

مطالعه اثر مقیاس در مدلسازی فیزیکی پی شمع در ماسه تحت بارگذاری فشاری

مهدی شرف خواه^۱ و عیسی شوش پاشا^{۲*}

۱. دانشجوی دکتری، دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه صنعتی نوشیروانی بابل

۲. دانشیار، دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه صنعتی نوشیروانی بابل

*shooshpasha@nit.ac.ir

تاریخ دریافت: ۹۷/۳/۲۴ تاریخ پذیرش: ۹۸/۱۰/۱۰

چکیده

پی‌های گسترده در خاک‌های ماسه‌ای به طور معمول از ظرفیت باربری بالایی برخوردار بوده ولی میزان نشست در این خاک‌ها ظرفیت باربری مجاز پی را محدود می‌کند. امروزه به کارگیری پی‌های شمعی به عنوان راه‌حلی برای کاهش نشست بسیار رایج است. در چنین شرایطی سهم بیشتر بار به پی گسترده وارد می‌شود و شمع‌ها نقش کاهنده نشست را خواهند داشت. تعداد شمع‌های استفاده شده و محل قرارگیری آن‌ها به گونه‌ایست که نشست پی را به مقدار مجاز کاهش دهد. اندرکنش میان شمع - خاک - پی گسترده در پی شمع پیچیده است. کارهای تحلیلی و عددی فراوانی در مورد پی‌های شمعی انجام شده ولی کارهای آزمایشگاهی نسبتاً اندک است. در این مقاله با مدلسازی فیزیکی بارگذاری فشاری پی‌های شمعی در آزمایشگاه و نیز با کمک تحلیل عددی اجزاء محدود به ارزیابی رفتار این پی‌ها در ماسه خشک پرداخته است. شمع‌های مورد آزمایش و پی گسترده به صورت بتنی درجا اجرا شدند. مدل‌های فیزیکی استفاده شده شامل شمع منفرد، شمع منفرد واقع در گروه شمع، پی گسترده و پی شمع بودند. همچنین اثر مقیاس مدل فیزیکی روی نتایج مورد بررسی قرار گرفته است. نتایج نشان داد که وقتی شمع منفرد توسط شمع‌های دیگر محصور می‌شود، ظرفیت باربری آن افزایش می‌یابد. همچنین با افزایش تعداد شمع‌ها در زیر پی گسترده مقدار نشست پی به طور قابل ملاحظه‌ای کاهش یافته است. با کمک مدلسازی عددی و نیز بکارگیری نظریه حالت بحرانی می‌توان با دقت قابل قبولی از نتایج مدلسازی فیزیکی با ابعاد آزمایشگاهی در مقیاس واقعی نیز بهره جست.

واژگان کلیدی: پی‌های شمعی، شمع‌های بتنی درجا، ماسه خشک، اثر مقیاس، تحلیل عددی اجزاء محدود

۱- مقدمه

باربری بالایی برخوردار بوده ولی در عوض عامل نشست در

این خاک‌ها تعیین کننده است. اگر پی گسترده با احداث

پی‌های گسترده در خاک‌های ماسه‌ای به طور معمول از ظرفیت

رفتار واقعی سازه را نمایش دهند. در واقع علت این رویداد برابر نبودن تنش‌ها در الگو و سازه واقعی در نقاط متناظر است. رابطه (۲) تنش قائم کل در خاک‌ها را در شرایط سکون نشان می‌دهد.

$$\sigma = \rho g z \quad (2)$$

که σ تنش قائم کل، ρ چگالی خاک، g شتاب ثقل و z عمق نقطه مورد نظر هستند. اگر ابعاد هندسی الگو و سازه واقعی با نسبت مقیاس n با هم متشابه شود و چگالی خاک در الگو و سازه واقعی یکسان باشد، در این صورت برای برقراری تشابه، لازم است تا شتاب‌ها در الگو و سازه با نسبت $1/n$ به هم مرتبط شوند. در بسیاری از پژوهش‌های انجام شده با کمک الگوهای $1g$ ، شتاب در الگو و سازه یکسان و برابر شتاب ثقل و چگالی‌ها نیز برابر در نظر گرفته شدند. در نتیجه این شرایط با اصول تشابه سازگاری ندارد. از طرفی مطابق نظریه نسبت منافذ بحرانی و نیز خط حالت پایا، رفتار خاک به جای اینکه تابع نسبت منافذ اولیه باشد، به فاصله نسبت منافذ اولیه از خط حالت پایا بستگی دارد. مطابق پژوهش [10] رفتار مدل زمانی با مقیاس واقعی تشابه دارد که نسبت منافذ خاک در مدل و سازه واقعی از خط حالت بحرانی فاصله‌ای برابر داشته باشد. به این ترتیب با انتخاب نسبت منافذ مناسب برای مدل $1g$ می‌توان رفتار سازه واقعی را پیش‌بینی نمود. نسبت منافذ

$$e_m = e_p + \lambda \ln \left(\frac{\sigma'_m}{\sigma'_p} \right) \quad (3)$$

بدست می‌آید.

که e_m و e_p به ترتیب نسبت منافذ در مدل و سازه واقعی، λ شیب خط حالت پایا و σ'_m و σ'_p به ترتیب تنش میانگین مؤثر در مدل و سازه واقعی است. نسبت تشابه هندسی (n) با توجه به تفاوت دانسیته مدل و واقعیت از رابطه (۴) بدست می‌آید.

$$n = \frac{\gamma'_m}{\gamma'_p} \quad (4)$$

که γ'_m و γ'_p به ترتیب وزن مخصوص مؤثر خاک در مقیاس واقعی و مدل و N نسبت تنش‌ها در مدل به سازه واقعی است. در همه پژوهش‌های آزمایشگاهی فوق، از شمع‌های فلزی استفاده شده است. شمع‌ها به صورت کوبشی یا توسط جک نصب شده‌اند. با این وجود در حال حاضر استفاده از شمع‌های بتنی درجا

تعدادی شمع در زیر آن تقویت شود، به این سیستم انتقال بار از سازه به خاک، پی شمع گفته می‌شود. پی‌های شمعی از سه جزء شمع، خاک و پی گسترده تشکیل شده است [1]. برخی از مطالعات تحلیلی و عددی انجام شده در مورد پی‌شمع‌ها شامل [3-1] هستند. به منظور کنترل نتایج روش‌های تحلیلی و عددی می‌توان از مدلسازی فیزیکی در آزمایشگاه بهره جست. مطالعات آزمایشگاهی در این خصوص اندک است [4-7]. در تحلیل ابعادی، پارامترهای مهندسی به کمیت‌های اساسی جرم (M)، طول (L) و زمان (T) کاهش می‌یابد. به عنوان نمونه تنش به صورت $ML^{-1}T^{-2}$ یا M/LT^2 نشان داده می‌شود و کرنش بدون بعد است. با تعریف ضرایب مقیاس بین الگو و سازه واقعی می‌توان نتایج الگوهای فیزیکی را در واقعیت نیز پیش‌بینی نمود. ضرایب مقیاس، زمانی قابل دستیابی بوده که بین الگو و سازه واقعی تشابه لازم برقرار باشد.

در تشابه هندسی، بین ابعاد هندسی در الگو و سازه واقعی یک نسبت تشابه مشخص وجود دارد. در واقع الگو و سازه واقعی زمانی از نظر هندسی متشابه هستند که نسبت تشابه بین هر دو نقطه متناظر ثابت باشد. نسبت تشابه از رابطه (۱) بدست می‌آید.

$$n = \frac{L_m}{L_p} \quad (1)$$

که L_m طول‌ها در الگو و L_p طول‌ها در سازه واقعی است. بدون در نظر گرفتن اثر مقیاس در یک مدل آزمایشگاهی، نتایج بدست آمده را نمی‌توان به مقیاس واقعی تعمیم داد. این درحالی است که در بسیاری از مطالعات مدلسازی‌های فیزیکی پی‌های شمعی اشاره شده در بالا، در مورد اثر مقیاس هیچ صحبتی به میان نیامده است. طبق نتایج بدست آمده از یک پژوهش اگر نسبت بعد فونداسیون به قطر دانه‌ها بزرگتر از ۳۰ باشد، می‌توان از اثر مقیاس برای اندازه دانه‌ها صرف‌نظر نمود [8]. در مهار کششی مدفون برای نسبت قطر مهار به اندازه متوسط دانه‌های بزرگتر از ۲۵ نتیجه مشابهی بدست آمد [9]. رفتار خاک به تنش محصور شدگی اولیه و نسبت منافذ اولیه خاک بستگی دارد [10]. به همین دلیل در مدل‌های $1g$ از آنجایی که نسبت منافذ مدل با سازه واقعی برابر است ولی تراز تنش‌ها متفاوت هست، نمی‌توانند

