



## مطالعه فرورفت شمع‌های فرا ساحل برای خاک‌های رسی در خلیج فارس همراه با مطالعه موردی

علی فاخر<sup>۱</sup>، ساناز محمودپور<sup>۲</sup>، مرتضی میرشکاری<sup>۳</sup>، مسعود میدانی<sup>۴</sup>

<sup>۱</sup>دکتری ژئوتکنیک، دانشیار دانشکده مهندسی عمران دانشگاه تهران، afakher@ut.ac.ir  
<sup>۲</sup>کارشناس ارشد ژئوتکنیک، شرکت مهندسین مشاور هندسه پارس، sanaz.mahmoudpour@gmail.com  
<sup>۳</sup>کارشناس ارشد ژئوتکنیک، شرکت مهندسین مشاور هندسه پارس، mr.mirshकारी@ut.ac.ir  
<sup>۴</sup>کارشناس ارشد ژئوتکنیک، شرکت مهندسین مشاور هندسه پارس، masood.meidani@ut.ac.ir

### چکیده

به علت بالا بودن قیمت ماشین آلات عملیات شمع‌کوبی در دریا و اهمیت زیاد این گونه از پروژه‌ها، بروز وقفه در حین کوبش و یا عدم فرورفت کافی شمع، هزینه‌های بسیاری را متوجه پروژه خواهد کرد. از این رو داشتن پیش‌بینی‌ای مناسب از میزان ضربه- فرورفت شمع‌ها از اهمیت بالایی برخوردار است. برای محاسبه میزان ضربه-فرورفت یک شمع، لازم است مقاومت خاک به فرورفت محاسبه شود. روابط مختلفی برای بدست آوردن مقاومت خاک به فرورفت وجود دارد که هر یک لازم است با توجه به محل پروژه کالیبره شوند. در این مقاله داده‌های واقعی ضربه فرورفت یکی از جکت‌های مستقر در حوزه پارس جنوبی مورد مطالعه قرار گرفته و با استفاده از آنها روابط مختلف محاسبه مقاومت خاک به فرورفت مورد ارزیابی قرار گرفته است. در انتها یکی از این روابط انتخاب شده و برای داده‌های این پروژه کالیبره شده است. در کنار این مطالعه، بررسی‌هایی هم بر روی ظرفیت باربری شمع و روش صحت سنجی آن با نتایج آزمایش PDA صورت گرفته است. نکات مهم مقاله حاضر (۱) پیشنهاد روش استیونس برای خاک‌های رسی در منطقه پارس جنوبی، (۲) پیشنهاد ضرایب کالیبره برای محاسبه مقاومت خاک نسبت به فرورفت شمع (SRD) و (۳) پیشنهاد بازنگری و اصلاح نتایج آزمایش‌های PDA برای تبدیل آنها به شرایط استاتیکی می‌باشد.

**کلمات کلیدی:** ظرفیت باربری شمع، آزمایش PDA، مقاومت خاک به فرورفت (SRD)

### ۱- مقدمه

شمع‌های دور از ساحل اغلب در پایه جکت‌ها اجرا می‌شوند به علت بالا بودن بارهای وارده بر آنها، طول‌های زیادی داشته و از ظرفیت باربری بالایی برخوردار می‌باشند. طول زیاد این شمع‌ها در برخی از پروژه‌ها منجر به بروز مشکلات بسیاری در حین عملیات کوبش شده و در آنها پدیده پس‌زدگی شمع (Refusal) رخ داده است. این مشکلات اجرایی از یک طرف و هزینه‌های بالای توقف عملیات کوبش این دسته شمع‌ها مانند قیمت بالای اجاره چکش‌ها و بارج‌های حمل شمع از طرف دیگر، لزوم انجام مطالعات در زمینه فرورفت این گروه از شمع‌ها را دوچندان می‌کند. مهمترین نکته در بحث فرورفت شمع، بدست آوردن رابطه‌ای بین تعداد ضربات پیش‌بینی شده و نفوذ شمع برای یک شمع و چکش معلوم است که در قالب نمودار ضربه-فرورفت ارائه می‌گردد. مهمترین بخش در برآورد صحیح این نمودار، محاسبه مقاومت خاک به فرورفت (SRD) می‌باشد [1]. برای محاسبه SRD روش‌های مختلفی وجود دارد، ولی هسته اصلی همگی آنها اعمال تغییراتی در ظرفیت باربری استاتیکی شمع است. این بدان معنا است که ظرفیت باربری استاتیکی شمع علاوه بر نقش داشتن در تعیین ابعاد شمع، در نحوه اجرای شمع و انتخاب چکش مناسب نیز نقش دارد و از این جهت محاسبه دقیق آن از اهمیت بالایی برخوردار است. روش متداول برای محاسبه ظرفیت باربری شمع‌های دور از ساحل استفاده از روابط کلاسیک می‌باشد. در سال‌های اخیر استفاده از آزمایش دینامیکی شمع به عنوان روشی برای تأیید کارکرد مناسب شمع‌کوب و همچنین تخمین ظرفیت باربری شمع و پاسخ بار-نشست آن در حال رایج شدن است [1]. متداول‌ترین روش برای آزمایش دینامیکی شمع، سیستم تحلیل‌گر کوبش شمع (PDA) می‌باشد، که معمولاً همراه با تحلیل CAPWAP مورد استفاده قرار می‌گیرد [2]. با استفاده از نتایج PDA می‌توان متغیرهای مختلفی از جمله ظرفیت باربری را بدست آورد. البته ظرفیت باربری قابل اعتمادترین متغیر حاصل از آزمایش PDA است [3]. نتایج آزمایش PDA ارتباط مستقیمی با شرایط کوبش و زمان انجام آزمایش دارد و نیاز به اصلاحاتی خواهد داشت.

