مهندسی عمران شریف
دوره‌ی ۲-۲۶، شماره‌ی ۳، ص. ۸۱-۹۴

ارزیابی ظرفیت باربری محوری شمع‌ها به‌کمک نتایج آزمایش نفوذ مخروط (CPTu) در محیط‌های دریایی ایران

برمك حسینی (کارشناس ارشد)
گروه عمران، دانشگاه آزاد اسلامی واحد صوفیان
ابوالفضل اسلامی (دانشیار)
دانشکده‌ی مهندسی عمران، دانشگاه صنعتی امیرکبیر

این نوشتار قابلیت کاربرد پنج روش جاری مبتنی بر نتایج آزمایش نفوذسنجی مخروطی (CPT)[1] و (CPTu) در تعیین ظرفیت باربری سیزده شمع کوبشی فولادی اجراشده در محیط‌های دریایی ایران را در مقایسه با نتایج آزمایش دینامیکی کوبش شمع، مورد بررسی و ارزیابی قرار می‌دهد. در این ارزیابی‌ها نتایج حاصل از آزمایش دینامیکی کوبش شمع، برای تعیین ظرفیت باربری اندازه‌گیری‌شده، به‌عنوان آزمایش پایه مورد استفاده قرار گرفت. ظرفیت باربری محاسبه‌شده‌ی شمع‌ها با استفاده از نتایج آزمایش CPTu با نتایج حاصل از ظرفیت باربری اندازه‌گیری‌شده از طریق آزمایش تحلیل شمع‌کوبی (PDA)[2] مقایسه شدند. در انجام این مقایسه و ارزیابی از روش‌های تحلیل آماری استفاده شد. نتایج حاصل از ارزیابی‌های مختلف نشان می‌دهد که عموماً روش‌های مبتنی بر نتایج CPT و CPTu از دقت کافی برای محاسبه‌ی ظرفیت باربری شمع‌ها برخوردارند. بنابراین در حالت کلی تلفیق آزمایش درجای CPTu با تحلیل دینامیکی شمع‌کوبی برای طراحی شمع‌ها به‌لحاظ ظرفیت باربری در سازه‌های دریایی مورد ملاحظه‌ی مهندسین طراح قرار می‌گیرد.

واژگان کلیدی: ظرفیت باربری، محیط دریایی، شمع‌های‌کوبشی، آزمایش دینامیکی، آزمایش نفوذسنج مخروطی با اندازه‌گیری فشار آب حفره‌یی (CPTu).

barmak.hb@gmail.com
afeslami@aut.ac.ir

مقدمه

یکی از مهم‌ترین عوامل مؤثر در پایداری و استحکام سازه‌های دریایی اجزای مربوط به پی‌ریزی آنهاست که اغلب به‌صورت شمع‌های کوبشیِ فولادی مورد استفاده قرار می‌گیرند. از آنجا که شمع‌های کوبشیِ ناپایدار باعث خرابی سازه‌های دریایی می‌شوند، ارزیابی ظرفیت باربری شمع‌ها و رعایت دقت لازم در طراحی‌آنها بسیار با اهمیت است. همچنین به‌علت سختی شمع‌ها و نیز هزینه‌های بالا، برای استقرارشان باید تعداد و عمق بهینه‌یی در نظر گرفت. ظرفیت باربری شمع‌ها را به‌شیوه‌های مختلف نظیر: تحلیل استاتیکی، آزمایش دینامیکی، آزمایش بارگذاری شمع و استفاده از نتایج آزمایش‌های درجا، می‌توان تعیین کرد. با در نظر گرفتن این نکته که از به‌کارگیری روش‌های مختلف محاسبه‌ی ظرفیت باربری شمع‌ها، که مبتنی بر روش‌های تحلیل استاتیکی هستند، پاسخ‌های بسیار متفاوتی دریافت شده، درمی‌یابیم که برای کنترل و محاسبه‌ی ظرفیت باربری شمع‌ها با هدف طراحی اقتصادی‌تر مقاطع و طول شمع‌ها، باید روش یا روش‌های مکملی ارائه کرد. در این راستا می‌توان از آزمایش نفوذسنجی مخروطی CPT و پیزوپنترومتر[3]، آزمایش نفوذ مخروط با اندازه‌گیری فشار آب (CPTu) به‌عنوان روش مکمل در تحلیل ظرفیت باربری محوری شمع بهره جست. شباهت دستگاه نفوذسنج مخروطی یا پنترومتر با ساختمان یک شمع، دقت بالا و چشم‌گیر تجهیزات الکتریکی دستگاه CPTu است که امکان اندازه‌گیری هم‌زمان فشار آب حفره‌یی[4] (U_2) را به همراه مقاومت نوک مخروط[5] (q_c) و اصطکاک جداره‌ی مخروط[6] (f_s) میسر می‌سازد. به‌علاوه، دست‌نخورده بودن خاک در حین آزمایش از جمله عواملی است که انجام این آزمایش در محیط‌های دارای خاک ریزدانه‌ی نرم تا متوسط را در طراحی شمع‌ها مورد توجه روزافزون قرار داده است. روش‌های متعددی به‌منظور استفاده از نتایج این آزمایش در محاسبه‌ی ظرفیت باربری شمع‌ها ارائه شده است. تحقیقات انجام شده در این زمینه حاکی از آن است که روابط مختلفی که برای استفاده از نتایج آزمایش CPT و CPTu ارائه شده نیز پاسخ‌های متفاوتی ارائه می‌دهند، که این مهم محققین را به سوی به‌گزینی این روش‌ها با توجه به مقایسه‌ی آنها با نتایج حاصل از آزمایش‌هایی نظیر بارگذاری استاتیکی یا برنامه‌ی تحلیل شمع به‌روش کیس با استفاده از معادله‌ی موج[7] (CAPWAP) رهنمون می‌سازد. با توجه به میسر نبودن انجام آزمایش بارگذاری شمع در محیط‌های دریایی به‌دلیل دشواری کار در این نوع محیط‌ها، استفاده از آزمایش‌های دینامیکی

تاریخ: دریافت ۱۳۸۷/۷/۱۴، داوری ۱۳۸۸/۴/۶، پذیرش ۱۳۸۸/۹/۱۸.

در حین شمع‌کوبی به‌همراه تحلیل انطباق سیگنال‌ها برای تحلیل ظرفیت باربری شمع‌ها ـ یکی از ساده‌ترین و اقتصادی‌ترین روش‌ها برای کسب اطمینان از محاسبات انجام‌شده ـ ارجحیت می‌یابد. با توجه به اهمیت موضوع، در این مطالعه تعداد ۱۳ مورد شمع‌کوبیِ فولادیِ اجرا شده در محیط‌های دریایی ایران مورد بررسی و ارزیابی قرار گرفتند و میزان تطابق روش‌های مختلف با نتایج حاصل از تحلیل شمع‌کوبی تعیین شد. بدین‌ترتیب قابلیت و میزان کفایت روش‌های CPT و CPTu ارزیابی شد. برای این منظور نتایج ظرفیت باربری حاصل از روش‌های مبتنی بر آزمایش CPT و CPTu، با نتایج حاصل از تحلیل شمع‌کوبی (PDA)، توسط روش‌های آمار و احتمال مورد بررسی قرار گرفتند.

