

مقاله پژوهشی

DOR: 20.1001.1.24767131.1401.8.2.6.6

درصد همانندی: ۲۴٪

بررسی تأثیر پارامترهای هندسی اسپادکن بر ظرفیت باربری و پدیده گسیختگی در بستر دریا

کمال علیخانی^۱، مرتضی بختیاری^{۲*}، اعتماد الدین رابعی غلامی^۳

^۱ کارشناسی ارشد مهندسی سواحل، بنادر و سازه‌های دریایی دانشگاه علوم و فنون دریایی خرمشهر، خرمشهر، ایران

kamal.alikhani@yahoo.com

bakhtiari@kmsu.ac.ir

^{۲*} نویسنده مسئول، دانشیار، دانشکده مهندسی دریا، دانشگاه علوم و فنون دریایی خرمشهر، خرمشهر، ایران

rabee@kmsu.ac.ir

^۳ مربی، دانشکده مهندسی دریا، دانشگاه علوم و فنون دریایی خرمشهر، خرمشهر، ایران

تاریخ پذیرش: ۱۴۰۲/۱۰/۲۴

تاریخ دریافت: ۱۴۰۲/۰۹/۱۶

چکیده

در تحقیق حاضر، اقدام به مطالعه عددی تأثیر پارامترهای هندسی اسپادکن سکوها‌های دریایی ظرفیت باربری و پدیده گسیختگی پانچ اسپادکن در خاک، با سیستم دو لایه‌ای ماسه بر رس، با روش کوپل لاگرانژی-اولیری شده است. این تحقیق با استفاده از نرم‌افزار آباکوس مدل‌سازی شده است و سناریوهای مورد بررسی بر اساس مطالعه سایر تحقیقات گذشته و با در نظر گرفتن کمبودهای این تحقیقات در نظر گرفته شده است. در این تحقیق پارامترهای هندسی اسپادکن شامل تأثیر قطر اسپادکن، زاویه نوک اسپادکن و ضخامت بزرگ‌ترین سطح مقطع اسپادکن در نظر گرفته شده است. نتایج به دست آمده با نتایج سایر تحقیقات گذشته مقایسه شد تا توانایی روش کوپل لاگرانژی-اولیری در تخمین ظرفیت باربری و پدیده گسیختگی پانچ اسپادکن ارزیابی شود. نتایج حاصل از تحقیق نشان می‌دهد، پارامترهای هندسی مورد نظر شامل، ضخامت لایه ماسه‌ای و قطر اسپادکن نسبت مستقیمی با مقاومت باربری پی اسپادکن دارند. به طوری که با افزایش هر کدام از این خصوصیات، مقاومت باربری نیز افزایش می‌یابد. همچنین نتایج نشان می‌دهد که پارامتر ضخامت بزرگ‌ترین سطح مقطع اسپادکن تأثیری در ظرفیت باربری و پدیده گسیختگی در خاک ندارد. همچنین نتایج به دست آمده از تحقیق حاضر نشان می‌دهد که مدل‌های تجربی لی و همکاران^۱ ۲۰۱۳ و هو و همکاران^۲ ۲۰۱۴ نتایج را کمتر از مدل کوپل لاگرانژی-اولیری برآورد نموده است.

واژه‌های کلیدی: مطالعه عددی، نرم‌افزار آباکوس، اسپادکن، پارامترهای هندسی، روش کوپل لاگرانژی-اولیری

۱. مقدمه

کشور ایران با توجه به منابع خدادادی و طبیعی جایگاهی ویژه و راهبردی دارد و از آن مهم‌تر در بیضی راهبردی جهانی قرار دارد و رتبه دوم جهانی دارنده گاز و رتبه چهارم جهانی نفت دارد. در این راستا صنایع نفت، گاز و پتروشیمی و سایر صنایع وابسته به حامل‌های انرژی‌زا، اولویت راهبردی دارند و سرمایه‌گذاری در آنها در اولویت است و ساخت و تولید تجهیزات و قطعات اصلی و یدکی آنها ارزش افزوده مضاعف دارد و ضامن تداوم تولید ثروت است. سکوهای جک آب به‌طور گسترده در بخش‌های نفت و گاز دریایی استفاده می‌شود که هر کدام بر یک پایه مخروطی با قطر بزرگ به نام اسپادکن ساخته شده‌اند [۳].

دکل‌های جک آب فراساحلی معمولاً روی پایه‌های مخروطی با قطر بزرگ «اسپادکن» ساخته می‌شوند که اغلب با استفاده از روش‌های تحلیلی سنتی برای پایه‌های کم‌عمق طراحی می‌شوند. تاکنون مطالعات زیادی در زمینه جنبه‌های مختلف کارکرد اسپادکن انجام شده است. ته و همکاران^۳ (۲۰۰۸)، آزمایش‌های نفوذ اسپادکن روی خاک دولایه‌ای (ماسه بر روی رس) را انجام دادند. در این آزمایش برای افزایش آگاهی نسبت به فرایند نفوذ، خلاصه مشاهدات از یک برنامه آزمایشگاهی توسعه‌یافته برای مطالعه الگوهای جابه‌جایی خاک در نزدیکی و حول اسپادکن در حال نفوذ مداوم در خاک، ارائه شد. همچنین در این آزمایش از دو اندازه مختلف برای قطر اسپادکن (D) و سه نوع آرایش لایه‌بندی خاک دولایه، استفاده شد. نتایج به‌دست آمده نشان می‌دهد، افزایش مقاومت باربری با افزایش ضخامت لایه ماسه‌ای فوقانی و مقاومت برشی لایه رسی زیرین و کاهش مقاومت باربری با افزایش قطر اسپادکن، رابطه مستقیم دارد [۱۳].

گیو و همکاران^۴ (۲۰۱۰)، پدیده نفوذ اسپادکن در سه نوع خاک را با استفاده از تکنیک CEL موجود در نرم‌افزار آباکوس مدل‌سازی نمودند. آنها سه نوع خاک شامل خاک رس بستر دریایی تک لایه، خاک ماسه‌ای تک لایه و خاک لایه‌بندی شده ماسه روی رس را در نظر گرفتند. در این تحقیق انواع تغییر شکل و سرعت جابه‌جایی ذرات خاک در

اعماق مختلف برای حالت‌های مختلف لایه‌بندی خاک مشاهده شد. نتایج مقاومت باربری در مقابل عمق نفوذ نشان دادند که گسیختگی پانچ در خاک‌های لایه‌ای ماسه روی رس، اتفاق می‌افتد و برای خاک‌های تک لایه رسی و ماسه‌ای رخ نمی‌دهد [۱۱].

گیو و هنکه^۵ (۲۰۱۰)، پدیده نفوذ اسپادکن را با استفاده از تکنیک CEL موجود در نرم‌افزار آباکوس مدل‌سازی نمودند. آنها نتایج حاصله را با روابط تحلیلی و داده‌های آزمایشگاهی مورد اعتبارسنجی قرار دادند. سپس مطالعات پارامتریک را برای بررسی کم و کیف تأثیر ضخامت لایه ماسه‌ای بالایی، زاویه اصطکاک ماسه و مقدار مقاومت برشی خاک رس بستر زیرین، بر روی ظرفیت باربری اسپادکن به انجام رساندند، نتایج به‌دست آمده نشان داد که افزایش مقدار هر کدام از پارامترهای مورد اشاره باعث افزایش مقاومت باربری می‌شود. در نهایت بر اساس مطالعات عددی، ایده‌ای برای گسترش راه‌کار مفهومی برای اندازه‌گیری مقاومت باربری اوج در محل، برای کنترل فرایند نصب جک آب پیشنهاد داده شد [۱۰].

