



معرفی شمعه‌های مکشی و کاربرد آنها در سازه‌های دریایی

امین ریسمانچیان، کارشناس ارشد دانشکده مهندسی عمران و محیط زیست - دانشگاه صنعتی امیرکبیر*

کاظم فخاریان، استادیار دانشکده مهندسی عمران و محیط زیست - دانشگاه صنعتی امیرکبیر**

*پست الکترونیکی: m_a_rismanchian@hotmail.com

**تلفن: ۶۴۵۴۲۹۷۵، شماره: ۶۴۱۴۲۱۳، پست الکترونیکی: kfakhari@aut.ac.ir

۱- چکیده

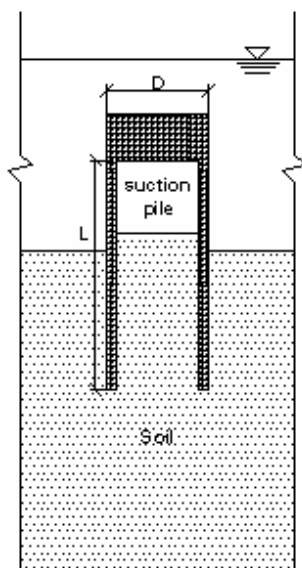
شمع مکشی استوانه‌ای است که در قسمت فوقانی بسته و در قسمت تحتانی باز می‌باشد و بر روی بستر دریا قرار می‌گیرد. پس از نفوذ بواسطه وزنش، پمپ نصب شده بر روی آن، آب درون شمع را خالی می‌کند و شمع بدلیل تولید اختلاف فشار بین داخل و بیرون کشیده شدن شمع، علاوه بر اصطکاک جداره‌ها، فشار منفی تولید شده نیز نیروی مقاومی را در برابر بیرون کشیدن و در اثر ایجاد فشار منفی در داخل شمع تشکیل می‌دهد. در این حالت ظرفیت شمع تا سه یا چهار برابر شمع‌های لوله‌ای معمولی است. با توجه به نیاز به اجرای پروژه‌های فراساحل در ارتباط با صنعت نفت و صنعت لنگرگاهی کشور، استفاده از این تکنیک در ایران مناسب به نظر می‌رسد. هدف اصلی این مقاله معرفی شمعه‌های مکشی، مزایا و کاربرد آنها و ارائه نتایج تحقیقاتی است که در دانشگاه صنعتی امیرکبیر در جریان است. باربری این شمعه‌ها تحت نیروی کششی شامل اصطکاک جداره‌ها و همچنین مقاومت ناشی از مکش تحت بارهای کششی گذرا با نرم افزار اجزا محدود PLAXIS مدل شده و صحت عملکرد مدل با موارد اجرا و ابزارگذاری شده کنترل و بررسی می‌گردد.

کلید واژه‌ها: شمع مکشی، صندوقه مکشی، مهار مکشی، ظرفیت باربری معکوس، نسبت ظاهری

۲- شمع مکشی چیست و چگونه نصب می‌شود.

شمع مکشی (شکل ۱) که گاهی با عناوین صندوقه مکشی و مهار مکشی نیز خوانده می‌شود، استوانه‌ای با یک انتهای بسته است که از طرف بازش بر روی بستر دریا قرار می‌گیرد. در این حالت شمع ابتدا بر اثر وزنش مقداری به درون بستر فرو می‌رود. سپس پمپی که بر روی آن نصب شده است شروع به کار می‌کند و آب درون

شمع را بیرون می کشد. بر حسب چگونگی خارج کردن آب از درون شمع دو طریقه نصب موجود است: (۱) روش پمپاژ پیوسته و (۲) روش پمپاژ ضربه ای [1,2]



شکل ۱: نمایی از یک شمع مکشی

بدین ترتیب با تخلیه آب درون شمع، اختلاف فشاری بین درون و بیرون شمع ایجاد می شود. این اختلاف فشار و هد آب روی شمع باعث رانده شدن شمع به داخل خاک می شود. در تمام مدت نصب، عملیات نصب توسط سیستم کنترل از دور^۱ (ROV)، چک می شود. بعد از پایان عملیات نصب این تجهیزات و پمپ نصب شده بر روی شمع جدا شده و پس از آب بندی سر شمع، شمع به سازه فوقانی متصل می شود.

