

مدلسازی عددی فونداسیون مخازن نفتی در دو حالت پی حلقوی و ترکیب پی حلقوی و شمع

عرفان نادری^۱، شهرام متوسل^۲

^۱ استادیار گروه عمران، واحد نورآباد ممسنی، دانشگاه آزاد اسلامی، نورآباد ممسنی.

^۲ بخش مهندسی و ساختمان، شرکت نفت فلات قاره ایران، تهران.

نام نویسنده مسئول:

عرفان نادری

تاریخ دریافت: ۱۴۰۲/۰۵/۰۹

تاریخ پذیرش: ۱۴۰۲/۰۷/۱۳

چکیده

واحدهای تولید نفت و گاز برای نگهداری و انبار کردن نفت خام و گاز نیاز به تعداد زیادی مخازن ذخیره دارند. با توجه به نفت خیز بودن کشور ایران و پروژه‌های عظیم پالایشگاهی در حال ساخت و در دست طراحی، نیاز به ظرفیت عظیم ذخیره‌سازی محصولات نفتی و گازی در کشورمان احساس می‌شود. با توجه به تقارن مخازن استوانه‌ای نفت نسبت به محور قائم گذرنده از مرکز آن، فونداسیون بسیاری از مخازن نفتی بصورت حلقوی ساخته می‌شود. اما مسئله‌ی مهمی که در این پژوهش به بررسی آن می‌پردازیم این است که آیا در زمین‌های خیلی نرم هم می‌توان از پی حلقوی برای مخازن نفتی استفاده نمود یا نیاز به ترکیب این پی با المان‌های عمودی تقویتی مثل شمع می‌باشد؟ از این رو در این پژوهش دو حالت کلی پی حلقوی و ترکیب پی و شمع به عنوان فونداسیون مخازن ذخیره نفت در زمین‌های رسی نرم با استفاده از مدلسازی عددی اجزای محدود مورد بررسی قرار گرفت. در حالت پی حلقوی پارامترهای ارتفاع و عرض پی و در حالت ترکیب پی حلقوی و شمع پارامتر زاویه بین ردیف‌های متوالی شمع‌ها (که تعیین کننده تعداد شمع‌های قرار گرفته در زیر پی حلقوی می‌باشد) مورد تحقیق قرار گرفت. نتایج نشان داد در زمین‌های رسی بسیار نرم پی حلقوی به تنهایی نمی‌تواند گزینه مناسبی برای تامین ظرفیت باربری فونداسیون مخازن نفتی باشد. همچنین دیده شد تسلیح پی حلقوی با شمع، نشست محیط پیرامونی پی را کاهش می‌دهد اما همچنان در مرکز مخزن ضعف نشست وجود دارد که بایستی با راهکارهایی مانند تقویت ورق کف مخزن یا تسلیح تمامی مناطق زیر مخزن با شمع جلوی آن را گرفت.

واژگان کلیدی: مخازن نفت، پی حلقوی، ظرفیت باربری، شمع، نشست.

مقدمه

یکی از مهمترین مسائل در زمینه صنایع استخراج و پالایش نفت و مشتقات آن، ذخیره سازی این مواد پس از خالص سازی و آماده سازی برای مصرف می باشد. موادی که خوراک بسیاری از پالایشگاه ها و پتروشیمی ها را تامین می کنند پس از تولید بلافاصله مورد استفاده قرار نمی گیرند. به دلایل زیادی از جمله یکسان کردن کیفیت محصول، اندازه گیری حجم محصول جهت فروش، امکان بارگیری و انتقال به تانکر و یا کشتی در حداقل زمان ممکن و ... سبب می شود تا محصولات صنایع نفت و گاز را بعد از تولید در مخازن یا تانک های مناسب ذخیره نمایند. ذخیره درست و بی خطر این مواد یکی از مهمترین موارد صنایع نفت و پتروشیمی و پالایشگاه می باشد. واحدهای نفت و گاز برای نگهداری نفت خام و گاز و نیز انبار کردن فرآورده های نفتی گوناگون، نیاز به تعداد بسیاری مخزن دارند.

فصل مشترک بین زمین و سازه، پی (شالوده یا فونداسیون) نامیده می شود. وظیفه شالوده انتقال بار از سازه به زمین قرار گرفته زیر آن می باشد. ظرفیت باربری خاک همواره یکی از مهم ترین فاکتورها در طراحی پی بوده است. در نظر گرفتن ظرفیت باربری بیشتر از مقدار واقعی می تواند موجب خسارت دیدن یا گسیختگی کلی سازه ها شود؛ و همچنین در نظر گرفتن ظرفیت باربری کمتر از مقدار واقعی منجر به بزرگ شدن ابعاد پی و غیراقتصادی شدن طرح می شود. ساختن سازه های مهندسی (مانند مخازن عظیم نفت) بر روی خاک نرم همواره مشکلاتی از جمله نشست بیش از حد، تغییر شکل در سازه و ناپایداری ایجاد می کند. چنانچه با توجه به سایر ملاحظات از جمله دسترسی و نزدیکی به دریا مجبور به ساخت مخازن بر روی خاک های نرم باشیم، باید به طریقی خاک تحتانی را برای تحمل بار مخازن بهسازی کنیم. در این پژوهش با مسلح سازی پی حلقوی با استفاده از شمع، خاک تحتانی مخازن نفتی را تقویت نموده و تاثیر پارامترهای مختلف را بر روی ظرفیت باربری و میزان نشست پی مخازن نفتی مورد بررسی قرار می دهیم.

انواع مخازن ذخیره سازی نفت

به طور کلی مخازن مورد استفاده در صنایع نفت، گاز و پتروشیمی را می توان به سه دسته عمده مخازن ذخیره اتمسفریک، مخازن ذخیره کروی، مخازن تحت فشار تقسیم بندی نمود. مخازن اتمسفریک که در این پژوهش به آن ها پرداخته می شود برای ذخیره سازی مواد نفتی و یا شیمیایی که در دمای محیط به صورت مایع هستند مورد استفاده قرار می گیرند. موادی همچون نفت خام، بنزین، گازوئیل و برش های سنگین نفت خام در این مخازن ذخیره سازی می شوند. دون رابرتز [۱] در مقاله ای فونداسیون های مخازن ذخیره استوانه ای را مرور کرده است. در این مقاله انواع فونداسیون های استفاده شده برای شرایط مختلف خاک مرور شده است. این پی ها شامل استفاده از بالشتک ماسه، دیواره حلقوی بتنی یا سنگی، دیواره حلقوی سپری و فونداسیون شمعی با کلاهک سنگی می شود. همچنین رفتار نشست مجاز مخازن در این مقاله مورد بحث قرار گرفته است. راماسامی و کالایسلوان [۲] به بررسی یک مطالعه موردی در زمینه نشست فونداسیون مخازن ذخیره در منطقه گانجتیک هند پرداختند. در این پژوهش ۸ مخزن فلزی ذخیره نفت و ۲ مخزن آب آتشنشانی که تا ۱۰۰ میلی متر دچار نشست شده بودند مطالعه شدند. خاک این سایت شامل لایه های متناوب خاک های چسبنده و غیر چسبنده بود. مخازن مورد آزمایش بارگذاری (هیدروتست) قرار گرفتند و نشست ها در ۹ مکان در اطراف کف مخازن مشاهده شد. در نهایت نشست های رخ داده با مقادیر نشست پیش بینی شده مقایسه شدند. مرادی و همکاران [۳] در مقاله ای جنبه های ژئوتکنیکی انواع فونداسیون های مخازن ذخیره را مرور کردند. آن ها پنج دسته فونداسیون را برای مخازن ذخیره لیست کردند که شامل فونداسیون خاکی، فونداسیون خاکی با دیواره حلقوی بتنی، فونداسیون خاکی با دیواره حلقوی سنگی یا شنی، فونداسیون صفحه ای بتن مسلح و فونداسیون شمعی می شود. همچنین آن ها بیان کردند فاکتورهای مختلفی از جمله ظرفیت باربری، نشست و هزینه ساخت در انتخاب نوع فونداسیون مخازن دخیل هستند. حمیدی و واراکسین [۴] به بررسی راهکارهای بهسازی خاک بستر فونداسیون مخازن در شرق مرکزی پرداختند. آن ها ابتدا به مرور بحث نشست در یک سری استانداردهای بین المللی پرداخته و سپس تعدادی مطالعه موردی در مورد فونداسیون مخازن نفتی که خاک تحتانی آن ها با روش تراکم دینامیکی بهسازی شده ارائه دادند. دیموف و همکاران [۵] به مطالعه نشست و کج شدگی یک مخزن نفتی در حین آزمایش هیدرولیکی پرداختند. آن ها پیشنهاد دادند در ساخت یک مخزن واقعی حداقل نه

نقطه برای سنجش میزان نشست مخزن پس از ساخت در نظر گرفته شود. بدین صورت که یک نقطه در مرکز مخزن و هشت نقطه در دور تا دور محیط فونداسیون مخزن در نظر گرفته شود. گونراتن و همکاران [۶] به بررسی نشست نسبی لبه تا مرکز فونداسیون دایره‌ای یک مخزن ذخیره قرار گرفته بر روی خاک الاستیک پرداختند. یونزو و همکاران [۷] نشست نابرابر یک مخزن بزرگ نفتی را مورد بررسی قرار دادند. در این پژوهش یک مخزن ۵۰۰۰ مترمکعبی نفت با استفاده از مدلسازی اجزای محدود شبیه سازی شد تا اثر نشست‌های نامتقارن پی بر روی تنش‌های کلی مخزن مورد بررسی قرار گیرد.

