



مقایسه عملکرد پی حلقوی در دو حالت مسلح شده با شمع متصل و منفصل

عرفان نادری^{۱*}، محسن غلامی^۱

^{۱*} گروه مهندسی عمران، واحد نورآباد ممسنی، دانشگاه آزاد اسلامی، نورآباد ممسنی، ایران

(Email: erfana.naderi@iaau.ac.ir)

(تاریخ دریافت مقاله ۱۴۰۴/۰۵/۲۳، تاریخ پذیرش مقاله: ۱۴۰۴/۰۳/۰۲)

چکیده

پی حلقوی از جمله پی‌هایی است که در عمل زیاد مورد استفاده قرار می‌گیرد. این پی برای برج‌های مخابراتی، مخازن نفتی، منابع آب هوایی و... به کار برده می‌شود. البته به نظر می‌رسد پی حلقوی برای اکثر سازه‌های با تقارن محوری نسبت به محور مرکزی قائم بر پی، یک پی مناسب و اقتصادی است. ظرفیت باربری خاک در طراحی پی نقش بسیار مهمی را ایفا می‌کند. در نظر گرفتن ظرفیت باربری به میزان بیشتر از مقدار واقعی می‌تواند منجر به وارد آمدن خسارات سنگین به سازه‌ها یا حتی زوال کلی آنها شود. از طرف دیگر در نظر گرفتن آن به میزان کمتر از مقدار واقعی، باعث بزرگ شدن بیش از حد ابعاد پی شده و پی را غیر اقتصادی می‌سازد. بنابر این با توجه به اهمیت موضوع ظرفیت باربری پی‌های حلقوی، در این مقاله ظرفیت باربری و نشست پی‌های حلقوی در دو حالت مسلح شده با شمع متصل و مسلح شده با شمع منفصل مورد بررسی قرار گرفته است. در این راستا ابتدا صحت سنجی با توجه به نتایج آزمایشگاه در برنامه Plaxis 3D انجام شده است و در ادامه به بررسی تأثیر متصل و منفصل بودن شمع بر ظرفیت باربری پی حلقوی، بررسی تأثیر طول شمع، تأثیر ضخامت بالشتک ماسه‌ای در پی شمع منفصل، تأثیر نسبت فاصله و زاویه شعاعی بین شمع‌ها پرداخته شده است. با توجه به بررسی‌های انجام شده نتایج نشان می‌دهد منفصل کردن شمع و استفاده از خاک متراکم بین شمع و پی حلقوی به‌طور میانگین باعث افزایش ظرفیت باربری می‌شود. همچنین ضخامت خاک متراکم بین پی و شمع تأثیر بسزایی بر عملکرد و ظرفیت باربری پی دارد. در مجموع مقایسه کلی نتایج نشان داد عملکرد پی شمع‌های منفصل بهتر از پی شمع‌های متصل در شرایط مشابه بوده است

کلمات کلیدی

ظرفیت باربری، پی حلقوی، شمع متصل، شمع منفصل، آنالیز اجزای محدود.



Comparison of the Performance of the Ring foundation Reinforced with Connected and Disconnected piles

Erfan Nader^{1*}, Mohsen Gholami¹

^{1*} Department of Civil Engineering, Islamic Azad University, Nourabad Mamasani Branch, Nourabad, Iran

(Email: erfan.naderi@iau.ac.ir)

(Date of received: 23/05/2025, Date of accepted: 14/08/2025)

ABSTRACT

The ring foundation is one of the foundations that is widely used in practice. This foundation is used for telecommunication towers, oil tanks, water and air resources, etc. The ring foundation is a suitable and economical foundation for most structures with axial symmetry. The bearing capacity of soil plays a very important role in the design of the foundation. Over-estimating the bearing capacity can lead to heavy damage to the structures or even total destruction. On the other hand, under-estimating the bearing capacity causes excessive enlargement of the foundation dimensions and makes the foundation uneconomical. Therefore, according to the importance of the bearing capacity of ring foundations, in this article, the bearing capacity and settlement of ring foundations in two cases, reinforced with connected piles and reinforced with disconnected piles, have been investigated. In this regard, first, verification was carried out according to the laboratory results in the Plaxis 3D program. Then, the effect of connected and disconnected piles on the bearing capacity of the ring pile raft foundation, the effect of pile length, the effect of sand cushion thickness in disconnected pile raft foundation, and the effect of the distance ratio and radial angle between the piles have been investigated. According to the investigations, the results show that disconnecting the pile and using dense soil between the pile and the ring foundation increases the bearing capacity. Also, the thickness of the dense soil between the foundation and the pile has a significant effect on the performance and bearing capacity of the foundation. The overall comparison of the results showed that the performance of disconnected pile raft foundations was better than that of connected pile raft foundations under similar conditions.

Keywords:

Bearing capacity, Ring Foundation, Connected Pile, Disconnected Pile, Finite Element Analysis.



۱- مقدمه

فصل مشترک بین زمین و سازه، پی (شالوده یا فونداسیون) نامیده می‌شود. وظیفه شالوده انتقال بار از سازه به زمین قرار گرفته زیر آن می‌باشد. ظرفیت باربری خاک همواره یکی از مهم‌ترین فاکتورها در طراحی پی بوده است. در نظر گرفتن ظرفیت باربری بیشتر از مقدار واقعی می‌تواند موجب خسارت دیدن یا گسیختگی کلی سازه‌ها شود؛ و همچنین در نظر گرفتن ظرفیت باربری کمتر از مقدار واقعی منجر به بزرگ شدن ابعاد پی و غیراقتصادی شدن طرح می‌شود. ظرفیت باربری نهایی، حداکثر فشار قابل تحمل توسط خاک می‌باشد که می‌تواند از طرف سازه به خاک وارد شود. بسته به شکل پی، نحوه توزیع فشار و گسیختگی خاک مقدار ظرفیت باربری تغییر خواهد کرد، و در حقیقت مسئله ظرفیت باربری برای هر پی از لحاظ شکل، اصطکاک با خاک، عمق و سایر پارامترهای اطراف پی بایستی به‌طور جداگانه بررسی شود. بهسازی خاک به منظور افزایش ظرفیت باربری و کاهش نشست‌پذیری خاک صورت می‌پذیرد. با توجه به روش‌های متعدد اصلاح خاک، تنها چند روش را می‌توان به عنوان بهترین و اقتصادی‌ترین طرح انتخاب کرد. برخی محدودیت‌های اقتصادی-محیطی سبب می‌شود که گاهی برخی روش‌های تراکم و تثبیت مناسب نباشد. در این شرایط استفاده از المان‌های ستونی به عنوان جایگزینی مناسب برای اغلب مواقع قابل استفاده می‌باشد. از آنجایی که پی و شمع‌ها، جزء اجزای اصلی سازه در انتقال بار سازه محسوب می‌شوند و می‌تواند در پایداری نقش بسزایی داشته باشد، باید از عوامل تأثیرگذار بر روی آن‌ها مطلع شد و این المان را در برابر بارهای اعمال شده پایدار نماییم.

در این میان در صورتی که شمع زیر پی کاملاً متصل به پی باشد (شکل ۱-الف) و به‌صورت منفصل (شکل ۱-ب) باشد بر تأثیر شمع بر ظرفیت باربری پی تأثیرگذار است و با توجه به پیچیده بودن تحلیل پدیده اندرکنش در جهت شناسایی عملکرد نوع شمع به پی و نحوه اعمال آن‌ها یکی از مسائل مهمی است که باید مورد توجه قرار گیرد. از این‌رو بررسی عوامل مؤثر و تعیین مقدار اثرگذاری هر یک از عوامل در پاسخ توده خاک و سازه مدفون شمع در برابر این نوع از بارگذاری‌ها به‌منظور داشتن بینش دقیق از مسئله، ضروری بوده و منجر به ارائه پاسخ صحیح و طراحی سیستم مقاوم‌سازی بهینه برای شمع‌های مدفون می‌شود که مقدار آن وابسته به طول و قطر شمع، جنس خاک و پیکربندی سازه و نوع اتصال شمع به پی و همچنین عمق خاک متراکم بین شمع و پی است. بنابراین در نظریه اندرکنش بین این سه المان و نوع اتصال لازم به نظر می‌رسد. در سیستم مرکب پی حلقوی - شمع، قسمتی از بار وارده توسط پی و مقدار باقیمانده توسط شمع در تماس با خاک، حمل می‌گردد که تحلیل آن‌ها پیچیده بوده و تاکنون روش‌های مختلفی در تحلیل توان باربری و توزیع نیروها بین اجزای این سیستم، پیشنهاد شده است. به دلیل وجود نیروهای برشی و لنگرهای خمشی زیاد در محل اتصال پی و شمع، در بسیاری از پروژه‌ها از پی‌شمع‌های منفصل استفاده می‌گردد. استفاده از بالشتک شنی در این سیستم باعث بازپخش نیروها و تغییر سهم شمع و رادیه از کل بار می‌گردد. از آنجا که نحوه پخش تنش و سهم شمع‌ها و رادیه واقع بر خاک مسلح در این سیستم پیچیده می‌باشد لذا شناخت و بررسی سیستم مذکور از اهمیت ویژه‌ای برخوردار می‌باشد.

