ژئوتکنیک فراساحلی:

اصول، تحلیل و طراحی پی های سطحی و شمع ها

دکتر حسین سرباز (عضو هیات علمی دانشگاه آزاد اسلامی واحد تهران شمال)
دکتر آرمان دادوند (دانشجوی دکتری دانشگاه آزاد اسلامی واحد تهران شمال)
دکتر بهزاد سجودی عبدی پور (دانشجوی دکتری دانشگاه آزاد اسلامی واحد تهران شمال)

انتشارات دانشگاهی فرهمند

. . . . . .

نام کتاب : ژئوتکنیک فراساحلی : اصول، تحلیل و طراحی پی های سطحی و شمع ها

مولفین : حسین سرباز/ آرمان دادوند/ بهزاد سجودی عبدی پور

انتشارات : نشر دانشگاهی فرهمند

تاریخ و نوبت چاپ : اول ۱۴۰۵

شمارگان : ۱۰۰ نسخه

بها : ۸۵۰۰۰۰۰ ریال

شابک : ۹۷۸-۶۲۲-۴۹۸۰-۹۹-۱

. . . . . .

حق چاپ برای نشر دانشگاهی فرهمند محفوظ می باشد

نشانی : تهران، خیابان انقلاب، روبروی دانشگاه تهران ، پاساژ فروزنده ، طبقه اول ، واحد ۴۱۹

تلفن : ۶۶۴۱۰۶۸۸ – ۶۶۹۶۸۶۱۴

. . . . . .

سرشناسه	:	سرباز، حسین، ۱۳۵۹-
عنوان و نام پدیدآور	:	ژیوتکنیک فراساحلی: اصول، تحلیل و طراحی پی‌های سطحی و شمع‌ها/حسین سرباز، آرمان دادوند، بهزاد سجودی‌عبدی‌پور.
مشخصات نشر	:	تهران: نشر دانشگاهی فرهمند، ۱۴۰۵.
مشخصات ظاهری	:	۱۸۲ ص.: مصور.
شابک	:	978-622-4980-99-1 : ۸۵۰۰۰۰۰۰ ریال
وضعیت فهرست نویسی	:	فیپا
یادداشت	:	کتابنامه: ص. ۱۷۲ - ۱۸۵.
موضوع	:	سازه‌های دریایی -- پی‌سازی Offshore structures -- Foundation شمع‌زنی (مهندسی عمران) Piling (Civil engineering)
شناسه افزوده	:	دادوند، آرمان، ۱۳۷۴-
شناسه افزوده	:	سجودی عبدی‌پور، بهزاد، ۱۳۵۶-
رده بندی کنگره	:	TC۱۶۶۵
رده بندی دیویی	:	۶۲۷/۹۸
شماره کتابشناسی ملی	:	۱۰۷۳۹۱۰۹
اطلاعات رکورد کتابشناسی	:	فیپا

فهرست مطالب

پیشگفتار ۴
فصل اول : شمع ها ۵
۱-۱ مقدمه ۵
۱-۲ انواع شمع‌ها ۱۱
۱-۳ مقدمه‌ای بر ظرفیت محوری ۱۴
۱-۴ قابلیت کوبیدن شمع و پایش دینامیکی ۱۸
۱-۵ ظرفیت شمع‌های کوبشی در خاک‌های رسی ۲۰
۱-۶ ظرفیت باربری شمع‌های کوبشی در ماسه ۳۲
۱-۷ ظرفیت محوری شمع‌های تزریقی یا دوغابی ۴۹
۱-۸ پاسخ محوری ۵۱
۱-۹ پاسخ جانبی ۷۷
فصل دوم : پی سطحی ۱۱۰
۲-۱ مقدمه ۱۱۰
۲-۲ مقاومت در برابر نصب ۱۲۹
۲-۳ ظرفیت باربری ۱۳۴
۲-۴ قابلیت بهره‌برداری ۱۶۹
مراجع ۱۸۱

پیش‌گفتار

توسعه روزافزون صنایع دریایی، بهره‌برداری از منابع انرژی در دریاها و گسترش زیرساخت‌های فراساحلی، ضرورت شناخت دقیق رفتار خاک و طراحی ایمن و اقتصادی پی‌های دریایی را بیش از پیش آشکار ساخته است. در این میان، مهندسی ژئوتکنیک فراساحلی به‌عنوان یکی از حوزه‌های تخصصی و پیچیده مهندسی عمران، نقش تعیین‌کننده‌ای در تأمین پایداری، قابلیت اطمینان و دوام سازه‌هایی دارد که در محیط‌های دریایی و تحت تأثیر بارهای متغیر و شرایط ژئوتکنیکی گوناگون احداث می‌شوند.

