

مدل سازی سانتریفیوژ شمع بلند تحت بار جانبی با خروج از مرکزیت بار زیاد در ماسه

شهریار شیرازی^{۱*}، مجید مرادی^۲^۱ کارشناس ارشد ژئوتکنیک، دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه تهران، sh.shirazi@ut.ac.ir^۲ دانشیار دانشگاه دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه تهران، mmoradi@ut.ac.ir

چکیده

اطلاعات مقاله

در این مقاله، پنج آزمایش سانتریفیوژ بارگذاری جانبی شمع بلند با خروج از مرکزیت بار قابل ملاحظه در ماسه انجام شده است تا ضمن تعیین منحنی‌های $p-y$ آزمایشگاهی، اثرات تغییرات خروج از مرکزیت بار و تغییرات طول شمع بر رفتار جانبی شمع انعطاف‌پذیر، بررسی شود. مقایسه نتایج آزمایشگاهی با منحنی‌های پیشنهادی API (موسسه نفت آمریکا)، مشخص می‌سازد که آنچه امروزه به‌عنوان تفاوت رفتار مونوپایل‌ها و شمع انعطاف‌پذیر شناخته می‌شود، تا چه میزان می‌تواند تحت تأثیر خروج از مرکزیت بار باشد. علاوه بر آن، کارایی و دقت تجهیزات موجود در دانشگاه تهران نیز مورد بررسی قرار گرفته است. نتایج نشان می‌دهد که هرچند خروج از مرکزیت بار بر منحنی‌های $p-y$ تأثیر می‌گذارد، اما رویکرد طراحی فعلی حتی با وجود خروج از مرکزیت بار زیاد، می‌تواند به طراحی قابل قبول منجر شود. سختی اولیه در منحنی‌های $p-y$ در اکثر آزمایش‌ها کم‌تر از مقادیر دستورالعمل بوده و مدل هایپربولیک، برآورد نزدیک‌تری به نتایج آزمایشگاهی دارد.

تاریخچه مقاله:

تاریخ دریافت مقاله: ۱۴۰۰/۱۱/۲۸

تاریخ پذیرش مقاله: ۱۴۰۱/۱۰/۲۸

کلمات کلیدی:

شمع بلند

بار جانبی

خروج از مرکزیت بار

منحنی $p-y$

سانتریفیوژ

Centrifuge modelling of long piles subjected to lateral loading with high load eccentricity in sand

Shahriar Shirazi¹, Majid Moradi^{2*}¹ MSc, School of Civil Engineering, College of Engineering, University of Tehran, sh.shirazi@ut.ac.ir² Associate Professor, School of Civil Engineering, College of Engineering, University of Tehran, mmoradi@ut.ac.ir

ARTICLE INFO

Article History:

Received: 17 Feb 2022

Accepted: 18 Jan 2023

Keywords:

Long pile

Lateral load

Load eccentricity

 $p-y$ curves

Centrifuge

ABSTRACT

In this research paper, five centrifuge lateral loading tests of long piles with a considerable load eccentricity were carried out in the sand to investigate the impacts of the load eccentricity and pile length changes on the lateral behavior of a flexible pile beside the determination of experimental $p-y$ curves.

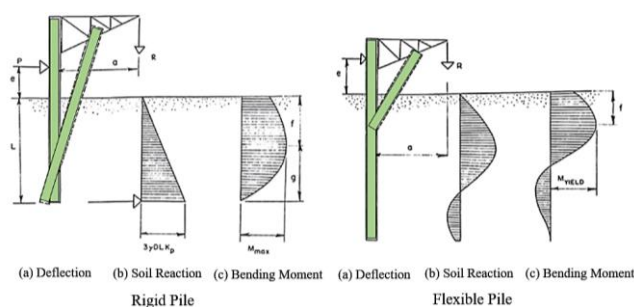
Comparing experimental test results with the recommended API (American Petroleum Institute) curves clarifies what is nowadays identified as the difference between the behaviors of monopiles and flexible piles how far can be affected by the load eccentricity. Additionally, the efficiency and accuracy of the available equipment at the University of Tehran have also been investigated. Results show that although the load eccentricity affects $p-y$ curves, the current design approach can lead to a proper design even at high load eccentricities. In most tests, the initial stiffness in $p-y$ curves is lower than that of the guidelines. Also, the hyperbolic model shows a closer estimation to the experimental test results.

۱ - مقدمه

از تفاوت رفتاری شمع بلند و کوتاه را می‌توان به اثر خروج از مرکزیت بار نسبت داد. علاوه بر آن، انجام آزمایش بر روی شمع بلند با دستگاه و تجهیزات موجود در دانشگاه تهران و مقایسه رفتار آن با دستورالعمل‌های پیشنهادی، امکان صحت‌سنجی ابزارها و شیوه انجام آزمایش‌های بارگذاری جانبی شمع را مهیا می‌سازد.

۲ - رویکردهای طراحی شمع‌ها تحت بار جانبی

شمع‌های تحت بار جانبی می‌بایست برای دو معیار مقاومت نهایی کافی و تغییرشکل مجاز، طراحی و تحلیل شوند. روش‌های تحلیل شمع تحت بار جانبی عبارت‌اند از: روش حالت حدی^۵، روش عکس‌العمل بستر^۶، روش $p-y$ ، روش الاستیسته^۷ و روش اجزا محدود^۸ [۱]. ساده‌ترین روش تحلیل شمع تحت بار جانبی، روش حالت حدی است. برامز با در نظرگیری سه برابری ضریب رانش خاک رانکین به‌عنوان فشار جانبی خاک و فرض رابطه خطی افزایش مدول عکس‌العمل بستر خاک با عمق، راهکاری برای تحلیل شمع‌ها در ماسه ارائه داد [۶]. سازوکار گسیختگی برای شمع انعطاف‌پذیر و صلب در شکل ۱ نشان داده شده است.



شکل ۱- سازوکار گسیختگی در شمع انعطاف‌پذیر و شمع صلب [۶]

در روش عکس‌العمل بستر، با در نظرگیری شمع به‌عنوان یک تیر فرضی تکیه داده‌شده بر فنرهای مستقل، پیوستگی خاک لحاظ نمی‌شود [۷]. متلاک و ریس رابطه مقاومت خاک و تغییرشکل را خطی لحاظ کردند [۸]. از آنجا که آزمایش‌ها رفتار مقاومت و تغییرشکل را غیرخطی نشان داده‌اند، روش عکس‌العمل بستر خطای زیادی دارد و مشخصاً به همین دلیل، برای تخمین مقاومت جانبی نهایی خاک نمی‌توان از این روش استفاده کرد. در روش الاستیسته برخلاف عکس‌العمل بستر، پیوستگی خاک در نظر گرفته می‌شود. اما این روش تنها برای کرنش‌های کوچک اعتبار دارد و نمی‌توان برای تعیین مقاومت جانبی نهایی استفاده کرد [۷]. عدم اندازه‌گیری دقیق مدول الاستیسته خاک و وابسته بودن آن به شرایط نصب شمع، از موانع استفاده از روش الاستیسته در پروژه‌های عملی است [۹]. روش اجزا محدود یک روش مفید با در نظرگیری فضای سه‌بعدی و پیوستگی خاک برای تحلیل شمع‌های جانبی بارگذاری‌شده است که محدودیت‌های ذکرشده در سایر روش‌ها را ندارد. البته باید توجه

عموماً شمع‌ها به‌ندرت صرفاً تحت بار عمودی قرار می‌گیرند و بارهای جانبی، کم‌وبیش به آن‌ها وارد می‌شوند. با گسترش در کاربرد سازه‌ها، به‌مرور استفاده از پی شمع با قطرهای متنوع برای تحمل بار جانبی فزونی یافته است. شمع‌هایی که به‌طور گسترده استفاده می‌شوند تا در مقابل بارهای جانبی همانند فشار زمین، بارهای مایل، باد، موج و زمین‌لرزه پایداری کنند [۱]. شمع‌هایی که در محیط دریا تحت بار جانبی قرار می‌گیرند، از نظر کاربرد و سازوکار گسیختگی به دو دسته شمع بلند و مونوپایل^۱ تقسیم می‌شوند. مونوپایل‌ها، تک‌شمع فولادی با قطر زیاد و نسبت لاغری کم هستند که در تغییر شکل جانبی به شکل صلب رفتار می‌کنند. در مواردی که مقدار بار جانبی قابل‌ملاحظه است، با افزایش طول شمع انعطاف‌پذیر، نمی‌توان ظرفیت باربری افقی را تقویت کرد. زیرا در رفتار شمع‌ها تحت بار جانبی، یک طول بحرانی^۲ وجود دارد که با افزایش طول شمع بیش از آن، تغییری در ظرفیت باربری جانبی شمع حاصل نمی‌شود [۲]. لذا رویکرد مهندسان ژئوتکنیک به تغییر در قطر شمع متمرکز شده و استفاده از مونوپایل‌ها به‌عنوان پی توربین‌های بادی فراساحلی رواج یافته است. در جدول ۱ برخی از تفاوت‌های عمده این دو نوع شمع، تشریح شده است.

