

# مدل سازی فیزیکی مونوپایل تحت اثر بار جانبی سیکلیک در دستگاه سانتریفیوژ ژئوتکنیکی

مهدی شهیدی خواه<sup>۱\*</sup>، مجید مرادی<sup>۲</sup>

۱- دانشجوی دکتری، گروه ژئوتکنیک، دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه تهران

۲- دانشیار، گروه ژئوتکنیک، دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه تهران

\*shahidi\_civil@ut.ac.ir

تاریخ پذیرش: [۹۸/۴/۱۸]

تاریخ دریافت: [۹۷/۷/۲۵]

## چکیده

مونوپایل‌ها شمع‌های تکی فولادی با مقطع دایره ای و به صورت توخالی و با قطر ۲ تا ۸ متر بوده و نسبت طول به قطر آن‌ها معمولاً کمتر از ۱۰ است. در حال حاضر طراحی مونوپایل‌ها بر مبنای آزمایش‌های صورت گرفته روی شمع‌های لاغر انجام می‌شود. با توجه به این‌که مونوپایل‌ها به صورت صلب رفتار می‌کنند، مطالعه و بررسی عملکرد آن‌ها ضروری به نظر می‌رسد. در این پژوهش ۴ آزمایش به منظور مدل‌سازی فیزیکی به کمک سانتریفیوژ رفتار مونوپایل‌ها در خاک ماسه‌ای انجام شده است. آزمایش اول به منظور تخمین ظرفیت باربری جانبی نهایی این مونوپایل‌ها و ۳ آزمایش دیگر برای بررسی رفتار آن‌ها تحت اثر بار جانبی سیکلیک و تخمین جابه‌جایی‌های تجمعی و چگونگی تغییر شکل آن‌ها انجام شده است. در نهایت نتایج به دست آمده با روابط موجود در مورد سایر شمع‌های مورد استفاده در پروژه‌های ژئوتکنیکی (با قطر کم تر از ۲ متر) مقایسه شده است. نتایج این پژوهش نشان می‌دهد استفاده از آیین‌نامه‌ها و دستورالعمل‌های موجود در تخمین ظرفیت باربری نهایی جانبی این شمع‌ها بسیار محافظه‌کارانه بوده ولی در تخمین سختی آن‌ها منجر به دستیابی به نتایج دست بالا و غیر قابل اطمینان می‌شود. بنابر این روابط آیین‌نامه‌های موجود نیازمند تغییراتی هستند تا بتوانند نتایج دقیق در مورد این شمع‌ها در پی داشته باشند.

**واژگان کلیدی:** مونوپایل، مدل‌سازی فیزیکی، بارگذاری جانبی سیکلیک، سانتریفیوژ

## ۱- مقدمه

در سال ۲۰۰۵ به ۱۶/۷ درصد در سال ۲۰۱۶ افزایش یافته است [2]. با توجه به آمار در سال ۲۰۱۶ انرژی باد پس از گاز طبیعی، دومین منبع تولید انرژی در کشورهای اتحادیه اروپا بوده است.

امروزه باد اصلی‌ترین منبع تولید انرژی پاک است [1]. سهم این بخش از کل انرژی تولید شده در اتحادیه اروپا از ۶ درصد

با توجه به محیط دریا این شمع ها تحت اثر بار سیکلیک ناشی از باد، موج و جریان های دریایی<sup>۱</sup> قرار می گیرند [7]. بارگذاری سیکلیک باعث انباشتگی دوران<sup>۲</sup> و تغییر سختی سیستم می شود که بر عملکرد آن بسیار مؤثر است. به همین دلیل، تحلیل رفتار مونوپایل تحت این شرایط بسیار مهم است.

در حال حاضر طراحی مونوپایل ها بر اساس منحنی های p-y که در استانداردهای API [8] و DNV [9] آمده انجام می شود. در این روش با بهره گیری از مفهوم فنرهای وینکلر، شمع مانند تیری روی فنرهای غیر خطی در نظر گرفته می شود. با توجه به اینکه منحنی های p-y موجود بر اساس نتایج آزمایش هایی است که روی شمع های با قطر کمتر از ۱ متر انجام شده، استفاده از آنها برای شمع های با قطر بیشتر از ۲ متر با ابهاماتی روبرو است.

به دلیل هزینه بالای آزمایش های بزرگ مقیاس، در این پژوهش رفتار مونوپایل ها در خاک ماسه ای تحت اثر بار جانبی به کمک مدل سازی فیزیکی سانتریفیوژ بررسی شده است. در این مقاله نتایج مربوط به ۱ آزمایش مونوتونیک و ۳ آزمایش سیکلیک ارائه شده و رفتار مونوپایل ها بحث و بررسی شده است.

## ۲- مرور ادبیات فنی

### ۱-۲- تحقیقات لیتل و بریاد [10]

نتایج این پژوهش ها بر اساس آزمایش روی لوله های بلند پیش تنیده بتنی و فولادی (قطر ۰/۶ تا ۱/۰۶ متر) که در خاک ماسه ای کم تراکم تا تراکم متوسط به ضخامت ۲۲ متر روی یک لایه رس سخت نصب شده بودند تحت بار جانبی سیکلیک بدست آمده است. برای هر آزمایش ۲۰ سیکل بار اعمال شده است. تابع توانی زیر برای تخمین کرنش جانبی انباشته شده در سطح زمین بعد از تعداد N سیکل ارائه شد:

$$\varepsilon_n = \varepsilon_1 N^m \quad (1)$$

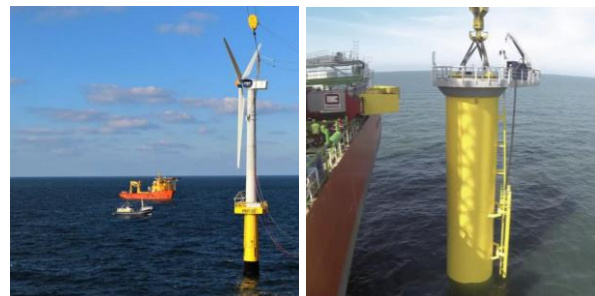
مزارع بادی فراساحلی مزایای متعددی نسبت به مزارع بادی موجود در خشکی دارند که آنها را منبع بسیار مناسبی برای استفاده از انرژی های تجدید پذیر می سازد. از جمله این مزایا می توان به موارد زیر اشاره کرد [3]:

- با توجه به وجود فضای بیشتر و امکان حمل و نقل قطعات بزرگ، این مزارع می توانند برای نصب توربین های بزرگتر و در نتیجه تولید انرژی بیشتر مورد استفاده قرار گیرند.
- بادهای دریایی معمولاً سرعت بیشتری نسبت به بادهای موجود در خشکی دارند و در نتیجه امکان استحصال انرژی بیشتر فراهم می شود.
- با توجه به اغتشاش کمتر در جریان های باد دریایی، توربین های فراساحلی با راندمان بیشتری کار کرده و عمر مفید بیشتری خواهند داشت.

