بررسی پاسخ مونوپایل‌ها تحت بارگذاری جانبی بوسیله مدلسازی سانتریفوژ

حمیدرضا خدایی[۱*]، مجید مرادی[۲]، عباس قلندرزاده[۳]

[۱] دانشجوی کارشناسی ارشد، گروه سازه‌های دریایی، دانشکده مهندسی عمران، پردیس دانشکده‌های فنی، دانشگاه تهران؛ hamid.khodaei@ut.ac.ir
[۲] استادیار، گروه سازه‌های دریایی، دانشکده مهندسی عمران، پردیس دانشکده‌های فنی، دانشگاه تهران؛ mmoradi@ut.ac.ir
[۳] دانشیار، گروه سازه‌های دریایی، دانشکده مهندسی عمران، پردیس دانشکده‌های فنی، دانشگاه تهران؛ aghaland@ut.ac.ir

اطلاعات مقاله

تاریخچه مقاله:
تاریخ دریافت مقاله: ۱۳۹۳/۰۹/۲۵
تاریخ پذیرش مقاله: ۱۳۹۴/۱۲/۰۲

کلمات کلیدی:
مونوپایل
بارگذاری جانبی
مدلسازی سانتریفوژ
منحنی p-y

چکیده

یکی از متداول‌ترین روش‌های تحلیل و طراحی مونوپایل‌ها تحت بار جانبی، روش منحنی‌های p-y یا به طور کلی استفاده از منحنی‌های نیرو- تغییر مکان در نقاط مختلف سازه است. به همین منظور و برای بررسی رفتاری و اندرکنش بین خاک و مونوپایل تحت بار جانبی در این تحقیق به مدلسازی این پدیده به صورت فیزیکی و با استفاده از دستگاه سانتریفوژ ژئوتکنیکی دانشگاه تهران و در فضای Ng پرداخته شد. در تحقیق حاضر با در نظر گرفتن دو پارامتر عمق نفوذ شمع در خاک (L) و همچنین طول آزاد (e) در سر شمع و تغییر در مقادیر و نسبت‌های این دو پارامتر، ۵ آزمایش مدل‌سازی شد. با ترسیم منحنی‌های p-y موجود در API و مقایسه آنها با منحنی‌های حاصل از آزمایش‌ها به بیان تفاوت‌ها و اصلاح آن‌ها می‌پردازیم.

Response of Monopiles Under Lateral Loading By Centrifuge Modeling

Hamid Reza Khodaei[1*], Majid moradi[2], Abbas Ghalandarzadeh[3]

[1] Msc. Student, School of Civil Engineering, University College of Engineering, University of Tehran; hamid.khodaei@ut.ac.ir
[2] Assistant Professor, School of Civil Engineering, University College of Engineering, University of Tehran; mmoradi@ut.ac.ir
[3] Associate Professor, School of Civil Engineering, University College of Engineering, University of Tehran; aghaland@ut.ac.ir

ARTICLE INFO

Article History:
Received: 16 Nov. 2014
Accepted: 21 Feb. 2016

Keywords:
Monopile
Lateral Load
Centrifuge Modeling
p-y Curve

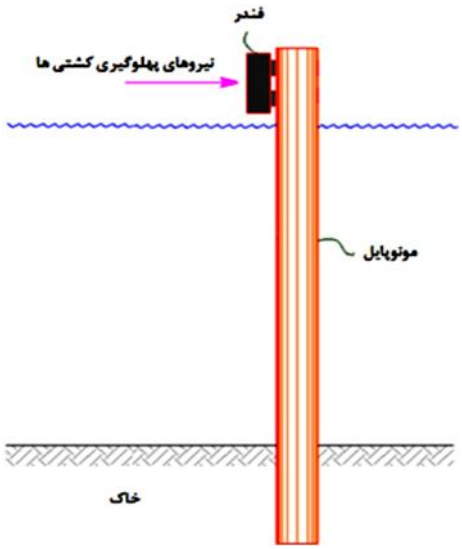
ABSTRACT

One of the most common methods to analyze and design monopiles under lateral load is load-displacement curves, particularly the p-y curves, at different locations of the structure. Thus, in order to investigate the soil-monopile behavior and interaction under lateral load is physically modeled and tested by utilizing the Geotechnical Centrifuge of Tehran University in the Ng space. In this study, five modeling tests are designed by considering the following two parameters with changes in their values and ratios: the penetration depth of the pile in soil (L) and the free length of the pile (e). The existing p-y curves in API are extracted and compared to experimental curves to observe differences and make the necessary modifications.

[Downloaded from marine-eng.ir on 2026-11-10]
[DOR: 20.1001.1.17357608.1394.11.22.4.0]

۱ – مقدمه

مونوپایل‌ها معمولاً برای مقاومت در برابر نیروهای قائم و جانبی به کار گرفته می‌شوند. در بسیاری از موارد نیروهای جانبی وارد به مونوپایل از نیروهای قائم وارد بر آن بیشتر است و ملاک طراحی قرار می گیرد. به عنوان مثال می‌توان به مونوپایل‌هایی که در توربین‌های بادی غول پیکر در مقابل بار ناشی از باد وارده مقاومت می‌کنند، همچنین به شمع‌های به‌کار رفته در اسکله‌های پهلوگیری (دولفین[1]) که تحت بار جانبی ناشی از برخورد کشتی با اسکله قرار می‌گیرند اشاره کرد. در چنین مواردی باید شمع را تحت بار جانبی تحلیل کرد و اندرکنش بین شمع و خاک را به دقت مدلسازی نمود. نمونه‌ای از این مونوپایل‌ها را به عنوان دولفین پهلوگیری در شکل ۱ می‌توان ملاحظه کرد.



شکل ۱ – شکل مونوپایل به عنوان دلفین پهلوگیری تحت بار جانبی

روش‌های مختلفی برای مدل‌سازی تحلیل رفتار شمع تحت بار جانبی پیشنهاد شده است که می‌توان در حالت کلی آنها را به دو گروه متمایز تقسیم کرد [۱]:

۱- روش‌هایی بر اساس بار- جابجایی (عکس‌العمل بستر)

۲- روش‌هایی بر اساس به کارگیری مکانیک محیط‌های پیوسته

روش عکس‌العمل بستر (وینکلر) به دلیل سادگی و جواب‌های واقعی آن در جامعه مهندسی از مقبولیت خاصی برخوردار است. در این روش شمع توسط المان‌های تیر خمشی مدل می‌شود که توسط فنرهای خطی و غیرخطی مدل کننده خاک احاطه شده است. استاندارد و آیین‌نامه مربوط به طراحی شمع‌ها تحت بارهای جانبی API می‌باشد که در آن منحنی‌های p-y مطرح شده است. البته پارامترهای مربوط به تغییرات p در API نیز مطرح شده که می‌توان به نوع خاک و خواص آن همانند چگالی و زاویه اصطکاک داخلی (φ) اشاره کرد. روش منحنی p-y از سایر روش‌ها معمول‌تر است. در این روش خاک را به صورت فنرهای غیر خطی متعددی مدل می‌کنند که هر یک، از منحنی نیرو- تغییر مکان خاصی تبعیت می‌کند [۲].

منحنی‌های معمول p-y منحنی‌های نیمه تجربی هستند. این منحنی‌ها ارتباط بین نیروهای جانبی وارده از طرف شمع به المان خاک (p) را با تغییر مکان جانبی این المان (y) بیان می‌کند. تاکنون منحنی‌های p-y مختلفی برای انواع خاک‌ها پیشنهاد شده است که مهمترین این منحنی‌ها ، منحنی‌های ارائه شده توسط ریسه و همکاران در سال ۱۹۷۴ [۳] و نیز منحنی‌های ارائه شده توسط مارکینسون و اُنیل در سال ۱۹۸۴ [۴] برای خاک‌های ماسه‌ای می باشد.

یکی از مشکلات مطرح در منحنی‌های p-y موجود، آن است که چنین منحنی‌هایی به صورت نیمه‌تجربی و برای شمع و خاک خاصی ارائه شده اند و نمی‌توان از آنها در هر نوع شمع و خاکی استفاده کرد. همچنین روابطی که این منحنی‌ها ارائه می‌دهند برای شمع‌های با قطرهای متوسط و کوچک مورد استفاده می‌باشند و نمی‌توان به سادگی از آنها برای شمع‌های با قطر زیاد بهره برد. در نتیجه طراحی مونوپایل بر اساس این منحنی‌ها و بدون اصلاح آنها منجر به طراحی سازه ای سخت‌تر از انتظار برای شمع خواهد شد و قابلیت جذب انرژی مونوپایل را کاهش می‌دهد. از این رو یکی از راه‌های بدست آوردن منحنی‌های p-y و همچنین منحنی‌های نیرو - تغییر مکان سر شمع فارغ از چنین مشکلاتی، انجام آزمایش بر روی شمع‌های با قطر زیاد می باشد. به گونه‌ای که این روش می‌تواند کمک شایانی به درک رفتار واقعی مونوپایل تحت بارهای جانبی بنماید. انجام آزمایش‌های بارگذاری افقی برجا بر روی مونوپایل‌ها در محیط دریا به سبب محدودیت امکانات آزمایش و نیز هزینه زیاد آن کاری به نسبت دشوار است. در حالی که مدل‌سازی شمع در مقیاس کوچک در دستگاه سانتریفوژ راه مناسبی برای پی بردن به رفتار واقعی مونوپایل تحت بار جانبی ارائه می‌دهد که در مقایسه با آزمایشهای بزرگ مقیاس روی شمع اصلی بسیار ساده‌تر، کارآمدتر و ارزان‌تر می‌باشد. برای این منظور برای انجام آزمایش‌ها دستگاه شبیه‌ساز بارگذاری جانبی طراحی و راه‌اندازی شد. در ادامه نتایج حاصل از بارگذاری جانبی یکطرفه به صورت نمودار نیرو - تغییرمکان سر شمع و همچنین p-y برای هریک از آزمایش‌ها نشان داده خواهد شد و با منحنی‌های موجود با API مقایسه و مورد بررسی قرار می‌گیرد. همچنین نمودار تغییر شکل در طول مونوپایل نیز با توجه به شرایط مرزی رسم می‌شود.

