بررسی تأثیر مشخصات بار جانبی بر رفتار مونوپایل با استفاده از مدل‌سازی فیزیکی

مهدی شهیدی‌خواه[۱*]، مجید مرادی[۲]، علیرضا خمسه[۳]

[۱] دانشجوی دکتری ژئوتکنیک، دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه تهران؛ shahidi_civil@ut.ac.ir
[۲] دانشیار دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه تهران؛ mmoradi@ut.ac.ir
[۳] کارشناس ارشد ژئوتکنیک، دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه تهران؛ alireza.kms71@gmail.com

اطلاعات مقاله

تاریخچه مقاله:
تاریخ دریافت مقاله: ۱۳۹۸/۰۱/۲۵
تاریخ پذیرش مقاله: ۱۳۹۸/۰۵/۲۰

کلمات کلیدی:
مونوپایل
مدل‌سازی فیزیکی
بارگذاری جانبی سیکلیک
سانتریفیوژ ژئوتکنیکی

چکیده

مونوپایل پرکاربردترین نوع فونداسیون برای انتقال بار توربین‌های بادی فراساحلی به زمین است. در بیش از ۸۰ درصد توربین‌های فراساحلی از مونوپایل استفاده شده است. یک مونوپایل در طول دوره بهره‌برداری تحت تأثیر میلیون‌ها سیکل بارگذاری جانبی قرار می‌گیرد که باعث ایجاد دوران و تغییر شکل جانبی در آن می‌شود. این دوران و تغییر شکل ایجاد شده در مونوپایل، تابع عواملی چون مشخصات خاک، مشخصات شمع و خصوصیات بار وارد بر آن است. روش‌های طراحی موجود، برای شمع‌های تحت بار جانبی با قطر کمتر از ۱ متر قابل استفاده هستند. با توجه به این‌که مونوپایل‌ها لوله‌های فلزی توخالی با قطر حدودی ۲ الی ۸ متر هستند، در این پژوهش با استفاده از مدل‌سازی فیزیکی در فضای سانتریفیوژ ژئوتکنیکی (Ng)، رفتار آنها در خاک ماسه‌ای تحت اثر بار جانبی مونوتونیک و سیکلیک مورد مطالعه قرار گرفته است. به‌منظور بررسی نحوه تأثیر خصوصیات بار جانبی وارده، ۱ آزمایش با بار مونوتونیک و ۶ آزمایش با بارهای سیکلیک طراحی و اجرا شده و تأثیر پارامترهای مختلف بارگذاری بر روی جابجایی تجمعی، تغییر شکل و سختی خاک مورد بررسی قرار گرفته است. در تمام آزمایش‌ها تغییر مکان مونوپایل به‌صورت جسم صلب بوده و جابجایی تجمعی حداکثر سر شمع بر حسب تعداد سیکل با دقت بسیار خوبی از یک روند توانی پیروی می‌کند. همچنین روند تغییرات سختی بر حسب تعداد سیکل به‌صورت افزایشی بوده و آهنگ این افزایش به‌صورت کاهشی است.

The Effect of Lateral Loading Parameters on Monopile Behavior Based on Physical Modeling

Mahdi Shahidikhah[1*], Majid Moradi[2], Alireza Khamseh[3]

[1] PhD Candidate, School of Civil Engineering, College of Engineering, University of Tehran, shahidi_civil@ut.ac.ir
[2] Associate Professor, School of Civil Engineering, College of Engineering, University of Tehran, mmoradi@ut.ac.ir
[3] MSc, School of Civil Engineering, College of Engineering, University of Tehran, alireza.kms71@gmail.com

ARTICLE INFO

Article History:
Received: 14 Apr. 2019
Accepted: 11 Aug. 2019

Keywords:
Monopile
Physical Modeling
Cyclic Lateral Loading
Geotechnical Centrifuge

ABSTRACT

Monopiles are the most common type of foundation for offshore wind turbines (OWT). Monopiles have been used in more than 80% of the offshore wind turbines. A monopile will be affected by millions of lateral load cycles during the operating period, which will cause its rotation and lateral deformation. The rotation and the deformation are dependent on the soil properties, monopile specification, and lateral loading characteristics. Current methods are only for the design of piles with less than 1meter in diameter. Due to this fact that monopiles are hollow cylindrical steel tubes with a diameter of 2 to 8 meters, in this research the behavior of these structures due to monotonic and cyclic lateral loads in sandy soils has been studied by physical modeling in a geotechnical centrifuge. One monotonic test and six cyclic tests were designed and implemented to investigate the effect of lateral load characteristics. According to the results of 7 tests, the effect of different loading parameters on monopile cumulative displacement and soil stiffness is discussed.
In all tests, the monopile deflection is a rigid body, and the cumulative displacement of the monopile head is increasing with power functions. Also, the monopile stiffness in terms of the number of cycles is ascending, and the rate of the increase is decreasing.

[Downloaded from marine-eng.ir on 2026-11-02]
[DOR: 20.1001.1.17357608.1398.15.29.16.4]

۱ - مقدمه

امروزه استفاده از انرژی باد در مناطق فراساحلی به‌منظور تولید الکتریسیته بسیار متداول شده و تعداد قابل توجهی از مزارع بادی فراساحلی در سراسر دنیا در دست احداث است. یکی از مهم‌ترین مسائل در مورد توربین‌های بادی فراساحلی طراحی و ساخت فونداسیون اقتصادی برای آنها است. فونداسیون بیش از ۸۰ درصد توربین‌های بادی فراساحلی اجرا شده تاکنون، مونوپایل است [۱]. مونوپایل لوله‌ای فلزی با قطر بزرگ در حدود ۲ الی ۸ متر است که ۴ الی ۶ برابر قطر درون بستر خاک دریا فرو می‌رود و بخش دیگر آن بیرون از خاک است. این نوع شمع‌ها معمولاً در خاک ماسه‌ای و با عمق آب حدود ۵ الی ۳۰ متر مورد استفاده قرار می‌گیرند. نیروی جانبی وارد شده به مونوپایل‌ها بیشتر از نیروی قائم بوده و ملاک طراحی است. مونوپایل‌ها به‌علت بزرگ بودن قطر قابلیت جذب انرژی بالایی دارند. شکل ۱ تصویری از یک مونوپایل ساخته شده در کشور آلمان را نشان می‌دهد.



شکل۱- نمونه مونوپایل ساخته شده با قطر ۷/۸ متر در مزرعه بادی وجامیت[۱] (آلمان) [۲]

طبق مطالعات فن و لانگ [۳] برای طراحی شمع‌ها تحت بار جانبی در شرایطی که بار قائم ناشی از وزن سازه در مقایسه با بارهای جانبی ناچیز است سه روش وجود دارد:

۱-روش حدی[۲]، به‌عنوان مثال روش الاستیسیته [۴]

۲-روش‌های اجزا محدود[۳] و تفاضل محدود[۴]

۳-روش عکس‌العمل بستر[۵].

در حال حاضر روش عکس‌العمل بستر به‌دلیل سادگی و دقت قابل قبول، رایج‌ترین روش طراحی است. این روش دارای معایبی از جمله در نظر گرفتن رفتار خطی به‌جای غیرخطی بین خاک و شمع، مدل کردن خاک به‌صورت فنرهای غیرپیوسته برخلاف واقعیت که خاک پیوسته عمل می‌کند و اشاره غیرمستقیم به هندسه شمع است. روش p-y یک روش توسعه‌یافته بر مبنای عکس‌العمل بستر است که رابطه غیرخطی بین مقاومت جانبی p و جابجایی y در نظر می‌گیرد. آئین‌نامه‌های API[۶] و DNV[۷] [۵ و ۶] منحنی های p-y را برای خاک‌های مختلف ارائه می‌کنند. این منحنی‌ها بر اساس نتایج آزمایش‌هایی بر روی شمع‌هایی با قطر کمتر از ۱ متر به‌دست آمده‌اند[۷]. این منحنی‌ها با اعمال ضرایب کاهنده بر روی ظرفیت استاتیکی خاک سعی در پیش‌بینی رفتار سیکلیک شمع دارند. محققان زیادی اثرات بارگذاری سیکلیک را بررسی کرده‌اند.

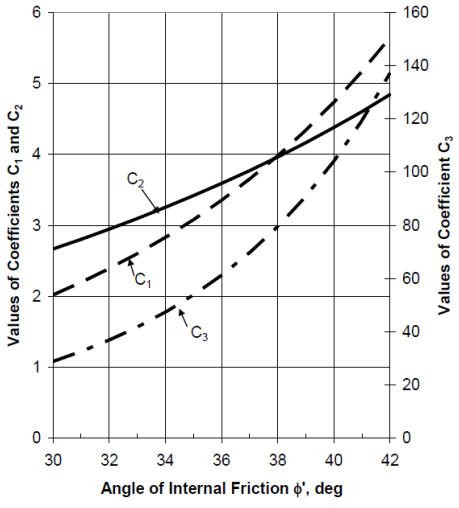
به‌طور کلی در حالت بارگذاری جانبی شمع‌های آزاد، با توجه به نسبت لاغری شمع (نسبت طول به قطر) دو مکانیزم گسیختگی محتمل است. برای شمع‌های کوتاه گسیختگی زمانی رخ می‌دهد که از ظرفیت خارجی شمع تجاوز شود، به‌عنوان مثال وقتی که فشار جانبی خاک اطراف شمع به‌مقدار نهایی خود برسد، شمع حول یک نقطه مشخص نزدیک انتها شروع به دوران می‌کند. برخلاف آن در شمع‌های لاغر، گسیختگی زمانی رخ می‌دهد که مفصل پلاستیک در نقطه مشخصی شکل گیرد و قسمتی از سازه شمع به مقاومت نهایی خود برسد. مونوپایل‌ها در دسته شمع‌های کوتاه قرار می‌گیرند. آیین‌نامه‌های عملیات دریایی (مانند API و DNV) روابط ساده شده‌ای را برای در نظر گرفتن این دو مکانیزم گسیختگی ارائه داده‌اند. این مکانیزم‌ها در آیین‌نامه API مطابق روابط (۱) الی (۳) معرفی شده است [۵].

$$P_{U-Shallow} = (C_1 z + C_2 D)\gamma z \qquad (۱)$$

$$P_{U-Deep} = C_3 \gamma z D \qquad (۲)$$

$$P_U(z) = min\{P_{U_{Shallow}} \text{ و } P_{U_{Deep}}\} \qquad (۳)$$

در این روابط P_U مقاومت نهایی بر واحد طول شمع، $P_{U\text{-}Shallow}$مقاومت نهایی بر اساس مکانیزم گسیختگی سطحی، $P_{U\text{-}Deep}$ مقاومت نهایی بر اساس مکانیزم گسیختگی عمیق، γ وزن مخصوص مؤثر خاک، z عمق و D قطر شمع هستند. همچنین C_1، C_2 و C_3 ضرایب تابع زاویه اصطکاک داخلی خاک (φ') هستند و با توجه به شکل ۲ محاسبه می‌شوند.



