

فرونشست خاک اطراف شمع تحت اثر بارگذاری سیکلی جانبی در خاک دانه ای

جواد کشاورز^۱، جعفر بلوری بزاز^{*}

۱- گروه عمران، دانشکده مهندسی، دانشگاه فردوسی مشهد، مشهد، ایران، bolouri@um.ac.ir

چکیده

در برخی از سازه ها همانند توربین های بادی از تک شمع ها در پی استفاده می شود. این سازه ها تحت اثر بارهای سیکلی همچون باد و امواج قرار می گیرند. بار سیکلی اعمال شده به پی باعث ایجاد جریان همرفتی در خاک اطراف شمع گشته و موجب پدیدار شدن فرونشست در اطراف شمع می گردد. هندسه فرونشست خاک تحت تاثیر فرکانس بارگذاری، طول مدفون شمع و تراکم خاک می باشد. مقدار فرونشست بر اساس تعداد سیکل در اطراف شمع و تاثیر بارهای سیکلی در ظرفیت باربری شمع و همچنین تغییرات فرکانس بارگذاری بر فرونشست اطراف شمع همواره از موضوعات مورد پرسش توسط پژوهشگران می باشد. در این راستا برنامه آزمایشاتی طراحی شد که بتوان به پاسخ این سوالات پرداخت. در این پژوهش شمع با طول های مدفون متفاوت تحت اثر بارگذاری سیکلی یک جهته قرار گرفته اند. آزمایشات در سه فرکانس مختلف در خاک ماسه ای سست و متراکم انجام شده است. نتایج آزمایشات نشان می دهد عمق و شعاع فرونشست خاک اطراف شمع با توجه به طول مدفون شمع، فرکانس بارگذاری و تراکم خاک متغیر است. بر اساس تحقیقات گذشته و نیز داده های آزمایشگاهی رابطه ای که بتوان فرونشست را تخمین زد ارائه و پارامترهای آن تعیین و کالیبره گردید. در نتیجه می توان با استفاده از این رابطه میزان فرونشست خاک اطراف شمع را در هر سیکل پیش بینی نمود. همچنین نتایج بارگذاری استاتیکی شمع قبل و بعد از بارگذاری سیکلی نشان می دهد ظرفیت باربری شمع می تواند افزایش یا کاهش یابد که به تراکم خاک در حالت اولیه و بازتوزیع ذرات خاک پس از بارگذاری سیکلی بستگی دارد. فرکانس بارگذاری نیز تاثیر چندانی در ظرفیت باربری استاتیکی پس از بارگذاری سیکلی ندارد.

کلمات کلیدی

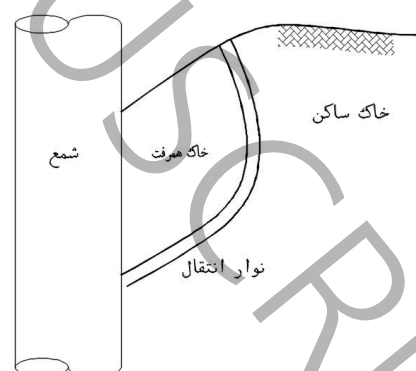
شمع، بارگذاری سیکلی، فرکانس، خاک ماسه ای، ظرفیت باربری استاتیکی.

ساخت توربین های بادی در سرتاسر جهان در دهه های گذشته به جهت تولید انرژی های تجدید پذیر افزایش یافته که می توان گفت اکثر پی های این سازه ها از نوع تک شمع (مونو پایل) می باشند. در صنعت توربین های بادی اروپا ۷۹ درصد از پی کل این سازه ها دارای شمع واحد (مونو پایل) اعلام شده است [۱]. اندر کنش خاک و شمع تحت اثر بار سیکلی بوسیله مدل های فیزیکی [۲-۷] و مدل های عددی [۸-۱۱] مورد مطالعه گسترده ای قرار گرفته است. تمرکز مطالعات صورت گرفته روی پاسخ شمع تحت اثر بار سیکلی بوده و توجه کمتری به جابجایی های ایجاد شده در اطراف شمع در اثر تغییر شکل های خاک شده است.

فرونشست خاک اطراف پی های شمعی تحت اثر بار جانبی سیکلی در پروژه های میدانی [۱۲] و در مدل های فیزیکی آزمایشگاهی [۱۳، ۱۴] مشاهده و گزارش شده است. نتایج این مطالعات نشان می دهد ذرات خاک در اطراف شمع به شکل همرفتی در یک محدوده جابجا شده و باعث ایجاد فرونشست می شوند. فرآیند فرونشست و همرفتی ذرات خاک در اطراف شمع مرتعش وابسته به زمان می باشد. این فرآیند می تواند باعث کاهش ظرفیت باربری [۱۵، ۱۶]، بدون تغییر و یا افزایش آن [۱۷، ۱۸] بسته به مشخصات بارگذاری شود [۱۹]. همچنین فرونشست می تواند منجر به افزایش تغییر شکل در شمع شود [۲۰] که در واقع باید گفت تغییر شکل های سیکلی خاک اطراف شمع بستگی به حالت اولیه خاک، تعداد سیکل و سطح کرنش سیکلی دارد [۲۱-۲۳].

دانه های خاک تحت اثر ارتعاش ایجاد شده توسط شمع، جریان همرفتی^۱ (فرو رفتن دانه های خاک به عمق و بازگشت آنها به سطح) ایجاد می کنند که در اصطلاح این رفتار را Ratcheting می نامند [۲۴-۲۶]. مکانیزم این رفتار به این شکل است که در بارگذاری سیکلی جانبی، میزان نیرو پشت شمع به حداکثر رسیده و سپس میزان نیرو کاهش می یابد و شمع به عقب بر می گردد. فضای خالی در ناحیه اتصال شمع و خاک ایجاد می گردد. این فضای خالی باعث می شود که دانه های ماسه در مجاورت شمع به عمق فرو رفته به گونه ای که دانه های ماسه به عمقی می رسند که فضای ایجاد شده در ناحیه اتصال شمع و خاک به اندازه ای که ذرات بتوانند به سمت پایین حرکت کنند بزرگ نیست و در نتیجه دانه های ماسه به داخل خاک فشار داده می شوند [۲۷].

مهاجرت ذرات خاک به سمت شمع در اثر بارگذاری سیکلی جانبی شروع می شود و در طول این بارگذاری این فرآیند ادامه می یابد. سرعت مهاجرت ذرات خاک در پشت شمع (جداره مقابل اعمال بار) بیش از سرعت آنها در جلوی شمع (جداره در جهت اعمال بار) می باشد [۱۳]. آزمون آزمایشگاهی نشان می دهد در بارگذاری یک طرفه، ماسه های قرار گرفته در پشت شمع در حدود قطر شمع و در جلوی شمع در حدود ۰/۶ برابر قطر شمع در ناحیه جریان همرفتی ماسه ها قرار می گیرند. در عمق نیز به ترتیب در پشت و جلوی شمع در حدود ۱/۵ و ۱/۲۵ برابر قطر شمع جریان همرفتی ماسه ها به شکل گوش (عرض زیاد در سطح و در عمق کاهش می یابد) ایجاد می شود که در شکل ۱ قابل مشاهده است [۲۸].



شکل ۱: حرکت همرفتی دانه های ماسه اطراف شمع [۱۳]

¹ Convective

Figure 1. Convective movement of sand grains around the pile

دو مرحله اصلی الگوی حرکت دانه های خاک شامل مرحله مترام شدن اولیه و ادامه جریان همرفتی می شود. مرحله اول بوسیله فرونشست، که خاک اطراف شمع باز آرایش و متراکم می شوند مشخص می گردد. پدیده دیگر در این مرحله تجمع جابجایی های شمع و افزایش مقاومت جانبی می باشد. به تدریج که خاک اطراف شمع به بیشینه چگالی خود می رسد جریان همرفتی غالب گشته که شروع مرحله دوم می باشد. در این مرحله فرونشست خاک اطراف شمع و افزایش سختی خاک کاهش می یابد [۱۵، ۲۸]. حرکت ذرات توسط تغییرات تنش برشی به سمت نواحی با مقاومت کمتر رانده می شود [۱۵].

یکی از روابط ارائه شده جهت تخمین عمق فرونشست خاک اطراف شمع تحت اثر بار سیکلی جانبی، ایده آل سازی پروفیل فرونشست است. مخروط ناقص که هندسه آن در شکل ۲ نمایش داده شده با شعاع فرونشست (l) برابر با قطر شمع (B) در نظر گرفته شده و با محاسبه حجم فرونشست (خط فرضی) میزان عمق آن با استفاده از رابطه (۱) قابل تخمین است [۲۷].