۲ – تحلیل شمع‌های تکی تحت بار افقی

سه معیار در طراحی پی‌های عمیق که تحت بارهای جانبی و لنگر قرار گرفته‌اند باید رعایت شوند: ۱) خاک بیشتر از مقاومت نهایی

[Downloaded from marine-eng.ir on 2026-11-10]

[DOR: 20.1001.1.17357608.1394.11.22.4.0]

خود تحت تنش قرار نگیرد. ۲) تغییر مکان جانبی سر شمع در محدوده مجاز باشد. ۳) خود سازه شمع تسلیم نشود. معمولاً تغییر مکان سر شمع قبل از اینکه خاک به مقاومت نهایی خود برسد، از حد مجاز تجاوز می‌کند. پس حداکثر تغییرمکان جانبی شمع معیار بحرانی در طراحی می‌باشد. پارامتر لازم برای طراحی مونوپایل‌ها تحت بار جانبی در ادامه مورد بررسی قرار می‌گیرد و روابط مربوطه ارائه می‌گردد.

۲-۱- ضریب عکس العمل بستر خاک

ضریب عکس‌العمل افقی بستر که با K_h نشان داده می شود، برابر با عکس العمل نیرویی است که بر واحد سطح خاک در اثر تغییر مکان جانبی شمع به میزان واحد اعمال می‌شود در واقع اگر قطر شمع را D بنامیم، با تغییر مکان جانبی مقطعی از شمع به میزان y، مقدار نیروی اعمالی به مقطع شمع در طول l از آن به صورت رابطه (۱) می‌شود.

$$F = K_h D l y \quad (۱)$$

پارامتر K_h با مدول اولیه عکس العمل بستر K_1 طبق رابطه (۲) مرتبط می‌گردد.

$$K_1 = K_h D \quad (۲)$$

تعیین ضریب عکس العمل بستر خاک به سه روش امکان‌پذیر است:

۱- آزمایش بارگذاری جانبی روی شمع با مقیاس واقعی

۲- آزمایش بارگذاری صفحه‌ای

۳- روابط تجربی با استفاده از دیگر خصوصیات خاک

ترزاقی مقادیر جدول ۱ را برای محاسبه مقدار K_h در خاک ماسه‌ای پیشنهاد داده است.

جدول ۱ - مقادیر پیشنهادی K_h توسط ترزاقی

نوع خاک ماسه ای	$K_h[\frac{MN}{m^3}]$	
	زیر سطح آب	بالای سطح آب
غیر متراکم	۱/۱	۲
تراکم متوسط	۵/۵	۸/۳
متراکم	۱۱	۱۸

لازم به ذکر این نکته نیز ضروری می‌باشد که مقدار ضریب عکس-العمل بستر علاوه بر نوع خاک و میزان تراکم آن به هندسه و در واقع قطر شمع نیز وابسته می‌باشد.

۳ – منحنی‌های غیر خطی p-y

همانگونه که می‌دانیم خاک فقط در کرنش‌های کوچک رفتار خطی دارد و از طرفی با استفاده از تحلیل‌های صورت گرفته روی شمع‌های تحت بار جانبی در حالتی که خاک با فنرهای خطی مدل می‌شود به خطای زیاد فنرهای خطی در تحلیل رفتار واقعی سیستم خاک و فنر پی می‌بریم. برای رفع این ایراد اساسی ، فنرهای غیر خطی جایگزین خاک یا همان منحنی های p-y توسط ریسه و همکارانش پیشنهاد شد. منحنی‌های p-y تغییر شکل خاک را در هر عمق دلخواهی زیر سطح زمین برای محدوده فشارهای افقی اعمال شده تعیین می‌کنند. این فشار می تواند از صفر تا مقدار مقاومت نهایی خاک تغییر کند. مهم‌ترین ایراد روش منحنی‌های p-y این است که پیوستگی خاک را در نظر نمی‌گیرد. زیرا این روش، خاک را به صورت فنرهایی مجزا مدل می‌کند. بنابراین تأثیر لایه‌های بالا یا پایین در پاسخ خاک در یک لایه مشخص در نظر گرفته نمی‌شود. یعنی تنش برشی ایجاد شده بین لایه‌های خاک لحاظ نمی‌شود. همچنین نقص دیگر منحنی‌های p-y سنتی این است که تأثیر مشخصات شمع (سختی شمع ، شرایط سرشمع و شکل شمع) در این منحنی‌ها در نظر گرفته نمی‌شود [۵]. از طرف دیگر منحنی-های p-y یک سری منحنی نیمه‌تجربی هستند. یعنی علاوه بر یک مبنای تحلیلی، استوار بر نتایج آزمایش‌ها هستند و چون این منحنی‌ها از نتایج آزمایش‌های واقعی بدست آمده‌اند می‌توان اینگونه استدلال کرد که اثر پیوستگی خاک به صورت خود به خود و تجربی در بدست آوردن این منحنی‌ها لحاظ شده است. به هر حال روش منحنی‌های p-y یکی از رایج‌ترین روش‌ها در طراحی پی‌های شمعی تحت بارهای جانبی می‌باشد که در عین سادگی، رفتار سیستم خاک – شمع را به خوبی تخمین می‌زند. از آنجا که خاک مورد بحث در این تحقیق، خاک ماسه‌ای می‌باشد لذا در اینجا فقط به معرفی منحنی‌ها و روابط مربوط به خاک‌های ماسه‌ای می‌پردازیم.

روش دیگر برای بدست آوردن منحنی p-y توسط API [۶] ارائه شد که همان روش مارکینسون و اُنیل در سال ۱۹۸۴ می‌باشد. مارکینسون و اُنیل برای بدست آوردن مقاومت جانبی نهایی خاک در منحنی پیشنهادی خود از روابط بدست آمده از نظریه گوه گسیختگی ریسه استفاده می‌کنند. مطابق این نظریه مقاومت جانبی نهایی ماسه برای اعماق سطحی از رابطه (۳) و برای عمق-های زیاد از رابطه (۴) بدست می‌آید. در نهایت مقاومت جانبی نهایی خاک کمترین مقدار این دو رابطه خواهد بود.

$$P_{us} = (C_1.z + C_2.D)\gamma.z \quad (۳)$$

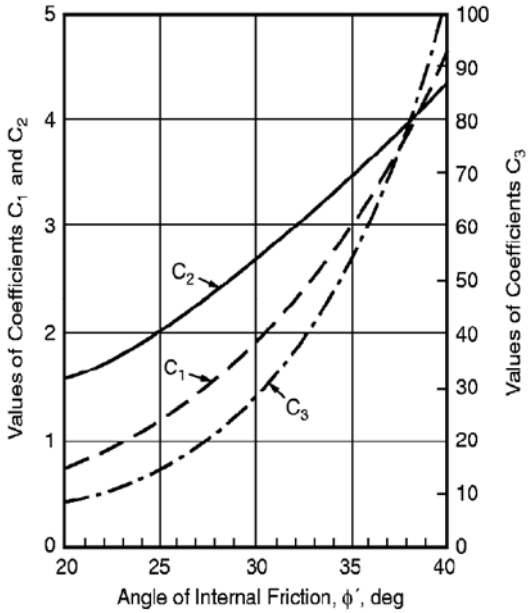
$$P_{ud} = C_3.D.\gamma.z \quad (۴)$$

$$P_u = min\{P_{us}, P_{ud}\} \quad (۵)$$

[Downloaded from marine-eng.ir on 2026-11-10]

[DOR: 20.1001.1.17357608.1394.11.22.4.0]

C_1 و C_2 و C_3 ضرایبی هستند که از شکل ۲ بدست می‌آیند.



شکل ۲ – ضرایب C_1 و C_2 و C_3 تابعی از زاویه اصطکاک داخلی [۴]

منحنی غیر خطی p-y مارکینسون و اُنیل برای مقاومت جانبی خاک بر حسب تغییر مکان با استفاده از رابطه (۶) قابل ترسیم است.

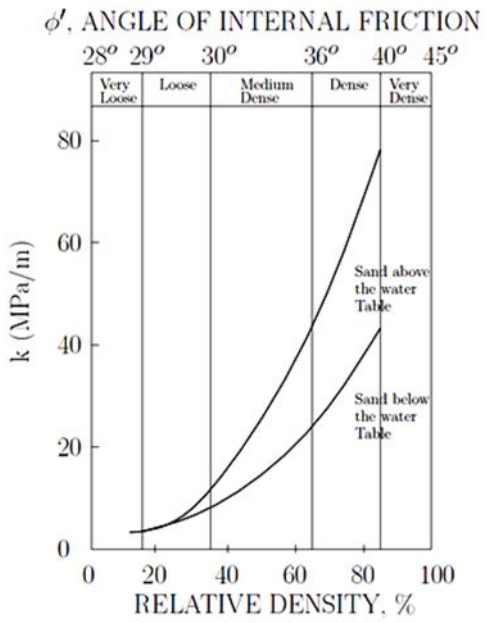
$$P = A\,.P_u\,.tgh\left[\frac{k.z}{A.P_u}y\right] \qquad (۶)$$

که در آن A ضریب تجربی برای در نظر گرفتن استاتیکی یا سیکلیک بودن بار است.

$$A = \left(3 - 0.8\frac{z}{D}\right) \qquad (۷)\ \text{بار استاتیکی}$$

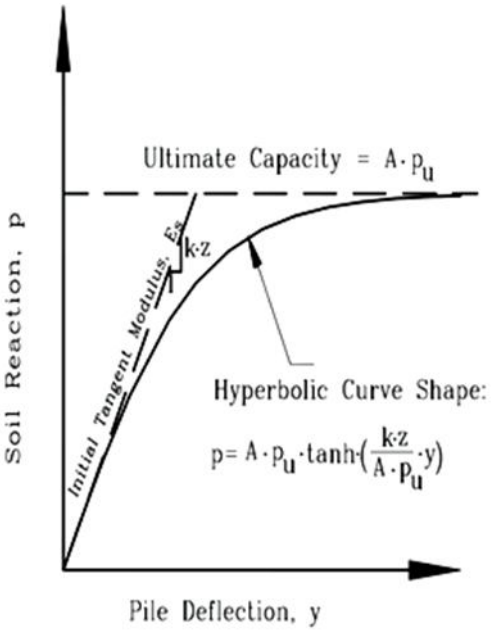
$$A = 0.9 \qquad (۸)\ \text{بار سیکلیک}$$

در رابطه (۶)، k مدول عکس العمل اولیه بستر برحسب $\frac{kN}{m^3}$ که بر اساس زاویه اصطکاک داخلی مؤثر خاک از نمودار شکل ۳ بدست می‌آید.



