

تعیین فاصله عددی مطمئن برای ایجاد ظرفیت باربری کامل نوک شمعهای درجاریز در خاکهای لایه ای در شرایط ماسه بر روی رس

محمد مهدی احمدی^۱؛ مجید خبازیان^۲

چکیده

در این تحقیق، با استفاده از روش‌های عددی به بررسی ظرفیت باربری نوک شمع‌های درجاریز در خاک‌های لایه‌ای و تعیین فاصله عددی مطمئن قرارگیری نوک شمع برای ایجاد ظرفیت باربری کامل در شرایط ماسه بر روی رس پرداخته شده است. ابتدا به توضیح مختصر مدل سازی ظرفیت باربری نوک شمع درجاریز در خاک همگن، مدل رفتاری انتخاب شده برای خاک و پارامترهای مدل رفتاری و سپس به مدل سازی ظرفیت باربری نوک شمع در خاک لایه‌ای پرداخته شده است. آنالیزهای عددی انجام شده نشان می‌دهد مقدار فاصله‌ای که در آن ظرفیت باربری نوک شمع تحت تاثیر خاک رسی قرار می‌گیرد به نسبت حداکثر ظرفیت باربری نوک شمع در خاک رسی همگن به حداکثر ظرفیت باربری نوک شمع در خاک ماسه‌ای همگن بستگی دارد. در پایان نتایج به دست آمده در آنالیزهای عددی با مقادیر تجربی پیشنهاد شده توسط محققین دیگر مقایسه شده است.

کلمات کلیدی

خاک‌های لایه‌ای، رس، شمع درجاریز، ظرفیت باربری نوک شمع، ماسه، مدل سازی عددی

Reliable depth to fully mobilize the end bearing capacity of drilled shafts in layered soils: the case of sand overlying clay

M.M. Ahmadi, M. Khabbazian

ABSTRACT

In this paper, a modeling procedure is carried out to numerically investigate the end bearing capacity of drilled shafts in layered soils. For the case of sand overlying clay, the reliable depth for full mobilization of the end bearing capacity of drilled shafts is also discussed. The modeling procedure in homogenous soil and the constitutive law are first described. The modeling procedure in layered soils is explained next. Numerical analyses show that when the pile tip is located in the sand and close to the clay layer below, the distance that pile tip senses the presence of the clay layer depends on the ratio of the fully mobilized end bearing capacity of clay to the fully mobilized end bearing capacity of sand. Finally, numerical results are compared with experimental data suggested by other researchers.

KEYWORDS

Layered Soils, Clay, Drilled Shafts, End Bearing Capacity, Sand, Numerical Modeling.

Email: mmahmadi@sharif.edu

^۱ استادیار دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه صنعتی شریف، تهران

Email: mjkhazzian@yahoo.com

^۲ کارشناس ارشد خاک و پی، دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه صنعتی شریف، تهران



محوری بر روی شمع‌های قائم تکی، به مطالعه ظرفیت باربری نوک شمع در خاک‌های لایه‌ای پرداخته و در شرایط ماسه بین دو لایه رسی مشاهده کرده‌اند که با نزدیک شدن نوک شمع به مرز مشترک ماسه-رس گسیختگی در شمع می‌تواند به علت سوراخ شدگی لایه ماسه‌ای به طرف لایه رسی رخ دهد. نتایج آزمایشات مایهوف و ساستری [۸] نشان می‌دهد مقدار فاصله مطمئن که نوک شمع می‌تواند به مرز مشترک ماسه-رس نزدیک شود تا سوراخ شدگی ایجاد نشود به نسبت حداکثر ظرفیت باربری نوک شمع در خاک رسی (q_{lw}) به حداکثر ظرفیت باربری نوک شمع در خاک ماسه‌ای (q_{ls}) در شرایط همگن بستگی دارد. برای نسبت $q_{lw}/q_{ls} = 0.67$ این فاصله $1/5$ برابر قطر شمع و برای نسبت $q_{lw}/q_{ls} = 0.2$ این فاصله ۶ برابر قطر شمع پیشنهاد شده است.

تاملینسون [۱۰] برای محاسبه ظرفیت باربری نوک شمع در شرایط ماسه بر روی رس رابطه ساده‌ای پیشنهاد می‌کند. همانگونه که در شکل (۲) مشاهده می‌شود برای حالت خاک متراکم روی خاک ضعیف، فرض شده است که زمانی که نوک شمع در فاصله کمتر از $10B$ از لایه رس ضعیف قرار دارد، مقاومت نوک آن تحت تاثیر لایه ضعیف پائینی قرار می‌گیرد. برای این حالت هرچه نوک شمع به لایه ضعیف زیرین نزدیک تر شود از مقدار مقاومت نوک آن کاسته