جدول ۱- ویژگی‌ها و تفاوت رفتار شمع بلند و مونوپایل [۳]

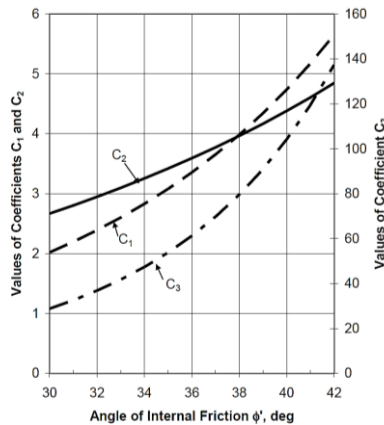
کاربرد	شمع بلند	مونوپایل
نسبت لاغری	صنعت نفت و گاز	توربین بادی فراساحلی
	$10 < L/D < 100$	$2 < L/D < 6$
وضعیت سر شمع	شبه ثابت ^۳ و با گیرداری بالا در تراز سطح خاک	آزاد با لنگر اعمالی زیاد و خروج از مرکزیت ۵ تا ۱۵ برابر قطر شمع
نوع گسیختگی طراحی برای سختی	تشکیل مفصل پلاستیک ^۴	چرخش صلب بدنه شمع
طراحی برای سختی	سختی دینامیک	سختی دینامیک
طراحی برای بار تناوبی	کاهش مقاومت نهایی در سطوح المانی، لنگر خمشی افزایش یافته	چرخش جمعی تحت بارگذاری تناوبی زیاد

با توجه به تفاوت عمده در سازوکار گسیختگی شمع‌های انعطاف‌پذیر و صلب تحت بار جانبی، استفاده از روش‌های طراحی مرسوم برای مونوپایل‌ها چندان قابل‌اعتماد نیست [۴]. تمرکز اصلی تحقیقات بارگذاری جانبی شمع بر روی اثر تغییر قطر و سختی خمشی شمع بوده و کم‌تر به اثر خروج از مرکزیت بار توجه شده است. هرچند شواهدی وجود دارد که تغییر خروج از مرکزیت بار، اثر چندان بر منحنی‌های $p-y$ مونوپایل‌ها نداشته است [۵]. باین‌حال در این پژوهش پنج آزمایش سانتریفیوژ بارگذاری جانبی بر روی شمع بلند با خروج از مرکزیت زیاد انجام شده است تا مشخص شود تا چه میزان

$$p_{us} = (C_1 z + C_2 D) \gamma' z \quad (1)$$

$$p_{ud} = C_3 D \gamma' z \quad (2)$$

که در آن p_{us} و p_{ud} مقاومت نهایی خاک به ترتیب در حالت نزدیک سطح خاک و در عمق های پایین تر است. D و z به ترتیب عمق زیر سطح خاک و قطر شمع و همچنین γ' وزن مخصوص غوطه وری خاک است. ضرایب C از شکل ۳ برحسب زاویه اصطکاک داخلی ماسه تعیین می شوند.



شکل ۳- ضرایب C در محاسبه مقاومت جانبی نهایی خاک [۱۲]

ساده سازی دوم در رابطه میان p و y است که تنها با یک رابطه تانژانت هایپربولیک مطابق رابطه (۳) به یکدیگر مرتبط شده اند:

$$p = A p_u \tanh\left(\frac{kz}{A p_u} y\right) \quad (3)$$

که در آن A ضریب تجربی وابسته به نوع بارگذاری ساده یا تناوبی، p_u کمینه مقاومت جانبی نهایی محاسبه شده در رابطه (۱) و (۲) و k نرخ افزایش مدول اولیه عکس العمل بستر با افزایش عمق است که از جدول ۲ بر اساس زاویه اصطکاک داخلی ماسه تعیین می شود.

جدول ۲- مقادیر k برحسب زاویه اصطکاک داخلی ماسه [۱۲]

ϕ' (درجه)	۲۵	۳۰	۳۵	۴۰
$k (MN / m^3)$	۵/۴	۱۱	۲۲	۴۵

۳-۳- منحنی های پیشنهادی هایپربولیک

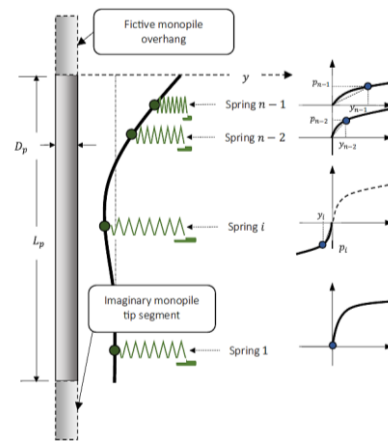
رابطه هایپربولیک در مسائل تنش- کرنش از گذشته وجود داشته اما جیورجیادیس و همکاران در سال ۱۹۹۲ برای تخمین منحنی $p-y$ در خاک ماسه ای، تابع هایپربولیک را پیشنهاد کردند [۱۴]. ارتباط میان p و y بر اساس تابع هایپربولیک در رابطه (۴) ارائه شده است:

$$p = \frac{y}{\frac{1}{k} + \frac{y}{p_u}} \quad (4)$$

داشت که دقت روش های عددی کاملاً به مدل رفتاری^۹ استفاده شده و صحت سنجی آن وابسته است [۷].

۳- روش منحنی های $p-y$

استفاده از روش منحنی های $p-y$ متداول ترین روش طراحی شمع ها تحت بار جانبی در پروژه های عملی است. این روش نیمه تجربی در واقع تکامل یافته روش عکس العمل بستر است که رفتار غیرخطی خاک را نیز در نظر می گیرد. منظور از p و y در روش منحنی های $p-y$ ، به ترتیب مقاومت جانبی خاک در واحد طول شمع و جابجایی متناظر آن است. به عبارت دیگر، منحنی های $p-y$ سختی فنرهای فرضی هستند که توسط آن خاک شبیه سازی می شود. نحوه استفاده از فنرهای غیرخطی در شکل ۲ نشان داده شده است.



شکل ۲- استفاده از فنرهای غیرخطی $p-y$ در تحلیل شمع [۱۰]

۳-۱- منحنی های پیشنهادی ریس و همکاران [۱۱]

ریس و همکاران در سال ۱۹۷۴ با آزمایش برجا بر روی شمع ته باز به قطر ۶۱ سانتی متر، منحنی های پیشنهادی $p-y$ در خاک ماسه ای را ارائه کردند. ماسه جزیره ماستانگ^{۱۰} مورد بررسی، دارای زاویه اصطکاک داخلی ۳۹ درجه بوده است. بر مبنای دو نوع گسیختگی گوه مقاوم در نزدیکی سطح خاک و جریان جانبی در عمق های پایین تر، دو مقدار مقاومت نهایی خاک پیشنهاد شده است.

۳-۲- منحنی های پیشنهادی API [۱۲]

در بین منحنی های پیشنهادی $p-y$ برای ماسه، موسسه نفت آمریکا^{۱۱} (API) متداول ترین رابطه را ارائه می دهد. منحنی های پیشنهادی API بر اساس تحقیقات انیل و مرکیسون [۱۳] تهیه شده است. در این روابط دو ساده سازی عمده نسبت به روابط ریس و همکاران وجود دارد. اول این که مقاومت نهایی خاک به جای استفاده از روابط طولانی، از طریق روابط کوتاه تر و ضرایب به دست آمده از نمودارها مطابق رابطه (۱) و (۲) تعیین می شود:

طراحی مونوپایل ها با استفاده از این روابط، می بایست توجه دوچندان شود.

۵- پیشنهادها و رویکردهای جایگزین

تحقیقات اخیر حوزه رفتار جانبی شمع ها و مونوپایل ها نشان می دهد که روابط فعلی نیازمند اصلاح هستند. استفاده از مدل هایپربولیک و تغییر در پارامترهای آن می تواند یک راه حل باشد. نتایج آزمایش های سانتریفیوژ نشان می دهد که مدل هایپربولیک برای مونوپایل ها دقیق تر است [۵]. نتایج آزمایش های برجا بر روی شمع بلند نیز حاکی از آن است که مدل های پیشنهادی می تواند بر بستر مدل هایپربولیک ارائه شوند [۲۱]. رفتار شمع های بلند با قطر زیاد نیز با مدل هایپربولیک توجیه پذیر است [۲۲]. با این حال تحقیقاتی نیز وجود دارد که با اصلاح روابط API و با همان شکل روابط سابق، توانسته است رفتار مونوپایل ها در حالت بارگذاری صرفاً افقی و یا ترکیب با بار عمودی را تخمین بزند [۲۳]. شکل های دیگری از روابط پیشنهادی با در نظرگیری عکس العمل غیرخطی شمع و خاک و حل بی بعد شمع جانبی نیز ارائه شده است [۲۴]. اصلاح در شیب اولیه منحنی های API از مواردی است که به کرات در ادبیات فنی دیده شده و اصلاح آن بر مبنای قطر شمع و سطح تنش می تواند به شکل رابطه (۶) صورت گیرد [۲۵]:

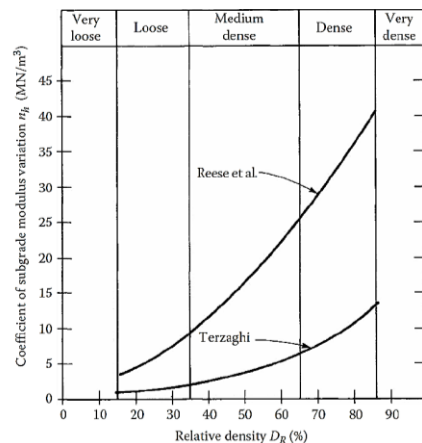
$$E_{\text{mod}}^{py} = kz_0 \left(\frac{z}{z_0} \right)^m \left(\frac{D}{D_0} \right)^{0.5} \quad (6)$$

که در آن k نرخ افزایش مدول اولیه بستر نسبت به عمق، D قطر شمع، z عمق خاک و m ضریبی بین 0.4 تا 0.7 است. مقدار D_0 و z_0 به ترتیب 61 سانتی متر و $2/5$ متر در نظر گرفته می شود تا مقدار سختی اصلاح شده با نتایج ریس و همکاران دقیقاً یکسان شود [۱۱]. علاوه بر روش های فعلی، مقدار مقاومت جانبی نهایی خاک غیرچسبنده (P_u) را می توان برحسب مقاومت خاک جلوی شمع و مقاومت برشی در دو طرف کنار شمع به دست آورد. از آنجایی که این روش مقاومت خاک را به جای شمع در نظر می گیرد، می توان از آن در شمع های صلب و انعطاف پذیر استفاده کرد [۲۶]. از آنجاکه در پروژه های عملی برای به دست آوردن زاویه اصطکاک داخلی اغلب از روابط همبستگی با نتایج آزمایش برجا تعیین می شود، می توان روابط p - y در خاک ماسه ای را مستقیماً به نتایج آزمایش برجا مثل CPT^{۱۲} مرتبط کرد [۲۷]. تحقیقات دیگری نشان می دهد علت عدم اطمینان در استفاده از روش p - y در مونوپایل ها، عدم نظرگیری همه مؤلفه های عکس العمل خاک است. جهت افزایش دقت در تحلیل جانبی مونوپایل ها، علاوه بر مؤلفه بار گسترده جانبی (P)، بایستی سه مؤلفه لنگر گسترده (m)، نیروی افقی در انتهای مونوپایل (H_B) و لنگر در انتهای مونوپایل (M_B) در نظر گرفته شود. با انجام مدل سازی عددی و صحت سنجی آن با

که در آن P_u مقاومت جانبی نهایی خاک و k به شکل رابطه (۵) تعریف می شود:

$$k = zn_h \quad (5)$$

که در آن z عمق زیر سطح خاک و n_h ضریب وابسته به تراکم خاک است. جیورجیادیس با انجام آزمایش سانتریفیوژ بر روی شمع های بلند، متوسط و کوتاه مشاهده کرد که ضمن تقریب بهتر تابع هایپربولیک نسبت به منحنی های پیشین، سختی اولیه پیشنهادی ریس و همکاران [۱۱] بیش از واقعیت است و نتایج به آنچه ترازقی [۱۵] مطابق شکل ۴ پیش تر ارائه کرده بود، نزدیک تر است.



شکل ۴- مقدار n_h برحسب درصد تراکم نسبی [۱۶]

۴- تردیدها در استفاده از روابط فعلی

تفاوت در سازوکار گسیختگی شمع های صلب و انعطاف پذیر، نادیده گرفتن مؤلفه مقاومتی برش جانبی و برش انتهای شمع و اثرات قطر شمع از محدودیت های جدی روابط API است [۴]. دایسون و رندلف با آزمایش سانتریفیوژ بارگذاری جانبی شمع در ماسه کربناتی، مشاهده کردند که تخمین سختی منحنی های API بیش از واقعیت است. علاوه بر آن، نحوه نصب شمع اثر محسوسی بر منحنی p - y می گذارد. این در حالی است که اثر ته باز یا ته بسته بودن شمع قابل چشم پوشی است [۱۷]. روابط API در شمع های با قطر بالا به دلیل بیش تخمینی سختی اولیه در عمق های زیاد، تغییر شکل شمع کم تر از واقعیت تخمین زده می شود و مقاومت برشی زیاد در انتهای شمع اثرگذار است [۱۸]. اثر مقاومت برشی زیاد در انتهای شمع به گونه ای است که اگر انتهای مونوپایل به داخل سنگ بستر سخت وارد شود، سختی اولیه خاک به شدت افزایش می یابد [۱۹]. مطالعه عددی انجام شده بر روی ماسه فیروزکوه و صحت سنجی شده بر اساس آزمایش سانتریفیوژ مونوپایل، نتیجه مشابهی را در مورد بیش تخمینی سختی اولیه خاک نشان می دهد [۲۰]. بنابراین با توجه به این که روابط API بر مبنای شمع های لاغر به قطر زیر ۱ متر صحت سنجی شده، در

می آیند. ضرایب مقیاسی که در این پژوهش مورد استفاده قرار گرفته، در جدول ۳ مشخص شده است.

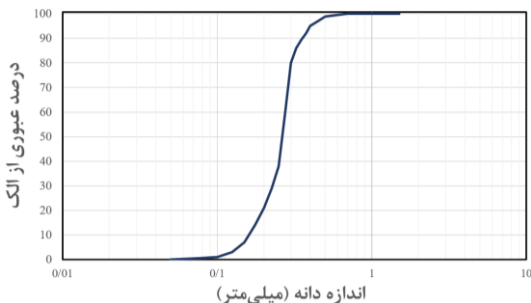
متغیر	ضریب مقیاس (واقعیت به مدل)
طول یا جابجایی	N
تنش	۱
نیرو	N ²
سختی خمشی	N ⁴
لنگر خمشی	N ³
عکس العمل خاک	N

۶-۱- مشخصات ماسه و آماده سازی نمونه

با توجه به تحقیقات متعددی که در دانشگاه تهران با استفاده از خاک ما سه ۱۶۱ فیروز کوه شکل گرفته است، در این تحقیق نیز از این خاک استاندارد به منظور تعیین رفتار جانبی شمع بلند استفاده شده است. مشخصات کلی این خاک در جدول ۴ و منحنی دانه بندی آن در شکل ۶ ارائه می شود.

جدول ۴- مشخصات ماسه ۱۶۱ فیروز کوه

نوع ماسه	طبقه بندی	e _{min}	e _{max}	G _s	D ₅₀
ماسه ۱۶۱ فیروز کوه	SP	۰/۵۷۴	۰/۸۷۴	۲/۶۵	۰/۳



شکل ۶- منحنی دانه بندی ماسه ۱۶۱ فیروز کوه

نمونه خاک در باکس فولادی به ابعاد ۵۰*۶۰*۸۰ سانتی متر ساخته شده است و با توجه به قطر کم شمع، مشکلی از بابت خطای شرایط مرزی وجود ندارد. درصد تراکم برای همه آزمایش ها با توجه به پژوهش های پیشین، ۶۰ درصد انتخاب شده است. به منظور سهولت در تراکم، رطوبت ۵ درصد به خاک افزوده می شود. سپس با توجه به درصد تراکم هدف، وزن مخصوص مرطوب خاک تعیین شده و با توجه به ضخامت هر لایه، وزن مشخصی از خاک به وسیله الک در باکس نمونه، کاملاً پخش می شود. با کوبه دستی، خاک تا میزانی که ضخامت لایه مورد انتظار تأمین شود، متراکم می شود. ضخامت لایه در همه آزمایش ها ۳ سانتی متر بوده که هر لایه در دو مرحله متراکم و تراز شده است. رطوبت ناچیز افزوده صرفاً جهت

نتایج آزمایش برجا، می توان چهار مؤلفه عکس العمل را استخراج کرد و با تهیه مدل یک بعدی بر مبنای آن و با فرضیات پیشین، مونوپایل ها تحلیل و طراحی می شوند [۲۸].

با توجه به ماهیت دینامیکی بارهای جانبی وارده بر شمع ها، منحنی های p-y دینامیکی نیز گسترش یافته اند. منحنی های p-y دینامیکی تابعی از منحنی p-y استاتیکی، سرعت ذرات خاک در یک عمق مشخص و فرکانس بارگذاری هستند. رابطه (۷) رابطه منحنی دینامیکی که در دستورالعمل برنامه تعاونی ملی تحقیقات بزرگ راهی آمریکا (NCHRP) پیشنهاد شده است را نشان می دهد [۲۹]:

$$p_d = p_s \left[\alpha + \beta a_0^2 + k a_0 \left(\frac{\omega y}{D} \right)^n \right], p_d \leq p_u \quad (7)$$

که در آن p_d مقدار دینامیکی، p_s مقدار p متناظر در p-y استاتیکی، a₀ فرکانس بارگذاری بدون بعد، ω فرکانس زاویه ای بارگذاری، γ تغییر شکل افقی شمع نسبت به خاک، D قطر شمع، ضرایب α، β، k و n از برآزش منحنی بدست آمده و ارائه شده اند. منحنی های p-y دینامیکی به شکل قابل ملاحظه ای تحت تاثیر نسبت فرکانس طبیعی سیستم شمع-خاک و فرکانس بارگذاری، دامنه شتاب و تنش محصورکننده هستند [۳۰].

