

بررسی عملکرد سیستم‌های رادیه‌ی شمع منفصل در دو حالت هندسی بزرگ و کوچک

عبدالحسین حداد* (دانشیار)

ارمیا شفیعی (کارشناس ارشد)

علی لشگری (دانشجوی دکتری)

دانشکده‌ی مهندسی عمران، دانشگاه سمنان

مهندسی عمران شریف، بهار ۱۳۹۷ (۱۳۹۷)
دوری ۲ - ۳۴، شماره ۱/۲، ص. ۱۱۰-۱۰۱

در سال‌های اخیر، توجه به امکان جایگزینی سیستم رادیه‌ی شمع - منفصل به جای رادیه‌ی شمع - متصل برای مقابله با آسیب‌پذیری بخش زیرسازه در محل اتصال شمع‌ها به رادیه بیشتر شده است. در مطالعات انجام شده در زمینه‌ی مذکور، تاکنون کمتر به سهم باربری اجزاء سیستم و آثار پارامتریک پارامترهای هندسی و ژئوتکنیکی مؤثر در سیستم رادیه‌ی شمع - منفصل توجه کرده‌اند. در نوشتار حاضر، با شبیه‌سازی عددی این نوع زیرسازه با به‌کارگیری ABAQUS 3D، پارامترهای هندسی و ژئوتکنیکی مؤثر در سیستم مذکور و تأثیر هندسه در رادیه شمع‌های بزرگ و کوچک در تغییر مکان‌های جانبی شمع‌ها و تأثیر مقاومت و ضخامت میان‌لایه‌ی شنی در نشست کلی شالوده بررسی شده است. نتایج پژوهش حاضر نشان می‌دهند که روش مذکور باعث افزایش سهم باربری مجموعه‌ی گروه شمع به مقدار ۱۷ الی ۱۸ درصد از کل ظرفیت باربری سیستم می‌شود. همچنین افزایش مقاومت میان‌لایه‌ی شنی منجر به کاهش نشست کلی سیستم به میزان ۱/۶ برابر می‌شود که حد بهینه‌ی افزایش زاویه‌ی اصطکاک و مدول یانگ میان‌لایه در حدود ۳۶ درجه و ۱۲۰ مگاپاسکال است.

واژگان کلیدی: رادیه‌ی شمع منفصل، رادیه‌ی شمع‌های بزرگ و کوچک، میان‌لایه‌ی شنی، اجزاء محدود سه‌بعدی.

ahadad@semnan.ac.ir
shafiee.ermia@students.semnan.ac.ir
ali.lashgarii@semnan.ac.ir

۱. مقدمه

کاربرد شمع‌های کاهنده‌ی نشست ارائه شده است.^[۱-۱۱] مفهوم پایه‌ی نگرش مذکور به این صورت است که شالوده از تعدادی شمع که برای کاهش نشست به میزان قابل قبول و همچنین تحمل بخشی از بار سازه که توسط پی به شمع‌ها انتقال می‌یابد، تشکیل شده است. این نگرش، طراحی سیستم پی رادیه‌ی شمع را بهینه می‌کند و تعداد شمع‌ها را به مقدار قابل توجهی کاهش می‌دهد. در حالتی که ظرفیت باربری رادیه به تنهایی کافی است، تعداد شمع‌های موردنیاز برای کاهش نشست در سطح مجاز، معمولاً کم است.^[۱] تعداد کم شمع‌ها در یک سیستم رادیه‌ی شمع می‌تواند سبب ایجاد تمرکز تنش محوری در نوک شمع‌ها، تولید لنگرهای خمشی بسیار بزرگ، و ایجاد ترک در رادیه شود؛ به خصوص در مناطق فعال لرزه‌ی اگر شمع‌ها به رادیه متصل شوند، به دلیل نیروهای جانبی سیکلی، نیروهای برشی بسیار بزرگ و همچنین لنگرهای واژگونی در نوک شمع‌ها ایجاد می‌شود. در تمامی موارد ذکر شده، احتمال حاکم شدن ظرفیت باربری سازه‌ی شمع‌ها به جای ظرفیت باربری ژئوتکنیکی آن‌ها وجود خواهد داشت. به همین دلیل جهت غلبه بر تنش‌های بزرگ مابین پی و شمع، در برخی مطالعات پیشنهاد شده است که شمع‌ها از رادیه جدا و به صورت عناصر مسلح کننده‌ی خاک زیرین استفاده شوند.^[۱۲، ۱۳]

برخی پژوهشگران (۱۹۹۸)،^[۱۰] براساس الزامات طراحی، سیستم رادیه‌ی شمع

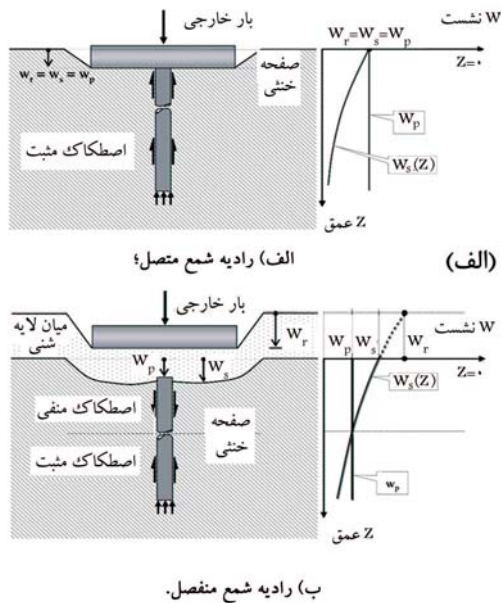
زمانی که یک سیستم پی گسترده‌ی سطحی (رادیه) به تنهایی قادر به تأمین الزامات طراحی نباشد، می‌توان با اضافه کردن تعدادی شمع به زیر آن، عملکرد رادیه را بهبود بخشید. دو دلیل اساسی جهت استفاده از شمع‌ها در زیر رادیه عبارت است از: تأمین ظرفیت باربری مورد نیاز و کاهش میزان نشست به سطح قابل قبول. در گذشته طراحی سیستم رادیه‌ی شمع با فرض تحمل کل بار سازه توسط شمع‌ها و یا به‌عنوان کاهنده‌ی نشست انجام می‌گرفت. از محدودیت‌های طراحی مذکور می‌توان به عدم در نظر گرفتن ظرفیت باربری شالوده در طراحی‌ها اشاره کرد که یک طراحی محافظه‌کارانه را در پی خواهد داشت.

در دهه‌های اخیر، مهندسان عمران روشی جایگزین مابین سیستم شالوده‌ی سطحی و عمیق، به نام سیستم ترکیبی رادیه‌ی شمع (و یا سیستم رادیه‌ی شمع) که کاهنده‌ی نشست است، را مطرح کرده‌اند. در ابتدا در سال ۱۹۷۲،^[۱] مفهوم سیستم رادیه‌ی شمع مطرح شده است. سپس در سال ۱۹۷۷،^[۲] کاربرد شمع‌ها به‌عنوان عناصر کاهنده‌ی نشست پیشنهاد شده است. تاکنون نیز مطالعات متعددی در زمینه‌ی

* نویسنده مسئول

تاریخ: دریافت ۱۳۹۴/۱۱/۲۰، اصلاحیه ۱۳۹۵/۴/۱۲، پذیرش ۱۳۹۵/۶/۳.

DOI:10.24200/J30.2018.1337



شکل ۱. مکانیسم انتقال بار و نشست در سیستم‌ها. [۲۰]

مطالعات کمی در زمینه‌ی بررسی عملکرد رادیه‌ی شمع منفصل در قیاس با رادیه‌ی شمع متصل ارائه شده است؛ لذا سازوکار و رفتار شالوده‌ی مذکور، کاملاً شناخته شده نیست. با این حال روابطی در خصوص رفتار بار - نشست رادیه‌ی شمع‌ها در حالت آزمایشگاهی ارائه شده است [۲۰]. اگر کل بار وارد شده به پی برابر Q_t ، بار انتقال یافته از پی به خاک برابر Q_p و کل بار انتقال یافته از پی به شمع‌ها برابر Q_r باشد، آنگاه تنش‌های وارد بر سیستم از روابط ۱ الی ۴ به دست می‌آیند:

$$q_t = \frac{Q_t}{B^2} \quad (1)$$

$$q_r = \frac{Q_r}{B_e^2 - n \frac{\pi D_p^2}{4}} \quad (2)$$

$$Q_p = \sum_{i=1}^n Q_{Ai} \quad n = 1, 4, 9 \quad (3)$$

$$Q_r = Q_t - Q_p \quad (4)$$

که در آن، q_t تنش کل وارد بر شالوده، B عرض شالوده، B_e عرض مؤثر شالوده که با فرض توزیع تنش با زاویه‌ی ۴۵ درجه برابر $B_e = B + 2h$ است که در آن: h ضخامت لایه، n تعداد شمع‌ها، D_p قطر شمع‌ها و Q_{Ai} بار محوری اندازه‌گیری شده در سر شمع i ام است.