با توجه به این‌که امروزه پی‌های حلقوی کاربرد وسیعی در سازه‌های گوناگون با درجه اهمیت بالا؛ نظیر برج‌های مخابراتی، مخازن ذخیره مایعات، پایه پل‌ها و سازه‌های فراساحلی بردارد و عدم پایداری آن باعث خسارات جبران‌ناپذیر می‌شود، با توجه به اهمیت موضوع در این پژوهش به بررسی و مدل‌سازی سه‌بعدی پی‌های حلقوی ترکیب‌شده با شمع متصل و منفصل پرداخته می‌شود. در این راستا با استفاده از نرم‌افزار اجزاء محدود Plaxis 3D نسخه ۲۰۲۰ که در خصوص حل مسائل ژئوتکنیک توانایی بالایی دارد، پارامترهای تأثیرگذار بیان‌شده بر ظرفیت باربری پی‌های حلقوی مسلح‌شده با شمع متصل و منفصل مورد بررسی قرار خواهد گرفت.

در این پژوهش نوع اتصال شمع به پی، نسبت طول شمع، قطر شمع به عرض پی، زاویه اصطکاک و چسبندگی خاک درشت‌دانه بین پی و شمع، بر رفتار شمع‌های منفصل، عمق خاک متراکم بین شمع منفصل و پی حلقوی مورد بررسی قرار خواهد گرفت تا بهینه‌ترین حالت طراحی پی‌های حلقوی ترکیب‌شده با شمع متصل و منفصل احداث‌شده بر روی خاک لایه‌ای درشت‌دانه متراکم ارائه شود.



شکل ۱: الف: برش شکل شماتیک پی حلقوی با شمع متصل ب: برش شکل شماتیک پی حلقوی با شمع منفصل

نادری [۱] به بررسی عددی و آزمایشگاهی اثر تداخل پی‌های حلقوی و دایره‌ای قرار گرفته بر ماسه مسلح پرداخته است. در این پژوهش خاک زیر پی به صورت ماسه مسلح و غیرمسلح در نظر گرفته شد و اثر تداخل پی‌ها، اثر شکل پی‌ها (حلقوی یا دایره‌ای)، فاصله بین پی‌ها و همچنین تأثیر لایه مسلح کننده روی ظرفیت باربری پی‌ها مورد بررسی قرار گرفت. داس و خاتری [۲] تلاش کردند با استفاده از نرم افزارهای کامپیوتری مدلی برای تخمین رفتار پی نواری و پی حلقوی در خاک‌های ماسه‌ای چندلایه پیش بینی کنند. والی و همکاران [۳] یک دیتا ست بزرگ و یک شبکه عصبی گسترده برای پیش بینی رفتار پی‌های حلقوی تدوین کردند. در این پژوهش از یک مطالعه گسترده آنالیز اجزای محدود برای پیش بینی رفتار پی‌های حلقوی استفاده شد و طیف گسترده‌ای از پارامترهای تأثیرگذار بر رفتار پی‌های حلقوی مورد بررسی قرار گرفت. پراساد و چاکرابورتی [۴] ظرفیت باربری پی حلقوی قرار گرفته بر روی توده سنگ را تحت موقعیت‌های بار مختلف مورد مطالعه قرار دادند. فیاض و یوسف شاه [۵] به صورت آزمایشگاهی به تحقیق بر روی رفتار پی حلقوی و پی دایره‌ای قرار گرفته بر روی خاک مسلح شده با ژئوگرید پرداختند. کادهیم و البوستا [۶] به بررسی رفتار پی‌های حلقوی پرداختند. در این پژوهش به صورت عددی با تغییر شعاع داخلی و خارجی پی‌های حلقوی در حالت خاک غیرمسلح و مسلح شده با دولایه ژئوگرید پرداختند و نتایج نشان داد با افزایش شعاع داخلی به شعاع خارجی مقادیر تنش در زیر فونداسیون در حال افزایش است. کاراندیپ و همکاران [۷] به بررسی آزمایشگاهی وجود ماسه متراکم زیر پی حلقوی مقاوم سازی شده با شمع پرداخته است. در این پژوهش تغییر نسبت شعاع داخلی به خارجی پی حلقوی و تغییر طول به قطر شمع مورد مطالعه قرار گرفته است. نتایج نشان می دهد کاهش نسبت قطر داخلی به خارجی و افزایش نسبت طول به قطر شمع ظرفیت باربری را افزایش داده است. سرگذی و حسینی [۸] به بررسی خروج از مرکزیت بر ظرفیت باربری پی‌های پرداخته اند. در این پژوهش با تغییر شعاع داخلی و خارجی پی‌های حلقوی و مقدار خروج از مرکزیت ظرفیت باربری پی بررسی شده است. با بررسی‌های انجام شده نتایج نشان می دهد با کاهش مقدار خروج از مرکزیت مقدار ظرفیت باربری پی‌های حلقوی در حال افزایش است. حسینی و همکاران [۹] به بررسی پی حلقوی زیر مخازن نفتی پرداخته است که با توجه به بررسی‌های انجام شده نتایج نشان می دهد تحلیل پی حلقوی با نرم افزار اجزاء محدود با نتایج دستی تقریباً یکسان بوده است. غلامی و حسینی [۱۰] به بررسی ظرفیت باربری پی‌های حلقوی پرداخته اند. در این پژوهش به صورت عددی با تغییر شعاع داخلی و خارجی پی‌های حلقوی تأثیر شعاع پی بر رفتار پی سنجیده شده است. نتایج نشان می دهد با افزایش شعاع داخلی به شعاع خارجی مقدار ظرفیت باربری فونداسیون در حال افزایش است.

شمع‌ها به عنوان یکی از مسلح کننده زیر پی سازه در مهندسی ژئوتکنیک به شمار می رود، که در پروژه‌های عمرانی به طور گسترده استفاده می شود و می تواند در پایداری کلی سازه تأثیر بسزایی داشته باشد. سمیر [۱۱] به بررسی ظرفیت باربری پی حلقوی بهسازی شده با ماسه متراکم و ترکیب ستون سنگی و شمع پرداخته است، در این راستا به صورت آزمایشگاهی با تغییر ارتفاع ماسه متراکم به شعاع پی حلقوی پرداخته است. پاتیل و همکاران [۱۲] با انجام آزمایش‌هایی بر روی مدل کوچک مقیاس پی رادیه شمع تحت بار قائم به بررسی رفتار بار-نشست و فرآیند انتقال بار بین پی و شمع‌ها پرداخته و بیان کردند که در ابتدای بارگذاری، به دلیل عدم تماس کافی بین سطح پی و خاک زیرین، شمع‌ها سهم اصلی بار را تحمل می کنند اما در ادامه و با نشست بیشتر مجموعه، بار بیشتری به پی منتقل شده و سهم باربری آن افزایش می یابد. همچنین، با افزایش تعداد شمع زیر پی، ظرفیت باربری پی رادیه شمع بهبود یافته است. رسولی و همکاران [۱۳] به بررسی تأثیر متصل و منفصل بودن شمع



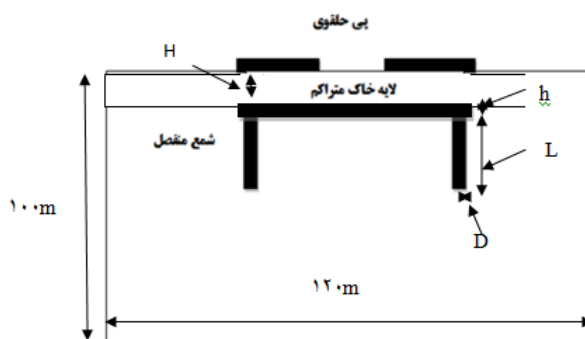
در زیر فونداسیون پرداخته شده اند. در این پژوهش به صورت آزمایشگاهی اتصال شمع به فونداسیون در دو حالت منفصل و متصل و با تغییر ضخامت بالشتک خاکی مورد بررسی قرار گرفته است. آلا و همکاران [۱۴] به صورت عددی به بررسی شمع های منفصل زیر فونداسیون پرداخته اند. در این پژوهش با استفاده از برنامه آباکوس تأثیر بالشتک بین شمع و پی که به صورت منفصل عمل می کند و تغییر ضخامت بالشتک بر رفتار پی مورد بررسی قرار گرفته است. نتایج نشان می دهد که افزایش ضخامت بالشتک باعث کاهش نیروی محوری می شود. اسلامی و همکارانش [۱۵] به بررسی بهینه یابی تأثیر متصل و منفصل بودن شمع زیر فونداسیون با مطالعه موردی پرداخته اند. در این پژوهش به صورت عددی در حالت اتصال شمع به فونداسیون در حالت منفصل با تغییر ضخامت بالشتک خاکی رفتار فونداسیون بررسی شده است و با توجه به بررسی های انجام شده با افزایش ضخامت بالشتک خاکی مقدار نشست افزایش داشته است.