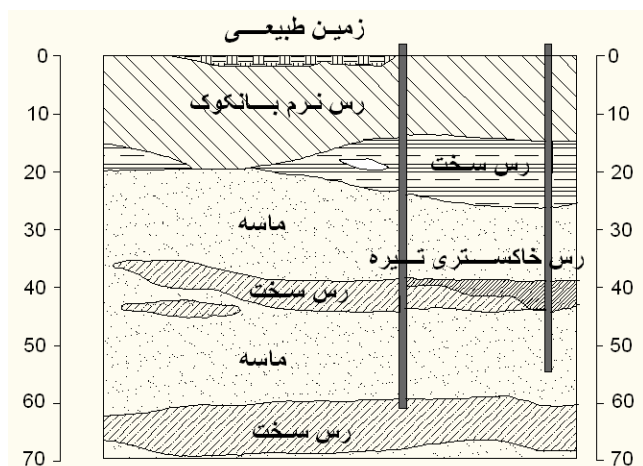
در خاک‌های لایه‌ای در شرایطی که انتهای شمع در خاک ماسه‌ای قرار گیرد که در زیر ماسه یک لایه رس قرار داشته باشد، با نزدیک شدن نوک شمع به مرز مشترک ماسه-رس ظرفیت باربری نوک شمع شروع به کاهش می‌کند. در نتیجه در خاک‌های لایه‌ای محل قرارگیری نوک شمع بر ظرفیت باربری تاثیر گذار بوده و تعیین فاصله مطمئن برای قرارگیری نوک شمع اهمیت زیادی دارد. این موضوع با آزمایشهای فراوان انجام شده روی شمع‌ها در خاکهای لایه‌ای گزارش شده است. به عنوان مثال در پروژه ای واقع در بانکوک [۱]، [۲] که دارای خاک لایه ای است، تحت شرایط یکسان از نظر ویژگی‌های زمین (شکل ۱) دو آزمایش بارگذاری شمع بر روی شمع‌های درجا ریز انجام شد. در آزمایش اول نوک شمع به طول ۶۰ متر و قطر $1/5$ متر در لایه رسی قرار گرفته بود که تحت بار ۱۷۵۰ تن و نشست ۹۰ میلی‌متر گسیخته شد. در آزمایش دوم نوک شمع با همان قطر به طول ۵۵ متر در لایه ماسه ای قرار گرفته بود که تحت بار ۲۵۰۰ تن و نشست ۲۹ میلی متر گسیخته شد. بنابراین مشاهده می‌شود که شمع دوم با طول مدفون کمتر عملکرد بهتری دارد.

برای محاسبه ظرفیت باربری نوک شمع‌های درجاریز در خاک‌های همگن روابط زیادی پیشنهاد شده است [۳]، [۴]، [۵]، [۶]، اما برای محاسبه ظرفیت باربری نوک شمع در خاک‌های لایه‌ای مطالعات و تحقیقات کمتری انجام شده است. این در حالی است که در طبیعت، خاک‌های موجود بیشتر به صورت لایه‌ای بوده و ظرفیت باربری نوک شمع در خاک‌های لایه‌ای با توجه به محل قرار گیری نوک شمع، از ظرفیت باربری نوک شمع در خاک‌های همگن متفاوت می‌باشد.

در این مقاله به صورت عددی و با استفاده از نرم افزار FLAC [۷]، ظرفیت باربری نوک شمع در خاک‌های لایه‌ای مورد بررسی قرار گرفته است. پس از مروری بر روابط تجربی موجود، نحوه مدل سازی ظرفیت باربری نوک شمع در خاک همگن به طور اختصار بیان شده و سپس به چگونگی مدل سازی ظرفیت باربری نوک شمع در خاک‌های لایه‌ای پرداخته شده و نتایج به دست آمده در آنالیزهای عددی با مقادیر تجربی پیشنهاد شده توسط محققین دیگر مقایسه شده است.

۲- روابط موجود برای در نظر گرفتن تاثیر لایه‌ای بودن خاک

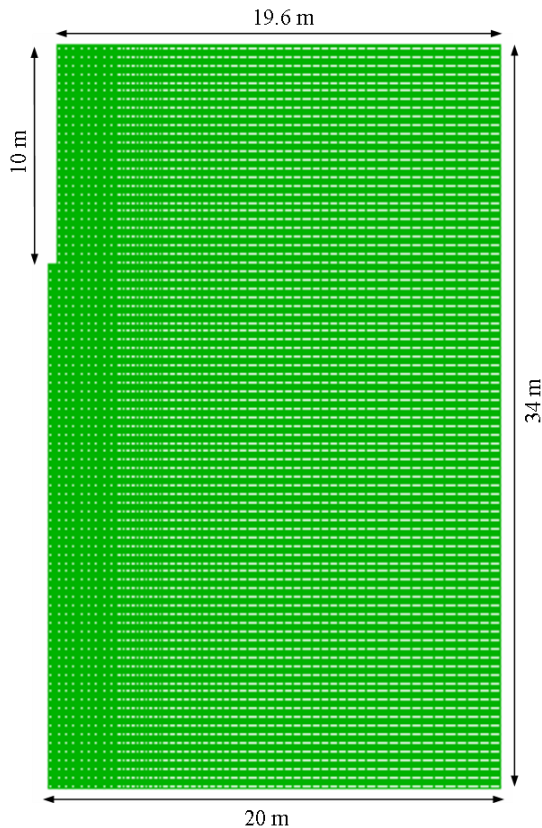
مایهوف و ساستری [۸]، [۹]، با انجام آزمایش بارگذاری



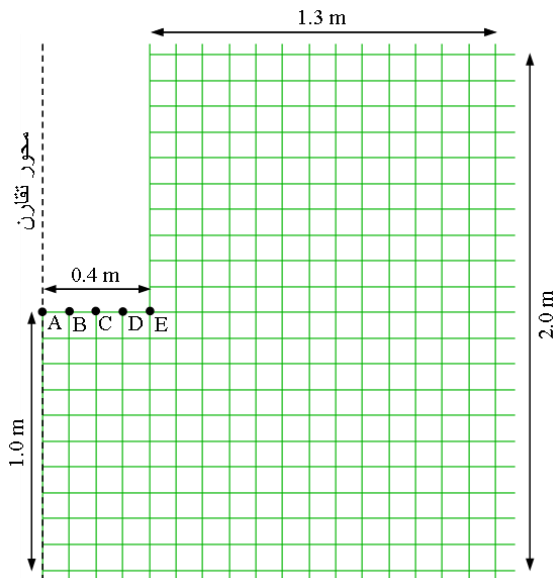
شکل (۱): پروفیل خاک لایه ای و شمع‌های مورد آزمایش [۱]، [۲]

می‌شود و در مرز مشترک دو لایه به مقاومت نوک در خاک ضعیف (q_{lw}) می‌رسد. بدین ترتیب برای حالتی که نوک شمع قرار گرفته در لایه خاک ماسه‌ای در فاصله H از لایه رسی زیرین قرار دارد، رابطه (۱) برای محاسبه ظرفیت باربری نوک شمع پیشنهاد شده است [۱۰].

و به سمت پائین به گره‌های A, B, C, D و E اعمال شده و تنش‌های ایجاد شده در المان‌های متناظر با این گره‌ها در آنالیز عددی ثبت می‌شود.



