

## ارزیابی عوامل موثر بر ظرفیت باربری نشست گروه شمع مرکب تحت بار قائم

سعید غفارپور جهرمی<sup>۱\*</sup>، نوید اسماعیلی<sup>۲</sup>

۱- استادیار، دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه تربیت دبیر شهید رجایی

۲- کارشناس ارشد ژئوتکنیک، دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه علوم و تحقیقات همدان

### چکیده

در این مقاله در یک شالوده عمیق مرکب از شمعهای بلند و کوتاه، تاثیر فاصله شمعها بر ظرفیت باربری و نیروهای وارد بر شمعها و همچنین نشست شالوده با در نظر گرفتن متغیرهایی مختلف نظیر طول شمعهای کوتاه، سختی خاک کتراکم زیر کلاهک، سختی شمعهای کوتاه و سختی شمع بلند با استفاده از روشهای عددی مورد ارزیابی قرار می‌گیرد. تحلیل عددی با بهره‌گیری از نرم‌افزار آباکوس صورت گرفته که نتایج حاصل نشان داد با افزایش فاصله بین شمعهای کوتاه و بلند، تنش ششاری محوری وارد بر شمعهای کوتاه افزایش و بر شمع بلند کاهش می‌یابد. همچنین با افزایش فاصله بین شمعهای کوتاه و بلند، نشست شالوده کاهش می‌یابد. با افزایش سختی شمع کوتاه، نشست گروه کاهش پیدا می‌کند در حالیکه افزایش سختی شمع بلند و کوتاه سبب کاهش نشست کلاهک می‌گردد.

**کلمات کلیدی:** شالوده عمیق، شمع مرکب، نشست کلاهک، بار محوری شمع، تحلیل عددی

## Investigating of Factors Affecting the Bearing Capacity and Settlement of the Composite Pile Group under Vertical Load

Saeed Ghaffarpour Jahromi<sup>\*1</sup>, Navid Esmaeili<sup>2</sup>

1- Assistant Professor, Department of Civil Engineering, Shahid Rajaei Teacher Training University

2- MSc in Geotechnical Engineering, Department of Civil Engineering, Islamic Azad University, Science and Research Branch, Hamadan

### Abstract

The goal of this research is to study the effect of the space between long and short piles beneath combined deep foundation caps on the forces acting on piles and the resulting summit, all done by considering variables such as; short pile length, soil pad stiffness (cushion), short pile stiffness and long pile stiffness, using a modeling and numerical analysis method. Modeling and numerical analysis are performed using the Abacus software, which results indicated that by increasing the space between short and long piles, the compressive axial tension acting on short piles rises and the compressive axial tension acting on long piles almost reduces, and also increasing the space between short and long piles will reduce the resulting summit and by rising the elastic modulus of short piles the summit reduces and increasing the elastic modulus of long and short piles results in reducing the summit.

**Keywords:** Deep foundation, Composite piles group, Raft settlement, Axial load, Numerical analysis.

\* مؤلف مسئول: سعید غفار پور جهرمی Saeed\_ghf@srttu.edu

تاریخ دریافت مقاله: ۱۳۸۳/۸/۱۸، تاریخ پذیرش مقاله: ۱۳۸۴/۷/۱۱

## ۱- مقدمه

استفاده از شالوده‌ها و پی‌های عمیق به عنوان یکی از رایجترین روش‌ها در انتقال بار در قیاس با پی‌های سطحی و نیز پی‌های نیمه‌عمیق، در ساخت و ساز سازه‌های مهندسی دارای مزایای بسیاری است که مهمترین آنها امکان کاربرد در خاک‌های مسأله‌دار، تحمل بارهای جانبی، تقلیل و کنترل میزان نشست، تراکم و بهسازی خاک‌ها و تأمین پایداری سازه‌های بلند می‌باشد. در سال‌های اخیر متناسب با توسعه‌ی تجهیزات اجرا و همراه با امکان انجام آزمایش‌های مختلف میدانی بر روی پی‌های عمیق و همچنین پیشرفت بخش نرم‌افزاری در روش‌های عددی، این امکان فراهم است که همگام با بررسی عملکرد واقعی بسیاری از شالوده‌های عمیق و تبیین مناسب رفتار آنها، به بهینه‌سازی در گستره‌ی پلان و پروفیل توجه شود چرا که به اقتصاد پروژه کمک شایانی نموده و صعوبت‌های اجرایی را به حداقل ممکن کاهش می‌دهد.