هنگامی که سازه فوقانی تحت نیروهای آبی مانند ضربه کشتی، باد و نیروی امواج قرار گیرد، نیروی بیرون کششی را به شمع وارد می کند. در این حالت بدلیل آبی بودن نیروها در زیر نوک شمع، فشار منفذی منفی (مکش) تولید می شود. این مکش به همراه نیروی اصطکاک جداره و وزن غوطه ور خاک محبوس درون شمع نیروی مقاوم در برابر بیرون کشش را تشکیل می دهند. به این حالت رفتار «زهکشی نشده» تحت نیروی کششی گذرا می گویند. اما اگر نیروهای کششی همچنان باقی بمانند، یا بسته به طراحی بعد از نصب شمع کلاهک شمع برداشته شده باشد، فشار آب منفذی زیر شمع بدلیل زهکشی زایل می شود و در این حالت شمع مانند یک شمع لوله ای اصطکاک می معمولی عمل می کند که آنرا حالت «زهکشی شده» می نامند. بسته به سرعت بارگذاری بین این دو حالت نیز حالت «تأحدی زهکشی شده» وجود دارد.

۳- تاریخچه

طرح شمع های مکشی برای اولین بار در سال ۱۹۸۰ در Gorm Field ارائه و برای نصب راهنماهای دریایی ساخته شد. اما بدلیل شرایط استثنایی نامناسب بستر دریا متحمل وقت و هزینه زیادی گردید و لذا در برابر روشهای

دیگر غیر اقتصادی شناخته شد. بخاطر این مساله اجرای مجدد این گونه شمع‌ها حدود ۱۰ سال به تعویق افتاد تا اینکه بخاطر پیشرفت در ساخت سکوه‌های ثقلی دامنی^۲، دوباره در سال ۱۹۸۵ در Gulfaks بکار رفت و از نظر تکنولوژیکی مورد تایید قرار گرفت.

ظهور مجدد شمع‌های مکشی در دهه ۹۰ مدیون پیشرفت سکوه‌های ثقلی بتنی عظیم در خاکهای سست است. این پیشرفت در اوایل دهه ۷۰ در یکی از کارگاه‌های دریای شمال شروع شد. نروژها سکوه‌های عظیم بتنی با دامنه‌هایی حدود ۲۰ متر برای اجرا در خاکهای نرم ساختند. قبل از آن سکوه‌های بتنی فقط در ماسه متراکم یا رس بیش تحکیمی بکار می‌رفت. بتدریج ساخت سکوه‌های بتنی پیشرفت پیدا کرد تا حدی که در اوایل دهه ۸۰ سکوه‌های زیادی با دامنه‌هایی در حدود ۵ متر ساخته شدند [۳]. در سال ۱۹۸۴ شرکت Statoil روش سکوه‌های بتنی را برای کارگاه Gulfaks C در نظر گرفت که باید در عمق ۲۲۰ متری اجرا می‌شد. اما بزودی به این نتیجه رسیدند که بعلت نرم بودن بستر به دامنه‌های بلندی احتیاج دارند. در سال ۱۹۸۵ آزمایشهای بر جایی برای امکان‌سنجی نفوذ دامنه‌های بلند بتنی بوسیله وزنشان و خلا در عمق مطلوب انجام گرفت [۴]. از آن به بعد دامنه‌های بلند و شمع‌های مکشی پذیرفته شدند.

۴- شمع‌های مکشی چرا و کجا؟

از سال ۱۹۹۵ شمع‌های مکشی راه حل انتخابی برای تعدادی لنگرگاه بوده‌اند که همه آنها لنگرگاه‌های دائمی برای واحدهای تولید نفت و صنایع تولیدی مربوط به آن بوده‌اند. مزایای شمع‌های مکشی متعدد است که مهمترین آنها دقت در تعیین ظرفیت باربری و دقت جایگذاری در حین اجرا است، یعنی با تلورانس کمی دقیق‌ترین پیش‌بینی از ظرفیت را می‌دهد.

