بررسی آزمایشگاهی رفتار بار- تغییرمکان شمع‌های پافیلی تحت بارهای کششی مایل در خاک ماسه‌ای

مسعود مکارچیان*[۱]، عرفان متینی[۲] و سجاد قلی‌پور[۳]

[۱] استادیار گروه عمران، دانشکده مهندسی، دانشگاه بوعلی‌سینا
[۲] دانش‌آموخته کارشناسی ارشد گروه عمران، دانشکده مهندسی، دانشگاه بوعلی‌سینا
[۳] دانش‌آموخته دکتری گروه عمران، دانشکده مهندسی، دانشگاه بوعلی‌سینا

(دریافت: ۹۵/۳/۱۹، پذیرش: ۹۸/۶/۱۷، نشر آنلاین: ۹۸/۶/۱۷)

چکیده

پی‌های عمیق عموماً برای تحمل بارهای فشاری سنگین و انتقال بار از سطوح ضعیف خاک به لایه‌های عمیق و مقاوم‌تر زمین استفاده می‌شوند. باتوجه به افزایش ضرورت ساخت سازه‌هایی نظیر برج‌های انتقال نیرو و دودکش‌های بزرگ که علاوه بر تحمل بارهای فشاری سنگینی، در معرض نیروهای بالارانش قائم و مایل بزرگی همچون بارهای باد و زلزله نیز قرار دارند، محققین به‌دنبال بررسی راه‌حل‌هایی برای مقابله با این نیروها هستند. استفاده از شمع‌ها به‌عنوان مهار جهت مقابله با بارهای کششی مایل و قائم، باعث گسترش مطالعه رفتار کششی و بررسی عوامل مختلف مؤثر بر ظرفیت بالارانش شمع‌ها، در سالیان گذشته شده است. در این پژوهش توسط دستگاه ساخته‌شده در دانشگاه بوعلی‌سینا، مطالعه آزمایشگاهی رفتار مدل‌های شمع ساده و پافیلی واقع بر بستر خاک ماسه‌ای با دانسیته نسبی ۶۰٪، تحت بارهای کششی انجام گرفته و اثر پارامترهای مختلف شامل زاویه اعمال بار و نسبت قطر پافیلی به قطر شمع بر رفتار بار- جابه‌جایی مطالعه شد. مدل‌های شمع با زوایای صفر (قائم)، ۳۰، ۶۰ و ۹۰ درجه (افقی)، نسبت به محور شمع تحت کشش قرار گرفته و سپس پاسخ بار- جابه‌جایی به‌دست آمد. بر پایه نتایج تحقیق، مقادیر زوایای بحرانی بارهای کششی مایل تحت پارامترهای مختلف که به‌ازای آن حداکثر ظرفیت باربری شمع تحت بار کششی حاصل می‌شود، تعیین شد؛ زاویه بحرانی متناظر با حداکثر ظرفیت کششی، ۶۰ درجه به‌دست آمد. تحلیل نتایج مطالعه نشان داد که ظرفیت باربری قائم نهایی شمع پافیلی نسبت به شمع ساده و همچنین با افزایش قطر قسمت پافیلی شمع، به‌طور قابل‌توجهی افزایش می‌یابد.

کلیدواژه‌ها: مدل آزمایشگاهی، شمع پافیلی، بار مایل، ظرفیت باربری شمع، زاویه بحرانی.

۱- مقدمه

امروزه پی‌های عمیق در جامعه مهندسی عمران دارای اهمیت فراوانی هستند که از جمله پرکاربردترین پی‌های عمیق می‌توان به شمع‌ها اشاره کرد. شمع‌ها اعضای بلندی هستند که جهت انتقال بارهای فونداسیون از لایه‌های ضعیف خاک در سطح زمین به نقاط عمیق‌تر و لایه‌های با مقاومت بیشتر استفاده می‌شود (Das، ۱۹۹۹). در سازه‌هایی که بر روی شمع‌ها ساخته می‌شوند، اغلب شمع‌ها در معرض نیروهای بالارانش و کششی مایل هستند که از جمله این موارد می‌توان به سازه‌های در معرض واژگونی زیاد مانند دودکش‌کوره‌ها، برج‌های انتقال نیرو، پایه پل‌ها، سکوهای غوطه‌ور در آب و یا اسکله‌ها اشاره کرد (Chen و همکاران، ۲۰۱۳). در سازه‌هایی نظیر سکوهای نفت که اغلب در معرض بارهای باد هستند، نیز نیروی بالارانش اتفاق می‌افتد و درواقع نیروی بیرون‌کشی اعمال‌شده به این سازه‌ها از وزن سازه بزرگ‌تر است (فخاریان و اسلامی، ۱۳۸۴). اولین بارگذاری بر روی سازه‌های مهارشده با کابل، کششی است که بار را رو به بالا و مایل به پی وارد می‌کند. انواع مختلفی از پی‌ها از جمله: شمع‌های حفاری‌شده یا کوبیده‌شده در خاک می‌توانند این نوع بارها را تحمل کنند. برای افزایش مقاومت کششی و فشاری شمع‌ها، شمع‌های با قطر بزرگ‌تر در نوک شمع تحت عنوان شمع‌های پافیلی[۱] مطرح است. علی‌رغم کاربردهای گسترده شمع‌های مختلف برای تحمل نیروهای کششی و مایل در عملیات مهندسی، مطالعه و بررسی‌های

1. Enlarged base piles

* نویسنده مسئول؛ شماره تماس: ۰۹۱۸-۸۱۴۸۱۳۵

آدرس ایمیل: makarchian@yahoo.com (م. مکارچیان)، erfan_matini@yahoo.com (ع. متینی)، sgholipour63@gmail.com (س. قلی‌پور).

کم‌تری در رابطه با رفتار کششی نسبت به بارگذاری فشاری (Salgado، ۲۰۱۰، Kong، ۲۰۱۱؛ Wen، ۲۰۱۴؛ Tehrani و همکاران، ۲۰۱۶؛ Han و همکاران، ۲۰۱۷) انجام شده است. شمع‌های پافیلی یکی از انواع متداول پی‌های عمیق است که با افزایش سطح مقطع نوک شمع، مقاومت باربری شمع به‌ویژه مقاومت کششی و بالارانش پی را بهبود و افزایش می‌دهد (Kong و همکاران، ۲۰۱۳). بااین‌وجود، مطالعه پی‌های عمیق به‌ویژه شمع‌های پافیلی تحت بارهای غیرمحوری به‌طور کامل انجام نشده و آزمایش‌های محدودی در این زمینه وجود دارد. با توجه به اهمیت موضوع رفتار شمع تحت بارهای مایل، در این مطالعه سعی شد که رفتار مدل‌های کوچک و آزمایشگاهی شمع، تحت بارگذاری کششی مایل به‌ازای زوایای مختلف بررسی شود. در این بخش، تعدادی از مهم‌ترین نتایج گزارش‌شده در مورد شمع‌های ساده و پافیلی توسط محققین مختلف اشاره می‌شود:

ظرفیت بالارانش دیوارهای مهاری صلب و شمع‌ها با مقطع ثابت تحت بارهای مایل، می‌تواند با کمک ضرایب بالارانش بیان شود که با بسط نظریه مقاومت بالارانش قائم پی‌ها به‌دست می‌آید (Meyerhof، ۱۹۷۳). تحلیل نتایج آزمایش‌ها نشان داد که ضرایب بالارانش دیوارهای مهاری با سطح زبر و شمع‌های با انتهای بزرگ (پافیلی) در ماسه و رس، عموماً از مقدار حداکثر برای بالارانش قائم، به میزان حداقل در حالت کشش افقی کاهش می‌یابد. ایشان همچنین رابطه مشابهی برای شمع‌های کوتاه با مقطع ثابت ارائه و نشان داد که مقاومت بالارانش شمع‌های بلند با افزایش زاویه انحراف بار از حالت قائم، افزایش می‌یابد.

مطابق مدل‌سازی عددی انجام‌گرفته در رابطه با ظرفیت شمع‌های قائم تحت بار محوری و بررسی تأثیر بار جانبی بر ظرفیت باربری، مشاهده شد که ظرفیت باربری محوری شمع با حضور بار جانبی کاهش می‌یابد (Abdel-Rahman و Achmus، ۲۰۰۶).

