

## تعیین پارامترهای ژئومکانیکی و ظرفیت باربری مجاز پی‌های سنگی مخازن سطحی نفت خام در جزیره خارک

سعید سلطانی محمدی<sup>۱\*</sup>؛ شکراله زارع<sup>۲</sup>؛ مجید نیکخواه<sup>۳</sup>؛ مهدی قنواتی نسب<sup>۴</sup>

۱- کارشناس ارشد مهندسی معدن- مکانیک سنگ، دانشگاه صنعتی شاهرود

۲- دانشیار دانشکده مهندسی معدن، نفت و ژئوفیزیک، دانشگاه صنعتی شاهرود

۳- استادیار دانشکده مهندسی معدن، نفت و ژئوفیزیک، دانشگاه صنعتی شاهرود

۴- کارشناس شرکت پایانه‌های نفتی ایران

پذیرش: ۱۳۹۶/۰۳

دریافت: ۱۳۹۵/۰۳

### چکیده

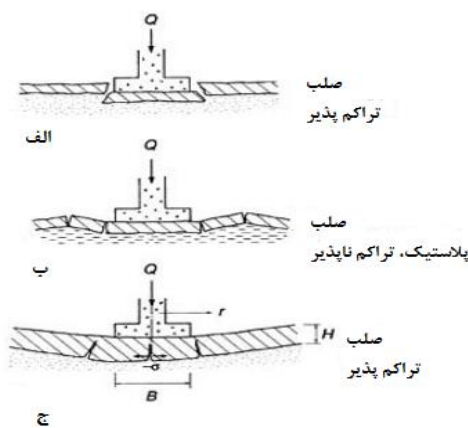
پی‌های سنگی در مقایسه با پی‌های خاکی به دلیل ماهیت سنگی آن‌ها دارای مقاومت و صلبیت بیشتری بوده و به همین دلیل در مقابل بسیاری از بارهای وارده، باربری لازم را از خود نشان می‌دهند؛ اما عواملی از قبیل خردشدگی توده‌سنگ، وجود ناپیوستگی‌ها، هوازدگی شدید، وجود حفرات کارستی، گسله‌داری و غیره موجب کاهش باربری آن‌ها می‌شود. جزیره خارک یکی از مهم‌ترین پایانه‌های صادرات نفت ایران است که در آن مخازن عظیم ذخیره‌سازی نفت خام با ظرفیت‌های مختلف ایجاد شده است. این مخازن نیاز به پی مناسب دارند که هم‌ظرفیت باربری کافی داشته و هم بتواند نشست را محدود کند. در این پژوهش روش‌های مختلف تعیین ظرفیت باربری شامل؛ استفاده از آیین‌نامه‌ها، روش‌های تجربی، روش‌های تحلیلی و روش عددی مورد بررسی قرار می‌گیرد. در ادامه ظرفیت باربری 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 تأثیر زیادی در ظرفیت باربری پی‌های سنگی دارد. ظرفیت باربری و نشست پی‌های جزیره خارک در حد مجاز بوده و برای ساخت مخازن ذخیره‌سازی نفت خام مناسب است.

ظرفیت باربری- پی‌سنگی- روش‌های تجربی، تحلیلی و عددی

واژگان کلیدی

## ۱- مقدمه

گسیختگی وجود خواهد داشت. 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 ( $Punching$ ) 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 خواهد کرد. 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 ۱ قابل مشاهده است [۲].



شکل ۱: احداث پی گسترده روی لایه های سنگی [۲]

الف- شکست پانچی ب- شکست کمانشی ج- شکست خمشی

ظرفیت باربری به دو صورت ظرفیت باربری نهایی و ظرفیت باربری مجاز بیان می شود. این دو اصطلاح به این صورت تعریف می شوند [۳]:

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

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 گونه ای که آن قدر بزرگ نباشد که باعث تخریب سازه شود، بیان می شود. ظرفیت باربری مجاز ( $q_a$ ) بر اساس مقاومت توده سنگ، به صورت ظرفیت باربری نهایی تقسیم بر یک ضریب ایمنی تعریف می شود:

مخازن ذخیره سازی به صورت وسیع در بسیاری از صنایع بخصوص در صنایع پالایش، نفت و پتروشیمی به منظور نگهداری محصولات مختلف نفتی به کار می روند. از جمله گزینه های محتمل برای پی سازه های عظیم می توان به پی های واقع بر روی توده های سنگی اشاره کرد. تعیین ظرفیت باربری پی از مسائل مهمی است که از دیرباز مورد توجه مهندسين ژئوتکنیک قرار گرفته و بنا به اهمیت آن روابط متعددی توسط محققین مختلف ارائه شده است. در هر کدام از این روابط عوامل مختلفی از جمله درزه ها و ناپیوستگی ها، چسبندگی و اصطکاک داخلی توده سنگ، شاخص های 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 این پژوهش 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 ساخته شده 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 پارامترهای ژئومکانیکی ساخته شده مخازن تعیین شده است. به منظور بررسی ناپیوستگی ها در توده سنگ از شاخص مقاومت زمین شناسی استفاده می شود و تحلیل هایی با آن انجام می گیرد.

## ۲- ظرفیت باربری پی های سنگی

از آنجایی که مقاومت سنگ ها در مقابل بارگذاری بیش از خاک است، در پی سازی ترجیح داده می شود که فشار وارده از سازه های سنگین به سنگ بستر یا پی سنگی منتقل شود [۱]. در صورتی که پی سنگی مستحکم و قوی باشد بارهای سازه اغلب می توانند بدون ایجاد مشکل و مسئله خاصی تحمل شوند، اما وجود یک شکستگی با مقاومت اندک با جهت یافتگی خاص، ممکن است باعث لغزش کامل شکستگی پی شود [۲].

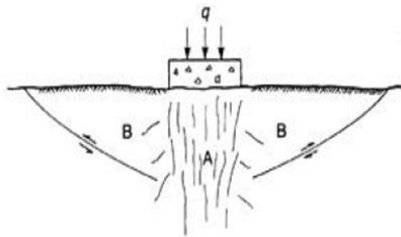
در مواردی که پی بر روی سنگ بستر لایه ای قرار می گیرد، به طوری که لایه زیرین آن ضخامت قابل ملاحظه ای داشته و از مقاومت کمتری برخوردار است، احتمال وقوع سه مکانیزم

در این رابطه  $K_{sp}$  فاکتور تجربی بوده که بین ۰/۱ تا ۰/۴ می‌باشد. عموماً این روش برای نسبت‌های  $S/B$  بین ۰/۰۵ تا ۲ و  $g/s$  بین صفر تا ۰/۰۲ به کار برده می‌شود.  $D$  فاکتور عمق بوده که به صورت زیر تعریف می‌شود:

$$D = 1 + 0.42 (L/B) < 3.4 \quad (۴)$$

### ۳-۳- روش مبنی بر معیار شکست هوک- براون

در این روش بررسی ظرفیت باربری با توجه به تشکیل گوه‌های مقاوم و محرک در سنگ زیر پی صورت می‌گیرد. همان‌طور که در شکل ۲ مشاهده می‌شود، سنگ واقع در زیر سازه در حالت تنش فشاری سه محوری قرار دارد. تنش اصلی کوچک‌تر برابر با فشار باربری ( $q$ ) و تنش اصلی کوچک‌تر برابر با فشار محصورکننده‌ای است که توسط سنگ‌های اطراف وارد می‌شود. حداکثر فشاری که سنگ‌های اطراف می‌توانند ایجاد کنند برابر با مقاومت فشاری تک‌محوری توده‌سنگ در منطقه ( $B$ ) می‌باشد. این شرایط در حالتی اتفاق می‌افتد که سطح ضعیف مشخصی برای گسیختگی توده‌سنگ وجود نداشته باشد و یا این که سنگ متخلخل بوده و بتواند تحت بارگذاری پی متراکم شود [۲].