حدود ۸۰ درصد توربین های بادی فراساحلی روی مونوپایل بنا شده اند [4]. مونوپایل ها شمع های لوله ای با قطر زیاد از جنس فولاد هستند که تحت بارگذاری جانبی به صورت کوتاه و صلب رفتار می کنند [5]. در مونوپایل ها معمولاً نسبت عمق گذاری به قطر در حدود ۲ الی ۶ (L/D=2~6) و نسبت طول آزاد به قطر در حدود ۵ الی ۱۵ (e/D=5~15) است [6]. شکل (۱) نمونه هایی از مونوپایل های نصب شده در مزارع بادی فراساحلی را نشان می دهد.

شکل ۱. دو نمونه از مونوپایل های نصب شده

الف) مزرعه بادی برکام ریفرگارد، ب) مزرعه بادی پرنسس آمالیا



ب) (b)

الف) (a)

Fig. 1. Two cases of installed monopiles  
a) Borkum Riffgrund windfarm (Germany)  
b) Prinses Amalia windpark (Netherlands)

1 Sea Current

2 Accumulation of Rotation

$$t = 0.032 \frac{L}{T_t} F_L F_i F_D \quad (5)$$

که  $T_t = \left(\frac{EI}{\eta_h}\right)^{0.2}$  و  $L$  طول مدفون شمع و  $\eta_h$  ضریب عکس‌العمل بارگذاری استاتیکی است.

متغیرهای دیگر رابطه (۵) مشابه معادله لانگ هستند.

#### ۲-۴- آزمایش‌های لب‌لانک و همکاران [13]

این پژوهش‌ها بر پایه آزمایش‌هایی با ۸۰۰۰ تا ۶۰۰۰۰ سیکل بارگذاری بوده که بر شمع‌های صلب با نسبت لاغری ۴/۵ که در خاک ماسه‌ای شل و خاک با تراکم متوسط غیر اشباع قرار دارند اعمال می‌شود. از یک روش بی‌بعدسازی برای تعیین ابعاد واقعی شمع و محدوده بارگذاری در آزمایشگاه استفاده شد. بر اثر بارگذاری‌های انجام شده با افزایش تعداد سیکل‌ها افزایش چشم‌گیری در چرخش تجمعی شمع ایجاد شده که با افزایش سختی خاک همراه بود. این یافته‌ها در تناقض مطلق با روش‌های لانگ و ونست و اکموس و همکاران بود که منحنی‌های بار-جاب‌جایی استاتیکی در حالت سیکلیک کاهش پیدا می‌کنند.

لب‌لانک چرخش تجمعی ( $\theta_N$ ) یک شمع صلب بعد از  $N$  سیکل بارگذاری را با رابطه زیر تخمین زد.

$$\theta_N = \theta_0 + \Delta\theta(N) \quad (6)$$

که  $\theta_0$  چرخش شمع است وقتی که لنگر به مقدار ماکزیمم خود در سیکل اول بارگذاری می‌رسد و  $\Delta\theta(N)$  از رابطه زیر محاسبه می‌شود:

$$\Delta\theta(N) = \theta_s T_b(\zeta_b, R_d) T_c(\zeta_c) N^{0.31} \quad (7)$$

در این رابطه  $\theta_s$  چرخش شمع تحت بار استاتیکی معادل بار ماکزیمم سیکلیک است.  $T_b$  و  $T_c$  توابع بدون بعد و  $R_d$  و چگالی نسبی ماسه هستند و  $\zeta_b$  و  $\zeta_c$  از روابط زیر بدست می‌آیند:

در رابطه بالا  $N$  تعداد سیکل،  $\varepsilon_1$  کرنش بعد از اولین سیکل و توان  $m$  تابع مشخصات خاک، جنس شمع، روش نصب و مشخصات بارگذاری است.

#### ۲-۲- پژوهش‌های لانگ و ونست [11]

این پژوهش‌ها با نتایج حاصل از آزمایش‌های میدانی روی ۳۴ شمع مختلف از نظر طول، قطر، جنس و روش نصب تحت بار جانبی سیکلیک فرمول زیر را برای تغییر مکان تجمعی جانبی در سطح زمین بعد از  $N$  سیکل بارگذاری ارائه کردند:

$$\varepsilon_n = \frac{A.H}{EI^{0.4}(\eta_{hN})^{0.6}} + \frac{B.M}{EI^{0.6}(\eta_{hN})^{0.4}} \quad (2)$$

در این رابطه  $EI$  سختی خمشی شمع،  $\eta_{hN}$  ضریب عکس‌العمل خاک برای سیکل  $N$  ام بارگذاری،  $H$  و  $M$  بار و لنگر افقی که در سطح زمین اعمال می‌شوند و  $A$  و  $B$  کمیت‌های اسکالر که براساس طول و سختی نسبی شمع  $T_r = (EI/\eta_{hN})^{0.2}$  تعیین می‌شوند.

در رابطه (۲) تمامی متغیرها به جز  $\eta_{hN}$  که از رابطه (۳) به دست می‌آید قابل محاسبه‌اند.

$$\eta_{hN} = \eta_{h1} \cdot N^{-t} \quad (3)$$

که  $\eta_{h1}$  ضریب عکس‌العمل خاک برای سیکل اول است و به چگالی خاک و سطح آب زیرزمینی بستگی دارد.

#### ۲-۳- تحقیقات لین و لیا [12]

براساس ۲۶ آزمایش بزرگ مقیاس روی شمع‌های تحت بار سیکلیک ( $N < 50$ ) یک روند لگاریتمی برای محاسبه کرنش تجمعی  $\varepsilon_n$  در سطح زمین برای  $N$  سیکل بارگذاری شده است:

$$\varepsilon_n = \varepsilon_1 [1 + t \ln(N)] \quad (4)$$

که  $t$  پارامتر اثر کاهندگی است و از رابطه زیر بدست می‌آید:

فرکانس ۰/۲۵ هرتز به شمع‌ها اعمال می‌شود. تغییر مکان تجمعی سر شمع  $y$  بعد از  $N$  سیکل بارگذاری با فرمول زیر تخمین زده می‌شود:

$$y = D f_N A_s \left( 100 \frac{H}{D^2 L Q_c} \right)^{\alpha_s} \quad (10)$$

که  $H$  مقدار بار اعمالی افقی در سر شمع،  $Q_c$  نرخ تغییرات مقاومت مخروط CPT در عمق،  $A_s$  و  $\alpha_s$  پارامترهای بدون بعد سختی خاک بسته به مشخصات خاک و ابعاد شمع است.  $f_N$  متغیر اصلاح تغییر مکان استاتیکی به تغییر مکان سیکلیک است که از رابطه (۱۱) به دست می‌آید:

$$f_N = 1 + \frac{N-1}{N} \beta_{N1} (\ln(\beta_{N2} + 1)) \quad (11)$$

پارامترهای  $\beta_{N1}$  و  $\beta_{N2}$  از نمودارهایی بر حسب  $\frac{y}{D}$  در مقابل تعداد سیکل  $N$  بدست می‌آید.