تحلیل نتایج مطالعه رفتار کششی شمع نشان داد که مقاومت نهایی شمع در برابر کشش مایل، تابع پیوسته‌ای از زاویه انحراف بار کششی و نسبت ظرفیت بالارانش قائم خالص و مقاومت جانبی نهایی شمع است. برای شمع تحت بارگذاری مایل، نسبت مقاومت قائم نهایی (P_u)، به مقاومت جانبی نهایی (P_L)، بزرگ‌تر از یک و حداکثر مقاومت به‌ازای زاویه بار ۳۰ درجه به‌دست آمد. برای نسبت P_u/P_L بین ۰/۱۸ تا ۰/۷۲، زاویه متناظر با بار حداکثر، ۶۰ درجه مشاهده شده و برای نسبت P_u/P_L کم‌تر از ۰/۱۸، مقدار مقاومت حداکثر در زاویه بار ۹۰ درجه حاصل شد (Chattopadhyay و Pise، ۱۹۸۶).

رفتار شمع‌های مهاری تحت بارهای کششی مایل، وابسته به نسبت طول مدفون به قطر (L/d)، نسبت قطر پافیلی به قطر شمع (B/d)، زاویه اعمال بار (α) و دانسیته نسبی خاک اطراف شمع (D_r) گزارش شد. مقاومت نهایی شمع با افزایش نسبت (L/d)، (B/d) و دانسیته خاک، افزایش می‌یابد. تحلیل نتایج نشان داد که زاویه بحرانی (α_{cr}) که در آن شمع به حداکثر مقاومت کششی مایل خود می‌رسد، به نسبت‌های (L/d)، (B/d) و دانسیته خاک بستگی دارد (Mandal و همکاران، ۲۰۰۲).

در تحقیق انجام‌شده توسط Patra و همکاران (۲۰۰۵)، رفتار مدل آزمایشگاهی شمع مهاری (با انتهای بزرگ) تحت بار کششی محوری و مایل در خاک چند لایه و یک لایه موردبررسی قرار گرفت. نتایج نشان داد با افزایش نسبت قطر پافیلی به قطر شمع، (B/d) و نسبت طول مدفون به قطر (L/d)، بار نهایی بالارانش افزایش می‌یابد. بار نهایی درحالتی که خاک با دانسیته نسبی متوسط بر روی خاک با دانسیته نسبی زیاد قرار دارد، بیشتر از حالتی است که خاک با دانسیته نسبی زیاد بر روی خاک با دانسیته نسبی متوسط قرار می‌گیرد. بر اساس نتایج، شمع‌های مهاری در زاویه‌ای مشخص به حداکثر ظرفیت باربری رسیده، به‌طوری‌که مقادیر ظرفیت باربری وابسته به نسبت (B/d) و (L/d) هستند.

نتایج آزمایشگاهی مدل‌های شمع واقع بر بستر ماسه مسلح با ژئوگرید توسط Baki و همکاران (۲۰۱۳) نشان داد که مقاومت بهینه شمع‌ها تحت بارگذاری کشش مایل، در شمع‌های زبر واقع بر بستر ماسه مسلح حاصل می‌شود. با تغییر زاویه اعمال کشش از صفر به ۶۰ درجه نسبت به حالت قائم، مقاومت اصطکاکی از حالت مقاومت اصطکاکی تنها، به مقاومت دیواره همراه با فشار جانبی زمین تبدیل شده و هر دو مؤلفه در ظرفیت نهایی مشارکت می‌کنند؛ بنابراین مقاومت بالارانش شمع‌های افقی تحت کشش مایل، با افزایش زاویه اعمال بار کششی افزایش می‌یابد. با افزایش ابعاد شمع از ۱۷ به ۳۴ میلی‌متر، نرخ افزایش بار ۳۱٪ مشاهده شد. با تبدیل شمع صاف به زبر، ظرفیت نهایی به مقدار ۳۲٪ افزایش یافت. در شمع‌های که ژئوگرید در بستر ماسه استفاده می‌شود، ظرفیت نهایی شمع نسبت به حالت خاک غیرمسلح، حدود ۲۸٪ افزایش یافت. استفاده از ژئوگرید برای بهبود عملکرد شمع در برابر بالارانش بسیار مفید گزارش شد.

مطالعه نتایج آزمایش‌های کششی بر رفتار بالارانش شمع‌های پافیلی درجا در خاکریزی‌های رسی و ماسه‌ای نشان داد که ظرفیت باربری کششی و مکانیسم گسیختگی به شرایط و مشخصات خاک پشت پی بستگی دارد (Lutenegger، ۲۰۱۵)

کاربرد ماسه شفاف و تحلیل تصاویر دیجیتال در ارزیابی تغییرشکل و جابه‌جایی داخلی ماسه، مکانیسم گسیختگی، پاسخ بار- جابه‌جایی، مقاومت بیرون‌کشی شمع و اندرکنش شمع و خاک توسط مدل‌سازی آزمایشگاهی انجام‌شده بر روی مدل‌های شمع پافیلی با مقطع متغیر بررسی و تحقیق شد. نتایج، کارآمدی مناسب این روش را در مطالعه مکانیسم گسیختگی شمع‌ها نشان داد (Kong و همکاران، ۲۰۱۵).

ظرفیت باربری کششی شمع پافیلی مدفون در ماسه از طریق مدل‌سازی فیزیکی بررسی و تحلیل نتایج نشان داد که ظرفیت کششی بالارانش شمع با افزایش نسبت طول مدفون به قطر به‌میزان بیشتر از مقدار دو و همچنین افزایش دانسیته نسبی ماسه، افزایش قابل‌توجهی می‌یابد. نتایج همچنین نشان داد که افزایش قطر شمع ساده و زاویه پافیلی شمع، باعث کاهش جزئی بار کششی شمع می‌شود (Nazir و همکاران، ۲۰۱۵).

عملکرد کششی شمع‌های واقع بر ماسه توسط مدل‌سازی فیزیکی مطالعه و تأثیر افزایش سطح شمع در تراز نوک بر مقادیر ظرفیت کششی موردبررسی قرار گرفت. نتایج افزایش قابل‌توجه ظرفیت کششی شمع‌ها، ناشی از افزایش قطر و سطح شمع در نوک را نشان داد. بر اساس نتایج، با افزایش سطح مقطع، جابه‌جایی موردنیاز شمع جهت بسیج شدن ظرفیت کششی پی نسبت به حالت شمع معمولی، افزایش نشان داد. همچنین با افزایش دانسیته نسبی ماسه، عملکرد ظرفیت کششی شمع افزایش یافت (Azzam و Elwakil، ۲۰۱۷).

یک سری مطالعه آزمایشگاهی و تحلیل عددی المان محدود جهت بررسی کارآمدی شمع‌های پافیلی با افزایش سطح مقطع در ترازهای مختلف طول شمع به‌منظور بهبود ظرفیت کشش بالارانش انجام گرفت. تحلیل نتایج مطالعه نشان داد که با افزایش سطح مقطع شمع در ترازهای مختلف، ظرفیت کششی بالارانش شمع افزایش یافته و میزان تغییرشکل ماسه در اطراف شمع و برآمدگی خاک سطح زمین کاهش می‌یابد. میزان بهبود عملکرد شمع به تراز مقطع افزایش یافته در طول شمع بستگی دارد؛ به‌طوری‌که افزایش سطح مقطع در تراز نوک شمع و یک‌سوم طول شمع، به‌ترتیب باعث افزایش ۶۰٪ و ۴٪ ظرفیت کششی شمع می‌شود. همچنین میزان تغییرشکل خاک مجاور شمع با افزایش سطح مقطع در تراز $L/3$ شمع نسبت به تراز L، چهار برابر بزرگ‌تر مشاهده شد. به‌عبارت‌دیگر، هر چه فاصله بین محل افزایش مقطع شمع (ایجاد مقطع پافیلی) تا سطح زمین بیشتر باشد، کارآمدی و سودمندی عملکرد شمع پافیلی نیز افزایش می‌یابد (Moayedi و Mosallanezhad، ۲۰۱۷).

