

بررسی عملکرد بار- نفوذ پی اسپادکن در خاک‌های تک‌لایه رسی

حجت مهرعلی زاده^۱، مسعود مکارچیان^{۲*}

^۱ دانشجوی دکتری مهندسی عمران، دانشکده مهندسی، دانشگاه بوعلی سینا؛ Mehralizadeh.hojat@gmail.com

^۲ استادیار مهندسی عمران، دانشکده مهندسی، دانشگاه بوعلی سینا؛ Makarchian@yahoo.com

اطلاعات مقاله	چکیده
تاریخچه مقاله: تاریخ دریافت مقاله: ۱۳۹۷/۰۲/۲۲ تاریخ پذیرش مقاله: ۱۳۹۷/۰۸/۲۹	استفاده از اسپادکن به‌عنوان پی سکوی حفاری جکاپ مرسوم است. ابعاد مدل، تحکیم رس و نفوذ اسپادکن، مهم‌ترین مسائل در مدل‌سازی این نوع پی‌ها در رس هستند. در این مقاله نفوذ مخروط‌های CPT و پی اسپادکن در خاک رسی تک‌لایه مورد بررسی قرار گرفته است. برای مطالعه تاثیر مقاومت زهکشی نشده رس بر عملکرد بار- نفوذ اسپادکن از خاک اصلاح شده با ۵ و ۱۰ درصد سیمان استفاده شد؛ همچنین از دو مخروط CPT با قطرهای متفاوت جهت تخمین مقاومت برشی زهکشی نشده لایه رس استفاده شد. نتایج نشان داد که می‌توان از رس اصلاح شده با سیمان برای مدل‌سازی خاک با مقاومت‌های متفاوت استفاده کرد، با این حال بایستی به تغییرات ضرایب ظرفیت باربری در دو حالت با و بدون سیمان دقت کرد. همچنین نتایج نفوذ مخروط‌های CPT نشان داد که در مدل‌سازی فیزیکی، می‌توان با دقت مناسب از مخروط‌های با قطر کوچکتر به‌جای مخروط‌های با قطر متداول بهره گرفت.
کلمات کلیدی: جکاپ اسپادکن مخروط CPT مدل‌سازی فیزیکی ضریب ظرفیت باربری	

Investigation of Load- Penetration Behavior of Spudcan Foundations in Single- Layered Clayey Soils

Hojat Mehralizadeh¹, Masoud Makarchian^{2*}

¹ PhD Candidate of Civil Engineering, Faculty of Engineering, Bu-Ali Sina University; Mehralizadeh.hojat@gmail.com

² Assistant Professor of Civil Engineering, Faculty of Engineering, Bu-Ali Sina University; Makarchian@yahoo.com

ARTICLE INFO

Article History:

Received: 12 May 2018

Accepted: 20 Nov. 2018

Keywords:

Jack- up

Spudcan

CPT cone

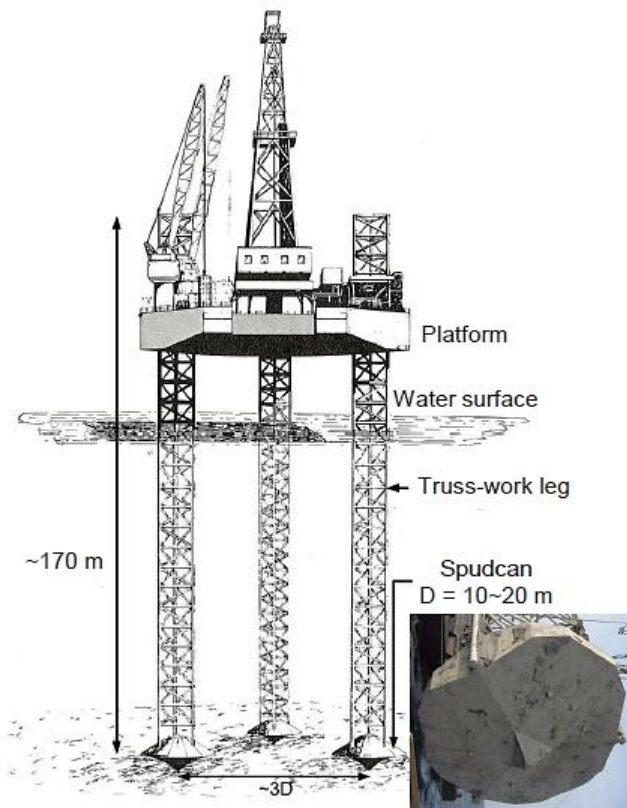
Physical modelling

Bearing capacity factor

ABSTRACT

Using spudcan as foundations for jack-up rigs is usual. Model dimensions, consolidation of clay, and spudcan penetration are the most important issues in modelling of this type of foundations in clays. Penetration of CPT cones and spudcan foundations in single- layered clayey soils was investigated in this paper. Cement stabilized clay with 5 and 10 percent cement was used to study the effect of undrained shear strength of clay on load- penetration behavior of spudcan; Also, two CPT cones with different diameters were used to estimate the undrained shear strength of clay layers. Results show that cement stabilized clays can be used for modelling of clay layers with different strengths. However, careful attention should be paid for changing of bearing capacity factors in two cases, with or without cement. Results show that cones with smaller diameters can be used in physical modelling with good accuracy as well as conventional ones.

چند ده متر برای رس نرم متغیر است. هم‌چنین نرخ نفوذ متوسط اسپادکن در خاک، به‌طور معمول، ۱ متر بر ساعت است.



شکل ۱- طرح شماتیک سکوی جکاپ بر روی اسپادکن [۱۲]

نفوذ اسپادکن پروسه‌ای سریع و زهکشی نشده است و زمانی که افزایش بار اعمال می‌شود، در مقایسه با زمان زهکشی سیال بسیار کم است. اگر خاک اطراف اسپادکن رس اشباع باشد، اسکلت خاک فشرده شده و اضافه فشار آب حفره‌ای زیادی ایجاد می‌شود؛ به‌طور کلی در طی نفوذ اسپادکن، جریان خاک سه فاز را تجربه می‌کند [۱۳]:

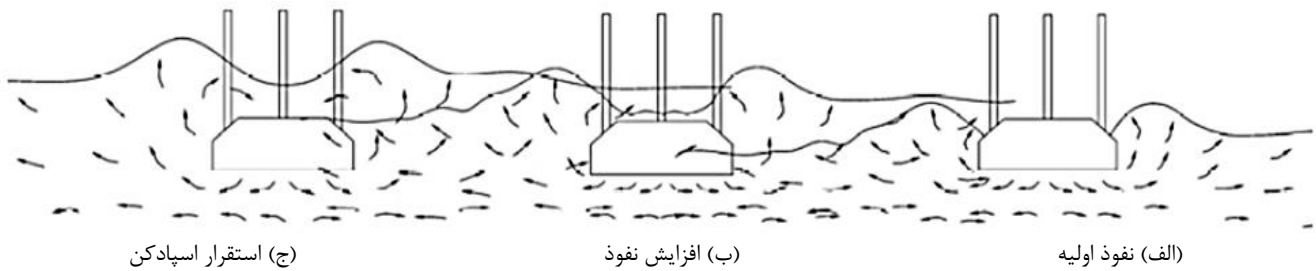
فاز ۱) خاک زیر اسپادکن جابجا شده و به سمت سطح جریان می‌یابد و باعث ایجاد حفره کوچکی در اطراف اسپادکن می‌شود. در این مرحله به دلیل افزایش فشار سربار ناشی از جابجایی خاک به سمت بالا، ظرفیت باربری نیز افزایش می‌یابد (شکل ۲ (الف)).