پی حلقوی

به طور کلی پی‌های حلقوی کاربرد گسترده‌ای در صنایع مختلف بالاخص صنایع نفت و گاز دارند. به عنوان مثال از پی‌های حلقوی به عنوان فونداسیون مخازن عظیم ذخیره نفت و گاز استفاده می‌گردد. همچنین از اینگونه پی‌ها می‌توان به عنوان شالوده‌ی دودکش‌های بزرگ، برج‌های ارتباطی، همچنین شالوده‌ی سیلوه‌های ذخیره مواد غذایی، راکتورهای اتمی و برج‌های خنک کننده نیروگاه‌ها استفاده نمود. عموماً پی حلقوی برای اکثر سازه‌های با تقارن محوری نسبت به محور مرکزی قائم بر پی، یک پی مناسب و اقتصادی است. بسته به مقدار نسبت قطر داخلی به خارجی، شکل پی حلقوی از حالت تیر دایره‌ای باریک (پی حلقوی با رفتار پی نواری) تا پی دایره‌ای تغییر می‌کند. مطالعات تئوری محدودی بر روی رفتار این پی‌ها و برای پیش‌بینی نشست آنها در گذشته انجام شده است.

هاتف و رضوی [۸] مطالعات در مورد ظرفیت باربری پی حلقوی را دنبال کرد. آن‌ها برای بدست آوردن ظرفیت باربری نهایی پی حلقوی بر روی خاک ماسه‌ای با تراکم کم، از نتایج آزمایشگاهی، تئوریک و مدلسازی توسط روش اجزای محدود استفاده کردند. از مهمترین نتایج آن‌ها افزایش حدود ۲۵ درصدی ظرفیت باربری پی حلقوی با نسبت قطر داخلی به خارجی بین ۰/۲ تا ۰/۴ نسبت به پی دایره‌ای با همان قطر خارجی بود. حاجیانی بوشهریان و هاتف [۹] به بررسی ظرفیت باربری پی دایره‌ای و حلقوی روی ماسه مسلح بوسیله آزمایشات مدل آزمایشگاهی، به همراه آنالیزهای عددی پرداختند. از برنامه اجزای محدود Plaxis برای مدل کردن پی‌ها در این پژوهش استفاده شد. نادری و هاتف [۱۰] ظرفیت باربری پی‌های حلقوی و دایره‌ای نزدیک به هم قرار گرفته بر روی ماسه مسلح را به صورت عددی و آزمایشگاهی مورد بررسی قرار دادند. در این تحقیق اثرات تداخل پی‌ها، اثرات شکل پی‌ها (حلقوی یا دایره‌ای)، فاصله بین پی‌ها و همچنین تأثیرات لایه مسلح کننده روی ظرفیت باربری پی‌ها مورد بررسی قرار گرفت. چن و همکاران [۱۱] به بررسی عددی فونداسیون یک مخزن ذخیره مایعات با استفاده از اختلاف نشست به عنوان شرایط مرزی پرداختند. از آنجایی که اصطکاک بین خاک و سازه بطور جامع مطالعه شده است، این مطالعه بر روی مدلسازی اصطکاک بین ورق کف مخزن و فونداسیون انجام شده است. نگش و ساسیدر [۱۲] در مقاله‌ای به طراحی و آنالیز فونداسیون دیوار حلقوی مخازن با استفاده از نرم افزار STAAD Pro پرداختند. در این مقاله نشست کلی، نشست نامتوازن، نشست داخلی و نشست لبه‌ها مورد مدلسازی قرار گرفت و با مقادیر محاسبه شده بصورت دستی مقایسه شد. ژیاو و همکاران [۱۳] به بررسی عددی ظرفیت باربری پی‌های حلقوی مخازن ذخیره‌ی قرار گرفته بر روی توده سنگ پرداختند. ریندرز و همکاران [۱۴] به طراحی حالت حدی فونداسیون مخازن ذخیره فلزی قرار گرفته بر روی پی حلقوی از جنس سنگ خرد شده پرداختند. نتایج نشان داد که مخزن می‌تواند بدون نیاز به روش‌های گران قیمت بهسازی خاک، بر روی فونداسیونی حلقوی از جنس سنگ خرد شده احداث شود. ایگناتوویچ و هوتالا [۱۵] به بررسی شکست یک مخزن فلزی ذخیره مایع NaOH در اثر نشست‌های زیاد فونداسیون قرار گرفته بر روی ماسه و شن پرداختند.

ترکیب پی حلقوی و شمع

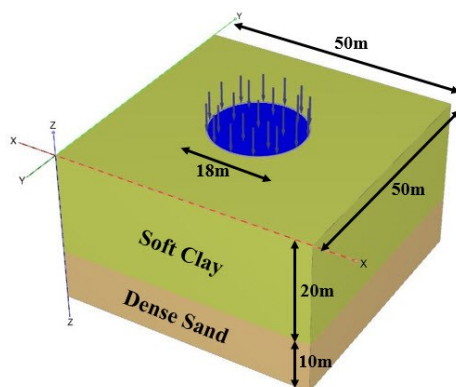
به جهت تقویت پی‌های حلقوی مخازن نفتی می‌توان آن‌ها را با المان‌های عمودی مانند شمع‌ها ترکیب نمود. آشور الخوزایی و جبار عباس [۱۶] یک مطالعه موردی از پی حلقوی یک مخزن نفتی فولادی را برای ارائه گام‌های صحیح طراحی فونداسیون آن مورد بررسی قرار دادند. هدف آن‌ها درک اصول طراحی ژئوتکنیکی و سازه‌ای فونداسیون مخازن نفتی فولادی سنگین بود. مخزن مطالعه شده توسط آن‌ها در صنایع نفتی بصره در جنوب عراق قرار گرفته است. قطر این مخزن نفتی ۲۶/۷۸ متر و ارتفاع

آن ۱۰ متر می‌باشد و بار این مخزن به صورت خطی و در روی محیط پیرامونی آن منتقل می‌شود. دو ردیف شمع بلند در دور تا دور مخزن در نظر گرفته شد تا بتواند بار اعمال شده از طرف مخزن و نفت مایع را تحمل نموده و بعنوان پایه تیر حلقوی بتن مسلح ایفای نقش نماید. نتایج نشان داد که استفاده از پی حلقوی قرار گرفته بر روی شمع‌ها راه حلی مناسب و اقتصادی برای فونداسیون مخازن نفتی سنگین قرار گرفته بر روی خاک ضعیف می‌باشد. ساندو و کومار [۱۷] به آنالیز آزمایشگاهی و عددی ترکیب فونداسیون حلقوی و شمع (با و بدون بالشتک ماسه‌ای مسلح شده با فیبر) قرار گرفته بر روی خاک رس نرم پرداختند. در این مطالعه ۳۴ مدل آزمایشگاهی برای بررسی اثر شمع‌های زیر پی حلقوی و همچنین اثر بالشتک ماسه‌ای مسلح شده با فیبر تصادفی، طول شمع‌ها و فاصله بین مرکز تا مرکز شمع‌ها بر روی نشست‌های نامتقارن، نیروی محوری شمع‌ها و مکانیزم توزیع بار انجام شد. نتایج نشان داد که قرار دادن شمع در زیر پی حلقوی باعث افزایش ظرفیت باربری و کاهش نشست‌های نامتقارن پی شده است. پالیشچاک و اشمیت [۱۸] روشی برای محاسبه نشست پی حلقوی ترکیب شده با شمع مربوط به مخازن ارائه دادند. در این پژوهش خاک از جنس رس در نظر گرفته شد و روش‌هایی برای محاسبه نشست نقطه مرکزی کف مخزن و نشست شمع‌های بتن مسلح ارائه گردید. شلیبی [۱۹] ظرفیت باربری پی حلقوی قرار گرفته بر روی رس بهسازی شده با ترکیب شمع سنگی و بالشتک ماسه‌ای را مورد بررسی قرار داد. نتایج نشان داد حضور شمع‌های سنگی با بالشتک ماسه‌ای باعث کاهش نشست و افزایش ظرفیت باربری پی حلقوی شده است و ابعاد بالشتک ماسه‌ای و شمع‌ها از فاکتورهای سیار مهم و اثرگذار در بهبود رفتار پی‌های حلقوی قرار گرفته بر روی خاک رس نرم می‌باشند.