مروری بر روش‌های محاسبه‌ی ظرفیت باربری شمع

علی‌رغم پیشرفت چشمگیر علم مکانیک خاک و مهندسی ژئوتکنیک در دهه‌های اخیر، همچنان تعیین ظرفیت باربری شمع‌ها با دشواری‌هایی همراه است. خواص فیزیکی و مکانیکی منحصر به فرد خاک، از قبیل ناهمگونی، ناهمسانی، وجود آب، استعداد خزش، تنوع مختلف خاک در طبیعت، رفتار پیچیده‌ی تنش-کرنش از یک‌سو و تنوع شمع‌ها از لحاظ جنس مصالح، شکل مقطع، روش‌های ساخت و استقرار و... از سوی دیگر، موجب پیچیدگی اندرکنش المان سازه‌یی شمع و خاک اطراف آن می‌شود. بنابراین مدل‌کردن چنین شرایط پیچیده‌یی که متغیرهای مختلفی در آن دخالت دارند، به‌سادگی میسر نیست. در دهه‌های گذشته، پژوهش‌گران متعددی در جهت ارائه‌ی روابط نظری یا تجربی مختلف به‌منظور تعیین ظرفیت باربری، که اغلب به‌نام روش‌های تحلیل استاتیکی شناخته می‌شوند، تلاش کرده‌اند.[۱] برای مثال می‌توان به روش‌های توصیه‌شده در آیین‌نامه‌ی مهندسیِ پی کانادا (CFEM)[8] و آیین‌نامه‌ی مؤسسه‌ی نفت آمریکا (API)[9] اشاره کرد.[۲و۳] تحقیقات انجام‌شده توسط سایر محققین نشان می‌دهد که از روش‌های مختلف محاسبه‌ی ظرفیت باربری شمع‌ها و مبتنی بر روش‌های تحلیل استاتیکی، پاسخ‌های بسیار متفاوتی به دست آمده است. در این مورد می‌توان به مطالعات انجام‌گرفته در سال‌های ۱۹۸۹ و ۲۰۰۴ اشاره کرد.[۴و۵] درنتیجه ارائه‌ی روش یا روش‌های مکمل برای کنترل و محاسبه‌ی ظرفیت باربری شمع‌ها با هدف طراحی اقتصادی‌تر مقاطع و طول شمع‌ها ضرورت می‌یابد. در این راستا آزمایشِ درجای CPT و CPTu به‌عنوان روش مکمل می‌تواند در تحلیل ظرفیت باربری محوری شمع مورد استفاده قرارگیرد. برای استفاده از نتایج آزمایش CPT و CPTu در محاسبه‌ی ظرفیت باربری شمع روش‌های مختلفی توسط محققین ارائه شده است.[۶-۱۱] تحقیقات انجام‌شده در این زمینه حاکی است که روابط مختلف ارائه‌شده برای استفاده از نتایج آزمایش CPT و CPTu نیز پاسخ‌های متفاوتی به دست می‌دهند. مثلاً برخی از تحقیقات به مقایسه و ارزیابی ظرفیت باربری شمع‌های محاسبه‌شده با استفاده از نتایج آزمایش CPT و CPTu، با نتایج اندازه‌گیری شده از آزمایش بارگذاری استاتیکی شمع پرداخته‌اند.[۱۲-۱۴] مطالعه‌ی انجام‌شده بر روی ۸ شمع بارگذاری‌شده در سال ۱۹۸۸ نشان داد که نتایج ظرفیت باربریِ حاصل از روش‌های بوستامانته و جیانسلی (۱۹۸۲)، درویتر و برینگن (۱۹۷۹) و اشمارتمن (۱۹۷۸)، در مقایسه با سایر روش‌ها، مطابقت بیشتری از خود نشان می‌دهند. در سال ۱۹۸۸، شش روش محاسبه‌ی ظرفیت باربری با استفاده از نتایج آزمایش CPT، با ظرفیت اندازه‌گیری شده از بارگذاری شمع بر روی ۹۸ شمع مقایسه شد.[۱۳] ارزیابی‌ها نشان داد که روش بوستامانته و جیانسلی (۱۹۸۲)، در مقایسه با سایر روش‌ها، با ظرفیت باربری اندازه‌گیری‌شده از بارگذاری شمع بیشترین تطابق را دارد. مطالعاتی که محققین در سال ۲۰۰۷ بر روی ۳۵ شمع کوبشی بتونی پیش‌تنیده در منطقه‌ی لوییزیانا انجام دادند[۱۴] نشان می‌دهد که روش‌های بوستامانته و جیانسلی (۱۹۸۲)، درویتر و برینگن (۱۹۷۹) و اشمارتمن (۱۹۷۸)، در مقایسه با سایر روش‌ها، از تطبیق بهتری برخوردارند.

آزمایش بارگذاری شمع، آزمایشی با مقیاس واقعی، دقیق و جامع برای تخمین ظرفیت باربری شمع است که امروزه کاربرد گسترده‌یی در مطالعات ژئوتکنیکی دارد، اما استفاده از این آزمایش در محیط‌های دریایی ـ به‌ویژه در مناطق عمیق‌تر آن ـ اغلب غیرممکن و غیراقتصادی است. بنابراین استفاده از یک روشِ جایگزینِ سریع، اقتصادی و مطمئن که بتواند تخمین خوبی از ظرفیت باربری شمع ارائه دهد و در محیط‌های آبی عمیق دریا قابل اجرا باشد، لازم و ضروری می‌نماید. یکی از این روش‌ها که امروزه مقبولیت زیادی یافته و کاربرد گسترده‌یی در مطالعات ژئوتکنیکی دارد، آزمایش شمع‌کوبی (PDA) است. درباره‌ی ارزیابی ظرفیت باربری شمع‌ها به‌وسیله‌ی آزمایش شمع‌کوبی مطالعات چندانی وجود ندارد، اما در یکی از مطالعات انجام شده که در آن ۳ شمع کوبشی مورد آزمایش شمع‌کوبی قرار گرفته‌اند[۱۵] نتایج حاصله بیان‌گر این نکته است که روش اشمارتمن (۱۹۷۸)، در مقایسه با سایر روش‌ها، بهترین جواب را ارائه می‌دهد.

محاسبه‌ی ظرفیت باربری شمع با استفاده از نتایج آزمایش CPT و CPTu

به‌طور عام، ظرفیت باربری محوری شمع مطابق رابطه‌ی ۱ به دست می‌آید:

$$Q_u = Q_t + Q_s = q_b A_t + \sum_{i=1}^{n} f_i A_{si} \qquad (1)$$

که در آن Q_u ظرفیت باربری نهایی شمع، Q_t مقاومت کل کف، Q_s مقاومت کل اصطکاکی، q_b ظرفیت باربری کف، A_t سطح مقطع کلی کف شمع، f_i ظرفیت باربری جداری، A_{si} سطح جانبی شمع است.[۱۶] روش‌های متعددی برای محاسبه‌ی ظرفیت باربری شمع با استفاده از نتایج آزمایش CPT و CPTu وجود دارد. به‌طور کلی این روش‌ها به دو دسته تقسیم می‌شوند:

الف) روش غیرمستقیم: در این روش ابتدا پارامترها و مشخصات مکانیکی خاک ـ از قبیل چسبندگی و زاویه‌ی اصطکاک داخلی ـ از نتایج آزمایش CPT و CPTu تعیین، و سپس با استفاده از این پارامترها و روابط تحلیل استاتیکی، ظرفیت باربری شمع معین می‌شود.