شکل ۲- مقادیر C_1، C_2 و C_3 بر حسب زاویه اصطکاک داخلی [۵]

[Downloaded from marine-eng.ir on 2026-11-02]

[DOR: 20.1001.1.17357608.1398.15.29.16.4]

روابط (۱) الی (۳) تخمین اولیه‌ای از ظرفیت باربری شمع‌ها تحت بارگذاری جانبی ارائه می‌دهند.

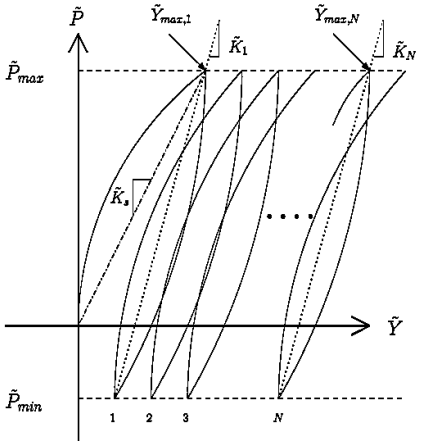
روند تغییرات جابجایی تجمعی مونوپایل‌ها بر حسب تعداد سیکل توسط محققان زیادی مورد بررسی قرارگرفته و همچنان جزئیات این روند تحت بارگذاری‌های مختلف مبهم است. در این پژوهش به‌کمک مدل‌سازی فیزیکی سانتریفیوژ رفتار مونوپایل‌ها در خاک ماسه‌ای تحت اثر بار جانبی سیکلیک مورد بررسی قرار گرفته است.

۲ – مرور مطالعات گذشته

در ادبیات فنی، شمع‌ها به دو دسته کوتاه یا صلب و بلند یا انعطاف‌پذیر تقسیم‌بندی می‌شوند. نسبت طول به قطر شمع معمولاً نشان‌دهنده کوتاه یا بلند بودن آن است. هرچه این نسبت کمتر باشد، رفتار شمع صلب‌تر است. مونوپایل‌ها معمولاً در دسته شمع‌های صلب قرار می‌گیرند.

۲-۱- مطالعات کلینکورت [۸]

کلینکورت با استفاده از دستگاه سانتریفیوژ رفتار شمع‌ها با لاغری ۶ (L/D=6) را در خاک ماسه‌ای متراکم در دو حالت اشباع و خشک بررسی کرد. شایان ذکر است آزمایش‌های انجام شده در پژوهش حاضر از لحاظ نوع بارگذاری به آزمایش‌های کلینکورت شباهت‌های زیادی دارد. شکل ۳ تغییر شکل جانبی شمع را تحت اثر بار جانبی سیکلیک دوطرفه ارائه می‌دهد.



شکل ۳- تغییر شکل جانبی شمع تحت اثر بار جانبی سیکلیک [۸]

در این آزمایش‌ها شمع‌ها تحت ۵۰۰ سیکل با فرکانس بار و وزن مخصوص خاک مشابه قرار گرفته و رابطه (۴) برای تغییر مکان جانبی شمع ارائه شده است:

$$Y_{max_n} = Y_{max_1} \times N^{\alpha} \qquad (۴)$$

که توان α به دو پارامتر بارگذاری ζ_b و ζ_c بستگی دارد و طبق روابط (۵) الی (۷) تعریف می‌شود:

$$\alpha(\zeta_c.\zeta_b) = T_c(\zeta_c) \times T_b(\zeta_b) \qquad (۵)$$

$$\zeta_b = \frac{P_{max}}{P_u} \qquad (۶)$$

$$\zeta_c = \frac{P_{min}}{P_{max}} \qquad (۷)$$

که P_u ظرفیت نهایی باربری جانبی، تحت بارگذاری استاتیکی اعمالی به سر شمع بوده و P_{max} و P_{min} بار حداکثر و حداقلی هستند که در هر سیکل بارگذاری به شمع وارد می‌شود. در این مطالعه با تعریف کمیت‌های بی‌بعد $\tilde{Y}$ و $\tilde{P}$ امکان مقایسه نتایج فراهم شده است.

$$\tilde{Y} = \frac{Y}{D} \qquad (۸)$$

$$\tilde{P} = \frac{H}{\gamma' D^3} \qquad (۹)$$

که در این روابط γ' چگالی مؤثر خاک، H نیروی افقی، Y جابجایی سر شمع و D قطر شمع هستند.

تغییرات سختی سکانت مطابق رابطه (۱۰) به‌صورت تابع لگاریتمی تعریف شده است.

$$K_N = K_1(1 + \kappa\, ln(N)) \qquad (۱۰)$$

κ نرخ تجمعی سختی، K_1 سختی سکانت سیکل اول و K_N سختی سکانت سیکل Nام هستند. κ مطابق رابطه (۱۱) به‌صورت حاصل‌ضرب دو تابع مستقل در نظر گرفته شده است.

$$\kappa(\zeta_c.\zeta_b) = \kappa_C(\zeta_c)\kappa_b(\zeta_b) \qquad (۱۱)$$

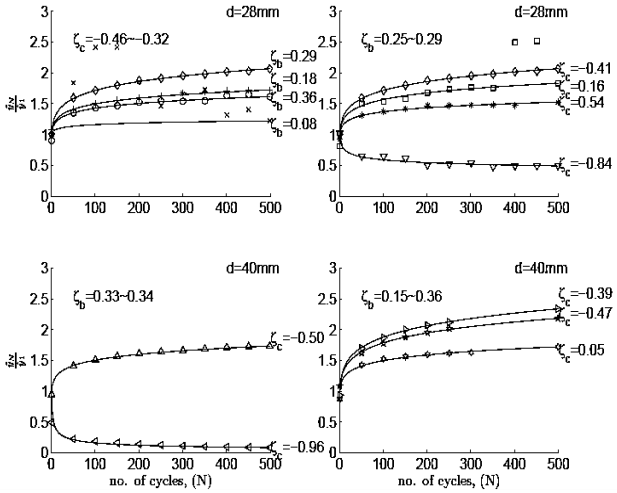
توابع $\kappa_C(\zeta_c)$ و $\kappa_b(\zeta_b)$ در رابطه (۱۱) به‌کمک تعدادی آزمایش سیکلیک تعیین می‌گردند.

طبق این توابع ضریب α (رابطه (۵)) زمانی ماکزیمم است که $-0.4 \le \zeta_c \le 0$ باشد و این بدان معناست که در این حالت، مقدار تغییر مکان ماکزیمم است. همچنین هنگامی که بار از حالت یک‌طرفه به‌حالت دوطرفه تغییر می‌کند انباشتگی سختی سکانت افزایش پیدا می‌کند.

طبق مشاهدات کلینکورت در سانتریفیوژ مشخص شد بیشترین خرابی در بارگذاری یک‌طرفه اتفاق می‌افتد. در شکل ۴ نتایج آزمایش‌های کلینکورت در خصوص تغییرات جابجایی تجمعی ارائه شده‌است. در این شکل محور افقی تعداد سیکل و محور قائم نسبت تغییر مکان میانگین سیکل Nام به تغییر مکان میانگین سیکل اول است.