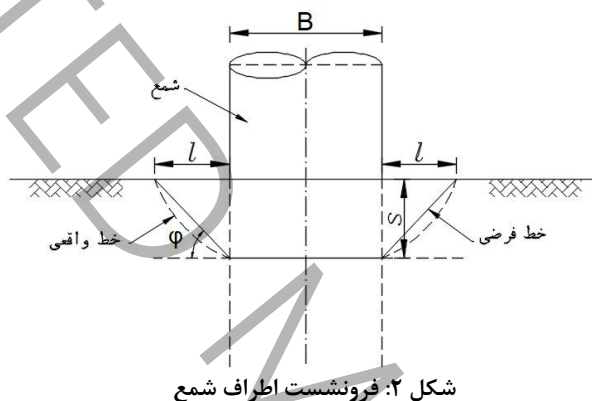


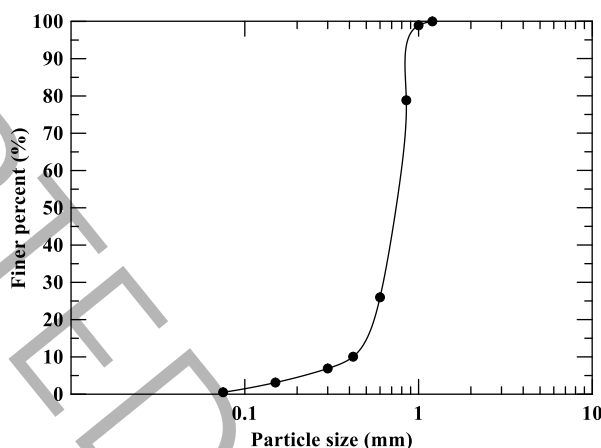
Figure 2. Subsidence around the pile

$$S = \frac{6}{5} \frac{\Delta V_c}{\pi B^2} \quad (1)$$

در این رابطه S عمق فرونشست، ΔV_c حجم فرونشست و B قطر شمع می باشد. رابطه ارائه شده هر چند بصورت تئوری صحیح است اما بدلیل آنکه شعاع فرونشست اطراف شمع تحت اثر بارگذاری جانبی به ندرت به قطر شمع می رسد در عمل کاربرد زیادی ندارد. همچنین باید توجه داشت که در بارگذاری های یک طرفه شعاع فرونشست ایجاد شده در جلو و پشت شمع یکسان نیست. تاثیر تغییرات فرکانس بارگذاری و طول مدفون شمع در خاک ماسه ای متراکم و سست بر فرونشست اطراف شمع تحت اثر بارگذاری سیکلی به همراه تغییر ظرفیت باربری استاتیکی شمع قبل و بعد از تجربه بارگذاری سیکلی به طور جامع مورد توجه قرار نگرفته است. در این پژوهش با اعمال بار سیکلی یک طرفه در سه فرکانس بارگذاری مختلف روی سه نمونه شمع با طول های مدفون متفاوت در ماسه متراکم و سست، هندسه فرونشست اطراف شمع و ظرفیت بارگذاری مختلف روی سه نمونه شمع با طول های مدفون متفاوت در ماسه متراکم و سست، هندسه فرونشست اطراف شمع و ظرفیت باربری استاتیکی در آزمایشگاه مورد بررسی قرار گرفته است. همچنین رابطه ارائه شده توسط سایر پژوهشگران جهت برازش داده های فرونشست بر زمان می باشد و امکان تخمین فرونشست بر اساس تعداد سیکل رخ داده وجود ندارد. در این پژوهش با تغییر پارامتر زمان به پارامتر تعداد سیکل و کالیبره نمودن ضرایب، امکان تخمین مقدار فرونشست بر اساس تعداد سیکل فراهم شده است.

پی سازه های توربین های بادی در محدوده وسیعی از ماسه های متراکم تا رس های سخت و سنگ ها نصب می شوند. به عنوان نمونه، لایه های خاک زیر دریای شمال از نوع ماسه است [۲۹]. در این پژوهش اندرکنش خاک از نوع ماسه با شمع مانند بسیاری از محققان در نظر گرفته شده است [۳۰-۳۲].

خاک مورد استفاده در پژوهش حاضر ماسه فیروز کوه می باشد که دانه بندی آن در شکل ۳ نمایش داده شده است. مشخصات ماسه در جدول ۱ ارائه شده که در طبقه بندی سیستم متحد به عنوان ماسه بد دانه بندی شده (SP) شناخته می شود.



شکل ۳: دانه بندی ماسه فیروز کوه مورد استفاده در آزمایش

Figure 33 Grading of Firoozkuh sand used in the experiment

Table 1. Specifications of Firoozkuh sand

جدول ۱: مشخصات ماسه فیروز کوه			
ضریب انحنای	ضریب یکنواختی	میانگین اندازه ذرات	چگالی ویژه ، Gs
C _c	C _u	d ₅₀ : mm	
۱/۲	۱/۸	۰/۷۰	۲/۷۱

۲-۲- مشخصات شمع

لوله پی وی سی با قطر ۶۳ mm و طول مدفون ۴۰۰، ۶۰۰ و ۸۰۰ mm به عنوان شمع در این پژوهش مورد استفاده قرار گرفته است. نسبت های مختلف طول به قطر شمع به گونه ای انتخاب شده که برخی شمع ها به عنوان شمع صلب و برخی به عنوان انعطاف پذیر شناخته شده است. نسبت طول به قطر شمع در این پژوهش بین ۶ تا ۱۳ و نسبت مقیاس^۱ 1:60 انتخاب شده است. در سایر پژوهش ها نسبت های طول به قطر ۴، ۵، ۷، ۱۰، ۱۸، ۲۰، ۲۸، ۳۰ و ۳۸ با نسبت مقیاس های ۱:۱۴، ۱:۲۶، ۱:۳۰، ۱:۴۰، ۱:۵۰، ۱:۸۰ و ۱:۱۰۰ مشاهده شده است [۳۲-۳۷، ۶، ۲۷]. مشخصات مکانیکی لوله های پی وی سی مورد استفاده در جدول ۲ آورده شده است.

Table 2. Specifications of the PVC pipe used

جدول ۲: مشخصات لوله پی وی سی مورد استفاده			
قطر خارجی	ضخامت	سختی	وزن
B (mm)	(mm)	EI (kN.m ²)	(N/m)
۶۳	۲/۶۳	۰/۶۸	۸/۶

۲-۳- دستگاه و بارگذاری شمع

¹ Scale ratio

دستگاه مورد استفاده در آزمایشگاه جهت شبیه سازی شمع تحت اثر بار جانبی سیکلی شامل سیستم بارگذاری، مخزن خاک، دستگاه بارش، سیستم قرائت داده و ترمینال خروجی است که در شکل ۴ نمایش داده شده است. دستگاه بارگذاری تشکیل شده از موتور کنترل^۱، پیچ ساچمه ای^۲، ریل، واگن، میز به همراه پیچ های نگهدارنده و نیرو سنج از نوع S شکل و با دقت ۲/۵ N است. بار توسط موتور کنترلی به همراه نیروسنج در ارتفاع ثابت ۳۵۰ mm ($e = 5.5 B$) از سطح خاک به صورت سیکلی و جانبی به شمع اعمال شده است. محققان مختلفی فاصله بین بارگذاری جانبی تا سطح خاک را در حدود ۲ تا ۲۵ برابر قطر شمع که در سازه های توربین های بادی در دریا ها تحت اثر بار جانبی باد و موج قرار گرفته اند، پیشنهاد کرده اند [۳۸]. در این پژوهش مخزن خاک به طول ۱۲۰۰ mm در عرض ۶۰۰ و ارتفاع ۱۰۰۰ mm با توجه به قطر شمع و حذف تاثیرات شرایط مرزی در جهت تاثیرات شرایط مرزی در مدل های آزمایشگاهی در جهت بارگذاری فاصله بین شمع و دیواره مخزن بین ۸ تا ۱۲ برابر قطر شمع و در جهت عمود بر بارگذاری فاصله بین شمع و دیواره ۳ تا ۴ برابر قطر شمع در نظر گرفته شده است [۳۹]. برای رسیدن به تراکم مورد نظر در خاک مورد استفاده از دستگاه بارش استفاده شده که شرح کامل آن در پژوهش دیگری ارائه شده است [۴۰، ۴۱]. با استفاده از دستگاه بارش، ماسه با دو دانسیته نسبی ۲۴٪ و ۹۷٪ در مخزن تهیه شد که معادل وزن مخصوص ۱۳/۸ و ۱۵ kN/m³ می باشد. سایر پارامترهای اندازه گیری شده در آزمایشگاه در جدول ۳ آورده شده است. جهت اندازه گیری تغییر نشست اطراف شمع و جابجایی های شمع از حسگرهای الکتریکی LVDTs^۳ (با دقت ۰/۲ mm) استفاده شده است.

Table 3. Shear parameters of the Firoozkuh sand used

جدول ۳: پارامترهای برشی ماسه فیروزکوه مورد استفاده

مدول یانگ	زاویه اصطکاک	چگالی نسبی	وزن مخصوص
E_s (MPa)	ϕ (°)	D_r (%)	γ_s (kN/m ³)
۱۶/۴	۳۳	۱±۲۴	۱۳/۸
۴۰	۴۱/۵	۱±۹۷	۱۵

۴-۲- نحوه انجام آزمایش

با استفاده از دستگاه بارش، مخزن به صورت لایه به لایه تا تراز کف شمع پر از ماسه می شود. پس از استقرار شمع پر کردن مخزن با کنترل قائم بودن شمع ادامه می یابد. بعد از پر شدن مخزن، صفحه و پیچ های نگهدارنده دستگاه بارگذاری نصب و کنترل موتور روی آن مستقر می گردد. بعد از آن نیرو سنج، سنسورهای اندازه گیری تغییر مکان جانبی و نشست خاک اطراف شمع نصب می شود و بارگذاری سیکلی به شمع اعمال می شود. مشخصات بارگذاری سیکلی یک طرفه با نسبت های بدون بعد b_b و b_c و تعریف ξ_c می شود، به عبارت دیگر [۳۳، ۳۸].

b_b = (ظرفیت باربری استاتیکی) / (حداکثر نیرو)

b_c = (حداقل نیرو) / (حداکثر نیرو)

در این پژوهش نسبت های بارگذاری ۰/۴ و صفر ($b_b = 0$ و $b_c = 0$) با تعداد ۵۰۰۰ سیکل در سه فرکانس بارگذاری ۰/۷، ۰/۱۴ و ۰/۲۸ Hz استفاده شده است. فرکانس بارگذاری سیکلی در خاک ها بین صفر تا ۱ Hz طبقه بندی شده است [۴۲، ۴۳]. فرکانس بارگذاری که در طول عمر سازه های توربین بادی رخ می دهد معمولاً بین ۰/۰۵ تا ۰/۲ Hz [۴۴] و حداکثر صفر تا ۰/۵ Hz