۲- مصالح آزمایش

ماسه مورد استفاده در این مطالعه ریزدانه بود و از سواحل دریای مازندران و از شهرستان بابلسر تهیه شد. ماسه در هوای آزاد خشک شد. در طبقه بندی یونیفاید این ماسه در طبقه SP قرار گرفت. مشخصات ماسه مورد نظر در جدول (۱) نشان داده شده است. اندازه متوسط دانه‌ها برابر 0.26 میلی‌متر است و نسبت قطر شمع به اندازه متوسط دانه‌ها برابر 10.9 است. بنابراین می‌توان از اثر مقیاس اندازه دانه‌ها صرف‌نظر نمود [8]. همان‌گونه که اشاره شد، طبق رابطه (۳)، به منظور برقراری تشابه، لازم است تا نسبت منافذ خاک در مقیاس واقعی نسبت به مدل آزمایشگاهی کاهش یابد [10]. بنابراین چنانچه در مدل آزمایشگاهی تراکم نسبی خاک زیاد باشد، ممکن است در مقیاس واقعی، نسبت منافذ خاک مورد نظر از مقدار کمینه کوچکتر شود که در این صورت قابل قبول نیست. از این رو در این پژوهش از ماسه سست با تراکم 30% استفاده شد تا در واقعیت با کاهش نسبت منافذ بتوان رفتار ماسه با تراکم نسبی بیشتر را بررسی نمود.

جدول ۱. مشخصات مصالح مورد آزمایش

Specific gravity	2.79
Minimum dry density, γ_{dmin} (kN/m ³)	14.9
Maximum dry density, γ_{dmax} (kN/m ³)	17.6
Particle size at percent finer 10%, D_{10} (mm)	0.11
Coefficient of uniformity, C_u	2.60
Coefficient of curvature, C_c	1.09
Raft compressive strength (MPa)	25
Piles compressive strength (MPa)	10
Raft unit weight (kN/m ³)	22.6
Piles unit weight (kN/m ³)	20.8

Table 1. Material properties

به منظور دستیابی به اهداف مورد نظر در خصوص اثر مقیاس مدل‌های آزمایشگاهی طبق پژوهش مرجع [10]، آزمایش سه محوری به ترتیب روی نمونه‌های با تراکم نسبی 30% ، 60% ، 85% و 100% انجام شده است. در تراکم نسبی 100% آزمایش تنها روی یک نمونه و به منظور بررسی تغییرات نسبت منافذ برحسب افزایش فشار دورگیر در نسبت منافذ کمینه انجام شده است. برای دستیابی به مشخصات ماسه در حالت بحرانی، آزمایش سه محوری تا مرحله‌ای که حجم نمونه و تنش انحرافی به مقدار ثابتی برسد ادامه یافت (شکل ۱). پارامترهای مقاومتی ماسه مورد

بسیار رایج است. در هنگام اجرای شمع‌های کوبشی، دانسیته طبیعی خاک در هنگام کوبیدن شمع افزایش می‌یابد. همچنین زاویه اصطکاک بین جداره شمع و خاک (δ) در شمع‌های بتنی درجا و شمع‌های فولادی متفاوت است. بنابراین به منظور مدلسازی فیزیکی پی‌های شمعی با شمع‌های بتنی درجا، لازم است تا از مصالح مشابه در آزمایشگاه استفاده شود. پژوهش‌های گذشته اغلب روی ماسه با تراکم نسبی متوسط و زیاد انجام شده، در حالی که در پژوهش حاضر نشان داده می‌شود که پی‌شمع‌ها می‌توانند برای بهبود باربری خاک‌های سست مورد استفاده قرار گیرد. از این رو مطالعه حاضر به مدلسازی فیزیکی پی‌های شمعی در ماسه سست بابلسر اختصاص دارد. از آنجایی که پژوهش‌های قبلی بیشتر بر روی شمع و پی فلزی انجام شده‌اند و شمع‌ها کوبشی بوده‌اند، در این پژوهش شمع‌های بکار رفته با حفاری و بتن ریزی درجا احداث شدند و همچنین پی گسترده بتن مسلح بوده و به صورت درجاریز احداث شد. روی شمع منفرد، شمع منفرد واقع در گروه شمع، پی گسترده و پی‌های شمعی آزمایش انجام شد. از آنجایی که در پژوهش‌های گذشته مطالعه اثر مقیاس در پی‌شمع بررسی نشده، در این پژوهش ابتدا با کمک تحلیل عددی اجزاء محدود رفتار این نوع پی‌ها مورد ارزیابی قرار گرفت و سپس به بررسی اثر مقیاس و ابعاد مدل‌ها روی رفتار آن‌ها پرداخته شد.

۳- مشخصات شمع‌ها و پی گسترده

شمع‌ها بتنی درجا بوده و قطر طول مدفون آن‌ها ثابت و به ترتیب برابر $28/4$ میلیمتر و 253 میلی‌متر بوده است. این ابعاد بعد پایان آزمایش و خروج شمع‌ها اندازه‌گیری شد. بنابراین نسبت طول به قطر شمع‌ها برابر با $8/91$ هستند. پی گسترده مورد استفاده در مدل مربعی و ابعاد آن برابر 200×200 میلی‌متر و ضخامت آن برابر 30 میلی‌متر بود. پی گسترده بتن مسلح درجا است و در هر یک از جهت‌های طولی و عرضی از چهار میلگرد نمره ۶، از نوع AIII استفاده شده است. از آنجایی که قطر شمع‌ها نسبتاً کوچک است، برای اطمینان از پیوستگی مصالح در طول بدنه شمع، سنگدانه‌های بکار رفته در شمع کوچکتر از سنگدانه‌های پی گسترده است. همچنین در بتن شمع از فوق روان‌کننده استفاده شد. مقاومت فشاری بتن پس از هفت روز تعیین شده است.

آزمایش حاصل از آزمایش سه محوری در جدول (۲) نشان داده شده است.

جدول ۲. پارامترهای مقاومت برشی ماسه

Internal friction angle at constant volume, ϕ_{CV} (°)	Internal friction angle at peak, ϕ_{peak} (°)	Cohesion (kPa)	Relative density (%)
33.7	37.3	0.0	30
38.2	42.7	0.0	60
39.4	44.7	0.0	85

Table 2. Shear strength parameters of sand

شکل ۱. تغییرات تنش انحرافی بر حسب کرنش محوری با فشار دورگیر ثابت در آزمایش سه محوری (الف) ۵۰ کیلوپاسکال (ب) ۱۰۰ کیلوپاسکال (پ) ۱۵۰ کیلوپاسکال (ت) ۲۰۰ کیلوپاسکال

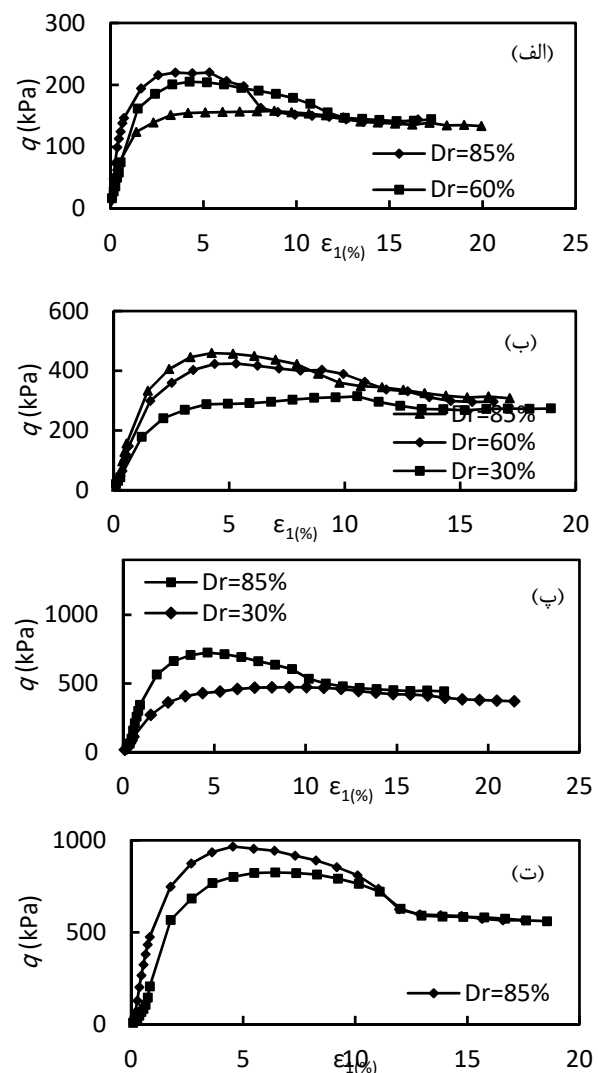


Fig. 1. Variation of deviator stress-axial strain at constant mean pressure in triaxial test

۴- تجهیزات آزمایش بارگذاری

مدل‌های مورد آزمایش در جعبه فلزی مشبک به ابعاد $1/3 \times 1/3$ متر و ارتفاع $1/10$ متر انجام شد. جداره مخزن از صفحات پلکسی شفاف بوده تا بتوان سطح خاک در هنگام خاکریزی را مشاهده نمود.