سختی یک سیستم رادیه‌ی شمع - منفصل کمی با سختی یک سیستم رادیه‌ی شمع - متصل متفاوت است. در سیستم رادیه‌ی شمع - متصل، شمع‌ها مستقیماً در وسط کلاهک بارگذاری می‌شوند و بسیج شدن ظرفیت شمع‌ها تابعی از سختی نسبی شمع و خاک است. در مراحل اولیه‌ی بارگذاری، شمع‌ها از خاک‌های اطراف سخت‌تر هستند و تا زمانی که ظرفیت نهایی شمع‌ها بسیج شوند، شمع‌ها بیشتر بار وارده را تحمل می‌کنند. سختی اولیه‌ی شالوده، تابعی از سختی شمع‌هاست. در سیستم رادیه‌ی شمع - منفصل، توزیع بار و بسیج شدن ظرفیت شمع‌ها تحت تأثیر تراکم لایه‌ی میانی است که تغییر شکل‌ها و مکانیسم انتقال بار از پی به شمع‌ها را اصلاح می‌کنند و اجازه‌ی وقوع جابه‌جایی نسبی پایین‌رونده‌ی رادیه - خاک - شمع را می‌دهند. از این رو سختی اولیه‌ی شالوده، تابعی از لایه‌ی میانی است. بر همین

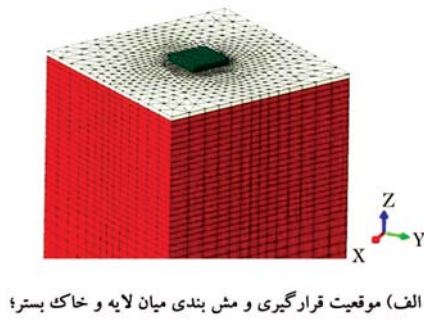
را به دو گروه تقسیم کرده‌اند. گروه اول، شامل سیستم رادیه‌ی شمع کوچک است، به این معنی که ظرفیت باربری رادیه بدون شمع ناکافی است. بنابراین دلیل استفاده از شمع، دست‌یابی به ظرفیت باربری مناسب است. نسبت عرض رادیه (B_R) به طول شمع‌ها (L) در گروه اول، به طور معمول از ۱ کوچک‌تر است ($B_R/L < 1$) و سختی خمشی پی به بسیار بزرگ است و نشست نامتقارن مسئله‌ی اصلی نیست. گروه دوم، شامل سیستم رادیه‌ی شمع بزرگ است، به این معنی که ظرفیت باربری رادیه بدون شمع کافی است، اما میزان نشست بیش از حد مجاز بوده است؛ از این رو هدف از کاربرد شمع‌ها کاهش نشست است، که در حالت رادیه‌ی شمع بزرگ نسبت عرض به طول بزرگ‌تر از ۱ است ($B_R/L > 1$) است. در سال‌های اخیر، مطالعاتی با استفاده از شبیه‌سازی‌های عددی، [۱۴-۲۰] و آزمایشگاهی [۱۴-۲۵] بر روی سیستم رادیه‌ی شمع منفصل انجام شده است.

بررسی برخی مطالعات انجام شده در زمینه‌ی سیستم‌های رادیه‌ی شمع منفصل، [۱۴] نشان می‌دهد که به مقوله‌ی نحوه‌ی توزیع بار و نشست و سهم باربری بین اجزاء مختلف سیستم رادیه‌ی شمع منفصل (مانند شمع، رادیه، میان‌لایه‌ی شنی) در شرایط مختلف رادیه‌ی شمع‌های کوچک و بزرگ به صورت کاربردی توجه نشده است. همچنین تغییرات پارامتریک مؤثر در تحلیل‌ها (مانند ابعاد رادیه، زاویه‌ی اصطکاک، مدول کشسانی، مشخصات هندسی شمع و ضخامت میان‌لایه‌ی شنی) بررسی نشده است. از این رو در نوشتار حاضر، دو مورد نحوه‌ی توزیع بار و نشست و سهم باربری بین اجزاء مختلف سیستم رادیه‌ی شمع منفصل و همچنین اثرات پارامتریک پارامترهای مؤثر در سیستم رادیه‌ی شمع منفصل پرداخته شده است.

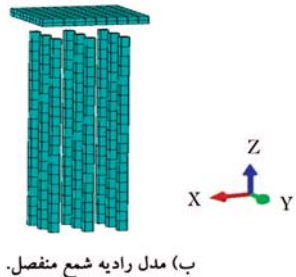
در پژوهش حاضر با استفاده از نرم‌افزار ABAQUS، سیستم رادیه‌ی شمع منفصل مدل‌سازی شده است. سپس با استفاده از نتایج یک مدل آزمایشگاهی، مدل عددی ساخته شده در پژوهش حاضر، صحت‌سنجی شده و پس از صحت‌سنجی مدل، رفتار پارامترهای مقاومتی و ضخامت میان‌لایه‌ی شنی، سهم نشست اجزاء سیستم، رفتار اصطکاک و اتکایی شمع‌ها، تأثیر قطر شمع‌ها، و حالت‌های مختلف هندسی بررسی شده است.

۲. سیستم رادیه‌ی شمع منفصل

در سال‌های اخیر، پژوهشگران به استفاده از سیستم رادیه‌ی شمع منفصل (NCPRF) به عنوان رویکردی جدید در عرصه‌ی مهندسی پی و در پاسخ به نیازهای روزافزون در پروژه‌های عمرانی به‌خصوص در سازه‌های بلند و سنگین در شرایط خاص محیطی و مقاومتی توجه کرده‌اند. در سیستم ذکر شده‌ی پی‌سازی برای بهبود مکانیسم انتقال بار از رادیه به خاک بستر، از یک لایه‌ی میانی در بین رادیه و شمع‌ها شامل خاک‌های درشت‌دانه‌ی متراکم استفاده می‌شود. شمع‌های منفصل به‌صورت عناصر مسلح‌کننده‌ی قائم در خاک زیرین عمل می‌کنند و با تشکیل محیطی از مصالح مرکب سخت، باعث بهبود ویژگی‌های مکانیکی بستر می‌شوند. در حالت ذکر شده، شمع‌ها مستقیماً در معرض بار روسازه قرار ندارند و تا حدی رعایت ملاحظات سازه‌یی برای آن‌ها کمتر تعیین‌کننده خواهد بود. در شکل ۱، مکانیسم انتقال بار و نحوه‌ی عملکرد دو سیستم شمع متصل و منفصل نشان داده شده است که مطابق آن در حالت متصل به دلیل اتصال شمع و شالوده، سیستم به‌صورت یک پی صلب عمل می‌کند و نشست شالوده (w_r)، شمع (w_p) و سطح خاک (w_s) با یکدیگر برابر هستند. در سیستم شمع منفصل، لایه‌ی میانی قرار گرفته بین شالوده و شمع، به دلیل تراکم‌پذیر بودن، نشست بیشتری نسبت به شمع‌ها خواهد داشت.



الف) موقعیت قرارگیری و مش بندی میان لایه و خاک بستر؛



ب) مدل رادیه شمع منفصل.

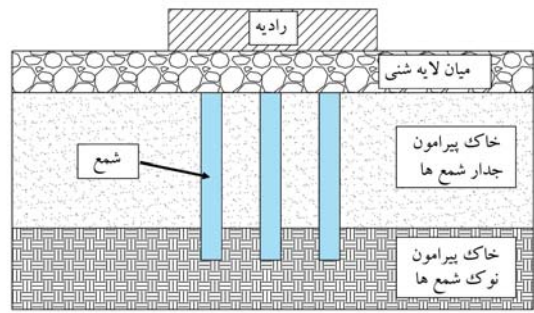
شکل ۳. مدل عددی ساخته شده.

متر و طول شمعها 40° متر و قطر شمعها (d) در تمامی موارد 0.8° متر و جنس آن از بتن بوده است. ضخامت میان لایه‌ی شنی (t) نیز در مدل‌های متعدد عددی و با توجه به هدف هر آزمایش، مقادیری شامل 0.5° ، 1° ، 1.5° ، 2° و 2.5° و 3° متر اختیار شده است. در شکل ۳، مدل عددی و شرایط مش بندی آن مشاهده می‌شود.

عمق خاک برای تحلیل تنش - کرنش، با توجه به تحلیل حساسیت، دو برابر طول شمع‌هاست. شرایط مرزی مدل نیز با مقید کردن بستر خاک در کف مدل و مرزهای قائم اعمال شده است. فاصله از طرفین مدل با توجه به کانتورهای نشست شالوده و در روند آزمون و خطا، با هدف عدم تلاقی کانتورها با کناره‌های مدل عددی و عدم تأثیرپذیری نتایج آن‌ها از فواصل مذکور انتخاب شده‌اند. شبکه بندی مش‌ها و ابعاد المان‌های خاک با نزدیک شدن به شمع‌ها کاهش می‌یابد؛ با آنکه این امر موجب افزایش زمان تحلیل می‌شود، اما موجب بالا بردن دقت نتایج تحلیل می‌شود.