¹ Servo Motor

² Ball Screw

³ Linear Variable Displacement Transducers

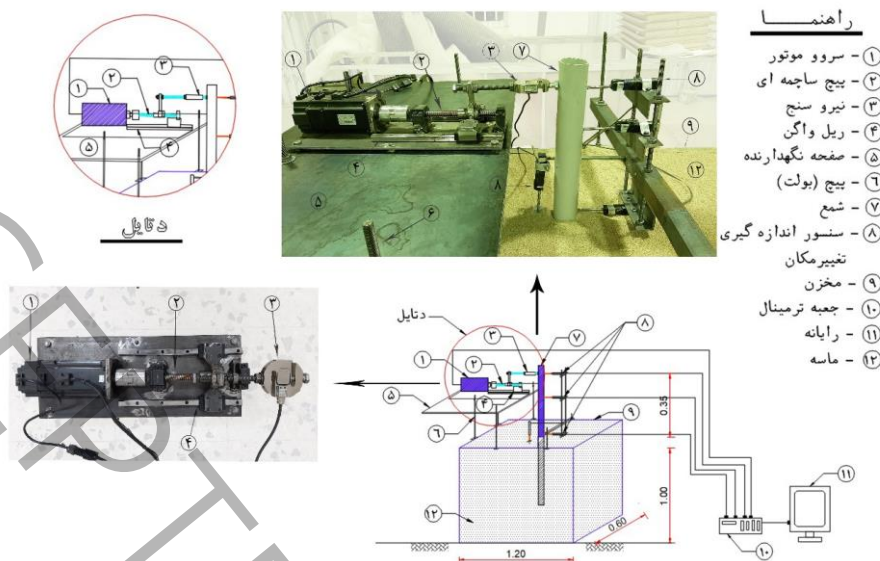
[۴۵] گزارش شده است. به عنوان نمونه فرکانس بارگذاری سازه‌های توربین بادی تحت اثر امواج دریا، برابر 0.106 Hz در آزمون‌های آزمایشگاهی شمع تحت اثر بارگذاری سیکلی جانبی انتخاب شده است [۴۶].

در پژوهش حاضر ۲۴ آزمایش استاتیکی و سیکلی انجام شده و هر آزمایش با یک کد بصورت $L*F*H$ و یا $L*F*L$ نامگذاری شده است. عدد بعد از L و f به ترتیب نشان دهنده طول مدفون شمع به سانتی متر (cm) و فرکانس بارگذاری بر حسب هرتز (Hz) می باشد. در انتها حرف L و H نشان دهنده تراکم خاک کم و یا زیاد مطابق جدول شماره ۳ می باشد. به عنوان مثال آزمایش با کد $L40F0.14L$ نشان دهنده انجام آزمایش با شمع به طول مدفون 40 cm ، فرکانس بارگذاری 0.14 Hz در خاک ماسه ای با چگالی نسبی 24% است. لیست آزمایشات انجام شده در جدول شماره ۴ ارائه شده است. قبل از انجام آزمایش‌های سیکلی، آزمایش استاتیکی جهت تعیین ظرفیت باربری استاتیکی شمع‌ها انجام شده است. ظرفیت باربری شمع تحت اثر بار جانبی بر اساس نمودار نیرو-جابجایی زمانی که تغییر مکان شمع به یک دهم قطر می‌رسد تعیین شده است [۲۷]. پس از بارگذاری سیکلی، بارگذاری استاتیکی تا گسیختگی انجام شده است.

Table 4. List of tests

جدول ۴: لیست آزمایش‌ها

ردیف	کد آزمایش	طول شمع مدفون $L \text{ (m)}$	چگالی نسبی $D_r \text{ (%)}$	فرکانس $f \text{ (Hz)}$	نسبت بارگذاری ξ_b
۱	L40F0.28H	۰/۴	۹۷	۰/۲۸	۰/۴
۲	L40F0.14H	۰/۴	۹۷	۰/۱۴	۰/۴
۳	L40F0.07H	۰/۴	۹۷	۰/۰۷	۰/۴
۴	L60F0.28H	۰/۶	۹۷	۰/۲۸	۰/۴
۵	L60F0.14H	۰/۶	۹۷	۰/۱۴	۰/۴
۶	L60F0.07H	۰/۶	۹۷	۰/۰۷	۰/۴
۷	L80F0.28H	۰/۸	۹۷	۰/۲۸	۰/۴
۸	L80F0.14H	۰/۸	۹۷	۰/۱۴	۰/۴
۹	L80F0.07H	۰/۸	۹۷	۰/۰۷	۰/۴
۱۰	L40F0.28L	۰/۴	۲۴	۰/۲۸	۰/۴
۱۱	L40F0.14L	۰/۴	۲۴	۰/۱۴	۰/۴
۱۲	L40F0.07L	۰/۴	۲۴	۰/۰۷	۰/۴
۱۳	L60F0.28L	۰/۶	۲۴	۰/۲۸	۰/۴
۱۴	L60F0.14L	۰/۶	۲۴	۰/۱۴	۰/۴
۱۵	L60F0.07L	۰/۶	۲۴	۰/۰۷	۰/۴
۱۶	L80F0.28L	۰/۸	۲۴	۰/۲۸	۰/۴
۱۷	L80F0.14L	۰/۸	۲۴	۰/۱۴	۰/۴
۱۸	L80F0.07L	۰/۸	۲۴	۰/۰۷	۰/۴
۱۹	L40H	۰/۴	۹۷	استاتیکی	استاتیکی
۲۰	L60H	۰/۶	۹۷	استاتیکی	استاتیکی
۲۱	L80H	۰/۸	۹۷	استاتیکی	استاتیکی
۲۲	L40L	۰/۴	۲۴	استاتیکی	استاتیکی
۲۳	L60L	۰/۶	۲۴	استاتیکی	استاتیکی
۲۴	L80L	۰/۸	۲۴	استاتیکی	استاتیکی



شکل ۴: طرح و تصویر دستگاه آزمایش
Figure 4. Scheme and image of the testing device

۲-۴- تحلیل ابعادی

تحلیل ابعادی برای کمیت‌های فیزیکی در جدول ۵ ارائه شده است [۴۷، ۲۷]. در جدول ۵ فاکتور n ، پارامتر مقیاس^۱ است.

Table 5. Dimensional analysis for laboratory models under 1g conditions

جدول ۵: تحلیل ابعادی برای مدل‌های آزمایشگاهی در شرایط 1g [۴۷، ۲۷]

ابعاد	تحلیل ابعاد	پارامتر
$L [m]$	$1/n$	طول (L)
$F [N]$	$1/n^3$	بار (H)
$F/L^3 [N / m^3]$	1	وزن مخصوص (γ)
$F * L^2 [N.m^2]$	$1/n^5$	سختی خمشی (EI)
$1/T [Hz]$	$n^{1/2}$	فرکانس بارگذاری (f)

جهت به حداقل رساندن اثر مقیاس در آزمایش‌های کوچک مقیاس و اطمینان از رفتار مدل آزمایشگاهی که نمایانگر مدل واقعی باشد، لازم است پارامترهای بکار رفته از تحلیل ابعادی تبعیت کنند. پارامترهای مورد استفاده در مقیاس آزمایشگاهی و واقعی مطابق جدول ۵، در جدول ۶ ارائه شده است. نسبت مقیاس مورد استفاده در این پژوهش ۶۰ در نظر گرفته شده است.

Table 6. Size of parameters in laboratory and real models

جدول ۶: اندازه پارامترها در مدل آزمایشگاهی و واقعی

مقیاس واقعی	مقیاس آزمایشگاهی	پارامتر	
۳/۸	۰/۰۶۳	$B (m)$	قطر شمع
۴۸ ، ۳۶ ، ۲۴	۰/۸ ، ۰/۶ ، ۰/۴	$L (m)$	طول شمع
$۵/۰ \times ۱۰^{۱۱}$	$۶/۸ \times ۱۰^۲$	$EI (N.m^2)$	سختی شمع

شمع

¹ Scaling factor

۰/۷	۰/۷	d_{50} (mm)	میانگین اندازه ماسه	خاک
۱۳/۸ ، ۱۵	۱۳/۸ ، ۱۵	γ (kN/m ³)	وزن مخصوص ماسه	
0.1×10^{-7}	۰~۹۰	P_t (N)	نیروی افقی	نیروها
۲۱	۰/۳۵	e (m)	فاصله نیرو از سطح خاک	
۰/۰۱~۰/۰۴	۰/۰۵~۰/۳	f (Hz)	فرکانس بارگذاری	

۵-۲- محدودیت آزمایش

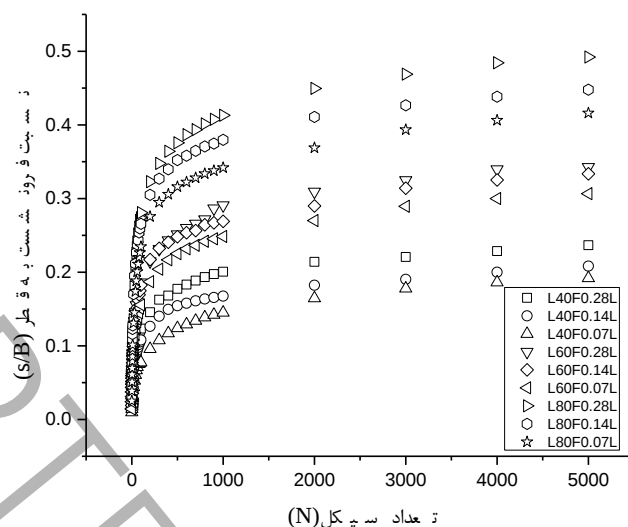
یکی از محدودیت‌های اصلی مطالعه ارائه شده در این مقاله، مربوط به شرایط خاک است. این پژوهش به ارزیابی رفتار شمع‌ها در خاک ماسه‌ای پرداخته است که تعداد زیادی از آنها در عمل در این نوع خاک قرار می‌گیرند، در حالی که برخی از تک شمع‌ها در خاک رسی اجرا می‌شوند [۶].

