

رفتار کیسون‌های مکشی تحت بارگذاری تناوبی جانبی بلند مدت

مقاله پژوهشی

بابک ابراهیمیان*، استادیار، دانشکده مهندسی عمران، آب و محیط زیست، دانشگاه شهید بهشتی، تهران، ایران
سید محمد منصورزاده، مربی، پژوهشکده حمل و نقل، مرکز تحقیقات راه، مسکن و شهرسازی، تهران، ایران
*پست الکترونیکی نویسنده مسئول: b_brahimian@sbu.ac.ir

دریافت: ۹۹/۰۵/۲۷ - پذیرش: ۹۹/۱۱/۰۴

صفحه ۴۴-۱۹

چکیده

کیسون‌های مکشی به‌طور فزاینده‌ای در پروژه‌های فراساحلی نظیر سکوهای نفت و گاز، توربین‌های بادی، المان‌های مهار و لنگرگاهی به‌کار گرفته می‌شوند. کیسون‌های مکشی به‌عنوان پی سازه‌های دریایی معمولاً در معرض نیروهای ناشی از باد، امواج و ضربه کشتی‌ها قرار دارند. اغلب مطالعات موجود در خصوص بار تناوبی جانبی وارد بر کیسون‌های مکشی، شامل چرخه‌های بارگذاری تا چند هزار چرخه و در خاک تک لایه هستند. حال آن‌که سازه‌های دریایی در طول عمر خود در معرض میلیون‌ها چرخه بارگذاری قرار می‌گیرند و خاک بستر دریا نیز می‌تواند شامل لایه‌بندی‌های متفاوت باشد. در این مقاله پس از مروری بر نتایج حاصل از تحقیقات انجام شده در زمینه بارگذاری جانبی کیسون‌های مکشی با تعداد چرخه‌های محدود، نتایج مطالعات موجود صورت پذیرفته اخیر با تعداد چرخه‌های بارگذاری بسیار زیاد و در حدود ۱ میلیون چرخه ارائه می‌گردد و رفتار بلند مدت کیسون مکشی به بارگذاری تناوبی جانبی در بستر تک لایه و دو لایه بررسی می‌شود. بر اساس جمع‌بندی نتایج حاصل از مطالعات موجود، به‌نظر می‌رسد که بارگذاری تناوبی جانبی حتی می‌تواند در مواردی باعث افزایش ظرفیت لنگر خمشی تا ۳۰٪ و افزایش سختی پایه تا ۵۰٪ شود که این تغییر سختی باید در تغییر فرکانس طبیعی سیستم یا بررسی رخدادهای احتمالی پدیده تشدید مد نظر قرار گیرد.

واژه‌های کلیدی: کیسون مکشی، بارگذاری تناوبی جانبی، مهندسی فراساحل، سختی، چرخش تجمعی

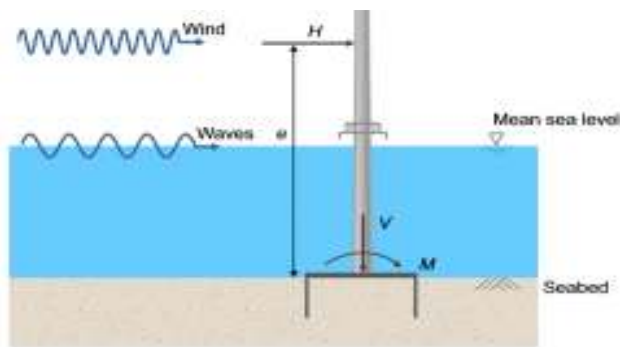
۱- مقدمه

جانبی ناشی از بارهای محیطی نظیر باد و امواج قرار می‌گیرد. برای نمونه پیش‌بینی می‌شود که یک توربین بادی دریایی بین ۱۰ تا ۱۰۰ میلیون چرخه بارگذاری جانبی نسبتاً کوچک را در طول عمر ۲۵ سال خود تجربه کند، که ممکن است منجر به چرخش غیرقابل برگشت پی و توربین شود (Bhattacharya, 2014). این مسأله بایستی در برنامه سرویس‌دهی یک توربین بادی مد نظر قرار گیرد (DNV, 2013)، به‌طوری‌که چرخش دائمی تجمعی کیسون از یک حد مشخصی (برای مثال 0.25 درجه برای توربین‌های مزرعه فراساحلی تورنتن بانک^۱) فراتر نرود (Peire et al., 2009). مسأله دوم مربوط به تأثیر بارگذاری تناوبی بر تغییر سختی پایه است که بر میزان سختی و در نتیجه بر فرکانس

کیسون‌های مکشی به‌عنوان پی مورد استفاده در سکوهای نفتی و گازی، توربین‌های بادی، المان‌های مهار و لنگرگاهی و دیگر سازه‌های دریایی معمولاً در معرض نیروهای ناشی از باد، امواج، ضربه کشتی‌ها و نیروهای بلند کننده قرار دارند. شکل ۱ به‌طور شماتیک یک کیسون مکشی را به‌عنوان پی یک توربین بادی فراساحلی نشان می‌دهد. در حالت کلی کیسون مکشی تحت بار عمودی ناشی از وزن سازه قرار گرفته بر روی آن و بارهای سیکلی یا تناوبی جانبی ناشی از موج و باد می‌باشد که به‌ترتیب در تراز سطح و بالاتر از تراز سطح دریا اعمال می‌شوند و در نتیجه یک لنگر واژگونی (M) در کیسون ایجاد می‌گردد. کیسون مکشی در دوره بهره‌برداری در معرض تعداد بالای چرخه‌های بار

دسته‌بندی و جمع‌بندی مطالعات و نتایج تحقیقاتی موجود در ادبیات فنی، رفتار کیسون‌های مکشی تحت بارگذاری تناوبی جانبی در شرایط متفاوت ساختگاهی (شامل بستر تک لایه و لایه‌ای^۲) بررسی می‌شود.

طبیعی سیستم تأثیر می‌گذارد. این موضوع ممکن است تحت شرایط خاصی حتی باعث بروز پدیده تشدید شود. بنابراین کاهش خطر رخداد پدیده تشدید، نیاز به پیش‌بینی واقع‌بینانه سختی پایه و سیستم در طول عمر طراحی خواهد داشت (Zhu et al., 2018a). در مقاله حاضر با گردآوری،



شکل ۱. کیسون مکشی به‌عنوان پایه یک توربین بادی فراساحلی (Zhu et al., 2018a)

۲- پیشینه تحقیق

مطالعات انجام شده اخیر شامل (Zhu et al., 2018a) و (Zhu et al., 2018b) اشاره نمود.

از طرفی بستر دریا در بسیاری از مکان‌هایی که جهت نصب سازه‌های دریایی در نظر گرفته می‌شود به‌صورت لایه‌ای (مثلاً دو لایه) است. برای نمونه در داجر بانک^۳ در دریای شمال، ضخامت ماسه‌های سطحی قرار گرفته بر روی رس سخت، از چند متر تا ده متر متفاوت است (Forewind, 2011, 2013). به‌گونه‌ای که احتمال می‌رود کیسون در لایه ماسه بالای رس قرار گیرد. از مطالعات فوق‌الذکر، گروه اول و دوم محدود به بسترهای تک لایه بوده و اما در مطالعات گروه سوم علاوه بر بستر تک لایه، بسترهای لایه‌ای نیز بررسی شده‌اند. به‌عنوان یک نتیجه کلی می‌توان گفت که مطالعات انجام پذیرفته تا قبل از سال ۲۰۱۸ یعنی گروه اول و دوم، محدود به بستر تک لایه با تعداد چرخه‌های محدود بارگذاری در حدود ۱۰۰۰ تا ۱۰۰۰۰ چرخه می‌باشد. ولی در سال ۲۰۱۸ با افزایش تعداد چرخه بار و با در نظر گرفتن بستر لایه‌ای علاوه بر بستر تک لایه، گشایش جدیدی در این حوزه رخ داده است. در بخش‌های بعدی پس از بررسی هر گروه از مطالعات فوق‌الذکر، مهمترین نتایج به دست آمده در خصوص رفتار کیسون‌های مکشی در بسترهای تک لایه و لایه‌ای تحت بارهای جانبی تناوبی ارائه می‌گردد.

مطالعات موجود را می‌توان در چند دسته یا گروه طبقه‌بندی نمود. در گروه اول مطالعات آزمایشگاهی شامل تعدادی آزمایش‌های مدل و تعداد محدودی آزمایش‌های میدانی مقیاس شده در بستر تک لایه می‌باشند که این آزمایش‌ها به‌طور معمول در کمتر از ۱۰۰۰ چرخه بار جانبی انجام شده‌اند و عمدتاً بر شرایط بارگذاری شدید متمرکز بوده‌اند. که از جمله می‌توان مطالعات (Byrne & Hously, 2004), (Hously et al., 2005, 2006), (Watson & Randolph, 2006) و (Kellye et al., 2006) را برشمرد که در این گروه قرار می‌گیرند. گروه دوم مطالعات آزمایشگاهی هستند که در آنها رفتار کیسون‌های مکشی در ماسه تحت بارهای جانبی تناوبی متوسط با تعداد چرخه بار در حدود ۱۰۰۰۰ بررسی شده است. از جمله مطالعاتی که در این گروه قرار می‌گیرند می‌توان به مطالعات (Zhu et al., 2013), (Cox et al., 2014) و (Foglia et al., 2014) اشاره نمود. اما به‌طور معمول این تعداد چرخه بار، بسیار کمتر از تعداد چرخه‌هایی است که سازه‌های دریایی در طول عمر مفید خود در معرض آن قرار دارند. گروه سوم مطالعات آزمایشگاهی دیگری هستند که به بررسی رفتار کیسون‌های مکشی تحت بارگذاری تناوبی جانبی با تعداد چرخه بسیار بالاتر ($N=10^6$) در بسترهای تک لایه و لایه‌ای پرداخته‌اند. از جمله مطالعاتی که در این گروه قرار می‌گیرند می‌توان به

۳- بحث و تحلیل مسأله

در این بخش قبل از بررسی مطالعات انجام یافته در خصوص رفتار کیسون‌های مکشی تحت بارگذاری تناوبی جانبی، چند نکته که در اغلب این مطالعات به کار رفته است، بیان می‌گردد.

در تحلیل ظرفیت باربری کیسون‌های مکشی و به طور خاص در نوع تک پایه^۴، علاوه بر ظرفیت باربری دو مسأله دیگر وجود دارد که باید در نظر گرفته شود: (۱) چرخش انباشته شده یا تجمعی^۵ در طول عمر سازه (۲) سختی پایه. چرخش تجمعی سازه در طول عمر طراحی آن باید به طور

(۱)

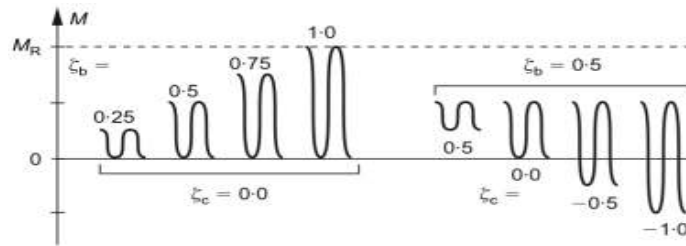
که M_{\min} و M_{\max} به ترتیب حداقل و حداکثر لنگر در طول یک چرخه بارگذاری و M_{ult} حداکثر ظرفیت لنگر نهایی بوده که از آزمایش‌های مونوتونیک^۶ به دست می‌آیند.

یک فرم مناسب نرمال شده^۷ برای چرخش به صورت $\frac{\Delta\theta(N)}{\theta_0} = \frac{(\theta_N - \theta_0)}{\theta_0}$ در نظر گرفته می‌شود که θ_0 و

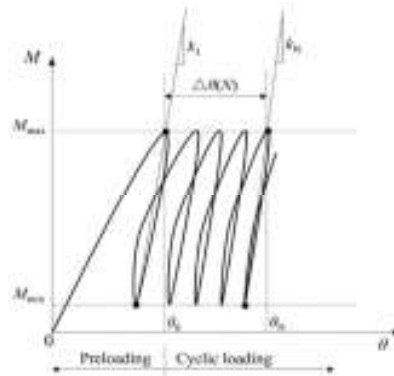
دقیق تخمین زده شود و معمولاً به محدودیت‌های سرویس دهی مرتبط است و سختی پایه نیز در شرایط بارگذاری مختلف برای ارزیابی فرکانس طبیعی سازه مورد نیاز است. بارهای تناوبی جانبی سینوسی با دو ویژگی بزرگی بار و تقارن بار (به ترتیب با استفاده از پارامترهای ξ_b و ξ_c) قابل توصیف می‌باشند و به فرم معادلات (۱) بیان شده‌اند (LeBlanc et al., 2010). که پارامتر ξ_b عددی بین ۰ و ۱ و پارامتر ξ_c عددی بین -۱ و ۱ بوده و $\xi_c \geq 0$ مبین بارگذاری یک‌طرفه و $\xi_c < 0$ مبین بارگذاری دو طرفه می‌باشد (به شکل ۲ مراجعه شود).

$$\xi_b = \frac{M_{\max}}{M_{ult}}, \quad \xi_c = \frac{M_{\min}}{M_{\max}}$$

در θ_N به ترتیب چرخش ماکزیمم متناظر با M_{\max} در بارگذاری چرخه اول و بارگذاری چرخه N ام مطابق شکل ۳ هستند (LeBlanc et al., 2010).



شکل ۲. معرفی پارامترهای بارگذاری تناوبی (LeBlanc et al., 2010)



شکل ۳. معرفی پارامترهای بارگذاری تناوبی (LeBlanc et al., 2010)

۳-۱- گروه اول با تعداد چرخه بارگذاری کمتر از ۱۰۰۰

از مقادیر بدون بعد برای بار لنگر استفاده گردید. در این مطالعه برای بارگذاری لنگر در رس و ماسه به ترتیب از پارامترهای بدون بعد $S_u R^3$ و $\gamma' R^4$ استفاده گردید که در آن R معرف شعاع کیسون و γ' و S_u به ترتیب معرف وزن مخصوص ماسه و مقاومت زهکشی نشده رس می‌باشد. با در نظر گرفتن ماتریس سختی و با جایگذاری مدول برشی مرتبط با نوع خاک، در نهایت معادلات زیر برای بارگذاری لنگر به ترتیب در ماسه و رس ارائه شده است.