در طی سالهای اخیر محققان بسیاری تلاش کردند با استفاده از روش‌های مختلف، ظرفیت باربری پی‌های عمیق را افزایش و نشست آنها را پیش‌بینی نموده و کاهش دهند. یکی از موضوعات نوین در شالوده‌های عمیق، معرفی شالوده‌های عمیق مرکب می‌باشد. اصطلاح مرکب به این معنی است که گروه شالوده مرکب متشکل از شمع‌های با طول بلند و کوتاه می‌باشد که هر دو گروه شمع بلند و کوتاه در کنار هم بار وارده را تحمل و ایجاد ظرفیت باربری می‌نمایند. از آنجا که این نوع پی‌های عمیق اخیراً معرفی شده‌اند، مکانیزم عملکرد آنها همچنان در برخی موارد ناشناخته باقی مانده است. تحقیقات گسترده‌ای جهت تعیین ظرفیت باربری محوری شمع‌ها توسط محققین در مراجع مختلف صورت گرفته است که از آن جمله میتوان به روشهای ارائه شده توسط کزدی (۱۹۷۵)، مایر هوف (۱۹۷۶)، تامیلنسون (۱۹۷۷)، و سیک (۱۹۷۷)، دستورالعمل مهندسی پی کانادا (۱۹۷۸ و ۱۹۸۵)، پولوس و دیویس (۱۹۸۰) و دستورالعمل طراحی پی نیروی دریایی ایالات متحده (۱۹۸۲) اشاره کرد [۱، ۲، ۳، ۴، ۵، ۶، ۷ و ۸]. در این بخش به شرح مطالعات انجام شده بر روی پی‌های عمیق مرکب به صورت خاص پرداخته می‌شود.

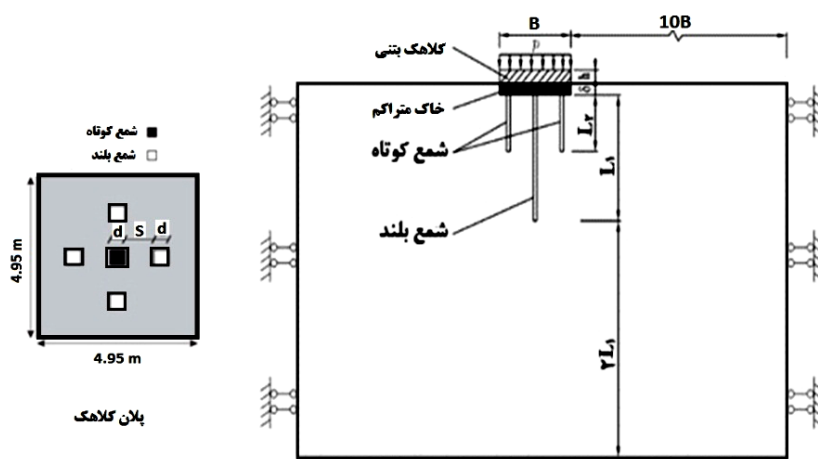
لیانگ و همکاران با انجام آنالیزهای عددی سه‌بعدی با استفاده از روش اجزای محدود نشان داد که افزایش طول شمع‌های بلند تأثیر بسیار قابل توجهی بر کاهش نشست‌های کلاهک دارد [۹]. ونگ و همکاران با انجام مطالعات فیزیکی در آزمایشگاه، عملکرد پی‌های عمیق مرکب را بررسی نمودند. آنها با تغییر جنس شمع‌های بلند و کوتاه، تأثیر آن را بر عملکرد و نشست شالوده عمیق مرکب را مورد بررسی قرار دادند [۱۰]. ژنگ و همکاران با انجام آنالیزهای عددی سه بعدی با استفاده از روش اجزای محدود، پارامترهایی نظیر طول و بعد شمع‌ها و ضخامت لایه خاک متراکم زیر کلاهک را مورد مطالعه قرار دادند. آنها ثابت کردند با افزایش طول شمع بلند، نشست کلاهک کاهش می‌یابد. همچنین آنها ثابت کردند افزایش طول شمع کوتاه تأثیری بر میزان نشست ندارد. همچنین آنها دریافتند که با افزایش ضخامت لایه خاک متراکم زیر کلاهک، میزان نشست کاهش می‌یابد و با افزایش طول شمع بلند نشست سیستم نیز کاهش می‌یابد [۱۱] و [۱۲]. ایزدی و همکارانش دریافتند هرچه اختلاف بین تنش‌های محوری شمع‌های بلند و کوتاه کمتر شود، شمع‌های کوتاه نقش بیشتری در بهبود ظرفیت باربری گروه شمع مرکب خواهند داشت [۱۳].