برای ساده‌تر شدن آزمایش، آب به‌طور کامل از آزمایش حذف شد. اگر آب حضور داشت، تخلیه از طریق منافذ بین دانه‌ها نقشی مهم در چگونگی تأثیر نرخ بارگذاری بر حرکات ماسه ایفا می‌کرد [۴۸]. این تأثیر عمدتاً به دلیل افزایش فشار منفذی با هر سیکل بارگذاری است. در ماسه‌های ریز که تحت ارتعاشات با شدت قابل توجه قرار می‌گیرند، افزایش موقتی فشار منفذی باعث کاهش قابل توجه تنش‌های مؤثر خواهد شد. این موضوع ممکن است باعث افزایش تحرک ذرات ماسه شود و به نرخ‌های توسعه بالاتر و همچنین ابعاد نهایی بزرگ‌تر برای فرونشست ماسه و جریان‌های همرفتی منجر شود، در مقایسه با آنچه در این مقاله ارائه شده است. علاوه بر این، ذرات ماسه احتمالاً تحت تأثیر اثر شستشوی آب قرار گیرند که حرکات آن‌ها را بسیار پیچیده‌تر خواهد کرد [۴۹]. برخی پژوهشگران معتقد هستند که آزمایش‌هایی که بر روی ماسه خشک انجام شده اند نتایج مشابهی با ماسه اشباع دارند، زیرا فشار آب در ماسه اشباع به سرعت کاهش می‌یابد [۵۰].

۳- نتایج آزمایشات و بحث

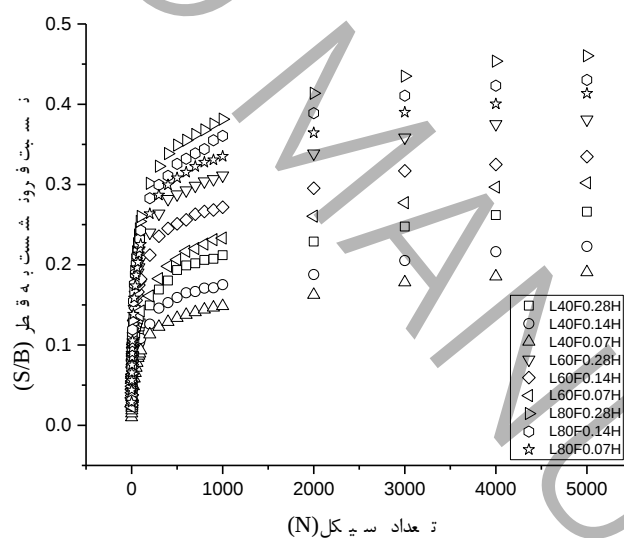
۱-۳- فرونشست اطراف شمع

شمع در طول‌های مختلف در ماسه متراکم و سست تحت اثر بارگذاری با سه فرکانس مختلف قرار داده شده که نتایج فرونشست ماسه اطراف شمع در حالت ماسه سست و ماسه متراکم به ترتیب در شکل‌های ۵ و ۶ برحسب نسبت فرونشست به قطر (S/B) در برابر تعداد سیکل نمایش داده شده است.



شکل ۵: نسبت فرونشست ماسه اطراف شمع در برابر تعداد سیکل در خاک دانه‌ای سست

Figure 5. Ratio of sand subsidence around the pile versus the number of cycles in loose granular soil



شکل ۶: نسبت فرونشست ماسه اطراف شمع در برابر تعداد سیکل در خاک دانه‌ای متراکم

Table 6. Ratio of sand subsidence around the pile versus the number of cycles in dense granular soil

با توجه به نتایج ملاحظه می گردد با افزایش طول مدفون شمع میزان فرونشست افزایش یافته که دلیل آن افزایش میزان بار وارده به شمع می باشد. در هر مرحله افزایش فرکانس بارگذاری در هر شمع از ۰/۰۷ به ۰/۱۴ Hz و همچنین از ۰/۱۴ به ۰/۲۸ Hz، افزایش مقدار عمق فرونشست را به طور میانگین در حدود ۱۰٪ نشان داده است. مقدار افزایش عمق فرونشست در شمع با عمق مدفون mm ۸۰۰، کمتر از ۱۰٪ و در شمع با عمق مدفون mm ۴۰۰، بیشتر از ۱۰٪ اندازه گیری شده است. لذا تغییر در فرکانس بارگذاری، تغییراتی در میزان فرونشست ایجاد کرده به گونه‌ای که فرکانس کوچکتر، فرونشست کمتری ایجاد کرده است اما این میزان تغییرات در شمع‌های کوتاه بیشتر از شمع‌های بلند می باشد. به بیان واضح تر تغییر در فرکانس بارگذاری، تاثیر بیشتری در شمع‌های کوتاه نسبت به شمع‌های بلند دارد. بیشینه میزان فرونشست در سیکل‌های ابتدایی رخ داده به گونه‌ای که بیش از ۶۰٪ میزان فرونشست در

۲۰۰ سیکل ابتدایی و ادامه میزان فرونشست در ۴۸۰۰ سیکل بعد از آن رخ می‌دهد. همچنین میزان فرونشست در ۱۰ سیکل ابتدایی بیش از ۲۰٪ فرونشست نهایی اندازه گیری شده است.

۳-۲- توسعه فرونشست در بستر زمان

محققین زیادی تلاش نمود اند میزان عمق فرونشست در اثر آبشستگی در پایه پل های واقع در رودخانه ها را در گذر زمان تعیین نمایند و در این خصوص روابطی را ارائه نموده‌اند. به عنوان نمونه از رابطه (۲) که ابتدا برای آبشستگی اطراف شمع ارائه شده [۵۱]- [۵۳]، به منظور ارزیابی عمق فرونشست می‌توان استفاده نمود [۴۹]. به عبارتی بر اساس مطالعات انجام شده از این تابع می‌توان برای برازش داده‌های فرونشست به صورت توسعه زمانی استفاده نمود.

$$\frac{Y}{Y_e} = a \left\{ 1 - \exp \left[-C \left(\frac{t}{T_e} \right)^n \right] \right\} \quad (۲)$$

در این رابطه Y پارامتر مورد اندازه گیری، t زمان، T_e زمان مشخصه، Y_e پارامتر مورد اندازه گیری در زمان مشخصه می‌باشد. همچنین پارامترهای a ، C و n ضرایبی هستند که بر پایه برازش داده‌ها تعیین می‌گردند. دو پارامتر T_e و Y_e بر اساس روش ارائه شده در پژوهش‌های پیشین [۴۹] و داده آزمایشگاهی قابل تعیین است. رابطه (۲) را می‌توان با استفاده از داده‌های آزمایشگاهی به صورت یک رابطه زمانی عمق فرونشست اطراف شمع در ماسه شل و متراکم به صورت رابطه شماره (۳) و (۴) ارائه نمود:

$$\frac{S}{S_e} = 1.07 \left\{ 1 - \exp \left[-2.84 \left(\frac{t}{T_e} \right)^{0.41} \right] \right\} \quad (۳)$$

$$\frac{S}{S_e} = 1.04 \left\{ 1 - \exp \left[-2.92 \left(\frac{t}{T_e} \right)^{0.40} \right] \right\} \quad (۴)$$

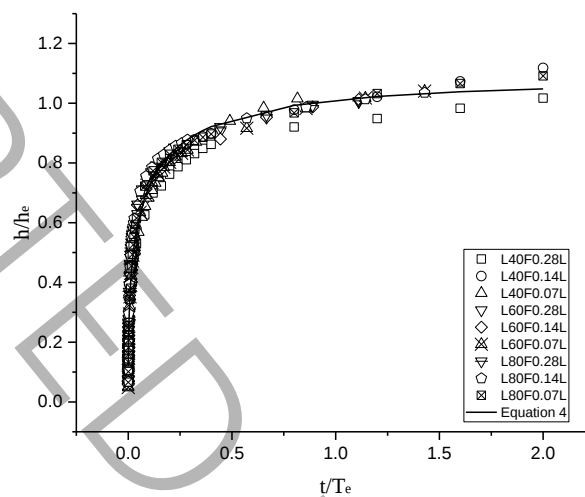
مقادیر T_e تعیین شده به همراه میزان فرونشست (S_e) در جدول ۷ ارائه شده است.