فاز ۲) با افزایش نفوذ، خاک اطراف اسپادکن جابجا شده و به‌صورت برگشتی به پشت اسپادکن می‌رود که به آن جریان برگشتی خاک^۵ می‌گویند. در این مرحله نیز ظرفیت باربری اسپادکن زیاد شده و مکانیزم جریان خاک از مکانیزم گسیختگی سطحی به مکانیزم گسیختگی عمیق تغییر می‌کند (شکل ۲ (ب)).

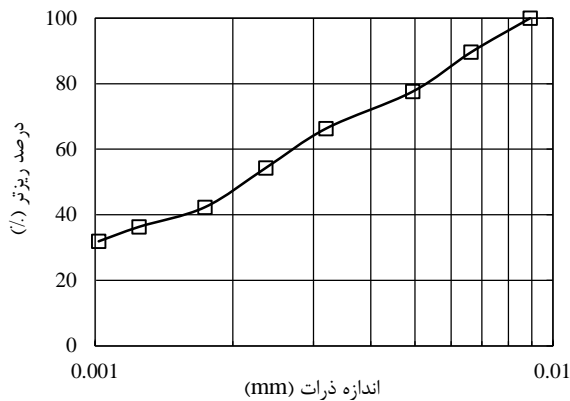
جکاپ^۱، سکوی فراساحلی سیاری با تنظیم ارتفاع خودکار است که دارای بدنه‌ای برای حفاری و نگه‌داشتن سایر تجهیزات در روی آن و سه یا بیشتر پایه جمع شدنی است که از بدنه عبور کرده‌اند [۱-۳]. جکاپ را به محل نصب برده و پایه‌ها را در بستر دریا فرو می‌کنند. سپس بدنه از سطح آب جدا شده و به سمت بالا می‌رود. جکاپ‌های بزرگ و مدرن معمولاً از ساختاری دو مخروطی به‌نام اسپادکن^۲، برای کمک به نصب واحد در بستر دریا استفاده می‌کنند. این ساختار معمولاً در پلان، به شکل شش ضلعی یا هشت ضلعی است. اغلب برای تحلیل‌های ژئوتکنیکی، اسپادکن به‌صورت دایره در نظر گرفته می‌شود. جکاپ‌های بزرگ در آب با عمق حدود ۱۵۰ متر عمل می‌کنند و دارای بدنه مثلی شکل با طول ۸۰ متر یا بیشتر هستند. برای نصب جکاپ با پایه‌های مستقل، واحد به محل نصب برده شده و عملیات پیش‌بارگذاری^۳ انجام می‌شود. پیش‌بارگذاری با فشاری معادل ۳۰۰ تا ۵۰۰ کیلوپاسکال انجام می‌شود که منجر به گسیختگی ظرفیت باربری خاک زیر و اطراف اسپادکن می‌شود. افزایش بار پیش‌بارگذاری، منجر به افزایش نفوذ پی شده و احتمال ناپایداری پی ناشی از پدیده آبهستگی، مخصوصاً در ماسه‌ها را کاهش می‌دهد [۴].

برخلاف دیگر انواع سکوها، جکاپ‌ها می‌توانند در مکان‌های مختلفی در طول عمر خود مورد استفاده قرار گیرند. محاسبات طراحی بایستی محدوده شرایط محیطی بستری را که جکاپ در طی عمر خود تجربه می‌کند، در نظر بگیرد. طراح، اسپادکنی را می‌خواهد که برای بستری شامل هر نوع خاکی از رس نرم تا ماسه مترکم مناسب باشد. هنگامی که یک جکاپ ساخته شده و سفارش داده می‌شود؛ ارزیابی خاص سایت بایستی برای جایی که جکاپ قرار است مورد استفاده قرار گیرد، انجام شود. راهنمای ارزیابی سایت برای جکاپ، توسط SNAME^۴ منتشر می‌شود. تحقیقات زیادی در مورد قابلیت اطمینان استاندارد SNAME و به‌طور کلی جکاپ‌ها انجام شده است [۵-۱۰].

اسپادکن پی تکی مخروطی فلزی است که به انتهای پایه‌های سکوی جکاپ متصل می‌شود. شکل ۱ طرح شماتیک سکوی جکاپ بر روی اسپادکن را نشان می‌دهد. هندسه اسپادکن‌های متداول، شبیه به‌هم، با بالا و پایین اریب و انتهای نوک تیز در پایین آن‌ها است. قطر معادل اسپادکن‌های متداول از ۱۰ متر تا اندکی بیشتر از ۲۰ متر است [۱]. اسپادکن‌ها در بستر دریا نصب می‌شوند تا پایداری سکوها جکاپ را در طی عملیات آن‌ها تضمین کنند. نصب آن‌ها با اعمال پیش‌بارگذاری توسط وزن جکاپ و افزودن آب به بدنه سکو صورت می‌گیرد. استاندارد (2008) SNAME تاکید می‌کند که بار پیش‌بارگذاری بیشتر از بار قائم حداکثر در شرایط بهره‌برداری باشد [۱۱]. عمق نفوذ نهایی، بین چند متر برای خاک دانه‌ای سخت تا



شکل ۲- جابجایی خاک در طی نفوذ اسپادکن [۱۳]



شکل ۳- منحنی دانه‌بندی خاک رس مورد استفاده در پژوهش

جدول ۱- مشخصات خاک رس مورد استفاده در پژوهش

مقدار	شماره استاندارد	مشخصات
۴۰/۵		LL (%)
۲۴/۶	ASTM D4318	PL (%)
۱۵/۹		PI (%)
۲/۶۵	ASTM D792	G_s (gr/cm ³)
۴۷	ASTM D7928	درصد ذرات رس کوچکتر از ۲ میکرون
۰/۰۰۲۲		D_{50} (mm)
۰/۳۴	ASTM D7928 & ASTM D4318	عدد فعالیت خاک (A)
۸/۶	ASTM D2435	c_v در سرپار ۲۰ kPa (m ² /Year)

افزودن سیمان به خاک رس برای مقاصد مختلف، از جمله تثبیت و بهبود خواص مقاومتی آن، صورت می‌پذیرد. در این پژوهش برای مدل‌سازی خاک رس با مقاومت‌های متوسط و زیاد، ۵ و ۱۰ درصد وزنی خاک رس خشک (A_{11})، به آن سیمان افزوده شده است. حدود اثربرگ مخلوط خاک و سیمان تقریباً ۳۰ دقیقه پس از اضافه کردن آب به مخلوط اندازه‌گیری شده است. در مدت مذکور گیرش اولیه سیمان رخ داده و تاثیر سیمان بر خواص خمیری خاک قابل اندازه‌گیری است. افزودن سیمان به خاک رس، به‌طور نسبی، باعث افزایش حد روانی و کاهش نشانه خمیری رس مورد استفاده شده است (شکل ۴). دلیل افزایش حد روانی خاک فولوکوله شدن ذرات رس و افزایش حجم حفرات مخلوط است که برای رسیدن به حالت مایع نیاز به آب بیشتری خواهد داشت. هم‌چنین با افزودن سیمان