مخزن روی یک پاشنه بتن آرمه صلب به ابعاد $2/2 \times 2/2$ متر و ضخامت ۳۰ سانتی‌متر قرار داده شد. برای حذف اثر انتهایی مطابق پیشنهاد استاندارد BS 1377:Part9 در مورد آزمایش بارگذاری صفحه، در صورتی که فاصله تکیه‌گاه‌ها از محور صفحه بیش از سه برابر عرض صفحه باشد، از اثر آن‌ها روی نتایج می‌توان صرف‌نظر نمود.

عکس‌العمل‌های لازم برای بارگذاری توسط یک قاب بسته فراهم شد. این قاب از بالا به یک تی‌ورق به ارتفاع ۳۰ سانتی‌متر متصل بود. ضخامت ورق‌ها ۱۵ میلی‌متر بودند. جک هیدرولیکی دستی با ظرفیت ۵۰۰ کیلو نیوتن و دامنه حرکت ۱۰ سانتی‌متر در زیر این تی‌ورق نصب شد. قطر میله بارگذاری جک ۹۰ میلی‌متر بوده است. نیرو سنج دارای ظرفیت ۳۰۰ کیلو نیوتن بوده است. پنج گج تغییر مکان عقربه ایبا دامنه حرکت ۵۰ میلی‌متر روی دو تیر مرجع نصب شدند. دو تا در گوشه، دو تا در لبه و یکی هم تقریباً در وسط کلاهک پی قرار گرفت. تیرهای مرجع روی لبه‌های جعبه قرار گرفت. در هنگام بارگذاری شمع منفرد، دو گج تغییر مکان در دو طرف شمع قرار داده شد و متوسط قرائت آن‌ها به عنوان نشست شمع در نظر گرفته شد. تجهیزات آزمایش بارگذاری در شکل (۲) نشان داده شده است.

۵- مدل‌های آزمایش و چگونگی ساخت آن‌ها

آزمایش‌ها عبارت بود از: شمع منفرد، شمع منفرد واقع در گروه شمع، پی گسترده، پی‌های شمعی دارای چهار و نه شمع. شمع-های منفرد گوشه، مرکز و لبه واقع در گروه شمع به طور جداگانه تحت آزمایش بارگذاری قرار گرفتند تا اثر احداث شمع‌ها روی یکدیگر بررسی شود. مدل‌های مورد آزمایش در این پژوهش در شکل (۳) نشان داده شده است. نسبت فاصله به قطر شمع‌ها (s/d) و چگونگی نامگذاری آزمایش‌ها در جدول (۳) نشان داده

شکل ۲. تجهیزات مورد استفاده در آزمایش بارگذاری

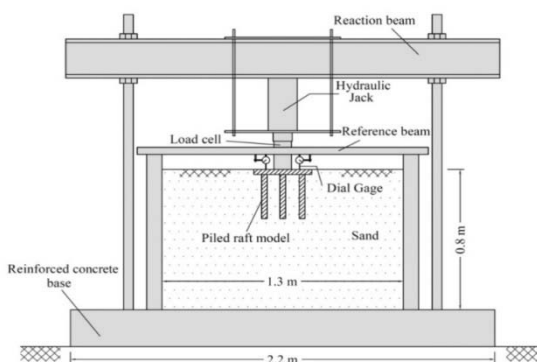


Fig. 2. Schematic of test setup

شده است. هر آزمایش یک بار تکرار شد تا درستی نتایج کنترل شود.

برای انجام هر آزمایش، ابتدا ماسه برای دستیابی به دانسیته مورد نظر توزین شده و سپس به صورت بارشی به درون جعبه آزمایش ریخته شد. خاک در لایه‌های ۱۰ سانتی‌متری متراکم شد. از آنجایی که تراکم نسبی خاک برابر ۳۰٪ در نظر گرفته شد، برای تراکم از میله و صفحه چوبی استفاده شد. صفحه چوبی دارای ابعاد ۲۰×۲۰ سانتی‌متر و ضخامت یک سانتی‌متر بود. ارتفاع نهایی خاک برابر ۸۰ سانتی‌متر بوده است.

شکل ۳. انواع بی‌های مورد آزمایش در این مطالعه

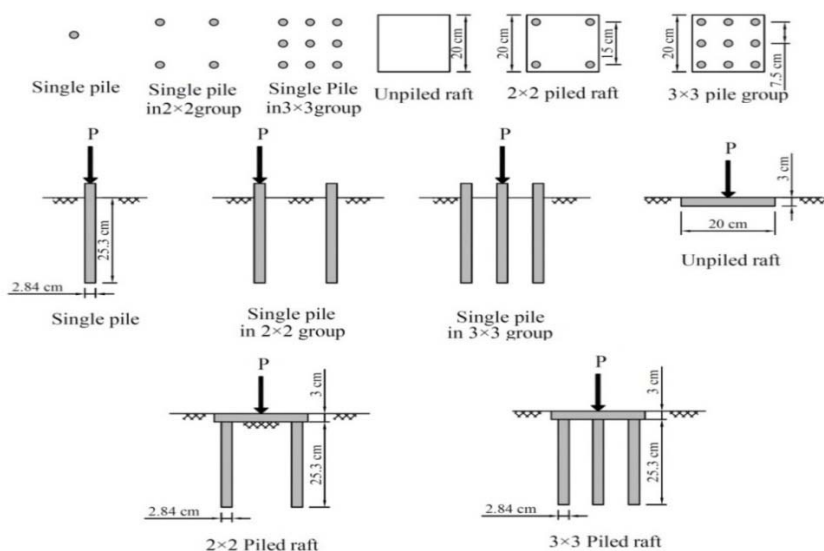


Fig. 3. Schematic of test program

جدول ۳. انواع مدل‌های مورد آزمایش و چگونگی نامگذاری آن‌ها

نام مدل‌ها	تشریح مدل	s/d
S	Single pile	-
SG-4	Single pile in 2x2 group of piles	5.2
SG-9	Single pile in 3x3 group of piles	2.6
R	Unpiled raft	-
PR-4	Piled raft with 2x2 piles arrangement	5.2
PR-9	Piled raft with 3x3 piles arrangement	2.6

Table. 3. Summary of test models

درون آن گودبرداری شد. سپس یک شابلون چوبی درون غلاف قرار داده شد. لوله‌های فولادی درون شابلون جای گرفتند.

بعد از پایان خاکریزی مدل‌های آزمایش در خاک احداث شدند. برای احداث پی‌شمع ابتدا یک غلاف با ابعاد داخلی ۲۰×۲۰ سانتی‌متر و به عمق پنج سانتی‌متر به درون خاک هدایت شد و

زمانی که آهنگ نشست به کمتر از $0.3/0$ میلی متر در دقیقه در ۳ دقیقه متوالی در پی گسترده و پی شمع و $0.25/0$ میلی متر در ساعت در شمع منفرد برسد. بار اعمال شده توسط نیروسنج اندازه گیری شد. در هنگام آزمایش روی شمع منفرد بارگذاری تا لحظه ای که نشست شمع به حداقل ۱۵ درصد قطر آن برسد و سپس تا جایی که تغییرات بار مقاوم شمع ناچیز شود، ادامه داده شد. پایان بارگذاری در پی شمع لحظه ای بود که نشست به ۱۵٪ عرض کلاهدک برسد. همچنین در صورتی که بدون افزایش بار نشست به میزان قابل توجهی افزایش یابد آزمایش خاتمه می یابد.

۶- نتایج آزمایش بارگذاری

میانگین نتایج آزمایش بارگذاری بر روی شمع منفرد و شمع منفرد واقع در گروه شمع در شکل (۴) نشان داده شده است.

در مجموع برای تمامی شمع های واقع در گروه شمع، ظرفیت باربری واقعی شمع بیش از شمع منفرد است. این افزایش ظرفیت باربری را می توان به اثر احداث شمع ها روی یکدیگر ناشی از افزایش دانسیته خاک در هنگام احداث شمع و اثر محصورشدگی شمع ها توسط شمع های مجاور نسبت داد. در خاک های متراکم احداث شمع می تواند سبب کاهش تراکم شود ولی در این پژوهش خاک سست است و از طرفی دیگر در احداث شمع از آنجایی که به صورت گام به گام ابتدا غلاف وارد خاک می شد و سپس حفاری درون آن انجام شد، به گونه ای که همیشه نوک غلاف پایین تر از سطح خاک درون لوله قرار می گیرد، پیش بینی شده که احداث شمع به این روش سبب افزایش تراکم نسبی خاک در اطراف شمع شود.