[Downloaded from marine-eng.ir on 2026-11-02]

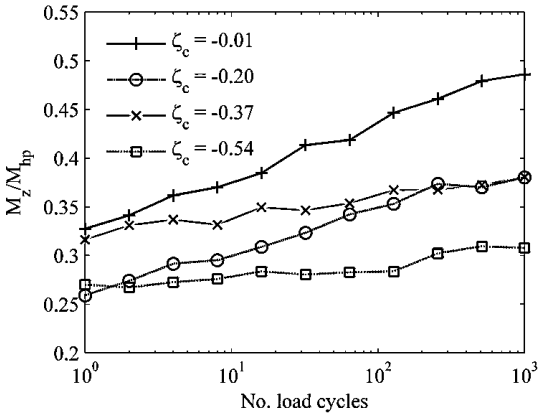
[DOR: 20.1001.1.17357608.1398.15.29.16.4]



شکل ۴- نمودار جابجایی تجمعی در آزمایش‌های کلینکورت[۸]

۲-۲- مطالعات کرکوود و هی [۹]

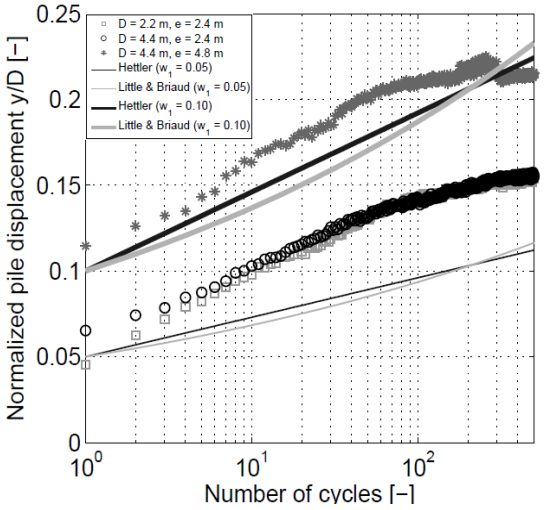
کرکوود و هی چهار آزمایش بر روی مونوپایل با قطر ۴/۵ متر تحت بار جانبی سیکلیک با استفاده از سانتریفیوژ در شتاب $100g$ انجام دادند. در این مطالعه طول شمع ۵۰ متر، عمق آزاد ۳۰ متر و عمق مدفون ۲۰ متر بوده است. در هر آزمایش ۱۰۰۰ سیکل بار افقی به شمع اعمال شد. خاک مورد آزمایش ماسه خشک با دانسیته نسبی ۶۲٪ بوده است. در این مطالعات مشاهده شده که سختی اطراف شمع تغییر می‌کند که این تغییر سختی باعث افزایش جابجایی و دوران سر شمع می‌شود. هرچه نسبت نیروی حداقل به نیروی حداکثر به‌سمت ۱- میل کند و بارگذاری به‌سمت حالت دوطرفه متقارن پیش رود جابجایی تجمعی شمع معکوس شده و شمع به‌حالت اولیه خود برمی‌گردد. طبق مشاهدات صورت گرفته بیشترین جابجایی تجمعی در بارگذاری دوطرفه با $\zeta_c = -0.37$ مشاهده شد. در شکل ۵ مقادیر لنگر به‌دست آمده بر حسب تعداد سیکل در عمق مشخص تحت بارگذاری‌های مختلف نشان داده‌شده‌است.



شکل ۵- مقایسه مقدار لنگر تحت بارگذاری‌های مختلف [۹]

۲-۳- مطالعات آلدرلیست [۱۰]

آلدرلیست برای بررسی اثرات تغییر قطر و طول آزاد بر ظرفیت باربری جانبی مونوپایل با استفاده از سانتریفیوژ دانشگاه دلفت هلند، مدل‌سازی مونوپایل را تحت بار جانبی و در خاک ماسه‌ای با دانسیته نسبی ۶۰٪ انجام داد. قطر شمع‌های آزمایش شده ۲/۲ و ۴/۴ متر بوده و در کلیه آزمایش‌ها نسبت عمق مدفون به قطر شمع ثابت است. دامنه بارگذاری آزمایش‌های سیکلیک بر اساس ۳۰٪ ظرفیت نهایی استاتیکی شمع تعریف شده است. در این مطالعه ظرفیت باربری جانبی مونوپایل، روند جابجایی تجمعی سر شمع و تغییرات سختی جانبی مونوپایل مورد بررسی قرار گرفته است. طبق نتایج افزایش قطر شمع باعث افزایش ظرفیت جانبی استاتیکی می‌گردد. همچنین سختی سکانت و سختی مماسی در بارگذاری سیکلیک با ازدیاد قطر شمع افزایش می یابد. شکل ۶ نمودار جابجایی تجمعی را در آزمایش‌های آلدرلیست ارائه می‌دهد.



شکل ۶- نمودار جابجایی تجمعی در آزمایش‌های آلدرلیست [۱۰]

۲-۴- مطالعات شیرزاده [۱۱]

شیرزاده با استفاده از دستگاه سانتریفیوژ دانشگاه تهران رفتار مونوپایلی با قطر واقعی ۲/۰۴ متر را تحت اثر بار جانبی مونوتونیک مدل‌سازی و مطالعه نمود.

اثر طول آزاد و نیز عمق مدفون شمع بر ظرفیت باربری جانبی با انجام ۵ آزمایش بررسی شد. از نتایج به‌دست‌آمده در این مطالعه می‌توان به موارد زیر اشاره نمود:

- رفتار شمع به‌صورت شمع کوتاه صلب است.
- طبق منحنی‌های p-y موجود در آئین‌نامه API مدول عکس‌العمل اولیه بستر ۲۳ برابر مقدار به‌دست آمده در آزمایش‌ها بوده که این به‌معنای محافظه‌کارانه بودن منحنی‌های API است.
- با افزایش عمق مدفون باربری جانبی شمع افزایش می‌یابد که این افزایش به‌صورت غیرخطی است.

[Downloaded from marine-eng.ir on 2026-11-02]

[DOR: 20.1001.1.17357608.1398.15.29.16.4]

- لنگر حداکثر در یک‌سوم بالایی عمق مدفون خاک رخ می‌دهد.

۲-۵- مطالعات جمهری [۱۲]

جمهری در ادامه مطالعات شیرزاده، رفتار مونوپایل را تحت اثر بارگذاری سیکلیک با سیستم بارگذاری جابجایی-کنترل مورد مطالعه قرار داد. او یک آزمایش مونوتونیک و چهار آزمایش سیکلیک بر روی مونوپایلی با قطر واقعی ۲/۰۴ متر انجام داده و تغییرات نیرو و سختی سکانت را در چهار آزمایش با بارگذاری‌های مختلف مورد بررسی قرار داده و نتایج زیر را ارائه کرده است:

- روند تغییرات سختی سکانت به دامنه و نوع بارگذاری وابسته است ولی از نتایج آزمایش‌ها نتیجه کلی نمی‌توان گرفت. با توجه به آزمایش‌های انجام شده، کاهشی بودن نرخ تغییرات سختی در بارگذاری سیکلیک یک‌طرفه مشخص است. بارگذاری دوطرفه نیاز به مطالعات بیشتر دارد. همچنین در بارگذاری دوطرفه نامتقارن هرچه دامنه بارگذاری بیشتر باشد نرخ این تغییرات بیشتر است.
- در کلیه آزمایش‌ها رفتار شمع هیسترتیک کامل است و خاک فرونمی‌ریزد. رفتار شمع بعد از تعداد مشخص سیکل بارگذاری به‌حالت پایدار رسیده و انرژی با نرخ ثابتی مستهلک می‌شود. این رفتار اصطلاحاً پلاستیسیته متناوب نامیده می‌شود.
- در نمودارهای هیسترتیک در قسمت بارگذاری مستقیم و معکوس هرچه دامنه بارگذاری بزرگ‌تر باشد، منحنی غیرخطی‌تر می‌شود و اگر دامنه کوچک باشد رفتار این نواحی خطی می‌شود.
- آزمایش‌ها روند لگاریتمی تغییرات سختی سکانت را نشان می‌دهند. این تغییرات بعد از ۸۰ سیکل به مقدار ثابتی می‌رسد.
- روند تغییرات لنگر داخلی سازه مونوپایل در عمق خاک مشابه بوده و بیشترین لنگر در یک سوم بالایی عمق مدفون اتفاق می‌افتد.

همانطور که پیش‌تر عنوان شد، در پژوهش جمهری سیستم بارگذاری سیکلیک به‌صورت جابجایی-کنترل بوده است. این مسئله را می‌توان مهم‌ترین کاستی این پژوهش دانست. با توجه به این‌که ماهیت بارگذاری باد و امواج دریا به‌صورت اعمال نیرو است، در پژوهش حاضر سیستم بارگذاری جانبی به‌حالت نیرو-کنترل ارتقاء یافته و آزمایش‌های سیکلیک با این سیستم انجام شده است.

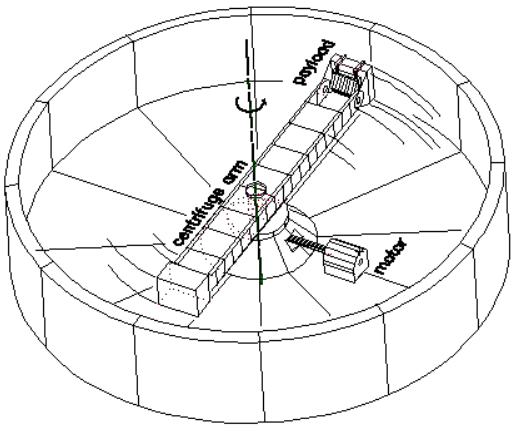
۳ – روش تحقیق

۳-۱-مدل‌سازی فیزیکی

رفتار مکانیکی خاک به‌شدت غیرخطی و وابسته به سطح تنش است. مهم‌ترین دلیل استفاده از مدل‌سازی سانتریفیوژ برای تحقیقات ژئوتکنیکی، اعمال تأثیر سطح تنش در رفتار مصالح است. به‌منظور شبیه‌سازی دقیق یک نمونه در مقیاس کوچک، می‌بایست تنش‌های درجا به‌درستی در مدل بازتولید شوند. برای ایجاد تنش‌های ناشی از وزن نمونه اصلی در یک مدل با مقیاس $\frac{1}{N}$ ، لازم است تا مدل تحت شتاب گرانشی N برابر شتاب گرانشی نمونه اصلی آزمایش شود. اگر یک مدل با مقیاس $\frac{1}{N}$ در معرض شتاب N برابر شتاب گرانش زمین قرار گیرد، ابعاد و بسیاری از پارامترهای نمونه اصلی می‌بایست به‌درستی مقیاس شوند. اساس کار سانتریفیوژ بر دوران مدل، حول محوری قائم با سرعت زاویه‌ای ثابت استوار است. بر حسب فاصله نمونه خاک، از محور دوران (r) و نیز سرعت زاویه‌ای دستگاه (ω)، شتاب شعاعی برابر با $r\omega^2$ به توده خاک وارد می‌شود. بنابراین وزن مخصوص معادل نمونه خاک از رابطه (۱۲) به‌دست می‌آید.

$$\gamma = \sqrt{\rho(g^2 + (r\omega^2)^2)} \qquad (۱۲)$$

در شکل ۷ نمای ساده‌ای از دستگاه سانتریفیوژ ژئوتکنیکی نمایش داده شده است.