بارگذاری در ۳ مرحله‌ی ژئواستاتیک جهت در نظر گرفتن تنش‌های در جای خاک، فعال کردن اندرکنش‌های تعریف شده بین خاک و بتن در نواحی مختلف رادیه و شمع‌ها و در نهایت بارگذاری قائم بر روی رادیه ناشی از بارگسترده‌ی روسازه به صورت تدریجی اعمال شده است. در هر سه مرحله ذکر شده، از رویکرد ضمنی برای تحلیل استفاده شده است. همچنین میزان نیروی اعمالی بر رادیه ناشی از روسازه، در تمامی مدل‌ها از جمله مدل‌های با ابعاد متفاوت رادیه یکسان در نظر گرفته شده است. و نیز برای اندرکنش‌های بین جداره و نوک شمع با خاک، از نوع اصطکاک‌ی برای اندرکنش مماسی (که بین دو سطح تغییر شکل پذیر و صلب استفاده می‌شود) و از نوع اتصال سخت (که بین دو سطح تغییر صلب استفاده می‌شود) برای اندرکنش عمود بر سطح استفاده شد که در سطوح مرز مشترک بین مصالح مختلف مانند خاک و بتن، ذرات خاک اجزای عبور از مرز مشترک و ورود به داخل شمع یا رادیه‌ی بتنی را نداشته باشند.

برای مدل‌سازی رادیه، از المان جسم تغییر شکل پذیر و نوع $C3D8$ ، برای شمع‌ها و خاک از المان جسم تغییر شکل پذیر و نوع $C3D6$ استفاده شده است. در نام‌گذاری مذکور، C بیانگر محیط پیوسته، 3D بیانگر محیط سه بعدی، 8 بیانگر المان مکعب 8 گره‌یی، 6 بیانگر المان منشوری 6 گره‌یی است. برای مدل‌سازی رفتار خاک، از



شکل ۲. اجزاء تشکیل دهنده‌ی سیستم رادیه‌ی شمع منفصل.

اساس، نشست یک سیستم رادیه‌ی شمع - منفصل از رابطه‌ی ۵ به دست می‌آید:

$$w_{pr} = Q_t / k_{pr} = (k_r w_r + k_p w_p) / k_{pr} \quad (5)$$

که در آن، w_{pr} نشست سیستم، w_r نشست رادیه، w_p نشست شمع، k_r سختی رادیه و k_p سختی شمع هستند. k_{pr} سختی سیستم رادیه‌ی شمع - منفصل است، که بر اساس رابطه‌ی ۶ محاسبه می‌شود:

$$k_{pr} = k_r + k_p w_p / w_r = k_r + \beta n k_p \quad (6)$$

که در آن، β ضریب سختی گروه شمع است و به طور معمول 0.5° در نظر گرفته می‌شود و n تعداد شمع‌هاست.

رادیه‌ی شمع منفصل به عنوان رویکردی جدید در طراحی رادیه‌ی شمع‌ها، به ویژه در مناطقی با فعالیت‌های لرزه‌ی قوی و یا خاک بستر با شرایط مقاومتی ضعیف که امکان استفاده از روش رادیه‌ی شمع متصل یا سایر سیستم‌های پی‌سازی وجود ندارد، مطرح شده است.

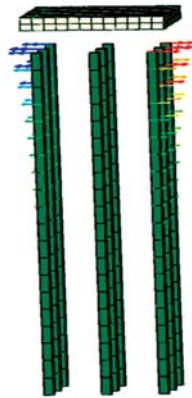
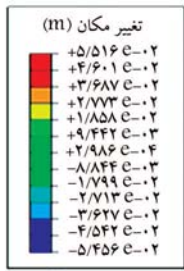
از مزایای سیستم رادیه‌ی شمع منفصل می‌توان به کاهش تمرکز تنش در ناحیه‌ی سر شمع و کاهش مشکلات سازه‌ی مربوط به آن به ویژه در مناطق لرزه خیز و همچنین بهبود مکانیسم انتقال بار از رادیه به خاک بستر همراه با افزایش نسبت سهم باربری شمع‌ها و توزیع یکنواخت‌تر نیرو اشاره کرد. از معایب سیستم مذکور نیز می‌توان به رفتار نسبتاً پیچیده‌تر و اجرای دشوارتر و کاربرد آن در شرایط خاص نسبت به رادیه‌ی شمع متصل اشاره کرد. همچنین با توجه به جدید بودن روش رادیه‌ی شمع منفصل، نمونه‌های اجرایی و تحقیقات اندکی در زمینه‌ی بررسی ابعاد رفتاری سیستم مذکور انجام شده است. اجزاء تشکیل دهنده‌ی رادیه‌ی شمع‌های منفصل در شکل ۲ نشان داده شده است که مطابق آن، اجزاء تشکیل دهنده‌ی سیستم مذکور از: رادیه، میان لایه، شمع و خاک تشکیل می‌شود. میان لایه به صورت متراکم و شامل مصالح شنی و یا سایر مصالح طراحی شده در حد واصل رادیه و شمع قرار می‌گیرد.

۳. مدل‌سازی سه بعدی اجزاء محدود و صحت‌سنجی آن

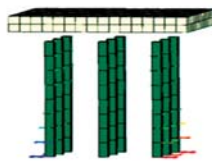
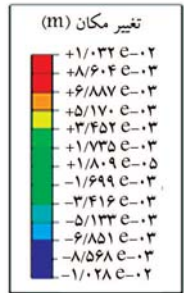
برای مدل‌سازی عددی از نرم‌افزار ABAQUS نسخه‌ی ۶/۱۲ استفاده شده است که توانایی بالایی در مدل‌سازی مسائل ساده تا مسائل پیچیدی غیرخطی در محیط ۲ و ۳ بعدی دارد. در پژوهش حاضر، برای مدل‌های سه بعدی رادیه‌ی شمع، ۹ شمع در ۳ ردیف (3×3) در نظر گرفته شده است که در حالت هندسی رادیه‌ی شمع بزرگ ($B_R/L > 1$)، ابعاد رادیه (B_R) 16×16 متر و طول شمع‌ها (L) 15 متر و در حالت هندسی رادیه‌ی شمع کوچک ($B_R/L > 1$)، ابعاد رادیه 12×12

جدول ۱. مشخصات مصالح مورد استفاده.

مصالح	ν	C (kPa)	ϕ	ρ (kg/m ³)	E (MPa)
ماسه	۰٫۲۵	۱	۳۲	۱۶۰۰	۵۰
شن	۰٫۲۵	۱	۳۶	۱۸۰۰	۷۰
بتن	۰٫۲	-	-	۲۴۰۰	۲۵۰۰۰

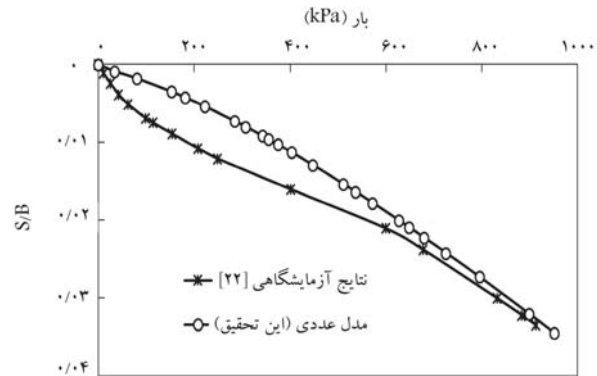


الف) رادیه شمع کوچک؛



ب) رادیه شمع بزرگ.

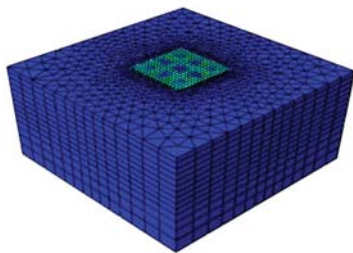
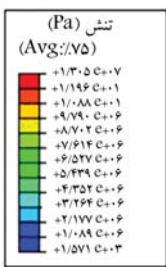
شکل ۵. بردار تغییر مکان‌های جانبی شمع‌ها در دو حالت هندسی.



شکل ۴. مقایسه‌ی رفتار مدل‌سازی عددی سیستم رادیه‌ی شمع منفصل با نتایج آزمایشگاهی.

مدل رفتاری موهر-کولمب اصلاح شده استفاده شده است که مدلی نسبتاً ساده و فراگیر است و نتایج قابل قبولی ارائه می‌کند و قادر است رفتار کشسان‌خیمیری را محاسبه کند. همچنین این مدل به پارامترهای بسیار کمتری نسبت به سایر مدل‌ها (مانند کپ و دراگر-پراگر) نیاز دارد. مصالح خاک مورد استفاده شامل خاک‌های ماسه و یک میان‌لایه‌ی شنی متراکم مابین رادیه و شمع‌ها بوده است. مشخصات مصالح مورد استفاده در جدول ۱ نشان داده شده است.