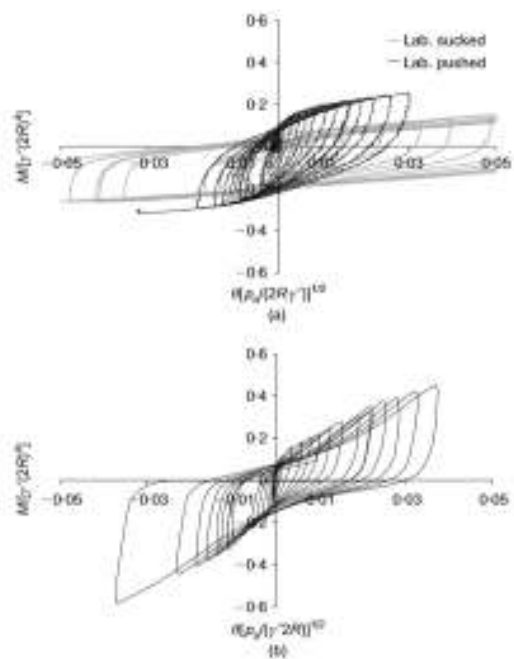
$$\frac{M}{\gamma' (2R)^4} = \theta \left(\frac{P_a}{2R\gamma'} \right)^{0.5} f_1 \left(\frac{M}{2RH}, \frac{V}{\gamma' (2R)^3}, \frac{h}{2R} \right) \quad (2)$$

$$\frac{M}{s_u (2R)^3} = \theta f_2 \left(\frac{M}{2RH}, \frac{V}{s_u (2R)^2}, \frac{h}{2R}, OCR \right) \quad (3)$$

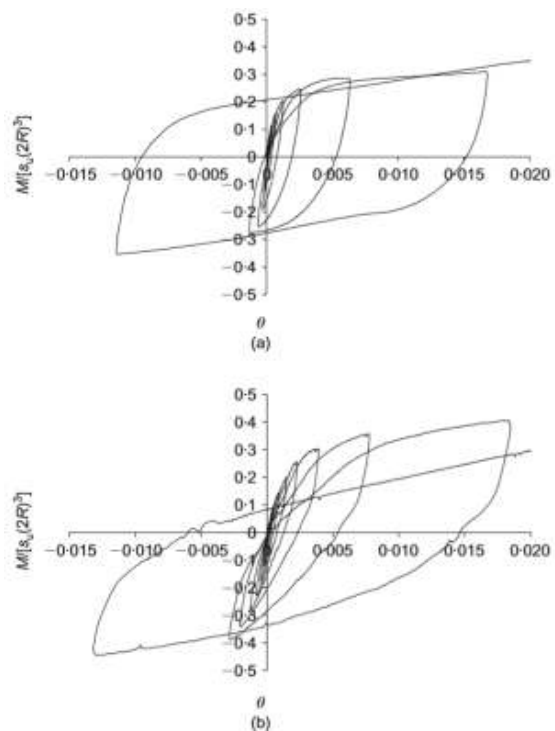
ماسه‌ای چرخش تجمعی کمتر برای کیسون‌های بزرگتر رخ داده است. ضمناً برای حالت نصب با مکش نسبت به نصب تحت فشار کیسون‌ها، مقادیر چرخش بزرگتر می‌باشند. به نظر می‌رسد که دلیل آن می‌تواند مربوط به اندازه ناحیه خاک دستخورده در فرآیند نصب کیسون باشد. همچنین در این مطالعه نتایج بارگذاری لنگر در لایه رس به نتیجه‌گیری مشابه در مورد ماسه منجر گردید. مشخص شد که مطابقت بین نتایج آزمایشگاهی و میدانی بسیار رضایت بخش است حتی اگر برخی از تفاوت‌ها که در بالا ذکر شد، باقی می‌ماند. در شکل ۵ نتایج بارگذاری لنگر بر کیسون مکشی در آزمایشگاه و میدان در لایه رسی ارائه گردیده‌اند. در نهایت کلی و همکاران بیان نمودند که با استفاده دقیق از متغیرهای بدون بعد امکان مقایسه مناسب و موفقیت آمیز بین نتایج آزمایشگاهی و میدانی وجود دارد. از این رو مدل‌های آزمایشگاه، مدل‌های سانتیفیوژ و آزمایش‌های میدانی نقش مهمی در پیش بینی عملکرد کیسون مکشی خواهند داشت و اعتبارسنجی یک نوع تست در برابر دیگری، بخش مهمی از این فرایند است. نکته دیگر آنکه آزمایش‌های آزمایشگاهی از مزیت اقتصادی مناسبی نسبت به آزمایش سانتیفیوژ یا آزمایش‌های میدانی برخوردار بوده و لذا می‌توان با استفاده از آن، تعداد تست‌های سانتیفیوژ و میدانی را کاهش داده و صرفه جویی اقتصادی نمود.

کلی و همکاران (Kelly et al., 2006) با انجام مطالعات آزمایشگاهی و شبیه سازی نتایج با شرایط میدانی، به بررسی رفتار کیسون‌های مکشی در تک لایه ماسه و رس پرداختند. در این مطالعه ابعاد کیسون‌ها و بارهای اعمال شده بر کیسون به صورت مقیاس شده و با حداکثر مطابقت با شرایط میدانی بر نمونه‌ها اعمال گردیدند. آزمایش بارگذاری لنگر در لایه ماسه و لایه رس با استفاده از کیسون‌های با قطر ۰/۲ متر در آزمایشگاه و ۳ متر در میدان انجام گردید. همچنین به منظور مقایسه بهتر نتایج آزمایشگاهی و میدانی،

که در آن P_a معرف فشار اتمسفر، h طول دامن کیسون، OCR نسبت بیش تحکیمی و M ، V و H به ترتیب معرف بار لنگر، عمودی و جانبی می‌باشند. همچنین f_1 و f_2 توابع بدون بعد می‌باشند. در این مطالعه، بارگذاری لنگر در آزمایشگاه با اعمال چرخش‌های مقیاس شده از داده‌های آزمایش‌های میدانی انجام گردید. در شکل ۴ نتایج بارگذاری لنگر بر کیسون مکشی در آزمایشگاه و میدانی در لایه ماسه‌ای ارائه گردیده‌اند. نتایج نشان می‌دهند که شکل منحنی لنگر-چرخش در تغییر شکل‌های کوچک در آزمایشگاه و میدان شبیه هم هستند اما با افزایش مقدار چرخش از میزان این همخوانی کاسته می‌شود. همچنین شکل خاص حلقه‌های هیستریزس در چرخش‌های بزرگ در شرایط میدانی به دلیل شکاف بین کیسون و ماسه می‌باشد. این ممکن است به این دلیل باشد که اندازه مطلق چرخش در آزمایشگاه بسیار کمتر از شرایط میدانی است. این پژوهشگران نشان دادند که روش نرمال سازی بارها برای مقایسه شالوده‌های کیسون مکشی در آزمایش‌های آزمایشگاهی و میدانی از دیدگاه سختی و ظرفیت باربری بسیار مناسب هستند. بنابراین می‌توان به طور مناسبی از مدل‌های آزمایشگاهی برای شبیه سازی شرایط واقعی بهره جست. مقایسه کیفی نتایج نشانگر آن است که در لایه

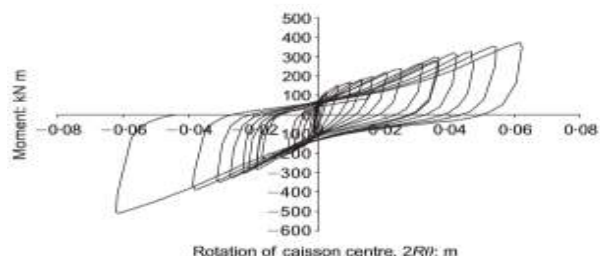


شکل ۴. بارگذاری لنگر در ماسه (الف) آزمایشگاهی با کیسون به قطر ۰/۲ متر (ب) میدانی با کیسون به قطر ۳ متر (Kelly et al., 2006)



شکل ۵. بارگذاری لنگر در رس (الف) آزمایشگاهی با کیسون به قطر ۰/۲ متر (ب) میدانی با کیسون به قطر ۳ متر (Kelly et al., 2006)

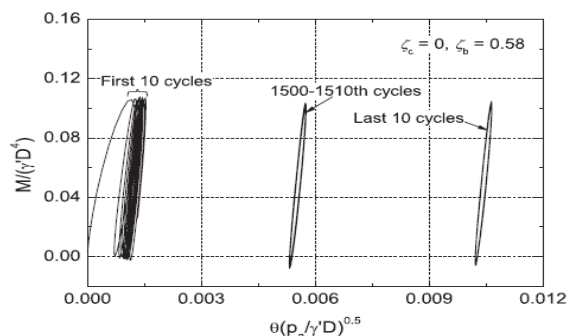
سختی بیشتر و هیستریزیس کمتری دارد. در دامنه مقادیر بزرگتر چرخش، سختی کاهش می یابد و هیستریزیس افزایش می یابد. در اینجا نیز حلقه بارگذاری در دامنه های بسیار بزرگ یک شکل خاص دارد که ناشی از دست خوردگی و شکاف ایجاد شده در ماسه در اطراف جدار کیسون است.



شکل ۶. بارگذاری لنگر در ماسه کیسون به قطر ۳ متر (Houlsby et al., 2006)

هولسیبی و همکاران (Houlsby et al., 2006) با انجام یک سری آزمایش میدانی در سایت لوس بی^۸ در اسکاتلند به بررسی رفتار کیسون های مکشی در ماسه پرداختند. نمودار لنگر- چرخش برای کیسون با قطر ۳ متر در شکل ۶ ارائه شده است. نمودار لنگر- چرخش در ابتدا

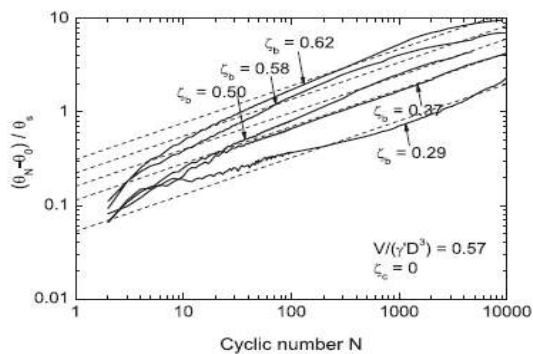
سه بسته ۱۰ چرخه ای که از یک تست بارگذاری تناوبی استخراج شده اند، نشان داده شده است (تعداد کل چرخه بار: ۹۰۶۲). با توجه به این شکل می توان دریافت که چرخه اول جابجایی بسیار بزرگتری را نسبت به چرخه های بعدی ایجاد می کند و چرخش تجمعی با افزایش تعداد چرخه بار افزایش می یابد هرچند که در این حالت نرخ چرخش کاهشی است. همچنین در شکل ۸ مقدار چرخش تجمعی بر حسب تعداد چرخه نشان داده شده است. نمودار شکل ۸ (الف) مربوط به حالتی است که $\zeta_b = 0.5$ و نمودار شکل ۸ (ب) مربوط به حالتی است که $\zeta_b = 0$ باشد و در هر دو حالت بارگذاری، مقدار پارامتر نرمال شده بار عمودی برابر 0.57 می باشد. با توجه به شکل ۸ (الف) مشاهده می شود که بارگذاری با اندازه ثابت پارامتر ζ_b ، در حالت بارگذاری دوطرفه چرخش های تجمعی بزرگتر نسبت به یک طرفه ایجاد نموده است. همچنین با توجه به شکل ۸ (ب) در بارگذاری یک طرفه با افزایش مقدار بار، چرخش تجمعی نیز افزایش می یابد.



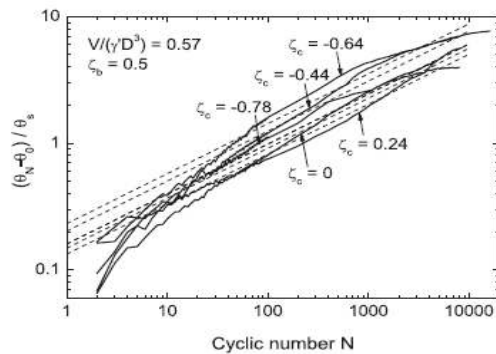
شکل ۷. ارتباط میان بار لنگر و زاویه چرخش برای سه بسته ۱۰ چرخه ای (Zhu et al., 2013)

۳-۲- گروه دوم با تعداد تقریباً ۱۰۰۰۰ چرخه بارگذاری

ژوو و همکاران (Zhu et al., 2013) به مطالعه رفتار نسبتاً بلند مدت کیسون های مکشی تحت بار جانبی تناوبی پرداختند. مطالعه آنها بر روی پاسخ لنگر- چرخش متمرکز گردید و لذا رفتار تناوبی و تجمع چرخش در طول عمر کیسون را مورد توجه قرار دادند. این کار با استفاده از یک دکل بارگذاری جدید در دانشگاه آکسفورد انجام شد. در مطالعه مذکور بارگذاری های تناوبی با تقریباً ۱۰۰۰۰ چرخه به کیسون مدل در بستر ماسه ای سست اعمال شد و بر اساس این آزمایش ها، چارچوبی برای ارزیابی زاویه چرخش تجمعی ارائه گردید. مشخص گردید که یک رژیم بارگذاری تناوبی خاص (بین حالت یک طرفه و دو طرفه) بیشترین چرخش را ایجاد می کند. همچنین مشخص شد که نشست تجمعی کیسون با افزایش تعداد چرخه و دامنه بار افزایش می یابد و نکته دیگر آن که تعداد چرخه بارگذاری بر مقدار سختی تناوبی تقریباً بدون تأثیر بود. پیرو توصیه های کلی و همکاران (۲۰۰۶)، نتایج این مطالعه نیز به صورت بی بعد ارائه گردیدند. در شکل ۷ رابطه بین بار لنگر و چرخش برای



(ب)

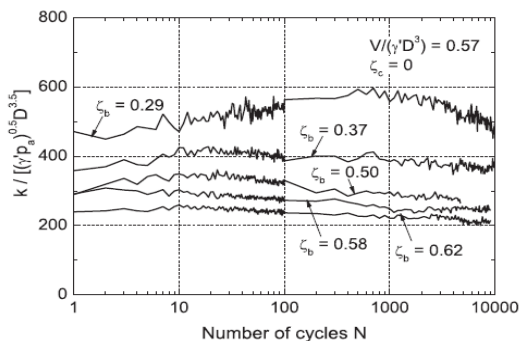


(الف)

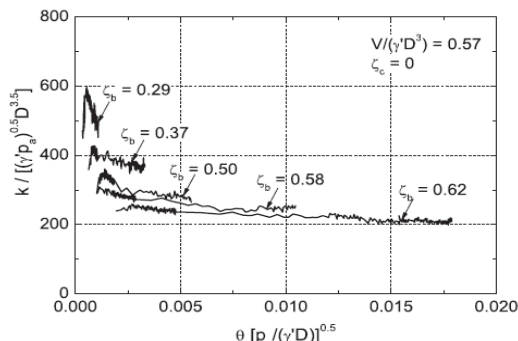
شکل ۸. نمودار چرخش زاویه‌ای نسبت به تعداد چرخه بارگذاری (Zhu et al., 2013)

عمر کیسون می‌تواند تقریباً ۶۰٪ افزایش یابد. مطابق شکل ۹ (ب) به نظر می‌رسد که سختی با افزایش تعداد چرخه نسبتاً ثابت بوده است. شکل ۱۰ نیز بیانگر آن است که با افزایش حداکثر بار تناوبی و همچنین با کاهش مقدار ζ_c ، مقدار سختی کاهش می‌یابد. این شکل همچنین نشان می‌دهد که برای هر دو حالت بارگذاری، وابستگی کمی به بار عمودی وجود دارد.