جوال الحسینی و الجورانی [۱۶] به مطالعه عددی و آزمایشگاهی پی شمع های منفصل و متصل پرداختند. مطالعات آزمایشگاهی با استفاده از پی های با ابعاد کوچک و مطالعات عددی با نرم افزار آباکوس سه بعدی انجام شد. نتایج نشان داد نشست کلی سیستم با استفاده از پی شمع های منفصل کاهش چشمگیر داشت و سیستم پی شمع منفصل کاهش زیادی در میزان تنش جانبی در طول شمع ایجاد کرد. چانگ و همکاران [۱۷] عملکرد پی شمع های قرار گرفته بر روی خاک های ماسه ای و رسی را تحت بارهای قائم مورد مطالعه قرار دادند. در این مطالعه از مدل اجزای محدود سه بعدی استفاده شد. لو و همکاران [۱۸] نشست فونداسیون های پی شمع را مطالعه کرده و با استفاده از مطالعات عددی و روابط تجربی، جداول طراحی برای محاسبه نشست این فونداسیون ها ارائه دادند. گوناوان و همکاران [۱۹] به بررسی بهینه سازی عملکرد فونداسیون قرار گرفته بر روی ماسه با استفاده از تسلیخ فونداسیون با پی شمع پرداختند. در این مطالعه مدل اجزای محدود پی شمع با ابعاد بزرگ تحت بار قائم بر روی خاک ماسه خشک مدلسازی شد.

همانطور که در مقالات بالا دیده شد مسئله رفتار پی شمع ها در حالت منفصل و متصل جزو مسائل مهم ژئوتکنیکی می باشد که تا کنون محققان زیادی به آن پرداخته اند و علارغم این تحقیقات هنوز هم اندرکنش های میان پی، شمع و خاک و رفتار فونداسیون و شمع در حالت های مختلف پی شمع جای بحث و تحقیق دارد. بهینه یابی تأثیر پارامترهای مختلف بر رفتار پی شمع می تواند کمک زیادی به طراحی اقتصادی فونداسیون ها ارائه نماید. از طرفی در پژوهش های قبلی انجام شده به کارگیری پی شمع های منفصل کمتر مورد بررسی قرار گرفته است که در این پژوهش به رفتار آن و مقایسه این رفتار با رفتار پی شمع های متصل پرداخته شده است.

۲- روش تحقیق

در این پژوهش از نرم افزار اجزای محدود سه بعدی پلکسیس (Plaxis 3D) برای مدلسازی مسئله و تجزیه و تحلیل نتایج استفاده شده است. نرم افزار پلکسیس سه بعدی مجموعه ای از ابزارها و توابع قدرتمند برای شبیه سازی مدل های رفتاری مختلف و تجزیه و تحلیل سه بعدی آن ها ارائه می کند و دارای ویژگی های پیشرفته ای برای مقابله با چالش های مدل سازی در پیچیده ترین پروژه های ژئوتکنیکی است. در شکل ۲ پارامترهای تعریف شده در مسئله در نمای برش به صورت شماتیک نشان داده شده است. همچنین در جدول ۱ مقادیر پارامترهای مورد مطالعه آورده شده است و پارامترهای ثابت زیر آن خط کشیده شده است. منظور از پارامتر ثابت این است که در مطالعه هر کدام از پارامترهای متغیر، سایر پارامترها ثابت و برابر با مقادیری که در زیر آن خط کشیده شده است در نظر گرفته می شود. در این جدول D قطر شمع و برابر با ۰/۵ متر می باشد.

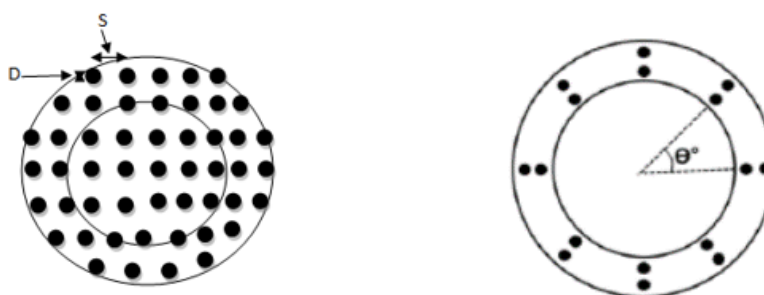


شکل ۲: پارامترهای مورد مطالعه.

جدول ۱: مقادیر پارامترهای مدل مورد مطالعه

پارامتر مورد مطالعه	مقدار
تغییر طول به قطر شع (L/D)	10-20-30-40-60
تغییر ضخامت پد خاک متراکم به قطر شع (H/D)	1-2-3-4-5-6-8
تغییر فاصله به قطر شع (S/D)	4-5-6-7-9
تغییر زاویه شعاعی بین ردیف‌های متوالی شع (θ°)	20-30-45-60

در تمامی مراحل مدلسازی قطر پی حلقوی برابر با ۲۰ متر و نسبت قطر داخلی به خارجی برابر با $0/6$ ، ضخامت پی بتنی برابر با ۱ متر و قطر شع برابر با $0/5$ متر در نظر گرفته شده است. در تمامی مدل‌ها ابعاد مخزن خاک مدلسازی شده در نرم افزار برابر با ۱۲۰ متر در ۱۲۰ متر و با عمق ۱۰۰ متر فرض شده است. جنس خاک در حالت شع متصل کاملاً رس و در حالت شع منفصل اطراف شع رس و بالشتک روی سر شع از جنس ماسه متراکم می باشد که در جدول ۲ پارامترهای این خاک‌ها نمایش داده شده است. در شکل ۳ پارامترهای فاصله بین شع‌های متوالی (S) و زاویه شعاعی بین ردیف‌های متوالی شع بر حسب درجه (θ) بصورت شماتیک نشان داده شده است.



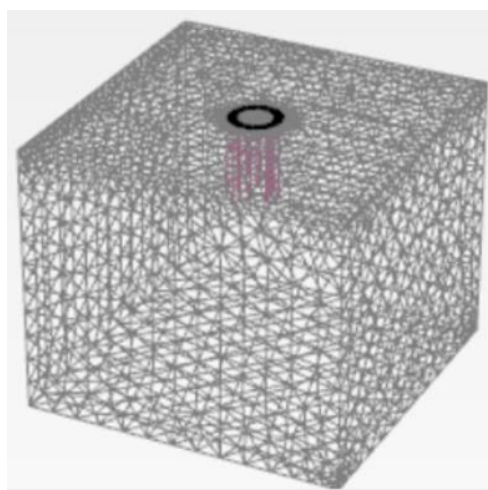
شکل ۳: الف) پارامتر تغییر زاویه شعاعی بین شع‌ها (θ°) ب) پارامتر تغییر فاصله به قطر شع (S/D)



جدول ۲: مشخصات خاک‌های مورد استفاده در مدل‌سازی‌ها

پی بتنی	ماسه	رس	پارامتر
25	18	14	$\gamma \left(\frac{kN}{m^3} \right)$
30000000	50000	10000	E (kPa)
0	42	0	ϕ°
0	0	10	C(kPa)
0	12	0	ψ°

برای مش‌بندی مدل از اجزای مثلثی ۱۰ گره‌ای که دارای دقت بالایی در تحلیل مسائل هستند استفاده شده است. برای کلاستر خاک از مش متوسط یا Medium استفاده شده است. برای مدل شمع‌ها و صفحات مشترک مدل شمع‌ها و خاک و همچنین خاک درون بلوک گروه بین مدل شمع‌ها که مقدار زیادی تنش را تحمل می‌کند با استفاده از گزینه Refine اجزاء را به اجزای بسیار ریز تا حد امکان برای بالا بردن دقت محاسبات تغییر می‌دهیم. شکل ۴ یک نمونه از مش بندی مدل در نرم افزار پلکسیس سه بعدی را نشان می‌دهد.

