردگی هایی با شیبی تا ۴۵ درجه هم دیده شده اند. در این شکاف ها قسمت بالایی شکاف عمودی است و با افزایش عمق، شیب شکاف کاهش می یابد. در بخش هایی از سنگ آهک که مقاومت بیش تری در مقابل انحلال دارند، ممکن است ستون های سنگی معلق و یا پل تشکیل شود.

شکاف ها به دلیل مشخصات ساختاری قادر نیستند به صورت یک سیستم زهکشی داخلی عمل کرده و آب زیرزمینی را به جریان اندازند، بنابراین پدیده های رگاب و جابجایی رسوبات در این ساختارها کمتر دیده شده است. در نتیجه اغلب لایه ضخیمی از خاک، شکاف ها را پوشش داده و ممکن است هر لحظه با خطر ریزش همراه باشند. این ریزش ها باعث تشکیل فروچاله ها می شوند.

۲- دره های کارستی^۲: در مناطق کارستی، مسیرهای زهکشی سطح به داخل مسیرهای زیرزمینی منحرف شده و باعث تخلیه دره ها می شوند. به عنوان مثال، رودخانه های فرعی^۳ به داخل حفره های مکنده^۴ فرورفته و رودخانه های بزرگ از چشمه های کارستی پدیدار می شوند. اکثر حوزه های زهکشی بزرگ در این مناطق دارای عوامل زهکشی سطحی و زیرزمینی هستند و زمانی که کل جریان به داخل زمین منتقل شود، دره های خشک به وجود می آیند.

¹ Slots and pinnacles

² Karst valleys

³ Tributary Streams

⁴ Swallow Holes

۳- مناطق پست^۱: مناطق کارستی عمدتاً دارای بخش هایی پست و فروچاله هایی هستند که به سمت گودال های بسته^۲ شیب دارند. در این گودال ها آب فقط به صورت زیرزمینی وجود دارد. فروچاله ها به صورت ناگهانی در اثر ریزش لایه های خاک فوقانی و یا به صورت تدریجی در اثر نشست زمین ایجاد می شوند (شکل (۲-۱۴) ب). در بخش هایی از توده سنگ که مسیر های نفوذپذیر باعث شتاب گرفتن پدیده انحلال سنگ و بزرگتر شدن مسیر های زهکشی می شوند، حفرات انحلالی^۳ به وجود می آیند. این فرآیند باعث به وجود آمدن دودکش هایی^۴ می شوند که به شکل قائم، شیب دار یا افقی بوده و توسط مقاومت لایه ها کنترل می شوند و گاهی تا ۱۰۰۰ متر قطر دارند. در مواقعی که یک سنگ مقاوم باعث توقف پیشرفت افقی انحلال می شود، غار به وجود آمده دارای دیوارهای پر شیب و عمق زیاد خواهد بود.

۴- مناطق برآمده: در مقابل فرورفتگی های موجود در مناطق کارستی، عوارض برآمده ای نیز در آن ها وجود دارد که از جمله آن ها می توان به ستون های سنگی مارپیچی و مناره های سنگی اشاره کرد. همچنین می توان به تپه های مخروطی مانند (با دامنه های نزدیک به قائم) و برج مانند (با دامنه های قائم) اشاره کرد. این تپه ها در اثر مقاومت پوش سنگ^۵ آن ها در مقابل انحلال محافظت شده اند.

۵- غارها: غارها ممکن است یک مجرای منفرد یا ترکیبی از چندین مجرای پر پیچ و خم متصل به هم باشد. غارها را می توان به شرح زیر تقسیم بندی کرد [۱]:

الف: مجاری خطی: حفره ای طولانی و مستقیم که در امتداد ناپیوستگی ها تشکیل می شود.

ب: مجاری چند بخشی: شامل چند بخش مستقیم هستند که تحت زوایای تند به هم متصل می شوند. این مجاری از الگوی منطقه ای درزه ها پیروی می کنند.

¹ Negative relief landforms

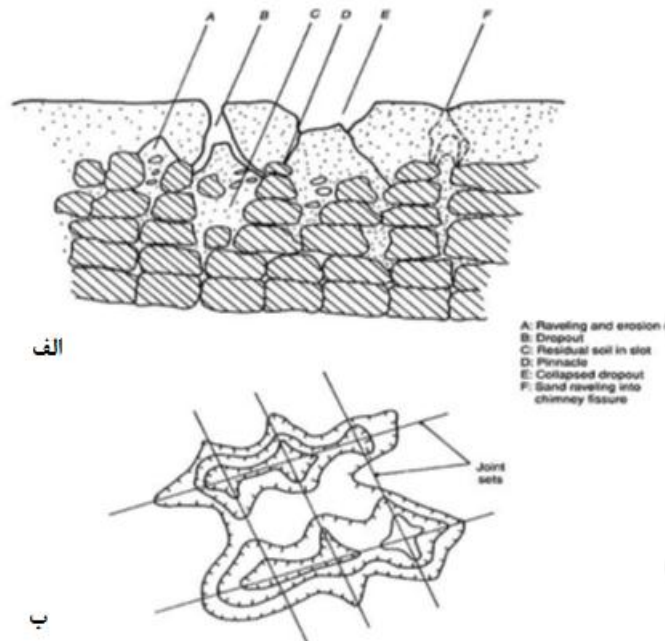
² Closed Depressions

³ Solution Cavities

⁴ pathways

⁵ Caprock

پ: مجاری غیر منظم: این نوع غارها از یک سری مجاری پر پیچ و خم تشکیل شده اند و از هیچ الگوی منظمی پیروی نمی کنند.



شکل ۲-۱۴- مراحل تشکیل فروچاله‌ها [۱]

الف- مقطع عرضی از یک منطقه کارستی ب- نقشه پلان گسترش فروچاله‌ها در امتداد دسته درزه‌ها

۶- خاک‌های برجا: خاک‌های برجا مصالحی هستند که پس از انحلال سن های کربناتی باقی می‌مانند. این خاک‌ها حاوی بخش‌های انحلال ناپذیر سنگ همچون سیلیس (به شکل چرت یا کوارتز)، مواد رسی و اکسید آهن می باشند. خاک برجا پوششی بر روی سنگ به وجود آورده و حفرات و غارها را به صورت موضعی یا به طور کامل پر می کند. گاهی ذرات خاک برجا باعث مسدود شدن مجاری شده و از انحلال بیشتر آن ها در اثر نفوذ آب زیرزمینی جلوگیری می‌کند. به دلیل مهاجرت ذرات ریز و همچنین افزایش رطوبت، معمولا با افزایش عمق، مقاومت خاک‌های برجا کاهش می یابد؛ به طوری که خاک برجای موجود در مجاورت سنگ نرم‌تر بوده و اغلب خمیری است. مرز سنگ و خاک کاملا مشخص بوده و غالبا حاوی قطعات سنگ آهک یا چرت معلق در خاک است. اما در سنگ آهک‌های ماسه دار یا شیلی با بخش ناخالص زیاد، ممکن است بقایای برخی ساختارها دیده شده و

سطح سنگ دارای یک منطقه شدیداً هوازده آهکی باشد. در بسیاری از مناطق، خاک های برجا توسط رسوبات، آبرفت ها و یخرفت ها پوشیده شده اند.

۲-۸-۹-۲- شناسایی حفرات کارستی

شناسایی و تعیین محل حفرات کارستی شامل استفاده از چندین روش جامع می شود. این روش ها شامل جمع آوری تجارب و مطالعات قبلی، عکس های هوایی برای شناسایی سایت، مطالعات ژئوفیزیک و درنهایت حفاری برای طراحی های جزئی می باشد. در مناطقی که وجود حفرات انحلالی شناسایی شده، چالهایی را حفاری می کنیم. از عکس های هوایی می توان برای شناسایی زمین های کارستی که توسط بعضی از ویژگی های توپوگرافی نشان داده شده استفاده کرد. روش های ژئوفیزیکی در شناسایی حفرات کارستی و پیش بینی شکل آن ها محدودیت دارند، زیرا این حفرات اغلب در عمق های مختلفی بوده و شکل های نامنظمی دارند. همچنین این حفرات می توانند توسط مواد مختلفی مانند؛ هوا، آب، رس و تکه سنگ ها پر شوند. به همین دلیل حفاری اغلب برای طراحی نهایی انجام می شود [۱].

حفاری با مته الماسه قابل اعتمادترین روش بررسی زمین های کاستی می باشد. به این دلیل که قادر است بین بستر سنگی، خرده سنگ ها و پرکننده خاک تفاوت قائل شود و نمونه هایی را برای تست های مقاومتی به دست آورد. حفاری ضربه ای که سریع تر و کم هزینه تر از حفاری با مته الماسه است به عنوان یک روش مکمل استفاده می شود. به عنوان یک راهنمایی در تعداد چال هایی که برای بررسی یک پی لازم است، می توان نشان داد که اگر یک حفره انحلالی ۱۰ درصد سطح باربری را تشکیل دهد، بنابراین ۱۶ چال با فاصله یکسان نیاز است تا در مورد شناسایی خصوصیات آن ها مطمئن شویم. اگر ۵ چال حفر شود احتمال شناسایی حفرات به ۵۰ درصد کاهش می یابد. پی سازی بر روی تشکیلات کارستی معمولاً با اقدامات ترمیمی هم چون تزریق با فشار، تزریق تراکمی، تزریق با جت و یا کندن مناطق سست و پرکردن مجدد آن ها با بتن همراه است. در مورد حفره های کوچک

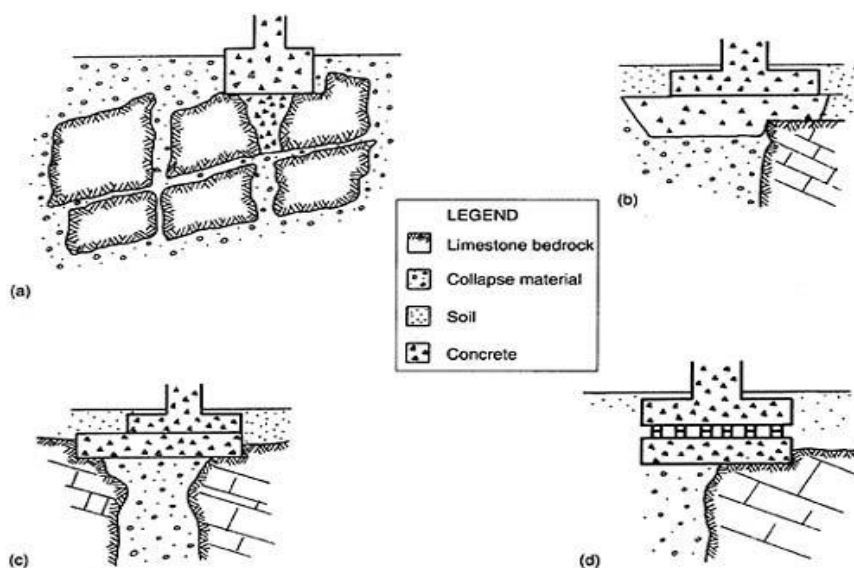
که سنگ پیرامون سالمی دارند، این امکان وجود دارد که پی را طوری طراحی و مسلح نمود که همانند یک پل بر روی حفره قرار گیرد [۱].

۲-۸-۹-۳- انواع پی در محیط‌های کارستی

طراحی موفق پی نیازمند تعیین مکان حفرات انحلالی برای این که سازه جای مناسبی واقع شود و تعیین مقدار باربری مناسب و روش ساخت و اجرای پی است. انواع پی‌های مناسب برای تشکیلات کارستی عبارتند از [۱]:

۱- پی سطحی: در این حالت میتوان با شناسایی حفرات سطحی و تزریق ملات بستر مناسبی برای ایجاد پی ایجاد کرد. اتکای پی روی بستر سنگی کم عمق است. در شکل (۲-۱۵-a) نمونه ای از آن مشاهده می‌شود. مزیت اصلی این روش مقرون به صرفه بودن و دردسترس بودن آن است.

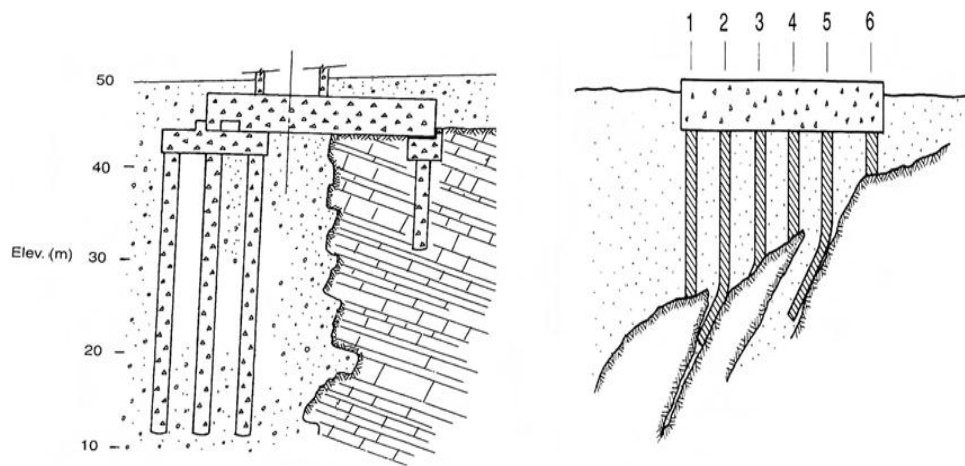
۲- پی بهبود یافته^۱: با ایجاد یک بستر کمکی متکی به بستر سنگی موجود، شرایط برای یک پی سطحی آماده می‌شود. معایب و مزایای آن همانند پی سطحی است و نسبت به پی‌های سطحی ارزان تر است. در شکل (۲-۱۵-c-a) نمونه‌هایی از اجرای پی‌های سطحی مشاهده می‌شود.



شکل ۲-۱۵- انواع پی‌های سطحی و بهبود یافته در محیط کارستی [۱]

¹ Treatment foundation

۳- پی عمیق: در این حالت عمق پی بیش از دو برابر عرض پی است. با اجرای شمع هایی نیرو به بستر سنگی عمیق منتقل می شود. در شکل (۲-۱۶) نمونه ای از اجرای پی های عمیق مشاهده می شود.



شکل ۲-۱۶- پی عمیق در تشکیلات کارستی [۱]

۲-۸-۱۰- تعیین ظرفیت باربری با استفاده از روش سرانو و اولالا

در این روش سرانو و اولالا^۱ ظرفیت باربری نهایی توده سنگ را با استفاده از معیار شکست غیر خطی هوک-براون محاسبه نموده اند. این معیار در مورد سنگ های بکر، سنگ های حاوی ناپیوستگی های متعدد و توده سنگ های درزه دار معتبر است. این روش پی های مدفون، بارگذاری های مورب و قرارگیری پی بر روی سطوح شیب دار را در بر می گیرد. روابط مختلفی برای تعیین ظرفیت باربری پی های سنگی توسط سرانو و اولالا ارائه شده است که در ادامه تشریح می شود.

۲-۸-۱۰-۱- قابلیت کاربرد روش

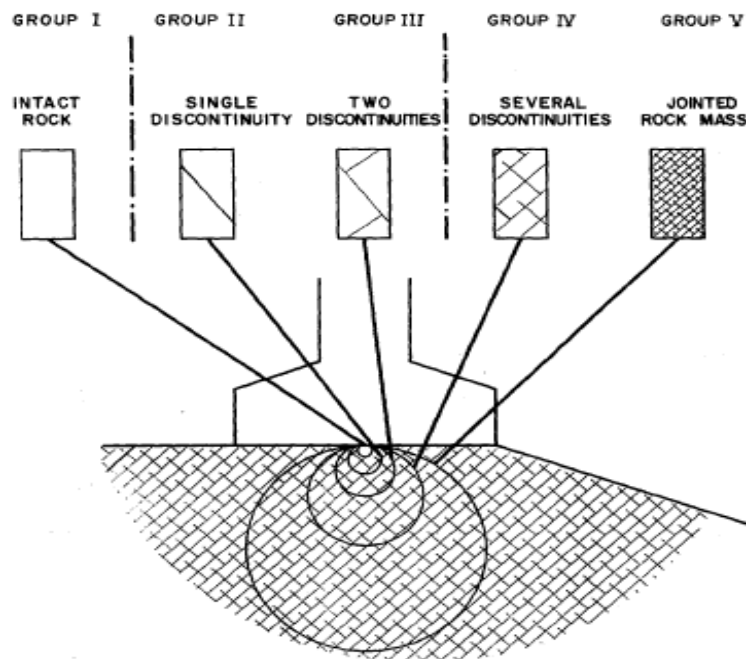
شکل (۲-۱۷) چگونگی استفاده از این معیار را برای طراحی پی های کم عمق به صورت شماتیک نشان می دهد. در این رابطه سنگ ها بر اساس تعداد دسته درزه ها به ۵ گروه تقسیم می شوند که بسته به شرایط پی و ابعاد آن میتوان، معیار سرانو و اولالا را در مورد آن ها به شرح زیر به کار برد [۲۴]:

¹ A. Serrano & C. Olalla

گروه I (سنگ بکر): درمورد این سنگ ها معیار هوک-براون معتبر بوده و می توان تحت شرایطی تئوری سرانو و اولالا را در مورد آن ها به کار برد.

گروه های II و III (سنگ های حاوی یک یا دو دسته ناپیوستگی): سنگ هایی که حاوی دسته ناپیوستگی های کمی هستند ناهمسانگرد عمل کرده و معیار هوک-براون را نمیتوان به طور عمومی در مورد آن ها معتبر دانست. بنابراین تئوری سرانو و اولالا نیز در این گروه قابل استفاده نیست.

گروه های IV و V (سنگ های حاوی چندین دسته ناپیوستگی): این سنگ ها تقریبا همسانگرد عمل کرده و معیار هوک-براون در موردشان معتبر است. تئوری سرانو و اولالا در مورد این سنگ ها بدون هیچ محدودیتی کاربرد دارد.



شکل ۲-۱۷- تاثیر مقیاس بر انتخاب مدل رفتار توده سنگ در طراحی پی های کم عمق واقع بر شیب های سنگی [۲۴]

۲-۱۰-۸- ظرفیت باربری نهایی براساس معیار اولیه هوک و براون (۱۹۹۴)

در سال ۱۹۹۴ سرانو و اولالا روش جامعی را برای تعیین ظرفیت باربری پی های سنگی بر اساس معیار هوک-براون ارائه کردند. معیار شکست اولیه هوک-براون به صورت زیر می باشد [۱۰]:

$$\frac{\sigma_1 - \sigma_3}{\sigma_{ci}} = \left(m \frac{\sigma_3}{\sigma_{ci}} + s \right)^{0.5} \quad ۳۰-۲$$

در این رابطه σ_1 و σ_3 تنش های اصلی حداکثر و حداقل و σ_{ci} مقاومت فشاری تک محوره سنگ بکر می باشد. m و s ثوابت هوک- براون بوده که به نوع سنگ و میزان شکستگی وابسته است.

سرانو و اولالا رابطه ی زیر را برای محاسبه ظرفیت باربری نهایی پی های سنگی ارائه کردند [۱۰]:

$$q_u = \beta(N_\beta - \xi) \quad ۳۱-۲$$

β و ξ پارامترهای ژئومکانیکی توده سنگ است که با استفاده از ثوابت هوک-براون به صورت زیر به دست می آید.

$$\beta = \frac{m \sigma_{ci}}{8} \quad , \quad \xi = \frac{8s}{m^2} \quad ۳۲-۲$$

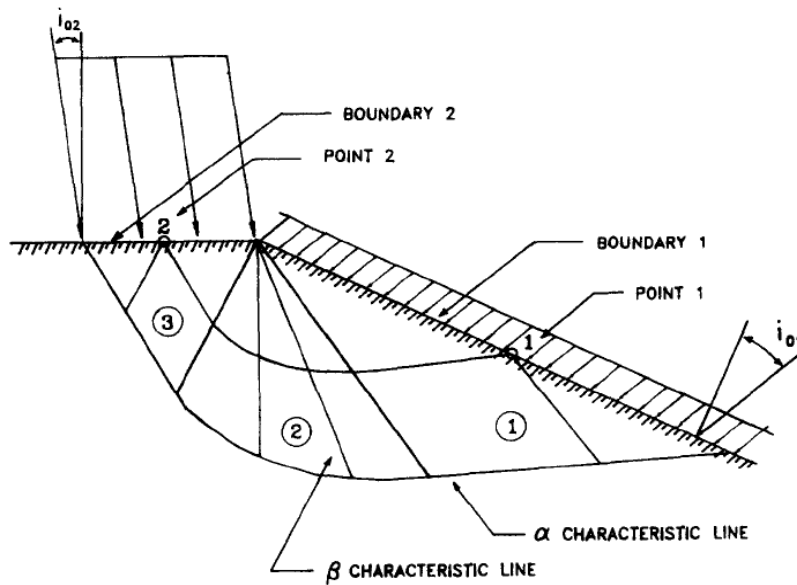
ضریب N_β را می توان براساس جداول، نمودار و روابط موجود محاسبه کرد. برای این منظور به صورت زیر عمل می کنیم.

$$N_\beta = \cos i_2 \left[\cos i_2 \frac{\cot^2 \rho}{2} + \frac{1 - \sin \rho}{\sin \rho} \times \sqrt{1 - \left(\frac{\sin i}{2 \tan \rho \tan \mu} \right)^2} \right] \quad ۳۳-۲$$

در اینجا i_2 زاویه موثر ظرفیت باربری نهایی و ρ زاویه اصطکاک آنی در زیر این بار است. متغیر μ به صورت زیر تعریف می شود:

$$\mu = \frac{\pi}{4} - \frac{\rho}{2} \quad ۳۴-۲$$

شبکه مشخصه در زیر پی به همراه سایر پارامترهای مربوطه در شکل (۲-۱۸) دیده می شود.



شکل ۲-۱۸- شبکه مشخصه در زیر پی [۱۰]

در حالت ساده شده در صورتی که بار اعمالی بر سطح خارجی مرز ۱ به صورت عمودی باشد. بار خارجی نرمال شده بر مرز ۱ را می توان به صورت زیر محاسبه کرد:

$$\sigma_{01}^* = \left(\frac{\sigma}{\beta} + \xi \right) = \frac{\cot^2 \rho_1}{2} - \frac{1 - \sin \rho_1}{\sin \rho_1} \quad ۳۵-۲$$

با استفاده از این معادله میتوان زاویه اصطکاک آنی در مرز ۱ را به صورت زیر محاسبه کرد:

$$\rho_1 = \sin^{-1} \left(\frac{1}{1 + \sqrt{2\sigma_{01}^*}} \right) \quad ۳۶-۲$$

بنابراین اینوریانت ریمن^۱ به صورت زیر به دست می آید:

$$I(\rho_1) = \frac{1}{2} \left[\cot \rho_1 + \ln \cot \frac{\rho_1}{2} \right] \quad ۳۷-۲$$

در صورتی که ظرفیت باربری عمود بر سطح باشد، به مرز ۲ نیز بر می گردد. در این صورت خواهیم داشت:

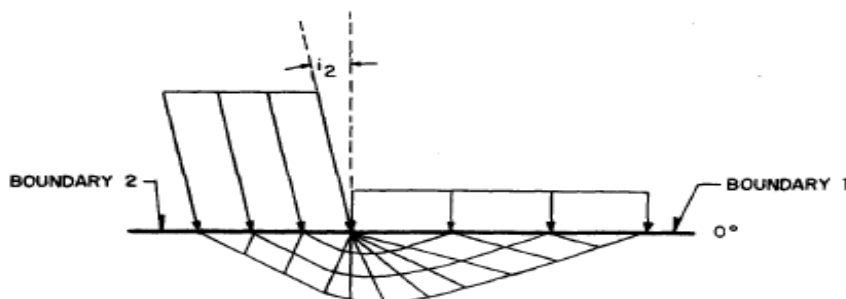
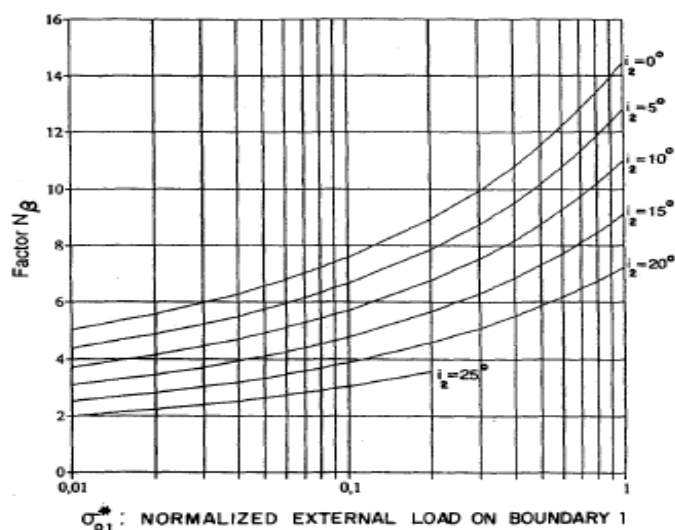
¹ Riemann's invariant

$$I(\rho_1) = \frac{1}{2} \left[\cot \rho_1 + \ln \cot \frac{\rho_1}{2} \right] \quad ۳۸-۲$$

$$I(\rho_2) = I(\rho_1) + \frac{\pi}{2} - \alpha \quad ۳۹-۲$$

$$N_\beta = \frac{\cot^2 \rho_2}{2} + \frac{1 - \sin \rho_2}{\sin \rho_2} \quad ۴۰-۲$$

همچنین برای سهولت کار در تعیین ضریب N_β در منابع مختلف جداول و نمودگرام هایی ترسیم شده است و میتوان از آن ها استفاده کرد. نمونه ای از این نمودگرام ها برای زمین افقی در شکل (۲-۱۹) دیده می شود. همچنین نمودگرام هایی از این نوع برای شرایطی که زمین شیب دار بوده و برای زاویه شیب های ۵، ۱۰ و ۱۵ درجه وجود دارد [۱۰].



شکل ۲-۱۹- مقدار ضریب بار (N_β) برحسب مقدار بار خارجی نرمالیزه شده وارد بر مرز ۱ و بار مورب اعمال شده روی مرز ۲ (برای زمین افقی $\alpha=0$) [۱۰]

۲-۸-۱۰-۳- ظرفیت باربری نهایی براساس معیار اصلاح شده هوک و براون (۲۰۰۰)

در روش قبل که برای تعیین ظرفیت باربری پی های سنگی ارائه شد از معیار اولیه هوک-براون برای تعیین ظرفیت باربری پی های سنگی استفاده شده است. هوک و همکاران معیار اولیه را برای کاربرد در محیط های به شدت درزه دار اصلاح کرده و از توان جدیدی (n) با دامنه تغییرات بین ۰/۵ تا ۰/۶۵ استفاده کردند. یک مقدار از توان $n=0.5$ بیانگر معیار شکست اولیه خواهد بود. معیار شکست جدید و پارامترهای آن به صورت زیر می باشد [۲۶]:

$$\frac{\sigma_1 - \sigma_3}{\sigma_{ci}} = \left(m \frac{\sigma_3}{\sigma_{ci}} + s \right)^n \quad ۴۱-۲$$

$$m = m_0 \exp\left(\frac{GSI - 100}{28}\right) \quad ۴۲-۲$$

$$S = \exp\left(\frac{GSI-100}{9}\right) \quad ۴۳-۲$$

$$n = \frac{1}{2} + \frac{1}{6} \left(e^{-GSI/15} - e^{-20/3} \right) \quad ۴۴-۲$$

در این روابط GSI اندیس مقاومت زمین شناسی بوده که توسط هوک و همکاران ارائه شد و m_0 پارامتر مربوط به سنگ بکر می باشد.

سرانو و اولالا در سال ۲۰۰۰ براساس معیار اصلاح شده نسخه ی جدیدی از رابطه خود برای تعیین ظرفیت باربری پی های سنگی را ارائه کردند که به صورت زیر می باشد [۲۶]:

$$q_u = \beta_n (N_\beta - \xi_n) \quad ۴۵-۲$$

β_n و ξ_n ثابت های توده سنگ بوده و به n ، m ، s و σ_c وابسته هستند و به صورت زیر به دست می آیند.

$$K = \left(\frac{1-n}{n} \right) \quad ۴۶-۲$$

$$A_n^k = \frac{m(1-n)}{2^{\frac{1}{n}}} \quad 47-2$$

$$A_n = (A_n^k)^{\frac{1}{k}} \quad 48-2$$

$$\beta_n = A_n \sigma_c \quad 49-2$$

$$\xi_n = \frac{s}{m A_n} \quad 50-2$$

ضریب N_β مطابق آن چه برای روش قبل گفته شد با استفاده از جداول، نمودگرام و روابط قابل محاسبه است. با جایگزین کردن پارامترهای مورد نیاز و حل معادله (۵۱-۲) ضریب N_β به دست می آید.

$$N_\beta = \cos i_{02} \left(\frac{1 - \sin \rho_2}{K \sin \rho_2} \right)^{1/k} \left[n \left(\frac{1 + \sin \rho_2}{\sin \rho_2} \right) \cos i_{02} + \sqrt{1 - \left(n \left(\frac{1 + k \sin \rho_2}{\sin \rho_2} \right) \sin i_{02} \right)^2} \right] \quad 51-2$$

در حالت ساده شده در صورتی که بار خارجی اعمال شده بر روی مرز ۱ به صورت عمود بر سطح اعمال شود، بار خارجی نرمال شده وارد بر این مرز به صورت زیر به دست می آید:

$$\sigma_{01}^* = \frac{\sigma_1}{\beta_n} + \xi_n = \left(\frac{1 - \sin \rho_1}{k \sin \rho_1} \right)^{1/k} \left[n \left(\frac{1 + \sin \rho_1}{\sin \rho_1} \right) - 1 \right] \quad 52-2$$

σ_1 بار خارجی وارد بر مرز ۱ یعنی محدوده اطراف سازه می باشد.

همچنین در صورتی که بار اعمال شده بر پی نیز عمود بر مرز باشد. روابط زیر را برای محاسبه اینوریانت ریمن زاویه اصطکاک آنی در مرز ۱ و ۲ داریم:

$$I_n(\rho) = \frac{1}{2k} \left[\cot \rho + \ln \left(\cot \left(\frac{\rho}{2} \right) \right) \right] \quad 53-2$$

$$I_n(\rho_2) = I_n(\rho_1) + \frac{\pi}{2} - \alpha \quad ۵۴-۲$$

بنابراین در حالت ساده شده که بار به صورت عمودی بر مرزهای خارجی اعمال شوند، N_β را میتوان به صورت زیر محاسبه کرد:

$$N_\beta = \left(\frac{1 - \sin \rho_2}{K \sin \rho_2} \right)^{1/k} \left[n \left(\frac{1 + \sin \rho_2}{\sin \rho_2} \right) + 1 \right] \quad ۵۵-۲$$

مقادیر ضریب N_β برای مقادیر مختلف توان n در یک زمین افقی با بارهای خارجی قائم در جدول (۵-۲) نشان داده شده است.

جدول ۵-۲- مقادیر ضریب N_β برای مقادیر مختلف توان n در یک زمین افقی با بارهای خارجی قائم [۲۶]

σ_{01}^*	0.50	0.55	0.60	0.65
0	2.66	2.21	1.66	1.06
10^{-6}	2.89	2.25	1.75	1.24
10^{-5}	3.01	2.34	1.87	1.40
10^{-4}	3.30	2.54	2.13	1.74
5×10^{-4}	3.65	2.88	2.51	2.20
10^{-3}	3.86	3.10	2.77	2.53
5×10^{-3}	4.56	3.96	3.73	3.66
10^{-2}	5.00	4.53	4.39	4.45
2×10^{-2}	5.54	5.27	5.27	5.53
4×10^{-2}	6.26	6.23	6.45	7.01
0.1	7.54	7.96	8.67	9.88
0.2	8.90	9.78	11.07	13.08
0.4	10.77	12.26	14.39	17.62
0.7	12.81	14.97	18.04	22.69
1	14.45	17.14	20.98	26.84

۲-۸-۱۰-۴- ظرفیت باربری مجاز براساس روش سرانو و اولالا

پس از به دست آوردن ظرفیت باربری نهایی، قدم بعدی در نظر گرفتن یک فشار باربری مجاز است. این فشار باید به اندازه کافی از فشار باربری نهایی کمتر باشد تا سازه در یک سطح ایمنی مناسب قرار گیرد. این هدف با در نظر گرفتن یک ضریب اطمینان (FS) عمومی قابل دسترسی است. بزرگی این ضریب اطمینان به احتمال شکست پی (P_0) بستگی دارد و همواره از یک بزرگتر است. ظرفیت باربری مجاز از تقسیم ظرفیت باربری نهایی بر ضریب اطمینان به دست می آید [۲۴].

عموما در مسائل مهندسی پی، برای حالات عادی (به جز موارد استثنایی مثل نیروگاه های هسته ای، تاسیسات تولید سموم و سایر تاسیساتی که با ریسک بالا همراهند) احتمال شکست را 10^{-4} در نظر می گیرند. در مورد پی های ساحلی، احتمالات بالاتر تا 10^{-2} نیز مد نظر قرار می گیرند. ضریب اطمینان باید عدم قطعیت و شک و تردید های مربوط به دو مساله زیر را پوشش دهد [۲۴]:

- ۱) متغیر های آماری پارامترهای توده سنگ ($RMR, m., \sigma_c$) در همه شرایط و حالات.
- ۲) میزان تطابق مدل شکست انتخابی با حالت واقعی (فقط در مواقعی که شکست شکننده داریم).