در حین انتخاب شمع‌های مکشی، هزینه در ترکیب با مزیت‌های تکنیکی مانند دقت در قرار دادن در محل شمع، احتیاج نداشتن به پیش‌تنیده کردن و دقت بالا در تعیین ظرفیت عوامل مهمی هستند. شمع‌های مکشی در اعماق مختلف و همچنین در شرایط مختلف خاک قابل اجرا هستند. در سالهای اخیر بیش از ۲۰۰ شمع مکشی در سراسر دنیا کار شده است که موثر بودن آنها را می‌رساند. در زیر به سابقه نصب شمع‌های مکشی در شرایط مختلف اشاره می‌شود.

۴-۱- شرایط خاک

در طول سالها شمع‌های مکشی در شرایط مختلف محلی، از خاک نرم گرفته تا خاک سفت و محکم مانند خاکهای کلوخه‌ای که باعث افزایش ناگهانی نیروی نفوذ می‌شوند و رسهای سفت و ماسه‌ای متراکم اجرا شده‌اند. تنها شرایطی که نمی‌توان در آن از شمع‌های مکشی استفاده کرد وجود بستر شنی یا قلوه سنگی، رسهای خیلی سخت و خاکهای بشدت سیمانته شده است. البته این شرایط بندرت در سواحل یافت می‌شوند. در این حالت‌ها باید به سراغ تکنیکهای دیگر مانند شمع‌های ثقلی یا شمع‌های دریل شده و گروت شده رفت.

۲-۴- ناهمگونی توپوگرافی بستر دریا و عمق آب

ناهمگونی توپوگرافی بستر دریا نیز ممکن است مشکلاتی ایجاد کند. منطقه Haltenbanken در نروژ یکی از بدترین شرایط ساحلی است که دارای توپوگرافی بسیار ناهمگون و غیر همگن است. علیرغم همه این مشکلات توانسته‌اند شمع‌های مکشی را در این منطقه اجرا کنند [۳].

اجرا در اعماق بالا همواره یکی از مشکلات سازه‌های دریایی بوده است. اما با پیشرفت تکنولوژی اجرای شمع‌های مکشی و با توجه به پیشرفت خوب و سریع وسایل و ابزار نظارت برای نصب در زیر دریا و پمپ‌های ایجاد کننده خلا بنظر می‌رسد عمق مسأله مهمی نباشد. اخیراً در دره می‌سی‌سی‌پی شمع‌هایی در عمق ۲۵۰۰ متر نیز اجرا شده‌اند که این خود نشان دهنده عملی بودن اجرای شمع‌های مکشی در اعماق زیاد است [۳].

۳-۴- شکل و هندسه شمع مکشی

قطر و طول عوامل تعیین کننده ظرفیت شمع‌های مکشی هستند. رابطه بین قطر و طول با ظرفیت عموماً غیرخطی است. شاید بهترین پارامتر برای بحث، پارامتر بدون بعد ضریب ظاهری^۳ یا عبارت دیگر نسبت ارتفاع به قطر شمع است.

این نسبت در شمع‌های اولیه در حدود ۱ تا ۲ بود اما بتدریج تا ۱۰ نیز افزایش یافت. هنوز مشخص نیست که چه ضریب ظاهری برای یک شرایط خاص بهینه است [۳].

شکل شمع‌های مکشی پارامتر دیگری است که دارای تنوع زیادی است. معمولاً سطح مقطع شمع‌های مکشی دایره‌ای است، اما شکلهای دیگری نیز اجرا شده‌اند. البته تا امروز مزیت قابل توجهی برای شکل خاصی شناسایی نشده است. سطح مقطع مثلثی مخصوصاً با اضلاع محذب به طرف داخل برای غلبه بر نیروی مکش ساخته شده است که مزیت راحتی انبار کردن و حمل و نقل و پایداری در عرشه کشتی در حین حمل را نیز دارد. اما چون از سطح مقطع آن کاسته می‌شود باید نیروی مکشی بیشتری وارد شود و بخاطر این امر کاهش ظرفیت بوجود خواهد آمد. در ضمن ساخت آن نیز دشوارتر و هزینه‌برتر است. البته هنوز در بعضی موارد ساخت این شکل شمع ترجیح داده می‌شود.