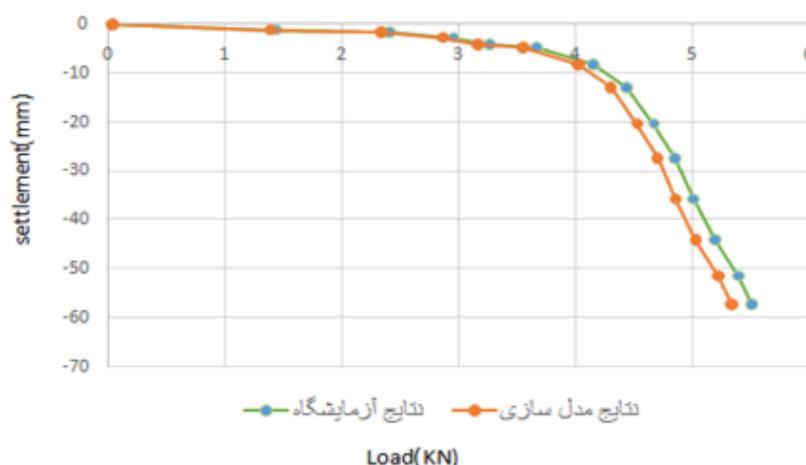


شکل ۳: یک نمونه از مش بندی مدل

۳- نتایج و بحث

۳-۱- صحت سنجی نتایج

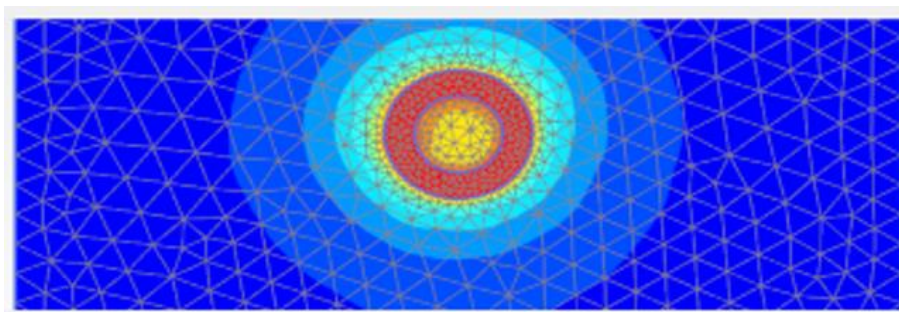
برای سنجش اعتبار نتایج کل به‌دست‌آمده از مدل‌سازی عددی با نرم‌افزار Plaxis، ابتدا مدل آزمایشگاهی استفاده شده توسط کاراندیپ و همکاران [۷] در این نرم‌افزار شبیه سازی شد و نتایج بار-نشست حاصل از تحلیل عددی با نتایج آزمایشگاهی به‌دست آمده توسط کاراندیپ و همکاران مقایسه گردید. در این تحقیق تعدادی آزمایش بر روی مدل‌های آزمایشگاهی پی شمع حلقوی قرار گرفته بر روی خاک رس نرم انجام شد. مقایسه نمودار تنش-نشست حاصل از مدل‌سازی با نرم افزار پلکسیس و نمودار مشابه گزارش شده توسط کاراندیپ و همکاران در شکل ۴ نشان داده شده است که مشاهده می‌شود نتایج تا حد زیادی همخوانی داشته و می‌توان به دقت نتایج نرم افزار پلکسیس برای مدل‌سازی این مسئله اعتماد نمود.



شکل ۴: مقایسه نمودار آزمایشگاهی گزارش شده توسط کاراندیپ و همکاران [۷] و نمودار نرم افزار پلکسیس

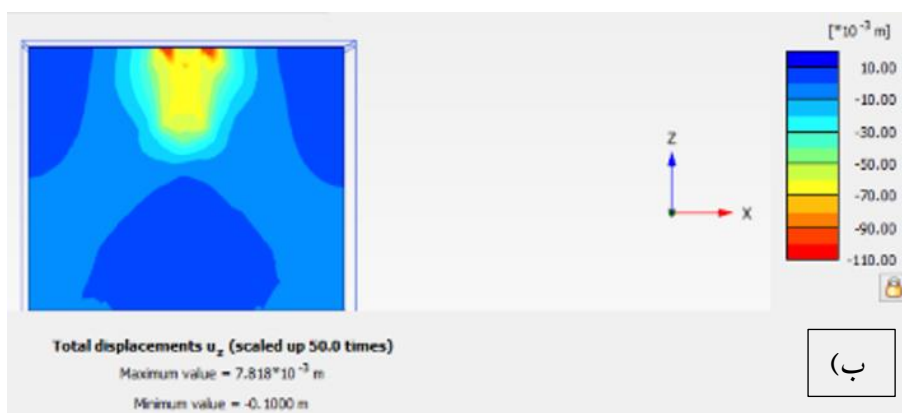
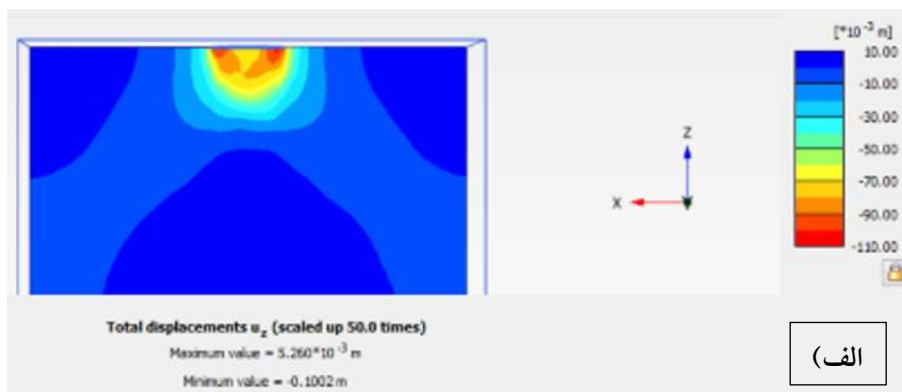
۳-۲- خروجی‌های گرافیکی نرم افزار پلکسیس

در ابتدا و قبل از گزارش نتایج نموداری، تعدادی از خروجی‌های گرافیکی مسئله مورد بررسی برای نمونه در این بخش ارائه می‌گردد. نحوه توزیع تنش در اثر بارگذاری پی حلقوی از نمای بالا در شکل ۵ نشان داده شده است. همان‌طور که در این شکل دیده می‌شود، ناحیه قرمز رنگ محدوده پی حلقوی است که بیشترین میزان بار را به خاک اعمال می‌کند و هرچه از پی دور می‌شویم میزان بار کاهش می‌یابد. همچنین خاک قرار گرفته در ناحیه داخل و مرکزی پی حلقوی تنش بسیار بالایی تحمل می‌کند که به خوبی عملکرد اثر بلوکی را در پی حلقوی نشان می‌دهد. اثر بلوکی باعث حرکت کردن خاک واقع شده در داخلی پی حلقوی به همراه خاک قرار گرفته در زیر پی حلقوی تحت بارگذاری اتفاق می‌افتد و باعث می‌شود پی حلقوی در مقایسه با پی دایره‌ای عملکرد بهتری نشان دهد.



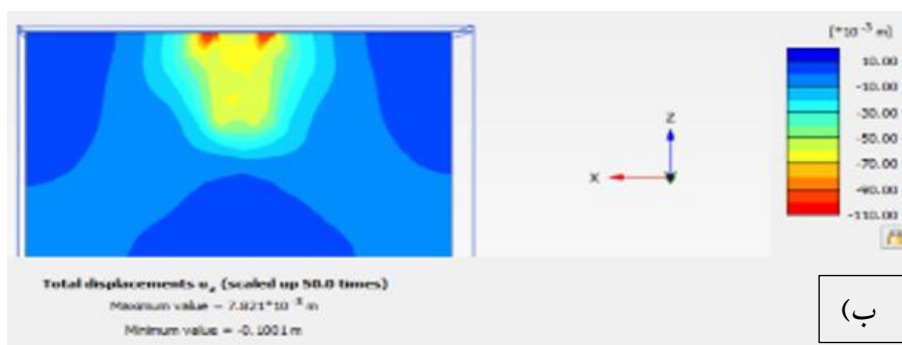
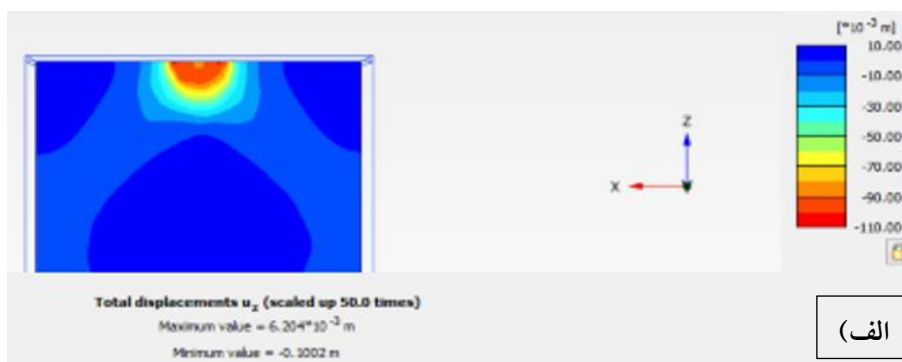
شکل ۵: نحوه توزیع تنش در پی حلقوی از نمای بالا

در شکل ۶ نشست کلی و نحوه توزیع تنش در پی شمع متصل در دو حالت $L/D=10$ و $L/D=60$ از نمای برش دیده می‌شود. می‌توان در این شکل‌ها مشاهده نمود تمرکز تنش در ناحیه زیر لبه‌های پی حلقوی و همچنین در مرکز پی ماکزیمم می‌باشد. همچنین با افزایش طول شمع‌ها از ۵ متر به ۳۰ متر، تنش اعمال شده از طرف پی حلقوی به اعماق پایین‌تر از خاک منتقل شده است و حجم بیشتری از خاک درگیر تحمل کردن این تنش شده است. در نتیجه با افزایش طول شمع، ظرفیت باربری سیستم پی شمع متصل افزایش یافته است.



شکل ۶: نشست کلی شمع متصل در دو حالت: الف) $L/D=10$ ب) $L/D=60$

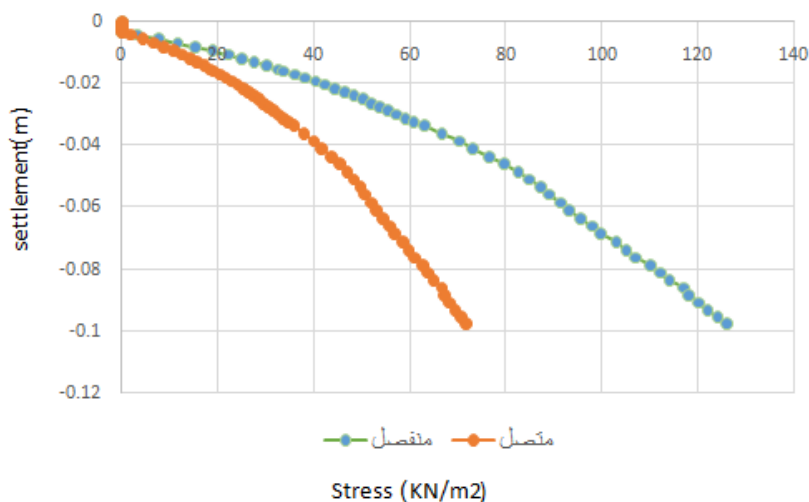
همچنین در شکل ۷ نشست کلی و نحوه توزیع تنش در پی شمع منفصل از نمای برش برای دو حالت $L/D=10$ و $L/D=60$ نشان داده شده است. توزیع تنش‌ها در این حالت نسبت به حالت متصل یکنواخت‌تر بوده است و این می‌تواند در اثر عدم انتقال لنگر خمشی از پی به شمع در حالت پی شمع منفصل باشد. همانند حالت متصل هرچه طول شمع‌ها بیشتر شود، تنش به عمق پایین‌تر خاک منتقل شده و ظرفیت باربری پی افزایش می‌یابد.