شکل ۳ – مدول عکس العمل اولیه بستر خاک[۴]

بر طبق صحبت‌های فوق، منحنی p-y پیشنهادی مارکینسون و اُنیل در نهایت به صورت شکل ۴ در می‌آید:



شکل ۴- شکل کلی منحنی p-y مارکینسون و اونیل[۴]

۴ – پاسخ خاک با استفاده از منحنی عملی لنگر

همانند آنچه در ابتدای بخش منحنی‌های p-y ریسه ذکر گردید در این روش ابتدا با استفاده از کرنش‌سنج‌های الکتریکی نصب شده روی طول شمع مستقیماً میزان لنگر وارده به نقاط مختلف شمع محاسبه می‌شود سپس با رسم دیاگرام لنگر وارد بر شمع و با استفاده از روابط زیر مقدار عکس‌العمل خاک و جابجایی شمع بدست می‌آید. این روش نیز در هر ۲ حالت آزمایش‌های محلی و آزمایش‌های مدل‌سازی در سانتریفوژ کاربرد دارد. لازم به ذکر است

[Downloaded from marine-eng.ir on 2026-11-10]

[DOR: 20.1001.1.17357608.1394.11.22.4.0]

که این روش در این تحقیق برای بدست آوردن مقادیر p و y به منظور دستیابی به منحنی p-y مورد استفاده قرار گرفته است.

$$y = \iint \frac{M(x)}{EI} dx \quad (۹)$$

$$P = \frac{d^2}{dx^2} M(x) \quad (۱۰)$$

۵- مروری بر تحقیقات پیشین

به طور کلی تحقیقات انجام شده در زمینه رفتار شمع تحت بار جانبی را می توان به ۴ دسته تقسیم کرد:

۱- آزمایش‌های سانتریفوژ (ng)
۲- آزمایش‌های آزمایشگاهی 1g
۳- آزمایش‌های محلی یا بزرگ مقیاس
۴- کارهای عددی و تحلیلی

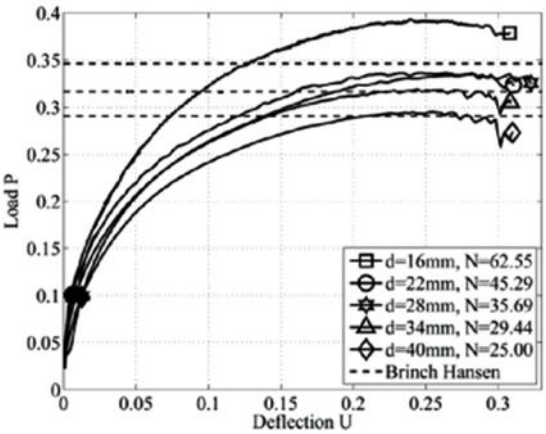
در تحقیقات گوناگون منحنی‌های p-y در شرایط مختلفی استخراج شده‌اند که از آن جمله می‌توان به بدست آوردن منحنی‌های p-y در بار استاتیکی یا سیکلیک، بار دینامیکی (زلزله)، ماسه خشک، مرطوب یا اشباع، خاک رسی، در کنار شیب، در حالت روانگرایی، در حالت وجود بار قائم و جانبی توأمان، در خاک چند لایه و ... اشاره کرد. از اولین کارهای سانتریفوژ انجام شده بر روی شمع تکی تحت بار جانبی می‌توان به آزمایش بر روی مدل شمع‌های جزیره موستانگ اشاره کرد که به سفارش API و در دانشگاه کلتک در سال ۱۹۷۷ صورت گرفت. در این آزمایش‌ها یک مدل شمع آلومینیومی مربعی با EI تقریباً معادل EI شمع‌های جزیره موستانگ استفاده شد که در شتاب سانتریفوژ ۱۰۰g مورد آزمایش قرار گرفت. ایده استفاده از سانتریفوژ ژئوتکنیکی برای شمع‌های تحت بار جانبی به دلیل مشکلات به وجود آمده در اثر اعمال نیروهای استاتیکی و سیکلیک موج و باد و همچنین نیروهای دینامیکی زلزله بر سازه‌های دریایی دور از ساحل و پیدا کردن راهی برای مدل‌سازی صحیح اندرکنش میان خاک و سازه پی آنها ایجاد شد. بعدها در سال ۱۹۸۳ در همان دانشگاه، رونالد اسکات یک آزمایش با شتاب ۴۸g را روی شمع معادل دایروی همان شمع‌های جزیره موستانگ به قطر اصلی ۶۱ سانتی‌متر انجام داد. بر همین اساس در سال ۱۹۹۱ نیز بوآفیا و گارنیر آزمایش های روی شمع تحت بار جانبی در دستگاه سانتریفوژ ژئوتکنیکی انجام دادند که در سالهای بعد مقدمه ارائه رابطه منحنی p-y توسط بوآفیا بود [۷]. به تدریج و به مرور زمان استفاده از شتاب سانتریفوژ برای مدل کردن شمع تحت بار جانبی افزایش چشمگیری پیدا کرد. در جدول ۲ تعدادی از جدیدترین کارها در زمینه مدل‌سازی شمع تحت بار افقی در دستگاه سانتریفوژ ژئوتکنیکی ارائه شده است.

جدول ۲- برخی از جدیدترین تحقیقات انجام شده در سال های اخیر

مرجع	شتاب	درصد تراکم	قطر شمع مدل [cm]	قطر شمع اصلی [m]
Ruigrok [۸]	۴۰g	۸۰٪	۱/۸	۰/۷۲
Brant et al. [۹]	۴۰g	۸۰٪	۱/۲۷	۰/۵۰۸
Leth et al. [۱۰]	۷۱/۴g	۹۰-۹۵٪	۲/۸	۲
Alderlieste [۱۱]	۸۰g	۶۰٪	۱/۳۷۵	۲/۲
	۱۶۰g		۲/۷۵	۴/۴
Z. Li et al. [۱۲]	۶۲/۳g	۹۷٪	۵	۳/۱۱۵
Klinkvort et al. [۱۳]	۶۲/۵g	۹۰٪	۱/۶	۱
Klinkvort et al. [۱۳]	۶۲/۵g	۸۴-۹۶٪	۱/۶	۱
	۴۵/۲۹g		۲/۲	
	۳۵/۶۹g		۲/۸	
	۲۹/۴۴g		۳/۴	
	۲۵g		۴	
Klinkvort et al. [۱۳]	۷۱/۴g	۷۹-۹۶٪	۲/۸	۲

یکی از افرادی که تحقیقات گسترده‌ای در زمینه مدل‌سازی شمع تحت بار جانبی در دستگاه سانتریفوژ ژئوتکنیکی انجام داده است، کلینکورت در دانشگاه تکنیکال دانمارک می‌باشد. وی با انجام بیش از ۷۰ تست بارگذاری استاتیکی و سیکلیک بر روی شمع هایی با قطر، عمق نفوذ و طول آزاد مختلف به بررسی رفتار شمع و خاک تحت بار جانبی پرداخته است [۱۳]. در ادامه تعدادی از مهم‌ترین نتایج او که با بحث های تحقیق حاضر ارتباط بیشتری دارند، بیان می‌گردد.

الف) با استفاده از نتایج ۵ تست استاتیکی نمودار شکل۵ را برای ۵ شمع مختلف در ۵ شتاب متفاوت (e ، L و D_r ثابت) بدست آورده است. جالب توجه است که در واقعیت، تمامی این شمع ها قطر یکسان ۱ متر دارند.

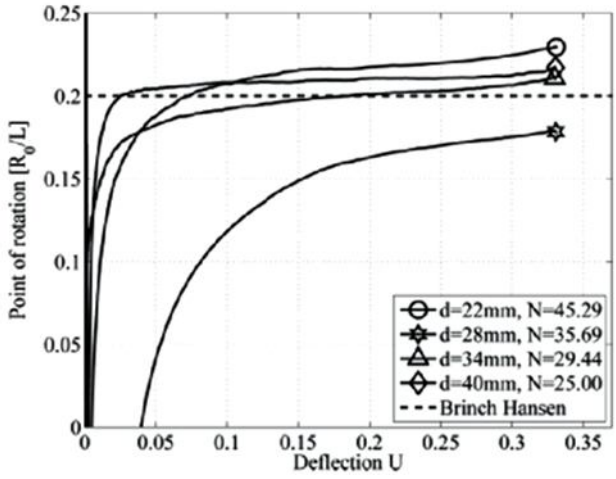


شکل ۵- منحنی‌های نیرو –تغییر مکان سر شمع با شتاب متفاوت[۱۳]

[Downloaded from marine-eng.ir on 2026-11-10]
[DOR: 20.1001.1.17357608.1394.11.22.4.0]

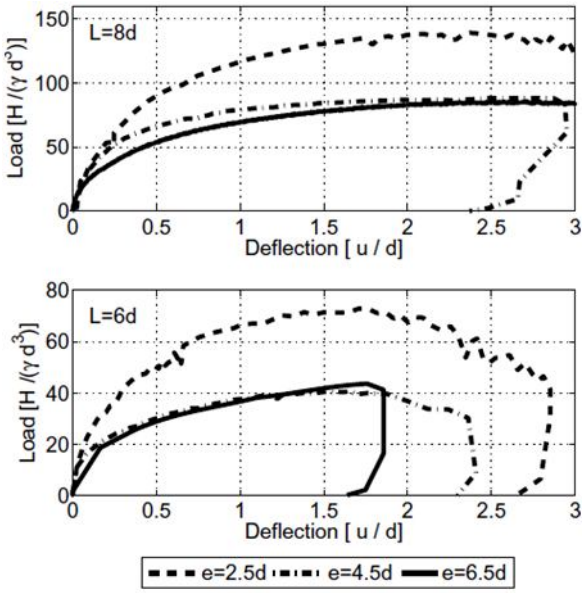
افزایش شتاب، سختی جانبی بیشتری نسبت به افزایش قطر شمع، در خاک ایجاد می‌کند که همین نکته عامل افزایش مقاومت جانبی است به نحوی که حتی شمع با قطر کمتر اما با سختی بیشتر در شتاب بیشتر مقاومت جانبی بیشتری نسبت به شمع مدل با قطر بیشتر در شتاب کمتر دارد.

ب) کلینکورت همچنین با آزمایش استاتیکی بر روی ۴ شمع دیگر نیز ثابت کرده است محل چرخش شمع در شمع‌های کوتاه در حدود ۰/۸ برابر عمق مدفون شمع از سطح خاک یعنی به فاصله ۰/۲L از نوک شمع است.



شکل ۶- نمودار محل چرخش شمع در برابر جابجایی سرشمع[۱۳]

ج) وی همچنین با انجام آزمایش بارگذاری استاتیکی بر روی یک شمع با ۲ عمق مدفون و ۳ طول آزاد مختلف مشاهده کرده است که زمانی، ظرفیت باربری نهایی جانبی خاک رخ می‌دهد که جابجایی افقی سر شمع تقریباً به حدود ۲ برابر قطر شمع برسد.