Table 7. Values of T_e and S_e using relation (3)

جدول ۷: مقادیر T_e و S_e با استفاده از رابطه (۳)

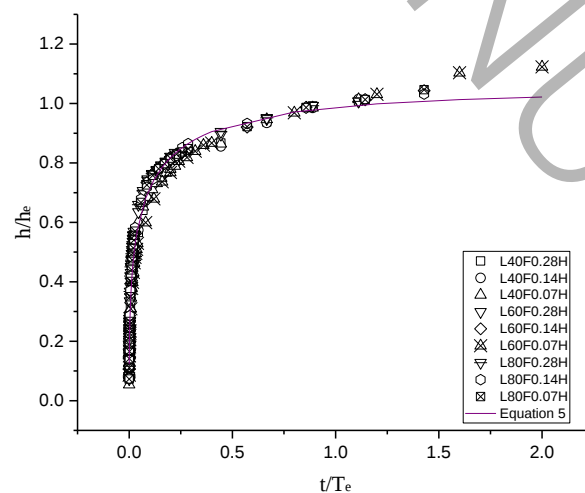
$S_e(\text{mm})$	$T_e(\text{h})$	آزمایش	$S_e(\text{mm})$	$T_e(\text{h})$	آزمایش
۱۶/۶۳	۴/۳۸	L40F0.28H	۱۴/۶۵	۲/۴۳	L40F0.28L
۱۳/۸۳	۸/۷۵	L40F0.14H	۱۱/۹۱	۸/۷۵	L40F0.14L
۱۱/۸۵	۱۷/۵	L40F0.07H	۱۱/۷۳	۹/۷۲	L40F0.07L
۲۳/۸۲	۴/۳۸	L60F0.28H	۲۳/۹	۴/۳۸	L60F0.28L
۲۰/۲۲	۶/۸۱	L60F0.14H	۲۰/۷۵	۸/۷۵	L60F0.14L
۱۶/۹۴	۹/۷۲	L60F0.07H	۱۸/۵۶	۱۳/۶۱	L60F0.07L
۲۸/۷۹	۴/۳۸	L80F0.28H	۳۰/۷۵	۴/۳۸	L80F0.28L
۲۶/۲۷	۶/۸۱	L80F0.14H	۲۷/۲۴	۶/۸۱	L80F0.14L
۲۴/۹۰	۱۳/۶۱	L80F0.07H	۲۴/۰۱	۹/۷۲	L80F0.07L

در شکل ۷ و ۸ معادلات شماره (۳) و (۴) که تابع زمانی فرونشست در ماسه شل و متراکم هستند بر اساس داده‌های شمع تحت اثر بار جانبی با طول‌ها و فرکانس‌های بارگذاری مختلف ترسیم شده و ضریب R^2 نیز برای هر دو معادله محاسبه گردیده ($R^2=0.99$) که بیانگر تطابق قابل قبول داده‌های آزمایشگاهی با رابطه ارائه شده است.



شکل ۷: تابع زمانی بدون بعد عمق فرونشست در ماسه سست

Figure 7. Dimensionless time function of subsidence depth in loose sand



شکل ۸: تابع زمانی بدون بعد عمق فرونشست در ماسه متراکم

Figure 8. Dimensionless time function of subsidence depth in dense sand

در پژوهش پیشین ضرایب a ، C و n به ترتیب $۱/۰۸$ ، $۲/۵۱$ و $۰/۲۴$ گزارش شده است [۴۹]. نزدیکی این اعداد به ضرایب بدست آمده توسط این پژوهش نشان دهنده مدلسازی صحیح و تاکید بر عدم تاثیر فرکانس بارگذاری در این رابطه می باشد و اختلاف آن مربوط به نوع دانه بندی خاک (اختلاف در اندازه ذرات میانگین) و تراکم خاک می باشد. البته نیاز به پژوهش های بیشتری می باشد که دقیقاً علت تغییر در ضرایب و محدوده ضرایب مشخص گردد.

۳-۳- محاسبه فرونشست بر اساس تعداد سیکل

همانگونه که در بخش ۳-۲ بیان شد، رابطه (۲) جهت تعیین عمق آب شستگی اطراف پایه پل و پدیده های مشابه آن که زمان متغیر اصلی می باشد کاربرد فراوان دارد. اما در بحث فرونشست اطراف شمع با توجه به اینکه فرکانس بارگذاری سیکلی متغیر است تعداد سیکل بارگذاری پارامتر اصلی به شمار می رود. به عبارتی می توان در رابطه (۲) به جای پارامتر زمان از تعداد سیکل بارگذاری که در رابطه (۵) ارائه شده استفاده نمود.

$$\frac{S}{S_e} = a \left\{ 1 - \exp \left[-C \left(\frac{N}{N_e} \right)^n \right] \right\} \quad (۵)$$

بر اساس رابطه (۵) و نتایج آزمایش انجام شده، رابطه بین تعداد سیکل و میزان فرونشست به صورت معادله (۶) و (۷) به ترتیب برای ماسه سست و متراکم خواهد بود.

$$\frac{S}{S_e} = 1.86 \left\{ 1 - \exp \left[-0.70 \left(\frac{N}{N_e} \right)^{0.42} \right] \right\} \quad (۶)$$

$$\frac{S}{S_e} = 2.00 \left\{ 1 - \exp \left[-0.66 \left(\frac{N}{N_e} \right)^{0.40} \right] \right\} \quad (۷)$$

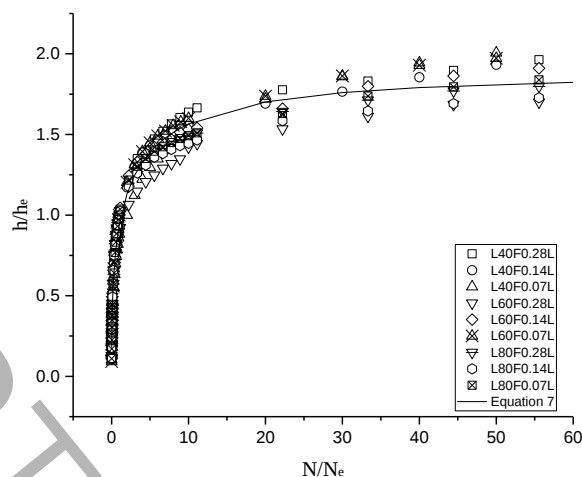
مقادیر N_e و S_e محاسبه و در جدول ۸ ارائه شده است.

Table 8. Values of N_e and S_e using relation (3)

جدول ۸: مقادیر N_e و S_e با استفاده از رابطه شماره ۳

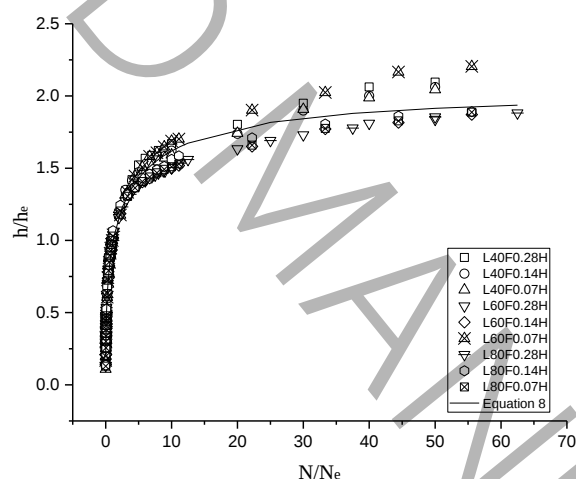
S_e (mm)	N_e	آزمایش	S_e (mm)	N_e	آزمایش
۸/۰۰	۱۰۰	L40F0.28H	۷/۵۹	۹۰	L40F0.28L
۶/۸۱	۱۰۰	L40F0.14H	۶/۷۹	۱۰۰	L40F0.14L
۵/۸۸	۱۰۰	L40F0.07H	۶/۰۳	۱۰۰	L40F0.07L
۱۳/۰۶	۱۰۰	L60F0.28H	۱۲/۷	۹۰	L60F0.28L
۱۱/۲۷	۹۰	L60F0.14H	۶/۷۹	۱۰۰	L60F0.14L
۸/۶۳	۹۰	L60F0.07H	۹/۷۹	۱۰۰	L60F0.07L
۱۵/۴۱	۸۰	L80F0.28H	۱۷/۲۵	۹۰	L80F0.28L
۱۴/۳۳	۹۰	L80F0.14H	۱۶/۳۳	۹۰	L80F0.14L
۱۳/۸۲	۹۰	L80F0.07H	۱۴/۲۶	۹۰	L80F0.07L

در شکل های ۹ و ۱۰ تابع روابط (۶) و (۷) که نشان دهنده تابع سیکلی میزان فرونشست در ماسه سست و متراکم تحت اثر بار جانبی با سه فرکانس بارگذاری مختلف و سه طول مدفون شمع می باشد، ارائه شده است.



شکل ۹: تابع سیکلی بدون بعد عمق فرونشست در ماسه شل

Figure 9. Dimensionless cyclic function of subsidence depth in loose sand



شکل ۱۰: تابع سیکلی بدون بعد عمق فرونشست در ماسه متراکم

Figure 10. Dimensionless cyclic function of subsidence depth in dense sand

جهت تخمین میزان فرونشست در سیکل‌های مختلف می‌توان از روابط (۶) و (۷) استفاده نمود. به این منظور نیاز به تعیین N_e و S_e می‌باشد که با توجه به نتایج ارائه شده در جدول ۸، تعداد سیکل مشخصه، N_e ، که اکثراً معادل ۹۰ و ۱۰۰ بدست آمده را می‌توان به طور متوسط برابر ۹۵ در نظر گرفت. همچنین برای نشست مشخصه میزان کمینه و بیشینه را باید در نظر گرفت که بر اساس جدول ۸ مقادیر آنها حدود ۶ و ۱۸ mm به ترتیب می‌باشد. در نتیجه می‌توان میزان فرونشست را در سیکل‌های مختلف تعیین نمود.