شکل کلاهک شمع برای شمع‌های با قطر کم و مکشهای متعادل بصورت تخت است. اما برای فشارهای بالا یا قطرهای زیاد از کلاهک‌های گنبدی استفاده می‌شود. اغلب استفاده از کلاهک انحنا دار راه ارزاتری است [۳].

۴-۴- محل اتصال نیرو

چنانچه شمع مکشی تحت نیروی محوری طراحی شود، مرکز اعمال نیرو محور شمع است. چنین وضعیتی برای سازه‌های شناور (TLP) متصور است. در سایر شرایط مانند لنگر کشتی‌ها، نیرو به بدنه شمع مکشی اعمال می‌شود.

محل اتصال بار به شمع، بسیار مهم است چراکه تاثیر زیادی بر ظرفیت باربری شمع دارد. این نقطه معمولاً به گونه‌ای انتخاب می‌شود که در حین بارگذاری نهایی حرکت دورانی در آن رخ ندهد. این نقطه در خاکهایی که

مقاومت ثابتی دارند در وسط یا درست زیر وسط شمع است و در خاکهایی که مقاومتشان با افزایش عمق بصورت خطی افزایش می‌یابد نزدیک دو سوم زیر سطح بستر است. با افزایش زاویه بار نسبت به بستر نقطهٔ بهینهٔ تماس به سمت بالا حرکت می‌کند، در صورتیکه افزایش نسبت طول به قطر نقطهٔ فوق را به پائین حرکت می‌دهد. در شمع‌هایی که تحت بارهای استاتیکی دائمی قرار دارند بخاطر حذر از ایجاد فاصله در پشت شمع نقطهٔ تماس پائین‌تر قرار می‌گیرد. البته باید در نظر داشت که پائین‌تر بردن نقطهٔ تماس باعث افزایش زاویهٔ بار می‌شود [۴].

محل تماس نیرو از نظر سازهٔ شمع توجه زیادی را به خود معطوف داشته است. چسباندن آن به سطح پوستهٔ استوانه‌ای باعث ایجاد تنش‌های سازه‌ای بارزی در هنگام اعمال حداکثر بار می‌گردد و باید از مسلح‌کننده‌ها و سخت‌کننده‌های قائم و افقی استفاده گردد. این سخت‌کننده‌ها خود باعث بروز مشکلات جدیدی هم در حین ساخت و هم در حین نصب می‌شوند. بنظر می‌رسد بهترین روش استفاده از ریخته‌گری است.

۵- انواع حالت‌های خرابی شمع مکشی

بسته به سرعت بارگذاری و شرایط بستر یکی از حالات خرابی زیر بوجود می‌آید [۵].

۵-۱- خرابی لغزشی^۴

هنگامیکه شمع مکشی با سرعت بسیار کمی بالا کشیده شود، بستر کاملاً زهکشی می‌شود و جریان آب به داخل صندوقه برقرار می‌گردد و هیچگونه مکش غیرفعالی تولید نمی‌گردد. این امر موجب ظرفیت باربری نسبتاً کم شمع شده که حاصل اصطکاک جداره‌ها و وزن غوطه ور خود شمع است [۶ و ۷]. در این حالت (شکل ۲ - الف) خاک محبوس داخل شمع جدا نمی‌شود و در بستر باقی می‌ماند و در نهایت جداره‌های داخلی و خارجی کاملاً تمیز خواهند بود که نشان دهندهٔ خرابی برشی موضعی است.

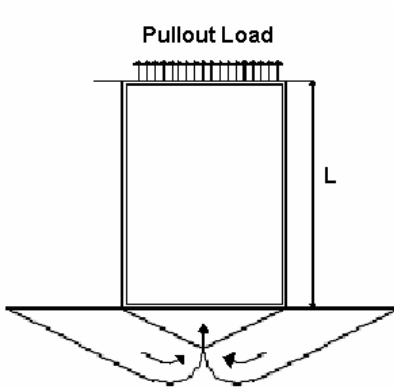
۵-۲- خرابی مقاومت انتهایی

با افزایش نرخ بارگذاری، بستر «تا حدی» زهکشی می‌شود و مکش غیر فعال تولید شده در بستر فقط برای بلند کردن خاک محبوس داخل شمع کفایت می‌کند. در این حالت ظرفیت شمع شامل مکش غیرفعال تولید شده در بستر، وزن غوطه‌ور شمع و خاک محبوس داخل آن و همچنین اصطکاک بین جدارهٔ خارجی صندوقه و خاک است (شکل ۲ - ب).