فاز ۳) با نفوذ بیشتر، تمامی اسپادکن درون خاک قرار می‌گیرد و خاک بالا آمده، شروع به حرکت به سمت پایین می‌کند. در این شرایط حفره ایجاد شده در اثر نفوذ، به سمت شرایط پایدار می‌رود. ظرفیت باربری در این مرحله به حد نهایی خود می‌رسد؛ اما مکانیزم‌های گسیختگی موضعی همچنان وجود دارند (شکل ۲ ج). الگوهای مشابهی در آزمایش‌های سانتریفیوژ و مدل‌های اجزاء محدود نفوذ پیوسته اسپادکن در رس‌های تک‌لایه به‌دست آمده است [۱۴ و ۱۵]. در همه این الگوها جریان برگشتی خاک در حین نفوذ رخ می‌دهد و بر خلاف توصیه‌های موجود در استاندارد SNAME (2008) این رخداد نه به خاطر ناپایداری حفره ایجاد شده، بلکه به خاطر مکانیزم ترجیحی جریان خاک از زیر اسپادکن به بالای آن است. در مقاله حاضر، نفوذ پی اسپادکن در رس اشباع به‌صورت مدل‌سازی آزمایشگاهی ۱g مورد بررسی قرار گرفته است. برای افزایش مقاومت برشی زهکشی نشده خاک رس در آزمایشگاه به آن مقادیری سیمان اضافه شد. هم‌چنین برای تخمین رفتار مقاومتی خاک، از آزمایش‌های تک‌محوری و نفوذ مخروط استفاده شد. در نهایت، نتایج حاصل به‌صورت نمودارهایی ارائه و مورد تحلیل و بررسی قرار گرفتند.

۲- مواد و روش‌ها

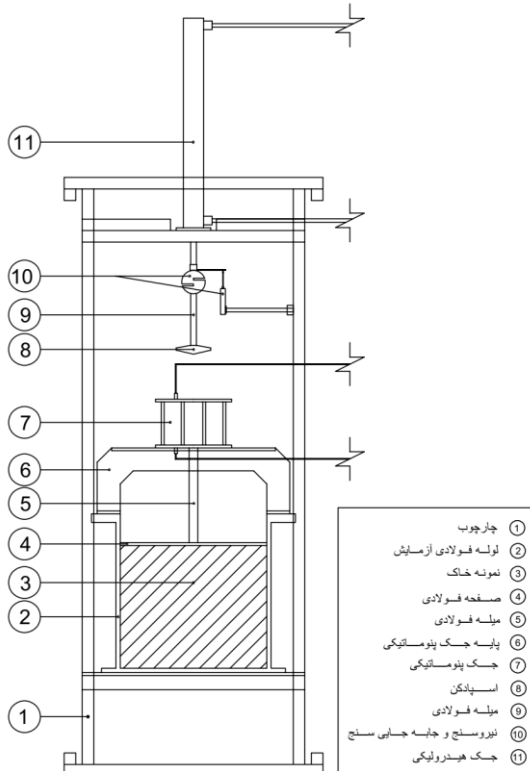
۲-۱- مصالح مورد استفاده

خاک رس مصرفی در این پژوهش سوپرکائولن زنون بود که به‌صورت تجاری و در کیسه‌های بزرگ ۱۲۰۰ کیلوگرمی به‌فروش می‌رسد. ۱۰۰ درصد ذرات این خاک از الک نمره ۲۰۰ عبور می‌کند. منحنی دانه‌بندی خاک مذکور، در شکل ۳ نشان داده شده است. سایر مشخصات خاک رس مورد استفاده نیز در جدول ۱ آورده شده است. از این رس، که در روش یکنواخت (متحد)، رس با خاصیت خمیری کم (CL) طبقه‌بندی می‌شود، در تهیه لایه نرم برای نفوذ پی اسپادکن استفاده شده است. لایه‌های سخت‌تر با افزودن مقادیر مشخصی از سیمان پرتلند تیپ ۲ به خاک رس، تهیه شدند.

سانتی‌متر انجام شد. با توجه به نسبت سطح صفحه بارگذاری روی نمونه خاک به سطح داخلی جک پنوماتیکی، فشار اعمالی بر روی نمونه‌ها، از تقسیم فشار داخلی جک پنوماتیکی، که توسط فشارسنج قرار گرفته در مسیر فشار باد کمپرسور اندازه‌گیری می‌شد، بر عدد $6/5$ محاسبه شد. از جک هیدرولیکی برای فروکردن پی اسپادکن و مخروط‌های CPT در خاک استفاده شد. این جک دارای میله‌ای به قطر ۳ سانتی‌متر با قابلیت جابه‌جایی ۶۰ سانتی‌متر است که به‌همراه نیروسنج و میله اتصال نیروسنج به پی، عملیات نفوذ را انجام می‌دهند. برای این‌که نفوذ پی در خاک زهکشی نشده باشد، بایستی سرعت نفوذ مقداری باشد که رابطه (۱)، ارائه شده توسط فینی و رندولف (۱۹۹۴) [۱۹]، برقرار باشد:

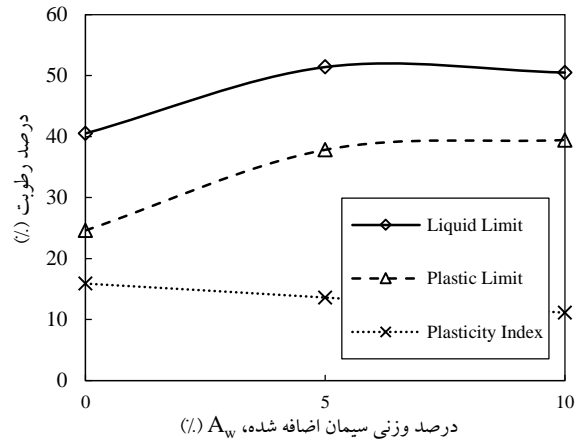
$$(v \times D) / c_v > 30 \quad (1)$$

در رابطه ۱، v ، سرعت نفوذ پی، D ، قطر اسپادکن و c_v ، ضریب تحکیم خاک است. برای این منظور سرعت نفوذ پی در خاک برابر ۱ میلی‌متر بر ثانیه انتخاب شد. قطر اسپادکن مدل برابر ۶۰ میلی‌متر بود که حدود $3/75$ برابر قطر خود از دیواره لوله فولادی فاصله داشت. منابع معتبر حداقل فاصله بر اسپادکن از دیواره جعبه آزمایش را ۲ برابر قطر اسپادکن می‌دانند؛ که فاصله مناسبی جهت جلوگیری از اثرات دیواره بر نتایج، محسوب می‌شود [۲۰ و ۲۱]. همچنین از دو مخروط CPT با قطرهای ۲۰ و $35/7$ میلی‌متر برای تخمین مقاومت برشی زهکشی نشده خاک استفاده شد. شکل ۶ پی اسپادکن و مخروط‌های CPT مورد استفاده در آزمایش را نشان می‌دهد.



شکل ۵- دستگاه مدل‌سازی نفوذ پی اسپادکن در خاک رس

که ماده‌ای فاقد خاصیت خمیری^۶ است، نشانه خمیری خاک رس کاهش می‌یابد. نتایج تغییرات حدود اتربرگ خاک رس اصلاح شده با سیمان، با پژوهش‌های مختلفی از جمله چو و همکاران (۲۰۰۴) [۱۶]، سرکار و همکاران (۲۰۱۲) [۱۷] و بیات و همکاران (۲۰۱۳) [۱۸] هم‌خوانی دارد.



شکل ۴- تغییرات حدود اتربرگ خاک رس با اضافه کردن سیمان

علاوه بر حدود اتربرگ، ضریب تحکیم خاک رس نیز با افزودن سیمان تغییر می‌کند. افزودن ۵ و ۱۰ درصد سیمان به خاک رس، تحت سربار ۲۰ کیلوپاسکال، ضریب تحکیم خاک را از $8/6$ مترمربع بر سال به ترتیب به $23/3$ و $58/2$ مترمربع بر سال خواهد رساند؛ به این معنا که گیرش خاک رس با این‌که میزان تحکیم خاک را تحت یک سربار خاص کاهش می‌دهد؛ اما این میزان تحکیم در زمان کمتری رخ داده است.