بنابراین ضریب اطمینان را می توان حاصل ضرب دو عامل زیر دانست.

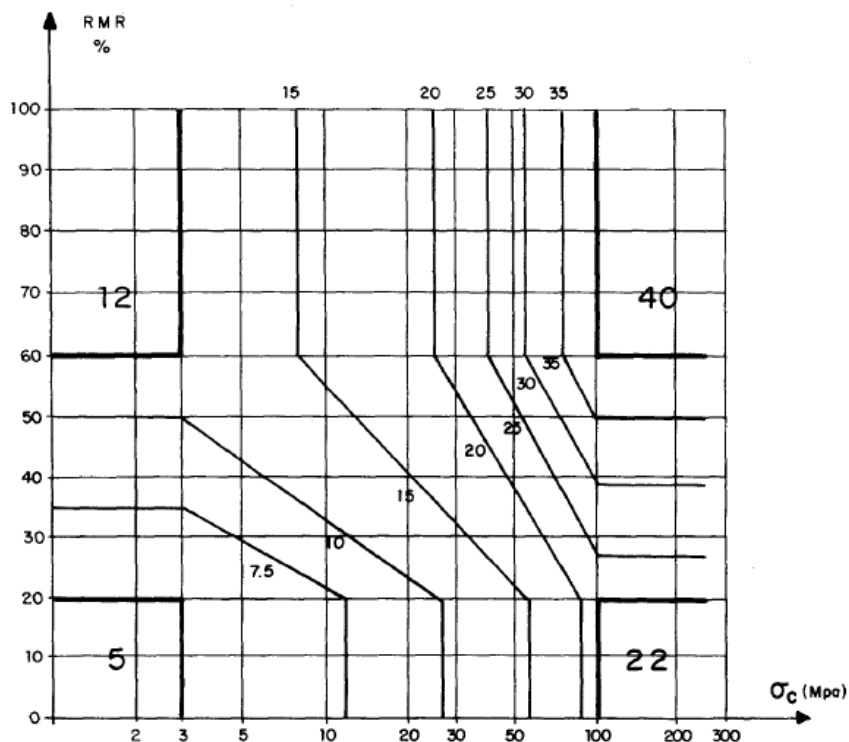
$$F = F_p \cdot F_m \quad ۵۶-۲$$

عامل F_p مربوط به تغییرات پارامترهای توده سنگ بوده و عامل F_m احتمال شکست شکننده یک قسمت یا کل پی را نشان می دهد. ضریب F_m در حالتی که رفتار شکننده داریم منظور می شود و برای رفتار پلاستیک سنگ (برای گروه های IV، V انواع سنگ ها و سنگ های نرم گروه I) مساوی یک در نظر گرفته می شود. بسته به ابعاد پی، این مساله قابل قبول است که برای $\sigma_c = 100 \text{ MPa}$ طبیعت سنگ رفتاری کاملا شکننده دارد. و مقدار F_m باید ۵ یا ۸ در نظر گرفته شود. برای شرایطی که $\sigma_c = 12/5 \text{ MPa}$ باشد، رفتار توده سنگ می تواند کاملا نرم بوده و بنابراین F_m ، یک فرض شود. ضریب ایمنی موضعی^۱ پارامترها (F_p) براساس مطالعات آماری در مورد پارامترهای RMR، σ_c و m. در شکل (۲-۲۰) پیشنهاد شده است.

۲-۸-۱۰-۵- ظرفیت باربری نهایی با در نظر گرفتن اثر وزن توده سنگ

روابطی که توسط سرانو و اولالا ارائه شد و تا اینجا به آن ها پرداختیم فاقد اثر وزن توده سنگ

¹ Partial safety factors



شکل ۲-۲۰- ضریب ایمنی موضعی (F_p) پیشنهاد شده [۲۴]

بود. در سال ۲۰۱۴ آقای اولالا رابطه جدیدی را برای محاسبه ظرفیت باربری توده سنگ ارائه نمود. در این حالت عبارت دیگری در رابطه ظرفیت باربری نهایی باید مورد توجه قرار گیرد تا نقش مهم و بدیهی وزن توده سنگ در روابط اعمال شود. بنابراین ظرفیت باربری نهایی با در نظر گرفتن وزن توده سنگ به صورت زیر می باشد [۲۰]:

$$q_u = \beta(N_\beta - \xi) + \frac{1}{2} \gamma B N_\gamma \quad ۵۷-۲$$

در این رابطه γ وزن مخصوص توده سنگ، B عرض پی و N_γ فاکتور باربری قدیمی می باشد که از روابط موجود قابل محاسبه است. سایر پارامترها قبلاً بررسی شده اند.

۲-۸-۱۱- تعیین ظرفیت باربری با استفاده از روش کولهاوی و کارتر^۱

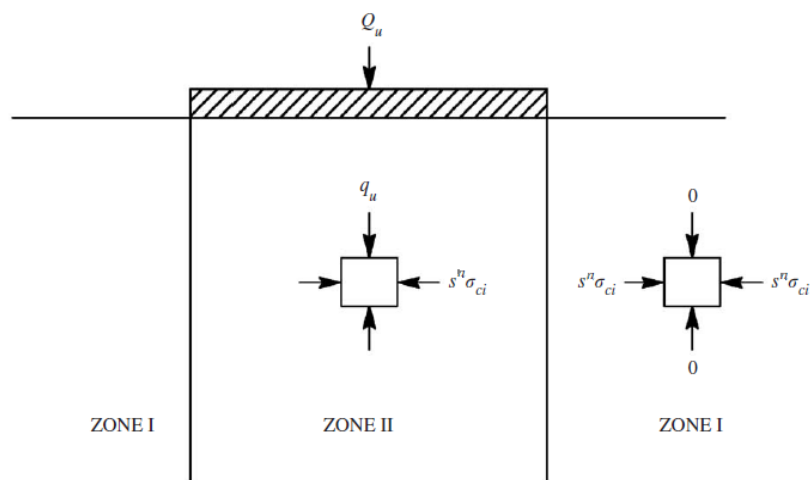
کولهاوی و کارتر یک راه حل حد پایین ساده برای تعیین ظرفیت باربری توده سنگ‌ها براساس معیار شکست غیر خطی هوک-براون ارائه کردند. جزئیات میدان تنش حد پایین در شکل (۲-۲۱)

¹ Kulhawy & Carter

نشان داده شده است. یک میدان تنش از بار گسیختگی (q_u) با یافتن میدان تنشی که حد تعادل و معیار شکست را ارضا کند محاسبه می شود. همانطور که در شکل دیده می شود توده سنگ زیر پی نواری به دو ناحیه تقسیم شده است. تنش قائم σ_3 در ناحیه‌ی یک فرض می شود صفر باشد (دارای وزن مخصوص بسیار کم)، در حالی که تنش افقی (σ_1) برابر با مقاومت فشاری غیر محصور توده سنگ خواهد بود. برای حالت تعادل، پیوستگی تنش نرمال در طول ناپیوستگی بین نواحی باید برقرار باشد. ظرفیت باربری پی نواری از معیار شکست غیر خطی هوک و براون و با ($\sigma_3 = S^n \sigma_{ci}$) به صورت زیر قابل محاسبه است [۷]:

$$q_u = [S^n + (m S^n + S)^n] \sigma_{ci} \quad ۵۸-۲$$

در این رابطه m ، n و پارامترهای هوک-براون و σ_{ci} مقاومت فشاری سنگ بکر می باشد.



شکل ۲-۲۱- راه حل حد پایین برای ظرفیت باربری پی‌های سنگی [۷]

۲-۸-۱۲- تعیین ظرفیت باربری با استفاده از روش عددی

روش های عددی^۱ در حل مسائل مهندسی می‌توانند کاربردهای زیادی داشته باشند. در گذشته به علت نبود امکانات رایانه ای کافی و همچنین زمان بر بودن انجام محاسبات، بیشتر از روابط تجربی استفاده شده است. باید توجه داشت که حل دقیق مسائل مهندسی سنگ با استفاده از روش های

¹ Numerical Method

تجربی و عددی به تنهایی ممکن نیست. ترکیب این دو روش، می تواند طراح را در حل مسائل پیچیده کمک کند. اساس روش های عددی، تبدیل یک محیط با بی نهایت درجه آزادی به محیطی با درجه آزادی محدود در تعداد معینی از نقاط محیط است.[۳۳].

مهم ترین مشخصه تحلیل های عددی این است که امکان مدلسازی ناپیوستگی ها و پارامترهای مختلف را فراهم نموده و مشخص می کند که جابجایی ناشی از بارگذاری به چه صورتی است. دقت اینگونه روش ها بستگی به قدرت و قابلیت نرم افزارهای مورد استفاده دارد. امروزه با توسعه علم کامپیوتر، نرم افزارهای فوق العاده قدرتمندی برای تحلیل تنش و کرنش در کاربردهای مختلف تهیه و به بازار عرضه شده است. به طور کلی روش های عددی به روش های پیوسته، گسسته و ترکیبی تقسیم می شوند. روش های پیوسته شامل روش المان محدود^۱، تفاضل محدود^۲ و المان مرزی^۳ و روش های گسسته شامل روش المان مجزا^۴ می باشند[۳۳]. بسته به نوع مساله و شرایط حاکم بر آن از روش مناسب برای تحلیل ها استفاده می شود. همچنین با استفاده از روش های عددی میتوان شرایط خاص و مواردی که با روش های دیگر قابل بررسی نیستند را مورد بررسی قرار داد.

۹-۲- نتیجه گیری

طبق تعریف پایین ترین قسمت سازه (شامل المان های سازه ای و زمین زیر آن) که نیروها و لنگرهای ناشی از بخش فوقانی سازه و سرباره ها را طوری به خاک یا سنگ بستر زیرین منتقل می کند که تنش های بیش از حد و نشست های اضافی در زمین ایجاد نشود، پی نام دارد. در واقع پی یک عامل انتقالی بین روسازه و زمین است و زمین نقش تکیه گاه را دارد. در حالت کلی پی ها را میتوان به دو دسته پی های سطحی و پی های عمیق تقسیم بندی کرد. پی مخازن ذخیره سازی نفت خام در جزیره خارک از نوع پی های سطحی می باشند.

¹ Finite Element Method

² Finite Difference Methods

³ Boundary Element Methods

⁴ District Element Methods

طبق نظر لادانی حالت های شکست پی های سنگی شامل توسعه شکستگی از طریق رشد ترک ، خرد شدن سنگ، سوراخ شدن (منگنه شدن) از طریق بسته شدن فضاهای خالی و شکست برشی می باشد. از طرف دیگر در تشکیلات لایه ای سه مکانیزم شکست پانچی، شکست کمانشی و شکست خمشی وجود دارد. در ساختگاه مخازن ذخیره سازی نفت خام در جزیره خارک از آنجایی که لایه سنگ آهک مرجانی مدول الاستیسیته ای به مراتب بالاتر از سنگ مارن زیرین دارد، لایه سنگ آهک مرجانی بخش اعظم بار را تحمل کرده و پایداری پی در درجه اول به ظرفیت باربری این لایه وابسته است. در این حالت با توجه به ضخامت نسبتا کم سنگ آهک مرجانی و رفتار پلاستیک و تراکم پذیری بسیار پایین سنگ مارن شکست کمانش محتمل تر است و لایه سنگ آهک مرجانی کمانش خواهد نمود.

روش های تعیین ظرفیت باربری پی های سنگی شامل استفاده از آیین نامه های ساختمانی، روش های تجربی، روش های تحلیلی و روش های عددی می باشند. در این فصل تمامی روش ها و پارامترهای آن ها به طور کامل تشریح شد. در فصل های بعدی از این روش ها برای تعیین ظرفیت باربری پی های سنگی مخازن ذخیره سازی نفت خام در جزیره خارک استفاده می شود.

۳- فصل سوم

نشست و توزیع تنش در پی‌های سنگی

محاسبات نشست نقش مهمی را در طراحی و اجرای پی دارد. نشست زیاد پی ممکن است باعث ایجاد صدمه و یا ایجاد اختلال در برنامه بهره برداری سازه شود. جابجایی پی‌های سنگی نیز همانند پی‌های واقع بر روی خاک معمولاً در طراحی کنترل می‌شوند. اما در توده‌های سنگی به دلیل طبیعت ناپیوسته‌ای که دارند باید مدلی اختیار شود که خواص ماده سنگ و ناپیوستگی را مدنظر قرار دهد. علاوه بر نشست، توزیع تنش در پی نیز باید مورد توجه قرار گیرد. به عنوان یک پیش فرض توزیع تنش در پی را میتوان مجموعه‌ای از تنش‌های ناشی از وزن سازه و تنش‌های ناشی از لنگرها در نظر گرفت.

در طراحی پی‌های سطحی، به خصوص وقتی که پی روی خاک سطحی قرار می‌گیرد، همواره احتمال نشست وجود دارد. معمولاً نشست که ناشی از تراکم و تحکیم خاک است به صورت نامنظم اتفاق افتاده و به ضخامت خاک موجود روی ستون‌های سنگی و شکاف‌ها وابسته می‌باشد. در بخش‌هایی از خاک برجا که تحت تنش‌های بالاتری قرار دارند، تراکم باعث شکست پانچی خاک به داخل خاک‌های عمیق‌تر و نرم‌تر می‌شود. به علاوه خاک ممکن است به خاطر افزایش بار تحکیم شود. تحکیم با نرخ کمتری نسبت به تراکم صورت می‌گیرد و ممکن است مدت یک سال یا بیش‌تر ادامه یابد. پایین رفتن سطح آب زیرزمینی میتواند این فرآیند را شتاب بخشد. متداول‌ترین دلیل نشست خاک، تخریب و ریزش آن به داخل حفرات انحلالی در اثر جریان آب است. اگر اندازه حفره محدود باشد، سرعت نشست به مرور کاهش می‌یابد. اما چنانچه یکی از پل‌ها یا گنبدهای تشکیل شده در شکاف ریزش کند، سرعت نشست افزایش خواهد یافت [۱].

۳-۲- نشست در پی‌های سنگی

برای اغلب پی‌های روی سنگ، مواد باربر به صورت الاستیک و همسانگرد در نظر گرفته می‌شوند. بنابراین نشست به همراه اعمال بار اتفاق می‌افتد و اثر وابسته به زمان وجود ندارد. تحت این شرایط

با استفاده از تئوری الاستیسیته و با بکارگیری مدول و نسبت پواسون توده سنگ نشست محاسبه می‌شود. مکانیزم نشست پی‌ها در توده سنگ به ترکیب ویژگی‌های سنگ بکر و شکستگی‌ها بستگی دارد. بر این اساس سه نوع نشست متفاوت را می‌توان شناسایی کرد [۱]:

۱- نشست ناشی از ترکیب کرنش سنگ بکر، انسداد و حرکت شکستگی‌ها و تراکم لایه‌های رسی. اگر سنگ مقاوم و الاستیک باشد، هرچند که از لایه‌های رسی با ضخامت در حد چند میلیمتر تشکیل شده باشد، باز هم نشست را الاستیک فرض می‌کنند و تئوری مربوط به آن را به کار می‌برند. تئوری الاستیسیته را می‌توان برای محاسبه نشست پی‌ها در تشکیلات همسانگرد، همگن، لایه‌ای و مواد همسانگرد عرضی^۱ استفاده کرد.

۲- نشست ناشی از حرکت قطعات سنگ به واسطه برش صفحات شکستگی. این مورد غالباً زمانی اتفاق می‌افتد که پی در ستیغ یک شیب تند قرار گیرد و قطعات سنگی بالقوه ناپایدار در دامنه شیب تشکیل شود. در سنگ‌های سخت که اختلاف بین مقاومت نهایی و باقی مانده شکستگی‌ها کم است، ممکن است در اثر یک جابجایی کوچک فرو ریزد.

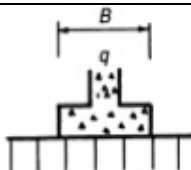
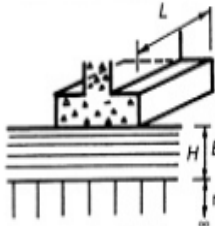
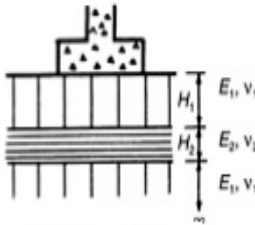
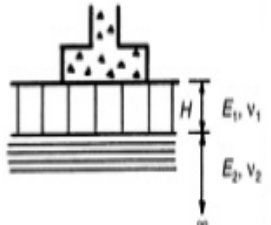
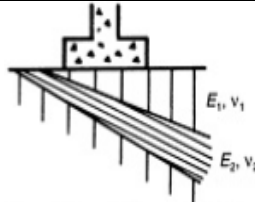
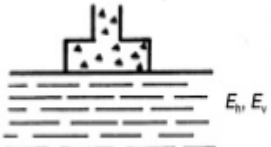
۳- نشست وابسته به زمان که شامل پی‌های بر روی سنگ‌های شکل‌پذیر^۲ مانند نمک و سنگ‌های شکننده وقتی که تنش‌های بیش از تسلیم بر آن وارد شود به وقوع می‌پیوندد. نشست‌های وابسته به زمان ممکن است در سنگ‌هایی که دارای لایه‌هایی از رس و دیگر سنگ‌های پلاستیک باشد اتفاق بیفتد. در ادامه روش‌های محاسبه نشست برای شرایط مختلف زمین‌شناسی بیان می‌شود. در جاهایی که هیچ کدام از این شرایط موجود نیست آنالیز عددی لازم است.

۳-۲-۱- محاسبه نشست الاستیک سنگ

از تئوری الاستیسیته می‌توان برای محاسبه نشست در دامنه وسیعی از شرایط زمین‌شناسی

¹ Transversely isotropic

² Ductile

شکل	شرایط زمین شناسی	محاسبه نشست
	الف) همگن، همسانگرد نیم فضا	۱- تعیین ضریب شکل از جدول (۱-۳) ۲- محاسبه نشست از رابطه (۱-۳)
	ب) لایه تراکم پذیر روی بستر صلب	۱- تعیین نسبت‌های H/B و L/B ۲- تعیین ضریب شکل از جدول (۲-۳) ۳- محاسبه نشست از رابطه (۱-۳)
	پ) لایه تراکم پذیر بین دو لایه صلب تر ($E_1 > E_2$)	۱- تعیین نسبت‌های $(H_1+H_2)/B$ و L/B ۲- محاسبه مدول تغییر شکل پذیری وزن دار دو لایه فوقانی $E = (E_1 H_1 + E_2 H_2) / (H_1 + H_2)$ ۳- تعیین ضریب شکل برای نسبت $(H_1+H_2)/B$ از جدول (۲-۳) ۴- محاسبه نشست از رابطه (۱-۳)
	ت) لایه صلب روی تشکیلات تراکم پذیر ($E_1 > E_2$)	۱- تعیین نسبت‌های H/B و E_1/E_2 ۲- تعیین ضریب تصحیح a از جدول (۳-۳) ۳- تعیین ضریب شکل از جدول (۱-۳) ۴- محاسبه نشست تقریبی از رابطه (۱-۳) با کمک پارامترهای الاستیک E_2 و v_2 برای کل پی ۵- محاسبه نشست واقعی از رابطه (۳-۳)
	ث) لایه شیب‌دار تراکم پذیر با ضخامت متغیر	از روش‌های تحلیل عددی استفاده شود.
	ج) سنک همسانگرد عرضی	از روابط (۳-۴) الف تا پ) و (۳-۵) و (۳-۷) الی (۳-۱۰) استفاده شود.

شکل ۳-۱- روش‌های محاسبه نشست پی برای شرایط مختلف زمین شناسی [۱]

شامل تشکیلات سنگی همگن، همسانگرد، مطبق و سنگ های همسانگرد عرضی استفاده کرد. شکل (۱-۳) شرایط مختلف زمین شناسی به همراه روابط مربوطه نشان داده شده است. اطلاعات مورد نیاز در تحلیل نشست شامل ویژگی های سنگ (مدول الاستیسیته و ضریب پواسون)، موقعیت و ضخامت هر لایه، شکل پی و فشار باربری می باشد. توصیه می شود که در این محاسبات، برای بررسی تاثیر ابعاد لایه ها و ویژگی های الاستیک سنگ بر نشست پی، تحلیل حساسیت انجام گیرد. به ندرت میتوان مدول توده سنگ را به دقت تعیین نمود، به همین دلیل لازم است که نشست برای دامنه از مدول ها و ابعادی که احتمال وجود آن ها در ساختگاه وجود دارد محاسبه شود [۱].

۳-۲-۱-۱- سنگ های همگن و همسانگرد

میزان نشست عمودی (δ_v) در سنگ های همگن و همسانگرد (شکل (۱-۳)- الف) از رابطه (۳-۱) محاسبه می شود. در این رابطه فرض می شود که یک یا چند بار گسترده یکنواخت بر روی سطح دایره ای یا چهار گوش پی عمل می کند [۱].

$$\delta_v = \frac{C_d q B (1 - \nu^2)}{E} \quad ۱-۳$$

q بار گسترده یکنواخت، B بعد مشخصه ی سطح بارگذاری (قطر برای پی های دایره ای و ضلع کوچکتر برای پی های چهارگوش)، C_d ضریب شکل^۱ (بستگی به شکل پی و موقعیت نقطه ای که نشست آن محاسبه می شود دارد)، ν ضریب پواسون و E مدول یانگ می باشند. مقادیر ضریب شکل (C_d) برای پی های دایره ای، مربعی و مستطیلی در جدول (۱-۳) ارائه شده است.

۳-۲-۱-۲- سنگ های لایه ای

نشست سنگ های لایه ای (در حالتی که لایه فوقانی در مقایسه با ابعاد پی نسبتاً ضخیم باشد) را میتوان با استفاده از تئوری الاستیک و مشابه روش ارائه شده برای سنگ های همسانگرد محاسبه

¹ Shape factor

نمود. در ادامه این بخش محاسبات مربوطه برای سه شرایط مختلف زمین شناسی ارائه می گردد (

حالت های ب، پ و ت در شکل ۳-۱) [۱].

جدول ۳-۱- ضریب شکل برای محاسبه نشست در حالت بارگذاری روی نیم فضای الاستیک [۱]

شکل پی	در مرکز	در گوشه	وسط بعد کوچکتر	وسط بعد بزرگتر	میانگین
دایره ای	۱	۰/۶۴	۰/۶۴	۰/۶۴	۰/۸۵
دایره ای (صلب)	۰/۷۹	۰/۷۹	۰/۷۹	۰/۷۹	۰/۷۹
مربعی	۱/۱۲	۰/۵۶	۰/۷۶	۰/۷۶	۰/۹۵
مربعی (صلب)	۰/۹۹	۰/۹۹	۰/۹۹	۰/۹۹	۰/۹۹
مستطیلی $L/B=1/5$	۱/۳۶	۰/۶۷	۰/۸۹	۰/۹۷	۱/۱۵
$L/B=2$	۱/۵۲	۰/۷۶	۰/۹۸	۱/۱۲	۱/۳۰
$L/B=3$	۱/۷۸	۰/۸۸	۱/۱۱	۱/۳۵	۱/۵۲
$L/B=5$	۲/۱۰	۱/۰۵	۱/۲۷	۱/۶۸	۱/۸۳
$L/B=10$	۲/۵۳	۱/۲۶	۱/۴۹	۲/۱۲	۲/۲۵
$L/B=100$	۴	۲	۲/۲۰	۳/۶۰	۳/۷۰
$L/B=1000$	۵/۴۷	۲/۷۵	۲/۹۴	۵/۰۳	۵/۱۵
$L/B=10000$	۶/۹۰	۳/۵۰	۳/۷۰	۶/۵	۶/۶

۱- وجود لایه تراکم پذیر بر روی بستری صلب: در مدل نشان داده شده در شکل (۳-۱-ب)، یک

لایه تراکم پذیر بر روی بستری صلب قرار گرفته است (مثلا حالتی که بخش هوازده روی سنگ

تازه و عمیق قرار گرفته است). وجود بستر صلب در زیر لایه فوقانی باعث کاهش میزان نشست آن

خواهد شد. در چنین حالتی، نشست توسط رابطه (۳-۱) محاسبه می شود، با این تفاوت که به

جای C_d از ضریب C'_d استفاده می شود. مقادیر C'_d در جدول (۳-۲) ارائه شده است. قابل ذکر

است که مقادیر C'_d آورده شده در این جدول فقط برای نقطه مرکزی سطح قابل استفاده است.

فرض مرتبط با مقادیر C'_d این است که هیچ گونه تنش برشی و جابجایی افقی در مرکز لایه

فوقانی و همچنین سنگ تحتانی اتفاق نخواهد افتاد.

۲- لایه تراکم پذیر در داخل تشکیلات صلب: نشست در داخل تشکیلاتی که حاوی یک لایه نسبتا

نازک تراکم پذیر در زیر لایه سنگی صلب است (شرایط نشان داده شده در شکل ۳-۱پ) را میتوان

با روشی مشابه آن چه برای حالت (۱) تشریح شد، محاسبه نمود. در این محاسبات فرض بر این است که اولاً لایه تحتانی نامحدود بوده و صلب عمل می کند و ثانیاً لایه های میانی و فوقانی تراکم پذیر هستند. با استفاده از این فرضیات میتوان ضریب شکل (C_d') را از جدول (۲-۳) به دست آورد و سپس نشست را با استفاده از میانگین وزن دار^۱ مدول دو لایه محاسبه نمود. میانگین وزن دار مدول از رابطه (۲-۳) محاسبه می شود:

$$\bar{E} = \frac{E_1 H_1 + E_2 H_2}{H_1 + H_2} \quad ۲-۳$$

در این حالت مقدار H مورد نیاز برای تعیین C_d' از روی جدول (۲-۳) معادل $H_1 + H_2$ در نظر گرفته می شود. پس از تعیین $\bar{E}$ ، مقدار نشست از رابطه (۱-۳) محاسبه می شود.

جدول ۲-۳- مقادیر ضریب شکل (C_d') برای محاسبه میزان نشست در مرکز بارگسترده یکنواخت [۱]

L/B							قطر دایره B=	H/B
∞	۱۰	۵	۳	۲	۱/۵	۱		
۰/۰۹	۰/۰۹	۰/۰۹	۰/۰۹	۰/۰۹	۰/۰۹	۰/۹۰	۰/۹۰	۰/۱
۰/۲۳	۰/۲۳	۰/۲۳	۰/۲۳	۰/۲۳	۰/۲۳	۰/۲۴	۰/۲۴	۰/۲۵
۰/۴۷	۰/۴۷	۰/۴۷	۰/۴۷	۰/۴۷	۰/۴۷	۰/۴۸	۰/۴۸	۰/۵
۰/۸۳	۰/۸۳	۰/۸۳	۰/۸۳	۰/۸۳	۰/۸۱	۰/۷۵	۰/۷۰	۱
۱/۰۸	۱/۰۸	۱/۰۸	۱/۰۷	۱/۰۳	۰/۹۷	۰/۸۶	۰/۸۰	۱/۵
۱/۴۰	۱/۴۰	۱/۳۹	۱/۳۳	۱/۲۲	۱/۱۲	۰/۹۷	۰/۸۸	۲/۵
۱/۶۰	۱/۵۹	۱/۵۶	۱/۴۵	۱/۳۱	۱/۱۹	۱/۰۱	۰/۹۱	۳/۵
۱/۸۳	۱/۸۲	۱/۷۲	۱/۵۵	۱/۳۸	۱/۲۴	۱/۰۵	۰/۹۴	۵
∞	۲/۵۳	۲/۱۰	۱/۷۸	۱/۵۲	۱/۳۶	۱/۱۲	۱	∞

با این محاسبات مقادیر دست بالایی برای نشست به دست خواهد آمد، چرا که اثر توزیع بار لایه صلب فوقانی در نظر گرفته نشده است. این لایه بخش قابل ملاحظه ای از بار را تحمل نموده و بنابراین بار کمتر به لایه تراکم پذیر زیرین وارد می شود (شکل ۳-۱پ).

۳- لایه صلب قرار گرفته بر روی تشکیلات تراکم پذیر: در این حالت یک لایه سنگی صلب بر روی

¹ Weigthed average

تشکیلاتی سنگی با صلیبیت کمتر قرار گرفته است (شکل ۳-۱). در این شرایط، نشست عمودی

(δ_v) در یک پی دایره‌ای با بارگذاری یکنواخت از رابطه (۳-۳) به دست می آید:

$$\delta_v = a \delta_{\infty} \quad 3-3$$

که در آن a ضریب تصحیحی است که با داشتن مدول نسبی دو سنگ ($\frac{E_1}{E_2}$) و نسبت $\frac{H}{B}$ ، از جدول (۳-۳) قابل محاسبه است. H ضخامت لایه فوقانی و B قطر پی است (شکل ۳-۱). پارامتر δ_{∞} عبارت است از نشست محاسبه شده با فرض این که مصالح پی کاملاً از جنس لایه تحتانی با ویژگی‌های الاستیک E_r و ν_r بوده و ضریب شکل (C_d) از جدول (۳-۱) محاسبه می شود.

جدول ۳-۳- ضریب تصحیح نشست الاستیک غیر یکنواخت^۱ [۱]

E_1/E_2					H/B
۱۰۰	۱۰	۵	۲	۱	
۱	۱	۱	۱	۱	۰
۰/۷۶۰	۰/۹۲۳	۰/۹۴۳	۰/۹۷۲	۱	۰/۱
۰/۴۳۱	۰/۶۹۹	۰/۷۷۹	۰/۸۸۵	۱	۰/۲۵
۰/۲۲۸	۰/۴۶۳	۰/۵۶۶	۰/۷۴۷	۱	۰/۵
۰/۱۲۱	۰/۲۸۷	۰/۳۹۹	۰/۶۲۷	۱	۱/۰
۰/۰۵۸	۰/۱۷۵	۰/۲۷۴	۰/۵۵۰	۱	۲/۵
۰/۰۳۶	۰/۱۳۶	۰/۲۳۸	۰/۵۲۵	۱	۵
۰/۰۱۰	۰/۱۰۰	۰/۲۰۰	۰/۵۰۰	۱	۸

۴- لایه شیب دار با ضخامت متغیر: محاسباتی که تا به حال ارائه شده‌اند، همگی مربوط به حالتی است که لایه ها افقی و دارای ضخامت یکنواخت هستند. برای شرایط نشان داده شده در شکل (۳-۱) ث)، ضروری است که از روش‌های عددی همچون اجزای محدود یا تفاضل محدود استفاده نمود. در این روش‌ها امکان مدل کردن دقیق تورب^۲، ضخامت، موقعیت و ویژگی های یک یا چند لایه وجود دارد.