گانو و همکاران^۶ در سال ۲۰۱۲ با تکنیک RITSS و نرم‌افزار AFENA نفوذ پیوسته پی اسپادکن در خاک لایه‌بندی شده در دولایه به‌صورت لایه رسی قوی فوقانی بر روی لایه رسی ضعیف زیرین را شبیه‌سازی نمودند. نتایج نشان داد با افزایش ضخامت لایه بالایی، ضریب باربری اوج و پتانسیل گسیختگی پانچ افزایش می‌یابد [۴].

ژنگ و همکاران^۷ (۲۰۱۵)، یک روش طراحی منطقی و گویا برای بررسی نفوذ اسپادکن در خاک رس بستر دریایی غیریکنواخت به‌صورت خاک رس بستر دریا نرمی که یک لایه رس سفت در بین آن قرار گرفته باشد (سیستم لایه‌بندی خاک به‌صورت سه لایه به ترتیب، رس نرم - رس سفت - رس نرم است)، ارائه نمودند. این روش با استفاده از یک مجموعه تحلیل‌های اجزاء محدود تغییر شکل‌های بزرگ که با نرم‌افزار آباکوس انجام گرفت، منتج شد. همچنین روش "bottom-up" که در دستورالعمل ISO standard 19905-1 پیشنهاد شده، برای مقایسه با روش ارائه شده انتخاب شد. نتایج پیش‌بینی شده با این دو روش با داده‌های آزمایشگاهی

تحقیقات دیگر وجود ندارد، از روش کوپل لاگرانژی-اوپلری (CEL) استفاده شده است.

۲. مواد و روش‌ها

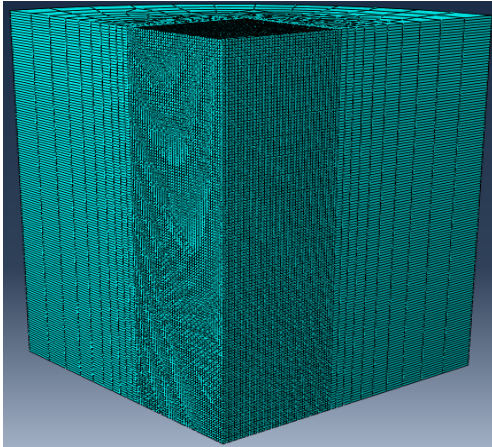
۲-۱. مدل‌سازی عددی

امروزه روش‌های عددی می‌توانند ابزار خوبی برای تخمین ظرفیت باربری پی اسپادکن باشند ولی شبیه‌سازی فرایند نفوذ عمیق یک پی اسپادکن در بستر دریا به دلیل مشکل همگرایی عددی ناشی از (۱) تغییر شکل مش‌ها به دلیل تغییر شکل شدید؛ (۲) مصالح غیرخطی به دلیل رفتار پیچیده خاک و (۳) شرایط مرزی غیرخطی از جمله تماس اصطکاکی، احتیاج به استفاده از تکنیک‌هایی دارد که بتواند بر این مشکلات غلبه کند. بدین منظور در این تحقیق، شبیه‌سازی عددی به وسیله روش^۹ CEL انجام گرفته است. در این روش خاک به‌عنوان بخش اوپلری و اسپادکن هم بخش لاگرانژی تکنیک CEL در نظر گرفته شده است. هندسه خاک در یک دامنه اوپلری سه‌بعدی با المان‌هایی شش‌وجهی خطی از نوع EC3D8R مدل‌سازی شد. هر المان اوپلری ۸ گره دارد و امکان اینکه چند ماده اوپلری هم‌زمان در آن وجود داشته باشد را می‌دهد. هندسه اسپادکن به‌عنوان جسمی صلب مدل شده و هندسه آن مشابه اسپادکن جک‌آپ " Marathon LeTourneau " Design, Class 82-SDC در نظر گرفته شده است [۱]. هندسه کل مدل در شکل (۱) و هندسه اسپادکن در شکل (۲) نشان داده شده است. الگوی مش‌بندی مدل عددی حاضر به صورتی است که در یک فاصله افقی نزدیک به محدوده نفوذ که تغییرات بزرگ‌تر و مهم‌تر است، اندازه سلول‌ها کوچک و ثابت و از آن فاصله تا انتهای مدل اندازه سلول‌ها بزرگ‌تر می‌شود. مدل شبکه‌بندی شده در شکل (۳) نشان داده شده است. به منظور مدل‌سازی رفتار خاک‌های ماسه‌ای و رسی از مدل موهر-کلمب^{۱۰} استفاده شد. مدل‌سازی در شرایط آب آزاد به وسیله تنش‌های مؤثر انجام گرفت. همچنین خاک ماسه‌ای در شرایط زهکشی شده و خاک رس بستر دریای زهکشی نشده در نظر گرفته شد. تنش‌های ژئواستاتیکی^{۱۱} ناشی از وزن مخصوص غوطه‌وری^{۱۱} خاک قبل از نفوذ

مقایسه شد، به طوری که مقایسه‌ها نشان داد که برآوردهای صورت گرفته با روش ارائه شده در این تحقیق مطابقت خوبی با پروفیل " بار - نفوذ " اندازه‌گیری شده داشت. اما روش " bottom-up " با کمتر برآورد کردن ظرفیت باربری در طی گسیختگی پانچ (در لایه رس سفت) تخمین‌هایی با دقت کمتری برای پروفیل مقاومت نفوذ ارائه کرد [۶ و ۱۶] و و همکاران^{۱۲} (۲۰۱۹)، پتانسیل یک فرمول SPH بهبودیافته برای برهمکنش‌های ترکیبی خاک-آب-ساختار را بررسی کردند. نتیجه روش پیشنهادی برای ردیابی تغییرات فشار آب منفذی اضافی در طول شبیه‌سازی تغییر شکل‌های بزرگ قابل‌اعتماد است. در واقع، شبیه‌سازی‌های SPH از تثبیت و نفوذ اسپادکان تا حد زیادی با نتایج تست اوپلری FEM و سانتیفریوژ مطابقت دارد [۱۵] طلوعیان و همکاران (۲۰۲۳)، در تحقیقی به مطالعه حداکثر عمق نفوذ پایه تحت پیش بار موجود با ترکیبی از تکنیک‌های تحلیلی، مدل‌سازی مقارن محوری دوبعدی و روش‌های المان محدود سه‌بعدی (FEM) با استفاده از تکنیک‌های لاگرانژی-اولری دلخواه کرنش بزرگ (ALE) پرداختند. نفوذ اسپادکن بر اساس شبیه‌سازی FEM پروفیل‌های خاک CPT، مبنای مقایسه با نتایج دستورالعمل‌های انجمن معماران و مهندسان دریایی (SNAME) را تشکیل می‌دهد. نتایج برای تأثیر پایه‌های نافذ بر رفتار پایه‌های همسایه ارائه شده‌اند که مطابقت خوبی با روش‌های پیش‌بینی مرسوم نشان می‌دهد [۱۴].