در شکل ۹ مقدار سختی باربرداری بر حسب چرخش و تعداد چرخه نشان داده شده است. شکل ۹ (الف) نشان می‌دهد که سختی باربرداری کیسون نسبت به چرخش جمعاً تقریباً ثابت است. اگر چه برخی از تغییرات جزئی در ۱۰۰ چرخه اول ناشی از جابجایی کیسون در زیر خاک می‌باشد. البته این نتیجه با آن چه که قبلاً توسط لبلانک و همکاران (LeBlanc et al., 2010) گزارش شده بود، متفاوت است. در آن مطالعه نشان داده شده بود که برای رژیم‌های بارگذاری تناوبی متوسط، مقدار سختی در طول

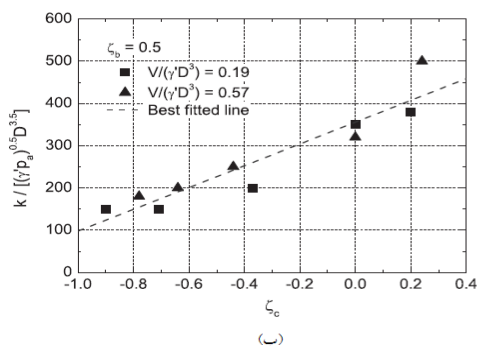


(ب)

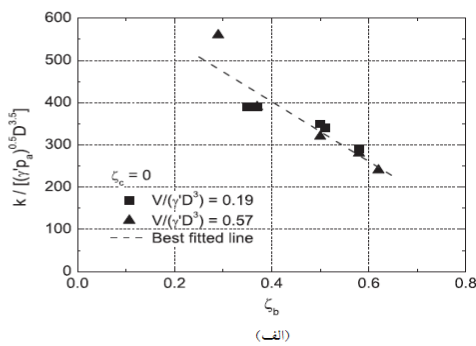


(الف)

شکل ۹. نمودار سختی نسبت به تعداد چرخه بارگذاری (Zhu et al., 2013)



(ب)

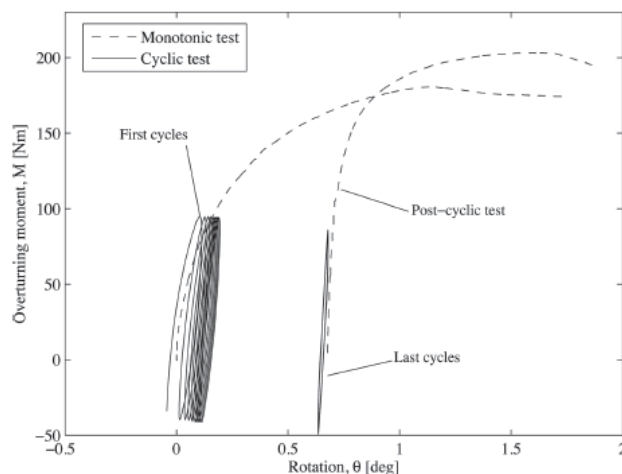


(الف)

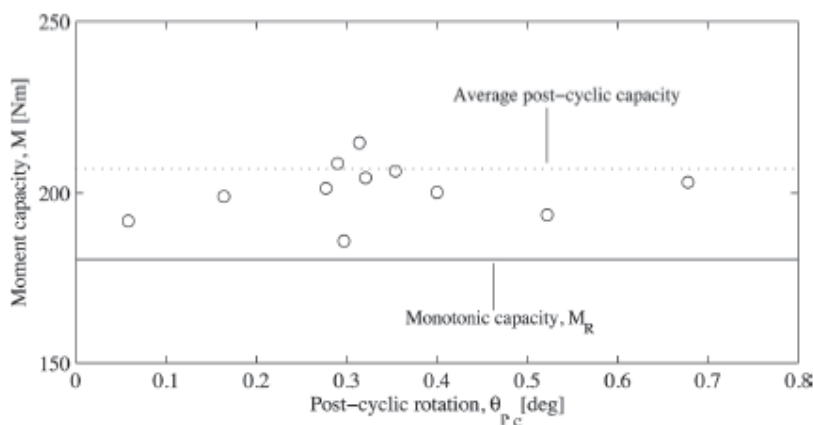
شکل ۱۰. نمودار سختی باربرداری متناظر با ۱۰۰ چرخه بارگذاری نسبت پارامترهای ζ_b ، ζ_c (Zhu et al., 2013)

آزمایش بارگذاری مونوتونیک، در شکل ۱۱ ارائه شده است. برای وضوح بیشتر، تنها چرخه اول و آخر بارگذاری نشان داده شده است. شایان ذکر است که در آخرین چرخه‌ها، کاهش ناچیز لنگر مشاهده می‌شود. متوسط ظرفیت پساسیکلی تقریباً ۱۳٪ بزرگتر از ظرفیت حالت مونوتونیک است. این نشان می‌دهد که وقتی یک پایه از قبل تحت بارگذاری تناوبی قرار داشته، پوش گسیختگی مونوتونیک آن گسترش می‌یابد. لذا انتظار می‌رود ظرفیت پساسیکلی حداقل برابر با حالت مونوتونیک باشد زیرا تمام مراحل آزمایش تحت شرایط کاملاً زهکشی شده انجام شده است. ثانیاً مشخص گردید که ظرفیت پساسیکلی مستقل از θ_{pc} بوده (شکل ۱۲) و سختی آزمایش‌های پساسیکلی به طور قابل توجهی بزرگتر حالت مونوتونیک است و بستگی به θ_{pc} دارد.

از این مطالعه مشخص گردید که چرخش تجمعی کیسون به طور قابل توجهی با ویژگی‌های بارگذاری تناوبی تحت تأثیر قرار می‌گیرد. همچنین به نظر نمی‌رسد که تعداد چرخه‌های بارگذاری بر خلاف مطالعه لبلانک و همکاران (۲۰۱۰) تأثیر قابل ملاحظه‌ای داشته باشد. نهایتاً ژوو و همکاران ابراز داشتند که برای تأیید نتیجه‌گیری به تعداد بیشتری چرخه بارگذاری و مقیاس بزرگتر احتیاج است. فولیا و همکاران (Fogila et al., 2014) با انجام یک سری آزمایش‌های 1g به مطالعه رفتار کیسون‌های مکشی پرداختند. آنها هدف از این مطالعه را کشف الگوی کلی پاسخ شالوده تحت بارگذاری تناوبی جانبی عنوان نمودند. در این مطالعه فونداسیون سطحی^۹ در ماسه متراکم و اشباع نصب و تحت بارهای جانبی و لنگر تناوبی قرار گرفتند. نتایج آزمایش بارگذاری تناوبی و به دنبال آن یک تست پساسیکلی و سپس



شکل ۱۱. بارگذاری سیکلی، پساسیکلی و مونوتونیک مینا (Fogila et al., 2014)



شکل ۱۲. ظرفیت لنگر مونوتونیک و پساسیکلی (Fogila et al., 2014)

دوطرفه باعث بزرگترین چرخش گردید. که این نتیجه با مشاهدات لبلانک و همکاران (۲۰۱۰)، ژوو و همکاران (۲۰۱۳) و فولیا و همکاران (۲۰۱۴) مشابه می‌باشد.

۳-۳- گروه سوم با تعداد در حدود یک میلیون چرخه

با توجه به اینکه این گروه از مطالعات با تعداد چرخه بار بسیار بیشتر از دو گروه قبل انجام گرفته و این تعداد چرخه بارگذاری تناسب بیشتری با شرایط واقعی دارد لذا نتایج به دست آمده از این مطالعات از اهمیت به سزایی برخوردار بوده و در این بخش به طور مفصل‌تر مورد بررسی قرار می‌گیرد. ژوو و همکاران (Zhu et al., 2018a) یک بانک اطلاعاتی از نتایج آزمایش‌های انجام شده در خصوص رفتار کیسون‌های نصب شده در لایه ماسه قرار گرفته بر لایه رس تحت بارگذاری تناوبی جانبی فراهم نمودند. این آزمایش‌ها تقریباً با تعداد $N=10^6$ چرخه بارگذاری انجام شد و با آزمایش‌های روی ماسه تک لایه و رس تک لایه تکمیل شدند. در این مطالعه ظرفیت باربری و مقدار چرخش در ماسه در دو حالت، وقتی کیسون در بالای فصل مشترک^{۱۱} و لایه قرار گیرد یا فصل مشترک در وسط ارتفاع کیسون قرار داشته باشد، محاسبه و بررسی گردید. رویکرد تجربی اتخاذ شده مطالعه فوق تست‌های مدل Ig است، زیرا آزمایش‌های میدانی برای بررسی پارامترهای مورد نظر در این مطالعه عملی نبوده و انجام آزمایش‌های سانتریفوژ نیز به‌طور کلی برای 10^6 چرخه بارگذاری امکان‌پذیر نیستند. نتایج حاصل از آزمایش‌های Ig همراه با نتایج حاصل از آزمایش‌های سانتریفوژ که در مطالعه بعدی همین پژوهشگران (Zhu et al., 2018b) به دست آمد، زمینه‌ای را برای ارزیابی رفتار بلند مدت کیسون مکشی در مقیاس میدانی فراهم می‌کند. انجام آزمایش‌های Ig مقیاس شده، نیاز به دقت زیادی در تعیین مقیاس دارد تا بتوان نتایج را به مقیاس واقعی تعمیم داد. از آنجا که رویکرد این مطالعه عمدتاً بر چرخش تجمعی کیسون متمرکز بوده، لذا در آن به سختی خاک توجه ویژه‌ای شده است. مدول برشی رس از رابطه (۴) به دست می‌آید.

$$G_{clay} = I_r \times S_u$$

این پژوهشگران با توجه به داده‌های جمع آوری شده در مطالعه خود و مطالعه ژوو و همکاران (۲۰۱۳)، مهمترین نتیجه‌گیری را این گونه اعلام نمودند که حداکثر بزرگی لنگر تناوبی که منجر به افزایش دامنه اثرات تخریبی نمی‌شود، بین ۱۸ تا ۲۳ درصد M_R است که M_R ظرفیت لنگر مونوتونیک می‌باشد. کوکس و همکاران (Cox et al., 2014) با انجام یک سری آزمایش‌های سانتریفوژ در دانشگاه UWA به مطالعه رفتار کیسون‌های مکشی تحت بار تناوبی جانبی پرداختند. کیسون‌های مدل در یک سانتریفوژ ژئوتکنیکی و در ماسه خشک بسیار متراکم نصب شده و با تعداد ۱۲۰۰۰ چرخه، بارگذاری شدند. در طول هر آزمایش، تغییرات سختی، چرخش تجمعی و نشست اندازه‌گیری شد. مشخص گردید که سختی چرخشی کیسون، به صورت لگاریتمی با تعداد چرخه بارگذاری افزایش می‌یابد، اما این میزان از آنچه که قبلاً برای کیسون‌های تکی گزارش شده بود، بسیار کمتر است. به طور مشابه چرخش تجمعی نیز با افزایش تعداد چرخه‌ها افزایش یافته و با استفاده از یک رابطه انرژی^{۱۱} به خوبی توصیف گردید. تجمع چرخش در طول آزمایش‌های دو طرفه نیز مشاهده شد و به نظر می‌رسد که توسط چرخه‌های بارگذاری اولیه ایجاد می‌شود و سبب تغییر سختی سیستم می‌گردد. آزمایش‌های موجود در این تحقیق شامل ۱۲۰۰۰ چرخه بار بود که این تعداد نسبت به 10^8 چرخه‌ای که ممکن است کیسون در طول ۲۰ سال عمر طراحی متحمل گردد بسیار کم است. این نتایج بر اساس حداکثر تعداد چرخه بار قابل اعمال در سانتریفوژ به دست آمد. اما با وجود این محدودیت‌ها، روند و رفتارهای واضح از آزمایش‌ها به دست آمد که در زیر خلاصه می‌شود.

- نسبت ابعاد کیسون تأثیر معنی داری بر سختی پایه و ظرفیت آن دارد.

- سختی سیستم کیسون در معرض بارگذاری تناوبی و تحت یک شرایط کاملاً زهکشی شده، افزایش یافت. این افزایش بر اساس یک رابطه لگاریتمی که تأثیر پذیر از جهت و اندازه بار است، تقریب زده می‌شود. افزایش سختی در طول بارگذاری تناوبی بلند مدت بسیار کمتر از آنچه که قبلاً برای کیسون تک پایه توسط لبلانک و همکاران (۲۰۱۰) گزارش شده بود، به دست آمد.