برای کالیبراسیون مدل عددی، از نتایج آزمایش‌های سانتریفیوژ مطالعاتی در سال ۱۳۲۰ [۲۵] که رفتار بارنشست سیستم پی رادیه‌ی شمع با شمع‌های منفصل را در شرایط استاتیکی و ساخت‌گاهی با ماسه‌ی استاندارد شماره‌ی ۱۶۱ فیروزکوه با تراکم نسبی ۰٫۵۵٪ و لایه‌ی شنی با ماسه‌ی D۱۱ فیروزکوه در تراکم نسبی ۰٫۹۰٪ را بررسی کرده بودند، استفاده شده است. در بخش حاضر، مدل عددی منطبق بر مدل آزمایشگاهی سانتریفیوژ، مدل‌سازی و نتایج مدل‌سازی‌های عددی و آزمایشگاهی مقایسه شده است. پس از کالیبراسیون پارامترهای ورودی، نمودار رفتار بار-نشست در مدل عددی با رفتار بار-نشست رادیه‌ی شمع منفصل در آزمایش سانتریفیوژ در شکل ۴ مقایسه شده است. در شکل ۴، نسبت نشست به عرض در مقابل بار وارده به سیستم ترسیم شده است. مقایسه‌ی نتایج مدل عددی و آزمایشگاهی نشان می‌دهد که با اعمال تدریجی بار و نزدیک‌تر شدن تنش وارده به مقدار نهایی در آزمایش مدل فیزیکی، رفتار دو نمودار به یکدیگر نزدیک‌تر می‌شود.



شکل ۶. کانتور تنش در حالت رادیه‌ی شمع بزرگ.

گرفته شود، علاوه بر مؤلفه‌ی قائم، مؤلفه‌ی افقی تغییر مکان نیز رخ می‌دهد و در نهایت، گوه‌های گسیختگی خاک در اطراف رادیه شکل می‌گیرد. این روند تغییر مکان خاک، تمایل به ایجاد تغییر مکان جانبی در شمع‌ها دارد و تفاوت رفتار بین دو حالت هندسی مذکور نمایان می‌شود. این تفاوت رفتاری را به این صورت می‌توان تشریح کرد که در رادیه‌ی شمع بزرگ ($B_R/L > 1$)، نوک شمع‌ها در عمق نسبتاً کمتری قرار می‌گیرد و به همین دلیل خاک زیر رادیه، سربار کمتری دارد و تغییر مکان‌های جانبی در ناحیه‌ی نوک شمع‌ها روی می‌دهد. ولی در حالت هندسی رادیه‌ی شمع کوچک ($B_R/L < 1$) که شمع‌ها در عمق بیشتری قرار گرفته‌اند و گیرداری مناسبی دارند، خاک زیر رادیه مقاومت بیشتری خواهد داشت و تغییر مکان‌های جانبی شمع‌ها در ناحیه‌ی بالای شمع‌ها روی داده است (شکل ۵). همچنین در شکل ۶، کانتور تنش در حالت رادیه‌ی شمع بزرگ نشان داده شده است.

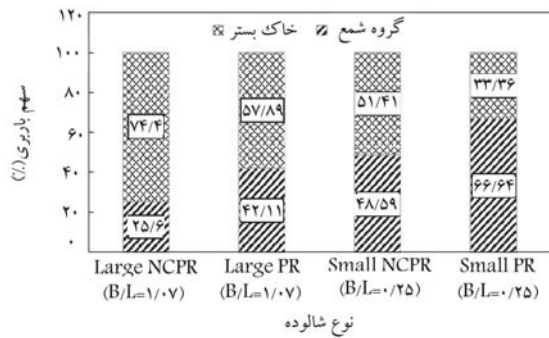
در شکل ۷، منحنی بار-نشست برای شالوده‌های رادیه‌ی شمع متصل (PR)،

۴. نتایج تحلیل

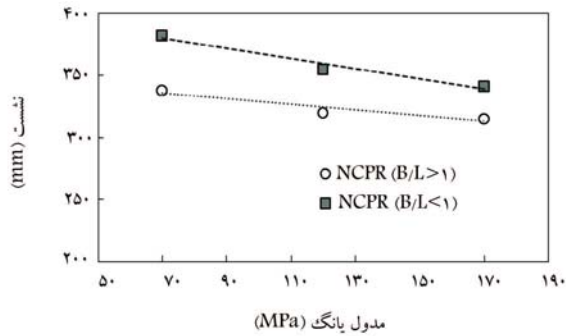
۱.۴. بررسی تغییر مکان جانبی شمع‌ها در حالت هندسی رادیه‌ی

شمع بزرگ و رادیه‌ی شمع کوچک

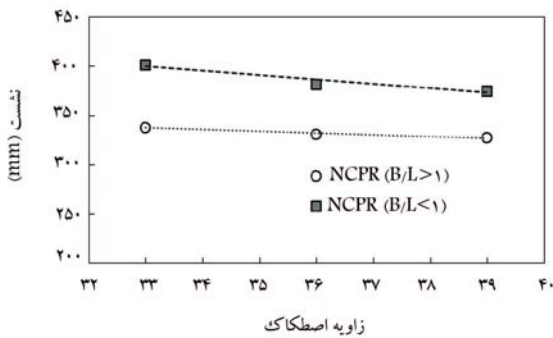
با اعمال بارگذاری بر روی رادیه (بر طبق مکانیسم گسیختگی خاک) تغییر مکان خاک زیر مرکز رادیه در جهت عمودی رخ می‌دهد. هر چه از مرکز رادیه فاصله



شکل ۸. تفاوت سهم باربری خاک بستر و گروه شمع‌ها در رادیه‌ی شمع‌های منفصل و متصل، در دو حالت هندسی رادیه‌ی شمع‌های بزرگ و کوچک.



الف) مدول یانگ میان لایه شنی؛

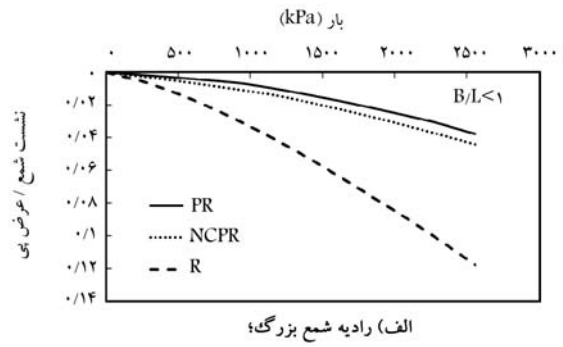


ب) زاویه اصطکاک میان لایه شنی.

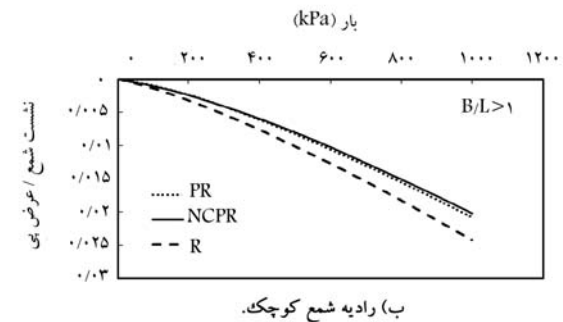
شکل ۹. تغییرات نشست رادیه‌ی شمع منفصل نسبت به تغییرات.

۲.۴. بررسی تأثیر پارامترهای مقاومتی (E و ϕ) میان‌لایه‌ی شنی در عملکرد رادیه‌ی شمع منفصل، در دو حالت هندسی رادیه‌ی شمع‌های بزرگ و کوچک

برای بررسی پارامترهای مقاومتی خاک، مقادیر E و ϕ میان‌لایه‌ی شنی به طور جداگانه و برای دو حالت هندسی رادیه‌ی شمع‌های بزرگ و کوچک افزایش داده شده است (شکل ۹). در بررسی منحنی‌های رفتار بار-نشست در شرایط هندسی رادیه‌ی شمع‌های بزرگ و کوچک مشاهده می‌شود که با افزایش دو مرحله‌ی E و ϕ میان‌لایه‌ی شنی، میزان نشست کمتر شده است. همان‌طور که مشاهده می‌شود، تأثیر افزایش پارامترهای مقاومتی میان‌لایه‌ی شنی، در حالت هندسی رادیه‌ی شمع کوچک بیشتر بوده و موجب کاهش نشست شده است. عملکرد مثبت میان‌لایه‌ی شنی در حالت رادیه‌ی شمع کوچک به این علت است که در حالت هندسی مذکور، تغییر مکان جانبی در ناحیه‌ی بالایی شمع‌ها روی می‌دهد و چون این ناحیه در



الف) رادیه شمع بزرگ؛



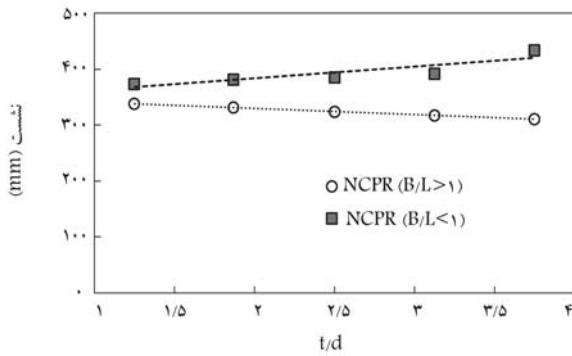
ب) رادیه شمع کوچک.

شکل ۷. مقایسه‌ی منحنی بار-نشست رادیه‌ی شمع‌های متصل (PR) و منفصل (NCPR) در دو حالت هندسی.