با توجه به تاریخچه موضوع نکته قابل توجه این است که در هیچ یک از مطالعات پیشین روی شالوده‌های عمیق مرکب، بررسی اثر فاصله شمع‌های بلند و کوتاه بر نیروهای وارد بر شمع‌ها و نشست ناشی از آن دیده نشده است لذا در این پژوهش این موضوع هدف اصلی قرار گرفت. فاصله شمع‌های بلند و کوتاه و تأثیر آنها بر عملکرد شالوده‌های عمیق مرکب با در نظر گرفتن متغیرهایی نظیر طول شمع‌های کوتاه، سختی کوشن، سختی شمع‌های کوتاه و سختی شمع بلند مورد بررسی این تحقیق قرار گرفته است.

## ۲- مدل سازی و تحلیل عددی (FEM)

در این پژوهش مشخصات مدل و ساختگاه آن همانند مدل ارائه شده در کار تحقیقاتی لیانگ و همکاران در نظر گرفته شدند [۱۴]. هندسه مدل بر اساس تئوری سعی و خطا در نظر گرفته می‌شود که به صورت پارامتریک در شکل ۱ نشان داده شده است. این ابعاد به گونه‌ای انتخاب شدند که صلیبیت مرزهای مدل کمترین تاثیر را بر نتایج تنش و کرنش کلاهک داشته باشد. با افزایش بیشتر ابعاد مدل نسبت به آنچه در شکل ۱ نشان داده شده است، تغییر در نتایج کمتر از ۱ درصد خواهد بود. بر این اساس عمق مدل خاک بایستی از کلاهک به اندازه سه برابر طول شمع بلند باشد ( $L_1$  طول شمع بلند). بعد عرضی مدل در هر جهت معادل  $10B$  از هر کلاهک در نظر گرفته شد ( $B$  عرض کلاهک). در این پژوهش بعد شمع کوتاه و بلند و ضخامت کوشن ثابت در نظر گرفته شد زیرا این متغیرها قبلاً توسط دیگر محققان بررسی شده‌اند. همچنین این متغیرها در مسائل مهندسی طیف گسترده‌ای نداشته و معمولاً مقادیر ثابتی در پروژه‌های عمرانی دارند.

شمع بلند و شمع کوتاه با مقطع مربع و بعد  $45$  سانتیمتر، عرض کلاهک  $4/95$  متر، ضخامت دال بتنی کلاهک  $0/5$  متر و ضخامت لایه خاک متراکم زیر کلاهک معادل  $40$  سانتیمتر در نظر گرفته شدند. طول شمع بلند در تمام تحلیل‌ها ثابت و  $25$  متر در نظر گرفته شد.



