

ارزیابی آزمایشگاهی پارامترهای موثر بر ظرفیت باربری جانبی شمع تکی در خاک ماسه ای

میثم معمار^۱، سید محمد علی زمردیان^{۲*}، امیرحسین وکیلی^۳

- ۱- دانشجوی دکتری عمران، گروه مدیریت عمران، واحد استهبان، دانشگاه آزاد اسلامی، استهبان، ایران
- ۲- دانشیار بخش مهندسی آب دانشگاه شیراز.
- ۳- استادیار، گروه مهندسی عمران، دانشکده مهندسی، موسسه آموزش عالی زند شیراز، شیراز، ایران

* mzomorod@shirazu.ac.ir

تاریخ پذیرش: ۹۸/۷/۳۰

تاریخ دریافت: ۹۸/۴/۲۰

چکیده:

ارزیابی ظرفیت باربری شمع تحت بار جانبی همواره از مسایل جذاب برای مهندسين بوده است. در این مطالعه آزمایشگاهی به جهت ارزیابی اثر شکل شمع بر رفتار شمع تکی در خاک ماسه ای تحت بار جانبی، چهار شکل مقطع مختلف شمع با سطح مقطع مساوی که بطور رایج در پروژه‌های عمرانی استفاده می‌شوند بکار گرفته شد. شمع‌های مورد استفاده شامل شمع H و شمع‌های ته بسته مربع، لوله ساده و لوله بالدار بودند که در شرایط مختلفی مانند تغییر تراکم نسبی و تغییر طول شمع تحت بار جانبی قرار گرفتند. نتایج نشان داد که ظرفیت باربری جانبی شمع‌های تکی کوتاه صلب H، مربع و لوله‌ای بالدار بترتیب ۰/۸۲، ۱/۲۱ و ۱/۴۳ برابر مقاومت جانبی شمع تکی لوله‌ای ساده در خاک ماسه‌ای سست است. ظرفیت باربری جانبی شمع کوتاه صلب تکی در ماسه با تراکم متوسط حدود ۲/۵ تا ۲/۵۵ برابر (بطور متوسط ۲/۵۲) و در ماسه متراکم حدود ۴/۳۵ تا ۴/۵۶ برابر (بطور متوسط ۴/۴۸) بیشتر از حالت ماسه با تراکم سست برای شکل‌های مختلف شمع بود. همچنین در خاک ماسه‌ای متراکم ظرفیت باربری جانبی شمع‌های طویل انعطاف‌پذیر و شمع‌های متوسط با شکل‌های مقطع متفاوت، به طور متوسط بترتیب حدود ۳/۹ و ۲/۷۹ برابر بیشتر از شمع‌های کوتاه صلب بود.

واژگان کلیدی: شکل مقطع شمع، مقاومت جانبی شمع، خاک ماسه‌ای، تراکم نسبی

۱- مقدمه

شمع‌ها معمولاً به منظور کاهش نشست پی و یا کاهش تغییر مکان جانبی روسازه تحت نیروهای جانبی بزرگ استفاده می‌شوند. پارامترهای زیادی بر طراحی شمع دخیل هستند از جمله می‌توان به جنس شمع، هندسه شمع شامل قطر و طول آن، روش نصب شمع، نوع بارگذاری شمع و همچنین نوع و طبقه‌بندی خاک مورد استفاده اشاره کرد. پژوهشگران زیادی تاکنون اثر این پارامترها را بر ظرفیت باربری شمع‌ها با انجام آزمون‌های آزمایشگاهی و مطالعات عددی ارزیابی نموده‌اند [1, 2]. شکل مقطع شمع یکی از عوامل مهمی است که بر ظرفیت باربری شمع تاثیر مهمی دارد زیرا نیروی اصطکاک ایجاد شده روی وجوه شمع و همچنین نیروی مقاوم ایجاد شده مقابل شمع دو پارامتر مهم در تعیین ظرفیت باربری جانبی شمع هستند که به طور مستقیم به هندسه شمع وابسته هستند [3]. نحوه توزیع تنش‌های برشی و نرمال روی شکل‌های مختلف مقطع شمع در شکل (۱) نشان داده شده است [4, 5]. پیکان‌های نشان داده شده در این شکل از سمت راست به چپ بیانگر تنش‌های نرمال و برشی توسعه یافته روی شکل‌های مختلف مقطع شمع تحت بار جانبی می‌باشند. روابط مختلفی برای تعیین ظرفیت باربری شمع‌ها وجود دارد که اغلب بر اساس مطالعات روی مقطع شمع با شکل دایره هستند. بعضی از پژوهشگران تلاش نموده‌اند تا با اعمال ضرایبی این چنین روابط را برای بعضی شکل مقاطع دیگر اصلاح نمایند [6]. ژانگ و همکاران [5] نیز بر اساس توزیع تنش روی شمع با شکل دایره، با در نظر گرفتن ضرایبی برای توزیع تنش نرمال و برشی روی شمع، روشی را برای محاسبه ظرفیت باربری جانبی شمع دایره‌ای ارائه نمودند. نتایج برخی مطالعات عددی و آزمایشگاهی نشان دادند که ظرفیت باربری جانبی شمع با مقطع مربع از لوله بیشتر است [7, 8]. مطالعات عباسا و همکاران [9] روی شمع مربعی و لوله‌ای تکی با دو طول متفاوت، نشان داد که در شرایط مختلف، باربری جانبی شمع مربعی حدود $1/3$ تا $1/65$

برابر شمع لوله‌ای است. مطالعات نشان داد که ظرفیت باربری جانبی شمع تکی در خاک‌های غیر چسبنده برعکس خاک‌های چسبنده حساسیت کمتری به سختی خمشی شمع دارد و باربری جانبی شمع در خاک غیر چسبنده بیشتر از خاک چسبنده است [10]. نتایج بارگذاری‌های جانبی شمع‌های بزرگ مقیاس ظرفیت باربری جانبی شمع‌های مربعی را حدود $1/15$ تا $1/3$ برابر شمع دایره‌ای گزارش نموده‌اند [11, 12]. پژوهش‌های انجام شده روی شمع‌های لوله‌ای ساده و شمع‌های لوله‌ای بالدار تکی نشان داد که با افزودن بال به طرفین شمع لوله‌ای ساده مقدار ظرفیت باربری جانبی شمع حدود $1/5$ تا $1/86$ برابر افزایش می‌یابد [13, 14]. نتایج پژوهش‌ها آشکار نمود که نصب بال روی بخش فوقانی شمع لوله‌ای ساده درست زیر سطح خاک در افزایش مقاومت جانبی شمع موثرتر است زیرا نیروی مقاوم بیشتری را جلوی شمع می‌تواند فراهم نماید [15]. [16]. مطالعات صورت گرفته روی اثر شکل شمع بر ظرفیت باربری گروه شمع کوتاه صلب در ماسه نشان داد نسبت ظرفیت باربری گروه شمع‌های لوله بالدار، مربعی و H به شمع لوله‌ای ساده بترتیب برابر با $1/4$ ، $1/19$ و $0/85$ می‌باشد [17].