۷-۲- پژوهش‌های کلینکورت و هددال [16]

کلینکورت و هددال با استفاده از دستگاه سانتریفیوژ رفتار شمع‌های صلب با لاغری ۶ در خاک ماسه‌ای اشباع و خشک متراکم را بررسی کردند. در این آزمایش‌ها شمع‌ها تحت ۵۰۰ سیکل با فرکانس و چگالی خاک مشابه قرار گرفته و رابطه زیر را برای تغییر مکان جانبی شمع ارائه کردند:

$$\varepsilon_n = \varepsilon_1 N^{T_b} (\zeta_{bb}) T_c (\zeta_{cc}) \quad (12)$$

که  $\zeta_{cc}$  و  $\zeta_{bb}$  مطابق زیر تعریف می‌شوند:

$$\zeta_{bb} = \frac{P_{max}}{P_u} \quad (13)$$

$$\zeta_{cc} = \frac{P_{min}}{P_{max}} \quad (14)$$

که  $P_u$  ظرفیت نهایی باربری جانبی، تحت بارگذاری استاتیکی اعمالی به سر شمع است و  $P_{min}$  و  $P_{max}$  ماکزیمم و مینیمم باری هستند که در هر سیکل به شمع وارد می‌شوند.

$$\zeta_b = \frac{M_{max}}{M_R} \quad (8)$$

$$\zeta_c = \frac{M_{min}}{M_{max}} \quad (9)$$

که  $M_{min}$  و  $M_{max}$  به ترتیب لنگرهای ماکزیمم و مینیمم بار سیکلیک هستند و  $M_R$  ظرفیت لنگر استاتیکی است.

۵-۲- پژوهش‌های آلدریست و همکاران [14]

آزمایش‌ها به وسیله مدل سازی فیزیکی در سانتریفیوژ، به منظور بررسی آثار تغییر قطر و طول آزاد بر ظرفیت باربری جانبی انجام شد. تراکم خاک در کلیه آزمایش‌ها ۶۰٪ و قطر شمع‌های آزمایش شده ۲/۲ و ۴/۴ متر است. طبق مشاهدات آلدریست در طول بارگذاری سیکلیک عمق مدفون شمع می‌تواند تغییر کند که بر جابه‌جایی تجمعی تأثیرگذار است. در شکل (۲) نمودار تغییرات جابه‌جایی تجمعی بر حسب تعداد سیکل نشان داده شده است.

شکل ۲. نمودار جابه‌جایی تجمعی در آزمایش‌های آلدریست

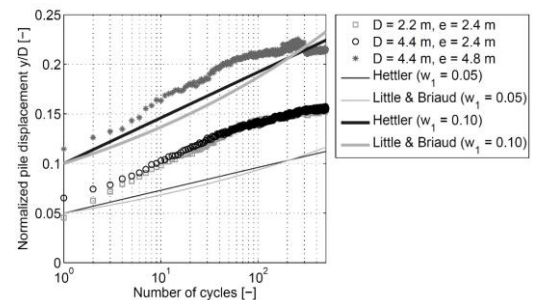


Fig. 2. Accumulation displacement [14]

۶-۲- پژوهش‌های بین و همکاران [15]

این روش بر پایه آزمایش‌هایی است که روی مونوپایل‌های کوچک نصب شده در خاک ماسه‌ای با تراکم متوسط تحت شتاب ۱g و ۲۰۰g (در سانتریفیوژ) انجام شده است. شمع‌های تحت آزمایش دارای قطر واقعی ۲/۴ متر ( $D$ )، عمق مدفون ۹/۶ متر ( $L$ ) برای شمع‌های صلب و  $12/5D$  برای شمع‌های انعطاف پذیر است. به وسیله امواج سینوسی بارگذاری یک طرفه با تعداد سیکل تقریباً ۱۰۰۰۰ سیکل و

این روند تحت بارگذاری‌های مختلف مبهم است. همچنین نتایج برخی پژوهش‌ها در خصوص روند تغییرات جابه‌جایی تجمعی با یکدیگر در تناقض است. در این پژوهش به کمک مدل‌سازی فیزیکی در شرایط Ng نخست ظرفیت باربری نهایی یک مونوپایل تعیین خواهد شد. پس از آن منحنی‌های p-y در اعماق مختلف استخراج شده و با منحنی‌های p-y آیین‌نامه‌های موجود مقایسه می‌شود. سپس ۳ آزمایش با بارگذاری سیکلیک یک‌طرفه به منظور ارزیابی پارامترهای دامنه بارگذاری، تعداد سیکل و فرکانس بار بر میزان جابه‌جایی‌ها انجام شده و نتایج مورد بحث قرار می‌گیرد.

### ۳- مدل‌سازی

#### ۳-۱- طراحی مدل

مدل مونوپایل با نسبت طول آزاد به قطر  $(e/D=7)$  و عمق مدفون به قطر  $(L/D=5)$  انتخاب شد و مشخصات هندسی مدل در شکل (۳) نشان داده شده است (ابعاد به سانتی‌متر ذکر شده‌اند). در هر یک از آزمایش‌ها ۱۲ لایه خاک در لایه‌های  $2/5$  سانتی‌متری ریخته و متراکم شده است (روش تراکم مرطوب). پس از اتمام ساخت نمونه دستگاه بارگذاری نصب شده و محفظه خاک به داخل ساتنریفیوژ منتقل می‌شود. در این مرحله شمع مدل به صورت قائم تا عمق ۲۵ سانتی‌متر در خاک کوبیده می‌شود. پس از کوبش شمع حرکت ساتنریفیوژ آغاز شده و بارگذاری‌های مورد نظر در شتاب  $40g$  اعمال می‌شود. با توجه به قوانین مقیاس در محیط ساتنریفیوژ، نسبت هندسی بین واقعیت و مدل در این پژوهش برابر ۴۰ است.

شکل ۳. شکل شماتیک چگونگی قرارگیری مونوپایل در مدل

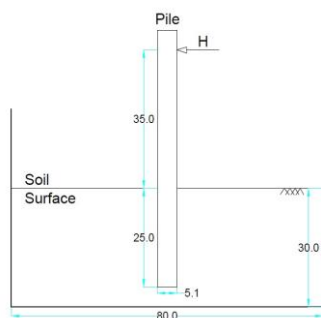


Fig. 3. Schematic diagram of the physical model

طبق مشاهدات کلینکورت و همکارانش در ساتنریفیوژ مشخص شد بیشترین خرابی در بارگذاری یک‌طرفه اتفاق می‌افتد. همچنین برخلاف مشاهدات لبلانک تحت بارگذاری دوطرفه متقارن شمع از موقعیت اولیه خود تغییر مکان می‌دهد.