شکل ۱: هندسه مدل در تحلیل عددی اجزای محدود

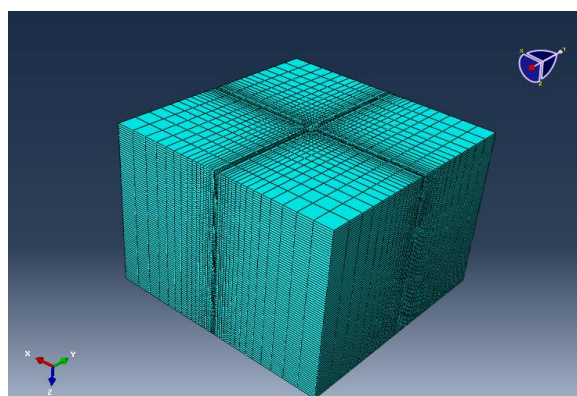
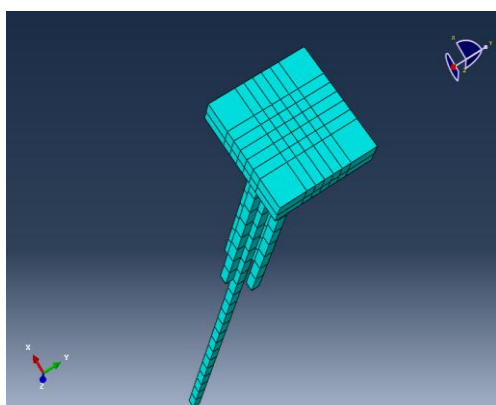
در تحلیل عددی فرض شد که کلاهک و شمع‌های بلند از بتن و شمع‌های کوتاه و کوشن از شن و ماسه تراکم (ستون شنی) ساخته شده‌اند. خصوصیات مصالح و خاک بستر و دیگر متغیرهای تحقیق در جدول ۲ آمده است. خاک بستر نیز از رس نرم در نظر گرفته شد. نظر به اینکه بتن مقاومت و سختی بسیار بالایی نسبت به خاک بستر دارد و همچنین ستون شنی متراکم نیز دارای خصوصیات مقاومتری نسبت به خاک بستر هستند، در تمامی تحلیل‌های عددی فرض شد کل سیستم شالوده در حالت الاستیک و خطی قرار دارند. در تحلیل عددی قبل از اینکه هریک از اعضای شالوده اعم از شمع بلند، شمع کوتاه، کوشن و کلاهک به حالت گسیختگی برسند، خاک نرم بستر به گسیختگی پلاستیک خود خواهد رسید که چنین فرضی دور از انتظار نیست. در حالت الاستیک رفتار خاک از قانون هوک پیروی می‌کند و به منظور محدود کردن رفتار برشی آن از معیار گسیختگی موهر کولمب استفاده شده است. سربار تنش روی کلاهک  $100$  کیلوپاسکال در نظر گرفته شده است.

جدول ۱: خصوصیات مصالح و متغیرهای تحلیل عددی

پیش فرض	شمع بلند	شمع کوتاه	خاک بستر	خاک متراکم زیر کلاهک	کلاهک بتنی
مدول الاستیسیته MPa	$10^4 - 3 \times 10^4$	۲۵۰-۱۰۰۰	۵	۱۰-۵۰	$3 \times 10^4$
ضریب پواسون	۰/۲	۰/۳	۰/۳۵	۰/۳	۰/۲
زاویه اصطکاک داخلی (درجه)	-	-	۱۰	-	-
چسبندگی (kPa)	-	-	۲۵	-	-

### ۳- مدل سازی عددی به روش اجزاء محدود

در این پژوهش تحلیل عددی اجزای محدود توسط نرم افزار ABAQUS انجام شده است که توانایی فوق العاده‌ای در تحیل دوبعدی و سه بعدی دارد [۱۵]. در مرزهای عمودی مدل از تکیه‌گاه غلطکی استفاده شد تا در این شرایط مرزی، حرکت خاک در جهت قائم آزاد باشد. همچنین حرکت ذرات خاک در جهت عمود بر صفحه مرزی مورد نظر مهار شده است. این مهار سبب ایجاد یک نوع صلبیت در جهت عمود بر صفحه خواهد شد. همانطور که قبلاً توضیح داده شد این صفحات مرزی به اندازه کافی دور از شالوده در نظر گرفته شده است تا کمترین اثر را بر نتایج تنش و کرنش داشته باشند. در صفحه تحتانی مدل از تکیه‌گاه پین استفاده شد تا این تکیه‌گاه اجازه تغییر مکان در جهات افقی را به خاک ندهد و حرکت ذرات خاک را در جهت قائم نیز مهار کند. از آنجایی که در مدل سازی این پژوهش از قانون الاستیک هوک همراه با معیار گسیختگی موهر-کولمب استفاده می‌شود، این مدل توانایی در نظر گرفتن مسیر تنش را در رفتار خاک نخواهد داشت، لذا شرایط اولیه تنش صفر به مدل اختصاص داده شد. این بدان معناست که نتایج تحلیل فقط شامل تغییرات تنش، تغییرات جابجایی یا نشست خواهند بود که دقیقاً هدف ما در این پژوهش است. برای مدل سازی خاک و شمع از المانهای سه بعدی Solid با عنوان C3D8R (۸ گرهی مکعبی) استفاده شد که دقیق‌ترین نتایج را در مسائل ژئومکانیکی به دست می‌دهد. در روش حل عددی اجزای محدود، نوع المان بکار گرفته شده، الگوی مش‌زنی و اندازه مش تأثیری مستقیمی بر نتایج حاصل خواهند داشت. در مش‌زنی مدل ساخته شده، دقیق‌ترین ویژگی‌ها اعمال شد تا خطای ناشی از مش‌زنی حداقل شود. مش‌بندی مدل در شکل ۲ نشان داده شده است.