^۱ Elastic distortion settlement correction factor

^۲ Inclination

۳-۲-۱-۳- سنگ‌های همسانگرد عرضی

برای محاسبه نشست در سنگ‌های همسانگرد عرضی (شرایط نشان داده شده در شکل ۱-۳ ج)، مثل شیل‌ها، ماسه سنگ‌ها و شیست‌ها می‌توان از روابط ارائه شده توسط کولهاوی و گودمن^۱ و ژرارد و هاریسون^۲ استفاده نمود. با استفاده از این روابط می‌توان مقدار نشست عمودی ناشی از اعمال بار دایره‌ای صلب روی سطح افقی سنگ همسانگرد عرضی را به دست آورد. ویژگی‌های سنگ توسط مدول‌های تغییر شکل پذیری عمودی و افقی (به ترتیب E_z و E_h)، مدول برشی بین صفحات افقی و عمودی (G_{hv}) و ضرایب پواسون زیر توصیف می‌شود [۱]:

V_{hh} ضریب پواسون برای تنش افقی روی کرنش افقی تکمیلی^۳

V_{hz} ضریب پواسون برای تنش افقی روی کرنش عمودی

V_{zh} ضریب پواسون برای تنش عمودی روی کرنش افقی

مقدار نشست (δ_z) بسته به ضریب β^2 که مربوط به ویژگی توده سنگ است، با یکی از سه رابطه زیر محاسبه می‌شود:

$$\delta_z = \frac{Q(c' + G_{hz})de(e^2 - \beta^2)}{2bG_{hz}[c' + d(e + \beta)^2][c' + d(e - \beta)^2]} \quad \text{مثبت } \beta^2 \quad ۴-۳$$

$$\delta_z = \frac{Qe(ad)^{\frac{1}{2}}}{2b(ad - c'^2)} \quad \text{منفی } \beta^2 \quad ۵-۳$$

$$\delta_z = \frac{Q(c' + G_{hx})de^3}{2bG_{zh}(c' + de^2)^2} \quad \beta^2 = 0 \quad ۶-۳$$

ضریب β^2 از رابطه (۷-۳) قابل محاسبه است:

$$\beta^2 = \frac{ad - c'^2 - 2c'G_{zh} - 2G_{zh}(ad)^{\frac{1}{2}}}{4G_{zh}d} \quad ۷-۳$$

مقادیر a ، c' و d از روابط زیر به دست می‌آیند:

¹ Kulhawy & Goodman

² Gerrard & Harrison

³ Complimentary horizontal strain

$$a = \frac{E_h(1-\nu_{hz}\nu_{zh})}{(1+\nu_{hh})(1-\nu_{hh}-2\nu_{hz}\nu_{zh})} \quad ۸-۳$$

$$c' = \frac{E_h\nu_{zh}}{1-\nu_{hh}-2\nu_{hz}\nu_{zh}} \quad ۹-۳$$

$$d = \frac{E_h\nu_{zh}(1-\nu_{hh})}{\nu_{hz}(1-\nu_{hh}-2\nu_{hz}\nu_{zh})} \quad ۱۰-۳$$

$$e^2 = \frac{ad-c'^2-2c'G_{zh}+2G_{zh}(ad)^{\frac{1}{2}}}{4G_{zh}d} \quad ۱۱-۳$$

که در آن Q بار وارده بر پی و b شعاع منطقه بارگذاری است. در مورد پی مربعی یا چهارگوش میتوان شعاع معادلی برای سطح پی در نظر گرفت (یعنی $b = B/(\pi^{\frac{1}{2}})$ برای پی مربعی به ضلع B). مدولهای تغییر شکل پذیری و برشی و ضریب پواسون توده سنگ مدل شده در شکل (۲-۳) را میتوان با توجه به ویژگیهای الاستیک سنگ بکر، فاصله داری ناپیوستگیها و سختی قائم و برشی آنها محاسبه نمود. روابط مربوط به پارامترهای الاستیک توده سنگ به شرح زیر است [۱]:

$$\frac{1}{E_i} = \frac{1}{E_r} + \frac{1}{S_{ikni}} \quad ۱۲-۳$$

$$\frac{1}{G_{ij}} = \frac{1}{G_r} + \frac{1}{S_{iksi}} + \frac{1}{S_{jksi}} \quad ۱۳-۳$$

$$\nu_{ij} = \nu_{ik} = \nu_r \frac{E_i}{E_r} \quad ۱۴-۳$$

که در آن ها $i=x,y,z$ و $j=y,z,x$ و $k=z,x,y$ می باشد. ویژگیهای الاستیک سنگ بکر و ناپیوستگیها با پارامترهای مدول تغییر شکل پذیری سنگ بکر (E_r)، ضریب پواسون سنگ بکر (ν_r) و مدول برشی سنگ بکر (G_r) تعریف می شوند که از رابطه (۱۵-۳) قابل محاسبه است:

$$G_r = \frac{E_r}{2(1+\nu_r)} \quad ۱۵-۳$$

در این روابط $S_{x,y,z}$ فاصله داری یک دسته درزه موجود در سنگ، K_{ni} سختی عمودی^۱ ناپیوستگیهای دسته درزه i ام و K_{si} سختی برشی^۲ دسته درزه i ام می باشد.

^۱ Normal stiffness

^۲ Shear stiffness

بررسی سختی ناپیوستگی ها در آزمایشگاه و صحرا مقادیر زیر را برای سختی عمودی و برشی سنگ ها نشان داده است:

۱- برای ماسه سنگ با درزه اره بر خشک

$$k_n = 35.1 \text{ GPa/m} \text{ و } k_s = 1.29 \text{ GPa/m}$$

۲- برای مارن با درزه پر شده با ماسه به ضخامت ۱ تا ۲ میلیمتر

$$k_n = 1.96 \text{ GPa/m} \text{ و } k_s = 2.34 \text{ GPa/m}$$

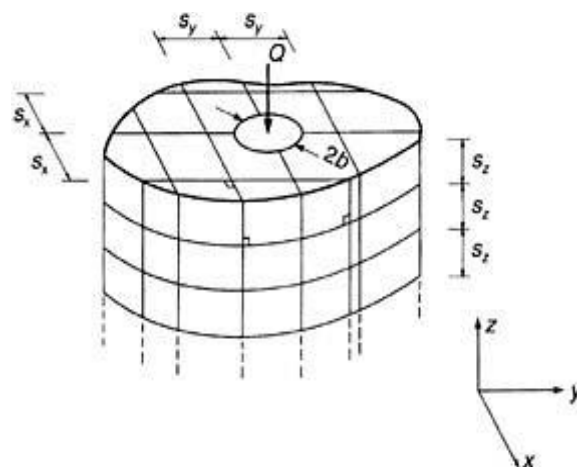
۳- برای میان لایه های شیلی مرطوب با ضخامت ۲ تا ۵ میلیمتر

$$k_n = 0.26 \text{ GPa/m} \text{ و } k_s = 0.02 \text{ GPa/m}$$

مدول تغییر شکل پذیری افقی (E_h) و مدول برشی افقی (G_{hz}) به کار رفته در محاسبات نشست از روابط (۱۶-۳) و (۱۷-۳) محاسبه می شوند.

$$E_h = \frac{E_x + E_y}{2} \quad ۱۶-۳$$

$$G_{hz} = \frac{G_{xz} + G_{yz}}{2} \quad ۱۷-۳$$



شکل ۳-۲- مدل یک توده سنگ ترک دار به سه دسته درزه عمود بر هم برای تعیین میزان نشست شالوده دایره ای در اثر بار عمودی [۱]

مقادیر ضرایب پواسون مورد نیاز برای محاسبات نشست از روابط زیر به دست می آید:

$$v_{zh} = v_r \frac{E_z}{E_r} \quad ۱۸-۳$$

$$v_{hz} = v_{hh} = v_r \frac{E_h}{E_r} \quad ۱۹-۳$$

$$\frac{E_z}{E_h} = \frac{v_{zh}}{v_{hz}} \quad ۲۰-۳$$

۳-۲-۲- نشست غیرالاستیک^۱ سنگ

در مورد سنگ‌های الاستیک، نشست همزمان با بارگذاری اتفاق می افتد. اما نشست های وابسته به زمان وقتی اتفاق می افتد که پی سنگ حاوی لایه های تراکم پذیر مانند رس یا مصالح شکل پذیر^۲ مثل نمک یا ماسه قیری^۳ باشد. سایر پدیده‌هایی که باعث ایجاد تغییر شکل وابسته به زمان در سنگ می شود شامل هوازگی، تورم لایه های رسی، آماس ناشی از آزاد شدن تنش، تغییر در شرایط تنش داخلی، خستگی ناشی از بارگذاری مرحله‌ای یا تناوبی و واکنش‌های شیمیایی می باشند چنانچه پی دارای لایه هایی از جنس خاک تراکم پذیر باشد، نشست ناشی از تراکم خاک را می توان با روش های متداول در مکانیک خاک تعیین نمود. فشردگی^۴ یک فرآیند سه مرحله ای شامل نشست آنی، تحکیم و تراکم ثانویه است. نشست آنی هم زمان با بارگذاری ایجاد شده و الاستیک تلقی می شود. نشست تحکیمی نوعی تغییر شکل وابسته به زمان است که بستگی به سرعت خروج آب از منافذ خاک دارد. تراکم ثانویه در اثر تسلیم خاک و متراکم شدن بدنه ذرات آن اتفاق افتاده و تابع زمان است [۱].

۳-۳- توزیع تنش در سنگ

اغلب پی‌های سنگی رفتاری شبیه به مواد الاستیک خطی دارند به طوری که امکان استفاده از تئوری الاستیسیته برای محاسبه توزیع تنش وجود دارد. دلیل استفاده از تئوری الاستیسیته اولاً، در دسترس بودن راه حل هایی برای محیط های الاستیک خطی با اعمال شرایط مرزی است که از

¹ Inelastic settlement

² Ductile materials

³ Tar sand

⁴ Compression

وضعیت های واقعی مهندسی تخمین زده می شوند. ثانیاً، مطالعات نشان داده که تئوری الاستیک به طور قابل قبولی تنش های اندازه گیری شده در محل را پیش بینی می کند.

کاربرد نمادین توزیع تنش در محاسبات نشست تشکیلات لایه ای است که لازم است تنش در هر لایه تعیین شود. کاربرد دیگر محاسبات توزیع تنش در تخمین اندرکنش بین میدان های تنش ایجاد شده است. به عنوان مثال اثر دو پی نزدیک به هم یا یک پی در نزدیکی تونل را می توان نامبرد. با بکارگیری قانون جمع آثار^۱ امکان جمع نمودن تنش های ایجاد شده به وسیله هر سازه و تعیین بخشی از سنگ که بیش از توان تحمل آن تحت میدان تنش قرار گرفته است وجود دارد [۱].

۳-۳-۱- سنگ ایزوترپ

توزیع تنش در یک نیم فضای الاستیک ناشی از یک بار عمودی نقطه ای اعمال شده بر روی سطح در یک محدوده کرنش کوچک طبق شکل (۳-۳) توسط بوسینسک^۲ در سال ۱۸۸۵ ارائه شده است. معادلات به شرح زیر می باشند [۱]:

$$\sigma_z = \frac{3Q}{2\pi} \frac{Z^3}{R^5} = \frac{3Q}{2\pi Z^2} \frac{1}{\left[1 + \left(\frac{r}{Z}\right)^2\right]^{\frac{5}{2}}}$$

$$\sigma_r = \frac{Q}{2\pi} \left[\frac{3Zr^2}{R^5} - \frac{1-2\nu}{R(R+Z)} \right]$$

۲۱-۳

$$\sigma_r = \frac{Q}{2\pi} (1-2\nu) \left[\frac{1}{R(R+Z)} - \frac{Z}{R^3} \right]$$

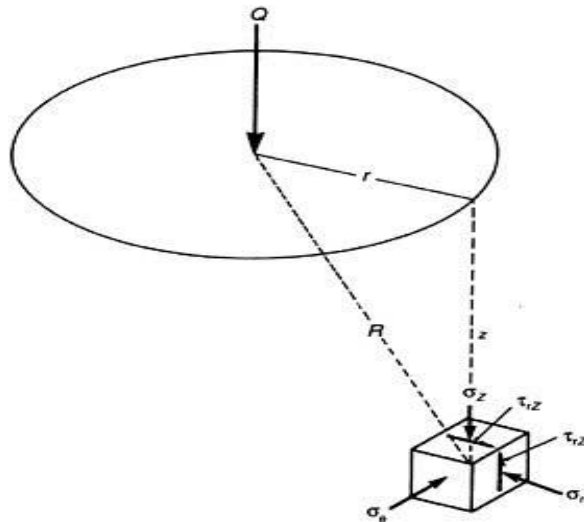
$$\tau_{rz} = \frac{3Q}{2\pi} \frac{Z^2 r}{R^5}$$

$$\tau_{\theta z} = \tau_{r\theta} = 0$$

در این روابط ν نسبت پواسون و r ، z و R ابعاد بیان شده در شکل (۳-۳) هستند. این تنش ها در یک محیط الاستیک خطی بدون وزن بیان شده اند، بنابراین به این مقادیر تنش ناشی از وزن مواد باید اضافه گردد. باید توجه کرد که این معادلات مستقل از ثابت های الاستیک هستند.

¹ Superposition

² Boussinesq



شکل ۳-۳- تنش‌ها در یک نیم فضای الاستیک از یک بار نقطه‌ای در سطح [۱]

۳-۳-۱-۱- بارهای توزیع شده و گسترده

معادلات بوسینسک را در صورت اصلاح می توان برای بدست آوردن تنش ها تحت یک بار توزیع شده در آنالیز تنش پی به کار برد. این مساله می تواند بوسیله اصل جمع آثار محقق شود. بنابراین تنش عمودی در عمق z در هر نقطه زیر یک بار توزیع شده با فشار اعمالی q ، از رابطه (۳-۲۲) به دست می آید.

$$\sigma_z = q \cdot I_z \quad ۳-۲۲$$

I_z ضریب تاثیر است که مقدار آن به شکل بار اعمالی و محل مورد نظر تعیین تنش وابسته است. دیاگرام هایی برای تعیین این ضریب تاثیر در نقاط مختلف پی ترسیم شده است که از آن ها می توان برای تعیین آن استفاده کرد [۱].

۳-۳-۱-۲- بارهای خطی

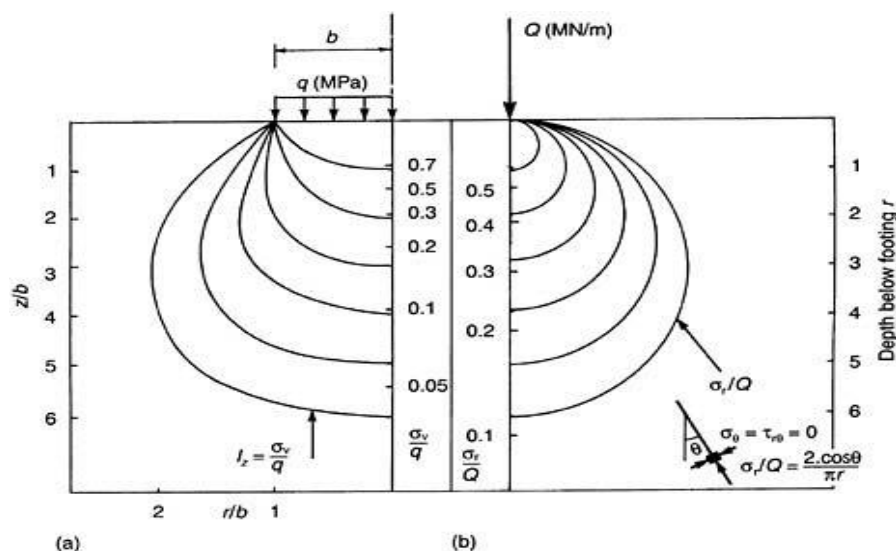
در حالی که بار خطی روی یک پی ایزوتروپ و الاستیک خطی (شکل ۳-۴-۱) قرار دارد. تنش های اصلی در هر نقطه فقط شامل تنش های شعاعی σ_r داده شده در معادله زیر است و تنش مماسی σ_θ و $\tau_{\theta z}$ هر دو صفر هستند.

$$\sigma_r = \frac{2Q \cos \theta}{\pi r}$$

$$\sigma_\theta = \tau_{r\theta} = 0$$

۲۳-۳

به طوری که Q بار خطی بر حسب (MN/m) و θ زاویه از محور قائم و r شعاع از نقطه اعمال بار است. تنش ها شامل یکسری بردارهای شعاعی از Q ، با طول بردارهایی که برابر با اندازه تنش است، می باشد و منحنی های تنش شعاعی برای یک بار خطی شامل یکسری دوائر مماسی نسبت به نقطه اعمال بار و مربوط به عمق $\frac{Q}{\pi r}$ (شکل ۳-۴-ب) می باشد.



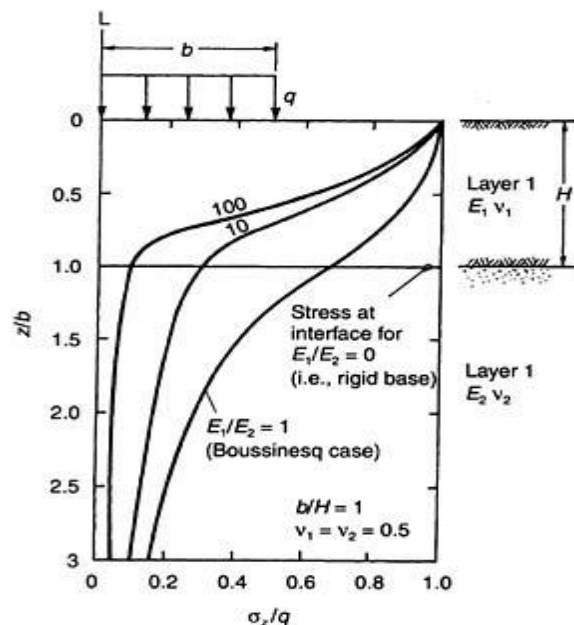
شکل ۳-۴- کنتورهای تنش برای پی های واقع بر نیم فضای الاستیک خطی ایزوتروپ [۱]

(a) تنش های نرمال قائم زیر بار یکنواخت دایره ای (b) تنش های شعاعی زیر بار خطی

۳-۳-۲- توزیع تنش در تشکیلات لایه ای

در تشکیلات لایه ای وقتی که سنگ مقاوم روی یک سنگ خیلی ضعیف قرار می گیرد، لایه بالایی بیشترین قسمت بار را تحمل کرده و تنش ایجاد شده در آن خیلی بیش تر از تنش لایه پایینی است. توزیع های تنش در سیستم های لایه ای برای مواد الاستیک در ابتدا برای روسازی راه توسعه داده شده است و نتایج آن را می توان در تشکیلات زمین شناسی نیز به کار برد. شکل (۳-۵) نشان می دهد که توزیع تنش قائم در سیستم دو لایه ای با یک نسبت مدول ۱۰۰، تمام بار توسط لایه بالایی تحمل می شود. محدودیت روش های محاسبه توزیع تنش توسعه داده شده برای روسازی راه این

است که لایه ها باید افقی و در ضخامت یکنواخت منظور شوند و در اغلب وضعیت های زمین شناسی که این شرایط حاکم نیست باید از تحلیل عددی استفاده کرد [۱].



شکل ۳-۵- تنش نرمال زیر مرکز سطحی دایره‌ای با بارگذاری یکنواخت در سطح سیستم الاستیک دو لایه‌ای [۱]

۳-۴- نتیجه گیری

در این فصل نشست و توزیع تنش در پی های سنگی به طور کامل مورد بررسی قرار گرفت. در حالت کلی نشست را می توان به دو دسته نشست الاستیک و نشست غیر الاستیک تقسیم بندی کرد. نشست الاستیک همزمان با بارگذاری اتفاق می افتد و نشست غیر الاستیک در اثر عواملی از قبیل وجود لایه های تراکم پذیر، هوازدهی، تورم لایه های رسی، آماس ناشی از آزاد شدن تنش، تغییر در شرایط تنش داخلی، خستگی ناشی از بارگذاری مرحله ای یا تناوبی و واکنش های شیمیایی به وجود می آید. در تشکیلات لایه ای وقتی که سنگ مقاوم روی یک سنگ خیلی ضعیف قرار می گیرد، لایه بالایی بیشترین قسمت بار را تحمل کرده و تنش ایجاد شده در آن خیلی بیش تر از تنش لایه پایینی است. در ساختگاه مخازن ذخیره سازی نفت خام در جزیره خارک نیز لایه ای از سنگ آهک مرجانی بر روی بستری از سنگ مارن قرار دارد. بنابراین لایه سنگ آهک بخش زیادی از بار را تحمل کرده و بخش کمتری از بار به لایه مارن وارد می شود.

۴- فصل چهارم

تعیین پارامترهای ژئومکانیکی ساختگاه مخازن

ذخیره سازی نفت خام

در این فصل ساختگاه مخازن ذخیره سازی نفت خام در جزیره خارک مورد بررسی قرار گرفته است. در ادامه براساس گزارش های زمین شناسی و ژئوتکنیکی پروژه های اجرا شده در محدوده ساختگاه مخازن و بازدید صورت گرفته از منطقه، وضعیت زمین شناسی و ژئوتکنیکی ساختگاه و پارامترهای ژئومکانیکی پی های سنگی مخازن تعیین شده است.

۴-۲- جزیره خارک

جزیره خارک یکی از مهم ترین جزایر موجود در خلیج فارس است که علی رغم وسعت کم، دارای اهمیت فراوانی از لحاظ تجاری، اقتصادی، نظامی و تاریخی است. منطقه خارک شامل میدان های نفتی فروزان، ابودر، درود و چندین میدان نفتی دیگر می باشد، علاوه براین خارک بزرگترین پایانه نفتی ایران است که بخش عظیمی از صادرات نفتی ایران از این پایانه صورت می گیرد. جزیره خارک به واسطه ی سواحل عمیق برای ایجاد لنگرگاه از مزیت های ویژه ای بهره مند است. امروزه کارشناسان این جزیره را به عنوان جایگاهی برای تاسیسات عظیم نفت برگزیده اند. در سال ۱۳۳۷ عملیات ساخت اسکله نفتی خارک آغاز شد که منجر به احداث یکی از بزرگترین پایانه های صدور نفت جهان شد. اکنون نیز اسکله جزیره خارک مهم ترین پایانه صدور نفت ایران است و همچنین تاسیسات گوناگون نفتی دیگر نیز در جزیره وجود دارد [۲۷].

این جزیره یکی از بخش های شهرستان بوشهر است و طبق آمار اخیر بیش از ده هزار نفر جمعیت دارد. این منطقه از لحاظ جغرافیایی در جنوب غربی ایران و در فاصله ۵۷ کیلومتری شمال غربی بوشهر قرار دارد. طول تقریبی آن ۸ کیلومتر و عرض آن حدود ۴ تا ۵ کیلومتر است و مساحت این جزیره کمتر از ۴۰ کیلومتر مربع می باشد. استان بوشهر در قسمت جنوبی کمربند چین خورده ساده زاگرس قرار دارد و در اثر فشار وارده از پلاتفرم عربستان به صفحه ایران به وجود آمده است [۲].

۴-۲-۱- زمین شناسی منطقه

جزیره خارک تاقدیسی مرجانی در خلیج فارس است. شیب شمالی این تاقدیس ۲ تا ۳ درجه به سمت شمال بوده و به سختی قابل اندازه گیری است ولی شیب جنوبی آن حدود ۵ تا ۶ درجه بوده و در محل هایی که فرسایش عمیق وجود دارد به خوبی قابل اندازه گیری است. شیب عمومی یال غربی به طور متوسط ۳۵ درجه و جهت شیب عموماً به طرف جنوب غربی است. یال شرقی دارای شیب عمومی ۵ تا ۱۵ درجه می باشد. این جزیره از فسیل ها و اندام های مرجان ها، دوکفه ای ها و دیگر جانداران دریایی که آمیخته با ذرات ماسه هستند، تشکیل شده است. لایه های زیرین (که در برش های عمودی دیده می شوند) از بافتی نرم و رسوبی که در برابر جریان آب کم دوام هستند، ساخته شده است. در بسیاری از نواحی خارک، فرسایش آب و باد موجب از بین رفتن لایه های زیرین و سقوط و تلاشی لایه های نسبتاً مقاوم تر فوقانی شده است. این روند فرسایش هم اکنون هم در حال تغییر مختصات ناهمواری های جزیره است [۲].

رخنمون های سطحی جزیره خارک مربوط به چهار سازند زمین شناسی شامل: سازند مارنی- ماسه سنگی آغا جاری، سازند آهکی خارک، رسوبات پلاتفورمی دریایی و بالاخره رسوبات عهد حاضر می باشند. آهک خارک خود قابل تقسیم به دو بخش است که بخش تحتانی گاهی با سازند آغا جاری همساز بوده و گاهی ناهم ساز است. پس از رسوب گذاری قسمت راسی سازند خارک، این جزیره بالا آمده است. قسمت فوقانی فرسایش یافته سازند خارک در ارتفاع ۷۵ متری از سطح دریا واقع است. در ادامه سازند های اصلی زمین شناسی تحت الارضی و سطحی جزیره و محدوده ساختگاه بررسی شده است [۲۷].

۴-۲-۱- سنگ آهک مرجانی

لایه سنگ آهک مرجانی شیرین رنگ با رگه های نارنجی و طوسی متخلخل که از سطح زمین تا

عمق ۱۰ متری ادامه داشته و از نظر مقاومت در رده سنگ‌های ضعیف با مقاومت فشاری بسیار کم قرار می‌گیرد. به طور کلی و براساس مطالعات تکمیلی ژئوتکنیکی، سنگ‌های مرجانی در اعماق ۲ تا ۶ متر قرار گرفته‌اند که در واقع ماسه‌های سخت شده به همراه صدف و جانوران دریایی می‌باشند. اطراف استخوان‌بندی این جانوران کربنات کلسیم وجود دارد که بیشتر به صورت گروهی زندگی می‌کنند. این جانوران با مصالحی همچون سنگ آهک، ماسه سنگ و غیره پوشانده شده و سنگ‌های مرجانی با تخلخل بالا را تشکیل داده‌اند.

۴-۲-۱-۲- سازند آجاجاری

ردیف رسوبی سازند آجاجاری قدیمی‌ترین واحد سنگی متعلق به میو پلیوسن است که در جزیره خارک رخنمون وسیعی داشته و شامل مارن‌های قرمز، ماسه سنگ‌های قهوه‌ای رنگ دانه ریز با لایه‌بندی چلیپائی به همراه سیلتستون‌های قرمز مایل به قهوه‌ای و بعضاً لایه‌هایی از مارن‌های خاکستری رنگ می‌باشد. مغزه‌های اخذ شده از گمانه‌ها نیز وجود لایه‌های رسی، مارنی و سیلتستونی ژئوپس‌دار را نشان داده است که جزء سازند آجاجاری می‌باشند.

سازند آجاجاری در محدوده ساختگاه جزیره شامل تناوب تکراری سیکل‌هایی است که به طرف بالا دانه‌ریز می‌شود. هر سیکل معمولاً بین ۱۰ تا ۱۰۰ متر ضخامت دارد ولی به طور کلی دارای ضخامت کمتر از ۵۰ متر می‌باشد. یک ردیف معمولی شامل لایه‌های ماسه سنگی به ضخامت ۲ تا ۵ متر و بر روی آن لایه ضخیمی از مارن در تناوب با لایه‌های نازک سیلتستون و ماسه سنگ ریز دانه می‌باشد. بعضی از طبقات ماسه سنگی تا صدها متر به طور جانبی گسترش دارند و برخی دیگر به صورت عدسی بین ۵۰ تا ۱۰۰ متر درازا دارند. ماسه سنگ‌های آجاجاری از دانه‌های تا حدی خوب گرد شده^۱ آهکی سیلتی تشکیل یافته است که ۷۰ تا ۷۵ درصد آن‌ها آهک، ۲۵ تا ۳۰ درصد بقیه سیلیس است که ۷ تا ۱۰ درصد سیلیس آن‌ها از نوع کوارتز و بقیه از نوع چرت یا سیلیس آبدار

¹ sub-well rounded

می‌باشند. لایه های مارن متراکم سازند آغاچاری که عمدتاً از دو رنگ طوسی روشن و قهوه‌ای روشن همراه با رگه های نارنجی تشکیل شده است. رس و لای با درصد کمی ماسه ریز تشکیل دهنده این لایه بوده و در سیستم طبقه بندی متحد (USCS) در گروه ML تا MH و CL تا CH قرار می‌گیرد.

پراکندگی مارن در سرتاسر ایران قابل توجه است. در اکثر مناطق ایران به دلیل منشا دریایی این نوع سنگ، می‌توان رگه های مختلفی از مارن مشاهده نمود. در حاشیه شمالی خلیج فارس، طیف وسیعی از مارن‌های گچ دار تا آهک دار قابل مشاهده است. طی مطالعات صحرایی و حفر گمانه های اکتشافی در محدوده جزیره، در اعماق بیش از ۶ متر بافت متراکمی از مارن نیز یافت شده است. این نوع سنگ در واقع خاک به همراه کربنات کلسیم است که در اصطلاح علمی بین ۳۵ تا ۶۵ درصد رس و ۶۵ تا ۳۵ درصد کربنات کلسیم دارد. مهم ترین عنصر موثر بر خصوصیات ژئوتکنیکی این نوع سنگ تابعی از درصد و نوع رس تشکیل دهنده آن است. میزان رطوبت مارن بر مشخصات مکانیکی آن موثر است به طوری که در صورت حضور آب، خاصیت سنگ بودن خود را از دست داده و به ذرات ریز رس تبدیل می‌شود. این سنگ در صورتی که به طور دائمی تحت تاثیر آب های زیرزمینی باشد، نرم و چسبناک و در صورتی که بالاتر از تراز آب زیر زمینی قرار گیرد بسیار سخت است و مقاومت مناسبی دارد، اما در صورت حضور آب مقاومت خود را از دست می‌دهد و رفتاری مانند خاک دارد.

۴-۲-۱-۳- رسوبات عهد حاضر جزیره خارک

رسوبات عهد حاضر شامل ماسه های آهکی حاوی قطعات مرجان ها و صدف ها است. به نظر می‌رسد که مقداری از ماسه‌های سواحل شمال خاوری جزیره در اثر جریان های ساحلی امتداد ساحل به این قسمت آورده شده و پس از سالیان دراز پهنه ماسه‌ای شمال شرقی جزیره را تشکیل داده اند. از طرفی دیگر همین ماسه ها مخزن آب قابل شرب مردم محلی را تشکیل می‌داده و در عین حال تمامی ساختمان‌های مسکونی جزیره خارک بر همین پهنه ماسه‌ای ساخته شده است. در این رسوبات سه رخساره ساحلی، ماندابی و ریفی قابل تشخیص می‌باشند، در عین حال هرکدام از رخساره ها به

زون‌های متعددی قابل تقسیم می‌باشند.

۳-۴- زمین‌شناسی ساختگاه مخازن

در محدوده ساختگاه مخازن ذخیره سازی نفت خام از اطلاعات پروژه های ذخیره سازی اجرا شده در منطقه و گزارش‌های زمین‌شناسی گمانه‌های حفر شده در این پروژه ها به همراه مطالعات میدانی صورت گرفته در محدوده ساختگاه، برای تعیین جنس، ضخامت و پارامترهای ژئومکانیکی لایه‌های زیرین ساختگاه مخازن استفاده شده است. در ادامه اطلاعات زمین‌شناسی و ژئوتکنیکی پروژه‌های اجرا شده در محدوده مخازن و نتایج مطالعات میدانی صورت گرفته بررسی شده و در انتها وضعیت زمین‌شناسی و پارامترهای ژئومکانیکی پی‌های سنگی برای ساخت مخازن ذخیره سازی تعیین می‌شود.

۳-۴-۱- پروژه مخازن ذخیره سازی نفت خام جزیره خارک

مطالعات و بررسی‌های انجام شده در محل احداث مخازن ذخیره سازی نفت خام با حفر ۹ حلقه گمانه تحقیقاتی ماشینی به عمق نهایی ۲۰ متر به همراه انجام آزمایشات لازم برای تعیین نوع و ضخامت لایه های زمین در محدوده گمانه ها، بررسی خصوصیات فیزیکی و مکانیکی لایه های زمین و تعیین زمین‌شناسی منطقه و محدوده پروژه صورت گرفته است.

به منظور تعیین نوع و ضخامت لایه های زمین، عملیات حفاری گمانه ها با استفاده از دستگاه حفاری به روش دورانی^۱ انجام و با توجه به نوع و جنس زمین، نمونه گیری به صورت مغزه^۲ از لایه‌های مختلف برای آزمایشات مورد نیاز انجام شده است. برای محفوظ ماندن حالت طبیعی تعدادی از نمونه های مغزه اخذ شده از محل گمانه ها، نمونه های مورد نیاز جهت آزمایش های مورد لزوم موم‌اندود شده اند. موقعیت گمانه ها در سایت و شیب موجود در منطقه در شکل (۴-۱) نشان داده

^۱- Rotary

^۲- Core

شده است. سطح تراز گمانه اول نسبت به سایر گمانه ها (گمانه ۲ تا ۴) اختلاف ارتفاعی در حدود ۱/۵ تا ۲ متر داشته و این اختلاف ارتفاع هرچه به گمانه ۹ نزدیک می‌شویم با توجه به شیب ملایم موجود بیشتر می‌شود [۲].

برای بررسی خصوصیات فیزیکی، مکانیکی و کیفی لایه های متراکم و سنگ گونه با توجه به روش حفاری دو شاخص مهم درصد مغزه بازیابی (C.R)^۱ و شاخص کیفیت سنگ (RQD)^۲ در زمان انجام عملیات صحرایی در اعماق مختلف گمانه ها کنترل و تعیین شده است. این دو شاخص در واقع بیانگر وضعیت سنگ از لحاظ درز و شکاف و همچنین مقاومت کلی توده سنگ می باشد [۲].



شکل ۴-۱: نمایی از موقعیت گمانه‌ها در سایت و شیب موجود در منطقه [۲]

براساس اطلاعات گمانه ها توالی لایه ها در حالت کلی به صورت زیر می باشد.

- ماسه رس دار لای دار به رنگ خاکستری تا قهوه‌ای روشن
- سنگ آهک لوماسل همراه با ماسه سخت شده با مرجان و صدف جانوران دریایی به رنگ شیری تا خاکستری روشن
- رس با خاصیت خمیری کم تا زیاد به رنگ خاکستری مایل به سبز تا قهوه ای (سنگ مارن)

¹ - Core Recovery

² Rock Quality Designation

با توجه به اطلاعات بدست آمده از گمانه ها و شیب موجود در منطقه لایه‌ی ماسه رس دار لای دار سطحی اغلب در ترازهای بالایی (گمانه های ۱ و ۵) و با ضخامت کم موجود می باشد. نمونه‌ای از مغزه های بدست آمده از اعماق مختلف گمانه ها در شکل (۴-۲) قابل مشاهده می باشد.



الف: سنگ آهک مرجانی به همراه ماسه سخت شده



ب: سنگ مارن متراکم

شکل ۴-۲- نمای قبل از تعیین مقاومت فشاری نمونه های سنگ اخذ شده از جزیره خارک (ASTM:D 2938)[۲]
موضوع طبقه بندی سنگ‌ها مبحثی است که ممکن است از دیدگاه های مختلف مورد بررسی قرار گیرد. براین اساس انواع گوناگون سنگ ها را می توان از نقطه نظر های متفاوتی مثل منشا و طرز تشکیل کانی‌های تشکیل دهنده، ساخت و بافت، خواص فیزیکی و مکانیکی آن ها رده بندی کرد.