۶- مدل سازی فیزیکی سانتریفیوژ

در این مقاله پنج آزمایش سانتریفیوژ بارگذاری جانبی در خاک ماسه ۱۶۱ فیروز کوه انجام شده است. آزمایش ها در شتاب ۴۰g در دستگاه سانتریفیوژ مدل Actidyn C67-2 موجود در دانشگاه تهران [۳۱] صورت گرفته که در شکل ۵ نشان داده شده است.



شکل ۵- دستگاه سانتریفیوژ دانشگاه تهران

به سبب سبکی از مسائل ژئوتکنیکی وابسته به سطح تنش خاک است. استفاده از دستگاه سانتریفیوژ امکان شبیه سازی سطح تنش مدل و واقعیت را فراهم می سازد. با چرخش دستگاه سانتریفیوژ و ایجاد شتاب Ng و کوچک کردن N برابری نسبت های طولی در واقعیت، سطح تنش در آزمایش و واقعیت مشابه می شوند. بر همین اساس رابطه میان متغیرهای مختلف در واقعیت و مدل به دست

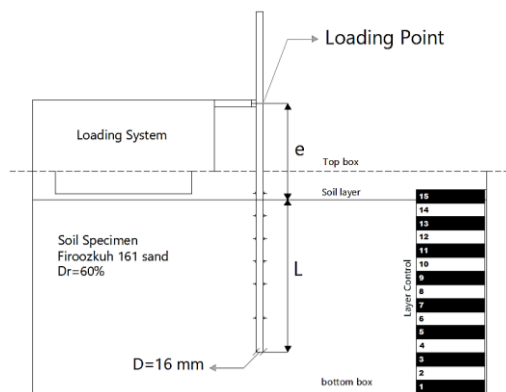
برای اندازه‌گیری تغییرشکل افقی شمع، از سه جابجایی‌سنج (LVDT^{۱۸}) استفاده شده است. جابجایی سنج اصلی روبروی نقطه بارگذاری جانبی قرار دارد. دو جابجایی‌سنج دیگر بالا و پایین نقطه بارگذاری جهت به دست آوردن ثابت‌های انتگرال‌گیری در محاسبه تغییرشکل شمع، نصب شده است. یک نیروسنج افقی S شکل^{۱۹} نیز مطابق شکل ۸ در امتداد شفت بارگذاری تعبیه شده است.



شکل ۸- تجهیزات رفتارنگاری و حس‌گرها

۴-۶- مشخصات و برنامه آزمایش‌ها

هر پنج آزمایش بارگذاری جانبی به شکل مونوتونیک^{۲۰} در شتاب ۴۰g انجام شده است. اعمال نیرو به شکل جابجایی کنترل^{۲۱} بوده و در همه آزمایش‌ها جابجایی به‌اندازه ۱۶ میلی‌متر (دقیقاً برابر با قطر شمع) اعمال شده و مقدار نیرو متناظر با آن قرائت شده است. نمونه خاک با تراکم ($D_r = 60\%$) و با درصد رطوبت ($\omega = 5\%$) از ماسه استاندارد ۱۶۱ فیروزکوه ساخته شده است. آزمایش‌ها در دو دسته طول شمع درون خاک ثابت و خروج از مرکزیت بار ثابت، برنامه‌ریزی شده است. با توجه به ابعاد باکس نمونه، نسبت لاغری شمع (L/D) بین ۱۸ تا ۲۴ متغیر بوده است تا عملکرد انعطاف‌پذیر در آزمایش‌ها شکل‌گیرد. معرفی متغیرهای مدل و ابعاد آن در شکل ۹ و جزئیات برنامه آزمایش‌ها در جدول ۵ بیان شده است.



شکل ۹- مشخصات و پارامترهای ابعاد مدل

جدول ۵- برنامه آزمایش‌ها (ابعاد پروتوتایپ)

تسهیل تراکم ماسه بوده و رفتار آن را می‌توان مشابه حالت خشک در نظر گرفت و از اثرات ماسه نیمه‌اشباع همانند چسبندگی ظاهری صرف‌نظر کرد. با توجه به تراکم خاک و شتاب سانتریفیوژ، زاویه اصطکاک داخلی ماسه (ρ') برابر با $36/5$ درجه تعیین می‌شود.

۲-۶- مشخصات شمع مدل

با توجه به این‌که شمع مرجع آزمایش‌های مرتبط با دستورالعمل‌ها دارای قطر ۶۱ سانتی‌متر بوده، تلاش شده است که قطری نزدیک به آن انتخاب شود تا اثرات قطر شمع به کمینه برسد. با انتخاب شتاب ۴۰g و شمع مدل ۱۶ سانتی‌متری، در ابعاد پروتوتایپ^{۱۳}، شمعی به قطر ۶۴ سانتی‌متر مدل می‌شود. ضخامت جداره لوله ته‌باز استفاده‌شده ۰/۵ میلی‌متر بوده تا رفتار انعطاف‌پذیر تحت بار جانبی ایجاد شود. جنس شمع از استیل ضدزنگ ۳۰۴ با مدول الاستیسیته ۲۰۷ گیگاپاسکال می‌باشد. ۶ جفت کرنش‌سنج^{۱۵} در طول شمع به فاصله‌های ۵ سانتی‌متری نصب شده تا با اتصال نیم‌پل^{۱۶} و دیتا لاگر^{۱۷} دستگاه سانتریفیوژ، بتوان لنگر خمشی را در طول شمع اندازه‌گیری کرد.

۳-۶- مراحل آماده‌سازی آزمایش

پس از ساخت نمونه، سیستم بارگذاری جانبی بر روی باکس نمونه قرار داده می‌شود. پس از تکمیل نصب سیستم بارگذاری، مجموعه باکس نمونه و سیستم بارگذاری به‌وسیله جرثقیل به داخل سانتریفیوژ انتقال می‌یابد و سایر تجهیزات اندازه‌گیری مطابق شکل ۷ نصب می‌شود.



شکل ۷- تجهیزات انجام آزمایش

کوبش شمع در شتاب ۱g به‌وسیله چکش لاستیکی و مشابه تحقیقات پیشین در این زمینه انجام شده است. این در حالی است که نحوه نصب شمع به شدت بر روی منحنی‌های $p-y$ اثر می‌گذارد [۱۷]. بارگذاری در همه آزمایش‌ها به شکل سر آزاد انجام شده و امکان چرخش نقطه بارگذاری توسط قطعه مفصل خمشی طراحی شده، فراهم است.

منحنی لنگر خمشی در طول شمع، به شکل مستقیم از نتایج کرنش سنج‌های آزمایش حاصل می‌شود. با در نظر گیری عملکرد مشابه تیر و با استفاده از روابط (۸) و (۹)، می‌توان به ترتیب تغییر شکل شمع بر حسب عمق (y_{pile}) و عکس العمل خاک در طول شمع (P) بر حسب عمق را به دست آورد:

$$y_{pile}(z) = \iint \frac{M(z)}{E_p I_p} dz \quad (8)$$

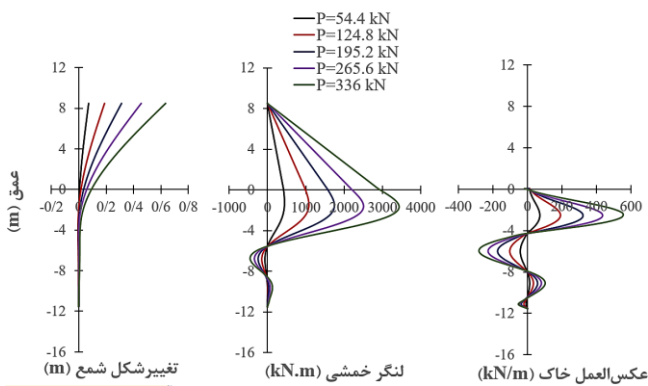
$$p(z) = \frac{d^2 M(z)}{dz^2} \quad (9)$$

که در آن z عمق خاک، M لنگر خمشی و $E_p I_p$ سختی خمشی شمع است. برای محاسبه موارد فوق، نیاز به تعیین رابطه پارامتری لنگر خمشی بر حسب عمق است. با توجه به نوع منحنی لنگر خمشی، استفاده از برازش توابع چند جمله‌ای چندان مناسب نیست. در برخی پژوهش‌ها با تقسیم به نواحی مختلف و برازش جداگانه هر ناحیه، رابطه لنگر را تعریف کرده‌اند [۱۷]. در این پژوهش، از تابع جمع جملات سینوسی^{۲۲} جهت برازش مطابق رابطه (۱۰) استفاده شده است:

$$(10)$$

$$M(z) = a_1 \sin(b_1 z + c_1) + a_2 \sin(b_2 z + c_2) + a_3 \sin(b_3 z + c_3) + a_4 \sin(b_4 z + c_4)$$

تابع فوق دارای ۱۲ متغیر است. ابتدا ناحیه بین نقاط معین به وسیله تابع درجه سه^{۲۳} برازش اولیه داده شد و سپس توسط رابطه معرفی شده برازش ثانویه داده شده است. دقت بالا و سهولت در مشتق یا انتگرال گیری از مزایای استفاده از این روش است. منحنی لنگر خمشی، تغییر شکل شمع و عکس العمل خاک در طول شمع برای سه آزمایش اول با طول مدفون متغیر و خروج از مرکزیت ثابت به ترتیب در شکل‌های ۱۲ تا ۱۴ ترسیم شده است. در همه شکل‌ها، هر سه منحنی به ترتیب به ازای بارهای افقی ثابت (P) نشان داده شده است.