شکل ۲: مش‌بندی مدل خاک و شالوده

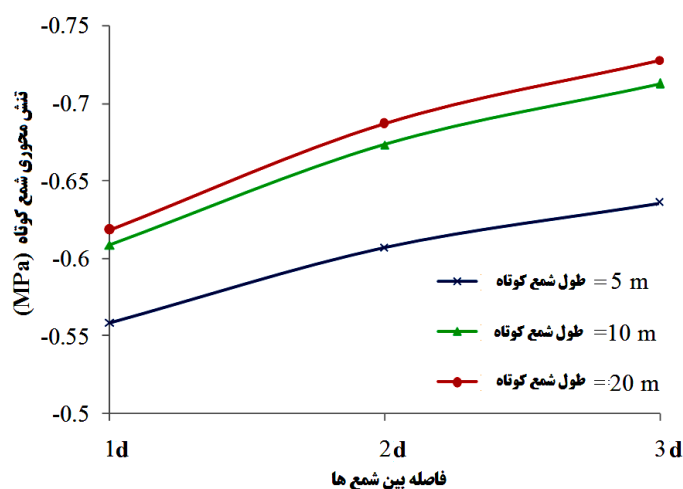
### ۴- مطالعات پارامتریک

در این پژوهش علاوه بر متغیرهای اشاره شده در جدول ۲ (یعنی مدول الاستیسیته شمع کوتاه و شمع بلند و خاک متراکم زیر کلاهک)، فاصله بین شمع‌های کوتاه با شمع‌های بلند و همچنین طول شمع کوتاه مورد ارزیابی قرار گرفت. فاصله شمع بلند و کوتاه با حرف S نشان

داده شده و نسبتی از بعد شمع دارد ( $s=1d=0.45\text{ m}$ ,  $s=2d=0.9\text{ m}$ ,  $s=3d=1.35\text{ m}$ ). همچنین طول شمع‌های کوتاه نیز معادل ۵، ۱۰، ۱۵ و ۲۰ متر بعنوان متغیر مورد ارزیابی قرار گرفت. در ادامه مقاله به مقایسه تاثیر فواصل بین شمع‌ها و تاثیر آن بر تنش‌های محوری شمع‌های کوتاه و بلند و همچنین نشست حاصله پرداخته می‌شود.

#### ۴-۱- تنش فشاری محوری وارد بر شمع کوتاه

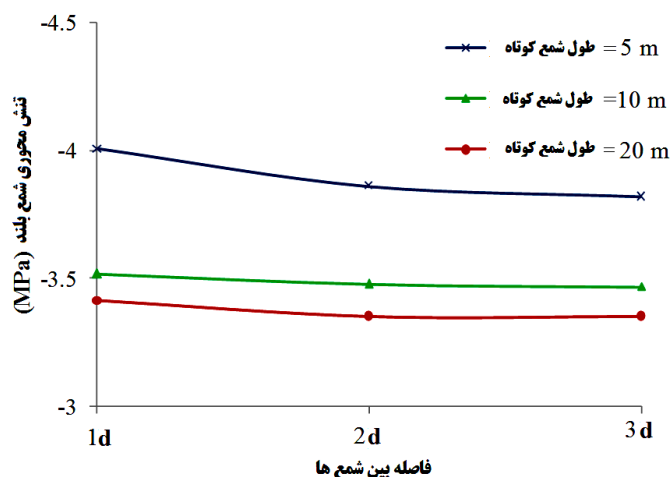
شکل ۳ اثر فاصله بین شمع‌های کوتاه و بلند را بر تنش‌های محوری فشاری وارد بر شمع‌های کوتاه نشان می‌دهد. همانطور که ملاحظه می‌شود با افزایش فاصله بین شمع‌های کوتاه و بلند، تنش محوری فشاری وارد بر شمع‌های کوتاه افزایش می‌یابد. همچنین با افزایش طول شمع‌های کوتاه بر میزان تنش محوری آنها افزوده می‌شود.