یکی از این طبقه بندی ها که توسط میلر و دیر^۱ انجام گرفته به این ترتیب است که سنگ ها را براساس فشاری تک محوری (σ_c) و مدول الاستیسیته (E) به گروه های مختلف تقسیم بندی کرده اند. بر مبنای این دو کمیت وضعیت استحکام نسبی سنگ ها مشخص می شود. براساس این طبقه بندی، لایه های سنگی محل پروژه در گروه EL یعنی در گروه سنگ های با مقاومت خیلی کم و و مدول الاستیسیته کم قرار دارند [۲].

همچنین به منظور بررسی ویژگی های در محل سنگ ها و نقش آن ها در بررسی خواص مهندسی سنگ، طبقه بندی هایی براساس رده بندی و فراوانی درزه ها و شاخص کیفیت سنگ انجام گرفته است. با توجه به شاخص کیفیت سنگ و درصد مغزه بازیافتی نمونه ها، می توان نتیجه گرفت که لایه های سنگی در محدوده گمانه ها عمدتاً در رده سنگ های متوسط تا خوب قرار می گیرند که از روی شاخص کیفیت توده سنگ می توان تا اندازه ای به فراوانی درزه و شکاف در سنگ پی برد.

۴-۳-۲- پروژه مخازن یکصد هزار بشکه ای ذخیره سوخت در جزیره خارک

در این پروژه دو دستگاه مخزن یکصد هزار بشکه ای ذخیره سوخت در جزیره خارک احداث شده است. به منظور شناسایی لایه های تحت الارضی سازه های طرح، تعداد دو حلقه گمانه ماشینی با دستگاه تمام هیدرولیک دورانی به صورت مغزه گیری پیوسته و حداکثر تا عمق ۱۵ متری حفاری شده است. براساس نمودار گمانه ها و مقاطع مربوط به آن مشخص می شود که جنس مصالح تحت الارضی تا اعماق حفاری شده به طور کلی از دو لایه تشکیل شده است [۲۸]:

- سنگ آهک مرجانی شیری رنگ با رگه های سبز روشن و متخلخل که از سطح زمین تا عمق ۱۱/۵ متری ادامه داشته و از نظر مقاومت در رده سنگ های ضعیف با مقاومت فشاری بسیار کم محسوب می شود.
- لایه مارن متراکم به رنگ قهوه ای تا قهوه ای روشن و سبز روشن که از عمق ۱۱/۵ متری تا انتهای عمق گمانه ها ادامه می یابد. رس و لای با درصد کمی ماسه ریز تشکیل دهنده این

¹-Deer & Miller, 1995

لایه می‌باشد.

تعداد ۶ آزمایش مقاومت فشاری بر روی نمونه های سنگ آهک مرجانی انجام گرفته که نتایج آن در جدول (۴-۱) آمده است. همچنین بر روی نمونه های بدست آمده از عملیات حفاری آزمایش برش مستقیم و آزمایش سه محوری انجام گرفته است که نتایج آن در جدول (۴-۲) مشاهده می شود.

جدول ۴-۱- مقاومت فشاری سنگ آهک مرجانی [۲۸]

گمانه	عمق گمانه (متر)	مقاومت فشاری (MPa)
BH1	4.5	2.94
BH1	10.5	4.91
BH2	4.5	4.11
BH2	4.5	2.26
BH2	8.0	4.53
BH2	10.5	3.22
میانگین		3.66

جدول ۴-۲- میانگین مشخصات ژئوتکنیکی پروژه احداث دو دستگاه مخزن یکصد هزار بشکه‌ای [۲۸]

شرح لایه	Depth (m)	USCS	N _{SPT}	E (MPa)	C (Mpa)	Ø (Deg)	Y _d (g/cm ³)	v
سنگ آهک مرجانی متخلخل (Coral)	0-11.5	-	>100	~150	Compressive Strength=3.66 MPa		1.64	0.27
رس و لای با درصد کمی ماسه ریز (مارن)	>11.5	CL to ML	>100	~75	C [*] =0.75 C ^{**} =0.24 C ^{***} =0.67	Ø ^{**} =18.0 Ø ^{**} =15.5	1.90	0.30

*= نتایج حاصل از آزمایش فشاری تک محوره
***= نتایج حاصل از آزمایش سه محوری
**= نتایج حاصل از آزمایش برش مستقیم

با توجه به اطلاعات گمانه های حفر شده در محدوده ساختگاه مخازن به طور کلی دو لایه سنگ آهک مرجانی و سنگ مارن مشاهده می شود. در برخی از مناطق نیز با توجه به توپوگرافی موجود در منطقه لایه‌ای از خاک و سنگ های هوازده بستر سنگی مخازن را پوشانده است.

۳-۳-۴- مطالعات میدانی در محدوده ساختگاه مخازن

به منظور آشنایی با وضعیت ژئوتکنیکی ساختگاه و نحوه ساخت مخازن بازدید از محدوده ساختگاه مخازن ذخیره سازی نفت خام در جزیره خارک صورت گرفته و اطلاعات تکمیلی برداشت شده است. برای این منظور وضعیت زمین شناسی و درزه داری منطقه مورد بررسی قرار گرفته و مقاومت فشاری سطحی با چکش اشمیت اندازه گیری شده است. نمایی از ترانشه ها و دیواره های به جا مانده در محوطه مخازن خارک در شکل (۳-۴) دیده می شود. وضعیت ناپیوستگی های و توالی لایه های موجود در منطقه در شکل (۴-۴) دیده می شود.



شکل ۳-۴- نمایی از ترانشه ها و دیواره های به جا مانده در محوطه مخازن خارک



شکل ۴-۴- وضعیت ناپیوستگی ها و توالی لایه ها در محوطه مخازن خارک

در محدوده ساختگاه مخازن ذخیره سازی نفت خام در سه موقعیت مختلف آزمایش چکش اشمیت انجام شده است. نتایج این بررسی در جدول (۳-۴) دیده می شود. از آنجا که رخنمون‌ها مربوط به سنگ آهک مرجانی بوده و ترانشه‌های موجود درون سنگ آهک مرجانی حفر شده اند، این مقادیر مربوط به سنگ آهک مرجانی می باشد. روابط مختلفی برای تعیین مقاومت فشاری توده سنگ با استفاده از عدد سختی اشمیت ارائه شده است. در شرایط موجود روابطی که بیشترین هم خوانی را با نتایج حاصل از آزمایشات مقاومت فشاری تک محوره سنگ دارد، رابطه کیدیبینزکی^۱ و رابطه پیشنهادی ISRM می باشد. رابطه کیدیبینزکی به صورت زیر تعریف می‌شود [۳۶]:

$$\sigma_c = 0.52 e^{(0.05 H_s + \gamma)} \quad ۱-۴$$

در این رابطه σ_c مقاومت فشاری تک محوری (MPa)، H_s شاخص میانگین عدد سختی اشمیت و γ وزن مخصوص توده سنگ (gr/cm^3) می باشد.

رابطه پیشنهادی ISRM به صورت زیر تعریف می شود:

$$\log \sigma_c = 0.00014 \gamma H_s + 3.16 \quad ۲-۴$$

در این رابطه σ_c مقاومت فشاری تک محوری (Psi)، H_s شاخص میانگین عدد سختی اشمیت و γ وزن مخصوص توده سنگ (gr/cm^3) می باشد.

جدول ۳-۴- نتایج حاصل از آزمایش چکش اشمیت برای سنگ آهک مرجانی

موقعیت	شاخص میانگین سختی اشمیت	مقاومت فشاری تک محوری (MPa)	
		رابطه کیدیبینزکی	رابطه ISRM
۱	۱۸/۴	۸/۹	۱۰/۰۸
۲	۱۷	۸/۳	۱۰/۰۷
۳	۲۰/۴	۹/۸۴	۱۰/۱

¹ Kidybinski

طبق بازدید صورت گرفته از محوطه مخازن و بررسی ترانشه ها و دیواره های به جا مانده از حفاری های قبلی مشخص شد که پی اکثر مخازن پس از برداشت خاک های سطحی بر روی بستر متراکم سنگی قرار می گیرند. نحوه اجرای دیواره حلقه بتنی به این صورت است که در مناطقی که ارتفاع آن بیش از تراز کف پی مخازن است و با برداشت خاک های سطحی به بستر سنگی می رسیم، رینگ مورد نظر حفاری شده و درون آن بتن ریزی می شود. در روش دیگر برای مناطقی که ارتفاع آن کمتر از تراز کف پی مخازن باشد سطح مورد نظر تسطیح شده و در صورت نیاز خاکریزی صورت می گیرد، سپس دیواره حلقه بتنی اجرا شده و داخل حلقه بتنی و فضای اطراف آن طبق استانداردهای موجود به صورت متراکم پر می شود. همواره یک لایه ماسه با ضخامت خیلی کم در زیر کف فولادی مخزن قرار می گیرد. خصوصیات بتن مورد استفاده برای پی مخازن در جدول (۴-۴) آمده است.

جدول ۴-۴- خصوصیات بتن مورد استفاده برای پی مخازن ذخیره سازی نفت خام در جزیره خارک [۳۰]

پارامتر	مقاومت فشاری (MPa)	مدول الاستیسیته (MPa)	ضریب پواسون	وزن مخصوص (gr/cm^3)	چسبندگی (MPa)	زاویه اصطکاک داخلی (Deg)
مقدار	۳۰	۲۷۰۰۰	۰/۲۵	۲/۴۵	۳/۴	۳۵

۴-۴- آشنایی با شرایط پروژه

جزیره خارک یکی از مهم ترین پایانه های صادرات نفت ایران می باشد. به منظور ایجاد امکان مانورهای عملیاتی، همچنین بازیافت انرژی جنبشی سیال و تبدیل آن به انرژی پتانسیل در مرتفع ترین نقطه جزیره خارک مخازن عظیمی با ظرفیت های متفاوت در طی چند پروژه احداث شده است (شکل ۴-۵). همچنین از این مخازن در مواقع بحرانی که شرایط جوی برای پهلویی نفتکش ها مساعد نبوده و یا نفتکش برای بارگیری در لنگرگاه حاضر نیست، جهت ذخیره سازی استفاده می شود.

این مخازن که در یک ارتفاع از سطح دریا بنا شده اند این امکان را به نفت خام می دهند تا با نیروی جاذبه به سمت اسکله ها هدایت شود. مخازن ذخیره سازی نفت به صورت استوانه های قطور و

مرتفع عمودی بنا شده‌اند و ظرفیت آنها از یکصد و چهل هزار تا یک میلیون بشکه متفاوت است. سقف این مخازن از نوع شناور بوده و با بالا و پایین رفتن سطح نفت در داخل مخزن حرکت می‌کند. شناور بودن سقف به میزان قابل توجهی از خروج گازهای سبک همراه نفت جلوگیری می‌کند و از کاهش مرغوبیت نفت نیز می‌کاهد. همچنین وجود سقف شناور ایمنی مخزن را بیشتر و باعث جلوگیری از مخلوط شدن هوا با هیدروکربن داخل مخزن می‌شود [۲۹].



شکل ۴-۵- نمایی از محوطه مخازن ذخیره سازی نفت خام در جزیره خارک

مجموع مخازن خارک در زمینی به مساحت حدود ۱۲۰ هکتار توان ذخیره سازی نفت خام (سبک و سنگین) با ظرفیت ۲۱/۹۵۲ میلیون بشکه را دارد. به منظور رسیدن به ظرفیت بالقوه براساس استاندارد جهانی (امکان دریافت ۱۵ روز نفت خام)، جلوگیری از مخلوط شدن نفت خام سبک و سنگین و همچنین اجتناب از عملیات جداسازی و سایر مشکلات احتمالی نیاز به ساخت مخازن جدید و افزایش توان ذخیره سازی می‌باشد. بر این اساس احداث مخازن جدید یک میلیون بشکه‌ای ذخیره سازی نفت خام در جزیره خارک در دستور کار شرکت پایانه های نفتی ایران قرار گرفت و مطالعات لازم برای ساخت این مخازن شروع شد [۵].

برای ساخت مخازن ذخیره سازی جدید تعداد ۹ عدد گمانه (BH-1 تا BH-9) تا عمق ۲۰ متری در منطقه حفاری شده است. موقعیت گمانه ها به گونه‌ای انتخاب شده که هر گمانه در مرکز یک

مخزن قرار گیرد. موقعیت و محل گمانه ها در شکل (۴-۱) قابل مشاهده می باشد. در فاز اول چهار مخزن یک میلیون بشکه ای ذخیره سازی نفت خام (BH-4 تا BH-8) احداث شده و توان ذخیره سازی به ۲۵/۹۵۲ میلیون بشکه رسیده است. مشخصات یک مخزن یک میلیون بشکه ای ذخیره سازی نفت خام در جدول (۴-۵) آمده است.

جدول ۴-۵- مشخصات یک مخزن ذخیره سازی نفت خام [۵] و [۳۰]

مشخصات مخزن		مقدار
ظرفیت	ظرفیت اسمی (بشکه)	۱۰۰۰۰۰۰
	حجم (m^3)	۱۵۸۹۸۸
ابعاد (m)	ارتفاع	۱۷/۸۳
	قطر	۱۰۸/۹۷
وزن (tons)	خالی	۲۸۰۰
	عملیاتی	۱۳۳۰۰۰
	آزمایش	۱۸۲۰۰۰

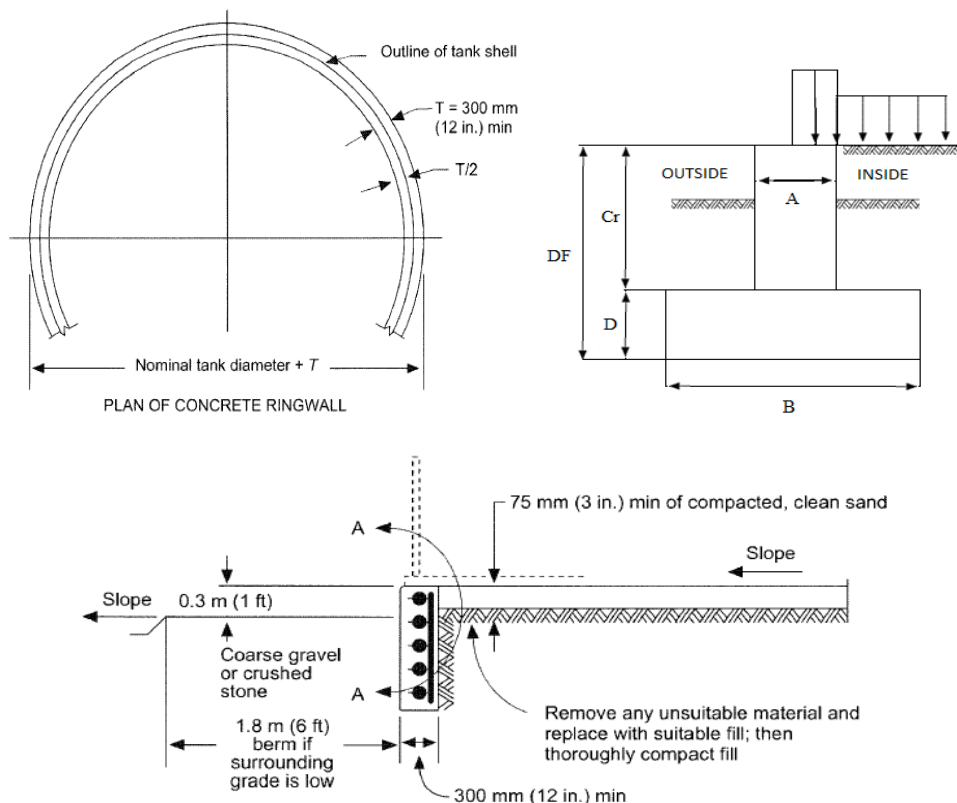
مخازن سطحی ذخیره سازی نفت خام از یک پی نواری تشکیل شده که به صورت یک دیوار حلقه ای بتنی^۱ در اطراف مخزن قرار دارد. این دیوار دارای ضخامت ۱/۱ متر بوده و از دو قسمت تشکیل شده است. قسمت پاشنه^۲ دارای عرض ۸۰ سانتیمتر و ضخامت ۴۰ سانتیمتر و قسمت بالایی دارای عرض ۴۰ سانتیمتر می باشد. مقطع فونداسیون با دیوار حلقه ای بتنی و نحوه اعمال بار در شکل (۴-۶) دیده می شود [۵].

برای اجرای پی ابتدا خاک های نباتی و آلی موجود سطحی تا هر عمقی که وجود داشته باشد، برداشت شده و سطح مورد نظر تسطیح می شود. مخازن ذخیره سازی نفت خام به گونه ای احداث می شوند که همگی در یک تراز ارتفاعی قرار گیرند تا جریان سیال براساس ظروف مرتبط به هم به راحتی برقرار باشد. پس از برداشت خاک های سطحی در صورتی که تراز کف پی کمتر از حد مورد

¹ Ring wall

² Footing

نیاز باشد، خاک مناسب با تراکم ۹۵٪ برای تشکیل سطح مناسب به کار می رود. خاکی که به عنوان پرکننده مورد استفاده قرار می گیرد باید عاری از هرگونه نباتات، مواد آلی و موادی که باعث خوردگی تانک می شود بوده و بعد از تراکم تحمل وزن سازه و محتویات آن را داشته باشد. مطابق استاندارد API-650 ارتفاع لایه های مورد تراکم می بایست کمتر از ۲۰ سانتیمتر باشد [۵] و [۳۰].



شکل ۴-۶- تصویر پی نواری مخازن ذخیره سازی [۳۱]

۴-۵- تعیین پارامترهای ژئومکانیکی ساختگاه مخازن

برای تعیین پارامترهای ژئومکانیکی ساختگاه مخازن از اطلاعات پروژه های ذخیره سازی اجرا شده در منطقه و گزارش های زمین شناسی گمانه های حفر شده در این پروژه ها به همراه مطالعات میدانی صورت گرفته در محدوده ساختگاه استفاده شده است. همانطور که قبلاً نیز اشاره شد برای ساخت مخازن ذخیره سازی نفت خام ابتدا عملیات تسطیح صورت می گیرد و تمام خاک های نباتی و آلی سطحی برداشته می شود. بررسی نمودار گمانه ها و مقاطع مربوط به آن ها در محدوده ساختگاه

مخازن و بررسی‌های میدانی نشان می‌دهد جنس مصالح تحت الارضی تا اعماق حفاری شده به طور کلی از دو لایه تشکیل شده است. نمونه ای از مغزه‌های به دست آمده از اعماق مختلف حفاری در شکل (۴-۷) دیده می‌شود. لایه‌های تشکیل دهنده پی به این صورت می‌باشند [۲].

- سنگ آهک لوماشل به همراه ماسه سخت شده با مرجان و صدف جانوران دریایی با بافتی متخلخل
- لایه‌های مارن متراکم که عمدتاً از دو رنگ طوسی روشن و قهوه‌ای روشن همراه با رگه‌های نارنجی تشکیل شده است.



سنگ آهک مرجانی (عمق ۴-۶ متری گمانه ۳)



سنگ آهک مرجانی (عمق ۲-۴ متری گمانه ۷)



سنگ آهک مرجانی (عمق ۰-۲ متری گمانه ۴)



سنگ مارن (عمق ۶-۸ متری گمانه ۸)

شکل ۴-۷- نمونه‌ای از مغزه‌های به دست آمده از اعماق مختلف حفاری [۲]

به منظور بررسی خصوصیات فیزیکی و مکانیکی لایه های سنگی در محل گمانه ها مطالعات صحرایی و آزمایش های متداول همچون آزمایش مقاومت فشاری تک محوره انجام شده است. با بررسی مغزه های بدست آمده از گمانه ها پارامترهای مختلف در مقیاس آزمایشگاهی اندازه گیری شده است. همچنین با بررسی های میدانی صورت گرفته وضعیت ژئوتکنیکی و زمین شناسی منطقه ارزیابی شد که نتایج آن در جدول (۴-۶) به صورت بازه حداقل و حداکثر قابل مشاهده می باشد.

جدول ۴-۶- پارامترهای ژئومکانیکی پی های سنگی مخازن ذخیره سازی نفت خام

نوع سنگ	RQD	CR	GSI	σ_{ci} (MPa)	ν	γ_d (g/cm ³)
سنگ آهک مرجانی	۸۱-۹۵	۸۷-۹۸	۳۵-۴۵	۴/۲ - ۱۱/۰۵	۰/۲۷	۱/۹۲
سنگ مارن	۸۰-۹۷	۸۷-۱۰۰	۴۰-۵۰	۴/۸-۱۰/۵	۰/۳۰	۲/۱۱

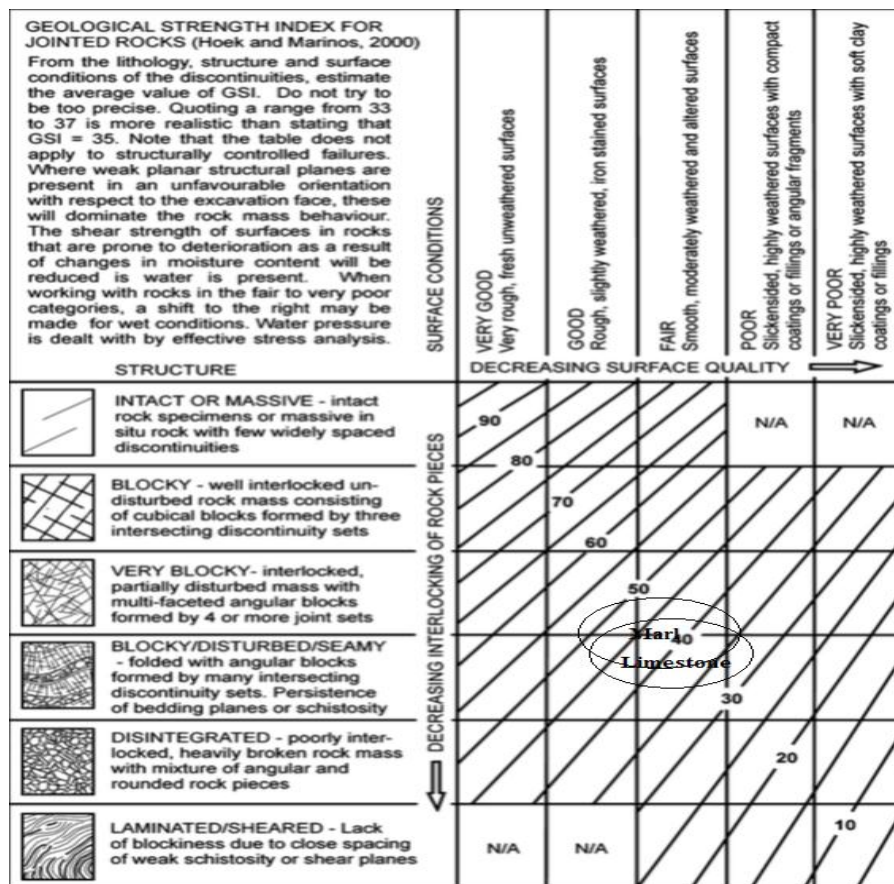
رفتار توده سنگ ها به دلیل عواملی از قبیل درزه داری، گسل خوردگی، هوازدگی و غیره تفاوت زیادی با سنگ بکر دارد. این تفاوت ها باعث می شود توده سنگ ها برخلاف سنگ بکر، حتی تحت بارهای کوچکتر تغییر شکل و نشست های بزرگی را متحمل شوند. خواص مهندسی توده سنگ ها در درجه اول به ناپیوستگی ها یا سطوح ضعیف ساختاری موجود در آن ها بستگی دارد و خواص ژئومکانیکی سنگ بکر در این خصوص از اهمیت کمتری برخوردار است. به منظور بررسی رفتار توده سنگ و در نظر گرفتن پدیده های ساختاری از شاخص مقاومت زمین شناسی^۱ استفاده شده است.

شاخص مقاومت زمین شناسی (GSI) که طی سال های مختلف توسط هوک و همکاران ارائه شد، سیستمی را برای تخمین کاهش مقاومت توده سنگ برای شرایط زمین شناسی مختلف که از روی مطالعات میدانی مشخص می شود فراهم می کند. خصوصیات توده سنگ براساس برداشت بصری از پدیده های ساختاری و شرایط سطحی ناپیوستگی ها که از روی زبری درزه و تغییرات آن

¹ Geological Strength Index (GSI)

مشخص می شود، به دست می آید. ترکیب این دو پارامتر مبنایی کاربردی برای توصیف محدوده وسیعی از توده سنگ ها با ساختارهای سنگی گوناگون از قطعه های سنگی خیلی محکم به هم پیوسته تا توده سنگ های خیلی خرد شده را شامل می شود. براساس توصیف توده سنگ مقدار GSI از روی خطوط نشان داده شده در جدول (۴-۷) مشخص می شود [۳۲].

جدول ۴-۷- نمودار عمومی تخمین GSI با توجه به مشاهدات زمین شناسی [۳۲]



برای تعیین پارامترهای ژئومکانیکی توده سنگ های منطقه از نرم افزار ¹ Roclab استفاده شده است. این نرم افزار پارامترهای ژئومکانیکی توده سنگ را براساس معیار شکست هوک- براون محاسبه می کند. نتایج پارامترهای ژئومکانیکی توده سنگ های موجود در ساختگاه مخازن ذخیره سازی نفت خام در جدول (۴-۸) وجود دارد. پارامترهای ورودی نرم افزار شاخص مقاومت زمین شناسی، مقاومت فشاری تک محوری، پارامتر سنگ بکر (mi)، فاکتور صدمه دیدگی (D) و مدول

¹ Roclab- Rocscience version1.033

الاستیسیته سنگ بکر (E_i) می باشد. در محدوده مخازن خارک از آنجایی که هیچگونه عملیات آتشیاری صورت نمی گیرد، فاکتور صدمه دیدگی صفر در نظر گرفته شده است.

برای تعیین مدول الاستیسیته سنگ بکر از نسبت مدولی^۱ که توسط دیر^۲ معرفی شد، استفاده شده است. مقادیر نسبت مدولی برای سنگ های مختلف ارائه شده است. رابطه مورد نظر به این صورت می باشد [۳۷]:

$$E_i = MR \sigma_c$$

۳-۴

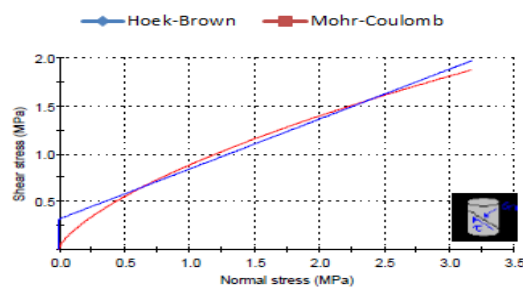
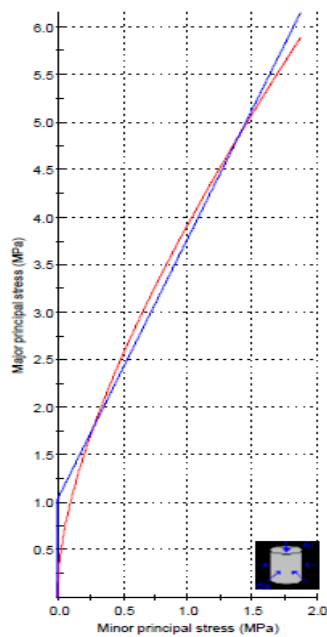
جدول ۴-۸- پارامترهای ژئومکانیکی توده سنگ های ساختگاه مخازن

سنگ مارن	سنگ آهک مرجانی	پارامترها	
۷/۲	۷/۵	σ_{ci} (MPa)	پارامترهای ورودی نرم افزار Roclab
۴۵	۴۰	GSI	
۷	۱۰	mi	
۰	۰	D	
۱۲۶۰	۳۰۷۵	E_i (MPa)	
۰/۹۸۲	۱/۱۷۳	mb	ثابت های معیار هوک و براون
۰/۰۰۲۲	۰/۰۰۱۳	S	
۰/۵۰۸	۰/۵۱۱	n	
۰/۳	۰/۳۲	چسبندگی (MPa)	پارامترهای توده سنگ
۲۶	۲۷/۵	زاویه اصطکاک داخلی (Deg)	
-۰/۰۱۶	-۰/۰۰۸	مقاومت کششی (MPa)	
۰/۳۲۳	۰/۲۴۸	مقاومت فشاری تک محوری (MPa)	
۰/۹۴۷	۱/۰۴۸	مقاومت فشاری کلی (MPa)	
۲۸۱/۸۰	۵۰۰	مدول تغییر شکل پذیری (MPa)	

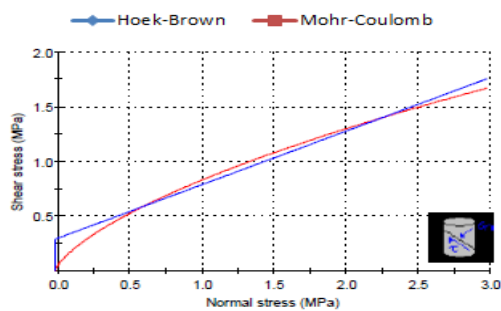
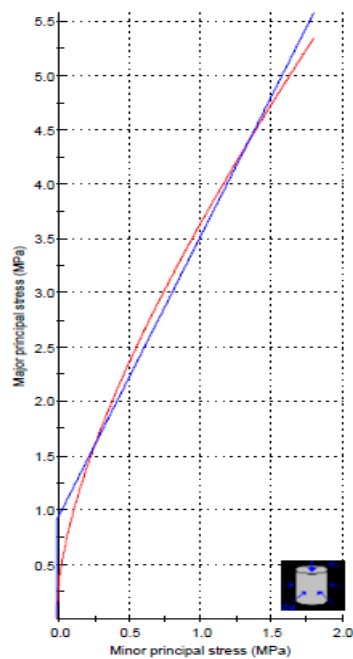
¹ Modulus ratio

² Deere

در جدول (۸-۴) پارامترهای C و ϕ پارامترهای موهر-کولمب مربوط به چسبندگی و زاویه اصطکاک داخلی توده سنگ و S, m_b و a پارامترهای هوک-براون براساس معیار شکست اصلاح شده می باشند. نمودارهای تنش-کرنش و تنش اصلی حداقل-تنش اصلی حداکثر برای سنگ آهک مرجانی و سنگ مارن در شکل های (۸-۴) و (۹-۴) مشاهده می شود.



شکل ۸-۴- نمودارهای تنش برشی-تنش نرمال و تنش اصلی حداقل-تنش اصلی حداکثر برای سنگ آهک مرجانی



شکل ۹-۴- نمودارهای تنش برشی-تنش نرمال و تنش اصلی حداقل-تنش اصلی حداکثر برای سنگ مارن

۴-۶- نتیجه گیری

در این فصل ساختگاه مخازن ذخیره سازی نفت خام در جزیره خارک به طور کامل مورد بررسی قرار گرفت و پارامترهای ژئومکانیکی مورد نظر تعیین شد. برای تعیین پارامترهای ژئومکانیکی منطقه از اطلاعات پروژه‌های ذخیره سازی انجام شده در منطقه و مطالعات میدانی صورت گرفته استفاده شده است. پی مخازن ذخیره سازی نفت خام به طور کلی از دو لایه سنگ آهک مرجانی و سنگ مارن تشکیل شده که سنگ آهک بر روی بستری از سنگ مارن قرار می‌گیرد. برای ساخت مخازن ابتدا خاک‌های نباتی و هوازده سطحی برداشته شده و سطح مورد نظر تسطیح می‌شود و در صورت نیاز مصالح مناسب جایگزین خواهد شد. در فصل بعد از این پارامترها برای تعیین ظرفیت باربری و نشست پی مخازن ذخیره سازی استفاده می‌شود.

۵- فصل پنجم

تعیین ظرفیت باربری و نشست پی‌های سنگی در

جزیره خارک

به طور کلی سنگ‌ها به غیر از سنگ‌های نرم حتی اگر شدیداً درزه‌دار باشند به عنوان پی برای اکثر سازه‌ها مصالح خوب و عاری از مشکل هستند. با این حال در احداث سازه‌های خاصی مثل برج‌های مرتفع، پل‌های بزرگ، نیروگاه‌های هسته‌ای، سدهای قوسی، مخازن عظیم ذخیره سازی و ... نیاز به پی‌های سنگی بسیار مقاوم از اهمیت خاصی برخوردار است. بنابراین تعیین دقیق ظرفیت باربری و نشست محیط‌های سنگی الزامی است.

هنگامی که نیروهای وارده شدید بوده و یا سنگ بسیار ضعیف و درزه‌دار است و یا زمانی که سازه خاصی نیاز به پی سنگ با مشخصات ویژه‌ای دارد، لازم است که روش‌های دقیق‌تری برای تعیین ظرفیت باربری نهایی و مجاز سنگ مورد استفاده قرار گیرد. در این فصل ظرفیت باربری و نشست پی‌های سنگی در جزیره خارک به منظور احداث مخازن سطحی ذخیره سازی نفت خام مورد بررسی قرار می‌گیرد.