شکل ۷- نمای ساده از یک دستگاه سانتریفیوژ

۳-۲-قوانین مقیاس در محیط سانتریفیوژ

مدل‌سازی در واقع شبیه‌سازی واقعیت با یک نسبت مشخص کوچک‌سازی است، تا بدین‌وسیله بررسی پاسخ واقعی سازه ممکن گردد. بنابراین برای اطمینان از درستی پاسخ مدل لازم است، ساخت نمونه کوچک شده بر اساس معیارها و قوانین مشخصی صورت پذیرد. برای انجام مدل‌سازی صحیح، لازم است در هر یک از مدل‌سازی‌های سانتریفیوژ (Ng) یا غیر سانتریفیوژ ($1g$)، اثر کوچک‌سازی در مدل که اثر مقیاس نامیده می‌شود، بررسی شود. برای این منظور می‌بایست رابطه بین مقادیر پارامترها در مدل با مقادیر متناظر آنها در واقعیت محاسبه شود. در جدول ۱ برخی قوانین مقیاس برای مدل‌سازی سانتریفیوژ در فضای Ng نشان داده شده است.

۳-۳-طراحی مدل

شمع مدل با طول ۷۰ سانتی‌متر با نسبت طول آزاد به قطر ۷ (e/D=۷) و عمق مدفون به قطر ۵ (L/D=۵) انتخاب گردیده است. در آزمایش‌ها خاک در لایه‌های ۲/۵ سانتی‌متری ریخته و متراکم شده است (روش تراکم مرطوب). ارتفاع کل خاکریزی معادل ۳۰

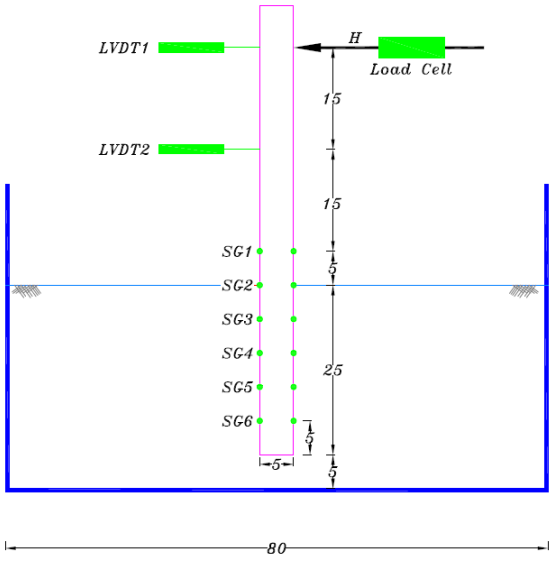
[Downloaded from marine-eng.ir on 2026-11-02]

[DOR: 20.1001.1.17357608.1398.15.29.16.4]

جدول۱- قوانین مقیاس برای مدل‌سازی در فضای Ng [۱۳]

پارامتر	مقیاس (واقعیت/مدل)
طول	$1/N$
مساحت	$1/N^2$
حجم	$1/N^3$
جرم	$1/N^3$
تنش	1
کرنش	1
نیرو	$1/N^2$
لنگر خمشی	$1/N^3$
سختی خمشی	$1/N^4$
سختی محوری	$1/N^2$
فرکانس	N

سانتی‌متر است. پس از اتمام ساخت نمونه دستگاه بارگذاری نصب شده و محفظه خاک به‌داخل سانتریفیوژ منتقل می‌گردد. پس از آن شمع مدل با زاویه ۹۰ درجه نسبت به سطح افق تا عمق ۲۵ سانتی‌متر در خاک کوبیده می‌شود. پس از انجام مراحل فوق، سانتریفیوژ ژئوتکنیکی روشن شده و به نمونه شتاب $۴۰g$ اعمال می‌گردد. مشخصات هندسی مدل در شکل ۸ نشان داده شده‌است (همه ابعاد به سانتی‌متر هستند).



شکل ۸- مشخصات هندسی مدل ساخته شده

۳-۴- تجهیزات

۳-۴-۱- سانتریفیوژ

سانتریفیوژ ژئوتکنیکی دانشکده فنی دانشگاه تهران ساخت شرکت اکتیدین[۸] فرانسه و از مدل C67-2 است و تصویری از آن در شکل (۹) نشان داده شده است. این سانتریفیوژ از نوع سانتریفیوژهای بازویی[۹] بوده که دارای سکوی شناور[۱۰] است. در این سانتریفیوژ از اتصالات لغزشی[۱۱] جهت انتقال داده‌ها استفاده می‌شود.



شکل ۹- سانتریفیوژ ژئوتکنیکی دانشگاه تهران

۳-۴-۲- محفظه خاک

محفظه خاک مورد استفاده در این پژوهش دارای طول ۸۰ سانتی‌متر، عرض ۴۰ سانتی‌متر و ارتفاع ۵۰ سانتی‌متر است. ۳ وجه این محفظه از ورق‌های فولادی به ضخامت ۱ سانتی‌متر و وجه چهارم از یک ورق پلکسی‌گلس به ضخامت ۴ سانتی‌متر ساخته شده است. اصطکاک بین خاک و دیواره‌های محفظه باعث ایجاد خطا در نتایج مدل‌سازی فیزیکی می‌شود. در این پژوهش به‌منظور کاهش اثر اصطکاک مذکور، از طلق‌های شفاف پلاستیکی در وجوه داخلی کلیه دیواره‌ها استفاده شده است. برانزبای و اسمیت بیان داشتند که با داشتن دیواره‌های جانبی صاف، اصطکاک جانبی تأثیر قابل ملاحظه‌ای بر فشار خاک و همچنین میدان سرعت ذرات نخواهد داشت [۱۴].

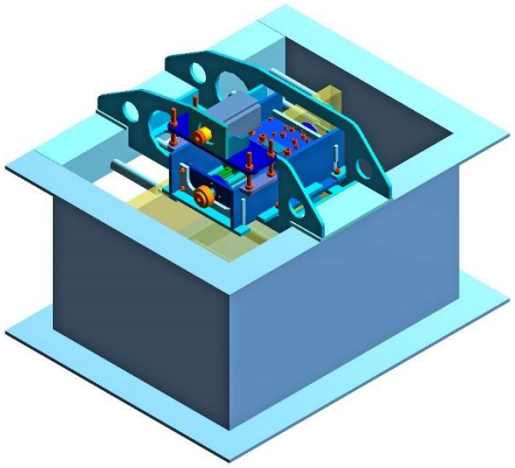
۳-۴-۳- دستگاه بارگذاری جانبی

سیستم بارگذاری موجود از موتور پله‌ای[۱۲] تشکیل شده است. در این سیستم با چرخش موتور، جابجایی به دو عدد پولی و یک تسمه منتقل شده و این حرکت به انتهای یک بال‌اسکرو وارد می‌گردد. بال‌اسکرو حرکت دورانی را به حرکت انتقالی تبدیل کرده و این حرکت انتقالی توسط دو عدد ریل و چهار واگن به محفظه اعمال بار و توسط آن به شفت بارگذاری منتقل می‌شود. شفت بارگذاری به‌کمک یک گیره مونوپایل را به‌صورت کنترل شده جابجا می‌کند. موتور موجود قابلیت بارگذاری دوطرفه را دارد. برنامه‌نویسی درایور دستگاه به‌گونه‌ای بوده که موتور بارگذاری‌های جابجایی-کنترل و نیرو-کنترل را به‌صورت ثابت، خطی و هارمونیک انجام می‌دهد. مکانیزم پایه‌ای عملکرد موتور به‌صورت جابجایی-کنترل است. در بارگذاری‌های نیرو-کنترل یک حلقه در برنامه‌نویسی درایور دستگاه تعریف شده است. بدین صورت که موتور جابجایی کوچکی اعمال می‌کند، سپس برنامه از نیروسنج بازخورد می‌گیرد، اگر نیروی موجود

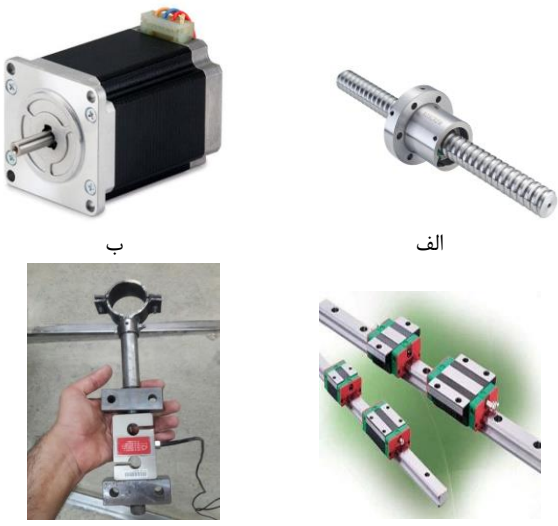
[Downloaded from marine-eng.ir on 2026-11-02]
[DOR: 20.1001.1.17357608.1398.15.29.16.4]

در نیروسنج کمتر از مقدار تقاضای اولیه باشد موتور در همان جهت و اگر نیروی موجود بیشتر باشد، موتور در خلاف جهت اولیه حرکت می‌کند. این حلقه به‌منظور اعمال بارگذاری به‌صورت دائم تکرار می‌شود.

