

عملکرد ژئوتکنیکی سیستم رادیه مرکب با ملاحظه‌ی متغیرهای شمع‌های منفصل

سعید صالحی ملکناه (کارشناس ارشد)

ابوالفضل اسلامی* (دانشیار)

دانشکده‌ی مهندسی عمران و محیط زیست، دانشگاه صنعتی امیرکبیر

مهندسی عمران شریف (زمستان ۱۳۹۲)
دوری ۲ - ۲۹، شماره‌ی ۳، ص. ۳۷-۴۴

استفاده از شمع‌های کاهنده‌ی نشست در طراحی فونداسیون رادیه مرکب (PRF)، سبب کاهش تعداد و یا ابعاد شمع‌ها می‌شود. در این حالت امکان ایجاد تنش محوری بالا در شمع‌ها و یا آسیب به اتصالات وجود خواهد داشت. یک گزینه استفاده از سیستم رادیه مرکب با شمع‌های منفصل است. در این تحقیق با استفاده از نرم‌افزار ABAQUS، ضمن مدل‌سازی سیستم رادیه مرکب مدل فیزیکی، موارد عملی و مطالعه‌ی موردی، به بررسی نشست، تنش تماسی، و تنش محوری شمع پرداخته شده است. در ادامه، تأثیر ارتفاع شکاف و چیدمان شمع‌ها در پلان بررسی و آرایش بهینه معرفی شده است. نتایج نشان می‌دهند که با استفاده از شمع‌های منفصل، نسبت بار شمع‌ها به کل بار کاهش و صفحه‌ی خنثی به اعماق پایین‌تر انتقال می‌یابد. همچنین با کاهش ارتفاع شکاف، تنش محوری بیشینه‌ی شمع و نسبت بار شمع به کل بار افزایش، و با تمرکز شمع‌های منفصل در مرکز رادیه، نشست و مجموع تنش شمع‌ها کاهش می‌یابد.

واژگان کلیدی: فونداسیون رادیه مرکب (PRF)، شمع‌های منفصل، مدل‌سازی عددی، بهینه‌سازی، شکاف (Gap).

۱. مقدمه

طراحی گروه شمع معمولاً با اتخاذ ضریب اطمینان بالایی برای شمع‌هاست و معیار اصلی طراحی، ظرفیت باربری گروه است. در این حالت آرایش شمع‌ها در گروه به گونه‌ی بی‌سبب است که کل بار روسازه را تحمل کند. اگرچه کلاهک که اغلب یک پی گسترده است، در تماس با خاک است؛ اما سهم آن در باربری و رفتار گروه در نظر گرفته نمی‌شود.^[۱] در این حالت می‌توان از مفهوم طراحی رادیه مرکب (PRF) استفاده کرد. در طراحی رادیه مرکب، تقسیم بار بین رادیه و شمع‌ها صورت می‌گیرد و شمع‌ها به اندازه‌ی ظرفیت باربری شمع تنها و یا حتی بیشتر از آن تحت بار قرار می‌گیرند. بنابراین فونداسیون رادیه مرکب سبب کاهش نشست کل و غیریکتاخت به شیوه‌ی کاملاً بهینه‌تر از مفهوم گروه شمع می‌شود. در طراحی رادیه مرکب مرسوم، تعداد شمع‌ها معمولاً زیاد است و بار تحمل شده توسط هر شمع نسبتاً کم است که باعث حاشیه‌ی اطمینان بالایی در مورد ظرفیت باربری ژئوتکنیکی یا بارگسیختگی سازه‌ی این شمع‌ها می‌شود. معمولاً ظرفیت ژئوتکنیکی شمع‌ها در برابر مقاومت فشاری مصالح شمع تعیین‌کننده است. همچنین به علت تعداد زیاد شمع‌های استفاده شده و اتصالات مناسب، مقاومت شمع‌ها در برابر بارهای افقی کافی است. به منظور کاهش تعداد شمع‌ها، پژوهشگران مفهوم طراحی شمع‌های کاهنده‌ی

* نویسنده مسئول

تاریخ دریافت: ۱۳۸۹/۱۲/۱۸، اصلاحیه ۱۳۹۰/۱۲/۱۵، پذیرش: ۱۳۹۱/۴/۲۴

s.salehi@aut.ac.ir
afeslami@aut.ac.ir

نشست را مطرح کرده‌اند. این مفهوم برای اولین بار در سال ۱۹۷۹ ارائه شده است.^[۲] در این حالت ضریب اطمینان شمع‌ها کاهش می‌یابد. اما در این شرایط ممکن است تنش محوری بالایی در این تعداد کم شمع ایجاد شود. طبق نظریه‌ی ارائه شده در سال ۱۹۹۴ در مفهوم بهینه‌ی طراحی فونداسیون، رادیه مرکب شمع‌ها به گونه‌ی طراحی می‌شوند که نقش اصلی‌شان کاهنده‌ی نشست باشد؛ در حالی که آنها ذاتاً، باعث افزایش ظرفیت باربری نیز می‌شوند.^[۳] واضح است که این رویکرد بهترین حالت برای طراحی اقتصادی است. شکل ۱، رفتار بار-نشست رادیه مرکب را براساس معیارهای طراحی اول و دوم نشان می‌دهد. منحنی ۵، رفتار رادیه‌ی ساده را نشان می‌دهد که در آن مقدار نشست در بار طراحی بسیار زیاد است. منحنی ۱، رویکرد طراحی سنتی را نشان می‌دهد که در آن رفتار گروه شمع بر رفتار سیستم حاکم است و قسمت عمده‌ی این منحنی خطی است. در این حالت بیشتر بارها توسط شمع‌ها تحمل می‌شوند. منحنی ۲، مفهوم شمع خزشی را نشان می‌دهد که در آن شمع‌ها ضریب اطمینان کوچک‌تری دارند؛ اما چون تعداد شمع‌ها کم‌تر است، رادیه نسبت به منحنی ۱ بار بیشتری تحمل می‌کند. منحنی ۳، استراتژی استفاده از شمع‌ها به منزله‌ی کاهنده‌ی نشست و استفاده از ظرفیت کامل شمع‌ها در بار طرح را نشان می‌دهد. در نتیجه، منحنی بار-نشست در بار طرح خطی نیست، اما سیستم فونداسیون حاشیه‌ی اطمینان کافی دارد و معیار نشست نیز برآورده شده است. بنابراین طراحی براساس منحنی ۳ اقتصادی‌تر از طراحی براساس منحنی‌های ۱ و ۲ خواهد بود.^[۴]

Messe Turhaus در آلمان، مدل فیزیکی و مورد مطالعاتی پرداخته می‌شود. به منظور بررسی رفتار سیستم رادیه مرکب، به بررسی نشست، تنش تماسی خاک زیر رادیه، تنش محوری شمع و نسبت بار شمع به کل بار پرداخته شده است.