۵-۲- تعیین ظرفیت باربری پی مخازن ذخیره سازی نفت خام

چنانکه در فصل دوم بیان شد، روش‌های مختلفی برای تعیین ظرفیت باربری پی‌های سنگی وجود دارد. این روش‌ها شامل روش‌های تحلیلی، روش‌های تجربی، روش‌های عددی و آزمون‌های بارگذاری صحرایی می‌باشد. در این میان آزمون‌های صحرایی همچون بارگذاری صفحه‌ای به دلیل هزینه زیاد و عدم امکان تعمیم دقیق با محیط به دلیل مشخص نبودن اثر مقیاس^۱ کمتر استفاده می‌شود. شکست در پی‌های سنگی به فاصله داری ناپیوستگی‌ها نسبت به عرض پی، جهت‌داری ناپیوستگی، شرایط ناپیوستگی (باز یا بسته بودن ناپیوستگی) و نوع سنگ بستگی دارد [۳۳]. در ادامه ظرفیت باربری پی‌های سنگی مخازن ذخیره سازی نفت خام در جزیره خارک توسط روش‌های تجربی، تحلیلی و عددی و در حالت‌های مختلف بررسی می‌شود.

¹ Scale effect

۵-۲-۱- تعیین ظرفیت باربری پی با استفاده از روش‌های تجربی

ظرفیت باربری پی به عنوان یکی از مباحث مهم در طراحی پی بوده که در روند طراحی آن‌ها مورد توجه قرار می‌گیرد. روش‌های تجربی تعیین ظرفیت باربری پی‌های سنگی و آیین نامه‌های موجود در فصل دوم به طور کامل بررسی شد. روابط تجربی اولیه براساس ارتباط ظرفیت باربری نهایی و مقاومت فشاری نامحصور سنگ بکر پیشنهاد شده‌اند و در آن‌ها اثر ناپیوستگی‌ها و مقاومت توده سنگ در نظر گرفته نشده است. انجمن ژئوتکنیک کانادا روشی تجربی را برای تعیین ظرفیت باربری پی‌های سنگی ارائه نمود که در آن تاثیر ناپیوستگی‌ها در توده سنگ در نظر گرفته شده است. در این رابطه K_{sp} فاکتوری تجربی بوده که به وضعیت ناپیوستگی‌های منطقه وابسته است و مقدار آن بین ۰/۱ تا ۰/۴ می‌باشد. بر اساس گزارش مطالعات صورت گرفته در منطقه این فاکتور ۰/۱ و طول فرورفتگی پی در سنگ ۱/۱ متر می‌باشد. مقادیر ظرفیت باربری نهایی و مجاز حاصل از روش‌های تجربی با فرض فاکتور ایمنی ۳ در جدول (۵-۱) آمده است.

جدول ۵-۱- ظرفیت باربری پی مخازن ذخیره سازی با استفاده از روش‌های تجربی (MPa)

سنگ مارن		سنگ آهک مرجانی		ظرفیت باربری روش بررسی
مجاز	نهایی	مجاز	نهایی	
۱۵/۶	۴۶/۸	۱۶/۲۵	۴۸/۷۵	روش تنگ
۷/۲	۲۱/۶	۷/۵	۲۲/۵	روش کوتز
۶/۴۸	۱۹/۴۴	۶/۷۵	۲۰/۲۵	روش رو و آرمیتاج
۱۰/۸	۳۲/۴	۱۱/۲۵	۳۳/۷۵	روش آرگما
۰/۷۲	۲/۱۷	۰/۷۵	۲/۲۶	روش کانادایی
۰/۷۵	۲/۲۵	۱	۳	آیین نامه

همانطور که در جدول (۵-۱) مشاهده می‌شود، روابط تجربی که به صورت ارتباط ظرفیت باربری و مقاومت فشاری تک محوری سنگ بکر بیان شده‌اند، ظرفیت باربری را به صورت غیر واقعی و بسیار بالا پیش بینی می‌کنند. در روش کانادایی ظرفیت باربری بسیار کمتر به دست می‌آید.

۵-۲-۲- تعیین ظرفیت باربری پی با استفاده از روش‌های تحلیلی

در فصول قبل انواع روش‌های تحلیلی تعیین ظرفیت باربری پی به تفصیل بیان شد. پی مخازن ذخیره سازی نفت خام در جزیره خارک عمدتاً از دو لایه سنگی تشکیل شده است. لایه‌ی اول سنگ آهک مرجانی بوده که عمدتاً تا عمق ۶ متری ادامه می‌یابد و لایه‌ی دوم سنگ مارن است که در زیر سنگ آهک مرجانی قرار گرفته و خود شامل توالی لایه‌هایی است که در زمان‌های مختلف رسوب یافته و تا اعماق ادامه می‌یابد. قطر مخازن ذخیره سازی نفت خام ۱۰۹ متر و طول فرورفتگی پی در سنگ ۱/۱ متر می‌باشد. پارامترهای ژئومکانیکی پی‌های سنگی منطقه در فصل قبل به طور کامل مورد بررسی قرار گرفت. در اینجا ظرفیت باربری نهایی و مجاز پی مخازن ذخیره سازی نفت خام در جزیره خارک بدست آمده از روش‌های تحلیلی مختلف بیان می‌شوند. مقادیر پارامترهای مورد استفاده در روش بل، روش هوک-براون و روش کولهاوی-کارتر در جداول (۵-۲) تا (۵-۴) آورده شده است.

جدول ۵-۲- مقادیر پارامترهای مورد استفاده در روش بل

پارامتر سنگ	C (MPa)	ϕ (Deg)	Cf1	Cf2	N ϕ	Nq	Nc	N γ	γ (gr/cm ³)
آهک مرجانی	۰/۳۲	۲۷/۵	۱/۲	۰/۷	۲/۷۲	۷/۳۸	۱۲/۲۵	۵/۲۵	۱/۹۲
مارن	۰/۳	۲۶	۱/۲	۰/۷	۲/۵۶	۶/۵۶	۱۱/۴	۴/۴۵	۲/۱۱

جدول ۵-۳- مقادیر پارامترهای مورد استفاده در روش هوک-براون

پارامتر سنگ	σ_c (MPa)	σ_3 (MPa)	Cf1	q _s	m	S	γ (gr/cm ³)
آهک مرجانی	۷/۵	۰/۵۳	۱/۲	۰/۰۲۱	۱/۱۷۳	۰/۰۰۱۳	۱/۹۲
مارن	۷/۲	۰/۵۵	۱/۲	۰/۰۲۳	۰/۹۸۲	۰/۰۰۲۲	۲/۱۱

جدول ۵-۴- مقادیر پارامترهای مورد استفاده در روش کولهاوی-کارتر

پارامتر سنگ	σ_c (MPa)	m	S	n
آهک مرجانی	۷/۵	۱/۱۷۳	۰/۰۰۱۳	۰/۵۱۱
مارن	۷/۲	۰/۹۸۲	۰/۰۰۲۲	۰/۵۰۸

با توجه به اطلاعات موجود در منابع مختلف ظرفیت باربری را می‌توان در دو حالت، با در نظر گرفتن اثر وزن توده سنگ و بدون در نظر گرفتن اثر وزن توده سنگ محاسبه کرد. از این رو ظرفیت باربری پی مخازن در دو حالت محاسبه شده است. سرانو و اولالا روابط مختلفی را برای تعیین ظرفیت باربری نهایی و مجاز پی‌های سنگی ارائه کردند که این روابط مستقل از اثر وزن توده سنگ بود. اولالا در سال ۲۰۱۴ رابطه جدیدی را معرفی کرد که در آن نقش بدیهی و مهم وزن توده سنگ را در ظرفیت باربری پی در نظر می‌گیرد. مقادیر پارامترها و ظرفیت باربری پی‌های سنگی مخازن در جداول (۵-۵) تا (۷-۵) موجود است. ضریب اطمینان مورد نظر برای تعیین ظرفیت باربری مجاز طبق توصیه منابع معتبر برابر ۳ اختیار شده است.

جدول ۵-۵- مقادیر پارامترها و ظرفیت باربری توده سنگ بی وزن در روش سرانو و اولالا ۱۹۹۴

پارامتر سنگ	β (MPa)	ξ	σ_{01}^*	ρ_1	$I(\rho_1)$	$I(\rho_2)$
آهک مرجانی	۱/۰۹۹	۰/۰۰۷۶	۰/۰۲۷	۵۴/۳۰	۰/۶۹۳	۲/۲۶۴
مارن	۰/۸۸۳۸	۰/۰۱۸۳	۰/۰۴۵	۵۰/۳۷	۰/۷۹۱	۲/۳۶۲

جدول ۵-۶- ادامه جدول قبل: مقادیر پارامترها و ظرفیت باربری توده سنگ بی وزن در روش سرانو و اولالا ۱۹۹۴

پارامتر سنگ	ρ_2	N_β	q_u (MPa)	F_m	F_p	q_a (MPa)
آهک مرجانی	۱۹/۷۸	۵/۸۲	۶/۳۹	۱	۱۲	۰/۵۳
مارن	۱۸/۸۵	۶/۳۸	۵/۶۳	۱	۱۳	۰/۴۳

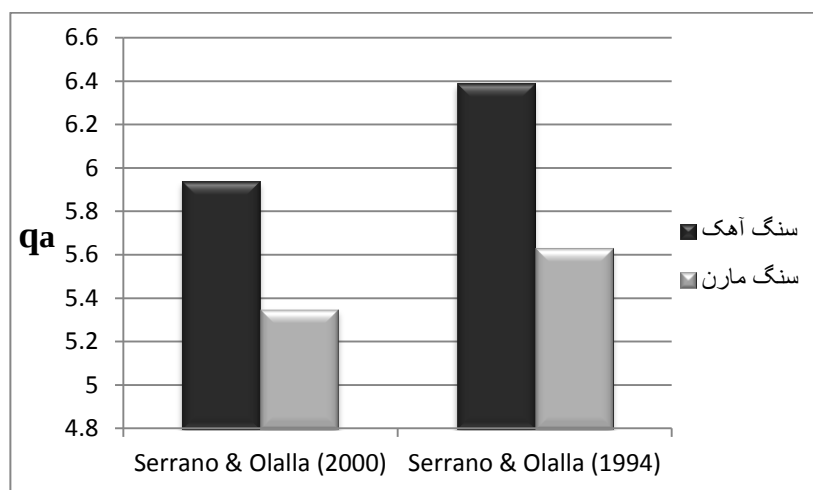
جدول ۵-۷- مقادیر پارامترها و ظرفیت باربری توده سنگ بی وزن در روش سرانو و اولالا ۲۰۰۰

پارامتر سنگ	K	A_n	β_n (MPa)	ξ	σ_{01}^*	ρ_1	$I(\rho_1)$
آهک مرجانی	۰/۹۶	۰/۱۳۶	۱/۰۱۷	۰/۰۰۸	۰/۰۲۹	۵۵/۰۵	۰/۷۰۶
مارن	۰/۹۷	۰/۱۱۵	۰/۸۳	۰/۰۱۹	۰/۰۴۷	۵۰/۷۶	۰/۸۰۷

جدول ۵-۸- ادامه جدول قبل: مقادیر پارامترها و ظرفیت باربری توده سنگ بی وزن در روش سرانو و اولالا ۲۰۰۰

پارامتر سنگ	$I(\rho_2)$	ρ_2	N_β	q_u (MPa)	F_m	F_p	q_a (MPa)
آهک مرجانی	۲/۲۷۷	۲۰/۶۵	۵/۸۵	۵/۹۴	۱	۱۲	۰/۵
مارن	۲/۳۷۸	۱۹/۴	۶/۴۶	۵/۳۵	۱	۱۳	۰/۴۱

ظرفیت باربری نهایی به دست آمده با استفاده از روش‌های ارائه شده توسط سرانو و اولالا برای سنگ آهک و مارن در شکل (۵-۱) نشان داده شده است. همانطور که مشاهده می‌شود روش سرانو و اولالا ۲۰۰۰ که برای محیط‌های به شدت درزه‌دار ارائه شده است، ظرفیت باربری را کمتر از روش سرانو و اولالا ۱۹۹۴ پیش‌بینی می‌کند.



شکل ۵-۱- ظرفیت باربری نهایی توده سنگ بی وزن با استفاده از روش سرانو و اولالا

ظرفیت باربری نهایی و مجاز پی‌های سنگی مخازن ذخیره سازی نفت خام در جزیره خارک

حاصل از روش‌های تحلیلی در جداول (۵-۹) و (۵-۱۰) آورده شده است. به منظور محاسبه ظرفیت باربری با توجه به روابط تحلیلی ارائه شده توسط محققین مختلف، ظرفیت باربری در دو حالت برای توده سنگ با وزن و توده سنگ بدون وزن محاسبه شده است. از آنجا که وزن سنگ بخش زیادی از بار وارده را تحمل می‌کند، انتظار می‌رود ظرفیت باربری توده سنگ با وزن بیشتر از توده سنگ بدون وزن باشد. بنابراین ظرفیت باربری محاسبه شده برای توده سنگ بدون وزن محافظه کارانه خواهد بود. نتایج نشان می‌دهد ظرفیت باربری توده سنگ بدون وزن بسیار کمتر از توده سنگ با وزن است.

جدول ۵-۹- ظرفیت باربری نهایی پی مخازن با استفاده از روش‌های تحلیلی (MPa)

سنگ آهک مرجانی		سنگ مارن		روش تحلیل
بدون وزن	با وزن	بدون وزن	با وزن	
۴/۷	۸/۶۷	۴/۱	۷/۸	روش بل
۲/۲	۳/۲۵	۲/۳	۳/۰۶	روش هوک و براون
۱/۷۱	-	۱/۸۳	-	روش کولهاوی و کارتر
۶/۳۹	۱۱/۸۸	۵/۶۳	۱۰/۷۵	روش سرانو و اولالا ۱۹۹۴
۵/۹۴	۱۱/۴۳	۵/۳۵	۱۰/۴۷	روش سرانو و اولالا ۲۰۰۰

جدول ۵-۱۰- ظرفیت باربری مجاز پی مخازن با استفاده از روش‌های تحلیلی (MPa)

سنگ آهک مرجانی		سنگ مارن		روش تحلیل
بدون وزن	با وزن	بدون وزن	با وزن	
۱/۵۷	۲/۸۹	۱/۳۷	۲/۶	روش بل
۰/۷۳	۱/۰۸	۰/۷۷	۱/۰۲	روش هوک و براون
۰/۵۷	-	۰/۶۱	-	روش کولهاوی و کارتر
۰/۵۳	۰/۹۹	۰/۴۳	۰/۸۳	روش سرانو و اولالا ۱۹۹۴
۰/۵	۰/۹۵	۰/۴۱	۰/۸۱	روش سرانو و اولالا ۲۰۰۰

همانطور که مشاهده می‌شود، ظرفیت باربری بدست آمده از روش‌های مختلف با توجه به تئوری‌های مختلفی که در آن‌ها استفاده شده متفاوت می‌باشد. از آنجایی که سنگ آهک مرجانی با ضخامتی حدود ۶ متر بر روی سنگ مارن قرار دارد و این بخش از پی نیز تحت تاثیر بارگذاری ناشی

از وزن مخزن و محتویات آن قرار می‌گیرد، ظرفیت باربری برای هر دو سنگ محاسبه شده است. در شرایط واقعی بخش زیادی از بار اعمال شده توسط لایه سنگ آهک تحمل می‌شود و از آنجا که لایه مارن در عمق قرار گرفته است، ظرفیت باربری آن از مقادیر محاسبه شده توسط روش‌های مختلف بیشتر خواهد بود. در شرایطی که پی مخازن پس از برداشت لایه های هوازده سطحی مستقیماً بر روی سنگ مارن قرار گیرد، ظرفیت باربری محاسبه شده را از خود نشان خواهد داد.

در بین روش‌های تحلیلی مختلف که بیان شد، روش سرانو-اولالا ۱۹۹۴، روش سرانو-اولالا ۲۰۰۰ و روش بل به ترتیب بیشترین ظرفیت باربری نهایی و روش کولهاوی-کارتز و روش هوک-براون به ترتیب کمترین ظرفیت باربری نهایی را به دست می‌آورند. روش سرانو-اولالا ۱۹۹۴ و روش سرانو-اولالا ۲۰۰۰ به ترتیب کمترین ظرفیت باربری مجاز و روش بل بیشترین ظرفیت باربری مجاز را پیش‌بینی می‌کنند. روش هوک-براون شرایط بینابینی از ظرفیت باربری مجاز را نتیجه می‌دهد.

۵-۲-۳- تعیین ظرفیت باربری پی با استفاده از روش عددی

امروزه با توجه به پیشرفت سریع علوم کامپیوتر، استفاده از روش‌های عددی برای حل مسائل ژئوتکنیکی گسترش چشم‌گیری یافته است. به دلیل قابلیت بالای روش‌های عددی، می‌توان تاثیر ناپیوستگی‌هایی مانند گسل، درزه، صفحات لایه بندی و ناهمگنی‌ها را مطالعه و بررسی کرد. با بهره‌گیری از نرم افزارهای موجود و تعریف دقیق هندسه، شرایط مرزی و خواص مقاومتی و تغییر شکل پذیری توده سنگ، می‌توان طراحی قابل قبولی انجام داد. در فصل دوم انواع روش‌های عددی به طور کلی معرفی شد. در این پایان نامه از روش تفاضل محدود برای بررسی ظرفیت باربری پی مخازن ذخیره سازی نفت خام در جزیره خارک استفاده شده است.

۵-۲-۳-۱- روش تفاضل محدود

روش تفاضل محدود یکی از قدیمی‌ترین روش‌های عددی برای حل دستگاه‌های معادلات دیفرانسیلی است که هنوز هم از کاربرد گسترده‌ای در حل مسائل مهندسی ژئوتکنیک برخوردار است.

در این روش هندسه مسئله به صورت پیوسته به یک سری المان تقسیم می شود که در نقاط گرهی به هم ارتباط دارند. برای حل معادلات در این روش به ازای هر مشتقی که در معادلات وجود دارد، عبارتی جبری بر حسب متغیرهای مساله مانند تنش، جابجایی و غیره جایگزین می شود. در این روش هیچ ماتریسی تشکیل نمی شود بنابراین محدودیت های کمتری دارد و همچنین اجازه آنالیز جابجایی بزرگ را می دهد. این روش به توان محاسباتی زیادی برای پردازش نیاز ندارد و نتایج حاصل از این روش و روش المان محدود برای مسائل خاص، یکسان است اما استفاده از روش تفاضل محدود برای کاربردهای مهندسی ژئوتکنیک انعطاف پذیرتر از روش المان محدود است [۳۳].

از مهم ترین نرم افزارهایی که از روش تفاضل محدود برای حل مسائل ژئوتکنیک استفاده می کند، نرم افزار $FLAC^{3D}$ ^۱ است که از مجموعه نرم افزارهای شرکت آیتسکا^۲ می باشد. این نرم افزار براساس تحلیل محاسباتی لاگرانژی استوار است و برای مدل سازی تغییر شکل های بزرگ مناسب می باشد. با این نرم افزار می توان مدل رفتاری سازه های خاکی، سنگی و یا سایر مواد را که دارای جریان پلاستیک در هنگام رسیدن به حد تسلیم هستند، شبیه سازی کرد. در این پایان نامه تمامی تحلیل های عددی توسط نرم افزار $FLAC^{3D}$ ورژن ۴ انجام گرفته است.

۵-۲-۳-۲- مراحل حل مسئله در $FLAC^{3D}$

مراحل حل مسئله و مدلسازی در نرم افزار $FLAC^{3D}$ به صورت زیر می باشد:

• ساخت مدل اولیه

- ساخت هندسه مدل
- انتخاب مدل رفتاری و تعیین خصوصیات ماده
- اعمال شرایط مرزی، اولیه
- بارگذاری پی

^۱ Fast Lagrangian Analysis of Continua in 3 Dimensional ($FLAC^{3D}$)

^۲ ITASCA

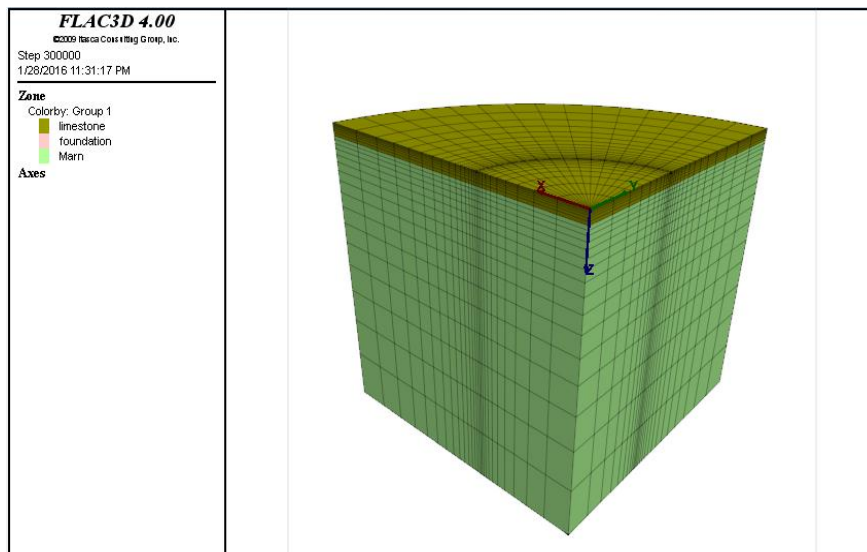
- حل و بررسی مدل ساخته شده و اصلاح آن در صورت نیاز

- تفسیر نتایج

۵-۲-۳-۳- هندسه سازی

اولین گام برای ساخت یک مدل ساخت هندسه آن است. زون بندی در این نرم افزار همزمان با هندسه سازی انجام می گیرد و تعیین چگالی المان بندی بر عهده کاربر می باشد. همواره باید مطابق با اصول و قواعد حاکم بر این نرم افزار، یک شبکه بندی بهینه را پیشنهاد داد. برای این منظور چگالی زون بندی مدل باید توزیع مناسبی داشته باشد و مقادیر منطقی برای ابعاد زون ها تعیین شود تا بتوان مناسب ترین شبکه را برای مدل ساخت. در اینجا نیز با ساختن مدل های مختلف و بررسی آن ها سعی شده مناسب ترین مدل برای تحلیل ها انتخاب شود، تا صحت و دقت نتایج را به همراه داشته باشد.

برای ساخت مدل سه بعدی در نرم افزار $FLAC^{3D}$ به دلیل تقارن پی دایره ای، یک چهارم از پی مدلسازی شده است. با این کار حجم محاسبات در مقایسه با مدلسازی کل پی کم می شود. محورهای مختصات به گونه ای انتخاب شده اند که محورهای X و Y به صورت افقی در صفحه بالایی استوانه و محور Z رو به پایین در راستای محور استوانه می باشد. شعاع مدل و ارتفاع آن برابر ۱۵۰ متر در نظر گرفته شده است. لایه ها به صورت افقی بوده که با توجه به وضعیت زمین شناسی کلی منطقه لایه اول تا عمق ۶ متر و لایه دوم از ۶ متر تا عمق زمین ادامه می یابد. محیط مدل سازی توسط المان های چهار ضلعی مش بندی شده است. چگالی مش بندی به گونه ای انتخاب شده که کمترین خطا را در نتایج داشته باشد. نمونه ای از مدل هندسی و مش بندی انجام شده برای بررسی ظرفیت باربری در این تحقیق در شکل (۵-۲) قابل مشاهده است.



شکل ۵-۲- مدل هندسی و مش بندی ایجاد شده در نرم افزار $FLAC^{3D}$

۵-۳-۴- انتخاب مدل رفتاری و تعیین خصوصیات ماده

پس از ساخت هندسه، باید یک مدل رفتاری مناسب به مواد آن اختصاص یابد. مدل‌های رفتاری متفاوتی در نرم افزار $FLAC^{3D}$ پیش بینی شده است. یکی از پرکاربردترین مدل‌های رفتاری در مسائل مکانیک سنگ و خاک، مدل موهر-کولمب است. در این مدل، تنش تسلیم تابع تنش‌های اصلی ماکزیمم و مینیمم می‌باشد. پارامترهای لازم برای این مدل چسبندگی، زاویه اصطکاک داخلی، زاویه اتساع، دانسیته، مدول حجمی و مدول برشی است. مدل رفتاری دیگری که در این نرم افزار قابل استفاده است، مدل هوک-براون می‌باشد. این مدل رفتاری براساس معیار گسیختگی هوک-براون عمل می‌کند و شرایط تنشی را در نظر می‌گیرد که منجر به گسیختگی در ماده سنگ و یا توده سنگ می‌شود. این معیار غیر خطی بوده و براساس رابطه بین تنش‌های اصلی حداقل و حداکثر تعریف می‌شود. پارامترهای لازم برای این مدل رفتاری پارامترهای هوک-براون (n ، s و m_b)، مقاومت فشاری تک محوره، دانسیته، مدول حجمی و مدول برشی است.

در این پایان نامه به منظور پیش بینی مدل رفتاری و تعیین خصوصیات مواد از مدل موهر-کولمب و مدل هوک-براون استفاده شده است. از آنجایی که روابط تحلیلی ارائه شده نیز براساس این

دو معیار می‌باشد، مقایسه‌ای بین نتایج حاصل از این دو مدل رفتاری صورت می‌گیرد. پارامترهای مورد نیاز برای این دو مدل در فصل قبل به طور کامل بررسی شد.

۵-۳-۲-۵- شرایط مرزی و اولیه

در این مرحله شرایط مرزی و اولیه در مدل اعمال شده و مدل برای رسیدن به تعادل اجرا می‌شود. در یک مدل عددی، شرایط مرزی شامل مقادیر متغیرهای میدانی^۱ مانند میدان جابجایی، تنش سرعت و غیره است که در مرزهای یک شبکه بندی عددی باید تعریف شوند. مرزهای مدل را می‌توان در دو دسته حقیقی^۲ و مجازی^۳ طبقه بندی کرد. مرزهای حقیقی مرزهایی هستند که واقعا در اطراف یک جسم فیزیکی که قرار است مدل شود، وجود دارند. به عنوان مثال جداری یک فضای زیرزمینی و سطح زمین به عنوان مرز حقیقی در نظر گرفته می‌شوند. در حالی که مرزهای مجازی وجود خارجی ندارند و تنها برای محصور کردن زون های یک مدل تعریف می‌شوند. از مرزهای مجازی می‌توان برای کاهش حجم محاسبات استفاده کرد [۳۴].

برای اعمال شرایط مرزی در مدل ساخته شده، جابجایی مرزهای تقارن در $x=0$ و $y=0$ به ترتیب در جهات x و y محدود شده‌اند. در مرزهای دایره‌ای اطراف و کف مدل جابجایی‌ها در تمام جهات محدود شده‌اند. برای اعمال شرایط اولیه شتاب گرانش به مدل اعمال می‌شود. شکل (۳-۵) شرایط مرزی در نظر گرفته شده برای تحلیل را به طور کامل نشان می‌دهد.

۵-۳-۲-۶- بارگذاری پی در مدل تفاضل محدود

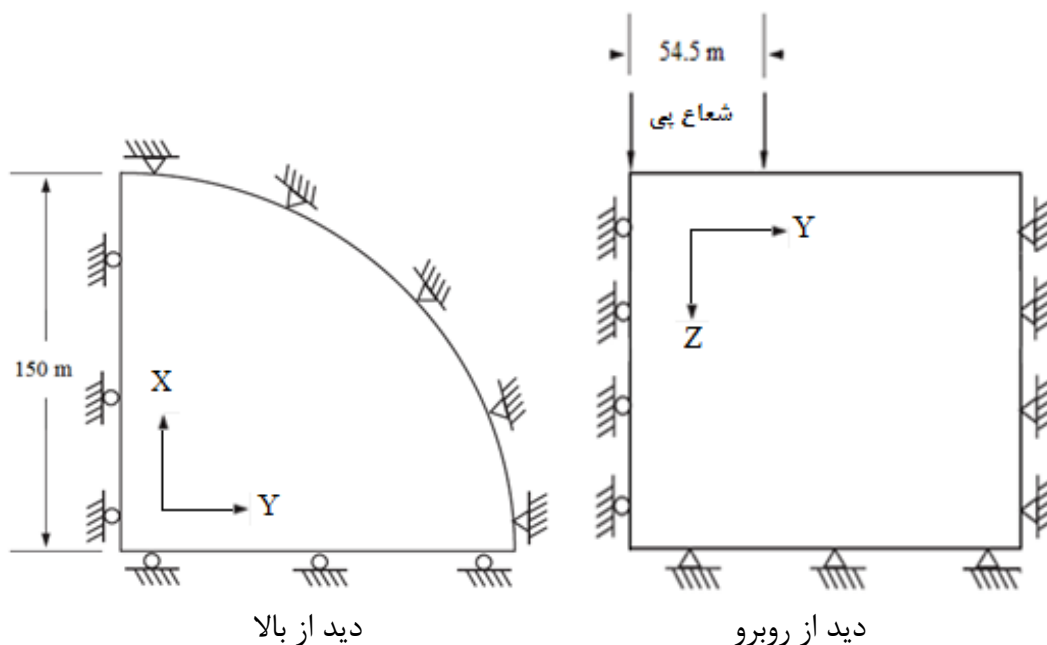
در این مرحله با توجه به نوع مسئله تعریف شده، تغییرات لازم به مدل اعمال می‌شود. تحلیل با اعمال یک سرعت قائم یا فشار یکنواخت برای شبیه سازی بارگذاری پی انجام می‌شود. برای این منظور طبق پیشنهاد دستورالعمل نرم افزار $FLAC^{3D}$ یک سرعت با بزرگی $10^{-4} \times 2/5$ متر در هر گام

¹ Field variables

² Real

³ Artificial

به نقاط گره‌ای زیر پی در جهت مثبت رو به پایین اعمال می‌شود. تحلیل‌ها در مدل رفتاری موهر-کولمب تا ۳۰۰۰۰۰ گام زمانی و در مدل رفتاری هوک-براون تا ۱۲۰۰۰۰ گام زمانی ادامه می‌یابد. نکته مهم در انتخاب تعداد گام زمانی و سرعت بارگذاری این است که سرعت بارگذاری باید به گونه‌ای انتخاب شود که نمودار ظرفیت باربری به درستی رسم شود. همچنین تعداد گام زمانی تا جایی ادامه می‌یابد که کنتورهای جابجایی و کنتورهای میدان سرعت به صورت دقیق ترسیم شوند. بنابراین کنتورهای جابجایی، کنتورهای میدان سرعت و نمودار ظرفیت باربری باید کنترل شوند تا از ایجاد خطا در نتایج جلوگیری شود.



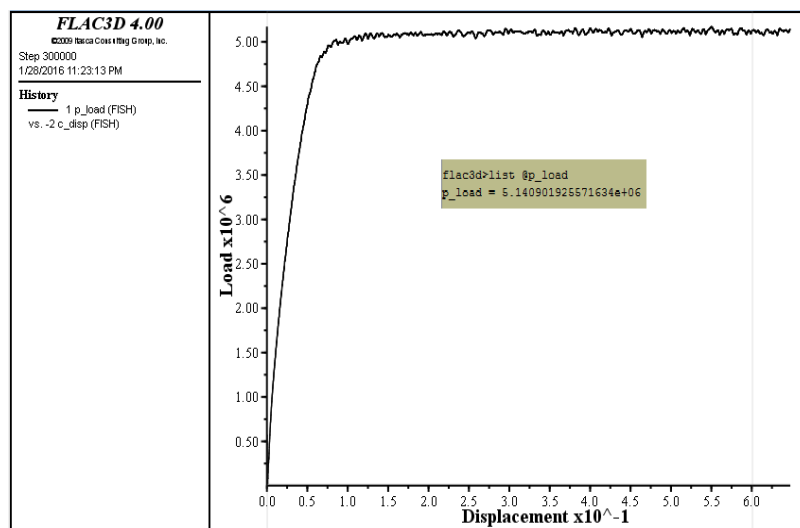
شکل ۳-۵- شرایط مرزی برای یک چهارم از مدل در آنالیز $FLAC^{3D}$

ظرفیت باربری نهایی پی به صورت مجموع نیروهای قائم عکس العمل در گره‌های زیر پی تقسیم بر مساحت آن محاسبه می‌شود. رابطه زیر نحوه تعیین این مقدار را نشان می‌دهد [۳۵]:

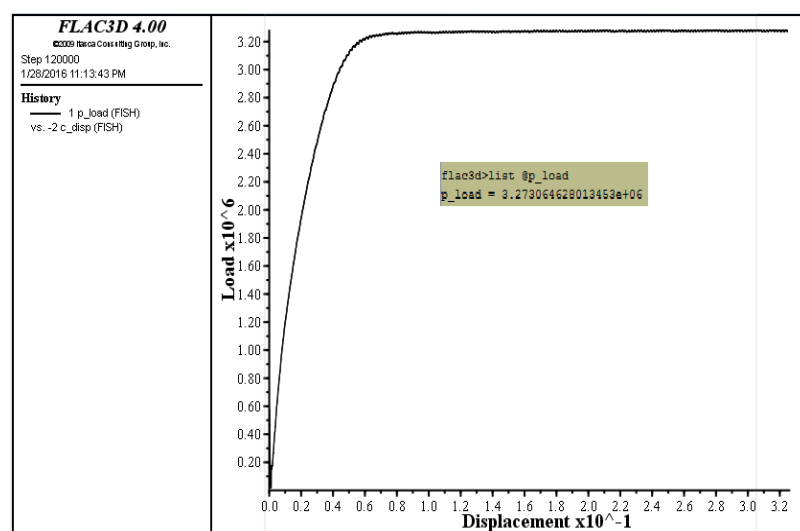
$$q_u = \frac{\sum_{i=1}^l f_i}{x_{i+1} - x_1} \quad ۱-۵$$

در این رابطه، f_i حداکثر نیروی قائم عکس العمل در گره‌های زیر پی، x_i موقعیت گره زیر پی در راستای افقی، x_1 موقعیت اولین گره در زیر پی و x_{i+1} موقعیت گره مجاور بر آخرین گره زیر پی است.