شکل ۷: نشست کلی شمع منفصل در دو حالت: الف) $L/D=10$ ب) $L/D=60$

۳-۳- بررسی تأثیر متصل و منفصل بودن شمع بر ظرفیت باربری پی حلقوی

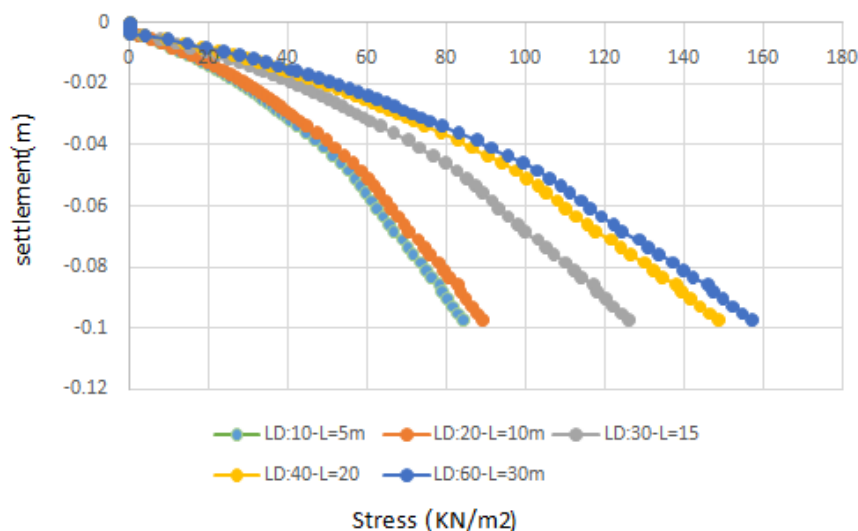
در این قسمت به بررسی تأثیر متصل و منفصل بودن شمع بر ظرفیت باربری پی حلقوی پرداخته شده است، در این راستا در دو حالت چیدمان شمع به صورت تنها زیر پی حلقوی و به صورت زیر پی و خاک وسط در دو حالت شمع به صورت متصل و منفصل مطابق شکل ۸ پرداخته شده است. در این مقایسه نسبت صخامت رادیه بتنی به قطر شمع برابر با ۱ و پارامترهای ثابت مطابق جدول ۱ در نظر گرفته شده است. با توجه به بررسی‌های انجام شده نتایج نشان می‌دهد منفصل بودن شمع با شرایط ژئوتکنیکی مورد بررسی باعث افزایش ظرفیت باربری پی می‌شود و با توجه به نمودارهای شکل ۸ نتایج نشان می‌دهد ظرفیت باربری پی حلقوی در حالت منفصل نسبت به حالت متصل مشابه ۴۸.۰۲ درصد بیشتر بوده است. ضمناً باید اشاره شود مقدار ظرفیت باربری با استفاده از روش مماسی (Tangent method) از روی نمودارهای تنش-نشست محاسبه شده است. در این روش یک مماس به قسمت ابتدایی (الاستیک) نمودار و یک مماس به قسمت انتهایی (پلاستیک) نمودار ترسیم شده و تنش نظیر محل برخورد این دو مماس به عنوان ظرفیت باربری پی در نظر گرفته می‌شود. تمامی مقادیر ظرفیت باربری در این مقاله از روش مماسی محاسبه شده‌اند.



شکل ۸: نمودار تنش- نشست پی حلقوی به صورت متصل و منفصل در حالت چیدمان شمع به صورت تنها زیر پی حلقوی

۳-۴- بررسی تأثیر نسبت طول به قطر شمع بر رفتار پی شمع منفصل و متصل

در این قسمت به بررسی ظرفیت باربری پی شمع منفصل با تغییر نسبت طول به قطر شمع (L/D) برابر با ۱۰، ۲۰، ۳۰، ۴۰، ۶۰ پرداخته می شود. قطر شمع ثابت و برابر با ۰.۵ متر می باشد. سایر پارامترها مطابق با مواردی که در جدول ۱ زیر آن خط کشیده شده است در نظر گرفته شد. نمودارهای تنش-نشست در شکل ۹ و نتایج ظرفیت باربری بدست آمده از روش مماسی در جدول ۳ ارائه شده است. نتایج نشان می دهد با افزایش طول شمعها ظرفیت باربری پی افزایش چشمگیری پیدا کرده است.



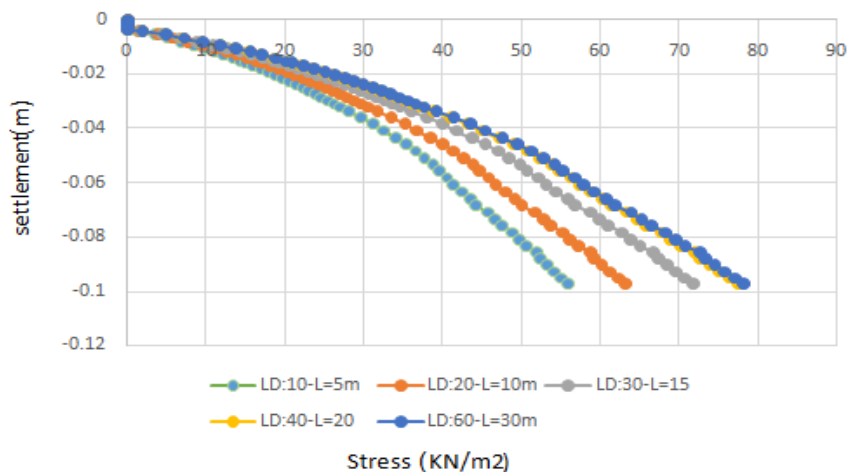
شکل ۹: نمودار مقایسه تنش - نشست پی حلقوی با تغییر نسبت طول به قطر در حالت پی شمع منفصل



جدول ۳: نتایج ظرفیت باربری پی حلقوی با تغییر نسبت طول به قطر در حالت پی شمع منفصل

مدل	ظرفیت باربری (کیلو نیوتن بر متر مربع)	درصد اختلاف
L/D=10 (L=5m)	66.07	-
L/D=20 (L=10m)	70.03	6
L/D=30 (L=15)	98.32	48.80
L/D=40 (L=20)	116.02	75.59
L/D=60 (L=30m)	124.2	87.96

در این قسمت به بررسی ظرفیت باربری پی شمع متصل با تغییر نسبت طول به قطر شمع (L/D) برابر با ۱۰، ۲۰، ۳۰، ۴۰، ۶۰ پرداخته شده است. نمودارهای تنش-نشست پی شمع متصل با نسبت طول شمع‌های متفاوت در شکل ۹ و نتایج ظرفیت باربری بدست آمده از روش مماسی در جدول ۴ نشان داده شده است. نتایج نشان می‌دهد افزایش نسبت طول به قطر شمع باعث افزایش ظرفیت باربری پی شمع متصل شده است. هر چند درصد افزایش ظرفیت باربری با افزایش طول شمع در حالت پی شمع منفصل نسبت به پی شمع متصل بیشتر بوده است. به زبان دیگر پارامتر افزایش طول شمع در حالت پی شمع منفصل تاثیر گذارتر از حالت پی شمع متصل می‌باشد.