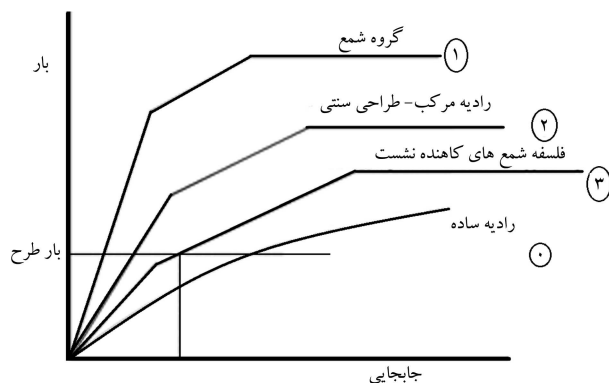
۲. سیستم رادیه مرکب با شمع‌های منفصل

پژوهشگران در سال ۱۹۷۹ در مروری بر سیستم‌های رادیه مرکب، نشان دادند که اگر خاک زیر رادیه به‌عنوان یک محیط کشسان مسلح‌شده در نظر گرفته شود، کاهش مقدار نشست قابل ملاحظه است.^[۷] بنابراین رویکردی جدید در طراحی فونداسیون‌ها، می‌تواند معرفی شمع‌ها فقط به‌منزله‌ی ابزاری برای بهبود پارامترهای سختی خاک باشد. این کار می‌تواند با انفصال این شمع‌ها از رادیه انجام گیرد. در این صورت فاصله‌ی ایجادشده بین رادیه و شمع‌ها سبب می‌شود شمع‌ها مستقیماً بارهای روسازه را تحمل نکنند. وقتی این شمع‌های کاهنده‌ی نشست به رادیه متصل نباشند، می‌توان نسبت به شمع‌های ساختمانی ضریب اطمینان بسیار کوچک‌تری در برابر گسیختگی سازه‌ی انتخاب کرد و این در حالی است که هیچ تخلفی از آیین‌نامه‌های مختلف ساختمانی صورت نمی‌گیرد و از آنجایی که می‌توان ظرفیت ژئوتکنیکی نهایی را کاملاً بسیج‌شده فرض کرد، دیگر ملاحظات سازه‌ی این شمع‌های کاهنده نشست بحرانی نیست.

همچنین از آنجایی که این شمع‌ها اعضای اصلی تحمل‌کننده‌ی بار نیست، می‌توان تفاوت‌ها و عدم قطعیت‌های اندک در بارها و مقاومت‌مصلح را نادیده گرفت. حتی بعضی ترک‌های کوچک در شمع‌ها ممکن است نقش مهمی در کاهش تقویت خاک زیری نداشته باشند. در اینجا ضریب اطمینان کوچکی در حد ۱/۳ را می‌توان در برابر گسیختگی سازه‌ی مصالح شمع اعمال کرد. بنابراین به این شمع‌های کاهنده‌ی نشست منفصل اجازه داده می‌شود نسبت به شمع‌های متصل به رادیه، بارهای بزرگ‌تری تحمل کنند که این موضوع باعث صرفه‌ی اقتصادی می‌شود. به‌علاوه خسارات احتمالی به اتصالات سازه‌ی دیگر یک موضوع مهم در طراحی نیست و بارهای افقی می‌توانند به‌طور مؤثر از طریق نیروی چسبندگی بسیج‌شده در فصل مشترک رادیه - خاک انتقال یابند. همچنین به علت اینکه معمولاً ساخت فونداسیون رادیه برای ساختمان‌های بلند همراه با زیرزمین است، نیروهای افقی می‌توانند توسط فشار مقاوم در دیوارهای زیرزمین تحمل شوند.^[۴]

۳. مدل‌سازی عددی سیستم رادیه مرکب

سه روش را می‌توان به‌منزله‌ی روش‌های تحلیل فونداسیون رادیه مرکب معرفی کرد. این سه روش عبارت‌اند از: روش‌های تحلیلی، آزمایشگاهی، و عددی. روش‌های عددی مختلفی را نیز می‌توان برای تحلیل فونداسیون رادیه مرکب استفاده کرد که این روش‌ها عبارت‌اند از: روش المان مرزی، روش‌های ساده‌شده‌ی اجزای محدود، روش‌های اجزای محدود سه‌بعدی، و روش‌های ترکیبی. مدل‌سازی در این تحقیق با استفاده از روش اجزای محدود دو بعدی و سه‌بعدی و به کمک نرم‌افزار ABAQUS انجام گرفته است. ABAQUS نرم‌افزاری است که با استفاده از آن می‌توان گستره‌ی وسیعی از مسائل خطی و غیرخطی شامل مسائل استاتیکی، دینامیکی، انتقال حرارت و الکترونیکی را تحلیل کرد.^[۸] برای مدل‌سازی شمع و خاک از المان‌های Solid Continuum سه بعدی (C3D) و برای مدل‌سازی رادیه از المان‌های S3 (المان شل ۳ گره‌ی) استفاده شده است. سطح تماس رادیه و خاک به‌صورت زبر^۲

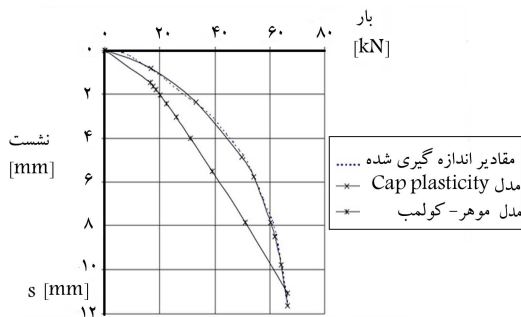


شکل ۱. منحنی‌های بار-نشست رادیه مرکب بر اساس فلسفه‌های مختلف طراحی.

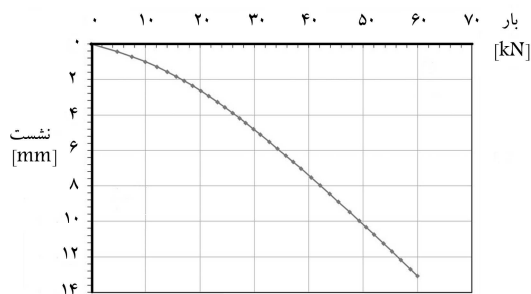
برای طراحی سیستم رادیه مرکب بهتر است ابتدا عملکرد فونداسیون رادیه بدون حضور شمع‌ها مورد بررسی قرار گیرد. اگر رادیه ساده سهم کمی از ظرفیت باربری مورد نیاز را فراهم می‌کند، بهتر است تا طراحی فونداسیون رادیه مرکب به طریق سنتی که در آن شمع‌ها برای اکثر بار روسازه طراحی می‌شود، انجام شود و رادیه فقط برای بهبود عملکرد شمع‌ها و کاهش اندک مازومات طراحی شمع‌ها در نظر گرفته شود. اما اگر رادیه ساده، ظرفیت باربری کافی و یا نزدیک به ظرفیت باربری مورد نیاز را داشته باشد، ولی معیارهای نشست کل یا نشست غیریکتواخت را برآورده نسازد، می‌توان شمع‌ها را به‌صورت کاهنده‌ی نشست طراحی کرد.^[۵] اما در سیستم رادیه مرکب معمولی، چون شمع‌ها به رادیه متصل‌اند و به سبب سختی بیشتر شمع‌ها در برابر رادیه، سهم قابل توجهی از بار به آنها می‌رسد و نقش رادیه در باربری کم‌رنگ جلوه می‌کند. در این حالت چون تعداد شمع‌ها عمدتاً زیاد است، بار تحمل‌شده توسط هر شمع نسبتاً کم است. واضح است که در صورت استفاده از شمع‌های کاهنده‌ی نشست و کاهش ضریب اطمینان ژئوتکنیکی و سازه‌ی در طراحی شمع‌ها، تعداد یا ابعاد شمع‌ها کاهش می‌یابد.