- میزان تجمع چرخش با افزایش تعداد چرخه در شرایط کاملاً زهکشی شده، به بزرگی و جهت نسبی بار بستگی داشت و به طور کلی، یک رژیم تناوبی بین یک طرفه و

(۴)

$$I_r = \frac{\exp(5.96 - 0.04 I_p)}{1 + \ln [1 + 0.04(OCR + 1)^{3.2}]^{0.8}} \quad (5)$$

مدول برشی ماسه نیز از رابطه (۶) به دست می‌آید
(Seed & Idriss, 1970; Iwasaki et al., 1978):

$$G_{sand} = A P_a \left(\frac{\sigma'_v}{P_a} \right)^n \quad (6)$$

می‌باشد و اندیس f نیز مبین واژه میدان^{۱۳} است. همچنین ابعاد کیسون مکشی با قطر ۱۶ متر و طول دامن ۸ متر و ضخامت بدنه ۱۰ سانتیمتر و مقیاس آزمایش نیز $\frac{1}{100}$ انتخاب گردیده است. مشخصات رس و ماسه در جدول ۱ و برنامه آزمایش‌ها در جدول ۲ ارائه شده است. در برنامه آزمایش‌ها، از بارگذاری مونوتونیک برای تعیین سختی "بارگذاری چرخه اول" و تعیین ظرفیت لنگر نهایی^{۱۴} کیسون در هر پروفایل خاک، و تعیین اندازه چرخه‌های بارگذاری مقیاس شده، استفاده گردیده است.

که در آن، OCR نسبت بیش تحکیمی و I_p شاخص خمیری است.

که در آن، σ'_v تنش قائم مؤثر، P_a فشار اتمسفر و A ضریب ثابت بدون بعد است و n نیز در بازه ۰/۴۳۵ تا ۰/۷۶۵ تغییر می‌یابد که در این مطالعه ۰/۵ در نظر گرفته می‌شود (Kelly et al., 2006; LeBlanc et al., 2010). در اینجا رفتار بستر لایه‌ای مورد توجه بوده و رویکرد انجام شده برای اطمینان از آن است که نسبت سختی رس به ماسه در مقیاس مدل و میدان واقعی معادل باشند. بستر لایه‌ای مورد نظر در این مطالعه با دانسیته ماسه $D_{r,f} = 80\%$ و چسبندگی زهکش نشده رس برابر با $S_{u,f} = 80 \text{ kPa}$ انتخاب شد که در واقع مبین بخشی از بستر دریای شمال^{۱۲}

جدول ۱. مشخصات ماسه سیلیکاته (Chow et al., 2015; Lee et al., 2013) و رس کائولین (Stewart, 1992; Richardson et al., 2009)؛ (Zhu et al., 2018a)

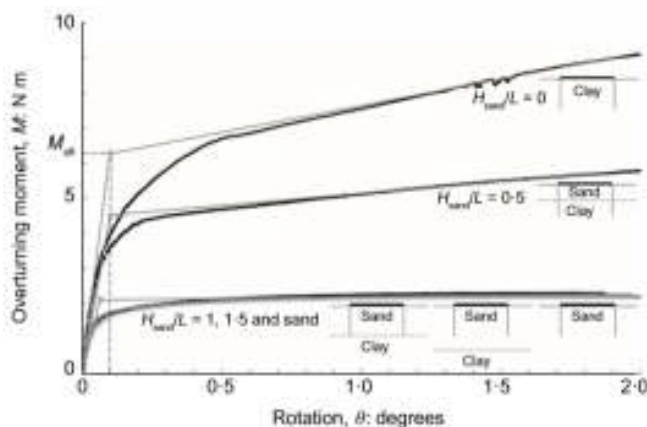
Silica sand		Kaolin clay	
Specific gravity, G_s	2.65	Specific gravity, G_s	2.6
Particle size, d_{50} : mm	0.19	Liquid limit, LL: %	61
Minimum dry density, ρ_{min} : kg/m ³	1461	Plastic limit, PL: %	27
Maximum dry density, ρ_{max} : kg/m ³	1774	Plasticity index, I_p : %	34
Critical state friction angle, ϕ'_{crit} : degrees	30	Angle of internal friction, ϕ' : degrees	23
Coefficient of consolidation, c_v : m ² /year at $D_r = 40\%$	>60 000	Coefficient of consolidation, c_v : m ² /year at $\sigma'_v = 110 \text{ kPa}$	2.6

جدول ۲. برنامه آزمایش‌های مونوتونیک و تناوبی (Zhu et al., 2018a)

Test ID	Test type	Soil profile	ζ_b	ζ_c	Number of cycles, N
P1	Monotonic	Sand	—	—	—
C1	Cyclic	Sand	0.4	0.1	1 204 998
P2	Monotonic	Clay	—	—	—
C2	Cyclic	Clay	0.4	0.1	1 239 149
P3	Monotonic	Sand over clay ($H_{sand}/L = 0.5$)	—	—	—
C3	Cyclic	Sand over clay ($H_{sand}/L = 0.5$)	0.4	0.1	380 049
C4			0.4	-0.3	905 398
C5			0.4	-0.7	1 310 071
C6			0.4	0.5	150 549
C7			0.4	1.0	—
C8			0.2	0.1	1 017 664
C9			0.7	0.1	1 112 751
P4	Monotonic	Sand over clay ($H_{sand}/L = 1.0$)	—	—	—
C10	Cyclic	Sand over clay ($H_{sand}/L = 1.0$)	0.4	0.1	1 200 049
P5	Monotonic	Sand over clay ($H_{sand}/L = 1.5$)	—	—	—
C11	Cyclic	Sand over clay ($H_{sand}/L = 1.5$)	0.4	0.1	1 199 263

پژوهشگران (Zhu et al., 2018b)، مبنایی را برای در نظر گرفتن رفتار کیسون در مقیاس میدانی تشکیل می‌دهند. شکل ۱۳ پاسخ لنگر- چرخش را که در تست‌های مونوتونیک اندازه‌گیری شده است، نشان می‌دهد. با توجه به این شکل، برای نمونه‌های ماسه‌ای تک لایه و نمونه‌های لایه‌ای با $\frac{H_{sand}}{L} \geq 1$ ، در ابتدا سختی افزایش می‌یابد و سپس به ظرفیت لنگر تقریباً ثابت می‌رسد. اما در نمونه‌های رس تک لایه و نمونه‌های لایه‌ای با $\frac{H_{sand}}{L} = 0.5$ ، ظرفیت لنگر به تدریج با افزایش چرخش افزایش می‌یابد. شکل ۵ نشان می‌دهد که ظرفیت لنگر عمدتاً از برش خاک در نقاط بالاتر از سطح نوک دامن $\left(\frac{Z}{L} \leq 1\right)$ حاصل می‌شود و با مقدار q_c در $\frac{Z}{L} \leq 1$ سازگاری دارد.

مطابق برنامه آزمایش‌ها که در جدول ۲ خلاصه شده است، این برنامه شامل ۱۶ فقره آزمایش کیسون مدل (در ۱۶ نمونه خاک) است که از این تعداد ۵ فقره مونوتونیک بوده و ۱۱ فقره بارگذاری تناوبی توام با یک مرحله مونوتونیک پس از پایان بارگذاری تناوبی می‌باشد. تعداد 10^6 چرخه بار در اکثر تست‌ها به استثنای تست‌های C_3 و C_6 که به طور زودرس (به دلیل بروز مشکل در کنترل بار) پایان یافت، به کیسون مدل اعمال گردید. گرچه تا قبل از مطالعه مذکور استفاده از پارامترهای بدون بعد، معیار مناسبی برای در نظر گرفتن نتایج حاصل از تست‌های مدل کوچک مقیاس بوده است (Kelly et al., 2006; Byrne, 2014)، اما هنوز مشخص نبوده که پارامترهای بی‌بعد مناسب برای پروفایل‌های خاک لایه‌ای چگونه است. به همین دلیل نتایج به دست آمده در تست‌های مدل در این مطالعه و نتایج به دست آمده از آزمایش‌های ساتریفوژ در مطالعه بعدی همین



شکل ۱۳. نتایج آزمایش مونوتونیک برای هر پروفیل خاک (Zhu et al., 2018a)

ماسه تک لایه و کمترین چرخش در رس تک لایه ایجاد شده است. مطابق نتایج حاصل از بارگذاری مونوتونیک به نظر می‌رسد که پارامتر حاکم در رفتار بلند مدت تناوبی، نسبت ضخامت لایه ماسه‌ای به طول دامن کیسون $\left(\frac{H_{sand}}{L}\right)$ می‌باشد. تأثیر شرایط بارگذاری تناوبی بر تحکیم رس در اشکال ۱۶ و ۱۷ نشان داده شده است. در شکل ۱۶ اثر تقارن بار مشاهده می‌شود که بزرگی بار $\beta_b = 0.4$ بوده و تقارن بار در رنج $\beta_c = -0.7$ تا $\beta_c = 1$ تغییر می‌یابد. همچنین در یک بستر لایه‌ای با نسبت ضخامت

در شکل ۱۴ نتایج آزمایش بارگذاری تناوبی جانبی در ماسه تک لایه (شکل ۱۴ - الف) و رس تک لایه (شکل ۱۴ - ب) و با نسبت بزرگی بار $\beta_b = 0.4$ و نسبت تقارن بار $\beta_c = 0.1$ ارائه شده است. آن چه که مشهود است، چرخش در طول بارگذاری تناوبی افزایش یافته و چرخش بعد از $N = 10^6$ چرخه بار در لایه رس تقریباً نیمی از چرخش در لایه ماسه‌ای بوده است. چرخش تجمعی در مقابل تعداد چرخه بارگذاری در اشکال ۱۵ تا ۱۷ نشان داده شده است. مطابق شکل ۱۵ بیشترین چرخش نرمال شده در

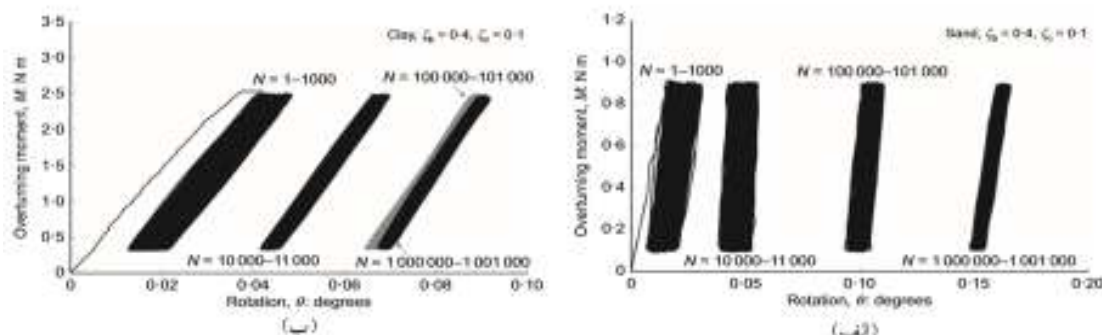
چرخش در بارگذاری یک‌طرفه به دست آمد. در شکل ۱۷ نتایج بارگذاری تناوبی وقتی که تقارن بار $\xi_c = 0.1$ و بزرگی بار از $\xi_b = 0.2$ تا $\xi_b = 0.7$ تغییر می‌کند، ارائه شده است. همچنین در اشکال ۱۵ تا ۱۷ نتایج تجربی با نتایج حاصل از قانون انرژی (Zhu et al., 2013; Cox et al., 2014) مطابق معادله ۸ مقایسه گردیده است.

$$\frac{\Delta\theta(N)}{\theta_0} = \beta \times N^\alpha$$

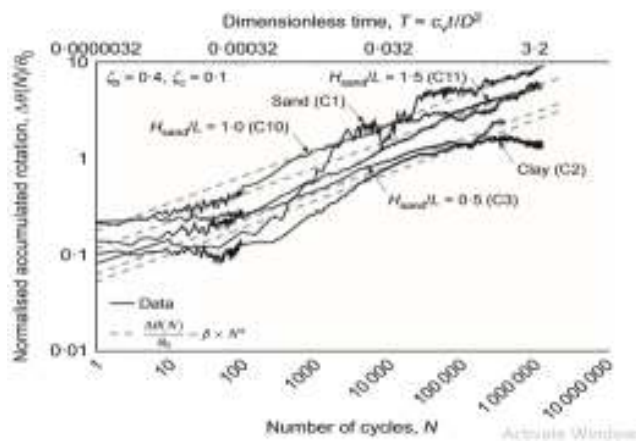
است که مقدار α در مطالعات موجود مقادیر دیگری از جمله (Abadie et al., 2015; LeBlanc et al., 2010) برای مونوپایل‌ها در مطالعه $\alpha = 0.31$ و (Zhu et al., 2018a) در مطالعه $\alpha = 0.30$ و (Cox et al., 2014) و $\alpha = 0.28$ در مطالعه (Zhu et al., 2018a) برای کیسون‌های مکشی گزارش شده است. مقدار پارامتر β در معادله ۸ نیز برحسب بار تناوبی اعمالی ($\xi_c = 0.1$, $\xi_b = 0.4$) در شکل ۱۸ ارائه شده است.