#### ۲-۸- پژوهش‌های کرکوود و هیگ [17]

در این مطالعه مدل‌سازی ساتنریفیوژ در شتاب  $100g$  به کمک چهار آزمایش روی شمع با قطر  $4/5$  متر انجام شد. طول شمع ۵۰ متر، طول آزاد ۳۰ متر و عمق مدفون ۲۰ متر است. در هر آزمایش ۱۰۰۰ سیکل بار افقی به شمع اعمال شد. خاک آزمایش شده خاک ماسه‌ای خشک با تراکم  $60\%$  است. طبق مشاهدات صورت گرفته برخلاف نتایج مشاهدات قبلی بیشترین تغییر مکان در بارگذاری دوطرفه با  $\zeta_c = -0.37$  مشاهده شد.

#### ۲-۹- پژوهش‌های شیرزاده و همکاران [18]

شیرزاده با استفاده از دستگاه ساتنریفیوژ به مدل‌سازی و مطالعه رفتار استاتیکی شمع با قطر واقعی ۲ متر پرداخت. خاک استفاده شده در آزمایش‌ها ماسه با تراکم  $60\%$  بوده است. نتایج بدست آمده توسط شیرزاده به شرح زیر است:

طبق منحنی‌های p-y موجود در آئین‌نامه API [8] مدول عکس‌العمل اولیه بستر ۲۳ برابر مقدار بدست آمده در آزمایش‌ها می‌باشد. که این به معنای محافظه‌کارانه بودن منحنی‌های API است. با افزایش عمق مدفون باربری جانبی شمع افزایش می‌یابد که این افزایش به صورت غیرخطی می‌باشد. لنگر بیشینه در یک سوم بالایی عمق مدفون خاک رخ می‌دهد.

#### ۲-۱۰- جمع‌بندی

در این بخش پیشینه‌ای از مطالعه رفتار مونوپایل تحت اثر بار جانبی ارائه شد. ظرفیت باربری مونوپایل‌ها، سختی سیستم خاک-شمع و روند تغییرات جابه‌جایی تجمعی مونوپایل‌ها در بارگذاری سیکلیک توسط پژوهشگران مختلفی بررسی شده است ولی به علت محدود بودن مطالعات انجام شده، همچنان

ریل و چهار واگن به محفظه اعمال بار و توسط آن به شفت بارگذاری منتقل می شود. شفت بارگذاری به کمک یک گیره مونوپایل را به صورت کنترل شده جابه جا می کند. در شکل (۵) تجهیزات دستگاه بارگذاری نشان داده شده است.

شکل ۵. تجهیزات مورد استفاده در ساخت دستگاه بارگذاری (الف) استپرموتور (ب) بال اسکرو (ج) ریل و واگن راهنما (د) قاب سیستم بارگذاری

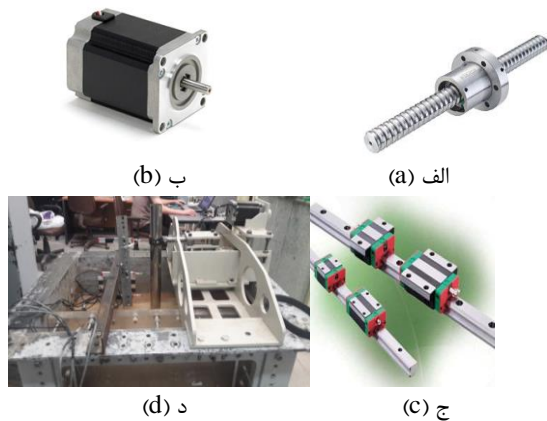


Fig. 5. Loading system equipment

- a) Stepper motor    b) Ball screw  
c) Rail                d) Loading frame

۳-۲-۴- ابزارهای رفتارنگاری  
به منظور رفتارنگاری اندرکنش خاک و شمع در حین آزمایش از مبدل‌ها<sup>۴</sup> یا سنسورهایی به شرح زیر استفاده شده است:  
- کرنش سنج<sup>۵</sup>: به منظور اندازه گیری کرنش و در نتیجه لنگر در طول شمع و با فواصل ۵ سانتی متر ۶ جفت کرنش سنج FLA5-11 نصب شده است. مدار کرنش سنج‌ها به صورت نیم پل<sup>۶</sup> بسته شده است.  
- تغییر مکان سنج خطی<sup>۷</sup>: ۲ تغییر مکان سنج برای اندازه گیری تغییر مکان سرشمع و یک نقطه دیگر در طول شمع نصب شده است.  
- نیروسنج<sup>۸</sup>: برای محاسبه نیروی اعمالی به شمع یک نیروسنج به ظرفیت ۱۰۰۰ کیلوگرم استفاده شده است.

4 Transducer  
5 Strain Gauge  
6 Half Bridge  
7 Linear Variable Differential Transformer (LVDT)  
8 Load Cell

۳-۲- تجهیزات

۳-۲-۱- سانتریفیوژ ژئوتکنیکی دانشگاه تهران

سانتریفیوژ ژئوتکنیکی دانشکده فنی دانشگاه تهران ساخت شرکت اکتیدین<sup>۱</sup> فرانسه و از مدل C67-2 است. این سانتریفیوژ از نوع سانتریفیوژهای بازویی<sup>۲</sup> بوده که دارای سکوی شناور<sup>۳</sup> است. در این پژوهش از اتصالات لغزشی برای انتقال داده‌ها استفاده شده است [19]. در شکل (۴) سانتریفیوژ دانشکده مهندسی عمران دانشگاه تهران نشان داده شده است.

شکل ۴. سانتریفیوژ ژئوتکنیکی دانشگاه تهران



Fig. 4. Geotechnical centrifuge in University of Tehran

۳-۲-۲- محفظه خاک

محفظه خاک این پژوهش دارای طول ۸۰ سانتی متر، عرض ۴۰ سانتی متر و ارتفاع ۵۰ سانتی متر است. ۳ وجه این محفظه از ورق‌های فولادی به ضخامت ۱ سانتی متر و وجه چهارم از یک ورق پلکسی گلس به ضخامت ۴ سانتی متر ساخته شده است.