ب) روش مستقیم: در این روش بین نتایج آزمایش CPT و CPTu و ظرفیت باربری شمع‌ها یک رابطه‌ی مستقیم ارائه می‌شود. در اغلب این روش‌ها برای تعیین مقاومت کف شمع از مقادیر مقاومت نوک مربوط به آزمایش CPTu یعنی q_c استفاده شده است. اما برای تعیین مقاومت واحد جداری شمع علاوه بر مقادیر مقاومتی نوک شمع (q_c) از مقادیر مقاومت اصطکاکی (f_s) مربوط به آزمایش CPTu نیز استفاده می‌شود.[۱]

در این تحقیق، روش‌های مستقیمِ مبتنی بر نتایج آزمایش CPT و CPTuکه مورد استفاده قرار گرفته‌اند عبارت‌اند از: ۱. روش اشمارتمن وناتینگهام؛ ۲. روش برینگن و درویتر؛ ۳. روش بوستامانته و جیانسلی؛۴. روش تومای و فخرو؛ ۵. روش اسلامی و فلنیوس. در ادامه شرح مختصری درباره‌ی هر یک از این روش‌ها ارائه شده است.

۱. روش اشمارتمن و ناتینگهام (۱۹۷۸)

این روش مبتنی بر خلاصه‌یی ازکار تحقیقی است که در سال ۱۹۷۵ توسط ناتینگهام روی مدل شمع‌ها و نیز شمع‌های واقعی انجام، و در سال ۱۹۷۸ توسط اشمارتمن به‌صورت دستورالعمل ارائه شد. مقاومت واحد انتهای شمع[۱۰] (r_t) در ماسه و رس مساوی میانگین مقاومت مخروط در نظر گرفته می‌شود و مقدار واقعی بستگی به توزیع مقادیر q_c نسبت به عمق دارد. مقاومت واحد جداری شمع[۱۱] (r_s) نیز از اصطکاک جداره‌ی CPT یا مقاومت نوک مخروط تعیین می‌شود. مقاومت نوک شمع از رابطه‌ی ۲ به دست می‌آید:

$$r_t = C_{OCR}.q_c \qquad (۲)$$

که در آن r_t مقاومت واحد نوک، C_{OCR} ضریب تصحیح بدون بعد اخذشده از نسبت بیش تحکیمی خاک، و q_c میانگین هندسی مقاومت نوک در ناحیه‌ی تأثیر است، که در این روش بین ۰٫۷ تا ۴ برابر قطر در پایین نوک شمع و ۶ تا ۸ برابر قطر در بالای نوک شمع است. مقاومت جداری برحسب اصطکاک جداری و از رابطه‌ی ۳ تعیین می‌شود:

$$r_s = K.f_s \qquad (۳)$$

که در آن r_s مقاومت واحد جداره و K ضریبی است بدون بعد که به شکل‌و جنس شمع و نوع نفوذسنج بستگی دارد و مقدار آن در ماسه‌ها بین ۰٫۸ تا ۲ و در رس بین ۰٫۲ تا ۱٫۲۵ است. f_s نیز اصطکاک جداری است. مقاومت جداری تنها در ماسه، و نه در رس، از رابطه‌ی ۴ نیز به دست می‌آید:

$$r_s = C.q_c \qquad (۴)$$

C ضریب بدون بعدی است که تابع نوع شمع است و مقدار آن از ۰٫۸ تا ۱٫۸ درصد در تغییر است. حد بالای ۱۲۰ کیلوپاسکال برای مقاومت نوک در حالت فشار و ۷۰ درصد مقاومت جداری حاصل از رابطه‌ی ۳ و ۴ برای حالت کشش و حد ۱۵ مگاپاسکال برای مقاومت نوک اعمال می‌شود.[۶]

۲. روش برینگن و درویتر (۱۹۷۹)

این روش به روش اروپایی مشهور است و مبتنی بر تجربیات برینگن و درویتر از پی‌های اجرا شده در پروژه‌های سواحل دریای شمال است. در خاک‌های ماسه‌یی، این روش برای تعیین مقاومت واحد نوک و جداره‌ی شمع مانند روش اشمارتمن و ناتینگهام عمل می‌کند. حد بالای ۱۵ مگاپاسکال برای مقاومت واحد انتهای شمع که توسط یک ضریب بیش‌تحکیم (OCR)[۱۲] کنترل می‌شود، حاکم بر طراحی است. برای محاسبه‌ی مقاومت جداری از رابطه‌ی ۳ با مقدار $K = ۱$ یا رابطه‌ی ۴ با $C = ٪۰٫۳$ استفاده می‌شود. رابطه‌ی موجود برای مقاومت واحد انتهای شمع در رس عبارت است از:

$$r_t = N_c.S_u \qquad (۵)$$

$$S_u = {}^{q_c}/_{N_k} \qquad (۶)$$

که در آن N_c ضریب ظرفیت باربری، S_u مقاومت برشی زه‌کشی‌نشده، و N_k ضریب بدون بعد نفوذسنج است که از ۱۵ تا ۲۰ تغییر می‌کند و با استفاده از تجارب محلی تعیین می‌شود. مقاومت واحد جداره در رس از مقاومت برشی زه‌کشی‌نشده (S_u) با استفاده از معادله‌ی ۷ به دست می‌آید:

$$r_s = \alpha.S_u \qquad (۷)$$

که در آن $alpha$ ضریب بعد است و مقدار آن برای رس‌های عادی تثبیت‌شده برابر ۱ و برای رس‌های بیش‌تحکیم برابر ۰٫۵ است. در این معادلات باید حد بالای ۱۲۰ کیلوپاسکال برای مقاومت واحد جداره اعمال شود.[۷]

۳. روش بوستامانته و جیانسلی (۱۹۸۲)

این روش فرانسوی براساس تجارب جیانسلی و بوستامانته در عملیات شمع‌کوبی اداره‌ی بزرگراه‌های فرانسه ارائه شده است. مقاومت واحد جداره و انتها از مقاومت نوک مخروط (q_c) تعیین شده و از اصطکاک جداره (f_s) در محاسبات استفاده‌یی نمی‌شود. مقاومت واحد انتها از محدوده‌ی ٪۴۰ تا ٪۵۰ q_c تعیین می‌شود و در منطقه‌ی ۱٫۵B بالا و ۱٫۵B پایین انتهای شمع میانگین‌گیری می‌شود (B قطر شمع است). طبق رابطه‌ی ۴، مقاومت واحد جداره و با مقدار C در حدود ۰٫۵ تا ۳ درصد، برحسب بزرگی مقاومت نوک مخروط، نوع خاک و نوع شمع تغییر می‌کند. حد بالای مقاومت واحد جداره‌ی شمع از حدود ۱۲۰ تا ۱۵۰ کیلوپاسکال بسته به نوع خاک، نوع شمع و متد جای‌گذاری شمع متغیر است.[۸]

۴. روش تومای و فخرو (۱۹۸۲)

این روش مبتنی است بر مطالعه‌ی صحرایی و آزمایشگاهیِ تعدادی شمع مختلف در خاکِ رس، در ایالت لویزیانا آمریکا استوار است. مقاومت انتها مانند روش پیشنهادی اشمارتمن و ناتینگهام تعیین شده و مقاومت واحد جداره مطابق معادله‌ی ۳ با استفاده از ضریب K از رابطه‌ی ۸ به دست می‌آید:

$$K = ۰٫۵ + ۹٫۵e^{-۰٫۰۹f_s} \qquad (۸)$$

که در آن f_s مقاومت اصطکاکی برحسب مگاپاسکال است.[۹]

۵. روش اسلامی و فلنیوس (۱۹۹۷)