طراحی پی در محیط فراساحلی، به دلیل تأثیر هم‌زمان شرایط زمین‌شناسی، ویژگی‌های مکانیکی خاک، فرآیند نصب، اندرکنش خاک و سازه و بارگذاری‌های ناشی از امواج، باد و سایر عوامل محیطی، با چالش‌های متعددی همراه است. پیچیدگی رفتار خاک در جریان نصب و بهره‌برداری، تغییرات تنش و فشار آب حفره‌ای، اثرات بارگذاری چرخه‌ای و تفاوت میان رفتار کوتاه مدت و بلند مدت پی، از جمله عواملی هستند که درک و تحلیل دقیق آن‌ها برای دستیابی به طرحی مطمئن و بهینه ضروری است. ازاین‌رو، اتکا به روابط تجربی و روش‌های متداول طراحی، بدون شناخت مبانی مکانیکی حاکم بر رفتار سیستم خاک و پی، نمی‌تواند در تمامی شرایط پاسخ‌گوی نیازهای مهندسی باشد.همچنین در طراحی ژئوتکنیکی سازه‌های دریایی، اهمیت فرآیند نصب و تأثیر آن بر عملکرد نهایی پی، به‌عنوان یکی از موضوعات اساسی باید مدنظر قرار گیرد. در این چارچوب، تحلیل رفتار شمع‌ها و پی‌های سطحی، شناخت سازوکارهای انتقال بار و بررسی عوامل مؤثر بر مقاومت و تغییرشکل، زمینه‌ای برای درک عمیق‌تر مسائل طراحی فراهم می‌آورد.کتاب حاضر با هدف ارائه رویکردی علمی و کاربردی در خصوص مبانی تحلیل و طراحی پی‌های فراساحلی برگرفته از کتاب ژئوتکنیک فراساحلی (Offshore Geotechnical Engineering) اثر آقای مارک رندولف و خانم سوزان گورونیک می باشد. در این میان سعی شده بجای ترجمه لغت به لغت و سطر به سطر کتاب، از ترجمه مفهومی استفاده شود. همچنین در بخشهایی که برای روشن تر شدن مفاهیم و توضیح یک رفتار مشخص، نیازمند توضیحات تکمیلی و شرح اضافه بر مطالب اصلی بوده سعی گردید این توضیحات به نحوی در ترکیب با متن اصلی به کتاب اضافه و ارائه شود. یکی از رویکردهای اصلی این کتاب، برقراری ارتباط میان مبانی نظری، شواهد آزمایشگاهی و میدانی و روش‌های مهندسی مورد استفاده در پروژه‌های واقعی است. چنین رویکردی به خواننده کمک می‌کند تا ضمن آشنایی با روش‌های محاسباتی و روابط طراحی، محدودیت‌ها، فرضیات و دامنه کاربرد آن‌ها را نیز بشناسد و بتواند با قضاوتی مهندسی، روش مناسب را متناسب با شرایط هر پروژه انتخاب کند. هدف نهایی، صرفاً ارائه روابط و دستورالعمل‌های طراحی نیست، بلکه تقویت توانایی تحلیل مسئله، تفسیر رفتار خاک و ارزیابی انتقادی نتایج محاسباتی است.در خاتمه لازم می‌دانیم از کلیه کسانی که در این مسیر ما را همراهی نمودند بویژه آقای علیرضا داراب نیا تشکر نموده و درخواست می نماییم که همکاران و صاحب نظران محترم با ارایه ی نقطه نظرات خود، ما را در بهبود ویرایشهای آتی یاری رسانند.

فصل اول: شمع‌ها

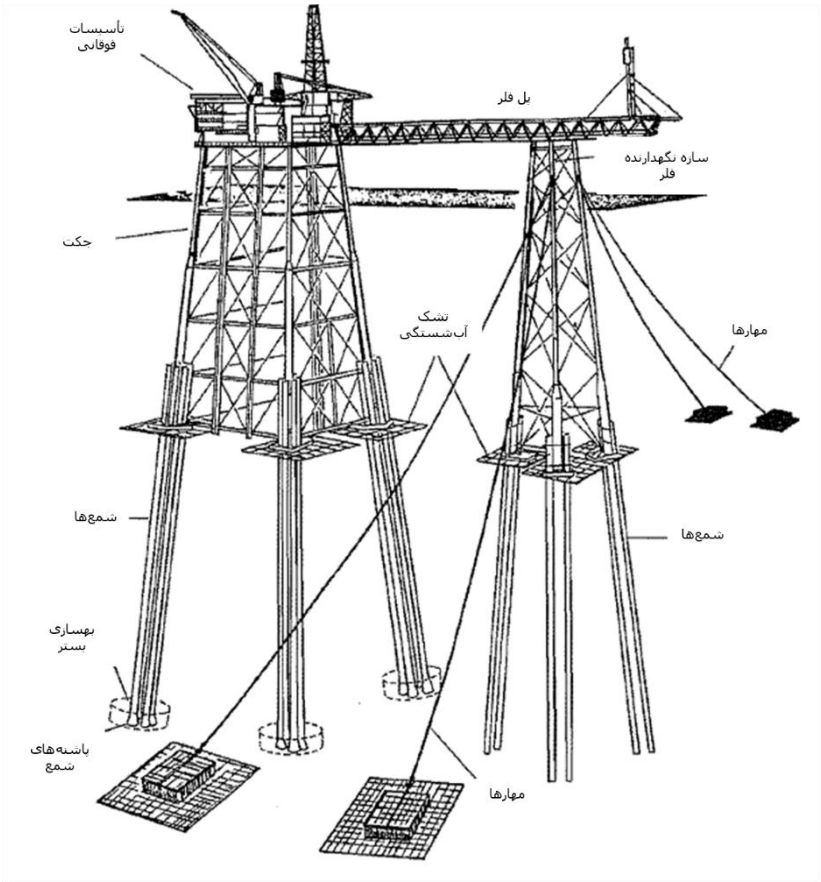
۱-۱ مقدمه

۱-۱-۱ ساختار فصل اول

این فصل به مطالعه و بررسی پی عمیق می‌پردازد. در ابتدای فصل پی عمیق معرفی و روش‌های ساخت انواع مختلف شمع‌های فراساحلی توضیح داده می‌شود، در ادامه پس از بررسی رفتار خاک در هنگام نصب شمع، روش‌های طراحی برای پیش‌بینی ظرفیت محوری شمع ارائه می‌شود. سپس این تحلیل به پاسخ کامل بار–نشست محوری گسترش می‌یابد. در انتها نیز، تحلیل یک شمع تحت بارگذاری جانبی شرح داده می‌شود. روش‌های مختلف طراحی برای شمع‌ها بسیار چالش براگیز بوده و نیازمند برقراری تعادل میان دو جنبه متضاد می‌باشد: (الف) در نظر گرفتن فرایندهای پیچیده‌ای که در حین نصب و بارگذاری شمع رخ می‌دهد و (ب) انجام طراحی با استفاده از اطلاعات محدودی که از مطالعات ژئوتکنیکی سایت به دست می‌آید.
اگرچه تحقیقات اخیر درک بهتری از رفتار شمع ارائه داده است اما با این حال بیشتر روش‌های ارزیابی ظرفیت محوری یا جانبی یک شمع دارای عناصر تجربی هستند، یعنی بر اساس داده‌های آزمایشگاهی و میدانی به دست آمده‌اند، نه فقط تئوری. در این کتاب، از داده‌های جدید در رابطه با تغییرات تنش در حین نصب و بارگذاری شمع برای توضیح و ارزیابی روش‌های تجربی مورد استفاده برای برآورد مقاومت و سختی شمع استفاده می‌شود. این تغییرات تنش ناشی از نصب و بارگذاری شمع برای مدل‌سازی مستقیم در طراحی‌های معمولی بسیار پیچیده هستند. با این حال، برای طراحی نباید بدون درک مکانیک پایه‌ی حاکم بر رفتار شمع، تنها به روش‌های تجربی تکیه کرد و باید مکانیک حاکم بر رفتار شمع را درک شود.