در شکل ۱۰ محفظه خاک همراه با قاب نگه‌دارنده بارگذاری جانبی و در شکل ۱۱ تجهیزات دستگاه بارگذاری نشان داده شده‌است.



شکل ۱۰- محفظه خاک همراه با قاب نگه‌دارنده بارگذاری جانبی [۱۱]



الف ب ج د

شکل ۱۱- تجهیزات مورد استفاده در دستگاه بارگذاری
الف) بال‌اسکرو ب) استپر موتور
ج) ریل و واگن راهنما د) گیره اعمال بار و لودسل

۳-۴-۴-ابزارهای رفتارنگاری

برداشت داده‌های مورد نیاز در حین آزمایش مستلزم به‌کارگیری مبدل‌ها[۱۳] یا سنسورهای مختلف است. در این پژوهش از سنسورهای زیر استفاده شده است:

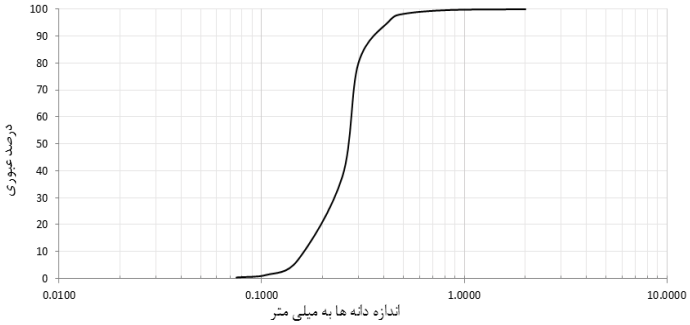
۱- نیروسنج[۱۴]: برای محاسبه نیروی اعمالی به شمع یک نیروسنج به‌ظرفیت ۳۰۰ کیلوگرم مورد استفاده قرار گرفته است.

۲- جابجایی‌سنج خطی[۱۵]: دو جابجایی‌سنج برای اندازه‌گیری تغییر مکان سر شمع و یک نقطه دیگر در طول شمع نصب شده است.

۳- کرنش‌سنج[۱۶]: به‌منظور اندازه گیری کرنش و در نتیجه لنگر در طول شمع و با فواصل ۵ سانتی‌متر ۶ جفت کرنش‌سنج FLA5-11 نصب شده است. مدار کرنش‌سنج‌ها به‌صورت نیم‌پل[۱۷] بسته شده است.

۳-۵- مشخصات خاک

در ساخت مدل‌های فیزیکی، از ماسه ۱۶۱ فیروزکوه با دانسیته نسبی ۶۰ درصد و با رطوبت ۵ درصد استفاده شده است. در این پژوهش بررسی رفتار مونوپایل در ماسه در شرایط زهکشی شده مورد نظر بوده است. با توجه به دشوار بودن کوبش خاک خشک و همچنین حساسیت‌زا بودن گرد و غبار ماسه فیروزکوه، ساخت نمونه‌ها با رطوبت کم انجام شده است. منحنی دانه‌بندی ماسه ۱۶۱ فیروزکوه در شکل ۱۲ و مشخصات آن در جدول ۲ ارائه شده است.



شکل۱۲- منحنی دانه بندی ماسه ۱۶۱ فیروزکوه

جدول۲- مشخصات ماسه ۱۶۱ فیروزکوه

c (kPa)	Φ (deg)	D_{60} (mm)	D_{50} (mm)	D_{30} (mm)	D_{10} (mm)	USCS
0	36.5	0.3	0.27	0.21	0.16	SP

۳-۶- مشخصات شمع

با توجه به این‌که مونوپایل‌های مورد استفاده در دریا معمولاً از فولاد ساخته می‌شوند، لوله‌ای از جنس فولاد ضد زنگ ۳۱۶ [۱۸] با مدول الاستیسته $۲/۰۷\times۱۰^{۶}\ \frac{kg}{cm^2}$ برای شمع مدل انتخاب گردید.

با توجه به ابعاد متداول مونوپایل‌های اجرا شده تا کنون [۲]، شمع استفاده شده در این پژوهش لوله‌ای با قطر خارجی ۵۱ و ضخامت ۱ میلی‌متر است. بر اساس قوانین مقیاس در محیط سانتریفیوژ، این شمع در شتاب $۴۰g$ یک مونوپایل با قطر ۲/۰۴ متر را در واقعیت مدل‌سازی می‌کند.

۴- تشریح آزمایش‌ها

در این پژوهش به‌منظور بررسی رفتار مونوپایل تحت اثر بار جانبی، ۷ آزمایش انجام شده است. در تمامی آزمایش‌ها عمق مدفون ۲۵ سانتی‌متر (۵ برابر قطر شمع) و طول آزاد شمع ۳۵ سانتی‌متر (۷ برابر قطر شمع) ثابت هستند. در ابتدا یک آزمایش مونوتونیک جهت

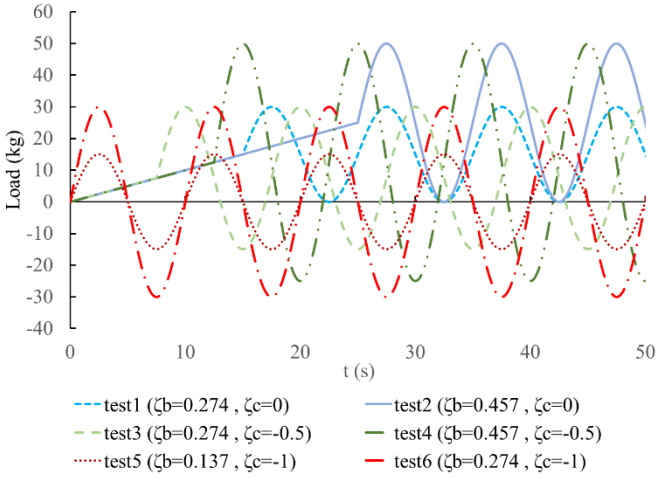
[Downloaded from marine-eng.ir on 2026-11-02]
[DOR: 20.1001.1.17357608.1398.15.29.16.4]

به‌دست‌آوردن ظرفیت استاتیکی مونوپایل و سپس ۶ آزمایش با بارگذاری سیکلیک که مشخصات آنها در جدول ۳ ارائه شده است، انجام شد.

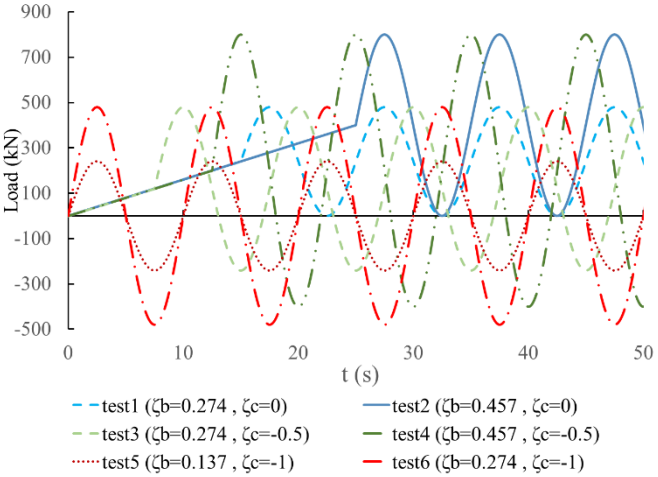
مجموعاً ۳ نوع بارگذاری سیکلیک به شمع اعمال شده است. یکی بارگذاری یک‌طرفه که نیرو از مقدار صفر تا مقدار حداکثر افزایش می‌یابد و دوباره به مقدار صفر برمی‌گردد تا یک سیکل بارگذاری کامل شود(آزمایش‌های ۱ و ۲)، دوم بارگذاری دوطرفه است که در آن بار افقی در جهت مخالف نیز اعمال می‌شود و تا مقدار زیر صفر کاهش پیدا می‌کند (آزمایش‌های ۳ و ۴) و سوم بارگذاری دوطرفه است که در آن بار افقی در جهت مخالف در دو جهت به‌یک‌اندازه اعمال می‌شود (آزمایش‌های ۵ و ۶). بارگذاری اعمالی به شمع مدل در آزمایش‌های مختلف و همچنین بار معادل اعمالی به مونوپایل در مقیاس واقعی در اشکال ۱۳ و ۱۴ نشان داده شده است. متغیرهای اصلی در این پژوهش بار حداکثر و حداقل در هر سیکل بارگذاری سیکلیک هستند.