این روش در اواسط دهه‌ی ۹۰ میلادی و براساس مطالعه‌ی موردی بر روی اطلاعات ۱۰۲ شمع جمع‌آوری شده از ساخت‌گاه‌های مختلف از کشورهای مختلف براساس داده‌های پیزوپنترومتر ارائه شده است. برخلاف چهار روش شرح داده‌شده در فوق، در این روش ابتدا داده‌ها تصحیح می‌شوند. بر این اساس، مقاومت اصطکاکی که تا حدودی غیردقیق است، با ترکیب مقاومت مؤثر نوک مخروط تصحیح می‌شود و نیز برخلاف چهار روش دیگر، از میانگین‌گیری هندسی داده‌ها به جای میانگین‌گیری حسابی استفاده شده است. علت استفاده از این روش این است که میانگین هندسی به مقادیر غالب و براساس نسبت مقادیر نزدیک‌تر است و به‌عکس، میانگین حسابی بیان‌گر قدر مطلق مقادیر است. بنابراین با استفاده از میانگین حسابی، مقادیر متوسط q_c در محدوده‌ی حوالی انتهای شمع نمی‌تواند نمایان‌گر مقادیر غالب و بیشینه باشد. در این خصوص استفاده از میانگین هندسی مقادیر متوسط q_c در منطقه‌ی نزدیک انتهای شمع مقدار متوسط دربرگیرنده‌ی همه‌ی تغییرات به دست آمده است، که به قضاوت اپراتور وابسته نیست و قابلیت تکرار خواهد داشت. در این روش مقاومت‌های واحد کف و جداره‌ی شمع تابعی از مقاومت نوک مخروط است و مقاومت واحد انتهای شمع با مقاومت مؤثر مخروط نیز یکسان در نظر گرفته شده و رابطه‌ی یک به

یک بین آن دو برقرار است. مقاومت واحد انتهای شمع با استفاده از میانگین هندسی و با ملاحظه‌ی گسترش منطقه‌ی گسیختگی اطراف پنجه‌ی شمع تعیین می‌شود:

$$r_t = C_t.q_{Eg} \qquad (۹)$$

در این رابطه، C_t ضریب تصحیحی است که در این روش از میانگین هندسی تمامی مقادیر مقاومت مؤثر مخروط در مجاورت انتهای شمع در طول منطقه‌ی تأثیر یا گسیختگی حاصل می‌شود. در خاک‌های همگن ارتفاع دقیق منطقه‌ی تأثیر مهم نیست، ولی می‌توان محدوده‌ی ۴B بالا و ۴B انتهای شمع را مد نظر قرار داد. در خاک غیرهمگن، زمانی که انتهای شمع در خاک متراکم و لایه‌ی ضعیف در بالای آن قرار می‌گیرد، منطقه‌ی تأثیر به‌قرار ۴B در زیر و ۲B در بالای انتهای شمع برای میانگین‌گیری استفاده می‌شود. مقاومت واحد جداره‌ی شمع با استفاده از مقاومت مؤثر نوک مخروط و برحسب درصدی از آن در نظر گرفته می‌شود:

$$r_s = C_s.q_E \qquad (۱۰)$$

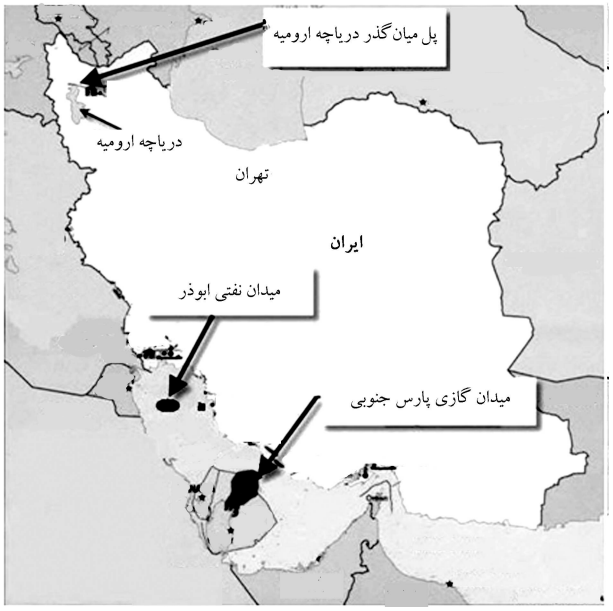
در این رابطه C_s ضریب تصحیح مقاومت جداری است که مقدار آن از ۰٫۴ درصد تا ۸ درصد برای خاک‌های مختلف متغیر است. همچنین q_E مقاومت مؤثر نوک مخروط در اعماق مختلف است.[۱۰و۱۱] خلاصه‌ی روابط فوق در جدول ۱ ارائه شده است.

موارد عملی جمع‌آوری‌شده[۱۷-۲۸]

۱. اطلاعات مربوط به ساخت‌گاه‌ها

الف) پروژه‌ی پل میان‌گذر شهید کلانتری، شمال غرب ایران، دریاچه‌ی اورمیه

کاهش طول مسیر بین دو شهر تبریز و اورمیه در شمال غرب کشور از دیرباز مطرح بوده است. بعد از پیروزی انقلاب، ایده‌ی اتصال دو ساحل شرقی و غربی دریاچه از طریق احداث خاکریز از دو سمت دریاچه، به‌طور جدی در دستور کار وزارت راه‌وترابری قرار گرفت. با اجرای این پروژه مسیر تبریز ـ اورمیه از ۳۰۰ کیلومتر به ۱۲۰ کیلومتر تقلیل می‌یافت. در شکل ۱ موقعیت جغرافیایی ساخت‌گاه دریاچه‌ی اورمیه و پل میان‌گذر نشان داده شده است. برای انجام این پروژه، کم عرض‌ترین بخش دریاچه به‌طول ۱۵ کیلومتر در نظر گرفته شد. خاک‌ریزی از دو سمت ساحل غربی و شرقی آغاز شد و حدود ۱۳٫۵ کیلومتر از هر سمت خاک‌ریزی شد، ولی در بخش میانی به‌علت وجود لایه‌های ضخیم خاک‌های ریزدانه و حساس، و لغزش خاک‌ریزی



شکل ۱. موقعیت جغرافیایی ساخت‌گاه‌های مورد مطالعه.

ادامه‌ی کار میسر نشد و حدود ۱٫۳ کیلومتر حد فاصل دو خاک‌ریز به‌همین صورت باقی ماند. در نهایت در سال ۱۳۸۱ مطالعات ژئوتکنیکی توسط شرکت مهندسین مشاور ماندرو با نظارت مؤسسه‌ی ژئوتکنیک نروژ (NGI)[۱۳] آغاز شد. در این راستا برای اخذ اطلاعات پروفیل خاک و پارامترهای آن از آزمایش CPTu استفاده شد و در طول مسیر ۸ گمانه توسط این دستگاه حفر، و اطلاعات مربوط به آنها ثبت شد. اجرای پروژه به شرکت صنایع دریایی ایران (ایران صدرا) واگذار شد. این پل که در نوع خود کم‌نظیر است در حد فاصل دو خاکریز ـ به‌طول ۱٫۳ کیلومتر ـ و در ۳ باند مجزا برای حمل‌ونقل جاده‌یی و ریلی، با ۱۹ دهانه اجرا شده است. دهانه‌ی وسطی که طول آن ۱۰۰ متر است طویل‌ترین دهانه است و به‌صورت پل قوسی فلزی اجرا می‌شود. در اجرای این پل بیش از ۴۰۰ شمع در مجموع با طولی بالغ بر ۳۰ کیلومتر برای پایه‌های پل اجرا شده است.

ب) حوزه‌ی نفتی ابوذر، جنوب ایران، خلیج فارس

این حوزه‌ی نفتی در ۱۱۰ کیلومتری غرب بوشهر، در حوالی مرز آبی ایران و کویت واقع شده است. در شکل ۱ موقعیت جغرافیایی ساخت‌گاه حوزه‌ی نفتی ابوذر که

جدول ۱. تعیین مقاومت واحد کف و جداره برای شمع‌ها با استفاده از روش‌های مبتنی بر CPT و CPTu.