در این مقاله مطالعه فرورفت شمع‌ها بر روی یک نمونه از جکت‌های پارس جنوبی در خلیج فارس صورت گرفته است. ابتدا ظرفیت باربری با استفاده از روش‌های کلاسیک محاسبه شده و سپس با نتایج اصلاح شده آزمایش PDA مقایسه شده است. در بخش پایانی با استفاده از ظرفیت

<sup>1</sup> Soil Resistance to Driving

<sup>2</sup> Pile Driving Analyzer

باربری بدست آمده، مقاومت خاک به فرورفت با روش‌های مختلف محاسبه شده و با نتایج واقعی کوبش شمع مقایسه شده و میزان اعتبار آنها مورد ارزیابی قرار گرفته است. در نهایت روابط معتبر محاسبه مقاومت خاک به فرورفت با توجه به داده‌های ثبت شده کالیبره شده و ضریب مناسب ارائه شده است.

## ۲- معرفی پروژه مورد مطالعه

پروژه مورد مطالعه در این تحقیق، یکی از جکتهای فاز ۲۲ پروژه پارس جنوبی (SPD 22) می‌باشد. محل قرارگیری این جکت در شکل ۱ نشان داده شده است. با توجه به مطالعات ژئوتکنیکی صورت گرفته در محل پروژه، خاک محل تا عمق ۹۵ متری از رس تشکیل شده است. این لایه‌های رسی از رس‌های بسیار نرم (Very soft clay) در اعماق بالایی تا رس‌های بسیار سخت (Hard clay) در اعماق پایینی ادامه یافته‌اند. مشخصات ژئوتکنیکی مورد استفاده برای محاسبه ظرفیت باربری در این لایه‌ها در جدول ۱ آورده شده است.



شکل ۱. محل قرارگیری جکت ۲۲ در منطقه پارس جنوبی

از عمق ۲۸ متری به پایین، علاوه بر بالا رفتن مقدار  $C_u$ ، مقادیر ضریب پیش تحکیمی (OCR) نیز بالای ۲ می‌باشد. این بدان معنا است که مسائل مربوط به افزایش ظرفیت باربری بر اثر زمان در این پروژه لازم است مورد مطالعه قرار گیرند.

جدول ۱. پارامترهای ژئوتکنیکی مورد استفاده برای محاسبه ظرفیت باربری شمع‌های جکت ۲۲

عمق (m)	توصیف خاک	$\gamma'$ (kN/m <sup>3</sup> )	OCR	$C_u$ (kPa)
0-3.6	Very soft CLAY	5.5	0.40	7.30
3.6-12	Very soft CLAY	6.5	0.40	10.8
12-15.8	Very soft to soft CLAY	7	0.80	25
15.8-19	Soft clay	9.5	1.70	60
19-22.3	Stiff CLAY	9.3	2.80	160
22.3-26	Firm CLAY	9.5	1.10	80
26-28.55	Firm to stiff CLAY	9.0	1.30	120
28.55-40	Stiff CLAY	8.6	5.00	240
40-43.6	Very stiff CLAY	9.7	2.40	200
43.6-47.8	Very stiff CLAY	9.5	3.00	240
47.8-58	Very stiff CLAY	9.2	2.50	250
58-62	Very stiff CLAY	9.8	2.50	290
62-66.15	Very stiff CLAY	10	2.00	300
66.15-73.5	Very stiff to hard clay	9.2	2.80	310
73.5-82	Hard CLAY	9.8	2.85	380
82-88.1	Hard CLAY	10.4	3.00	420
88.1-94	Hard CLAY	9.5	3.00	520

### ۳- ظرفیت باربری شمع

۳-۱- محاسبه ظرفیت باربری شمع با استفاده از روابط کلاسیک

برای محاسبه ظرفیت باربری محوری شمع‌ها در جکت ۲۲، از روابط مربوط به آیین‌نامه API(2007) استفاده شده است. روابط (۱) و (۲) به ترتیب برای محاسبه مقاومت نوک و جدار شمع در هر عمق برای خاک‌های رسی استفاده می‌شوند.