اخیراً، استفاده از تحلیل المان محدود تغییر شکل بزرگ (LDFFE) با توجه به انتخاب یک مدل سازنده مناسب برای توصیف شرایط مکان، امکان شبیه‌سازی پاسخ‌های نفوذ CPT را فراهم کرده است [۲].

بررسی‌ها نشان می‌دهد که اکثر تحقیقات صورت گرفته پیشین، به دنبال بهبود روش‌های موجود در پیش‌بینی نفوذ اسپادکن در شرایط قرارگیری لایه ماسه‌ای روی لایه رسی بوده است. در تحقیق حاضر نیز به منظور تکمیل تحقیقات قبل، گسیختگی پانچ ناشی از نفوذ پی اسپادکن در خاک لایه‌ای با در نظر گرفتن همه پارامترهای هندسی اسپادکن و پارامترهای خاک از جمله پارامتر گرادیان مقاومت برشی خاک که در

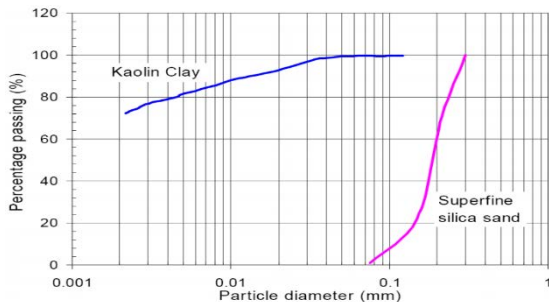


شکل ۳. الگوی مش بندی هندسه خاک

۲-۲. پارامترهای مورد مطالعه

۲-۲-۱. مشخصات خاک

ساختار خاک در این پژوهش به صورت خاک دولایه‌ای ماسه روی رس در نظر گرفته شده است که در بسیاری از مناطق فراساحلی که سازه‌های جکاپ مشغول به فعالیت بوده و هستند، رایج است. ماسه نوع سیلیکا به عنوان لایه بالایی ماسه‌ای و رس کائولین (شکل ۴)، به عنوان لایه پایینی رسی برای خاک لایه‌ای در تمام سناریوهای تحقیق در نظر گرفته شده است.



شکل ۴. نمودار توزیع اندازه ذرات خاک‌های ماسه‌ای و رسی

۲-۲-۲. خصوصیات ژئوتکنیکی خاک‌های ماسه‌ای و رسی

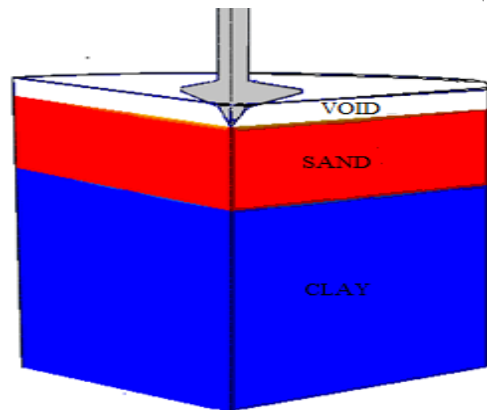
وزن مخصوص مؤثر خاک ماسه‌ای ($\gamma'_s = 9.96 \frac{\text{KN}}{\text{m}^3}$)، تراکم نسبی خاک ماسه‌ای ($I_D = 44\%$)، وزن مخصوص مؤثر خاک رس بستر دریایی ($\gamma'_c = 7.1 \frac{\text{KN}}{\text{m}^3}$)، مقاومت برشی خاک رس بستر

$$(S_u = (11.01 - 12.96) \frac{\text{KN}}{\text{m}^3}),$$

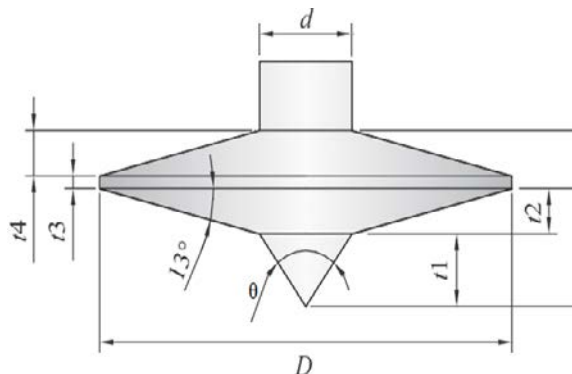
گرادیان مقاومت برشی خاک رس بستر

$$(\rho = (1.54 - 1.55) \frac{\text{Kpa}}{\text{m}})$$

اسپادکن اعمال می‌شود، به همراه یک ضریب فشار جانبی برابر ۱ برای لایه رسی و $(1 - \sin \phi')$ برای لایه ماسه‌ای. ضریب پواسون^{۱۳} (ν) را برای خاک رس بستر دریا برابر ۰/۴۹ و برای خاک ماسه‌ای برابر ۰/۳، مدول یانگ (E) خاک رس بستر دریا یک مقدار معمول برابر با $35 \cdot S_u$ ، به طوری که S_u مقاومت برشی خاک رس بستر دریا و ۲۵ مگاپاسکال برای خاک ماسه‌ای نظر گرفته شده است. اندرکنش بین مصالح اوپلری (خاک) و مصالح (لاگراژی) اسپادکن با الگوریتم "General Contact" تعریف می‌شود که از روش "penalty contact" استفاده می‌کند. بر اساس دستورالعمل SNAME (2008) ضریب زبری بین اسپادکن و خاک‌های ماسه‌ای رسی (α) به ترتیب برابر ۰/۵ و ۰/۴ در نظر گرفته می‌شود [۱۲]. تماس اندرکنشی بین مصالح مختلف اوپلری (لایه‌های ماسه و رس) تعریف نمی‌شود زیرا مصالح به طور مداوم تغییر شکل می‌یابند و لغزشی بین آنها وجود ندارد.



شکل ۱. هندسه کلی مدل نفوذ اسپادکن در خاک



شکل ۲. هندسه پی اسپادکن

۲-۲-۳. خصوصیات مهندسی خاک رس بستر دریا

حد روانی ($LL = 61\%$)، حد خمیری ($PL = 27\%$)، نشانه خمیری ($I_p = 34\%$)، چگالی مخصوص ($G_s = 2.6$)، زاویه اصطکاک داخلی ($\phi_{cv} = 23.5$)

۲-۲-۴. خصوصیات مهندسی خاک ماسه‌ای

چگالی مخصوص ($G_s = 2.65$)، میانگین اندازه ذره مؤثر ($d_{50} = 0.19mm$)، ضریب تخلخل بیشینه (maximum porosity coefficient) ($e_{max} = 0.7472$)، ضریب تخلخل کمینه ($e_{min} = 0.4485$)، زاویه اصطکاک حالت بحرانی ($\phi_{cv} = 31^\circ$)

۲-۲-۵. هندسه اسپادکن

در تحقیق حاضر از ۷ تیپ پی اسپادکن استفاده شده است که فرم کلی آن‌ها یکسان است، اما در ابعاد متفاوتند. در جدول (۱) و شکل (۲) جزئیات ابعادی آن‌ها ذکر شده است.