بر اساس پژوهشی در سال ۱۹۹۳ فرض می‌شود ظرفیت ژئوتکنیکی شمع‌ها تحت شرایط بهره‌برداری^۱ تا میزان ۸۰٪ بسیج شود.^[۶] در چنین وضعیتی می‌توان ضریب اطمینان کمتری به ظرفیت ژئوتکنیکی شمع‌ها اعمال کرد. در این حالت چون عموماً ظرفیت باربری رادیه ساده کافی است، عملکرد سیستم رادیه مرکب هنوز رضایت‌بخش است، اما این شمع‌ها که با فاصله‌ی زیاد در زیر رادیه قرار گرفته‌اند، ممکن است مقاومت جانبی کافی در برابر بارهای افقی ایجاد نکنند. بنابراین بسیاری از پژوهشگران و مشاوران از استفاده از شمع‌های کاهنده‌ی نشست برای سازه‌های قرارگرفته بر فونداسیون رادیه در نواحی فعال لرزه‌ی یا نواحی با بارهای جانبی بزرگ که از باد ناشی می‌شود، تردید دارند. مثلاً در جا کارتای اندونزی به دلیل اینکه این طرح را مسئولان امر ساختمان تأیید نمی‌کنند، برای استفاده از این شمع‌های کاهنده‌ی نشست تمایلی ندارند. این عدم تأیید به علت آسیب احتمالی به اتصالات بین تعداد کم شمع و رادیه طی یک زلزله است.^[۴] همچنین به علت سختی جانبی بیشتر شمع‌ها در برابر رادیه، بیشتر بار جانبی نیز به شمع می‌رسد. در این حالت ممکن است این شمع‌ها مقاومت جانبی کافی ایجاد نکنند و احتمال آسیب به اتصالات سازه‌ی نیز وجود خواهد داشت. در این شرایط یک گزینه، می‌تواند استفاده از سیستم رادیه مرکب با شمع‌های منفصل باشد.

در این تحقیق با استفاده از روش اجزای محدود دو بعدی تقارن محوری و روش اجزای محدود سه‌بعدی و با استفاده از نرم‌افزار ABAQUS به بررسی سازه‌های مهم ابزارگذاری شده مانند ساختمان ۲۵۶ متری Messeturm و ساختمان

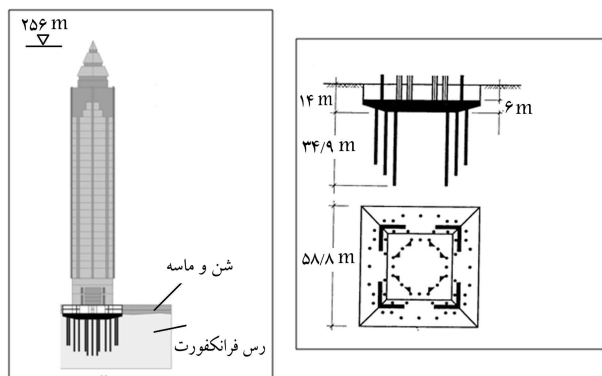


شکل ۱. الف) نتایج ارائه شده در ادبیات فنی؛ [۱۱]



شکل ۲. ب) نتایج این تحقیق.

شکل ۳. منحنی‌های بار-تغییر مکان به دست آمده از آزمایشگاه و مدل‌سازی عددی.

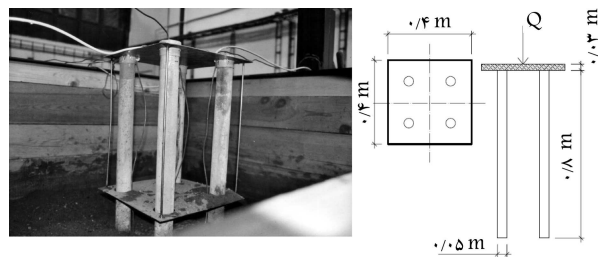


شکل ۴. فونداسیون رادیه مرکب برای برج Messeturm [۴]

از المان‌های تقارن محوری^۴ استفاده شده است. استفاده از این نوع آنالیز به علت سهولت مدل‌سازی و کاهش زمان حل مسئله نسبت به آنالیزهای سه‌بعدی مقرون به صرفه است. در این فونداسیون رادیه‌ی مربع‌شکل با دایره‌ی به شعاع ۳۳ m جایگزین و فرض شده است که شعاع‌های با طول ۲۷، ۳۱ و ۳۵ متر به ترتیب در ۳ نوار به شعاع‌های ۲۷، ۲۱ و ۱۲ متر قرار گرفته‌اند. به منظور مدل‌سازی شعاع‌ها از نوارهایی با مدول کشسانی معادل استفاده شده است (رابطه‌ی ۲).

$$E_{eqps} = \frac{n_{ringi} A_p E_p}{2\pi R_i B} \quad (2)$$

که در این رابطه، E_{eqps} ، مدول کشسانی میانگین شعاع‌ها، n_{ringi} تعداد شعاع‌ها در رینگ i ، A_p سطح مقطع عرضی شعاع، E_p مدول کشسانی مصالح شعاع، R_i شعاع رینگ i ام، و B قطر شعاع است.^[۱] با توجه به ضخامت متغیر رادیه، رادیه با ۳ ضخامت متغیر مدل و ضخامت آن در کناره ۳ m و در وسط ۶ m در نظر گرفته شده است. به این ترتیب مدول کشسانی شعاع‌ها به صورت جدول ۲ معادل شده است.



شکل ۵. آزمایش مدل فیزیکی فونداسیون رادیه مرکب در پراگ. [۱۱]

جدول ۱. مشخصات خاک و شمع در مدل‌سازی رادیه مرکب آزمایشگاهی. [۷]

مصالح	γ (kN/m ³)	ϕ (°)	C (KPa)	ν	E (MPa)
بتن شمع و رادیه	۲۵	-	-	۰٫۲	۳۰۰۰۰
ماسه	۱۸	۲۹	۵	۰٫۲۵	۱۰

مدل شده است. یعنی اجازه‌ی هیچ‌گونه لغزشی در نقاط اتصال داده نمی‌شود. سطح تماس شمع و خاک دارای اصطکاک است که با اصطکاک به روش کولمب اصلاح و با ضریب μ مدل شده است. با توجه به پیشنهادی در سال ۲۰۰۲،^[۹] تغییر شکل ۵ mm برای بسیج کامل اصطکاک جداری و ضریب μ با فرمول پیشنهادی دیگری (۱۹۹۸) مطابق رابطه‌ی ۱ انتخاب شده است:^[۱۰]

$$\mu = \tan(\delta)$$

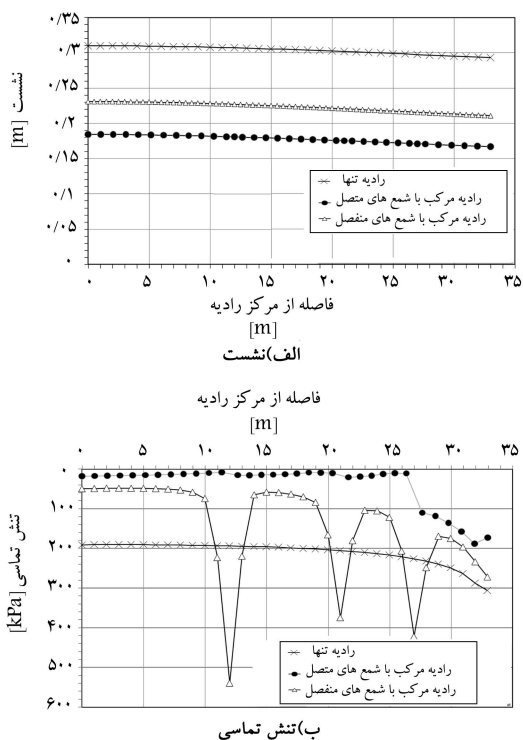
$$\delta = \tan^{-1}(\sin \phi' \times \cos \phi' / (1 + \sin^2 \phi')) \quad (1)$$

در این رابطه، ϕ' زاویه‌ی اصطکاک مؤثر خاک بر حسب درجه است. به منظور کالیبراسیون مدل‌سازی، رادیه مرکب همراه با ۴ شمع مانند مدل فیزیکی در آزمایشگاه CEG FCE CTU پراگ (شکل ۲) آنالیز شده است.^[۱۱] برای مدل‌سازی خاک، ابعاد خاک برابر با اندازه‌ی جعبه‌ی حاوی آن در نظر گرفته شده است. همچنین به علت تقارن فقط ۱/۴ کل مدل آنالیز شده است. رادیه با ابعاد $۰٫۴ \times ۰٫۴ \times ۰٫۳$ متر) در نظر گرفته شده است. شمع‌ها به قطر ۰٫۰۵ m و با طول ۰٫۸ m هستند. مشخصات خاک ماسه‌ی رس‌دار و شمع در جدول ۱ آورده شده است. به منظور بررسی رفتار بار-نشست، باری برابر با ۶۰ kN در مرکز رادیه وارد شده است. به منظور صحت‌سنجی نتایج مدل با نتایج مدل‌های قبلی و نتایج به دست آمده از آزمایشگاه، منحنی‌های بار-تغییر مکان رادیه مرکب در شکل ۳ آورده شده است. با توجه به نتایج می‌توان دید که نتایج آنالیز، اختلاف اندکی با مقادیر اندازه‌گیری شده دارند.