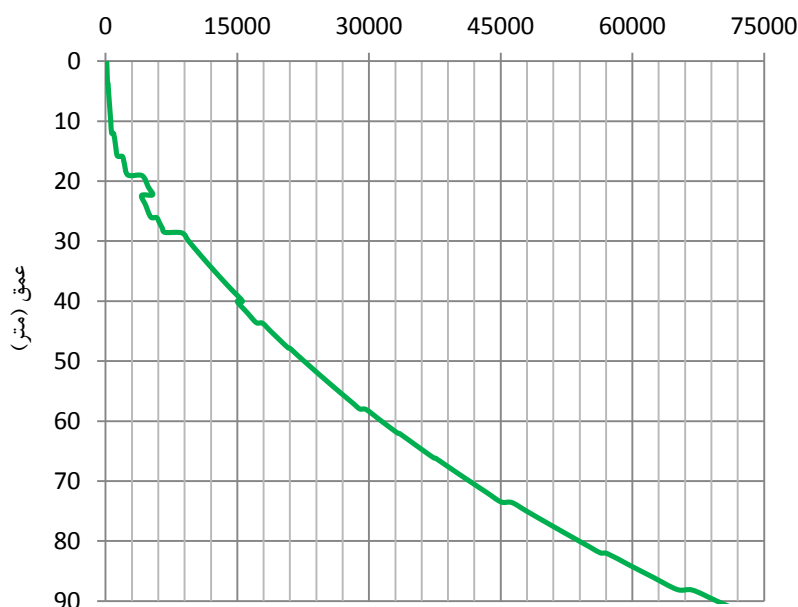
$$q = 9 C_u \quad (1)$$

$$f = \alpha C_u \quad (2)$$

که در آنها  $q$  ظرفیت باربری نوک شمع،  $f$  مقاومت اصطکاکی جدار در هر نقطه،  $C_u$  چسبندگی زهکشی نشده خاک رس و  $\alpha$  ضریب بدون بعد می‌باشد.

از نکات مهم در محاسبه ظرفیت باربری توجه به مساله plug و یا Unplug بودن نوک شمع‌ها می‌باشد. محاسبات نشان می‌دهد که تا عمق ۱۵ متری رفتار شمع unplug و بعد از آن به صورت plug می‌باشد. نمودار مربوط به ظرفیت باربری نهایی در شکل ۲ آورده شده است. با توجه به بارهای طراحی هر شمع برای شرایط مختلف و ضرایب اطمینان موجود در آیین‌نامه، طول شمع‌ها طبق ظرفیت باربری نهایی ارائه شده در شکل ۲ بدست آمده است. جدول ۲ طول مورد نیاز برای هر یک از چهار شمع جکت ۲۲ و ظرفیت باربری هر یک را نشان می‌دهد.

ظرفیت باربری نهایی محوری شمع (kN)



شکل ۲. نمودار ظرفیت باربری نهایی شمع در اعماق مختلف برای جکت ۲۲

جدول ۲. طول مورد نیاز برای هر شمع و ظرفیت باربری هر یک

شماره شمع	ظرفیت باربری شمع (kN)	طول مورد نیاز شمع (متر)
A1	60000	85
A2	68000	89
B1	56000	82
B2	68000	89