با مرور مطالعات انجام شده دیده می‌شود که روش‌های تعیین ظرفیت باربری جانبی مختلفی برای شمع وجود دارد که اغلب بر اساس مطالعات روی مقطع دایره‌ای ارائه شده‌اند و همگی تخمینی بوده و مقادیر یکسانی بدست نمی‌دهند [5] و پارامتر مهم اثر شکل مقطع شمع بر ظرفیت باربری جانبی آن در نظر گرفته نشده است [11] و تنها پژوهش‌های محدودی در شرایط خاصی اثر شکل‌های مربعی و لوله‌ای را بر ظرفیت باربری جانبی شمع مقایسه نموده‌اند. مطالعات روی ظرفیت باربری جانبی شمع H و مقایسه آن با شمع‌های با شکل مقطع دیگر بسیار ناچیز و محدود است. با توجه به استفاده از شکل‌های مختلف شمع در پروژه‌های عملی، پژوهش‌های جامعی که اثر شکل‌های مختلف شمع را بطور همزمان در شرایط مختلف ارزیابی و مقایسه نموده باشد وجود ندارد. از عوامل مهم در طراحی بهینه اقتصادی بودن طرح است [18]. در این پژوهش

بهینه از حیث هزینه یکسان برای ساخت شمع‌ها، می‌توان ظرفیت باربری جانبی و کارایی آنها را با یکدیگر مقایسه نمود. قابل ذکر است که در این حالت شمع‌ها با شکل مقطع متفاوت دارای ممان اینرسی قابل مقایسه با یکدیگر خواهند بود [7, 18]. نسبت عرض بال و ارتفاع جان به ضخامت شمع‌های H به گونه‌ای انتخاب گردید تا مشخصه‌های یک مقطع فشرده تامین گردد [20, 21]. شمع‌های H حول محور ضعیف‌شان بارگذاری شدند. براساس مطالعات نصر [14]، مقدار عرض و طول بهینه برای بال شمع‌های لوله بالدار بترتیب برابر با $0.75D_p$ و $0.4L_e$ (طول مدفون شمع) در نظر گرفته شد و بار جانبی نیز عمود بر جهت بال‌ها اعمال گردید. به منظور تامین نیروی مقاوم بیشتر مقابل شمع لوله‌ای بالدار، بال روی بخش بالایی شمع زیر سطح خاک نصب شد [14, 15].

فاکتور سختی شمع (T) عامل مهمی است که بر رفتار شمع تحت بارگذاری اثر می‌گذارد. این پارامتر در خاک‌های غیرچسبنده با استفاده از رابطه (۲) محاسبه می‌گردد [22]:

$$T = \sqrt[5]{\frac{E_p I_p}{n h}} \quad (2)$$

که E_p و I_p بترتیب ممان اینرسی مقطع شمع و مدول الاستیسیته مصالح شمع و $n h$ نیز ضریب واکنش بستر خاک در نوک شمع می‌باشد. مقادیر پیشنهادی ضریب واکنش بستر خاک برای خاک ماسه‌ای با تراکم نسبی متراکم، متوسط و سست بترتیب برابر با 13500 ، 6000 و 1900 می‌باشد [23]. اگر طول مدفون شمع از $4T$ بزرگتر باشد رفتار شمع‌های طویل انعطاف‌پذیر و اگر از $2T$ کوچکتر باشد رفتار شمع کوتاه صلب را نشان خواهد داد [22]. شمع‌ها با سه طول مدفون مختلف 250 ، 500 و 980 میلیمتر (متناظر با طول نرمال (L_e/D_p) برابر با $12/5$ ، 25 و 49) مورد آزمایش قرار گرفتند که بر طبق مشخصات شمع‌های مندرج در جدول

با در نظر گرفتن شرایط طراحی بهینه [18] تلاش گردید تا با انجام آزمون‌های آزمایشگاهی روی شمع‌های کوچک مقیاس، ظرفیت باربری جانبی تعدادی از مقاطع رایج مورد استفاده در پروژه‌های عمرانی (شامل شمع‌های H، لوله‌ای، مربعی و لوله بالدار) در شرایط مختلفی همچون تغییر تراکم نسبی خاک و تغییر طول شمع مورد ارزیابی قرار گیرد و در هر مورد بهترین شکل مقطع معرفی گردد.

۲- مواد و روش

۲-۱- شمع

شمع‌های ساخته و استفاده شده در این مطالعه آزمایشگاهی از جنس فولاد با مدول الاستیسیته برابر با 2×10^8 کیلونیوتن بر مترمربع می‌باشند. از پارامترهای مهم در طراحی بهینه، اقتصادی بودن آن می‌باشد [18]. چهار شکل متفاوت مقطع شمع شامل شمع H و شمع‌های ته بسته لوله‌ای ساده، لوله بالدار و مربع ساخته شد. قانون مقیاس وود و همکاران [19] برای ساخت شمع‌ها مطابق رابطه (۱) استفاده گردید:

$$\frac{E_m I_m}{E_p I_p} = \frac{1}{n^5} \quad (1)$$

که E_m و E_p بترتیب مدول ارتجاعی مدل شمع و شمع واقعی و I_m و I_p نیز بترتیب ممان اینرسی مدل شمع و شمع واقعی و $1/n$ نیز فاکتور مقیاس طول است. در این مطالعه ابعاد خارجی کلیه شمع‌ها برابر با 20 میلیمتر در نظر گرفته شد. بنابراین شمع لوله‌ای فولادی با قطرهای خارجی و داخلی بترتیب برابر با 20 و $15/15$ میلیمتر با در نظر گرفتن مقیاس طول $1/10$ ، شمع لوله‌ای فولادی واقعی به قطر خارجی و داخلی بترتیب برابر با 400 و 350 میلیمتر را مدل سازی می‌کند.

با مساوی در نظر گرفتن قطر خارجی کلیه شکل شمع‌ها (برابر با 20 میلیمتر) ضخامت جداره‌های کلیه شمع‌ها به گونه‌ای انتخاب شد تا سطح مقطع کلیه شمع‌ها (A) مساوی با 134 میلیمتر مربع گردد. در این صورت وزن فولاد مصرفی برای ساخت شمع‌ها با شکل مقطع متفاوت یکسان بوده و لذا با توجه به معیار طراحی

شکل ۱. توزیع تنش های برشی و نرمال روی شکل های مختلف مقطع شمع. (الف) شمع H، (ب) شمع مربعی و (ج) شمع دایره ای [4, 5]

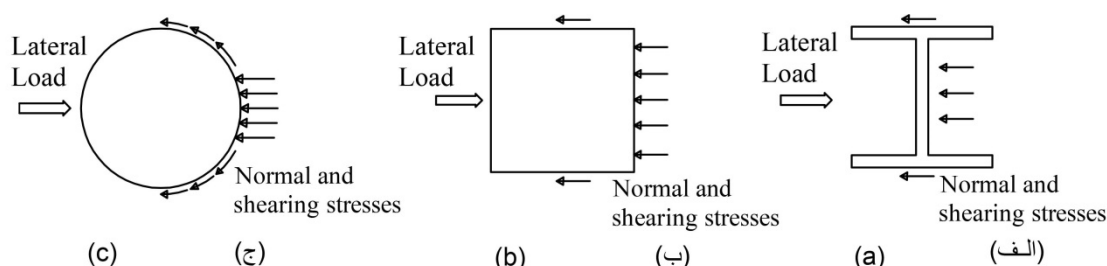


Fig. 1. Distribution of shear and normal stresses on different cross sections of piles, (a) H pile, (b) square pile, (c) pipe pile [4, 5]