شکل ۹: نمودار مقایسه تنش - نشست پی حلقوی با تغییر نسبت طول به قطر در حالت پی شمع متصل

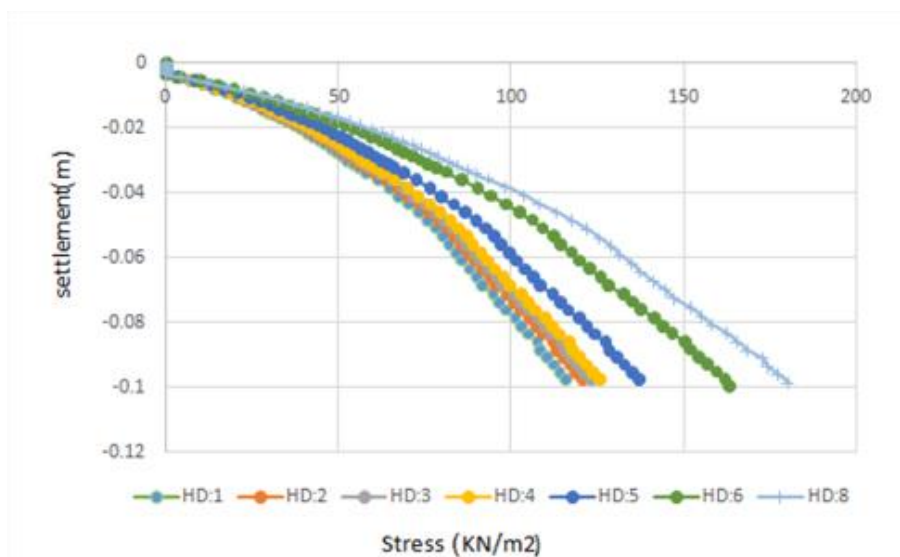
جدول ۴: نتایج ظرفیت باربری پی حلقوی با تغییر نسبت طول به قطر در حالت پی شمع متصل

مدل	ظرفیت باربری (کیلو نیوتن بر متر مربع)	درصد اختلاف
D=10 (L=5m)/L	39.67	-
D=20 (L=10m)/L	44.83	13
D=30 (L=15)/L	51.10	28.82
D=40 (L=20)/L	54.94	38.48
D=60 (L=30m)/L	55.49	39.86



۳-۵- بررسی تأثیر ضخامت پد (بالشتک ماسه‌ای) بر رفتار پی شمع منفصل

در این قسمت به بررسی تأثیر ضخامت پد (بالشتک ماسه‌ای) به قطر شمع در حالت پی شمع منفصل پرداخته می‌شود. نسبت ضخامت بالشتک ماسه‌ای به قطر شمع (H/D) برابر با ۱، ۲، ۳، ۴، ۵، ۶ و ۸ قطر شمع ثابت و برابر با ۰.۵ متر در نظر گرفته شده است. نمودارهای تنش-نشست پی شمع منفصل با ضخامت‌های مختلف بالشتک ماسه‌ای در شکل ۱۰ و نتایج مربوط به ظرفیت باربری این نمودارها در جدول ۵ گزارش شده است. نتایج نشان می‌دهد در پی شمع منفصل افزایش نسبت ضخامت پد به قطر باعث افزایش چشمگیر ظرفیت باربری پی حلقوی شده است. در واقع وجود بالشتک شنی باعث توزیع یکنواخت بار بین گروه شمع‌ها می‌شود. به زبات دیگر بالشتک بتنی تنش را به طور تقریباً یکنواخت بین شمع‌های مختلف توزیع کرده و باعث می‌شود تمرکز تنش کمتری در شمع‌های قرار گرفته در زیر پی ایجاد شود. از اینرو با بیشتر شدن ضخامت بالشتک بتنی شمع‌های بیشتری در باربری پی دخیل شده و به همین دلیل ظرفیت باربری پی افزایش می‌یابد.



شکل ۱۰: نمودار مقایسه تنش - نشست پی حلقوی با تغییر ضخامت بالشتک ماسه‌ای در حالت پی شمع منفصل

جدول ۵: نتایج ظرفیت باربری پی حلقوی با تغییر ضخامت بالشتک ماسه‌ای در حالت پی شمع منفصل

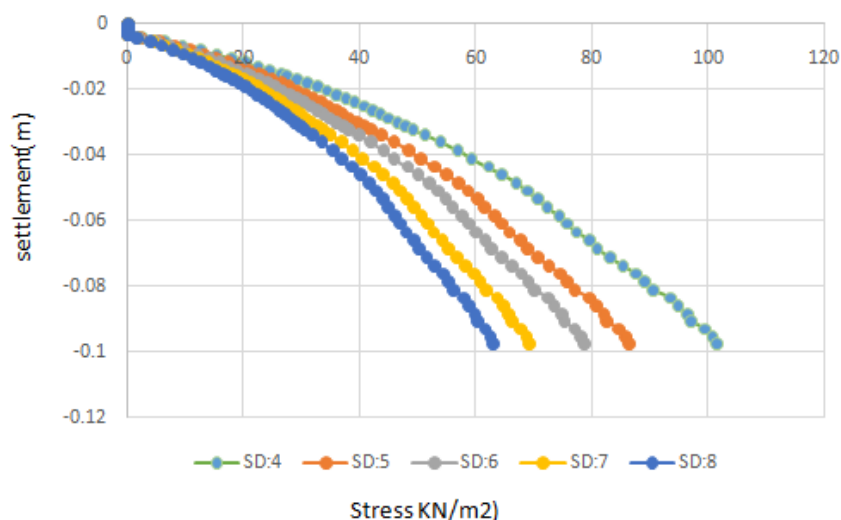
مدل	ظرفیت باربری (کیلو نیوتن بر متر مربع)	درصد اختلاف
H/D=1	83.57	-
H/D=2	87.75	5
H/D=3	89.94	7.62
H/D=4	98.32	17.64
H/D=5	108.15	29.41
H/D=6	127.62	52.70
H/D=8	142.94	71.03

۳-۶- بررسی تأثیر نسبت فاصله به قطر شمع بر رفتار پی شمع متصل و منفصل

بررسی تأثیر نسبت فاصله بین دو شمع متوالی به قطر شمع (S/D) بر رفتار پی شمع متصل و متصل در این قسمت مورد بررسی قرار گرفته است. نتایج بررسی پارامتر فاصله بین شمع‌ها برای پی شمع متصل در شکل ۱۱ و جدول ۶ ارائه گردیده است. با افزایش فاصله بین شمع‌ها تعداد شمع‌های قرار گرفته در زیر پی کاهش یافته و ظرفیت باربری پی نیز کاهش یافته است. نکته‌ای که از مقایسه نتایج جدول ۴ و جدول ۶ می‌توان پی برد این است که تأثیر نسبت طول شمع بر رفتار پی شمع متصل در مقایسه با فاصله بین شمع‌های مجاور پارامتری تأثیرگذارتر بر ظرفیت



باربری پی حلقوی بوده است. به زبان دیگر اگر در شرایط مورد بررسی این پروژه بخواهیم از طریق افزایش متراژ شمع گذاری زیر پی ظرفیت باربری را افزایش دهیم، بهتر است طول شمع‌ها را بیشتر کنیم تا اینکه تعداد شمع‌ها افزایش دهیم.

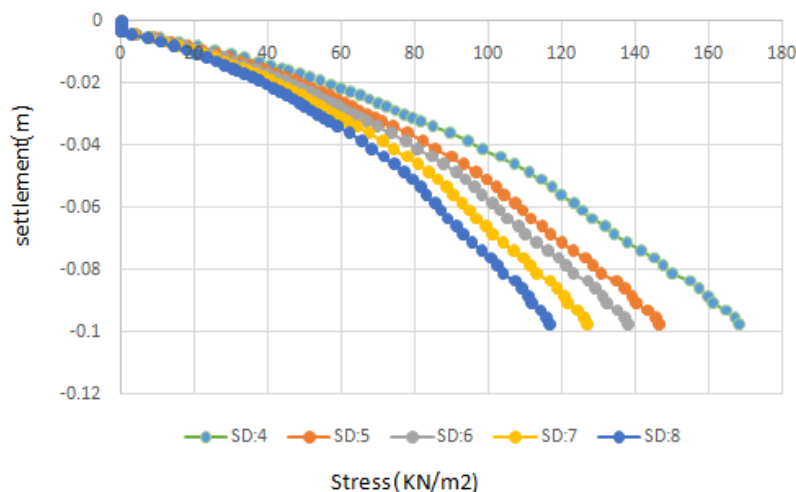


شکل ۱۱: نمودار مقایسه تنش - نشست پی حلقوی با تغییر نسبت فاصله بین شمع‌ها در حالت پی شمع متصل

جدول ۶: نتایج ظرفیت باربری پی حلقوی با تغییر نسبت فاصله بین شمع‌ها در حالت پی شمع متصل

مدل	ظرفیت باربری (کیلو نیوتن بر متر مربع)	درصد اختلاف
S/D=4	72.45	-
S/D=5	61.58	-15
S/D=6	56.04	-22.65
S/D=7	49.59	-31.54
S/D=8	45.13	-37.70

نمودارهای تنش - نشست مربوط به بررسی پارامتر فاصله بین شمع‌های متوالی برای پی شمع منفصل در شکل ۱۲ ارائه گردیده است. از روی نمودارهای شکل ۱۲ مقادیر ظرفیت باربری با استفاده از روش مماسی که پیشتر توضیح داده شد بدست آورده شده و در جدول ۷ مقادیر ظرفیت باربری گزارش شده است. نتایج نشان می‌دهد مشابه حالت پی شمع متصل، در حالت پی شمع منفصل هم با افزایش فاصله بین شمع‌ها ظرفیت باربری پی کاهش یافته است. همچنین مقایسه مقادیر ظرفیت باربری جدول ۶ و جدول ۷ نشان می‌دهد ظرفیت باربری‌های پی شمع منفصل در مقایسه با حالت مشابه پی شمع متصل بیشتر بوده است. در واقع عملکرد بالشتک شنی در بازتوزیع تنش بین شمع‌ها باعث عملکرد بهتر پی شمع منفصل در مقایسه با پی شمع متصل در حالت مشابه شده است.