### ۳-۲- اثر زمان بر ظرفیت باربری شمع

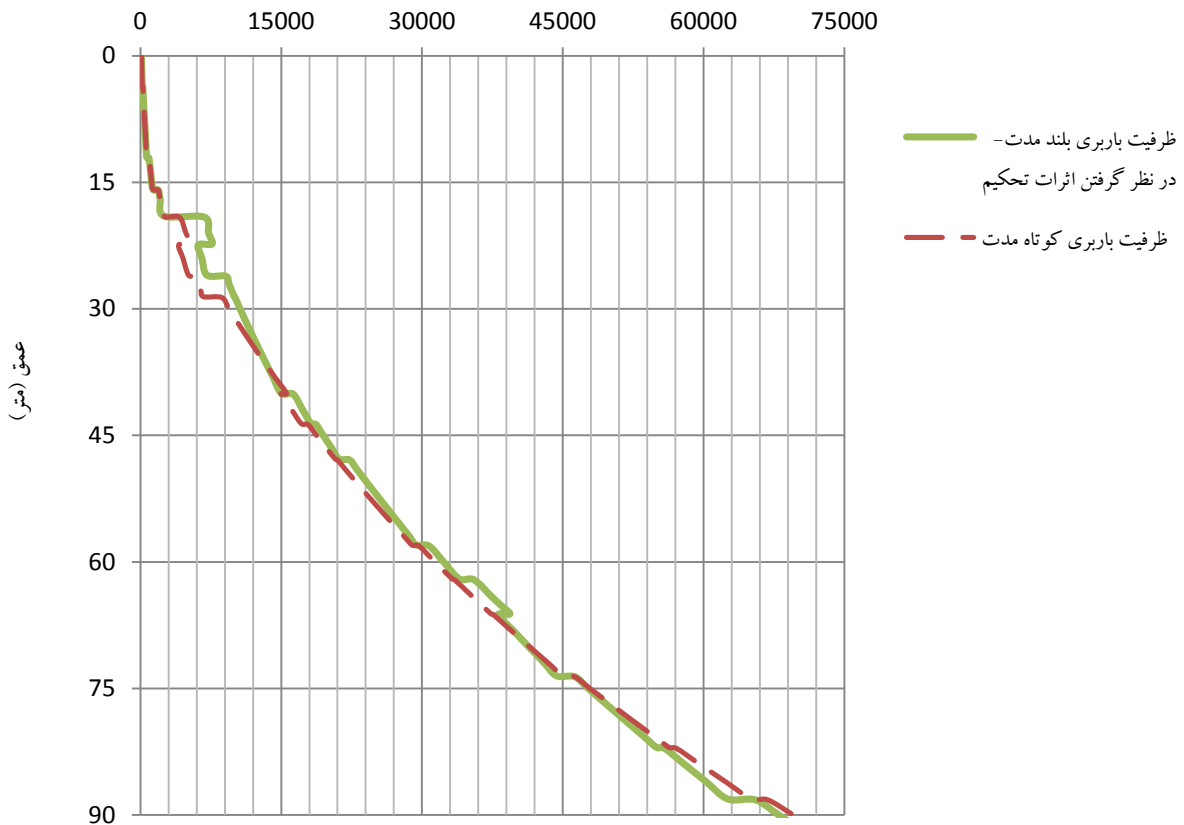
شمع‌های کوبیده شده در خاک‌های رسی نرم و متوسط در حین کوبش دست خورده می‌شوند و همچنین فشار اضافی آب حفره‌ای بوجود می‌آید. با پایان یافتن عملیات کوبش شمع، فشار اضافی آب حفره‌ای به تدریج محو شده و به دنبال آن، تنش موثر و مقاومت برشی خاک افزایش می‌یابد. همچنین در رس‌های تیکسوتروپ، قسمتی از مقاومت برشی خاک که در اثر دست‌خوردگی کاهش یافته است، بازیافت می‌شود. این عوامل باعث می‌شود که ظرفیت باربری شمع‌های کوبیده شده در رس نرم و متوسط با گذشت زمان افزایش یابد [4].

رندلف و همکاران [5] رابطه (۳) را برای تخمین میزان افزایش چسبندگی زهکشی نشده خاک‌های رسی در اثر کوبش شمع، ارائه داده‌اند.

$$Cu(\infty) = \left(\frac{Cu(0)}{\sigma'_c}\right) * \left(\frac{\sqrt{3}}{M} + 3\right) * Cu(0) \quad (3)$$

در این رابطه،  $Cu(0)$  و  $Cu(\infty)$  به ترتیب چسبندگی زهکشی نشده قبل از کوبش و بعد از کوبش پس از محو فشار آب حفره‌ای اضافی است. ضریب  $M$  نیز یک متغیر برای نشان دادن اثر زاویه اصطکاک داخلی خاک می‌باشد. اثرات مربوط به پیش تحکیمی خاک در  $\sigma'_c$ ، در نظر گرفته شده است.  $\sigma'_c$  تنش پیش تحکیمی خاک می‌باشد. در جکت ۲۲، با توجه به جدول ۱ مشاهده می‌شود که از عمق ۲۸ متر به بعد ضریب پیش تحکیمی (OCR) خاک بالا می‌رود. با سخت تر شدن خاک‌های رسی، اثر افزایش ظرفیت باربری نهایی شمع بر اثر عملیات کوبش کاهش می‌یابد. شکل ۳ نشان دهنده ظرفیت باربری نهایی شمع با و بدون در نظر گرفتن اثرات محو فشار آب حفره‌ای اضافی می‌باشد. در جکت ۲۲ محاسبات نشان داد که افزایشی با گذشت زمان در ظرفیت باربری شمع ایجاد نخواهد شد و بدین ترتیب طول شمع‌ها تغییری نخواهد کرد. علت این امر بالا بودن ضریب پیش تحکیمی خاک رس محل پروژه می‌باشد.

ظرفیت باربری نهایی محوری (kN)



شکل ۳. نمودار ظرفیت باربری نهایی شمع در اعماق مختلف برای جکت ۲۲ در دو حالت با و بدون در نظر گرفتن اثر تحکیم