روش تحقیق

در این پژوهش از نرم افزار اجزای محدود Plaxis 3D نسخه ۲۰۱۹ و برای مش بندی از حالت مش بندی مثلثی استفاده شده است. نرم افزار Plaxis 3D از المان‌های مثلثی ده گره‌ای در مدلسازی‌ها استفاده می‌کند. همچنین برای بالا بردن دقت مدلسازی، نرم افزار Plaxis بصورت اتوماتیک ابعاد مش در اطراف المان‌های مهم مانند شمع‌ها را ریزتر از سایر نقاط در نظر می‌گیرد. برای تعیین هندسه مسئله پیش رو ابتدا باید ابعاد مخزن ذخیره نفت مشخص گردد. اگر ابعاد مخزن خیلی بزرگ باشد با توجه به تعداد زیاد ستون‌های سنگی یا شمع‌هایی که در زیر آن در نظر گرفته می‌شود، شبکه مش بندی بسیار گسترده شده و مدت آنالیز مدل توسط کامپیوتر بسیار طولانی می‌گردد. ازینرو پس از چند مرحله سعی و خطا بر اساس جدول سایز مخازن در استاندارد API650 [۲۰]، قطر مخزن برابر با ۶۰ فوت (حدوداً ۱۸ متر) و ارتفاع مخزن برابر با ۴۰ فوت (حدوداً ۱۲ متر) در نظر گرفته شد. بر اساس اطلاعات این جدول حجم مخزن مورد بررسی برابر با ۲۰۰۰۰ بشکه (BBL) و معادل ۳۱۸۰ متر مکعب می‌باشد.

با توجه به گستردگی زیاد زمین‌های با بستر رسی نرم در کشور ایران، خاک مسئله مورد بررسی به صورت یک لایه ۲۰ متری رس نرم در نظر گرفته شد. عمق خاک مدلسازی باید بگونه‌ای در نظر گرفته شود که تنش‌ها به مرز مدل نرسد و مرزها تاثیری در نتایج نداشته باشند. ازینرو در مدلسازی‌های عددی عمق ۳۰ متر و طول و عرض ۵۰ متر برای خاک در نظر گرفته شد. به‌جهت نزدیک‌تر کردن لایه‌بندی خاک به واقعیت، در مدلسازی‌های عددی یک لایه ۱۰ متری خاک ماسه‌ای متراکم در زیر لایه ۲۰ متری خاک رس نرم در نظر گرفته شد. ابعاد مسئله در شکل ۱ نشان داده شده است.



شکل ۱ ابعاد خاک و فونداسیون مسئله مورد بررسی

بارگذاری

از خواص فیزیکی نفت خام که ارزش اقتصادی نفت خام بر مبنای آن سنجیده می‌شود، وزن مخصوص آن می‌باشد. لذا سنجش و نحوه محاسبه فرمول آن مهم است. اکثر کشورهای جهان چگالی نفت‌های خام را بر حسب درجه API به جای چگالی نسبی بیان می‌کنند. ارتباط بین این دو، به گونه ای است که افزایش چگالی API با کاهش چگالی ویژه مطابقت می‌کند. چگالی API همواره به نمونه مایع در ۶۰ درجه فارنهایت اشاره دارد. بر اساس اطلاعات ارائه شده توسط وزارت نفت ایران درجه API نفت خام سنگین ایران برابر با ۲۹/۶ و چگالی ویژه این نفت برابر با 875.3 kg/m^3 می‌باشد. بر این اساس و با استفاده از حجم مخزن نفت مدلسازی شده (که برابر با ۳۱۸۰ مترمکعب می‌باشد)، می‌توان وزن نفت خام درون مخزن و تنش اعمال شده به ورق کف مخزن را محاسبه نمود. بنابراین بار وزن نفت داخل مخزن در مدلسازی عددی بصورت تنش یکنواخت به ورق (Plate) تعریف شده در کف مخزن و با اندازه ۱۱۰ کیلوپاسکال اعمال گردید. همچنین طبق جداول موجود در استاندارد API650 [۲۰]، وزن مخزن خالی برابر با ۱۶۴۰۰۰ پوند معادل ۷۴/۴ تن می‌باشد. در عمل این بار به لبه های فونداسیون و به صورت خطی اعمال می‌گردد. بنابراین در آنالیزهای عددی این بار بصورت خطی یکنواخت با شدت 13 kN/m به محیط پیرامونی ورق کف مخزن اعمال شد. بار گسترده و بار خطی در تمامی مراحل مدلسازی بصورت همزمان به فونداسیون اعمال شدند. این روش بارگذاری توسط مرادی و همکاران [۳] و داس و دب [۲۱] توصیه شده است.

مشخصات مصالح

همانطور که در شکل ۱ نشان داده شد، لایه‌بندی خاک در تمامی مدلسازی‌های این پژوهش شامل ۲۰ متر خاک رسی نرم قرار گرفته بر روی ۱۰ متر خاک ماسه‌ای متراکم (Dense Sand) می‌باشد. مشخصات این مصالح در جدول ۱ آورده شده است. خاک رسی نرم و خاک ماسه‌ای متراکم با مدل رفتاری موهر-کولمب در نرم افزار Plaxis تعریف شدند. دلیل انتخاب این مدل رفتاری، در دسترس و ساده بودن پارامترهای مورد نیاز برای مصالح و توانایی بالای این مدل در پیش بینی رفتار خاک بود. مطابق استاندارد API650 [۲۰] تمامی ورق‌های کف مخازن باید حداقل ضخامت برابر با ۶ میلی‌متر داشته باشند. از اینرو ورق فولادی کف مخزن با ضخامت ۱۰ میلی‌متر و به‌صورت الاستیک در نرم‌افزار تعریف شد. سپس بار گسترده یکنواخت قائم حاصل از محتویات مخزن بر روی این ورق و بار خطی یکنواخت حاصل از وزن بدنه و سقف مخزن به محیط پیرامونی این ورق اعمال شد. در تمامی حالت‌های پی حلقوی و ترکیب پی حلقوی و شمع، در فضای داخلی پی حلقوی که در زیر ورق فولادی قرار می‌گیرد، مصالح درشت دانه متراکم (Coarse Aggregate) در نظر گرفته شده است. بدلیل کوتاه مدت بودن مدلسازی‌ها، تمامی مصالح خاکی در حالت زهکشی نشده تعریف شدند که در این حالت زاویه اصطکاک خاک رس برابر با صفر می‌باشد. همچنین پی حلقوی از جنس بتن تعریف شد که مشخصات آن در جدول ۱ آمده است.

لازم به ذکر است طبق توصیه شرکت سازنده نرم‌افزار Plaxis [۲۲]، شمع‌ها باید با استفاده از گزینه تیر جاسازی شده (Embedded beam) مدلسازی شوند. در واقع نرم افزار ابتدا شمع‌ها بصورت یک سری خطوط ترسیم می‌کند و سپس پارامترهای

شمع از جمله قطر شمع را به آن اعمال می‌کند. در تمام مدل‌سازی‌های این پژوهش جنس شمع‌ها بتنی و قطر تمامی شمع‌ها برابر با ۰/۵ متر و ثابت در نظر گرفته شد.

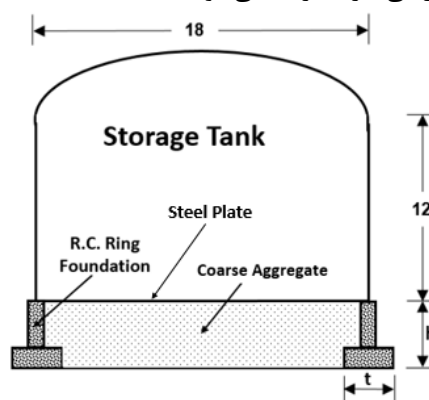
جدول ۱ پارامترهای استفاده‌شده در مدل‌سازی عددی

Parameter	Value				
	Soft Clay	Coarse Aggregate	Dense Sand	Steel Plate	Concrete Ring Footing
Model	M-C	M-C	M-C	Linear-Elastic	Linear-Elastic
Width (m)	20	-	10	0.01	Variable
Unit weight (kN/m ³)	14	20	18	78.5	25
Cohesion (kPa)	10	0	0	-	-
Internal friction angle (ϕ°)	0	45	42	-	-
Poisson's ratio	0.4	0.3	0.3	0.3	0.15
Modulus of elasticity (kPa)	7000	80000	50000	2E8	3E7
Dilation angle (ψ°)	0	15	12	-	-

نتایج و بحث

مدلسازی‌های اجزای محدود این پژوهش شامل دو حالت کلی پی حلقوی و ترکیب پی حلقوی و شمع می‌شود. در حالت پی حلقوی، پارامترهای ارتفاع پی (h) و عرض پی (t) مورد مطالعه قرار گرفت که این دو پارامتر در شکل ۲ بصورت شماتیک نشان داده شده‌اند. در تمامی مدل‌ها فضای داخلی پی‌های حلقوی با مصالح درشت دانه (Coarse Aggregate) پر شده است که در شکل ۲ نیز برشی از آن مشاهده می‌گردد.