شکل ۳: اثر فاصله بین شمع‌های کوتاه و بلند بر تنش فشاری محوری شمع کوتاه

#### ۴-۲- تنش فشاری محوری وارد بر شمع بلند

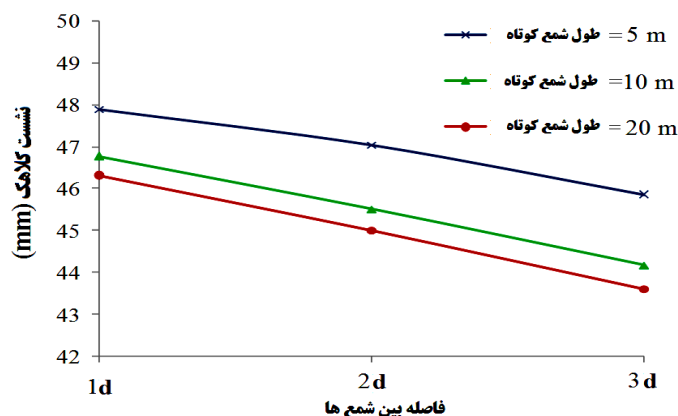
تاثیر فاصله بین شمع‌های کوتاه و بلند بر تنش فشاری محوری وارد بر شمع بلند در شکل ۴ نشان داده شده است. همانطور که ملاحظه می‌شود با افزایش فاصله بین شمع‌های کوتاه و بلند، تنش محوری فشاری وارد بر شمع بلند تقریباً کاهش می‌یابد. همچنین با افزایش طول شمع کوتاه، از میزان تنش محوری فشاری وارد بر شمع بلند کاسته می‌شود.



شکل ۴: اثر فاصله بین شمع‌های کوتاه و بلند بر تنش فشاری محوری شمع بلند

## ۳-۴- تاثیر فاصله شمع بر نشست کلاهک

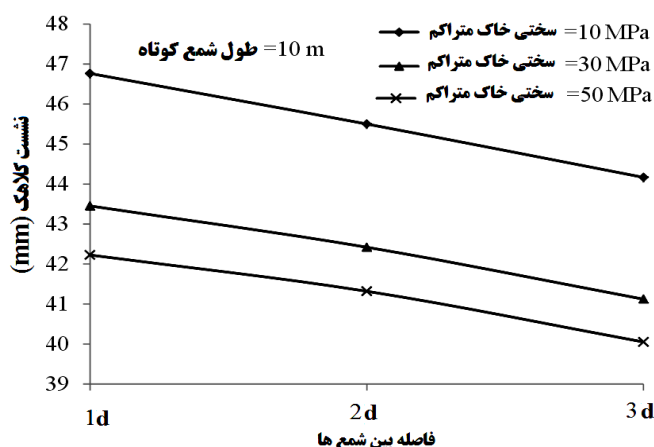
اثر فاصله بین شمع‌های کوتاه و بلند را بر حداکثر نشست کلاهک در شکل ۵ نشان داده شده است. همانطور که قابل مشاهده است با افزایش فاصله بین شمع‌های کوتاه و بلند نشست حاصله کاهش می‌یابد. علاوه بر این با افزایش طول شمع کوتاه میزان نشست حاصله نیز کاهش می‌یابد.