### ۳-۳- تحلیل ظرفیت باربری با استفاده از نتایج آزمایش PDA

امروزه آزمون دینامیکی شمع با استفاده از سیستم تحلیل گر کوبش شمع (PDA)، به عنوان روشی جدید در تخمین ظرفیت باربری شمع مورد استفاده قرار می‌گیرد. به دو دلیل، ظرفیت باربری بدست آمده از آزمایش PDA از مقادیر بدست آمده از روابط کلاسیک کمتر است. دلایل این امر (i) ماهیت دینامیکی بودن آزمایش PDA و (ii) اثرات گیرش خاک و کوتاه مدت بودن ظرفیت باربری بدست آمده از آزمایش PDA می‌باشند. البته اثرات عامل دوم را با انجام این آزمایش مدتی پس از اتمام شمع‌کوبی می‌توان کاهش داد. مراجع مختلف ضرایب متفاوتی برای تصحیح نتایج PDA ارائه داده‌اند. دستورالعمل FHWA [6] بر مبنای مطالعات راشه [7]، ضرایبی را برای اصلاح نتایج آزمایش PDA ای که بلافاصله پس از اتمام کوبش شمع انجام می‌شود، در خاک‌های مختلف ارائه داده است. با توجه به رسی بودن لایه‌های خاک در محل جکت ۲۲، ضریب اصلاح ۲ طبق دستورالعمل FHWA برای این جکت انتخاب شد. علت بکارگیری و انتخاب مقدار این ضریب در ادامه مقاله با توجه به ضرایب کوبش بحث می‌شود.

نتایج آزمایش PDA برای دو شمع A1 و A2 از چهار شمع جکت ۲۲ در جدول ۳ آورده شده است. همانطور که در جدول ۳ مشاهده می‌شود نتایج خام آزمایش PDA حکایت از ناکافی بودن طول شمع دارد، ولی با اصلاح نتایج آن، طول شمع‌ها کافی خواهد بود تحلیل و استنباط از PDA باید با توجه به شرایط پروژه انجام گیرد. در این جکت، علت اصلی اصلاح نتایج آزمایش PDA در دو نکته است. اول به علت دینامیکی بودن

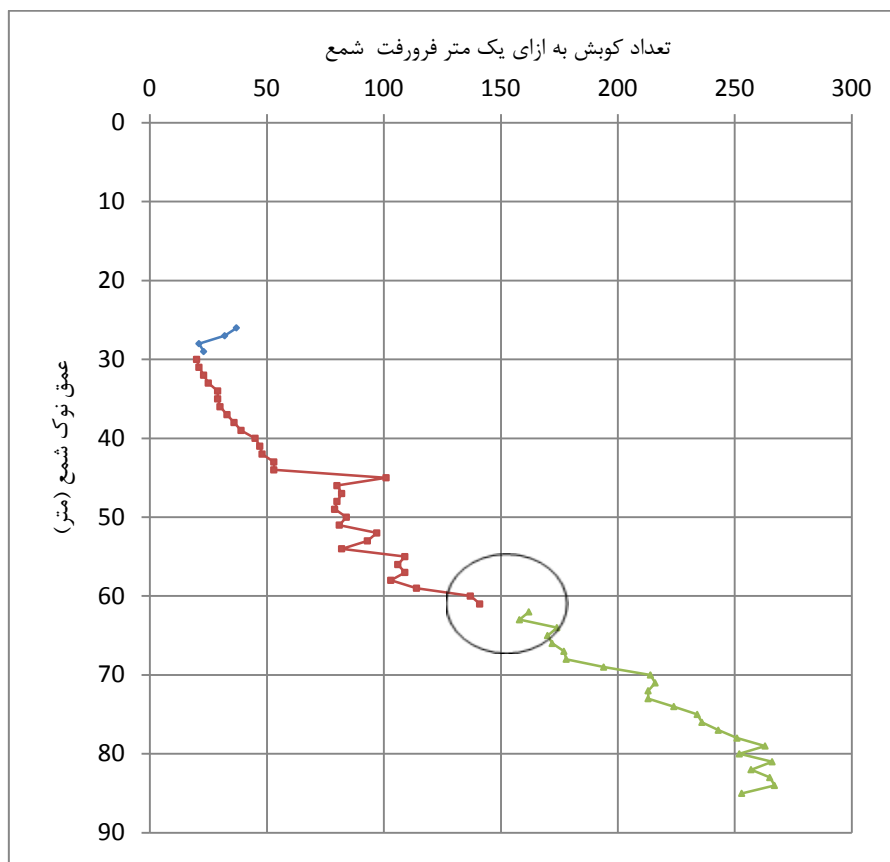
آزمایش و دوم آنکه نرخ کوبش چکش در این جکت، به نسبت سایر پروژه‌های مشابه بالاتر بوده است. به طور معمول، شمع‌های جکت‌ها با نرخ کوبش ۴۰ ضربه در دقیقه اجرا می‌شوند ولی در جکت شماره ۲۲، شمع‌ها با نرخ ۶۰ ضربه در دقیقه کوبیده شده‌اند. این سرعت بالا منجر به بالا رفتن فشار اضافی آب حفره‌ای و کاهش شدید تنش موثر در حین کوبش می‌شود. آزمایش PDA در این جکت، دقیقاً پس از عملیات کوبش انجام گرفته است. این بدین معنا است که در حین انجام آزمایش PDA، فشار اضافی آب حفره‌ای در نوک شمع بسیار بالا بوده و نتایج بدست آمده برای شرایط کوتاه مدت می‌باشد.