جدول ۱. ابعاد پی‌های اسپادکن مورداستفاده در سناریوها (تمام ابعاد در

واحد متر است)

نوع اسپادکن	t_1	t_2	t_3	t_4	D	d	θ
A	۱/۴۴	۰/۸۹	۰/۳	۰/۸۱	۱۰	۲/۹۲	76°
B	۱/۷۳	۱/۰۷	۰/۳	۱/۰۷	۱۲	۲/۹۲	76°
C	۲/۰۲	۱/۲۵	۰/۳	۱/۲۷	۱۴	۲/۹۲	76°
D	۱/۴۴	۰/۸۹	۰/۱۵	۰/۸۱	۱۰	۲/۹۲	76°
E	۱/۴۴	۰/۸۹	۰/۶	۰/۸۱	۱۰	۲/۹۲	76°
F	۱/۷۳	۱/۰۷	۰/۳	۱/۰۷	۱۰	۲/۹۲	76°
G	۱/۷۳	۱/۰۷	۰/۳	۱/۰۷	۱۴	۲/۹۲	108°

۲-۲-۶. صحت سنجی و کالیبراسیون

به منظور صحت‌سنجی نتایج به دست آمده در این تحقیق، دو مدل آزمایشگاهی از تحقیقات تجربی صورت گرفته توسط (هو و همکاران ۲۰۱۴) [۵]، به وسیله مدل نرم‌افزاری موردنظر این تحقیق مدل‌سازی و نتایج حاصل با نتایج آزمایشگاهی مقایسه شد. مدل‌های آزمایشگاهی موردنظر به صورت سیستم خاک دولایه‌ای ماسه روی رس بوده که لایه خاک ماسه‌ای دارای تراکم نسبی برابر ۴۳ درصد، وزن

مخصوص مؤثر برابر ۹/۹۶ کیلونیوتن بر مترمکعب و ضخامت برابر ۶ متر است. لایه خاک رس بستر دریا دارای مشخصاتی از جمله مقاومت برشی موجود در مرز دولایه (su_0) برابر ۱۲/۹۶ کیلوپاسکال، گرادیان مقاومت برشی برابر ۱/۵۴ کیلوپاسکال بر متر و وزن مخصوص مؤثر برابر ۷۱۰ کیلونیوتن بر مترمکعب است. پی اسپادکن در این دو آزمایش دارای فرم کلی نشان داده شده در شکل (۱) و جزئیات ارائه شده در جدول (۲) است:

جدول ۲. ابعاد اسپادکن مورداستفاده در آزمایش تجربی

(هو و همکاران ۲۰۱۴)

اسپادکن	t_1	t_2	t_3	t_4	D	d	θ
مدل ۱	۱/۴۴	۰/۸۹	۰/۳	۰/۸۱	۱۰	۲/۹۲	76°
مدل ۲	۱/۷۳	۱/۰۷	۰/۳	۱/۰۷	۱۲	۲/۹۲	76°

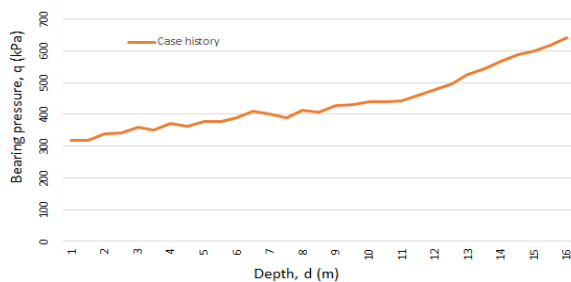
درصد خطای مربوط به هر کدام از مدل‌ها با اندازه مش مربوطه در جدول (۳) ارائه شده است.

جدول ۳. درصد خطای هر مدل

اندازه مش			مدل آزمایشگاهی ۱
۰/۳	۰/۴	۰/۵	
۷%	۱۰%	۱۲%	درصد خطا
اندازه مش			مدل آزمایشگاهی ۲
۰/۳	۰/۴	۰/۵	
۵%	۹%	۱۳%	درصد خطا

در نهایت با توجه به خروجی‌ها و درصد خطای به دست آمده برای مدل‌ها با اندازه مش‌های متفاوت، برای محدوده‌ای برابر با قطر اسپادکن و نزدیک به نفوذ، ابعاد مش ۰/۳ متر و از این فاصله تا انتهای مدل (فاصله شعاعی) اندازه مش از ۰/۷ تا ۳/۵ متر در نظر گرفته شده است. در نمودارهای شکل (۵) مقایسه صورت گرفته بین مدل‌های آزمایشگاهی و نرم‌افزاری نشان داده شده است:

می‌کند. بنابراین می‌توان گفت مدل عددی، محدوده گسیختگی پانچ را با دقت قابل قبولی پیش‌بینی می‌کند. به منظور انجام کالیبراسیون مدل حاضر از داده‌های ارائه شده مربوط به یک مورد نفوذ پایه سکوی جکاپ در بستر خلیج تایلند، استفاده شد. خاک موردنظر دارای ساختار لایه‌ای به صورت لایه رس سخت - لایه رس نرم - لایه رس سخت با ضخامت‌های به ترتیب ۹، ۵ و ۳ متر و وزن مخصوص مؤثر برای هر سه لایه 8 kN/m^3 و مقاومت برشی برای هر سه لایه به ترتیب ۶۵، ۳۵ و ۸۰ کیلو پاسکال و قطر اسپادکن برابر با ۱۱/۵ متر است. مقادیر اندازه‌گیری شده میدانی در این عملیات نشان می‌دهد که پی‌های اسپادکن در فاصله اعماق ۵/۷۵ تا ۷/۰۱۵ متر، تحت پیش‌بارگذاری به اندازه ۳۹۴/۸ کیلو پاسکال، مستقر می‌شوند. همان‌طور که در شکل (۶) مشاهده می‌شود، مدل عددی نتایج قابل قبولی به دست می‌دهد زیرا در عمقی برابر با ۶/۴ متر که نزدیک به عمق نفوذ نهایی پی‌های اسپادکن در مورد میدانی است، مقاومت باربری اوجی برابر با ۴۰۸ کیلو پاسکال به دست می‌دهد که ۳/۳٪ بیشتر از مقدار اندازه‌گیری شده است.