۴-۳- عمق و شعاع فرونشست

میزان عمق و شعاع فرونشست نهایی اطراف لوله پس از اعمال ۵۰۰۰ سیکل در جدول ۹ ارائه شده است. نسبت میزان عمق فرونشست به قطر، متغیر بوده که به طول مدفون شمع، تراکم خاک و به فرکانس بارگذاری بستگی دارد. نسبت میزان عمق فرونشست به طول مدفون شمع بین ۰/۰۳ تا ۰/۰۴ بوده که میانگین آن ۰/۰۳۵ می‌باشد. به عبارت دیگر میزان عمق فرونشست اطراف شمع حدود ۰/۰۳۵ طول مدفون شمع تخمین زده می‌شود. نسبت شعاع فرونشست به عمق فرونشست که در ستون آخر جدول ۹ محاسبه

شده است، به طور میانگین در خاک های سست ۱/۸۳ و در خاک های متراکم ۱/۹۵ می باشد. به صورت تئوری میزان شعاع فرونشست برابر با میزان عمق فرونشست بخش بر تانژانت زاویه اصطکاک داخلی خاک اطراف شمع می باشد که در جدول ۹ محاسبه و نشان داده شده است [۱۹]. ملاحظه می شود مقادیر اندازه گیری شده با مقادیر تحلیلی ($l=S/\tan\phi$) اختلاف قابل توجهی مخصوصاً در خاک متراکم دارد. با استفاده از روابط (۶) و (۷) میزان عمق فرونشست تخمین زده می شود و با دانستن نسبت شعاع به عمق فرونشست میزان شعاع قابل تخمین است.

Table 9. Depth and radius of subsidence in different piles along with their ratios

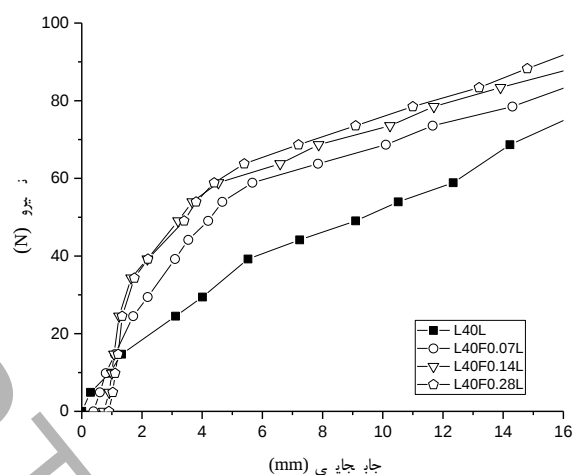
جدول ۹: عمق و شعاع فرونشست در شمع های مختلف به همراه نسبت های آن

l/S	$l=S/\tan(\phi)$	S/L	S/D	l (mm)	S (mm)	آزمایش
۱/۸۶۷	۲۳/۰۹۸	۰/۰۳۸	۰/۵۳۶	۲۸	۱۵	L40F0.28L
۲/۰۰۰	۲۰/۰۱۸	۰/۰۳۳	۰/۵۰۰	۲۶	۱۳	L40F0.14L
۲/۰۸۳	۱۸/۴۷۸	۰/۰۳۰	۰/۴۸۰	۲۵	۱۲	L40F0.07L
۱/۷۰۸	۳۶/۹۵۷	۰/۰۴۰	۰/۵۸۵	۴۱	۲۴	L60F0.28L
۱/۶۱۹	۳۲/۳۳۷	۰/۰۳۵	۰/۶۱۸	۳۴	۲۱	L60F0.14L
۱/۶۳۲	۲۹/۲۵۷	۰/۰۳۲	۰/۶۱۳	۳۱	۱۹	L60F0.07L
۱/۸۷۱	۴۷/۷۳۶	۰/۰۳۹	۰/۵۳۴	۵۸	۳۱	L80F0.28L
۱/۸۵۷	۴۳/۱۱۶	۰/۰۳۵	۰/۵۳۸	۵۲	۲۸	L80F0.14L
۱/۸۰۸	۴۰/۰۳۶	۰/۰۳۳	۰/۵۵۳	۴۷	۲۶	L80F0.07L
۲/۰۵۹	۱۹/۲۱۵	۰/۰۴۳	۰/۴۸۶	۳۵	۱۷	L40F0.28H
۲/۲۱۴	۱۵/۸۲۴	۰/۰۳۵	۰/۴۵۲	۳۱	۱۴	L40F0.14H
۲/۳۳۳	۱۳/۵۶۴	۰/۰۳۰	۰/۴۲۹	۲۸	۱۲	L40F0.07H
۱/۷۰۸	۲۷/۱۲۷	۰/۰۴۰	۰/۵۸۵	۴۱	۲۴	L60F0.28H
۱/۸۵۷	۲۳/۷۳۶	۰/۰۳۵	۰/۵۳۸	۳۹	۲۱	L60F0.14H
۱/۸۹۵	۲۱/۴۷۶	۰/۰۳۲	۰/۵۲۸	۳۶	۱۹	L60F0.07H
۱/۷۹۳	۳۲/۷۷۹	۰/۰۳۶	۰/۵۵۸	۵۲	۲۹	L80F0.28H
۱/۸۵۲	۳۰/۵۱۸	۰/۰۳۴	۰/۵۴۰	۵۰	۲۷	L80F0.14H
۱/۸۴۶	۲۹/۳۸۸	۰/۰۳۳	۰/۵۴۲	۴۸	۲۶	L80F0.07H

۴- ظرفیت باربری

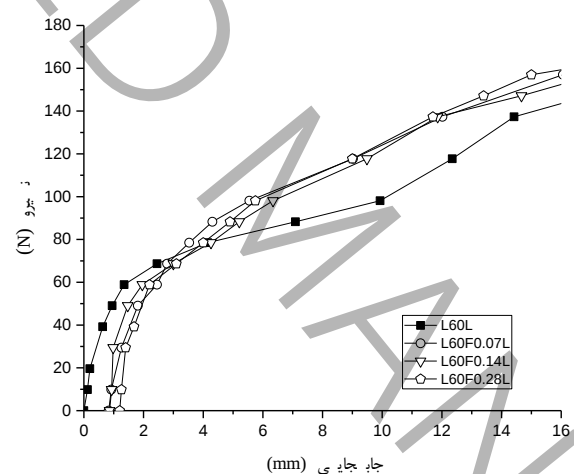
ظرفیت باربری شمع پس از قرار گرفتن تحت اثر ۵۰۰۰ بارگذاری سیکلی، مورد ارزیابی قرار گرفته و با رفتار شمع تحت اثر بار استاتیکی جانبی مورد مقایسه قرار گرفته است. به این منظور پس از اعمال آخرین سیکل بارگذاری جانبی، شمع تحت اثر بار جانبی استاتیکی قرار گرفته و میزان مقاومت آن در برابر نیروی جانبی مجدد اندازه گیری شده است. جابجایی افقی شمع تحت اثر بارگذاری جانبی استاتیکی اولیه و ثانویه پس از تجربه ۵۰۰۰ سیکل بارگذاری و با سه فرکانس مختلف در خاک سست (چگالی نسبی ۰/۲۴) و در خاک متراکم (چگالی نسبی ۰/۹۷) به ترتیب در شکل های ۱۱ تا ۱۳ و ۱۴ تا ۱۶ ارائه شده است.

با توجه به نتایج ملاحظه می گردد ظرفیت باربری استاتیکی جانبی شمع پس از طی بارگذاری سیکلی با توجه به تراکم خاک، افزایش و یا کاهش می یابد و در مواردی به ظرفیت باربری حالت اولیه می رسد. در صورتی که خاک سست باشد تحت اثر بارگذاری جانبی سیکلی و حرکت ماسه های اطراف شمع (جریان همرفتی) خاک متراکم تر شده و در نتیجه ظرفیت باربری جانبی افزایش می یابد. در صورتی که خاک متراکم باشد، تراکم ماسه اطراف شمع تغییر یافته و باعث می شود ظرفیت باربری کاهش یافته و یا به ظرفیت باربری قبل از بارگذاری سیکلی برسد.



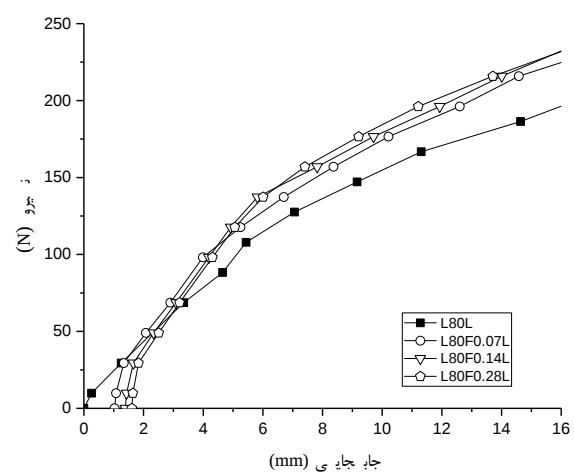
شکل ۱۱: نمودار نیرو جابجایی شمع با طول مدفون ۴۰۰ mm در خاک سست

Figure 11. Force-displacement graph of a pile with 400 mm embedded length in loose soil



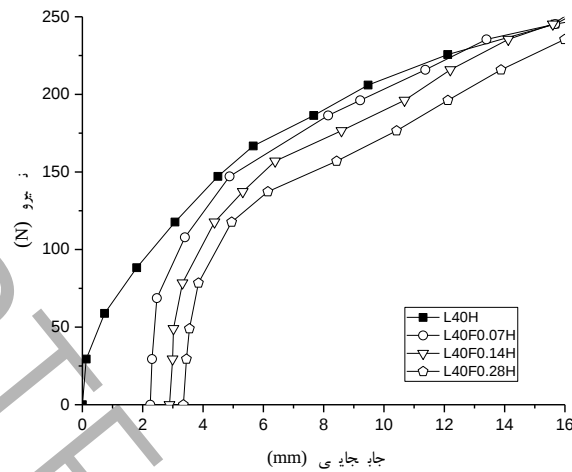
شکل ۱۲: نمودار نیرو جابجایی شمع با طول مدفون ۶۰۰ mm در خاک سست