در این پروژه در صورتی که آزمایش PDA مدتی بعد از اتمام عملیات شمع‌کوبی، مثلاً ۲ هفته، انجام می‌گرفت، ظرفیت‌های باربری دقیق‌تری بدست می‌آمد. مشابه این اتفاق در نتایج ضربه فرورفت اندازه‌گیری شده مشاهده می‌شود. شکل ۴ نمودار مربوط به نتایج واقعی ضربه فرو رفت شمع‌های جکت ۲۲ می‌باشد. در عملیات شمع‌کوبی این جکت، در عمق ۶۲ متری، به علت اتصال قطعه جدیدی از شمع، وقفه‌ای به مدت ۱۲ ساعت در عملیات کوبش ایجاد می‌شود. پس از شروع دوباره عملیات کوبش افزایش تعداد ضربات در حوالی همان عمق مشاهده شد. این افزایش تعداد ضربات به علت کاهش فشار اضافی آب حفره‌ای و بالا رفتن تنش موثر خاک است. همین اتفاق در PDA نیز اتفاق می‌افتد. به همین علت لازم است ضریب اصلاحی بر روی نتایج آزمایش PDA در این پروژه صورت گیرد.

لازم است به تفاوت میان کاهش فشار آب حفره‌ای در حین کوبش و فرآیند تحکیم توجه شود. همانطور که در بخش دوم نیز اشاره شد، در این جکت به علت سخت بودن رس، افزایشی در میزان ظرفیت باربری شمع رخ نخواهد داد، ولی سرعت کوبش بالای شمع‌ها منجر به پایین آمدن شدید تنش موثر در حین کوبش و راحت تر فرو رفتن شمع خواهد شد. این کاهش شدید تنش موثر در حین کوبش، اثر مستقیمی بر روی نتایج آزمایش PDA دارد.

جدول ۳. نتایج خام و اصلاح شده آزمایش PDA در جکت ۲۲

شمع	نتایج خام تست PDA (kN)	نتایج اصلاح شده تست PDA (kN)	مقدار ظرفیت باربری مورد نیاز (kN)
A1	34162	61459	60000
A2	39959	73814	68000



شکل ۴. نمودار ضربه فرورفت اندازه‌گیری شده برای یکی از شمع‌ها در جکت SPD 22

#### ۴- مقاومت خاک به فرورفت (SRD<sup>۳</sup>)

مقاومت خاک به فرورفت (SRD) در واقع ظرفیت باربری نهایی محوری شمع در شرایط دینامیکی حین کوبش است. با استفاده از SRD می‌توان تخمینی نسبت به تعداد ضربه فرورفت در اعماق مختلف بدست آورد. روش‌های مختلفی برای بدست آوردن مقدار SRD وجود دارد. معروفترین روش مربوط به استیونس و همکاران [8] است. روش وی با توجه به تعداد بسیار زیادی نمونه در خلیج فارس کالیبره شده است. بعد از وی، پیچ و همکاران اثرات خستگی اصطکاکی (friction fatigue) را در روابط استیونس اعمال کردند. مطالعه بعدی مربوط به کلیات و همکاران [9] می‌باشد که تغییراتی را در روابط پیچ ایجاد کردند. آنها در روابط خود شمع را به دو قسمت تقسیم کرده و در هر قسمت ضریب جداگانه‌ای را لحاظ کردند. همگی آنها در روابط خود اثرات مربوط به توقف در عملیات شوع کوبی را لحاظ کرده و بدین شکل دو حد بالایی و پایینی در محاسبه SRD معرفی کرده‌اند.

۴-۱- محاسبه مقاومت خاک به فرورفت با استفاده از روش استیونس (Stevens et al.)

استیونس را می‌توان اولین فردی دانست که مطالعات جامعی بر روی مقاومت خاک به فرورفت انجام داده است. وی در سال ۱۹۸۲ در مقاله‌ای این مقاومت را برای خاک‌های رس سخت، ماسه سخت و سنگ بدست آورد. اعداد داده شده در روابط استیونس، با توجه به تعداد بسیار زیادی نمونه شمع اجرا شده در خلیج فارس کالیبره شده است و از این حیث ارتباط خوبی با شرایط ژئوتکنیکی جکت شماره ۲۲ دارد. وی روابط خود را برای دو حالت رفتاری شمع ارائه نمود. حالت اول مربوط به شرایط Plug و حالت دوم مربوط به شرایط Unplug می‌باشد. در هر یک از این حالات نیز یک حد بالایی و پایینی تعریف شده است. حد پایینی برای حالت اجرای عادی و حد بالایی برای حالتی است که وقفه‌ای در عملیات شمع کوبی ایجاد شده باشد. با توجه به اینکه معیار انتخاب مقادیر SRD ماکزیمم مقدار بین حالت Plug و Unplug است، از ظرفیت باربری حالت Unplug استفاده شده است. روابط (۴) و (۵) توسط استیونس برای محاسبه مقاومت خاک به فرورفت در رس‌های سخت، شرایط Unplug و عملیات بدون وقفه ارائه شده است.

$$Q_{SRD} = 1.5 Q_s + Q_e \quad (۴)$$

در این رابطه،  $Q_s$  مقاومت جدار و  $Q_e$  مقاومت نوک شمع می‌باشد که از روابط کلاسیک API محاسبه می‌شوند. بعد از محاسبه  $Q_{SRD}$  لازم است که ضریب اصلاحی  $F_p$  در آن ضرب شود، مقدار حاصل، مقدار نهایی SRD برای هر عمق می‌باشد.

$$F_p = 0.5 \times (OCR)^{0.3} \quad (۵)$$

۴-۲- محاسبه مقاومت خاک به فرورفت با استفاده از روش کلیات (Colliat et al.)