شکل ۲: شالوده قرار گرفته روی سنگ [۲]

با توجه به آنچه گفته شد ظرفیت باربری مجاز به این صورت به دست می‌آید:

$$q_a = \frac{C_{f1} S^{1/2} \sigma_c [1 + (m S^{-1/2} + 1)^{1/2}]}{FS} \quad (۵)$$

ضریب تصحیح  $C_{f1}$  بر اساس شکل پی در محاسبات تعیین ظرفیت باربری مجاز از جدول ۲ به دست می‌آید.

جدول ۲: ضرایب تصحیح شکل پی ( $L$  طول و  $B$  عرض پی) [۲]

$C_{f1}$	$C_{f2}$	شکل پی	
۱	۱	$L/B > 6$	نواری
۱/۱۲	۰/۹	$L/B = 2$	مستطیلی
۱/۰۵	۰/۹۵	$L/B = 5$	مستطیلی
۱/۲۵	۰/۸۵		مربعی
۱/۲	۰/۷		دایروی

$$q_a = \frac{q_u}{FS} \quad (۱)$$

برای بیشتر پی‌ها، حداقل ضریب ایمنی قابل قبول با احتساب یک‌بار سازه‌ای شامل تمام بارهای زنده و مرده ۳ می‌باشد. به‌عنوان یک معیار برای بررسی پی، تنش میانگینی که بر پی اعمال می‌شود باید برابر یا کمتر از ظرفیت باربری مجاز باشد.

### ۳-۲- تعیین ظرفیت باربری پی‌های سنگی

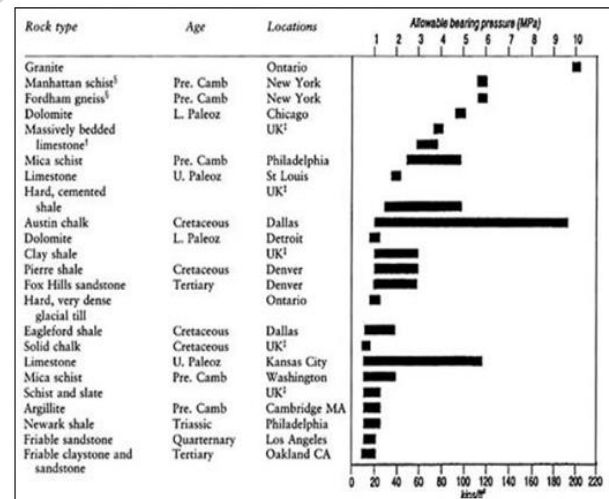
به‌طور کلی روش‌های تعیین ظرفیت باربری پی‌های سنگی شامل روش‌های تجربی، روش‌های تحلیلی و روش‌های عددی می‌باشد. در ادامه به معرفی این روش‌ها می‌پردازیم.

#### ۳-۱- آیین‌نامه‌های ساختمانی

روش متداول برای تعیین فشار باربری مجاز، استفاده از جداول و آیین‌نامه‌های منتشر شده است. برای بسیاری از سازه‌ها، ابعاد مورد نیاز ناحیه‌ی باربری پی از حد جداول منتشر شده یا آیین‌نامه‌های ساختمانی که در آن‌ها فشار باربری مجاز انواع سنگ‌ها درج شده، به دست می‌آید. جدول ۱ فشار باربری مجاز را برای انواع شرایط زمین‌شناسی سنگ‌ها، بسته به نوع و سن آن‌ها ارائه می‌نماید. [۲].

جدول ۱: ظرفیت باربری مجاز برای سنگ‌های تازه طبق

آیین‌نامه‌های ساختمانی [۲]



### ۳-۲- روش کانادایی

انجمن ژئوتکنیک کانادا در سال ۱۹۸۵ برای تعیین ظرفیت باربری نهایی رابطه زیر را پیشنهاد نموده است [۴]:

$$q_u = 3\sigma_c K_{sp} \cdot D \quad (۲)$$

$$K_{sp} = [3 + S/B] / [10 \left(1 + \frac{300g}{S}\right)^{0.5}] \quad (۳)$$

## ۳-۵-۱- روش سرانو و اولالا ۱۹۹۴

در سال ۱۹۹۴ سرانو و اولالا روش جامعی را برای تعیین ظرفیت باربری پی‌های سنگی بر اساس معیار هوک- براون ارائه کردند. معیار شکست اولیه هوک- براون به صورت زیر می‌باشد [۵]:

$$\frac{\sigma_1 - \sigma_3}{\sigma_{ci}} = \left( m \frac{\sigma_3}{\sigma_{ci}} + s \right)^{0.5} \quad (۱۳)$$

بر این اساس سرانو و اولالا رابطه‌ی زیر را برای محاسبه ظرفیت باربری نهایی پی‌های سنگی ارائه کردند:

$$q_u = \beta(N_\beta - \xi) \quad (۱۴)$$

ضریب  $N_\beta$  را می‌توان بر اساس جداول، نمودار و روابط موجود محاسبه کرد.  $\beta$  و  $\xi$  پارامترهای ژئومکانیکی توده سنگ است که با استفاده از ثوابت هوک- براون به صورت زیر به دست می‌آید.

$$\beta = \frac{m \sigma_{ci}}{8} \quad (۱۵)$$

$$\xi = \frac{8s}{m^2} \quad (۱۶)$$

## ۳-۵-۲- روش سرانو و اولالا ۲۰۰۰

در روش قبل از معیار اولیه هوک- براون برای تعیین ظرفیت باربری پی‌های سنگی استفاده شده است. هوک و همکاران معیار اولیه را برای کاربرد در محیط‌های 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 به صورت زیر می‌باشد [۶]:

$$\frac{\sigma_1 - \sigma_3}{\sigma_{ci}} = \left( m \frac{\sigma_3}{\sigma_{ci}} + s \right)^n \quad (۱۷)$$

سرانو و اولالا در سال ۲۰۰۰ بر اساس معیار اصلاح شده نسخه‌ی جدیدی از رابطه خود را برای تعیین ظرفیت باربری پی‌های سنگی ارائه کردند که به صورت زیر می‌باشد [۶]:

$$q_u = \beta(N_\beta - \xi) \quad (۱۸)$$

ضریب  $N_\beta$  را می‌توان بر اساس جداول، نمودار و روابط موجود محاسبه کرد.  $\beta_n$  و  $\xi_n$  ثابت‌های توده سنگ بوده و به  $s$ ,  $m$ ,  $n$  و  $\sigma_c$  وابسته هستند و به صورت زیر به دست می‌آیند.

$$K = \left( \frac{1-n}{n} \right) \quad (۱۹)$$

$$A_n^k = \frac{m(1-n)}{2^{\frac{1}{n}}} \quad (۲۰)$$

$$A_n = (A_n^k)^{\frac{1}{k}} \quad (۲۱)$$

$$\beta_n = A_n \sigma_c \quad (۲۲)$$

در حالتی که پی سازه در عمق سنگ استقرار یابد، لازم است معادله را اصلاح نمود و تأثیر افزایش تنش ناشی از تنش محصورکننده ( $q_s$ ) در سطح زمین را به حساب آورد؛ بنابراین رابطه ظرفیت باربری به صورت زیر است [۲]:

$$q_a = \frac{C_{f1}[(m\sigma_c\sigma_3 + S\sigma_c^2)^{1/2} + \sigma_3]}{FS} \quad (۶)$$

که در آن:

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

## ۳-۴- روش بل (Bell)

برای تعیین ظرفیت باربری سنگ‌های ضعیف با ترک‌داری بسیار کم از روش بل استفاده می‌شود. اصول مورداستفاده در این روش مانند اصولی است که در مورد سنگ‌های ترک‌دار در روش مبتنی بر معیار هوک- براون استفاده می‌شود. در این روش تحلیل، وزن سنگ در گوه فعال و همچنین محصوریت ایجادشده سنگ‌های اطراف در محاسبات در نظر گرفته می‌شود. ظرفیت باربری مجاز در این روش از رابطه زیر محاسبه می‌شود [۲]:

$$q_a = \frac{C_{f1}c N_c + C_{f2}(B\gamma/2)N_\gamma + \gamma D N_q}{FS} \quad (۸)$$

در این رابطه  $C_{f1}$  و  $C_{f2}$  ضرایب تصحیح سنگ پی بوده که از جدول ۲ به دست می‌آیند.  $N_c$  و  $N_\gamma$  و  $N_q$  ضرایب ظرفیت باربری بوده که به ترتیب نشان‌دهنده تأثیر چسبندگی، تأثیر وزن خاک و عرض پی و تأثیر روباره است و از روابط زیر محاسبه می‌شوند:

$$N_c = 2 N_\theta^{0.5} (N_\theta + 1) \quad (۹)$$

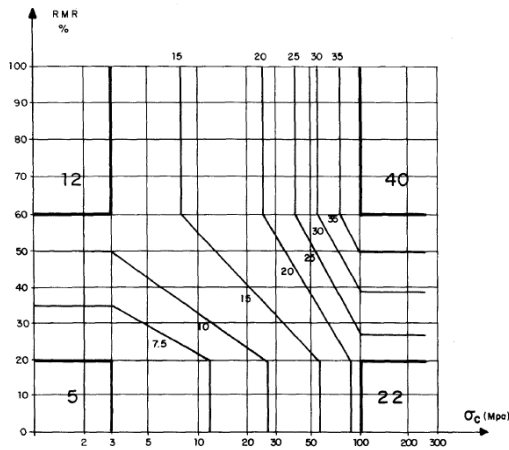
$$N_\gamma = 0.5 N_\theta^{0.5} (N_\theta^2 - 1) \quad (۱۰)$$

$$N_q = N_\theta^2 \quad (۱۱)$$

$$N_\theta = \tan^2 (45 + \phi/2) \quad (۱۲)$$

## ۳-۵-۲- روش سرانو و اولالا (Serrano-Olalla)

در این روش سرانو و اولالا ظرفیت باربری نهایی توده سنگ را با استفاده از معیار شکست غیرخطی هوک- براون محاسبه نموده‌اند. این معیار در مورد سنگ‌های بکر، سنگ‌های حاوی ناپیوستگی‌های متعدد و توده سنگ‌های درزه دار معتبر است. روابط مختلفی برای تعیین ظرفیت باربری پی‌های سنگی توسط سرانو و اولالا ارائه شده است که در ادامه تشریح می‌شود.

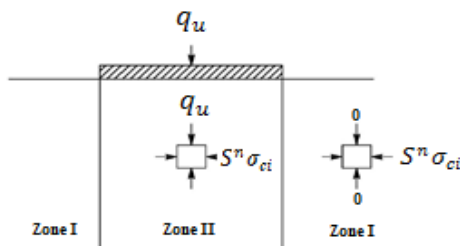


شکل ۳: ضریب ایمنی موضعی ( $F_p$ ) پیشنهاد شده [۷]

### ۳-۶- روش کولهاوی و کارتر (Kulhawy-Carter)

کولهاوی و کارتر یک راه‌حل حد پایین ساده برای تعیین ظرفیت باربری توده سنگ‌ها بر اساس معیار شکست غیرخطی هوک- براون ارائه کردند. جزئیات میدان تنش حد پایین در شکل ۴ 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 می‌شود. همان‌طور که در شکل دیده می‌شود توده سنگ زیر پی نواری به دو ناحیه تقسیم شده است. تنش قائم  $\sigma_3$  در ناحیه‌ی یک فرض می‌شود صفر باشد (دارای وزن مخصوص بسیار کم)، در حالی که تنش افقی ( $\sigma_1$ ) 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 غیرخطی هوک و براون و با ( $\sigma_3 = S^n \sigma_{ci}$ ) به صورت زیر قابل محاسبه است [۹]:

$$q_u = [S^n + (m S^n + S)^n] \sigma_{ci} \quad (26)$$



شکل ۴: راه‌حل حد پایین ظرفیت باربری پی سنگی [۹]

$$\xi_n = \frac{S}{m A_n} \quad (23)$$

### ۳-۵-۳- ظرفیت باربری مجاز در 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 بستگی دارد و همواره از یک بزرگتر است. ضریب اطمینان باید عدم قطعیت و شک و تردیدهای مربوط به دو مسئله زیر را پوشش دهد [۷]:

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

بنابراین ضریب اطمینان را می‌توان حاصل ضرب دو عامل زیر دانست.

$$FS = F_p \cdot F_m \quad (24)$$

عامل  $F_p$  مربوط به تغییرات پارامترهای توده سنگ بوده و عامل  $F_m$  احتمال شکست شکننده یک قسمت یا کل پی را نشان می‌دهد. ضریب  $F_m$  در حالتی که رفتار شکننده داریم منظور می‌شود و برای رفتار پلاستیک سنگ مساوی یک در نظر گرفته می‌شود. ضریب ایمنی موضعی پارامترها ( $F_p$ ) بر اساس مطالعات آماری در شکل ۳ پیشنهاد شده است.

### ۳-۵-۴- ظرفیت باربری نهایی با در نظر گرفتن اثر وزن توده سنگ

روابطی که توسط سرانو و اولالا ارائه شد و تا اینجا به آن‌ها پرداختیم فاقد اثر وزن توده سنگ 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 داریم [۸]:

$$q_u = \beta(N_\beta - \xi) + \frac{1}{2} \gamma B N_\gamma \quad (25)$$

در این رابطه  $N_\gamma$  فاکتور باربری قدیمی می‌باشد که از روابط موجود قابل محاسبه است.

## ۳-۷- روش‌های عددی

روش‌های عددی در حل مسائل مهندسی کاربردهای زیادی دارد. در گذشته به علت نبود امکانات رایانه‌ای کافی و همچنین زمان‌بر بودن انجام محاسبات، بیشتر از روابط تجربی استفاده شده است. باید توجه داشت که حل دقیق مسائل مهندسی سنگ با استفاده از روش‌های تجربی و عددی به تنهایی ممکن نیست. ترکیب این دو روش، می‌تواند طراح را در حل مسائل پیچیده کمک کند. اساس روش‌های عددی، تبدیل یک محیط با بی‌نهایت درجه آزادی به محیطی با درجه آزادی محدود در تعداد معینی از نقاط محیط است [۱۰].

به‌طور کلی روش‌های عددی به روش‌های پیوسته، گسسته و ترکیبی تقسیم می‌شوند. روش‌های پیوسته شامل روش المان محدود، تفاضل محدود و المان مرزی و روش‌های گسسته شامل روش المان مجزا می‌باشند. امروزه با توسعه علم کامپیوتر، نرم‌افزارهای فوق‌العاده قدرتمندی برای تحلیل تنش و کرنش در کاربردهای مختلف تهیه و به بازار عرضه شده است. همچنین با استفاده از روش‌های عددی می‌توان شرایط خاص و مواردی که با روش‌های دیگر قابل بررسی نیستند را مورد بررسی قرارداد [۱۰].

## ۴- تعیین نشست پی‌های سنگی

برای اغلب پی‌های روی سنگ، مواد برابر به‌صورت الاستیک و همسانگرد در نظر گرفته می‌شوند؛ بنابراین نشست به همراه اعمال بار اتفاق می‌افتد و اثر وابسته به زمان وجود ندارد. از تئوری الاستیسیته می‌توان برای محاسبه نشست در دامنه وسیعی از شرایط زمین‌شناسی استفاده کرد که در ادامه به آن می‌پردازیم.