روش‌های رایج مبتنی بر CPT و CPTu	مقاومت واحد کف r_t	مقاومت واحد جداره r_s	ملاحظات
اشمارتمن و ناتینگهام (۱۹۷۸)	$r_t = C_t.q_{ca}$	$r_s = C_s.q_c$	ماسه و رس $Cs = ۰٫۸ \sim ٪۱٫۸$
		$r_s = K.f_s$	رس $K = ۰٫۲ \sim ۱٫۲۵$، ماسه $K = ۰٫۸ \sim ۲$
برینگن و درویتر (۱۹۷۹)	$r_t = N_c.S_u$	$r_s = C_s.q_c \& r_s = Kf_s$	ماسه $K = ۱, C = ٪۰٫۳$
		$r_s = \alpha.S_u$	رس $\alpha = ۱\ for\ NC,\ \alpha = ۰٫۵\ for\ OC$
بوستامانته و جیانسلی (۱۹۸۱)	$r_t = C_t.q_{ca}$	$r_s = C_s.q_c$	$C_t = ۰٫۴ \sim ۰٫۵۵$
			$C_s = ٪۰٫۳$
توماى و فخرو (۱۹۸۲)	$r_t = C_t.q_{ca}$	$r_s = k.f_s$	ماسه و رس $Cs = ۰٫۸ \sim ٪۱٫۸$
			$K = ۰٫۵ + ۹٫۵e^{(-۰٫۰۰۹f_s)}$
اسلامی و فلنیوس (۱۹۹۷)	$r_t = C_t.q_{Eg}$	$r_s = C_s.q_{Eg}$	$C_t = ۱$
			$C_s = ٪(۰٫۳ \sim ۸)$

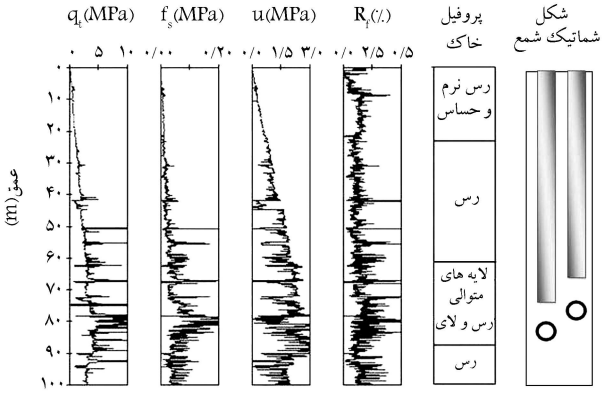
یکی از بزرگ‌ترین حوزه‌های نفتی ایران در خلیج فارس است، نشان داده شده است. به‌منظور مطالعه، سه شمع از سکوهای سرچاهی این منطقه به‌نام‌های AB، A۱۷ و A۱۶ انتخاب شده‌اند، که در این تحقیق با نام‌های ۳، ۲ و AOW۱ نام‌گذاری شده‌اند. به‌لحاظ ژئوتکنیکی، این حوزه از لایه‌های متعدد و متراکم ماسه‌یِ ناشی از نهشته‌های آبرفتی رودخانه‌های منتهی به شمال خلیج فارس تشکیل شده است. این ویژگی‌ها باعث ایجاد خاکی با جنس متنوع و ناهمگون در این حوزه شده است. عمق آب در این حوزه بالغ بر ۴۰ متر است.

ج) حوزه‌ی نفت و گاز پارس جنوبی، فاز ۱ و ۷، جنوب ایران، خلیج فارس

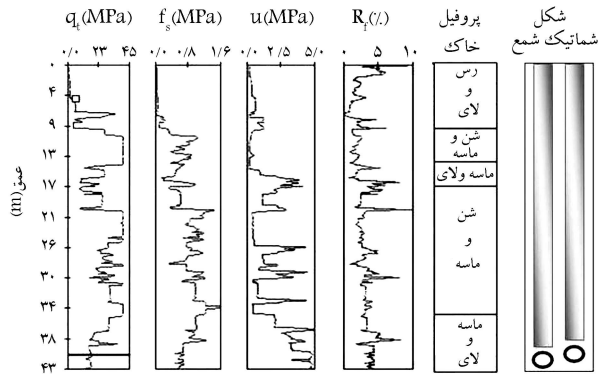
این حوزه‌ی عظیم نفت و گاز در منطقه‌ی مرز آبی ایران و قطر در خلیج فارس واقع شده و از عمیق‌ترین مناطق خلیج فارس است. در شکل ۱ موقعیت جغرافیاییِ ساخت‌گاه این حوزه نشان داده شده است. عمق آب در این منطقه بالغ بر ۷۰ متر است و جنس خاک غالباً رسی و شامل درصدی مواد کربناتی با خمیرسانی کم است. از این حوزه‌ی نفتی دو سکوی سرچاهی SPD۱ و SPD۷ از فازهای I و VII برای مطالعه انتخاب شده است.

۲. اطلاعات مربوط به شمع‌ها

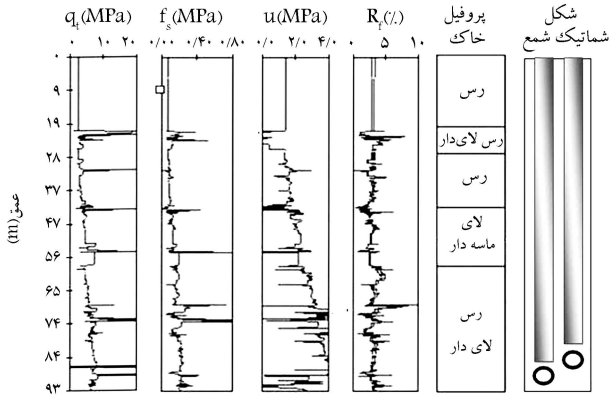
در این نوشتار ظرفیت باربری ۱۳ شمع کوبشی فولادی ته‌باز با مقطع دایره‌یی از سازه‌های فراساحلی اجراشده در محیط‌های دریایی ایران، از ۴ ساخت‌گاه و ۳ منبع مورد بحث و بررسی قرارگرفتند. کلیه‌ی شمع‌های موجود به‌صورت دایره‌یی بوده و سطح مقطع در طول شمع ثابت است. جنس همگی آنها فولادی، و نحوه‌ی نصب و اجرای آن کوبشی است. قطر شمع‌ها بین ۶۸۵ تا ۹۱۳ میلی‌متر و عمق مدفون آنها بین ۴۱ تا ۸۵ متر در تغییر است. در این نوشتار مجموعاً ۱٫۲ کیلومتر شمع مورد بررسی قرارگرفته است. تمامی آزمایش‌ها توسط دستگاه پیزوپنترومتر الکتریکی (CPTu) انجام شده و فشار آب حفره‌یی در تمامی موارد ثبت شده است. برای نمونه از هر ساخت‌گاه مورد مطالعه یک نمودارگمانه‌ی آزمایش (CPTu) به‌همراه پروفیل خاک گمانه‌ی مربوطه به روش اسلامی ـ فلنیوس که توسط برنامه‌ی UniCone تحلیل شده و شکل شماتیک شمع‌های اجراشده در طول‌های متفاوت، و نیز مقطع عرضی آنها به‌ترتیب در شکل‌های ۲ (مربوط به شمع شماره‌ی ۵ از پروژه‌ی پل میان‌گذر دریاچه اورمیه)، ۳ (مربوط به شمع شماره‌ی ۱۰ از پروژه‌ی چاه‌های نفتی ابوذر)، و ۴ (مربوط به شمع شماره‌ی ۱۳ از پروژه‌ی پارس جنوبی) نشان داده شده‌اند. در تمامی موارد، در نزدیکی محل اجرای شمع‌ها آزمایش پیزوپنترومتر (CPTu)