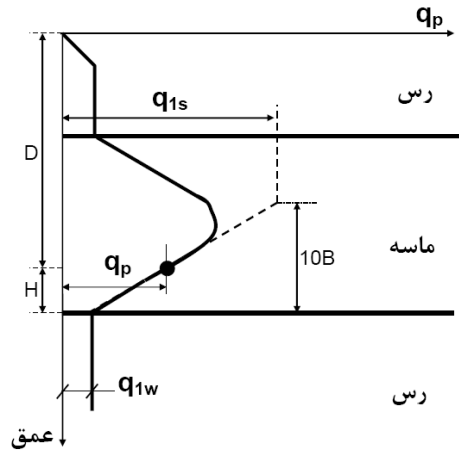
شکل (۳): مش بندی مورد استفاده برای مدل سازی شمعی به قطر ۸۰ سانتیمتر و طول مدفون ۱۰ متر



شکل (۴): نمای نزدیک از مش بندی مورد استفاده در اطراف نوک شمعی با قطر ۸۰ سانتیمتر

با افزایش تغییر مکان، تنش‌های ایجاد شده در المان‌های

$$q_p = q_{1w} + (q_{1s} - q_{1w}) \cdot \frac{H}{10B} \leq q_{1s} \quad (1)$$



شکل (۲): تغییرات ظرفیت باربری نوک شمعی در خاک ماسه‌ای مدفون بین دو لایه خاک رسی [۱۰]

۳- نحوه مدل سازی ظرفیت باربری نوک شمعی

در این تحقیق از نرم افزار FLAC برای مدل سازی ظرفیت باربری نوک شمعی استفاده شده است. با توجه به آنکه بیشتر شمعی‌های درجاریز مقطع دایره‌ای دارند و به صورت استوانه اجرا می‌شوند، مساله ظرفیت باربری قائم نوک شمعی دارای تقارن محوری است. در نتیجه آنالیزها دوبعدی و به صورت تقارن محوری انجام شده است. بدین ترتیب برای مدل سازی شمعی و خاک اطراف آن قطاعی از هندسه مساله مدل شده است. شکل (۳) مش بندی مورد استفاده برای مدل سازی شمعی به قطر ۸۰ سانتیمتر و طول مدفون ۱۰ متر را نشان می‌دهد. فضای خالی قرار گرفته در سمت چپ شکل (۳) محل قرارگیری شمعی را نشان می‌دهد. گفتنی است که در مدل سازی انجام شده، مرز جانبی در برابر تغییر مکان افقی مقید شده و فقط دارای تغییر مکان قائم می‌باشد و مرز پائینی در برابر تغییر مکان افقی و قائم مقید شده است. همچنین برای تحلیلهای انجام شده در این تحقیق نسبت قطر مش به قطر شمعی برابر با ۵۰ می‌باشد، و این بیان می‌دارد که مرزها به اندازه کافی از شمعی دور قرار گرفته اند که شرایط مرزی تاثیر قابل توجهی بر روی نتایج تحلیل ندارد [۱۱]. در شکل (۴) مش بندی مورد استفاده در اطراف نوک شمعی به قطر ۸۰ سانتیمتر در نمای نزدیکتری نسبت به شکل (۳) نشان داده شده است. با توجه به آنکه مساله دارای تقارن محوری است، محور قائم مار بر نقطه A محور تقارن مساله است. با توجه به شکل (۴)، برای مدل سازی ظرفیت باربری نوک شمعی، در انتهای فضای خالی قرار گرفته در سمت چپ (محل قرار گیری شمعی) تغییر مکانی در جهت قائم

شده در خاک اطراف نوک شمع خیلی بیشتر از مقادیر تنش‌ها در فواصل دورتر شمع می‌باشد و با توجه به این که در مدل رفتاری به کار رفته در این تحقیق پارامترهای الاستیک مدل مور-کولمب تابع سطح تنش می‌باشد، مقادیر پارامترهای مدل در نواحی نزدیک نوک شمع و نواحی دورتر شمع با هم متفاوت هستند. در نتیجه نیاز است که رابطه‌ای بین متوسط تنش‌های ایجاد شده و پارامترهای الاستیک خاک برقرار شود.

احمدی و همکاران [۱۶]، [۱۷]، برای تحلیل مقاومت نوک مخروط CPT با توجه به اندازه‌گیری‌های تجربی مقاومت نوک مخروط توسط لون و همکاران [۱۸] روابط (۲) و (۳) را برای تعیین مدول برشی و مدول حجمی پیشنهاد می‌کند.

$$G = K_G P_A \left(\frac{\sigma'_m}{P_A} \right)^n \quad (2)$$

$$K = K_B P_A \left(\frac{\sigma'_m}{P_A} \right)^m \quad (3)$$

در این روابط،

σ'_m : تنش موثر متوسط

P_A : فشار اتمسفریک برابر ۹۸/۱ کیلوپاسکال

n و m : توان که بین ۰/۲ تا ۰/۷ متغیر است.

K_G و K_B : عدد مدول برشی و حجمی که فقط تابع دانسیته

نسبی ماسه فرض شده‌اند. مقادیر این ضرائب در جدول (۱) آورده شده است.

جدول (۱): مقادیر عدد مدول برشی و حجمی پیشنهاد شده توسط احمدی و همکاران برای ماسه [۱۶]، [۱۷]

دانسیته نسبی (%)	K_G	K_B
۴۵	۱۹۵	۲۲۵
۶۵	۲۳۰	۲۸۵
۸۵	۲۹۰	۴۸۰

با توجه به این که هدف تعیین ظرفیت باربری نوک شمع می‌باشد و ظرفیت باربری نوک شمع شباهت زیادی با مقاومت نوک مخروط CPT دارد، در تحقیق حاضر از روابط پیشنهاد شده توسط احمدی و همکاران [۱۶]، [۱۷] برای بدست آوردن پارامترهای الاستیک خاک استفاده شده است. برای پارامترهای m و n میانگین مقدار پیشنهاد شده برای آنها یعنی مقدار ۰/۴ انتخاب شده است.