۱-۱-۲ کاربردهای فراساحلی پی‌های شمعی

در این بخش مزایا، انواع و چالش‌های طراحی شمع‌های عمیق در سکوهای دریایی بررسی می‌گردد. بطورکلی شمع‌ها (پی عمیق) در شرایطی که خاک نرم در سطح زمین وجود داشته باشد یا بارهای افقی (مثل موج و باد) زیاد باشند (که بتواند باعث لغزش پی سطحی شود) نسبت به پی سطحی ترجیح داده می‌شود. نوع شمعی که در یک محل خاص می‌تواند استفاده شود، به شرایط ژئوتکنیکی آن منطقه بستگی دارد. از سویی دیگر شمع‌های دریایی از نظر قطر نیز با شمع‌هایی که معمولا در خشکی استفاده می‌شود متفاوت هستند، قطر شمع‌های دریایی از حدود ۳۰ اینچ (۰.۷۶ متر) برای نگهدارنده‌های سرچاهی (Wellhead conductors) تا بیش از ۴ متر برای شمع‌های بزرگ مونوپایل توربین‌های بادی، با نسبت‌های معمول قطر به ضخامت دیواره شمع بین ۲۵ تا ۱۰۰ متغیر هستند.
شمع‌های فولادی کوبشی روش سنتی و رایج برای نگهداشتن سکوهای فولادی دریایی هستند. در سکوهای کوچک جکت معمولاً در هر گوشه سکوی یک شمع وجود دارند که با اعضای اصلی سازه جکت هم راستا است. در سکوهای متوسط ممکن است از شمع‌های دامنی (skirts) نیز استفاده شود که در طول گوه‌های بلندتر یک سازه جکت مستطیلی قرار دارند. در سکوهای بزرگ ممکن است هر گوشه شامل مجموعه‌ای از چندین شمع باشد. به عنوان مثال، در منطقه شمال غربی استرالیا، سکوی رانکین شمالی A، با هشت شمع در هر یک از چهار گوشه طراحی شده است (شکل ۱–۱). در حالی که سکوی نزدیک به آن، یعنی سکوی Goodwyn A، دارای پنج شمع در هر گوشه می‌باشد. کاهش تعداد شمع‌های نگهدارنده یک جکت می‌تواند صرفه جویی قابل توجهی در هزینه‌ها به دنبال داشته باشد. لذا کاهش هزینه‌های ساخت و نصب (به همراه کاهش زمان برنامه‌های مرتبط) منجر به بهینه‌سازی دقیق و ارزشمند در طراحی می‌شود و ارزش بالایی دارد.



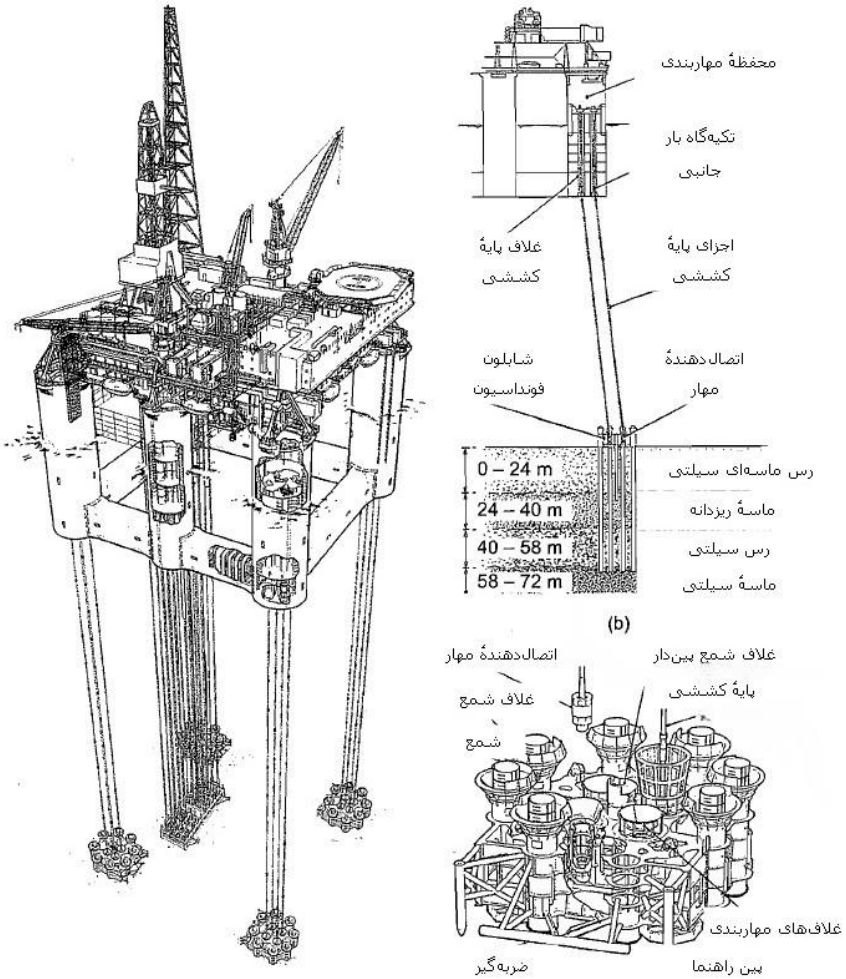
شکل ۱-۱ وضعیت پی‌ها در سکوی رانکین شمالیA. (North Rankin A Platform) (پتروشیمی وودساید، ۱۹۸۸)