۲-۲- دستگاه آزمایش

برای مدل‌سازی فیزیکی نفوذ پی اسپادکن در خاک رس، از دستگاه آزمایش متشکل از چارچوب فولادی، لوله فولادی جهت ساخت نمونه، جک پنوماتیک جهت تحکیم نمونه، جک هیدرولیک جهت نفوذ اسپادکن در خاک، نیروسنج و جابجایی سنج متصل به دستگاه ثبت داده (داده‌نگار) و مخروط‌های CPT و پی اسپادکن استفاده شده است (شکل ۵). قطر داخلی لوله فولادی آزمایش ۵۱ سانتی‌متر (۲۰ اینچ) و ارتفاع آن از کف ۵۴ سانتی‌متر بود. این ابعاد قابلیت خوبی برای ساختن نمونه‌های خاک رس یک و چندلایه دارد. آب‌بندی میان دیواره و کف ظرف با استفاده از اورینگ^۷ انجام شد و در کف ظرف، شیر زهکشی وجود دارد. هم‌چنین برای وارد کردن فشار یکنواخت بر نمونه‌های خاک، از یک صفحه فولادی با ضخامت ۱۰ میلی‌متر، که در سطح آن سوراخ‌هایی برای زهکشی تعبیه شده بود استفاده شد. تحکیم نمونه‌ها با استفاده از جک پنوماتیکی با قطر داخلی ۲۰ سانتی‌متر و میله بارگذاری با قطر ۳ سانتی‌متر و قابلیت جابه‌جایی ۵

۲-۳- آماده سازی نمونه‌ها

روش آماده‌سازی نمونه‌ها در این پژوهش تا حدودی مشابه روش‌های ولاهوس و همکاران (۲۰۰۱) [۲۲] و جایونو (۲۰۱۱) [۲۰] بود. تفاوت‌های ایجاد شده در میزان تنش‌های اعمالی و مدت زمان اعمال این تنش‌ها به خاک بودند. آماده‌سازی نمونه‌ها در این پژوهش با مخلوط کردن آب و کائولن در نمونه‌های بدون سیمان، و آب، کائولن و سیمان در نمونه‌های اصلاح شده با سیمان و هم‌زدن مخلوط به مدت یک ساعت با هم‌زن مخصوص جهت خارج کردن حباب‌های هوا و سپس قراردادن گل اشباع تهیه شده در چند لایه و با کاردک‌های مخصوص در جعبه آزمایش انجام گرفت. میزان سیمان در نمونه‌های دارای سیمان، ۵ و ۱۰ درصد وزنی خاک خشک (A_w) بود و آب اضافه‌شده به اندازه‌ای بود که رطوبت نمونه‌ها تقریباً ۲ برابر حد روانی خاک رس بدون سیمان ($w = 80\%$) باشد. تمامی نمونه‌ها با ارتفاع اولیه ۳۰ سانتی‌متر در جعبه آزمایش قرار داده شدند. سپس با استفاده از جک پنوماتیکی، به مدت سه روز فشار یکنواخت ۲۰ کیلوپاسکال، یک روز ۵۰ و یک روز ۸۰ کیلوپاسکال بر روی نمونه‌ها اعمال شد. در نهایت نیز در مدت ۲ ساعت، فشار اعمالی به ۵۰ و ۲۰ کیلوپاسکال کاهش یافت. در تمام مدت عملیات اعمال فشار جهت تحکیم نمونه‌ها، تمامی شیرهای زهکشی نمونه باز بودند. روند اعمالی منجر به تحکیم نمونه‌ها شده و نمونه‌ها را آماده هرگونه بارگذاری می‌نماید. بعد از اتمام این روند، فشار اعمالی از روی نمونه‌ها برداشته شده و با کنارگذاشتن جک پنوماتیکی، مدل‌های پی اسپادکن و یا مخروط‌های CPT در خاک نفوذ داده شدند. ارتفاع نهایی نمونه‌ها در پایان، برای نمونه‌های بدون سیمان، با ۵ و ۱۰ درصد سیمان به ترتیب برابر ۲۰، ۲۴ و ۲۸ سانتی‌متر بود.

پس از انجام هر آزمایش، با استفاده از نمونه‌گیر جدارنازک، نمونه‌هایی مطابق استاندارد شماره ASTM D2166 جهت آزمایش تک‌محوری و تعیین وزن مخصوص اشباع خاک‌ها، تهیه و مورد آزمایش قرار گرفت. نتایج آزمایش‌های تک‌محوری برای خاک‌های با درصد سیمان متفاوت در جدول ۲ آمده است. پارامترهای جدول ۲ به ترتیب، A_w ، درصد سیمان اضافه شده به رس، q_u ، مقاومت نهایی (گسیختگی) در آزمایش تک‌محوری، c_u ، مقاومت برشی زهکشی‌نشده رس، ε_f ، کرنش متناظر مقاومت نهایی در آزمایش تک‌محوری، ε_{50} ، کرنش متناظر نصف مقاومت نهایی در آزمایش

تک‌محوری، E_f ، مدول الاستیسیته نهایی در آزمایش تک‌محوری و E_{50} ، مدول الاستیسیته در ۵۰ درصد مقاومت نهایی در آزمایش تک‌محوری هستند. وزن مخصوص اشباع خاک‌ها نیز برای نمونه‌های با صفر، ۵ و ۱۰ درصد سیمان به ترتیب برابر ۱۷/۰۰، ۱۶/۵۰ و ۱۶/۳۰ کیلونیوتن بر مترمکعب بود.

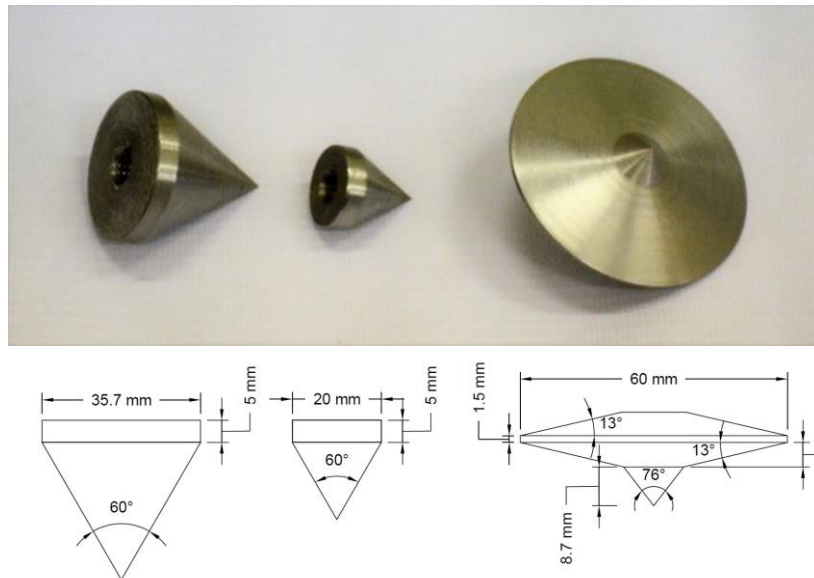
۳- نتایج و بحث

۳-۱- نفوذ مخروط CPT در خاک تک‌لایه

از مخروط CPT جهت تخمین مقاومت برشی زهکشی نشده انواع خاک‌ها و تعیین لایه‌های خاک استفاده می‌شود. این آزمایش در پروژه‌های طراحی و نصب سکوه‌های دریایی، قبل از عملیات طراحی انجام می‌شود. مهم‌ترین ویژگی این آزمایش، قابلیت ارائه نتایج پیوسته در عمق است. برای تبدیل مقاومت نوک مخروط CPT به مقاومت برشی زهکشی نشده خاک، پارامتری به نام ضریب مخروط (N_{kt}) مورد نیاز است که ($N_{kt} = q_c / c_u$) از رابطه ظرفیت باربری ترزاقی از تقسیم مقاومت نوک مخروط به دست آمده از نفوذ مخروط CPT بر مقاومت برشی زهکشی نشده حاصل از آزمایش‌های برش مستقیم، تک‌محوری و یا سه‌محوری در آزمایشگاه حاصل می‌شود. بدیهی است این پارامتر وابسته به ویژگی‌های خاک مورد استفاده است و با تغییر خاک، این پارامتر نیز دچار تغییر خواهد شد. در این پژوهش، ضرایب مخروط برای خاک‌های بدون سیمان و با ۵ و ۱۰ درصد سیمان، مطابق روشی که در ادامه آمده، جهت استفاده‌های بعدی تعیین شدند.