شکل ۷- نمودارهای نیرو –تغییر مکان سرشمع در طول آزاد و عمق مدفون‌های متفاوت[۱۴]

نتیجه دیگری که می‌توان از نمودارهای شکل ۷ گرفت، این است که اگر یک شمع با طول آزاد و عمق مدفون مشخص را ابتدا تحت آزمایش بارگذاری جانبی قرار دهیم و در مرحله بعد در یک حالت با ثابت نگه داشتن عمق مدفون، طول آزاد آن را به یک اندازه مشخص کاهش دهیم و یا در حالت دیگر در با ثابت نگه داشتن طول آزاد ، عمق مدفون آن را به همان اندازه افزایش دهیم و در هر دو حالت، آزمایش بارگذاری جانبی را روی شمع انجام دهیم اثر افزایش عمق مدفون روی افزایش ظرفیت باربری به مراتب بیشتر از اثر کاهش طول آزاد است.

۶ –مفهوم مدل‌سازی سانتریفوژ

مزیت و برتری اصلی آزمایش‌های سانتریفوژ در آن است که تنش‌های وارده در مدل می‌تواند جایگزین تنش‌های حالت اولیه گردد. این موضوع دارای اهمیت بالایی است زمانی که مواد و خاک مورد آزمایش، مانند ماسه دارای چه رفتار تنش- کرنش از خود هستند، زمانی‌که تحت فشار محصور کننده قرار می‌گیرند [۱۵]. در سانتریفوژها براساس نسبت شتاب گرانشی به شتاب ثقل زمین که با N نمایش داده می‌شود، ابعاد خطی مدل کوچک می‌گردد (l/N). در جدول ۳، قوانین شبیه‌سازی برای مدل‌سازی سانتریفوژ در فضای Ng بطور خلاصه نشان داده شده است.

جدول ۳ - روابط شبیه‌سازی برای مدل سازی سانتریفوژ در فضای Ng

پارامتر	مقیاس (واقعیت / مدل)
شتاب	N
طول	$1/N$
مساحت	$1/N^2$
حجم	$1/N^3$
تنش	1

۶-۱- سانتریفوژ دانشگاه تهران

دستگاه سانتریفوژ شامل یک بازوی چرخنده به همراه سبد آزمایش به صورت ثابت با مفصل گردان در انتها می‌باشد. سانتریفوژ دانشگاه تهران از نوع سانتریفوژهای بازویی بوده که دارای سکوی شناور هستند. در شکل ۸ تصویر این سانتریفوژ را می‌توان ملاحظه نمود.

شکل ۸ –سانتریفوژ ژئوتکنیکی دانشگاه تهران

[Downloaded from marine-eng.ir on 2026-11-10]

[DOR: 20.1001.1.17357608.1394.11.22.4.0]

۷ –مشخصات مصالح خاکی

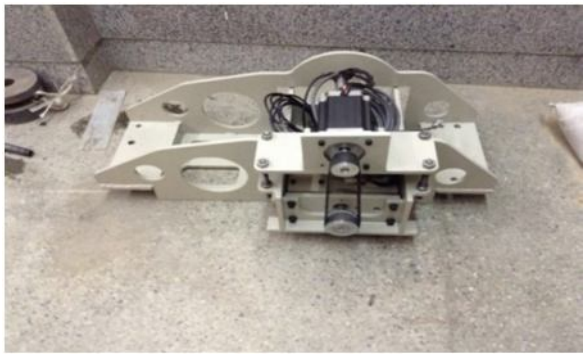
خاک مورد استفاده در ساخت مدلهای فیزیکی، ماسه ۱۶۱ فیروزکوه می‌باشد. این خاک که به عنوان یک خاک استاندارد است دارای دانه‌بندی یکنواخت و مشابه به ماسه تویورا ژاپن می‌باشد. مشخصات فیزیکی و مکانیکی این خاک در جدول ۴ آورده شده است. همچنین آزمایش‌های صورت گرفته با تراکم ٪۶۰ و رطوبت ٪۵ انجام شده است.

جدول ۴ –مشخصات ماسه فیروزکوه ۱۶۱

نوع ماسه	G_s	C_u	C_c	D_{50} [mm]
۱۶۱ فیروزکوه	۲/۶۵۸	۱/۸۷	۰/۸۸	۰/۳

۸ –ساخت دستگاه شبیه‌ساز بارگذاری جانبی

با توجه به محدودیت فضا در سانتریفوژ، سیستم حرکت و متعلقات آن نیز باید حداقل حجم را اشغال نمایند. با توجه به عدم وجود سیستم بارگذاری در سانتریفوژ تصمیم به ساخت یک دستگاه بارگذاری جانبی دارای استپر موتور مکانیکی برای اعمال بارگذاری استاتیکی متناسب با محفظه خاک گرفته شد. به دلیل افزایش وزن قطعات در فضای با شتاب بالا در حین چرخش سانتریفوژ و نیروهای با مقدار زیاد برای اعمال بارگذاری، استپر موتور ۶۶kgf.m جهت نصب در سیستم بارگذاری انتخاب گردید که بتواند با راندمان بالا نیروهای لازم برای جابجایی افقی شمع را اعمال کند.مکانیسم عملکرد دستگاه شبیه‌ساز بارگذاری جانبی به صورتی است که چرخش استپر موتور، به دو عدد پولی و یک تسمه به دور آنها منتقل شده و این حرکت به انتهای یک بال اسکرو وارد می‌گردد. بال اسکرو حرکت دورانی ایجاد شده در موتور را به حرکت انتقالی تبدیل می‌کند. این حرکت انتقالی توسط دو عدد ریل و چهار واگن به محفظه اعمال بار و توسط آن به شفت بارگذاری منتقل می‌شود و در انتها شفت، مونوپایل را به صورت کنترل شده در جهت جانبی جابجا می‌کند. برای جلوگیری از خرابی‌های موضعی بر روی بدنه شمع از یک قطعه یکنواخت کننده نیرو استفاده شده است. البته یک سیستم کنترل کننده قطع و وصل نیرو و تعیین جهت چرخش موتور یعنی همان جهت بارگذاری رفت و برگشتی نیز در خارج دستگاه سانتریفوژ تعبیه گردید. دستگاه کامل شده شبیه ساز بارگذاری جانبی را می‌توان در شکل ۹ ملاحظه کرد. نوع بارگذاری در تمام آزمایش‌ها به صورت یکطرفه و استاتیکی می‌باشد.



شکل ۹ –دستگاه شبیه‌ساز بارگذاری جانبی

۹ –مشخصات مونوپایل مورد آزمایش

مونوپایل مورد استفاده در کلیه آزمایش‌ها از جنس استنلس استیل ۳۱۶ می‌باشد که از نظر مدول الاستیسیته بسیار نزدیک به مونوپایل‌های مورد استفاده در دریا بوده که مشخصات مکانیکی و مقایسه‌ای با سایر فولادها را می‌توان در جدول ۵ ملاحظه کرد. لازم به ذکر است که مونوپایل انتخابی دارای قطر ۲/۵ سانتی‌متر و ضخامت ۰/۵ میلی‌متر می‌باشد که در شتاب ۴۰g بر اساس قوانین مقیاس یک مونوپایل با قطر ۱ متر در واقعیت را مدلسازی می‌کند و درتمامی آزمایش‌ها برقرار است.

جدول ۵ - مشخصات مکانیکی استنلس استیل ۳۱۶

جنس لوله	وزن مخصوص $[kg/m^3]$	تنش تسلیم [MPa]	تنش نهایی [MPa]	مدول الاستیسیته [GPa]
استنلس استیل	۷۹۳۰	۲۹۰	۵۱۵	۲۰۷
ST52	۷۸۵۰	۳۶۰	۵۲۰	۲۱۰
ST60	۷۸۵۰	۴۲۰	۶۰۰	۲۱۰
ST70	۷۸۵۰	۴۹۰	۷۰۰	۲۱۰

به منظور رفتارنگاری اندرکنش خاک و شمع در حین آزمایش از مبدلها یا سنسورهایی به قرار زیر استفاده شده است:

۱- کرنش سنج[۵]: به منظور اندازه گیری کرنش و لنگر و جابجایی در طول شمع

۲- تغییر مکان سنج خطی[۶]: برای اندازه‌گیری تغییر مکان سر شمع

۳- نیروسنج[۷]: برای محاسبه نیروی وارده به سر شمع

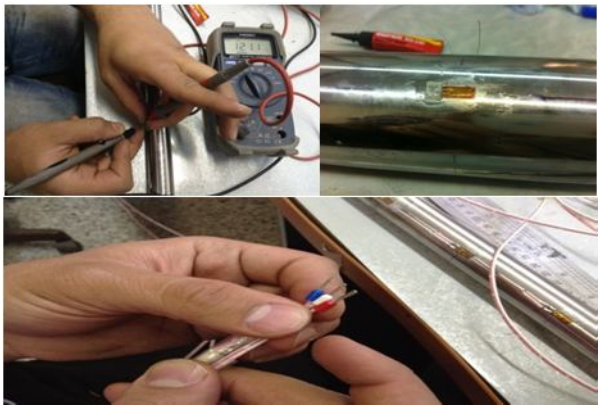
۹-۱- کرنش سنج

با توجه به نوع بارگذاری جانبی شمع، خمش در طول شمع رخ می‌دهد لذا برای اندازه‌گیری کرنش‌های خمشی در شمع می‌بایست، کرنش‌سنج‌ها بر روی محور قائم شمع، در جهت طول و در دو طرف آن قرار گیرند. از جمله عوامل اثرگذار در انتخاب کرنش‌سنج، مقدار کرنش موقعیت نصب آن است به همین دلیل برای نصب کرنش-

[Downloaded from marine-eng.ir on 2026-11-10]

[DOR: 20.1001.1.17357608.1394.11.22.4.0]