علیرغم تلاش برای کاهش تعداد شمع‌ها و بهینه‌سازی طراحی در عین حال، هرگونه برآورد بیش از حد ظرفیت شمع می‌تواند هزینه بر باشد. به عنوان نمونه به دلیل مشکلات در محاسبه ظرفیت باربری شمع‌ها، در حین ساخت سکوی رانکین شمالی Aدر سال ۱۹۸۲، مشخص شد که ظرفیت واقعی جداره‌ی شمع‌های کوبشی به طور قابل توجهی پایین‌تر از برآوردهای انجام شده با استفاده از روش‌های طراحی سنتی بود. دلیل این موضوع هم از این امر ناشی می‌شد که تجربه‌های پیشین طراحی در دنیا عمدتاً براساس ماسه‌های سیلیسی بود و این تجربه‌ها برای ماسه‌های کربناته‌ی موجود در سواحل استرالیا، محافظه کارانه و قابل استفاده نبود. این امر منجر به این شد که این سکو در ابتدای بهره‌برداری برای طوفان‌های شدید با دوره بازگشت طولانی، تاییدیه ایمنی نداشته باشد و شرکت وودساید مجبور بود هنگام نزدیک شدن طوفان‌های شدید استوایی، کارگران را از سکو خارج و سکوی خود را خالی می‌نمود. برای رفع این مشکل تعمیراتی با هزینه ۳۴۰ میلیون دلار استرالیا (به قیمت سال ۱۹۸۸) انجام گردید و سکوی مذکور پس از انجام اصلاحات در فوریه ۱۹۸۸ به طور کامل مورد تأیید قرار گرفت (جوئل و خورشید، ۱۹۸۸).

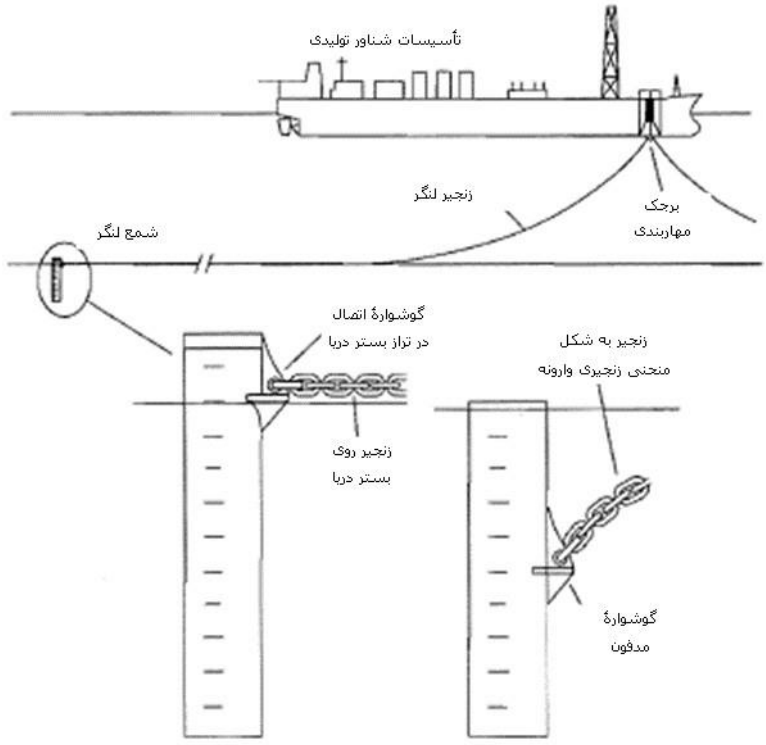
برای حل مشکل ظرفیت کم شمع‌ها در ماسه‌های کربناتی، از روش جایگزین یعنی شمع‌های حفاری و تزریق شده استفاده می‌گردد. در این روش، ابتدا یک چاه حفاری و یک شمع لوله‌ای فولادی درون آن قرار داده شده و سپس با تزریق دوغاب اطرافش پر می‌گردد. این عملیات زمان‌بر و پر هزینه است لذا برای حل این معضل از روش شمع کوبشی و تزریق شده استفاده

می‌گردد. در این روش پس از کوبیدن شمع، دوغاب تحت فشار در امتداد سطح جداره تزریق می‌گردد. هرچند این روش از نظر اقتصادی جذاب است، اما بدلیل اینکه نظارت بر ضخامت و کیفیت پوشش دوغاب آسان نیست و نمی‌توان به راحتی مطمئن شد که دوغاب به همه‌جا رسیده است، مشکلاتی در زمینه کنترل کیفیت به همراه دارد.

در کنار استفاده از شمع‌ها به عنوان پی‌های عمیق، شمع‌ها همچنین می‌توانند برای مهار کردن سکوهای شناور، همانند مهار سکوهای دارای پایه‌های کششی (TLP)، به‌کار روند. در این کاربرد، شمع تحت بار قائم رو به بالا (کشش) قرار می‌گیرد. نخستین سکوی دارای پایه‌های کششی در سال ۱۹۸۲ در میدان هاتن در دریای شمال نصب شد و توسط شمع‌های کوبشی مهار گردید (تت‌لو و لیس، ۱۹۸۲) (شکل ۱-۲). در زیر هر گوشه‌ی این سکو، یک الگوی استقرار (قالب راهنما) در بستر دریا قرار داده شد. هر قالب چهار مهار کششی متصل به سکو را به هشت شمع که تا عمق ۵۸ متری کوبیده شده بودند، متصل می‌کرد. در طراحی‌های جدید، سکوهای دارای پایه‌های کششی آرایش ساده‌تری در بستر دریا دارند. در این طراحی‌ها، هر مهار کششی مستقیماً به یک شمع منفرد (به جای چند شمع) متصل می‌گردد (دیگره و همکاران، ۱۹۹۹).