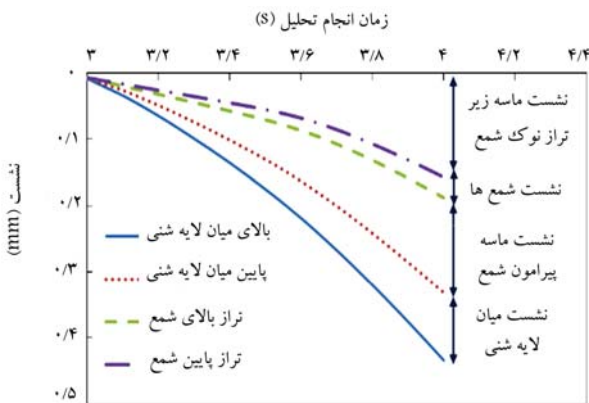
رادیه‌ی شمع منفصل (NCPR) و فقط رادیه (R) و برای دو حالت هندسی رادیه‌ی شمع‌های بزرگ و کوچک ترسیم شده است. براساس شکل ۵، چنانچه شمع‌ها به رادیه متصل شوند، موجب محدود شدن تغییر مکان‌های جانبی در بالای شمع‌ها می‌شوند. به همین دلیل رادیه‌ی شمع متصل در شرایط مشابه و برای حالت هندسی رادیه‌ی شمع کوچک، نشست کمتری نسبت به رادیه‌ی شمع منفصل از خود نشان می‌دهد. ولی در حالت هندسی رادیه‌ی شمع بزرگ، که تغییر مکان‌های جانبی در پایین شمع‌ها روی می‌دهد، متصل بودن شمع‌ها در بالا به رادیه، تأثیر خاصی در مورد مذکور نداشته است.

به طور کلی اگر در حالت هندسی رادیه‌ی شمع کوچک، فاصله‌ی شمع‌ها از یکدیگر و سرشمع‌ها مقید شوند و نوعی محصورشدگی ایجاد شود، موجب تغییر مکان جانبی شمع‌ها می‌شود و در اثر آن، نشست رادیه‌ی شمع منفصل نیز کاهش می‌یابد. همچنین می‌توان از مصالحی مانند ژئوگرید که مقاومت کششی مناسب دارند، در نواحی زیرین میان‌لایه‌ی شنی که در نزدیکی سرشمع‌ها قرار دارد، جهت کاهش تغییر مکان جانبی شمع‌ها استفاده کرد.

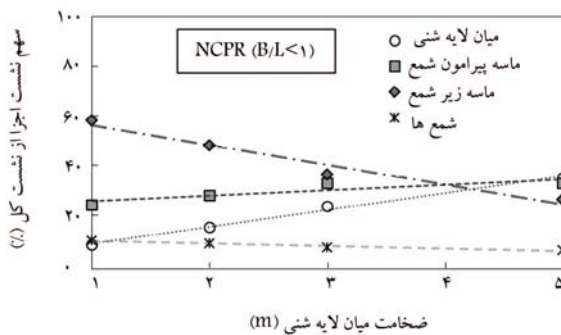
براساس شکل ۷، اختلاف قابل‌توجهی بین نمودارهای بار-نشست در پی‌های فقط رادیه (R) و رادیه‌ی شمع منفصل (NCPR) در شرایط هندسی یکسان وجود دارد که بیان‌گر تفاوت در سهم انتقال بار از میان‌لایه به خاک بستر و سهم باربری مجموعه‌ی گروه شمع، در دو حالت هندسی رادیه‌ی شمع‌های بزرگ و کوچک است. به این ترتیب که در حالت هندسی رادیه‌ی شمع کوچک، سهم باربری شمع‌ها نسبت به حالت هندسی رادیه‌ی شمع بزرگ افزایش یافته است (در حدود ۲ برابر) و این امر موجب افزایش فاصله بین منحنی‌های بار-نشست فقط رادیه و رادیه‌ی شمع منفصل در شکل ۵ شده است. در شکل ۸، سهم باربری خاک بستر و گروه شمع‌ها در رادیه‌ی شمع‌های منفصل و متصل، در دو حالت هندسی رادیه‌ی شمع‌های بزرگ و کوچک نشان داده شده است.



شکل ۱۰. تغییرات نشست رادیه‌ی شمع منفصل در دو حالت هندسی بزرگ و کوچک برای تغییرات نسبت ضخامت میان‌لایه‌ی شنی به قطر شمع.

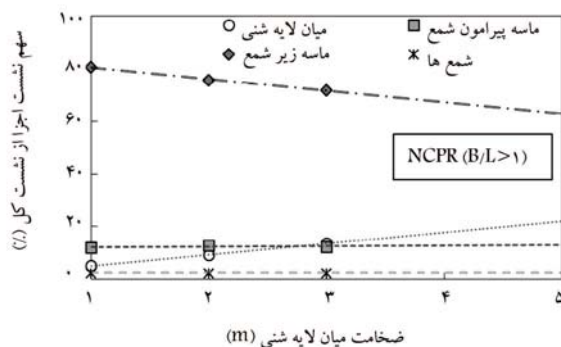


شکل ۱۱. سهم نشست اجزاء مختلف در سیستم رادیه‌ی شمع منفصل.



ضخامت میان لایه شنی (m)

الف) رادیه شمع کوچک؛



ضخامت میان لایه شنی (m)

ب) رادیه شمع بزرگ.

شکل ۱۲. تغییرات درصد سهم نشست هرکدام از اجزاء سیستم نسبت به نشست کل نسبت به تغییرات ضخامت میان‌لایه‌ی شنی.

مجاورت لایه‌ی شنی قرار دارد، افزایش مقاومت لایه‌ی شنی تا حدودی از تغییر مکان‌های جانبی شمع‌ها می‌کاهد. ولی در حالت هندسی رادیه‌ی شمع بزرگ که تغییر مکان‌های جانبی شمع‌ها در ناحیه‌ی پائین شمع‌ها روی می‌دهد، تأثیر افزایش مقاومت لایه‌ی شنی کمتر خواهد بود.

۳.۴. بررسی تأثیر ضخامت میان‌لایه‌ی شنی در عملکرد رادیه‌ی شمع منفصل

شکل ۱۰، تغییرات نشست رادیه‌ی شمع منفصل در دو حالت هندسی بزرگ و کوچک را برای تغییرات نسبت ضخامت میان‌لایه‌ی شنی (t) به قطر شمع (d) نشان می‌دهد. در بررسی منحنی‌های بار- نشست رادیه‌ی شمع منفصل در شرایط هندسی رادیه‌ی شمع بزرگ، که سهم انتقال بار از میان‌لایه به خاک بستر در حدود ۷۵٪ است و رادیه نقش مؤثرتری در انتقال بار دارد، مشاهده می‌شود که با افزایش ضخامت میان‌لایه‌ی شنی، میزان نشست کاهش می‌یابد. برخلاف حالت رادیه‌ی شمع بزرگ، در حالت هندسی رادیه‌ی شمع کوچک، سهم انتقال بار از میان‌لایه به خاک بستر و سهم باربری مجموعه‌ی شمع‌ها به حدود ۵۰٪ کاهش یافته است. با توجه به شکل ۱۰، با افزایش نسبت ضخامت میان‌لایه‌ی شنی به قطر شمع، میزان نشست افزایش یافته است.

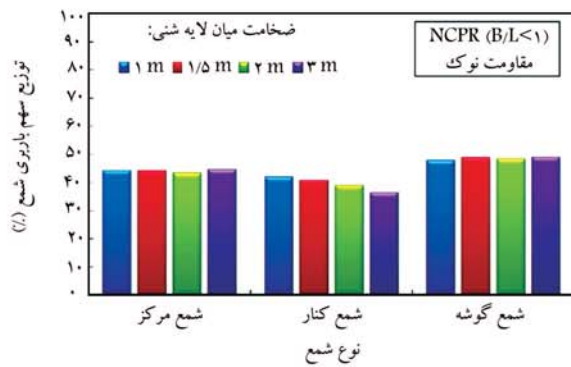
در تفسیر این روند کاهش و افزایشی در نشست، می‌توان به این مورد اشاره کرد که افزایش هر چه بیشتر ضخامت میان‌لایه‌ی شنی، موجب قرارگرفتن شمع‌ها در عمق پایین‌تر و کاهش عملکرد آن‌ها می‌شود. بنابراین سهم باربری شمع‌ها کاهش و سهم انتقال بار از میان‌لایه به خاک بستر افزایش می‌یابد، که این موضوع از طریق اطلاعات حاصل از تحلیل‌های عددی نیز تصدیق می‌شود. بنابراین در حالت هندسی رادیه‌ی شمع بزرگ که سهم باربری شمع‌ها در حدود ۲۵٪ است و رادیه نقش اساسی را در باربری ایفا می‌کند، افزایش ضخامت میان‌لایه‌ی شنی موجب کاهش نشست شده است. ولی در حالت هندسی رادیه‌ی شمع کوچک که نقش باربری رادیه کم و نقش باربری شمع‌ها پررنگ‌تر است، افزایش ضخامت میان‌لایه‌ی شنی موجب افزایش نشست شده است. در واقع، افزایش ضخامت میان‌لایه‌ی شنی هم‌زمان دو اثر ایجاد می‌کند: ۱. کاهش نشست به دلیل افزایش ضخامت لایه‌ی متراکم در زیر رادیه و ۲. قرارگرفتن شمع‌ها در ترازهای پایین‌تر که تنش‌های کمتری دریافت می‌کنند و عملکرد آن‌ها کاهش می‌یابد. بنابراین با توجه به نوع شرایط هندسی و ویژگی‌های آن، یکی از دو اثر ذکرشده بر دیگری غلبه می‌یابد.