تراکم نسبی خاک درون قوطی ها اندازه گیری شد که با مقدار مورد نیاز حدود $\pm 2\%$ اختلاف داشت. به منظور کاهش اثر مرزها بر ناحیه تنش انتشار یافته پیرامون شمع ابعاد جعبه آزمایش مورد استفاده باید به اندازه کافی بزرگ باشد [9]. توسعه تنش در امتداد نیروی جانبی حدود $8D_p-12$ و در امتداد عمود بر نیروی جانبی حدود $3D_p-4$ می باشد [25, 26]. بر اساس مطالعات انجام شده چنانچه نسبت بعد جعبه آزمایش در پلان به قطر شمع بزرگتر از ۱۵ باشد می توان از اثر شرایط مرزی چشم پوشی نمود [27]. همچنین به منظور جلوگیری از اثر مرز پایین بر نتایج آزمایش پیشنهاد گردیده که حداقل فاصله نوک شمع تا مرز پایین حدود ۶ برابر قطر شمع رعایت گردد [28]. در این پژوهش ابعاد داخلی جعبه مورد استفاده در پلان برابر با 1000×1000 میلیمتر و ارتفاع جعبه ۱۶۰۰ میلیمتر بوده است این ابعاد کلیه معیارهای گفته شده را تامین می نماید لذا می توان از اثر مرزها بر نتایج آزمایش چشم پوشی نمود.

۲-۳- روش انجام آزمایش

بعد از تهیه خاک در تراکم نسبی مورد نظر، شمع با فشار توسط یک جک هیدرولیکی درون خاک قرار داده شد. نیروی جانبی حدود ۵۰ میلیمتر بالاتر از سطح خاک توسط سیستم جک و فنر به ظرفیت $2/5$ کیلو نیوتن به سر شمع وارد گردید. تغییر مکان جانبی سر شمع توسط یک گیج سنجش تغییر مکان با دقت $0/01$ میلیمتر اندازه گیری شد. معیار مورد نظر برای تعیین ظرفیت باربری جانبی شمع، نیروی جانبی متناظر با تغییر

(۱) طول های مذکور بترتیب متناظر با رفتار شمع های کوتاه صلب، متوسط و طویل انعطاف پذیر می باشند. طول کلی شمع ها ۵۰ میلیمتر بلندتر از طول مدفون آنها می باشد. شکل (۲) نما و مقطع شمع های مورد استفاده را نشان می دهد.

۲-۲- خاک

در این مطالعه ماسه بد دانه بندی شده (مطابق با سیستم طبقه بندی متحد) با مشخصات مندرج در جدول (۲) استفاده گردیده است [24]. کمینه و بیشینه وزن مخصوص خشک ماسه با انجام آزمایش ASTM D4253, D4254 بدست آمدند. وزن مخصوص خشک ماسه در سه تراکم نسبی (DR) مختلف ۳۵ درصد (ماسه سست)، ۶۵ درصد (ماسه با تراکم متوسط) و ۸۵ درصد (ماسه متراکم) بترتیب برابر با $16/52$ ، $15/65$ و $16/52$ kN/m^3 و $17/11$ بدست آمد. زاویه اصطکاک داخلی خاک ماسه متناظر با حالت سست، تراکم متوسط و متراکم نیز بترتیب برابر با 34 ، $36/5$ و 40 درجه بدست آمد. خاک سست با روش بارانی تهیه گردید و جهت تهیه خاک با تراکم های متوسط و متراکم، خاک در لایه های ۵۰ میلیمتری درون جعبه آزمایش ریخته و هر لایه با چکشی به وزن $21/6$ N کوبیده شد. ارتفاع سقوط چکش ۲۵۰ میلیمتر و تعداد ضربات در هر لایه برای رسیدن به خاک با تراکم متوسط و متراکم بترتیب برابر با ۶۳ و ۳۱۵ ضربه با روش سعی و خطا بدست آمد. به منظور کنترل تراکم نسبی خاک، تعدادی قوطی در ترازهای مختلف در خاک درون جعبه آزمایش قرار داده شد. پس از انجام آزمایش بارگذاری شمع،

جدول ۱. مشخصات شمع‌های مورد استفاده

	A (mm ²)	I _m (mm ⁴)	Loose sand		Medium dense sand		Dense sand	
			2T (mm)	4T (mm)	2T (mm)	4T (mm)	2T (mm)	4T (mm)
Fin pile	134	5470	449	889	357	710	303	607
Square pile	134	6900	470	940	374	748	318	636
pipe pile	134	5270	446	892	354	708	300	600
H pile	134	3600	412	824	328	656	278	556

Table 1. Characteristics of piles used

شکل ۲. نما و مقطع شمع‌های مورد استفاده: (الف) شمع لوله بالدار، (ب) شمع لوله ساده، (ج) شمع H، (د) شمع مربعی

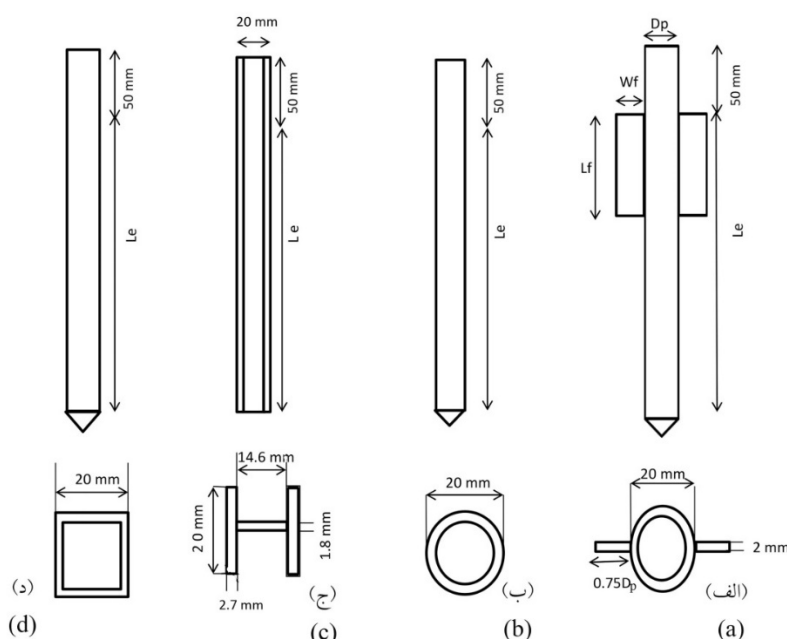


Fig. 2. Views and cross sections of piles used, (a) fin pile, (b) pipe pile, (c) H pile, (d) square pile

جدول ۲. مشخصات ماسه مورد استفاده

D ₁₀ (mm)	D ₃₀ (mm)	D ₅₀ (mm)	D ₆₀ (mm)	Gs	Cu	Cc	g _{dmax} (kN/m ³)	g _{dmin} (kN/m ³)
0.14	0.23	0.32	0.38	2.7	2.71	0.99	17.51	14.81

Table 2. Characteristics of sand used

مکان سر شمع به میزان $0.1 D_p$ در نظر گرفته شد. شکل (۳) در جدول (۳) نشان داده شده است.

۳- بحث و نتایج. نما و جزییات دستگاه آزمایش مورد استفاده را نشان می‌دهد.

در این پژوهش چهار شکل مختلف شمع تحت بار جانبی قرار داده متغیرهای مورد بررسی برای شکل شمع‌های مختلف، تغییر تراکم نسبی و تغییر طول شمع بوده است. برنامه انجام آزمایشات شدند و اثر عوامل مختلفی بر ظرفیت باربری جانبی شمع بررسی گردید که نتایج آن در ادامه تشریح می‌گردد.