با اجرای برنامه در تعداد گام زمانی محاسباتی، نمودار ظرفیت باربری پی به دست می آید، به این ترتیب ظرفیت باربری نهایی قابل محاسبه است. زمانی که پی دچار تغییر مکان‌هایی است که منجر به افزایش بار نمی شود نمودار بار- تغییر مکان به یک ثبات (شیب تقریباً صفر) می‌رسد. باری که در آخرین گام به دست می آید، معادل ظرفیت باربری نهایی پی (q_u) است. شکل (۴-۵) نمودار ظرفیت باربری نهایی پی در مدل موهر-کولمب و شکل (۵-۵) نمودار ظرفیت باربری پی در مدل هوک-براون را نشان می‌دهد. همانطور که مشاهده می‌شود، ظرفیت باربری به دست آمده با استفاده از مدل رفتاری موهر-کولمب بسیار بیش‌تر از مدل رفتاری هوک-براون است.



شکل ۴-۵- نمودار تعیین ظرفیت باربری پی مخازن ذخیره سازی در مدل موهر-کولمب



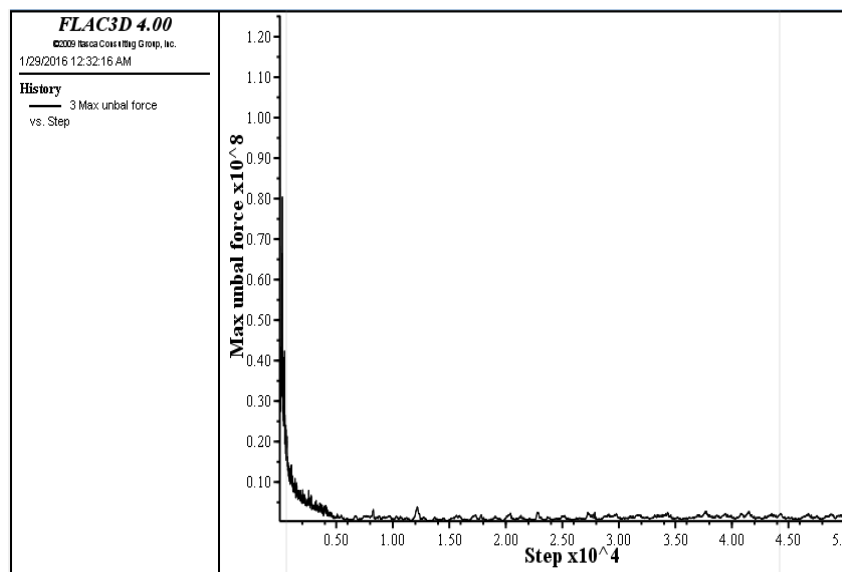
شکل ۵-۵- نمودار تعیین ظرفیت باربری پی مخازن ذخیره سازی در مدل هوک-براون

ظرفیت باربری نهایی و مجاز پی مخازن ذخیره سازی نفت خام در جزیره خارک به دست آمده از مدلسازی عددی توسط نرم افزار $FLAC^{3D}$ در دو حالت با در نظر گرفتن وزن توده سنگ و بدون در نظر گرفتن وزن توده سنگ در جدول (۵-۱۱) آمده است. برای محاسبه ظرفیت باربری در حالت با وزن، وزن مخصوص توده سنگ در مدلسازی اعمال می شود و در حالت بی وزن ظرفیت باربری بدون در نظر گرفتن وزن مخصوص توده سنگ به دست می آید. نتایج نشان می دهد وزن توده سنگ نقش زیادی را در افزایش ظرفیت باربری پی دارد.

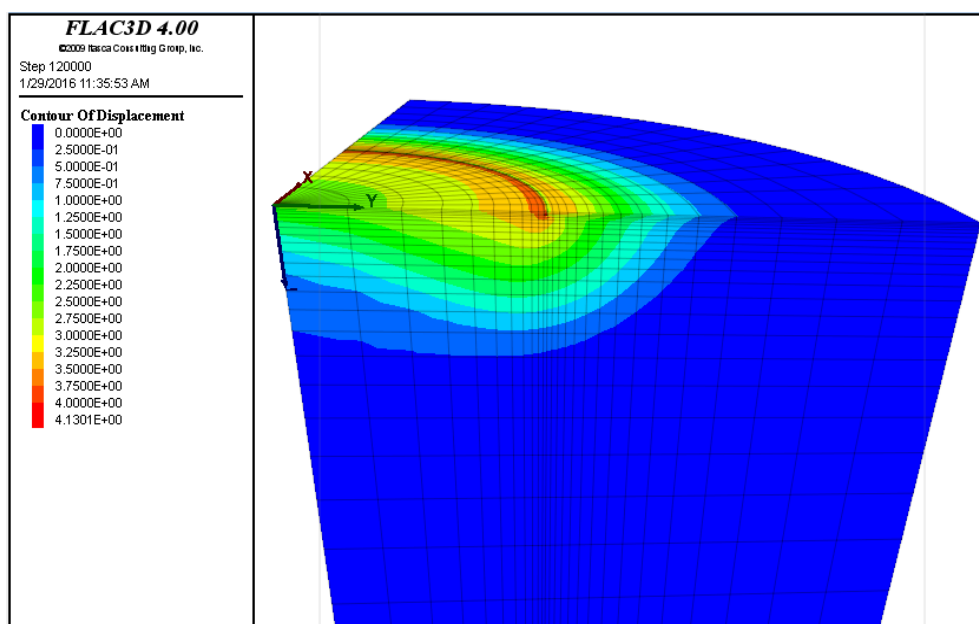
جدول ۵-۱۱- ظرفیت باربری پی مخازن ذخیره سازی نفت خام بدست آمده از تحلیل عددی (MPa)

مدل رفتاری	ظرفیت باربری مجاز		ظرفیت باربری نهایی	
	با وزن	بدون وزن	با وزن	بدون وزن
مدل موهر-کولمب	۱/۷۱	۱/۰۷	۵/۱۴	۳/۲
مدل هوک-براون	۱/۰۹	۰/۶۹	۳/۲۷	۲/۰۸

به منظور بررسی وضعیت تعادل مدل عددی و کنترل صحت روند مدلسازی می توان از شاخص هایی مانند نیروهای نامتعادل، سرعت در گره ها و جابجایی مدل استفاده کرد. شکل (۵-۶) نشان می دهد که نیروهای نامتعادل بعد از گام های زمانی مشخصی به صفر میل کرده و مدل به درستی به تعادل رسیده است. کنتورهای جابجایی پی مخازن ذخیره سازی نفت خام در جزیره خارک در زمان ظرفیت باربری نهایی برای یک چهارم از مدل در شکل (۵-۷) مشاهده می شود. همانطور که در شکل نیز مشخص است، بیش ترین جابجایی پی در اطراف مخزن و زیر رینگ بتنی اتفاق می افتد. در واقع بار اعمال شده به زمین باعث جابجایی زمین زیر پی به خصوص در محدوده اطراف مخزن می شود. این کنتورها محدوده ای از زمین که تحت تاثیر بارگذاری قرار می گیرد را نشان می دهند. همانطور که در شکل مشاهده می شود، کنتورهای جابجایی سنگ مارن که در زیر لایه سنگ آهک مرجانی قرار دارد را تحت تاثیر قرار می دهند. این مساله لزوم بررسی ظرفیت باربری و نشست سنگ مارن را نشان می دهد.



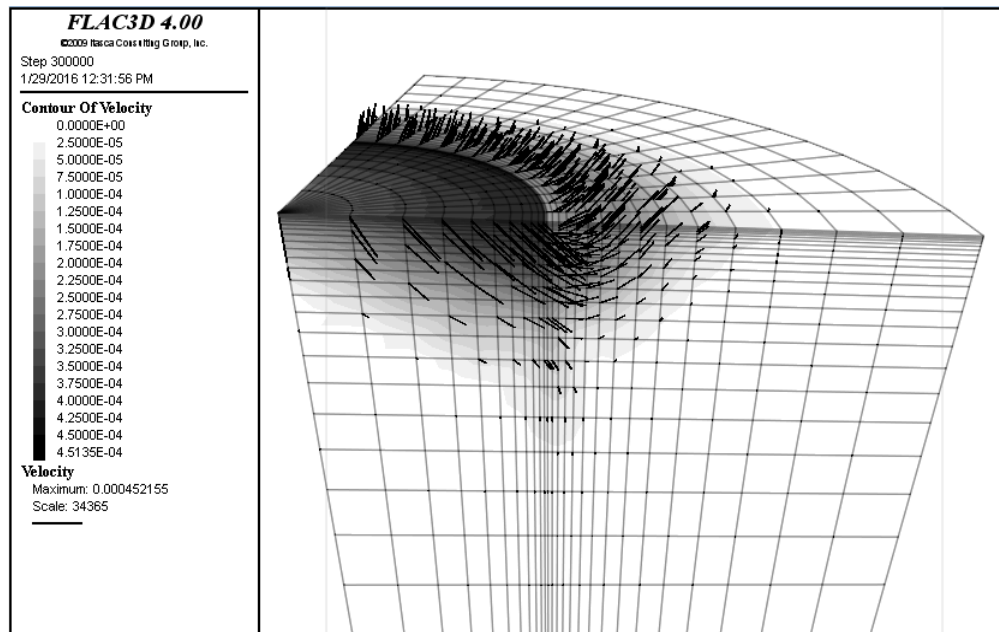
شکل ۵-۶- تغییرات نیروی نامتعادل پس از بارگذاری در مدل موهر-کولمب



شکل ۵-۷- کنتورهای جابجایی پی مخازن در زمان ظرفیت باربری نهایی در مدل هوک- براون

کنتورهای میدان سرعت و بردار سرعت پی پس از بارگذاری در زمان ظرفیت باربری نهایی در شکل (۵-۸) مشاهده می‌شود. همانطور که در شکل مشخص است در اثر اعمال بار ناشی از وزن مخزن و محتویات درون آن، زمین زیر مخزن به سمت اطراف تمایل به جابجایی دارد. کنتورهای میدان سرعت حساس‌ترین نقاط پی در اثر اعمال بار که بیشترین جابجایی در آن‌ها اتفاق می‌افتد را نشان

می‌دهند. بردارهای سرعت جهت جابجایی زمین زیر مخزن را نشان می‌دهند. در واقع در اثر اعمال بار بخشی از پی که در زیر مخزن قرار دارد فشرده می‌شود و محدوده اطراف مخزن تمایل به جابجایی رو به بالا را دارد.



شکل ۵-۸- کنتورهای میدان سرعت و بردار سرعت پی پس از بارگذاری در مدل موهر-کولمب

۵-۲-۳-۷- بررسی ظرفیت باربری پی مخازن در حالت خاص

چنانکه بیان شد، جنس مصالح پی در محل احداث مخازن عظیم ذخیره سازی نفت خام در جزیره خارک به طور کلی از دو لایه سنگ آهک مرجانی و سنگ مارن تشکیل شده است. بررسی نمودار گمانه‌ها و مطالعات میدانی صورت گرفته نشان می‌دهد که یک لایه نازک از سنگ‌های هوازده و خاک سطح زمین را پوشانده است. برای احداث مخازن نفت خام ابتدا خاک‌های سطحی و هوازده برداشت شده و در صورت نیاز مصالح مناسب جایگزین می‌شود.

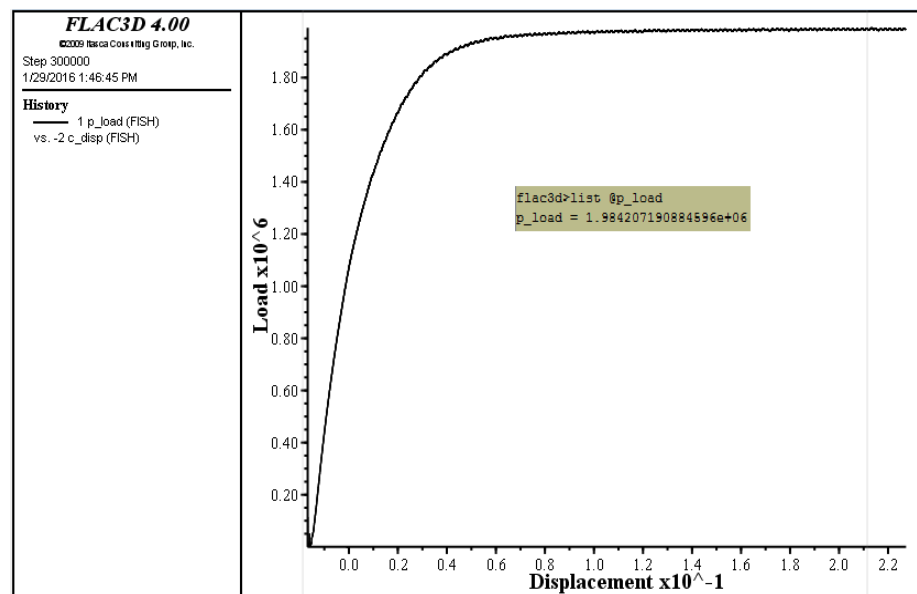
پی اکثر مخازن ذخیره سازی نفت خام به گونه‌ای است که با برداشت خاک‌های سطحی و هوازده بر روی بستر مقاوم سنگی قرار می‌گیرد و تنها در برخی از موارد نیاز به مصالح جایگزین می‌باشد. با بررسی نمودار گمانه‌ها و ترانشه‌های موجود در منطقه مشخص شد که به طور معمول در برخی از گمانه‌ها تا عمق ۲ متری سنگ‌های هوازده و خاک وجود دارد. با توجه به ناهمواری‌های

موجود در منطقه مقدار مصالح جایگزین حداکثر ۳ متر در نظر گرفته شده است. خصوصیات خاک مورد استفاده در زیر مخازن ذخیره سازی نفت خام به عنوان مصالح جایگزین براساس گزارشات موجود در جدول (۵-۱۲) آمده است.

جدول ۵-۱۲- خصوصیات خاک مورد استفاده در زیر مخازن ذخیره سازی نفت خام [۵]

پارامتر	C (MPa)	ϕ (Deg)	γ (gr/cm ³)	E (MPa)	ν
مقدار	۰/۰۲۱	۲۰	۱/۱۳	۱۶	۰/۴

در این حالت به منظور بررسی ظرفیت باربری پی مخازن با استفاده از مدلسازی عددی، هندسه مدل، سرعت بارگذاری و تعداد گام زمانی مطابق آن چه در قبل گفته شد می باشد. مدل رفتاری برای توصیف مواد تشکیل دهنده پی مدل موهر - کولمب در نظر گرفته شده است. در این حالت پس از بارگذاری، ظرفیت باربری نهایی پی با در نظر گرفتن وزن توده سنگ ۱/۹۸ مگا پاسکال به دست آمده است. شکل (۵-۹) نمودار تعیین ظرفیت باربری پی مخازن ذخیره سازی در صورت وجود یک لایه ۳ متری خاک در زیر مخزن را نشان می دهد.



شکل ۵-۹- نمودار تعیین ظرفیت باربری در صورت وجود یک لایه ۳ متری خاک

۵-۳- تعیین نشست پی مخازن ذخیره سازی

مقدار و توزیع نشست نقش مهمی را در طراحی و اجرای پی‌ها دارد. نشست زیاد اجزای پی ممکن است که باعث ایجاد صدمه و یا ایجاد اختلال در برنامه بهره برداری سازه شود. برای بیشتر پی‌های واقع بر روی سنگ، مواد باربر به طور قابل ملاحظه‌ای الاستیک و ایزوتروپ هستند، بنابراین نشستی که پدید می‌آید طولانی مدت نیست بلکه از نوع نشست آنی بوده و از تئوری الاستیسیته قابل محاسبه است. در اینجا به بررسی نشست پی مخازن ذخیره سازی با استفاده از روش تحلیلی و عددی می‌پردازیم.

۵-۳-۱- تعیین نشست با استفاده از روش تحلیلی

مخازن عظیم ذخیره سازی نفت خام در جزیره خارک به طور عمده بر روی بستری از سنگ آهک مرجانی با ضخامتی به طور متوسط حدود ۶ متر قرار می‌گیرند و در زیر این بستر سنگ مارن وجود دارد. برای محاسبه نشست با استفاده از روش‌های تحلیلی از آنجایی که مدول الاستیسیته سنگ آهک مرجانی بیش از سنگ مارن است صلبیت آن بیشتر می‌باشد. در این شرایط نشست به صورت زیر به دست می‌آید:

$$\delta_v = a \delta_{\infty}$$

در این رابطه δ_{∞} نشست محاسبه شده با فرض این که مصالح پی کاملاً از جنس لایه مارن باشد و پارامتر a ضریب تصحیح است. مقادیر پارامترها و نشست پی مخازن ذخیره سازی نفت خام در جدول (۵-۱۳) مشاهده می‌شود.

جدول ۵-۱۳- مقادیر پارامترها و نشست پی مخازن با استفاده از روش تحلیلی

پارامتر	a	q (MPa)	C _d در مرکز	C _d در گوشه	E (MPa)	v	δ_v (cm) در مرکز	δ_v (cm) در گوشه
مقدار	۰/۹۸	۰/۲	۱	۰/۶۴	۲۸۱/۸۰	۰/۳	۶/۹	۴/۴۲

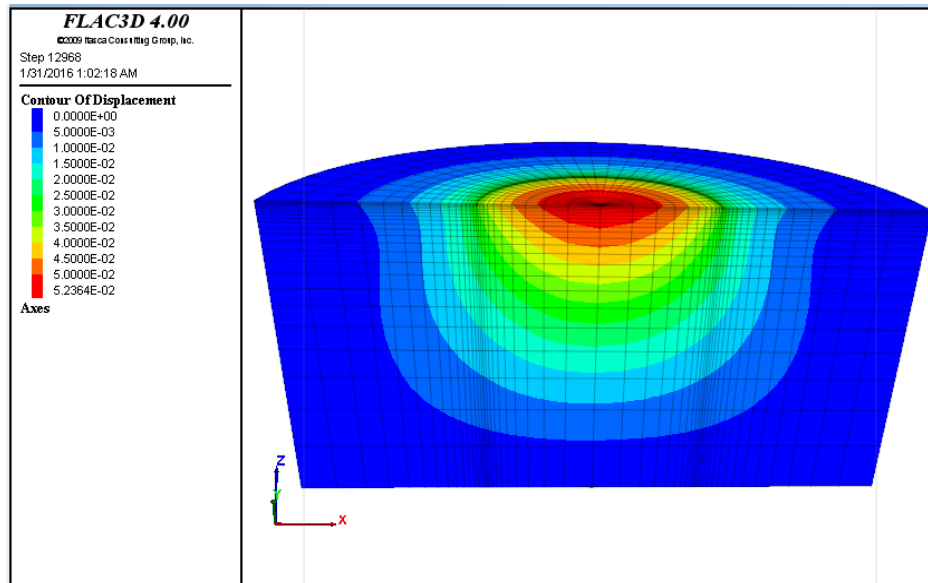
۵-۳-۲- تعیین نشست با استفاده از روش عددی

برای تعیین نشست پی مخازن ذخیره سازی نفت خام با استفاده از مدلسازی عددی اولین گام ساخت هندسه مدل می باشد. برای این منظور ابعاد مدل هندسی مورد نظر در جهت x و y که در صفحه ی افقی قرار دارند ۳۰۰ متر و در جهت z که در راستای قائم رو به پایین است، ۱۵۰ متر در نظر گرفته شده است. به دلیل تقارن پی دایره ای و کاهش حجم محاسبات نصف پی مدل می شود. چگالی مش بندی، شرایط مرزی و اولیه مشابه مدل ساخته شده برای تعیین ظرفیت باربری است. مدل رفتاری مورد نظر برای تعیین خصوصیات مواد تشکیل دهنده پی مدل موهر-کولمب و مدل هوک-براون در نظر گرفته شده است. بار اعمال شده به پی بار ثقیلی می باشد که این بار شامل وزن مخزن و محتویات درون آن است.

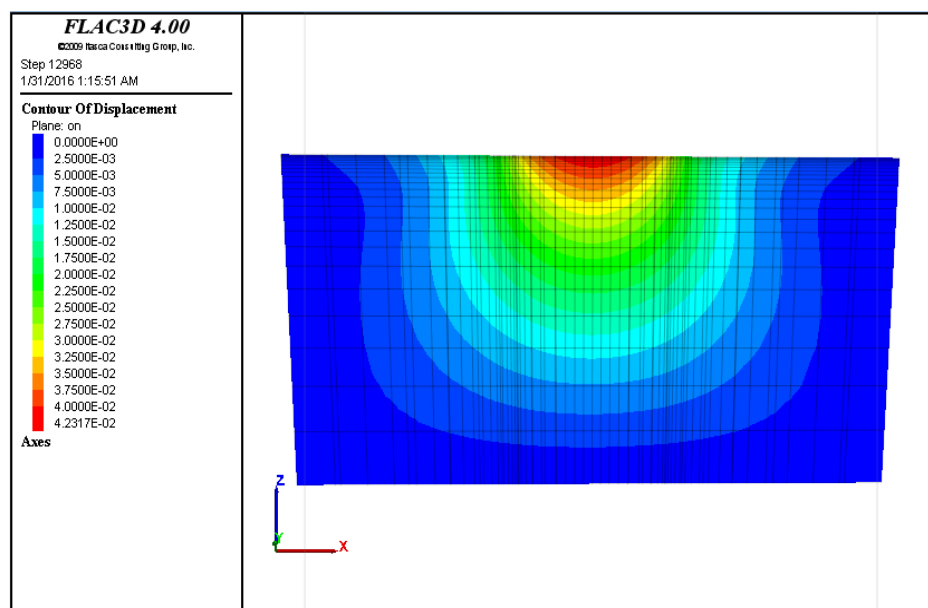
هندسه مدل ساخته شده و کنتورهای نشست پی در مدل موهر-کولمب در شکل (۵-۱۰) نشان داده شده است. همانطور که مشخص است بیشترین نشست پی در مرکز مخزن و کمترین نشست در اطراف مخزن اتفاق می افتد. نشست به دست آمده با استفاده از مدلسازی عددی با مدل رفتاری موهر-کولمب در گوشه ها ۲/۷ سانتیمتر و در مرکز مخزن ۵/۵ سانتیمتر می باشد. نمودار جابجایی نقاط زیر پی پس از بارگذاری در مدل موهر-کولمب در شکل (۵-۱۱) دیده می شود. همانطور که در شکل مشاهده می شود جابجایی پس از تعداد گام زمانی مشخصی به حد ثابتی می رسد. کنتورهای نشست پی در صفحه ی قائمی که در فاصله ۴۰ متری از مرکز مخزن قرار گرفته با استفاده از مدل رفتاری موهر-کولمب در شکل (۵-۱۲) دیده می شود. نشست به دست آمده در این حالت کمتر از مرکز مخزن خواهد بود که در شکل ها نیز مشاهده می شود.

نمودار جابجایی نقاط زیر پی پس از بارگذاری در مدل هوک-براون در شکل (۵-۱۳) مشاهده می شود. همانطور که انتظار می رود نشست به دست آمده در این مدل رفتاری با مدل موهر-کولمب برابر است. این مساله را اینگونه می توان بیان کرد که همانطور که در روابط تحلیلی محاسبه نشست

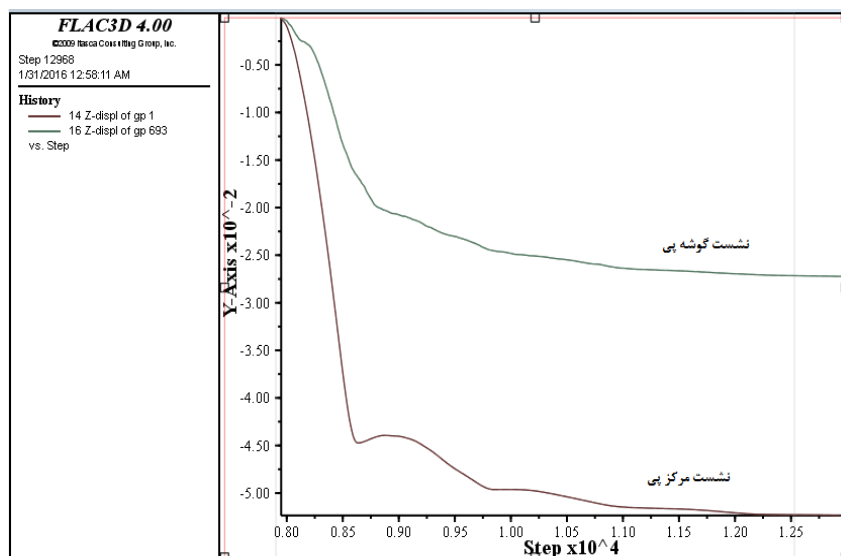
الاستیک سنگ نیز دیده می شود، نشست تنها تابع ثوابت الاستیک سنگ (E و ν) خواهد بود و سایر پارامترها تاثیری در نشست پی نخواهند داشت. از آنجایی که ثوابت الاستیک توده سنگ در این دو مدل رفتاری توسط مدول برشی و مدول حجمی تعریف می شوند و این دو پارامتر در هر دو مدل برابر است، نشست محاسبه شده نیز یکسان خواهد بود.



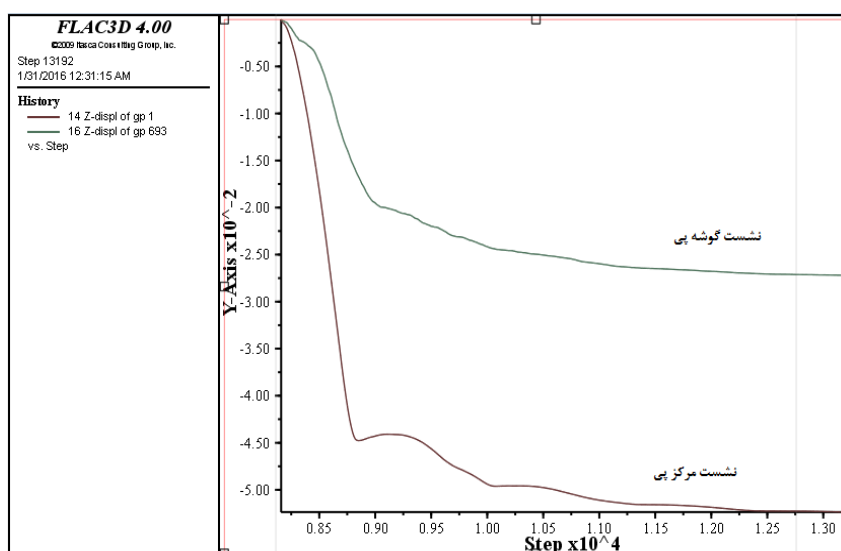
شکل ۵-۱۰- کنتورهای نشست پی مخازن ذخیره سازی در مدل موهر- کولمب



شکل ۵-۱۱- کنتورهای نشست پی در صفحه‌ای قائم به فاصله ۴۰ متری از مرکز مخزن در مدل موهر-کولمب



شکل ۵-۱۲- جابجایی نقاط زیر پی مخازن پس از بارگذاری در مدل موهر-کولمب



شکل ۵-۱۳- جابجایی نقاط زیر پی مخازن پس از بارگذاری در مدل هوک-براون

۴-۵- بررسی ظرفیت باربری و نشست پی مخازن ذخیره سازی نفت خام

در این فصل ظرفیت باربری و نشست پی مخازن ذخیره سازی نفت خام در جزیره خارک توسط روش‌های مختلف مورد بررسی قرار گرفت. ظرفیت باربری مجاز پی مخازن با استفاده از مدلسازی عددی با در نظر گرفتن اثر وزن توده سنگ با مدل رفتاری موهر-کولمب $1/71$ مگاپاسکال و با مدل رفتاری هوک-براون $1/09$ مگاپاسکال به دست آمده است. همچنین با در نظر گرفتن یک لایه سه

متری از خاک در زیر مخزن ظرفیت باربری مجاز ۰/۶۶ مگاپاسکال محاسبه شد. برای بررسی وضعیت منطقه از نظر ظرفیت باربری به عنوان یک معیار، تنش میانگین که بر پی اعمال می‌شود می‌بایست برابر یا کمتر از ظرفیت باربری مجاز باشد.

براساس اطلاعات موجود وزن مخزن در زمان آزمایش ۱۸۲۰۰۰ تن است که شامل وزن سازه‌ی فلزی مخزن و محتویات درون آن می‌باشد. این وزن بیشترین وزن ثقلی وارده در طول عمر مخزن است. در صورتی که ظرفیت باربری مجاز پی برای این بار ثقلی حداکثر جواب دهد، از نظر بار ثقلی مشکلی نخواهیم داشت. بنابراین داریم:

$$A = \frac{\pi D^2}{4} = 3.14 \times \frac{109^2}{4} = 9326.6 \text{ m}^2$$

$$P = \frac{W}{A} = \frac{182000 \times 10^4}{9326.6} \approx 0.195 \text{ Mpa} \quad \longrightarrow \quad P \approx 0.195 \text{ Mpa} \leq q_a$$

همانطور که مشاهده می‌شود بار ثقلی اعمال شده از ظرفیت باربری مجاز پی در دو حالت ذکر شده کمتر است. بنابراین تنش ناشی از بار ثقلی زیر مخزن در محدوده مجاز است و مشکلی از نظر ظرفیت باربری نخواهیم داشت. وزن سازه در زمان بهره‌برداری طبق گزارشات موجود ۱۳۳۰۰۰ تن می‌باشد. از آنجایی که این وزن از وزن سازه در زمان آزمایش کمتر است، قطعاً تنش موجود نیز کمتر از تنش مجاز پی خواهد بود.

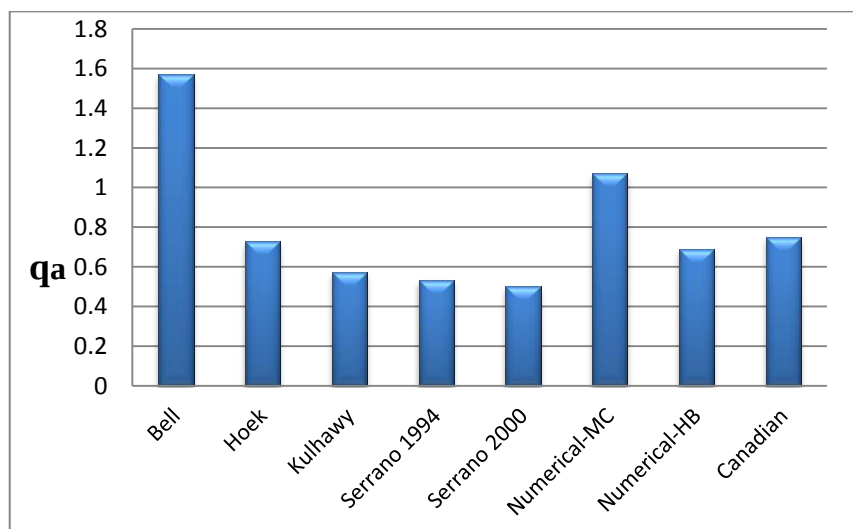
به عنوان یک معیار برای ارزیابی نشست پی مخازن ذخیره‌سازی برای دو نقطه از پی (مرکز تا لبه)، اختلاف نشست دو نقطه به فاصله آن‌ها می‌بایست کمتر از $\frac{1}{300}$ باشد [۹]. نشست پی مخازن ذخیره‌سازی نفت خام براساس مدلسازی عددی ۲/۷ سانتیمتر در گوشه مخزن و ۴/۵ سانتیمتر در مرکز مخزن به دست آمد، بنابراین داریم:

$$\delta = 5.5 - 2.7 = 2.8 \text{ cm}$$

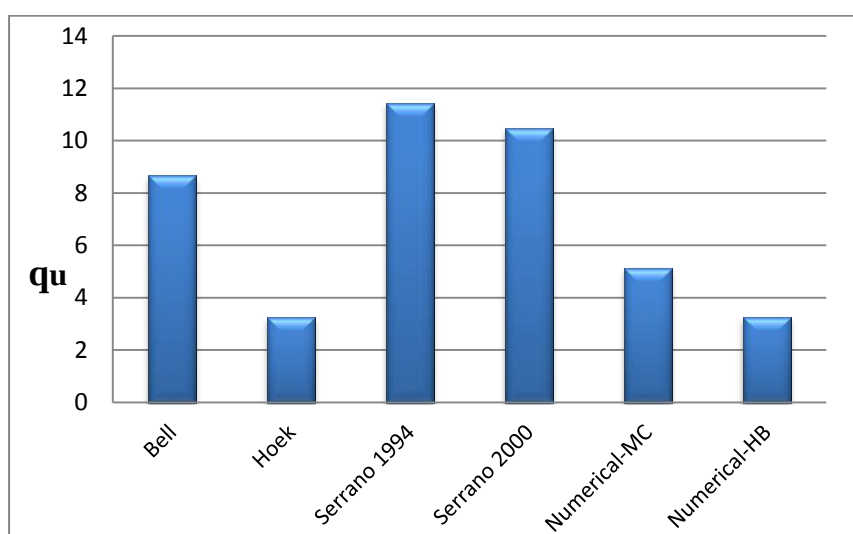
$$\delta/L = \frac{2.8}{5450} = 0.00051 < 1/300 \quad \longrightarrow \quad \text{OK}$$

با توجه به آنچه گفته شد از نظر نشست نیز مشکلی برای مخازن ذخیره سازی وجود ندارد.