ایده در نظر گرفتن اثرات خستگی اصطکاکی (friction fatigue) را اولین بار پیچ در سال ۱۹۹۰ مطرح کرد. پس از آن کلیات در سال ۱۹۹۳ کارهای پیچ را ادامه داد و شمع را در طول خود به دو قسمت تقسیم کرد و برای هر یک ضریب  $F_p$  جداگانه‌ای در نظر گرفت. رابطه محاسبه  $Q_{SRD}$  با استفاده از روش کلیات مشابه رابطه (۴) است ولی ضریب  $F_p$  آن متفاوت می‌باشد. رابطه (۶) مقدار ضریب اصلاحی  $F_p$  در رابطه کلیات را نشان می‌دهد.

$$F_p = \lambda \times (OCR)^{0.3} \quad (۶)$$

در این رابطه مقدار متغیر  $\lambda$  در جدول ۴ ارائه شده است.

جدول ۴. مقادیر متغیر  $\lambda$  برای شرایط بدون وقفه در رابطه کلیات

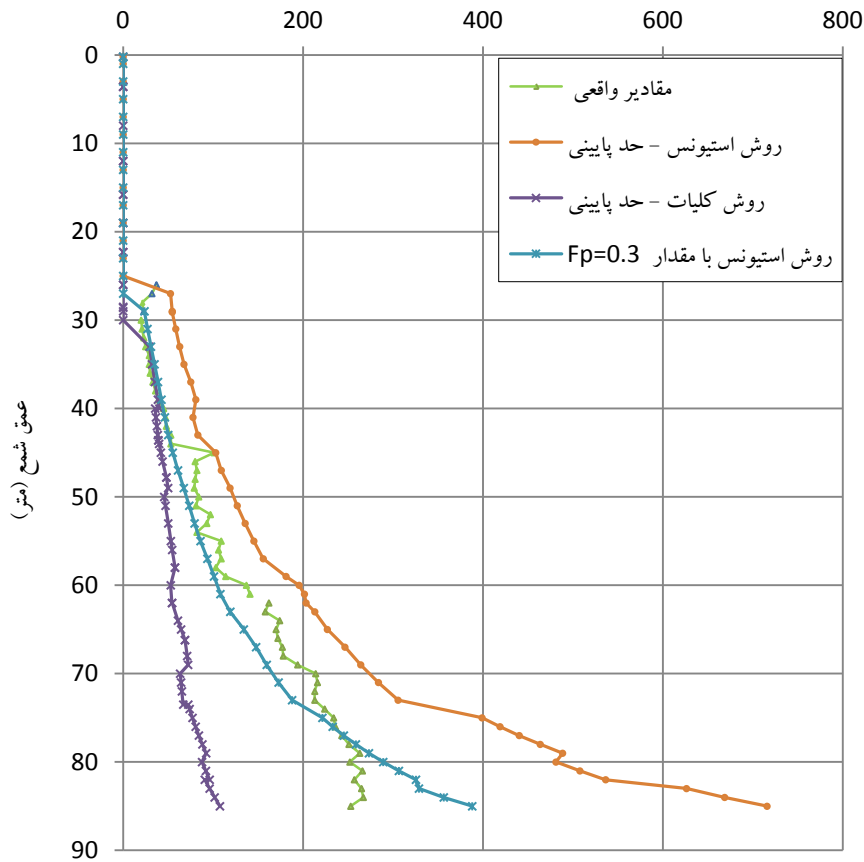
بخش‌های بالایی شمع (از بستر دریا تا ۱۰ متری بالای نوک شمع)	
بخش پایینی شمع (ما بین نوک شمع تا ۱۰ متر بالاتر از آن)	

۴-۳- محاسبه مقاومت خاک به فرورفت با استفاده از نتایج واقعی ضربه فرورفت در جکت SPD 22

