

# ارزیابی تأثیر مشخصات هندسی پی رادیه - شمع بر رفتار آن در خاک رس نرم تحت شرایط زهکش شده

کاظم فخاریان\* (استادیار)

محمدرضا خانمحمدی (کارشناس ارشد)

دانشکده‌ی مهندسی عمران و محیط‌زیست، دانشگاه صنعتی امیرکبیر

رفتار پی رادیه - شمع<sup>۱</sup> در خاک رس نرم به دلیل پاره‌یی نگرانی‌ها نظیر ظرفیت باربری ناکافی خاک و احتمال نشست زیاد پی، مسئله‌ی است که در سالیان اخیر مورد توجه قرار گرفته است. سهم شمع‌ها نسبت به رادیه در تحمل بار وارد بر پی مسئله‌ی مهم است. در نوشتار حاضر با مدل‌سازی عددی به بررسی تأثیر مشخصات هندسی پی رادیه - شمع بر رفتار آن در خاک رس نرم پرداخته و تحلیل‌ها در قالب مطالعات پارامتریک انجام شده است. تحلیل‌های انجام شده مشخص کرد که نحوه‌ی آرایش شمع‌ها در زیر رادیه تأثیر بسزایی بر عملکرد پی دارد. افزایش طول و قطر شمع‌ها موجب کاهش نشست پی و بالارفتن سهم شمع‌ها در تحمل بار وارد می‌شود. افزایش ضخامت رادیه منجر به کاهش نشست متوسط و تقاضای پی می‌شود، اما تغییر ضخامت رادیه اثری بر سهم باربری رادیه و یا شمع‌ها ندارد.

واژگان کلیدی: رادیه - شمع، رس نرم، مدل عددی، مطالعات پارامتریک.

## ۱. مقدمه

شود. همچنین در برخی موارد با کمک روش‌های بهسازی خاک نظیر پیش‌بارگذاری، اقدام به اصلاح خاک محل می‌شود. اما چنانچه بتوان از رادیه - شمع به جای این روش‌ها استفاده کرد، کمک شایانی به اقتصاد پروژه خواهد شد. با توجه به درک فواید فراوان استفاده از این نوع پی و نیاز مبرم ساخت بناهای مختلف بر روی زمین‌هایی با بافت بسیار نرم، لزوم بررسی استفاده از این نوع پی روی خاک‌های نرم و نحوه‌ی عملکرد آن محسوس است. در این نوشتار، کارایی پی رادیه - شمع مستقر بر روی خاک‌های رس نرم مورد تحلیل قرار گرفته است. لذا با استفاده از مدل‌سازی عددی سه‌بعدی به روش المان محدود، به ارزیابی تأثیر مشخصات هندسی پی رادیه - شمع در قالب مطالعات پارامتریک پرداخته شده است.

## ۲. مدل عددی

مدل عددی ساخته‌شده از نوع تقارن محوری به صورت یک چهارم بوده و به روش اجزای محدود و با استفاده از نرم‌افزار ABAQUS<sup>[۶]</sup> تحلیل شده است. در این مدل‌سازی برای تعریف خواص مواد رادیه و شمع‌ها، از مشخصات مواد کشسان ایزوتروپیک و برای رفتار خاک از مشخصات رفتاری کشسان - خمیری کامل با معیار گسیختگی موهر - کلمب استفاده شده است. المان مورد استفاده از نوع شش‌وجهی ۸ گره‌یی است که در نرم‌افزار به اختصار با نماد C3D8R نشان داده می‌شود. جهت

ایده‌ی تلفیق رادیه و پی‌های عمیق، به‌منزله‌ی گزینه‌ی جدید در مبحث پی‌سازی از دهه‌ی ۷۰ میلادی مطرح شده است. به‌کارگیری پی‌های عمیق در زیر پی‌های گسترده (سیستم پی گسترده‌ی مرکب) می‌تواند سبب کاهش نشست و اثر توأم افزایش ظرفیت باربری شود. در حالت کلی، بهره‌گیری از پی‌های رادیه - شمع سبب کاهش محسوس در طول شمع‌ها، بهبود سرویس‌دهی پی‌ها به لحاظ نشست‌های کلی و ناهمسان، به کمینه‌رساندن احتمال چرخش، و ناپایداری سازه می‌شود و به اقتصاد پروژه نیز کمک می‌کند.<sup>[۱]</sup>

امروزه ثابت شده است که در صورت بالابودن ظرفیت باربری خاک محل، استفاده از رادیه - شمع به جای گروه شمع معمولی بسیار مقرون به صرفه‌تر است. اما به دلیل پاره‌یی نگرانی‌ها به‌ویژه در خصوص نشست‌های بالا استفاده از این نوع پی در خاک‌های نرم محبوبیت زیادی ندارد.<sup>[۲]</sup> با وجود این، نمونه‌های موفق از اجرای رادیه - شمع در خاک‌های رس نرم نیز موجود است.<sup>[۳]</sup>

مناطق جنوبی و جنوب شرق استان خوزستان از جمله آبادان، خرمشهر، و ماهشهر در جنوب غربی ایران از جمله مناطقی‌اند که بسیاری از پروژه‌های عظیم صنعتی در آنجا در حال اجراست. وجود رس نرم در لایه‌های فوقانی خاک این منطقه موجب شده است تا عمدتاً از گروه شمع برای زیرسازی سازه‌های سنگین استفاده

\* نویسنده مسئول

تاریخ: دریافت ۱۴/۱۳۹۰، اصلاحیه ۷/۳/۱۳۹۰، پذیرش ۱۵/۱/۱۳۹۱.