جدول۳- مشخصات آزمایش‌های انجام شده

شماره آزمایش	H_{max}(kg)	H_{min}(kg)	f(Hz)	تعداد سیکل
۰	مونوتونیک			
۱	۳۰	۰	۰/۱	۱۳۰
۲	۵۰	۰	۰/۱	۱۳۰
۳	۳۰	-۱۵	۰/۱	۱۳۰
۴	۵۰	-۲۵	۰/۱	۱۳۰
۵	۱۵	-۱۵	۰/۱	۱۳۰
۶	۳۰	-۳۰	۰/۱	۱۳۰



شکل ۱۳- بارگذاری اعمالی به شمع مدل در آزمایش‌های مختلف



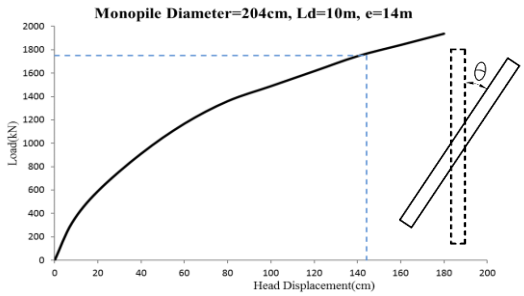
شکل ۱۴- بارگذاری اعمالی به مونوپایل در مقیاس واقعی

۵ – نتایج

۵-۱- آزمایش مونوتونیک

۵-۱-۱- ظرفیت مونوپایل

در منحنی نیرو-تغییر مکان سر شمع نقطه مشخصی برای یافتن ظرفیت نهایی مشخص نیست. مطابق معیار کلینکورت و لبلانک [۸ و ۱۵]، برای محاسبه ظرفیت باربری حداکثر دوران مونوپایل به $\theta = 4^{\circ}$ محدود می‌گردد. با توجه به نتایج جابجایی‌سنج‌های موجود، میزان دوران مونوپایل در طول آزمایش قابل محاسبه است. نیروی افقی که باعث دوران مونوپایل به‌میزان ۴ درجه می‌شود، به عنوان ظرفیت باربری آن در نظر گرفته می‌شود. شکل ۱۵ نمودار نیرو-تغییر مکان سر شمع را در مقیاس واقعی نشان می‌دهد.



شکل ۱۵- ظرفیت نهایی جانبی شمع با معیار چرخش ۴ درجه

با در نظر گرفتن زاویه چرخش ۴ درجه به‌عنوان معیار گسیختگی ظرفیت باربری مونوپایل (P_u) ۱۷۵۰ کیلونیوتن به‌دست می‌آید. پولس برای تعیین ظرفیت باربری نهایی شمع‌ها با خروج از مرکزیت رابطه (۱۳) را پیشنهاد داده است [۱۶].

$$P_u = \frac{0.5\gamma DL^3 K_p}{e+L} \qquad (۱۳)$$

[Downloaded from marine-eng.ir on 2026-11-02]

[DOR: 20.1001.1.17357608.1398.15.29.16.4]

که در این رابطه γ وزن مخصوص خاک، D قطر شمع، L عمق مدفون شمع، e طول آزاد شمع و K_p ضریب فشار جانبی مقاوم خاک است.

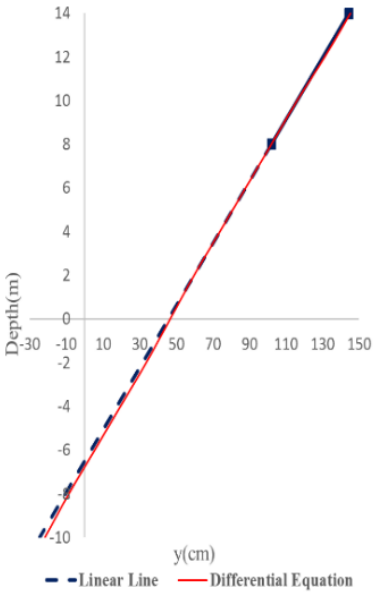
مطابق این رابطه ظرفیت باربری مونوپایل مورد بررسی حدود ۲۸۰۰ کیلونیوتن محاسبه می‌گردد. بنابراین رابطه کلاسیک ظرفیت باربری مونوپایل را ۶۰ درصد دست بالا تخمین می‌زند.

۵-۱-۲- تغییر شکل نهایی مونوپایل

در آزمایش مونوتونیک با فرض رفتار صلب می‌توان به‌کمک نتایج جابجایی‌سنج‌ها به راحتی تغییر شکل تقریبی شمع را محاسبه کرد. همچنین به‌کمک معادله دیفرانسیل تغییر مکان تیر (رابطه (۱۴)) و استفاده از دو شرط مرزی تغییر مکانی، تغییر شکل دقیق شمع قابل محاسبه است.

$$EI\frac{d^2y}{dx^2} = M(x) \qquad (۱۴)$$

شکل (۱۶) تغییر شکل شمع را نشان می‌دهد. نمودار خط چین نشان دهنده تغییر مکان با فرض رفتار کاملاً صلب و با استفاده از نتایج جابجایی‌سنج‌ها و نمودار پیوسته مربوط به نتیجه حل دقیق معادله دیفرانسیل تغییر مکان شمع است.



شکل ۱۶- نمودار تغییر شکل شمع واقعی

مطابق این شکل عمق چرخش شمع واقعی معادل ۶/۴۹ متر به‌دست آمده است. همچنین مقایسه دو نمودار نشان‌دهنده آن است که تغییر شکل مونوپایل به‌صورت تغییر شکل جسم صلب است.

۵-۲- آزمایش‌های سیکلیک

آزمایش‌های سیکلیک با توجه به نتایج آزمایش مونوتونیک طراحی شده‌اند. نیروی حداکثر در این آزمایش‌ها تا حدود نیمی از ظرفیت باربری نهایی مونوپایل است (آزمایش‌های ۲ و ۴). پس از ساخت مدل و قرار دادن آن در داخل سانتریفیوژ، هنگامی که شتاب سانتریفیوژ به‌مقدار $۴۰g$ رسید، بارگذاری اعمال می‌شود. به‌عنوان مثال در آزمایش ۱ نیروی اعمالی به‌صورت تابع سینوسی با حداکثر ۳۰ و حداقل ۰ کیلوگرم است. برای تولید این بارگذاری ابتدا نیرو به‌صورت مونوتونیک و تا مقدار ۱۵ کیلوگرم اعمال شده، پس از آن بارگذاری سینوسی آغاز می‌شود. شایان ذکر است فرکانس بارگذاری ۰/۱ هرتز و تعداد سیکل‌های بارگذاری ۱۳۰ سیکل است. پس از اعمال بارگذاری سیکلیک، نیرو به صفر رسیده و سانتریفیوژ از حرکت می‌ایستد.

در آزمایش‌های سیکلیک، شمع‌ها تحت ۱۳۰ سیکل با فرکانس بارگذاری و دانسیته خاک مشابه قرار گرفته و رابطه (۴) برای تغییر مکان جانبی شمع‌ها در نظر گرفته شده است[۸].

در جدول ۴ نتایج مربوط به جابجایی سر شمع در مقیاس واقعی بر اساس آزمایش‌های مختلف ارائه شده است.

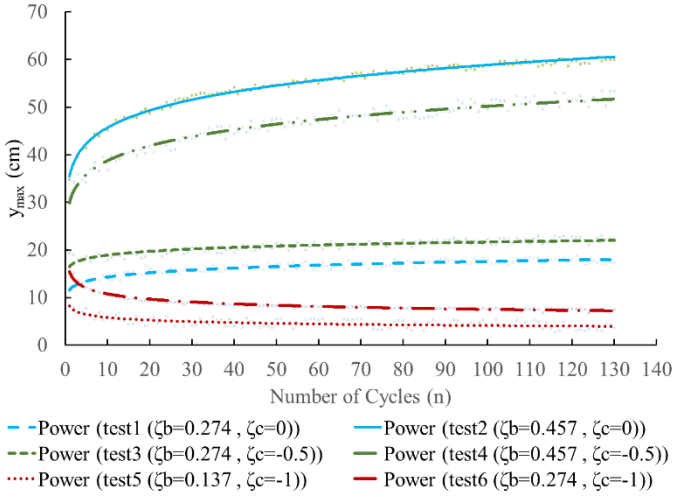
جدول۴- نتایج مربوط به جابجایی حداکثر سر شمع در مقیاس واقعی

شماره آزمایش	ζ_b	ζ_c	جابجایی حداکثر در سیکل ۱۲۰ (cm)	دوران حداکثر در سیکل ۱۲۰ (deg)
۱	۰/۲۷۴	۰/۰	۱۷/۷۹	۰/۵۰
۲	۰/۴۵۷	۰/۰	۵۹/۷۶	۱/۷۱
۳	۰/۲۷۴	-۰/۵	۲۲/۰۸	۰/۶۱
۴	۰/۴۵۷	-۰/۵	۵۰/۹۸	۱/۴۴
۵	۰/۱۳۷	-۱/۰	۴۰/۰۴	۰/۱۰
۶	۰/۲۷۴	-۱/۰	۷/۳۳	۰/۱۸

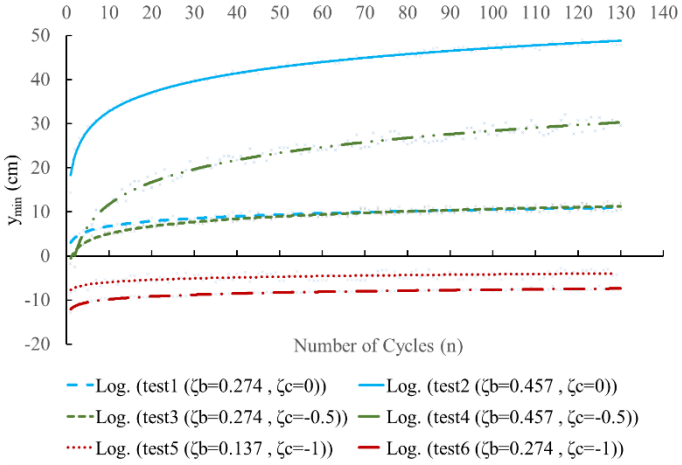
مطابق جدول ۴ بیشترین جابجایی در آزمایش دوم که به‌صورت یک‌طرفه بوده اتفاق افتاده است. پارامتر اصلی تأثیرگذار در میزان جابجایی تجمعی ζ_b است. در یک ζ_b ثابت با افزایش ζ_c تغییر مکان افزایش می‌یابد. اشکال ۱۷ و ۱۸ روند تغییرات جابجایی را در مقیاس واقعی برای آزمایش‌های سیکلیک نشان می‌دهند. جابجایی حداکثر سر شمع بر حسب تعداد سیکل در آزمایش‌های یک‌طرفه و دوطرفه نامتقارن افزایشی بوده ولی در آزمایش‌های دوطرفه متقارن ($\zeta_c = -1$) این روند به‌صورت کاهشی است. در تمام آزمایش‌ها جابجایی حداکثر بر حسب تعداد سیکل از یک روند توانی پیروی می‌کند. جابجایی حداقل سر شمع بر حسب تعداد سیکل در تمام آزمایش‌ها به‌صورت افزایشی بوده و از یک روند لگاریتمی پیروی می‌کند. روابط حاصل از برازش منحنی بر داده‌های موجود در جدول ۵ ارائه شده است. شایان ذکر است جابجایی‌ها در روابط ارائه شده بر حسب سانتی‌متر است.