شکل ۵: اثر فاصله بین شمع‌های کوتاه و بلند بر نشست کلاهک

## ۴-۴- تاثیر سختی خاک متراکم زیر کلاهک بر نشست

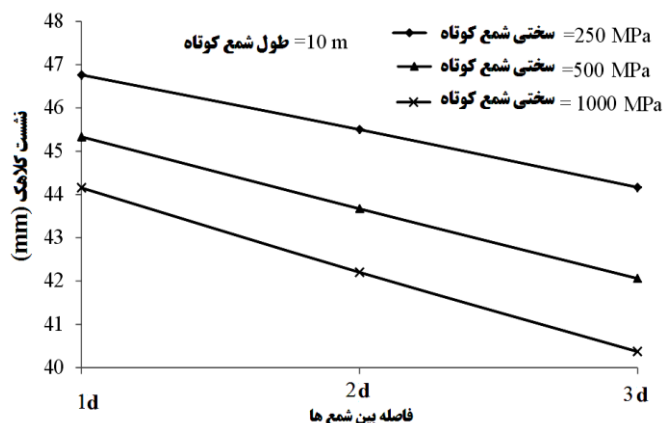
شکل ۶ تاثیر تغییرات سختی و مدول الاستیسیته لایه خاک متراکم زیر کلاهک همراه با تغییرات فاصله بین شمع‌های کوتاه و بلند بر میزان نشست کلاهک را نشان می‌دهد. با افزایش مدول الاستیسیته خاک متراکم زیر کلاهک، مقادیر نشست به مقدار قابل توجهی کاهش پیدا می‌کند. همچنین با افزایش فاصله بین شمع‌های کوتاه و بلند، نشست کلاهک نیز کاهش پیدا می‌کند.



شکل ۶: اثر تغییرات مدول الاستیسیته خاک متراکم زیر کلاهک و فاصله بین شمع‌های کوتاه و بلند بر نشست شالوده

## ۴-۵- تاثیر سختی شمع کوتاه بر نشست کلاهک

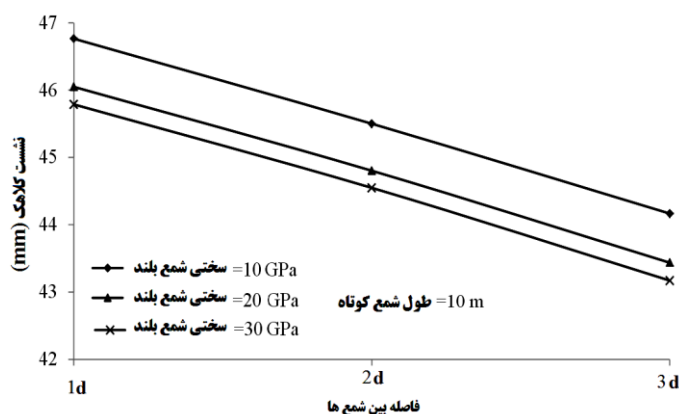
شکل ۷ بیانگر تاثیر تغییرات مدول الاستیسیته شمع‌های کوتاه بر حسب تغییرات فاصله بین شمع‌های کوتاه و بلند بر میزان نشست کلاهک را نشان می‌دهد. با افزایش مدول الاستیسیته شمع‌های کوتاه، نشست کاهش پیدا کرده اما همچنین با افزایش فاصله بین شمع‌های کوتاه و بلند، نشست کلاهک کاهش پیدا می‌کند.



شکل ۷: اثر تغییرات مدول الاستیسیته شمع‌های کوتاه و فاصله بین شمع‌های کوتاه و بلند بر نشست شالوده

#### ۶-۴- تاثیر سختی شمع بلند بر نشست کلاهک

شکل ۸ تاثیر تغییرات مدول الاستیسیته شمع بلند بر حسب تغییرات فاصله بین شمع‌های کوتاه و بلند بر میزان نشست کلاهک را نشان می‌دهد. با افزایش مدول الاستیسیته شمع بلند، نشست کلاهک کاهش پیدا می‌کند اما با افزایش فاصله بین شمع‌های کوتاه و بلند، میزان نشست کاهش پیدا می‌کند.



شکل ۸: اثر تغییرات مدول الاستیسیته شمع بلند و فاصله بین شمع‌های کوتاه و بلند بر نشست شالوده

#### ۵- نتیجه گیری

در سال‌های اخیر متناسب با توسعه‌ی تجهیزات اجرا و همراه با امکان انجام آزمایش‌های مختلف میدانی بر روی پی‌های عمیق و همچنین پیشرفت بخش نرم‌افزاری در روش‌های عددی، این امکان فراهم است که همگام با بررسی عملکرد واقعی بسیاری از شالوده‌های عمیق و تبیین مناسب رفتار آنها، به بهینه‌سازی در گستره‌ی پلان و پروفیل توجه شود چرا که به اقتصاد پروژه کمک شایانی نموده و صعوبت‌های اجرایی را به حداقل ممکن کاهش می‌دهد. اهم نتایج این تحقیق را می‌توان بصورت زیر خلاصه کرد.