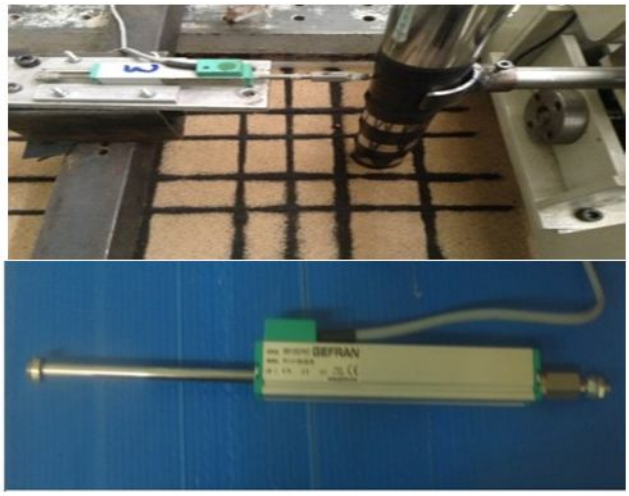
سنج‌ها در ابتدا شمع به دقت خط کشی شد و محل‌های مورد نظر برای نصب کرنش‌سنجها با دقت زیادی تعیین گردید. با توجه به طول شمع و امکانات موجود تصمیم به نصب ۱۶ عدد کرنش سنج در ۸ ایستگاه روی بدنه شمع گرفته شد. سپس در بالای این نقاط برای عبور سیمهای انتقال دهنده اطلاعات، سوراخهای ریزی ایجاد گردید. در مرحله بعد محل تعیین شده برای نصب کرنش‌سنج‌ها با استفاده از الکل و پنبه به دقت تمیز گردید تا سطح شمع برای نصب کرنش‌سنج، عاری از هر گونه آلودگی باشد. پس از آن کرنش-سنج‌ها و ترمینال‌های آنها با استفاده از چسب قطره‌ای رازی به دقت در محل‌های تعیین شده نصب گردید. در این مرحله سیم‌های رشته‌ای به هم تابیده از سوراخها عبور داده شده و به همراه سیم-های کرنش‌سنجها به ترمینال‌های نصب شده لحیم گردید. در انتها به وسیله دستگاه اهم متر عدم اتصال کوتاه کرنش‌سنجها و سیم-های آنها به بدنه شمع بررسی گردید و برای جلوگیری از کنده شدن کرنش سنجها در مراحل کوبش شمع و در حین آزمایش با چسب برق دور آنها پوشش داده شد. شایان ذکر است نحوه اتصال کرنش‌سنج‌ها به یکدیگر به صورت Full Bridge انتخاب گردید تا خروجی آن بتواند تنها با ثبت یک عدد، مستقیماً ورودی مورد نیاز برای محاسبه خمش در روابط کالیبراسیون را نمایش دهد. در شکل ۱۰ نصب کرنش‌سنج‌ها بر روی شمع نشان داده شده است.



شکل ۱۰- مراحل آماده‌سازی و نصب کرنش‌سنج‌ها بر روی بدنه شمع

۹-۲- تغییر مکان سنج

برای شناخت میزان جابجایی سر شمع و چگونگی تغییر موقعیت آن در حین آزمایش از یک عدد تغییر مکان سنج خطی در سر شمع استفاده گردیده است تا تغییر مکان در آن نقطه را ثبت نماید (شکل ۱۱).



شکل ۱۱ – تصویر تغییر مکان سنج و نحوه قرارگیری در سر شمع

۹-۳- نیروسنج

برای اندازه گیری نیروی وارد بر سر شمع از یک نیروسنج به ظرفیت ۱ تن و به شکل S استفاده شده است (شکل ۱۲).

شکل ۱۲- تصویر نیرو سنج S شکل مورد استفاده

علاوه بر این ابزاربندی، از ماسه نشانگر (مارکر) رنگی به صورت شبکه ای در سطح خاک استفاده شده است. استفاده از این نشانگرهای رنگی، به منظور امکان مشاهده بهتر تغییر شکل ها در سطح خاک پس از آزمایش است.

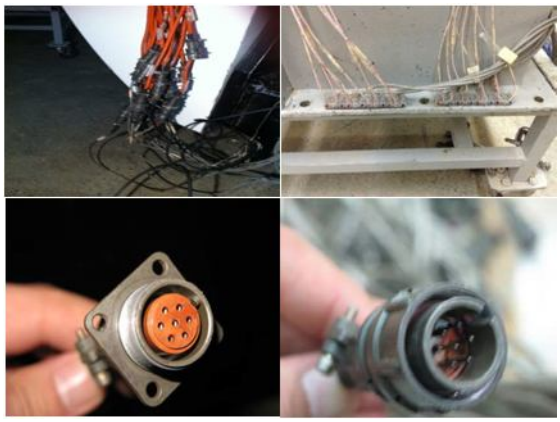
۱۰- تجهیزات قرائت و انتقال داده ها

برای قرائت و ثبت داده‌ها، از دیتالاگر داخلی دستگاه سانتریفوژ استفاده شده است. لیکن با توجه به امکان استفاده از اتصالات لغزشی و یا سیستم بی سیم، در این تحقیق از اتصالات لغزشی جهت انتقال داده‌ها استفاده شده است. از جمله مسائل حائز اهمیت در سیستم انتقال داده‌ها در دستگاه، اتصالات به کار رفته برای ارتباط سنسورها از دستگاه شبیه‌ساز به مدارهای داخلی سانتریفوژ است. چرا که می‌بایست این اتصالات به اندازه لازم محکم بوده و در شتاب بالا مقاومت نمایند و نیز به سهولت امکان اتصال و انفصال داشته باشند، تا بتوان محفظه را برای آماده سازی به بیرون از دستگاه سانتریفوژ منتقل کرد. در شکل ۱۳ تصویر اتصالات به کار

[Downloaded from marine-eng.ir on 2026-11-10]

[DOR: 20.1001.1.17357608.1394.11.22.4.0]

رفته در دستگاه که از نوع اتصالات رایج در تجهیزات نظامی می-باشد نشان داده شده است.



شکل ۱۳- تصویر اتصالات به کار رفته برای سیستم انتقال داده از سنسورها

۱۱ – محفظه خاک

ابعاد محفظه خاک باید متناسب با ابعاد مونوپایل و شرایط مرزی آن باشد به صورتی که در زمان اعمال بار جانبی به مونوپایل و تغییر مکان متناظر با آن دیواره‌های محفظه خاک کمترین اثر را روی خاک جابجا شده در اطراف شمع داشته باشند. این محفظه دارای طول ۸۰ سانتی‌متر ، عرض ۶۰ سانتی‌متر و ارتفاع ۵۰ سانتی‌متر می‌باشد که از ورقهای فولادی به ضخامت ۱ سانتی‌متر ساخته شده است.

۱۲ – برنامه آزمایش‌ها

در این تحقیق در مجموع ۵ آزمایش انجام پذیرفت که ۳ آزمایش با اعمال طول آزاد ثابت و با عمق مدفون متفاوت صورت گرفت و ۲ آزمایش دیگر با ثابت نگه‌داشتن یکی از عمق‌های مدفون مرحله قبل و با تغییر دادن طول آزاد انجام گردید. در جدول ۶ می‌توان برنامه آزمایش‌های صورت گرفته را ملاحظه کرد. قابل ذکر است که سرعت بارگذاری در تمام آزمایش‌ها ۰/۲۴ mm/s و مدت آن ۷۰ s می‌باشد. همچنین در شکل ۱۴ می‌توان نمونه آماده شده مدل به همراه تمامی تجهیزات را مشاهده کرد.

جدول ۶ – برنامه و مشخصات آزمایش‌ها

شماره آزمایش	عمق مدفون [cm]	طول آزاد [cm]	$\frac{L}{D}$	$\frac{e}{D}$
۱	۳۷/۷۴	۲۴/۵	۱۵/۱	۹/۸
۲	۳۰/۶	۲۴/۵	۱۲/۲	۹/۸
۳	۲۶/۵۲	۲۴/۵	۱۰/۶	۹/۸
۴	۲۶/۵۲	۲۹/۵	۱۰/۶	۱۱/۸
۵	۲۶/۵۲	۳۴/۵	۱۰/۶	۱۳/۸

شکل ۱۴ –نمونه آماده شده مدل برای انجام آزمایش

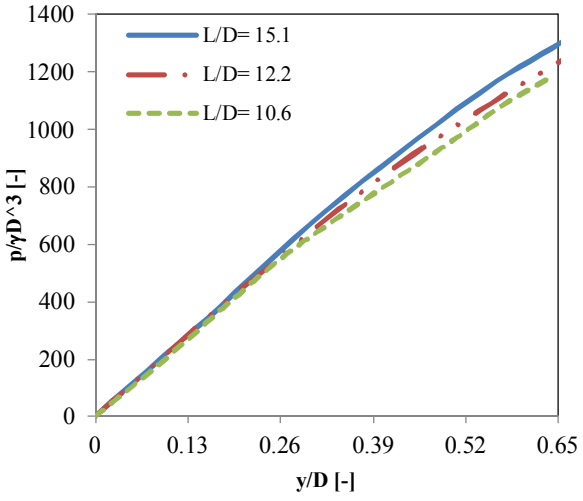
۱۳ – نمودارها و نتایج

در ابتدا نمودارهای مقایسه‌ای بدون بعد نیرو – جابجایی سر شمع با در نظر گرفتن اثر دو پارامتر عمق مدفون و طول آزاد بدست آمده و پس از آن منحنی‌های p-y حاصل از آزمایش‌ها ارائه می‌گردد و با منحنی‌های بدست آمده از روابط API مقایسه می‌گردد و اصلاحات لازم در نمودارها مورد بررسی قرار گرفته و بحث می‌شود.

۱۳-۱- نمودار نیرو – جابجایی در سر شمع

۱۳-۱-۱- اثر عمق نفوذ شمع در خاک (L)

همان‌طور که در نمودار شکل ۱۵ مشخص است با کاهش میزان فرو رفت شمع در خاک، از سختی جانبی شمع در خاک کاسته می‌شود و همین امر باعث کاهش میزان ظرفیت باربری جانبی شمع به ازای یک جابجایی خاص می‌گردد. البته لازم به ذکر است با توجه به نمودارهای مقایسه‌ای نشان داده شده میزان تغییرات سختی و ظرفیت باربری به ازاء تغییر در نفوذ شمع بسیار کم بوده و این تغییرات به یکدیگر نزدیک هستند. همان‌گونه که ملاحظه می‌گردد مقدار تغییرات ظرفیت باربری با هم تقریباً مقداری معادل ۵٪ تفاوت دارند این در حالیست که مقدار نفوذ در هر کدام از آزمایش‌ها با آزمایش قبلی خود ۱۵ الی ۲۰ درصد با یکدیگر تغییرات داشته‌اند.