پی‌های حلقوی مخازن طبق نقشه‌های اجرا شده همواره به شکل T برعکس می‌باشند و دلیل استفاده از چنین شکلی این است که سطح مقطع قسمتی از پی که روی زمین قرار می‌گیرد نسبت به بالای پی بیشتر باشد. برای مدلسازی چنین پی‌هایی در نرم افزار Plaxis، ابتدا پی T شکل به صورت دو بعدی در مکان مورد ترسیم می‌گردد و سپس این شکل دوبعدی ۳۶۰ درجه حول محور قائم گذرنده از مرکز پی دوران می‌یابد تا فرم سه بعدی پی حلقوی تشکیل گردد. سپس ورق فولادی کف مخزن که تا وسط جان پی امتداد دارد و روی پی قرار می‌گیرد تعریف می‌شود.

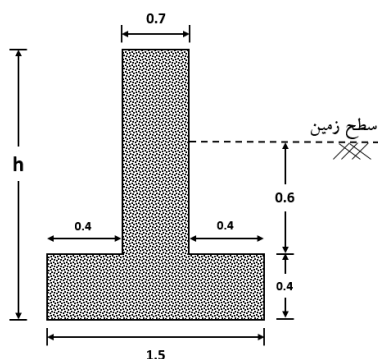


شکل ۲ برشی از شکل شماتیک مسئله در حالت پی حلقوی

تأثیر ارتفاع پی حلقوی

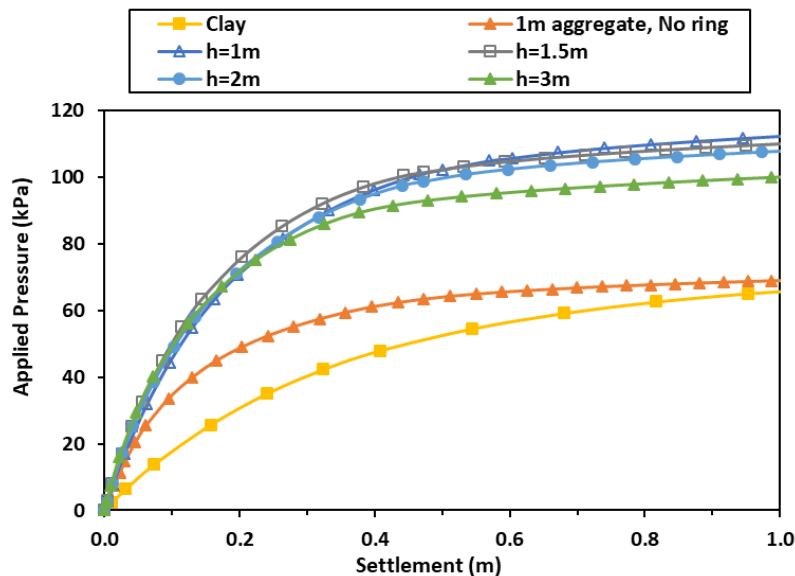
پارامتر اولی که در مورد پی‌های حلقوی مخازن مورد بررسی قرار گرفت تأثیر ارتفاع پی حلقوی بر روی رفتار تنش-نشست این پی می‌باشد. مقطع پی حلقوی مدلسازی شده در این بخش و ابعاد آن در شکل ۳ نشان داده شده است. عرض پی حلقوی در تمامی مدل‌های این بخش ۱/۵ متر در نظر گرفته شده است. ابعاد بال و جان مقطع پی حلقوی بر حسب متر در شکل ۳ دیده می‌شود. به جز h سایر ابعاد نوشته شده در این شکل در مدلسازی‌های مربوط به بررسی اثر ارتفاع پی، ثابت در نظر گرفته شده‌اند.

ارتفاع پی برابر با مقادیر مختلف 3, 2.5, 2, 1.5, 1 متر در نظر گرفته شد. در تمامی مدل‌ها برای بهتر دیده شدن اثر تغییر ارتفاع، یک متر پایینی پی داخل زمین قرار گرفته است. یعنی اگر ارتفاع پی حلقوی یک متر باشد کل پی داخل زمین و اگر ارتفاع پی بیشتر از یک متر باشد مازاد یک متر خارج از زمین قرار گرفته است (شکل ۳). بدین ترتیب در تمامی مدل‌های مورد بررسی این بخش، کف پی‌ها در یک تراز قرار گرفته و مقایسه بین نتایج دقیق‌تر خواهد بود.



شکل ۳ ابعاد مقطع پی حلقوی در بررسی اثر ارتفاع پی (بر حسب متر)

نمودارهای تنش-نشست مربوط به بررسی پارامتر ارتفاع پی حلقوی در شکل ۴ نشان داده شده است. در تمام مدل‌ها کل فضای داخلی پی‌های حلقوی با مصالح درشت دانه متراکم (Coarse Aggregate) پر شده است. در شکل ۴ حالت Clay حالتی است که مخزن بدون هیچ فونداسیونی روی زمین نرم قرار گرفته است. همچنین منظور از حالت 1m aggregate, No ring حالتی است که پی حلقوی وجود ندارد اما مصالح درشت دانه‌ی داخل پی حلقوی به عمق ۱ متر و با همان ابعادی که داخل پی حلقوی قرار می‌گیرد مدل شده است. می‌توان مشاهده نمود که وجود مصالح متراکم درشت دانه در زیر مخزن باعث بهبود رفتار تنش-نشست شده است اما تاثیر آن زیاد نبوده است. با اضافه کردن پی حلقوی به ارتفاع ۱ متر در زیر مخزن، رفتار تنش-نشست مخزن بهبود چشمگیری پیدا کرده است و سیستم توانسته است تنش‌های بسیار بالاتری را تحمل کند. اما جالب اینجاست که با افزایش ارتفاع پی حلقوی از ۱ متر تا ۳ متر، نتایج هیچگونه بهبودی نشان نداده‌اند و حتی در مواردی بدتر هم شده‌اند. دلیل این امر می‌تواند این باشد که با افزایش ارتفاع پی حلقوی مکانیزم انتقال تنش قائم به خاک تحتانی هیچ تغییری نمی‌کند و افزایش ارتفاع پی تنها ممکن است به افزایش کرنش جانبی پی حلقوی منجر شود که بهتر است در پشت بخش بیرون زده پی حلقوی خاکریزی برای کاهش کرنش جانبی پی ایجاد نمود. در واقع می‌توان گفت راهکار افزایش ارتفاع پی حلقوی به جهت افزایش ظرفیت باربری راهکار مناسبی نیست. برای اطمینان از نتایج مدل‌های این بخش آنالیز مجدد شدند اما جواب‌ها تغییری نکرد و نتایج آنالیز مجدد نیز مانند آنالیز اولیه بود.



شکل ۴ نمودارهای تنش-نشست بررسی تاثیر ارتفاع پی حلقوی

برای بدست آوردن ظرفیت باربری هر کدام از نمودارهای تنش-نشست از روش مماسی استفاده می‌شود. در این روش ابتدا در قسمت انتهایی نمودار تنش-نشست که نمودار کم کم به سمت افقی شدن پیش می‌رود یک مماس را بر نمودار رسم می‌شود. سپس مماس دیگری بر قسمت ابتدایی نمودار که معرف رفتار الاستیک پی‌ها می‌باشد ترسیم می‌گردد و تنش متناظر با نقطه‌ی برخورد این دو مماس که نشانگر مقدار ظرفیت باربری در یک نشست خاص می‌باشد به عنوان مقدار ظرفیت باربری پی در نظر گرفته می‌شود. این روش تعیین ظرفیت باربری توسط مهندسیین مورد استفاده قرار گرفته است [۲۳].

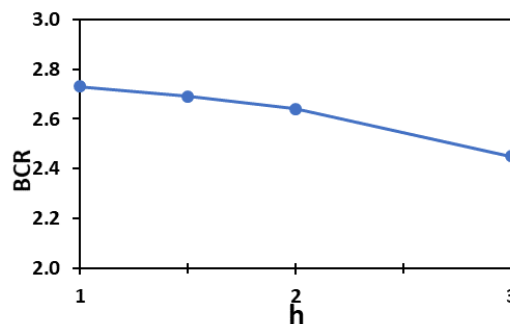
در جدول ۲ ظرفیت باربری و نسبت ظرفیت باربری (BCR) مربوط به سیستم پی حلقوی در حالات ارتفاع مختلف ارائه شده است. نسبت ظرفیت باربری (BCR) پارامتری بدون بعد است که بصورت نسبت ظرفیت باربری پی در حالت خاک تقویت شده به ظرفیت باربری پی در حالت خاک تقویت نشده (خاک رس تنها بدون پی و شمع) تعریف می‌شود. با توجه به مقادیر ظرفیت باربری در این جدول و تنش حاصل از وزن میعانات نفتی و وزن بدنه‌ی مخزن که پیشتر محاسبه شد، می‌توان نتیجه گرفت در چنین خاک نرمی پی حلقوی به تنهایی نمی‌تواند بار اعمال شده از طرف مخزن مورد بررسی در این طرح را تحمل کند و نیاز به المان‌های تقویتی نظیر شمع دارد. هر چند پی حلقوی با ارتفاع ۱ متر و عرض ۱/۵ متر موجب افزایش ۱۷۳ درصدی ظرفیت باربری نسبت به حالت بدون پی شده است.