شکل ۲. مشخصات CPTu درباره‌ی شمع شماره‌ی ۵ مربوط به پل میان‌گذر دریاچه اورمیه و لوگ خاک و عمق استقرار شمع‌ها.[۳۳]



شکل ۳. مشخصات CPTu درباره‌ی شمع شماره‌ی ۱۰ مربوط به چاه‌های نفتی ابوذر و لوگ خاک و عمق استقرار شمع‌ها.[۳۳]



شکل ۴. مشخصات CPTu درباره‌ی شمع شماره‌ی ۱۳ مربوط به پارس جنوبی و لوگ خاک و عمق استقرار شمع‌ها.[۳۳]

انجام شده است؛ همچنین در حین شمع‌کوبی‌ها آزمایش تحلیل شمع‌کوبی (PDA) بر روی هر ۱۳ شمع انجام گرفته و نتایج ظرفیت باربری نهایی شمع‌ها اخذ شدند. ظرفیت باربری کل شمع‌ها حاصل از آزمایش دینامیکی بین ۴۷۰۰ تا ۱۶۵۰۰ کیلونیوتن است. خلاصه‌ی اطلاعات جمع‌آوری شده در جدول ۲ ارائه شده است.

۳. اطلاعات مربوط به پروفیل خاک

در طی سه دهه‌ی اخیر، محققین روش‌های متعددی برای طبقه‌بندی لایه‌های مختلف خاک با استفاده از نتایج آزمایش CPTu ارائه کرده‌اند. رابرتسون و کامپانلا (۱۹۸۸) اولین کسانی بودند که براساس نتایج مقاومت نوک تصحیح‌شده برای فشار آب حفره‌یی، نموداری برای طبقه‌بندی خاک ارائه کردند.[۲۹] اخیراً (در سال ۲۰۰۴) نیز روش جدیدی برای طبقه‌بندی خاک‌ها براساس نتایج آزمایش CPTu ارائه شده است.[۳۰] طبق این روش خاک‌ها به پنج گروه: رس‌های حساس یا سیلت؛ رس یا سیلت؛ سیلت رس‌دار یا رس سیلت‌دار؛ ماسه‌ی سیلت‌دار یا سیلت ماسه‌دار؛ ماسه یا ماسه‌ی شن‌دار طبقه‌بندی می‌شوند. نمودار طبقه‌بندی خاک‌ها به‌روش‌های کامپانلا ـ رابرتسون (۱۹۸۸) و اسلامی ـ فلنیوس (۲۰۰۴) در شکل ۵ نشان داده شده است. در این نوشتار برای طبقه‌بندی خاک براساس نتایج آزمایش CPTu از این دو روش و نیز از برنامه‌ی رایانه‌یی UniCone استفاده شده است. براساس این روش قریب به ۹۰٪ خاک‌های مورد مطالعه از خاک‌های رسی نرم و حساس، رس و رس سفت، و بقیه از سیلت و سیلت ماسه دار و شن ـ ماسه تشکیل شده

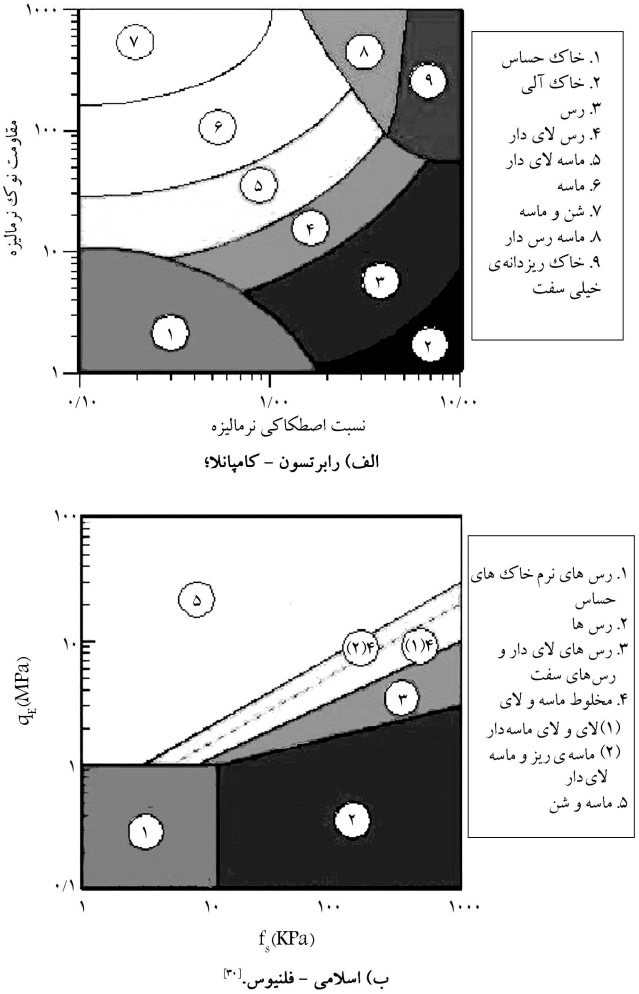
جدول ۲. خلاصه اطلاعات گردآوری شده مربوط به شمع‌های مورد استفاده در ۴ ساخت‌گاه.[۳۳]

شماره شمع	نام پروژه	موقعیت جغرافیایی	نام شمع	شکل مقطع عرضی شمع	ابعاد شمع			نتایج آزمایش تحلیل شمع‌کوبی (KN)
					طول (m)	قطر (mm)	ضخامت (mm)	
۱	پل میان‌گذر دریاچه‌ی اورمیه (شهید کلانتری)	دریاچه‌ی اورمیه در شمال غرب ایران	UCA۴	دایروی	۶۶	۸۱۳	۳۸٫۱	۵۴۰۰
۲			UCA۵	دایروی	۶۶	۸۱۳	۳۸٫۱	۴۷۰۰
۳			UCA۷	دایروی	۶۶	۸۱۳	۳۸٫۱	۵۵۰۰
۴			UCB۳	دایروی	۷۵	۸۱۳	۳۸٫۱	۷۳۰۰
۵			UCB۴	دایروی	۷۵	۸۱۳	۳۸٫۱	۵۵۰۰
۶			UCB۵	دایروی	۷۵	۸۱۳	۳۸٫۱	۷۰۰۰
۷			UCB۷	دایروی	۷۵	۸۱۳	۳۸٫۱	۶۳۰۰
۸			UCB۸	دایروی	۷۵	۸۱۳	۳۸٫۱	۸۰۰۰
۹	حوزه‌ی نفتی ابوذر	خلیج فارس جنوب ایران	AOW۱	دایروی	۴۱٫۳	۹۱۴	۳۲	۹۴۰۰
۱۰			AOW۲	دایروی	۴۱٫۳	۷۶۲	۳۸	۱۲۴۰۰
۱۱			AOW۳	دایروی	۴۰٫۲	۷۶۲	۳۸	۱۶۵۰۰
۱۲	حوزه‌ی گاز پارس جنوبی - فاز ۱		SPD۱	دایروی	۸۳٫۱	۶۸۵	۱۷٫۵	۱۲۷۰۰
۱۳	حوزه‌ی گاز پارس جنوبی- فاز ۷		SPD۷	دایروی	۸۵	۶۸۵	۱۷٫۵	۹۸۰۰

است. در شکل‌های ۲ الی ۴ پروفیل خاک حاصل از نتایج آزمایش CPTu در سه ساخت‌گاه مورد مطالعه ارائه شده است.