($\frac{H_{sand}}{L} = 0.5$) چرخش نرمال شده در بارگذاری یک‌طرفه مقدار بزرگتری نسبت به بارگذاری دوطرفه دارد. اگرچه تأثیر تقارن بار به طور سیستماتیک برای سایر پروفیل‌های خاک در اینجا بررسی نشده است. البته (Zhu et al., 2013) عکس این نتیجه را در ماسه تک لایه مشاهده نمودند یعنی چرخش در بارگذاری دوطرفه بزرگتر از (۸)

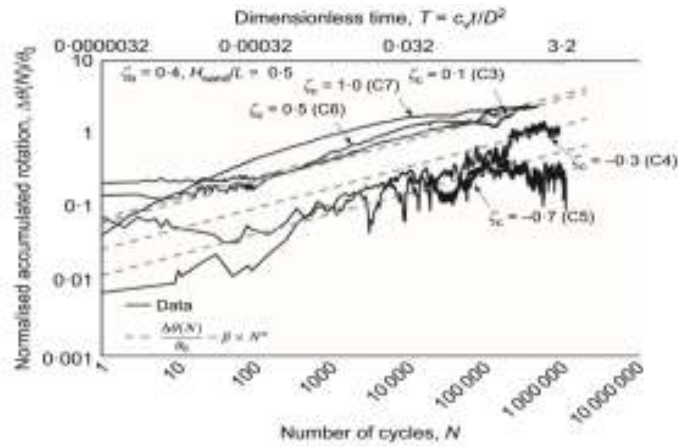
که ضرایب α و β بدون بعد بوده و ضریب β مبین چرخش اولیه از θ_0 به θ_1 و α مبین نرخ تجمع کرنش با افزایش تعداد چرخه است. β در مطالعات پیشین (Zhu et al., 2013; LeBlanc et al., 2010) با T نشان داده شده است که در این مطالعه برای اجتناب از سردرگمی و اشتباه شدن با فاکتور بدون بعد زمان یعنی (T)، با β معرفی شده است. با تحلیل رگرسیون، مقدار α برای سایر آزمون‌های این تحقیق برابر با $\alpha = 0.28$ به دست آمده است. لازم به ذکر



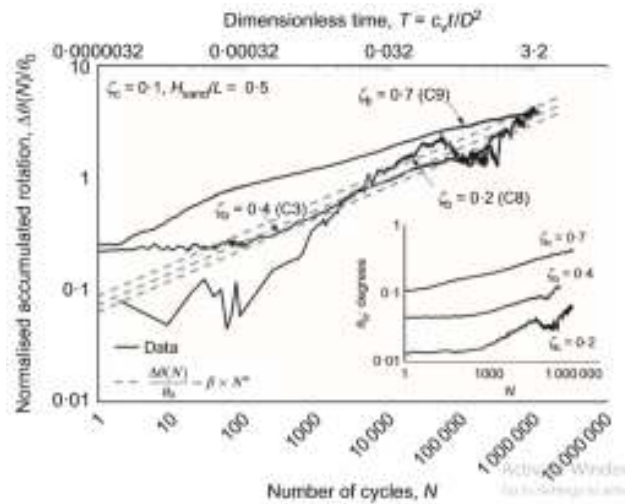
شکل ۱۴. پاسخ لنگر- چرخش تپ در طول بارگذاری تناوبی (الف) ماسه؛ (ب) رس (Zhu et al., 2018a)



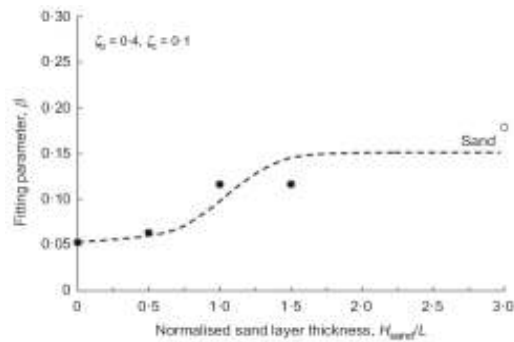
شکل ۱۵. چرخش تجمعی نرمال شده با تعداد چرخه بارگذاری پروفیل‌های مختلف خاک ($\xi_c = 0.1$, $\xi_b = 0.4$) (Zhu et al., 2018a)



شکل ۱۶. چرخش تجمعی نرمال شده با تعداد چرخه بارگذاری پروفیل $H_{sand}/L = 0.5$ خاک ($\zeta_b = 0.4$) (Zhu et al., 2018a)



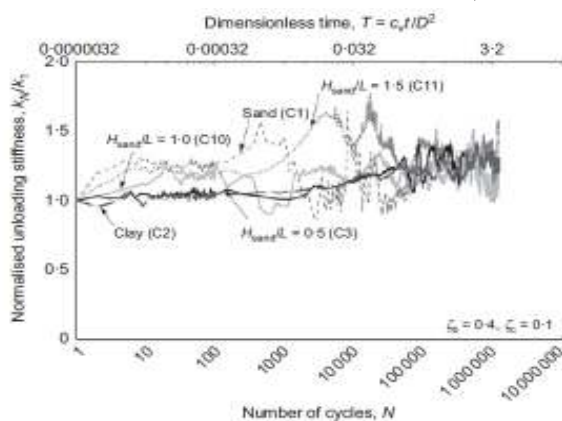
شکل ۱۷. چرخش تجمعی نرمال شده با تعداد چرخه بارگذاری پروفیل $H_{sand}/L = 0.5$ خاک ($\zeta_c = 0.1$) (Zhu et al., 2018a)



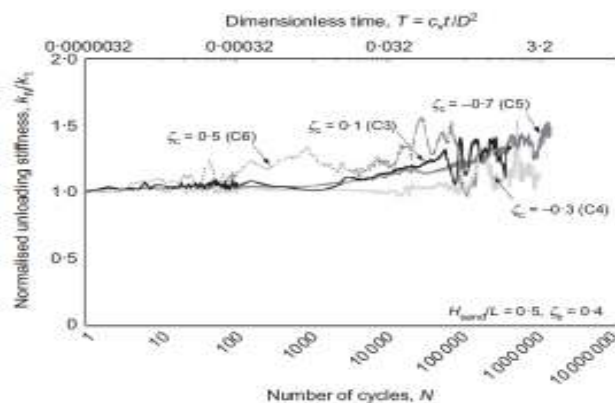
شکل ۱۸. تغییر پارامتر زهکشی نشده β بر حسب پروفیل خاک (Zhu et al., 2018a)

می‌رسد که در بلند مدت با متراکم شدن ماسه و تحکیم رس، سختی نیز معمولاً در حدود ۲۰ تا ۵۰ درصد افزایش می‌یابد. این چنین تغییراتی در سختی پی باید با دقت در نظر گرفته شود زیرا باعث تغییر فرکانس طبیعی سیستم می‌شود. به عنوان مثال در مطالعه (Arany et al., 2016) با افزایش سختی در حدود ۵۰٪ برای ۱۰ مزرعه بادی فراساحلی، مقدار فرکانس طبیعی سیستم نیز بین ۱/۵ تا ۳/۵ درصد افزایش یافت. با این وجود، اگر میزان سختی اولیه پایه کم باشد، افزایش در فرکانس طبیعی سیستم تا ۲۲ درصد هم می‌رسد (بستر دریا در این ۱۰ مورد شامل ماسه‌های متراکم و رس‌های سخت بودند) (Arany et al., 2016).

در شکل ۱۹ تغییرات سختی باربرداری $\frac{k_N}{k_1}$ بر حسب تعداد چرخه نشان داده شده است. که k_1 و k_N به ترتیب سختی باربرداری چرخه اول و چرخه N ام هستند. مطابق شکل ۱۹ مقدار سختی در حال افزایش است، اگرچه پراکندگی ظاهری در داده‌ها به دلیل تغییرات بسیار ناچیز در چرخش در هر چرخه بارگذاری، دیده می‌شود. این شکل نشان می‌دهد که افزایش میزان سختی در پروفیل‌های ماسه‌ای ($\frac{H_{sand}}{L} > 1$) که ناشی از تراکم است، نسبت به افزایش سختی در پروفیل‌های رسی که ناشی از تحکیم می‌باشد، سریعتر است. اشکال ۲۰ و ۲۱ برای $\frac{H_{sand}}{L} = 0.5$ نشان می‌دهند که افزایش سختی مستقل از تقارن بار است، اما با افزایش بزرگی بار تناوبی، افزایش سختی بیشتری خواهیم داشت. به نظر

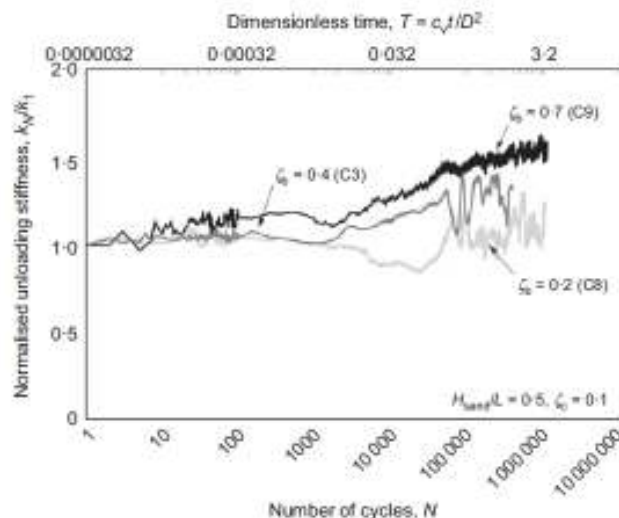


شکل ۱۹. سختی باربرداری بر حسب تعداد چرخه بار برای پروفیل‌های مختلف خاک با (Zhu et al., 2018a) ($\xi_b = 0.4$, $\xi_c = 0.1$)



شکل ۲۰. سختی باربرداری بر حسب تعداد چرخه بار برای پروفیل‌های مختلف خاک با

(Zhu et al., 2018a) ($\xi_b = 0.4$, $\frac{H_{sand}}{L} = 0.5$)

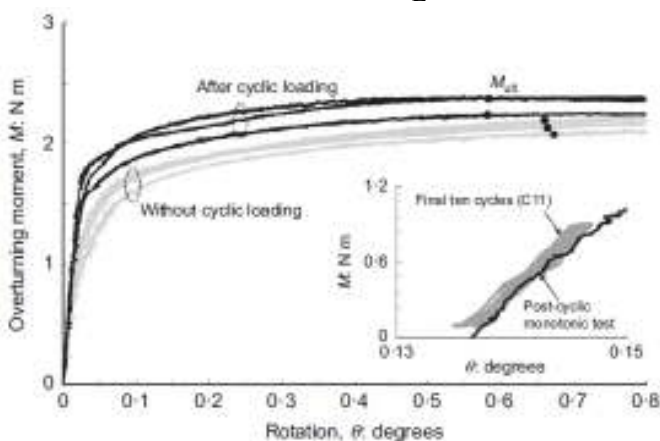


شکل ۲۱. سختی باربرداری بر حسب تعداد چرخه بار برای پروفیل‌های مختلف خاک با

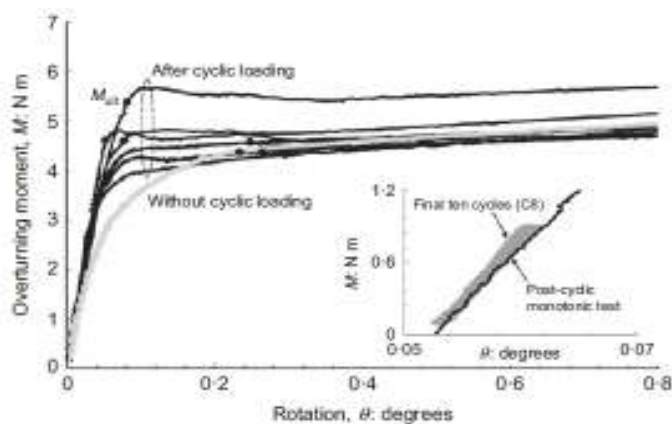
$$(Zhu et al., 2018a) \left(\xi_c = 0.1, \frac{H_{sand}}{L} = 0.5 \right)$$

حدود ۱۰٪ افزایش و در نمونه‌های رسی ($\frac{H_{sand}}{L} = 0, 0.5$) مقدار ۳۰٪ افزایش ظرفیت لنگر پسا سیکلی خواهیم داشت. مطابق شکل ۲۴، در بارگذاری مونوتونیک پسا سیکلی در نمودار لنگر- چرخش رس تک لایه، یک قله^۱ دیده می‌شود که در بارگذاری مونوتونیک قبل از بار تناوبی به چشم نمی‌خورد. همان طور که قبلاً هم بیان گردید، تحکیم نقش سودمندی در ثبات و پایداری چرخش کیسون و سختی باربرداری داشته و می‌تواند افزایش راندمان طراحی را با توجه به بهبود ظرفیت لنگر فراهم نماید.

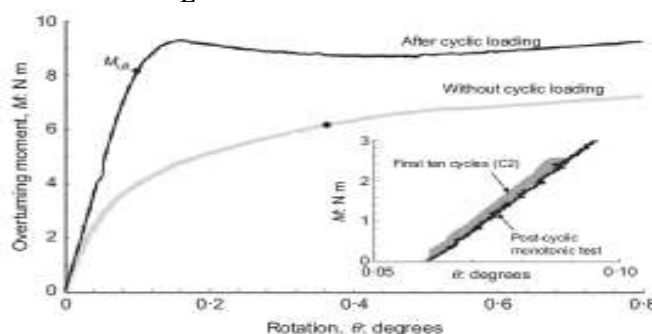
در مطالعه مذکور برای ارزیابی تأثیر بارگذاری تناوبی بر ظرفیت باربری و سختی سیستم کیسون مکشی، پس از بارگذاری تناوبی، بارهای مونوتونیک نیز اعمال گردید. در شکل ۲۲ تا ۲۴ پاسخ‌های لنگر- چرخش در حالت‌های با و بدون پیش بارگذاری تناوبی نشان داده شده است. بارگذاری تناوبی به طور کلی ظرفیت لنگر و سختی را افزایش می‌دهد. پس از شروع آزمایش و اعمال چرخه‌های بارگذاری و به تبع آن افزایش سختی، تدریجاً نرخ افزایش سختی کمتر شده و سختی به یک ثبات و پایداری می‌رسد. با توجه به نتایج مشخص می‌شود که در نمونه‌های ماسه‌ای ($\frac{H_{sand}}{L} \geq 1$)



شکل ۲۲. رفتار مونوتونیک پس از بارگذاری تناوبی، تک لایه ماسه ($\frac{H_{sand}}{L} = 1, 1.5$) (Zhu et al., 2018a)



شکل ۲۳. رفتار مونوتونیک پس از بارگذاری تناوبی ($\frac{H_{sand}}{L} = 0.5$) (Zhu et al., 2018a)



شکل ۲۴. رفتار مونوتونیک پس از بارگذاری تناوبی تک لایه رس (Zhu et al., 2018a)

و تنش موثر ناشی از وزن خاک در نوک کیسون برابر 40 kPa بود. مقدار پارامتر بدون بعد $\frac{v}{\gamma} D_3 = 0.68$ انتخاب شده است که در رنج مطالعات موجود می‌باشد. به عنوان مثال پارامتر بدون بعد در مطالعه (Zhu et al., 2018a) برابر ۰/۶۲ و در مطالعه (Cox et al., 2014) برابر ۰/۶۹ و در مطالعه (Zhu et al., 2013) برابر ۰/۵۷ و در مطالعه (Foglia et al., 2014) برابر ۰/۸۶ و در مجموع در رنج پیشنهادی (Foglia and Ibsen, 2016) یعنی از ۰/۰۹ تا ۰/۹۱ قرار دارد.

مشخصات ماسه و رس مورد آزمایش در جدول ۳ آمده است. برای دستیابی به مقاومت برشی زهکشی نشده $S_{II} = 80 \text{ kPa}$ لایه رس توسط دوغاب کاتولین بیش تحکیم یافته آماده گردید. دانسیته نسبی لایه ماسه روی لایه رس، برابر ۰/۸۳ بوده و برای هر دو حالت زهکشی شده و نیمه زهکشی شده از آب و یک مایع با ویسکوزیته بالا به عنوان سیال حفره‌ای استفاده گردیده است.