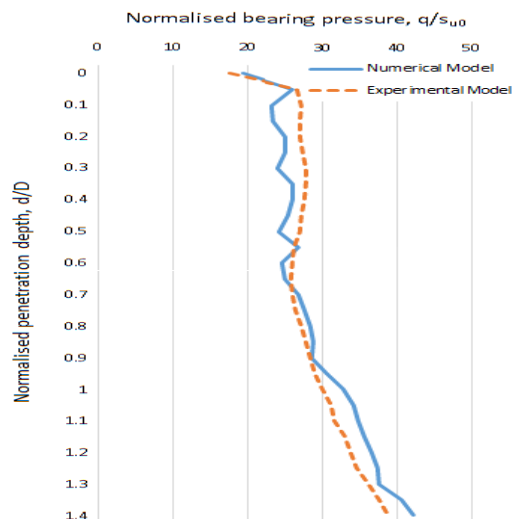
شکل ۶. نمودار مقاومت-عمق، مدل عددی نفوذ پی اسپادکن در خلیج تایلند

۳. یافته‌ها و بحث

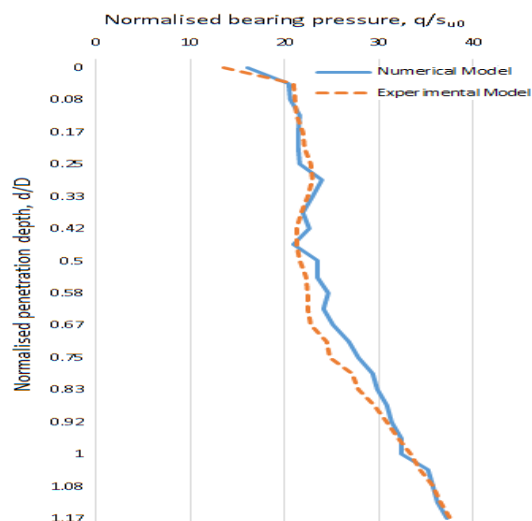
در این بخش نتایج حاصل از اجرای سناریوهای مختلف حاصل تأثیر پارامترهای هندسی اسپادکن روی ظرفیت باربری پی اسپادکن ارائه شده است. همچنین با توجه به اینکه در هنگام گسیختگی حجم مشخصی از لایه بالایی که در زیر اسپادکن قرار گرفته به همراه آن به لایه زیرین منتقل می‌شود (Soil plug)، نیز مورد بررسی قرار گرفته است.

تأثیر پارامترهای خاک

تأثیر پارامترهای هندسی اسپادکن



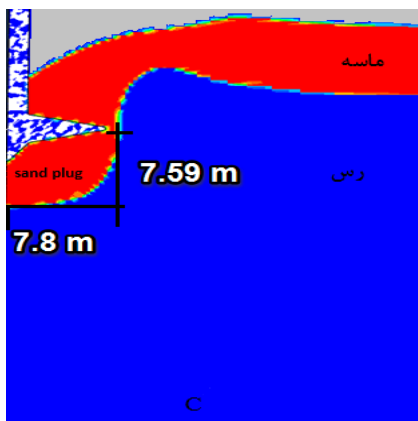
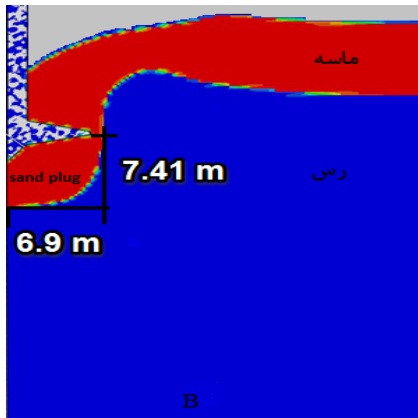
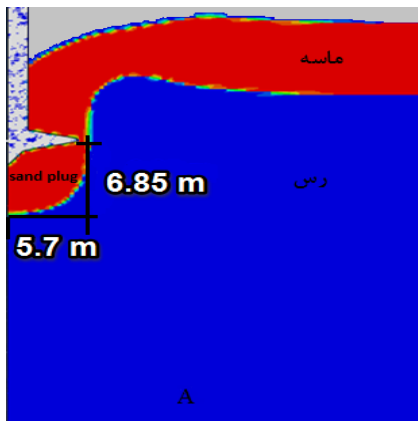
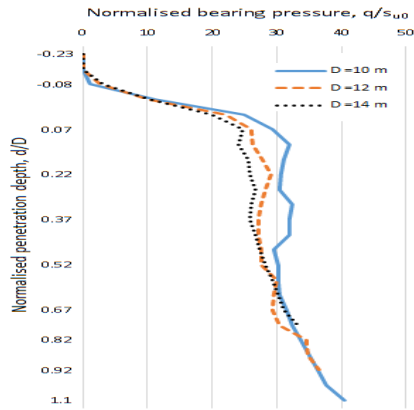
(الف)



(ب)

شکل ۵. نمودار مقایسه نتایج آزمایش تجربی و نرم‌افزاری برای (الف) مدل ۱ و (ب) مدل ۲

همان‌طور که در شکل (۵) مشخص است برای مدل آزمایشگاهی یک محدوده گسیختگی حدوداً از عمق ۰/۹ متر تا عمق ۸/۵ متری اتفاق می‌افتد درحالی‌که برای مدل عددی محدوده گسیختگی از عمق حدوداً ۰/۹ سانتی‌متر تا عمق ۷/۳ متر اتفاق می‌افتد. به علاوه اینکه مقادیر مقاومت باربری پی اسپادکن را نیز با مقدار خطای برابر با ۷ درصد پیش‌بینی می‌کند. همچنین برای مدل آزمایشگاهی ۲ گسیختگی حدوداً از عمق ۰/۸ متر تا عمق ۸/۲ متری و برای مدل عددی گسیختگی از عمق حدوداً ۰/۴ متر تا عمق ۷/۴ متر اتفاق می‌افتد، به علاوه اینکه مقادیر مقاومت باربری پی اسپادکن را نیز با مقدار خطای برابر با ۵ درصد پیش‌بینی



شکل ۷: نمودار مقاومت باربری. عمق برای قطرهای مختلف اسپادکن (A) Sand plug مربوط به اسپادکن با قطر ۱۰ متر. (B) Sand plug مربوط به اسپادکن با قطر ۱۲ متر (C) Sand plug مربوط به اسپادکن با قطر ۱۴ متر

در شکل‌های ۷ تا ۹، تأثیر پارامترهای مختلف خاک، شامل قطر پی اسپادکن (D)، زاویه نوک اسپادکن (θ) و ضخامت بزرگ‌ترین سطح مقطع اسپادکن (t_3) بر مقاومت باربری پی اسپادکن نشان داده شده است. بررسی‌ها نشان می‌دهد که پتانسیل وقوع پدیده نفوذ پانچ برای قطرهای مختلف اسپادکن وجود دارد. به طوری که محدوده گسیختگی برای تحلیل‌های شامل اسپادکن با قطر ۱۰، ۱۲ و ۱۴ متر به ترتیب برابر با ۰/۸ متر تا ۷/۷ متر، ۰/۶ متر تا ۸ متر و ۰/۵ متر تا ۷/۱ متر است. همچنین نتایج نشان می‌دهند، با افزایش قطر پی اسپادکن، مقاومت باربری کمتری به دست می‌آید. بررسی‌ها نشان می‌دهد، حجم خاک جابه‌جا شده V_{plug} رابطه مستقیمی با قطر پی اسپادکن دارد، به طوری که برای تحلیل‌های شامل اسپادکن با قطر ۱۰، ۱۲ و ۱۴ متر، مقادیر ارتفاع خاک جابه‌جا شده h_{plug} به ترتیب برابر با ۶/۸۵، ۷/۴۱ و ۷/۵۹ متر خواهد بود. همچنین عرض آن نیز به ترتیب برابر با ۵/۷، ۶/۹ و ۷/۸ متر است (شکل ۷).