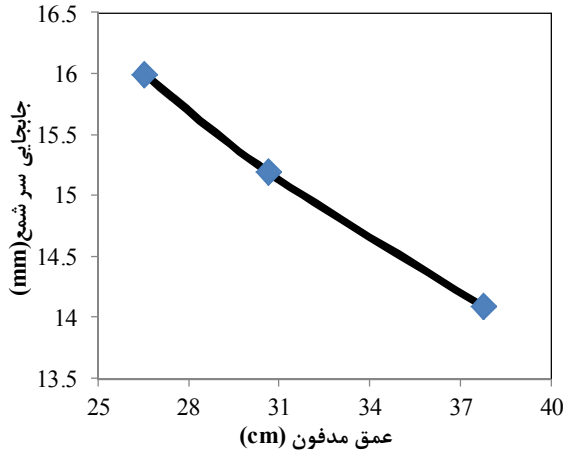


شکل ۱۵ – اثر عمق نفوذ شمع در خاک

[Downloaded from marine-eng.ir on 2026-11-10]

[DOR: 20.1001.1.17357608.1394.11.22.4.0]

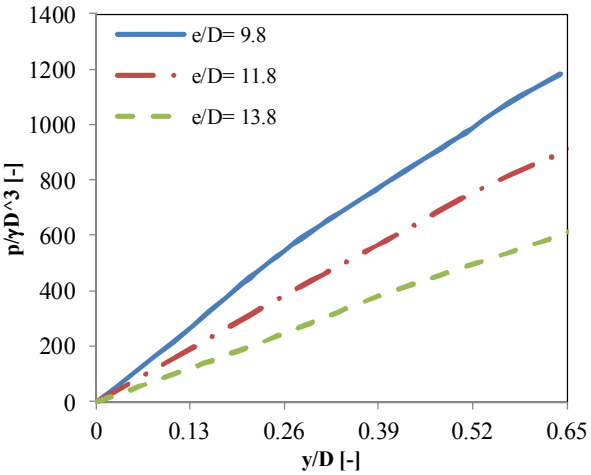
همچنین با توجه به شکل ۱۶ می‌توان نشان داد که با افزایش طول فرورفت شمع در خاک، از میزان جابجایی جانبی در سر شمع به ازای یک نیروی خاص کاسته می‌شود.



شکل ۱۶ –نمودار اثر عمق مدفون بر جابجایی در سر شمع برای ۳ آزمایش اول

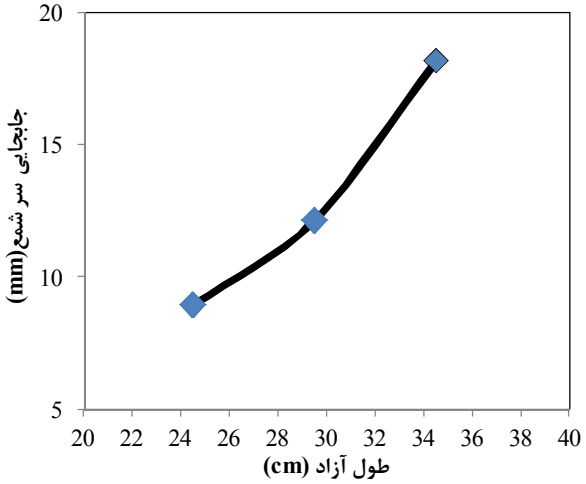
۱۳-۱-۲- اثر طول آزاد (e)

همان‌گونه که از نمودارشکل ۱۷ در مورد تغییرات در میزان طول آزاد مشخص است، میزان تغییرات در این پارامتر تأثیرگذارتر از تغییر در میزان عمق نفوذ است. در ۳ آزمایش نشان داده شده، طول آزاد به میزان تقریباً ٪۱۵ از آزمایش قبلی خود تغییر پیدا کرده است. همان طور که ملاحظه می‌گردد با افزایش طول آزاد، از سختی جانبی شمع کاسته شده و شیب نمودارها رو به کاهش است و به تبع آن نیز ظرفیت باربری جانبی نیز کاسته می‌شود، البته لازم به تذکر است که این تغییرات به نسبت با تغییرات رخ داده در بخش قبل بسیار قابل ملاحظه‌تر بوده، به طوری از سختی جانبی به ازای افزایش طول آزاد، تقریباً ٪۲۰ کاسته می‌شود. در این حالت نیز باز هم شمع به ظرفیت نهایی و حالت غیرخطی خود نرسیده است.



شکل ۱۷ –اثر طول آزاد

با توجه به نمودار شکل ۱۸ نیز مشاهده می‌گردد که با افزایش طول آزاد، میزان جابجایی در سر شمع نیز افزایش می‌یابد.



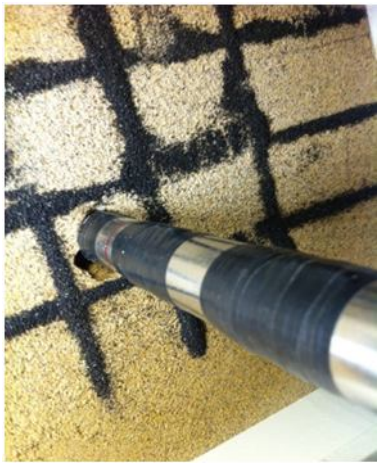
شکل ۱۸ – نمودار اثر طول آزاد بر جابجایی در سر شمع برای ۳ آزمایش دوم

۱۳-۲- تغییرات در شمع و خاک پس از بارگذاری

در مورد خاک و تغییر شکل‌های مربوط به آن نیز همان طور که در شکل ۱۹ مشخص می‌باشد در جلوی خاک تغییر شکل‌های محسوسی اصلاً رخ نمی‌دهد که بخواهد خاک را به صورت قابل ملاحظه‌ای جابجا کند و یا اثر جانبی زیادی بر روی خاک اطراف شمع داشته باشد. تنها اتفاقی که در مورد خاک اطراف شمع اتفاق می‌افتد آن است که مقداری از آن در پشت شمع خالی می‌شود که در شکل‌ها نیز کاملاً مشخص است. البته در شمع‌های با قطر بزرگتر برآمدگی در جلوی شمع بدلیل رفتار خمیری خاک بوجود می‌آید که محسوس‌تر می‌باشند. علت آن که تغییر شکل و جابجایی محسوسی در جلوی شمع ملاحظه نمی‌شود، بخاطر این موضوع می‌باشد که هم مدت بارگذاری بدلیل طول کوتاه تغییرمکان سنج و محدودیتهای موجود در محفظه خاک و عوامل دیگر کم می‌باشد و هم قطر شمع به گونه‌ای است که نمی‌تواند اثر زیادی بر روی خاک اطراف گذاشته و به عبارتی دیگر شرایط مرزی عامل محدود کننده زیادی برای این قطر نمی‌باشد و در نتایج تأثیر بسزایی ندارد. البته لازم به ذکر است که با باربرداری از روی شمع، شمع تا حدی به صورت الاستیک عمل کرده و مقداری از جابجایی را جبران می‌کند.

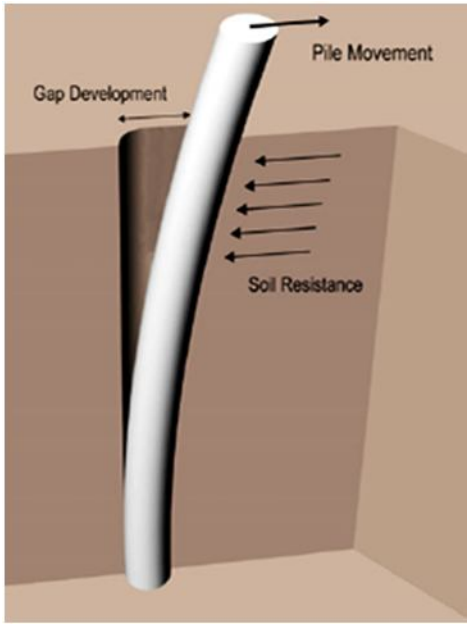
[Downloaded from marine-eng.ir on 2026-11-10]

[DOR: 20.1001.1.17357608.1394.11.22.4.0]

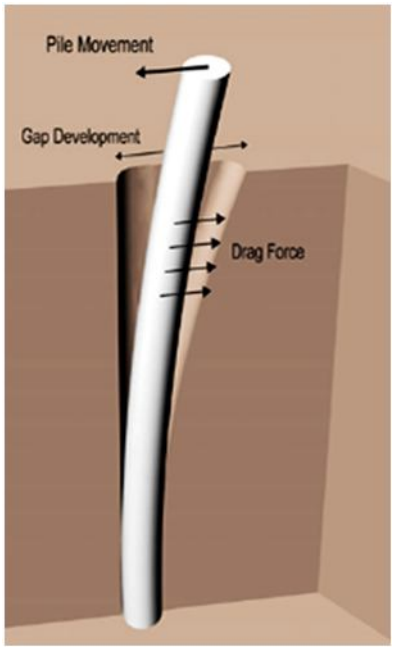


شکل ۱۹- خالی شدن خاک پشت شمع پس از آزمایش

با توجه به شکل ۱۹ در پایان آزمایش‌ها همان گونه که مشخص می‌باشد، در سطح خاک و جلوی شمع با توجه به این قطر میزان جابجایی‌های سطحی و اثرات شرایط مرزی بسیار کم می‌باشد. اما نکته قابل توجه مربوط به ایجاد فاصله در پشت شمع و ایجاد مقاومت در جلوی شمع می‌باشد که می‌توان در شکل ۲۰ آن را ملاحظه کرد. همان‌گونه که مشخص است با ایجاد بارگذاری جانبی یکطرفه، در پشت شمع یک فاصله بین خاک و سازه ایجاد می‌گردد و پس از باربرداری با توجه به ماهیت رفتاری مونوپایل‌ها و خاصیت جذب انرژی بالای آن‌ها مقداری از شمع جابجا شده برمی‌گردد و آن فاصله ایجاد شده در حین بارگذاری کمتر می‌شود. البته باید این نکته نیز قید گردد که این رفتار در خاک‌های خشک اتفاق می‌افتد و در حالت اشباع و شرایطی که کاملاً در داخل آب می‌باشد نیز نیاز به بررسی‌های بیشتری وجود دارد.

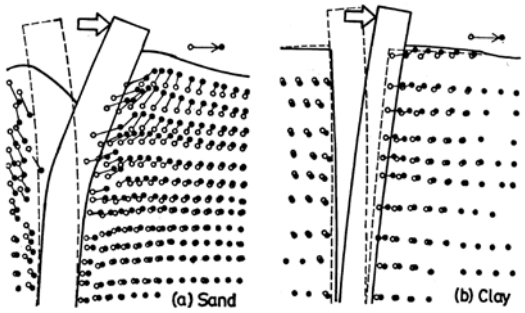


شکل ۲۰- پاسخ خاک و شمع در هنگام بارگذاری [۱۶]



شکل ۲۱- پاسخ خاک و شمع در هنگام باربرداری [۱۶]

کیشیدا و همکاران [۱۶] در سال ۱۹۸۵ نیز بوسیله مشاهدات از طریق اشعه ایکسو مدل‌سازی مونوپایل‌ها هم در خاک رسی و هم ماسه‌ای و بارگذاری جانبی، به همین تغییر شکل در خاک ماسه‌ای رسیدند و در شکل ۲۲ می‌توان تفاوت بین تغییرات ایجاد شده در ماسه و رس را در جلو و پشت شمع تحت بار مشاهده کرد.