جدول ۲ نتایج ظرفیت باربری بررسی تاثیر ارتفاع پی حلقوی

Description			Bearing (kPa) capacity	BCR
Ring Footing Height (m)	Ring Footing Width (m)	Coarse Aggregate Height (m)		
-	-	-	37	-
-	-	1	62.6	1.69
1	1.5	1	100.8	2.73
1.5	1.5	1.5	99.4	2.69
2	1.5	2	97.7	2.64
3	1.5	3	90.5	2.45

به جهت درک بهتر نتایج، نمودار نسبت ظرفیت باربری (BCR) بر حسب ارتفاع پی حلقوی در شکل ۵ ترسیم شده است. در این شکل نیز می‌توان مشاهده نمود با افزایش ارتفاع پی حلقوی ظرفیت باربری این پی و به تبع آن نسبت ظرفیت باربری کاهش

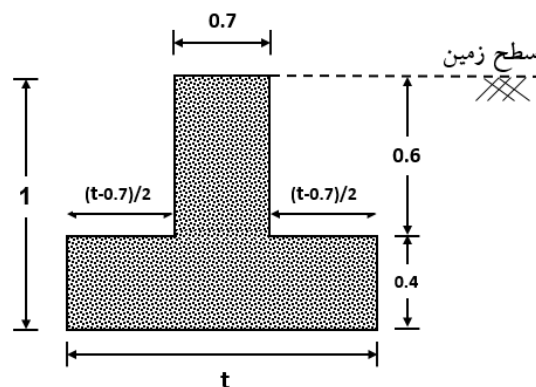
داشته است. هرچند میزان این کاهش زیاد نیست و می‌توان گفت افزایش ارتفاع پی حلقوی تاثیر چندانی بر ظرفیت باربری این پی تحت بارهای استاتیکی قائم ندارد.



شکل ۵ تغییرات BCR با h

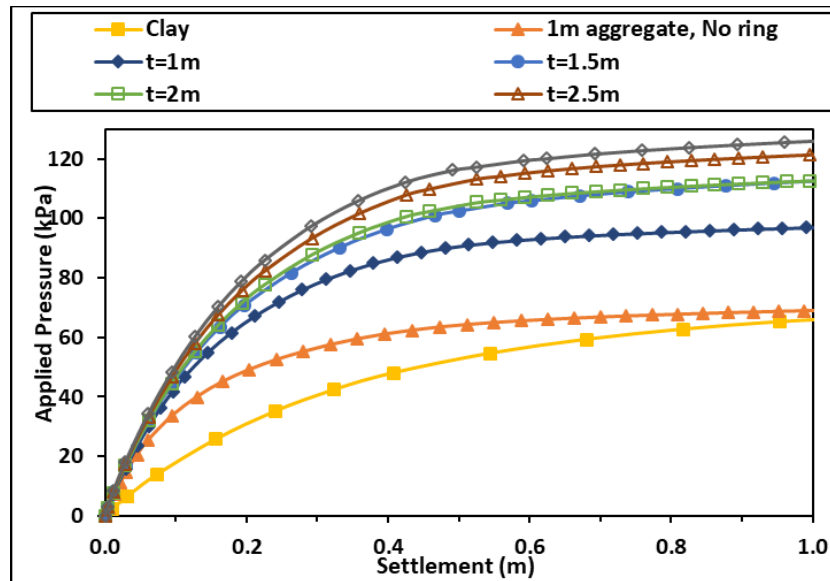
تاثیر عرض پی حلقوی

پارامتر دومی که در بررسی پی‌های حلقوی مخازن نفتی مورد بررسی قرار گرفت، عرض پی می‌باشد. با توجه به نتایج بررسی اثر ارتفاع پی حلقوی، ارتفاع این پی در این بخش ثابت و برابر با ۱ متر در نظر گرفته شد. عرض جان پی همانند بخش قبلی برابر با ۰/۷ متر در نظر گرفته شد. ابعاد مقطع پی حلقوی مدل شده در این بخش بصورت شماتیک در شکل ۶ کشیده شده است. همانند مرحله قبل که یک متر پایینی پی درون خاک قرار گرفته بود، در اینجا نیز کل پی یک متری درون خاک قرار گرفت و بیرون زدگی نداشتیم. ضخامت بال پی مشابه بخش قبلی برابر با ۰/۴ متر و ثابت در نظر گرفته شد. عرض‌های مختلف پی حلقوی که در این بخش مورد آنالیز و بررسی قرار گرفتند برابر با $t=1, 1.5, 2, 2.5, 3$ متر هستند.



شکل ۶ ابعاد مقطع پی حلقوی در بررسی عرض پی (بر حسب متر)

نتایج تنش-نشست حاصل از آنالیز حالت‌های مختلف عرض پی حلقوی در شکل ۷ ترسیم شده است. به صورت کلی می‌توان مشاهده نمود با افزایش عرض پی رفتار باربری پی حلقوی بهبود یافته است. عرض $t=1.5m$ رفتار بهتری نسبت به $t=1m$ نشان داده و رفتاری مشابه با $t=2m$ داشته است. بنابراین اگر بخواهیم برای مخزن با شرایط مسئله یک عرض پی بهینه و اقتصادی پیدا کنیم، $t=1.5m$ می‌تواند بهترین گزینه باشد. افزایش عرض به میزان‌های $t=2.5m$ و $t=3m$ موجب افزایش باربری پی شده است، هرچند میزان این افزایش ناچیز است. مقادیر کمی افزایش ظرفیت باربری را می‌توان در جدول ۳ مشاهده نمود.



شکل ۷ نمودارهای تنش-نشست بررسی تاثیر عرض پی حلقوی

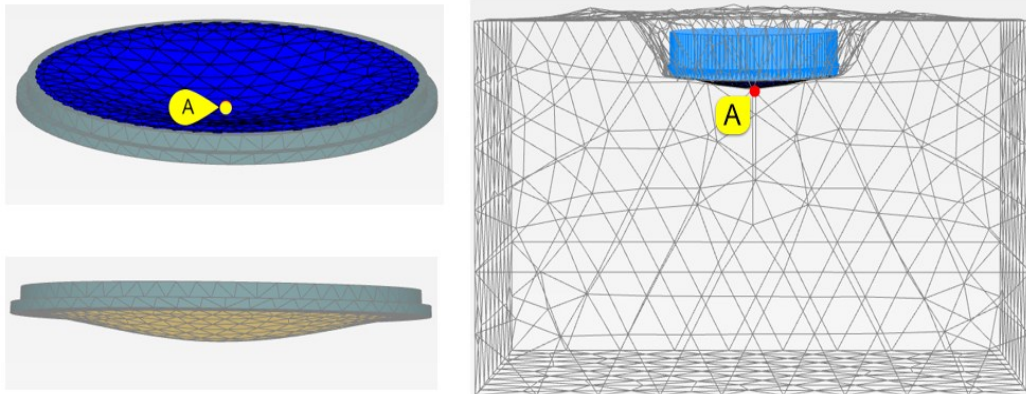
جدول ۳ نتایج ظرفیت باربری بررسی تاثیر عرض پی حلقوی

Description			Bearing capacity (kPa)	BCR
Ring Footing Height (m)	Ring Footing Width (m)	Coarse Aggregate Height (m)		
-	-	-	37	-
-	-	1	62.6	1.69
1	1	1	89.4	2.41
1	1.5	1	100.8	2.73
1	2	1	100.7	2.72
1	2.5	1	111.3	3.01
1	3	1	114.4	3.09

با توجه به نتایج جدول ۳ مشاهده می‌شود ظرفیت باربری حالت $t=3m$ به نسبت حالت $t=1.5m$ متر تنها ۱۴ درصد افزایش داشته است. همچنین می‌توان مشاهده نمود حالت $t=1.5m$ نسبت به حالتی که فقط یک متر مصالح درشت دانه در زیر مخزن قرار داشته است افزایشی ۶۱ درصدی در ظرفیت باربری ایجاد کرده است که به خوبی نشان دهنده تاثیر مثبت پی حلقوی است. ذکر این نکته ضروری است که تمامی نمودارهای تنش-نشست در نقطه مرکزی ورق کف مخزن یعنی جایی که بیشترین نشست را داشته است ترسیم شده است. برای درک بهتر این نکته، یک نمونه مش تغییر شکل یافته مربوط به حالت $t=1.5m$ و از نماهای مختلف در شکل ۸ نشان داده شده است. شکل سمت راست مش تغییر شکل یافته سه بعدی به همراه بار و شکل‌های سمت چپ مربوط به تغییر شکل مجموعه‌ی ورق کف مخزن، مصالح درشت دانه و پی حلقوی از نماهای بالا و پایین می‌باشند. در این شکل‌ها تقعر ورق کف مخزن و خاک درشت دانه کاملاً مشخص است؛ اما می‌توان مشاهده نمود پی حلقوی بتنی به درستی و به صورت صلب عمل کرده و تقریباً تغییر شکلی نداشته است.