۳-۲-۳- دستگاه بارگذاری جانبی

سیستم بارگذاری و قاب نگه دارنده آن در سال ۱۳۹۳ توسط شیرزاده و خدایی ساخته شده است [18]. سیستم بارگذاری موجود از یک استپرموتور تشکیل شده و سازوکار عملکرد آن به این صورت است که با چرخش استپرموتور جابه جایی به دو عدد پولی و یک تسمه منتقل شده و این حرکت به انتهای یک بال اسکرو وارد می شود. بال اسکرو حرکت دورانی را به حرکت انتقالی تبدیل می کند. این حرکت انتقالی توسط دو عدد

1 ACTIDYN SYSTEMS  
2 Beam Centrifuge  
3 Swinging Platform

استنلس استیل ۳۱۶ با مدول الاستیسته برابر  $210 \times 10^6 \frac{kg}{cm^2}$  برای شمع مدل انتخاب شد.

نمای کلی نمونه آزمایش با موقعیت جابه‌جایی سنج‌ها و نیروسنج در شکل (۶) ارائه شده است.

شکل ۶. موقعیت ابزار اندازه‌گیری و موقعیت شمع

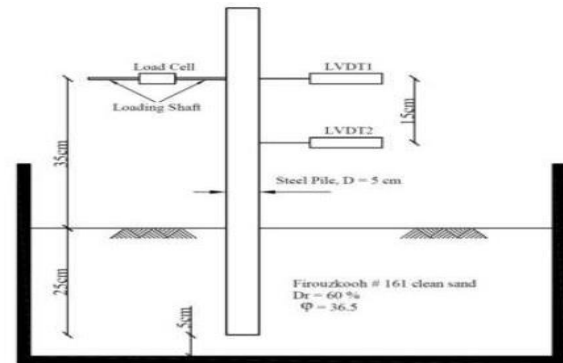


Fig. 6. Pile and LVDTs Location in model

#### ۴- برنامه آزمایش‌ها

در این پژوهش پس از راه‌اندازی و کنترل سیستم بارگذاری جدید، مجموعاً ۴ 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 است. در ابتدا یک آزمایش مونوتونیک برای بدست آوردن ظرفیت مونوپایل انجام شد. سپس ۳ آزمایش با بارگذاری سیکلیک که مشخصات آن‌ها در جدول (۲) ارائه شده است، انجام شد. متغیرهای اصلی در این پژوهش ماکزیمم بار در هر سیکل و فرکانس بارگذاری سیکلیک هستند.

جدول ۲. برنامه آزمایش‌های انجام شده

Test No	Type	Number of cycles	f(Hz)	H <sub>max</sub> (kg)	H <sub>min</sub> (kg)
1	Monotonic	---	---	---	---
2	Cyclic	130	0.10	30	10
3	Cyclic	70	0.05	30	10
4	Cyclic	130	0.10	60	20

#### ۵- نتایج

در این بخش نتایج مربوط به مدل‌سازی‌های فیزیکی انجام شده ارائه می‌شود. شایان ذکر است نتایج استخراج شده از آزمایش‌ها با توجه به قوانین مقیاس به مقادیر مربوط به مونوپایل واقعی تبدیل شده و در این بخش ارائه شده‌اند.

##### ۵-۱- ظرفیت مونوپایل

در منحنی نیرو تغییر مکان سر شمع نقطه مشخصی برای یافتن ظرفیت نهایی مشخص نیست. مطابق معیار کلینکورت [16] و لبلانک [13] ماکزیمم دوران برای محاسبه ظرفیت باربری

#### ۳-۳- مشخصات مصالح خاکی

خاک مورد استفاده در ساخت مدل‌های فیزیکی، ماسه ۱۶۱ فیروزکوه و با تراکم نسبی ۶۰ درصد و با رطوبت ۵ درصد است. مشخصات مکانیکی ماسه فیروزکوه در جدول (۱) ارائه شده است.

جدول ۱. مشخصات کامل ماسه استاندارد فیروزکوه ۱۶۱

C (kPa)	Φ (deg)	D <sub>60</sub> (mm)	D <sub>50</sub> (mm)	D <sub>30</sub> (mm)	D <sub>10</sub> (mm)	USCS
0	36.5	0.3	0.27	0.21	0.16	SP

Table 1. Firoozkooh sand-161 properties

#### ۳-۴- شمع

شمع استفاده شده در این پژوهش لوله‌ای با قطر خارجی ۵۱ و ضخامت ۱ میلی‌متر است. بر اساس قوانین مقیاس سانتریفیوژ این شمع در شتاب ۴۰g یک مونوپایل با قطر ۲/۰۴ متر در واقعیت را مدل‌سازی نماید. با توجه به این که مونوپایل‌های مورد استفاده در دریا معمولاً از فولاد با مدول الاستیسته  $210 \times 10^6 \frac{kg}{cm^2}$  ساخته می‌شوند به همین جهت لوله‌ای از جنس

شکل (۸) تغییر شکل شمع را نشان می دهد. نمودار خط چین نشان دهنده تغییر مکان با فرض رفتار کاملاً صلب و با استفاده از نتایج جابه جایی سنج ها و نمودار پیوسته مربوط به نتیجه حل دقیق معادله دیفرانسیل تغییر مکان شمع است. مطابق این شکل عمق چرخش شمع واقعی در آزمایش معادل ۶/۴۹ متر به دست آمده است. همچنین مقایسه دو نمودار نشان دهنده آن است که تغییر شکل مونوپایل به صورت تغییر شکل جسم صلب است.

### ۳-۵- مقایسه نتایج با API

منحنی  $p-y$  ارائه شده در API تابع مشخصات خاک، قطر شمع و عمق مورد بررسی است. در این بخش بر اساس نتایج آزمایش مونوتونیک و با توجه به مشخصات خاک مورد آزمایش و همچنین قطر مونوپایل منحنی  $p-y$  برای شمع واقعی منطبق بر آیین نامه API برای اعماق  $Z=2D$  و  $Z=D$  محاسبه شده است. همچنین منحنی های  $p-y$  حاصل از آزمایش استخراج شده اند. چگونگی به دست آوردن این منحنی ها بدین گونه است که برای محاسبه تنش ناشی از خاک ( $p$ )، از توابع لنگر موجود دو مرتبه مشتق گرفته می شود و با قرار دادن عمق های مختلف شمع در خاک نمودار  $p-y$  حاصل از آزمایش ها بدست می آید. نمودارهای مربوط به روش API و آزمایش صورت گرفته در شکل (۹) ارائه شده است.

شکل ۹. نمودار  $p-y$  به دست آمده از آزمایش و روش API

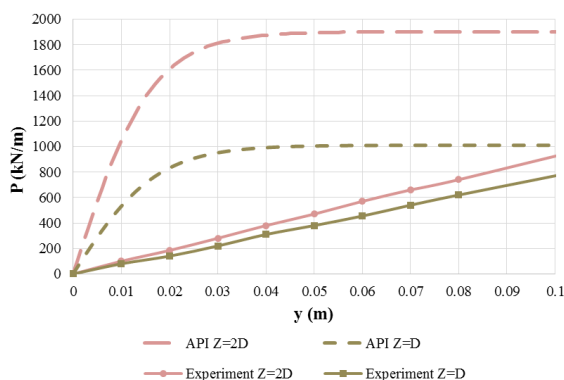


Fig. 9.  $p-y$  curves based on API and current test

مونوپایل به  $\theta = 4^\circ$  محدود شده است. شکل (۷) نمودار نیرو تغییر مکان سرشمع واقعی را نشان می دهد.