شکل ۱۲: نمودار مقایسه تنش - نشست پی حلقوی با تغییر نسبت فاصله بین شمع‌ها در حالت پی شمع منفصل

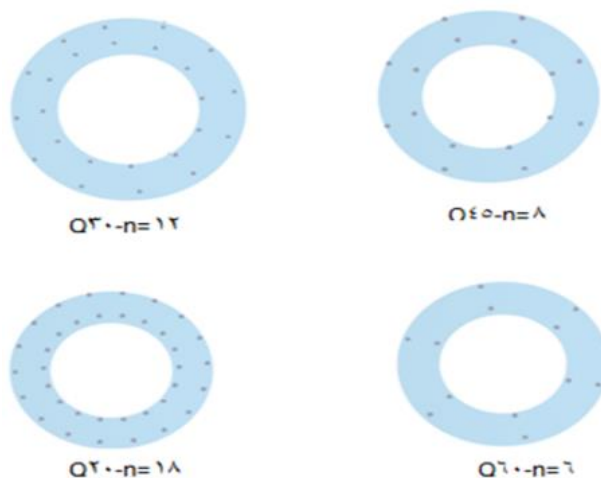
جدول ۷: نتایج ظرفیت باربری پی حلقوی با تغییر نسبت فاصله بین شمع‌ها در حالت پی شمع منفصل

مدل	ظرفیت باربری (کیلو نیوتن بر متر مربع)	درصد اختلاف
S/D=4	115.57	-
S/D=5	100.55	-13
S/D=6	95.52	-17.35
S/D=7	87.88	-23.96
S/D=8	80.85	-30.04

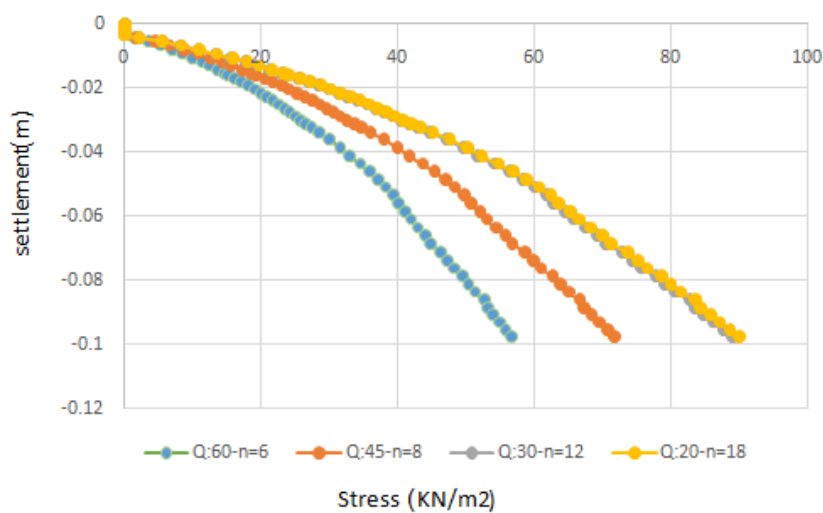
۳-۷- بررسی تأثیر زاویه شعاعی بین ردیف‌های متوالی شمع بر رفتار پی شمع متصل و منفصل

در این قسمت به بررسی تأثیر زاویه شعاعی بین ردیف‌های متوالی شمع متصل بر ظرفیت باربری پی حلقوی پرداخته می‌شود. زوایای شعاعی ۲۰، ۳۰، ۴۵، ۶۰ درجه به ترتیب متناظر با تعداد ۲۴، ۱۶ و ۱۲ شمع در زیر پی در این بخش از پژوهش بررسی شده است. نحوه چیدمان شمع‌ها در حالت‌های مختلف زوایای شعاعی در شکل ۱۳ نشان داده شده است. این چیدمان در حالت پی شمع منفصل و متصل مشابه با هم می‌باشد. نتایج مدلسازی‌های عددی تأثیر زاویه شعاعی برای حالت‌های پی شمع متصل و پی شمع منفصل به ترتیب در نمودارهای شکل ۱۴ و ۱۵ نشان داده شده است. بررسی‌ها نشان می‌دهد در هر دو حالت پی شمع متصل و منفصل کاهش زاویه شعاعی باعث عملکرد بهتر پی شمع شده است. هرچند در هر دو پی شمع حالت منفصل و متصل رفتار تنش-نشست دو حالت $\Theta=20^\circ$ و $\Theta=30^\circ$ بسیار به هم نزدیک بوده است. به زبان دیگر کاهش زاویه شعاعی از ۳۰ به ۲۰ درجه چندان تفاوتی در رفتار پی شمع ایجاد نمی‌کند و حالت $\Theta=30^\circ$ که متناظر با تعداد ۲۴ شمع در زیر پی می‌باشد، بهینه‌ترین حالت تسلیح پی حلقوی با ردیف‌های شعاعی شمع می‌باشد.

مقادیر ظرفیت باربری محاسبه شده از روی نمودارهای تنش-نشست شکل‌های ۱۴ و ۱۵ و با استفاده از روش شعاعی، برای پی شمع‌های متصل و منفصل به ترتیب در جداول ۸ و ۹ نمایش داده شده است. با مقایسه نتایج این دو جدول می‌توان مشاهده نمود ظرفیت باربری پی شمع‌های منفصل بیشتر از پی شمع‌های متصل در شرایط مشابه بوده است. همچنین در هر دو حالت پی شمع متصل و منفصل، ظرفیت باربری در دو حالت $\Theta=20^\circ$ و $\Theta=30^\circ$ تقریباً برابر می‌باشد و افزایش تعداد شمع‌های شعاعی از ۲۴ عدد به ۳۶ عدد توجیحی ندارد.



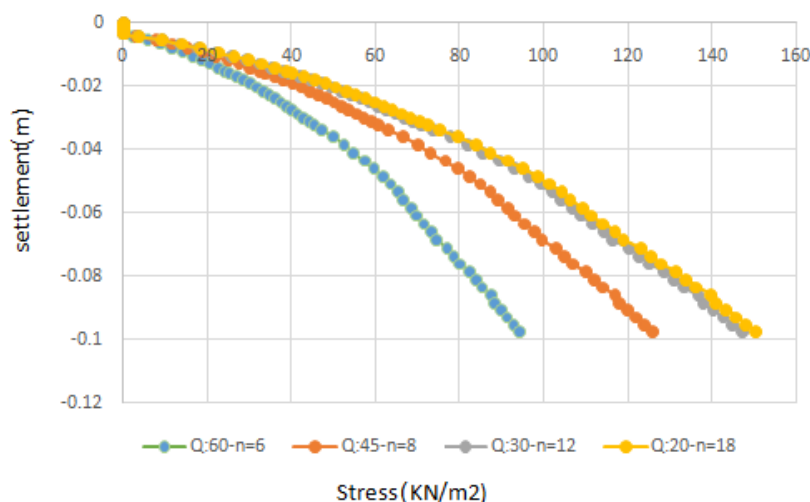
شکل ۱۳: پارامتر مورد بررسی زاویه شعاعی بین ردیف‌های متوالی شمع



شکل ۱۴: نمودار مقایسه تنش - نشست پی حلقوی با تغییر زاویه شعاعی بین ردیف شمع‌ها در حالت پی شمع متصل

جدول ۸: نتایج ظرفیت باربری پی حلقوی با تغییر زاویه شعاعی بین ردیف شمع‌ها در حالت پی شمع متصل

مدل	ظرفیت باربری (کیلو نیوتن بر متر مربع)	درصد اختلاف
$\Theta=60^\circ$ (n=12)	39.67	-
$\Theta=45^\circ$ (n=16)	51.10	28.82
$\Theta=30^\circ$ (n=24)	63.52	60.12
$\Theta=20^\circ$ (n=36)	64.16	61.72



شکل ۱۵: نمودار مقایسه تنش - نشست پی حلقوی با تغییر زاویه شعاعی بین ردیف شمع‌ها در حالت پی شمع منفصل.

جدول ۹: نتایج ظرفیت باربری پی حلقوی با تغییر زاویه شعاعی بین ردیف شمع‌ها در حالت پی شمع منفصل

مدل	ظرفیت باربری (کیلو نیوتن بر متر مربع)	درصد اختلاف
$\Theta=60^\circ$ (n=12)	64.28	-
$\Theta=45^\circ$ (n=16)	98.32	52.95
$\Theta=30^\circ$ (n=24)	100.28	56
$\Theta=20^\circ$ (n=36)	102.29	59.12

۴- نتیجه گیری

در این مقاله با افزودن شمع به پی در دو حالت منفصل و متصل پی را تسلیح کرده و رفتار پی شمع را در دو حالت فوق با استفاده از مدلسازی اجزای محدود مورد بررسی قرار دادیم. پی مورد بررسی به صورت حلقوی با نسبت قطر داخلی به خارجی ۰.۶ و خاکی که پی روی آن قرار گرفته است از جنس رس در نظر گرفته شد. ابتدا و قبل از مدلسازی مساله مورد بررسی به آنالیز صحت سنجی نرم افزار اجزای محدود 3D 2020 Plaxis پرداخته شد و این بررسی نشان داد که این نرم افزار به خوبی قابلیت بررسی مساله مورد بررسی را دارا می‌باشد. سپس با استفاده از نرم افزار اجزای محدود پلکسیس سه بعدی نسخه ۲۰۲۰ به مدلسازی و بررسی حالت‌های مختلف پی شمع‌های منفصل و متصل پرداخته شد. در پژوهش پیش رو ابتدا رفتار پی شمع در دو حالت منفصل و متصل با استفاده از خروجی‌های گرافیکی نرم افزار مورد بحث و مقایسه قرار داده شد. سپس پارامترهای نسبت طول به قطر شمع (L/D)، فاصله بین شمع‌ها به قطر شمع (S/D) و زاویه شعاعی بین ردیف‌های متوالی شمع (Θ) برای هر دو حالت پی شمع منفصل و متصل بررسی گشته و اثر پارامترهای فوق بر رفتار پی شمع در دو حالت منفصل و متصل با یکدیگر مقایسه و مطالعه گردید. همچنین اثر پارامتر نسبت ضخامت بالشتک ماسه‌ای به قطر شمع (H/D) در حالت پی شمع منفصل نیز مورد بررسی و بحث قرار گرفت. مقادیر ظرفیت باربری در تمامی حالت‌ها از روی نمودارهای تنش-نشست حاصل از آنالیز اجزای محدود و با استفاده از روش مماسی انجام گرفت. با توجه به مدلسازی‌های عددی انجام شده نتایج کلی زیر از این پژوهش قابل برداشت می‌باشد:

- ۱- با افزودن شمع به پی هم در حالت منفصل و هم در حالت متصل تنش‌های اعمال شده در اثر بارگذاری پی به اعماق پایین‌تر خاک منتقل شده و این توزیع تنش به اعماق پایین‌تر موجب افزایش ظرفیت باربری و عملکرد بهتر پی در هر دو حالت منفصل و متصل می‌گردد.
- ۲- در مقایسه تمامی حالت‌های مساله نتایج حاکی از ظرفیت باربری بالاتر پی شمع منفصل در مقایسه با پی شمع متصل مشابه می‌باشد. دلیل این رفتار عملکرد بالشتک شنی پی شمع منفصل در باز توزیع تنش‌ها بین گروه شمع‌های تحتانی می‌باشد. در واقع عدم وجود بالشتک شنی در حالت پی شمع متصل باعث تمرکز تنش در برخی شمع‌ها و مشارکت کمتر سایر شمع‌ها در تحمل نیروها می‌گردد. به همین دلیل توزیع تنش‌ها



در گروه شمع‌ها در حالت منفصل بهتر انجام شده و رفتار بهتری در مقایسه با حالت متصل مشاهده گردید. از طرف دیگر عدم اتصال پی به شمع در حالت منفصل باعث عدم انتقال گشتاور و نیروی برشی جانبی از پی به شمع و موجب عملکرد بهتر سیستم پی شمع در مقایسه با حالت متصل می‌گردد.

۳- بررسی پارامتر نسبت طول شمع (L/D) نشان داد در هر دو حالت پی شمع منفصل و متصل افزایش طول شمع باعث افزایش ظرفیت باربری پی بوده است. این افزایش ظرفیت باربری در اثر انتقال تنش به اعماق پایین‌تر خاک می‌باشد. همچنین مقایسه بین تمامی پارامترهای مورد بررسی در این مقاله نشان داد که افزایش طول شمع‌ها بیشترین تاثیر را بر روی درصد افزایش ظرفیت باربری پی داشته است و بنابراین مهمترین پارامتر تاثیر گذار بر رفتار پی شمع می‌باشد.

۴- مطالعه پارامتر نسبت ضخامت بالشتک ماسه‌ای (H/D) در حالت پی شمع منفصل نشان داد با افزایش ضخامت بالشتک ماسه‌ای ظرفیت باربری پی حلقوی فوقانی افزایش می‌یابد. دلیل این افزایش این است که هرچه ضخامت بالشتک ماسه‌ای متراکم بیشتر باشد تنش به صورت یکنواخت‌تری به شمع‌های تحتانی منتقل می‌گردد. پارامتر ضخامت بالشتک ماسه‌ای از پارامترهای مهم و بسیار تاثیرگذار بر رفتار پی شمع منفصل می‌باشد.

۵- بررسی پارامتر نسبت فاصله بین شمع‌ها (S/D) نشان داد هرچه نسبت فاصله بین شمع‌ها بیشتر شود تعداد شمع‌هایی که زیر پی قرار می‌گیرند کمتر شده و ظرفیت باربری پی نیز کاهش می‌یابد. نسبت فاصله در مقایسه با سایر پارامترهای بررسی شده در این مقاله تاثیر کمتری بر درصد تغییرات ظرفیت باربری پی داشت.

۶- مطالعه پارامتر زاویه شعاعی بین ردیف‌های متوالی شمع (Θ) نشان داد با افزایش زاویه شعاعی ظرفیت باربری پی حلقوی کاهش می‌یابد. نتایج نشان داد بهینه‌ترین حالت استفاده از چیدمان شعاعی شمع‌ها در زیر پی حلقوی حالت $\Theta=30^\circ$ می‌باشد.

۵- مراجع

- 1-Erfan Naderi, Nader Hataf, Model testing and numerical investigation of interference effect of closely spaced ring and circular footings on reinforced sand, Geotextiles and Geomembranes, Volume 42, Issue 3, 2014, Pages 191-200
- 2- Pragyana Paramita Das, Vishwas N. Khatri, Bearing capacity prediction of strip and ring footings embedded in layered sand, Proceedings of the Institution of Civil Engineers - Geotechnical Engineering, Volume 177, Issue 4, 2024, Pages 414-431
- 3-Ramin Vali, Esmaeil Alinezhad, Mohammad Fallahi, Majid Beygi, Mohammad Saberian, Jie Li, Developing a novel big dataset and a deep neural network to predict the bearing capacity of a ring footing, Journal of Rock Mechanics and Geotechnical Engineering, Volume 16, Issue 11, 2024, Pages 4798-4813
- 4-Prasad, Surya Dev, Chakraborty, Manash, Bearing capacity of ring footing resting on rock mass under different loading positions, Sādhanā journal, Volume 50, Issue 2, 2025, Pages 111
- 5-Fayaz, Sana, Shah, Mohammad Yousuf, Experimental Investigation of the Behavior of Ring and Circular Footings on Geogrid Reinforced Layered Soil Strata, Transportation Infrastructure Geotechnology, Volume 11, Issue 4, 2024, Pages 2270-2295
- 6-Kadhun, B, Suhale, A, 2021, A Review On The Performance Of Ring Foundations Resting On Reinforced And Unreinforced Soil, Iop Conf. Series: Materials Science And Engineering 1105 012086 Iop Publishing
- 7-Karandeep, S, Arvind, K, Experimental Study On Piled Ring Foundation Resting On Rdfs Cushion Overlying Soft Clay, 2021
- 8-Sargazi, O, Hosseininia, E, 2018, Bearing Capacity Of Ring Footings On Cohesionless Soil Under Eccentric Load, Computers And Geotechnics, 0266-352x/ 2018



- 9-Hussein M. Ashoural.Khuzaei, Basim Jabbar Abbas, A Case Study On Design Of Ring Footing For Oil Storage Steel Tank,Civil Engineering, College Of Engineering Al-Muthanna University Al-Muthanna, Iraq, 2018
- 10-Gholami.H, Hosseininia,E,2017, Bearing Capacity Factors Of Ring Footings By Usingthe Method Of Characteristics, Article In Geotechnical And Geological Engineering , 2017
- 11-Samir, Ibrahim Shalaby,2017, Bearing Capacity Of Ring Footing On Stabilized Clay With Sand Trench- Stone Pile Combination,Faculty Of Petroleum And Mining Engineering, Suez University, Suez, Egypt, International Journal Of Scientific Engineering And Applied Science (Ijseas) – Volume-3, Issue-5, 2017
- 12-Patil, J. D. Vasanvala, S. A. & Solanki, C. H. An Experimental Study On Behaviour Of Piled Raft Foundation. Indian Geotechnical Journal, 46(1), 16-24, 2016
- 13-Rasoul,H, A, Hosseininia,E, Baziar, M. Modarresi, H. Shahnazari,H, Centrifuge Modeling Of Non-Connected Piled Raft System, International Journal Of Civil Engineering, Vol. 13, No. 2, 2015
- 14-Alaa,A, Essam, B, Marwa, N, Numerical Analysis Of Unconnected Piled Raft With Cushion, Ain Shams Engineering Journal, 2014
- 15- Eslami,A, Veiskarami, M.Eslami,M, Study On Optimized Piled-Raft Foundations (Prf) Performancewith Connected And Non-Connected Piles- Three Case Histories, International Journal Of Civil Engineering, Vol. 10, No. 2, 2012
- 16-Athraa Mohammed Jawad Alhassani, Ala Nasir Aljorany, Experimental and Numerical Modeling of Connected and Disconnected Piled Raft, KSCE Journal of Civil Engineering, Volume 27, Issue 6, 2023,Pages 2442-2454
- 17-Der-Wen Chang, Shih-Hao Cheng, Wei-Cheng Zheng, Chan-Yen Tseng, Louis Ge, Serviceability performance of piled raft foundations under vertical loads in clayey and sandy soils, Soils and Foundations, Volume 65, Issue 4, 2025
- 18-Ruping Luo, Zhidan Li, Bitang Zhu, Qijing Yang, Differential settlements of piled raft foundation: numerical simulations, empirical equations and design charts, Journal of Building Engineering, Volume 111, 2025
- 19-H. Gunawan, L. Flessati, P. Marveggio, Optimizing foundation performance: the impact of raft on piled raft foundation in sand, Geotechnique Letters, 2025