۴. بررسی موارد عملی^۳ و ارزیابی فاکتورهای مؤثر ۱.۴. ساختمان Messeturm

برج Messeturm با ارتفاع ۲۵۶ m، بلندترین ساختمان در اروپا در زمان ساخت آن بود. این ساختمان متشکل از رادیه‌ی به ضخامت ۶ m در بخش مرکزی است که ضخامت آن در لبه‌ها به ۳ m کاهش می‌یابد. ۶۴ شمع در ۳ دایره‌ی هم‌مرکز آرایش یافته‌اند. شمع‌ها ۱/۳ m قطر دارند و طول آنها از ۲۶/۹ m تا ۳۴/۹ m تغییر می‌کند (شکل ۴).

با توجه به اینکه در فونداسیون رادیه مرکب ساختمان Messeturm، آرایش شمع‌ها و نوع بارگذاری بسیار شبیه به حالت تقارن محوری است، به منظور مدل‌سازی



شکل ۵. مقایسه‌ی دیاگرام نشست و تنش تماسی زیر رادیه برای فونداسیون‌های رادیه‌ساده، رادیه با شمع‌های متصل و منفصل.

مقادیر نشست سیستم رادیه مرکب با شمع‌های منفصل ($Gap = 0.5\text{ m}$) نزدیک به شمع‌های متصل است و همان‌گونه که از شکل ۵ مشخص است، انفصال شمع‌ها از کارایی‌شان در کاهش نشست فونداسیون نمی‌کاهد. مقادیر تنش تماسی (شکل ۵) در زیر رادیه نشان می‌دهد که در سیستم رادیه با شمع‌های متصل، مقادیر تنش تماسی کمتر از دو حالت دیگر است و در حالت رادیه‌ساده تنش تماسی بیشینه است. اما در حالت رادیه با شمع‌های منفصل تنش تماسی بیشتر از سیستم رادیه با شمع‌های متصل است. در حالت رادیه با شمع‌های منفصل با انفصال شمع‌ها از رادیه به علت نیروهای کشش رو به پایین که به علت انتقال نیرو به شمع‌های منفصل به وجود می‌آید، فشار تماسی در اطراف شمع‌ها به مقدار زیادی افزایش می‌یابد. اما این مقادیر در فاصله‌ی بین شمع‌ها تعدیل می‌یابد و بسیار کمتر از ظرفیت باربری رادیه می‌شود. مقدار دقیق تمرکز تنش و تغییرات تنش تماسی بین شمع‌ها مستازم استفاده از مدل‌های رفتاری دقیق‌تر، استفاده از المان‌های کوچک‌تر در بین شمع‌ها و استفاده از المان‌های سطح مشترک (برای ایجاد امکان لغزش بین پی و خاک و توزیع مجدد تنش) است و با توجه به محدودیت‌های تحلیل (برای مثال مدل کشسان خطی همراه با معیار گسیختگی موهر-کولمب) حصول مقادیر دقیق این تنش‌ها مشکل است.

۲.۴. ساختمان Messe Torhaus

فونداسیون این ساختمان ۳۰ طبقه که در سال‌های ۱۹۸۲-۱۹۸۴ ساخته شده است، اولین فونداسیون رادیه مرکب ساخته شده در آلمان به‌شمار می‌رود (شکل ۶). این ساختمان ۴۰۰ MN وزن و ۱۳۰ m ارتفاع دارد. عبور یک خیابان و یک کالورت بزرگ فاضلاب باعث شده است تا رادیه به ۲ بخش تقسیم شود که هر یک ۲/۵ m ضخامت دارند و با ۴۲ شمع درجا تقویت می‌شوند. فاصله‌ی بین دو رادیه ۱۰

جدول ۲. مدول کشسانی معادل شمع‌ها به منظور استفاده در مدل دوبعدی ساختمان Messeturm.

شمع	مدول کشسانی (MPa)
ردیف داخلی (۳۵ متری)	۵۴۱۶
ردیف میانی (۳۱ متری)	۳۸۶۹
ردیف بیرونی (۲۷ متری)	۳۹۱۷

جدول ۳. خصوصیات مصالح به منظور استفاده در مدل ساختمان Messeturm [۸].

مصالح	E (MPa)	ν	C (KPa)	φ (°)	γ (kN/m^3)
بتن رادیه	۳۴۰۰۰	۰/۲	-	-	۲۵
بتن شمع	۲۵۰۰۰	۰/۲	-	-	۲۵
رس فرانکفورت	۵۰	۰/۱۵	۲۰	۲۰	۱۹
سنگ آهک فرانکفورت	۲۰۰۰	۰/۲۵	۱۰۰۰	۱۵	۲۲

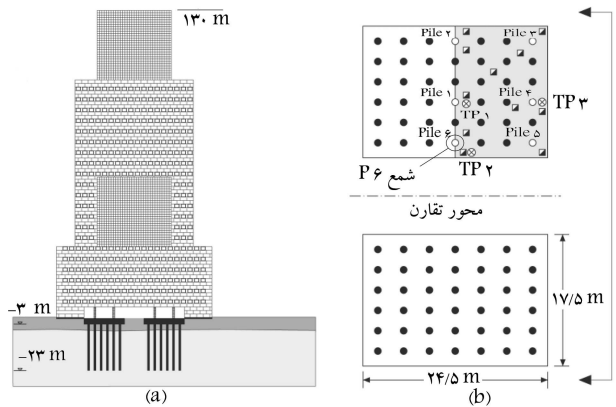
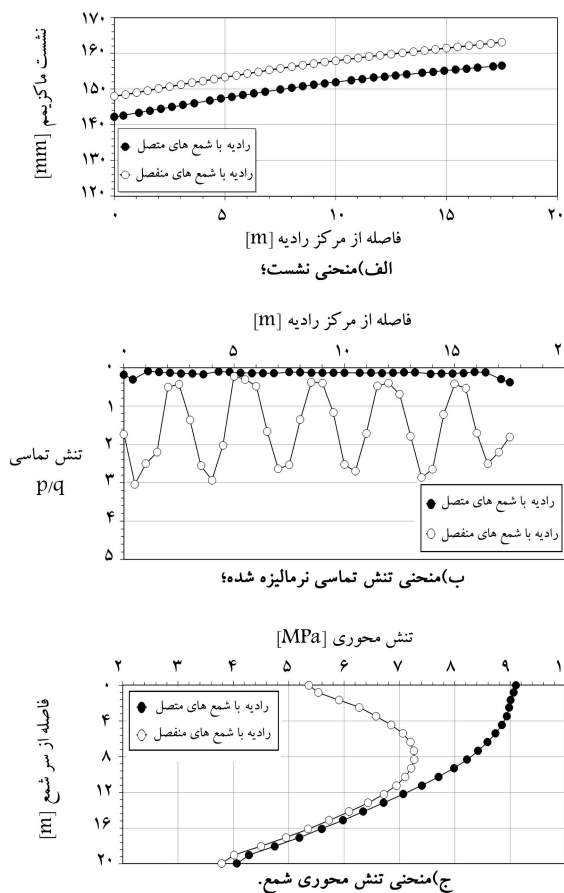
خاک زیر رادیه از ۳ لایه تشکیل شده است: لایه‌ی اول از ماسه و شن که تقریباً ۱۰ متر زیر سطح زمین امتداد یافته است. در زیر این لایه، خاک رس فرانکفورت ۵ به عمق ۷۴/۸ m و در زیر آن سنگ آهک فرانکفورت ۶ به عمق ۵۵/۲ m قرار دارد. به منظور مدل‌سازی مصالح رادیه و شمع از بتن با رفتار کشسان خطی و برای مدل‌سازی رس فرانکفورت و سنگ آهک فرانکفورت از مدل رفتاری موهر-کولمب استفاده شده است، که پارامترهای آن در جدول ۳ آورده شده است. به دلیل آنکه به منظور اجرای فونداسیون ۸ متر خاک برداری شده است و همچنین به علت سهولت مدل‌سازی از لایه‌ی ماسه و شن صرف‌نظر شده است. در ساختمان Messeturm جهت اجرای فونداسیون سطح آب حدود ۱۰ متر پایین آورده شده و پس از اتمام مراحل اجرایی سطح آب در تراز بالاتر از رادیه قرار گرفته است، به همین منظور در مدل‌سازی، وزن مؤثر بتن فونداسیون و با احتساب ضخامت میانگین رادیه در نظر گرفته شده است.