۱- با افزایش فاصله بین شمع‌های کوتاه و بلند، تنش فشاری محوری وارد بر شمع بلند تقریباً کاهش می‌یابد. همچنین با افزایش طول شمع‌های کوتاه، از میزان تنش فشاری محوری شمع بلند کاسته می‌شود.

۲- با افزایش فاصله بین شمع‌های کوتاه و بلند، تنش فشاری محوری وارد بر شمع بلند کاهش می‌یابد. همچنین با افزایش طول شمع‌های کوتاه، از میزان تنش محوری فشاری شمع بلند کاسته می‌شود.

- ۳- با افزایش فاصله بین شمع‌های کوتاه و بلند، نشست کلاهک کاهش می‌یابد. علاوه بر این با افزایش طول شمع‌های کوتاه، میزان نشست کلاهک نیز کاهش می‌یابد.
- ۴- با افزایش مدول الاستیسیته شمع بلند، نشست کلاهک کاهش پیدا می‌کند.
- ۵- با افزایش مدول الاستیسیته شمع‌های کوتاه، نشست کلاهک کاهش پیدا می‌کند.
- ۶- با افزایش مدول الاستیسیته خاک متراکم زیر کلاهک، نشست آن کاهش پیدا می‌کند.

## ۶- منابع

- [1] Kezdi, A. "Pile Foundation. Foundation Engineering Handbooks", Van Nostrand Reinhold Co., New York (1975).
- [2] Meyerhof, G. "Bearing Capacity and Settlement of Pile Foundations. *Journal of Geotechnical Engineering*", ASCE, 102, GT3: (1976), 197-228.
- [3] Tomlinson, M.J. "Pile Design and Construction Practice. Cement and Concrete Association", London, (1977).
- [4] Vesic, A.S. "Design of Pile Foundations. Transportation Research Board", National Research Council, Washington D.C, (1977).
- [5] "Canadian Foundation Engineering Manual", Canadian Geotechnical Society Bi Tech. publication, (1985).
- [6] "Canadian Foundation Engineering Manual", Canadian Geotechnical Society Bi Tech. publication, (1978).
- [7] Poulos, H.G., Davis, E. H. "Pile Foundation Analysis and Design". Wiley, NewYork. (1980).
- [8] "Foundation and Earth Structures Design Manual 7.2", Department of US Navy, NAVFAC DM-7.2, Alexandria, VA. (1982).
- [9] Liang, F., Chen, L., Shi, X. "Numerical analysis of composite piled raft with cushion subjected to vertical load". *Computers and Geotechnics*, No. 30 (2003) 443-453.
- [10] Wang, X.Z., Zheng, J. J., Yin, J. H. On composite foundation with different vertical reinforcing elements under vertical loading: a physical model testing study. *Journal of Zhejiang University-SCIENCE A (Applied Physics & Engineering)*, 11, No. 2 (2010) 80-87.
- [11] Zheng, J., Abusharar, S. W., Wang, X. Three-dimensional nonlinear finite element modelling of composite foundation formed by CGF-lime piles. *Computers and Geotechnics*, No. 35 (2008) 637-643.
- [12] Zhao, M., Zhang, L., Yang, M. Settlement calculation for long-short composite piled raft foundation. *Journal of Central South University of Technology*, No. 6 (2006) 749-754.
- [13] Moayed, R.Z., Izadi, E., Mirsepahi, M. 3D finite elements analysis of vertically loaded composite piled raft. *Journal of Central South University of Technology*. No. 20 (2013) 1713-1723.
- [14] Liang, F., Chen, L., Han, J., Integral equation method for analysis of piled rafts with dissimilar piles under vertical loading. *Computers and Geotechnics*, No.39 (2009) 419-426.
- [15] Abaqus User's Manual, Version 6.7., Hibbitt, Karlsson, and Sorensen Inc., Pawtucket, Providence, R.I. (2007).