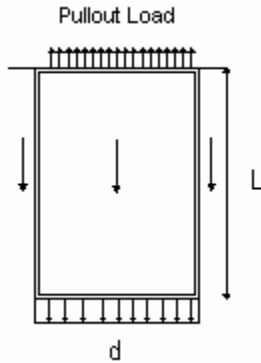
۵-۳- خرابی ظرفیت باربری معکوس

هنگامیکه صندوقه با سرعت زیاد بالا کشیده شود فرصتی برای زهکشی بدست نمی‌دهد و مکش غیرفعال تولید شده در کف صندوقه و خاک اطراف آن به تنش کل کمک می‌کند و خرابی بصورت ظرفیت باربری معکوس نمایان می‌گردد. بخاطر خرابی برشی کلی^۵ خاک محبوس درون شمع از بستر جدا گشته و همراه شمع بالا می‌آید. عموماً در این حالت ظرفیت بدست آمده زیاد است و در حدود سه تا چهار برابر ظرفیت بیرون کشش شمع

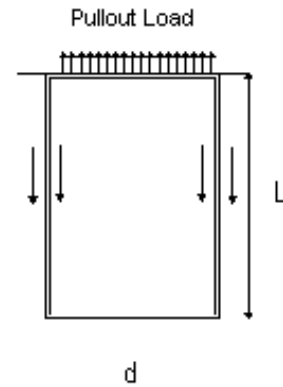
در حالت زهکشی شده است. همچنین اصطکاک بین جداره خارجی و خاک اطراف و نیز وزن غوطه‌ور خاک محبوس به ظرفیت بیرون کشش کمک می‌کنند [۸]. (شکل ۲ - ج)



شکل ۲ - ج: ظرفیت باربری معکوس در حالت زهکشی نشده



شکل ۲ - ب: نمایی از نیروی بیرون کشش و اصطکاک جداره‌ها، نیروی مکش، وزن شمع و خاک محبوس بعنوان نیروی مقاوم



شکل ۲ - الف: نمایی از نیروی بیرون کشش و اصطکاک جداره‌ها بعنوان نیروی مقاوم در حالت زهکشی شده

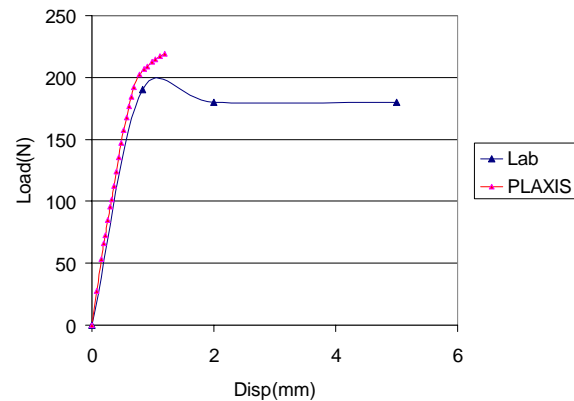
شکل ۲: انواع خرابی شمع مکشی تحت بارگذاری با سرعت‌های مختلف