### ۳. مطالعات پارامتریک

خواص مصالح رادیه، شمع‌ها و خاک در مدل عددی پایه برای مطالعات پارامتریک در جدول ۳ آمده است. خاک به صورت ۲ لایه فرض شده است که لایه‌ی فوقانی، خاک رس نرم اشباع به ضخامت ۲۰ m و لایه‌ی زیرین یک لایه‌ی ماسه‌ی نسبتاً متراکم با ضخامت ۱۰ m است. مشخصات هندسی پی در جدول ۴ بیان شده است. در همه‌ی موارد تحلیل، با توجه به وجود تقارن در مدل، سیستم پی - خاک به صورت یک چهارم مدل شده است. شکل ۱، مدل پایه‌ی مش‌بندی شده جهت انجام تحلیل‌های پارامتریک را نشان می‌دهد.

کلیه‌ی تحلیل‌ها در شرایط بار قائم و یکنواخت و براساس پارامترهای زهکشی شده‌ی خاک صورت گرفته است. کاربرد این سیستم در پی مخازن سوخت، مخازن نگهداری آب، و بسیاری از ساختمان‌های بلند و متقارن در دنیا، کاربرد شرایط تنش قائم یکنواخت را توجیه می‌کند.

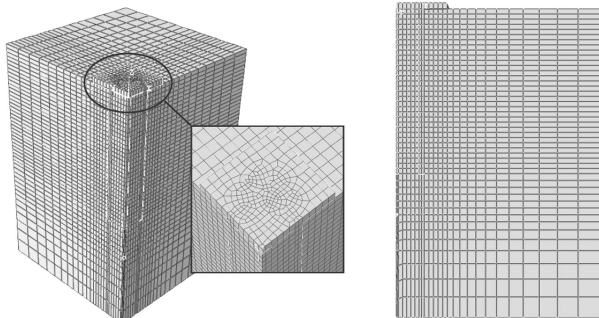
پارامترهای مورد بررسی در تحلیل‌های انجام شده به این شرح است:

جدول ۳. مشخصات مصالح در مدل پایه.

مصالح	مدل رفتاری	وزن مخصوص ( $\gamma$ ) (kN/m <sup>3</sup> )	مدول کشسان (E) (MPa)	نسبت پواسون ( $\nu$ )	چسبندگی مؤثر ( $c'$ ) (kPa)	زاویه‌ی اصطکاک داخلی مؤثر ( $\phi'$ ) (درجه)
رادیه و شمع	کشسان	۲۴	۲۱۰۰۰	۰٫۲	-	-
رس - کلمب	موهر	۱۸	۶	۰٫۳	۵	۲۰
ماسه - کلمب	موهر	۱۹	۲۰	۰٫۳۵	۲	۳۵

جدول ۴. مشخصات هندسی پی رادیه - شمع در مدل المان محدود.

المان پارامتر	طول (L)	عرض (B)	ضخامت (t)	شمع (m)
طول	۱۰	۱۰	۰٫۶	طول قطر
مقدار	۱۰	۱۰	۰٫۶	۲٫۵
				۱۶
				۰٫۵
				فاصله‌بندی (S)
				(L <sub>p</sub> )
				(d <sub>p</sub> )



شکل ۱. مش‌بندی مدل پایه برای مطالعات پارامتریک.

حذف تأثیر زیاد اندازه‌ی شبکه<sup>۲</sup> بر روی نتایج، شبکه‌بندی به‌کار گرفته شده در تمامی تحلیل‌ها یکسان و به گونه‌ی بی است که المان‌های خاک قرار گرفته در زیر پی و نیز در نواحی نزدیک به انتهای شمع‌ها، به اندازه‌ی کافی ریز و المان‌های دور از آن به تدریج بزرگ‌تر شوند. همچنین کوشش شد که تغییر اندازه‌ی المان‌ها ملایم و به تدریج صورت گیرد.

برای مدل‌سازی رفتار مماسی و لغزشی دو سطح خاک و شمع از مدل اصطکاک کلمب استفاده شده است. در این مدل، لغزش زمانی آغاز می‌شود که تنش برشی ایجاد شده بین دو سطح برابر یا بیشتر از حاصل ضرب ضریب اصطکاک ( $\mu$ ) در فشار تماسی شود.  $\mu$  برای رس بین ۰٫۲ تا ۰٫۴ پیشنهاد شده است.<sup>[۷]</sup> در این پژوهش  $\mu$  برابر با ۰٫۳ اختیار شده است.