شکل ۴. مقایسه منحنی های بار- نشست شمع منفرد واقع در گروه شمع

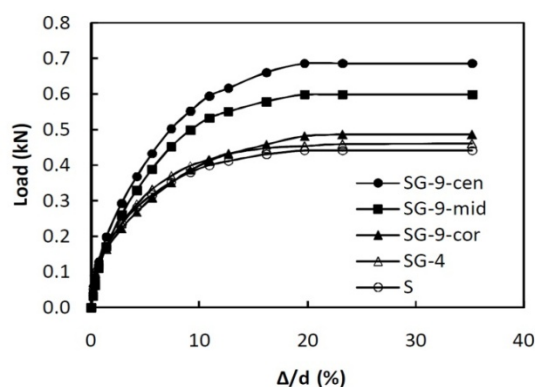


Fig. 4. Average load-settlement variations of single pile and single pile in group

شابلون چوبی برای تعیین محل دقیق شمع ها و نیز هدایت قائم شمع ها استفاده شد. قطر خارجی لوله و طول آن به ترتیب ۲۵ و ۳۵۰ میلی متر بود. حفاری شمع های آزمایش توسط اوگر انجام شد و همزمان با پیشرفت حفاری، لوله ها نیز به آرامی به درون خاک هدایت شد. به این ترتیب در هر مدل ابتدا تمامی لوله ها به اندازه ۲۵ سانتی متر در محل احداث شمع ها به درون خاک هدایت شدند و سپس بتن ریزی انجام شد.

قبل از انجام بتن ریزی طول مدفون شمع ها اندازه گیری شد. سپس بتن ریزی انجام شد و غلاف های فولادی در هنگام بتن ریزی از درون خاک به آرامی خارج شدند. به منظور احداث شمع منفرد، سر شمع تا ارتفاع حدود پنج سانتی متر از سطح زمین بالاتر آورده شد. این عمل با قرار دادن یک قالب هادی روی سطح زمین فراهم شد.

به این ترتیب اطمینان حاصل شد که در هنگام بارگذاری، تراز سر شمع همواره بالاتر از تراز خاک قرار داشته باشد. برای احداث پی شمع، سر شمع هم تراز با خاک اطراف آن بود و پی گسترده بر روی آن احداث شد. در واقع از آنجا که شمع ها مسلح نیستند، اتصال پی و شمع به صورت اتکایی است.

در مرحله بعد یک ردیف شبکه 4×4 میلگرد نمره هشت با رعایت پوشش بتنی در داخل گود قرار داده شد و سپس بتن ریزی انجام شد. در نهایت پس از پایان بتن ریزی پی شمع، تراز بالای پی با تراز خاک اطراف برابر شد. در مرکز پی گسترده و روی بتن تازه صفحه فولادی دایره ای به قطر ۹۰ میلی متر و ضخامت ۵ میلی متر قرار داده شد. این صفحه برای کاهش تمرکز تنش در هنگام بارگذاری بکار رفت. سپس غلاف فلزی مربعی از اطراف پی گسترده به آرامی بیرون آورده شد. بعد از پایان مراحل اجرای مدل مدت هفت روز به بتن فرصت داده شد تا به مقاومت لازم برسد. آزمایش مقاومت فشاری انجام شده نشان می دهد که این مدت برای جلوگیری از گسیختگی بدنه شمع در هنگام بارگذاری کافی است.

برای اندازه گیری نشست قائم پی در این پژوهش از پنج گیج عقبه ای به دقت $0.1/0$ میلی متر و با حداکثر دامنه ۵۰ میلی متر روی کلاهدک استفاده شد. آزمایش به روش گام به گام با بار ثابت انجام شد. در هر گام بار وارد شده ثابت نگه داشته شد تا

متمرکز (Point Load) در مرکز پی تعریف شد. مش‌بندی به صورت مثلثی با ابعاد متوسط انجام، و در اطراف مدل ابعاد آن ریزتر شد. در این پژوهش برای ماسه‌ها رفتار زهکشی شده انتخاب، و از آنجایی که ماسه مورد آزمایش دارای تراکم نسبی ۳۰٪ بوده، از این رو در معرفی مشخصات مقاومتی مصالح در نرم‌افزار، نتایج بدست آمده از آزمایش سه محوری در همین دانسیته مورد استفاده قرار گرفته است. در جدول‌های (۵ تا ۷) مشخصات مصالح که در مدلسازی عددی مورد استفاده قرار گرفت، نشان داده شده است. همان‌گونه که ملاحظه می‌شود مقادیر جدول با نتایج حاصل از آزمایش‌های آزمایشگاهی هماهنگی داشته است. به منظور تعیین تغییرات مدول الاستیسته در عمق که شامل مدول الاستیسته مرجع (E_{ref}) و شیب افزایش این پارامتر در عمق ($E_{increment}$) می‌شود، از نتایج حاصل از آزمایش سه محوری در فشارهای محصورشدگی متفاوت بهره‌گیری شده است. تغییرات مدول الاستیسته نسبت به عمق در شکل (۶) نشان داده شده است.

از آنجایی که در مرز خاک-شمع ممکن است که مشخصات مصالح متفاوت باشد، از این رو با تعریف یک جزء حد فاصل این مشخصات معرفی می‌شود. در PLAXIS 3D FOUNDATION Version 1.6 مشخصات این جزء توسط یک ضریب کاهش مقاومت (R_{inter}) تعریف خواهد شد. در این پژوهش از آنجایی که بعد از آزمایش و پس از استخراج شمع‌ها مشاهده شد که جداره شمع کاملاً زیر است، بنابراین گسیختگی در خاک رخ داده است و از این روزه δ با زاویه اصطکاک خاک برابر فرض شد و بنابراین مقدار R_{inter} برابر یک انتخاب شد.

جدول ۵. مشخصات مورد استفاده برای ماسه در مدلسازی عددی

Model	Mohr-coulomb
Material type	Drained
Specific gravity	2.79
Void ratio	0.766
Unit weight(kN/m ³)	15.52
Reference modulus, E_{ref} (kN/m ²)	1488
Poisson ratio, $\nu_{(nu)}$	0.28
Internal friction angle, ϕ (°)	37.37
Dilation angle, ψ (°)	3.39
$E_{increment}$ (kN/m ² /m)	1170

Table 5. Sand properties used in FEM analysis

در شکل (۵) منحنی بار-نشست پی‌های شمعی با پی گسترده مقایسه شده است. با افزایش تعداد شمع‌ها مقدار نشست پی‌شمع به طور قابل ملاحظه کاهش می‌یابد. در ابتدای بارگذاری از آنجایی که سهم باربری شمع نسبت به خاک بیشتر است [10]، از این رو شیب منحنی بارگذاری بیشتر است. در پی‌شمع دارای ۹ شمع منحنی بارگذاری در ابتدا بیشترین شیب را دارد. بعد از گسیختگی شمع‌ها شیب منحنی بار-نشست تقریباً کاهش یافته و با شیب منحنی بارگذاری پی گسترده برابر می‌شود.

شکل ۵. مقایسه منحنی‌های بار - نشست پی گسترده با پی‌های شمعی با آرایش ۲×۲ و ۳×۳

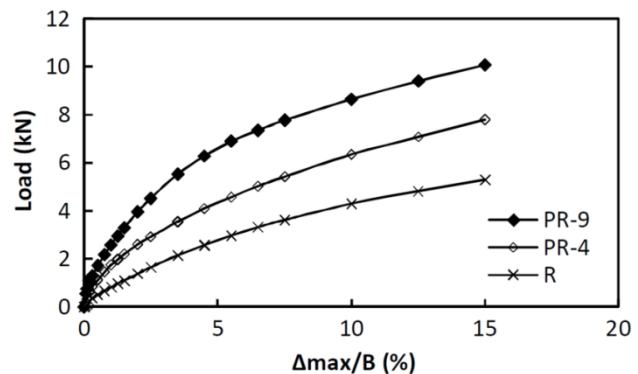


Fig. 5. Average load-settlement variations for test piled rafts

۷- تحلیل عددی مدل‌های آزمایش به روش اجزاء محدود

به منظور مدلسازی عددی مدل‌های آزمایشی از نرم‌افزار PLAXIS 3D FOUNDATION بهره‌گیری شده است. به منظور کنترل و درستی آزمایشی نرم‌افزار ابتدا پی گسترده در ابعاد آزمایشی توسط نرم‌افزار مدلسازی شده و رفتار آن با نتایج حاصل از آزمایش مقایسه شد. در این مدلسازی سعی شده که شرایط مدل‌های عددی و آزمایشگاهی با یکدیگر هماهنگی داشته باشند. این شرایط شامل هندسه، ابعاد مدل و مخزن خاک، مشخصات مصالح، نوع و چگونگی بارگذاری هستند.