بارگذاری در ۴ مرحله صورت گرفته است: در مرحله‌ی اول تنش‌های اولیه به خاک اعمال شده است. در مرحله‌ی دوم به اندازه‌ی ۸ متر خاک برداری و در مرحله‌ی سوم وزن رادیه برابر با ۳۶/۱ KPa روی سطح رادیه اعمال شده است. در مرحله‌ی چهارم بار کل ناشی از روسازه برابر با ۱۵۶۸ MN به‌صورت بار گسترده اعمال شده است. سطح تماس شمع و خاک دارای اصطکاک است که با استفاده از اصطکاک به روش کولمب و با ضریب $\mu = 0.35$ مدل شده است.

همان‌طور که از شکل ۵ مشخص است، بیشینه‌ی نشست در سیستم رادیه با شمع‌های متصل برابر ۱۸ cm محاسبه شده است. در حالی که نشست واقعی اندازه‌گیری شده تقریباً ۱۴/۴ cm است. پژوهشگران در سال ۲۰۰۳، با آنالیز سه‌بعدی مقدار نشست را برابر ۱۷/۴ cm محاسبه کرده‌اند. [۱۲] علت اختلاف اندازه‌گیری شده را می‌توان به دلیل استفاده از مدل دوبعدی و در نظر گرفتن شمع‌ها به‌صورت رینگ، به جای حالت استقرار واقعی‌شان بیان کرد. همچنین به منظور تقسیم بار شمع‌ها و رادیه، ضریب رادیه مرکب « α_{pr} » به‌صورت رابطه‌ی ۳ تعریف می‌شود: [۱۲]

$$\alpha_{pr} = \frac{\sum P_{pile}}{\sum P_{total}} \quad (3)$$

که در آن، $\sum P_{pile}$ مجموع بار شمع‌ها و $\sum P_{total}$ مقدار کل بار اعمال شده است. مقدار این ضریب در آنالیز فوق ۰/۵ محاسبه شده است، در حالی که مطابق آخرین مقدار گزارش شده ۰/۴۳ و مقدار اندازه‌گیری شده در سال ۲۰۰۳، ۰/۶۳ [۱۱] است.



شکل ۶. فونداسیون رادیه مرکب برای برج Messe Turhaus آلمان. [۱۷]

است. شمع‌ها ۲۰ m طول و ۰٫۹ m قطر دارند. ابعاد زمین ساختمان ۲۴٫۵×۴۳ متر است، ولی به علت وجود خیابان مذکور مساحت هر رادیه ۱۷٫۵×۲۴٫۵ متر است. بدون وجود شمع‌ها نشست حدود ۲۵۰ mm تخمین زده می‌شد، ولی فونداسیون رادیه مرکب حدود ۱۲۰ mm نشست کرده است. شرایط خاک محل شامل ماسه و شن تا ۲٫۵ m زیر زمین است و در زیر آن رس فرانکفورت قرار گرفته است. سنگ آهک فرانکفورت نیز خارج از منطقه‌ی تأثیر فونداسیون است. سطح آب زیرزمینی دقیقاً زیر رادیه قرار گرفته است.

به علت تقارن فقط ۱٫۴ مدل در آنالیز سه بعدی مسئله در نظر گرفته شده است. برای مدل‌سازی شمع از المان‌های C3D8R و برای مدل‌سازی خاک از المان‌های C3D4 و برای مدل‌سازی رادیه از المان‌های S3 استفاده و بارگذاری در ۳ مرحله انجام شده است: در مرحله‌ی اول تنش‌های اولیه در خاک ایجاد و در مرحله‌ی دوم وزن رادیه برابر با ۶۲٫۵ KPa به صورت بار گسترده بر سطح رادیه اعمال می‌شود. در مرحله‌ی سوم بار ۴۶۶٫۵ KPa نیز به صورت بار گسترده بر رادیه وارد می‌شود. به منظور مدل‌سازی مصالح رادیه و شمع از بتن با رفتار کشسان خطی و برای مدل‌سازی رس فرانکفورت و سنگ آهک فرانکفورت از مدل رفتاری موهر-کولمب استفاده شده است که پارامترهای آن در جدول ۴ آورده شده است.

نتایج نشست، تنش تماسی نرمالیزه شده «p/q» (تنش تماسی به تنش متوسط بارگذاری) و تنش محوری شمع در شکل ۷ آورده شده است. نتایج منحنی نشست نشان می‌دهد که مقدار نشست سیستم رادیه مرکب با شمع‌های منفصل (Gap = ۰٫۵ m) بسیار نزدیک به سیستم رادیه مرکب با شمع‌های متصل است و شمع‌ها به طور مؤثری به صورت سخت‌کننده‌ی خاک زیری عمل می‌کنند. مقدار نشست بیشینه‌ی سیستم

جدول ۴. خصوصیات مصالح به منظور استفاده در مدل ساختمان Messe Turhaus. [۱۷]

مصالح	E (MPa)	ν	C (KPa)	φ (°)	γ (kN/m ³)
بتن رادیه	۳۴۰۰۰	۰٫۲	-	-	۲۵
بتن شمع	۲۳۵۰۰	۰٫۲	-	-	۲۵
رس فرانکفورت	۵۰	۰٫۱۵	۲۰	۲۰	۱۹
ماسه	۷۵	۰٫۲۵	۰	۳۲٫۵	۱۸

شکل ۷. دیگرام نشست، تنش تماسی و تنش محوری در شمع P6 برای فونداسیون‌های رادیه با شمع‌های متصل و منفصل در فونداسیون Messe Torhaus.