این پژوهشگران در ادامه مطالعه بالا و در واقع برای تکمیل شدن شکاف موجود در مسیر تکامل تحقیقات خود، مطالعه دیگری را بر اساس مدل سانتریفوژ برنامه‌ریزی نموده و انجام دادند. سپس داده‌های این مطالعه را در کنار داده‌های آزمون 1g، بالغ بر ۱ میلیون چرخه بارگذاری، به صورت یکجا در نظر گرفتند و رفتار بلند مدت کیسون را تحت بارگذاری جانبی تناوبی بررسی نمودند که روش و نتایج حاصل از این آزمایش‌های سانتریفوژ به صورت زیر می‌باشد. ژوو و همکاران (Zhu et al., 2018b) یک سری آزمایش سانتریفوژ به منظور بررسی تأثیر تنش‌های ناشی از وزن خاک، مکش نصب و شرایط زهکشی، در راستای تکمیل آزمایش‌های بارگذاری تناوبی بلند مدت 1g، طراحی نمودند. این آزمایش‌ها با نسبت ظاهری ۰/۵ و با شرایط واقع بینانه بر اساس داده‌های مطالعات قبلی به ویژه مطالعه (Zhu et al., 2018a) انجام گردید. قطر مدل ۸۰ میلیمتر بوده و بار گریز از مرکز به صورت واقع بینانه مطابق با مطالعات (Cox et al., 2014) در نظر گرفته شد. آزمایش‌ها با شتاب 100g

جدول ۳- مشخصات ماسه سیلیکاته و رس کائولین استفاده شده در آزمایش (Zhu et al., 2018b)

Silica sand		Kaolin clay	
Specific gravity, G_s	2.65	Specific gravity, G_s	2.60
Mean particle size, d_{50} (mm)	0.19	Liquid limit, LL (%)	61
Minimum dry density, ρ_{min}	1461	Plastic limit, PL (%)	27
Maximum dry density, ρ_{max}	1774	Plastic index, I_p (%)	34
Critical state friction angle, ϕ'_{cs}	30	Critical state friction angle ϕ'_{cs} (°)	23
Coefficient of consolidation, c_v (m ² /year)	16,000 [*] 1.1 × 10 ⁻⁶ [†]	Coefficient of consolidation, c_v (m ² /year), estimated for stress level at	7.5

^{*} when saturated with 700 cSt cellulose ether pore fluid
[†] when saturated with 1 cSt water pore fluid

- در جدول ۴ برنامه و مشخصات آزمایش‌های سانتریفوژ ارائه شده است. این آزمایش‌ها شامل ۸ آزمایش بارگذاری تناوبی برای بررسی آثار زیر است:
- سطح تنش در ماسه (تست ۱-۲ در مقایسه با تست 1g)
 - رژیم زهکشی در ماسه (تست‌های ۱-۲ و ۲-۱ تا ۳-۶)
 - روش نصب در ماسه (تست‌های ۱-۲ و ۲-۳)
 - ماسه روی رس (تست‌های ۲-۳ و ۳-۳)
 - بزرگی و تقارن بار تناوبی در ماسه بر روی رس (تست‌های ۲-۳ تا ۳-۶)

جدول ۴. برنامه آزمایش سانتریفوژ (Zhu et al., 2018b)

Test ID	Soil sample		Installation	Loading type	ζ_b	ζ_c	Cycles N
	Soil type	Pore fluid					
1-1	Sand	Water (1 cSt)	Jacked	Monotonic	-	-	-
1-2			Jacked	Cyclic	0.4	0.1	5,222
2-1	Sand	High viscosity pore fluid	Jacked	Cyclic	0.4	0.1	547
2-2			Suction	Monotonic	-	-	-
2-3			Suction	Cyclic	0.4	0.1	16,377
3-1	Sand over clay ($H_{sand}/L = 0.5$)	High viscosity pore fluid in sand (700 cSt) Water in clay (1 cSt)	Suction	Monotonic	-	-	-
3-2			Suction	Cyclic	0.7	0.1	2,369
3-3			Suction	Cyclic	0.4	0.1	91,793
3-4			Suction	Cyclic	0.4	0.5	4,543
3-5			Suction	Cyclic	0.4	-	16,999
3-6			Suction	Cyclic	0.55	0.1	2,677

همانطور که قبلاً هم گفته شد پاسخ چرخش می‌تواند توسط یک قانون انرژی بیان گردد که در شکل با خط چین مشخص شده است. مطابق شکل ۲۶ بهترین سازگاری یا انطباق (بر اساس رگرسیون حداقل مربعات) با آزمون‌های قبلی و سایر آزمون‌های این تحقیق با استفاده از $\alpha = 0.29$ به دست آمده است. مقادیر α ، β و θ_0 در این مطالعه و مطالعات قبلی در جدول ۵ به صورت خلاصه ارائه شده است. اگر چه نرخ افزایش چرخش کیسون (مشخص شده با α) برای همه آزمایش‌ها در این تحقیق یکسان است اما مقدار چرخش اولیه متناظر با M_{max} (که منعکس کننده

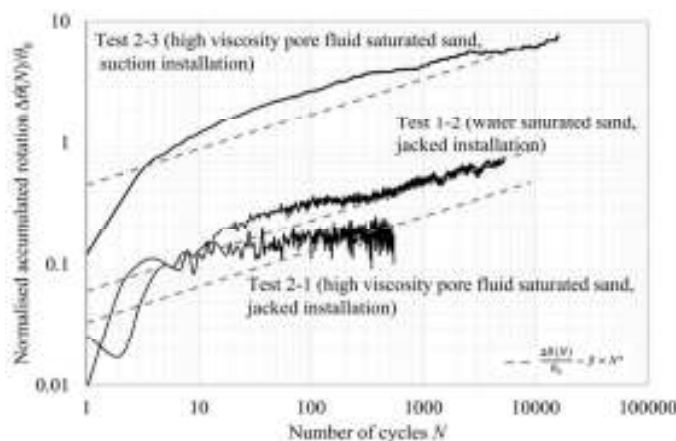
همان طور که بیان گردید شرایط و موقعیت‌های تأثیرگذار بر چرخش کیسون که در مطالعه مذکور بررسی شده است شامل روش نصب، سطح تنش و زهکشی در لایه ماسه‌ای می‌باشد که در ادامه ارائه شده است.

• تأثیر روش نصب، سطح تنش و زهکشی در لایه ماسه‌ای

چرخش تجمعی نرمال شده برحسب تعداد چرخه بارگذاری و روش نصب در لایه ماسه‌ای و با پارامترهای $\zeta_c = 0.1$ ، $\zeta_b = 0.4$ در شکل ۲۵ نشان داده شده است.

می‌دهد بر اساس ترازهای مختلف تنش ناشی از وزن و شرایط مختلف زهکشی و نصب با مکش (به عنوان شرایط واقع بینانه‌تر نسبت به حالت نصب با جک) در جدول ۵ آورده شده است.

بزرگی بار تناوبی و تیپ خاک است) و چرخش تجمعی پس از یک چرخه بارگذاری $\Delta\theta(1) = (\theta_1 - \theta_0)$ (مشخص شده با β) برای هر آزمایش متفاوت است. این مسأله به طور مستقیم بر مقدار مطلق چرخش تجمعی تأثیر می‌گذارد. مقادیر متفاوت چرخش که در ماسه و ماسه بر روی رس رخ



شکل ۲۵. تأثیر روش نصب روی چرخش کیسون در ماسه با $\zeta_c = 0.1$, $\zeta_b = 0.4$ (Zhu et al., 2018b)

جدول ۵. مقادیر متناسب α و β از آزمایش‌ها در ماسه و ماسه بر روی رس با شرط $\frac{H_{sand}}{L} = 0.5$ (Zhu et al., 2018b)

α	β	N	θ_0	Soil type	Install.	Pore fluid	ζ_b	ζ_c	Approach	Source	
0.18	0.53	$\sim 10^1$	*	Sand	Jacked	Water	0.4	-	lg	Foglia et al.	
0.39	0.10	10,325	*			Dry	0.37	0	lg	Zhu et al.	
0.30	0.10	71	*			Dry	0.4	0.02	Ng	Cox et al.	
0.28	0.15	1,204,998	0.017 ^b			Water	0.4	0.1	lg	Zhu et al. (2018) [†]	
0.29	0.03	0.06	5,222		0.013 ^b	Jacked	Water	0.4	0.1	Ng	This study.
		0.03	547		0.006 ^b		High viscosity none	0.4	0.1		This study.
		0.45	16,377		0.013 ^b	Suction	viscosity none	0.4	0.1		This study.
		0.67	91,793		0.029 ^b		High viscosity pore fluid	0.4	0.1		This study.
		0.62	4,543		0.035 ^b		High viscosity pore fluid	0.4	0.5		This study.
		0.17	16,999		0.032 ^b		High viscosity pore fluid	0.4	-0.7		This study.
0.52	2,677	0.042 ^b	Sand over clay	Suction	High viscosity pore fluid	0.55	0.1	This study.			
0.29	2,469	0.286 ^b			High viscosity pore fluid	0.7	0.1	This study.			

* Not known.

[†] Only data for $\zeta_b = 0.4$ and $\zeta_c = 0.1$ are provided here. Parameters relevant to other values of ζ_b and ζ_c can be found in the original studies.

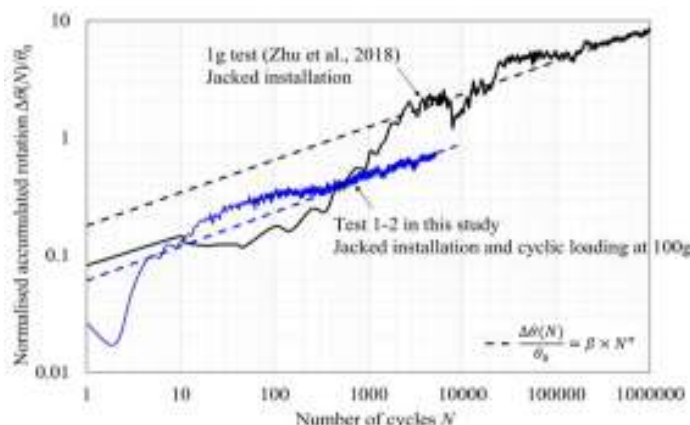
منجر به چرخش کمتر کیسون در چرخه اول $N=1$ می‌شود که این موضوع اهمیت تأثیر روش نصب بر وضعیت خاک را برجسته می‌سازد. مقایسه نتایج مطالعات پیشین در خصوص مقدار چرخش به عنوان مثال مطالعه (Cox et al., 2014) با مقادیر چرخش اولیه پس از نصب با جک در این

بررسی تأثیر نفوذپذیری ماسه و میزان بارگذاری بر داده‌های حاصل از سانتیفرژ، نشان می‌دهد که چرخش تجمعی پس از چرخه اول (به عنوان مثال $\Delta\theta(1) = \theta_0 \times \beta$) مقدار بیشتری در حالت زهکشی (با مایع منفذی آب) نسبت به حالت نیمه زهکشی (با مایع منفذی با ویسکوزیته بالا)، پس از نصب با جک دارد. به نظر می‌رسد که نصب با جک

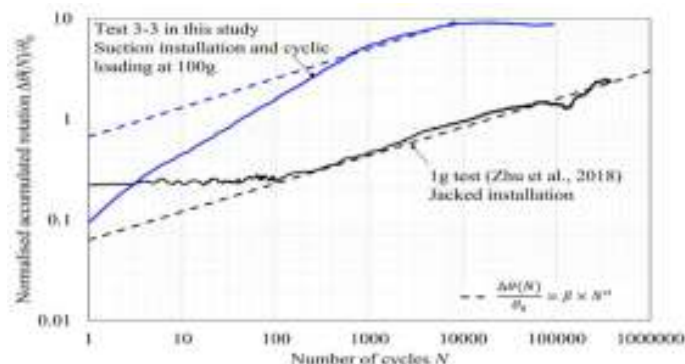
همان طور که از بحث قبلی انتظار می‌رود، اندازه بزرگی چرخش یعنی $\frac{\Delta\theta(N)}{\theta_0}$ در $N=1$ در تست‌های 1g برابر $\beta=0.15$ و در تست‌های سانتیفیوژ برابر $\beta=0.06$ می‌باشد. نتایج در شرایط ماسه بر روی رس نیز در شکل ۲۶ (ب) نشان داده شده است.

مطالعه (تست‌های ۱-۱ و ۱-۲)، این امکان را می‌دهد که مقدار چرخش متأثر از مکش را شناسایی نماییم.

شکل ۲۶ (الف) برای نصب کیسون با جک در ماسه ($\xi_c = 0.1$, $\xi_b = 0.4$) نشان می‌دهد که نرخ بلند مدت چرخش تجمعی تقریباً یکسان است: یعنی $\alpha = 0.28$ برای تست‌های 1g و $\alpha = 0.29$ در تست‌های سانتیفیوژ. گرچه



(الف)



(ب)

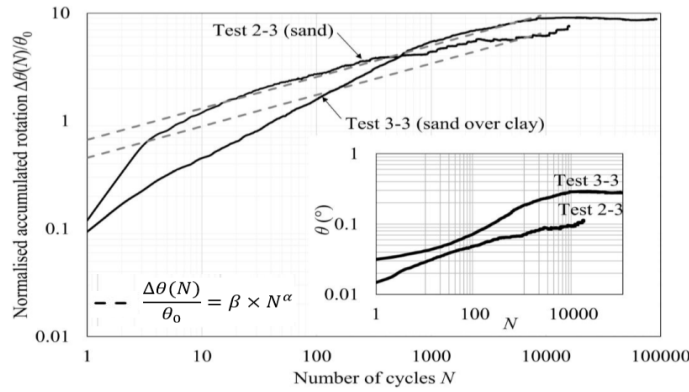
شکل ۲۶. چرخش تجمعی کیسون برای (الف)- نصب با جک در ماسه و کاملاً زهکشی شده (ب)- نصب با جک برای ماسه بر روی رس در 1g و نصب با مکش در سانتیفیوژ (Zhu et al., 2018b)

• تأثیر لایه رس زیرین بر لایه ماسه

این عدم ثبات به تعداد چرخه‌ها ($N=16377$) ربط داده شود. زیرا در آزمایش‌های معادل در مطالعه ژوو و همکاران (Zhu et al., 2018a) پس از تعداد چرخه $N = 10^6$ یک پایداری در آزمایش‌های ماسه بر روی رس دیده شد ولی چرخش در ماسه همچنان ادامه داشت و دلیل پایداری چرخش در ماسه بر روی رس به افزایش مقاومت ناشی از تحکیم در لایه رسی ربط داده شد. اگر چه اندازه $\frac{\Delta\theta(N)}{\theta_0}$ در ماسه و ماسه بر روی رس مشابه است، اما چرخش مطلق در

در شکل ۲۷ مقدار چرخش در بارگذاری تناوبی در ماسه ($\xi_c = 0.1$, $\xi_b = 0.4$) یعنی تست ۲-۳ و حالتی که ماسه بر روی رس قرار دارد یعنی تست ۳-۳ بعد از نصب با مکش مقایسه شده است. مقدار $\alpha = 0.29$ در هر دو حالت یکسان است اگر چه تجمع چرخش در ابتدا در ماسه سریع‌تر است. چرخش در نهایت در ماسه بر روی رس در چرخه $N=10000$ تقریباً ثابت و پایدار می‌شود. اما در ماسه تک لایه این پایداری و ثبات دیده نمی‌شود گرچه ممکن است

ماسه بر روی رس همانطور که در شکل داخلی ۲۷ نشان داده شده است نسبت به ماسه بیشتر است.