## ۴-۱- سنگ‌های همگن و همسانگرد

میزان نشست عمودی ( $\delta_v$ ) در سنگ‌های همگن و همسانگرد از رابطه (۲۷) محاسبه می‌شود. در این رابطه فرض می‌شود که یک یا چند بار گسترده یکنواخت بر روی سطح دایره‌ای یا چهارگوش پی عمل می‌کند [۲].

$$\delta_v = \frac{C_a q B (1 - \nu^2)}{E} \quad (27)$$

پارامتر  $C_a$  ضریب شکل پی بوده که به شکل پی و موقعیت نقطه‌ای که نشست آن محاسبه می‌شود بستگی دارد.

## ۴-۲- سنگ‌های لایه‌ای

نشست سنگ‌های لایه‌ای (در حالتی که لایه فوقانی در مقایسه با ابعاد پی نسبتاً ضخیم باشد) را می‌توان با استفاده از تئوری الاستیک و مشابه روش ارائه‌شده برای سنگ‌های همسانگرد محاسبه نمود. در ادامه محاسبات مربوط برای شرایط مختلف زمین‌شناسی ارائه می‌شود [۲].

## ۴-۲-۱- لایه تراکم پذیر بر روی بستری صلب

در شرایطی که یک لایه تراکم پذیر بر روی بستری صلب قرار می‌گیرد (مثلاً 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 (۲۷) محاسبه می‌شود، با این تفاوت که به جای  $C_a$  از ضریب  $C'_a$  استفاده می‌شود. فرض مرتبط با مقادیر  $C'_a$  این است که هیچ‌گونه تنش برشی و جابجایی افقی در مرکز لایه فوقانی و همچنین سنگ تحتانی اتفاق نخواهد افتاد.

## ۴-۲-۲- لایه تراکم پذیر در داخل تشکیلات صلب

نشست در داخل تشکیلاتی که حاوی یک لایه نسبتاً نازک تراکم پذیر در زیر لایه سنگی صلب است را می‌توان با روشی مشابه آنچه برای حالت قبل تشریح شد، محاسبه نمود. در این محاسبات فرض بر این است که اولاً لایه تحتانی نامحدود بوده و صلب عمل می‌کند و ثانیاً لایه‌های میانی و فوقانی تراکم پذیر هستند. با استفاده از این فرضیات می‌توان ضریب شکل ( $C'_a$ ) را به دست آورد و سپس نشست را با استفاده از میانگین وزن‌دار مدول دولایه محاسبه نمود.

$$\bar{E} = \frac{E_1 H_1 + E_2 H_2}{H_1 + H_2} \quad (28)$$

## ۴-۲-۲- لایه صلب بر روی تشکیلات تراکم پذیر

در این حالت یک لایه سنگی صلب بر روی تشکیلاتی سنگی با صلبیت کمتر قرار می‌گیرد. در این شرایط، نشست عمودی ( $\delta_v$ ) در یک پی دایره‌ای با بارگذاری یکنواخت از رابطه (۲۹) به دست می‌آید:

$$\delta_v = a \delta_{\infty} \quad (29)$$

در این رابطه  $a$  ضریب تصحیحی است که با داشتن مدول نسبی دو سنگ ( $\frac{E_1}{E_2}$ ) و نسبت ضخامت لایه فوقانی به قطر پی ( $\frac{H}{B}$ ) قابل محاسبه است. پارامتر  $\delta_{\infty}$  نشست محاسبه‌شده با فرض این‌که مصالح پی کاملاً از جنس لایه تحتانی بوده از رابطه (۲۷) محاسبه می‌شود.

## ۵- تعیین پارامترهای ژئومکانیکی ساختمان مخازن نفت خام در جزیره خارک

مجتمع مخازن خارک در زمینی به مساحت حدود ۱۲۰ هکتار توان ذخیره‌سازی نفت خام را دارد. این مخازن به صورت استوانه‌های 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. این مخازن که در یک ارتفاع از سطح دریا بنا شده‌اند این امکان را به نفت خام می‌دهند تا با نیروی جاذبه به سمت اسکله‌ها هدایت شود [۱۱].

برای تعیین پارامترهای ژئومکانیکی ساختمان مخازن از اطلاعات پروژه‌های ذخیره‌سازی اجرا شده در منطقه و گزارش‌های زمین‌شناسی گمانه‌های حفار شده در این پروژه‌ها به همراه مطالعات میدانی صورت گرفته در محدوده ساختمان استفاده شده است. برای ساخت مخازن یک میلیون بشکه‌ای نفت خام تعداد ۹ عدد گمانه تا عمق ۲۰ متری در منطقه حفاری شده است. بررسی‌ها نشان می‌دهد جنس مصالح تحت‌الارضی تا اعماق حفاری شده به‌طور کلی از دولایه تشکیل شده است. لایه اول عمده تا عمق ۶ متری ادامه دارد و لایه دوم که در زیر آن قرار گرفته خود شامل توالی لایه‌هایی است که در زمان‌های مختلف رسوب یافته و تا اعماق ادامه می‌یابد [۱۱]:

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

مخازن سطحی ذخیره‌سازی نفت خام از یک پی نواری تشکیل شده که به صورت یک دیوار حلقه‌ای بتنی در اطراف مخزن قرار دارد. این دیوار دارای ضخامت ۱/۱ متر بوده و از دو قسمت تشکیل شده است. مخازن یک میلیون بشکه‌ای نفت خام دارای قطر حدود ۱۰۹ متر می‌باشند. برای ساخت مخازن ذخیره‌سازی نفت خام ابتدا خاک‌های نباتی و آلی موجود

جدول ۳: پارامترهای ژئومکانیکی پی‌های سنگی مخازن ذخیره‌سازی نفت خام

نوع سنگ	RQD	CR	GSI	$\sigma_{ci}$ (MPa)	$\nu$	$\gamma_d$ (g/cm <sup>3</sup> )
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

سطحی تا هر عمقی که وجود داشته باشد، برداشت شده و سطح مورد نظر تسطیح می‌شود [۱۱].

به منظور بررسی خصوصیات فیزیکی و مکانیکی لایه‌های سنگی در محل گمانه‌ها مطالعات صحرایی و آزمایش‌های متداول همچون آزمایش مقاومت فشاری تک‌محوره انجام شده است. با بررسی مغزه‌های به دست آمده از گمانه‌ها پارامترهای مختلف در مقیاس آزمایشگاهی اندازه‌گیری شده است. همچنین با بررسی‌های میدانی صورت گرفته وضعیت ژئوتکنیکی و زمین‌شناسی منطقه ارزیابی شد که نتایج آن در جدول ۳ به صورت بازه حداقل و حداکثر قابل مشاهده می‌باشد.

به منظور بررسی رفتار توده‌سنگ از شاخص مقاومت زمین‌شناسی (*Geological Strength Index*) استفاده شده است. این شاخص سیستمی را برای تخمین کاهش مقاومت توده‌سنگ برای شرایط زمین‌شناسی مختلف که از روی مطالعات میدانی مشخص می‌شود فراهم می‌کند. خصوصیات توده‌سنگ بر اساس برداشت بصری از پدیده‌های ساختاری و شرایط سطحی ناپیوستگی‌ها که از روی زبری درزه و تغییرات آن مشخص می‌شود، به دست می‌آید [۱۲].

برای تعیین پارامترهای ژئومکانیکی توده‌سنگ‌های منطقه از نرم‌افزار Roclab استفاده شده است. این نرم‌افزار پارامترهای ژئومکانیکی توده‌سنگ را بر اساس معیار شکست هوک- براون محاسبه می‌کند. نتایج پارامترهای ژئومکانیکی توده‌سنگ‌های منطقه در جدول ۴ آمده است.