Figure 12. Force-displacement graph of a pile with 600 mm embedded length in loose soil



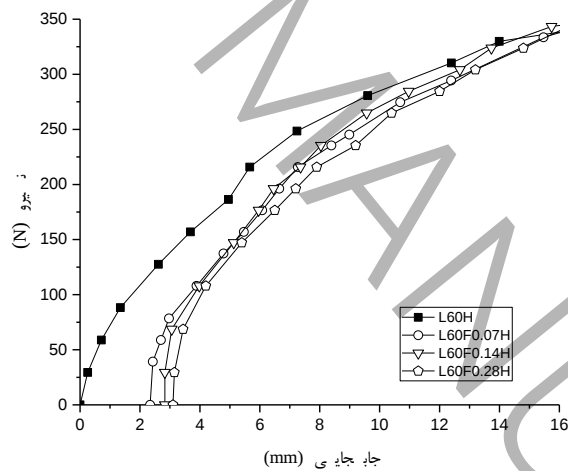
شکل ۱۳: نمودار نیرو جابجایی شمع با طول مدفون ۸۰۰ mm در خاک سست

Figure 13. Force-displacement graph of a pile with 800 mm embedded length in loose soil



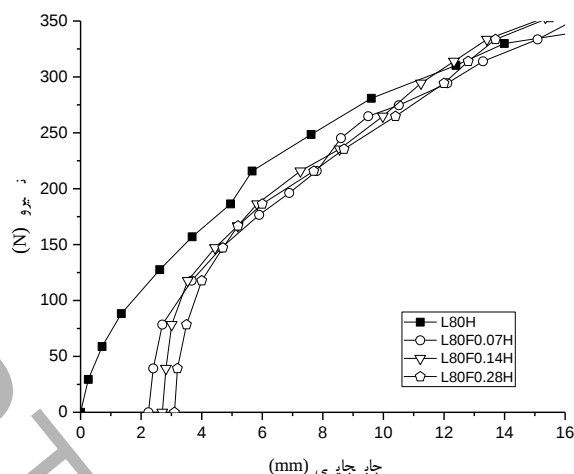
شکل ۱۴: نمودار نیرو جابجایی شمع با طول مدفون ۴۰۰ mm در خاک متراکم

Figure 14. Force-displacement graph of a pile with 400 mm embedded length in dense soil



شکل ۱۵: نمودار نیرو جابجایی شمع با طول مدفون ۶۰۰ mm در خاک متراکم

Figure 15. Force-displacement graph of a pile with 600 mm embedded length in dense soil



شکل ۱۶: نمودار نیرو جابجایی شمع با طول مدفون ۸۰۰ mm در خاک متراکم
Figure 16. Force-displacement graph of a pile with 800 mm embedded length in dense soil

۵- نتیجه گیری

- با افزایش عمق مدفون شمع میزان فرونشست تحت اثر بار سیکلی در اطراف شمع افزایش می یابد. در حقیقت عمق فرونشست خاک اطراف شمع با طول مدفون آن رابطه مستقیم داشته و به طور میانگین در حدود ۳/۵٪ طول مدفون شمع می باشد. دلیل این پدیده باز توزیع ذرات خاک و جریان همرفتی خاک در اثر ضربات شمع به خاک می باشد.
- افزایش فرکانس بارگذاری باعث افزایش میزان فرونشست اطراف شمع گشته که دلیل آن را می توان افزایش سرعت حرکت دانه های ماسه دانست. با دو برابر کردن فرکانس بارگذاری از ۰/۰۷ Hz به ۰/۱۴ Hz و از ۰/۱۴ Hz به ۰/۲۸ Hz به طور میانگین عمق فرونشست در هر افزایش نسبت به حالت قبل حدود ۱۰٪ افزایش مشاهده شده است.
- شعاع فرونشست با عمق آن رابطه مستقیم دارد بگونه ای که مقدار شعاع فرونشست از لبه شمع به طور میانگین در خاک سست حدود ۱/۸ برابر و در خاک متراکم حدود ۲ برابر عمق فرونشست می باشد. دلیل اصلی این موضوع این است که جریان همرفتی در خاک سست تحت بارگذاری سیکلی باعث متراکم شدن خاک اطراف شمع می گردد و بالازدگی ایجاد نمی شود حال آنکه در خاک های متراکم باز توزیع ذرات خاک رخ می دهد، به نحوی که تراکم خاک اطراف شمع تحت تاثیر قرار گرفته و منجر به بالازدگی خاک در لبه های فرونشست می شود که عمق فرونشست بیشتری را ایجاد می کند.
- بر اساس روابط ارائه شده (۶) و (۷) میزان فرونشست اطراف شمع در سیکل های مختلف را می توان تخمین زد. در این رابطه دو پارامتر سیکل مشخصه و نشست مشخصه به ترتیب ۹۵ و حدود ۶ تا ۱۸ mm بدست آمده است.
- در کلیه آزمایشات پس از اعمال ۵۰۰۰ سیکل، بارگذاری مونوتونیک تا رسیدن به گسیختگی ادامه یافت. نتایج نشان می دهد که تغییر در فرکانس بارگذاری، تاثیری بر ظرفیت باربری استاتیکی پس از اعمال بار سیکلی ندارد. در نمودار نیرو - جابجایی پس از اعمال بارهای سیکلی، مقدار نیرو در یک جابجایی معین در فرکانس های بارگذاری مختلف نزدیک به هم (کمتر از ۵٪) و در برخی مواقع هر سه عدد نیرو یکسان ثبت شده است.
- ظرفیت باربری شمع تحت اثر بار جانبی در خاک های سست پس از بارگذاری سیکلی با توجه به متراکم شدن خاک اطراف شمع بین ۱۰٪ تا ۵۰٪ افزایش داشته است که بستگی به ویژگی های بارگذاری و طول مدفون شمع دارد. حال آنکه در خاک های متراکم با توجه به باز توزیع دانه های خاک اطراف شمع و جریان همرفتی خاک، ظرفیت باربری بین ۵٪ تا ۲۰٪ کاهش یافته است.

- [1] M. Dolores Esteban, J.-S. López-Gutiérrez, V. Negro, C. Matutano, F.M. García-Flores, M.Á. Millán, Offshore wind foundation design: some key issues, *Journal of Energy Resources Technology*, 137(5) (2015).
- [2] L.C. Reese, W.R. Cox, F.D. Koop, Analysis of laterally loaded piles in sand, *Offshore Technology in Civil Engineering Hall of Fame Papers from the Early Years*, (1974) 95-105.
- [3] R.E.S. Moss, J.A. Caliendo, L.R. Anderson, Investigation of a cyclic laterally loaded model pile group, *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, 17(7-8) (1998) 519-523.
- [4] F. Rosquoet, L. Thorel, J. Garnier, Y. Canepa, Lateral cyclic loading of sand-installed piles, *Soils and foundations*, 47(5) (2007) 821-832.
- [5] W. Liao, J. Zhang, J. Wu, K. Yan, Response of flexible monopile in marine clay under cyclic lateral load, *Ocean Engineering*, 147 (2018) 89-106.
- [6] C.N. Abadie, *Cyclic lateral loading of monopile foundations in cohesionless soils*, University of Oxford, 2015.
- [7] Z. Liu, Y. Zhang, Effect of drainage conditions on monopile soil-pile interaction in sandy seabed, *Ocean Engineering*, 315 (2025) 119826.
- [8] M. Achmus, K. Abdel-Rahman, Y.-S. Kuo, Numerical modelling of large diameter steel piles under monotonic and cyclic horizontal loading, in: *10th International Symposium on Numerical Models in Geomechanics*, GREECE Rhodes, 2007, pp. 453-459.
- [9] Y.-S. Kuo, M. Achmus, K. Abdel-Rahman, Minimum embedded length of cyclic horizontally loaded monopiles, *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, 138(3) (2012) 357-363.
- [10] I. Depina, T.M.H. Le, G. Eiksund, T. Benz, Behavior of cyclically loaded monopile foundations for offshore wind turbines in heterogeneous sands, *Computers and Geotechnics*, 65 (2015) 266-277.
- [11] M.M. Ahmadi, S. Hadei, S.A. Borzeshi, A. Hokmabadi, Effects of Loading Frequency on Soil-Pile Interaction Using Numerical Nonlinear Three-Dimensional Analyses, *International Journal of Geomechanics*, 25(1) (2025) 04024301.
- [12] D.A. Brown, C. Morrison, L.C. Reese, Lateral load behavior of pile group in sand, *Journal of Geotechnical Engineering*, 114(11) (1988) 1261-1276.
- [13] P. Cuéllar, M. Baeßler, W. Rücker, Ratcheting convective cells of sand grains around offshore piles under cyclic lateral loads, *Granular Matter*, 11(6) (2009) 379-390.
- [14] R. Owji, G. Habibagahi, M. Veiskarami, An experimental study on the lateral behavior of piles in unsaturated sand under monotonic, cyclic and post cyclic loading, *Geotechnical and Geological Engineering*, (2024) 1-21.
- [15] P. Cuéllar, S. Georgi, M. Baeßler, W. Rücker, On the quasi-static granular convective flow and sand densification around pile foundations under cyclic lateral loading, *Granular Matter*, 14(1) (2012) 11-25.
- [16] G. Yin, F. Niu, J. Luo, J. Wang, M. Liu, T. Dong, Y. Cao, A. Li, High potential for pile-bearing capacity loss and ground subsidence over permafrost regions across the Northern Hemisphere, *Global and Planetary Change*, 226 (2023) 104156.
- [17] G. Nicolai, L.B. Ibsen, C. O'Loughlin, D. White, Quantifying the increase in lateral capacity of monopiles in sand due to cyclic loading, *Géotechnique Letters*, 7(3) (2017) 245-252.
- [18] P. Truong, B. Lehane, V. Zania, R.T. Klinkvort, Empirical approach based on centrifuge testing for cyclic deformations of laterally loaded piles in sand, *Géotechnique*, 69(2) (2019) 133-145.