شکل ۳. دستگاه بارگذاری مورد استفاده، (الف): اجزاء دستگاه، (ب): نمای دستگاه

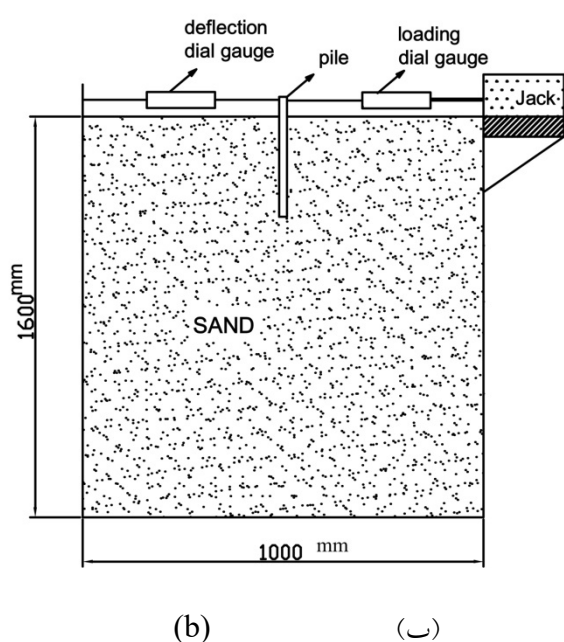


Fig. 3. Loading device used in this study (a) details of device , (b) view

سر شمعه‌های با شکل مقطع متفاوت را در خاک سست برای شمعه‌های کوتاه صلب با طول نرمال (L_e/D_p) ۱۲/۵ نشان می‌دهد. راهنمای اشکال بترتیب از چپ به راست شکل شمعه، طول نرمال شمعه و نسبت تراکم خاک را نشان می‌دهند. همان‌گونه که در این شکل دیده می‌شود شمعه‌های لوله بالدار و H بترتیب بیشترین و کمترین ظرفیت باربری جانبی را نشان دادند. نسبت نیروی جانبی شمعه‌های H، مربع و لوله بالدار به نیروی جانبی شمعه لوله ساده (RLR) بترتیب برابر با ۰/۸۲، ۱/۲۱ و ۱/۴۳ می‌باشد. به منظور مقایسه نتایج مطالعه حاضر با مطالعه نصر [14] نیروی جانبی بدون بعد $Q/\gamma_d L_e^2 D_p$ تعریف گردید تا اثر پارامترهای مختلف بر نتایج حداقل گردد که در این رابطه Q باربری جانبی شمعه در تغییر مکان افقی γ_d ، $0/1 D_p$ وزن مخصوص خشک خاک، L_e طول مدفون شمعه و D_p قطر

جدول ۳. برنامه آزمون‌های آزمایشگاهی

variable	Type of pile	Relative density	L_e/D_p
Pile Shape	Fin pile, square pile, pipe pile, H pile	Loose	12.5, 25
		Loose, medium dense, dense	12.5, 25
Relative density of sand	Fin pile, square pile, pipe pile, H pile	Loose, medium dense, dense	12.5, 25
Pile length	Fin pile, square pile, pipe pile, H pile	dense	12.5, 25, 49

Table 3. Experimental tests plan

۱-۳-۱ اثر شکل شمعه

شکل مقطع شمعه اثر مهمی بر رفتار شمعه تحت بار جانبی دارد. شکل (۴) تغییرات نیروی جانبی (Q) در مقابل تغییر مکان نرمال

۱ Ratio of Lateral Resistance

پژوهش‌های انجام شده توسط راسل [12] و بوستمانته [11] مقایسه می‌نماید. طول شمع‌های مورد استفاده در مطالعات راسل و بوستمانته بترتیب برابر با ۱۱/۵۸ و ۱۰ متر و قطر شمع‌های لوله‌ای، مربعی و H در هر دو مطالعه با یکدیگر مساوی و بترتیب برابر با ۳۲۳/۸، ۳۰۴/۸ و ۳۰۷/۳ میلیمتر بوده است. همان‌گونه که دیده می‌شود نتایج تحقیق حاضر با مطالعات راسل و بوستمانته تطابق خوبی نشان می‌دهد به گونه‌ای که شمع مربعی در هر سه مطالعه دارای ظرفیت باربری جانبی بیشتری نسبت به شمع H است. از لحاظ مقادیر RLR نیز مقادیر مطالعه حاضر کمتر از ۵ درصد با نتایج مطالعات راسل (۲۰۱۶) و بوستمانته (۲۰۱۴) اختلاف دارند. شمع لوله‌ای به علت شکل دایره‌ای خود برخلاف شمع مربعی، وقتی تحت نیروی جانبی قرار می‌گیرد تماس نیمه پشتی خود با خاک را از دست می‌دهد و بنابراین نیروهای برشی و اصطکاکی بیشتری روی وجوه شمع مربعی نسبت به شمع دایره‌ای ایجاد می‌شود که نتیجه آن مقاومت جانبی بیشتر شمع مربع نسبت به شمع لوله‌ای است [11, 12]. با اضافه شدن بال‌ها به یک شمع لوله‌ای ساده و ایجاد شمع بالدار، میزان نیروی مقاوم ایجاد شده جلوی آن به مقدار چشم‌گیری افزایش می‌یابد که باعث افزایش مقاومت جانبی شمع می‌گردد [14]. هنگام کوبیدن شمع در خاک، خاک اطراف آن تا حدودی متراکم می‌گردد. تراکم بیشتر خاک اطراف باعث افزایش نیروی مقاوم ایجاد شده جلوی شمع می‌گردد. یکی از عواملی که روی میزان این تراکم اثر می‌گذارد نوع ته باز یا ته بسته بودن شمع است. شمع‌های ته باز نسبت به شمع‌های ته بسته به مقدار کمتری می‌توانند خاک اطراف خود را متراکم نمایند. میزان فشردگی خاک بین بال‌های شمع H نیز بر میزان نیروی مقاوم ایجاد شده جلوی شمع تاثیرگذار است [12]. شمع‌های H نیز از نوع شمع‌های ته باز هستند که هنگام کوبش در خاک سست نسبت به دیگر مقاطع استفاده شده کمتر می‌تواند خاک اطراف را متراکم نماید. مقادیر RLR برای شمع‌های با شکل مقطع متفاوت برای دو طول نرمال (L_e/D_p)

شمع است [29]. شکل (۵) مقادیر نیروی جانبی بدون بعد شمع لوله‌ای و لوله بالدار کوتاه صلب مطالعه حاضر را با نتایج مطالعه نصر [14] مقایسه می‌نماید. همان‌گونه که از شکل (۵) دیده می‌شود نیروی جانبی بدون بعد شمع لوله‌ای مطالعه حاضر حدود ۷ درصد بزرگتر از نتایج مطالعه نصر [14] است ولی نیروی جانبی بدون بعد شمع لوله بالدار مطالعه حاضر حدود ۱۱ درصد از نتایج مطالعه نصر [14] کمتر است. قابل ذکر است که عرض بال شمع بالدار در مطالعه نصر

شکل ۴. تغییرات نیروی جانبی شمع کوتاه صلب در مقابل تغییر مکان نرمال سر شمع در خاک سست