شکل ۱-۲ آرایش پی سکو دارای پایه کششی هاتن (Hutton) (تت‌لو و همکاران، ۱۹۸۳)



شکل ۱-۳ شمع‌های مهاری تحت بار جانبی برای سیستم‌های مهاربندی

علاوه بر کاربردهای بالا، شمع‌ها برای لنگر انداختن و مهار کشتی‌های شناور با استفاده از زنجیرهای کاتنری (قوسی) یا کشیده (تاوت) نیزاستفاده می‌شوند. در این حالت، شمع تحت بار تقریباً افقی یا مایل قرار می‌گیرد. در آب‌های کم عمق و در شرایط آرام، بخشی از زنجیر مهار بر روی بستر دریا قرار می‌گیرد در این شرایط بارهای کوچک مهار، توسط اصطکاک با بستر دریا تحمل می‌شود. در هنگام طوفان، زنجیر، بار افقی چرخه‌ای (سیکلیک) یک طرفه‌ای را به شمع مهاری وارد می‌کند. زنجیر ممکن است در سطح خاک به شمع مهاری متصل شود یا از طریق یک پد-آی مدفون (اتصال دهنده‌ی زیرزمینی) که کارآمدتر می‌باشد، متصل گردد. در آب‌های عمیق، معمولاً از مهار کشیده شده (تاوت) استفاده می‌شود که در این حالت زنجیر با زاویه ۳۵° یا بیستر نسبت به افق بیشترقرار می‌گیرد. نمونه‌هایی از آرایش‌های رایج مهار در شمع‌های مهاری در شکل ۱-۳ نشان داده شده است.

یکی دیگر از کاربردهای شمع‌ها در محیط‌های فراساحلی، پشتیبانی از توربین‌های بادی دریایی است. در این کاربری، بار طراحی، بیشترعمدتا تحت تأثیر لنگر واژگونی (ناشی از باد) است، بنابراین شمع‌ها را کوتاه و ستبر با قطر زیاد طراحی می‌کنند تا سختی جانبی کافی را فراهم نماید. شمع‌های لوله‌ای فولادی (Monopile) با قطر تا ۴ متر در دریای شمال برای پشتیبانی از توربین‌های بادی نصب شده‌اند.

۱-۱-۳ مبنای طراحی برای پی‌های شمعی

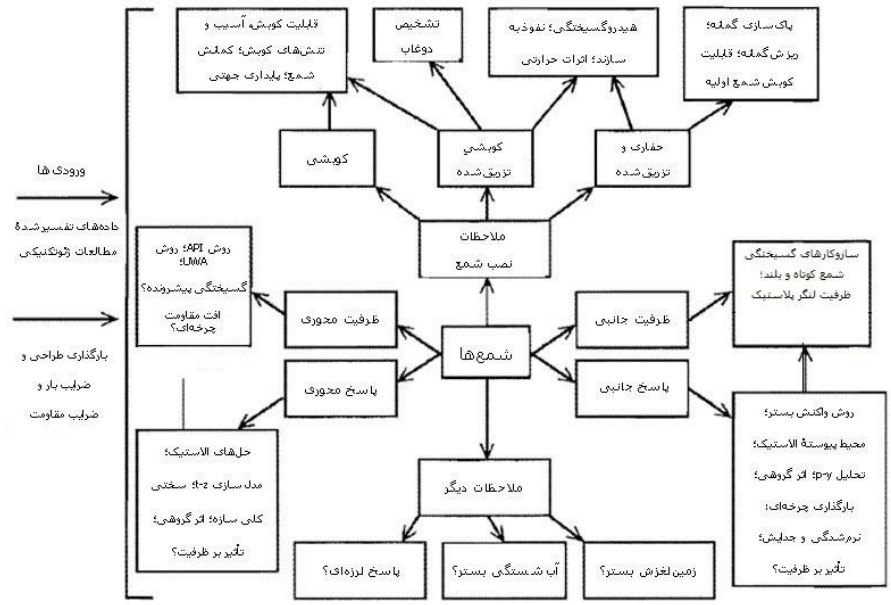
این بخش درباره مبانی طراحی شمع‌ها صحبت می‌کند و نشان می‌دهد در طراحی پی شمعی باید تمامی‌جنبه‌های نصب و عملکرد سیستم را در نظر بگیریم. شکل ۱-۴ پارامترهای اصلی که ممکن است برای طراحی یک پی شمعی نیاز به بررسی داشته باشد و ابزارهای تحلیل اولیه برای این منظور را به صورت خلاصه نشان می‌دهد.

برای هر پروژه مشخص، فرآیند طراحی ژئوتکنیکی شامل مراحل زیر است: (الف) ارزیابی ویژگی‌های سایت و شرایط طراحی، و (ب) بررسی پارامترهای مختلف طراحی و گروه بندی مناسب آن‌ها. به عنوان مثال بررسی پارامترهای:

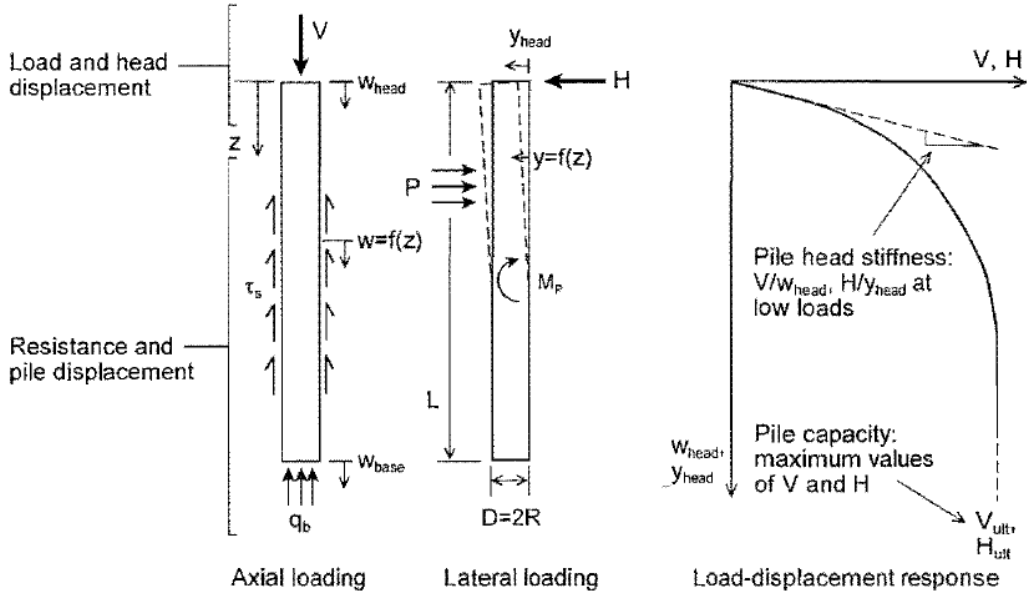
- نصب (قابلیت کوبش، پایداری دیواره چاه (گمانه) و تزریق دوغاب)
- ظرفیت محوری و عملکرد تحت بارهای چرخه‌ای (سیکلیک) محوری
- ظرفیت جانبی و عملکرد تحت بارهای چرخه‌ای (سیکلیک) جانبی
- اثرات گروهی (که منجر به سختی کلی پی می‌شود)
- ملاحظات دیگر (پاسخ لرزه‌ای، پایداری موضعی بستر دریا و آب‌شستگی).

طراحی پی شمعی باید بگونه‌ای باشد که ضمن تضمین نصب یا اجرای مطمئن شمع تا عمق موردنظر، پی نهایی از سختی و مقاومت کافی برای تحمل بارهای طراحی برخوردار باشد. همچنین پی باید با کاهش تعداد و طول شمع‌ها (در نتیجه کاهش نیاز به مصالح و زمان نصب) از لحاظ هزینه بهینه‌سازی گردد.

از برخی جهات، طراحی شمع مشابه طراحی پی سطحی است. همانند پی‌های سطحی، استحکام پی شمعی معمولاً به مقاومت برشی زهکشی نشده در خاک‌های رسی و زاویه اصطکاک یا مقاومت نوک مخروط در ماسه مرتبط است، اگرچه امروزه تمایل به استفاده از مقاومت نوک مخروط برای تمامی‌خاک‌ها در طراحی شمع روز به روز افزایش می‌یابد. علاوه بر این، سختی شمع با استفاده از سختی بهره‌برداری یا عملیاتی خاک و بکارگیری روابط الاستیک محاسبه می‌شود.



شکل ۱-۴ برخی از الزامات طراحی پی عمیق



شکل ۱–۵ نام‌گذاری پاسخ شمع

علیرغم این تشابهات با پی سطحی، با این حال پی شمعی با پی سطحی به لحاظ موارد زیر تفاوت دارد:

۱–تحلیل‌هایی که مقاومت خاک و ظرفیت پی را به هم مرتبط می‌سازند، در شمع‌ها از دقت کمتری برخوردار بوده و ماهیتی بیشتر تجربی دارند. این امر عمدتا به این دلیل است که مکانیزم گسیختگی یک شمع به ویژه در ناحیه نوک آن، نمی‌تواند به طور کامل توسط راه حل‌های تحلیلی توصیف شود. علاوه بر این، ویژگی‌های خاک و وضعیت تنش‌هایی که به عنوان ورودی این تحلیل‌ها بکار می‌روند، اغلب به دلیل فرآیند نصب و در حین نصب دستخوش تغییر می‌شوند.

۲–تحلیل‌های مربوط به مقاومت و سختی شمع‌ها، بدلیل پاسخ غیرخطی و لایه بندی خاک، به ندرت به صورت فرم بسته (فرمول‌های ساده) قابل اعمال است و معمولاً به دلیل تغییر ویژگی‌های خاک در لایه‌های مختلف نیاز به روش‌های عددی دارد.

با این وجود یکی از ساده‌سازی‌های مهم در شمع‌ها نسبت به پی سطحی این است که اندرکنش بارهای ترکیبی (مثلاً همزمانی بار افقی و عمودی) در شمع‌ها نسبت به پی سطحی اهمیت کمتری داشته، به گونه‌ای که اعمال بار افقی تأثیر قابل توجهی بر ظرفیت عمودی ندارد و بالعکس. دلیل این موضوع این است که بار افقی در ناحیه بالایی شمع تحمل می‌شود، در حالی که بار عمودی عمدتا در قسمت پایین شمع، جایی که تنش و استحکام خاک عموماً بالاتر است، تحمل می‌شود..

۱–۱–٤ نام گذاری مولفه‌های بار، مقاومت و هندسه شمع

نام‌گذاری مورد استفاده برای توصیف مؤلفه‌های بار و مقاومت شمع و همچنین هندسه‌ی شمع‌ها، در شکل ۱–۵ خلاصه شده است.

- بارهای اعمال شده: مشابه پی سطحی، بارهایی که در سر شمع اعمال می‌شوند به مولفه‌های عمودی (V) و افقی (H) تقسیم می‌شوند. اگر سر شمع گیردار باشد یا بار افقی به شمع در نقطه‌ای غیر از سطح خاک اعمال شود، یک

بار ممان (M) نیز ممکن است وجود داشته باشد. بیشینه‌ی بارها (ظرفیت نهایی یا گسیختگی) با زیرنویس «ult» نشان داده می‌شوند.