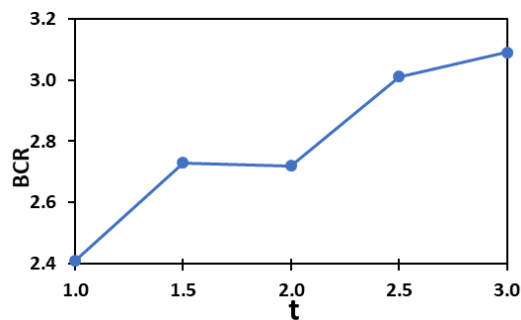
نمودارهای تنش-نشست بالا مربوط به نقطه A از شکل ۸ می‌باشند که بیشترین نشست را داشته است. دلیل اینکه تاثیر پی حلقوی بر روی ظرفیت باربری کمتر از حالات دیگر بررسی شده مانند ستون سنگی و شمع بوده است این است که پی حلقوی نشست محیط پیرامونی مخزن را محدود می‌کند اما نمی‌تواند جلوی نشست زیاد مرکز مخزن را بگیرد. در واقع در خاک‌های خیلی نرم، پی حلقوی تنها محیط مخزن را بهسازی می‌کند و برای بهسازی سایر بخش‌های میانی مخزن نیز باید تمهیداتی از جمله تقویت ورق کف مخزن یا افزودن المان‌های تسلیح کننده به خاک اندیشیده شود. بنابر این با توجه به نتایج حاصله می‌توان نتیجه

گرفت در خاک‌های خیلی نرم، مانند آنچه در این پژوهش بررسی شده است، پی حلقوی به تنهایی نمی‌تواند گزینه مناسبی برای بهسازی بستر مخازن نفتی باشد.



شکل ۸ مش تغییر شکل یافته پی حلقوی حالت $t=1.5m$

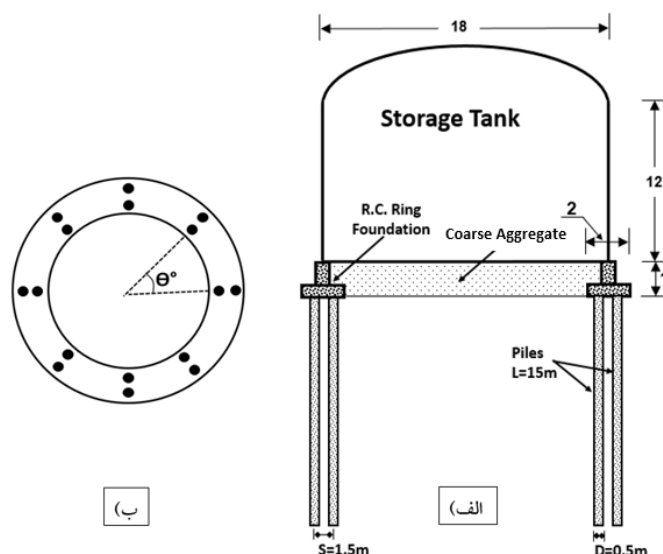
نمودار تغییرات نسبت ظرفیت باربری پی (BCR) با عرض پی حلقوی در شکل ۹ ترسیم شده است. به جز حالت $t=2m$ که نسبت به حالت $t=1.5m$ تغییری نداشته است، با افزایش عرض پی حلقوی، نسبت ظرفیت باربری افزایش داشته است. هر چند سه برابر کردن عرض پی (از یک متر به سه متر) تنها منجر به افزایش ۲۸ درصدی ظرفیت باربری شده است.



شکل ۹ تغییرات BCR با عرض پی حلقوی

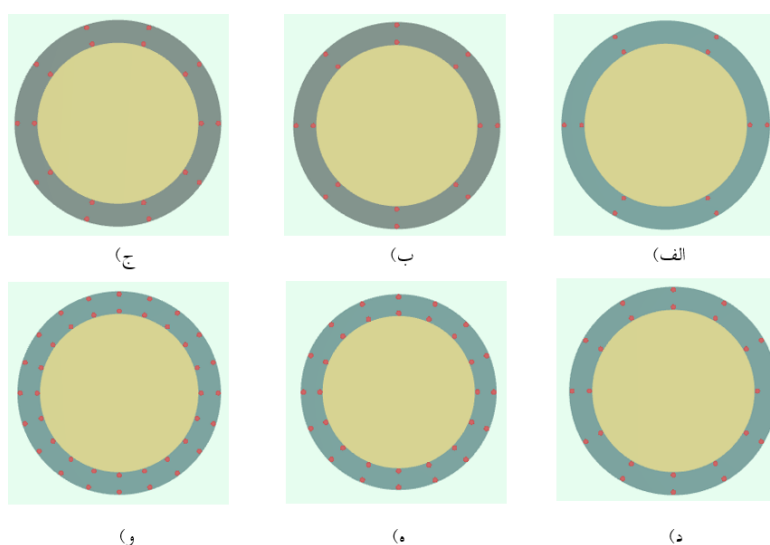
ترکیب پی حلقوی و شمع

به جهت تقویت پی‌های حلقوی مخازن نفتی می‌توان آن‌ها را با المان‌های عمودی مانند شمع‌ها ترکیب نمود. یک نمونه از موارد اجرا شده از این نوع پی‌های ترکیبی مربوط به مخزنی در صنایع نفتی عراق در شهر بصره می‌باشد که مطالعه موردی آن توسط الخوضایی و عباس [۱۶] انجام گرفته است. مقطع ترکیب پی حلقوی و شمع‌های آنالیز شده در پژوهش حاضر در شکل ۱۰-الف نمایش داده شده است. در این بخش پارامتر زاویه‌ی بین ردیف‌های متوالی شمع‌ها (θ) که تعیین کننده‌ی تعداد ردیف‌های شمع قرار گرفته در زیر پی حلقوی است مورد مطالعه قرار خواهد گرفت. بعنوان مثال اگر در هر ۴۵ درجه از دایره‌ی پی حلقوی یک ردیف شمع قرار دهیم ($\theta=45^\circ$)، در زیر این پی ۸ ردیف شمع با آرایش شعاعی قرار خواهند گرفت که در شکل ۱۰-ب نحوه چیدمان آن‌ها نشان داده شده است.



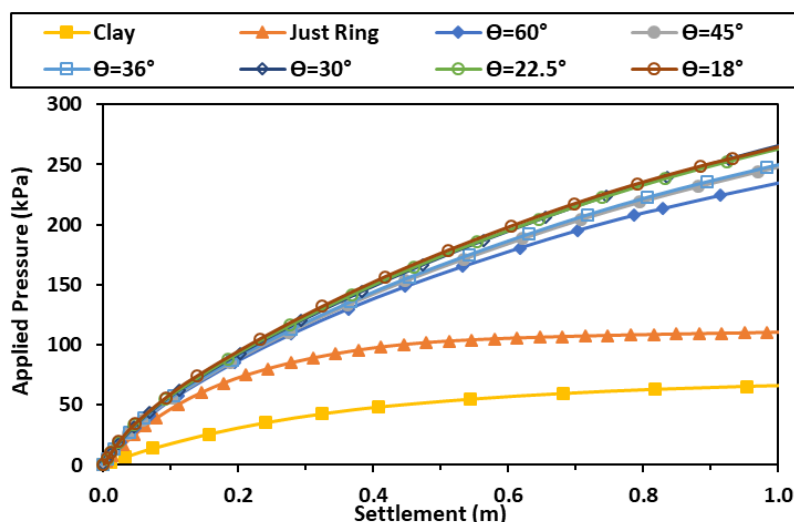
شکل ۱۰ شکل شماتیک مسئله در حالت تسلیح بستر با ترکیب پی حلقوی و شمع
الف) از نمای مقطع ب) پی حلقوی و شمع ها از نمای پلان (ابعاد بر حسب متر)

در این بخش از آنالیزها همانطور که در شکل ۱۰-الف نیز مشاهده گردید، برخی پارامترها ثابت در نظر گرفته شده‌اند چون هدف بررسی تاثیر تعداد ردیف‌های شمع است. از جمله پارامترهای عرض و ارتفاع پی حلقوی که به ترتیب برابر با ۲ و ۱ متر است و همچنین طول، قطر و فاصله بین مرکزهای دو شمع مجاور که به ترتیب برابر با ۱۵، ۰/۵ و ۱/۵ متر در نظر گرفته شده است. پارامتر متغیر این بخش یعنی زاویه بین ردیف‌های متوالی شمع‌ها، برابر با $\Theta = 60, 45, 36, 30, 22.5, 18$ درجه در نظر گرفته شد. مانند حالت پی حلقوی، فضای داخلی پی حلقوی با مصالح درشت دانه پر شده است و تمامی مشخصات مصالح در نظر گرفته شده در آنالیزهای عددی این بخش با مشخصات مصالح مراحل قبلی پژوهش برابر می‌باشد. مدل‌های مختلف ترکیب پی حلقوی و شمع آنالیز شده در نرم افزار Plaxis از نمای زیر در شکل ۱۱ نشان داده شده است. دلیل انتخاب این نما، دیده شدن نحوه چیدمان و تعداد شمع‌ها در حالات مختلف آنالیز شده می‌باشد که محل شمع‌ها با نقاط قرمز رنگ در این شکل دیده می‌شوند. بدیهی است با کم شدن زاویه بین ردیف‌های متوالی شمع (Θ)، تعداد شمع‌های قرار گرفته در زیر پی افزایش می‌یابد.