با مد نظر داشتن بررسی رفتار نهایی سیستم رادیه - شمع در خاک رس نرم، تمام تحلیل‌ها تحت شرایط زهکشی شده انجام شده‌اند و اثر تحکیم در نظر گرفته نشده است. بنابراین مقادیر ثابت مدول یانگ زهکشی شده و پارامترهای مقاومت برشی زهکشی شده برای لایه‌های خاک اختیار شده‌اند. بار به صورت یکنواخت در سطح رادیه بعد از تعادل اولیه اعمال شده است.

### ۱.۲. صحت‌سنجی مدل عددی

جهت صحت‌سنجی، از نتایج آزمایش مدل سانتریفیوژ یک پی استفاده شده است.<sup>[۸]</sup> این مدل پی قبلاً نیز در فضای سه‌بعدی در نرم‌افزار ABAQUS مدل‌سازی شده است،<sup>[۷]</sup> لذا می‌توان از نتایج هر دو برای مقایسه بهره برد.

این مدل متشکل از یک پی رادیه - شمع دایره‌ی بی است که بر روی خاک رس سفت قرار گرفته است. تعداد کل شمع‌های به‌کار گرفته ۹ عدد با فاصله‌ی ۲٫۵ m، طول ۱٫۵ m و قطر ۰٫۳۲ m است. این شمع‌ها در زیر یک رادیه‌ی دایره‌ی بی با قطر ۱۴ متر و ضخامت ۰٫۵ m قرار گرفته‌اند. ضخامت خاک نیز ۲۵ m است. رادیه تحت بار یکنواخت به بزرگی معادل ۱۲ MN قرار دارد. ویژگی‌های خاک و رادیه - شمع استفاده شده در مدل، در جدول ۱ بیان شده است.

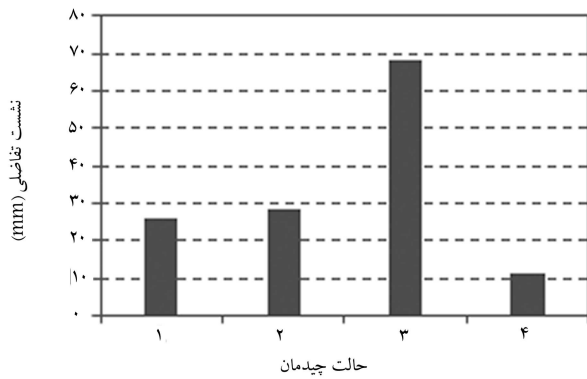
نتایج تحلیل سه بعدی در این مطالعه با مدل سانتریفیوژ و مدل سه بعدی در مطالعه‌ی Lee و همکاران در جدول ۲ نشان داده شده است. ملاحظه می‌شود که نتایج همخوانی قابل قبولی با هم دارند.

جدول ۱. مشخصات مصالح در مدل المان محدود.

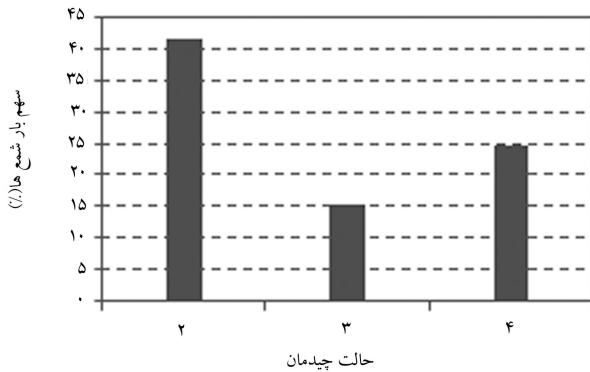
نوع مصالح	پارامتر	
	رادیه و شمع	رس
مدول کشسان (E)	۴۰۰۰۰	۱۶٫۸
نسبت پواسون ( $\nu$ )	۰٫۱۶	۰٫۴
مقاومت برشی زهکشی نشده ( $c_u$ )	-	۴۱٫۴
وزن مخصوص ( $\gamma$ )	۲۰	۱۷٫۵

جدول ۲. مقایسه‌ی نتایج حاصل از سه مدل.

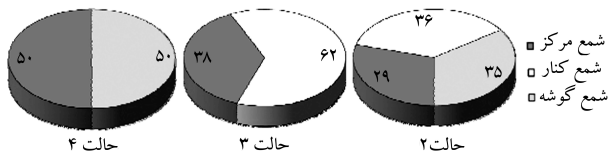
نتایج	نشست میانگین (mm)	بار حمل شده توسط شمع‌ها (%)
مدل سانتریفیوژ <sup>[۸]</sup>	۲۲	۱۹
مدل FEM <sup>[۷]</sup>	۲۱	۲۲
مدل FEM در این مطالعه	۲۲٫۳	۱۷



شکل ۴. نشت تفاضلی پی برای حالات مختلف آرایش شمع‌ها.