- جابه‌جایی‌ها و دوران‌ها: جابه‌جایی عمودی با (w) نشان داده می‌شود و در طول شمع به دلیل فشردگی شمع تغییر می‌کند. جابه‌جایی افقی نیز با (y) نشان داده می‌شود و در طول شمع به دلیل خمش شمع تغییر می‌کند. دوران در سر شمع نیز با (θ) نمایش داده می‌شود.
- مقاومت محوری: ظرفیت محوری از مقاومت جداره و مقاومت نوک به دست می‌آید. مقاومت واحد جداره (یک تنش برشی) با τ_s و مقاومت واحد نوک (به صورت تنش) با q_b نشان داده می‌شود.
- مقاومت جانبی: ظرفیت جانبی از تنش‌های قائم و برشی که به طور افقی بر روی جداره شمع عمل می‌کنند، ناشی می‌شود. این تنش‌ها به گونه‌ای پیچیده در پیرامون شمع تغییر می‌کنند. در طراحی، این تنش‌ها به صورت نیرویی در واحد طول شمع تجمیع می‌شوند که می‌توان آن را به عنوان یک بار توزیع شده در طول شمع در نظر گرفت. مقدار نهایی آن با P_{ult} نشان داده می‌شود. توجه داشته باشید که P یک تنش نیست لذا با حرف بزرگ نمایش داده می‌شود.
- مقاومت خمشی یا ظرفیت ممان پلاستیک شمع: مقاومت خمشی یا ممان پلاستیک شمع که با M_p نشان داده می‌شود. گسیختگی جانبی شمع می‌تواند در دو حالت رخ دهد: (الف) تجاوز از ظرفیت نهایی جانبی خاک (گسیختگی ژئوتکنیکی)، که در این حالت شمع به عنوان یک جسم صلب گسیخته می‌شود، یا (ب) زمانی که شمع در اثر خمش دچار گسیختگی می‌شود (گسیختگی سازه‌ای).

۱-۲ انواع شمع‌ها

۱-۲-۱ ملاحظات طراحی در انواع شمع‌ها

در این فصل دو نوع شمع مورد استفاده در پروژه‌های فراساحلی معرفی می‌شوند: شمع‌های کوبشی متداول و شمع‌های تزریقی یا دوغابی (که معمولاً به صورت حفاری و دوغاب‌ریزی اجرا می‌شوند، اگرچه یک نوع ترکیبی از شمع کوبشی–گروتی نیز وجود دارد). از آن‌جا که شمع‌های کوبشی در سراسر جهان بسیار رایج‌تر هستند، بنابراین در این فصل به آن‌ها توجه بیشتری شده است. شمع‌های دوغابی در رسوبات سیمانی و سنگ‌ها کاربرد بیشتری دارند و به همین دلیل در برخی شرایط در سواحل استرالیا و خاورمیانه مورد استفاده قرار می‌گیرند. روش‌های طراحی برای این نوع شمع‌ها نیز به طور خلاصه در این فصل شرح داده شده است.

۱-۲-۲ شمع‌های فولادی کوبشی

شمع‌های فولادی لوله‌ای که انتهای آن‌ها باز است، بدون تردید رایج‌ترین نوع پی مورد استفاده در سکوهای دریایی هستند. این شمع‌ها، از نوع شمع‌های جابه‌جایی محسوب می‌شوند؛ به این معنی که هنگام نصب، به جای اینکه خاک خارج شود خاک را کنار می‌زنند و خاک جابه‌جا می‌شود. امروزه این شمع‌ها با استفاده از چکش‌های هیدرولیکی که قابلیت کار در زیر آب را دارند نصب می‌گردند، در حالی که در گذشته از چکش‌های بخار و دیزلی که تنها بالای آب عمل می‌کردند، استفاده می‌شد. شمع‌ها معمولاً به طول‌هایی تا ۱۰۰ متر ساخته می‌شوند و در صورت نیاز به طول‌های بیشتر، در هنگام نصب به هم جوش داده و متصل می‌شوند.

برای نگهداشتن سازه‌های جکت، شمع‌ها از طریق غلاف‌های متصل به سازه کوبیده می‌شوند. در آب‌های کم عمق، شمع‌ها با استفاده از چکش‌های بالای آب که بر روی امتاددهنده‌هایی(به اصطلاح دنباله‌ها) سوار می‌شوند تا به شمع برسند کوبیده می‌شوند. در آب‌های عمیق، استفاده از این روش غیرعملی است و لذا از چکش‌های زیرآبی استفاده می‌گردد. چکش‌های مدرن حفاری زیر آب به گونه‌ای طراحی شده‌اند که شمع را از طریق غلاف‌های هدایت‌کننده روی سازه جکت به پایین هدایت کنند. پس از کوبیده شدن تا عمق مورد نیاز، شمع‌ها به غلاف‌های موجود در پایه پایه‌های جکت جوش داده شده یا دوغاب‌ریزی می‌شوند. برای شمع‌های مهاری، در حین کوبش، نگهداری و پشتیبانی توسط یک قاب موقت در بستر دریا فراهم می‌شود.

شمع‌ها معمولاً با انتهای باز کوبیده می‌شوند، به گونه‌ای که خاک به درون شمع جریان می‌یابد و یک "پُلاگ" (Plug) ایجاد می‌کند. در شمع‌های لوله‌ای با انتهای باز، هنگام نفوذ شمع به داخل خاک، بخشی از خاک وارد محفظه‌ی داخلی شمع می‌شود و به‌مرور، یک ستون خاکی فشرده درون شمع تشکیل می‌دهد. به این ستون خاکی که درون شمع محصور شده و می‌تواند با حرکت شمع به پایین رانده می‌شود، پلاگ خاکی (Plugging) می‌گویند.

بعضا در نزدیکی نوک شمع از دیواره ضخیم‌تری که به آن "کفشک" می‌گویند استفاده می‌شود تا نوک شمع را تقویت کرده و مقاومت کوبشی در امتداد جداره را در خاک‌های سخت کاهش دهد. اگر پاسخ مقاوم‌تری برای نوک شمع مورد نیاز باشد، از یک صفحه فولادی جوش داده شده یا برای شمع‌های بزرگ‌تر از یک نوک مخروطی برای ایجاد شمع با انتهای بسته استفاده می‌شود که مقاومت کوبش را افزایش می‌دهد. این رویکرد در رسوبات کربناته‌ی فشرده‌ی سواحل برزیل علاوه بر افزایش مقاومت جداره شمع،باعث افزایش ظرفیت باربری نهایی نوک شمع در جابه‌جایی‌های معمولی گردید (دِ ملو و همکاران، ۱۹۸۹؛ دِ ملو و گالگول، ۱۹۹۲).