## ۶- ظرفیت باربری پی مخازن در جزیره خارک

پی مخازن یک میلیون بشکه‌ای ذخیره‌سازی نفت خام در جزیره خارک به‌طور کلی از دولایه سنگ آهک مرجانی و سنگ مارن تشکیل شده است. به طوری که سنگ مارن در زیر لایه سنگ آهک مرجانی قرار گرفته و تا اعماق ادامه می‌یابد. در ادامه ظرفیت باربری پی مخازن توسط روش‌های مختلف بررسی می‌شود.

جدول ۴: پارامترهای ژئومکانیکی توده سنگ‌های ساختگاه مخازن حاصل از نرم‌افزار Roclab

سنگ مارن	سنگ آهک مرجانی	پارامترها
۷/۲	۷/۵	$\sigma_{ci}$ (MPa)
۴۵	۴۰	GSI
۷	۱۰	mi
.	.	D
۱۲۶۰	۳۰۷۵	$E_i$ (MPa)
۰/۹۸۲	۱/۱۷۳	$m_b$
۰/۰۰۲۲	۰/۰۰۱۳	S
۰/۵۰۸	۰/۵۱۱	n
۰/۳	۰/۳۲	چسبندگی (MPa)
۲۶	۲۷/۵	زاویه اصطکاک داخلی (Deg)
۲۸۱/۸۰	۵۰۰	مدول تغییرشکل پذیری (MPa)

پارامترهای ورودی نرم‌افزار Roclab

ثابت‌های معیار هوک-براون

پارامترهای توده سنگ

جدول ۶: ظرفیت باربری نهایی پی مخازن با استفاده از روش‌های تحلیلی (MPa)

سنگ مارن	سنگ آهک مرجانی		ظرفیت باربری
	بی‌وزن	با وزن	
۷/۸	۴/۱	۸/۶۷	۴/۷
۳/۰۶	۲/۳	۳/۲۵	۲/۲
-	۱/۸۳	-	۱/۷۱
۱۰/۷۵	۵/۶۳	۱۱/۸۸	۶/۳۹
۱۰/۴۷	۵/۳۵	۱۱/۴۳	۵/۹۴

جدول ۷: ظرفیت باربری مجاز پی مخازن با استفاده از روش‌های تحلیلی (MPa)

سنگ مارن	سنگ آهک مرجانی		ظرفیت باربری
	بی‌وزن	با وزن	
۲/۶	۱/۳۷	۲/۸۹	۱/۵۷
۱/۰۲	۰/۷۷	۱/۰۸	۰/۷۳
-	۰/۶۱	-	۰/۵۷
۰/۸۳	۰/۴۳	۰/۹۹	۰/۵۳
۰/۸۱	۰/۴۱	۰/۹۵	۰/۵

## ۳-۶ روش عددی

در این پژوهش از روش تفاضل محدود برای بررسی ظرفیت باربری پی مخازن ذخیره‌سازی نفت خام در جزیره خارک

## ۱-۶ روش‌های تجربی

روش‌های تجربی تعیین ظرفیت باربری پی‌های سنگی و آیین‌نامه‌های موجود در بخش‌های قبل به‌طور کامل بررسی شد. مقادیر ظرفیت باربری نهایی و مجاز پی مخازن ذخیره‌سازی نفت خام در جزیره خارک حاصل از این روش‌ها با فرض فاکتور ایمنی ۳ در جدول ۵ آمده است.

جدول ۵: ظرفیت باربری پی مخازن ذخیره‌سازی با استفاده از روش‌های تجربی (MPa)

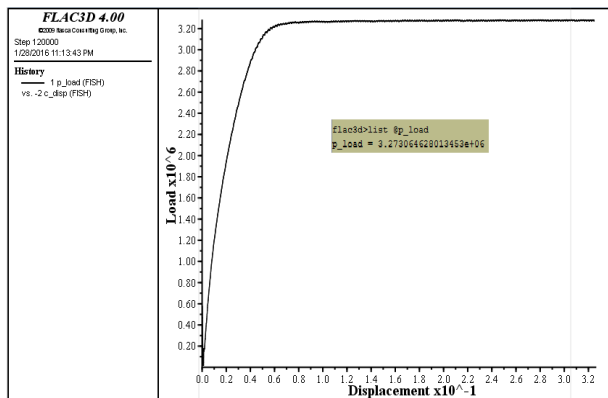
ظرفیت باربری	سنگ آهک مرجانی		سنگ مارن	
	مجاز	نهایی	مجاز	نهایی
روش کانادایی	۰/۷۵	۲/۱۷	۰/۷۲	۲/۲۶
آیین‌نامه	۱	۲/۲۵	۰/۷۵	۳

## ۲-۶ روش‌های تحلیلی

ظرفیت باربری نهایی و مجاز پی مخازن ذخیره‌سازی نفت خام در جزیره خارک حاصل از روش‌های تحلیلی در جداول ۶ و ۷ آورده شده است. ظرفیت باربری را می‌توان در دو حالت، با در نظر گرفتن اثر وزن توده سنگ و بدون در نظر گرفتن وزن توده سنگ محاسبه کرد. از این رو ظرفیت باربری پی مخازن در دو حالت محاسبه شده است. از آنجاکه 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 محافظه‌کارانه خواهد بود.



مثبت رو به پایین اعمال می‌شود. با اجرای برنامه در تعداد گام زمانی محاسباتی، نمودار ظرفیت باربری پی به دست می‌آید. زمانی که پی دچار تغییر مکان‌هایی است که منجر به افزایش بار نمی‌شود نمودار بار- تغییر مکان به یک ثبات (شیب تقریباً صفر) می‌رسد. باری که در آخرین گام به دست می‌آید، معادل ظرفیت باربری نهایی پی ( $q_u$ ) خواهد بود. شکل ۶ نمودار ظرفیت باربری پی در مدل هوک-براون را نشان می‌دهد.



شکل ۶: نمودار تعیین ظرفیت باربری پی مخازن ذخیره‌سازی در مدل هوک-براون

ظرفیت باربری نهایی و مجاز پی مخازن نفت خام در جزیره خارک حاصل مدل‌سازی عددی در جدول ۸ آمده است. مرزبندی میدان سرعت و بردار سرعت پی پس از بارگذاری در زمان ظرفیت باربری نهایی در شکل ۷ مشاهده می‌شود. در اثر اعمال بار ناشی از وزن مخزن و محتویات درون آن، زمین زیر مخزن به سمت اطراف تمایل به جابجایی دارد. مرزبندی‌های میدان سرعت حساس‌ترین نقاط پی در اثر اعمال بار که بیشترین جابجایی در آنها اتفاق می‌افتد را نشان می‌دهند.

جدول ۸: ظرفیت باربری پی مخازن ذخیره‌سازی نفت خام حاصل تحلیل عددی (MPa)

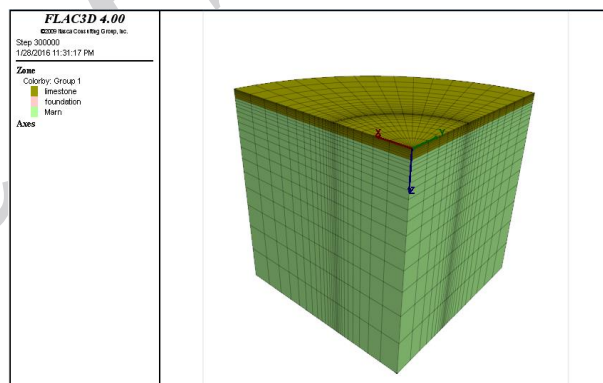
مدل رفتاری	ظرفیت باربری مجاز		ظرفیت باربری نهایی	
	با وزن	بدون وزن	با وزن	بدون وزن
موهر-کولمب	۱/۷۱	۱/۰۷	۵/۱۴	۳/۲
هوک-براون	۱/۰۹	۰/۶۹	۳/۲۷	۲/۰۸

#### ۶-۴- ظرفیت باربری پی مخازن در حالت خاص

برای احداث مخازن نفت خام ابتدا خاک‌های سطحی و هوازده برداشت شده و در صورت نیاز مصالح مناسب جایگزین می‌شود.