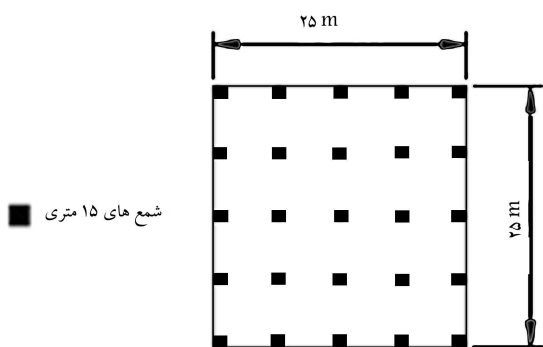
رادیه مرکب با شمع‌های متصل و منفصل به ترتیب ۱۵٫۷ cm و ۱۶٫۳ cm محاسبه شده است. نتایج تنش تماسی در دو سیستم نشان می‌دهد که در سیستم رادیه مرکب با شمع‌های منفصل تنش تماسی بیشتر از رادیه با شمع‌های متصل است. همچنین تمرکز تنش در اطراف شمع‌های منفصل نیز قابل مشاهده است. به علت تعدد شمع‌ها، تمرکز تنش در نقاط زیادی از خاک زیر رادیه رخ می‌دهد. نتایج تنش محوری در شمع نشان می‌دهد که در سیستم رادیه مرکب با شمع‌های منفصل، تنش محوری در شمع کاهش می‌یابد و همچنین محل مقدار بیشینه‌ی تنش در طول شمع -- محل صفحه‌ی خنثی -- به اعماق پایین‌تری انتقال می‌یابد. در محل صفحه‌ی خنثی تغییر مکان نسبی بین شمع و خاک برابر صفر بوده و بیشترین نیروی محوری جهت طراحی سازه‌ی در محل صفحه‌ی خنثی بر شمع اثر می‌کند و نشست گروه شمع برابر نشست در محل صفحه‌ی خنثی است. تنش محوری سر شمع در سیستم رادیه مرکب با شمع‌های منفصل ۵٫۴ MPa و در سیستم رادیه مرکب با شمع‌های متصل ۹٫۱ MPa است. یعنی در شمع‌های منفصل ۴۰٪ کاهش در تنش سر شمع مشاهده می‌شود.

ارتفاع شکاف در سیستم رادیه مرکب با شمع‌های منفصل، فاصله‌ی بین شمع و رادیه است. به منظور بررسی تأثیر ارتفاع شکاف، ۴ ارتفاع شکاف مختلف در نظر گرفته است. نتایج شکل ۸ نشان می‌دهد که با کاهش ارتفاع شکاف، نشست کاهش اندکی می‌یابد. همچنین با کاهش ارتفاع شکاف، مقدار تنش تماسی بیشینه در اطراف شمع افزایش و مقدار آن در فاصله‌ی بین شمع‌ها کاهش می‌یابد. با مقایسه‌ی تنش

۵. آرایش شمعه‌های منفصل در سیستم DCPRF

به منظور بهینه‌سازی آرایش شمعه‌های متصل مطالعاتی انجام شده است، [۱۳، ۱۴] اما تاکنون تحقیقی در مورد آرایش بهینه‌ی شمعه‌های منفصل انجام نشده است. به منظور بررسی آرایش شمعه‌های منفصل از مطالعه‌ی موردی شکل ۱۰ استفاده شده است. به منظور بررسی میزان تأثیر آرایش شمعه‌ها، شرایط خاک زیر رادیه برای تمام آرایش‌های مختلف یکسان فرض شده است. زیرا توزیع بار بین شمعه‌ها و رادیه به مقاومت و سختی خاک نیز بستگی دارد. ابعاد رادیه در پلان ۲۵×۲۵ متر ضخامت آن ۸/۸ m است. این رادیه روی خاکی با مشخصات آورده شده در جدول ۵ قرار دارد. فرض شده است سنگ بستر در عمق ۱۰ m زیر رادیه قرار دارد. شمعه‌ها با مقطع مربعی با بعد ۰/۶ m و با طول ۱۵ m فرض شده است. در حالت پیش فرض، فاصله‌ی بین شمعه‌ها در پلان ۵/۵ m است. به علت تقارن مسئله فقط ۱/۴ مدل در آنالیز سه بعدی مسئله در نظر گرفته شده است. بارگذاری در ۳ مرحله انجام شده است: در مرحله‌ی اول تنش‌های اولیه در خاک ایجاد می‌شوند و در مرحله‌ی دوم وزن رادیه به صورت بار گسترده بر سطح وارد می‌شود. در مرحله‌ی سوم بار ۹۲/۷ KPa نیز به صورت بار گسترده بر رادیه اعمال می‌شود. به منظور مدل‌کردن اندرکنش بین رادیه و شمعه از روش اصلاح‌شده‌ی کولمب استفاده شده است. برای زاویه‌ی اصطکاک $\phi = 20^\circ$ این ضریب ۰/۳ محاسبه می‌شود. به منظور مقایسه‌ی آرایش‌های مختلف شمعه‌های منفصل در پلان ۶ آرایش مختلف در نظر گرفته شده است (شکل ۱۱).

نتایج منحنی نشست نشان می‌دهد که آرایش ۵ کمترین مقادیر نشست بیشینه و غیریکنواخت را دارد. یعنی با تمرکز شمعه‌های بلندتر در مرکز رادیه، نشست بیشینه و به صورت واضح‌تر نشست غیریکنواخت کاهش می‌یابد. همچنین نتایج نشان می‌دهد که آرایش ۲ بیشترین مقدار نشست بیشینه و غیریکنواخت را دارد. یعنی حالتی که شمعه‌های بلند در اطراف و شمعه‌های کوتاه‌تر در وسط قرار گرفته باشند،

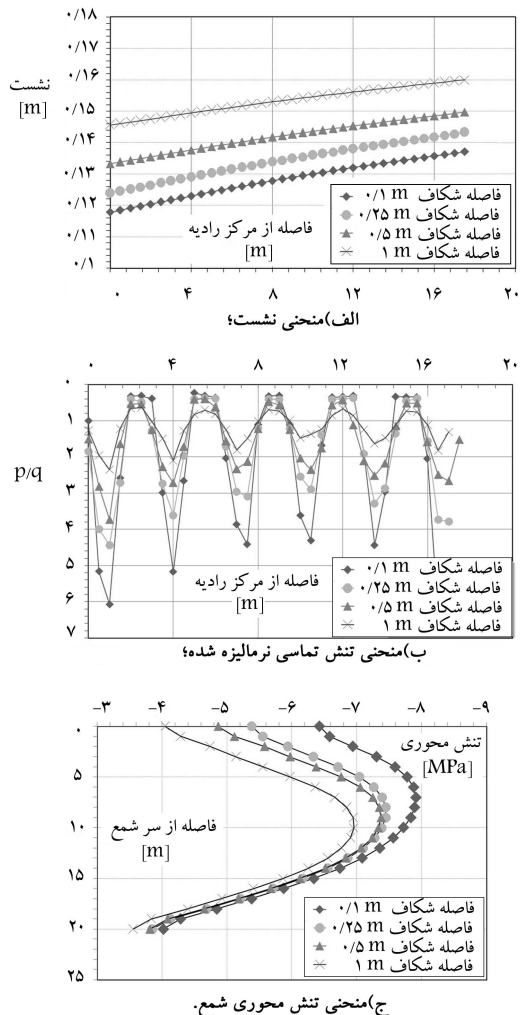


شکل ۱۰. شکل شماتیک فونداسیون رادیه مرکب برای مطالعه‌ی موردی.

جدول ۵. خصوصیات خاک در نظر گرفته شده در سیستم رادیه مرکب مطالعه‌ی موردی.