بررسی مکانیسم گسیختگی برشی شمع‌های واقع بر ماسه به‌ویژه شمع پافیلی، تحت بارگذاری‌های کششی توسط برخی از محققین انجام شده است (Dickin، ۱۹۸۸؛ Niroumand و همکاران، ۲۰۱۲؛ Faizi و همکاران، ۲۰۱۵؛ Nazir و همکاران، ۲۰۱۵).

Dickin (۱۹۸۸) با مطالعه رفتار شمع‌های پافیلی، انواع مکانیسم‌های گسیختگی اطراف شمع‌ها را مطابق شکل (۱) به سه گروه شامل؛ مدل سطح گسیختگی قائم مسطح، مدل سطح لغزش منحنی و مدل مخروط ناقص معکوس، طبقه‌بندی کرده است.

Nazir و همکاران (۲۰۱۵) با بررسی مکانیسم گسیختگی شمع‌های پافیلی در ماسه از طریق روش تصاویر دیجیتالی ذرات، نشان دادند که سطوح لغزش ایجادشده بالای مدل پی در ماسه متراکم، به‌صورت منحنی و با زاویه $\varphi/2$ تا سطح زمین ادامه می‌یابد. با توجه به بررسی‌های انجام‌گرفته و نتایج حاصله، برای سازه‌های واقع بر خاک‌های دانه‌ای همانند پروژه‌های نزدیک سواحل، استفاده از ظرفیت کششی شمع‌های پافیلی تحت زوایای بارگذاری مختلف می‌تواند جهت مقابله با بارهای افقی و مایل مدنظر قرار گیرد. با وجود اثبات کارآمدی شمع‌های پافیلی در فراهم کردن مقاومت فشاری و کششی به‌عنوان یک نوع پی مقرون به‌صرفه، با این حال مطالعات بر رفتار و عملکرد کششی به‌ویژه تحت بارهای مایل نسبت به بارگذاری فشاری، نسبتاً محدود است. بنابراین نیاز به بررسی بیشتر و جامع‌تری در این مورد احساس می‌شود. در این مقاله عملکرد کششی شمع‌های دایره‌ای واقع بر بستر ماسه، توسط آزمایش‌های آزمایشگاهی کوچک‌مقیاس تحت نیروهای مایل بررسی شد. پارامترهای مختلف مدل‌های شمع ساده و پافیلی شامل؛ طول شمع (L)، قطر شمع (d)، قطر قسمت پافیلی شمع (B) و زاویه امتداد اعمال بارگذاری (α) مورد ارزیابی قرار گرفت. جدول (۱)، مقادیر موردنظر در مطالعه برای پارامترهای مختلف را نشان می‌دهد. تفاوت عمده مطالعه حاضر نسبت به سایر تحقیقات مشابه، اعمال بار کششی شمع پافیلی در زوایای مختلف و تعیین زاویه بحرانی شمع متناظر با حداکثر باربری کششی است که به‌عنوان نوآوری مطالعه شناخته می‌شود.

شکل ۱- انواع مکانیسم‌های گسیختگی شمع‌های پافیلی تحت بارگذاری کششی (Dickin و همکاران، ۱۹۸۸)

جدول ۱- مقادیر موردنظر برای پارامترهای مختلف مطالعه شده

پارامتر	مقادیر موردمطالعه
طول شمع (L)	۱۰ و ۴۰ سانتی‌متر
قطر شمع (d)	۱ و ۲ سانتی‌متر
قطر پافیلی (B)	۵ و ۱۰ سانتی‌متر
زاویه امتداد بارگذاری (α)	۰، ۳۰، ۶۰ و ۹۰ درجه

۲- روش انجام تحقیق

۲-۱- دستگاه مدل‌سازی شمع تحت بار کششی

شکل (۲) جزئیات دستگاه بارگذاری مورداستفاده در مطالعه را که در دانشگاه بوعلی‌سینا ساخته شده و به‌عنوان اختراع به ثبت رسیده است، نشان می‌دهد؛ مخزن خاک دستگاه مکعبی شکل و به ابعاد داخلی ۶۰ سانتی‌متر است که در قسمت پایین چارچوب دستگاه قرار دارد. شکل (۳) جابه‌جایی‌سنج‌های افقی و قائم مورداستفاده را نشان می‌دهد که بر سطح کلاهک مخصوص نصب‌شده روی مدل شمع مدفون در خاک، مماس شده‌اند.

شکل ۲- دستگاه مدل‌سازی مورد استفاده در آزمایش‌های مدل

شکل ۳- جابه‌جایی‌سنج‌های افقی و قائم و کلاهک مخصوص

۲-۲- خاک مورداستفاده در آزمایش

نوع خاک مصرفی، ماسه ریزدانه سیلیسی است که از منطقه امیریه فیروزکوه، واقع در ۱۳۰ کیلومتری شمال شرق تهران تهیه شده است. ماسه مورداستفاده در مدل‌سازی فیزیکی، مطابق سیستم طبقه‌بندی متحد، ماسه بد دانه‌بندی شده به‌نام SP[2] است (ASTM، ۲۰۰۶). مشخصات ماسه شامل ضریب یکنواختی (C_u) برابر با ۱/۴۴ و ضریب خمیدگی (C_c) برابر با ۱/۱۶ است. همچنین دانسیته خشک حداکثر و حداقل ماسه برابر با ۱/۷۳ و ۱/۴۶ گرم بر سانتی‌متر مکعب اندازه‌گیری شد. زاویه اصطکاک داخلی ماسه توسط دستگاه برش مستقیم به‌ازای دانسیته نسبی ۶۰٪ تعیین شد که به‌میزان ۳۹ درجه به‌دست آمد. با توجه به خشک بودن مصالح و عدم وجود ریزدانه قابل توجه، مقدار چسبندگی خاک تقریباً صفر تعیین شد. منحنی دانه‌بندی ماسه مورد استفاده، در شکل (۴) ارائه شده است.

شکل ۴- نمودار دانه‌بندی ماسه مورد استفاده در آزمایش‌ها

2. Poorly Graded Sand

۲-۳- مدل شمع ساده و پافیلی

جهت ساخت مدل‌های شمع، از میله با آلیاژ برنج استفاده شد که به قطرهای مختلف ۱ و ۲ سانتی‌متر و طول‌های ۱۰ و ۴۰ سانتی‌متر تراشیده شد. همچنین برای مدل‌سازی قسمت پافیلی شمع، از شکل مخروط با قطر قاعده به اندازه ۵ و ۱۰ سانتی‌متر استفاده شد. دو سر میله به‌عمق یک سانتی‌متر رزوه شد، تا از یک سمت به قسمت پافیلی و از سمت دیگر به کابل کشش جهت بارگذاری متصل شود. برای مدل شمع ساده، همان میله ساده بدون قسمت پافیلی و برای مدل شمع پافیلی، میله همراه با قسمت مخروطی شکل استفاده شد که تصویری از مدل‌های شمع در شکل (۵) نشان داده شده است.

شکل ۵- مدل شمع برنجی به‌همراه قسمت پافیلی آن

۲-۴- نحوه آماده‌سازی بستر ماسه‌ای

مطابق روش متداول بارش ماسه، اگر خاک ماسه‌ای از ارتفاع مشخص و ثابتی بر روی سطح افقی ریخته شود، تمام قسمت‌های بستر ماسه‌ای دارای وزن مخصوص یکسان و همگنی خواهد بود. هرچه ارتفاع ریزش ماسه بیشتر باشد، دانسیته نسبی و وزن مخصوص بستر نیز بیشتر می‌شود (Rad و Tumay، ۱۹۸۷؛ LoPresti و همکاران، ۱۹۹۲). برای ماسه با دانه‌بندی مشخص از طریق آزمون و خطا، ارتفاع ریزش و دانسیته متناظر با آن به‌دست می‌آید. در این تحقیق پس از ۵ بار سعی و خطا برای رسیدن به دانسیته نسبی ۶۰٪ در ظرف مخصوص اندازه‌گیری دانسیته، ارتفاع مناسب ریزش ماسه ۵۰ سانتی‌متر تعیین شد. ریزش ماسه در لایه‌های با ضخامت ۵ سانتی‌متر برای رسیدن به تراکم مطلوب (وزن مخصوص ۱/۵۹ گرم بر سانتی‌مترمکعب) انجام گرفت. با توجه به ارتفاع مخزن (۶۰ سانتی‌متر) و طول بزرگ‌ترین شمع (۴۰ سانتی‌متر)، ۲۰ سانتی‌متر از کف مخزن به صورت دستی با ماسه پر شده و از ارتفاع ۲۰ سانتی‌متر به بعد با استفاده از سیستم الک مخصوص، بارش ماسه انجام و بستر یکنواخت ماسه آماده شد.