نفوذ مخروط CPT در نمونه خاک با استفاده از میله فولادی متصل به جک هیدرولیکی انجام و نیروی اعمالی با استفاده از نیروسنج اندازه‌گیری شد. از دو مخروط با قطرهای ۳۵/۷ و ۲۰ میلی‌متر جهت نفوذ استفاده شد. از این میان، قطر ۳۵/۷ میلی‌متر به‌عنوان قطر استاندارد و دیگری قطر غیراستاندارد بودند. نفوذ مخروط‌ها با سرعت ۱ میلی‌متر بر ثانیه انجام شد و سپس با استفاده از رابطه (۲)، ارائه شده توسط تانی و کریگ (۱۹۹۵) [۲۳]، نتایج برای سرعت استاندارد نفوذ مخروط CPT یعنی ۲۰ میلی‌متر بر ثانیه اصلاح شد:

$$q_c = q_c^* \left[1 + 0.1 \times \log\left(\frac{v}{20}\right) \right] \quad (2)$$

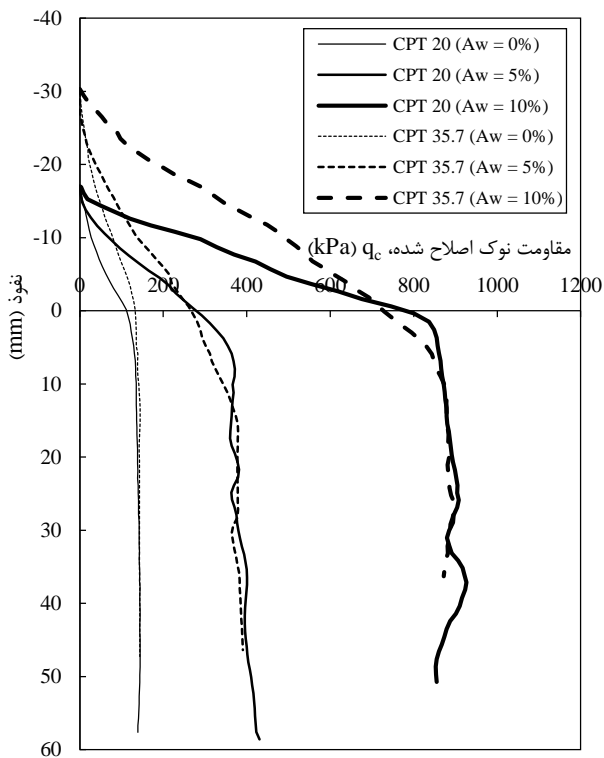


شکل ۶- پی اسپادکن و مخروط‌های CPT مورد استفاده در پژوهش

جدول ۲- نتایج آزمایش‌های تک‌محوری بر روی نمونه‌های با درصد سیمان متفاوت

E_{50} (MPa)	E_f (MPa)	ε_{50} (%)	ε_f (%)	$c_u = q_u/2$ (kPa)	q_u (kPa)	A_w (%)
۰/۴	۰/۲	۲/۹۵	۱۰/۶	۱۲/۸	۲۵/۶	۰
۲/۵	۲/۴	۱/۴	۲/۹	۳۴/۹	۶۹/۸	۵
۸/۲	۹/۷	۱	۱/۷	۸۳/۲	۱۶۶/۴	۱۰

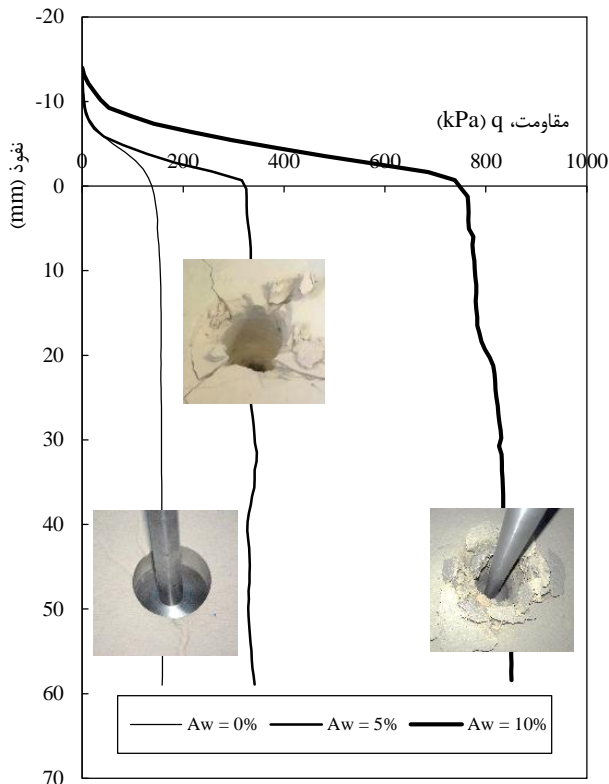
شد. هم‌چنین این کاهش با تقریب مناسبی به صورت خطی است. این نتیجه‌گیری با نتایج تحقیقات مختلفی [۲۴-۲۶] هم‌خوانی دارد.



شکل ۷- مقاومت اصلاح شده نوک مخروط‌های CPT مورد آزمایش در سرعت استاندارد ۲۰ میلی‌متر بر ثانیه

در رابطه (۲)، q_c ، مقاومت نوک مخروط در سرعت استاندارد ۲۰ میلی‌متر بر ثانیه و q_c^* ، مقاومت نوک مخروط در سرعت ۱ میلی‌متر بر ثانیه است. هم‌چنین ۷، سرعت نفوذ مخروط و برابر ۱ میلی‌متر بر ثانیه است. بر همین اساس مطابق رابطه ۲، نتایج نفوذ مخروط با سرعت ۱ میلی‌متر بر ثانیه، در عدد $0/۸۷$ ضرب شدند. شکل ۷ مقاومت اصلاح‌شده نوک مخروط‌های CPT مورد آزمایش را در سرعت استاندارد و در خاک‌های متفاوت نشان می‌دهد.