پی گسترده و شمع به ترتیب با جزء Floor و Pile تعریف شدند. مرزهای انتهایی مطابق ابعاد الگوهای آزمایشی تعریف شدند. برای در نظر گرفتن رفتار جداره و نوک شمع از جزء حد فاصل در این نواحی استفاده شد. بارگذاری توسط یک بار

شکل (۸ الف) نتایج حاصل از آزمایش بارگذاری شمع منفرد را با تحلیل عددی مقایسه می‌نماید. همان‌گونه که ملاحظه می‌شود، با وجود اینکه در مشخصات مصالح در مقایسه با پی گسترده تغییری رخ نداده ولی منحنی‌ها بر یکدیگر هماهنگ نیستند. این رویداد را می‌توان اینگونه تفسیر کرد که در هنگام اجرای پی گسترده تنها بخشی از لایه فوقانی خاک گودبرداری شده و بتن-ریزی پی گسترده در آن به عنوان جایگزین احداث شده است. بنابراین خاک در عمق دچار دستخوردگی زیادی نخواهد شد. ولی در هنگام اجرای شمع منفرد، همان‌گونه که پیشتر در مقایسه منحنی‌های شمع منفرد و شمع منفرد واقع در گروه شمع اشاره شد، به علت اجرای شمع توسط غلاف، دانسیته خاک اطراف شمع افزایش می‌یابد. این عامل سبب افزایش سختی شمع و کاهش نشست آن در هنگام بارگذاری خواهد شد. این تغییر دانسیته در اطراف شمع بیشترین مقدار و با دور شدن از جداره شمع به تدریج کاهش می‌یابد. نمونه‌گیری و اندازه‌گیری مقدار دانسیته نسبی ماسه در اطراف شمع بسیار دشوار است. با توجه به اینکه انتظار می‌رود که حجم عمده مصالح اطراف شمع، رفتاری مشابه با ماسه بکار رفته در مدل پی گسترده داشته باشد، از این رو برای رفع این مشکل حلقه‌ای به شعاع ۲۵ میلی‌متر در اطراف شمع مدلسازی شد و مشخصات مصالح این حلقه با آزمون و خطا به گونه‌ای تعیین شد که منحنی بارگذاری شمع منفرد در تحلیل عددی با واقعیت هماهنگ شود.

جدول ۸ مشخصات مورد استفاده برای حلقه واسط پیرامونی شمع در مدلسازی عددی

Model	Mohr-coulomb
Material type	Drained
Specific gravity	2.79
Void ratio	0.688
Unit weight(kN/m ³)	16.24
Reference modulus of elasticity, E_{ref} (kN/m ²)	4350
Poisson ratio, $\nu_{(nu)}$	0.243
Internal friction angle, ϕ (°)	42.75
Dilation angle, ψ (°)	4.32
$E_{increment}$ (kN/m ² /m)	1244

Table 8. Material properties for intermediate ring

جدول ۶. مشخصات مورد استفاده برای شمع در مدلسازی عددی

Model	Linear elastic
Material type	Non-porous
Unit weight(kN/m ³)	20.80
Reference modulus, E_{ref} (kN/m ²)	1.535e7
Poisson ratio, $\nu_{(nu)}$	0.2

Table 6. Pile properties used in FEM analysis

جدول ۷. مشخصات مورد استفاده برای پی گسترده در مدلسازی عددی

Model	Linear elastic
Material type	Non-porous
Unit weight(kN/m ³)	22.60
Reference modulus, E_{ref} (kN/m ²)	2.474e7
Poisson ratio, $\nu_{(nu)}$	0.2

Table 7. Raft properties used in FEM analysis

شکل ۶. تغییرات مدول الاستیسیته نسبت به عمق

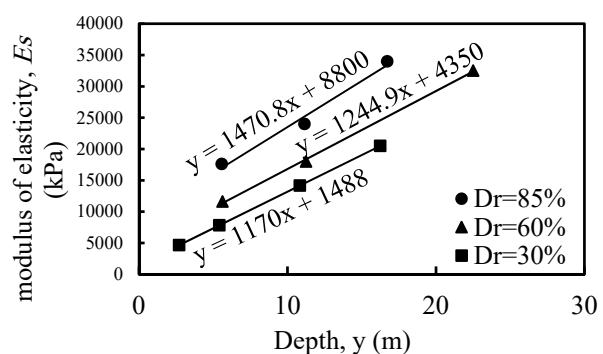


Fig. 6. Variation of modulus of elasticity with Depth

در شکل (۷) منحنی بارگذاری پی گسترده حاصل از آزمایش بارگذاری با نتایج بدست آمده از تحلیل عددی مقایسه شده است. همان‌گونه که ملاحظه می‌شود، منحنی‌ها هماهنگی مناسبی دارند.

شکل ۷. مقایسه منحنی بارگذاری پی گسترده حاصل از آزمایش با تحلیل

عددی

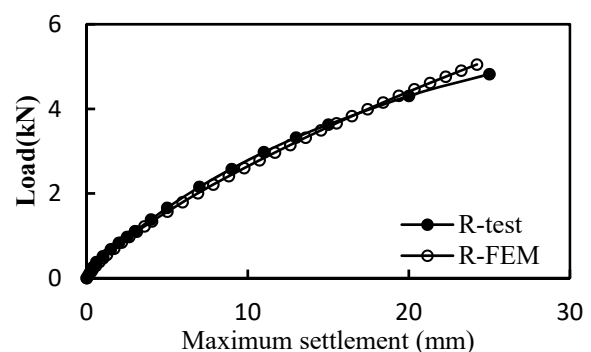


Fig. 7. Comparison of measured load-settlement curve of model unpiled raft with FEM results

شکل ۹. مدلسازی شمع منفرد و حلقه پیرامونی آن در تحلیل عددی

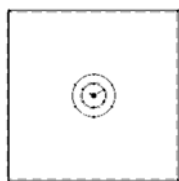


Fig. 9. Simulation of single pile with intermediate ring

شکل ۱۰. مقایسه منحنی بارگذاری حاصل از آزمایش با تحلیل عددی در مدل های آزمایش

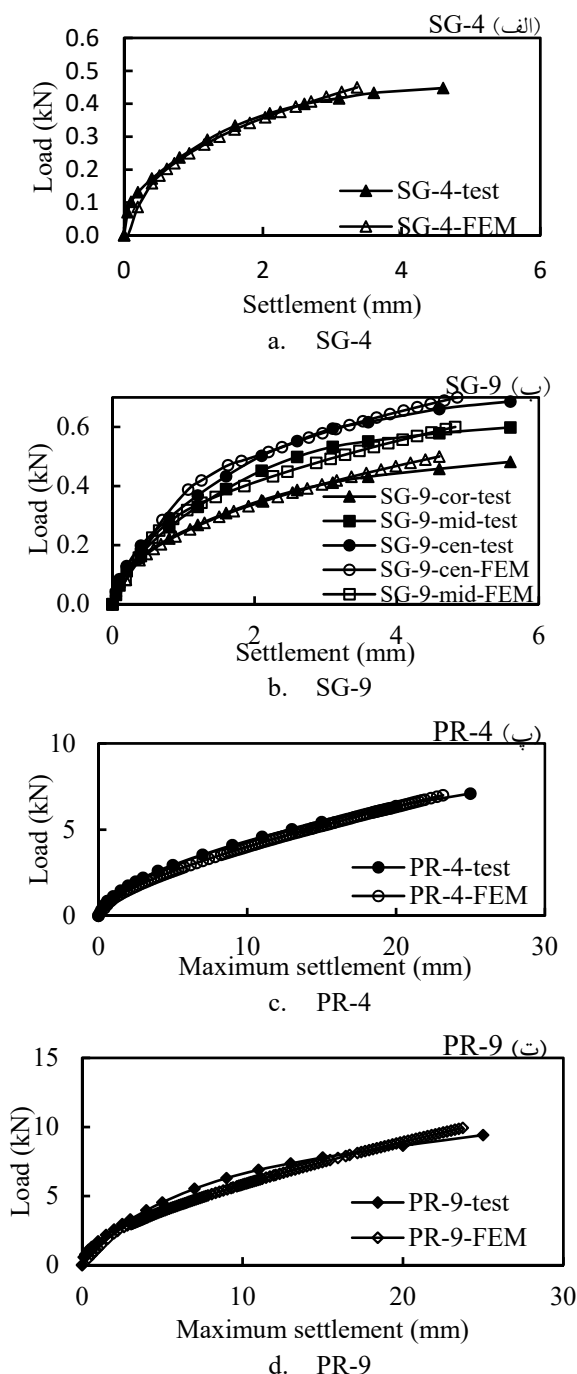


Fig. 10. Comparison of measured load-settlement curve of test models with FEM results

بر اساس آزمون و خطا معلوم شد که با انتخاب دانسیته نسبی ۶۰٪ برای این حلقه و بنابراین استفاده از نتایج حاصل از آزمایش سه محوری روی ماسه دارای این دانسیته نسبی، هماهنگی مناسبی بین مدل ها برقرار می شود. هندسه مدل شمع منفرد در نرم افزار در شکل (۹) نشان داده شده است. مشخصات تعریف شده برای مصالح این حلقه در جدول (۸) نشان داده شده است. شکل (۸ ب) مقایسه منحنی های بارگذاری حاصل از آزمایش و تحلیل عددی را در حالتی که از حلقه واسط استفاده شده نشان می دهد.