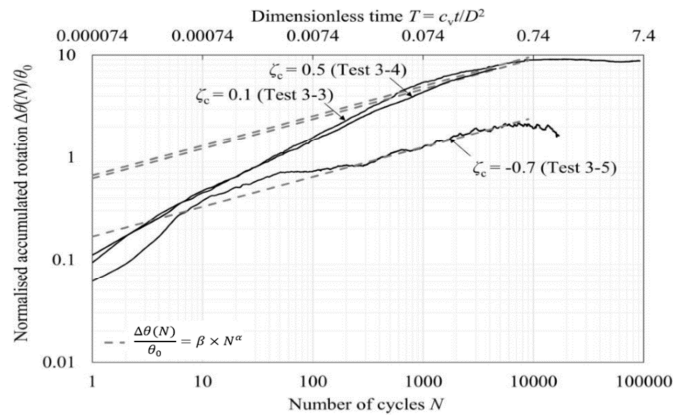


شکل ۲۷. تأثیر لایه رس زیرین بر چرخش تجمعی کیسون تحت بار تناوبی (Zhu et al., 2018b)

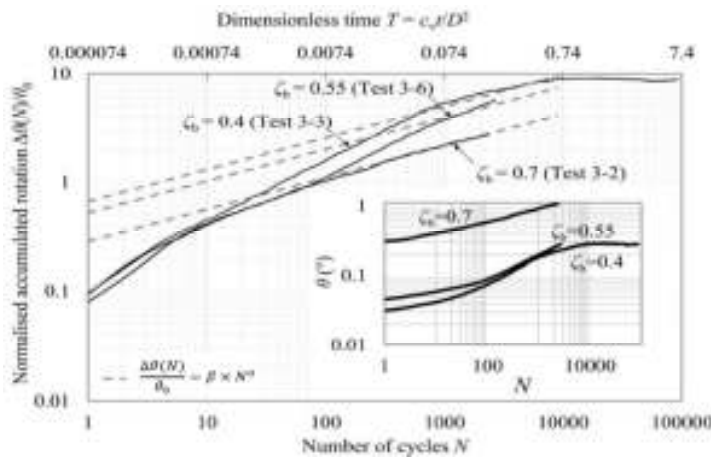
• تأثیر اندازه و تقارن بار تناوبی

۲۸ (ب) تأثیر اندازه بار تناوبی با تغییر مقادیر $\zeta_b = 0.4, 0.55, 0.7$ در مقدار ثابت تقارن بار تناوبی با $\zeta_c = 0.1$ بر چرخش تجمعی کیسون در ماسه بر روی رس قابل مشاهده است.

اثر بزرگی و تقارن بار تناوبی بر چرخش کیسون در شکل ۲۸ نشان داده شده است. در شکل ۲۸ (الف) تأثیر تقارن بار تناوبی (با تغییر مقادیر $\zeta_c = 0.5, 0.1, -0.7$ در مقدار ثابت اندازه بار تناوبی با $\zeta_b = 0.4$) ارائه شده و در شکل



(الف)

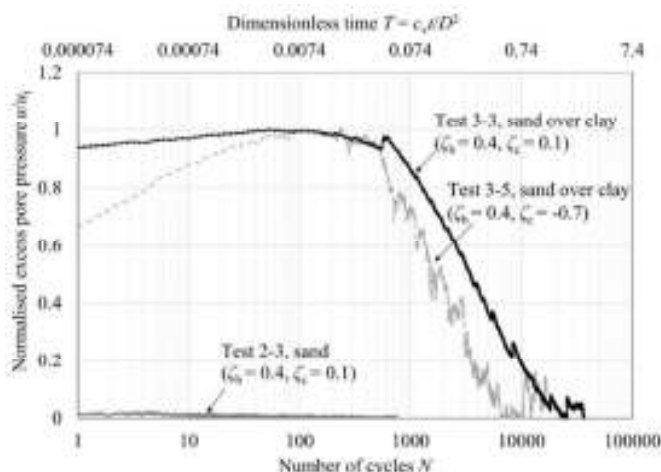


(ب)

شکل ۲۸. تأثیر تقارن و اندازه بار تناوبی بر چرخش تجمعی کیسون در ماسه بر روی رس الف- تقارن بار ب- اندازه بار (Zhu et al., 2018b)

شکل ۲۸ الف) نشان می‌دهد که مقدار چرخش نرمال شده $\frac{\Delta\theta(N)}{\theta_0}$ برای بارگذاری یک‌طرفه ($\xi_c = 0.5, 0.1$) یکسان و مقدار بزرگتری نسبت به چرخش متناظر با بارگذاری دو طرفه یعنی ($\xi_c = -0.7$) دارد. اما همان طور که در شکل الحاقی ۲۸ ب) نشان داده شده، مقدار چرخش نرمال شده با افزایش ξ_c ، افزایش می‌یابد. روند مشاهده شده با روند گزارش شده در مطالعه (Zhu et al., 2018a) همخوانی دارد که در آن مطالعه نصب کیسون با جک انجام شده و مایع منفذی آب بوده است. در تست شماره ۳-۳ و ۵-۳ پس از ۱۰۰۰۰ چرخه یک پایداری و ثبات در چرخش کیسون در ماسه بر روی رس مشاهده می‌شود. اما از آنجا که رفتار مشابهی در نمونه‌های ماسه مشاهده نمی‌شود، این رفتار پایدار باید ناشی از تغییر مقاومت در لایه رس باشد. در شکل ۲۹ مقدار فشار آب حفره‌ای اندازه‌گیری شده در تست‌های

شکل ۲۸ الف) نشان می‌دهد که مقدار چرخش نرمال شده $\frac{\Delta\theta(N)}{\theta_0}$ برای بارگذاری یک‌طرفه ($\xi_c = 0.5, 0.1$) یکسان و مقدار بزرگتری نسبت به چرخش متناظر با بارگذاری دو طرفه یعنی ($\xi_c = -0.7$) دارد. اما همان طور که در شکل الحاقی ۲۸ ب) نشان داده شده، مقدار چرخش نرمال شده با افزایش ξ_c ، افزایش می‌یابد. روند مشاهده شده با روند گزارش شده در مطالعه (Zhu et al., 2018a) همخوانی دارد که در آن مطالعه نصب کیسون با جک انجام شده و مایع منفذی آب بوده است. در تست شماره ۳-۳ و ۵-۳ پس از ۱۰۰۰۰ چرخه یک پایداری و ثبات در چرخش کیسون در ماسه بر روی رس مشاهده می‌شود. اما از آنجا که رفتار مشابهی در نمونه‌های ماسه مشاهده نمی‌شود، این رفتار پایدار باید ناشی از تغییر مقاومت در لایه رس باشد. در شکل ۲۹ مقدار فشار آب حفره‌ای اندازه‌گیری شده در تست‌های



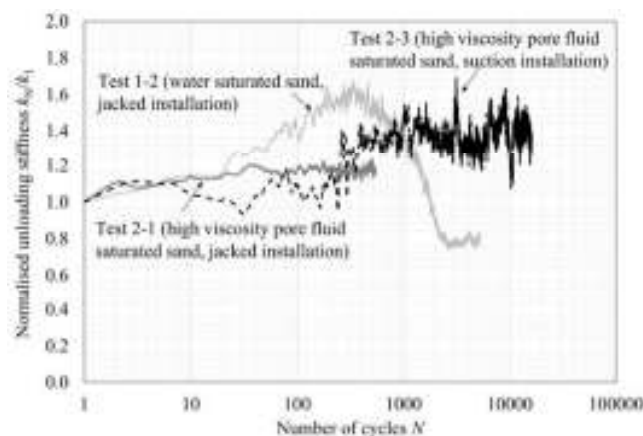
شکل ۲۹. پاسخ فشار آب حفره‌ای در طول بارگذاری تناوبی در ماسه بر روی رس (Zhu et al., 2018b)

اندازه کوچک بار تناوبی ($\xi_b = 0.4$) یک کاهش در سختی دیده می‌شود که البته تا حدی در طول آزمایش بهبود می‌یابد. در نقطه مقابل، تست بارگذاری تناوبی دو طرفه با بار کم ($\xi_c = -0.7, \xi_b = 0.4$) و تست بارگذاری تناوبی یک طرفه با بار بزرگتر ($\xi_c = 0.1, \xi_b = 0.7$) در ابتدا تغییرات کمی در سختی نشان می‌دهند، و سپس به صورت ملایم شروع به افزایش می‌کند، مثلاً در حدود چرخه ۵۰۰۰ ام در آزمون

در مطالعه مذکور تأثیر بارگذاری تناوبی بر سختی باربرداری در دو حالت بستر ساده و لایه‌ای ارائه شده است. با توجه به شکل ۳۰ سیر تکامل منحنی نسبت سختی در تک لایه ماسه طی ۱۰ چرخه اول بارگذاری یکسان است و در نهایت به طور متوسط از ۲۰ تا ۵۰ درصد افزایش در سختی را نشان می‌دهد. در حالت ماسه بر روی رس، مطابق شکل ۳۱ الف) در آزمایش‌های بارگذاری یک‌طرفه $\xi_c \geq 0$ با

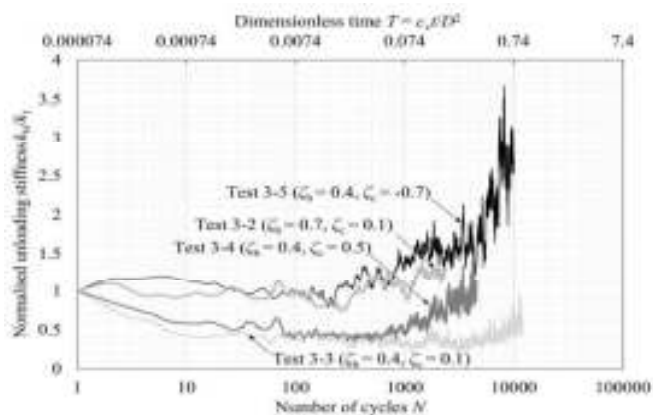
یافته است و لذا در آن نقطه یک ثبات در چرخش و افزایش در سختی مشاهده می‌شود. مقایسه با تست‌های گرانج I_g در شکل ۳۱ (ب) نشان می‌دهد که افزایش سختی در بلند مدت مقداری متوسط بوده و پایدارتر است. این اختلاف ممکن است به دلیل اثرات تنش ناشی از وزن خود خاک و یا به دلیل تأثیرات دینامیکی سیستم باشد.

۳-۵ با نرخ بیشتری افزایش یافته، به طوری که در چرخه ۱۰۰۰۰ به ۲/۷۵ می‌رسد. نقطه‌ای که در آن سختی شروع به افزایش می‌کند (یعنی حدود چرخه ۲۰۰ ام)، به نظر می‌رسد با نقطه‌ای که فشار حفره‌ای در آن نقطه شروع به کاهش می‌کند، یکسان باشد (مراجعه به شکل ۲۹). افزایش سریعتر در سختی در چرخه ۵۰۰۰ ام در تست ۳-۵، منطبق بر نقطه‌ای است که فشار حفره‌ای تقریباً به طور کامل استهلاک

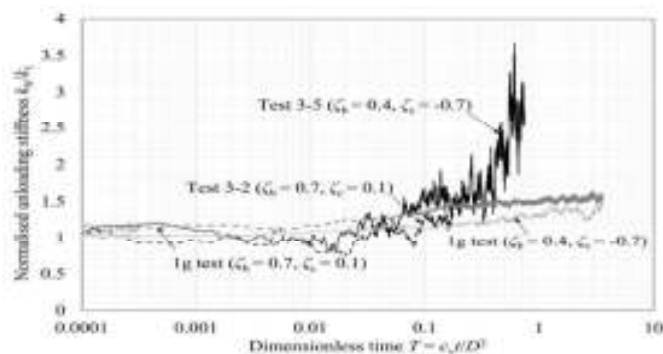


شکل ۳۰. تغییر سختی با تعداد چرخه در ماسه ($\zeta_b=0.4, \zeta_c=0.1$)

با مایع‌های منفذی مختلف و شرایط نصب متفاوت (Zhu et al., 2018b)



(الف)



(ب)

شکل ۳۱. تغییر سختی با تعداد چرخه در لایه ماسه بر روی رس (الف) با تغییر اندازه و تقارن بار تناوبی ماسه (ζ_b, ζ_c)

(ب) مقایسه با نتایج بلند مدت گزارش شده در مطالعه (Zhu et al., 2018a)

۴- نتیجه گیری

می‌باشد و این موضوع به افزایش مقاومت ناشی از تحکیم رس نسبت داده می‌شود که در نهایت باعث تثبیت چرخش در بستر رسی می‌شود. تأثیر تقارن بار برای یک بستر لایه‌ای بررسی گردید و علیرغم برخی مطالعات قبلی در ماسه که نشان دادند بارگذاری جزئی دو طرفه بیشترین پاسخ را به دنبال دارد، این نتایج نشان دادند که بحرانی‌ترین بارگذاری، بارگذاری یک طرفه است. مشخص گردید که چرخش کیسون برحسب تعداد چرخه را می‌توان با استفاده از یک رابطه انرژی ساده پیش بینی نمود. پس از یک میلیون چرخه بارهای متوسط، این مقدار برای یک بستر ساده رس و ماسه به ترتیب $\frac{2}{4}$ و $\frac{7}{2}$ برابر چرخش در چرخه اول به دست آمدند و مقادیر چرخش کیسون در بستر لایه‌ای (ماسه بر روی رس) نیز در فاصله بین این دو مقدار عددی قرار گرفتند. این محدوده می‌تواند در ارزیابی چرخش احتمالی سازه مستقر بر روی کیسون راهگشا باشد. بارگذاری تناوبی می‌تواند باعث افزایش ظرفیت تا 30% و سختی پایه تا 50% شود. این تغییرات به تراکم ماسه و افزایش مقاومت ناشی از تحکیم رس نسبت داده می‌شود. انتظار می‌رود که این تغییر سختی، فرکانس طبیعی سیستم را تغییر دهد (به خصوص هنگامی که فرکانس طبیعی اولیه سیستم بسیار کوچکتر باشد) لذا لازم است در طراحی‌ها و در بررسی رخداد تشدید در نظر گرفته شود.