برای تعیین زاویه اتساع خاک ماسه‌ای از رابطه پیشنهاد شده توسط بولتون [۱۹] استفاده شده است.

$$\varphi' = \varphi'_{crit} + 0.8 \psi \quad (4)$$

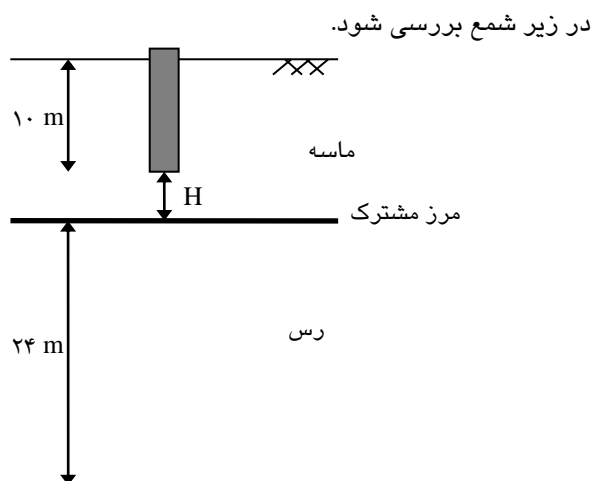
در رابطه قبلی

متناظر با گره‌ها نیز افزایش می‌یابد. لی و سالگادو [۱۲] بیان می‌کنند که به طور معمول، نمودار بار-نشست برای شمع‌های مدفون در ماسه به صورت یک منحنی بوده که به تدریج افزایش می‌یابد و دارای نقطه حداکثر نمی‌باشد. بدین ترتیب از آنجا که در خاک‌های ماسه‌ای شیب منحنی تنش ایجاد شده در نوک شمع در برابر تغییر مکان نوک شمع تا تغییر مکان‌های زیادی به صورت افقی نمی‌شود، تعیین معیاری برای انتخاب ظرفیت باربری نهایی نوک شمع از اهمیت زیادی برخوردار است. محققین معیارهای متفاوتی را برای انتخاب ظرفیت باربری نهایی شمع پیشنهاد می‌کنند. این معیارها به عواملی از جمله نوع شمع و نحوه اجرای آن بستگی دارد. انیل و ریس [۱] او ریس و رایت [۷] مقدار نشست مورد نیاز برای بسیج کامل ظرفیت باربری نوک شمع را ۵ درصد قطر شمع بیان کرده‌اند. کودتو [۱۳] این نشست را ۱۰ درصد قطر شمع، بوروس ۱۰ تا ۱۵ درصد قطر شمع [۱۴]، تاملینسون ۱۰ تا ۲۰ درصد قطر شمع [۱۰] و فلمینگ و همکاران ۵ تا ۱۰ درصد قطر شمع پیشنهاد داده‌اند [۱۵].

اگر چه انتخاب معیار ظرفیت باربری نوک شمع بر اساس نشست در حدود ۱۰ درصد قطر شمع برای شمع‌های کوبشی، که قطر کمی دارند، ممکن است منطقی باشد لیکن برای شمع‌های در جا ریز، با توجه به قطر زیاد این نوع شمع‌ها، انتخاب معیار ظرفیت باربری نوک شمع بر اساس نشست در حدود ۱۰ درصد قطر شمع می‌تواند موجب انجام طراحی شود که شرایط سرویس دهی سازه را برآورده نکند. بنابراین لازم است که انتخاب معیار ظرفیت باربری نوک شمع بر اساس نشست کمتر از ۱۰ درصد قطر شمع انجام شود. در این تحقیق با توجه به پیشنهادات محققین، تنش ایجاد شده در نوک شمع در نشست معادل ۵ درصد قطر شمع به عنوان ظرفیت باربری نوک شمع‌های درجا ریز در نظر گرفته شده است [۶].

۴- نحوه مدل سازی ظرفیت باربری نوک شمع

برای مدل سازی رفتار خاک اطراف نوک شمع از مدل الاستوپلاستیک مور-کولمب استفاده شده است. تعداد کم پارامترهای مورد نیاز و سادگی تعیین این پارامترها (در مقایسه با پارامترهای مورد نیاز برای مدل‌های رفتاری دیگر) از جمله مزایای این مدل رفتاری می‌باشد. پارامترهای این مدل رفتاری شامل مدول الاستیک حجمی (K)، مدول برشی (G)، زاویه اصطکاک داخلی خاک برای ماسه (φ')، مقاومت برشی زه‌کشی نشده خاک (C_{II}) و زاویه اتساع (ψ) می‌باشد. با توجه به این که در حین بارگذاری شمع تنش‌های ایجاد



شکل (۵): شکل شماتیک مدل سازی شمع و پروفیل خاک در شرایط ماسه بر روی رس

پارامترهایی که در مدل سازی برای خاکهای ماسه‌ای و خاک رسی انتخاب شده‌اند در جدول (۲) آورده شده است. همان گونه که در جدول مشخص است برای ماسه مترام مقدار زاویه اصطکاک داخلی برابر ۴۵ درجه و برای ماسه شل برابر با ۲۵ درجه فرض شده است. این مقادیر در واقع حد پائین و حد بالای زاویه اصطکاک برای خاکهای

جدول (۲): پارامترهای مورد استفاده در مدل سازی

پارامتر خاک	ماسه مترام	ماسه شل	رس نرم	رس سخت
زاویه اصطکاک داخلی (ϕ')، درجه	۴۵	۲۵	صفر	صفر
مقاومت برشی زهکشی نشده (C_u)، kPa	صفر	صفر	۲۵	۱۲۵
زاویه اتساع (ψ)، درجه	۱۵	صفر	صفر	صفر
وزن مخصوص خاک (kN/m^3)	۱۸	۱۸	۱۸	۱۸
ضریب فشار جانبی خاک (K_0)	۰/۲۹	۰/۵۸	۰/۴	۰/۴

اما از آنجا که در مدل سازی، وزن مخصوص خاک فقط بر روی تنش‌های برجا تأثیر گذار است و در آنالیزهای عددی در هنگام نفوذ نوک شمع در خاک تنش‌های قابل ملاحظه‌ای در اطراف نوک شمع ایجاد می‌شود، تفاوت در مقدار وزن مخصوص خاک ماسه‌ای و رسی تأثیر قابل توجهی بر نتایج نخواهد گذاشت.