شکل ۲۲- مقایسه تغییر شکل جانبی خاک –شمع در رس و ماسه بوسیله اشعه ایکس

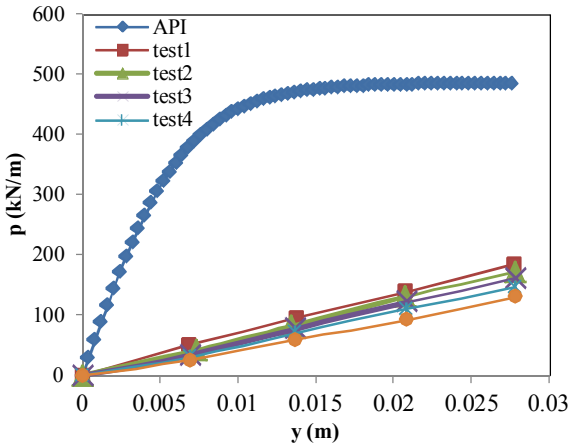
۱۳-۳- منحنی‌های p-y

همان‌گونه که اشاره شد، منحنی p-y در API با توجه به روابط و نمودارها به عمق خاک، قطر شمع و مشخصات خاک مانند زاویه اصطکاک داخلی و میزان تراکم آن بستگی دارد. این روابط و فرضیات بر اساس آزمایش‌های برجا بر روی نوع مشخصی از خاک با ویژگی‌های ثابت صورت پذیرفته است. حال با توجه به مشخصات خاک مورد آزمایش و همچنین عمق مورد نظر و نیز قطر مونوپایل و قرار دادن این مقادیر در روابط ذکر شده در API برای دو عمق Z=2D و Z=3D می‌توان این نمودارها را رسم کرد. لازم به ذکر این نکته نیز ضروری می‌باشد که با توجه به روابط ارائه شده در

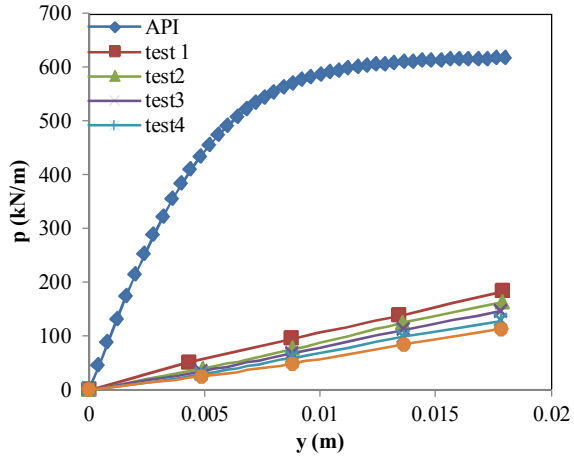
[Downloaded from marine-eng.ir on 2026-11-10]

[DOR: 20.1001.1.17357608.1394.11.22.4.0]

API و مقدار تراکم نسبی در آزمایش‌ها، ضریب عکس‌العمل بستر برای منحنی‌های p-y در API، $\frac{kN}{m^3}$ ۴۰۰۰۰ بدست می‌آید. پس از رسم منحنی‌های p-y بوسیله روابط موجود در API، نوبت به رسم منحنی‌های p-y حاصل از آزمایش‌های تحقیق حاضر می‌باشد. نحوه بدست آوردن این منحنی‌ها بدین‌گونه است که، با توجه به نمودارهای لنگر بدست آمده و تابع حاصل از آن به ازای نیروهای مختلف، با دو بار انتگرال‌گیری از این توابع و قرار دادن شرایط مرزی برای بدست آوردن ضرایب ثابت، مقدار جابجایی y برای هرکدام از آزمایش‌ها بدست می‌آید. به منظور بدست آوردن مقدار مقاومت خاک یا همان p، از توابع لنگر ذکر شده در بالا با دو بار مشتق گرفتن حاصل می‌شود و با قرار دادن عمق‌های مختلف شمع در خاک، نمودار p-y حاصل از آزمایش‌ها بدست می‌آید. لازم به توضیح است که شرایط مرزی مذکور عبارتست از مقدار جابجایی در سر شمع با توجه به نتایج بدست آمده از آزمایش‌ها و همچنین مقدار شیب صفر در انتهای آن می‌باشد. نمودارهای حاصل از این محاسبات را در شکل‌های ۲۳ و ۲۴ به ازای دو عمق Z=2D و Z=3D هم برای API و هم حاصل از آزمایش‌ها را به صورت مقایسه‌ای می‌توان ملاحظه کرد.



شکل ۲۳ - مقایسه منحنی p-y آزمایش‌ها و API در عمق Z=2D



شکل ۲۴ - مقایسه منحنی p-y آزمایش‌ها و API در عمق Z=3D

همان‌گونه که از نمودارهای بالا مشخص است، با افزایش عمق میزان ظرفیت باربری جانبی نیز افزایش می‌یابد، به طوری که ٪۲۵ مقدار ظرفیت باربری در عمق پایین‌تر، بیشتر می‌باشد. از روی نمودارها مشخص می‌باشد که با توجه به بارگذاری اعمال شده به مونوپایل، رفتار آن کاملاً الاستیک و خطی بوده و به ظرفیت باربری جانبی نهایی نرسیده و تا ناحیه پلاستیک غیر خطی نیز فاصله زیادی می‌باشد و برای دستیابی به این منظور باید بارگذاری را ادامه داد. همچنین همان‌طور که ملاحظه می‌گردد با کاهش عمق مدفون و افزایش طول آزاد (به ترتیب نحوه انجام آزمایش‌ها)، مقدار ظرفیت باربری جانبی رو به کاهش است که البته اختلاف بین این مقادیر ٪۱۰ برای هر دو عمق می‌باشد.

با توجه به نمودارهای p-y ارائه شده در API و همچنین رسم نمودارهای p-y حاصل از آزمایش‌ها، اختلاف بسیار زیادی در ارتباط با این دو نمودار و در واقع شیب اولیه آن‌ها درباره بدست آوردن ظرفیت باربری جانبی وجود دارد. با توجه به موارد ذکر شده و اختلاف نشان داده شده باید نمودار p-y در API را اصلاح نمود. برای بررسی این موضوع از آنجا که قطر شمع، عمق محاسبه منحنی و جنس خاک قابل تغییر نیست در شکل‌های ۲۵ و ۲۶ مقادیر مدول عکس العمل اولیه بستر تغییر داده شده و منحنی‌های API اصلاح شده‌ای برای آن مقادیر رسم شده است. ملاحظه می‌شود مقادیر k کمتر، انطباق مناسب‌تری با مقادیر نیروی حاصل از آزمایش ایجاد می‌کند. از این رو می‌توان نتیجه گرفت که در شرایطی که بخواهیم از منحنی‌های p-y موجود در API نتایج قابل قبولی برای شمع‌های با قطر زیاد بدست آوریم باید برای بدست آوردن مدول عکس‌العمل اولیه بستر k بر روی خاک مورد بررسی آزمایش انجام دهیم و مقدار k را برای پروژه مورد نظر بیابیم.

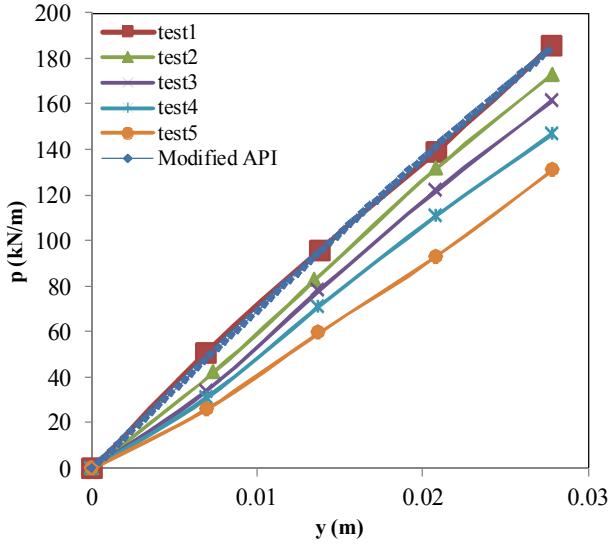
همچنین در ترسیم منحنی‌های p-y سنتی API مواردی از جمله میزان تغییرات عمق مدفون و تغییرات طول آزاد در نظر گرفته نمی‌شوند اما از منحنی‌های p-y حاصل از آزمایش‌ها مشهود است که افزایش عمق مدفون شمع یا کاهش طول آزاد آن موجب تقویت ظرفیت باربری شمع می‌شود.

شایان ذکر است با مقادیر k کمتر منحنی API به قسمت ثابت خود نمی‌رسد و رسیدن به قسمت افقی نمودار یعنی رسیدن به مرحله گسیختگی، مستلزم داشتن جابجایی زیاد است که در پنج آزمایش تحقیق حاضر به چنین جابجایی زیادی برای گسیختگی کامل نرسیده‌ایم و این عامل نیز نشان دهنده لزوم کاهش و اصلاح مقادیر k برای ترسیم منحنی API اصلاح شده است. با انجام محاسبات صورت گرفته و مقایسه با منحنی‌های حاصل از آزمایش مقدار $\frac{kN}{m^3}$ ۳۵۰۰ تا رسیدن و نزدیک شدن به مقادیر آزمایش اول

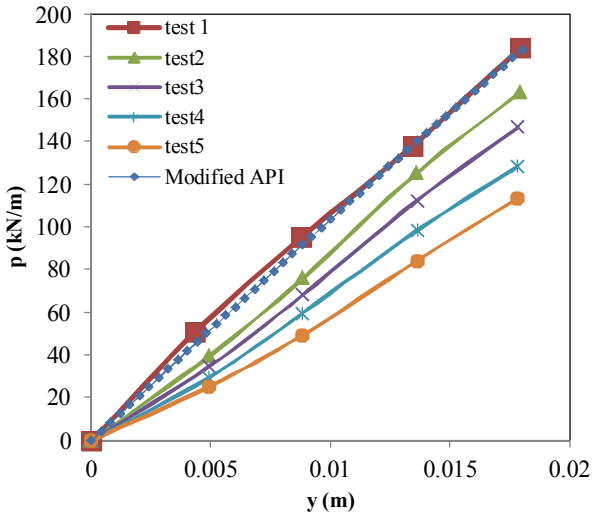
[Downloaded from marine-eng.ir on 2026-11-10]

[DOR: 20.1001.1.17357608.1394.11.22.4.0]

بدست می‌آید. لازم به ذکر است که برای هر دو عمق این مقدار یکسان بوده و با افزایش عمق این مقدار تغییری نمی‌کند.