مشخص گردید که اندازه‌گیری‌های دقیق سائتریفوز پس از نصب را می‌توان با نتایج حاصل از آزمایش‌های مدل Ig در تعداد چرخه‌های بسیار بیشتر (برای پیش بینی رفتار بلند مدت یک کیسون مکشی تحت بارگذاری تناوبی جانبی) ترکیب کرده و چرخش تجمعی کیسون را براساس یک روش محاسبه ساده در بررسی‌ها لحاظ نمود. استفاده از این روش محاسبه نشان داد که زاویه چرخش بلند مدت کیسون برای بارگذاری تناوبی یک‌طرفه در حالت ماسه بر روی رس، نسبت به یک بستر ماسه‌ای بیشتر است. نتیجه مهم دیگر این است که در همه این مطالعات بار چرخه‌ای به طور یک جهته اعمال گردیده است و لذا اعتبار این نتایج باید در شرایط تغییر جهت بار با توجه به تغییر جهت باد و امواج، بررسی شود.

در مقاله حاضر با بررسی و جمع بندی مطالعات موجود صورت پذیرفته اخیر، به بررسی رفتار کیسون‌های مکشی تکی تحت بارگذاری تناوبی جانبی در بستر ساده (ماسه تک لایه، رس تک لایه) و بستر لایه‌ای (ماسه بر روی رس) پرداخته شده است. در این مقاله با تمرکز بر مطالعات آزمایشگاهی موجود، نخست این مطالعات بر اساس تعداد چرخه بارگذاری در سه گروه طبقه‌بندی شدند و سپس نتایج اصلی هر گروه از مطالعات بیان گردید. گروه سوم مطالعات، با اعمال تعداد چرخه بار بسیار بیشتر نسبت به گروه‌های اول و دوم انجام شده است که این تعداد چرخه بارگذاری تناسب بیشتری با شرایط واقعی دارد و در این مقاله با تفصیل بیشتری بیان گردیده است. پژوهشگران در مطالعات گروه‌های اول و دوم، به عنوان یک نتیجه و رویکرد مشترک بیان نمودند که تعداد نسبتاً کم چرخه‌های بارگذاری یکی از ضعف‌های این مطالعات بوده و لذا برای تأیید صحت نتیجه‌گیری‌ها، به تعداد بیشتری چرخه بارگذاری و همچنین مقیاس بزرگتر احتیاج است. در گروه سوم مطالعات از تست‌های مدل Ig (با تعداد چرخه بالا حدود 1000000 چرخه) و سپس از آزمایش‌های مدل سائتریفوز به عنوان مکمل نتایج Ig بهره گرفته شده است. تمرکز مطالعات موجود در سه رویکرد اصلی زیر می‌باشد:

- چرخش کیسون: که به یک مقدار معین محدود می‌گردد.
- سختی فونداسیون: تغییر سختی در حالت حدی خستگی و تأثیر آن بر فرکانس طبیعی سیستم، باید مورد توجه و بررسی قرار گیرد.

- ظرفیت باربری جانبی: که در حالت حدی نهایی باید مورد توجه باشد.

آزمایش‌های مدل Ig در تک لایه ماسه، تک لایه رس و ماسه بر روی رس انجام شده که هر آزمایش به طور معمول شامل ۱ میلیون چرخه بار جانبی می‌باشد. با توجه به نتایج به دست آمده، چرخش کیسون در بسترهای لایه‌ای وقتی که ضخامت ماسه حداقل برابر با طول دامن کیسون است، شبیه به تک لایه ماسه می‌باشد. همچنین چرخش در رس زیرین با کاهش ضخامت ماسه، کاهش می‌یابد. مقدار چرخش در بستر ساده رسی و متناسب با عمق نفوذ دامن، کوچکتر

-Cox, J. A., O'Loughlin, C. D., Cassidy, M., Bhattacharya, S., Gaudin, C. & Bienen, B., (2014), "Centrifuge study on the cyclic performance of caissons in sand", *International Journal of Physical Modelling in Geotechnics* 14(4), pp.99-115.

-Chow, S. H., O'Loughlin, C. D., Corti, R., Gaudin, C. & Diambra, A., (2015), "Drained cyclic capacity of plate anchors in dense sand: experimental and theoretical observations", *Géotechnique Letters* 5(2), pp.80-85.

-De Ruiter, J. & Fox, D. A. (1975) Site investigations for North Sea forties field. Proceedings of the 7th Annual Offshore Technology Conference (OTC). Houston, Texas, OCT 2246, pp. 25-30.

-DNV, (2016), "Support structures for wind turbines", Offshore standard (DNVGL-ST-0126). Oslo, Norway: DNV.

-DNV (Det Norske Veritas) (2013), "DNV-OS-J101: Design of offshore wind turbine structures", Offshore standard. Oslo, Norway: DNV.

-Foglia, A., Ibsen, L. B., Nicolai, G. & Andersen, L. V., (2014), "Observations on bucket foundations under cyclic loading in dense saturated sand In Proceedings of the 8th International Conference of Physical Modelling in Geotechnics(ICPMG) (Gaudin, C. & White, D. J. (eds))", Leiden, the Netherlands: CRC Press/Balkema (Taylor & Francis Group), pp. 667-673.

-Foglia, A. & Ibsen, L. B., (2016), "Monopod bucket foundations under cyclic lateral loading", *Int. J. Offshore Polar Engng* 26, No. 2, pp.109-115.

-Forewind (2011), "Dogger Bank zonal characterization" Reading, UK: Forewind. See [http://www.forewind.co.uk/uploads/files/Zonal%20characterisation%20document%20\(second%20version\).pdf](http://www.forewind.co.uk/uploads/files/Zonal%20characterisation%20document%20(second%20version).pdf) (accessed 08/11/2017).

-Forewind (2013), "Environmental statement chapter 12 appendix A – GEMS geophysical survey report", Reading, UK: Forewind. See http://www.forewind.co.uk/uploads/files/Creyke_Beck/Phase_2_Consultation/Chapter_12_Appendix_A_-_GEMS_Survey_Report.pdf (accessed 08/11/2017).

-Fu, D., Gaudin, C., Tian, C., Bienen, B. & Cassidy, M. J., (2015), "Effects of preloading with consolidation on undrained bearing capacity of skirted circular footings. *Géotechnique* 65, No. 3, pp.231-246.

<https://doi.org/10.1680/geot.14.P.2120>.

-Gourvenec, S. & Randolph, M. F., (2010), "Consolidation beneath circular skirted foundations", *Int. J. Geomech.* 10, No. 1, pp.22-29.

-Houlsby, G. T., Kelly, R. B., Huxtable, J. & Byrne, B. W., (2005), "Field trials of suction caissons in clay for offshore wind turbine

۵- پی نوشت ها

1. Thornton Bank
2. Layered Seabed
3. Dogger Bank
4. Monopod
5. Accumulated Rotation
6. Monotonic
7. Normalized
8. Luce Bay
9. Bucket Foundation
10. Power Relationship
11. Interface
12. North Sea Seabeds
13. Feild
14. Ultimate Moment Capacity
15. Peak

۶- مراجع

-Abadie, C. N., Byrne, B. W. & Levy-Paing, S. (2015), "Model pile response to multi-amplitude cyclic lateral loading in cohesionless soils", In Proceedings of the 3rd International Symposium on Frontiers in Offshore Geotechnics (ISFOG) (Meyer, V. (ed)). Leiden, the Netherlands: CRC Press/Balkema (Taylor & Francis Group), pp. 681-686.

-Bhattacharya, S., (2014), "Challenges in design of foundations for offshore wind turbines", *Engineering & Technology Reference*. Stevenage, UK: Institution of Engineering and Technology (IET).

-Bhattacharya, S., Nikitas, N., Garnsey, J., Alexander, N. A., Cox, J., Lombardi, D., Wood, D. M. & Nash, D. F. T., (2013), "Observed dynamic soil-structure interaction in scale testing of offshore wind turbine foundations.", *Soil Dynamics Earthquake Engng* 54, pp.47-60.

-Bienen, B., O'Loughlin, C. D & Zhu, F. Y. (2017), "Physical modelling of suction bucket installation and response under long-term cyclic loading", *Proceedings of 8th Offshore Site Investigation & Geotechnics International Conference (OSIG 2017)*, Kensington, London, pp. 524-531.

Byrne, B. W., (2014), "Laboratory scale modelling for offshore geotechnical problems", In Proceeding of the 8th international conference on physical modelling in geotechnics (ICPMG) (eds C.GaudinandD.J.White), pp.61-75.

-Leiden, the Netherlands: CRC Press/Balkema (Taylor & Francis Group).

-Byrne, B. W. & Houlsby, G. T. (2004), "Experimental investigations of the response of suction caissons to transient combined loading", *J. Geotech. Geoenviron. Engng* 130, No. 3, pp.240-253.

- Watson, P. G. & Randolph, M. F. (2006), "A centrifuge study into cyclic loading of caisson foundations. Proceedings of the international conference physical modelling in geotechnics, Hong Kong, PR China, pp. 4–6.
- Zhu, B., Byrne, B. W. & Houlsby, G. T., (2013), "Long-term lateral cyclic response of suction caisson foundations in sand", *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering* 139(1), pp.73-83.
- Zhu, F. Y., O'Loughlin, C., Bienen, B., Cassidy, M. J., & Morgan, N., (2018a), "The response of suction caissons to long-term lateral cyclic loading in single-layer and layered seabeds", *Geotechnique*, 68 (8), pp.729-741.
- Zhu, F. Y., (2018), "Suction caisson foundations for offshore wind energy installations in layered soils", PhD thesis, The University of Western Australia, Crawley, Perth, Australia.
- Zhu, F. Y., Bienen, B., O'Loughlin, C., Cassidy, M. J., and Morgan, N., (2018b), "Suction caisson foundations for offshore wind energy: cyclic response in sand and sand over clay", Accepted manuscript doi: 10.1680/jgeot.17.pp.273. Published online in 'accepted manuscript.
- foundations" *Géotechnique* 55, No. 4, pp.287–296.
<https://doi.org/10.1680/geot.2005.55.4.287>.
- Houlsby, G. T., Kelly, R. B., Huxtable, J. & Byrne, B. W., (2006), "Field trials of suction caissons in sand for offshore wind turbine foundations", *Géotechnique* 56, No. 1, pp.3–10.
<https://doi.org/10.1680/geot.2006.56.1.3>.
- Ibsen, L. B. & Brincker, R., (2004), "Design of a new foundation for offshore wind turbines", Proceedings of the 22nd international modal analysis conference (IMAC), Detroit, MI, USA.
- Kelly, R. B., Houlsby, G. T. & Byrne, B. W., (2006), "A comparison of field and laboratory tests of caisson foundations in sand and clay. *Géotechnique* 56, No. 9, pp.617–626.
<https://doi.org/10.1680/geot.2006.56.9.617>.
- LeBlanc, C., Houlsby, G. T. & Byrne, B. W. (2010), "Response of stiff piles in sand to longterm cyclic lateral loading. *Géotechnique* 60(2), pp.70-90.
- Richardson, M. D., O'Loughlin, C. D., Randolph, M. F. & Gaudin, C., (2009), "Setup following installation of dynamic anchors in normally consolidated clay. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering* 135(4), pp.487-496.
- Schroeder, E. C., Merritt, A. S., Sørensen, K. W., Muir Wood, A., Thilsted, C. L. & Potts, D. M. (2015). Predicting monopile behaviour for the Gode Wind offshore wind farm. In Proceedings of the 3rd international symposium on frontiers in offshore geotechnics (ISFOG) (ed. V. Meyer), pp. 735–740.

Long-Term Lateral Cyclic Response of Suction Caisson Foundations

Babak Ebrahimiyan, Assistant Professor, Geotechnical Engineering Department, Faculty of Civil, Water and Environmental Engineering, Shahid Beheshti University (SBU), Tehran, Iran.

Seyed Mohammad Mansoorzadeh, Instructor, Housing & Urban Development Research Center, Tehran, Iran.

E-mail: b_ebrahimiyan@sbu.ac.ir

Received: March 2021-Accepted: July 2021

ABSTRACT

Suction caissons are commonly used in offshore projects such as oil and gas rigs, wind turbines, and berth elements. Suction caissons as the foundation of marine structures are usually exposed to the lateral cyclic forces of wind, waves and the impact of ships. Most existing studies on lateral cyclic loads on suction caissons involve limited number of load cycles. And the soil environment is composed of a single layer. whereas offshore structures will generally experience millions of loading cycles over their service life. Seabed soils can also contain different layers. In this article, after reviewing the results of research on lateral loading of suction caissons with a limited number of cycles, the results of recent studies with a very large number of loading cycles of about 1 million cycles are presented. Also, the long-term behavior of suction caissons to lateral cyclic loading in single-layer and layered seabed are reviewed. Based on the summary of the results of existing studies, it seems that lateral cyclic loading can even in some cases increase the caisson capacity by up to 30% and stiffness by up to 50%. This change in stiffness must be taken into account in changing the natural frequency of the system or investigating the possible occurrence of the resonance phenomenon.

Keywords: Suction Caisson, Cyclic Lateral Loading, Offshore Engineering, Stiffness, Accumulated Rotation