شکل ۵. سهم بار شمع‌ها برای حالات مختلف آرایش شمع‌ها.



شکل ۶. توزیع بار بین شمع‌ها برای حالات مختلف آرایش شمع‌ها.

نقاط نیز افزایش یافته است. نشت تفاضلی برای حالات مختلف در شکل ۴ آمده است.

با وجود تعداد یکسان شمع‌ها در حالت‌های سوم و چهارم، نشت تفاضلی در آن‌ها کاملاً متفاوت است. سهم شمع‌ها در تحمل بار وارده بر پی در شکل ۵ نشان داده شده است.

در بین حالت‌های مختلف، حالت دوم با تعداد ۹ شمع دارای بیشترین درصد حمل بار توسط شمع‌ها است. از طرف دیگر می‌توان نقش کم‌رنگ شمع‌ها در تحمل بار را در حالت سوم نسبت به حالت چهارم (با تعداد یکسان شمع‌ها) مشاهده کرد. لذا نتایج حاصل در زمینه نشت تفاضلی و نیز سهم باربری شمع‌ها، می‌تواند بیانگر چیدمان نامناسب شمع‌ها در حالت سوم نسبت به حالت چهارم باشد. شکل ۶، نحوه توزیع نیرو بین ۳ شمع به نمایندگی از شمع‌های مرکز، کنار، و گوشه را نشان می‌دهد. به عبارت دیگر، درصدهای نشان داده شده در شکل بیانگر سهم هر نوع شمع از مجموع بار وارد بر ۳ نوع شمع است. مثلاً در حالت چهارم به تمام ۵ شمع موجود در پی به یک اندازه بار وارد شده است. می‌توان با لایه نشت تفاضلی در حالت‌های دوم و سوم را به نسبت حالت چهارم ناشی از توزیع نامناسب بار بین شمع‌های آن‌ها دانست.

- چیدمان شمع‌ها در زیر رادیه: ۴ حالت،
- طول شمع‌ها  $(L_p/H)$ : ۲/۰ الی ۱/۰،
- قطر شمع‌ها: ۳۰ الی ۷۰ سانتی‌متر،
- ضخامت رادیه: ۲۰ الی ۸۰ سانتی‌متر.

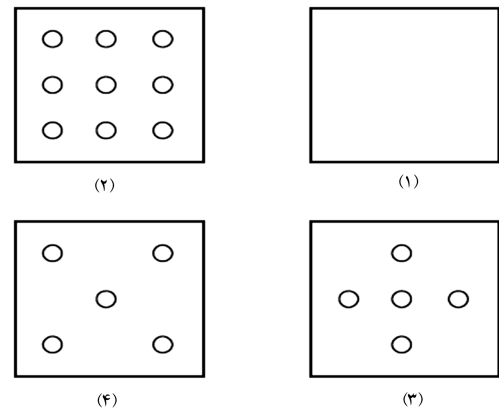
به منظور بیان نتایج، به بررسی نشت تفاضلی، نشت مرکز پی، و نیز سهم بار شمع‌ها پرداخته شده است.

### ۱.۳. چیدمان شمع‌ها در زیر رادیه

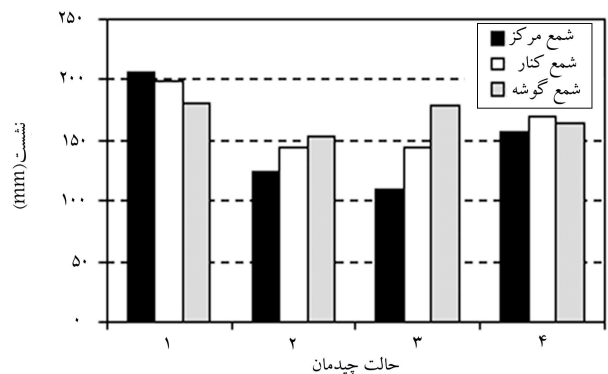
چهار حالت نشان داده شده در شکل ۲، برای بررسی تأثیر نحوه قرارگیری شمع‌ها در زیر رادیه بر رفتار پی در نظر گرفته شده است.

حالت اول، رادیه به صورت تک و بدون شمع است. در حالت دوم، تعداد ۹ شمع با آرایش مربعی و متداول به طور یکنواخت در زیر رادیه جایگذاری شده‌اند. حالات سوم و چهارم دارای ۵ شمع در زیر رادیه هستند؛ با این تفاوت که در حالت سوم شمع‌های گوشه و در حالت چهارم شمع‌های کناری حذف شده‌اند. شکل ۳، مقادیر نشت در نقاط مرکز، کنار، و گوشه‌ی پی را نشان می‌دهد.