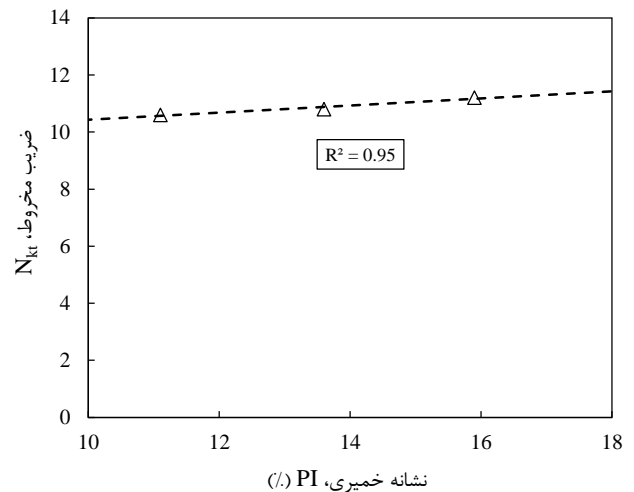
نتایج به‌دست آمده از شکل ۷ نشان می‌دهد که افزودن سیمان باعث افزایش مقاومت نوک مخروط می‌شود. هم‌چنین تطابق خوبی بین نتایج مخروط‌های با قطرهای متفاوت وجود دارد. به عبارتی قطر مخروط، تاثیر چندانی بر نتایج ندارد و در کارهای آزمایشگاهی می‌توان از مخروط‌های با قطر کوچک‌تر در مدل‌سازی استفاده کرد. ضرایب مخروط با استفاده از مقاومت اصلاح‌شده نوک مخروط (q_c) و مقاومت برشی زهکشی‌نشده (c_u) به‌دست آمده از آزمایش‌های تک‌محوری، تعیین شدند. در محاسبه مقاومت نوک مخروط با توجه به ثابت شدن مقاومت نوک از یک عمق مشخص، از میانگین نتایج مقاومت نوک از همان عمق به بعد استفاده شد. شکل ۸ ضرایب مخروط را برای خاک‌های با نشانه خمیری متفاوت نشان می‌دهد. همان‌طور که در شکل ۸ مشخص است، کاهش نشانه خمیری ناشی از افزودن سیمان به خاک رس، باعث کاهش ضریب مخروط خواهد



شکل ۹- ظرفیت باربری پی اسپادکن با قطر ۶۰ میلی‌متر در طی نفوذی برابر قطر اسپادکن در خاک‌های با درصد سیمان متفاوت

در شکل ۹ همچنین بر روی هر منحنی، حفره ایجاد شده در اثر نفوذ اسپادکن برای خاک رس با درصد‌های سیمان متفاوت نشان داده شده است. به جز حالت نفوذ اسپادکن در رس بدون سیمان، در سایر حالات، رخ دادن پدیده جریان برگشتی خاک به صورت واضح مشاهده نشد. عمق حفره ایجاد شده یا به عبارتی محل وقوع پدیده جریان برگشتی خاک در حالت بدون سیمان در حدود ۹ سانتی‌متر از سطح نمونه خاک بود که ۱/۵۰ برابر قطر اسپادکن و پائین‌تر از عمق نفوذی است که نتایج آن در شکل ۹ آمده است.

ضریب ظرفیت باربری پی در خاک رسی طبق رابطه ظرفیت باربری ترزاقی، از تقسیم مقادیر ظرفیت باربری در هر عمق، بر مقدار مقاومت برشی زهکشی نشده خاک ($N_c = q_u / c_u$) به دست می‌آید. به صورت نظری، این ضریب برای پی نواری مستقر بر بستر رسی مقدار $(2 + \pi)$ است. اسکمپتون (۱۹۵۱) نشان داد که این مقدار برای پی‌های مربع و دایره‌ای در عمق‌های زیاد ($d/D > 4$) به حدود ۹ می‌رسد [۲۷]. بنابراین به صورت عمومی، مقادیر ضرایب ظرفیت باربری نفوذ پی اسپادکن در خاک رسی، در مقایسه با پی‌های سطحی مستقر بر بستر رسی بیشتر است. این موضوع در پژوهش‌های مختلفی نیز آمده است [۲۸ و ۲۹]. در این پژوهش نیز ضرایب ظرفیت باربری، مقادیر بیشتری را نشان دادند. با این حال افزودن سیمان به خاک رس، مقدار ضریب ظرفیت باربری را کاهش می‌دهد. به گونه‌ای که با افزودن سیمان، مقدار ضریب ظرفیت باربری



شکل ۸- ضرایب مخروط CPT بر اساس نشانه خمیری خاک

۲-۳- نفوذ اسپادکن در خاک تک‌لایه

مانند مخروط‌های CPT، نفوذ اسپادکن نیز با استفاده از میله فولادی متصل به جک هیدرولیکی انجام شد و نیروها و تغییر مکان‌ها با استفاده از نیروسنج و جابه‌جایی‌سنج اندازه‌گیری شدند. شکل ۹ نتایج ظرفیت باربری پی اسپادکن دارای قطر ۶۰ میلی‌متر را طی نفوذ در خاک‌های با درصد سیمان متفاوت نشان می‌دهد. نتایج نشان می‌دهد که ظرفیت باربری نهایی اسپادکن در نمونه‌های رسی، با افزودن سیمان به نمونه‌ها و یا به عبارتی با افزایش مقاومت برشی زهکشی نشده آن‌ها افزایش می‌یابد.

به دلیل مخروطی بودن مخروط‌های CPT و پی اسپادکن، از لحظه نفوذ نوک مخروط کوچک انتهایی، تا زمانی که سطح مقطع برخورد مخروط در تماس با خاک، به حداکثر خود می‌رسد؛ افزایش ظرفیت باربری مشاهده می‌شود. به همین دلیل منحنی‌های شکل‌های ۷ و ۹ از ناحیه منفی شروع شده‌اند و در نقطه‌ای که عمق نفوذ برابر صفر است، سطح مقطع برخورد مخروط به حداکثر خود در نفوذ در خاک رسیده است. علاوه بر این، در شکل ۹ به دلیل گسیختگی سطحی خاک زیر اسپادکن در عمق نفوذ کم، افزایش ظرفیت باربری تا عمقی پایین‌تر از تراز صفر، در خاک بدون سیمان نیز مشاهده می‌شود. این موضوع در خاک‌های دارای سیمان به دلیل تردتر شدن خاک، در حین نفوذ قسمت مخروطی شکل رخ داده و تقریباً از تراز صفر به ثبات ظرفیت باربری، ناشی از فاز گسیختگی عمیق خواهد رسید. این تردتر شدن خاک بر منحنی بار- نفوذ مخروط‌های CPT (شکل ۷) به دلیل زاویه زیاد نوک مخروط، ابعاد کوچک‌تر نسبت به اسپادکن و تفاوت در مکانیزم نفوذ، تاثیر کمتری دارد. در نهایت نیز به دلیل آن‌که معمولاً در تفسیر نتایج از میانگین مقادیر q_c یا q در ناحیه‌ای که مقاومت تقریباً ثابت شده است استفاده می‌شود؛ نتایج فوق قابل قبول و قابل استناد خواهند بود.

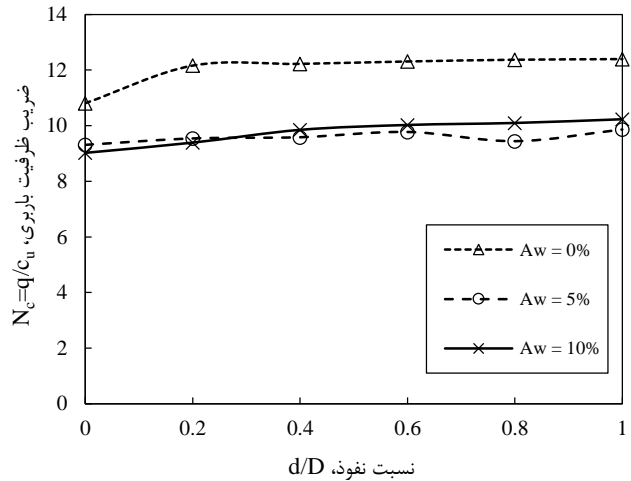
حدود اتربرگ خاک دارای سیمان ایجاد نمی‌کند، در این‌جا نیز چنین اتفاقی رخ می‌دهد.