شکل ۷. بدست آوردن ظرفیت نهایی جانبی مونوپایل با استفاده از معیار چرخش ۴ درجه

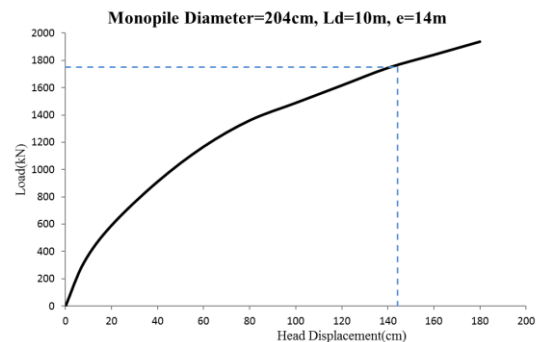


Fig. 7. Ultimate Lateral bearing capacity of monopile based on 4 deg rotation method

با در نظر گرفتن زاویه چرخش ۴ درجه به عنوان معیار گسیختگی ظرفیت باربری مونوپایل ۱۷۵۰ کیلونیوتن به دست آمد.

### ۲-۵- تغییر شکل نهایی مونوپایل

در آزمایش اول با فرض رفتار صلب می توان به کمک نتایج جابه جایی سنج ها به راحتی تغییر شکل تقریبی شمع را محاسبه کرد. همچنین به کمک معادله دیفرانسیل تغییر مکان تیر (رابطه ۱۵) و استفاده از دو شرط مرزی تغییر مکانی تغییر شکل دقیق شمع قابل محاسبه است [20].

$$EI \frac{d^2 y}{dx^2} = M(x) \quad (15)$$

شکل ۸. نمودار تغییر شکل شمع واقعی

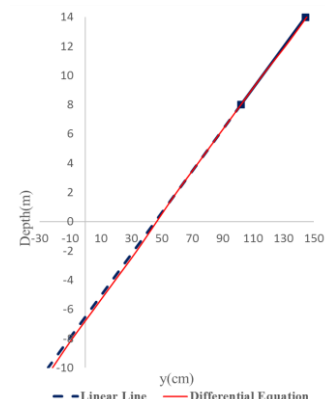


Fig. 8. Pile deflection (prototype)



در روابط فوق  $H_{min}$  و  $H_{max}$  به ترتیب کمترین و بیشترین نیروی اعمالی در هر سیکل و  $H_{static}$  ظرفیت مونوپایل است.

جدول ۳. نتایج جابه‌جایی و دوران مونوپایل واقعی در آزمایش‌های مختلف

Test No	$\zeta_b$	$\zeta_c$	Cycle	$y_{max}(cm)$	$\Theta_{max}(deg)$
1	1	0	0	142.5	4.0
2	0.27	0.33	120	29.6	0.79
3	0.27	0.33	60	27.2	0.81
4	0.55	0.33	120	67.7	2.12

Table 3. Maximum displacement and rotation of monopile in tests (prototype)

مطابق جدول (۳) بیشترین جابه‌جایی در آزمایش اول که به صورت مونوتونیک بوده اتفاق افتاده است. در بین آزمایش‌های سیکلیک بیشترین جابه‌جایی‌ها مطابق انتظار در آزمایش چهارم اندازه‌گیری شده است. شکل‌های (۱۰ و ۱۱) روند افزایش جابه‌جایی را در آزمایش‌های سیکلیک نشان می‌دهند.

شکل ۱۰. جابه‌جایی ماکزیمم بر حسب تعداد سیکل

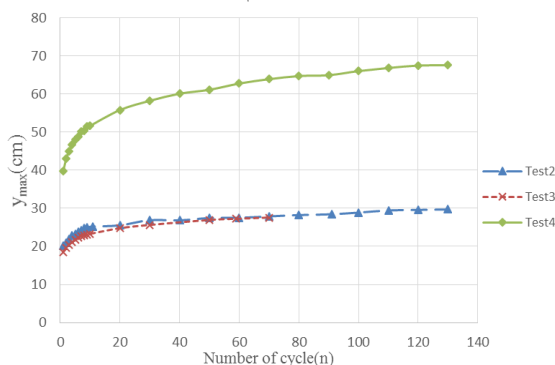


Fig. 10. Maximum displacements as a function of Number of cycles

شکل ۱۱. جابه‌جایی مینیمم بر حسب تعداد سیکل

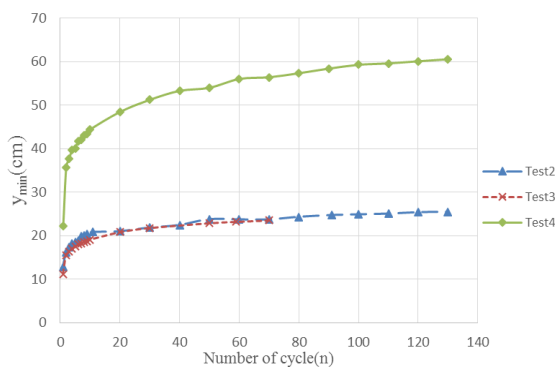


Fig. 11. Minimum displacements as a function of Number of cycles

با توجه به شکل (۹) مشخص است، با افزایش عمق، میزان ظرفیت باربری جانبی نیز افزایش می‌یابد. همچنین با توجه به نمودارهای  $p-y$  ارائه شده در API و نمودارهای  $p-y$  حاصل از آزمایش، اختلاف بسیار زیادی در ارتباط با این دو نمودار و در واقع سختی اولیه آن‌ها وجود دارد. نسبت سختی اولیه محاسبه شده به روش API به سختی اولیه محاسبه شده بر اساس آزمایش انجام شده در عمق  $Z=D$  برابر  $4/7$  و در عمق  $Z=2D$  برابر  $6/8$  است. در واقع می‌توان نتیجه گرفت آیین‌نامه API سختی اولیه مونوپایل در خاک ماسه‌ای را بسیار دست بالا تخمین می‌زند. نرمی منحنی‌های  $p-y$  برای شمع‌های صلب در خاک‌های ماسه‌ای در کارهای آزمایشگاهی اخیر گزارش شده است [14، 16 و 21].