- [19] Y. Wang, M. Zhu, W. Gong, G. Dai, H. Lu, B. Wang, Lateral behavior of monopiles considering the effects of sand subsidence and densification under lateral cyclic loading, *Marine Georesources & Geotechnology*, (2021) 1-11.
- [20] H. Ma, J. Yang, L. Chen, Numerical analysis of the long-term performance of offshore wind turbines supported by monopiles, *Ocean Engineering*, 136 (2017) 94-105.
- [21] T. Wichtmann, A. Niemunis, T. Triantafyllidis, Strain accumulation in sand due to cyclic loading: drained cyclic tests with triaxial extension, *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, 27(1) (2007) 42-48.
- [22] T. Wichtmann, A. Niemunis, T. Triantafyllidis, On the determination of a set of material constants for a high-cycle accumulation model for non-cohesive soils, *International journal for numerical and analytical methods in geomechanics*, 34(4) (2010) 409-440.
- [23] S.-H. Chong, J.C. Santamarina, Sands subjected to repetitive vertical loading under zero lateral strain: accumulation models, terminal densities, and settlement, *Canadian Geotechnical Journal*, 53(12) (2016) 2039-2046.
- [24] J.B. Knight, E.E. Ehrichs, V.Y. Kuperman, J.K. Flint, H.M. Jaeger, S.R. Nagel, Experimental study of granular convection, *Physical Review E*, 54(5) (1996) 5726.
- [25] E. Ehrichs, J.K. Flint, H.M. Jaeger, J.B. Knight, S.R. Nagel, G.S. Karczmar, V.Y. Kuperman, Convection in vertically vibrated granular materials, *Philosophical Transactions of the Royal Society of London. Series A: Mathematical, Physical and Engineering Sciences*, 356(1747) (1998) 2561-2567.
- [26] M. Hassan, D. Liyanapathirana, W. Fuentes, C. Leo, P. Hu, A review of soil deformation and lateral pressure ratcheting phenomena in integral abutment bridges, *Transportation Geotechnics*, (2024) 101388.
- [27] P. Cuéllar, *Pile Foundations for Offshore Wind Turbines: Numerical and Experimental Investigations on the Behaviour under Short Term and Long-Term Cyclic Loading*, Berlin, Berlin, Germany, 2011.
- [28] L. Li, H. Liu, W. Wu, M. Wen, M.H. El Naggat, Y. Yang, Investigation on the behavior of hybrid pile foundation and its surrounding soil during cyclic lateral loading, *Ocean Engineering*, 240 (2021) 110006.
- [29] K. Lesny, J. Wiemann, Design aspects of monopiles in German offshore wind farms, in: *Proceedings of the International Symposium on Frontiers in Offshore Geotechnics*, AA Balkema Publishing, 2005, pp. 383-389.
- [30] P. Tasiopoulou, Y. Chaloulos, N. Gerolymos, A. Giannakou, J. Chacko, Cyclic lateral response of OWT bucket foundations in sand: 3D coupled effective stress analysis with Ta-Ger model, *Soils and Foundations*, 61(2) (2021) 371-385.
- [31] A. Hokmabadi, A. Fakher, B. Fatahi, Full scale lateral behaviour of monopiles in granular marine soils, *Marine Structures*, 29(1) (2012) 198-210.
- [32] M.F. Awad-Allah, N. Yasufuku, A.H. Abdel-Rahman, Cyclic response of wind turbine on piles in unsaturated sand, *International Journal of Physical Modelling in Geotechnics*, 17(3) (2016) 161-176.
- [33] C. LeBlanc, G. Houlsby, B. Byrne, Response of stiff piles in sand to long-term cyclic lateral loading, *Géotechnique*, 60(2) (2010) 79-90.
- [34] R.-p. Chen, Y.-x. Sun, B. Zhu, W.D. Guo, Lateral cyclic pile-soil interaction studies on a rigid model monopile, *Proceedings of the Institution of Civil Engineers-Geotechnical Engineering*, 168(2) (2015) 120-130.
- [35] G. Yu, W. Gong, M. Chen, G. Dai, Y. Liu, Prediction and analysis of behaviour of laterally loaded single piles in improved gravel soil, *International Journal of Civil Engineering*, 17(6) (2019) 809-822.

- [36] S. Basack, S. Dey, Influence of relative pile-soil stiffness and load eccentricity on single pile response in sand under lateral cyclic loading, *Geotechnical and Geological Engineering*, 30(4) (2012) 737-751.
- [37] K. Madhusudan Reddy, R. Ayothiraman, Experimental studies on behavior of single pile under combined uplift and lateral loading, *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, 141(7) (2015) 04015030.
- [38] R.T. Klinkvort, O. Heddal, Lateral response of monopile supporting an offshore wind turbine, *Proceedings of the Institution of Civil Engineers-Geotechnical Engineering*, 166(2) (2013) 147-158.
- [39] S.N. Rao, V. Ramakrishna, M.B. Rao, Influence of rigidity on laterally loaded pile groups in marine clay, *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, 124(6) (1998) 542-549.
- [40] M. Abdollahi, J. Bolouri Bazaz, Reconstitution of Sand Specimens Using a Rainer System, *International Journal of Engineering*, 30(10) (2017) 1451-1463.
- [41] M. Kazemi, J.B. Bolouri, A curtain traveling pluviator to reconstitute large scale sand specimens, *Geomechanics & engineering*, 14(2) (2018) 131-139.
- [42] P.a.A. Peralta, M., An experimental investigation of piles in sand subjected to lateral cyclic loads in: *Proceedings of the 7th International Conference on Physical Modelling in Geotechnics (ICPMG)*, 2010, pp. 985-990.
- [43] A. Gotschol, Veränderlich elastisches und plastisches Verhalten nichtbindiger Böden und Schotter unter zyklisch-dynamischer Beanspruchung, Universität Kassel, Hessen, Germany, 2002.
- [44] K. Lesny, P. Hinz, Design of monopile foundations for offshore wind energy converters, in: *Contemporary topics in deep foundations*, 2009, pp. 512-519.
- [45] D. Kallehave, C.L. Thilsted, M. Liingaard, Modification of the API py formulation of initial stiffness of sand, in: *Offshore Site Investigation and Geotechnics: Integrated Technologies-Present and Future*, Society of Underwater Technology, 2012.
- [46] C.N. Abadie, B.W. Byrne, G.T. Houlsby, Rigid pile response to cyclic lateral loading: laboratory tests, *Géotechnique*, 69(10) (2019) 863-876.
- [47] B. Walz, Der 1g-Modellversuch in der Bodenmechanik-Verfahren und Anwendung, Vortrag zum, 2 (2006) 13-26.
- [48] A. Barari, M. Bagheri, M. Rouainia, L.B. Ibsen, Deformation mechanisms for offshore monopile foundations accounting for cyclic mobility effects, *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, 97 (2017) 439-453.
- [49] J. Li, D. Guan, Y.-M. Chiew, J. Zhang, J. Zhao, Temporal evolution of soil deformations around monopile foundations subjected to cyclic lateral loading, *Ocean Engineering*, 217 (2020) 107893.
- [50] K.O. Abongo, Model Study of the Static and Cyclic Lateral Capacity of Finned Piles, Lehigh University, 2019.
- [51] N.S. Cheng, Y.M. Chiew, X. Chen, Scaling analysis of pier-scouring processes, *Journal of Engineering Mechanics*, 142(8) (2016) 06016005.
- [52] M. Wei, Y.-M. Chiew, D. Guan, Temporal development of propeller scour around a sloping bank, *Journal of Waterway, Port, Coastal, and Ocean Engineering*, 144(5) (2018) 06018005.
- [53] D. Guan, J. Liu, Y.-M. Chiew, Y. Zhou, Scour evolution downstream of submerged weirs in clear water scour conditions, *Water*, 11(9) (2019) 1746.

Soil subsidence around the pile under lateral cyclic loading in granular soil

ABSTRACT

In many structures, such as offshore wind turbines, single piles are used in the foundation. These structures are subjected to cyclic loads such as wind and waves. The cyclic load applied to the foundation causes a convective flow of soil around the pile and also to appear subsidence around the pile. The geometry of soil subsidence is influenced by loading frequency, pile embedded length, and soil density. The amount of subsidence based on the number of cycles around the pile, the impact of cyclic loads on the pile's bearing capacity, and variations in loading frequency on the subsidence around the pile have consistently been topics of interest among researchers. To address this question, an experimental program was designed to provide answers. In this research, piles with different embedded lengths have been subjected to one-way cyclic loading. Cyclic tests have been performed with three various frequencies in loose and dense sandy soil. The results of the tests indicate that the depth and radius of the soil subsidence around the pile are various, according to the embedded length of the pile, loading frequency, and soil density. Based on past research and laboratory data, a relationship to estimate soil subsidence depth has been provided and the constant coefficients of this equation have been determined and calibrated. As a result, it is possible to predict the amount of soil subsidence around the pile in each cycle by using this relationship. Also, the results of static loading of the pile before and after applying cyclic loading show that the bearing capacity of the pile may increase or decrease, depending on the soil density in the initial state and the redistribution of soil particles after cyclic loading. In addition, the loading frequency has no considerable effect on the static bearing capacity after cyclic loading.

KEYWORDS

Pile, cyclic loading, frequency, sandy soil, static bearing capacity