در جدول ۳ نتایج ضریب ظرفیت باربری اسپادکن در این پژوهش با سایر پژوهش‌ها مقایسه شده است. تمامی نتایج برای اسپادکن‌های نرم بوده و نتایج برای انواع مدل‌سازی فیزیکی و عددی آمده است. علاوه بر نتایج مدل‌سازی‌های مختلف، ضریب ظرفیت باربری روش استاندارد SNAME نیز آورده شده است. از میان روش‌های ذکر شده نتایج حاصل از این پژوهش به نتایج مدل‌سازی سانتریفیوژ حسین و همکاران (۲۰۰۳) نزدیک‌تر است. با این تفاوت که افزودن سیمان به رس همزمان با افزودن مقاومت برشی زهکشی نشده رس، باعث کاهش در ضریب ظرفیت باربری آن می‌شود که بایستی این موضوع در مدل‌سازی چندلایه با این روش مدنظر قرار گیرد. هم‌چنین ضریب ظرفیت باربری حاصل از استاندارد SNAME را می‌توان به دلیل درنظر گرفتن ضرایب اطمینان، محافظه‌کارانه دانست. به جز پژوهش هولسی و مارتین (۲۰۰۳) سایر نتایج حاصل از مدل‌سازی‌های عددی نزدیک به هم و در حدود ۹ هستند. لازم به ذکر است که در صورت استفاده از اسپادکن زبر به جای نرم، نتایج حاصل از تحلیل‌های مختلف، تنها ۴ تا ۱۰ درصد تفاوت را نشان می‌دهد [۲۹].

۴- نتیجه‌گیری

در این پژوهش نفوذ پی اسپادکن در خاک رس تک‌لایه با استفاده از مدل‌سازی فیزیکی ۱g مورد تحلیل و بررسی قرار گرفت. برای افزایش مقاومت زهکشی نشده خاک رس به آن مقادیری سیمان پرتلند افزوده شد. علاوه بر اسپادکن مدل، مخروط‌های CPT نیز جهت تخمین مقاومت برشی زهکشی نشده خاک مورد استفاده قرار گرفتند. نتایج حاصل از این پژوهش نشان داد که:

میانگین، برای نفوذ اسپادکن در خاک رس تا عمقی برابر قطر اسپادکن، از ۱۲/۰۵ برای رس بدون سیمان به ۹/۵۸ و ۹/۷۷ برای خاک‌های با ۵ و ۱۰ درصد وزنی سیمان خواهد رسید. این موضوع در شکل ۱۰ نشان داده شده است. شکل ۱۰ ضرایب ظرفیت باربری را برای نفوذ اسپادکن در خاک رس تا عمقی برابر قطر اسپادکن، در خاک‌های با درصد سیمان متفاوت نشان می‌دهد.



شکل ۱۰- ضرایب ظرفیت باربری پی اسپادکن در اعماق مختلف برای خاک‌های با درصد سیمان متفاوت

همان‌طور که در شکل ۱۰ مشخص است؛ با این‌که افزودن سیمان باعث کاهش ضریب ظرفیت باربری خاک می‌شود اما این کاهش، با افزایش بیشتر مقدار سیمان، تغییر چشم‌گیری نمی‌کند. شاید بتوان مهم‌ترین عامل موثر بر ضریب ظرفیت باربری را در خاک رس حدود اتربرگ خاک دانست. همان‌طور که افزودن سیمان باعث تغییر در حدود اتربرگ خاک می‌شود، اما افزایش بیشتر آن، تغییر زیادی در

جدول ۳- ضریب ظرفیت باربری نفوذ اسپادکن نرم در خاک رسی تک‌لایه در عمقی برابر با قطر اسپادکن

مقدار N_c در عمق $d/D=1$		
مقدار	نوع مدل	روش
۹	مدل‌سازی عددی	ونگ و کارتر (۲۰۰۲) [۳۰]
۷~۷/۵۰	مدل‌سازی عددی	هولسی و مارتین (۲۰۰۳) [۳۱]
۱۲	مدل‌سازی سانتریفیوژ (۱۰۰g)	
۱۰	مدل‌سازی سانتریفیوژ (۲۰g)	حسین و همکاران (۲۰۰۳) [۲۸]
۱۰~۱۱	مدل‌سازی عددی	
۷~۸		استاندارد SNAME (2008) [۱۱]
۸/۹۵	مدل‌سازی عددی	حسین و رندولف (۲۰۰۹) [۲۹]
۱۲/۴۰	مدل‌سازی آزمایشگاهی (۱g)، درصد سیمان برابر صفر	
۹/۸۶	مدل‌سازی آزمایشگاهی (۱g)، درصد سیمان برابر ۵	پژوهش حاضر
۱۰/۲۳	مدل‌سازی آزمایشگاهی (۱g)، درصد سیمان برابر ۱۰	

- 5- Soil Backflow
- 6- Non- Plastic
- 7- O- Ring

۵- مراجع

- 1- McClelland, B., Young, A.G., and Remmes, B.D., (1982), *Avoiding Jackup Rig Foundation Failures*, *Journal of Southeast Asian Geotechnical Society*, Vol. 13, p. 151-188.
- 2- Young, A.G., Remmes, B.D., and Meyer, B.J., (1984), *Foundation Performance of Offshore Jackup Drilling Rigs*, *Journal of Geotechnical Engineering*, Vol. 110(7), p. 841-859.
- 3- Vazquez, J.H., Michel, R.P., Alford, J.H., Quah, M., and Foo, K.S., (2005), *Jackup Units. A Technical Primer for the Offshore Industry Professional*, www.bbengr.com and www.keppelfels.com.sg.
- 4- Poulos, H.G., (1988), *Marine Geotechnics*, Unwin Hymen, London.
- 5- MSL, (2002a), *Assessment of the Effect of Wave-in-Deck Loads on A Typical Jack-Up*, Offshore Technology Report 2001/034, UK Health and Safety Executive, HSE Books.
- 6- MSL, (2002b), *Interpretation of Full-Scale Monitoring Data From A Jack-Up*, Offshore Technology Report 2001/035, UK Health and Safety Executive, HSE Books.
- 7- Nelson, K., Smith, P., Hoyle, M., Stoner, R., and Yersavel, T., (2000), *Jack-Up Response Measurements and the Underprediction of Spud-Can Fixity by SNAME 5-5A*, Offshore Technology Conference, Paper OTC 12074.
- 8- Cassidy, M.J., Houlsby, G.T., Hoyle, M., and Marcom, M.R., (2002a), *Determining Appropriate Stiffness Levels for Spudcan Foundations Using Jack-Up Case Records*, International Conference on Offshore Mechanics and Arctic Engineering, Oslo, Norway.
- 9- Cassidy, M.J., Taylor, P.H., Taylor R.E., and Houlsby, G.T., (2002b), *Evaluation of Long-Term Extreme Response Statistics of Jack-Up Platforms*, *Ocean Engineering*, Vol. 29, p. 1603-1631.
- 10- Morandi, A.C., Karunakaran, D., Dixon, A.T., and Baerheim, M., (1998), *Comparison of Full-Scale Measurements and Time Domain Irregular Sea Analysis for A Large Deepwater Jack-Up*, Offshore Technology Conference, Paper OTC 8828.
- 11- SNAME, (2008), *Guidelines for Site-Specific Assessment of Mobile jackup Units*, Rev. 3, Technical and Research Bulletin 5-5A, Society of Naval Architects and Marine Engineers.
- 12- Reardon, M.J., (1986), *Review of the Geotechnical Aspects of Jack-Up Unit Operations*, *Ground Engineering*, Vol. 19(7), p. 21-26.
- 13- Zhang, A., Duan, M., Li, H., Zhao, J., and Wang, J., (2012), *Prediction Methods of Spudcan Penetration*

۱- افزودن سیمان به خاک رس باعث افزایش مقاومت برشی زهکشی نشده آن می شود و می توان از خاک رس اصلاح شده با سیمان به عنوان لایه با مقاومت زیاد در مدل سازی نفوذ اسپادکن در رس استفاده کرد.