۴. اطلاعات آزمایش دینامیکی شمع‌کوبی

هنگامی که ضربه‌ی چکش در حین عملیات شمع‌کوبی بر سر شمع نواخته می‌شود، شمع قدری در زمین فرو می‌رود. از جمله عوامل مؤثر بر میزان فرورفت شمع به‌ازای هر ضربه، سختی شمع و مقاومت و سختی خاک در اطراف جداره‌ی شمع در اعماق مختلف، و همچنین در نوک شمع و پایین‌تر از آن است. لذا میزان فرورفت شمع در خاک، به‌ازای هر ضربه‌ی چکش با انرژی وارده‌ی مشخص، می‌تواند شاخصی از مقاومت خاک باشد. در این حالت می‌توان با حل معادله‌ی حرکت برای سیستم، برحسب میزان فرورفت شمع در خاک، ظرفیت باربری استاتیکی معادل شمع را محاسبه کرد.[۱] از این ایده در طی چند دهه‌ی گذشته برای محاسبه‌ی ظرفیت باربری شمع‌ها استفاده شده است، که امروزه از آن به‌عنوان آزمایش‌های دینامیکی یاد می‌شود. یکی از متداول‌ترین این آزمایش‌ها، آزمایش دینامیکی تحلیل شمع‌کوبی (PDA) است. در این روش از سیگنال‌های مربوط به کرنش‌سنج و شتاب‌سنج‌هایی که در نزدیکی سرشمع‌های بتونی یا فولادی نصب می‌شوند، استفاده می‌شود. ابزار اندازه‌گیری شامل یک دستگاه مرکزی PAK همراه با نمایش‌گر، ۲ عدد شتاب‌سنج و ۲ عدد کرنش‌سنج همراه با کابل‌های مربوطه است. حساسه‌های اندازه‌گیری کرنش و شتاب به فاصله‌ی ۲ برابر قطر شمع پایین‌تر از رأس شمع، روی بدنه‌ی خارجی با پیچ و مهره چنان متصل می‌شوند که یک کرنش‌سنج و شتاب‌سنج یک طرف و یک کرنش‌سنج و شتاب‌سنج در جهت مخالف (۱۸۰°) روی بدنه‌ی شمع نصب شود. نحوه‌ی ثبت و پردازش اطلاعات حاصله چنین است که هنگام هر ضربه به دستگاه، کرنش و شتابِ ایجادشده در شمع توسط دستگاه و به‌صورت تابعی از زمان نشان داده‌می‌شود و میانگین شتاب اندازه‌گیری‌شده و نیز کرنش اندازه‌گیری‌شده توسط حساسه‌های طرفین ثبت می‌شود. در پایان عملیات، کلیه‌ی اطلاعات به‌صورت



الف) رابرتسون - کامپانلا؛

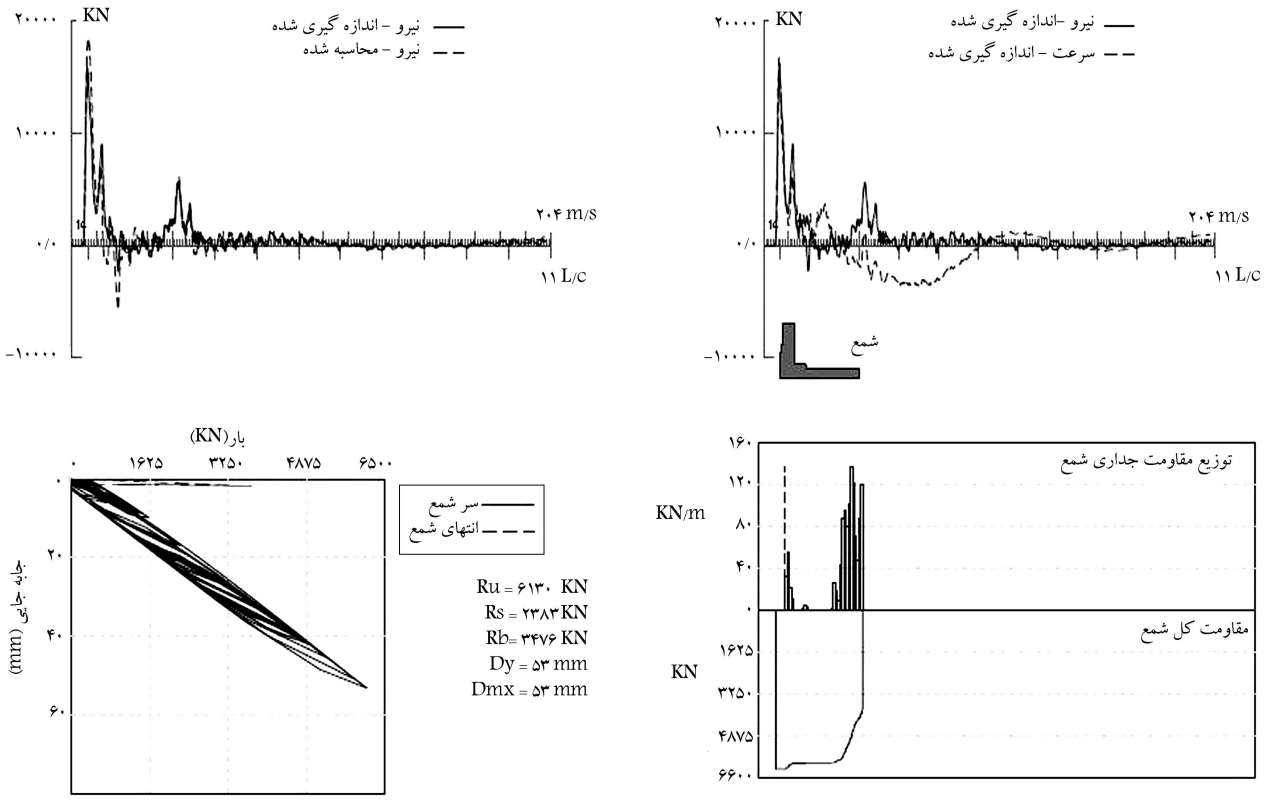
ب) اسلامی - فلنیوس.[۳۰]

شکل ۵. نمودار طبقه‌بندی خاک به دو روش.

امواج شتاب (و انتگرال زمانی آن سرعت) و امواج کرنش (با حاصل‌ضرب در مدول کشسانی به‌صورت تنش) و پردازش اولیه‌ی اطلاعات ذخیره می‌شود. تغییرات امواج ثبت‌شده نسبت به زمان را می‌توان به‌صورت «مسیر موج[14]» (شکل ۶) نشان داد. در مرحله‌ی پردازش اولیه‌ی داده‌ها، فارغ از اطلاعات پروفیل خاک منطقه و بدون در نظر داشتن توزیع ظرفیت باربری شمع در لایه‌های مختلف خاک بر اساس نتایج حاصله در اعماق مختلف، می‌توان ظرفیت باربری برحسب عمق، میزان انرژی وارده به سیستم شمع و خاک برحسب عمق، میزان تنش وارده به شمع (مقدار میانگین و بیشینه)، تعداد ضربات برحسب عمق نفوذ، تعداد ضربات در دقیقه و نسبت $\frac{F}{V}$ یا همان Z (امپدانس سیستم) را به دست آورد (F نیرو و V سرعت متناسب با آن است). نتایج این بخش از پردازش، که تحلیل شمع‌کوبی (PDA) نام دارد، براساس روش مشهور به کِپس[15] حاصل می‌شود. انتگرال‌گیری زمانی از منحنی شتاب برای دست‌یابی به منحنی سرعت و همچنین به دست آوردن تنش وارده (با نیرو با توجه به سطح مقطع معلوم شمع) با حاصل‌ضرب مدول کشسانی در کرنش اندازه‌گیری شده توسط سیستم انجام می‌پذیرد. درنتیجه می‌توان برآورد بسیار دقیق‌تری از انرژی وارده به سرشمع به‌ازای هر ضربه داشت. با استفاده از نتایج آزمایش PDA از نوع کرنش بزرگ می‌توان ظرفیت باربری ایستای کل شمع را در حین شمع‌کوبی تعیین کرد.[۳۱]