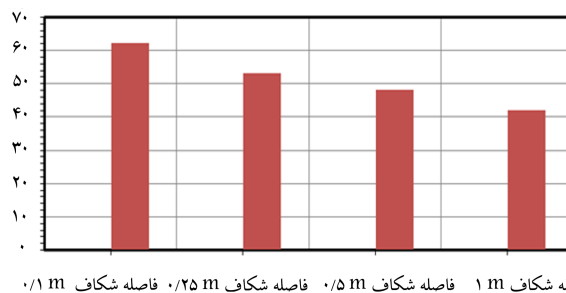
مصالح	E (MPa)	ν	C (KPa)	ϕ ($^\circ$)	λ (kN/m ²)
بتن رادیه	۲۵۰۰۰	۰/۲	-	-	۲۵
بتن شمعه	۲۵۰۰	۰/۲	-	-	۲۵
خاک	۱۵	۰/۳	۲۰	۲۰	۱۹

محوری در شمعه نیز واضح است که هرچه ارتفاع شکاف کمتر شود، تنش محوری بیشینه افزایش و محل تنش محوری بیشینه در طول شمعه به اعماق بالاتری انتقال می‌یابد. همچنین با کاهش ارتفاع شکاف، نسبت بار شمعه‌ها به کل بار افزایش می‌یابد. همان‌طور که مشاهده می‌شود با کاهش ارتفاع Gap از ۱ m به ۱۰ cm این نسبت از ۴۲٪ به ۶۲٪ افزایش می‌یابد (شکل ۹).

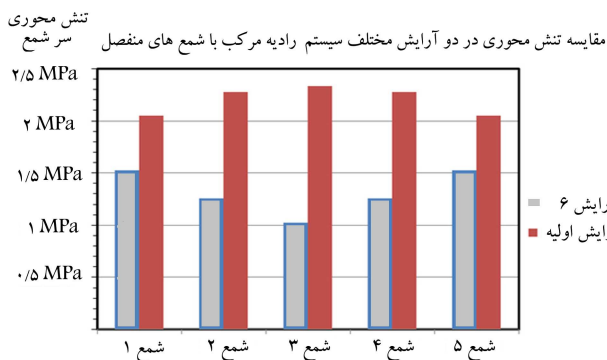


شکل ۸. بررسی ارتفاع شکاف بر نشست، تنش تماسی و نیروی محوری شمعه در سیستم رادیه مرکب با شمعه‌های منفصل در فونداسیون Messe Torhaus.

درصد بار شمعه‌ها به بار کل



شکل ۹. نمودار درصد بار شمعه‌ها به بار کل به ازای Gap های مختلف در فونداسیون Messe Torhaus.



شکل ۱۳. مقایسه‌ی تشن سرشمع‌ها در سیستم رادیه مرکب با شمع‌های منفصل در سیستم رادیه مرکب مطالعه‌ی موردی.

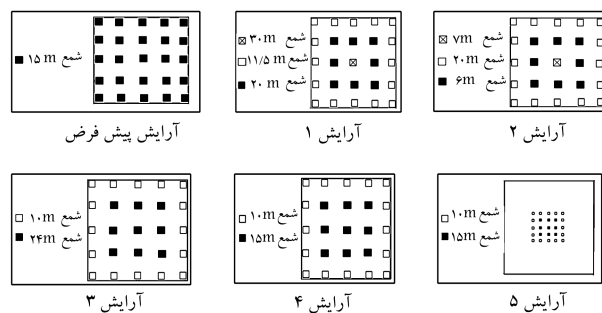
بدترین نوع چینش شمع‌هاست. نتایج تشن تماسی نشان می‌دهد که تمرکز تشن تماسی در زیر شمع‌های بلندتر بیشتر است. مثلاً با مقایسه‌ی شمع‌های قرارگرفته در فاصله‌ی ۶ m از مرکز رادیه می‌توان مشاهده کرد که برای آرایش ۳ که در این محل شمع‌های ۲۴ m قرارگرفته‌اند، تشن تماسی بیشینه و برای آرایش شماره‌ی ۲ که در این محل شمع‌های ۶ m قرارگرفته‌اند، تشن تماسی کمینه است (شکل ۱۲).

به منظور مقایسه‌ی تشن در شمع‌های منفصل، آرایش پیش‌فرض با آرایش ۶ مورد مقایسه قرارگرفته است. در هر دو حالت طول شمع‌ها ۱۵ m است. ولی در آرایش ۶، شمع‌ها در مرکز رادیه قرارگرفته‌اند.

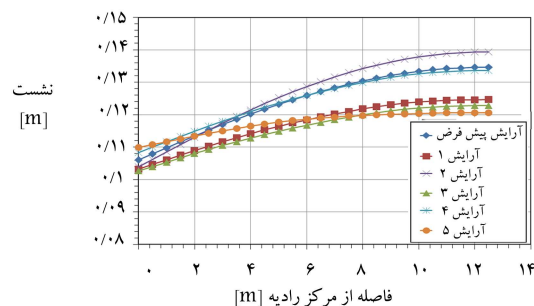
مقایسه‌ی تشن شمع‌ها در مقطع وسط رادیه در شکل ۱۳ نشان داده شده است. نتایج نشان می‌دهند که در آرایش ۶ که شمع‌ها در مرکز رادیه قرارگرفته‌اند و فاصله‌ی آنها از هم کم است، نشست، مخصوصاً نشست غیریکنواخت و تشن محوری شمع‌ها کمتر از آرایش پیش‌فرض است. در این حالت مقدار بارشمع به کل بار ۲۱٪ محاسبه شده است، در صورتی که در آرایش پیش‌فرض این ضریب ۲۹٪ است. این ضریب برای شمع‌های متصل ۶۲٪ محاسبه شده است. همچنین نتایج نشان می‌دهند که در آرایش پیش‌فرض، شمع‌های وسط بار بیشتری تحمل می‌کنند، اما در آرایش ۶ شمع‌های کناری بار بیشتری تحمل می‌کنند. دلیل این مسئله اثر گروه است که باعث می‌شود در آرایش ۶ که فاصله‌ی شمع‌ها کمتر است و شمع‌ها در مرکز رادیه قرارگرفته‌اند، نشست خاک اطراف شمع سبب کاهش سختی شمع‌ها شود و در این حالت کاهش سختی شمع‌های وسط بیشتر است.

۶. نتیجه گیری

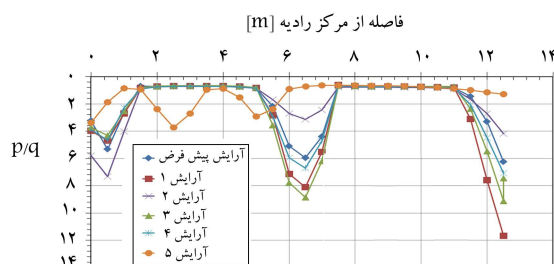
استفاده از شمع‌های کاهنده‌ی نشست سبب کاهش ضریب اطمینان طراحی شمع‌ها می‌شود. در این شرایط ممکن است تشن محوری بالایی در آنها ایجاد شود و با ممکن است این شمع‌ها مقاومت جانبی کافی ایجاد نکنند و احتمال آسیب به اتصالات سازه‌ی نیز وجود خواهد داشت. در این شرایط یک گزینه استفاده از سیستم رادیه مرکب با شمع‌های منفصل است. به دلیل اندرکنش‌های گوناگون در سیستم رادیه مرکب و پیچیدگی تحلیل، استفاده از روش‌های عددی رو به افزایش است. در این روش‌های عددی مختلفی برای تحلیل فونداسیون رادیه مرکب ارائه شده است. در این تحقیق با استفاده از نرم‌افزار ABAQUS، ضمن مدل‌سازی دوبعدی و سه‌بعدی سیستم رادیه مرکب مدل فیزیکی، موارد عملی شامل فونداسیون Messeturm و فونداسیون Messe Torhaus و همچنین مطالعه‌ی موردی، این نتایج حاصل شده است:



شکل ۱۱. آرایش‌های به‌کار رفته در مطالعه‌ی موردی.



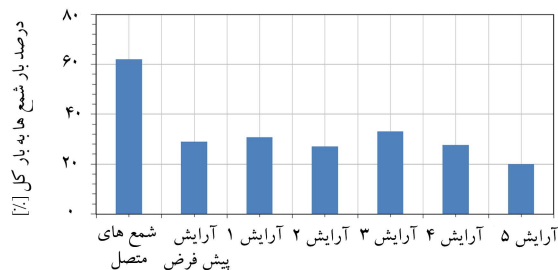
الف) منحنی نشست؛



ب) منحنی تشن تماسی؛



ج) نشست بیشینه؛



د) نسبت بار شمع‌ها به کل بار.