از آنجایی که پی شمع از دو جزء پی گسترده و شمع تشکیل شده است، بنابراین انتظار می رود با تطبیق هر یک از منحنی های بارگذاری پی گسترده و شمع منفرد، رفتار سایر مدل های آزمایش نیز بر نتایج حاصل از تحلیل عددی منطبق شود. نتایج این مقایسه در شکل (۱۰) نشان داده شده است. همان گونه که ملاحظه می شود، در حالت کلی تمامی منحنی ها، انطباق مناسبی داشته اند.

شکل ۸. مقایسه منحنی بارگذاری شمع منفرد حاصل از آزمایش با تحلیل عددی

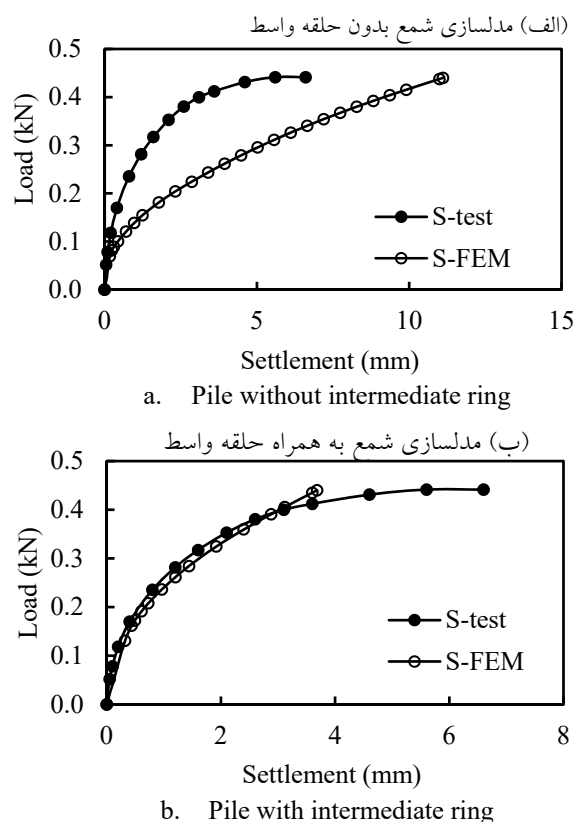


Fig. 8. Comparison of measured load-settlement curve of model single pile with FEM results

۸- بررسی اثر مقیاس در مدل‌های آزمایش

مطابق پژوهش مرجع [10] زمانی رفتار مدل آزمایشگاهی در مقیاس واقعی هم تکرار می‌شود که نسبت منافذ خاک در مدل و واقعیت از خط حالت بحرانی فاصله یکسانی داشته باشند. در همین راستا و بر اساس نتایج حاصل از آزمایش سه محوری، خط حالت بحرانی و خط نسبت منافذ کمینه ماسه مورد آزمایش تعیین شد که در شکل (۱۱) نشان داده شده است. این خط بهترین خط عبوری از نقاط حالت بحرانی حاصل از آزمایش سه محوری بوده که بر مبنای روش کمترین مربعات بدست آمده است.

شکل ۱۱. خط حالت بحرانی و خط نسبت منافذ کمینه در ماسه مورد آزمایش

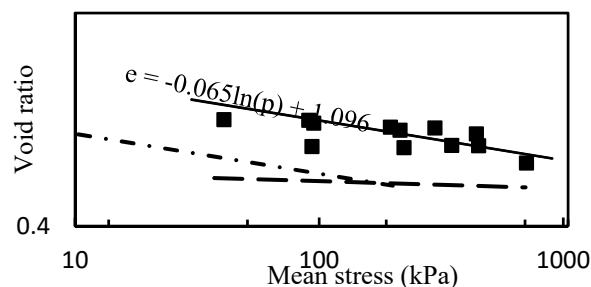


Fig. 11. Critical State and minimum void ratio line in test sand

مطابق این شکل و بر مبنای رابطه (۳)، شیب خط حالت بحرانی (λ) و نسبت منافذ متناظر با تنش همه جانبه یک کیلوپاسکال به ترتیب برابر -0.065 و 1.096 بدست آمده است. بنابراین رابطه مدل و واقعیت به صورت زیر خواهد

$$0.766 = e_p - 0.065 \ln\left(\frac{\sigma'_m}{\sigma'_p}\right) \quad (5)$$

خط حالت مدل در واقع خطی است که با شیب برابر با خط حالت بحرانی ترسیم می‌شود و با آن فاصله یکسانی دارد (شکل ۱۱). این خط می‌تواند برای هر عمق دلخواه از خاک ترسیم شود. با داشتن نسبت منافذ خاک و تنش همه جانبه در کف مخزن این خط برای این تراز در شکل (۱۱) ترسیم شده است. در تراز کف مخزن تنش همه جانبه برابر 7.39 کیلوپاسکال ($\sigma'_m = 7.39 \text{ kPa}$) بوده و نسبت منافذ خاک برابر 0.766 است که متناظر با تراکم نسبی 30% در

ماسه مورد آزمایش است. این مقادیر در رابطه (۵) مشاهده می‌شود.

تمامی نقاط واقع در خط حالت مدل معرف نقاطی هستند که رفتاری مشابه با یکدیگر دارند. همان‌گونه که ملاحظه می‌شود، در مقیاس واقعی نسبت منافذ از مقدار کمینه نمی‌تواند عبور نماید. این مقدار کمینه در محل تقاطع خط حالت مدل و خط نسبت منافذ کمینه در شکل قابل مشاهده است. نسبت منافذ کمینه در نقطه تقاطع برابر 0.562 و تنش همه جانبه برابر 169.76 کیلوپاسکال بدست آمد. بنابراین تنش همه‌جانبه در مقیاس واقعی در تراز مشابه کف مخزن نمی‌تواند از این مقدار فراتر رود. اگر در مقیاس واقعی نقطه‌ای با این تنش همه جانبه در نظر گرفته شود، بر اساس تحلیل ابعادی که توسط آلتایی و فلینیوس [10] نیز پیشنهاد شد، نسبت تنش N بین مدل و واقعیت در تراز کف مخزن برابر 0.435 ($N = 7.39/169.76 = 0.0435$) بدست می‌آید. با محاسبه وزن مخصوص متناظر با نسبت منافذ کمینه 0.562 و نیز در اختیار داشتن نسبت منافذ خاک در مدل-آزمایشگاهی، نسبت تشابه هندسی (n) مطابق رابطه (۴) برابر 0.385 بدست آمد. به عبارت دیگر ابعاد مدل آزمایشگاهی در عکس این مقدار یعنی 26 می‌تواند ضرب شود تا ابعاد آن در مقیاس واقعی بدست آید. چون تمامی محاسبات برای محل تقاطع خط حالت مدل با خط نسبت منافذ کمینه انجام شده، از این رو در این شرایط دانسته خاک در مقیاس واقعی بیشترین مقدار (نسبت منافذ کمینه) را خواهد داشت.