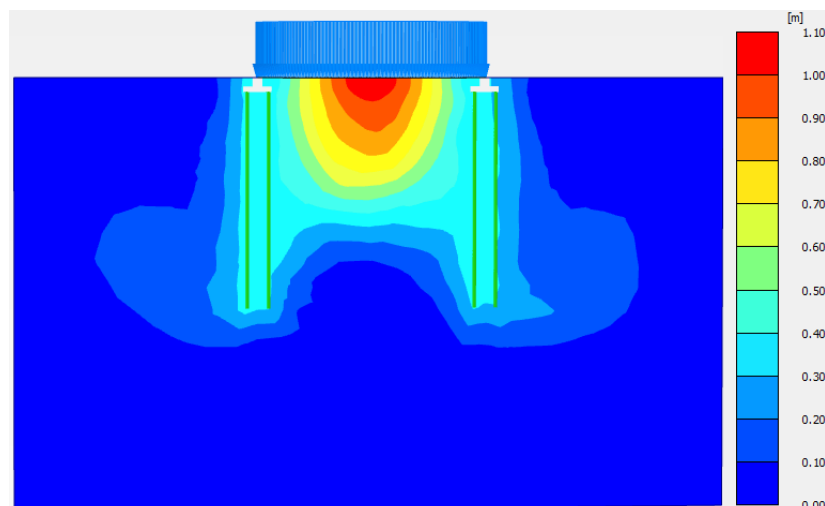
شکل ۱۱ حالات مختلف آنالیز شده‌ی ترکیب پی حلقوی و شمع
الف) $\Theta = 60^\circ$ ب) $\Theta = 45^\circ$ ج) $\Theta = 36^\circ$ د) $\Theta = 30^\circ$ ه) $\Theta = 22.5^\circ$ و) $\Theta = 18^\circ$

در شکل ۱۲ نمودارهای نتایج تنش-نشست مربوط به تاثیر زوایای مختلف بین دو ردیف شمع‌های دوتایی در سیستم ترکیب پی حلقوی و شمع نشان داده شده است. در تمامی آنالیزها همانطور که در بالا توضیح داده شد قطر، طول و فاصله مرکز تا مرکز شمع‌ها و همچنین ارتفاع و عرض پی حلقوی ثابت بوده است. همچنین تمامی نمودارها در نقطه‌ی مرکزی ورق دایره‌ای کف مخزن ترسیم شده است. برای درک بهتر تاثیر سیستم ترکیبی پی حلقوی و شمع، نمودار حالات خاک رس تنها و حالت پی حلقوی بدون شمع نیز در این شکل نشان داده شده است. می‌توان مشاهده نمود با افزودن ۶ ردیف دوتایی شمع در زیر پی حلقوی ($\theta=60^\circ$)، نمودار بار-نشست این پی نسبت به حالت پی بدون شمع بهبود چشمگیری پیدا نموده است. همچنین می‌توان دید با افزایش تعداد ردیف‌های شمع از ۶ ردیف ($\theta=60^\circ$) به ۸ ردیف ($\theta=45^\circ$) و مقادیر بیشتر، نمودارها تغییرات چندانی از خود نشان نداده‌اند. به طوری که نتایج حالت‌های دوازده ردیف شمع ($\theta=30^\circ$)، شانزده ردیف شمع ($\theta=22.5^\circ$) و بیست ردیف شمع ($\theta=18^\circ$) تقریباً یکسان بدست آمده است. دلیل این امر این است که تقویت زیر پی حلقوی با ردیف‌های شمع بیشترین تاثیر را روی کم کردن نشست خود پی حلقوی می‌گذارد، اما نمودارهای تنش-نشست ترسیم شده در شکل ۱۲ همگی مربوط به نقطه بحرانی مرکزی پی یعنی جایی که در زیر آن شمع‌ی وجود ندارد و نشست ماکزیمم است می‌باشند. در نتیجه افزایش تعداد شمع‌ها بیشتر از یک تعداد بر روی این نمودارها تاثیر چندانی نشان نداده است. چون نشست اتفاق افتاده در نقطه مرکزی پی در اثر تغییر شکل ورق کف مخزن بوده است و وجود شمع‌های پیرامونی تاثیر چندانی بر آن نداشته است. بنابراین در خاک‌های بسیار نرم باید حتماً فضای مرکزی پی حلقوی نیز توسط ورق ضخیم‌تر تقویت شود. راهکار دیگر این است که علاوه بر فضای پیرامونی، در فضای داخلی پی حلقوی نیز المان‌های تقویتی مانند شمع در نظر گرفت.



شکل ۱۲ نمودارهای تنش-نشست بررسی تاثیر زاویه بین ردیف‌های متوالی شمع در ترکیب پی حلقوی و شمع

برای بهتر متوجه شدن تفاوت در میزان نشست در زیر پی حلقوی و مرکز پی، یک نمونه از دیاگرام نشست کلی پی در مقطع گذرنده از مرکز پی مربوط به حالت $\theta=45^\circ$ در شکل ۱۳ به نمایش در آمده است. در این شکل مقطع دو طرف پی حلقوی و شمع‌های قرار گرفته در زیر این دو مقطع دیده می‌شود. می‌توان مشاهده نمود که شمع‌ها بخوبی عمل کرده و توانسته‌اند تنش‌های لبه‌های مخزن را به لایه‌های پایینی خاک منتقل کنند، اما در مرکز پی کاملاً ضعف نشست وجود داشته و حداکثر نشست‌ها اتفاق افتاده است. تحت بار اعمال شده در این مدل، زمانی که نشست در مرکز پی حدود ۱ متر بوده است، نشست در زیر لبه‌ی پی حلقوی حدود ۰/۴ متر می‌باشد. بنابراین می‌توان نتیجه گرفت در خاک‌های بسیار نرم بایستی تمامی مناطق زیر مخزن نفتی با المان‌های تقویت کننده‌ی خاک بهسازی شود و صرفاً بهسازی محیط پیرامونی مخزن به خوبی نمی‌تواند جلوی نشست‌های زیاد را بگیرد.

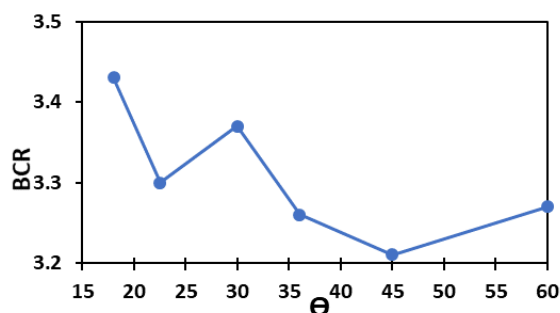


شکل ۱۳ دیاگرام نشست کلی در مقطع گذرنده از مرکز پی ($\theta=45^\circ$)

مقادیر ظرفیت باربری نمودارهای شکل ۱۲ با استفاده از روش مماسی محاسبه و در جدول ۴ ارائه شده است. همچنین نمودار تغییرات نسبت ظرفیت باربری (BCR) با زاویه بین ردیف‌های مجاور شمع (θ) در شکل ۱۴ به نمایش درآمده است. پیشتر توضیح داده شد که به چه دلیل افزایش تعداد شمع‌ها تاثیر چندانی در افزایش ظرفیت باربری پی نگذاشته است. در واقع حداقل تعداد شمع‌ها (یعنی ۶ ردیف) باعث افزایش ۲۰ درصدی ظرفیت باربری نسبت به حالت پی حلقوی بدون شمع شده است و پس از آن با افزایش تعداد ردیف‌های شمع بهبود چندانی در ظرفیت باربری مشاهده نشده است.