ϕ' : زاویه اصطکاک داخلی خاک بر حسب درجه
 ϕ'_{crit} : زاویه اصطکاک نهایی که متوسط مقدار آن برای ماسه‌های مختلف در حدود ۳۳ درجه می‌باشد و در این مقاله نیز مقدار آن ۳۳ درجه در نظر گرفته شده است [۱۹].
 ψ : زاویه اتساع خاک بر حسب درجه

۵- مدل سازی ظرفیت باربری نوک شمع در شرایط ماسه بر روی رس

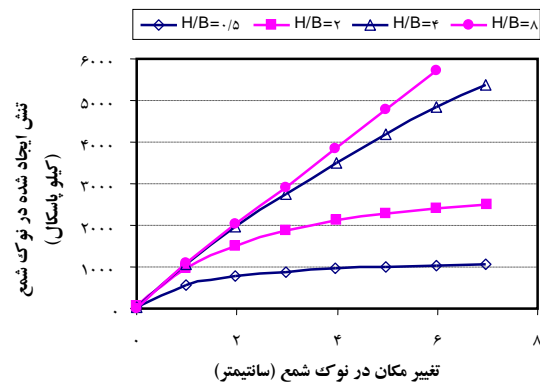
برای بررسی تغییرات ظرفیت باربری نوک شمع در خاک‌های لایه‌ای، شمعی به طول ۱۰ متر و قطر ۸۰ سانتیمتر در دو وضعیت ماسه مترام بر روی رس، و ماسه شل بر روی رس مدل سازی شده است. شمع و پروفیل خاک به طور شماتیک در شکل (۵) نشان داده شده است. مطابق شکل (۵)، پروفیل خاک شامل یک لایه ماسه‌ای بر روی خاک رسی بوده و شمع به طور کامل در خاک ماسه‌ای قرار می‌گیرد. در آنالیزهای انجام شده، طول شمع ثابت و برابر ۱۰ متر در نظر گرفته شده و فاصله نوک شمع تا مرز مشترک ماسه-رس (H) متغیر و به صورت ضریبی از قطر شمع (B) انتخاب شده است. ثابت نگه داشتن طول شمع باعث می‌شود که در همه آنالیزها، تنش‌های موجود در نوک شمع برابر بوده و فقط تأثیر وجود لایه رسی

ماسه‌ای می‌باشد. به همین صورت برای خاک رسی نرم مقدار مقاومت برشی زهکشی نشده برابر ۲۵ کیلو پاسکال و برای رس سخت ۱۲۵ کیلو پاسکال فرض شده است. اگر چه در واقعیت می‌توان خاکهایی را یافت که پارامترهای مقاومتی آنها می‌تواند در خارج از محدوده یاد شده باشد لیکن می‌توان گفت که پارامترهای انتخاب شده محدود و وسیعی از خاکهای ماسه‌ای و رسی را در بر می‌گیرد. همچنین در جدول (۲) مقدار وزن مخصوص برای انواع خاکها یکسان فرض شده است. اگر چه وزن مخصوص می‌تواند مقادیر متفاوتی را داشته باشد

نسبت حداکثر ظرفیت باربری نوک شمع در خاک رسی همگن (q_{lw}) به حداکثر ظرفیت باربری نوک شمع در خاک ماسه‌ای همگن (q_{ls}) برابر $0/683$ می‌باشد، مشاهده می‌شود که ظرفیت باربری نوک شمع از $H/B = 8$ تا $H/B = 1$ ثابت می‌باشد. شکل منحنی در این قسمت بیان می‌کند که نوک شمع تا فاصله‌ای برابر ۱ قطر شمع از لایه رسی، وجود خاک رسی را احساس نمی‌کند و ظرفیت باربری فقط تابع خاک ماسه‌ای می‌باشد. مقدار ظرفیت باربری از $H/B = 1$ شروع به کاهش می‌کند. بدین ترتیب نوک شمع در $H/B = 1$ وجود لایه رسی در جلوی خود را احساس کرده و ظرفیت باربری کاهش می‌یابد.

در شکل (۷-ب)، برای شرایط ماسه متراکم بر روی رس نرم با $Cu = 25 \text{ kPa}$ ($q_{lw}/q_{ls} = 0/27$)، مشاهده می‌شود که ظرفیت باربری نوک شمع از $H/B = 8$ تا $H/B = 7$ تقریباً ثابت می‌باشد. مقدار ظرفیت باربری از $H/B = 7$ شروع به کاهش (با شیب بسیار کم) کرده و در $H/B = 5$ شیب منحنی زیاد می‌شود. بدین ترتیب نوک شمع در $H/B = 7$ وجود لایه رسی در جلوی خود را کمی احساس کرده و ظرفیت باربری کاهش می‌یابد. کاهش ظرفیت باربری تا $H/B = 5$ به تدریج انجام می‌گیرد ولی از این فاصله به بعد، ظرفیت باربری به سرعت کاهش می‌یابد. این اتفاق را می‌توان ناشی از سوراخ شدگی لایه ماسه‌ای به درون لایه رسی تفسیر کرد.