علت این اختلاف بین نتایج را می‌توان به خاطر افزایش محدوده تاثیر تنش در توده خاکی عنوان کرد. همچنین با توجه به طول آزاد زیاد مونوپایل‌ها اثر همزمانی بار جانبی و لنگر باعث نشست بیشتر و سختی کمتر آن‌ها می‌شود. بنابراین می‌توان نتیجه گرفت با توجه به اینکه منحنی‌های  $p-y$  موجود در آیین‌نامه API بر اساس آزمایش‌هایی روی شمع‌های لاغر ارائه شده‌اند، نیازمند تغییرات جدی به منظور لحاظ نمودن شرایط مونوپایل هستند.

#### ۴-۵- نتایج آزمایش‌های سیکلیک

همان‌گونه که پیش‌تر عنوان شد در این پژوهش یک آزمایش با بارگذاری مونوتونیک و سه آزمایش با بارگذاری سیکلیک کنترل شده توسط نیرو به شمع اعمال شد و تغییرات جابه‌جایی در نمودارهای هیسترتیک و جابه‌جایی ماکزیمم و مینیمم بر حسب سیکل بررسی شد. در جدول (۳) نتایج چهار آزمایش به طور خلاصه آورده شده است. مطابق مطالب موجود در ادبیات فنی پارامترهای زیر به منظور معرفی بارگذاری سیکلیک ارائه می‌شود [16].

$$\zeta_b = \frac{H_{max}}{H_{static}} \quad \zeta_c = \frac{H_{min}}{H_{max}} \quad (16 \text{ و } 17)$$

طبق نمودارهای ارائه شده می توان نتیجه گرفت با تغییر فرکانس در محدوده ۰/۰۵ تا ۰/۱ هرترز تغییر ملموسی در جابه جایی و دوران شمع اتفاق نمی افتد، ولی عمق نقطه دوران جابه جا می شود.

## ۶- نتیجه گیری

در این پژوهش در ابتدا یک آزمایش مونوتونیک انجام شد که بر اساس آن نتایج زیر حاصل شد:

- رفتار سازه مونوپایل تا حد گسیختگی تعریف شده در ادبیات فنی به صورت صلب بوده، بنابر این سازوکار گسیختگی مونوپایل ها مشابه شمع های کوتاه و صلب خواهد بود.

- محاسبه ظرفیت باربری جانبی مونوپایل به کمک روابط موجود امکان پذیر نبوده و این امر نیازمند مدل سازی عددی یا آزمایشگاهی است.

- ماکزیمم لنگر در عمقی حدود ۲۰٪ طول فرورفت مونوپایل در خاک رخ داده است.

- دوران مونوپایل حول نقطه ای در عمق ۶۵٪ طول فرورفت اتفاق می افتد.

- سختی اولیه مونوپایل ها بسیار کمتر از سختی اولیه محاسبه شده توسط آیین نامه API است (۱۴ تا ۲۰ درصد آیین نامه).

پس از انجام آزمایش مونوتونیک، سه آزمایش سیکلیک با بارگذاری های متفاوت انجام شد که نتایج آن ها بر اساس منحنی های نیرو-تغییر مکان سرشمع، جابه جایی های ماکزیمم و مینیمم و در هر سیکل، لنگر در طول شمع و تغییر شکل سازه شمع، نتایج زیر به دست آمد:

- جابه جایی تجمعی سرشمع بر حسب تعداد سیکل به صورت افزایشی بوده و نرخ افزایش در تمامی آزمایش ها به صورت کاهشی است.

- جابه جایی تجمعی سرشمع در تمام آزمایش ها و همچنین جابه جایی های بی بعد شده با دقت بسیار خوبی از یک روند لگاریتمی پیروی می کند.

نمودارهای فوق بیانگر آن هستند که جابه جایی سر مونوپایل بر حسب شماره سیکل از یک روند لگاریتمی پیروی می کند. در تمامی آزمایش ها در اطراف شمع حفره ایجاد شده که این به معنی کاهش عمق گیرداری در طول آزمایش است. روند لگاریتمی تغییرات جابه جایی نشان دهنده روند افزایشی سختی خاک است. علت اصلی افزایش سختی، افزایش تراکم نسبی و به تبع آن افزایش چگالی خاک در اطراف شمع است. در پژوهش های گذشته به افزایش سختی شمع تحت بار سیکلیک اشاره شده است [13]. کونلار نیز به پدیده تراکم خاک ماسه ای تحت بار چرخه ای و تأثیر آن بر افزایش سختی اشاره کرده است [22].

در تمامی آزمایش های سیکلیک حدود ۶۰٪ از جابه جایی های نهایی در دو سیکل اول اتفاق افتاده است. با توجه به تغییرات جابه جایی پس از حدود ۱۰۰ سیکل، به نظر می رسد پس از تعداد مشخصی سیکل این روند تقریباً متوقف می شود. البته این موضوع مستلزم بررسی های بیشتر است.

با توجه به نتایج استرین گیج ها مقدار لنگر خمشی در طول شمع قابل محاسبه است. در این بخش لنگر خمشی در طول شمع در سیکل ۶۰م در آزمایش های مختلف محاسبه شده و بر اساس آن نتایج مربوط به تغییر شکل شمع در شکل (۱۲) ارائه شده است.

شکل ۱۲. تغییر شکل شمع در سیکل ۶۰م آزمایش های مختلف

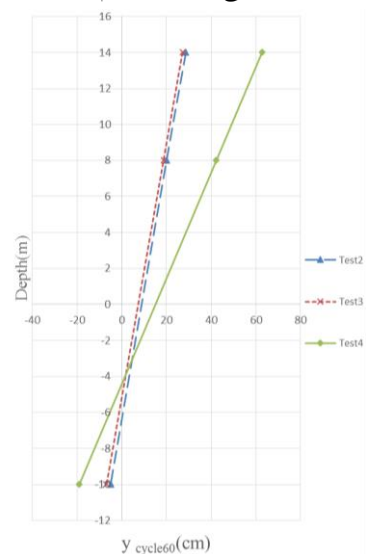


Fig. 12. Pile displacement in 60<sup>th</sup> cycle

Division, Civil Engineering Department, Texas A&M University, College Station, TX, USA, 1988.

[11] Long, J. H., and G. Vanneste, "Effects of cyclic lateral loads on piles in sand". *Journal of Geotechnical Engineering*, ASCE 120 (1):225-244, 1994.

[12] Lin SS and Liao JC, "Permanent Strains of Piles in Sand due to Cyclic Lateral Loads". *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering* 125(9): 789-802, 1999.

[13] C. LeBlanc, G. T. Houlsby, and B. W. Byrne, "Response of stiff piles in sand to long-term cyclic lateral loading". *Geotechnique*, 60(2):79-90, 2010a. M3:10.1680/geot.7.00196.

[14] E. A. Alderlieste, "Experimental modelling of lateral loads on large diameter mono-pile foundations in sand," Delft University of Technology, Delft, 2011.