۲-۵- نحوه مدل‌سازی و انجام آزمایش

به‌منظور یکسان بودن شرایط آزمایش‌ها از نظر زاویه و نقطه اثر اعمال بار، محل قرارگیری مدل شمع بعد از بارش ماسه، دقیقاً در مرکز مخزن و هم سطح با وجه بالایی مخزن اجرا شد. مدل شمع‌ها به‌صورت کاملاً قائم تا پایان بارش ماسه در مخزن نگه‌داشته شد. بعد از ریختن خاک زیر شمع، سطح خاک با خط‌کش صاف و در گام بعدی شمع در محل مورد نظر روی سطح خاک قرار گرفته و با سیم مفتول به صورت ضربدری در گوشه‌های مخزن مهار شد. سپس با قرار دادن الک مخصوص در فاصله ۵۰ سانتی‌متری از سطح خاک به‌صورت افقی، ریزش ماسه انجام گرفت. با توجه به مدرج بودن طلق دیواره مخزن، بعد از رسیدن ارتفاع لایه به ۵ سانتی‌متر، الک ۵ سانتی‌متر جابه‌جا شده و بارش ماسه ادامه یافت. به‌منظور کنترل صحت میزان دانسیته نسبی خاک، تعدادی ظروف مخصوص دانسیته در گوشه‌های مخزن قرار گرفته و پس از اتمام مدل‌سازی و انجام آزمایش، وزن مخصوص بستر ماسه توسط دانسیته ماسه درون ظروف، کنترل شد. با باز کردن سیم مفتول به‌آرامی و بدون اینکه نیرو یا تغییرشکلی به شمع وارد شود، کلاهک مخصوص اندازه‌گیری تغییرمکان شمع برروی سرشمع نصب گردید. سیم مخصوص کشش (با مقاومت بالا) از یک طرف به پیچ نیروسنج و از طرف دیگر به پیچ حلقه نصب شده در سرشمع متصل شد. دو عدد جابه‌جایی‌سنج جهت اندازه‌گیری جابه‌جایی‌های قائم و افقی، با کمک گیره‌های مغناطیسی در محل‌های موردنظر مستقر شد. پس از تکمیل فرآیند مدل‌سازی و تنظیم فشار هیدرولیکی و سرعت بارگذاری دستگاه، مقادیر نیرو و جابه‌جایی توسط داده‌نگار به رایانه ارسال و ثبت شد. زمان انجام هر آزمایش به‌طور متوسط ۳۰ الی ۴۰ دقیقه به طول انجامد. پس از انجام هر آزمایش، خاک درون مخزن خارج شده و مجدداً مخزن برای آزمایش بعدی مطابق با روند مذکور پر شد. برخی از آزمایش‌های انجام شده در این تحقیق برای کنترل صحت انجام فرآیند مدل‌سازی‌ها و دقت نتایج، تکرار شد.

۳- نتایج مدل‌سازی‌ها

به‌منظور مطالعه رفتار کششی انواع شمع‌های ساده و پافیلی در معرض بارگذاری‌های مختلف، آزمایش‌های مدل فیزیکی انجام و پاسخ‌های بار- جابه‌جایی به‌ازای پارامترهای مختلف ارائه شد. در شکل (۶) نمای شماتیک مدل‌های شمع ساده و پافیلی به‌همراه پارامترهای مختلف طول، قطر شمع، قطر قسمت پافیلی، محور شمع و زاویه اعمال بارگذاری نمایش داده شده است. جهت ساده‌سازی در تحلیل و مقایسه نتایج، اسامی آزمایش‌ها با شماره‌های اختصاری تعریف شدند؛ بدین صورت که شماره‌ها به‌ترتیب از سمت چپ، مقادیر طول، قطر و قطر قسمت پافیلی شمع را به سانتی‌متر نشان می‌دهد. نمونه‌ای از نتایج پاسخ بار- جابه‌جایی (جابه‌جایی افقی و محوری) مدل‌های شمع ساده و پافیلی، به‌ازای پارامترهای مختلف در شکل‌های (۷) و (۸) ارائه شده است. برای تعیین بار نهایی مدل‌های شمع از روش بار حداکثر

و تغییر شیب منحنی استفاده شد؛ به‌طوری‌که ظرفیت کششی نهایی شمع به‌عنوان بار متناظر با نقطه‌ای از نمودار بار- جابه‌جایی در نظر گرفته شد که با رسیدن به مقدار حداکثر، شیب منحنی تغییر می‌کند. به‌عبارت دیگر، گسیختگی نهایی در نقطه‌ای که بدون افزایش بار، جابه‌جایی پیوسته افزایش می‌یابد، تعیین شد.

برای بارگذاری‌های مایل، با مقایسه بارهای نهایی به‌ازای جابه‌جایی‌های افقی و محوری، مقادیر بار نهایی کمتر به‌عنوان بار نهایی شمع در نظر گرفته شد. با توجه به این‌که گسیختگی جانبی خاک اطراف شمع زودتر از حالت قائم رخ داده و مدل شمع بار کمتری را تحمل می‌کند، بنابراین بار نهایی برای زوایای بارگذاری ۳۰، ۶۰، ۹۰ درجه از نمودار بار- جابه‌جایی افقی و برای حالت زاویه صفر درجه از نمودار بار- جابه‌جایی قائم تعیین شد.

مطابق شکل (۷)، برای مدل شمع ساده ۲-۴۰ (طول شمع ۴۰ سانتی‌متر و قطر شمع ۲ سانتی‌متر) بار نهایی شمع در حالت کشش قائم (α=۰)، از نمودار بار- جابه‌جایی محوری به‌دست آمد که برابر با مقدار ۲۱۱ نیوتن است. همچنین حداکثر بار کششی در برابر جابه‌جایی محوری مدل شمع ۲-۴۰ در حالت (α=۳۰)، (α=۶۰) و (α=۹۰)، به‌ترتیب برابر ۱۹۱، ۲۰۱ و ۱۶۶ نیوتن به‌دست آمده است. جابه‌جایی محوری متناظر با بارهای نهایی در زوایای مختلف، حدود ۱/۰۵ میلی‌متر است. ملاحظه می‌شود که بیشترین بار کششی در مدل شمع مذکور، به‌ترتیب به‌ازای حالت قائم، (α=۶۰)، (α=۳۰) و (α=۹۰) به‌دست آمده است

شکل ۶- نمای شماتیک شمع ساده، پافیلی و پارامترهای مختلف

شکل ۷- نمودار بار- جابه‌جایی شمع ۲-۴۰؛ الف) جابه‌جایی محوری، ب) جابه‌جایی افقی (d=2 cm و L=40 cm)

از مقایسه نمودارهای بار در برابر جابه‌جایی‌های قائم و افقی، مشاهده می‌شود که بار نهایی مدل شمع ۲-۴۰ در حالت مایل و افقی به‌ازای نمودارهای بار- جابه‌جایی افقی به‌دست می‌آید که برای زوایای ۳۰، ۶۰ و ۹۰ درجه به‌ترتیب برابر با ۱۷۸/۵، ۱۹۱ و ۱۵۷/۵ نیوتن است. جابه‌جایی افقی متناظر با بارهای نهایی در زوایای فوق حدوداً برابر ۱/۰۵ میلی‌متر است.

شکل ۸- نمودار بار- جابه‌جایی شمع ۵-۲-۴۰: الف) جابه‌جایی محوری، ب) جابه‌جایی افقی (L=40cm, d=2cm و B=5cm)

برای مدل پافیلی ۵-۲-۴۰ (طول شمع ۴۰ سانتی‌متر، قطر شمع ۲ سانتی‌متر و قطر قسمت پافیلی ۵ سانتی‌متر) بار نهایی شمع در حالت (α=۰)، از نمودار بار- جابه‌جایی محوری تعیین شد که برابر با ۳۹۳ نیوتن و جابه‌جایی متناظر با آن نیز حدود ۱/۱۵ میلی‌متر است. همچنین حداکثر بار کششی در برابر جابه‌جایی محوری مدل شمع در حالت‌های (α=۳۰)، (α=۶۰) و (α=۹۰)، به‌ترتیب ۳۱۰، ۳۵۶ و ۲۸۱ نیوتن و به‌ازای میزان جابه‌جایی حدود ۱/۱۵ میلی‌متر به‌دست آمد. برای مدل شمع پافیلی نیز همانند مدل ساده، بیشترین بار کششی به‌ترتیب در حالت‌های قائم، (α=۶۰)، (α=۳۰) و (α=۹۰) به‌دست آمد.