جدول ۴ نتایج ظرفیت باربری بررسی تاثیر زاویه بین ردیف‌های مجاور شمع

Description				Bearing (kPa) capacity	BCR
Number of Pile Rows	θ°	Ring Footing Height (m)	Ring Footing Width (m)		
0	-	-	-	37	-
0	-	1	2	100.7	2.72
6	60	1	2	121	3.27
8	45	1	2	118.9	3.21
10	36	1	2	123	3.26
12	30	1	2	124.8	3.37
16	22.5	1	2	122	3.3
20	18	1	2	127	3.43



شکل ۱۴ تغییرات نسبت ظرفیت باربری با زاویه بین ردیف شمع‌های مجاور

نتیجه‌گیری

در بسیاری از مناطقی که نیاز به ساخت مخازن در آن‌ها احساس می‌شود، خاک سطحی توانایی تحمل بار اعمال شده از طرف مخازن را ندارد. ساختن سازه‌های مهندسی بر روی اینگونه خاک‌های سست و نرم همواره مشکلاتی ازجمله نشست بیش از حد، تغییر شکل در سازه و ناپایداری ایجاد می‌کند. در این پژوهش دو حالت پی حلقوی و ترکیب پی حلقوی و شمع به‌عنوان فونداسیون مخازن نفتی قرار گرفته بر روی خاک رسی نرم مورد آنالیز و بحث قرار گرفته است. مدلسازی‌ها با استفاده از آنالیز اجزای محدود، توسط نرم‌افزار Plaxis 3D نسخه ۲۰۱۹ انجام گردید و اثر پارامترهای مختلف بر روی ظرفیت باربری و نشست فونداسیون مخازن نفتی مورد بررسی و بحث قرار گرفت. نتایج کلی زیر از این بررسی‌ها بدست آمد. لازم به ذکر است که این نتایج با توجه به نوع مصالح و هندسه تعریف شده در مسئله‌ی مورد بررسی بدست آمده است:

۱- قرار دادن پی حلقوی در زیر مخزن باعث بهبود چشمگیر در رفتار تنش-نشست و افزایش ۱۷۳ درصدی ظرفیت باربری مخزن نسبت به حالت مخزن قرار گرفته بر روی خاک شده است.

۲- افزایش ارتفاع پی حلقوی راهکار مناسبی برای افزایش ظرفیت باربری این پی تحت بارهای قائم استاتیکی نمی‌باشد زیرا با افزایش ارتفاع پی حلقوی، مکانیزم انتقال تنش قائم به خاک تحتانی هیچ تغییری نمی‌کند.

۳- افزایش عرض پی حلقوی موجب بهبود رفتار باربری پی حلقوی و افزایش ظرفیت باربری این پی شده است؛ همچنین نتایج نشان داد در مساله مورد بررسی عرض پی حلقوی برابر با ۱/۵ متر بهینه می‌باشد.

۴- در خاک‌های خیلی نرم پی حلقوی تنها خاک زیر محیط پیرامونی مخزن را تقویت می‌کند و نمی‌تواند جلوی نشست مناطق مرکزی مخزن را بگیرد. به زبان دیگر در خاک‌های خیلی نرم، پی حلقوی به تنهایی نمی‌تواند گزینه مناسبی برای بهسازی بستر مخزن نفتی باشد.

۵- افزودن ۶ ردیف شمع در زیر پی حلقوی موجب افزایش ۲۰ درصدی ظرفیت باربری در مرکز این پی نسبت به مرکز پی حلقوی بدون شمع شده است و پس از آن با افزایش تعداد ردیف‌های شمع بهبود کمی در ظرفیت باربری مشاهده شده است. در واقع شمع‌ها بخوبی عمل کرده و توانسته‌اند در محیط پیرامونی تنش را به لایه‌های پایینی خاک منتقل کنند اما در مرکز پی بدلیل عدم وجود شمع‌ها، کاملاً ضعف مقاومت در برابر نشست وجود داشته و حداکثر نشست‌ها در این مناطق اتفاق افتاده است.

۶- در خاک‌های بستر خیلی نرم باید الزاماً علاوه بر تسلیح محیط پیرامونی مخزن، برای بخش میانی مخزن نیز تمهیداتی از جمله تقویت ورق کف مخزن یا افزودن المان‌های تسلیح کننده‌ی خاک اندیشیده شود. زیرا صرفاً تسلیح محیط پیرامونی با روش‌هایی مانند ترکیب پی و شمع نمی‌تواند به خوبی جلوی نشست مناطق مرکزی مخزن را بگیرد.

منابع و مراجع

- [1] Don Roberts, V., Foundations for Cylindrical Storage Tanks. 1961.
- [2] Ramasamy, G., Kalaiselvan, G., A CASE STUDY ON SETTLEMENT OF OIL STORAGE TANK FOUNDATIONS, in Proceedings: Fourth International Conference on Case Histories in Geotechnical Engineering. 1998: St. Louis, Missouri.
- [3] Moradi, A., Mahmoudzadeh, A., Rahim Safavi, Y., Geotechnical Aspects of Storage Tank Foundation Types. IOSR Journal of Mechanical and Civil Engineering (IOSR-JMCE), 2017. 14(1): p. 43-49.
- [4] Hamidi, B. and S. Varaksin. Ground Improvement of Tank Foundations in the Middle East. in International Congress and Exhibition" Sustainable Civil Infrastructures: Innovative Infrastructure Geotechnology". 2017. Springer.
- [5] Dimov, L., I. Dimov, and E. Bogushevskaya, Large Oil Tank Settlement and Tilt During Hydraulic Testing. Soil Mechanics & Foundation Engineering, 2017. 54 (3).
- [6] Gunerathne, S., et al., Analysis of edge-to-center settlement ratio for circular storage tank foundation on elastic soil. Computers and Geotechnics, 2018. 102: p. 136-147.
- [7] Yunxiu, M., et al., Analysis of Uneven Settlement of Large Oil Storage Tank. IOP Conference Series: Materials Science and Engineering, 2021. 1043(4): p. 042052.
- [8] Hataf, N. and M.R. Razavi. MODEL TESTS AND FINITE ELEMENT ANALYSIS OF BEARING CAPACITY OF RING FOOTINGS ON LOOSE SAND. 2003.
- [9] Boushehrian, J.H. and N. Hataf, Experimental and numerical investigation of the bearing capacity of model circular and ring footings on reinforced sand. Geotextiles and Geomembranes, 2003. 21(4): p. 241-256.
- [10] Naderi, E. and N. Hataf, Model testing and numerical investigation of interference effect of closely spaced ring and circular footings on reinforced sand. Geotextiles and Geomembranes, 2014. 42(3): p. 191-200.
- [11] Chen, Z.P., et al., Finite-element analysis of liquid-storage tank foundations using settlement difference as boundary condition. Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part E: Journal of Process Mechanical Engineering, 2009. 223(4): p. 225-231.
- [12] Nagesh, D., Sasidhar, C., Design and Analysis of Tank Ring Wall Foundation by using STAAD Pro V8i. International Journal of Scientific Research in Science, Engineering and Technology IJSRSET, 2017. 3(8): p. 1264-1266.
- [13] Xiao, Y., et al., Numerical study on bearing capacity of ring foundations for storage tanks on a rock mass. Arabian Journal of Geosciences, 2020. 13(23): p. 1249.
- [14] Reinders, K.J., B. Schoenmaker, and W.A. Nohl, Limit-State Design of a Steel Storage Tank Foundation on a Crushed Rock Ring Based on Proven Soil Strength, in Geotechnical Safety and Risk. 2015.
- [15] Ignatowicz, R. and E. Hotala, Failure of cylindrical steel storage tank due to foundation settlements. Engineering Failure Analysis, 2020. 115: p. 104628.
- [16] M. AshourAl.Khuzaei, H. and B. Jabbar Abbas, A Case Study on Design of Ring Footing for Oil Storage Steel Tank. International Journal of Engineering & Technology, 2018. 7(3.36): p. 6.
- [17] Sandhu, P.K.S. and A. Kumar, Experimental and numerical analysis of the under-reamed piled ring foundation. Marine Georesources & Geotechnology, 2022: p. 1-13.
- [18] Polishchuk, A.I. and O.A. Shmidt, Method for calculating the settlement of ring pile foundations of tanks. Journal of Physics: Conference Series, 2021. 1928(1): p. 012043.
- [19] Shalaby, S.I., Bearing Capacity of Ring Footing on Stabilized Clay with Sand Trench- Stone Pile Combination. International Journal of Scientific Engineering and Applied Science (IJSEAS), 2017. 3(5).
- [20] Institute, A.P., API 650: Welded Steel Tanks for Oil Storage. 2013, American Petroleum Institute: Washington, D.C.
- [21] Das, A.K. and K. Deb, Response of cylindrical storage tank foundation resting on tensionless stone column-improved soil. International Journal of Geomechanics, 2017. 17(1): p. 04016035.
- [22] PLAXIS 3D Tutorial Manual, B. Communities, Editor. 2013.
- [23] Trautmann, C.H. and F.H. Kulhawy, Uplift load-displacement behavior of spread foundations. Journal of Geotechnical Engineering, 1988. 114(2): p. 168-184.