به منظور مقایسه ظرفیت باربری بدست آمده از روش‌های مختلف، ظرفیت باربری مجاز و نهایی پی مخازن ذخیره سازی در شکل‌های (۵-۱۴) و (۵-۱۵) نشان داده شده است. همانطور که مشاهده می‌شود روش‌های مختلف با توجه به تئوری استفاده شده در آن‌ها مقادیر مختلفی را برای ظرفیت باربری پیشنهاد می‌کنند. در بین روش‌های موجود که مورد بررسی قرار گرفته، روش سرانو-اولالا



شکل ۵-۱۴ - ظرفیت باربری مجاز پی مخازن حاصل از روش‌های مختلف برای سنگ آهک بی وزن (MPa)



شکل ۵-۱۵ - ظرفیت باربری نهایی پی مخازن حاصل از روش‌های مختلف برای سنگ آهک وزن دار (MPa)

کمترین ظرفیت باربری مجاز و روش هوک- براون کمترین ظرفیت باربری نهایی را ارائه می‌دهند. با استفاده از مدل سازی عددی مقادیر بینابینی برای ظرفیت باربری پی مخازن حاصل شده است. این مساله به نوعی صحت نتایج حاصل از مدلسازی را نشان می‌دهد. مقادیر ظرفیت باربری حاصل مدلسازی عددی با مدل رفتاری موهر-کولمب بیشتر از مدل رفتاری هوک-براون خواهد بود.

۵-۵- مطالعات پارامتری و تحلیل حساسیت

با توجه به عدم قطعیت داده‌های ورودی و تعیین پارامترهای ژئومکانیکی ساختگاه مخازن با استفاده از اطلاعات پروژه‌های ذخیره سازی اجرا شده در سطح جزیره خارک و همچنین برای اینکه دید دقیقی نسبت به تاثیر عوامل مختلف در ظرفیت باربری پیدا کنیم، مطالعات پارامتری و تحلیل حساسیت ظرفیت باربری و نشست پی مخازن انجام شده است.

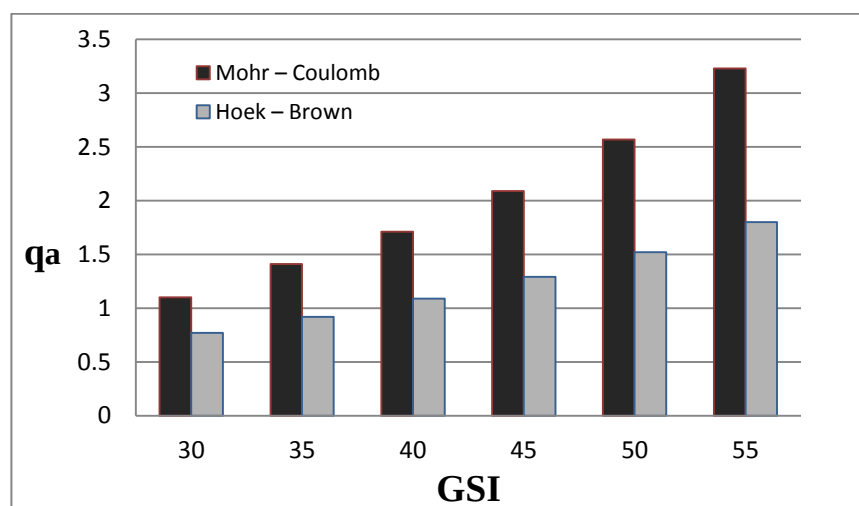
۵-۵-۱- مطالعات پارامتری

هدف اصلی از انجام مطالعات پارامتری بررسی چگونگی و میزان تاثیر هر یک از پارامترها بر ظرفیت باربری پی می‌باشد. برای این منظور ظرفیت باربری پی مخازن نسبت به تغییرات مقادیر داده‌های زمین و با ثابت فرض کردن سایر پارامترها به دست می‌آید. در ادامه تاثیر پارامترهای شاخص مقاومت زمین شناسی، مقاومت فشاری تک محوره، وزن مخصوص توده سنگ و زاویه اصطکاک داخلی بررسی می‌شود.

۵-۵-۱-۱- شاخص مقاومت زمین شناسی (GSI)

رفتار توده سنگ به دلیل وجود ناپیوستگی‌ها تفاوت زیادی با سنگ بکر دارد. در واقع وجود ناپیوستگی در سنگ باعث می‌شود ظرفیت باربری سنگ کاهش قابل ملاحظه‌ای داشته باشد. به منظور بررسی ناپیوستگی‌ها و عوامل ضعیف ساختاری در این تحقیق از شاخص مقاومت زمین‌شناسی (GSI) استفاده شده است.

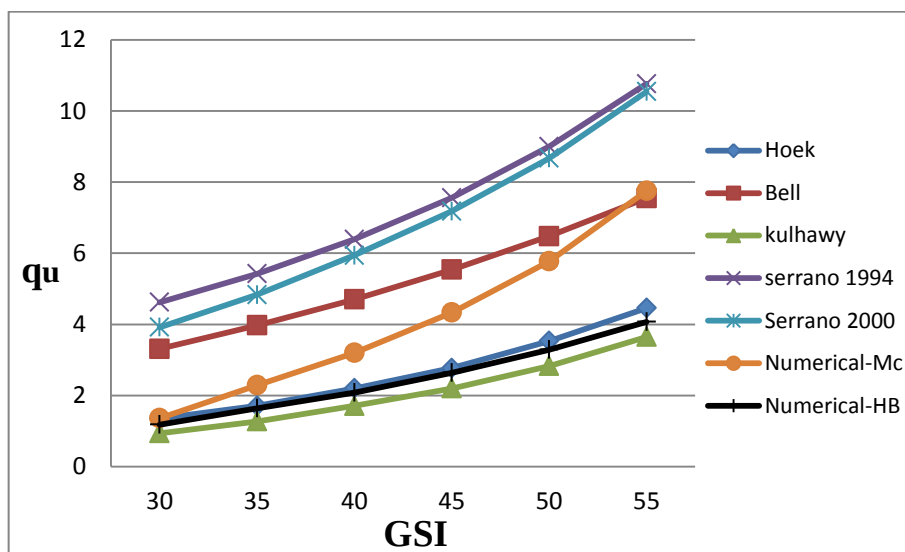
پی مخازن ذخیره سازی نفت خام در جزیره خارک به طور عمده از دو لایه سنگ آهک مرجانی و سنگ مارن تشکیل شده است. براساس مطالعات صورت گرفته شاخص مقاومت زمین شناسی منطقه برای سنگ آهک مرجانی حدود ۴۰ و برای سنگ مارن حدود ۴۵ می باشد. برای تعیین تاثیر این پارامتر، ظرفیت باربری با استفاده از مدلسازی عددی و با دو مدل رفتاری موهر-کولمب و هوک-براون در بازه های ۵ تایی مورد بررسی قرار گرفته است. همانطور که در شکل (۵-۱۶) دیده می شود، با کاهش GSI و تضعیف توده سنگ ظرفیت باربری کاهش قابل ملاحظه ای می یابد. این مساله لزوم انجام بررسی های دقیق تر و در نظر گرفتن ناپیوستگی ها در توده سنگ پی را نشان می دهد. با افزایش GSI و کیفیت توده سنگ مدل موهر-کولمب مقادیر بیشتری از ظرفیت باربری را نسبت به مدل هوک-براون پیش بینی می کند.



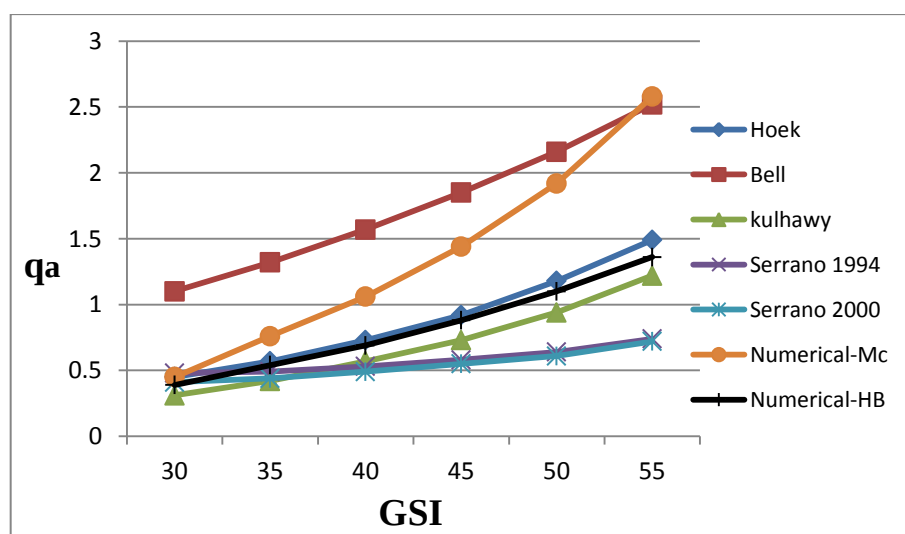
شکل ۵-۱۶- ظرفیت باربری مجاز سنگ آهک مرجانی حاصل از مدل سازی عددی براساس تغییرات GSI با در نظر گرفتن وزن سنگ (MPa)

در شکل (۵-۱۷) ظرفیت باربری نهایی پی مخازن بدون در نظر گرفتن وزن سنگ، براساس تغییرات GSI با روش های مختلف مقایسه شده است. همانطور که مشاهده می شود با افزایش GSI و کاهش ناپیوستگی ها ظرفیت باربری روند صعودی دارد. ظرفیت باربری نهایی به دست آمده در این حالت با روش سرانو- اولالا ۱۹۹۴ بیش ترین مقدار و با روش کولهاوی-کارتر کمترین مقدار را نتیجه می دهد. ظرفیت باربری نهایی محاسبه شده با استفاده از مدلسازی عددی در بین این بازه قرار دارد.

شکل (۵-۱۸) ظرفیت باربری مجاز پی مخازن بدون در نظر گرفتن وزن سنگ براساس تغییرات GSI را نشان می دهد. ظرفیت باربری مجاز محاسبه شده با روش بل بیشترین مقدار و بار روش سرانو-اولالا ۲۰۰۰ کمترین مقدار را خواهد داشت. در مقادیر GSI بسیار پایین، ظرفیت باربری مجاز به دست آمده از روش کولهاوی-کارتر و مدلسازی عددی با مدل رفتاری هوک-براون کمتر از روش سرانو اولالا ۲۰۰۰ خواهد بود.

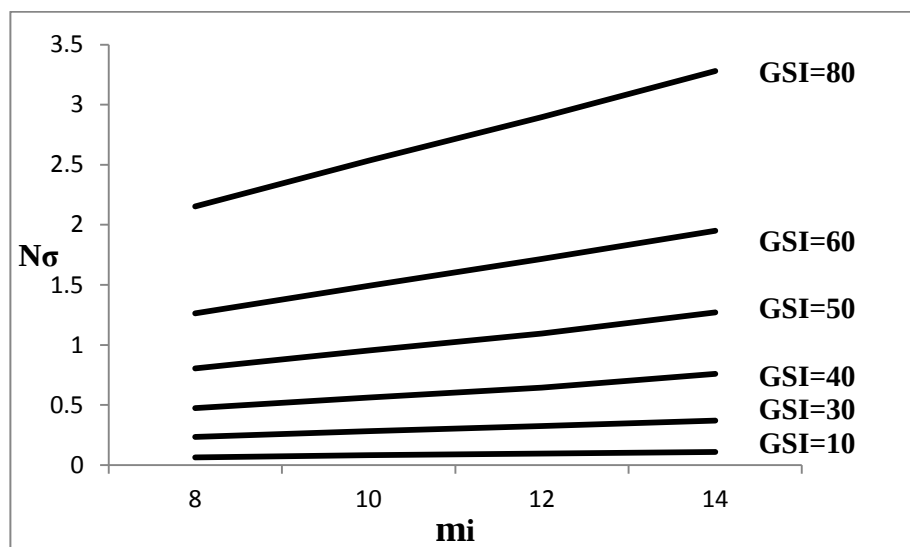


شکل ۵-۱۷- مقایسه ظرفیت باربری نهایی سنگ آهک مرجانی با استفاده از روش های مختلف بدون در نظر گرفتن وزن توده سنگ (MPa)



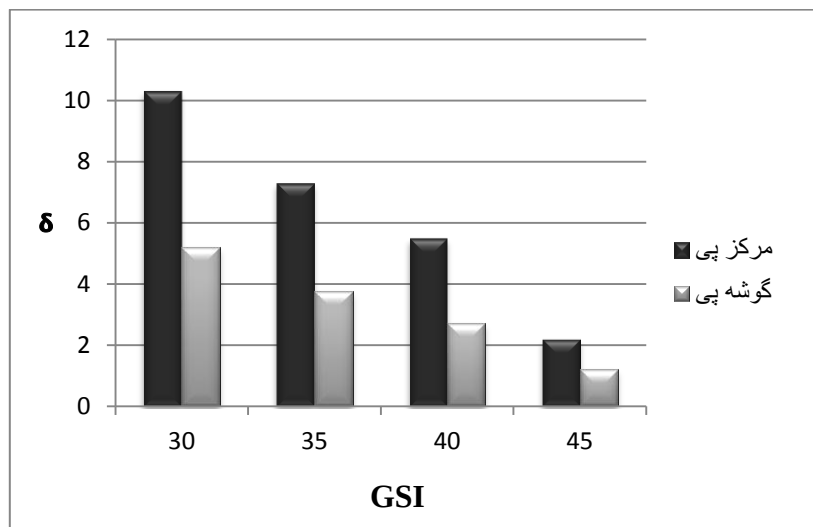
شکل ۵-۱۸- مقایسه ظرفیت باربری مجاز سنگ آهک مرجانی با استفاده از روش های مختلف بدون در نظر گرفتن وزن توده سنگ (MPa)

فاکتور ظرفیت باربری ($N\sigma$) توده سنگ بی وزن برای گستره‌ای از مقادیر GSI و m_i با استفاده از مدلسازی عددی و با مدل رفتاری هوک-براون در شکل (۵-۱۹) نشان داده شده است. برای یک مقدار GSI ، افزایش m_i باعث افزایش ظرفیت باربری نهایی می‌شود. مقدار فاکتور ظرفیت باربری به صورت خطی با GSI و m_i تغییر می‌کند و با افزایش GSI و به عبارتی افزایش کیفیت توده سنگ تغییرات فاکتور ظرفیت باربری افزایش می‌یابد. به عبارت دیگر در مقادیر GSI پایین تغییر m_i تاثیر زیادی در مقدار ظرفیت باربری نهایی توده سنگ نخواهد داشت ولی در مقادیر GSI بالا افزایش m_i باعث افزایش ظرفیت باربری نهایی توده سنگ می‌شود. با بهتر شدن کیفیت توده سنگ و افزایش GSI این روند ادامه می‌یابد.



شکل ۵-۱۹- فاکتور ظرفیت باربری توده سنگ بی وزن حاصل مدلسازی عددی برای مقادیر مختلف GSI به منظور بررسی تاثیر ناپیوستگی‌ها در نشست پی مخازن ذخیره سازی نفت خام، تغییرات نشست در مقادیر مختلف GSI با استفاده از مدلسازی عددی بررسی شده است. شکل (۵-۲۰) نشان می‌دهد که با افزایش GSI نشست پی مخازن کاهش می‌یابد. در این تحلیل از مدل رفتاری موهر-کولمب استفاده شده است. از آنجایی که نشست تابع ثوابت الاستیک سنگ (E و ν) می‌باشد با تغییر GSI مدول الاستیسیته سنگ تغییر می‌کند و ضریب پواسون تغییر کمتری دارد. بنابراین مدول الاستیسیته توده سنگ بیشترین تاثیر را در نشست پی دارد. در اینجا نشست پی مخازن در دو

موقعیت مرکز و گوشه پی محاسبه شده است. همانطور که قبلا نیز اشاره شد، نشست در گوشه پی کمتر از نشست در مرکز آن خواهد بود.



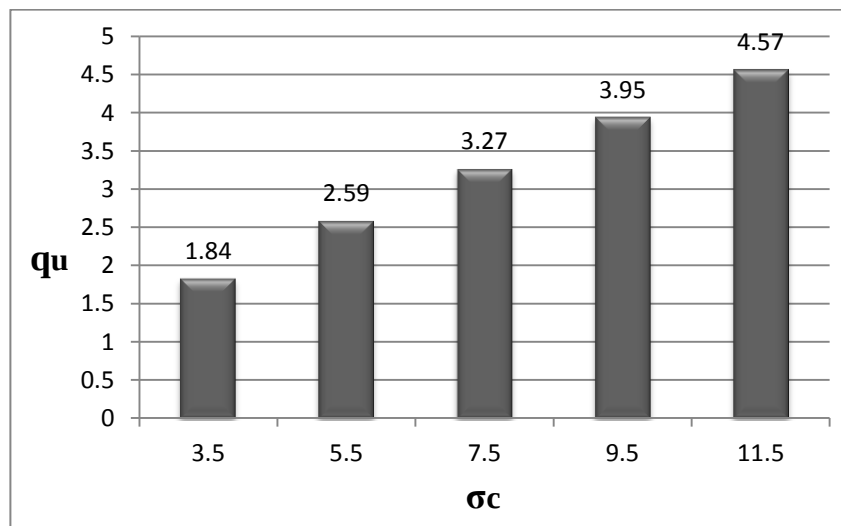
شکل ۵-۲۰- نشست پی مخازن نسبت به تغییرات GSI با استفاده از مدل سازی عددی (cm)

۵-۱-۲- مقاومت فشاری تک محوره

مقاومت فشاری تک محوره سنگ یکی از پارامترهایی است که همواره در طراحی های مهندسی مورد توجه قرار می گیرد. مقاومت ماده سنگ یا سنگ بکر به عنوان یک پارامتر اصلی در اکثر سیستم های طبقه بندی توده سنگ مورد توجه قرار گرفته است. مقاومت ماده سنگ حد نهایی مقاومت توده سنگ می باشد. آزمایش مقاومت فشاری تک محوری مرسوم ترین آزمون آزمایشگاهی برای مطالعات مکانیکی سنگ بکر می باشد که با وجود ظاهری ساده، انجام دقیق آن بسیار مشکل است، این آزمایش به عنوان آزمایش پایه در اکثر پروژه های مهندسی انجام گرفته و به ندرت اتفاق می افتد که در پروژه های مقاومت فشاری تک محوری مورد نیاز نباشد.

براساس مطالعات صورت گرفته در محل احداث مخازن نفت خام در جزیره خارک مقاومت فشاری تک محوره سنگ آهک در حالت طبیعی $4/2$ تا $11/05$ مگاپاسکال می باشد. برای بررسی تاثیر این پارامتر، ظرفیت باربری پی نسبت به تغییرات مقاومت فشاری تک محوره با ثابت فرض کردن سایر

پارامترها تعیین شده است. شکل (۵-۲۱) تغییرات ظرفیت باربری نهایی پی نسبت به تغییرات مقاومت فشاری تک محوری سنگ آهک را در مدل هوک-براون و با در نظر گرفتن وزن توده سنگ نشان می‌دهد. با افزایش مقاومت فشاری تک محوره توده سنگ ظرفیت باربری روندی افزایشی خواهد داشت.



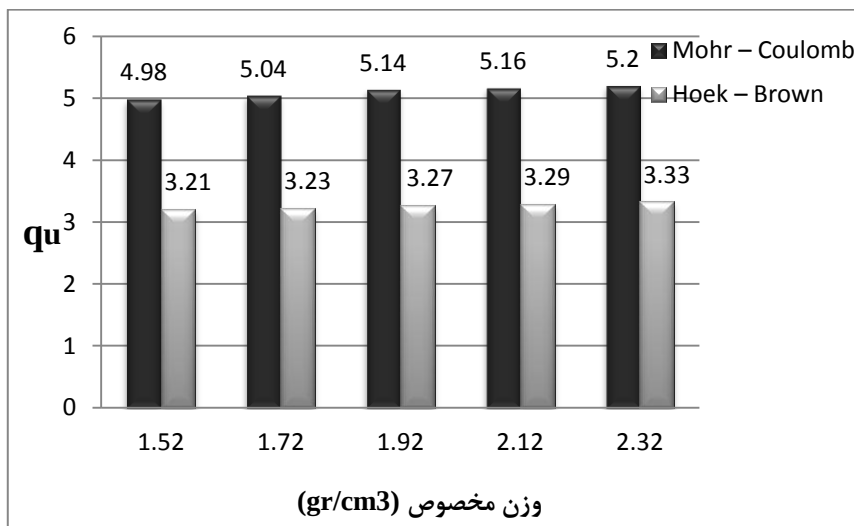
شکل ۵-۲۱- ظرفیت باربری نهایی حاصل از مدل‌سازی عددی نسبت به تغییرات مقاومت فشاری تک محوری سنگ آهک مرجانی (MPa)

۵-۱-۳-۵- وزن مخصوص توده سنگ

ظرفیت باربری پی مخازن ذخیره‌سازی در دو حالت با در نظر گرفتن اثر وزن توده سنگ و بدون در نظر گرفتن وزن توده سنگ محاسبه شد. زمانی که وزن توده سنگ در محاسبات لحاظ می‌شود ظرفیت باربری به طور قابل ملاحظه‌ای افزایش می‌یابد که این مساله با استفاده از روش‌های مختلف بررسی شد. وزن مخصوص لایه آهک مرجانی ۱/۹۲ گرم بر سانتیمتر مکعب و وزن مخصوص مارن ۲/۱۱ گرم بر سانتیمتر مکعب می‌باشد. در این جا تغییرات ظرفیت باربری نهایی پی مخازن ذخیره‌سازی نفت خام نسبت به تغییرات وزن مخصوص سنگ آهک مرجانی با ثابت فرض کردن سایر پارامترها با استفاده از مدل‌سازی عددی بررسی شده است.

مطالعات صورت گرفته نشان می‌دهد افزایش یا کاهش اندک در وزن تخمین‌زده شده‌ی

توده سنگ پی مخازن تاثیر اندکی در مقدار ظرفیت باربری می گذارد. ولی در حالت کلی با افزایش وزن مخصوص توده سنگ، ظرفیت باربری روند صعودی دارد. تغییرات ظرفیت باربری نهایی پی مخازن ذخیره سازی نفت خام در جزیره خارک براساس وزن مخصوص توده سنگ با استفاده از مدلسازی عددی و با دو مدل رفتاری موهر-کولمب و هوک-براون در شکل (۵-۲۲) دیده می شود.

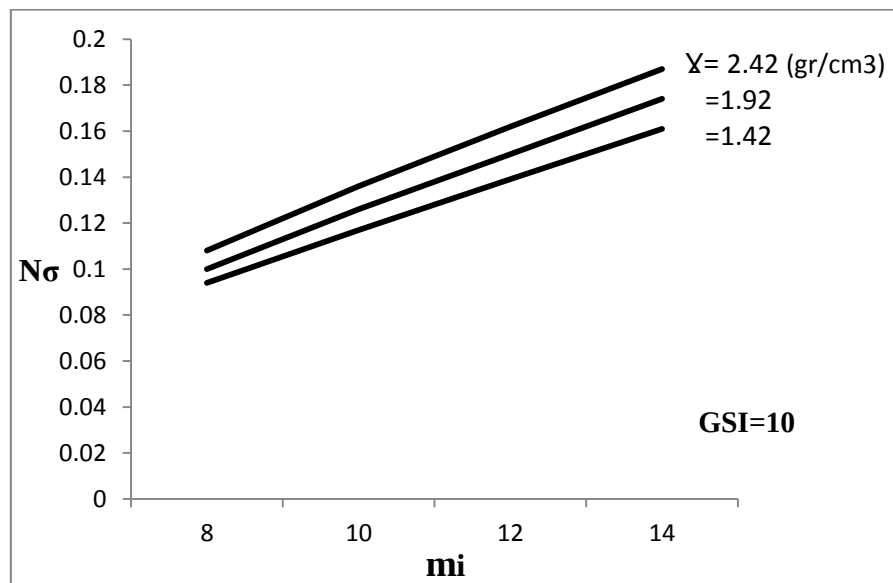


شکل ۵-۲۲- تغییرات ظرفیت باربری نهایی مدل سازی عددی براساس وزن مخصوص سنگ آهک مرجانی (MPa)

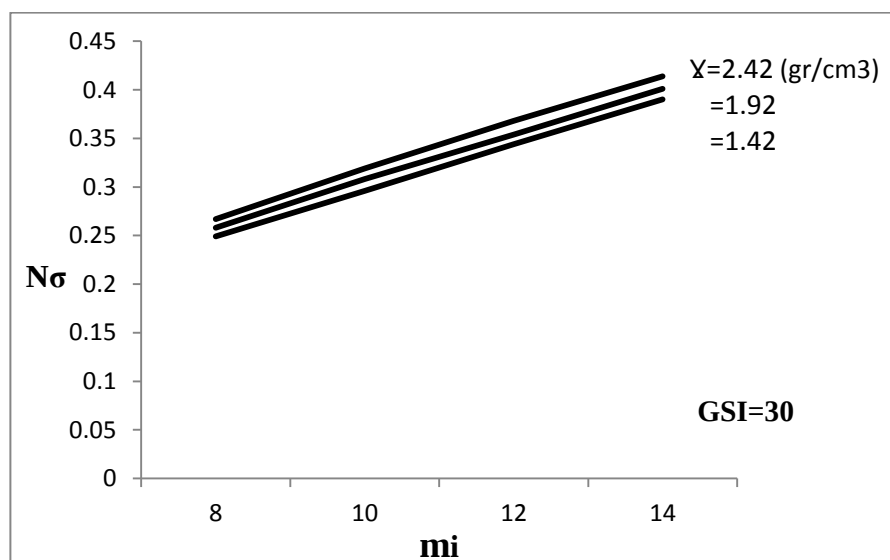
تاثیر وزن مخصوص توده سنگ در شرایط درزه داری مختلف با استفاده از مدل سازی عددی و با مدل رفتاری هوک-براون در شکل های (۵-۲۳) تا (۵-۲۶) نشان داده شده است. در این اشکال نمودارهای فاکتور ظرفیت باربری توده سنگ برای مقادیر مختلف GSI در شرایطی که وزن مخصوص توده سنگ در هر نمودار ثابت است، به دست آمده اند. نتایج نشان می دهد که افزایش وزن مخصوص توده سنگ باعث افزایش فاکتور ظرفیت باربری ($N\sigma$) و در نتیجه افزایش ظرفیت باربری نهایی توده سنگ می شود.

از طرف دیگر تاثیر وزن سنگ با افزایش GSI کاهش می یابد. این مطلب به وضوح در شکل ها مشاهده می شود که با افزایش GSI خطوطی که به وسیله وزن مخصوص توده سنگ (γ) نشان داده شده اند، به سمت سنگ با وزن مخصوص کمتر تمایل به همگرایی دارند. به طوری که اگر همین روند تا توده سنگ بدون وزن نیز ادامه یابد، خطوط به سمت توده سنگ بدون وزن همگرا می شوند. در

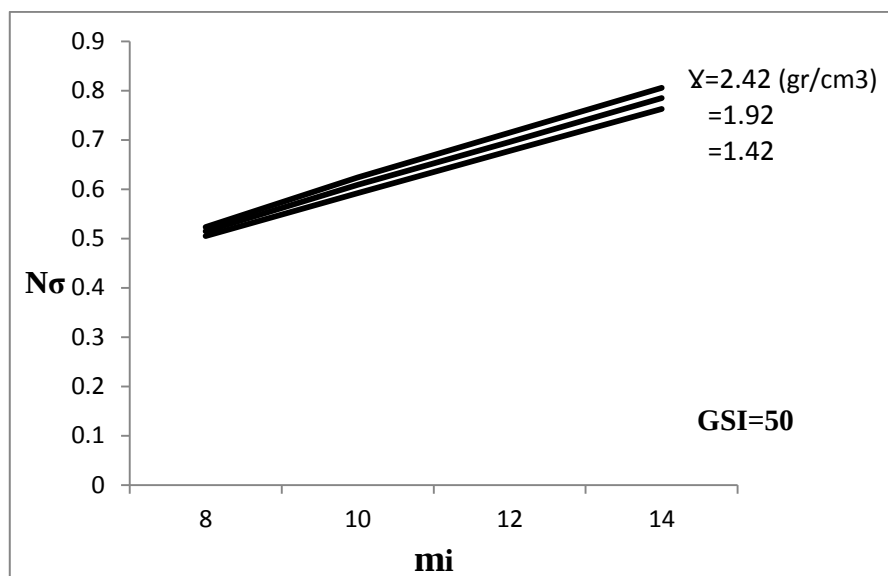
GSI=80 (شکل ۵-۲۶) وزن مخصوص توده سنگ تاثیر بسیار کمی بر ظرفیت باربری می‌گذارد. بنابراین در شرایطی که درزه داری توده سنگ کم باشد و به عبارتی کیفیت توده سنگ بالا است، وزن مخصوص توده سنگ کمترین اثر را بر ظرفیت باربری پی خواهد گذاشت. همانطور که در شکل‌ها نیز مشاهده می‌شود این مساله در مقادیر GSI بیش از ۳۰ خود را نشان می‌دهد.



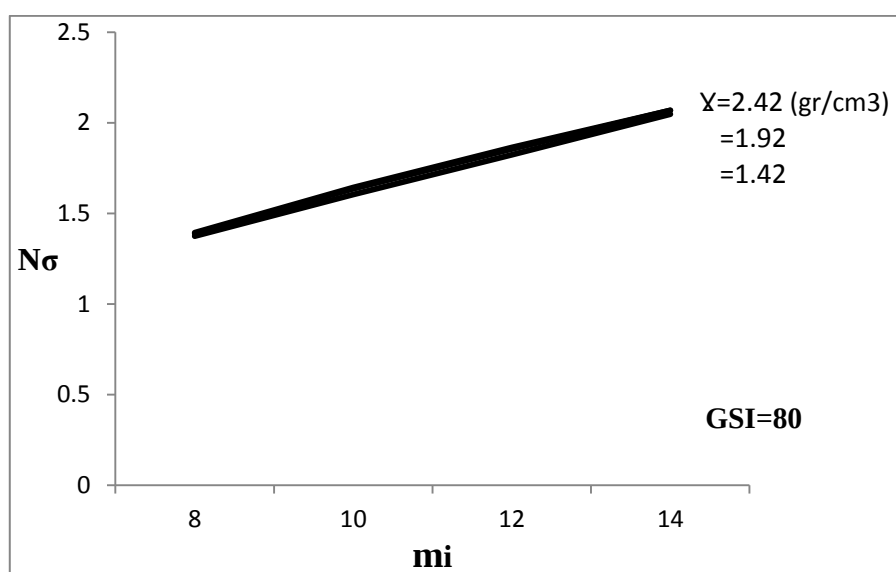
شکل ۵-۲۳- تغییرات فاکتور ظرفیت باربری پی مخازن با استفاده از مدل‌سازی عددی برای GSI=10



شکل ۵-۲۴- تغییرات فاکتور ظرفیت باربری پی مخازن با استفاده از مدل‌سازی عددی برای GSI=30



شکل ۵-۲۵- تغییرات فاکتور ظرفیت باربری پی مخازن با استفاده از مدل سازی عددی برای $GSI=50$

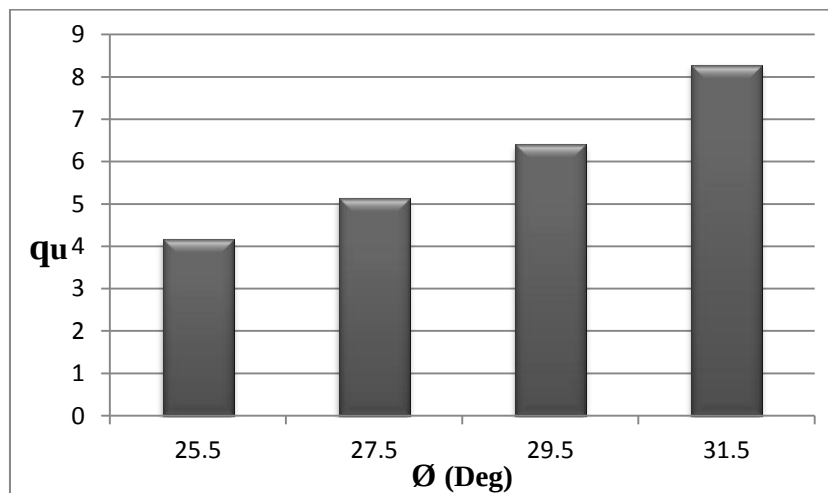


شکل ۵-۲۶- تغییرات فاکتور ظرفیت باربری پی مخازن با استفاده از مدل سازی عددی برای $GSI=80$

۵-۱-۴- زاویه اصطکاک داخلی

به منظور بررسی تاثیر زاویه اصطکاک داخلی توده سنگ بر ظرفیت باربری پی مخازن ذخیره سازی نفت خام در جزیره خارک، ظرفیت باربری پی با استفاده از مدل سازی عددی و با مدل رفتاری موهر-کولمب برای مقادیر مختلف زاویه اصطکاک داخلی سنگ آهک مرجانی با در نظر گرفتن وزن توده سنگ به دست آمده است. همانطور که در شکل (۵-۲۷) مشاهده می شود، با افزایش زاویه

اصطکاک داخلی سنگ آهک مرجانی ظرفیت باربری پی افزایش می یابد.