این نتیجه با نتایج به دست آمده از تحقیقات ته و همکاران (۲۰۰۸) و لی و همکاران (۲۰۱۳) که روی خاک لایه‌ای ماسه بر رس صورت پذیرفت، مطابقت دارد (جدول ۴). دلیل این نتایج به این خاطر است که با کاهش اندازه قطر و در نتیجه افزایش نسبت H_s/D بخش بزرگ‌تری از سطح گسیختگی محدود به لایه ماسه‌ای خواهد بود و برعکس با افزایش اندازه قطر و در نتیجه کاهش نسبت H_s/D بخش بزرگ‌تری از سطح گسیختگی به داخل لایه رسی امتداد می‌یابد، چون مقاومت لایه ماسه‌ای نسبت به مقاومت باربری لایه رسی بیشتر است؛ بنابراین برای قطرهای کوچک‌تر، مقاومت باربری بزرگ‌تری بسنج می‌شود. به عبارتی دیگر با تغییر اندازه قطر اسپادکن مقادیر منابع تأمین‌کننده مقاومت q_{peak} نیز تغییر می‌کند، به طوری که هرچقدر سهم لایه رسی در تأمین مقاومت کمتر باشد (برای قطرهای کوچک‌تر) مقاومت q_{peak} بزرگ‌تری به دست می‌آید، عکس این نتیجه نیز صادق است.

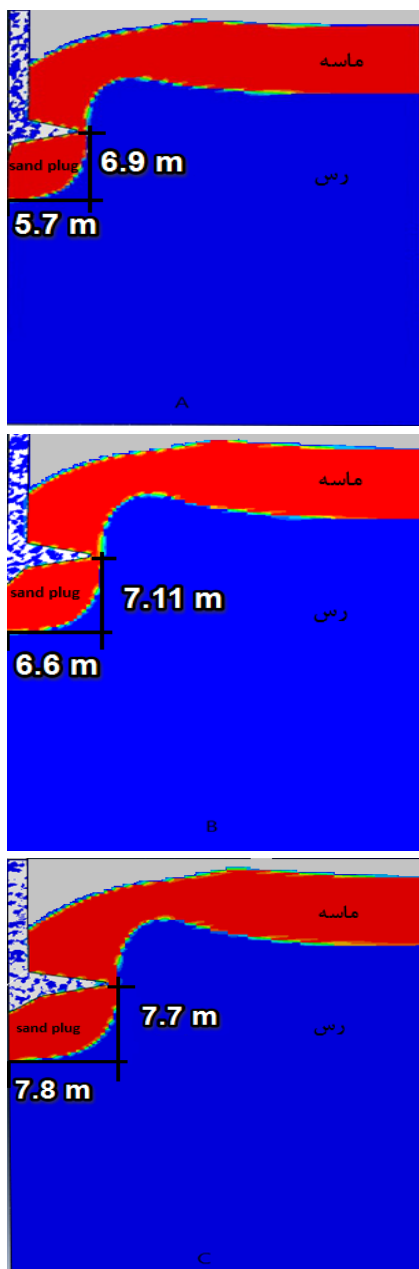
جدول ۴. نتایج تحقیقات گذشته در مورد تأثیر قطر اسپادکن روی ظرفیت

باربری آن

محقق	D	q_{peak} (kpa)
	۳	۶۸۰
(ته و همکاران ۲۰۰۸)	۶	۵۳۸
	۸	۶۰۵
(لی و همکاران ۲۰۱۳)	۱۲	۵۱۳
[۹]	۱۶	۴۶۱
	۱۰	۳۴۲
تحقیق حاضر	۱۲	۳۰۸
	۱۴	۲۸۶

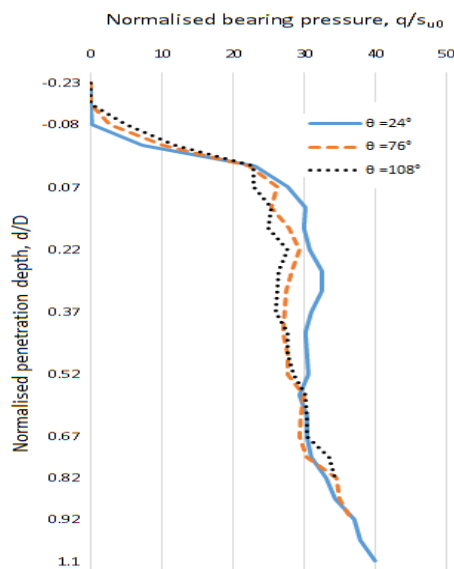
بررسی تأثیر زاویه‌های مختلف نوک اسپادکن (θ) بر پتانسیل وقوع پدیده نفوذ پانچ نشان می‌دهد که محدوده گسیختگی برای تحلیل‌های شامل θ برابر با 24° ، 76° و 108° به ترتیب برابر با $0/6$ متر تا $7/6$ متر، $0/6$ متر تا 8 متر و $0/6$ متر تا 7 متر است. با توجه به نمودارهای شکل (۸)، برای زاویه‌های بزرگ‌تر نوک پی اسپادکن، ظرفیت باربری کمتری به دست می‌آید (شکل ۸).

با توجه به شکل (۸)، رابطه مستقیمی با زاویه نوک اسپادکن دارد، به طوری که برای اسپادکن‌های با زاویه نوک برابر با 24° ، 76° و 108° درجه، مقادیر h_{plug} به ترتیب برابر با $6/9$ ، $7/11$ و $7/7$ متر خواهد بود. همچنین مقادیر b_{plug} نیز به ترتیب برابر با $5/7$ ، $6/9$ و $7/8$ متر است.



شکل ۸. نمودار مقاومت باربری. عمق برای زوایای مختلف نوک اسپادکن (θ)، Sand plug (A) مربوط به تحلیل شامل اسپادکن با زاویه نوک 24° . Sand plug (B) مربوط به تحلیل شامل اسپادکن با زاویه نوک 76° . Sand plug (C) مربوط به تحلیل شامل اسپادکن با زاویه نوک 108° .

بررسی پتانسیل وقوع پدیده نفوذ پانچ برای هر ۳ ضخامت بزرگ‌ترین سطح مقطع اسپادکن نشان می‌دهد که محدوده گسیختگی برای مقادیر مختلف ضخامت بزرگ‌ترین سطح مقطع اسپادکن برابر با $0/15$ ، $0/3$ و $0/6$ متر به ترتیب برابر با $0/7$ متر تا $7/7$ متر، $0/7$ متر تا $7/7$ متر و $0/7$ متر تا $8/1$ متر است. همچنین با توجه به نتایج، تغییرات بعد ضخامت بزرگ‌ترین سطح مقطع اسپادکن تأثیر خاصی بر مقاومت باربری ندارد (شکل ۹).