[Downloaded from marine-eng.ir on 2026-11-02]

[DOR: 20.1001.1.17357608.1398.15.29.16.4]



شکل ۱۷- روند تغییرات جابجایی حداکثر بر حسب تعداد سیکل در مقیاس واقعی

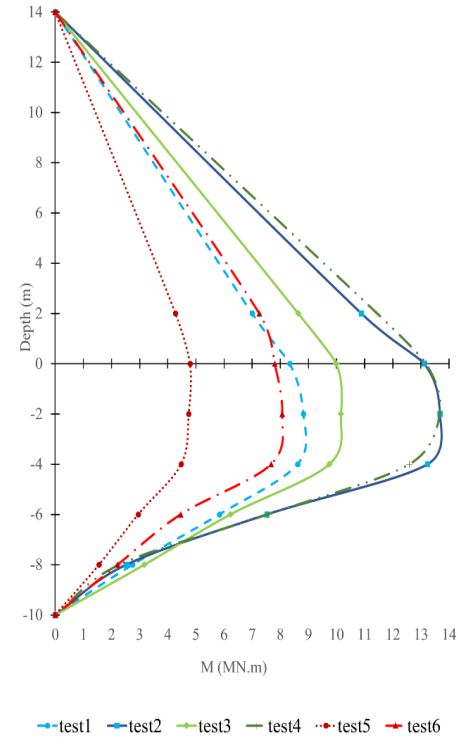


شکل ۱۸- روند تغییرات جابجایی حداقل بر حسب تعداد سیکل در مقیاس واقعی

جدول۵- روابط به‌دست آمده برای تغییر مکان حداکثر و حداقل مونوپایل در مقیاس واقعی بر حسب تعداد سیکل بارگذاری

شماره آزمایش	رابطه
۱	$y_{max(cm)}=11.611N^{0.0901}$ $y_{min(cm)}=1.622\ln(N)+3.031$
۲	$y_{max(cm)}=35.449N^{0.1101}$ $y_{min(cm)}=6.252\ln(N)+18.369$
۳	$y_{max(cm)}=16.504N^{0.0592}$ $y_{min(cm)}=2.429\ln(N)-0.544$
۴	$y_{max(cm)}=29.905N^{0.1124}$ $y_{min(cm)}=7.234\ln(N)-4.935$
۵	$y_{max(cm)}=8.239N^{-0.15}$ $y_{min(cm)}=0.772\ln(N)-7.715$
۶	$y_{max(cm)}=15.454N^{-0.156}$ $y_{min(cm)}=0.956\ln(N)-12.041$

با توجه به نتایج کرنش‌سنج‌های نصب شده در طول شمع، مقدار لنگر خمشی قابل محاسبه است. شکل ۱۹ نمودار لنگر خمشی را بر حسب طول مونوپایل در مقیاس واقعی در سیکل ۱۲۰ ام آزمایش‌های مختلف ارائه می‌دهد.



شکل ۱۹- لنگر خمشی مونوپایل در سیکل ۱۲۰ ام

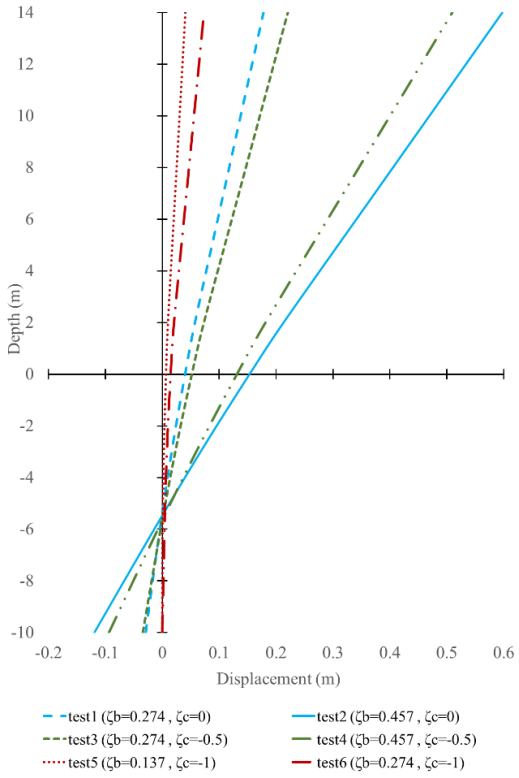
با توجه به نتایج، لنگر حداکثر تابع پارامتر ζ_b بوده و ζ_c تأثیر چندانی بر آن ندارد.

همانگونه که پیش‌تر عنوان شد، تغییر مکان شمع را می‌توان به‌کمک معادله دیفرانسیل مذکور (رابطه (۱۳)) محاسبه کرد.

به‌منظور مقایسه بهتر جابجایی در آزمایش‌های مختلف، نتایج مربوط به تغییر شکل مونوپایل در مقیاس واقعی در سیکل ۱۲۰ام در شکل ۲۰ ارائه شده است.

[Downloaded from marine-eng.ir on 2026-11-02]

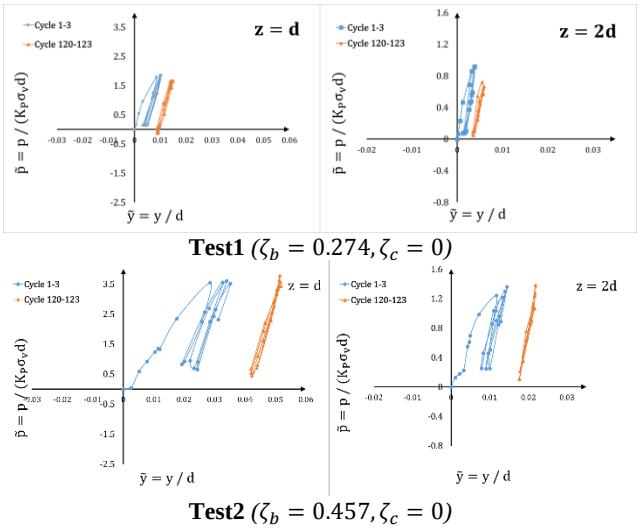
[DOR: 20.1001.1.17357608.1398.15.29.16.4]



شکل ۲۰- تغییر شکل مونوپایل در سیکل ۱۲۰ ام

دوران مونوپایل حول نقطه‌ای در عمق ۵۰ تا ۶۰ درصد طول فرورفت اتفاق افتاده است. این نتیجه اندکی با نتایج سایر محققان که عمقی در حدود ۷۰ تا ۸۰ درصد طول فرورفت گزارش کرده‌اند، متفاوت است [۱۷].

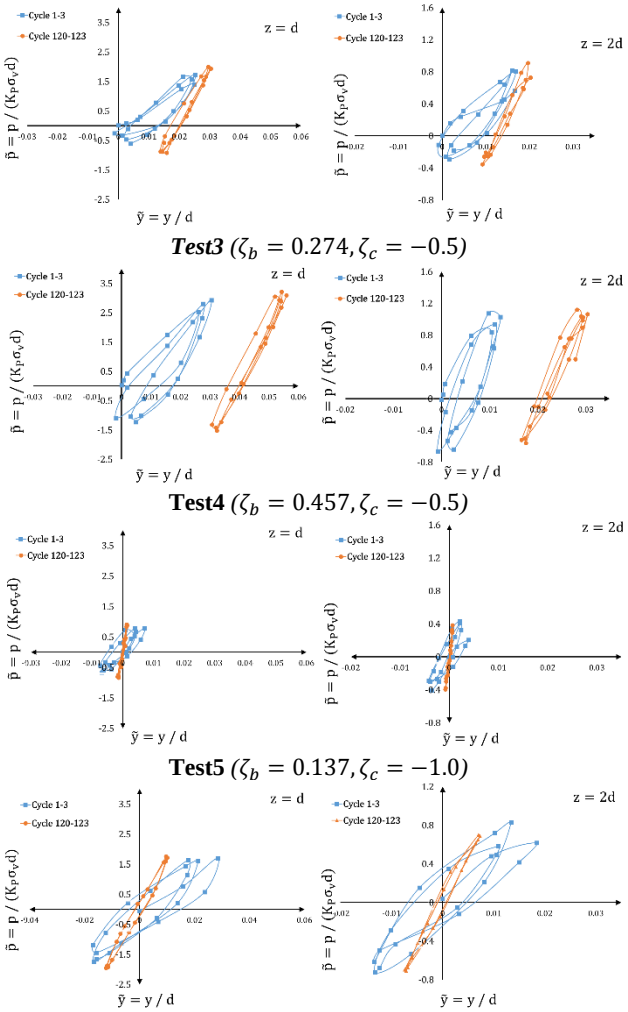
به‌منظور بررسی تغییرات سختی منحنی نیرو-تغییر مکان بی‌بعد در آزمایش‌های مختلف در اعماق $Z=D$ و $Z=2D$ محاسبه شده و در نمودارهای شکل ۲۱ ارائه شده است.