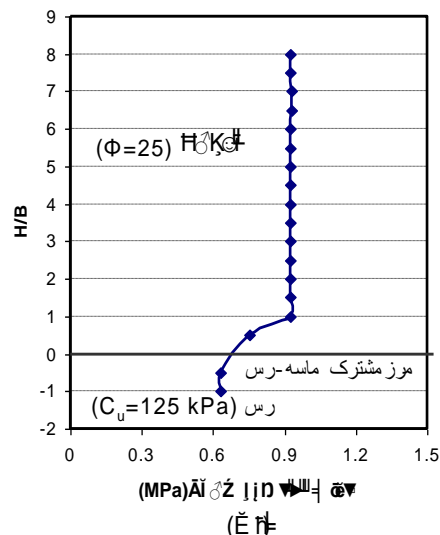
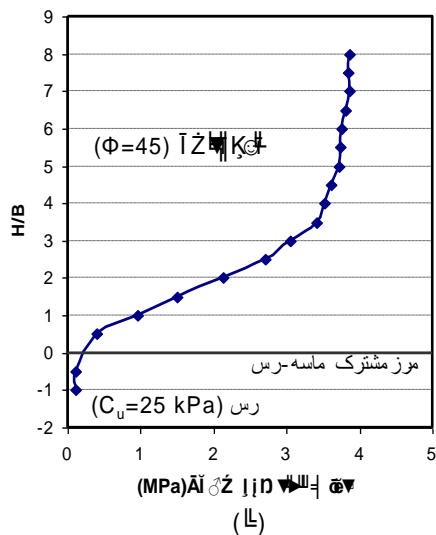
با توجه به شکل (۷-الف و ب) مشاهده می‌شود که با ورود نوک شمع به لایه رسی، در فاصله‌ای برابر نیم قطر شمع از لایه ماسه‌ای ظرفیت باربری نوک شمع ثابت می‌شود. بنابراین در شرایط ماسه بر روی رس، برای شمع‌هایی که نوک آن در خاک رسی قرار گرفته، ظرفیت باربری بعد از نیم قطر شمع فقط تابع خصوصیات خاک رس می‌باشد. این موضوع به این معنی است که ظرفیت باربری نوک شمع بیشتر از آنکه تحت تاثیر خاک قرار گرفته در بالای خود باشد، تابع خصوصیات خاک در جلوی خود می‌باشد. بدین ترتیب در شرایط وجود لایه ماسه ای بر روی یک لایه رسی



شکل (۶): منحنی تنش ایجاد شده در نوک شمع برابر نشست نوک شمع برای شرایطی که شمع در خاک ماسه‌ای متراکم قرار داشته و فاصله نوک شمع تا لایه رسی $0/5$ ، 2 ، 4 و 8 برابر قطر شمع است.

در شکل (۶) منحنی تنش ایجاد شده در نوک شمع برابر نشست نوک شمع برای شرایطی که شمع در خاک ماسه‌ای متراکم قرار داشته و فاصله نوک شمع تا لایه رسی $0/5$ ، 2 ، 4 و 8 برابر قطر شمع است، نشان داده شده است. با توجه به شکل (۶) مشاهده می‌شود در شرایطی که نوک شمع در فاصله‌ای برابر نیم قطر شمع در بالای لایه رسی قرار دارد، منحنی تنش-نشست بسیار پائین تر از شرایطی است که این فاصله 8 برابر قطر شمع می‌باشد. همچنین مشاهده می‌شود در شرایط $H/B = 0/5$ ، منحنی تنش-نشست به صورت افقی تبدیل می‌شود که این بدان معنی است که در این شرایط، با وجود این که نوک شمع در خاک ماسه‌ای قرار دارد ولی بیشتر تحت تاثیر خاک رسی می‌باشد. بر خلاف شرایط $H/B = 0/5$ ، در شرایط $H/B = 4$ و $H/B = 8$ ، نوک شمع وجود لایه ضعیف رسی را کمتر احساس کرده و بیشتر تحت تاثیر خاک ماسه‌ای متراکم می‌باشد.

تغییرات ظرفیت باربری نوک شمع در برابر تغییر فاصله نوک شمع نسبت به مرز مشترک ماسه-رس (H/B) در شرایط ماسه شل بر روی رس و ماسه متراکم بر روی رس در شکل (۷) نشان داده شده است. با توجه به شکل (۷-الف) در شرایط ماسه شل بر روی رس سخت با $Cu = 125 \text{ kPa}$ (شرایطی که



شکل (۷): تغییرات ظرفیت باربری نوک شمع در برابر تغییر فاصله نوک شمع تا مرز مشترک ماسه - رس
الف. در شرایط ماسه شل بر روی رس، ب. در شرایط ماسه متراکم بر روی رس

جدول (۳): چهار آنالیز انجام شده برای بررسی تاثیر نسبت q_{Iw}/q_{Is}

شماره آنالیز	ماسه، مقاومت برشی زهکشی شده، ϕ (°)	رس، مقاومت برشی زهکشی نشده، C_u (kPa)	q_{Iw}/q_{Is}
۱	۴۵	۱۵۰	۰/۲۲
۲	۲۵	۵۰	۰/۲۳
۳	۲۵	۷۵	۰/۳۹
۴	۳۵	۱۲۵	۰/۳۹

نتایج آنالیزهای عددی انجام شده در شکل شماره ۸ نشان داده شده است. منحنی قائم در شکل شماره ۸ بیانگر نسبت q_{IH}/q_{Is} ضرب در ۱۰۰ می باشد که در آن مقدار ظرفیت باربری نوک شمع قرار گرفته در فاصله H از مرز مشترک ماسه-رس می باشد. به عبارت دیگر مقدار $(q_{IH}/q_{Is}) \times 100$ بیان می کند که اگر در شرایط ماسه بر روی رس نوک شمع در فاصله H از مرز مشترک ماسه-رس قرار گیرد، ظرفیت باربری نوک شمع چه درصدی از حداکثر ظرفیت باربری نوک شمع در خاک ماسه ای همگن خواهد بود.