۲- مدل سازی آزمایشگاهی نفوذ اسپادکن در رس نیاز به تمهیداتی دارد که مهم ترین آن ها توجه به شرایط زهکشی نمونه ها در حین تحکیم و بارگذاری و جلوگیری از اثرات جداره و کف لوله آزمایش است.

۳- استفاده از مخروط های CPT به شرط تعیین دقیق ضرایب مخروط در خاک های مختلف می تواند در تخمین مقاومت برشی زهکشی نشده لایه های رس کاربرد داشته باشد. این شیوه جایگزین مطمئن، ساده و کم هزینه تری نسبت به آزمایش های برش مستقیم، تک محوری و سه محوری خواهد بود. ضمن این که نتایج حاصل در عمق پیوسته هستند.

۴- نتایج نفوذ مخروط های CPT با قطرهای مختلف نشان داد که تطابق خوبی بین نتایج مقاومت نوک مخروط های با قطر متفاوت وجود دارد. این نتیجه گیری نشان می دهد که در مدل های آزمایشگاهی می توان با اطمینان مناسب از مخروط های با قطر کوچک تر استفاده کرد.

۵- مقادیر ضرایب ظرفیت باربری نفوذ پی اسپادکن در خاک رسی عموماً بیشتر از پی های سطحی مستقر بر بستر رسی است. با این حال افزودن سیمان به خاک رس، مقدار ضریب ظرفیت باربری را کاهش می دهد. به گونه ای که با افزودن سیمان، مقدار ضریب ظرفیت باربری میانگین، برای نفوذ اسپادکن در خاک رس تا عمقی برابر با قطر اسپادکن، از ۱۲/۰۵ برای رس بدون سیمان به ۹/۵۸ و ۹/۷۷ برای خاک های با ۵ و ۱۰ درصد وزنی سیمان خواهد رسید.

۶- مقایسه نتایج حاصل از این پژوهش و سایر پژوهش ها نشان داد که نتایج پژوهش حاضر به نتایج مدل سازی سانتریفیوژ حسین و همکاران (۲۰۰۳) نزدیک تر است. با این تفاوت که کاهش در ضرایب ظرفیت باربری پی اسپادکن با افزودن سیمان به رس بایستی، در مدل سازی چندلایه با این روش مدنظر قرار گیرد.

۷- ضریب ظرفیت باربری حاصل از استاندارد SNAME را می توان به دلیل در نظر گرفتن ضرایب اطمینان، محافظه کارانه دانست. به جز نتایج مدل سازی عددی هولسی و مارتین (۲۰۰۳)، سایر نتایج مدل سازی های عددی نزدیک به هم و در حدود ۹ هستند.

کلید واژگان

- 1- Jack- Up
- 2- Spudcan
- 3- Preloading
- 4- Society of Naval Architects and Marine Engineers

- on Clay, International Offshore and Polar Engineering Conference, Stavanger, Norway.
- 23- Tani, K., and Craig, W.H., (1995), *Development of Centrifuge Cone Penetration Test to Evaluate the Undrained Shear Strength Profile of a Model Clay Bed*, Soils and Foundations, Vol. 35(2), p. 37-47.
- 24- Stark, T.D., and Delshaw J.E., (1990), *Correlations of Unconsolidated- Undrained Triaxial Test and Cone Penetration Tests*, Transportation Research Record Proceeding, Vol. 1278, p. 96-102.
- 25- Otoko, G.R., Manuel, I.F., Igwagu, M., and Edoh, C., (2016), *Empirical Cone Factor for Estimation of Undrained Shear Strength*, Electronic Journal of Geotechnical Engineering, Vol. 21(18), p. 6069- 6076, ejge.com.
- 26- Nwobasi, P.A., Egba, E.I., (2013), *Estimation of Undrained Shear Strength of Soil using Cone Penetration Test*, International Journal of Scientific and Engineering Research, Vol. 4(9), p. 409-420.
- 27- Skempton, A.W., (1951), *The Bearing Capacity of Clays*, Building Research Congress, London, Vol. 1(3), p. 180-189.
- 28- Hossain, M.S., Hu, Y., and Randolph, M.F., (2003), *Spudcan Foundation Penetration into Uniform Clay*, International Offshore and Polar Engineering Conference, Honolulu, Hawaii, USA.
- 29- Hossain, M.S., and Randolph, M.F., (2009), *New mechanism-based design approach for spudcan foundations on single layer clay*, Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, Vol. 135(9), p. 1264-1274.
- 30- Wang, C.X., and Carter, J.P., (2002), *Deep Penetration of Strip and Circular Footings into Layered Clays*, International Journal of Geomechanics, Vol. 22, p. 205-232.
- 31- Houlsby, G.T., and Martin, C.M., (2003), *Undrained Bearing Capacity Factors for Conical Footings on Clay*, Geotechnique, Vol. 535, p.513-520.
- for Jack-Up Units*, China Ocean Engineering, Vol. 26(4), p. 591-602.
- 14- Hossain, M.S., Hu, Y., Randolph, M.F., and White, D.J., (2005), *Limiting Cavity Depth for Spudcan Foundations Penetrating Clay*, Geotechnique, Vol. 55(9), p. 679-690.
- 15- Hossain, M.S., Randolph, M.F., Hu, Y., and White, D.J., (2006), *Cavity stability and bearing capacity of spudcan foundations on clay*, Proceeding of Offshore Technology Conference, Houston, OTC 17770.
- 16- Chew, S.H., Kamruzzaman, A.H.M., and Lee, F.H., (2004), *Physicochemical and Engineering Behavior of Cement Treated Clays*, Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, Vol. 130, p.696-706.
- 17- Sarkar, G., Islam, M.R., Alamgir, M., and Rokonzaman, M., (2012), *Study on the Geotechnical Properties of Cement Based Composite Fine-Grained Soil*, International Journal of Advanced Structures and Geotechnical Engineering, vol. 1(2), p. 2319-5347.
- 18- Bayat, M., Asgari, M.R., and Mousivand, M., (2013), *Effects of Cement and Lime Treatment on Geotechnical Properties of a Low Plasticity Clay*, International Conference on Civil Engineering Architecture and Urban Sustainable Development, Tabriz, Iran.
- 19- Finnie, I.M.S., and Randolph, M.F., (1994), *Punch-Through and Liquefaction Induced Failure of Shallow Foundations on Calcareous Sediments*, International Conference on the Behaviour of Offshore Structures, Massachusetts, USA, Vol. 1, p. 217-230.
- 20- Tjahyono, S., (2011), *Experimental and Numerical Modelling of Spudcan Penetration in Stiff Clay Overlying Soft Clay*, PhD Thesis, National University of Singapore.
- 21- Hu, P., (2015), *Predicting Punch-Through Failure of a Spudcan on Sand Overlying Clay*, PhD thesis, University of Western Australia.
- 22- Vlahos, G., Martin, C.M., Cassidy, M.J., (2001), *Experimental Investigation of a Model Jack-Up Unit*