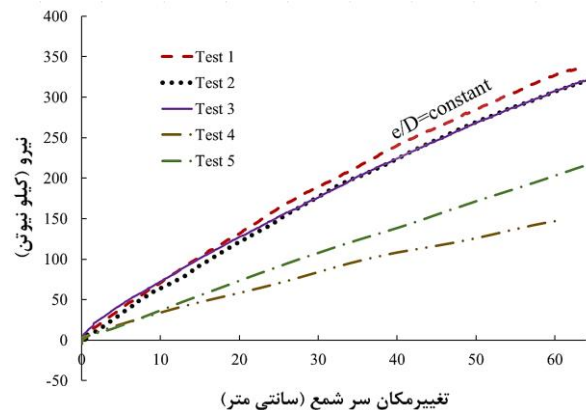
شکل ۱۲- لنگر خمشی، تغییر شکل شمع و عکس العمل خاک آزمایش ۱

شماره آزمایش	D_r (%)	L (m)	e (m)	L/D	e/D
آزمایش ۱	۶۰	۱۱/۵۲	۸/۴۸	۱۸	۱۳/۲۵
آزمایش ۲	۶۰	۱۳/۴۴	۸/۴۸	۲۱	۱۳/۲۵
آزمایش ۳	۶۰	۱۵/۳۶	۸/۴۸	۲۴	۱۳/۲۵
آزمایش ۴	۶۰	۱۱/۵۲	۱۲	۱۸	۱۸/۷۵
آزمایش ۵	۶۰	۱۱/۵۲	۱۰/۲۴	۱۸	۱۶

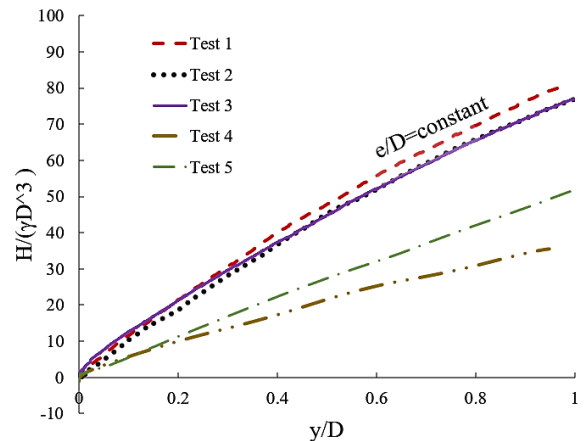
۷- نتایج و بررسی

۷-۱- منحنی نیرو-تغییر مکان سر شمع

منحنی نیرو-تغییر مکان سر شمع هر پنج آزمایش در شکل ۱۰ ترسیم شده است. ظرفیت باربری افقی در آزمایش‌های خروج از مرکزیت ثابت ضمن افزایش طول مدفون شمع، هیچ تغییری نداشته است. این نتایج نشان می‌دهد که ضمن تأیید موضوع طول بحرانی شمع، رفتار تمامی این آزمایش‌ها به شکل انعطاف پذیر بوده است. مطابق انتظار با افزایش خروج از مرکزیت بار، ظرفیت باربری به شکل محسوس کاهش داشته است. در شکل ۱۱ با استفاده از روابط بی بعد سازی متغیرهای مسئله، منحنی نیرو-تغییر مکان سر شمع بی بعد ترسیم شده است.

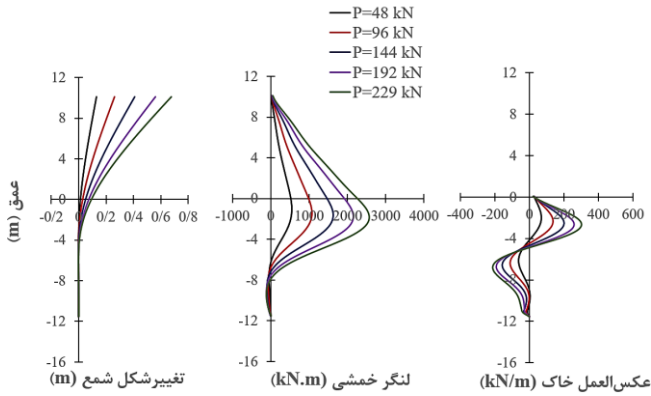


شکل ۱۰- منحنی نیرو-تغییر مکان سر شمع (ابعاد پروتوتایپ)



شکل ۱۱- منحنی نیرو-تغییر مکان سر شمع (بی بعد)

۷-۲- منحنی لنگر خمشی، تغییر شکل شمع و عکس العمل

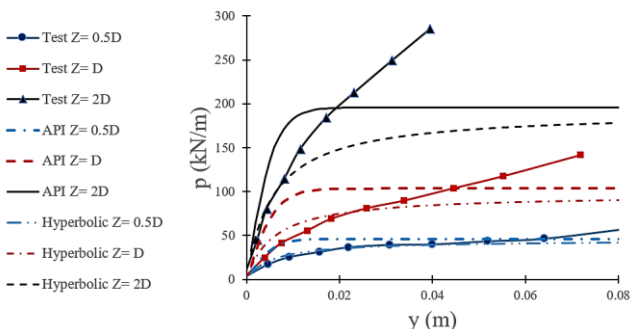


شکل ۱۶- لنگر خمشی، تغییر شکل شمع و عکس العمل خاک آزمایش ۵

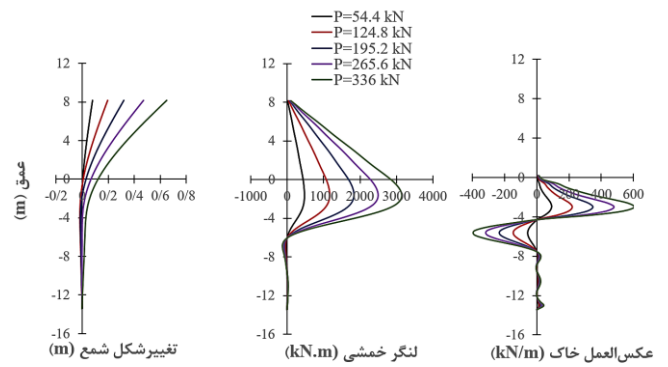
در انتهای شمع به دلیل نبود کرنش سنج کافی، عدم دقت در منحنی عکس العمل خاک دیده می شود که البته اثر محسوس در پاسخ کلی شمع ندارد. ضمناً با مشاهده نمودار تغییر شکل شمع در همه آزمایش ها می توان نتیجه گرفت که عمق مدفون بیشتر از عمق گیرداری نسبی شمع است. در همه آزمایش ها بخش انتهایی شمع کاملاً ثابت و بدون تغییر شکل دیده می شود.

۳-۷- منحنی های p-y

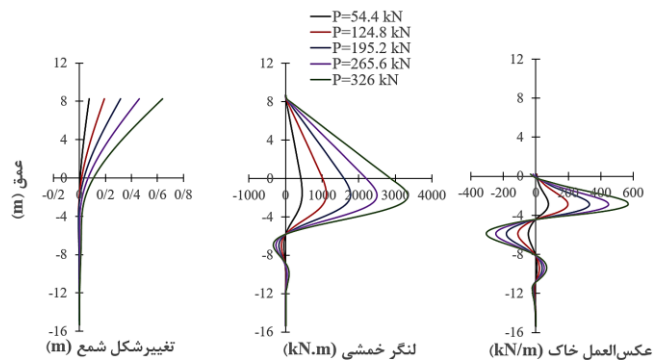
منحنی های p-y یا سختی فنرهای فرضی، با ترسیم مقادیر عکس العمل خاک بر حسب تغییر شکل افقی شمع در یک عمق مشخص و بارهای افقی مختلف، به دست می آیند. با توجه به عملکرد انعطاف پذیر شمع، عمق های مورد بررسی برابر $0.5D$ ، D و $2D$ انتخاب شده است. به علت تغییر شکل کم شمع بلند در عمق های زیاد، از ارائه منحنی p-y در تراز بیش از $2D$ صرف نظر شده است. منحنی های حاصله از آزمایش با دو نوع منحنی پیشنهادی API و هایپر بولیک که پیش تر معرفی شده اند، مقایسه شده است. ϕ' یا زاویه اصطکاک داخلی برابر با $36/5$ درجه و قطر شمع برابر ۶۴ سانتی متر به عنوان متغیرهای ورودی مدل های p-y پیشنهادی انتخاب شده است. در شکل های ۱۷ تا ۲۱، به ترتیب منحنی های p-y آزمایشگاهی و مقایسه آن با مدل های پیشنهادی برای آزمایش ها اول تا پنجم ارائه شده است.