و قرار گرفتن نوک شمع در خاک رس زیرین، می توان از وجود لایه ماسه ای بالایی صرف نظر کرده و ظرفیت باربری نوک شمع را با توجه به لایه رسی محاسبه کرد. با مقایسه اشکال (۷-الف) و (۷-ب) نتیجه می شود که با افزایش اختلاف در ظرفیت باربری دو لایه مجاور هم (کاهش نسبت q_{Iw}/q_{Is}) و در شرایط ماسه بر روی رس، فاصله ای که نوک شمع وجود لایه رسی زیرین را احساس می کند افزایش می یابد. با کاهش نسبت q_{Iw}/q_{Is} از ۰/۶۸۳ به ۰/۰۲۷، مقدار فاصله مطمئنی که نوک شمع می تواند به مرز مشترک ماسه-رس نزدیک شود تا گسیختگی از نوع سوراخ شدگی اتفاق نیفتد، از یک قطر شمع به ۵ قطر شمع افزایش می یابد.

۶- مدل سازی ظرفیت باربری نوک شمع در

شرایط ماسه بر روی رس

با توجه به شکل شماره ۷ تاثیر نسبت q_{Iw}/q_{Is} بر مقدار فاصله مطمئنی که نوک شمع می تواند به مرز مشترک ماسه-رس نزدیک شود مشاهده شد. برای بررسی بیشتر تاثیر نسبت q_{Iw}/q_{Is} ، چهار آنالیز عددی انجام شد. دو آنالیز عددی در نسبت $q_{Iw}/q_{Is} \approx 0/2$ و دو آنالیز دیگر در نسبت $q_{Iw}/q_{Is} \approx 0/4$ انجام شد. جزئیات آنالیزهای انجام شده در جدول (۳) آورده شده است.

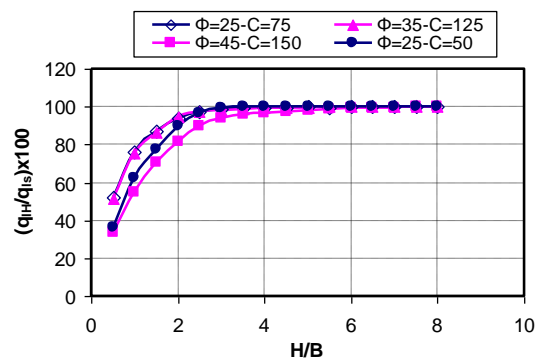
جدول (۴): مقایسه نتایج عددی در این تحقیق با نتایج آزمایشگاهی
میرهوف و ساستری برای مقدار فاصله مطمئن جلوگیری از سوراخ

شدگی

نسبت q_{lw}/q_{ls}	مقدار فاصله مطمئن	
۰/۰۲	نتایج آزمایشگاهی	۶ B
۰/۰۲۷	نتایج عددی (این تحقیق)	۵ B
۰/۶۷	نتایج آزمایشگاهی	۱/۵ B
۰/۶۸	نتایج عددی (این تحقیق)	۱ B

۸- نتیجه گیری

در خاک‌های لایه‌ای بسته به محل قرارگیری نوک شمع، ظرفیت باربری نوک شمع نسبت به ظرفیت باربری نوک شمع در خاک‌های همگن متفاوت می‌باشد. به عبارت دیگر در شرایط خاک‌های لایه‌ای، استفاده از روابط محاسبه ظرفیت باربری نوک شمع در خاک‌های همگن می‌تواند منجر به نتایج غیر واقعی شود. در شرایط ماسه بر روی رس و قرار گرفتن نوک شمع در خاک ماسه‌ای، با نزدیک شدن نوک شمع به مرز مشترک ماسه-رس وجود لایه ضعیف رسی توسط نوک شمع احساس شده و ظرفیت باربری کاهش می‌یابد. مقدار فاصله‌ای که در آن ظرفیت باربری نوک شمع تحت تاثیر خاک رسی قرار می‌گیرد به نسبت حداکثر ظرفیت باربری نوک شمع در خاک رسی همگن به حداکثر ظرفیت باربری نوک شمع در خاک ماسه‌ای همگن (q_{lw}/q_{ls}) بستگی دارد. به طور کلی با کاهش نسبت q_{lw}/q_{ls} ، مقدار فاصله‌ای که نوک شمع قرار گرفته در خاک ماسه‌ای وجود لایه رسی روبروی خود را احساس می‌کند افزایش می‌یابد. همچنین آنالیزهای عددی نشان می‌دهد که ظرفیت باربری نوک شمع بیشتر از آنکه تحت تاثیر خاک قرار گرفته در بالای خود باشد، تابع خصوصیات خاک در جلوی خود می‌باشد. بدین ترتیب در شرایط وجود لایه ماسه‌ای متراکم بر روی یک لایه رس نرم و قرار گرفتن نوک شمع در لایه رس نرم زیرین، می‌توان از وجود لایه متراکم بالایی چشم پوشی و ظرفیت باربری نوک شمع را با توجه به لایه رس محاسبه کرد.



شکل (۸): تغییرات نسبت (q_{lw}/q_{ls}) در برابر H/B

پارامترهای مقاومت برشی خاک به گونه‌ای انتخاب شده‌اند تا بتوان با مقایسه مقادیر یکسان q_{lw}/q_{ls} مقادیر H/B را به دست آورد. با توجه به شکل (۸) ملاحظه می‌شود که برای خاک‌های لایه‌ای شامل ماسه بر روی رس اگر نسبت q_{lw}/q_{ls} برابر باشد، نحوه کاهش ظرفیت باربری نوک شمع با نزدیک شدن نوک شمع به مرز مشترک ماسه-رس تقریباً یکسان خواهد بود. به عنوان مثال، در شرایط ماسه با زاویه اصطکاک ۲۵ و ۲۵ درجه به ترتیب بر روی خاک رسی با چسبندگی زهکشی نشده ۱۲۵ و ۷۵ کیلوپاسکال، منحنی (q_{lw}/q_{ls}) در برابر H/B منطبق بر یکدیگر خواهند بود. بنابراین اگرچه پارامترهای مقاومت برشی مختلف در آنالیزهای انجام شده در این تحقیق استفاده شده است اما می‌توان نتیجه گرفت که هرگاه مقدار q_{lw}/q_{ls} یکسان باشد مقدار H/B به دست آمده یکسان است.