از مقایسه نمودارهای بار در برابر جابه‌جایی قائم و افقی، ملاحظه می‌شود که بار نهایی مدل شمع ۵-۲-۴۰ در حالت مایل و افقی، از نمودارهای بار- جابه‌جایی افقی به‌دست می‌آید که به‌ازای زوایای ۳۰، ۶۰ و ۹۰ درجه به‌ترتیب برابر ۲۱۱، ۲۳۲ و ۱۷۶ نیوتن است.

به‌منظور مقایسه بهتر رفتار کششی شمع پافیلی نسبت به شمع ساده، مطابق شکل (۹) نمودار بار- جابه‌جایی شمع‌های با قطر پافیلی مختلف ارائه شده است. مقایسه نتایج ظرفیت کششی نشان می‌دهد که به‌ازای همه زوایای بارگذاری، با افزایش قطر شمع در انتهای آن، مقادیر بار کششی به‌طور قابل‌توجهی افزایش یافته و میزان جابه‌جایی موردنیاز برای بسیج مقاومت افزایش جزئی داشته است. تحلیل کمّی نتایج و تأثیر پارامترهای مختلف بر مقادیر ظرفیت کششی در بخش‌های بعدی ارائه شده است.

شکل ۹- پاسخ بار- جابه‌جایی شمع‌های با قطر پافیلی مختلف

۴- بحث و بررسی نتایج

در این بخش از مقاله، نتایج حاصل از تحقیق مورد تفسیر و بررسی قرار گرفته و تأثیر پارامترهای مختلف بی‌بعد شامل نسبت طول به قطر شمع (L/d)، نسبت قطر پافیلی به قطر شمع (B/d) و زاویه امتداد بارگذاری (α) بر مقادیر ظرفیت باربری شمع ساده و پافیلی ارزیابی می‌شود.

۴-۱- اثر نسبت طول به قطر شمع

به‌منظور مقایسه بهتر تأثیر طول شمع بر افزایش مقادیر ظرفیت کششی مدل‌های شمع، از پارامترهای بدون بعد نسبت طول به قطر شمع (L/d) و نسبت بهبود بار کششی در نمودارها استفاده شد. شکل (۱۰) تأثیر افزایش طول شمع و اثر نسبت L/d بر مقدار بهبود ظرفیت کششی شمع‌های ساده را به‌ازای قطر و طول‌های مختلف شمع نشان می‌دهد. ملاحظه می‌شود که به‌ازای همه زوایای بارگذاری، بار نهایی با افزایش نسبت L/d افزایش یافته و باعث بهبود ظرفیت کششی تا ۱۹ برابر در ازای تغییر ۴ برابری L/d بسته به پارامترهای مختلف شده است. با توجه به مشارکت فشار جانبی خاک اطراف شمع در افزایش باربری متناسب با افزایش طول شمع، تغییر طول شمع تأثیر بیشتری در میزان بهبود ظرفیت کششی با افزایش زاویه بارگذاری را ارائه می‌دهد. بنابراین در زوایای بارگذاری مایل، استفاده از شمع‌های با طول بزرگ‌تر، کارآیی و بهره‌وری بیشتری نسبت به حالت بار قائم دارد.

شکل ۱۰- نسبت بهبود بار کششی در برابر نسبت *L/d* شمع ساده

۴-۲- اثر نسبت قطر پافیلی به قطر شمع

با بررسی تأثیر نسبت قطر شمع به قطر پافیلی (*B/d*)، می‌توان میزان کارآمدی قسمت پافیلی را در افزایش مقادیر ظرفیت باربری محوری، مایل و جانبی شمع به‌دست آورد. بنابراین تأثیر نسبت *B/d* بر میزان بهبود ظرفیت کششی به‌ازای دو نسبت *B/d* برابر با ۵ و ۱۰ مورد تحلیل قرار گرفته و نمودارهای نسبت بهبود بار کششی ارائه شد. شکل‌های (۱۱) و (۱۲) به‌ترتیب مقادیر بار نهایی و نسبت بهبود ظرفیت کششی شمع‌های پافیلی را در برابر نسبت *B/d* نشان می‌دهد که بیانگر میزان افزایش بار نهایی شمع‌های پافیلی نسبت به شمع ساده است. ملاحظه می‌شود که ظرفیت کششی با افزایش قطر قسمت انتهای شمع ساده (قسمت پافیلی)، به‌ازای همه زوایای بار افزایش می‌یابد. بیشترین بهبود در تأثیر افزایش قطر پافیلی شمع، به‌ازای زاویه صفر درجه (بالارانش قائم) مشاهده شد.

شکل ۱۱- مقادیر بار کششی نهایی در برابر نسبت B/d

شکل ۱۲- نسبت بهبود بار کششی در برابر نسبت‌های *B/d*

همچنین مقایسه نتایج نشان داد که به‌ازای نسبت‌های *B/d* یکسان و قطرهای متفاوت شمع (*d*)، با افزایش قطر شمع از مقدار یک به ۲ برابر، مقادیر بهبود بار کششی کاهش یافته است. نتیجه به‌دست آمده در رابطه با کاهش بهبود بار شمع پافیلی با افزایش قطر *d*، با نتایج گزارش شده توسط Nazir و همکاران (۲۰۱۵) مطابقت دارد.

۴-۳- زاویه امتداد بارگذاری

همان‌طوری که از نمودارهای بار- جابه‌جایی در شکل‌های (۷) و (۸) ملاحظه شد، با افزایش زاویه بار از صفر به ۹۰ درجه، مقادیر باربری کششی کاهش یافت. با بررسی تأثیر زاویه امتداد بار بر نتایج ظرفیت کششی مشاهده شد که برای هر دو مدل شمع ساده و پافیلی، کم‌ترین میزان بار کششی قابل تحمل، در حالت بارگذاری جانبی (*α*=۹۰)، رخ داده (گسیختگی جانبی خاک اطراف شمع) و بیشترین بار کششی نیز در حالت قائم (*α*=۰) به‌دست آمد (گسیختگی محوری خاک اطراف شمع). هنگامی که بار کششی از حالت قائم خارج می‌شود (*α*=۳۰)، بار نهایی قابل تحمل توسط سیستم خاک- شمع به‌طور محسوسی کاهش می‌یابد. دلیل این کاهش، در اولویت قرار گرفتن گسیختگی جانبی خاک نسبت به گسیختگی محوری است. با افزایش بیشتر زاویه اعمال بار (*α*=۶۰)، باز هم گسیختگی جانبی خاک سریع‌تر از گسیختگی محوری رخ می‌دهد، با این تفاوت که مقاومت جانبی خاک کمی بیشتر از حالت قبل می‌شود (در اصطلاح بدنه شمع هنگام بیرون کشیده شدن، به خاک تکیه می‌کند) و این عامل فرصت بسیج شدن مقاومت جانبی خاک را قبل از گسیختگی فراهم می‌کند. در این حالت نسبت به حالت کاملاً افقی (*α*=۹۰)، هر دو عامل مقاومت جانبی و محوری خاک در برابر بار کششی

بسیج شده و در نتیجه شمع مقاومت بیشتری را نسبت به حالت بار افقی، نشان می‌دهد.