شکل ۲۵- اصلاح نمودار API در عمق Z=2D ($k_h = 3500 \frac{kN}{m^3}$)



شکل ۲۶ - اصلاح نمودار API در عمق Z=3D ($k_h = 3500 \frac{kN}{m^3}$)

مقدار ضریب عکس‌العمل بستر در API بسیار بیشتر و دست بالاتر از مقادیر تعریف شده ارتباط بین تراکم اولیه خاک و مقاومت آن، حاصل از آزمایش‌ها در نظر گرفته شده است. زیرا سایر پارامترهای محاسبه شده در رابطه یعنی قطر شمع و عمق نفوذ ثابت می‌باشند. اختلاف موجود در ظرفیت باربری جانبی بین API و مقادیر آزمایشگاهی در عمق 2D، ۴۰٪ و در عمق 3D، ۳۰٪ می‌باشد که حاکی از آن است که محاسبات صورت گرفته در API بسیار دست بالا و محافظه کارانه می‌باشد. به همین منظور و برای سازگاری نتایج حاصل از این دو مقایسه باید اصلاحاتی در مقادیر API صورت پذیرد، که اصلاح صورت گرفته در ضریب عکس‌العمل بستر خاک k_h به همان مقادیر یاد شده در بالا می‌باشد. در سایر آزمایش‌ها نیز این مقادیر اصلاحی برای k محاسبه گردیده است که برای آزمایش سوم این مقدار $\frac{kN}{m^3}$ ۳۰۰۰ بدست می‌آید که کمتر از آزمایش اول می‌باشد.

۱۳-۴- بحث روی نتایج حاصل از مقایسه منحنی p-y آزمایش‌ها و API

همان طور که ملاحظه می‌شود مقادیر k کمتر انطباق مناسب‌تری با مقادیر نیروی حاصل از آزمایش ایجاد می‌کند. از این رو می‌توان نتیجه گرفت که در شرایطی که بخواهیم از منحنی‌های p-y موجود در API نتایج قابل قبولی برای شمع‌های با قطر زیاد بدست آوریم باید برای بدست آوردن مدول عکس‌العمل اولیه بستر (k) بر روی خاک مورد بررسی آزمایش انجام دهیم و مقدار k را برای پروژه مورد نظر بیابیم.

همچنین در ترسیم منحنی‌های p-y سنتی API مواردی از جمله میزان تغییرات عمق مدفون و تغییرات طول آزاد در نظر گرفته نمی‌شوند اما از منحنی‌های p-y حاصل از آزمایشات مشهود است که افزایش عمق مدفون شمع (L) یا کاهش طول آزاد (e) آن موجب تقویت ظرفیت باربری شمع می‌شود.

شایان ذکر است با مقادیر k کمتر، منحنی API به قسمت ثابت خود نمی‌رسد و رسیدن به قسمت افقی نمودار یعنی رسیدن به مرحله گسیختگی مستلزم داشتن جابجایی زیاد است که در آزمایش‌های تحقیق حاضر به چنین جابجایی زیادی برای گسیختگی کامل نرسیده‌ایم و این عامل نیز نشان دهنده لزوم کاهش و اصلاح مقادیر k برای ترسیم منحنی API اصلاح شده است.

۱۴ – نتیجه‌گیری

در این تحقیق ۵ آزمایش برای مشخص کردن اثر طول آزاد و نیز عمق مدفون شمع بر ظرفیت باربری جانبی انجام پذیرفت. بر همین اساس منحنی‌های نیرو – تغییر مکان سر شمع و نیز منحنی‌های p-y در هر آزمایش استخراج گردید و بر مبنای آنها و نیز بر مبنای مشاهدات عینی از آزمایش‌ها نتایج زیر بدست آمده است:

۱- رفتار جانبی شمع تا جابجایی رخ داده یعنی ۰/۶۵D به صورت خطی است و به ناحیه غیر خطی نرسیده‌ایم.

۲- با افزایش عمق مدفون، جابجایی در سر شمع کاسته می شود و با افزایش طول آزاد افزایش می یابد.

۳- اثر طول آزاد در جابجایی های رخ داده در سر شمع بیشتر از عمق نفوذ می باشد.

۴- مقادیر سختی اولیه پیش بینی شده بوسیله API تقریباً ۱۱/۵ برابر بیشتر از مقادیر اولیه سختی خاک محاسبه شده است، به همین دلیل مقادیر ضریب عکس العمل بستر، k، در آن باید اصلاح

[Downloaded from marine-eng.ir on 2026-11-10]

[DOR: 20.1001.1.17357608.1394.11.22.4.0]

گردد. در واقع برای استفاده از منحنی‌های p-y آئین‌نامه API باید در ابتدا مقدار مدول عکس‌العمل اولیه بستر را با استفاده از آزمایش برای خاک محل کالیبره کنیم. به عبارتی محاسبات صورت گرفته در API بسیار دست بالا و محافظه کارانه می‌باشد.

۵- آئین‌نامه API برای رسم منحنی p-y تغییرات عمق مدفون و طول آزاد را به طور مستقیم در نظر نمی‌گیرد اما در آزمایش‌ها مشخص شد که تغییرات این دو پارامتر در میزان بار تحمل شده در اعماق مختلف تأثیرگذار است و شکل منحنی p-y را تغییر می‌دهد.

۶- ضریب عکس العمل بستر k_h علاوه بر میزان بار جانبی، به هندسه شمع اعم از قطر نیز بستگی دارد.

۷- با افزایش عمق از 2D به 3D مقدار ضریب عکس‌العمل بستر تغییری نمی‌کند و نشان از آن دارد که این پارامتر به عمق خاک بستگی چندانی ندارد.

از مهم‌ترین دستاوردهای این پژوهش می‌توان به این نکته اشاره کرد که در این تحقیق دستگاهی برای بارگذاری جانبی روی شمع در دستگاه سانتریفوژ ژئوتکنیکی ساخته و بخش‌های مختلف فعالیت آن کالیبره شد. همچنین با بررسی و مقایسه نتایج آن با معتبرترین منحنی‌های نیرو – تغییر مکان موجود به صحت عملکرد آن تا حد زیادی پی برده شد. بر همین اساس می‌توان در آینده پروژه‌های متعددی را با این دستگاه تعریف کرده و مدل شمع های واقعی را در مقیاس کوچک مدل‌سازی نموده و منحنی‌های نیرو – تغییر مکان و لنگر آنها را برای استفاده در طراحی آنها بدست آورد. همچنین می‌توان با تغییر در پارامترهای خاک و یا اشباع کردن آن و تغییر در میزان تراکم، تحقیقات مختلفی در همین راستا برای آینده پیشنهاد نمود.

کلید واژگان

1- Dolphin
2- Mustang Island
3- Stepper Motor
4- Ball Screw
5- Strain Gauge
6- Linear Variable Differential Transformer
7- Load Cell

۱۳ – مراجع

1- Poulos, H. G. and Davis, E. H., (1980), *Pile Foundation Analysis And Design*, John Wiley & Sons Publisher, p. 124-127

2- Huang, J. W., (2011), *Development of modified p-y curves for Winkler Analysis to characterize the lateral load behavior of a single pile embedded in improved soft clay*, MS.c. Thesis, Iowa State University, p.53-57

3- Reese, L. C. Cox, W. R. and Koop, F. D., (1974), *Analysis of laterally loaded piles in sand*, Offshore Technology Conference, p. 12-24

4- Murchinson, J. M. and O'Neill, M. W., (1984), *Evaluation of p-y relationships in cohesionless soils*, Symposium of Analysis and Design of Pile Foundations, ASCE ,San Fransisco, p.1-8

5- Sadeghi-Hokmabadi, A. Seyfi, H. and Fakher, A., (2009), *Analysis of single piles under lateral loading using the Strain Wedge Model*. 8th International Congress of Civil Engineering (8ICCE), Shiraz University, Shiraz, Iran (In Persian).

6- Recommended Practice for Planning, (2007), *Designing and Constructing Fixed Offshore Platforms - Working Stress Design,* API RP 2A-WSD – Errata.

7- A. Bouafia., (2013), *P-Y curves from the prebored pressuremeter test for laterally loaded single piles*, 18th International Conference on Soil Mechanics and Geotechnical Engineering, Paris, p. 1-9

8- J. Ruigrok., (2010), *Laterally Loaded Piles Models and Measurements*, Ph.D. Thesis, Faculty of Civil Engineering and Geosciences TU, Delft, p. 48-52

9- L. a. L. H. I. Brant., (2006), *Centrifuge Modeling of Piles Subjected to Lateral Loads,* Journal of Soil Stress-Strain Behavior: Measurement, Modeling and Analysis, Vol, 15, p. 15-20

10- T. Leth, A. Krogsboll and O. Hededal., (2008), *Centrifuge facilities at Technical University of Denmark,* Nordisk Geotechnical Conference, Norway, p. 335-342

11- E. A. Alderlieste., (2011), *Experimental modelling of lateral loads on large diameter mono-pile foundations in sand,* MS.c. Thesis, Delft University Of Technology, p.94-96

12- Z. Li, S. K. Haigh and M. D. Bolton., (2008), *Centrifuge modelling of monopile under cyclic lateral loads,* 7th International Conference on Physical Modelling in Geotechnics ,Zurich, p.128-138

13- R. T. Klinkvort, C. T. Leth and O. Hededal., (2010), *Centrifuge modelling of a laterally cyclic loaded pile,* Journal of Physical Modelling in Geotechnics, Vol. 22, p. 1-6

14- R. L. C. &. H. O. Klinkvort., (2010), *Centrifuge modelling of a laterally cyclic loaded pile,* Journal of Physical Modelling in Geotechnics – Springman, Laue & Seward (eds), Taylor & Francis Group, p. 15-26

15- Achmus, M. Kuo, Y. S. and Abdel-Rahman, K., (2009*), Behavior of monopile foundations under cyclic lateral load*, journal of Computers and Geotechnics, Vol. 36, p. 725-735

16- K. Kishida, Y. Suzuki and S. Nakai., (1985), *Behavior of a pile under horizontal cyclic loading*, 12th International Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering, p. 15-25

[Downloaded from marine-eng.ir on 2026-11-10]

[DOR: 20.1001.1.17357608.1394.11.22.4.0]