همه روش‌های مختلف ارائه شده در مراجع مختلف برای محاسبه مقاومت خاک به فرورفت (SRD) با توجه به داده‌های تجربی کالیبره شده‌اند. در پروژه جکت ۲۲ نیز برای عملیات اجرایی از روش کلیات برای محاسبه SRD استفاده شد. پس از ثبت داده‌های ضربه فرورفت و مقایسه آن با نتایج پیش‌بینی شده، اختلاف زیادی میان آنها مشاهده شد. با توجه به نتایج واقعی، کالیبراسیون مجددی بر روی روابط صورت گرفت. در این کالیبراسیون رابطه استیونس به عنوان رابطه مبنا انتخاب شده و کالیبراسیونی بر روی مقدار ضریب  $F_p$  انجام گرفت. بهترین تطبیق با ضریب  $F_p$  مساوی ۰٫۳ بدست می‌آید. مقایسه میان مقادیر واقعی ضربه فرورفت با مقادیر بدست آمده از روش‌های استیونس و کلیات و ضریب  $F_p$  مساوی ۰٫۳ در شکل ۵ آمده است. همانطور که مشاهده می‌شود روش کلیات اختلاف زیادی با نتایج واقعی دارد. روش استیونس نیز با اینکه ضرایب آن با تعداد زیادی نمونه اجرا شده در خلیج فارس کالیبره شده است، در اعماق انتهایی اختلاف‌هایی با نتایج واقعی نشان می‌دهد. با توجه به نتایج می‌توان به این نتیجه رسید که روش کلیات، روشی غیر محافظه کارانه بوده و نتایج دست پایینی ارائه می‌دهد که این امر موجب انتخاب چکش ضعیفتر و در نتیجه احتمال پس‌زدگی شمع در هنگام کوبش در شرایط واقعی می‌گردد.

<sup>3</sup> Soil Resistance to Driving

تعداد ضربه به ازای یک متر فرورفت



شکل ۵. مقادیر ضربه فرورفت در جکت ۲۲ با استفاده از روش‌های مختلف

### نتیجه‌گیری

با توجه به گستردگی روش‌های مطالعه فرورفت شمع در سکوه‌های دور از ساحل، روندی منطقی همراه با مطالعه موردی در این مقاله ارائه شد و با نتایج واقعی کوبش مقایسه گردید. در نهایت نکات مهم مقاله حاضر به شرح ذیل جمع‌بندی می‌شود.

الف) در صورت استفاده از آزمایش‌های دینامیکی PDA برای تأیید اعتبار محاسبات کلاسیک ظرفیت باربری، لازم است اصلاحاتی با توجه به جنس خاک و در نظر گرفتن سرعت کوبش شمع‌ها بر روی نتایج آن صورت گیرد.

ب) رسی بودن خاک، خود به تنهایی عاملی برای افزایش ظرفیت باربری درازمدت شمع‌ها نمی‌باشد و لازم است به میزان پیش‌تحکیمی خاک توجه شود. در خاکهایی که OCR آنها بیش از ۲ باشد، میزان افزایش قابل توجه نیست.

ج) برای محاسبه مقاومت خاک به فرورفت خاک‌های رسی در در منطقه پارس جنوبی، روش استیونس روش قابل اطمینان تری نسبت به روش کلیات می‌باشد.

د) در محل پروژه جکت SPD 22، استفاده از روش استیونس با مقدار  $F_p$  مساوی ۰٫۳، جوابهای نزدیکتری به شرایط واقعی کوبش داشته است.

### مراجع

- [1] پولوس، ه. ۱۳۸۷. ژئوتکنیک دریایی. روشن ضمیر، م.ع. (مترجم). انتشارات جهاد دانشگاهی، واحد صنعتی اصفهان.
- [2] Rausche, F., G. G. Goble. 1972. "Soil resistance prediction from pile dynamics". J. Soil Mechanics Foundat. Div., ASCE 98(SM9), 917-37.
- [3] خوشبخت مروی، م.ج، فاخر، ع.، معرفت، م.ص. ۱۳۸۹. دقت نتایج ظرفیت باربری شمع حاصل از اندازه‌گیری‌های دینامیکی با استفاده از روش PDA. مجله مهندسی عمران شریف، سال بیست و ششم، شماره ۱.
- [4] فاخر، ع. ۱۳۹۰. مهندسی پی پیشرفته. انتشارات دانشگاه تهران.

- [Δ] Randolph, M. F., Carter, J. P. & Wroth, C. P. (1979). "Driven piles in clay-the effects of installation and subsequent consolidation". *Geotechnique* 29, No. 4, 361-393.
- [ϛ] Design and Construction of Driven pile Foundation US Department of Transportation, Federal Highway Administration Publication No. FHWA-HI-97-013, November 1998.
- [Υ] Rausche, F., Thendean, G. Abou-matar, H., Likins, G. and Goble, G. (1996). Determination of Pile Drivability and Capacity from Penetration Tests. FHWA Contract No. DTFH61-91-C-00047, Final Report, U.S. Department of Transportation, Federal Highway Administration.
- [Λ] Stevens R.S. Wiltsie, E.A., and Turton, H., (1982). "Evaluating Pile Drivability for Hard Clay, Very dense Sand and Rock". *Proc 14th Offshore Technology Conference, Houston, Vol.1*, 465 – 482.
- [Ϡ] Colliat, J.L., Vergobbi, P., Puech, A. (1993), "Friction degradation and setup effects in hard clays offshore Congo and Angola", *Offshore Technology Conference, OTC 7192*, pp. 627-634.