Test1 $(\zeta_b = 0.274, \zeta_c = 0)$

Test2 $(\zeta_b = 0.457, \zeta_c = 0)$

شکل ۲۱- منحنی نیرو-تغییر مکان مونوپایل در اعماق Z=D و Z=2D



Test3 $(\zeta_b = 0.274, \zeta_c = -0.5)$

Test4 $(\zeta_b = 0.457, \zeta_c = -0.5)$

Test5 $(\zeta_b = 0.137, \zeta_c = -1.0)$

Test6 $(\zeta_b = 0.274, \zeta_c = -1.0)$

ادامه شکل ۲۱- منحنی نیرو-تغییر مکان مونوپایل در اعماق Z=D و Z=2D

مؤلفه‌های مختلفی در اندرکنش خاک و سازه، رفتار کلی شمع را تحت تأثیر قرار می‌دهد. این مؤلفه‌ها شامل مقاومت خاک در مقابل حرکت شمع، توسعه شکاف بین شمع و خاک و نیروی برآ که ناشی از حرکت شمع در شکاف است می‌شود [۸]. با وجود رفتار غیرخطی کلی و هیسترزیس، منحنی بارگذاری و باربرداری در سیکل‌های انتهایی تقریباً به رفتار خطی نزدیک است. این مسئله با نتایج زعیر همخوانی دارد [۱۸].

با توجه به نتایج آزمایش‌ها با افزایش تعداد سیکل، سختی سکانتی افزایش یافته است. با تشکیل حفره در اطراف شمع، عمق مدفون کاهش می‌یابد ولی تغییر در تراکم خاک و پلاستیسیته موضعی باعث افزایش سختی سیستم می‌شود. محققان دیگری مانند لبلانک نیز این افزایش سختی شمع را تحت بار سیکلیک گزارش کرده‌اند [۱۵]. بررسی روند دقیق افزایش سختی نیازمند آزمایش‌های بیشتر است.

[Downloaded from marine-eng.ir on 2026-11-02]

[DOR: 20.1001.1.17357608.1398.15.29.16.4]

۵ – نتیجه گیری

در این پژوهش یک آزمایش مونوتونیک و شش آزمایش سیکلیک با بارگذاری یک‌طرفه، دوطرفه نامتقارن و دوطرفه متقارن با دامنه‌های بارگذاری مختلف انجام گردید. نخست نتایج مربوط به آزمایش مونوتونیک ارائه و ظرفیت باربری نهایی جانبی آن محاسبه گردید. سپس در هر آزمایش سیکلیک با توجه به روند تغییرات جابجایی بر حسب تعداد سیکل، نمودار لنگر در طول شمع و جابجایی سازه شمع و نمودار نیرو-تغییر مکان سر شمع، نتایج زیر مشاهده شد:

- روند تغییرات جابجایی شمع در اثر بارگذاری جانبی در سیکل‌های مختلف به چندین عامل وابسته است. عامل اول تغییر شکل پلاستیک دائمی در اثر بارگذاری سیکلیک است که از آن در اکثر مراجع به‌عنوان عامل کاهش ظرفیت باربری و افزایش جابجایی تجمعی نام برده‌اند. عامل دوم نوع بارگذاری و دامنه آن است که با توجه به نتایج در $\zeta_c = 0$ ، بحرانی‌ترین حالت رخ داده و هرچه ζ_b بیشتر شود آهنگ افزایش این روند بیشتر است. عامل دیگر تراکم خاک است، که در اثر ضربه خاک جلوی شمع متراکم می‌شود و باعث افزایش ظرفیت باربری می‌شود. با توجه به این سه عامل در چهار آزمایش یک‌طرفه و دوطرفه نامتقارن مشاهده شده که جابجایی تجمعی سر شمع به‌صورت توانی افزایش یافته و نرخ این افزایش در تمامی این آزمایش‌ها به‌صورت کاهشی است. اما در آزمایش‌های متقارن دوطرفه عامل تراکم و سختی خاک در دو طرف شمع غلبه کرده و باعث شده که جابجایی تجمعی سر شمع کاهش یافته و شمع به‌سمت مکان اولیه خودش برود.
- روند تغییرات سختی سکانت کاملاً به دامنه و نوع بارگذاری وابسته است. طبق مشاهدات این آزمایش‌ها هرچه بارگذاری از حالت یک‌طرفه به‌سمت بارگذاری دوطرفه پیشروی کند، آهنگ افزایش سختی سکانت بیشتر می‌شود.
- افزایش دامنه بارگذاری منجر به افزایش جابجایی تجمعی می‌شود. نرخ این افزایش به‌صورت غیرخطی است.
- جابجایی تجمعی حداکثر سر شمع در تمام آزمایش‌ها با دقت بسیار خوبی از یک روند توانی و جابجایی تجمعی حداقل از یک روند لگاریتمی پیروی می‌کند.
- روند تغییرات سختی در هر سیکل به‌صورت افزایشی بوده و آهنگ این افزایش به‌صورت کاهشی است.
- در تمامی آزمایش‌ها رفتار مونوپایل به‌صورت صلب بوده و عملکرد آن مشابه شمع‌های کوتاه بوده است.
- در تمامی آزمایش‌های سیکلیک دوران شمع حول نقطه‌ای در حدود ۵۰ تا ۶۰ درصد عمق فرورفت آن رخ داده است.
- در اکثر آزمایش‌ها مقادیر حداکثر لنگر در تمامی سیکل‌ها در عمق یک سوم طول فرورفت مونوپایل رخ داده است.
- تنش‌های ایجاد شده در سازه مونوپایل بسیار پایین‌تر از آستانه جاری شدن بوده است.

کلیدواژگان

1. Veja Mate
2. Limit State Method
3. Finite Element Method
4. Finite Difference Method
5. Subgrade Reaction Method
6. American Petroleum Institute
7. Det Norske Veritas
8. Actidyn Systems
9. Beam Centrifuge
10. Swinging Platform
11. Slip Rings
12. Stepper Motor
13. Transducer
14. Load Cell
15. Linear Variable Differential Transformer (LVDT)
16. Strain Gauge
17. Half Bridge
18. Stainless Steel 316

۶ – مراجع

1- Doherty, P., Gavin, K., & Casey, B. (2011). *The Geotechnical Challenges Facing the Offshore Wind Sector*. In Geofrontiers, Dallas, Texas, USA, March, 2011. American Society of Civil Engineers.

2- Negro, V., López-Gutiérrez, J. S., Esteban, M. D., Alberdi, P., Imaz, M., & Serraclara, J. M. (2017). *Monopiles in offshore wind: Preliminary estimate of main dimensions*. Ocean Engineering, 133, 253-261.

3- Fan, C. C., & Long, J. H. (2005). *Assessment of existing methods for predicting soil response of laterally loaded piles in sand*. Computers and Geotechnics, 32(4), 274-289.

4- Broms, B. B. (1964). *Lateral resistance of piles in cohesionless soils*. Journal of the Soil Mechanics and Foundations Division, 90(3), 123-158.

5- American Petroleum Institute. (2011). RP2A-WSD: *Recommended practice for planning, designing, and constructing fixed offshore platforms: working stress design*. Washington DC, USA.

6- Standard DNVGL-ST-0126. (2016). DNV.GL: *Support structures for wind turbines*.

7- O'Neill, M. W., & Murchison, J. M. (1983). *An evaluation of p-y relationships in sands*. University of Houston.

8- Klinkvort, R. T. (2012). *Centrifuge Modelling of Drained Lateral Pile-Soil Response*, Doctoral dissertation, Ph. D. thesis, DTU.

9- Kirkwood, P., & Haigh, S. (2013). *Centrifuge testing of monopiles for offshore wind turbines*. In The Twenty-third International Offshore and Polar

[Downloaded from marine-eng.ir on 2026-11-02]

[DOR: 20.1001.1.17357608.1398.15.29.16.4]

Engineering Conference. International Society of Offshore and Polar Engineers.
10- Alderlieste, E. A. (2011). *Experimental Modelling of Lateral Loads on Large Diameter Monopile Foundations in Sand*, MSc. thesis, Delft University of Technology.
11- Shirzadeh, N. (2014). *Physical Modeling of Monopile under Lateral Load in Geotechnical Centrifuge*, MSc. thesis, University of Tehran. (in Persian)
12- Jomehri, F. (2016). *Centrifuge Modeling of Monopile under Lateral Cyclic Load in Sand*, MSc. thesis, University of Tehran. (in Persian)
13- Taylor, R. E. (2014). *Geotechnical Centrifuge Technology*. CRC Press.
14- Bransby, P. L., & Smith, I. A. (1975). *Side friction in model retaining-wall experiments*. Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, 101 (ASCE# 11447 Proceedings).
15- LeBlanc, C. (2009). *Design of Offshore Wind Turbine Support Structures: Selected topics in the field of geotechnical engineering*, Ph. D thesis, Aalborg University, Denmark.
16- Poulos, H. G., & Davis, E. H. (1980). *Pile Foundation Analysis and Design* (No. Monograph).
17- Randolph, M., & Gourvenec, S. (2017). *Offshore Geotechnical Engineering*. CRC Press.
18- Zaaijer, M. B. (2006). *Foundation modelling to assess dynamic behaviour of offshore wind turbines*. Applied Ocean Research, 28(1), 45-57.

[Downloaded from marine-eng.ir on 2026-11-02]

[DOR: 20.1001.1.17357608.1398.15.29.16.4]