۷- مقایسه نتایج مدل سازی با روابط موجود

مقادیر فاصله مطمئن برای جلوگیری از سوراخ شدگی، پیشنهاد شده توسط میرهوف و ساستری [۹] با نتایج به دست آمده در مدل سازی، در جدول (۴) آمده است. با توجه به جدول (۴) مشاهده می‌شود که نتایج مدل سازی با اعداد پیشنهادی توسط میرهوف و ساستری برابری خوبی دارد. همچنین تاملینسون [۱۰] مقدار فاصله‌ای که در آن نوک شمع وجود لایه رسی زیرین را احساس نمی‌کند، ۱۰ برابر قطر شمع پیشنهاد می‌کند. تغییرات ظرفیت باربری نوک شمع در این فاصله به صورت خطی پیشنهاد شده است. نتایج مدل سازی نشان می‌دهد انتخاب این فاصله و در نظر گرفتن تغییرات ظرفیت باربری نوک شمع به صورت خطی در این فاصله، در شرایط وجود لایه ماسه‌ای متراکم بر روی خاک رسی (پائین بودن نسبت q_{lw}/q_{ls} در جهت اطمینان می‌باشد. ولی در شرایط وجود ماسه شل بر روی خاک رسی، این معیار بسیار محافظه کارانه خواهد بود.

Amsterdam, Neth: 29-34.

O'Neill M W, Reese A C (1999) Drilled shafts: construction procedures and design methods. Federal Highway Administration.

FLAC User Manual, Version 4 (2000) Itasca Consulting Group Inc., USA.

Meyerhof, G.G., Sastry, V.V.R.N., 1977, Bearing Capacity of Piles in Layered Soils. Part1. Clay overlying sand, Canadian Geotechnical Journal, 15, pp. 171-181

Meyerhof, G.G., Sastry, V.V.R.N., 1997, Bearing capacity of piles in layered soils. Part2. Sand overlying clay, Canadian Geotechnical Journal

Tomlinson, M.J., 1994, Pile Design and Construction Practice, Fourth edition, E & FN SPON

Ahmadi, M.M. Robertson, P.K. 2008, A numerical study of chamber size and boundary effects on CPT tip resistance in NC sand. Accepted for publication in Scientia Iranica.

Lee J H, Salgado R (1999) Determination of pile base resistance in sands. ASCE Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, Vol. 125, No. 8: 673-683.

Cudoto D P (2001) Foundation design, principles and practices. 2nd edition, Prentice-Hall Inc.

Bruce D A (1986) Enhancing the performance of large diameter piles by grouting. Parts 1 and 2, Ground Engineering, May and July, respectively.

Fleming W G K, Weltman A J, Randolph M F, Elson W K (1985) Piling engineering. John Wiley & Sons.

Ahmadi M M, Byrne P M, Campanella R G (2005) Cone tip resistance in sand: modeling, verification, and applications. Canadian Geotechnical Journal, 42: 977-993.

Ahmadi M M, Robertson P K (2005) Thin layer effects on the CPT q_c measurement. Canadian Geotechnical Journal, No. 42: 1-16.

Lunne, T., Robertson, P. K. and Powell, J. M., 1997, Cone Penetration Testing in Geotechnical Practice, Blackie Academic & Professional.

Bolton, M. D., 1986, "The strength and dilatancy of sands" Geotechnique 36, No. 1, pp 65-78.

۹- فهرست علائم

[۶]		B	قطر شمع
[۷]		C_u	مقاومت برشی زهکشی نشده
[۸]		G	مدول برشی
[۹]		H	فاصله نوک شمع تا مرز مشترک ماسه-رس
[۱۰]		K	مدول حجمی
[۱۱]		K_B	عدد مدول حجمی
[۱۲]		K_G	عدد مدول برشی
[۱۳]		K_O	ضریب فشار جانبی خاک در حالت سکون
[۱۴]		m	عدد توان برای تنش
[۱۵]		n	عدد توان برای تنش
[۱۶]		P_A	فشار اتمسفر
[۱۷]		q_p	ظرفیت باربری نوک شمع
[۱۸]		q_{IH}	ظرفیت باربری نوک شمع قرار گرفته در خاک
[۱۹]		q_{Iw}	حداکثر ظرفیت باربری نوک شمع در خاک رسی
[۲۰]		q_{Is}	حداکثر ظرفیت باربری نوک شمع در خاک ماسه‌ای
[۲۱]		S	تغییر مکان نوک شمع
[۲۲]		ϕ'	زاویه اصطکاک خاک
[۲۳]		ϕ'_{crit}	زاویه اصطکاک نهایی خاک
[۲۴]		γ	دانسیته خاک
[۲۵]		v	نسبت پواسون
[۲۶]		σ'_m	متوسط تنش موثر
[۲۷]		ψ	زاویه اتساع

۱۰- مراجع

- [۱] Thasnanipan, N., Anwar, M.A., Maung, A.W., 1999, Failure mechanism of long bored piles in layered soil of Bangkok, Civil and Environmental Engineering Conference, Bangkok, Thailand
- [۲] Thasnanipan, N., Tanseng, P., Anwar, M.A., 1988, Large diameter bored piles in multi-layered soils of Bangkok, Deep Foundation on Bored and Auger Piles, Bangkok, Rotterdam
- [۳] Reese L C, Wright S J (1977) Construction procedure and design for axial loading Vol. 1, Drilled Shaft Manual, HDV-22, Implementation Package 77-21, Implementation Division, U.S. Department of Transportation, McLean, Virginia, p 140.
- [۴] Meyerhof G G (1976) Bearing capacity and settlement of pile foundations. The Eleventh Terzaghi Lecture, Journal of the Geotechnical Engineering Division, ASCE, Vol. 102, No. GT3: 197-228.
- [۵] Decourt L (1982) Prediction of the bearing capacity of piles based exclusively on N values of the SPT. Proceedings of the 2nd European Symposium, Volume 1: Standard Penetration Test,