همان‌گونه که انتظار می‌رود، بیشترین نشت در بین همه‌ی حالات، مربوط به حالت رادیه‌ی تک است. کمترین نشت مربوط به حالت دوم، یعنی رادیه با تعداد ۹ شمع است. افزایش نشت گوشه در حالت سوم در اثر حذف شمع‌های گوشه است. به طور مشابه در حالت چهارم، با حذف شمع‌های کناری، نشت در آن



شکل ۲. چیدمان مختلف شمع‌ها در زیر رادیه.



شکل ۳. نشت مرکز، کنار و گوشه‌ی پی برای حالات مختلف آرایش شمع‌ها.

### ۲.۳. ضخامت رادیه

در این بخش، از ضخامت‌های ۲۰، ۴۰، ۶۰ و ۸۰ سانتی‌متر برای بررسی تأثیر ضخامت رادیه بر رفتار پی استفاده شده است. رادیه - شمع مورد استفاده مطابق با حالت دوم (نشان داده شده در بخش ۱.۳) است. شکل ۷، روند نشست در طول خط مرکزی پی (از نقطه‌ی مرکزی تا کنار پی) را برای ضخامت‌های مختلف رادیه نمایش می‌دهد. این شکل نشان می‌دهد که با افزایش ضخامت، پی به حالت صلب عمل می‌کند و نشست آن یکنواخت‌تر و در نتیجه نشست تفاضلی در پی به صفر نزدیک می‌شود. به عبارت دیگر، نشست تفاضلی فقط در ضخامت‌های کم رادیه قابل توجه است. مشاهده می‌شود با افزایش ضخامت، نشست در مرکز پی افزایش و در لبه‌ی آن کاهش می‌یابد.

نتایج حاصل از تحلیل‌ها بیانگر آن است که ضخامت رادیه تأثیر چندانی بر سهم باربری رادیه و یا شمع‌ها ندارد (شکل ۸).

### ۳.۳. قطر شمع‌ها

به منظور بررسی اثر قطر شمع‌ها بر رفتار پی رادیه - شمع، حالت‌های دوم و چهارم از چیدمان شمع‌ها انتخاب شد. جهت انجام این تحلیل، قطر شمع‌ها بین ۳۰ تا ۷۰ سانتی‌متر متغیر در نظر گرفته شد.

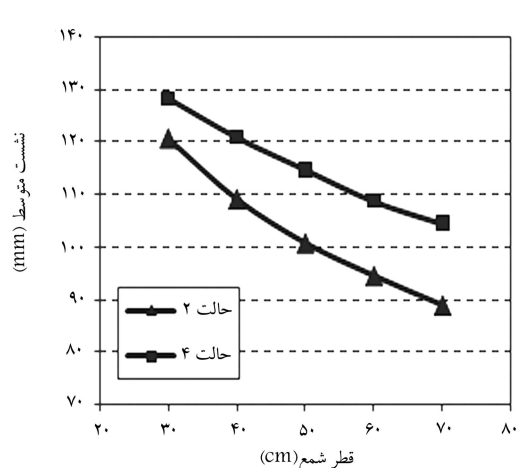
شکل ۹ بیانگر آن است که با افزایش قطر شمع‌ها، میزان نشست متوسط پی کاهش می‌یابد. این نمودار، روند کاهش نشست به ازای افزایش قطر را تقریباً خطی نشان می‌دهد. این تذکر لازم است که نشست متوسط از میانگین نشست نقاط مرکز، کنار، و گوشه‌ی پی به دست آمده است.

شکل ۱۰ نشان می‌دهد که افزایش قطر شمع‌ها سبب بالا رفتن سهم آن‌ها در تحمل بار وارد بر پی می‌شود. روند تغییرات از اثر محسوس قطر شمع‌ها بر میزان سهم باربری آن‌ها حکایت دارد؛ به گونه‌ی پی که افزایش قطر از ۳۰ cm به ۵۰ cm موجب افزایش دو برابری سهم شمع‌ها در تحمل بار می‌شود.

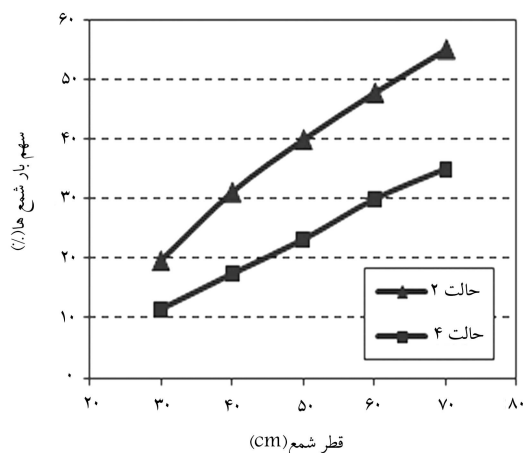
### ۴.۳. طول شمع‌ها

از میان آرایش شمع‌های نشان داده شده در شکل ۲، حالت‌های دوم و چهارم برای انجام این تحلیل انتخاب شد. برای هر دو حالت، ۵ طول مختلف برای شمع‌ها در نظر گرفته شده است. با توجه به اینکه عمق لایه‌ی رس نرم ۲۰ متر است، طول شمع‌ها به گونه‌ی پی است که در ۴ مورد اول انتهای شمع‌ها درون لایه‌ی رس قرار دارد و فقط انتهای شمع‌های ۲۰ متری بر روی لایه‌ی نسبتاً متراکم ماسه قرار گرفته است. در نمودارهای ارائه شده، طول شمع‌ها ( $L_p$ ) برحسب عمق لایه‌ی رس ( $H$ ) بی‌بعد شده است.