استفاده شده است. از مهم‌ترین نرم‌افزارهایی که از روش تفاضل محدود برای حل مسائل ژئوتکنیک استفاده می‌کند، نرم‌افزار  $FLAC^{3D}$  است. تمامی تحلیل‌های عددی توسط ورژن ۴ این نرم‌افزار انجام گرفته است.

برای ساخت مدل سه‌بعدی به دلیل تقارن پی دایره‌ای، یک‌چهارم از پی مدل‌سازی شده است. با این کار حجم محاسبات در مقایسه با مدل‌سازی کل پی کم می‌شود. محورهای مختصات به‌گونه‌ای انتخاب شده‌اند که محورهای  $X$  و  $Y$  به‌صورت افقی در صفحه بالایی استوانه و محور  $Z$  رو به پایین در راستای محور استوانه می‌باشد. شعاع مدل و ارتفاع آن برابر ۱۵۰ متر در نظر گرفته شده است. لایه‌ها به‌صورت افقی بوده که با توجه به وضعیت زمین‌شناسی کلی منطقه لایه اول تا عمق ۶ متر و لایه دوم از ۶ متر تا عمق زمین ادامه می‌یابد. نمونه‌ای از مدل هندسی و مش بندی انجام شده در شکل ۵ قابل مشاهده است.



شکل ۵: مدل هندسی و مش بندی ایجاد شده در نرم‌افزار  $FLAC^{3D}$

به‌منظور پیش‌بینی مدل رفتاری مواد از مدل موهر-کولمب و مدل هوک-براون استفاده شده است. از آنجایی که روابط تحلیلی ارائه شده نیز بر اساس این دو معیار می‌باشد، مقایسه‌ای بین نتایج حاصل از این دو مدل رفتاری صورت می‌گیرد. 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.

تحلیل با اعمال یک سرعت قائم یا فشار یکنواخت برای شبیه‌سازی بارگذاری پی انجام می‌شود. برای این منظور طبق پیشنهاد دستورالعمل نرم‌افزار  $FLAC^{3D}$  یک سرعت با بزرگی  $10^{-4} \times 2/5$  متر در هر گام به نقاط گره‌ای زیر پی در جهت

#### ۷-۱- تعیین نشست با استفاده از روش تحلیلی

مخازن عظیم ذخیره‌سازی نفت خام در جزیره خارک به‌طور عمده بر روی بستری از سنگ‌آهک مرجانی با ضخامتی حدود ۶ متر قرار می‌گیرند و در زیر این بستر سنگ مارن وجود دارد. از آنجایی که مدول الاستیسیته سنگ‌آهک مرجانی بیش از سنگ مارن است صلبیت آن نیز بیشتر می‌باشد. در این شرایط نشست با استفاده از رابطه (۲۹) به دست می‌آید. در این رابطه ضریب تصحیح  $a$  برابر ۰/۹۸ است. بر این اساس نشست در مرکز پی ۶/۹ سانتیمتر و در گوشه پی ۴/۴۲ سانتیمتر خواهد بود.

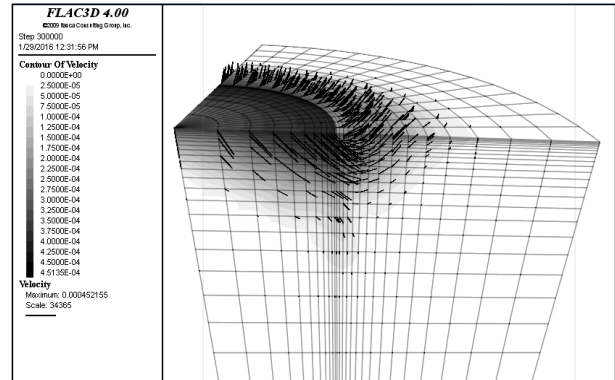
#### ۷-۲- تعیین نشست با استفاده از روش عددی

برای تعیین نشست پی مخازن ذخیره‌سازی نفت خام با استفاده از مدل‌سازی عددی ابعاد مدل هندسی موردنظر در جهت  $x$  و  $y$  که در صفحه‌ی 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 دایره‌ای و کاهش حجم محاسبات نصف پی مدل می‌شود. چگالی مش بندی، شرایط مرزی و اولیه مشابه مدل ساخته شده برای تعیین ظرفیت باربری است. مدل رفتاری موردنظر برای تعیین خصوصیات مواد تشکیل‌دهنده پی مدل موهر-کولمب و مدل هوک-براون در نظر گرفته شده است. بار اعمال شده به پی بار ثقلی می‌باشد که این بار شامل وزن مخزن و محتویات درون آن است.

هندسه مدل ساخته شده و مرزبندی نشست پی در مدل موهر-کولمب در شکل ۸ نشان داده شده است. همان‌طور که مشخص است بیش‌ترین نشست پی در مرکز مخزن و کمترین نشست در اطراف مخزن اتفاق می‌افتد. نشست به دست آمده با استفاده از مدل‌سازی عددی با مدل رفتاری موهر-کولمب در گوشه‌ها ۲/۷ سانتیمتر و در مرکز مخزن ۵/۵ سانتیمتر می‌باشد.

نمودار جابجایی نقاط زیر پی پس از بارگذاری در مدل هوک-براون در شکل ۹ مشاهده می‌شود. همان‌طور که انتظار می‌رود نشست به دست آمده در این مدل رفتاری با مدل موهر-کولمب برابر است این مسئله را این‌گونه می‌توان بیان کرد که نشست تنها تابع ثوابت الاستیک سنگ ( $\nu$  و  $E$ ) خواهد بود و سایر پارامترها تأثیری در نشست پی نخواهند داشت. از آنجایی که ثوابت الاستیک توده‌سنگ در این دو مدل رفتاری توسط مدول برشی و مدول حجمی تعریف می‌شوند و این دو پارامتر در هر دو مدل برابر است، نشست محاسبه شده نیز یکسان خواهد بود.

پی اکثر مخازن ذخیره‌سازی نفت خام به‌گونه‌ای 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.



شکل ۷: مرزبندی میدان سرعت و بردار سرعت پی پس از بارگذاری در مدل موهر-کولمب

با بررسی نمودار گمانه‌ها و ترانسه‌های موجود در منطقه مشخص شد که به‌طور 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 ذخیره‌سازی نفت خام به‌عنوان مصالح جایگزین بر اساس گزارشات موجود در جدول ۹ آمده است.

جدول ۹: خصوصیات خاک مورد استفاده در زیر مخازن ذخیره‌سازی نفت خام [۱۱]

پارامتر	$\nu$	$E$ (MPa)	$\gamma$ (gr/cm <sup>3</sup> )	$\phi$ (Deg)	$C$ (MPa)
مقدار	۰/۴	۱۶	۱/۱۳	۲۰	۰/۰۲۱

به‌منظور بررسی ظرفیت باربری پی مخازن با مدل‌سازی عددی، هندسه مدل، سرعت بارگذاری و تعداد گام زمانی مطابق آنچه در قبل گفته شد می‌باشد. برای توصیف مواد تشکیل‌دهنده پی از مدل موهر-کولمب استفاده شده است. ظرفیت باربری نهایی پی پس از بارگذاری با در نظر گرفتن وزن توده‌سنگ ۱/۹۸ مگاپاسکال خواهد بود.

#### ۷- تعیین نشست پی مخازن ذخیره‌سازی

مقدار و توزیع نشست نقش مهمی را در طراحی و اجرای پی دارد. نشست زیاد اجزای پی ممکن است که باعث ایجاد صدمه و یا ایجاد اختلال در برنامه بهره‌برداری سازه شود. در اینجا به بررسی نشست پی مخازن پرداخته می‌شود.

محدوده مجاز است.