۴.۴. بررسی سهم نشست اجزاء در رادیه‌ی شمع منفصل همگام با

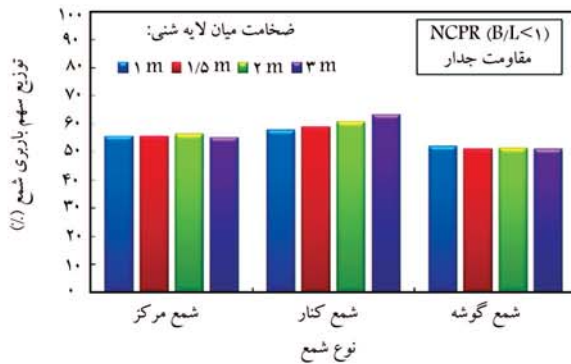
افزایش ضخامت میان‌لایه‌ی شنی

در بررسی دقیق‌تر وضعیت نشست در سیستم پی رادیه‌ی شمع منفصل، نشست کلی سیستم در ۴ بخش و به تفکیک برای هر یک از اجزاء سیستم، شامل: میان‌لایه‌ی شنی، خاک پیرامون شمع‌ها، خاک زیر تراز نوک شمع‌ها و خود شمع‌ها بررسی شده است. در شکل ۱۱، نشست ۴ بخش ذکرشده به تفکیک برای ضخامت میان‌لایه‌ی شنی ۳ متر نشان داده شده است. برای بررسی‌های بیشتر ضخامت‌های ۱، ۲، ۳ و ۵ متر برای میان‌لایه‌ی شنی و در شرایط هندسی رادیه‌ی شمع‌های کوچک و بزرگ، سهم نشست هر یک از اجزاء سیستم پی به طور مستقل محاسبه و در شکل ۱۲ ترسیم شده است.

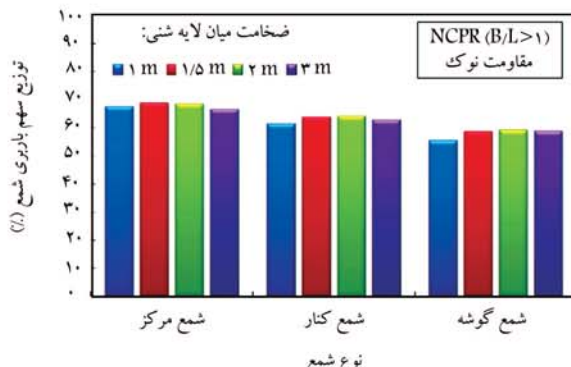
با توجه به شکل ۱۲ مشاهده می‌شود که هم‌زمان با افزایش ضخامت میان‌لایه‌ی شنی:



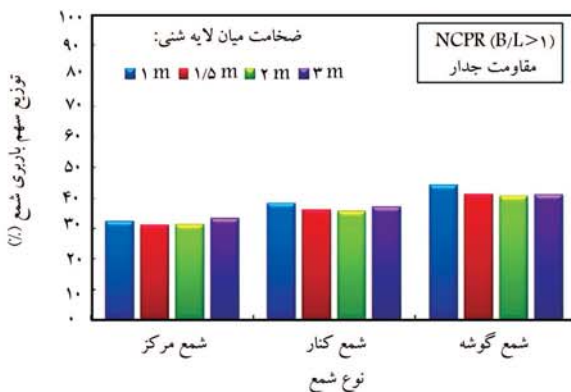
الف) مقاومت نوک رادیه شمع کوچک؛



ب) مقاومت جدار رادیه شمع کوچک؛



ج) مقاومت نوک رادیه شمع بزرگ؛



د) مقاومت جدار رادیه شمع بزرگ.

شکل ۱۳. سهم باربری انواع شمع.

• درصد سهم نشست میان لایه‌ی شنی از نشست کل افزایش یافته است، به نحوی که در میان لایه‌ی شنی با ضخامت ۳ متر، نسبت سهم نشست میان لایه‌ی شنی بسیار زیاد است.

• درصد سهم نشست خاک‌های ماسه‌یی در کنار و مجاورت شمع‌ها در حالت هندسی رادیه‌ی شمع کوچک تا مقدار معینی افزایش یافته و پس از آن ثابت شده است؛ ولی در حالت هندسی رادیه‌ی شمع بزرگ، تقریباً بدون تغییر و ثابت باقی مانده است.

• درصد سهم نشست خاک‌های ماسه‌یی در زیر تراز قرارگیری نوک شمع‌ها که نمایانگر عملکرد محوری مطلوب شمع‌هاست، کاهش یافته است.

• درصد سهم نشست مربوط به شمع‌ها از نشست کل، اندکی کاهش یافته است.

همچنین براساس شکل ۱۲، در حالت هندسی رادیه‌ی شمع کوچک که تغییرات نشست، شدت بیشتری دارد، شدت تغییرات مذکور به علت فشار ناشی از میان لایه‌ی شنی است که در اثر آن شمع‌ها دچار تغییر مکان جانبی می‌شوند و از عملکرد محوری آن‌ها کاسته شده و به دنبال آن، انتقال نیرو و میزان نشست خاک در تراز زیر نوک شمع‌ها کاهش یافته است. شایان ذکر است که میزان نشست میان لایه‌ی شنی و خاک ماسه‌یی در کنار و مجاورت شمع‌ها افزایش یافته است. مطابق شکل ۱۲، روند تغییرات نشست اجزا با شدتی کمتر در حالت هندسی رادیه‌ی شمع بزرگ ایجاد شده است و نمودار تغییرات نشست مذکور در ضخامت‌های مختلف، شیب ملایمی دارد.

۵.۴. بررسی رفتار اتکایی و اصطکاکی شمع‌ها در رادیه‌ی شمع

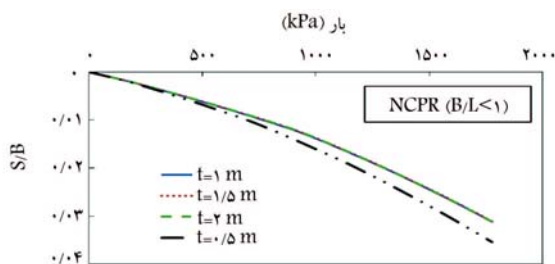
منفصل همگام با تغییر ضخامت میان لایه‌ی شنی

یکی دیگر از موضوعات مهم، مکانیسم توزیع بار در سیستم رادیه‌ی شمع منفصل، با تمرکز بر نحوه‌ی انتقال بار در شمع‌ها و محاسبه‌ی سهم باربری نوک و سهم باربری جدار شمع‌هاست که در ۳ دسته‌ی: شمع مرکز، شمع کنار گوشه و شمع کنار وسط قابل طبقه‌بندی و بحث و بررسی است (شکل ۱۳). در حالت هندسی رادیه‌ی شمع بزرگ و در شرایط ساخت‌گاهی مورد مطالعه در پژوهش حاضر، ۶۰-۷۰ درصد از سهم باربری مجموعه‌ی شمع‌ها به صورت اتکایی عمل می‌کند و در این حالت هندسی، ظرفیت باربری شمع‌ها بیشتر متکی بر مقاومت نوک آن‌هاست. در حالی که در حالت هندسی رادیه‌ی شمع کوچک، عملکرد اصطکاکی شمع‌ها بیشتر ناشی از عملکرد اتکایی آن‌هاست و سهم باربری جدار شمع‌ها از حدود ۳۰٪ در حالت رادیه‌ی شمع بزرگ به حدود ۶۰٪ در حالت هندسی رادیه‌ی شمع کوچک تغییر یافته است. افزایش ضخامت میان لایه‌ی شنی نیز تأثیر قابل توجهی در نحوه‌ی انتقال بار شمع‌ها و تغییر در سهم باربری نوک و جدار آن‌ها نداشته است.