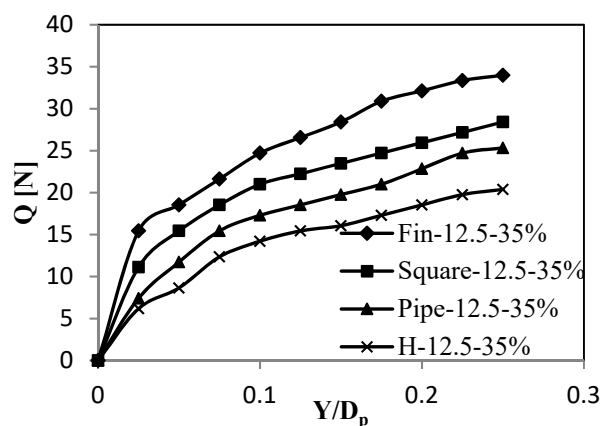


Fig. 4. Variation of lateral load of short rigid pile versus normalized deflection of pile head

شکل ۵. مقایسه نتایج شمع لوله ساده و لوله بالدار با مطالعه نصر (۲۰۱۳)

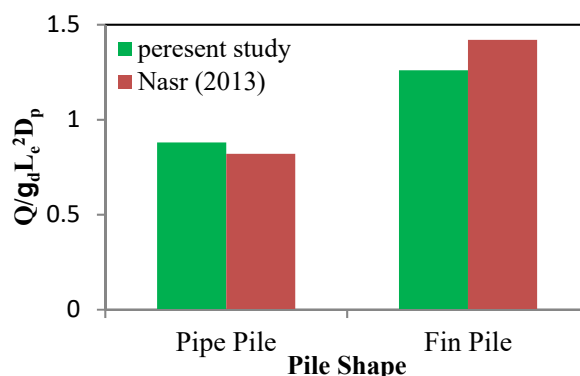


Fig. 5. Comparison of the results of pipe pile and fin pile with study of Nasr (2013)

[14]، ۲۵ درصد از مطالعه کنونی بزرگتر است که باعث می‌گردد شمع نیروی جانبی بزرگتری را تحمل نماید. شکل (۶) مقادیر RLR برای شمع‌های مربعی و H در خاک متراکم را با نتایج

۲-۳- اثر تراکم نسبی خاک

یکی از پارامترهای تاثیرگذار بر ظرفیت باربری جانبی شمع، میزان تراکم خاک است. به منظور بررسی ظرفیت باربری جانبی شمع‌های تکی با شکل مقطع متفاوت در تراکم نسبی‌های مختلف، ماسه در سه حالت تراکم سست، متوسط و متراکم متناظر با تراکم نسبی برابر با ۳۵، ۶۵ و ۸۵ درصد تهیه گردید. شکل (۸) تغییرات نیروی جانبی شمع‌های کوتاه صلب را در تغییر مکان $D_p/1$ در تراکم نسبی‌های مختلف نشان می‌دهد. نتایج نشان می‌دهد که در تراکم نسبی‌های مختلف، شمع لوله‌ای بالدار و شمع H بترتیب بیشتری و کمترین مقاومت جانبی را دارند. با افزایش تراکم نسبی از ۳۵ درصد به ۸۵ درصد مقاومت جانبی همه شمع‌ها با شکل مقطع متفاوت حدود ۳۳۵ تا ۳۵۶ درصد (بطور متوسط حدود ۳۴۸ درصد) افزایش یافت. میزان افزایش مقاومت جانبی شمع‌ها از حالت تراکم نسبی ۳۵ درصد به ۶۵ درصد حدود ۷۴ درصد بیشتر از حالت افزایش تراکم نسبی از ۶۵ درصد به ۸۵ درصد است. افزایش تراکم نسبی باعث افزایش مقاومت برشی بسیج شده روی سطح شمع بعلت اصطکاک بین شمع و ماسه می‌گردد که افزایش مقاومت جانبی شمع را در پی خواهد داشت [14].

میزان افزایش در مقاومت جانبی در تراکم نسبی ۸۵ درصد به ۳۵ درصد برای شمع H بیشتر از دیگر شکل شمع‌ها است (بترتیب حدود ۲، ۱۰ و ۲۲ درصد بیشتر از شمع‌های ته بسته لوله‌ای بالدار، لوله ساده و مربع است). میزان جابه‌جایی خاک بر اثر کوبش شمع‌های ته باز کمتر از شمع‌های ته بسته است و بنابراین در خاک متراکم، بافت خاک کمتر دستخوش تغییر می‌گردد این مساله می‌تواند عامل افزایش مقاومت جانبی شمع‌های ته باز نسبت به ته بسته در خاک متراکم باشد [12].

برابر با ۱۲/۵ و ۲۵ در خاک سست در شکل (۷) بطور گرافیکی نشان داده شده‌اند. همان‌گونه که دیده می‌شود نتایج از همگرایی خوبی برخوردار هستند بطوریکه نسبت مقاومت جانبی شمع‌های متوسط بالدار، مربع و H نسبت به شمع لوله ساده با طول متوسط بترتیب برابر با ۱/۴، ۱/۲۳ و ۰/۸۳ است. بنابراین نتایج نشان می‌دهند که در شرایط یکسان از نظر مساوی بودن ابعاد خارجی شمع و همچنین مقدار فولاد مصرفی برای ساخت شمع، شمع لوله‌ای بالدار دارای مقاومت جانبی بیشتری نسبت به دیگر مقاطع آزمایش شده است.

شکل ۶. مقایسه نتایج شمع مربعی و H با پژوهش‌های دیگران

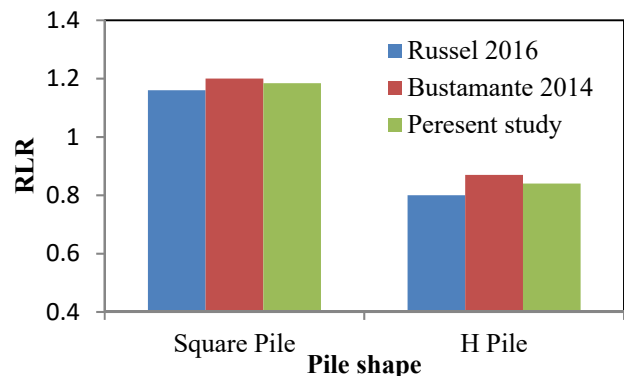


Fig. 6. Comparison of the results of square pile and H pile with other studies

شکل ۷. رفتار شمع‌های کوتاه صلب و متوسط با شکل مقطع متفاوت در خاک سست

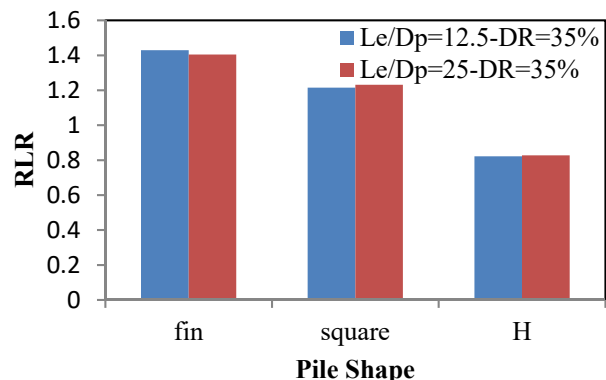


Fig. 7. Behavior of short rigid pile and intermediate pile with different pile shape