شکل (۱۳) نمودار بار نهایی در برابر زوایای بارگذاری ۰، ۳۰، ۶۰ و ۹۰ درجه را به‌ازای دو مدل شمع ساده و پافیلی با طول ۴۰ سانتی‌متر نشان می‌دهد. همانطور که ملاحظه می‌شود، بار نهایی هر دو شمع در زاویه (α=۰) حداکثر است. برای حالت زاویه (α=۳۰) مقدار بار کاهش و سپس در زاویه (α=۶۰) مقداری افزایش می‌یابد و نهایتاً در زاویه (α=۹۰) بار نهایی به حداقل مقدار ممکن می‌رسد. تعیین زاویه بحرانی در شمع‌ها که حداکثر بار کششی مایل نهایی شمع در این زاویه رخ می‌دهد، می‌تواند باعث افزایش کارآمدی و بهره‌وری این نوع شمع‌ها در فرایند طراحی و اجرا شود. بر اساس تحلیل نتایج، حداکثر بار نهایی کششی در شمع‌های با طول بلند (L=40 cm) و تحت زوایای مایل بارگذاری به‌ازای زاویه بحرانی ۶۰ درجه به‌دست آمد. برای شمع‌های با طول ۱۰ سانتی‌متر به‌علت ناکافی بودن طول شمع در بسیج کردن مقاومت جانبی خاک اطراف شمع در بارگذاری‌های مایل، زاویه بحرانی که حداکثر مقاومت کششی را داشته باشد، مشاهده نشد.

شکل ۱۳- نمودار بار نهایی در برابر زوایای مختلف اعمال بار

۴-۴- بررسی میزان نسبت جابه‌جایی شمع

با تبدیل شمع ساده به پافیلی، علاوه بر افزایش قابل‌ملاحظه بار نهایی در تمامی زوایای اعمال بار، جابه‌جایی متناظر نیز افزایش می‌یابد. شکل (۱۴) نمودار تغییرات بار در برابر پارامتر بی‌بعد نسبت جابه‌جایی به قطر شمع، برای مدل‌های شمع پافیلی را نمایش می‌دهد. ملاحظه می‌شود که جهت بسیج شدن مقاومت کششی شمع، نسبت جابه‌جایی به قطر شمع متناظر با بار نهایی شمع، با افزایش قطر پافیلی افزایش می‌یابد. با این حال، میزان افزایش بار در مقایسه با افزایش جزئی نسبت جابه‌جایی (کم‌تر از ۹٪)، با افزایش قطر پافیلی شمع قابل‌توجه بوده و استفاده از این نوع شمع را توجیه‌پذیر می‌کند.

شکل ۱۴- تغییرات بار کششی نهایی برحسب نسبت جابه‌جایی

۴-۵- صحت‌سنجی نتایج با روابط نظری

به‌منظور صحت‌سنجی و بررسی دقت نتایج مدل‌سازی فیزیکی کوچک‌مقیاس، نتایج بار کششی تعدادی از مدل‌های مختلف شمع با مقادیر متناظر به‌دست آمده از روابط نظری موجود در مراجع معتبر مورد مقایسه قرار گرفت. روابط نظری مورد استفاده در تعیین ظرفیت کششی شمع‌ها شامل؛ روابط Das (۱۹۹۹) برای بار قائم شمع ساده، Meyerhof و Adams (۱۹۶۸) برای بار قائم شمع پافیلی، Chattopadhyay و Pise (۱۹۸۶) برای شمع‌های تحت بار مایل و Broms (۱۹۶۴) برای شمع‌های در معرض بارگذاری جانبی هستند. جدول (۲) مقایسه نتایج آزمایشگاهی و نظری مدل‌های مختلف شمع را نشان می‌دهد. بر پایه مقایسه کمّی نتایج ملاحظه می‌شود که نتایج بار کششی مدل‌های آزمایشگاهی و روابط نظری تطابق نسبتاً خوبی باهم دارند، به‌طوری‌که متوسط اختلاف نتایج کم‌تر از ۸٪ است. شکل (۱۵) نیز مقایسه نتایج برخی از مدل‌ها را به‌صورت نموداری نشان می‌دهد.

جدول ۲- مقایسه نتایج مدل‌های آزمایشگاهی و نظری شمع

مدل شمع	بار نهایی (نیوتن)					
	(α=۰°)		(α=۶۰°)		(α=۹۰°)	
	آزمایش	نظری	آزمایش	نظری	آزمایش	نظری
۱۰-۱	۸	۵	۶	۷	۴	۵
۱۰-۱-۵	۳۳	۳۱	۱۲	۱۱	۷	۷
۱۰-۱-۱۰	۶۶	۷۰	۲۱	۲۴	۱۳	۱۱
۱۰-۲-۵	۴۱	۳۷	۱۷	۱۵	۱۱	۱۲
۱۰-۲-۱۰	۸۳	۷۵	۲۸	۳۱	۱۶	۱۶
۴۰-۱	۹۹	۹۷	۹۳	۱۰۲	۸۱	۸۳
۴۰-۱-۵	۲۶۲	۲۸۵	۱۱۲	۱۱۴	۸۸	۸۹
۴۰-۱-۱۰	۶۷۴	۷۶۵	۱۵۲	۱۵۰	۱۰۸	۱۰۹
۴۰-۲	۲۱۱	۱۹۲	۱۹۱	۱۹۷	۱۵۸	۱۶۷
۴۰-۲-۵	۳۹۳	۴۰۴	۲۳۲	۲۲۵	۱۷۶	۱۷۳
۴۰-۲-۱۰	۷۱۰	۷۷۱	۲۵۲	۲۵۸	۱۸۹	۱۹۱

شکل ۱۵- مقایسه تغییرات مقادیر بار نهایی مدل آزمایشگاهی و روابط نظری

۵- نتیجه‌گیری

هدف اصلی در این تحقیق مطالعه و ارزیابی تأثیر پافیلی کردن شمع بر ظرفیت کششی شمع‌های ساده تحت بارگذاری با زوایای مختلف بود. به‌همین منظور مدل‌های شمع دایره‌ای کوچک‌مقیاس در آزمایشگاه با بررسی تأثیر پارامترهای مختلف طول شمع، قطر شمع، قطر پافیلی شمع، زاویه امتداد بار کششی مدل‌سازی شده و پاسخ بار- جابه‌جایی به‌دست آمد. براساس تحلیل نتایج و ارزیابی تأثیر پارامترهای مورد مطالعه، خلاصه موارد ذیل به‌عنوان نتیجه‌گیری تحقیق ارائه می‌شود:

• در بارگذاری مدل‌های شمع در همه حالت‌ها گسیختگی خاک نسبت به شمع رخ داده و در مدل‌های تحت بار مایل، گسیختگی جانبی خاک اطراف شمع نسبت به گسیختگی محوری خاک، سریع‌تر به‌دست آمد. ظرفیت باربری شمع در بارگذاری مایل، حاصل ظرفیت باربری محوری به‌علاوه مقدار کمی از مقاومت جانبی بسیج شده خاک اطراف شمع است. با توجه به کوچک بودن تغییرمکان‌های خاک اطراف شمع در لحظه گسیختگی، مکانیسم گسیختگی قابل رویت نبود.

• مقایسه پاسخ بار- جابه‌جایی مدل‌های شمع نشان می‌دهد که با تبدیل شمع ساده به پافیلی، مقادیر بار کششی به‌طور قابل‌توجهی افزایش یافته و میزان جابه‌جایی موردنیاز برای بسیج مقاومت افزایش جزئی دارد. جابه‌جایی متناظر با گسیختگی شمع ساده و پافیلی به‌ترتیب حدود ۵٪ و ۶٪ قطر شمع به‌دست آمد.

• افزایش طول شمع ساده باعث افزایش قابل‌توجه مقادیر ظرفیت کششی شمع به‌ویژه شمع‌های تحت بارگذاری مایل می‌شود؛ بار نهایی با افزایش چهار برابری نسبت L/d، تا ۱۹ برابر بسته به پارامترهای مختلف بهبود نشان داد.

• با توجه به مشارکت فشار جانبی خاک اطراف شمع در افزایش ظرفیت کششی شمع تحت زوایای بار مایل متناسب با افزایش طول شمع، استفاده از شمع‌های با طول بزرگ‌تر، کارآیی و بهره‌وری بیشتری نسبت به حالت بار قائم دارد.

• ظرفیت کششی شمع با افزایش قطر قسمت انتهایی شمع (قسمت پافیلی)، به‌ازای همه زوایای بار در محدوده ۲-۸ برابر افزایش یافت. بیشترین بهبود تأثیر افزایش قطر پافیلی شمع، به‌ازای زاویه صفر درجه (بالارانش قائم) مشاهده شد.