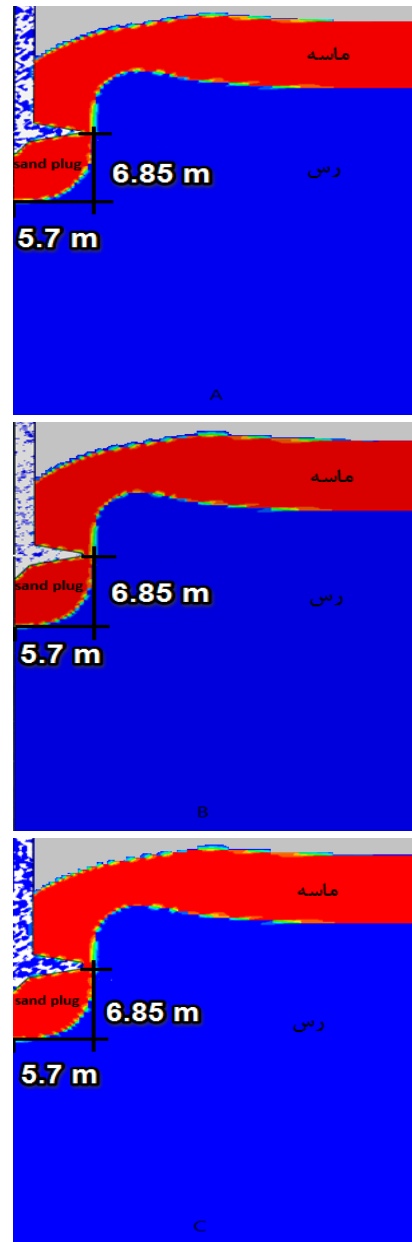
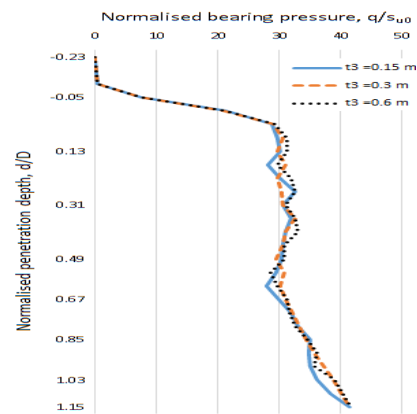


با توجه به شکل (۹)، مقادیر b_{plug} و h_{plug} برای هر کدام از مدل‌ها به ترتیب برابر با $6/85$ و $5/7$ متر است، بنابراین می‌توان نتیجه گرفت که تغییرات ضخامت t_3 پی اسپادکن تأثیری بر حجم خاک ماسه‌ای که توسط اسپادکن به خاک رس بستر دریا زیرین منتقل می‌شود، ندارد. دلیل این امر به این خاطر است که این بعد از اسپادکن برخلاف سطح زیرین اسپادکن مستقیماً در انتقال خاک هیچ‌گونه تأثیری ندارد.

هر کدام از نمودارهای شکل (۹) را می‌توان به سه بخش تقسیم نمود، به طوری که فاصله $2/33$ تا 0 ، طولی است که بزرگ‌ترین سطح مقطع اسپادکن (نقطه مرجع اسپادکن بر روی این سطح در نظر گرفته شده است) هنوز به خاک نرسیده، بنابراین نیروی کمی در این بازه به پی وارد می‌شود و برای هر سه آزمایش مقادیر تقریباً یکسانی به دست می‌دهد. در بخش دوم نمودار، شیب افزایش مقادیر خیلی کم و در ادامه روند ثابت و نزولی حاکم می‌شود که این نشان‌دهنده وقوع پدیده نفوذ پانچ است. بخش سوم و آخر، نمودار روند صعودی دارد. در این بخش پی اسپادکن به لایه رسی می‌رسد که مقاومت افزایشی نسبت به عمق دارد، بنابراین در این محدوده پی اسپادکن هرچه قدر بیشتر نفوذ کند، مقاومت باربری روند افزایشی خواهد داشت.

نتایج به دست آمده از بررسی تأثیر پارامترهای مختلف نشان می‌دهد استفاده از روش کوپل لاگراژ-اویلر به خوبی میزان ظرفیت باربری پی اسپادکن را تخمین می‌زند. حال در این بخش تأثیر پارامتر گرادیان مقاومت برشی بررسی می‌شود.

بررسی نتایج پتانسیل وقوع پدیده نفوذ پانچ برای ۳ گرادیان مقاومت برشی لایه رسی نشان داد که محدوده گسیختگی برای تحلیل‌های شامل ρ برابر با 1 kpa/m ، $1/55 \text{ kpa/m}$ و 2 kpa/m به ترتیب برابر با $0/6$ متر تا 8 متر، $0/6$ متر تا 8 متر، $0/4$ متر تا $7/6$ متر است شکل (۹). بررسی‌ها نشان می‌دهند، با افزایش مقدار گرادیان مقاومت برشی خاک رس بستر دریا، مقاومت باربری خاک نیز افزایش می‌یابد. همچنین در محدوده نفوذ در لایه رسی، هرچه گرادیان مقاومت برشی بزرگ‌تر باشد، نرخ افزایش مقاومت باربری متناظر، بزرگ‌تر خواهد بود. همچنین نتایج نشان می‌دهد که با افزایش گرادیان مقاومت برشی لایه رسی، V_{plug} کاهش می‌یابد. دلیل این روند این است که خاک رس بستر دریا گرادیان مقاومت بیشتر، سخت‌تر خواهد بود و در نتیجه فشار محدودکننده بیشتری بر توده خاک sand plug اعمال می‌کند و باعث تراکم بیشتر آن می‌شود.



شکل ۹. نمودار مقاومت باربری. عمق برای مقادیر مختلف پارامتر ضخامت بزرگ‌ترین سطح مقطع اسپادکن و Sand plug مربوط به تحلیل شامل اسپادکن با ضخامت $t_3 = 0.15 \text{ m}$ Sand plug مربوط به تحلیل شامل اسپادکن با بعد $t_3 = 0.3 \text{ m}$ Sand plug مربوط به تحلیل شامل اسپادکن با بعد $t_3 = 0.6 \text{ m}$.

۴. نتیجه گیری

همان گونه که بیان شد هدف از تحقیق حاضر بررسی تأثیر پارامترهای هندسی اسپادکن بر ظرفیت باربری و پدیده است. گسیختگی نتایج حاصل از تحقیق حاضر را می توان به صورت زیر خلاصه نمود:

۱. مقاومت باربری با قطر پی اسپادکن رابطه عکس دارد و با تغییر قطر از ۱۰ تا ۱۴ متر، ارتفاع خاک جابه جا شده ۱۰/۸۰ درصد تغییر می کند؛