از آنجایی که در خاک مورد آزمایش در مدلسازی عددی، دانسیته نسبی در اطراف شمع به 60% افزایش داده شده است، از این رو نسبت منافذ متناظر با تراکم نسبی 60% ، در مقایسه با تراکم 30% کمتر است و خط حالت مدل پایین در تراکم نسبی 60% پایین‌تر از خط حالت مدل در تراکم نسبی 30% قرار می‌گیرد. از این رو در این حالت تقاطع خط حالت مدل با خط نسبت منافذ کمینه در تنش‌های کوچکتری نسبت به حالت قبل اتفاق می‌افتد. اگر محاسبات فوق دوباره تکرار شود، ضریب افزایش ابعاد مدل حداکثر برابر $5/6$ ($n = 0.179$) بدست خواهد آمد. بنابراین می‌توان نتیجه

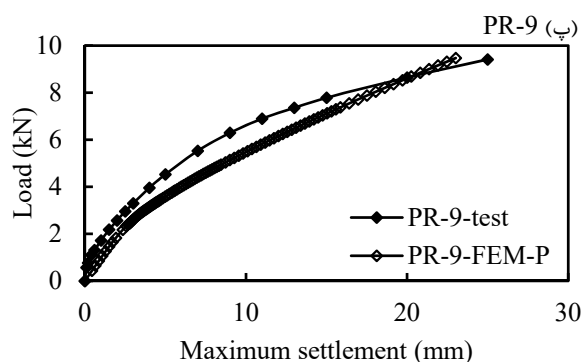
گرفت، که نتایج بدست آمده از مدل‌های آزمایش در این پژوهش را می‌توان حداکثر برای مدل‌های با ابعاد ۵/۶ برابر بزرگتر، استفاده کرد و در این محدوده قابل کاربرد است. اما چنانچه درستی این مبانی ثابت شود، این نتیجه گیری نمی‌تواند از اهمیت تئوری فوق در بررسی اثر مقیاس بکاهد. زیرا طبق پیشنهاد همین پژوهشگران که بر اساس جمع آوری داده‌های موجود در پژوهش‌های علمی بوده، شیب خط حالت بحرانی و مکان آن در خاک‌ها متفاوت است. از این رو این نسبت مقیاس می‌توان محدوده متنوعی را اختیار نماید. بنابراین نتایج حاصل از آزمایش روی مدل‌سازی فیزیکی خواهد توانست پاسخگوی نیازهای موجود در عمل باشد.

بر مبنای توضیحات فوق در این پژوهش به منظور بررسی اثر مقیاس ابتدا یک نسبت تشابه هندسی (بیشتر از $n=0.179$) اختیار و با کمک این نسبت تمامی ابعاد مدل به مقیاس واقعی تبدیل می‌شود. سپس طبق روش پیشنهادی [10] در مرحله بعد نسبت منافذ و در نتیجه تراکم نسبی مناسب برای ماسه در مقیاس واقعی محاسبه می‌شود. طبق مبانی تحلیل ابعادی، در صورتی که نیروی وارد شده نیز طبق قانون تشابه انتخاب شود، تغییر شکل‌ها (نشست‌ها) نیز در مقیاس بزرگتر باید متناسب با نسبت تشابه هندسی افزایش یابد.

در این پژوهش از آنجایی که در تراکم نسبی ۶۰٪ آزمایش سه محوری انجام شده از این رو با کمک رابطه (۵) در خط حالت مدل نسبت تنش به گونه‌ای محاسبه شده که نسبت منافذ متناظر با تراکم نسبی ۶۰٪ بدست آید. طبق نمودار حالت بحرانی خاک و نیز توضیحات بخش قبل، انتخاب ضریب ۳/۴۷ به عنوان ضریب مقیاس هندسی ($n=0.2879$)، این هدف محقق می‌شود. در این صورت، در حلقه اطراف شمع که در مدل دارای دانسیته نسبی ۶۰٪ بوده، در مقیاس واقعی به حدود ۹۰٪ خواهد رسید. مشخصات مصالح در این تراکم با تقریب مناسب و قابل قبولی از درون‌یابی نتایج آزمایش سه محوری در تراکم ۸۵٪ و ۱۰۰٪ انتخاب شده است.

به این ترتیب با تغییر اندازه مدل و تغییر مشخصات مصالح (دانسیته و نسبت منافذ) می‌توان با تحلیل عددی رفتار پی‌شمع‌ها را در مقیاس بزرگتر بررسی نمود. در شکل (۱۲) رفتار پی گسترده در مقیاس واقعی که توسط تحلیل عددی اجزاء محدود انجام شده با مدل مورد آزمایش مقایسه شده است. در این منحنی‌ها P (prototype) معرف مدل با مقیاس واقعی و m (model) معرف مدل آزمایشگاهی است. نشست و نیرو به منظور مقایسه رفتار، در مدل و واقعیت همسان‌سازی شده‌اند. به عبارتی دیگر بعد از انجام تحلیل عددی و استخراج منحنی بارگذاری، مقادیر نشست‌ها در نسبت تشابه هندسی ضرب و نیروها نیز طبق رابطه تشابه تطبیق داده شده است. شکل (۱۲ الف) حالتی را نشان می‌دهد که تنها ابعاد هندسه مسئله بزرگنمایی شده است ولی مشخصات مصالح با مدل آزمایشگاهی برابر است. در واقع هدف بررسی این موضوع است که اگر تنها ابعاد مسئله افزایش پیدا نماید و مشخصات مصالح تغییر نکند، رفتار مدل در مقیاس واقعی چه تفاوتی با مدل آزمایشگاهی خواهد داشت. همان‌گونه که ملاحظه می‌شود، هیچ تناسبی میان تغییر شکل‌ها وجود ندارد و نسبت نشست‌ها بیشتر از نسبت تشابه خواهد بود. به عبارت دیگر خاک رفتاری سست را از خود نشان می‌دهد.

در شکل (۱۲ ب) علاوه بر افزایش ابعاد مدل، دانسیته نسبی ماسه نیز به صورتی که در بالا تشریح شد، افزایش داده شده است. همان‌گونه که ملاحظه می‌شود، هماهنگی مناسبی میان نتایج برقرار شده است. شکل (۱۳) نتایج این مقایسه را برای سایر مدل‌های آزمایش نشان می‌دهد. ابعاد این مدل‌ها و دانسیته خاک نیز با اعمال نسبت تشابه هندسی به صورت بیان شده، افزایش داده شد. همانطوری که انتظار می‌رفت این منحنی‌ها نیز مطابق پیش‌بینی‌ها رفتار کرده‌اند.



c. PR-9

Fig. 13. Comparison of measured load-settlement curve of test models with FEM results in full scale dimensions

بنابراین می توان نتیجه گرفت که انجام مدلسازی فیزیکی و استخراج نتایج مورد نظر، بدون بررسی اثر مقیاس که در بسیاری از پژوهش ها نیز متداول است، تنها محدود به همان مدل های آزمایشگاهی و در همان ابعاد خواهد بود. به عبارتی دیگر نمی توان نتایج بدست آمده را برای ابعاد بزرگتری از مسئله که تغییری در شرایط تراکمی خاک رخ نداده بکار برد. بلکه لازم است تا ابتدا مطالعاتی در خصوص تعیین خط حالت بحرانی و نسبت منافذ کمینه خاک انجام داد.

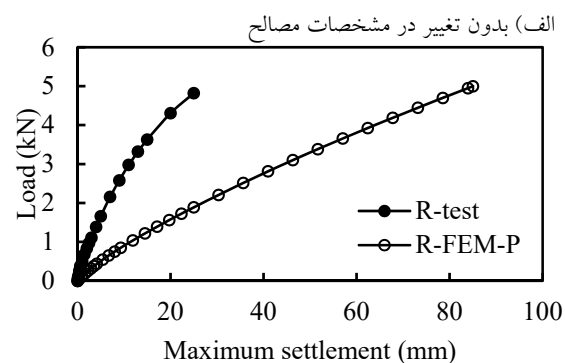
۹- نتیجه گیری

در این مطالعه با آزمایش روی پی های شمعی در ماسه بابل سر رفتار آن ها بررسی شد. شمع های بکار رفته با حفاری و بتن ریزی درجا احداث شدند. پی گسترده بتن مسلح بوده و به صورت درجاریز احداث شده است. انواع پی هایی که در این پژوهش مورد آزمایش قرار گرفتند، شامل شمع منفرد، شمع منفرد واقع در گروه شمع، پی گسترده، پی های شمعی دارای چهار و نه شمع بودند که نتایج زیر بدست آمد.

۱- اقرارگیری شمع منفرد واقع در گروه شمع به دلیل محصور شدگی شمع ها و افزایش دانسیته خاک در هنگام احداث شمع ها، ظرفیت باربری و سختی شمع افزایش پیدا نمود.