• به‌ازای نسبت‌های B/d یکسان با افزایش قطر شمع ساده (d)، مقادیر بهبود بار کششی شمع به‌طور جزئی کاهش یافت.

• با افزایش زاویه بارگذاری کششی از صفر به ۹۰ درجه، مقادیر باربری کششی کاهش یافت؛ برای مدل‌های شمع، کم‌ترین میزان بار کششی برای حالت بارگذاری جانبی (α=۹۰) و بیشترین بار نیز در حالت قائم (α=۰) به‌دست آمد. در بالارانش قائم، عوامل مقاومت در برابر گسیختگی شمع شامل وزن شمع، اصطکاک بین خاک و شمع و وزن خاک بالای قسمت پافیلی آن است. با خارج شدن بار از حالت محوری، گسیختگی جانبی خاک غالب شده و قبل از انسجام خاک اطراف شمع برای رسیدن به حداکثر ظرفیت باربری محوری، گسیختگی رخ می‌دهد. در زوایای بار بزرگ‌تر، مقاومت جانبی خاک نیز در تأمین ظرفیت باربری شمع مشارکت می‌کند.

• تحلیل نتایج نشان داد که حداکثر بار نهایی کششی در شمع‌های با طول بیشتر و تحت زوایای مایل بارگذاری، به‌ازای زاویه بحرانی ۶۰ درجه به‌دست آمد. در حالی‌که برای شمع‌های با طول کوتاه‌تر، به‌علت ناکافی بودن طول شمع در بسیج کردن مقاومت جانبی خاک اطراف شمع در بارگذاری‌های مایل، هیچ زاویه بحرانی مشاهده نشد.

• مقایسه کمّی نتایج مدل‌سازی فیزیکی مدل‌های شمع با روابط نظری موجود جهت اعتبارسنجی نتایج تحقیق، نشان داد که نتایج بار کششی مدل‌های آزمایشگاهی و روابط نظری تطابق نسبتاً خوب و قابل‌قبولی باهم دارند که بیانگر دقت و صحت مدل‌سازی و نتایج حاصله است.

۶- مراجع

فخاریان ک، اسلامی ا، "ظرفیت باربری محوری شمع‌ها"، انتشارات پژوهشکده حمل و نقل، ۲۴۱، ۱۳۸۴.

Abdel-Rahman K, Achmus M, “Numerical Modelling of the Combined Axial and Lateral Loading of Vertical Piles”, Institute of Soil Mechanics & Foundation Engineering and Waterpower Engineering, University of Hannover, Germany, 2006.

ASTM 2006, “Standard practice for classification of soils for engineering purposes (Unified Soil

Meyerhof GG, Adams JI, "The Ultimate Uplift Capacity of Foundations", Canadian Geotechnical Journal, 1968, 5 (4), 225-244.

Moayedi H, Mosallanezhad M, "Uplift resistance of belled and multi-belled piles in loose sand", Measurement, 2017, 109, 346-353.

Nazir R, Moayedi H, Pratikso A, Mosallanezhad M, "The uplift load capacity of an enlarged base pier embedded in dry sand", Arabian Journal of Geosciences, 2015, 8, 7285-7296.

Niroumand H, Kassim KHA, Ghafooripour A, Nazir A, "Uplift Capacity of Enlarged Base Piles in Sand", EJGE, 2012, 17 (R), 2721-2737.

Patra NR, Deograthias M, James M, "Pullout Capacity of Anchor Piles", Indian Geotechnical Conference IGC, 2005.

Rad NS, Tumay MT, "Factors affecting sand specimen preparation by raining", Geotechnical Testing Journal, 1987, 10 (1), 31-37.

Salgado R, "The Axial Resistance of Nondisplacement Piles", Art of Foundation Engineering Practice Congress, West Palm Beach, Florida, United States, 2010.

Tehrani FS, Salgado R, Prezzi M, "Analysis of Axial Loading of Pile Groups in Multilayered Elastic Soil", International Journal of Geomechanics, 2016, 16 (2).

Wen SL, "Failure Behavior of Belled Pile under Combined Loads", Advances in Soil Dynamics and Foundation Engineering Conference, Shanghai, China, May 26-28, 2014.

Classification System)", ASTM standard D2487, West Conshohocken, PA, 2006.

Azzam WR, Elwakil AZ, "Model Study on the Performance of Single-Finned Pile in Sand under Tension Loads", International Journal of Geomechanics, 2017, 17 (3).

Baki B, Ahmet D, Mustafa L, Bahadır O, Talha S, "An Investigation of Uplift Behavior of Vertical Piles Embedded in Reinforced Sand under Inclined Loads", 2nd International Balkans Conference on Challenges of Civil Engineering, BCCCE, 23-25 May, Epoka University, Tirana, Albania, 2013.

Broms BB, "Lateral Resistance of Piles in Cohesive Soils", Journal of the Soil Mechanics and Foundations Division, ASCE, 1964, 90, 27-63.

Chattopadhyay BC, Pise PJ, "Uplift Capacity of Piles in Sand", Journal of Geotechnical Engineering, 1986, 112 (9), 888-903.

Chen JY, Gilbert RB, Puskar FJ, Verret S, "Case Study of Offshore Pile System Failure in Hurricane Ike", Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, 2013, 139 (10), 1699-1708.

Das BM, "Principles of Foundation Engineering", 4th Edition, PWS Publishing Company, Pacific Grove, USA, 821p, 1999.

Dickin EA, "Uplift behaviour of horizontal anchor plates in sand", Journal of Geotechnical Engineering, ASCE, 1988, 114 (11), 1300-1317.

Faizi K, Kalatehjari R, Nazir R, Rashid ASA, "Determination of pile failure mechanism under pullout test in loose sand", Journal of Central South University, 2015, 22, 1490-1501.

Han F, Prezzi M, Salgado R, Zaheer M, "Axial Resistance of Closed-Ended Steel-Pipe Piles Driven in Multilayered Soil", Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, 2017, 143 (3).

Kong, GQ, "Performances of Compressive Capacity for Belled Wedge Pile Group", in: Advances in Building Materials, Pts 1-3, Trans Tech Publications Ltd, Stafa-Zurich, 2011, 1084-1088.

Kong GQ, Yang Q, Liu HL, Liang RY, "Numerical Study of a New Belled Wedge Pile Type under Different Loading Modes," European Journal of Environmental and Civil Engineering, 2013a, 17 (S1), 65-82.

Kong GQ, Cao ZH, Zhou H, Sun XJ, "Analysis of Piles Under Oblique Pullout Load Using Transparent-Soil Models", Geotechnical Testing Journal, 2015, 38 (5), 725-738.

LoPresti, DCF, Pedroni S, Crippa V, "Maximum dry density of cohesionless soils by pluviation and by ASTM D 4253-83: A comparative study", Geotechnical Testing Journal, 1992, 15 (2), 180-189.

Lutenegger AJ, "Uplift Tests on Shallow Cast-in-Place Enlarged Base Pedestal Foundations in Clay", IFCEE, San Antonio, Texas, 2015.

Mandal AK, Patra NR, Pise PJ, "Behaviour of Enlarged Base Piles in Sand under Oblique Pullout Loads", Indian Geotechnical Journal, 2002, 32 (4), 382-394.

Meyerhof GG, "Uplift Resistance of Inclined Anchors and Piles", Proceedings of the 8th International Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering, Moscow, 167-172, 1973.

University of Tabriz

Journal of Civil and Environmental Engineering
Volume 51 (2021), Issue 1 (Spring), 99-109

EXTENDED ABSTRACT

Experimental Investigation of Load- Displacement Behavior of Enlarged Base Piles under Oblique Tension Loadings in Sandy Soil

Masoud Makarchian*[a], Erfan Matini [b], Sajjad Gholipour [b]

[a] *Faculty of Engineering, Bu-Ali Sina University, Hamedan*
[b] *Civil Engineering Department, Faculty of Engineering, Bu-Ali Sina University, Hamedan*

Received: 09 June 2016; **Accepted:** 09 September 2019

Keywords:
Laboratory models, Enlarged base pile, Oblique load, Pile bearing capacity, Critical angle.