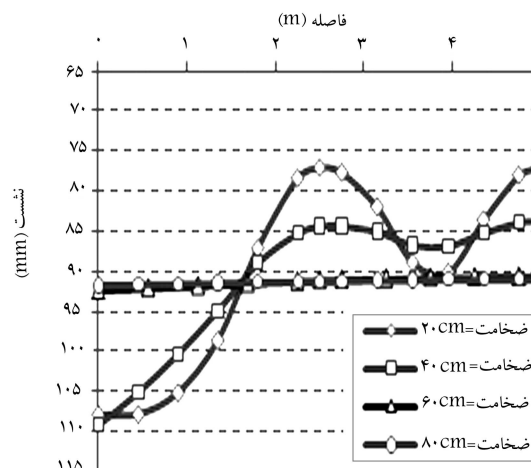
نشست متوسط پی رادیه - شمع در اثر بار اعمالی برای طول شمع‌های مختلف



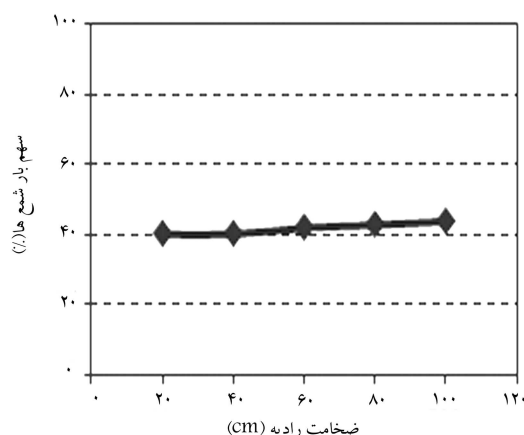
شکل ۹. نشست متوسط پی به ازای قطرهای مختلف شمع‌ها.



شکل ۱۰. سهم بار شمع‌ها به ازای قطرهای مختلف شمع‌ها.



شکل ۷. نشست در طول خط مرکزی پی برای ضخامت‌های مختلف رادیه.



شکل ۸. سهم باربری شمع‌ها به ازای ضخامت‌های مختلف رادیه.

و ممکن است خاک از کف رادیه فاصله بگیرد؛ بدین ترتیب دوباره تمامی بار بر روی شمع‌ها اعمال می‌شود.<sup>[۴]</sup>

در مقابل، همان‌گونه که در مقدمه بیان شد، استفاده از رادیه-شمع مزایای زیادی را به همراه دارد. از طرفی وجود رس نرم در مناطق مهمی نظیر ماهشهر که بسیاری از پروژه‌های مهم ملی در آنجا در حال انجام است، این ضرورت را ایجاد کرد تا کارایی این نوع پی در این‌گونه مناطق مورد ارزیابی قرار گیرد.

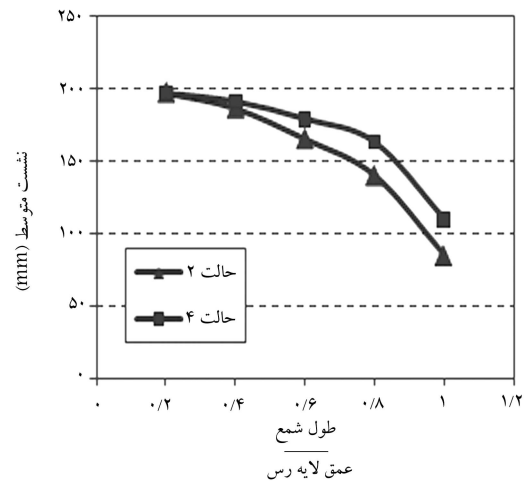
مطالعات پارامتریک نشان داد که رادیه - شمع در خاک رس نرم نمی‌تواند نشست کلی سیستم را به مانند گروه شمع کاهش دهد. اما با طراحی بهینه‌ی رادیه - شمع (از نظر هندسه‌ی پی)، می‌توان به گونه‌ی عمل کرد که پی تحت بارهای اعمالی از سوی سازه دارای نشست تفاضلی کمی باشد. بنابراین استفاده از رادیه‌ی شمع به جای گروه شمع برای سازه‌هایی نظیر مخازن فولادی ذخیره‌ی آب (که نشست‌هایی در حدود ۱۰۰ تا ۱۵۰ میلی‌متر هم مشکلی در عملکرد آن‌ها ایجاد نمی‌کند)، گزینه‌ی مناسب به نظر می‌رسد.