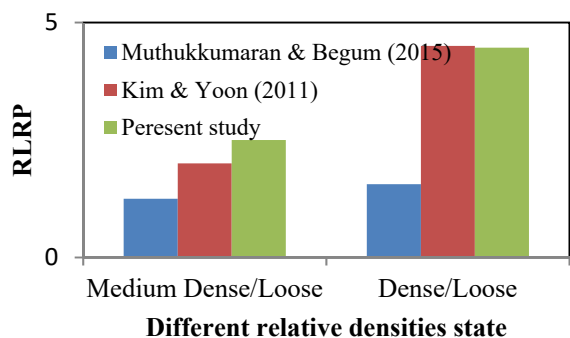


Fig. 9. Effect of soil relative density on lateral resistance of pipe pile

۳-۳- اثر طول شمع

با افزایش طول شمع، رفتار شمع از حالت شمع کوتاه صلب به شمع طویل انعطاف‌پذیر تغییر می‌یابد. در جهت ارزیابی اثر طول شمع برای شکل مقاطع مختلف شمع، سه طول مدفون مختلف شمع برابر با ۲۵۰، ۵۰۰ و ۹۸۰ میلی‌متر متناظر با شمع کوتاه صلب، متوسط و طویل انعطاف‌پذیر (متناظر با طول نرمال (L_e/D_p) برابر با ۱۲/۵، ۲۵ و ۴۹) ساخته و مورد آزمایش قرار داده شدند.

شکل (۱۰) تغییرات نیروی جانبی شمع مربعی در مقابل جابه‌جایی نرمال سر شمع در خاک متراکم را نشان می‌دهد. همان‌گونه که در این شکل دیده می‌شود با افزایش طول نرمال شمع مربعی مقاومت جانبی شمع افزایش می‌یابد به گونه‌ای که ظرفیت باربری جانبی شمع با طول نرمال ۴۹ حدود ۲۹۸ درصد بیشتر از شمع با طول نرمال ۱۲/۵ است. این رفتار در دیگر شکل مقاطع شمع نیز مشاهده گردید. شکل ۱۰. تغییرات نیروی جانبی شمع مربعی در مقابل تغییر مکان نرمال سر شمع در ماسه متراکم

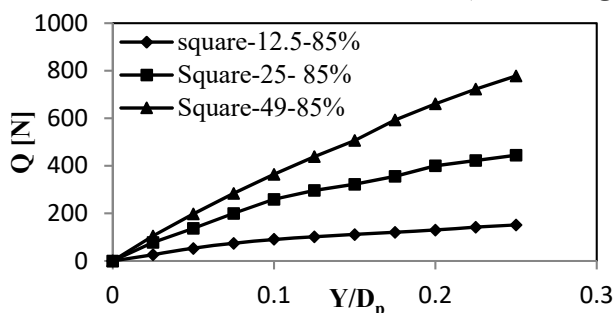


Fig. 10. Variation of lateral load of square pile versus normalized pile head deflection in dense sand

شکل ۸. تغییرات نیروی جانبی شمع کوتاه صلب در تراکم نسبی‌های مختلف خاک

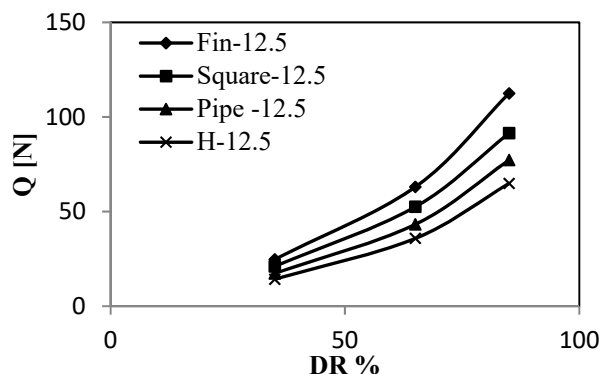


Fig. 8. Variation of lateral load of short rigid pile in different relative densities

شکل (۹) تغییرات مقاومت جانبی شمع لوله‌ای (RLRP) مطالعه حاضر در دو حالت نسبت مقاومت جانبی شمع در ماسه با تراکم متوسط به ماسه سست (Medium Dense/Loose) و همچنین نسبت مقاومت جانبی شمع در حالت ماسه متراکم به ماسه سست (Dense/Loose) را با نتایج مطالعات ماتوکوماران و بگام [۳۰] و کیم و یون [۲۸] از لحاظ رفتاری مقایسه می‌نماید. همان‌گونه که در شکل (۹) دیده می‌شود رفتار جانبی شمع با تغییر تراکم در هر سه پژوهش مشابه یکدیگر است به گونه‌ای که با افزایش میزان تراکم خاک مقدار مقاومت جانبی شمع لوله‌ای نیز افزایش می‌یابد. از دلایل میزان تفاوت در مقادیر افزایش مقاومت جانبی نشان داده شده در این شکل می‌توان به تفاوت در درصد تراکم خاک در هر یک از حالت‌های ماسه سست، متوسط و متراکم مورد استفاده در این مطالعات اشاره نمود.

شکل ۹. اثر تراکم خاک بر مقاومت جانبی شمع لوله‌ای

۱ Ratio of lateral resistance of pipe pile

شکل ۱۱. تغییرات نیروی جانبی شمع تکی با شکل مقطع مختلف نسبت به افزایش طول نرمال شمع در ماسه متراکم

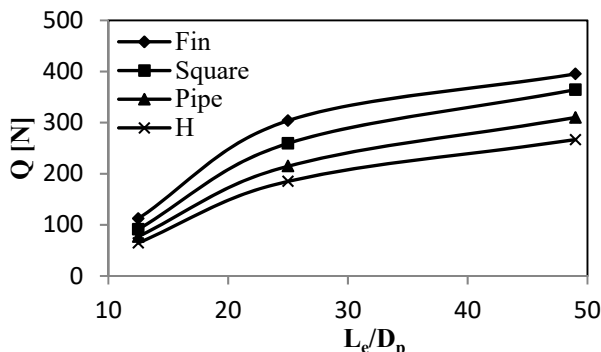


Fig. 11. Variation of lateral load of single pile with different pile shape versus normalized length of pile in dense sand

شکل (۱۲) نسبت مقاومت جانبی شمع‌های لوله‌ای و لوله بالدار طویل را نسبت به شمع کوتاه صلب در مطالعه حاضر با مطالعات نصر [14] مقایسه می‌نماید. همان‌گونه که دیده می‌شود با افزایش طول شمع باربری جانبی آن به مقدار قابل ملاحظه‌ای افزایش می‌یابد. تفاوت در نسبت‌های افزایش مقاومت جانبی مطالعه کنونی با مطالعات نصر [14] بعلاوه تفاوت در طول شمع‌های مورد استفاده است (نسبت طول شمع‌های طویل انعطاف پذیر به کوتاه صلب در مطالعات نصر حدود ۲/۶۶ بوده است).