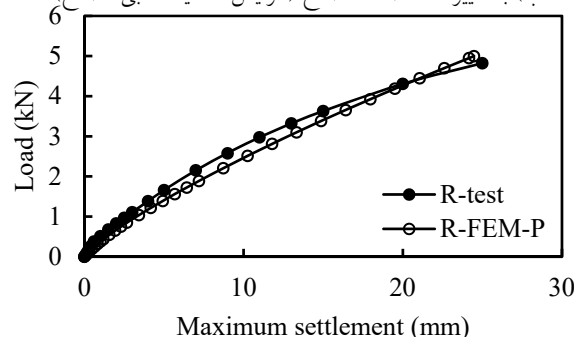
۲- مدلسازی عددی با تقریب خوبی توانست رفتار مدل های آزمایش را تا بار نهایی پیش بینی نماید. به علت تغییر مشخصات خاک در اطراف شمع در هنگام احداث آن، لازم است تا در مدلسازی عددی، برای شعاعی در اطراف شمع این تغییرات اعمال شود تا رفتارها در تحلیل عددی با نتایج آزمایشگاهی هماهنگی داشته باشد.

شکل ۱۲. مقایسه منحنی های بارگذاری پی گسترده با نتایج حاصل از تحلیل عددی در مقیاس واقعی



a. Without any change of material properties

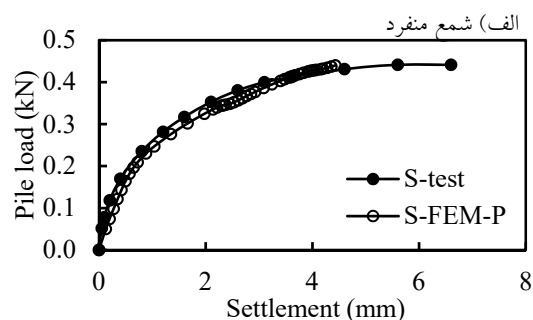
ب) با تغییر مشخصات مصالح (افزایش دانسیته نسبی مصالح)



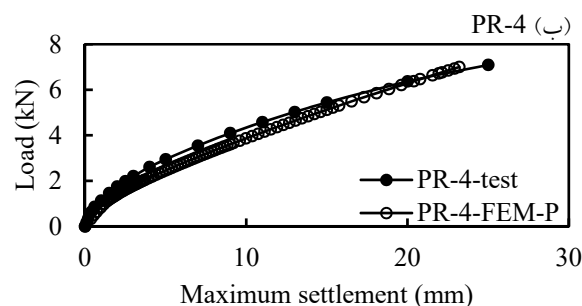
b. Increase of of soil density

Fig. 12. Comparison of measured load-settlement curve of raft with FEM results in full scale dimensions

شکل ۱۳. مقایسه منحنی بارگذاری مدل های آزمایش با تحلیل عددی در مقیاس واقعی (الف) شمع منفرد (ب) PR-4 (پ) PR-9



a. single pile



b. PR-4

- [3] Huangab, M., Y. Jiu, J. Jiang and B. Lie. 2017. "Nonlinear Analysis of Flexible Piled Raft Foundations subjected to Vertical Loads in Layered Soils", *Soils and Foundations*, 57(4): 632-644.
- [4] Patil, J., S. A. Vasanwala and C.H. Solanki. 2016. "An Experimental Study of Eccentrically Loaded Piled Raft", *International Journal of Geotechnical Engineering*, 9(1) p. p. 101-112.
- [5] Fioravante, V. and D. Giretti. 2010. "Contact versus Noncontact Piled Raft Foundations", *Canadian Geotechnical Journal*, 47(11): 1271-1287.
- [6] El Sawwaf, M. 2010. "Experimental Study of Eccentrically Loaded Raft with Connected and Unconnected Short Piles", *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, 136(10): 1394-1402.
- [7] El-Garhy, B., A.A. Galil, A. Youssef and M.A. Raia. 2013. "Behavior of Raft on Settlement Reducing Piles: Experimental Model Study", *Journal of Rock Mechanics and Geotechnical Engineering*, 5(5): 389-399.
- [8] Sedran, G., D.F.E. Stolle and R.G. Horvath. 2001. "An Investigation of Scaling and Dimensional Analysis of Axially Loaded Piles", *Canadian Geotechnical Journal*, 38(3): 530-541.
- [9] Tagaya, K., R.F. Scott and H. Aboshi. 1988. "Scale Effect in Anchor Pullout Test by Centrifugal Technique", *Soil and Foundations*, 28(3): 1-12.
- [10] Altaee, A. and B.H. Fellenius. 1994. "Physical Modeling in Sand", *Canadian Geotechnical Journal*, 31(3): 420-431.

۳- با کمک مبانی نظریه حالت بحرانی، می توان رفتار مدل های آزمایشگاهی 1g را در مقیاس واقعی با دقت قابل قبولی پیش بینی نمود. در این پژوهش نشان داده شد، تنها در صورتی می توان رفتاری مشابهی را بین مدل آزمایشگاهی و واقعیت مشاهده نمود که دانسیته خاک نیز متناسب با تغییر ابعاد، تغییر یابد. برای بکارگیری نتایج حاصل از بررسی اثر مقیاس مدل های آزمایشگاهی در عمل و در صورتی که هدف از مطالعه، پیش بینی رفتار واقعی سازه با کمک مدلسازی فیزیکی مسئله در شرایط 1g باشد، باید در ابتدا طبق مبانی نظریه حالت بحرانی، خط حالت بحرانی را برای خاک مورد نظر با دقت مناسبی تعیین نمود. سپس با توجه به مقدار نسبت منافذ کمینه و بیشینه، ابعاد مناسب برای مدل آزمایشگاهی انتخاب و دانسیته نسبی خاک مورد نظر در مدل را تعیین نمود. بدین صورت می توان امیدوار بود که علاوه بر رفتار کیفی، رفتار کمی سازه واقعی نیز پیش بینی شود.

۱۰- مراجع

- [1] Alnuaim, A.M., El Nagggar, H. and El Nagggar, A.M. 2017. "Evaluation of Piled Raft Performance Using a Verified 3D Nonlinear Numerical Model", *Geotechnical and Geological Engineering*, 35(4): 1831-1845.
- [2] Comodromos, E.M., M.C. Papadopoulou and L. Laloui. 2016. "Contribution to the Design Methodologies of Piled Raft Foundations under Combined Loadings", *Canadian Geotechnical Journal*, 53(4): 559-577.

Physical Modeling of Piled Raft Foundations in sand under compression load

M. Sharafkhah¹, I. Shooshpasha^{2*}

1- PhD. Candidate, Science, Babol Noshirvani University of Technology, Babol, Mazandaran, Iran

2- Assoc. Prof., Babol Noshirvani University of Technology, Babol, Mazandaran, Iran

*shooshpasha@nit.ac.ir

Abstract:

Nowadays, the employment of large raft foundations is common in high-rise buildings. The amounts of settlement in these cases usually are considerable. The settlements are reduced by installation of some piles beneath the raft, occasionally. This load transfer system is called "piled raft Foundation". In such cases, the raft usually carries a high portion of structural loading, and the piles are as the settlement reducer elements. The number of piles and their configuration are determined in such a way that settlement of the foundation decreases to an allowable value. In these situations, the configuration of piles is determined in optional manner and strategically. The foundations are conventionally designed in which the piles carry the total load of structure and the raft bearing capacity is not taken into account. Numerous studies indicated that this method is too conservative and the load should be divided between piles and raft. Only when the pile cap is elevated from the ground level, the raft bearing contribution can be neglected. In a piled raft foundation, pile-soil-raft interaction is complicated. Although several numerical studies have been carried out to analyze the behaviors of piled raft foundations, very few experimental studies are reported in the literature. As long as the behavior of these foundations is not evaluated on experimental or full-scale tests, it cannot rely on analytical and numerical results. Full-scale loading tests are costly due to the large amounts of forces and reactions. Therefore, the small-scale experimental study can be an effective way of controlling numerical and analytical methods. This paper concentrates on study of behavior of piled raft in dry sand by physical modeling and finite element analysis method. The piles and raft models were made of cast-in-place concrete. The physical models consisted of single pile, single pile in group, unpiled raft and piled raft foundation. The scale effects of the models were investigated. Some instruments measured the load contribution between the piles and the raft. The effect of the piles installation in the group was also investigated. The results showed that with installation of the single pile in a group, the pile bearing capacity and stiffness increase. In fact, the piles installation and confinement, increases stiffness of the soil around the pile that decreases soil deformation and pile settlement. Due to increase of the number of piles beneath the raft, the bearing capacity of raft increase and its settlement decrease, significantly. By increasing the number of piles, the settlement of the foundation decreases significantly. At the beginning of the loading, due to higher stiffness of the piles than the soil, the slope of load-settlement curves for the piled raft is greater. The piled raft with maximum number of piles has a steeper initial slope in the loading curve. After pile failure, the loading curve reduces and becomes parallel to that of unpiled raft. Based on the results of this study, with the use of finite element method and the critical state theory, one can predicate behavior of test model in the full scale dimensions.

Keywords: Piled Raft Foundations, Cast-in-place Concrete Piles, dry Sand, Scale Effect, Finite Element Analysis.