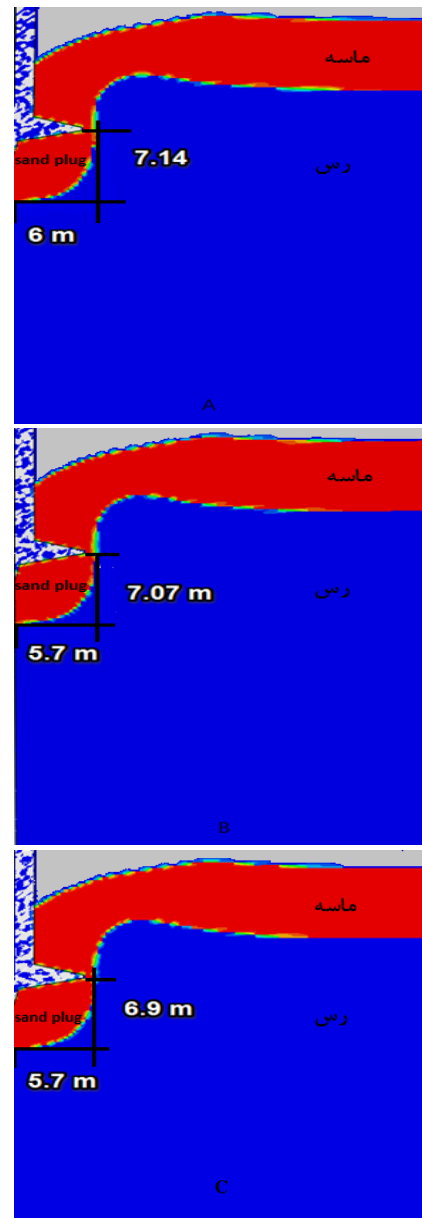
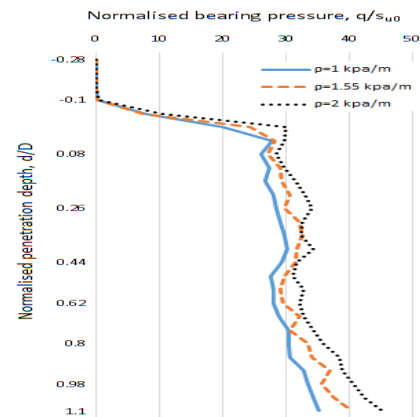
۲. تغییرات ضخامت بزرگ ترین مقطع پی اسپادکن تأثیری بر مقاومت باربری ندارد به طوری که برای مقادیر مختلف ضخامت بزرگ ترین سطح مقطع اسپادکن برابر با ۰/۱۵، ۰/۳، و ۰/۶ متر به ترتیب برابر با ۰/۷ متر تا ۷/۷ متر، ۰/۷ متر تا ۷/۷ متر و ۰/۷ متر تا ۸/۱ متر است؛

۳. با افزایش زاویه نوک پی اسپادکن، ظرفیت باربری کمتری به دست می آید و با افزایش زاویه نوک اسپادکن از ۲۴ تا ۱۰۷ درجه ارتفاع خاک جابه جا شده ۱۱/۶ درصد تغییر می کند؛

۴. الگوی گسیختگی خاک زیر پی اسپادکن در حال نفوذ، نسبت به عمق تغییر می کند، طوری که در عمق های سطحی، گسیختگی دارای دو مؤلفه، برش در طول صفحه برشی تقریباً عمودی در لایه ماسه ای و گسیختگی برشی موضعی در لایه رسی است. همچنین گسیختگی برای عمق های بیشتر، شامل برش در اطراف توده خاک ماسه ای منتقل شده توسط اسپادکن و جریان عمیق خاک رس بستر دریا به سمت بالاست.

سپاسگزاری

نویسندگان مقاله از دانشگاه علوم و فنون دریایی خرمشهر برای ایجاد شرایط انجام تحقیق کمال تشکر و قدردانی را به عمل می آورند.



شکل ۱۰. نمودار مقاومت باربری. عمق برای گرادیان های مقاومت برشی لایه رسی مختلف، (A) مربوط به تحلیل شامل خاک رس بستر دریا با گرادیان مقاومت $p=1\text{ kPa}$ ، (B) مربوط به تحلیل شامل خاک رس بستر دریا با گرادیان مقاومت $p=1.55\text{ kPa}$ و (C) مربوط به تحلیل شامل خاک رس بستر دریا با گرادیان مقاومت $p=2\text{ kPa}$

VA, USA : Society of Naval Architects and Marine Engineers.2008.

- [13] Teh K L, Leung C F, Chow Y K, Handidjaja P. Prediction of punch-through for spudcan penetration in sand overlying clay. Offshore Technology Conference, OTC20060.2009.
- [14] Tolooyan A, Gavin K, Dyson AP. Estimation of spudcan penetration in variable sand deposits with the Arbitrary Lagrangian Eulerian Finite Element Method. Ocean Engineering. 2023 Aug 1;281:114955.
- [15] Wu H, Njock PG, Chen J, Shen S. Numerical simulation of spudcan-soil interaction using an improved smoothed particle hydrodynamics (SPH) method. Marine Structures. 2019 Jul 1;66:213-26.

پی‌نوشت‌ها

1. Lee et L
2. Hu et al
3. Tel et al
4. Qiu et al
5. Qiu and Henke
6. Gao et al
7. Zhang et al
8. Wu et al
9. Coupled Eulerian-Lagrangian
10. Mohr-Coulomb model
11. Geostatic stress
12. Submerged unit weight
13. Poisson's ratio

مراجع

- [1] Bolton MD. The strength and dilatancy of sands. Geotechnique. 1986 Mar;36(1):65-78.
- [2] Chouhan K, Chavda JT. A novel approach to simulate cone penetration test using conventional FEM. Geotechnical and Geological Engineering. 2023 Mar;41(2):1439-51.
- [3] Deng W, Tian X, Han X, Liu G, Xie Y, Li Z. Topology optimization of jack-up offshore platform leg structure. Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part M: Journal of Engineering for the Maritime Environment. 2021 Feb;235(1):165-75.
- [4] Gao W, Yu L, Hu Y. Large deformation FE analysis of large diameter spudcan penetration into two-layer of uniform clays. International Journal of Geotechnical Engineering. 2012 Apr 1;6(2):171-7.
- [5] Hu P, Stanier SA, Cassidy MJ, Wang D. Predicting peak resistance of spudcan penetrating sand overlying clay. Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering. 2014 Feb 1;140(2):04013009.
- [6] International Organization for Standardization. Petroleum and Natural Gas Industries: Site-specific Assessment of Mobile Offshore Units. Jack-ups Commentary and Detailed Sample Calculation. ISO; 2012.
- [7] Lee KK. Investigation of potential spudcan punch-through failure on sand overlying clay soils. [dissertation]. Perth: Univ. Western Australia; 2009. 217p.
- [8] Lee KK, Randolph MF, Cassidy MJ. Bearing capacity on sand overlying clay soils: A simplified conceptual model. Géotechnique. 2013 Dec;63(15):1285-97.
- [9] Liu J, Yu L, Zhou H, Kong X. J. Bearing Capacity and Critical Punch-Through Depth of Spudcan on Sand Overlying Clay. China Ocean Eng. . 2014;28(1): 139 – 147.
- [10] Qiu G, Henke S. Controlled installation of spudcan foundations on loose sand overlying weak clay. Marine Structures. 2011; 24(4): 528–550.
- [11] Qiu G, Henke S, Grabe J. 3D FE analysis of the installation process of spudcan foundations. In 2nd International Symposium on Frontiers in Offshore Geotechnics (ISFOG), Perth WA. 2010; pp. 685–690.
- [12] SNAME. SNAME:Recommended practice for site specific assessment of mobile jack-up units. T & r bulletin 5-5a 1st edn, rev 3. Alexandria,