شکل ۱۲. بررسی منحنی‌های نشست، تشن تماسی و نسبت بارشمع به کل بار در آرایش‌های مختلف مطالعه‌ی موردی.

رادیه با شمع‌های منفصل، با انفصال شمع‌ها از رادیه و به علت نیروهای کشش رو به پائین که به دلیل انتقال نیرو به شمع‌های منفصل به وجود می‌آید، فشار تماسی خاک زیر رادیه در اطراف شمع‌ها به مقدار زیادی افزایش می‌یابد. اما این مقدار در فاصله‌ی بین شمع‌ها تعدیل می‌یابد و به مراتب کمتر از ظرفیت باربری رادیه می‌شود.

-- با کاهش ارتفاع شکاف بین رادیه و شمع، تنش محوری بیشینه‌ی شمع افزایش می‌یابد و نسبت بار شمع‌ها به کل بار بیشتر می‌شود. همچنین محل تنش محوری بیشینه در طول شمع به اعماق بالاتری انتقال می‌یابد. تحلیل‌ها نشان داده است که با تمرکز شمع‌های منفصل در مرکز رادیه، مقادیر نشست، مخصوصاً نشست غیریکنواخت و نسبت تنش شمع‌ها به رادیه کاهش می‌یابد.

-- نتایج مربوط به نشست حاکی از آن است که شمع‌های منفصل به منزله‌ی سخت‌کننده‌ی خاک عمل کرده و مقادیر نشست سیستم رادیه مرکب با شمع‌های منفصل نزدیک به مقادیر نشست سیستم رادیه مرکب با شمع‌های متصل است. یعنی با جداسازی شمع‌ها از رادیه کارایی‌شان در کاهش نشست چندانی نمی‌یابد.

-- با انفصال شمع‌ها از رادیه، تنش محوری در سر شمع و طول شمع کاهش می‌یابد. در مقایسه با شمع‌های متصل در سیستم رادیه با شمع‌های منفصل، محل بیشینه‌ی نیروی محوری سازه‌ی در شمع (صفحه خنثی) به اعماق پائین‌تر انتقال می‌یابد.

-- مقادیر تنش تماسی در زیر رادیه نشان می‌دهد که تنش تماسی در حالت رادیه با شمع‌های منفصل بیشتر از سیستم رادیه با شمع‌های متصل است. اما در حالت

پانوشتها

1. working load
2. rough
3. case histories
4. axisymmetric
5. Frankfurt clay
6. Frankfurt limestone

منابع (References)

1. Prakoso, W.A. and Kulhawy, F.H. "Contribution to piled raft foundation design", *J. Geotech. Engng., ASCE*, **127**(1), pp. 17-24 (2001).
2. Cao, X.D., Wong, I. and Chang, M. "Behavior of model rafts resting on pile-reinforced sand", *J. of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, **130**(2), pp.129-138 (February 2004).
3. Randolph, M.F. "Design methods for pile groups and piled rafts", State-of-the-art report, *13 th Int. Conf. Soil Mech. Foundn Engng*, New delhi, **5**, pp. 61-82 (1994).
4. Hemsley, J.A., *Design Applications of Raft Foundations*, Thomas Telford Ltd., London (2000).
5. Veiskarami, M., Eslami, A., Ranjbar, M.M. and Riyazi, T. "Geotechnical interaction of mat foundation and pile group, two case studies", *Esteghlal Journal of Engineering, Isfahan University of Technology*, **36**(1), pp. 93-107 (September 2007).
6. Randolph, M.F. and Clancy, P. "Efficient design of piled rafts", *Proc., 2nd Int. Geotechnical Seminar on Deep Foundations on Bored Auger Piles*, Ghent, Belgium, pp. 119-130 (1993).
7. Hooper, J.A. "Review of behavior of piled raft foundations", Construction Industry Research and Information Association, London, 1979, Rep. 83, on: Version 6.8; Dassault Systèmes (2008).
8. ABAQUS User's Manual, Abaqus/CAE User's Manual. Abaqus Online Documentation: Version 6.8; Dassault Systèmes (2008).
9. Lee, C.J., Bolton, M.D. and Al-Tabbaa, A. "Numerical modelling of group effects on the distribution of dragloads in pile foundations", *Geotechnique*, **52**(5), pp. 325-335 (2002).
10. Randolph, M.F. and Wroth, C.P. "Application of the failure state in undrained simple shear to the shaft capacity of driven piles", *Geotechnique*, **31**(1), pp. 143-157 (1981).
11. Al Gaboby, Z. "Numerical modelling of piled raft", A Thesis Submitted for the Degree of Philosophy, Praha, únor (2010).
12. Reul, O. and Randolph, M.F. "Piled rafts in overconsolidated clay: Comparison of in situ measurements and numerical analysis", *Géotechnique*, **53**(3), pp. 301-315 (2003).
13. Horikoshi, K. and Randolph, M.F. "A contribution to optimum design of piled rafts", *Geotechnique*, London, England, **48**(3), pp. 301-317 (1998).
14. Esalmi, A., Veis Karami, M. and Eslami, M.M. "Piled-raft foundation (PRF) optimization design with connected and disconnected piles", 11 th International Conference on Deep Foundations, New York, NY, USA, (DFI) (2008).

GEOTECHNICAL PERFORMANCE OF PILED RAFT FOUNDATIONS WITH DISCONNECTED PILES AND EFFECTS OF VARIOUS DESIGN FACTORS

S. Salehi Malekshah

s.salehi@aut.ac.ir

A. Eslami (corresponding author)

afeslami@aut.ac.ir

Dept. of Civil and Environmental Engineering
Amir Kabir University of Technology

Sharif Civil Engineering Journal

Volume 29, Issue 4, Page 37-44, Original Article

© Sharif University of Technology

- Received 9 March 2011; received in revised form 6 March 2012; accepted 14 July 2012.

Abstract

In the conventional design of deep foundations, it is usually assumed that the entire design load of the structure is carried by the piles, and the entire system acts as a pile group. Pile groups are conventionally designed by adopting a relatively high factor of safety to the piles, and the major design criterion is the bearing capacity of the group. The piled-raft foundation (PRF) is a recent design concept, which is used as an effective method of foundation design to reduce settlements of structures. Recently, the use of settlement reducer piles in the design of piled raft foundations has led to the reduction in number or dimension of the piles. However, the system may involve high axial stresses to be induced in a relatively small number of piles; or in the occurrence of damage to structural connections. Therefore, an alternative approach is to disconnect the piles from the raft. This system is known as the disconnected or non-connected piled raft foundation (DCPRF or NCPRF).

The use of numerical analyses using finite element techniques has become popular in recent years in the field of foundation engineering. Because of rigorous interaction for piled raft foundation elements, physical modeling measurements and case history records have been considered to justify numerical modeling results. Finite element modeling using ABAQUS software, with emphasis on determination of settlement, contact pressure and axial stress of piles, has been carried out. Also, effects of gap height-distance between the raft and the disconnected pile heads, and pile group arrangements, have

been examined in order to optimize the design approach. Results indicate that using disconnected piles, the ratio of pile load to total load decrease and the neutral plane (the plane of maximum structural force in piles) shifts to lower depths. Also, reducing gap height leads to an increase in the maximum axial stress of the piles and the pile load to total load ratio. Moreover, concentration of piles at the center of the raft reduces settlement and pile stress.

Key Words: Piled raft foundations (PRF), disconnected piles, numerical modeling, optimization, gap.