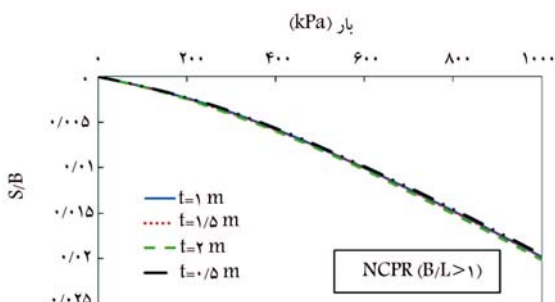
۶.۴. بررسی تأثیر افزایش قطر شمع‌ها در عملکرد رادیه‌ی شمع

منفصل، در دو حالت هندسی رادیه‌ی شمع‌های بزرگ و کوچک

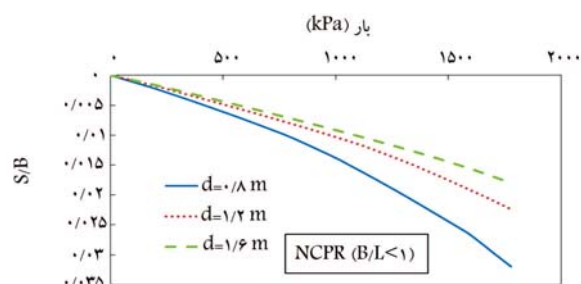
با افزایش قطر شمع‌ها، نشست بی‌کاهش می‌یابد. تأثیر پذیری منحنی‌های رفتار از قطرهای مختلف شمع‌ها، در حالت هندسی رادیه‌ی شمع کوچک نسبت به رادیه‌ی شمع بزرگ، بیشتر است. لذا همان‌طور که در شکل ۱۴ مشاهده می‌شود، کاهش نشست در حالت هندسی رادیه‌ی شمع بزرگ، کمتر و یکنواخت‌تر است و در حالت هندسی رادیه‌ی شمع کوچک، میزان کاهش نشست بیشتر است. بیشترین کاهش نشست با افزایش قطر از ۸/۰ به ۱۲/۰ متر ایجاد می‌شود که در حالت هندسی



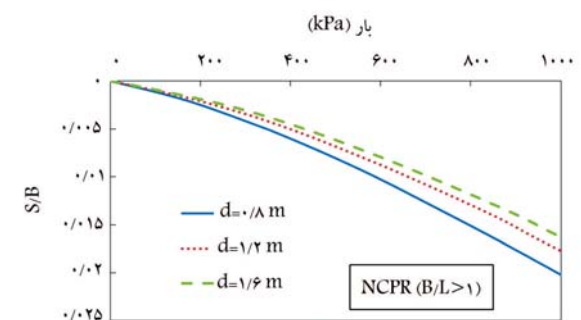
الف) رادیه شمع کوچک؛



ب) رادیه شمع بزرگ.



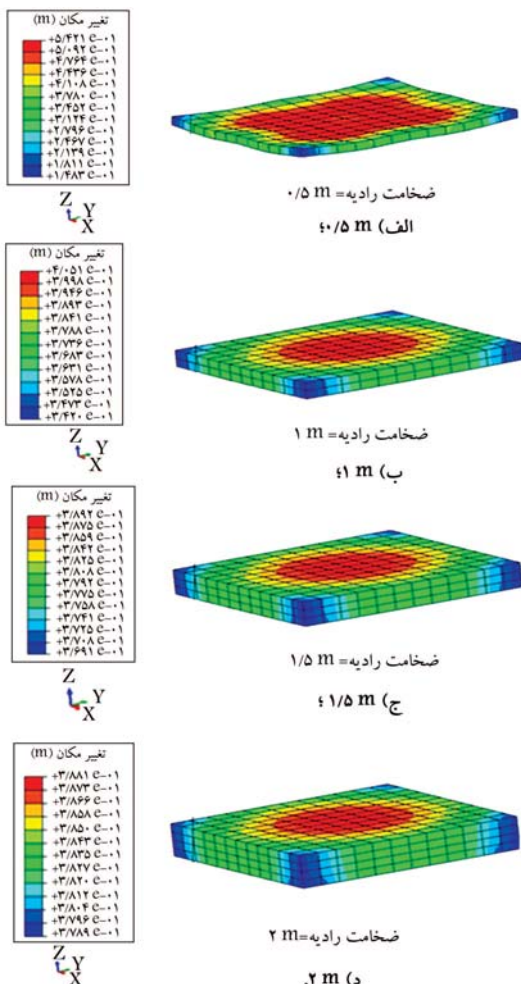
الف) رادیه شمع کوچک؛



ب) رادیه شمع بزرگ.

شکل ۱۵. منحنی بار - نشست رادیه‌ی شمع منفصل در مقابل تغییرات ضخامت در حالت هندسی.

شکل ۱۴. منحنی بار - نشست رادیه‌ی شمع منفصل در حالت هندسی.



شکل ۱۶. کانتورهای تغییر مکان رادیه در سیستم رادیه‌ی شمع منفصل در حالت هندسی رادیه‌ی شمع کوچک برای ضخامت‌ها.

رادیه‌ی شمع کوچک در حدود ۲ برابر و در حالت رادیه‌ی شمع بزرگ در حدود ۱/۳ برابر است. می‌توان علت اختلاف روند کاهش نشست با افزایش قطر شمع در سیستم رادیه‌ی شمع‌های بزرگ و کوچک را تفاوت در سهم باربری در دو حالت هندسی دانست. نسبت سهم باربری برای مجموعه‌ی شمع‌ها در حالت هندسی رادیه‌ی شمع کوچک بیشتر از نسبت سهم باربری شمع‌ها در حالت هندسی رادیه‌ی شمع بزرگ است (شکل ۸).

۷.۴. بررسی تأثیر حالات هندسی رادیه‌های شمع بزرگ و شمع

کوچک در عملکرد رادیه، در سیستم رادیه‌ی شمع منفصل

در شکل ۱۵، تأثیر ضخامت رادیه در رفتار بار- نشست سیستم رادیه‌ی شمع منفصل بررسی شده است. در بررسی منحنی‌های رفتار بار- نشست رادیه‌ی شمع منفصل، در هر دو حالت هندسی رادیه‌ی شمع‌های بزرگ و کوچک (به استثناء ضخامت ۰/۵ متر)، تقریباً تغییرات ضخامت، اثر قابل توجهی در نشست سیستم ندارد. در سیستم رادیه‌ی شمع کوچک، بیشترین نشست برای ضخامت ۰/۵ متر و در حدود ۱/۱۳ برابر سایر ضخامت‌ها حاصل شده است.

برای بررسی دقیق‌تر علت تغییر رفتار نشست سیستم در ضخامت ۰/۵ متر در شرایط هندسی رادیه‌ی شمع کوچک، کانتورهای نشست در ضخامت‌های مختلف بررسی شد (شکل ۱۶). مقایسه‌ی کانتورهای تغییر مکان رادیه نشان می‌دهد که دلیل این تغییر رفتار، انعطاف پذیر عمل کردن رادیه در ضخامت ۰/۵ متر (حتی با وجود کوچک‌تر بودن ابعاد رادیه و در نتیجه افزایش سختی خمشی آن) است که موضوعی نادر است؛ زیرا در این‌گونه مدل‌سازی‌ها رادیه معمولاً به صورت صلب عمل می‌کند. دلیل این موضوع، علاوه بر ضخامت کم رادیه، تفاوت رفتار سیستم پی رادیه‌ی شمع منفصل در دو حالت هندسی رادیه‌ی شمع بزرگ و رادیه‌ی شمع کوچک است که به تفصیل در بخش‌های قبلی به آن پرداخته شد. همان‌طور که بیان شده است، در شرایط هندسی رادیه‌ی شمع کوچک، به علت گیرداری نوک شمع‌ها

رادیه‌ی شمع کوچک در ناحیه‌ی بالای شمع‌ها و در حالت هندسی رادیه‌ی شمع بزرگ در ناحیه‌ی پایین شمع‌ها ایجاد می‌شود که از مهم‌ترین عوامل تغییر رفتار سیستم رادیه‌ی شمع منفصل برای دو حالت هندسی رادیه‌ی شمع‌های کوچک و بزرگ محسوب می‌شود.

۲. در حالت هندسی رادیه‌ی شمع کوچک در قیاس با حالت هندسی رادیه‌ی شمع بزرگ، سهم انتقال بار از میان‌لایه به خاک بستر در حدود ۱/۵ برابر کاهش و سهم باربری مجموعه‌ی گروه شمع‌ها در حدود ۲ برابر افزایش می‌یابد. همچنین در حالت هندسی رادیه‌ی شمع بزرگ، شمع‌ها بیشتر عملکرد انکابی دارند و سهم باربری نوک در آن‌ها غالب است. ولی در حالت هندسی رادیه‌ی شمع کوچک، سهم باربری جدار شمع‌ها افزایش قابل ملاحظه‌ی نشان داده است.

۳. در شرایط بارگذاری و مقاومت خاک یکسان، حالت هندسی رادیه‌ی شمع بزرگ، عملکرد بهتری نسبت به رادیه‌ی شمع متصل نشان می‌دهد، ولی در حالت هندسی رادیه‌ی شمع کوچک، رادیه‌ی شمع متصل عملکرد بهتری نسبت به رادیه‌ی شمع منفصل از خود نشان می‌دهد.

۴. افزایش پارامترهای مقاومتی میان‌لایه‌ی شنی، در حالت هندسی رادیه‌ی شمع کوچک، تأثیر بیشتری در کاهش نشست (در حدود ۱/۱۵ برابر) نسبت به حالت هندسی رادیه‌ی شمع بزرگ دارد.