شکل ۱۷- منحنی p-y آزمایشگاهی برای آزمایش ۱

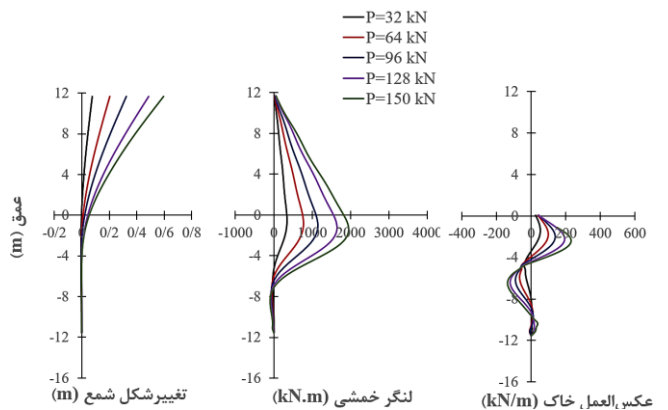


شکل ۱۳- لنگر خمشی، تغییر شکل شمع و عکس العمل خاک آزمایش ۲



شکل ۱۴- لنگر خمشی، تغییر شکل شمع و عکس العمل خاک آزمایش ۳

نتایج نشان می دهد که با افزایش طول شمع، عملاً تغییری در منحنی ها ایجاد نمی شود و صرفاً ناحیه صفر در لنگر خمشی و عکس العمل خاک ایجاد می شود. این موضوع به طور مشابهی در منحنی نیرو-تغییر مکان سرشمع نیز قابل استنباط است. شکل های ۱۵ و ۱۶ نشان داده شده است. آزمایش های اول، چهارم و پنجم دارای طول مدفون ثابت و خروج از مرکزیت هستند. نتایج نشان می دهد که حتی با افزایش خروج از مرکزیت بار، همچنان رفتار شمع به شکل انعطاف پذیر بوده و مفصل پلاستیک در نیمه بالایی شمع تشکیل شده است.



شکل ۱۵- لنگر خمشی، تغییر شکل شمع و عکس العمل خاک آزمایش ۴

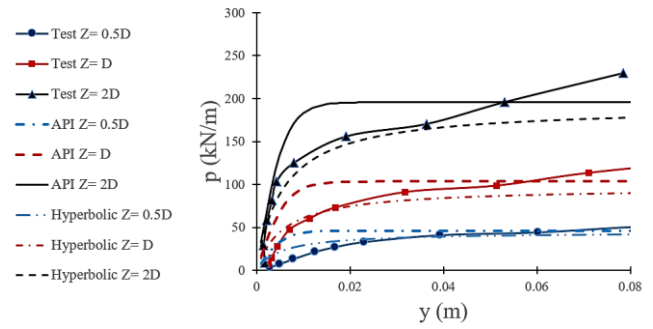
به عمق موردبررسی و شرایط خروج از مرکزیت بار و طول مدفون شمع، کم تر یا بیش تر از مقدار p_{II} تخمینی است. از آنجاکه در محاسبه منحنی $p-y$ از انتگرال دوم و مشتق دوم منحنی لنگر استفاده می شود، حساسیت منحنی ها به برازش منحنی لنگر خمشی زیاد بوده و در برخی آزمایش ها منحنی $p-y$ رفتار متفاوتی داشته است. در آزمایش های اول تا سوم در حالت طول مدفون متغیر شمع، روند مشخصی مشاهده نشده ولی آزمایش دوم و سوم با توجه به بلندترین حالت ممکن شمع، بیشترین تطابق با منحنی های پیشنهادی هایپربولیک دیده می شود.

خروج از مرکزیت بار در آزمایش های اول، پنجم و چهارم به ترتیب افزایش داشته است. مشاهده این سه منحنی نشان می دهد که با افزایش خروج از مرکزیت بار، اثر افزایشی عمق خاک در افزایش سختی، کاهش داشته است. به بیان دیگر، با افزایش خروج از مرکزیت بار، منحنی های $p-y$ در سه عمق موردبررسی به یکدیگر نزدیک تر شده اند. می توان گفت اثر خروج از مرکزیت بار به گونه ای بوده که در اعماق کم تر، ماسه رفتاری سخت تر و در اعماق بیش تر، رفتاری نرم تر از حالت نرمال داشته است. البته این موضوع نیاز به آزمایش های گسترده تر دارد. نتایج نشان می دهد که استفاده از روش $p-y$ و فرض تیر بر بستر فنرهای مستقل، حتی با وجود خروج از مرکزیت بالا (لنگر خمشی اعمالی بالا) توجیه پذیر است. البته شکل کلی منحنی تانژانت هایپربولیک API دو تفاوت عمده با نتایج تحقیق دارد. اولاً در منحنی های API شیب اولیه منحنی به شکل تندتری ارائه می شود و ثانیاً در نتایج آزمایشگاهی، نرم شونده گی در رفتار خاک دیرتر از پیشنهاد API اتفاق می افتد.

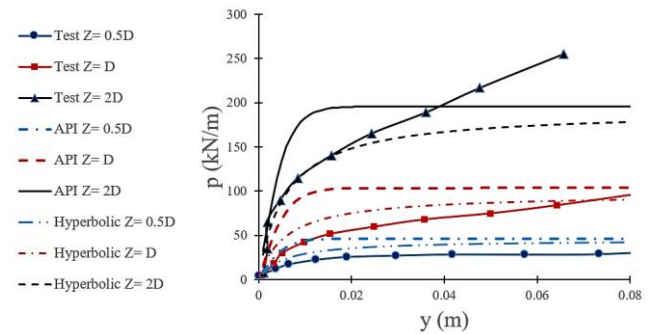
۴-۷- تغییرات سختی اولیه ماسه بر حسب عمق

یکی از فرضیات مهم در ارائه منحنی های پیشنهادی $p-y$ ، رابطه خطی میان سختی اولیه ماسه و عمق خاک است. با توجه به مشخصات ماسه ۱۶۱ فیروزکوه و درصد تراکم نسبی ۶۰ درصد، تحقیقات ریس و همکاران و دستورالعمل API، نرخ تغییرات مدول عکس العمل بستر بر حسب عمق را حدود 25 MN/m^3 تخمین می زنند. اگرچه این ضریب از ویژگی های ماسه محسوب می شود اما تحقیقات نشان داده است که برای شمع های با قطر زیاد یا مونوپایل ها این تخمین بسیار دست بالا گرفته شده است [۳۲، ۱۹، ۱۴].

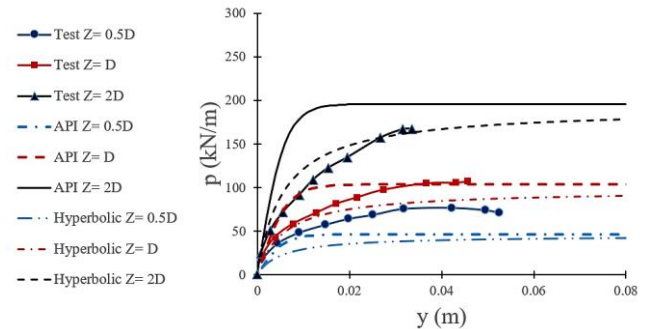
مقدار نرخ تغییرات مدول عکس العمل بستر بر حسب عمق برای آزمایش پنجم به دست آمده است. آزمایش پنجم با نسبت لاغری ۱۸ و نسبت خروج از مرکزیت به قطر شمع ۱۶، به عنوان معیار مقایسه انتخاب شده است تا هم ویژگی های شمع انعطاف پذیر و هم خروج از مرکزیت بالا به شکل هم زمان موردبررسی قرار گیرد. در شکل ۲۲ مقایسه بین آزمایش پنجم و تحقیقات چو و کیم [۱۹] بر روی



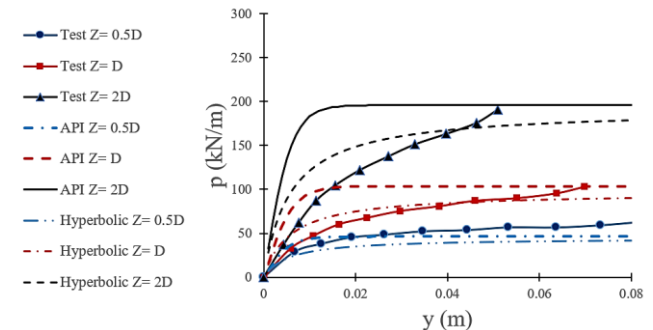
شکل ۱۸- منحنی $p-y$ آزمایشگاهی برای آزمایش ۲



شکل ۱۹- منحنی $p-y$ آزمایشگاهی برای آزمایش ۳



شکل ۲۰- منحنی $p-y$ آزمایشگاهی برای آزمایش ۴



شکل ۲۱- منحنی $p-y$ آزمایشگاهی برای آزمایش ۵

نتایج نشان می دهد که به طور کلی شیب اولیه منحنی های $p-y$ آزمایشگاهی کم تر از مقادیر API بوده و فرم منحنی ها به مدل هایپربولیک نزدیکی بیش تری دارد. مقدار مقاومت جانبی نهایی بسته

$$(p_u)_{proposed} = 1.1(p_u)_{API} \quad (12)$$

$$p = \frac{y}{\frac{1}{(k_i)_{proposed}} + \frac{y}{(p_u)_{proposed}}} \quad (13)$$

متغیرهای استفاده شده در روابط (۱۱) تا (۱۳) مشابه توضیحات پیشین در بخش معرفی مدل هایپربولیک است. البته باید دقت داشت که در عمل تعیین مقدار دقیق پارامترهای خاک ماسه‌ای دارای عدم قطعیت است و مدل مذکور برای ماسه فیروزکوه با مفروضات این تحقیق همانند $\phi' = 36/5$ و درصد تراکم 60% پیشنهاد شده است.