شکل ۱۲. نسبت مقاومت جانبی شمع طویل به شمع کوتاه صلب برای شمع‌های لوله‌ای ساده و لوله بالدار

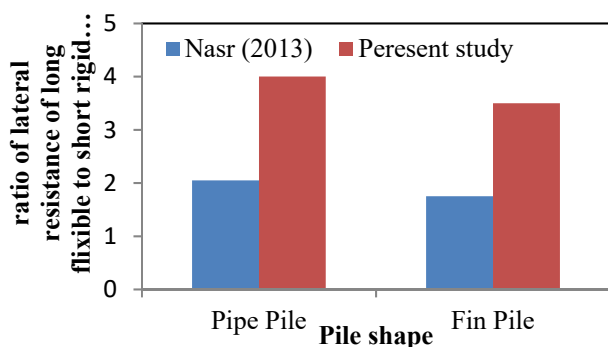


Fig. 12. The ratio of lateral resistance of long flexible pile to that of short rigid pile for pipe pile and fin pile

۴- نتیجه گیری

شکل (۱۱) تغییرات نیروی جانبی شمع‌های با شکل مقطع متفاوت در مقابل افزایش طول نرمال شمع در ماسه متراکم را نشان می‌دهد. با مشاهده این شکل مشخص است که با افزایش طول نرمال شمع مقدار مقاومت جانبی کلیه شمع‌ها افزایش می‌یابد. در خاک متراکم افزایش مقاومت جانبی شمع‌های طویل انعطاف‌پذیر نسبت به شمع‌های متوسط حدود ۳۰ الی ۴۴ درصد و نسبت به شمع‌های کوتاه صلب حدود ۲۵۱ الی ۳۱۱ درصد (بطور متوسط ۲۹۰ درصد) برای شکل‌های مختلف شمع بدست آمد. مقاومت جانبی شمع‌های متوسط بطور متوسط حدود ۱۷۹ درصد از شمع‌های کوتاه صلب بیشتر بود.

اگرچه نیروی مقاوم ایجاد شده جلوی شمع و نیروی برشی توسعه یافته روی شمع‌های بلند انعطاف‌پذیر تحت نیروی جانبی نسبت به شمع‌های کوتاه صلب بیشتر است [14]، ممان اینرسی مقطع نیز در باربری شمع‌های طویل انعطاف‌پذیر نقش مهمی دارد. ترکیب این سه عامل می‌تواند ظرفیت باربری شمع را تحت تاثیر قرار دهد. با مقایسه ممان اینرسی‌های مقاطع مختلف مورد استفاده در جدول (۱) دیده می‌شود با اینکه مقطع مربع بیشترین ممان اینرسی را دارد ولی مقاومت جانبی مقطع شمع بالدار طویل انعطاف‌پذیر از بقیه بیشتر است. این مساله نقش مهم شکل شمع را با توجه به نیروی مقاوم تشکیل شده مقابل شمع طویل انعطاف‌پذیر تحت نیروی جانبی نشان می‌دهد.

نقش بال در افزایش مقاومت جانبی در شمع‌های بالدار طویل انعطاف‌پذیر کمتر از شمع‌های کوتاه صلب است به گونه‌ای که با افزودن بال به شمع‌های لوله‌ای کوتاه صلب حدود ۴۳ درصد به مقاومت آنها افزوده گردید ولی این افزایش در شمع‌های لوله‌ای طویل انعطاف‌پذیر حدود ۲۷ درصد است. این رفتار در مطالعات نصر [14] نیز گزارش شده است.

- در این مطالعه آزمایشگاهی اثر شکل شمع بر مقاومت جانبی شمع‌های تکی در شرایط مختلفی همچون تراکم نسبی و طول‌های مختلف شمع مورد ارزیابی قرار گرفت و نتایج زیر حاصل شد:
- ۱- بین شمع‌های صلب کوتاه آزمایش شده با شکل مقطع مختلف در ماسه سست، شمع لوله بالدار بیشترین مقاومت جانبی و شمع H کمترین مقاومت جانبی را نشان دادند. نسبت مقاومت جانبی شمع کوتاه صلب لوله بالدار، مربع و شمع H به شمع لوله ساده بترتیب برابر با $1/43$ ، $1/21$ و $0/82$ بدست آمد.
- ۲- با افزایش تراکم نسبی از حالت ماسه سست به متراکم، میزان ظرفیت باربری جانبی شمع‌ها حدود 335 تا 357 درصد برای شکل‌های مختلف شمع افزایش می‌یابد. شمع H در ماسه متراکم نسبت به ماسه سست افزایش مقاومت جانبی بیشتری را نسبت به دیگر شکل شمع‌ها نشان داد.
- ۳- با افزایش طول شمع، رفتار شمع‌ها از حالت صلب کوتاه به طویل انعطاف‌پذیر تغییر می‌یابد. مقاومت جانبی شمع‌های طویل انعطاف‌پذیر با شکل مقطع متفاوت حدود 30 الی 44 درصد نسبت به شمع متوسط و حدود 251 الی 311 درصد (بطور متوسط 290 درصد) نسبت به شمع‌های کوتاه صلب بیشتر بود.
- ### اعلام تعارض منافع
- نویسندگان اعلام می‌کنند که هیچ نوع تعارض منافی وجود ندارد.
- ### منابع و مراجع
- [1] Baziar M.H., Rafiee F., Saeedi Azizkandi A. & Lee C. J. 2018 Effect of super-structure frequency on the seismic behavior of pile-raft foundation using physical modeling. *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, 104, 196-209.
- [2] Vali R., Shams G., Porhoseini R., Saberian M. & Beygi M. 2019 Lateral behavior of pile located on top of a slope. *Australian geomechanics*, 54(1), 103-114.
- [3] Briaud J. L., Smith T. and Meyer B. 1984 Laterally loaded piles and the pressuremeter: comparison of existing methods, in *Laterally loaded deep foundations: Analysis and performance*. ASTM International.
- [4] Reese L.C. & Van Impe W.F. 2001 *Single piles and pile groups under lateral loading*. A. A. Balkema, Rotterdam, Netherlands: CRC Press.
- [5] Zhang L., Silva F. & Grismala R. 2005 Ultimate lateral resistance to piles in cohesionless soils. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, 131(1), 78-83.
- [6] Smith T.D. 1987 Friction mobilization F-y curves for laterally loaded piles from the pressuremeter. in *Proceedings of the international symposium on predictions and performance in geotechnical engineering*, Calgary, Canada.
- [7] Pedram B. 2015 Effects of pile shape in improving the performance of monopiles embedded in onshore clays. *Canadian Geotechnical Journal*, 52(8), 1144-1158.
- [8] Zomorodian S.M.A. & Dehghan M. 2011 Lateral resistance of a pile installed near a reinforced slope. *International Journal of Physical Modelling in Geotechnics*, 11(4), 156-165.
- [9] Abbasa J.M. & Ibrahim H.Q. 2018 The Effect of Pile Cross Section on the Lateral behavior of Piles Under ombined Loading. *Journal of Engineering Science and Technology Review*, 11(3), 174-179.
- [10] Abbasa J.M., Chik Z. & Taha M.R. 2018 Modelling and assessment of a single pile subjected to lateral load. *Studia Geotechnica et Mechanica*, 40(1), 65-78.
- [11] Bustamante G. 2014 Influence of Pile Shape on Resistance to Lateral Loading. Brigham Young University - Provo.
- [12] Russell D.N. 2016 The Influence of Pile Shape and Pile Sleeves on Lateral Load Resistance. Brigham Young University - Provo.
- [13] Duhrkop J., Grabe J., Bienen B., White D.J. & Randolph M.F. 2010 Centrifuge experiments on laterally loaded piles with wings. in Vol. 2, *Proceedings of International Conference on Physical Modelling in Geotechnics (ICPMG)*.
- [14] Nasr A.M. 2013 Experimental and theoretical studies of laterally loaded finned piles in sand.