بر مبنای مطالب بیان‌شده، نویسندگان این نوشتار در حال ارزیابی دامنه‌ی کاربرد رادیه - شمع در خاک ماهشهر (با استفاده از اطلاعات پروژه‌ی احداث مخازن آب سر بندر) هستند. نتایج حاصل از آن در نوشتارهای آتی ارائه خواهد شد.

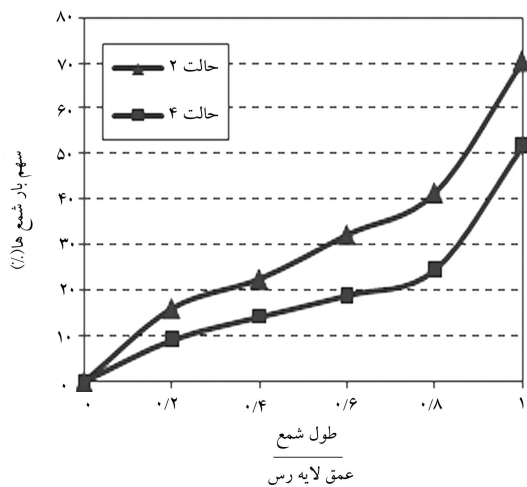
## ۵. نتیجه‌گیری

در این نوشتار، به مطالعه‌ی تأثیر مشخصات هندسی پی رادیه - شمع بر رفتار آن در خاک‌های نرم تحت شرایط زهکش شده پرداخته شده است. نحوه‌ی چیدمان شمع‌ها در زیر رادیه، ضخامت رادیه، طول، و قطر شمع‌ها، پارامترهایی‌اند که در تحلیل‌های انجام‌شده مورد بررسی قرار گرفته‌اند. با انجام این مطالعه، این نتایج حاصل شد:

۱. نتایج نشان می‌دهد پی رادیه - شمع در خاک نرم دارای نشست نسبتاً زیادی است. اما در مقابل می‌توان با انتخاب مناسب مشخصات هندسی رادیه - شمع، نشست تفاضلی را به‌نحو مطلوبی کنترل کرد. لذا در پروژه‌هایی که نشست کلی پی خیلی محدودیت‌زا نباشد، می‌توان از رادیه - شمع در خاک رس نرم بهره برد.
۲. نحوه‌ی چیدمان شمع‌ها در زیر رادیه تأثیر بسزایی بر عملکرد پی دارد؛ به گونه‌ی پی که می‌توان از شمع‌های کم‌ترولی با چیدمان مناسب‌تر در رادیه - شمع استفاده کرد و میزان نشست متوسط و تفاضلی پی را کاهش داد، بارورده را به‌نحو مطلوبی بین شمع‌ها توزیع کرد و سهم شمع‌ها را در تحمل بارورده در حد قابل قبولی نگه داشت.
۳. مطالعات نشان داد که ضخامت رادیه تأثیر چندانی بر سهم باربری رادیه و یا شمع‌ها ندارد. همچنین مطابق انتظار با افزایش ضخامت رادیه، پی صلب‌تر عمل کرد و میزان نشست تفاضلی پی کاهش یافت.
۴. نتایج از اثر محسوس افزایش قطر شمع‌ها بر زیاد شدن میزان سهم باربری آن‌ها حکایت دارد. همچنین افزایش قطر شمع‌ها نشست متوسط پی را کاهش می‌دهد. در این مطالعه، روند کاهش نشست به ازای افزایش قطر تقریباً خطی به دست آمد.
۵. نتایج بیانگر تفاوت زیاد در میزان نشست پی رادیه - شمع در دو حالت استفاده از شمع‌های متکی بر لایه‌ی متراکم و شمع‌های شناور در لایه‌ی رس نرم است. زمانی که نوک شمع‌ها بر روی یک لایه‌ی متراکم قرار می‌گیرد، نشست سیستم به شدت کاهش می‌یابد و سهم باربری شمع‌ها با افزایش طول آن‌ها زیادتر می‌شود. سهم بار شمع‌ها در حالت اتکای آن‌ها بر یک لایه‌ی متراکم، رشد قابل ملاحظه‌ی نسبت به شمع‌های شناور در لایه‌های نرم می‌یابد.



شکل ۱۱. نشست متوسط پی به ازای طول شمع‌های مختلف.



شکل ۱۲. سهم بار شمع‌ها به ازای طول شمع‌های مختلف.

در شکل ۱۱ آمده است. به وضوح دیده می‌شود که افزایش طول شمع‌ها منجر به کاهش نشست پی شده است. این کاهش نشست در حالتی که نوک شمع‌ها بر روی لایه‌ی متراکم ماسه‌ی قرار می‌گیرند، محسوس‌تر است.