[15] Bienen, B., J. Dührkop, J. Grabe, M. F. Randolph, and D. J. White, "Response of piles with wings to monotonic and cyclic lateral loading in sand". *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering* 138 (3):364-375, 2012.

[16] Klinkvort, Rasmus Tofte. Centrifuge modelling of drained lateral pile-soil response. Diss. Ph. D. thesis, DTU, 2012.

[17] Kirkwood, P, B. & Haigh. S. K, "Centrifuge testing of monopiles for offshore wind turbines". *Proc. ISOPE*, Anchorage, 2013.

[18] Shirzadeh N. Centrifuge modelling of monopiles under lateral loading (MSc Thesis, University of Tehran). (In Persian)

[19] Moradi, M., and A. Ghalandarzadeh. "A new geotechnical centrifuge at the University of Tehran, IR Iran." *Proceedings of the Conference on Physical Modeling in Geotechnics*. Vol. 28. 2010.

[20] Rosquoet, Frédéric, et al. "Lateral cyclic loading of sand-installed piles." *Soils and foundations* 47.5 (2007): 821-832.

[21] Choo, Yun Wook, and Dongwook Kim. "Experimental Development of the p-y Relationship for Large-Diameter Offshore Monopiles in Sands: Centrifuge Tests." *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering* 142.1 (2015): 04015058.

[22] Cuéllar, Pablo. "Pile foundations for offshore wind turbines: numerical and experimental investigations on the behaviour under short-term and long-term cyclic loading." (2011).

- مقادیر ماکزیمم لنگر مشابه آزمایش مونوتونیک در تمام سیکل‌ها در عمقی حدود ۲۰٪ طول فرورفت مونوپایل در خاک رخ داد.

- دوران مونوپایل حول نقطه‌ای در عمق بین ۳۰ تا ۷۵٪ طول فرورفت اتفاق می‌افتد.

- تغییر فرکانس بارگذاری تأثیری بر جابه‌جایی تجمعی ندارد ولی با کاهش فرکانس عمق چرخش مونوپایل پایین‌تر رفته و تنش بیشتری در سازه شمع ایجاد می‌شود.

## References

## ۷-مراجع

[1] Colmenar-Santos A, Perera-Perez J, Borge-Diez D. Offshore wind energy: A review of the current status, challenges and future development in Spain. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. 2016 Oct 31;64:1-8

[2] Wind in power, 2016 European statistics, Published in February 2017

[3] Abdel-Rahman, K., and M. Achmus. "Finite element modelling of horizontally loaded monopile foundations for offshore wind energy converters in Germany." *Proceedings of the international symposium on frontiers in offshore geotechnics*. Taylor and Francis, Perth. 2005.

[4] Negro, Vicente, et al. "Monopiles in offshore wind: Preliminary estimate of main dimensions." *Ocean Engineering* 133 (2017): 253-261.

[5] Hansen JB, Brinch-Hansen J, Hansen JB. The ultimate resistance of rigid piles against transversal forces. 1961.

[6] Byrne, B. W., et al. "PISA: new design methods for offshore wind turbine monopiles." (2018).

[7] Byrne BW, Houlsby GT. Foundations for offshore wind turbines. *Philosophical Transactions of the Royal Society of London A: Mathematical, Physical and Engineering Sciences*. 2003 Dec 15;361(1813):2909-30.

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

[9] DNV (Det Norske Veritas) OS-J 101: Design of Offshore Wind Turbine Structures. Det Norske Veritas, Oslo, Norway, 2014.

[10] Little, R. L., and J.-L. Briaud, "Full scale cyclic lateral load tests on six single piles in sand". *Miscellaneous paper GL-88-27*, Geotechnical

# Centrifuge Modelling of Monopiles under Cyclic Lateral Loads

M.Shahidikhah<sup>1\*</sup>, M.Moradi<sup>2</sup>

1- Ph.D. candidate in Geotechnical Eng., Faculty of Civil Eng., University of Tehran

2- Associate Prof., Geotechnical Eng. Dept., Faculty of Civil Eng., University of Tehran

\*shahidi\_civil@ut.ac.ir

## Abstract:

Wind turbines are considered as an important element of the renewable energy structure. Offshore wind turbines are tending to be more efficient than onshore because wind speed and direction are more consistent. Monopiles are widely used for offshore wind turbines at present. They are always subjected to significant cyclic lateral loads due to wind and wave excitation. Monopiles are hollow cylindrical steel piles with a circular cross-section and a length to diameter ratio of less than 10 ( $L/D < 10$ ). Currently, the design of monopiles is based on experiments performed on slender piles. Since monopiles behave rigidly, finding their action seems to be very necessary for accurate analysis and design of these structures.

In order to better understand the performance of monopiles under static and cyclic lateral loads, a series of static and cyclic lateral load tests was conducted on a stainless steel monopile in the geotechnical centrifuge. The main goal of this study is the examination of accumulated lateral displacement of a monopile foundation for an offshore wind turbine with a large diameter subjected to wind and wave loads. In this article, the lateral responses of a large diameter monopile under one-way force-controlled cyclic lateral loads are described and accumulated permanent pile shaft lateral displacements caused by cyclic lateral loads are discussed. All tests were performed in beam centrifuge. Monopile was installed in Firoozkooch-161 sand in this study. The centrifuge tests were carried out at different cyclic load and magnitude ratios insights into the ongoing development of net stresses and bending moment.

In this research, 4 Tests were designed and implemented to centrifuge modeling the action of monopiles in sandy soils. Tests were carried at physical modeling laboratory of the school of civil engineering at the University of Tehran. The first experiment was initially conducted to estimate the ultimate capacity of these piles, and then the obtained results compared to similar research findings. Three other experiments were carried out to evaluate their behavior affected by cyclic lateral load and to determine cumulative displacements and deformation state. Consequently, the results were finally compared with findings of other researchers, regulations, and relationships available related to other used piles (with a diameter less than 2 m) in geotechnical projects. Results of the study indicate that the use of available regulations and instructions in estimating the lateral load-bearing capacity of these piles was conservative. However, this fact can lead to the achievement of unreliable and upper-hand results. Thus, the existing relationships and regulations need to be changed to provide accurate results related to these piles.

The major findings of this study are presented below:

-The estimation of the monopile lateral bearing capacity is impossible with existing formulas, and this requires numerical or physical modeling.

-The behavior of the monopile structure under lateral loading is rigid until the failure limit, so the failure mechanism of the monopiles will be similar to the short and rigid piles.

-Cumulative lateral displacement of the monopile head is ascending in the number of cycles, and its rate in all cyclic tests is reducing.

-The monopile has rotated around a point in the depth of 30 to 75 percent of the driving length.

-The maximum bending moment value in all cycles has occurred in the depth of about 20% of the driving length.

**Keywords:** Monopiles, Physical modelling, Cyclic lateral loading, Centrifuge