۶- مطالعه پارامتریک

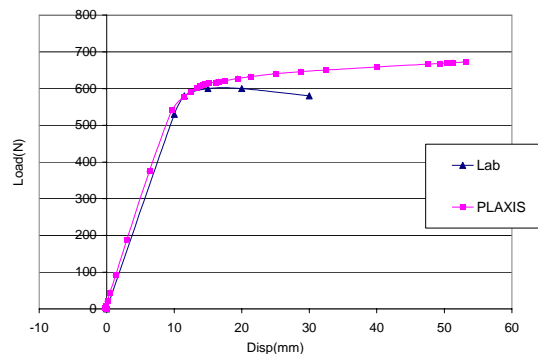
در حال حاضر مطالعاتی به روش اجزا محدود توسط مولفین در حال انجام است. در این مطالعه با استفاده از نرم افزار اجزا محدود PLAXIS مدلهایی از شمع مکشی ساخته شده است و سپس با استفاده از اطلاعات آزمایشگاهی موجود مدل عددی کالیبره شده و صحت عملکرد آن کنترل گردیده است. در شکل ۳ می‌توان نمونه‌ای از منحنی‌های کالیبراسیون این مدلها را مشاهده کرد. همچنین مطالعاتی بر روی رابطه ظرفیت بیرون کشش شمع مکشی با تغییر پارامترهای مقاومتی خاک و همچنین نسبت ظاهری در حال انجام است که در مقالات بعدی به نتایج حاصل از آن پرداخته خواهد شد.

الف - نمودار نیرو - تغییر مکان برای شمع با نسبت

ظاهری ۶ در حالت زهکشی شده
(El-Gharbawy & Olson, 1998)



ب- نمودار نیرو و تغییر مکان برای شمع با نسبت
ظاهری ۶ در حالت زهکشی نشده
(El-Gharbawy & Olson, 1998)



شکل ۳- مقایسه نمودارهای نیرو و تغییر مکان یک شمع در آزمایشگاه و مدل اجزا محدود ساخته شده توسط برنامه PLAXIS

۷- خلاصه و نتیجه گیری

با توجه به اطلاعات داده شده در این مقاله چنین برداشت می شود که شمع های مکشی راه حلی اقتصادی و مناسب بعنوان پی سازه های دریایی هستند و در کشور ایران و بخصوص در دریای خزر که عمق آب زیاد است می تواند گزینه مناسبی باشد و لذا ضروری بنظر می رسد که در این مورد تحقیقات بیشتری انجام شود. کالیبراسیون مدل های ساخته شده توسط نرم افزار PLAXIS بصورت موفقیت آمیزی انجام شده است و لذا مدل پیشنهادی برای ارائه مطالعات در این زمینه مناسب بنظر می رسد.

۸- مراجع

- [1] Allersma, H. G. B., Hogervorst, J. R. and Pimoulle M. (2001). "Centrifuge Modelling of Suction Pile Installation Using a Percussion Technique." Proc., 11th Int. Offshore and Polar Engineering Conf. (ISOPE), Norway, pp. 620-625.
- [2] Allersma, H. G. B., Plenevaux, F. J. A., Brinkgreve, R. B. and Simon, T. (1997). "Simulation of Suction Pile Installation in Sand in a Geocentrifuge." Proc., 7th Int. Offshore and Polar Engineering Conf. (ISOPE), Honolulu, USA, pp. 761-765.
- [3] Tjelta, T.I. (2001). "Suction Piles: Their Position and Application Today." Proc., 11th Int. Offshore and Polar Engineering Conf. (ISOPE), Norway, pp. 1-6.
- [4] Tjelta, T.I., Guttormsen, T.R. and Hermstad, J. (1986). "Large-Scale Penetration Test at a Deepwater Site." Proc., Offshore Technology Conf., Houston.
- [5] Deng, W. and Carter, J.P. (2000). "A Theoretical Study of the Vertical Uplift Capacity of Suction Caissons." Proc., 10th Int. Offshore and Polar Engineering Conf. (ISOPE), USA, pp. 342-349.
- [6] El-Gharbawy, S. and Olson, R. (1998). "Laboratory Modeling of Suction Caisson Foundations." Proc., 8th Int. Offshore and Polar Engineering Conf. (ISOPE), Canada, pp. 537-542.
- [7] El-Gharbawy, S. and Olson, R. (1998). "The Pullout Capacity of Suction Caisson Foundations for Tension Leg Platforms." Proc., 8th Int. Offshore and Polar Engineering Conf. (ISOPE), Canada, pp. 531-536.

[8] Clukey, E. and Morrison, M. (1993). "A Centrifuge and Analytical Study to Evaluate Suction Caissons for TLP Applications in the Gulf of Mexico." GSP No. 38, pp. 141-156.

¹ Remote Operating Vehicle

² Skirted Gravity Platforms

³ Aspect Ratio

⁴ Sliding failure

⁵ General shear failure