ملاحظات طراحی ویژه این نوع شمع‌ها، به قابلیت کوبش (به ویژه در رسوبات سیمانی یا ماسه‌های متراکم) و دوره تحکیم (یا افزایش مقاومت پس از نصب) برای دستیابی به ظرفیت کامل مربوط می‌شود. مشکلات مربوط به قابلیت کوبش شامل عدم نفوذ (امتناع از نفوذ) و آسیب نوک شمع است. امتناع از نفوذ یعنی مقاومت خاک آنقدر زیاد است که چکش نمی‌تواند شمع را به عمق مورد نظر برساند و نفوذ مورد نظر حاصل نمی‌شود. اگر نوک شمع قبل یا حین کوبش آسیب ببیند، ممکن است نوک شمع دچار کمانش و گسیختگی شود (باربور و اِربریچ، ۱۹۹۵). این موضوع می‌تواند باعث کاهش ظرفیت شمع شده یا باعث شود شمع زودتر از موعد از نفوذ باز بماند.. نمونه‌ای از حالت دوم یعنی یک مورد واقعی که شمع زودتر از موعد از نفوذ بازماند و نیاز به تعمیرات اساسی داشت، توسط آلم و همکاران (۲۰۰۴) شرح داده شده است. از دیگر محدودیت‌های شمع‌های کوبشی، وجود یک لایه سنگی سیمانی است که ممکن است مانع کوبش شمع شده و به نوک شمع آسیب برساند. در خاک‌های فشرده و سیمانی، مانند ماسه‌های کربناتی، شمع‌های کوبشی می‌توانند مقاومت جداره‌ی بسیار کمی داشته باشند.

۱-۲-۳ شمع‌های حفاری و دوغابی (گروتی)

شمع‌های حفاری و دوغابی (گروتی) از یک لوله‌ی فولادی تشکیل شده‌اند که درون یک چاه (گمانه) حفاری شده با قطر بزرگ‌تر قرار می‌گیرند و سپس اطرافش با دوغاب یا گروت پر می‌شود. این شمع‌ها شبیه به شمع‌های حفاری شده در خشکی هستند، با این تفاوت که به جای قفس آرماتور، از یک لوله‌ی فولادی استفاده می‌شود.

این نوع شمع‌ها به عنوان جایگزینی برای شمع‌های کوبشی در سنگ (که امکان کوبش وجود ندارد) یا در رسوبات کربناته (جایی که شمع‌های کوبشی از ظرفیت جداره‌ی پایینی برخوردارند) استفاده می‌شوند. اجرای شمع‌های حفاری و دوغابی پر هزینه است، زیرا زمان ساخت و اجرای آن طولانی است و در برخی موارد به شمع‌های کوبشی اولیه برای عبور از رسوبات نرم سطحی احتیاج است.

ترتیب نصب یک شمع حفاری و دوغابی به شرح زیر است (شکل ۱-۶):

۱- یک شمع اولیه، که یک شمع فولادی استاندارد است، از میان رسوبات نرم سطحی کوبیده می‌شود تا از این طریق جداره چاه که ممکن است در حین حفاری پایدار نمانده و ریزش کند پایدار بماند.
۲- با استفاده از یک دستگاه حفاری دورانی، عملیات برای حفاری فراتر از طول شمع اولیه (مرحله ۱) تا رسیدن به عمق مورد نظر نوک شمع ادامه می‌یابد.
۳- لوله‌ی فولادی را در چاه حفاری شده قرار می‌دهند و فضای بین شمع و چاه را با دوغاب (گروت) پر می‌کنند.

شمع‌های حفاری و دوغابی به دلیل فرآیند ساخت چند مرحله‌ای و دوره ساخت نسبتاً طولانی، پر هزینه هستند. همچنین تأخیرهایی ممکن است در صورت بروز مشکلات در حین ساخت و ساز رخ دهد. در طراحی این شمع‌ها باید موارد زیر را در نظر گرفت:

۱- پایداری چاه: اگر احتمال ریزش چاه وجود داشته باشد، می‌توان از گل حفاری برای پایدارسازی دیواره‌ی آن استفاده کرد. در عین حال باید توجه داشت، این کار ممکن است ضریب اصطکاک را کاهش دهد، حتی اگر چاه قبل از دوغاب‌ریزی با آب دریا شست و شو داده شود.
۲- نیاز (یا عدم نیاز) به شمع اولیه (و قابلیت کوبش این شمع): بسته به شرایط رسوبات سطحی، ممکن است استفاده از شمع اولیه ضروری باشد و در این صورت، قابلیت کوبش این شمع باید مورد ارزیابی قرار گیرد.
۳- عملیات دوغاب‌ریزی (گروت‌ریزی): این مرحله شامل پر کردن فضای خالی بین شمع و چاه (گمانه) حفاری شده با دوغاب (گروت) است که باید به طور کامل و دقیق انجام شود.
٤- فشار دوغاب یا گروت (ارتفاع ستون دوغاب): دوغاب‌ریزی تحت فشار بالا یا استفاده از گروت‌های منبسط شونده می‌تواند منجر به افزایش تنش افقی و در نتیجه افزایش مقاومت جداره شود. در واقع فشار بالای دوغاب به پر کردن کامل فضای اطراف شمع کمک کرده و می‌تواند مقاومت جداره را افزایش دهد، اما از سوی دیگر فشار بیش از حد می‌تواند باعث شکست هیدرولیکی لایه‌ها شود.
٥- تمیز کردن کف چاه (گمانه): ریزش مصالح نرم حاصل از حفاری به انتهای چاه، می‌تواند منجر به کاهش عملکرد نوک شمع شود.