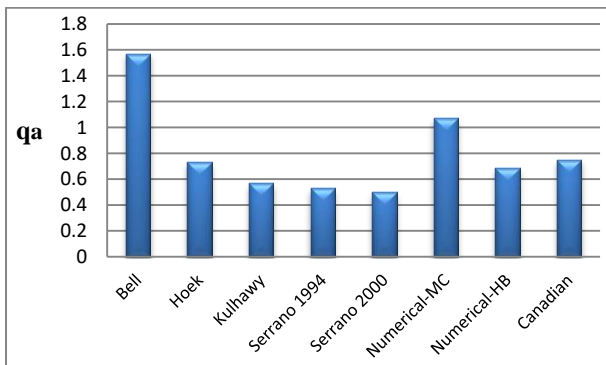
به عنوان یک معیار برای ارزیابی نشست پی مخازن ذخیره سازی برای دو نقطه از پی (مرکز تا لبه)، اختلاف نشست دو نقطه به فاصله آن ها می بایست کمتر از  $\frac{1}{300}$  باشد [۱۳]. نشست پی مخازن ذخیره سازی نفت خام بر اساس مدل سازی عددی ۲/۷ سانتیمتر در گوشه مخزن و ۴/۵ سانتیمتر در مرکز مخزن به دست آمد، بنابراین داریم:

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

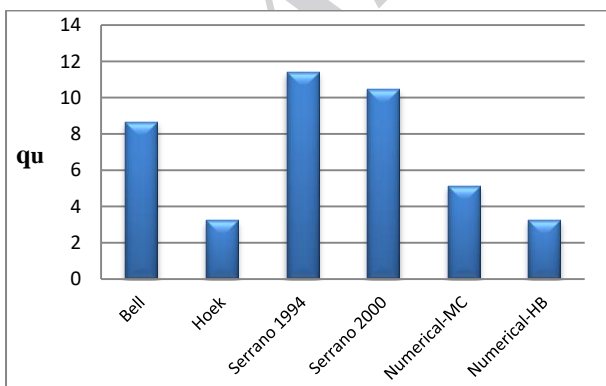
$$\delta/L = \frac{2.8}{5450} = 0.00051 < 1/300$$

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

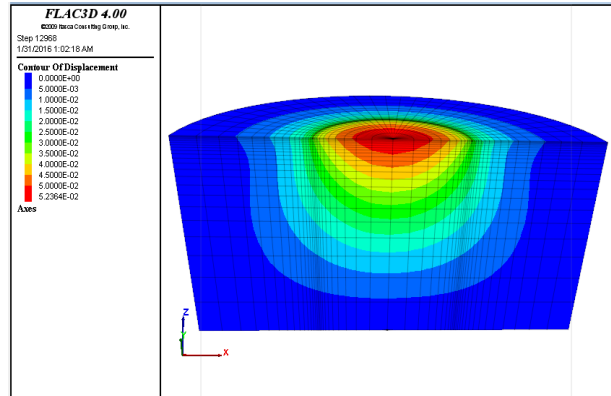
به منظور مقایسه ظرفیت باربری به دست آمده از روش های مختلف، ظرفیت باربری مجاز و نهایی پی مخازن ذخیره سازی در شکل های ۱۰ و ۱۱ نشان داده شده است. روش های مختلف با توجه به تئوری استفاده شده در آن ها مقادیر مختلفی را برای ظرفیت باربری پیشنهاد می کنند.



شکل ۱۰: ظرفیت باربری مجاز پی مخازن حاصل از روش های مختلف برای سنگ آهک بی وزن (MPa)

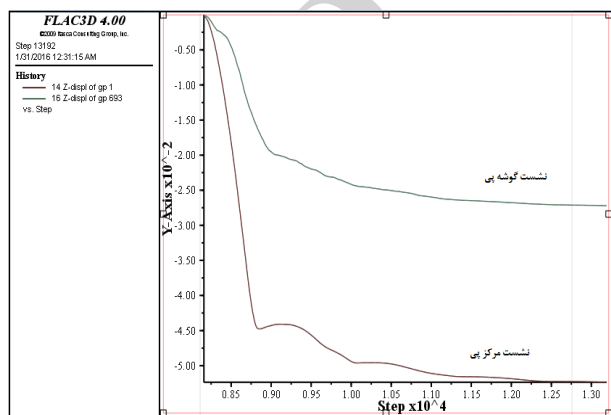


شکل ۱۱: ظرفیت باربری نهایی پی مخازن حاصل از روش های مختلف برای سنگ آهک وزن دار (MPa)



شکل ۸: مرزبندی نشست پی مخازن ذخیره سازی در مدل موهر-

کولمب



شکل ۹: جابجایی نقاط زیر پی مخازن پس از بارگذاری در مدل

هوک- براون

### ۸- بررسی ظرفیت باربری و نشست پی مخازن

ظرفیت باربری مجاز پی مخازن با استفاده از مدل سازی عددی با در نظر گرفتن اثر وزن توده سنگ با مدل رفتاری موهر- کولمب ۱/۷۱ مگاپاسکال و با مدل رفتاری هوک- براون ۱/۰۹ مگاپاسکال به دست آمده است. همچنین با در نظر گرفتن یک لایه ۳ متری از خاک در زیر مخزن ظرفیت باربری مجاز ۰/۶۶ مگاپاسکال محاسبه شد.

بر اساس اطلاعات موجود وزن مخزن در زمان آزمایش ۱۸۲۰۰۰ تن است که شامل وزن سازه ی فلزی مخزن و محتویات درون آن می باشد. این وزن بیشترین وزن ثقلی وارده در طول عمر مخزن است [۱۱]. در صورتی که ظرفیت باربری مجاز پی برای این بار ثقلی حداکثر جواب دهد، از نظر بار ثقلی مشکلی نخواهیم داشت. با توجه به قطر مخزن که حدود ۱۰۹ متر است، بار ثقلی اعمال شده بر پی ۰/۱۹۵ مگاپاسکال خواهد بود. این بار از ظرفیت باربری مجاز پی در تمام حالات ذکر شده کمتر است؛ بنابراین تنش ناشی از بار ثقلی زیر مخزن در

۳- در ساختگاه مخازن ذخیره‌سازی نفت خام در جزیره خارک از آنجایی که لایه سنگ‌آهک مرجانی مدول الاستیسیته‌ای به مراتب بالاتر از سنگ مارن زیرین دارد، این لایه 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 سنگ‌آهک مرجانی و رفتار پلاستیک و تراکم‌پذیری بسیار پایین سنگ مارن شکست کمانشی محتمل‌تر است.

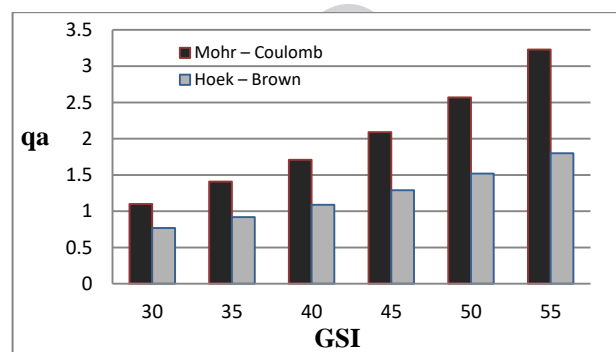
۴- تمام تحلیل‌ها در این پژوهش در دو حالت با در نظر گرفتن وزن توده‌سنگ و بدون در نظر گرفتن وزن توده‌سنگ انجام شده است. در صورتی که وزن توده‌سنگ در محاسبات ظرفیت باربری لحاظ شود، ظرفیت باربری افزایش می‌یابد؛ بنابراین ظرفیت باربری محاسبه‌شده برای توده‌سنگ بدون وزن محافظه‌کارانه خواهد بود.