سهم باربری شمع‌ها با افزایش طول آن‌ها زیادتر می‌شود (شکل ۱۲). سهم بار شمع‌ها در حالت اتکای آن‌ها بر یک لایه‌ی متراکم، رشد چشمگیری نسبت به شمع‌های شناور در لایه‌ی رس نرم می‌یابد؛ به گونه‌ی پی که سهم باربری شمع‌ها با طول ۲۰ متر در حدود ۲ برابر شمع‌ها با طول ۱۶ متر است.

## ۴. بحث و کاربرد مهندسی

استفاده از رادیه - شمع در زمین‌های نرم به دلایلی در میان مهندسان ژئوتکنیک محبوبیتی ندارد که ۲ دلیل عمده آن عبارتند از:

۱. خاک رس نرم عموماً دارای ظرفیت باربری اندک و سختی ناچیز است و بیشتر میزان بار را شمع‌ها تحمل می‌کنند.
۲. بر اثر عواملی نظیر زهکش شدن خاک، در رس نرم نشست زیاد ایجاد می‌شود

## پانوشتها

1. Piled-raft
2. mesh

## منابع (References)

1. Randolph, M.F. "Design Methods for pile groups and piled rafts", *13th Int. Conf. SMFE*, New Delhi, **5**, pp. 61-82 (1994).
2. Horikoshi, K. and Randolph, M.F. "A contribution to optimal design of piled rafts", *Geotechnique*, **48**(3), pp. 301-317 (1998).
3. Poulos, H.G. "Piled-raft foundation: Design and applications", *Geotechnique*, **51**(2), pp. 95-113 (2001).
4. Poulos, H.G. "Piled raft and compensated piled raft foundations for soft soil sites", *Geotechnical Special Publication*, **129**, pp. 214-234 (2005).
5. Tan, Y.C., Chow, C.M. and Gue, S.S. "Piled raft with different pile length for medium-rise buildings on very soft clay", *16th Int. Conf. ICSMGE*, Osaka, pp. 2045-2048 (2005).
6. Hibbitt, Karlsson and Sorensen, *ABAQUS/Standard User's Manual*, Dallas, HKS Inc. (2007).
7. Lee, J., Kim, Y. and Jeong, S. "Three-dimensional analysis of bearing behavior of piled raft on soft clay", *Computers and Geotechnics*, **37**(1-2), pp. 103-114 (2010).
8. Horikoshi, K. and Randolph, M.F. "Centrifuge modelling of piled raft foundations on clay", *Geotechnique*, **46**(4), pp. 741-752 (1996).

# EVALUATION OF THE EFFECT OF GEOMETRIC CHARACTERISTICS OF A PILED-RAFT ON ITS BEHAVIOR ON SOFT CLAY UNDER DRAINED CONDITIONS

**K. Fakharian** (corresponding author)

kfakhari@aut.ac.ir

**M.R. Khanmohammadi**

mrkh65@yahoo.com

Dept. of Civil and Environmental Engineering  
Amirkabir University of Technology

Sharif Civil Engineering Journal

Volume 29, Issue 2, Page 71-76, Original Article

© Sharif University of Technology

- Received 3 April 2011; received in revised form 22 October 2011; accepted 3 April 2012.

## Abstract

Combined piled-raft foundations (CPRF), is an innovative idea proposed since the 1970s. Adding piles to raft foundations contributes to settlement reduction and an increase in the bearing capacity of the raft. Generally speaking, CPRF helps in considerably reducing the number of piles and pile lengths, improving serviceability in both total and differential settlements, and minimizing tilt and instability probabilities. Reduction in the number and length of piles also contributes to considerable saving in construction cost. The applicability of the construction of piled-raft foundations on soft clay has been under greater attention in recent years. Lack of sufficient stiffness for soil and, thus, excessive settlement, allowing mobilization of pile loads, is a major concern in this regard. This paper presents a numerical investigation into the effects of geometrical variations of piled-raft components on soft clay, as a parametric study.

A 3D FEM numerical model is developed using ABAQUS. The model was calibrated by comparing physical and numerical modeling of other researchers. An elaborate parametric study was then conducted to evaluate the effect of various parameters on CPRF applicability on soft clay. In this study, attention was focused on the drained (long-term) response of a piled-raft resting on a soft clay layer, so the clay was idealized using drained shear strength parameters,  $c'$  and  $\phi$ . Thus, consolidation effects were neglected. In all analyses vertical uniform loading was applied to the top of the raft surface. The results indicate that pile arrangements under the raft play an important role in piled-raft performance. An increase in pile length and diameter results in settlement reduction and an increase in the pile contribution ratio. An increase in raft thickness reduces differential settlements, but has no considerable effect on the pile and/or raft bearing ratio.

Overall, the construction of pile-rafts on soft clay is

promising, as long as the total settlement of the structure is not imposing restrictions, such as the common 20 mm allowable settlement. But, instead, if the allowable settlements are in the range of 100 to 150 mm, for example, in the case of rigid steel tanks, the method will be applicable, with considerable cost and construction time savings.

**Key Words:** Piled-raft, soft clay, numerical modeling, parametric study.