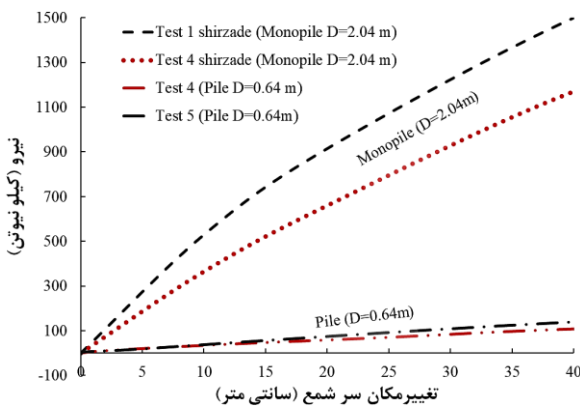
۶-۷- مقایسه نتایج نیرو-تغییر مکان با مونوپایل‌ها

مقایسه نمودار نیرو-تغییر مکان سر شمع با نتایج آزمایش سانتریفیوژ شیرزاده [۳۳] با نمونه ماسه کاملاً مشابه و شیوه ساخت یکسان انجام شده است. دو آزمایش با ابعاد نسبتاً مشابه مطابق جدول ۶ برای مقایسه انتخاب شده است.

جدول ۶- ابعاد آزمایش‌ها جهت مقایسه شمع بلند و مونوپایل [۳۳]

شمع بلند (قطر ۶۴ سانتی‌متر)			مونوپایل (قطر ۲۰۴ سانتی‌متر)		
شماره آزمایش	L (m)	e (m)	شماره آزمایش	L (m)	e (m)
۵	۱۱/۵۲	۱۰/۲۴	۱	۱۰/۶	۹/۸
۴	۱۱/۵۲	۱۲	۴	۱۰/۶	۱۱/۸

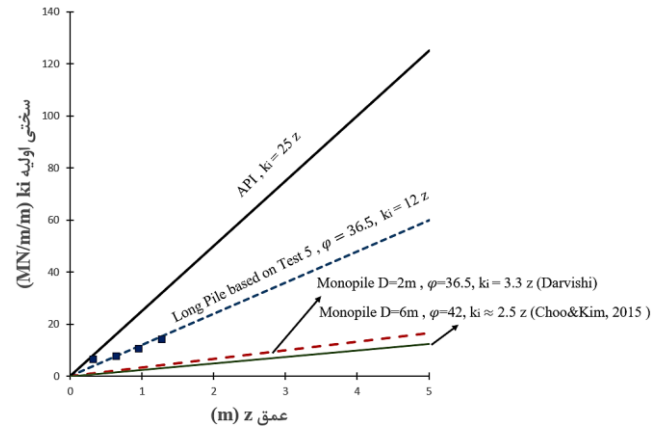
مقایسه نمودار نیرو-تغییر مکان شمع بلند و مونوپایل در شکل ۲۴ نشان داده شده است.



شکل ۲۴- مقایسه نیرو-تغییر مکان در شمع بلند و مونوپایل

نتایج این مقایسه نشان می‌دهد که با افزایش قطر شمع، میزان نیرو افقی در جابجایی یکسان، می‌تواند تا بیش از ۱۰ برابر فزونی یابد. نمودارهای بی‌بعد شده نیرو-تغییر مکان شمع بلند و مونوپایل در شکل ۲۵ مشخص شده است. نتایج نشان می‌دهد که با بی‌بعدسازی نمودار، با جابجایی تا به اندازه $0/2$ قطر شمع، نمودارهای متناظر

مونوپایل به قطر ۶ متر و تحقیقات درویشی و همکاران [۳۲] بر روی مونوپایل به قطر ۲ متر انجام شده است.

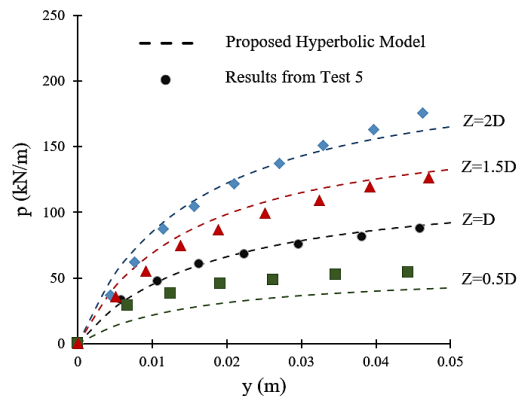


شکل ۲۲- مقایسه نرخ تغییرات مدول عکس‌العمل بستر با عمق در شمع بلند و مونوپایل

نتایج نشان می‌دهد که مقدار پیشنهادی سختی اولیه API هم برای شمع بلند و هم برای مونوپایل دچار بیش تخمینی است. اما باین حال مغایرت آن با نتایج شمع بلند، بسیار کم‌تر از نتایج آزمایش بر روی مونوپایل‌ها است. اگرچه فرض رابطه خطی ضریب عکس‌العمل خاک با عمق می‌تواند فرض قابل قبولی باشد.

۵-۷- منحنی هایپربولیک p-y پیشنهادی برای شمع بلند

اگرچه منحنی‌های p-y هایپربولیک با پارامترهای فعلی تخمین قابل قبولی از واقعیت را ارائه می‌کند، اما هدف از این بخش، بهبود منحنی هایپربولیک با تغییر در متغیرهای آن است تا خروج از مرکزیت بار نیز در نتایج لحاظ شود. همانند بخش پیشین، شمع آزمایش پنجم به‌عنوان معیار شمع بلند با خروج از مرکزیت بالا انتخاب شده است. در شکل ۲۳ برازش هایپربولیک انجام شده است.



شکل ۲۳- برازش هایپربولیک p-y برای آزمایش پنجم

منحنی‌های برازش شده پیشنهادی با فرضیات زیر به‌دست آمده‌اند:

$$(k_i)_{proposed} = 0.5(k_i)_{API} \quad (11)$$

- مقایسه منحنی $p-y$ آزمایشگاهی با دستورالعمل API و مدل هایپربولیک نشان می دهد که به طور کلی تخمین مدل هایپربولیک، مطابقت بیشتری با نتایج آزمایشگاهی دارد. همچنین با در نظر گیری سختی اولیه پیشنهادی $0.5k$ می توان نتایج دقیق تری مشاهده کرد.
- افزایش خروج از مرکزیت بار باعث شده تا اثر افزایشی سختی ماسه با عمق، کاهش یابد. به عبارت دیگر، با افزایش خروج از مرکزیت بار، منحنی $p-y$ در اعماق مختلف نسبت به حالت بار افقی خالص، نزدیک تر شده اند. البته این مشاهده نیاز با تحقیقات بیش تری دارد. با این وجود، استفاده از روش $p-y$ و فرض تیر بر بستر فنرهای مستقل، برای شمع های بلند می تواند تا حدودی قابل قبول باشد.
- تغییرات سختی اولیه بر حسب عمق نشان می دهد که دستورالعمل API، سختی اولیه منحنی $p-y$ را حتی برای شمع های بلند، بیش از اندازه تخمین می زند (حدوداً ۲ برابر). اگر چه این تفاوت به شکل ملموسی کم تر از اختلاف در مونوپایل ها است.

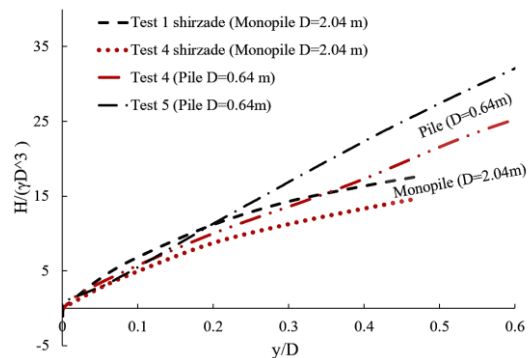
کلید واژگان

- 1- Monopile
- 2- Critical Length
- 3- Quasi-fixed
- 4- Plastic Hinge
- 5- Limit State Method
- 6- Subgrade Reaction Method
- 7- Elasticity Method
- 8- Finite Element Method
- 9- Constitutive Model
- 10- Mustang Island
- 11- American Petroleum Institute
- 12- Cone Penetration Test
- 13- Prototype
- 14- Stainless Steel
- 15- Strain Gauge
- 16- Half Bridge
- 17- Data Logger
- 18- Linear Variable Differential Transformer
- 19- S-Type Load Cell
- 20- Monotonic
- 21- Displacement-Control
- 22- Sum of Sine
- 23- Cubic Spline

۹- مراجع

- 1- 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.