شکل ۵-۲۷- تغییرات ظرفیت باربری نهایی پی نسبت به تغییر زاویه اصطکاک داخلی سنگ آهک مرجانی با استفاده از مدل سازی عددی (MPa)

۵-۵-۲- تحلیل حساسیت

در این بخش تحلیل حساسیت عمق لایه سنگ آهک مرجانی، عمق لایه خاک در صورت وجود در زیر مخازن و فاصله‌ی مخازن از یکدیگر انجام شده است. برای این منظور چگونگی تغییرات مقادیر ظرفیت باربری پی مخازن نسبت به تغییر پارامترهای هندسی مورد نظر با ثابت فرض کردن سایر پارامترها با استفاده از نرم افزار $FLAC^{3D}$ بررسی شده است.

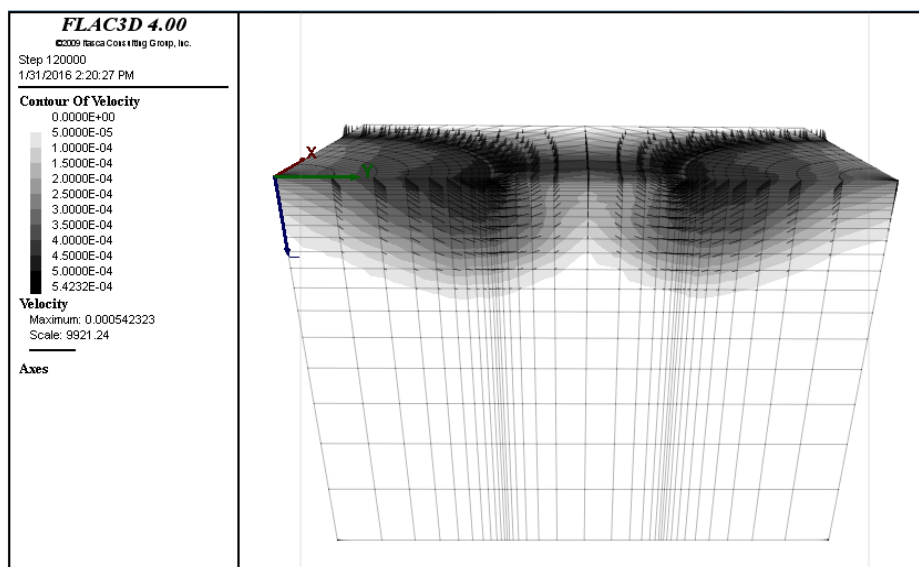
۵-۵-۲-۱- فاصله مخازن ذخیره سازی

مخازن ذخیره سازی نفت خام معمولاً به صورت مجموعه‌ای از مخازن در کنار یکدیگر بنا می‌شوند. ظرفیت باربری پی مخازن برای یک مخزن منفرد توسط روش‌های مختلف مورد بررسی قرار گرفت. به منظور بررسی تاثیر فاصله در ظرفیت باربری پی، در این جا ظرفیت باربری دو مخزن در فواصل مختلف از یکدیگر بررسی شده است.

مخازن ذخیره سازی نفت خام در جزیره خارک دارای قطر ۱۰۹ متر بوده و از نوع سقف شناور می‌باشند. براساس استانداردهای موجود فاصله‌ی بین مخازن منفرد مجاور با قطر بیش از ۱۰ متر و با

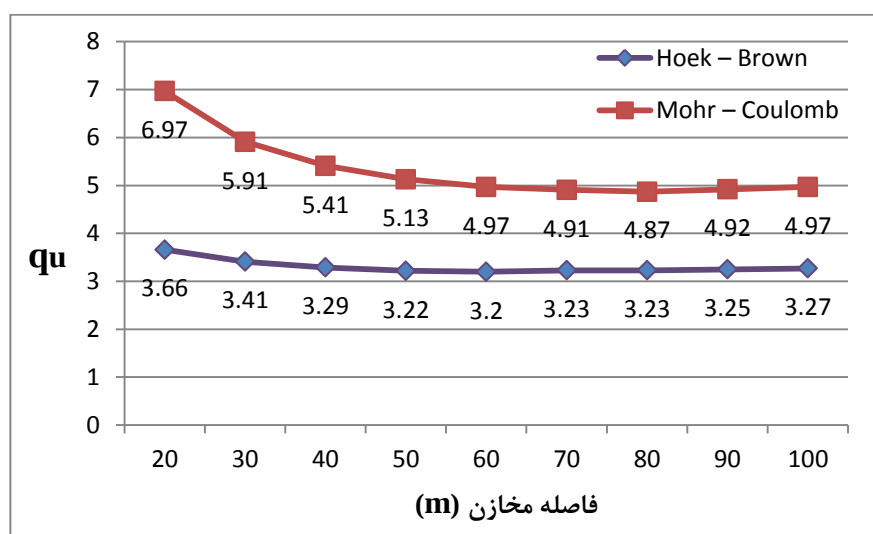
سقف شناور، $0/3$ قطر مخزن بزرگتر در نظر گرفته می‌شود، به گونه ای که این فاصله از 10 متر کمتر نباشد. همچنین ضوابط دیگری برای فاصله مخزن از دیواره‌های جداکننده محوطه آن وجود دارد [۲۹]. بر این اساس فاصله مخازن ذخیره سازی نفت خام از حدود 30 متر نمی‌تواند کمتر باشد.

در اینجا برای بررسی تاثیر فاصله مخازن از دو مدل رفتاری موهر-کولمب و هوک-براون استفاده شده است. برای شبیه سازی بارگذاری پی یک سرعت با بزرگی $10^{-4} \times 2/5$ متر در هر گام به نقاط گره‌ای زیر پی در جهت مثبت رو به پایین اعمال می‌شود. تحلیل ها در مدل موهر-کولمب تا 300000 گام زمانی و در مدل هوک-براون تا 120000 گام زمانی ادامه می‌یابد. به منظور کاهش حجم محاسبات یک چهارم از پی هر مخزن که با فواصل مختلف در کنار هم قرار گرفته‌اند، مدل شده است. شرایط مرزی و اولیه برای مرزهای حقیقی و مجازی مشابه آن چه در بخش‌های قبل اشاره شد در این مدل اعمال می‌شوند. مدل هندسی ساخته شده به همراه کنتورهای میدان سرعت پی پس از بارگذاری برای دو مخزن به فاصله 50 متر از یکدیگر با مدلسازی عددی و در مدل هوک-براون در شکل (۵-۲۸) دیده می‌شود. فاصله مخازن سطحی نفت خام در جزیره خارک به طور معمول حدود 50 تا 60 متر می‌باشد.



شکل ۵-۲۸- مدل هندسی و کنتورهای میدان سرعت پی پس از بارگذاری برای دو مخزن با فاصله 50 متر

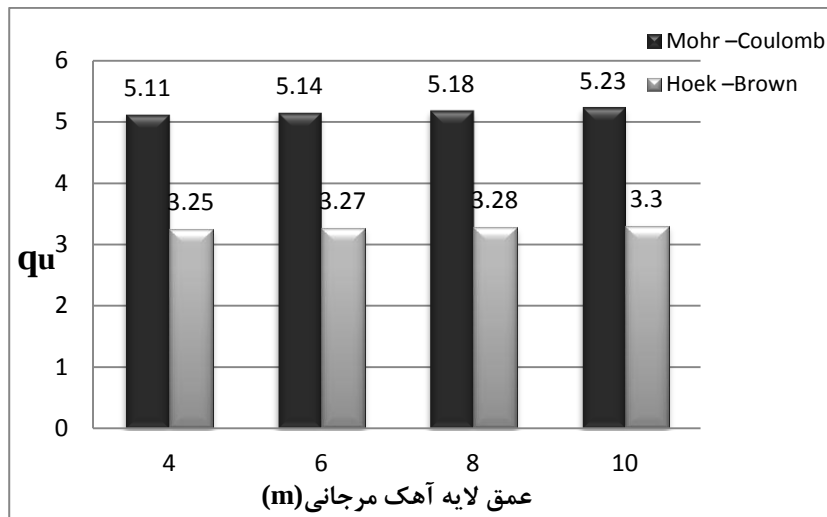
به منظور بررسی تاثیر فاصله مخازن، ظرفیت باربری نهایی پی برای دو مخزن در فواصل مختلف بررسی شده است. همانطور که در شکل (۵-۲۹) دیده می شود، با کاهش فاصله مخازن وزن مخزن مجاور همانند یک بار خارجی عمل کرده و از جابجایی پی جلوگیری می کند و در نتیجه باعث افزایش ظرفیت باربری می شود. با افزایش فاصله مخازن به تدریج ظرفیت باربری کاهش یافته و به ظرفیت باربری در حالت مخزن منفرد نزدیک می شود. منظور از فاصله مخازن در این شکل فاصله دیوار به دیوار دو مخزن مجاور می باشد.



شکل ۵-۲۹- تاثیر فاصله مخازن بر روی ظرفیت باربری نهایی پی با استفاده از مدل سازی عددی (MPa)

۵-۲-۵- عمق لایه سنگ آهک

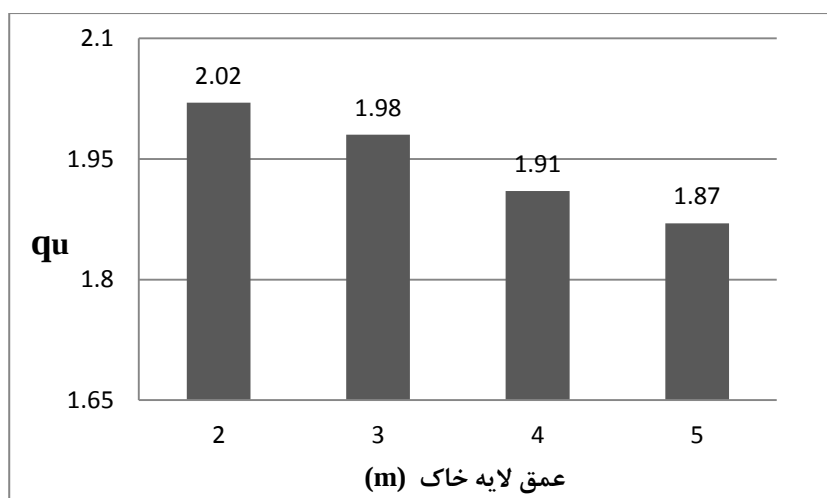
همانطور که در فصل قبل به طور کامل بررسی شد، براساس اطلاعات به دست آمده از نمودار گمانه ها و مطالعات میدانی صورت گرفته از جزیره خارک پی مخازن ذخیره سازی نفت خام به طور کلی از دو لایه سنگ آهک مرجانی و سنگ مارن تشکیل شده است. لایه سنگ آهک مرجانی به طور عمده در عمق ۶ متر قرار می گیرد. در اینجا تحلیل حساسیت ظرفیت باربری پی نسبت به تغییر عمق این لایه بررسی شده است. همانطور که در شکل (۵-۳۰) مشاهده می شود، با افزایش عمق و در نتیجه افزایش ضخامت سنگ آهک مرجانی ظرفیت باربری نهایی روندی افزایشی خواهد داشت. ولی تاثیر آن در مقابل پارامترهای ژئومکانیکی توده سنگ کمتر است.



شکل ۵-۳۰- تغییرات ظرفیت باربری نهایی پی نسبت به تغییرات عمق سنگ آهک با در نظر گرفتن وزن سنگ با استفاده از مدل سازی عددی (MPa)

۵-۲-۳- عمق لایه خاک

ظرفیت باربری پی مخازن با در نظر گرفتن یک لایه ۳ متری از خاک در زیر آن مورد بررسی قرار گرفت. در اینجا تحلیل حساسیت عمق خاک موجود در زیر مخازن با در نظر گرفتن لایه هایی به ضخامت ۲ تا ۵ متر با استفاده از مدلسازی عددی و با مدل رفتاری موهر-کولمب مورد بررسی قرار گرفته است. همانطور که در شکل (۵-۳۱) دیده می شود با افزایش عمق لایه خاک موجود در زیر مخزن ظرفیت باربری به طور قابل ملاحظه ای کاهش می یابد.



شکل ۵-۳۱- تغییرات ظرفیت باربری نهایی پی نسبت به تغییر عمق خاک با در نظر گرفتن وزن سنگ در مدل موهر-کولمب (MPa)

۵-۶- نتیجه گیری

در این فصل ظرفیت باربری و نشست پی مخازن ذخیره سازی نفت خام در جزیره خارک با استفاده از روش های تجربی، تحلیلی و عددی بررسی شده است. با بررسی های صورت گرفته مشخص شد ظرفیت باربری و نشست پی مخازن ذخیره سازی نفت خام در جزیره خارک در حد مجاز بوده و مشکلی در این زمینه وجود ندارد. تمام تحلیل ها در این فصل در دو حالت با در نظر گرفتن وزن توده سنگ و بدون در نظر گرفتن وزن توده سنگ انجام شده است. نتایج نشان می دهد در صورتی که وزن توده سنگ در محاسبات ظرفیت باربری لحاظ شود، ظرفیت باربری افزایش می یابد. ظرفیت باربری بدست آمده از روش های مختلف با توجه به تئوری های مختلفی که در آنها استفاده شده متفاوت می باشد. ناپیوستگی ها نقش مهمی در ظرفیت باربری پی دارند به طوری که با افزایش GSI و کاهش ناپیوستگی ها ظرفیت باربری پی افزایش می یابد.

۶- فصل ششم

نتیجه‌گیری و پیشنهادات

در این تحقیق ظرفیت باربری و نشست پی مخازن ذخیره سازی نفت خام در جزیره خارک با استفاده از روش‌های تجربی، تحلیلی و عددی مورد بررسی قرار گرفته است. در ابتدا با استفاده از روش‌های تجربی و تحلیلی موجود ظرفیت باربری و نشست پی‌های سنگی جزیره خارک ارزیابی شد. سپس با استفاده از مدلسازی عددی با استفاده از نرم افزار $FLAC^{3D}$ ظرفیت باربری و نشست پی مخازن مورد بررسی قرار گرفت. در نهایت مطالعات پارامتری و تحلیل حساسیت پارامترهای طراحی صورت گرفته است. نتایج این تحقیق به صورت زیر می باشد.

۶-۲- نتایج تحقیق

- ۱- به رغم تصور این که پی های سنگی برای اغلب سازه‌ها پی‌های قابل اطمینانی هستند، در عین حال در مواردی که توده سنگ از کیفیت پایینی برخوردار است، به ویژه برای سازه‌های حساس و با اهمیت، لزوم مطالعه و تخمین ظرفیت باربری پی های سنگی وجود دارد.
- ۲- بررسی‌های صورت گرفته در این پایان نامه نشان داد، ظرفیت باربری و نشست پی مخازن ذخیره سازی نفت خام در جزیره خارک در حد مجاز بوده و مشکلی در این زمینه وجود ندارد.
- ۳- طبق نظر لادانی حالت‌های شکست پی‌های سنگی شامل توسعه شکستگی از طریق رشد ترک، خرد شدن سنگ، سوراخ شدن (منگنه شدن) از طریق بسته شدن فضاهای خالی و شکست برشی می‌باشد. از طرف دیگر در تشکیلات لایه‌ای سه مکانیزم شکست پانچی، شکست کمانشی و شکست خمشی وجود دارد. در ساختگاه مخازن ذخیره سازی نفت خام در جزیره خارک از آنجایی که لایه سنگ آهک مرجانی مدول الاستیسیته‌ای به مراتب بالاتر از سنگ مارن زیرین دارد، لایه سنگ آهک مرجانی بخش اعظم بار را تحمل کرده و پایداری پی در درجه اول به ظرفیت باربری این لایه وابسته است. در این حالت با توجه به ضخامت

نسبتاً کم سنگ آهک مرجانی و رفتار پلاستیک و تراکم پذیری بسیار پایین سنگ مارن شکست کمانش محتمل تر است و لایه سنگ آهک مرجانی کمانش خواهد نمود.

۴- در تشکیلات لایه‌ای وقتی که سنگ مقاوم روی یک سنگ خیلی ضعیف قرار می‌گیرد، لایه بالایی بیشترین قسمت بار را تحمل کرده و تنش ایجاد شده در آن خیلی بیش تر از تنش لایه پایینی است. در ساختگاه مخازن ذخیره سازی نفت خام در جزیره خارک نیز لایه ای از سنگ آهک مرجانی بر روی بستری از سنگ مارن قرار دارد. بنابراین لایه سنگ آهک بخش زیادی از بار را تحمل کرده و بخش کمتری از بار به لایه مارن وارد می‌شود.

۵- با توجه به اختلاف نتایج ظرفیت باربری پی های سنگی حاصل از روابط مختلف، رابطه و روش مناسب باید براساس نوع و رفتار توده سنگ و با نگرش به نوع پی، گستره بارگذاری آن، حالت شکست احتمالی، میزان احتمال شکست پی و اهمیت سازه انتخاب شود.

۶- برای سازه‌های بزرگ و حائز اهمیت طراحی باید به گونه‌ای باشد که اثرات اندرکنش پی و سازه با توجه به ظرفیت باربری پی مد نظر قرار گیرد بنابراین استفاده از روش‌های عددی که به نوعی اثرات ناپیوستگی‌های توده سنگ را لحاظ می‌کنند کمک کننده خواهد بود.

۷- تمام تحلیل‌ها در این پایان نامه در دو حالت با در نظر گرفتن وزن توده سنگ و بدون در نظر گرفتن وزن توده سنگ انجام شده است. نتایج نشان می‌دهد در صورتی که وزن توده سنگ در محاسبات ظرفیت باربری لحاظ شود، ظرفیت باربری افزایش می‌یابد. از آنجا که وزن سنگ بخش زیادی از بار وارده را تحمل می‌کند بنابراین ظرفیت باربری محاسبه شده برای توده سنگ بدون وزن محافظه کارانه خواهد بود.

۸- توده سنگ‌ها ناپیوسته و ناهمگن بوده و رفتاری متفاوت با سنگ بکر دارند. به منظور بررسی ناپیوستگی‌ها در توده سنگ از شاخص مقاومت زمین‌شناسی (GSI) استفاده شده است. مقایسه مقادیر ظرفیت باربری در شرایط درزه‌داری مختلف نشان می‌دهد که وجود ناپیوستگی‌ها و صفحات ضعیف می‌تواند تاثیر زیادی بر ظرفیت باربری پی سنگی داشته باشد

که این امر بستگی به جهت‌داری، فاصله‌داری، شرایط ناپیوستگی‌ها و پرکننده‌ی آن‌ها دارد، بنابراین بررسی دقیق شرایط و مقاومت ناپیوستگی‌های موجود در محیط سنگی از اهمیت ویژه‌ای برخوردار است. با افزایش GSI و کاهش ناپیوستگی‌ها ظرفیت باربری پی افزایش می‌یابد.

۹- ظرفیت باربری بدست آمده از روش‌های مختلف با توجه به تئوری‌های مختلفی که در آن‌ها استفاده شده متفاوت می‌باشد. در بین روش‌های کانادایی، بل، هوک-براون، کولهاوی-کارتز، سرانو-اولالا و مدلسازی عددی ظرفیت باربری مجاز پی مخازن ذخیره سازی نفت خام بدون در نظر گرفتن وزن سنگ با روش سرانو-اولالا ۲۰۰۰ کمترین مقدار و با روش بل بیشترین مقدار را خواهد داشت. ظرفیت باربری به دست آمده با مدل سازی عددی در این حالت مقادیری بینابین را دارد. ظرفیت باربری نهایی پی مخازن ذخیره‌سازی نفت خام با در نظر گرفتن وزن سنگ با استفاده از روش هوک-براون و مدلسازی عددی با انتخاب مدل رفتاری هوک-براون کمترین مقدار و با روش سرانو-اولالا ۱۹۹۴ بیش‌ترین مقدار را خواهد داشت.

۱۰- برای یک مقدار GSI، افزایش m_i باعث افزایش ظرفیت باربری نهایی می شود. مقدار فاکتور ظرفیت باربری به صورت خطی با GSI و m_i تغییر می کند و با افزایش GSI و به عبارتی افزایش کیفیت توده سنگ تغییرات فاکتور ظرفیت باربری افزایش می یابد. به عبارت دیگر در مقادیر GSI پایین تغییر m_i تاثیر زیادی در مقدار ظرفیت باربری نهایی توده سنگ نخواهد داشت ولی در مقادیر GSI بالا افزایش m_i باعث افزایش ظرفیت باربری نهایی توده سنگ می‌شود. با بهتر شدن کیفیت توده سنگ و افزایش GSI این روند ادامه می یابد.

۱۱- با افزایش GSI نشست پی مخازن کاهش می یابد. از آنجایی که نشست تابع ثوابت الاستیک سنگ (E و ν) می‌باشد با تغییر GSI مدول الاستیسیته سنگ تغییر می‌کند و ضریب پواسون تغییر کمتری دارد. بنابراین مدول الاستیسیته توده سنگ بیشترین تاثیر را در نشست پی خواهد داشت.

۱۲- در بین پارامترهای مختلف که مورد بررسی قرار گرفت، شاخص مقاومت زمین شناسی، مقاومت فشاری تک محوره و زاویه اصطکاک داخلی توده سنگ بیشترین تاثیر را در ظرفیت باربری پی دارند. تغییر مختصر وزن مخصوص توده سنگ، عمق لایه سنگ آهک و عمق خاک موجود در زیر مخازن تاثیر زیادی بر ظرفیت باربری پی مخازن ذخیره سازی نفت خام ندارد. همچنین کاهش فاصله مخازن باعث افزایش ظرفیت باربری پی می شود.

۱۳- برای توده سنگ ضعیف با $GSI < 30$ ، وزن سنگ تاثیر مهمی بر ظرفیت باربری می گذارد. در حالی که وزن توده سنگ برای کیفیت های بالای توده سنگ تاثیر خاصی بر نتایج ندارد.

۳-۶- پیشنهادات

- ۱- در این تحقیق ظرفیت باربری و نشست پی های سنگی با در نظر گرفتن بارهای ثقلی استاتیکی بررسی شد، پیشنهاد می شود ظرفیت باربری به صورت دینامیکی نیز مورد بررسی قرار گیرد.
- ۲- با توجه به اینکه در منطقه شواهدی از آب زیر زمینی مشاهده نشده تاثیر آب زیرزمینی در ظرفیت باربری بررسی نشده است. پیشنهاد می شود این مساله نیز بررسی شود.
- ۳- نشست های وابسته به زمان از جمله مسائلی است که می تواند جهت ارزیابی دقیق تر پی مخازن بررسی شود.

فهرست منابع

- [۱]- Wyllie, D.C., (2005), "Foundation on rock", Second Editions, Principal, Golder Associates, Consulting Engineers Vancouver, Canada.
- [۲]- شرکت پایانه های صادرات مواد نفتی ایران، (۱۳۸۷)، " پروژه مخازن ذخیره سازی نفت خام در جزیره خارک"، بوشهر، آزمایشگاه فنی و مکانیک خاک استان بوشهر.
- [۳]- معاونت برنامه ریزی و نظارت بر منابع هیدروکربوری وزارت نفت ، (۱۳۸۸)، "ترازنامه هیدروکربوری کشور سال ۸۷"، تهران، موسسه مطالعات بین المللی انرژی، چاپ آبرنگ.
- [۴]- Google Earth, www.google.com
- [۵]- NIOC-IOTC, "Study & Design Of 4 Million Barrel Storage Tanks Of Kharg Oil Terminal", Storage Tanks (1000000bbl) Foundation Calculation Notebook.
- [۶]- Peck, R.B., Hanson W.E., Thornburn T.H., (1974), "Foundation Engineering", Wiley, New York, pp. 361-3.
- [۷]- Kulhawy, F.H., Carter, J.P., (1992), "Settlement and bearing capacity of foundations on rock masses and socketed foundations in rock masses", In: Bell FG, editor. Engineering in rock masses. Oxford, UK: Butterworth- Heinemann, p. 231-45.
- [۸]- Goodman, R. E., (1989), "Introduction to Rock Mechanics", second edition; WILEY; 348-356.
- [۹]- Bowles, J. E., (1997), "Foundation Analysis and Design", fifth edition; McGraw-Hill Companies. 277-280.
- [۱۰]- Serrano, A., Ollala, C., (1994), "Ultimate Bearing Capacity Of Rock Masses", International Journal of Rock Mechanic, Vol. 31.NO.2.
- [۱۱]- Yang, X., Yin, J.H., Li, L., (2003), "Influence of a nonlinear failure criterion on the bearing capacity of a strip footing resting on rock mass using a lower bound approach", Canadian Geotechnical Journal, 40(3): p. 702-707.
- [۱۲]- Prakoso, W. A., Kulhawy, F. H., (2004), "Bearing Capacity of Strip Footing on Jointed Rock Masses", ASCE 1347-1349.
- [۱۳]- Yang, X.L., Yin, J.H., (2005), "Upper bound solution for ultimate bearing capacity with a modified Hoek-Brown failure criterion", International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences, 42(4), p. 550-560.

[۱۴]- Saada, z., Maghous, S., Garnier, D., (2008), "Bearing capacity of shallow foundation on rocks obeying a modified Hoek-Brown failure criterion, computers and geotechnics, 35(2), p.144-154.

[۱۵]- Ching, J., Hu, Y., (2011), "Reliability-based design for allowable bearing capacity of footings on rock masses by considering angle of distortion"; International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences. 728- 740.

[۱۶]- Imani, M., Fahimifar, A., Sharifzadeh, M., (2012), "Upper Bound Solution For the Bearing capacity of Submerged Jointed Rock Foundations", Rock mechanic and rock engineering, 45(4), p.639-646.

[۱۷]- Bindlish, A., Singh, M., Samadhiya, N., (2012), "Ultimate Bearing Capacity of Shallow Foundations on Jointed Rock Mass", Indian Geotechnical Journal, 42(3), p. 169-178.

[۱۸]- Clause, J., (2013), "Bearing capacity of circular footings on a Hoek-Brown material", International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences, 57, p. 34-41.

[۱۹]- Fahimifar, A., Ahmadvand, M., Ghadami, H., Abdolmaleki, A., (2013), "Accurate Survey Effect of Jointing On Bearing Capacity for Rock Foundation (A Case Study of Safa Dam in Kerman Province, Iran)", International Symposium of advances in Science And Thechnology, p. 07-08-5252, Bandar-Abbas, Iran.

[۲۰]- Olalla, C., (2014), "Foundations on rock masses", Rock Engineering and Rock Mechanics, Structures in and on Rock Masses – Alejano, Perucho, Olalla & Jiménez (Eds) © 2014 Taylor & Francis Group, London, 978-1-13800149-7.

[۲۱]- ستایش ع، محسنی آستانی ر، رمضانزاده بادلی م، (۱۳۸۸)، "فونداسیون های سطحی، ظرفیت باربری و نشست"، سازمان انتشارات جهاد دانشگاهی.

[۲۲]- رهائی ع، (۱۳۷۷)، " اصول مهندسی پی"، دانشگاه صنعتی امیر کبیر.

[۲۳]- Brown, W.D., (1994), "Engineering and Design Rock foundation", US Army Corps of Engineering.

[۲۴]- Serrano, A., Olalla, C., (1996), " Allowable bearing capacity of rock foundations using a Non- linear failure criterium", Int.j rock mech. Sci, vol 33 .No4

[۲۵]- گشتاسبی ک، نیکخواه م، دلیری م، (۱۳۸۰)، " بررسی روش های تخمین ظرفیت باربری پی های سنگی"، اولین کنفرانس مکانیک سنگ.

[۲۶]- Serrano, A., Olalla, C., Gonzalez, J., (2000), "Ultimate bearing capacity of rock masses based on the modified Hoek-Brown criterion", International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences.

[۲۷]- جوانمرد س، پایان نامه کارشناسی ارشد، (۱۳۹۲)، "طراحی مقدماتی تونل ارتباطی جزیره خارک به ساحل اصلی"، دانشکده مهندسی معدن، نفت و ژئوفیزیک، دانشگاه صنعتی شاهرود.

[۲۸]- شرکت پایانه های صادرات مواد نفتی ایران، (۱۳۸۱)، "طرح احداث دو دستگاه مخزن یکصد هزار بشکه‌ای ذخیره سوخت در جزیره خارگ"، تهران، مهندسین مشاور تکنولوژی و طراحی ایران، مهندسین مشاور خدمات مهندسی پی کارآزما.

[۲۹]- معاونت مهندسی و ساخت داخل شرکت ملی نفت ایران، (۱۳۸۷)، "استاندارد مهندسی برای طراحی فرآیندی و انتقال مایع و گاز و ذخیره سازی"، ویرایش اول، تهران، اداره تحقیقات و استانداردها.

[۳۰]- مشاوره شفاهی با کارشناسان شرکت ملی نفت ایران و نامه نگاری‌های صورت گرفته.

[۳۱]- API Standard 650, (2007), "Welded Tanks for Oil Storage", American petroleum Institute.

[۳۲]- Marinos, G., Marinos, V., Hoek, E., (2007), "Geological Strength Index (GSI). A characterization tool for assessing engineering properties for rock masses", Proceedings of the Workshop (W1) on Underground Works under Special Conditions.

[۳۳]- کرمی م، ابره ب، فرامرزی ل، (۱۳۹۱)، "آموزش کاربردی نرم افزار $FLAC^{3D}$ "، ویرایش دوم، چاپ اول، انتشارات جهاد دانشگاهی واحد صنعتی اصفهان.

[۳۴]- Itasca Consulting Group Inc, (2009), 'Fast Lagrangian Analysis of Continua in 3 Dimensions', version 4.0 User's Manual.

[۳۵]- Javid, A., Fahimifar, A., Imani, M., (2015), "Numerical investigation on the bearing capacity of two interfering strip footings resting on a rock mass", journal of and Geotechnics 69 (2015) 514–528.

[۳۶]- خانلری غ، فریدونی د، (۱۳۹۰)، "ارائه روابط تجربی به منظور محاسبه مقاومت فشاری و مدول الاستیسیته سنگ های سخت با استفاده از نتایج چکش اشمیت"، نشریه زمین شناسی مهندسی، جلد پنجم، شماره یک.

[۳۷]- Hoek, E., Diederichs, M.S., (2006), "Empirical estimation of rock mass modulus", International Journal of Rock Mechanics & Mining Sciences 43 (2006) 203–215.

Abstract:

Designing of foundations on rock masses, it is necessary that the rock masses be examined from different aspects. One of the aspects in addition to the settlement and instability, is determination the bearing capacity of rock foundations. Because of high strength and rigidity of rocks, the bearing capacity of rock foundations is more than soil foundations. But factors such as rock mass crush, discontinuities, high weathering, karst cavities, faulting, etc. cause bearing reduced. Due to the establishment of many structures on rock foundation and created problems about instability of structures established on unsuitable rock foundations, today, the necessity of accurate and comprehensive examination of rock foundations and estimation of effective parameters in the bearing capacity of them is very important.

Khark Island is one of the most important Iranian oil export terminals. For storing of crude oil at the highest point of the Khark Island, huge tanks with different capacities in an area about 120 hectares are constructed. Oil storage tanks, especially in critical areas, are very important. In order to have sufficient bearing capacity as well as reducing the subsidence, these tanks required an appropriate foundations. Any deficiency in these rock foundations could be able to make a huge irreparable damages.

In these thesis after introducing the rock foundations and its failure mechanisms different approach of bearing capacity determination such as use building codes, experimental methods, analytical and numerical methods will be examined. Then bearing capacity and settlement of rock foundations of crude oil storage tanks at Khark Island determined by various methods. In order to examine discontinuities and weak structural factors, the geological strength index is used. The results of studies show that the discontinuities have great impacts on the bearing capacity of rock foundations. Bearing capacity and settlement of Khark Island are in the allowable limit and is suitable for construction of these tanks.

Keywords: Bearing capacity, Rock foundation, Empirical, Analytical and Numerical methods



Shahrood University of Technology
Faculty of Mining, Petroleum and Geophysics

**Determination of geomechanical parameters and allowable bearing
capacity of the rock foundations of surface crude oil tanks in
Khark Island**

Saeed Soltani Mohamadi

Supervisor:
Dr. Shokrollah Zare

Advisor:
Dr. Majid Nikkhah

February 2016