- [23] Terzaghi K. 1955 Evaluation of coefficients of subgrade reaction. *Geotechnique*, 5(4), 297-326.
- [24] ASTM, Standard practice for classification of soils for engineering purposes (Unified Soil Classification System). 2010, ASTM International West Conshohocken (PA).
- [25] Poulos H.G. & Davis E.H. 1980 *Pile foundation analysis and design*. Wiley, New York, NY, USA.
- [26] Rao S.N., Ramakrishna V. & Rao M.B. 1998 Influence of rigidity on laterally loaded pile groups in marine clay. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, 124(6), 542-549.
- [27] Dong J., Chen F., Zhou M. & Zhou X. 2017 Numerical analysis of the boundary effect in model tests for single pile under lateral load. *Bulletin of Engineering Geology and the Environment*, 1-12.
- [28] Kim B.T. & Yoon G.L. 2011 Laboratory modeling of laterally loaded pile groups in sand. *KSCE Journal of Civil Engineering*, 15(1), 65-75.
- [29] LeBlanc C., Houlsby G. & Byrne B. 2010 Response of stiff piles in sand to long-term cyclic lateral loading. *J Geotechnique*, 60(2), 79-90.
- [30] Muthukkumaran K. & Begum N.A. 2015 Experimental Investigation of Single Model Pile Subjected to Lateral Load in Sloping Ground. *Geotechnical and Geological Engineering*, 33(4), 935-946.
- Canadian *Geotechnical Journal*, 51(4), 381-393.
- [15] Babu K.V. & Viswanadham B.V.S. 2018 Numerical Investigations on Lateral Load Response of Fin Piles. International Congress and Exhibition "Sustainable Civil Infrastructures: Innovative Infrastructure Geotechnology", 317-329.
- [16] Peng J. R., Rouainia M. & Clarke B. 2010 Finite element analysis of laterally loaded fin piles. *Computers and structures* 88(21), 1239-1247.
- [17] Memar M., Zomrodian S.M.A. & Vakili A. H. 2019 Effect of pile cross section shape on pile group behavior under lateral loading in sand. *International Journal of Physical Modelling in Geotechnics*, <https://doi.org/10.1680/jphmg.19.00020>
- [18] Ugural A.C. 2007 *Mechanics of Materials*. John Wiley and sons.
- [19] Wood D.M., Crewe A. & Taylor C. 2002 Shaking table testing of geotechnical models. *International Journal of Physical Modelling in Geotechnics*, 2(1), 1-13.
- [20] AISC, *Manual of Steel Construction*. 2005.
- [21] Amde A., Chini S. & Mafi M. 1997 Model study of H-piles subjected to combined loading. *Geotechnical & Geological Engineering*, 15(4), 343-355.
- [22] Broms B.B. 1964 Lateral resistance of piles in cohesionless soils. *Journal of the Soil Mechanics Foundations Division*, 90(3), 123-158.

علائم و اختصارات

D _p	قطر شمع	T	فاکتور سختی
D ₁₀	قطر ذره ماسه که ۱۰ درصد ذرات از آن ریزترند	E _p	مدول الاستیسیته مصالح شمع با سایز واقعی
D ₃₀	قطر ذره ماسه که ۳۰ درصد ذرات از آن ریزترند	E _m	مدول الاستیسیته مصالح شمع مدل
D ₅₀	قطر ذره ماسه که ۵۰ درصد ذرات از آن ریزترند	I _m	ممان اینرسی سطح مقطع شمع مدل
D ₆₀	قطر ذره ماسه که ۶۰ درصد ذرات از آن ریزترند	I _p	ممان اینرسی سطح مقطع شمع با سایز واقعی
γ _d	وزن واحد خشک خاک	n _h	ثابت واکنش خاک بستر در نوک شمع
γ _{dmin}	کمینه وزن مخصوص خشک خاک	A	سطح مقطع شمع
γ _{dmax}	بیشینه وزن مخصوص خشک خاک	L	طول کلی شمع
G _s	چگالی دانه های خاک	L _e	طول مدفون شمع
C _u	ضریب یکنواختی	W _f	عرض بال شمع بالدار
C _c	ضریب دانه بندی	L _f	طول بال شمع بالدار
RLR	نسبت مقاومت جانبی شمع با شکل مقطع متفاوت به شمع لوله‌ای	Q	نیروی جانبی در سر شمع

Experimental investigation of effective parameters on lateral resistance of single piles

M. Memar¹, S.M.A. Zomorodian^{2*}, A.H. Vakili³

1 - PhD student, Department of Civil Engineering, Estahban Branch, Islamic Azad University, Estahban, Iran

2 - Associate Professor, Water Engineering Department, Shiraz University, Shiraz, Iran

3 - Assistant Professor, Department of Civil Engineering, Faculty of Engineering, Zand Institute of Higher Education, Shiraz, Iran

* mzomorod@shirazu.ac.ir

Abstract

Assessment of bearing capacity of single pile under lateral loading has been always an attractive matter for engineers. Piles are usually subjected to moment, vertical, and horizontal loads. The Lateral loads are including wind, earthquakes, ship decking, earth pressure, wave, and ice thrust. The behavior of laterally loaded single pile is complicated and still is a useful research area. There are a lot of parameters which affect on pile behavior under lateral loading. One of these important factors is cross section shape of pile. When a pile is subjected to lateral loading, the passive force performed in front of the pile, has an important role on lateral resistance of pile which is exactly related to cross section shape of pile. Physical modeling is a reliable approach in geotechnical engineering to take into account all of these factors simultaneously. In this experimental study the effect of cross sections shapes of pile on single pile behavior under lateral loading in sandy soil were assessed. Four different cross sections shapes of pile which are commonly used in real projects were employed. These pile shapes were including: H pile, and closed-end square, pipe, and fin piles. In concept of optimum design the surface areas of all different cross sections shapes of piles were considered to be the same but with comparative moment inertias. In this condition the amount of material used for pile construction was the same for all different pile shapes used in this study and thus it was possible to comparison the results and find the best pile shape in any conditions. The lateral resistances of these single piles were investigated in different conditions such as different soil relative densities including 35, 65, and 85 % corresponds to loose, medium dense, and dense sand and different embedment pile lengths including 250, 500, and 980 mm corresponds to short rigid, intermediate, and long flexible piles. Results revealed that the ratios of lateral bearing capacity of short rigid H pile, square pile and fin pile to that of pipe pile in loose sand were 0.82, 1.21, and 1.43 respectively. The lateral resistances of single short rigid piles in medium dense sand were about 150 to 155% (152 % in average) higher than loose sand and they were in dense sand about 335 to 356 % (348 % in average) greater than loose sand for different pile shapes. When the soil relative density changed from loose state to medium state the lateral resistance of single piles were about 74 % higher in comparison to the case which soil relative density changed from medium state to dense state. The increase in lateral resistance of H pile in dense sand in comparison to loose sand was higher than fin pile, pipe pile and square pile by about 2, 10, and 22 % respectively. The lateral bearing capacity of long flexible piles and intermediate piles with different pile shapes in dense sand was respectively by about 290 % and 179 % greater than short rigid piles. The efficiency of fins in long flexible fin pile on improvement of lateral bearing capacity was lower in comparison to short rigid fin pile.

Key words: Pile Shape, Lateral Resistance, Sand, Relative Density