1. Introduction

One of the most used deep foundations is piles. The piles are tall members that are used to transfer the foundation loads from the weak layers of the soil to the ground at a deeper and stronger layer. In some structures, the piles may be exposed to uplift forces, including those subjected to extreme overturning moments, such as power towers or docks. During numerical modeling in relation to vertical pile under axial load, it was observed that the axial load-bearing capacity of the pile was reduced at the presence of lateral loading (Abdel-Rahman and Achmus, 2006). For the pile under load, the ultimate vertical load ratio (P_u) to the lateral loading (P_L) was greater than 1, with a maximum resistance to load times, when the load angle was 30 degrees. The ratio P_u/P_L was between 0.18 and 0.72, and for the angle of 60 degrees, P_u/P_L less than 0.18 ratio, the ratio value is maximized at 90 degrees (Chattopadhyay and Pise, 1986). Baki et al. (2013) reported that the optimal load bearing of the piles under tensile loading is achieved in rough piles in anchored sand. By changing the angle of application of the tensile loading from zero to 60 degrees relative to the vertical, the pile frictional resistance only turns to the side resistance with the lateral side of the earth, and both components contribute to the final capacity. The study of piles behavior under oblique tension loadings showed that tensile loads are depending on the buried length ratio (L/d), the ratio of the enlarged base diameter to the pile diameter (B/d), the loading angle (α) and the relative density of the soil around the pile (D_r). The ultimate resistance of pile increases with increasing the ratios of (L/d), (B/d) and soil density. The analysis of the results showed that the critical angle (α_{cr}) which the pile reaches its maximum tensile strength depends on the ratio (L/d), (B/d) and soil density (Mandal et al., 2002). The tensile load capacity of the buried enlarged base pile in the sand was studied using physical modeling tests. Analysis of the results showed that the uplift tensile capacity of pile increases significantly with increasing the ratio of buried length to pile diameter more than two and also, increasing the relative density of the sand. The results also showed that the increase in the pile diameter leads to the tensile load of the pile (Nazir et al., 2015). A series of laboratory studies and numerical analysis of finite element were performed to evaluate the efficiency of enlarged base piles with increasing cross-section at different levels of the pile length in order to improve its uplift capacity. The results of the study showed that with increasing the cross-section of the pile at different levels, the tensile capacity of piles increased, and the amount of sand deformation around the pile decreased (Moayedi and Mosallanezhad, 2017).

In this paper, the tensile performance of circular piles on sand beds was investigated by small-scale laboratory experiments under oblique forces. Various parameters of simple and enlarged base pile models were evaluated, including the length of the pile (L), the diameter of the pile (d), the diameter of the enlarged base pile (B) and the loading angle (α).

* Corresponding Author
E-mail addresses: makarchian@yahoo.com (Masoud Makarchian), erfan_matini@yahoo.com (Erfan Matini), sgholipour63@gmail.com (Sajjad Gholipour).

2. Methodology

Fig. (1-a) shows the loading apparatus, which was made at Bu-Ali Sina University. The 60*60*60cm soil chamber is located on the bottom of the frame. In Fig. (1-b) horizontal and vertical displacement gauges have been shown, and in Fig. (1-c) the enlarged base model piles are shown. The model piles are kept completely vertical with wires, until the end of sand raining in the soil chamber. After pouring the soil around the pile, the soil surface is completely flattened with a steel ruler. In the next step, the pile is placed on the surface of the soil at the desired location. Two LVDTs are provided with the help of magnetic clips in the desired locations, and their tips are tangent to the surface of the pile cap. After adjusting the device's hydraulic pressure and loading speed (displacement rate), running the software for recording data on the computer, introducing the calibration file into the software, and zeroing the number and electronic displacement, by turning on the electric motor, the test begins and the corresponding values of the force transfers will be saved by computer. The type of soil used is a dry fine silica sand. This sand is a poorly degraded sand and classified according to the unified classification system as SP ($C_{u=}$ 1.44 and C_c=1.16).

(a) (b) (c)

Fig. 1. Photoghraphs of: a) Modeling apparatus, b) Horizontal and vertical LVDTs, c) Enlarged base pile model

3. Results and discussion

In order to study the tensile behavior of different types of simple and enlarged base piles exposed to different loading, physical model experiments were carried out and load-displacement responses were presented for various parameters. The typical results of load-displacement response (horizontal and axial displacement) of pile models are presented in Figure 2 in terms of different parameters. To determine the final load of pile models, the maximum load method and the constant slope were used. The tensile load values verses displacement of pile models of 40-2 and 40-2-5 (pile length=40 cm, pile diameter=2 cm, and enlarged base pile diameter=5 cm) are shown in Figure 2 for different angles of oblique loading. The ultimate load of the pile for different loading angles (α =0˚, vertical loading, 30˚, 60˚, and 90˚, lateral loading) are 211, 191, 201, and 166 N, respectively for 40-2 model and 393, 211, 232, and 176 N for 40-2-5 model.

Comparison of the tensile strength results shows that for all loading angles, with increasing diameter of the pile at its end (base), tensile load values were significantly increased and the amount of displacement needed for resistance mobilization was slightly increased.

3.1. Effect of the ratio of length to diameter of piles

The results analysis showed that for all loading angles, the ultimate load increases with an increase in L/d ratio and leads to the improvement of tensile strength up to 19 times for a change of 4 times of L/d values, depending on different parameters. For the oblique angles of loading, the use of larger-length piles has more efficiency than the vertical loading.

Fig. 2. Load- axial displacement diagram of the piles (d=2 cm, B=5 cm, and L=40 cm)

3.2. Effect of the ratio of enlarged base diameter to pile diameter

Based on the analysis of test results, it was observed that the tensile capacity increases with increasing diameter of the end of a simple pile (enlarged base of the pile), for all loading angles. The maximum improvement was obtained in the uplift case (loading with a zero angle). Also, the comparison of the results showed that for the same values of *B/d* ratio, with the increasing in the diameter pile from 1 to 2 times, the improvement values of tensile capacity decreased.

4. Conclusions

From this experimental study, the following important conclusions are obtained:

1. In all experimental studies, the ultimate loading of piles was due to soil failure, and rupture of the pile material is not occurred. The lateral failure of the soil around the pile is faster than its axial failure, and the most load-bearing capacity of the pile is generally derived from axial bearing capacity, plus a small amount of mobilized side resistance of the soil around the pile.
2. The displacement corresponding to the pile failure was about 5% -6% of pile diameter for simple and enlarged base piles.
3. With increasing tensile loading angle from zero to 90 degrees, tensile load values were reduced; for pile models, the minimum load was obtained for lateral loading (α=90°) and the maximum load was observed in the vertical position (α=0°).
4. For both conventional and enlarged base piles with a length to diameter ratio of 20, the angle at which the maximum bearing capacity of the pile under oblique loading is 60˚.
5. The comparison of the physical modeling results of pile models with those of theoretical relationships for validating the results of the research showed that the tensile capacities obtained from the experimental models and theoretical relationships have a relatively good and acceptable correlation, which indicates the accuracy of the modeling and its results.

5. References

Abdel-Rahman K, Achmus M, "Numerical Modelling of the Combined Axial and Lateral Loading of Vertical Piles", Institute of Soil Mechanics, Foundation Engineering and Waterpower Engineering, University of Hannover, Germany, 2006.

Baki B, Ahmet D, Mustafa, L, Bahadır O, Talha S, "An Investigation of Uplift Behavior of Vertical Piles Embedded in Reinforced Sand under Inclined Loads", 2nd International Balkans Conference on Challenges of Civil Engineering, BCCCE, 23-25 May, Epoka University, Tirana, Albania, 2013.

Chattopadhyay BC, Pise PJ, "Uplift Capacity of Piles in Sand, Journal of Geotechnical Engineering", 1986,112, 9, 888-903.

Mandal AK, Patra NR, Pise PJ, "Behaviour of Enlarged Base Piles in Sand under Oblique Pullout Loads", Indian Geotechnical Journal, 2002, 32 (4), 382-394.

Moayedi H, Mosallanezhad M, "Uplift resistance of belled and multi-belled piles in loose sand", Measurement, 2017, 109, 346-353.

Nazir R, Moayedi H, Pratikso A, Mosallanezhad M, "The uplift load capacity of an enlarged base pier embedded in dry sand", Arab J Geosci., 2015, 8, 7285-7296.