۵. افزایش ضخامت میان‌لایه‌ی شنی در حالت هندسی رادیه‌ی شمع بزرگ موجب کاهش نشست در حدود ۱/۱۵ برابر و در حالت هندسی رادیه‌ی شمع کوچک موجب افزایش نشست در حدود ۱/۳ برابر می‌شود. همچنین افزایش ضخامت لایه‌ی شنی در حالت هندسی رادیه‌ی شمع کوچک، موجب افزایش سهم نشست خاک ماسه‌یی در سطح پیرامون و هم‌تراز جدار شمع‌ها می‌شود. ولی در حالت هندسی رادیه‌ی شمع بزرگ، تأثیری در تغییر سهم نشست خاک ناحیه‌ی مذکور مشاهده نمی‌شود.

۶. در حالت هندسی رادیه‌ی شمع کوچک نسبت به حالت هندسی رادیه‌ی شمع بزرگ، افزایش قطر شمع‌ها تأثیر بیشتری در کاهش نشست نسبت به حالت هندسی رادیه‌ی شمع بزرگ دارد. همچنین ضخامت کم رادیه در سیستم رادیه‌ی شمع منفصل در حالت هندسی رادیه‌ی شمع کوچک، موجب بروز رفتار انعطاف‌پذیر رادیه می‌شود.

در عمق پایین‌تر، تغییر مکان‌های جانبی در ناحیه‌ی بالای شمع‌ها رخ می‌دهد و تأثیر آن در رادیه با ضخامت کم، بیشتر از تأثیر تغییر مکان‌های جانبی رخ داده در ناحیه‌ی نوک شمع‌ها در شرایط هندسی رادیه‌ی شمع بزرگ است. به همین دلیل است که با وجود بارگذاری یکسان و شرایط خاکی یکسان، رادیه با ضخامت ۰/۵ متر در حالت هندسی رادیه‌ی شمع بزرگ، همچنان به صورت صلب عمل کرده است، ولی در حالت هندسی رادیه‌ی شمع کوچک، انعطاف‌پذیر رفتار کرده است.

۵. نتیجه‌گیری

در سال‌های اخیر، پژوهشگران به استفاده از سیستم رادیه‌ی شمع منفصل به دلیل مزایای آن توجه کرده‌اند. سیستم رادیه‌ی شمع‌ها براساس الزامات طراحی به دو گروه رادیه‌ی شمع‌های بزرگ و کوچک تقسیم می‌شوند، که رادیه‌ی شمع بزرگ به صورت $BR/L > 1$ و رادیه‌ی شمع کوچک به صورت $BR/L > 1$ تعریف می‌شوند. بررسی مطالعات پیشین نشان داده است که به مقوله‌ی نحوه‌ی توزیع بار و نشست و سهم باربری بین اجزاء مختلف سیستم رادیه‌ی شمع منفصل (مانند: شمع، رادیه، میان‌لایه‌ی شنی) در شرایط مختلف رادیه‌ی شمع‌های کوچک و بزرگ به صورت کاربردی توجه نشده است. همچنین تغییرات پارامتریک مؤثر در تحلیل‌ها (مانند: ابعاد رادیه، زاویه‌ی اصطکاک، مدول کشسانی، مشخصات هندسی شمع و ضخامت میان‌لایه‌ی شنی) کمتر بررسی شده است.

در پژوهش حاضر، با استفاده از شبیه‌سازی عددی در محیط سه‌بعدی اجزاء محدود و پس از صحت‌سنجی آن، به بررسی سهم باربری اجزاء سیستم رادیه‌ی شمع در دو گروه هندسی و تأثیر تغییر نسبت بعد رادیه به طول شمع‌ها انجام شده است. همچنین موارد متعددی از تحلیل‌های پارامتریک پارامترهای هندسی و ژئوتکنیکی مؤثر در سیستم رادیه‌ی شمع و در دو حالت هندسی انجام شد که در برخی موارد، تغییرات قابل‌توجهی در رفتار رادیه‌ی شمع منفصل مشاهده شد. از جمله تغییرات مذکور، تفاوت در نسبت سهم باربری گروه شمع و نیز نسبت سهم بار انتقالی از میان‌لایه به خاک بستر است. نتایج حاصل از پژوهش حاضر را می‌توان به اختصار به این شرح بیان کرد:

۱. تغییر مکان جانبی شمع‌ها در سیستم رادیه‌ی شمع منفصل، در حالت هندسی

منابع (References)

1. Davis, E.H. and Poulos, H.G. "The analysis of piled raft systems", *Australia Geotechnique Journal*, **2**(1), pp. 21-27 (1972).
2. Burland, J.B. and Broms, B. "Behavior of foundations and structures on soft ground", In Proc. 9th ICSMFE (1977).
3. Hansbo, S. and Jendebly, L. "A case study of two alternative foundation principles: Conventional friction piling and creep piling", *Vag-och Vattenbyggaren*, **7**(8), pp. 29-31 (1983).
4. Padfield, C.J. and Sharrock, M.J. "Settlement of structures on clay soils", Construction Industry Research and Information Association, Directorate of Civil Engineering Service, Property Services Agency, Department of the Environment (1983).
5. Hansbo, S. and Jendebly, L. "A case study of two alternative foundation principles: Conventional friction piling and creep piling", *Vag-och Vattenbyggaren*, **7**(8), pp. 29-31 (1983).
6. Cooke, R.W. "Piled raft foundations on stiff clays- a contribution to design philosophy", *Geotechnique*, **36**(2), pp. 169-203 (1986).

7. Randolph, M.F. "Science and empiricism in pile foundation design", *Geotechnique*, **53**(10), pp. 847-875 (2003).
8. Horikoshi, K. and Randolph, M.F. "A contribution to optimum design of piled rafts", *Geotechnique*, **48**(3), pp. 301-317 (1998).
9. Clancy, P. and Randolph, M.F. "Analysis and design of piled raft foundations", *International Journal for Numerical and Analytical Methods in Geomechanics*, **17**(12), pp. 849-869 (1993).
10. Russo, G. and Viggiani, C. "Factors controlling soil-structure interaction for piled rafts", *In Proceedings of the International Conference on Soil-Structure Interaction in Urban Civil Engineering*, Darmstadt, pp. 79-102 (1998).
11. Poulos, H. G. "Piled raft foundations: Design and applications", *Geotechnique*, **51**(2), pp. 95-113 (2001).
12. Mandolini, A. "Design of piled raft foundations: Practice and development", *Proceedings of Deep Foundations on Bored and Auger Piles-BAP IV*, Ghent, Belgium (2003).
13. Wong, I.H., Chang, M.F. and Cao, X.D. "Raft foundations with disconnected piles", *Design Applications of Raft Foundations* (2000).
14. Cao, X.D., Wong, I.H. and Chang, M.F. "Behavior of model rafts resting on pile-reinforced sand", *Journal of geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, **130**(2), pp. 129-138 (2004).
15. Liang, F.Y., Chen, L.Z. and Shi, X.G. "Numerical analysis of composite piled raft with cushion subjected to vertical load", *Computers and Geotechnics*, **30**(6), pp. 443-453 (2003).
16. Liang, F., Li, J. and Chen, L. "Optimization of composite piled raft foundation with varied rigidity of cushion", *In Foundation Analysis and Design: Innovative Methods*, pp. 29-34 (2006).
17. Eslami, A., Veiskarami, M. and Eslami, M.M. "Study on optimized piled-raft foundations (PRF) performance with connected and non-connected piles-three case histories", *International Journal of Civil Engineering*, **10**(2), pp. 100-111 (2012).
18. Sharma, V.J., Vasanvala, S.A. and Solanki, C.H. "Effect of cushion on composite piled raft foundation in layered soil under seismic forces", *International Journal of Scientific Engineering and Technology*, **1**(6), pp. 314-322 (2011).
19. Hadad, A. and Shafiee, E. "Evaluation of gravel middle-layer geometry and parameters effect on performance of non-connected piled raft in sandy soil", *The 10th International Congress on Civil Engineering*, University of Tabriz (2015).
20. Hadad, A. and Shafiee, E. "Evaluation of negative friction condition on non-connected piled raft", *The 10th International Congress on Civil Engineering*, University of Tabriz (2015).
21. El Sawwaf, M. "Experimental and numerical study of eccentrically loaded strip footings resting on reinforced sand", *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, **135**(10), pp. 1509-1518 (2010).
22. Fioravante, V. and Giretti, D. "Contact versus non-contact piled raft foundations", *Canadian Geotechnical Journal*, **47**(11), pp. 1271-1287 (2010).
23. Zhang, H. and Ming, L.S. "Mechanical performance of settlement-reducing pile foundation with cushion", *Advanced Materials Research*, **368**, pp. 2545-2549 (2012).
24. Saeidi, A. and Baziar, M.H. "Evaluation of gravel padding effect on discontact piled raft using shake table and centrifuge", *The 1st Iranian Conference on Geotechnical Engineering*, University of Mohaghegh Ardabili (2013).
25. Baziar, M.H., Salehzade, H. and Rasouli, H. "Centrifuge modeling of granular layer effects to reduce settlement of discontact piled raft", *MS. Thesis*, Iran University of Science and Technology (2013).