۵- به منظور بررسی ناپیوستگی‌ها در توده‌سنگ از شاخص مقاومت زمین‌شناسی (GSI) استفاده شده است. مقایسه مقادیر ظرفیت باربری در شرایط درزه‌داری مختلف نشان می‌دهد که وجود ناپیوستگی‌ها می‌تواند تأثیر زیادی بر ظرفیت باربری پی‌سنگی داشته باشد. با افزایش GSI و کاهش ناپیوستگی‌ها ظرفیت باربری پی افزایش می‌یابد.

۶- ظرفیت باربری به دست‌آمده از روش‌های مختلف با توجه به تنوعی‌های مختلفی که در آن‌ها استفاده شده متفاوت می‌باشد. روش مناسب باید بر اساس نوع و رفتار توده‌سنگ و با توجه به نوع پی، گستره بارگذاری آن، حالت شکست احتمالی، میزان احتمال شکست پی و اهمیت سازه انتخاب شود.

۷- در بین روش‌های مختلف که بررسی شد ظرفیت باربری مجاز پی مخازن 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 دست‌آمده با مدل‌سازی عددی مقادیری بینابین را دارد. ظرفیت باربری نهایی پی مخازن با در نظر گرفتن وزن سنگ با استفاده از روش هوک-براون و مدل‌سازی عددی با مدل رفتاری هوک-براون کمترین مقدار و با روش سرانو-اولالا ۱۹۹۴ بیشترین مقدار را خواهد داشت. مقادیر ظرفیت باربری حاصل مدل‌سازی عددی با مدل رفتاری موهر-کولمب بیشتر از مدل رفتاری هوک-براون خواهد بود.

بر اساس مطالعات صورت گرفته شاخص مقاومت زمین‌شناسی برای سنگ‌آهک مرجانی حدود ۴۰ و برای سنگ مارن حدود ۴۵ می‌باشد. همان‌طور که در شکل ۱۲ دیده می‌شود، با کاهش GSI و تضعیف توده‌سنگ ظرفیت باربری کاهش قابل‌ملاحظه‌ای می‌یابد. این مسئله لزوم انجام بررسی‌های دقیق‌تر و در نظر گرفتن ناپیوستگی‌ها در توده‌سنگ پی را نشان می‌دهد. با افزایش GSI و کیفیت توده‌سنگ مدل موهر-کولمب مقادیر بیشتری از ظرفیت باربری را نسبت به مدل هوک-براون پیش‌بینی می‌کند.



شکل ۱۲: ظرفیت باربری مجاز سنگ‌آهک مرجانی حاصل از مدل‌سازی عددی بر اساس تغییرات GSI (MPa)

## ۹- نتیجه‌گیری

در این پژوهش ظرفیت باربری و نشست پی مخازن ذخیره‌سازی نفت خام در جزیره خارک با استفاده از روش‌های مختلف مورد بررسی قرار گرفته است. در ابتدا با استفاده از روش‌های تجربی و تحلیلی موجود ظرفیت باربری و نشست پی ارزیابی شد. سپس با استفاده از مدل‌سازی عددی با استفاده از نرم‌افزار  $FLAC^{3D}$  ظرفیت باربری و نشست پی مخازن مورد بررسی قرار گرفت. نتایج این تحقیق به صورت زیر می‌باشد.

۱- با وجود این که پی‌های سنگی برای اغلب سازه‌ها پی‌های قابل‌اطمینانی هستند، در مواردی که توده‌سنگ از کیفیت پایینی برخوردار است، به‌ویژه برای سازه‌های حساس و با اهمیت، لزوم مطالعه و تخمین ظرفیت باربری پی‌های سنگی وجود دارد.

۲- بررسی‌های صورت گرفته در این پژوهش نشان می‌دهد که ظرفیت باربری و نشست پی مخازن ذخیره‌سازی نفت خام در جزیره خارک در حد مجاز بوده و مشکلی در این زمینه وجود ندارد.

## ۱۰- سپاس‌گزاری

این پژوهش با همکاری شرکت پایانه‌های نفتی ایران انجام شده است. مؤلفان بر خود لازم می‌دانند مراتب تقدیر و تشکر خود را از ریاست محترم پژوهش و توسعه شرکت پایانه‌های نفتی ایران و سایر همکاران ایشان اعلام نمایند.

## ۱۱- فهرست نمادها

نماد	واحد	شرح
$\sigma_{ci}$	MPa	مقاومت فشاری تک‌محوره
S	cm-m	فاصله‌داری ناپیوستگی‌ها
B	m	عرض یا قطر پی
g	mm-cm	بازشدگی ناپیوستگی‌ها

## ۱۲- مراجع

[۱] رهایی ع، (۱۳۷۷). اصول مهندسی پی. دانشگاه صنعتی امیر کبیر. ISBN: 978-964-463-337-9.

[2] Wyllie, D. C. (2005). *Foundation on rock*. Second Editions, Principal, Golder Associates, Consulting Engineers Vancouver, Canada. ISBN 0-203-47767-7.

[3] Brown, W. D. (1994) *Rock foundation*. US Army Corps of Engineering. EM110-1-2908.

[۴] گشتاسبی، ک. نیکخواه، م. دلیری، م. (۱۳۸۰). بررسی روش‌های تخمین ظرفیت باربری پی‌های سنگی. اولین کنفرانس مکانیک سنگ ایران. IRMC01\_040.

[5] Serrano, A., & Ollala, C. (1994), Ultimate Bearing Capacity Of Rock Masses. *International Journal of Rock Mechanics*, Vol. 31.NO.2. Doi:10.1016/0148-9062(94)92799-5.

[6] 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*. 37 (2000) 1013-1018. Doi:10.1016/j.ijrmms.2015.12.014.

[7] 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. Doi:10.1016/0148-9062(95)00081-X.

نماد	واحد	شرح
L	m	طول پی فروشده در سنگ
S, m, n	-	پارامترهای هوک-براون
$\sigma_1, \sigma_3$	MPa	تنش اصلی حداکثر و حداقل
C	MPa	چسبندگی توده‌سنگ
$\gamma$	gr/cm <sup>3</sup>	وزن مخصوص و توده‌سنگ
$\emptyset$	Deg	زاویه اصطکاک داخلی
q	MPa	بار گسترده یکنواخت
v	-	ضریب پواسون
E	MPa	مدول الاستیسیته
H	cm-m	ضخامت لایه

[8] Olalla, C. (2014). Foundations on rock masses. *Rock Engineering and Rock Mechanics, Structures in and on Rock Masses*, London, 978-1-13800149-7. DOI: 10.1201/b16955-6.

[9] Kulhawy, F.H., & Carter, J.P. (1992). Settlement and bearing capacity of foundations on rock masses and socketed foundations in rock masses. *Engineering in rock masses*. p. 231-45. Doi:10.1016/B978-0-7506-1965-3.50016-9

[۱۰] کرمی، م. ابره، ب. فرامرزی، ل. (۱۳۹۱). آموزش کاربردی نرم‌افزار FLAC<sup>3D</sup>. ویرایش دوم، چاپ اول، انتشارات جهاد دانشگاهی واحد صنعتی اصفهان. ISBN: 978-600-5151-39-8.

[۱۱] شرکت پایانه‌های صادرات مواد نفتی ایران، (۱۳۸۷). پروژه مخازن ذخیره‌سازی نفت خام در جزیره خارک. بوشهر، آزمایشگاه فنی و مکانیک خاک استان بوشهر.

[12] Marinos, G., & Marinos, V., & Hoek, E. (2007). Geological Strength Index (GSI). A characterization tool for assessing engineering properties for rock masses, Workshop on Underground Works under Special Conditions. DOI: 10.1201/NOE0415450287.ch2.

[13] Bowles, J. E. (1997). *Foundation Analysis and Design*. fifth edition; McGraw-Hill Companies. 277-280. ISBN 0-07-912247-7