تقریباً منطبق هستند. بنابراین استفاده از متغیرهای بی بعد می تواند ایده روش طراحی بهینه برای شمع های بلند و مونوپایل ها باشد.



شکل ۲۵- مقایسه نیرو- تغییر مکان بی بعد در شمع بلند و مونوپایل

۸- نتیجه گیری

در این مقاله، پنج آزمایش سانتریفیوژ بارگذاری جانبی مونوتونیک بر روی شمع بلند به قطر ۶۴ سانتی متر انجام شده است و رفتار شمع انعطاف پذیر با خروج از مرکزیت زیاد با به دست آوردن منحنی نیرو-تغییر مکان سرشمع، لنگر خمشی، تغییر شکل شمع، عکس العمل خاک و منحنی $p-y$ مورد بررسی قرار گرفته است. همچنین بررسی اثرات تغییرات خروج از مرکزیت بار و طول مدفون شمع با آزمایش بر روی ماسه ۱۶۱ فیروزکوه، از اهداف این تحقیق بوده است. نتایج زیر مشاهده شده است:

- در تمامی آزمایش ها، رفتار شمع با وجود خروج از مرکزیت وارده زیاد، انعطاف پذیر مشاهده شده است. پاسخ شمع تحت بار جانبی با تشکیل مفصل پلاستیک در نیمه بالایی شمع (حدود $0.3L$) همراه بوده است.
- ظرفیت باربری جانبی شمع در آزمایش های با خروج از مرکزیت ثابت و طول مدفون شمع متغیر، ثابت بوده است. این موضوع در نمودار نیرو-تغییر مکان سر شمع قابل استنباط است. علاوه بر آن، نتیجه فوق با مفهوم طول بحرانی در شمع های انعطاف پذیر نیز مطابقت دارد و تنها طولی از شمع که در نزدیکی خاک است، درگیر شده است. در مونوپایل ها برخلاف شمع های بلند با افزایش طول مدفون شمع، ظرفیت باربری به شدت افزایش می یابد. علاوه بر آن، ظرفیت باربری جانبی شمع بلند با افزایش خروج از مرکزیت بار، کاهش می یابد. اگر چه این کاهش خطی نیست و به ویژگی های سازه ای شمع وابسته است.
- با مشاهده نمودارهای لنگر خمشی و عکس العمل خاک می توان دریافت که با افزایش طول مدفون شمع، تنها ناحیه صفر به انتهای شمع افزوده می شود و تأثیری در پاسخ شمع ندارد.

- of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, 142(1), 04015058
- 20- Shirazi, S., Moradi, M., & Shahidikhah, M. (2019). *Numerical modeling of monopile under lateral loading in sand*. 4th Iranian Conference of Geotechnical Engineering, Tehran. (in Persian)
- 21- Tak Kim, B., Kim, N. K., Jin Lee, W., & Su Kim, Y. (2004). *Experimental load-transfer curves of laterally loaded piles in Nak-Dong River sand*. Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, 130(4), 416-425.
- 22- Wang, H., Wang, L., Hong, Y., Mašin, D., Li, W., He, B., & Pan, H. (2021). *Centrifuge testing on monotonic and cyclic lateral behavior of large-diameter slender piles in sand*. Ocean Engineering, 226, 108299.
- 23- Lu, W., & Zhang, G. (2020). *New py curve model considering vertical loading for piles of offshore wind turbine in sand*. Ocean Engineering, 203, 107228.
- 24- Su, D., Yan, W. M., Bao, X. H., & Huang, S. (2018). *Nondimensional solutions for laterally loaded piles in sand considering nonlinear soil-pile interactions*. International Journal of Geomechanics, 18(7), 04018077.
- 25- Kallehave, D., Thilsted, C. L., & Liingaard, M. A. (2012). *Modification of the API py formulation of initial stiffness of sand*. In Offshore site investigation and geotechnics: integrated technologies-present and future. OnePetro.
- 26- Zhang, L., Silva, F., & Grismala, R. (2005). *Ultimate lateral resistance to piles in cohesionless soils*. Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, 131(1), 78-83.
- 27- Suryasentana, S. K., & Lehane, B. M. (2016). *Updated CPT-based p-y formulation for laterally loaded piles in cohesionless soil under static loading*. Géotechnique, 66(6), 445-453.
- 28- Burd, H. J., Byrne, B. W., McAdam, R. A., Houlsby, G. T., Martin, C. M., Beuckelaers, W. J. A. P., ... & Muir Wood, A. (2017). *Design aspects for monopile foundations*. In Proceedings of TC209 workshop on foundation design for offshore wind structures, 19th ICSMGE, Seoul, South Korea (pp. 35-44).
- 29- Brown, D. A., O'Neill, M. W., Hoit, M., McVay, M., El Naggar, M. H., & Chakraborty, S. (2001). *Static and dynamic lateral loading of pile groups* (No. Project E24-9 FY'97).
- 30- Lim, H., & Jeong, S. (2018). *Simplified py curves under dynamic loading in dry sand*. Soil Dynamics and Earthquake Engineering, 113, 101-111.
- 31- Moradi, M., & Ghalandarzadeh, A. (2010). *A new geotechnical centrifuge at the University of Tehran, IR Iran*. In Proceedings of the Conference on Physical Modeling in Geotechnics (Vol. 28, pp. 251-254).
- 32- Darvishi Alamouti, S., Moradi, M., & Bahaari, M. R. (2019). *Centrifuge modelling of monopiles subjected to lateral loading*. Scientia Iranica, 26(6), 3109-3124.
- 33- Shirzadeh, N. (2014). *Physical Modeling of Monopile Under Lateral Load in Geotechnical Centrifuge*. (Master's thesis). University of Tehran, Iran. (in Persian)
- 2- Randolph, M. F. (1981). *The response of flexible piles to lateral loading*. Geotechnique, 31(2), 247-259.
- 3- Randolph, M., & Schneider, J. (2017). *Pile Foundations: Design for Axial and Lateral Loading*. Encyclopedia of Maritime and Offshore Engineering, 1-23
- 4- Doherty, P., & Gavin, K. (2012). *Laterally loaded monopile design for offshore wind farms*. Proceedings of the institution of civil engineers-energy, 165(1), 7-17.
- 5- Klinkvort, R. T., & Hededal, O. (2014). *Effect of load eccentricity and stress level on monopile support for offshore wind turbines*. Canadian Geotechnical Journal, 51(9), 966-974.
- 6- Broms, B. B. (1964). *Lateral resistance of piles in cohesionless soils*. Journal of the Soil Mechanics and Foundations Division, 90(3), 123-156.
- 7- Brødbæk, K. T., Møller, M., Sørensen, S. P. H., & Augustesen, A. H. (2009). *Review of py relationships in cohesionless soil*. Department of Civil Engineering, Aalborg University. DCE Technical reports No. 57
- 8- Matlock, H., & Reese, L. C. (1960). *Generalized solutions for laterally loaded piles*. Journal of the Soil Mechanics and foundations Division, 86(5), 63-92.
- 9- Poulos, H. G. (1971). *Behavior of laterally loaded piles: I-single piles*. Journal of the Soil Mechanics and Foundations Division, 97(5), 711-731.
- 10- Amar Bouzid, D. (2018). *Numerical investigation of large-diameter monopiles in sands: Critical review and evaluation of both API and newly proposed py curves*. International Journal of Geomechanics, 18(11), 04018141.
- 11- Reese, L. C., Cox, W. R., & Koop, F. D. (1974). *Analysis of laterally loaded piles in sand*. In Offshore Technology Conference. OnePetro.
- 12- API (American Petroleum Institute). (2014). *Geotechnical and foundation design considerations. Recommended practice 2GEO*. Washington, DC, USA: API Publishing Services.
- 13- O'Neill, M.W. and Murchison, J.M., (1983). *An evaluation of py relationships in sands*. A report to the American Petroleum Institute. Houston, TX, USA: University of Houston.
- 14- Georgiadis, M., Anagnostopoulos, C., & Safleku, S. (1992). *Centrifugal testing of laterally loaded piles in sand*. Canadian Geotechnical Journal, 29(2), 208-216.
- 15- Terzaghi, K. (1955). *Evaluation of Coefficients of Subgrade Reaction*: Geotechnique. 297-326.
- 16- Tomlinson, M., & Woodward, J. (2007). *Pile design and construction practice*. CRC press.
- 17- Dyson, G. J., & Randolph, M. F. (2001). *Monotonic lateral loading of piles in calcareous sand*. Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, 127(4), 346-352.
- 18- Abdel-Rahman, K., & Achmus, M. (2005). *Finite element modelling of horizontally loaded monopile foundations for offshore wind energy converters in Germany*. In Proceedings of the international symposium on frontiers in offshore geotechnics. Taylor and Francis, Perth (pp. 391-396).
- 19- Choo, Y. W., & Kim, D. (2016). *Experimental development of the p-y relationship for large-diameter offshore monopiles in sands: Centrifuge tests*. Journal