در مرحله‌ی بعد برای دست‌یابی به نتایج دقیق‌تر، به‌گونه‌یی که لایه‌های خاک را در تعیین میرایی اعمال‌شده در روابط مؤثر سازد و مقاومت اعمال‌شده بر بدنه‌ی شمع را بهتر توزیع کند، پردازش با نرم‌افزار CapWap انجام می‌پذیرد. ذکر این نکته ضروری است که در PDA پردازش با فرض میرایی ثابت برای کل خاک و در CapWap برای هر لایه میرایی خاص خود خاک اثر داده می‌شود. در این روش برای محاسبه‌ی نیروی‌های مقاومت خاک مؤثر بر شمع، اطلاعات مربوط به مقادیر نیرو و سرعت اندازه‌گیری‌شده از روش PDA با روش تحلیل معادله‌ی موج ترکیب می‌شود. با توجه به این که اندازه‌گیری مقادیر نیرو و سرعت در سرشمع انجام شده است، نیازی به مدل‌سازی چکش و ابزارکوبش نیست. در روش CapWap شمع توسط المان‌های یکسان و پیوسته مدل می‌شود.

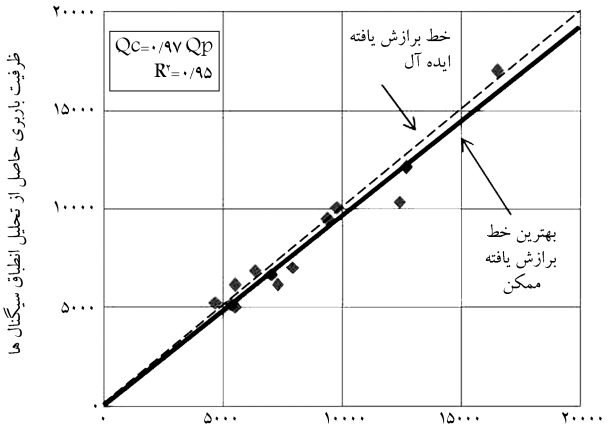
به‌طور خلاصه نتایج روش CapWap مبتنی است بر بهترین انطباق ممکن بین متغیر محاسبه‌شده در سرشمع (نیرو) و مقدار متناظر اندازه‌گیری شده‌ی آن. چنانچه انطباق خوبی برقرار نباشد، با تغییر پارامترهای مقاومت خاک نیروی سرشمع دوباره محاسبه می‌شود. به‌همین دلیل این روش را «روش انطباق سیگنال‌ها» می‌نامند. در حین نصب شمع‌های مورد مطالعه، آزمایش PDA بر روی آنها انجام شده و از نتایج آنها در ارزیابی‌های مختلف صورت‌گرفته به‌عنوان آزمایش مبنا استفاده شده است. در شکل ۶ نتایج تحلیل انطباق سیگنال توسط نرم‌افزار CapWap برای تعیین ظرفیت باربری شمع‌ها، که داده‌های اولیه و خام آن نتایج آزمایش دینامیکی PDA در حین کوبش است، برای شمع شماره ۵ از ساختگاه دریاچه اورمیه نشان داده شده است. از آنجا که در این نوشتار بر انجام آزمایش‌های درجا برای محاسبه و ارزیابی ظرفیت باربری شمع‌ها تکیه شده است و نیز با اتکاء بر این امر که درمورد شمع‌های مورد مطالعه میزان انطباق قابل قبول است، و اختلاف بین ظرفیت باربری حاصل از آزمایش تحلیل شمع‌کوبی (PDA) و تحلیل انطباق سیگنال‌ها به‌کمک نرم‌افزار (CapWap) درحدود۴ درصد است، نتایج آزمایش تحلیل شمع‌کوبی (PDA) به‌عنوان آزمایش مبنا در ارزیابی‌ها انتخاب شده است. میزان انطباق ظرفیت باربری‌های حاصل از آزمایش تحلیل شمع‌کوبی و تحلیل انطباق سیگنال‌ها در شکل ۷ نشان داده شده است.



شکل ۶. تحلیل انطباق سیگنال براساس نتایج آزمایش PDA توسط نرم‌افزار CapWap برای شمع شماره‌ی ۵.[۲۶]

برنامه‌ی رایانه‌یی UniCone

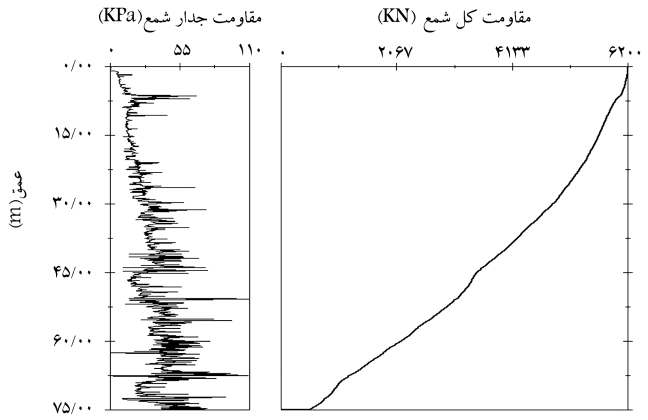
UniCone یک برنامه‌ی رایانه‌یی تخصصی در زمینه‌ی محاسبه‌ی ظرفیت باربری قائم شمع‌ها با استفاده از نتایج آزمایش CPTu است، که در سال ۲۰۰۲ میلادی توسط محققین در کانادا بسط و توسعه یافته است. این برنامه قادر است ظرفیت باربری شمع را به شش روش اروپایی، فرانسوی، اشمارتمن، مایرهوف، تومای ـ فخرو و اسلامی ـ فلنیوس به‌تفکیک مقاومت جداره و نوک به‌صورت گرافیکی و جدول نشان دهد. همچنین برخورداری از قابلیت نمایش گرافیکی نتایج آزمایش CPTu ـ شامل مقاومت نوک، مقاومت جداره، فشار آب حفره‌یی و فشار آب حفره‌یی هیدرواستاتیک و نسبت اصطکاکی ـ از ویژگی‌های این برنامه است. این برنامه همچنین قادر است، لایه‌های مختلف خاک را براساس نتایج آزمایش CPT و CPTu مطابق دو روش رابرتسون ـ کامپونلا (۱۹۸۳) و اسلامی ـ فلنیوس (۱۹۹۷)، به‌صورت جدول و نمودار، درکنار نمودار نتایج آزمایش CPTu نمایش دهد.[۳۲] در این نوشتار برای محاسبه‌ی‌ظرفیت باربری نهایی شمع‌های موجود و نیز طبقه‌بندی خاک‌ها از این برنامه‌ی رایانه‌یی استفاده شده است. برای مثال، در شکل‌های ۸ و ۹ نمونه‌ی خروجی این برنامه برای ظرفیت باربریِ شمع شماره‌ی ۵ از پل میان‌گذر دریاچه‌ی اورمیه به‌صورت جدول و گراف ارائه شده است.



شکل ۷. میزان تطابق نتایج ظرفیت باربری حاصل از تحلیل شمع‌کوبی با تحلیل انطباق سیگنال‌ها.

روش	R_t	R_s	R_u
اسلامی-فلنیوس	۵۰۴ KN	۵۷۱۱ KN	۶۲۱۴/۵ KN
اروپایی	۷۳۸ KN	۱۳۶۷۰ KN	۱۴۴۰۷/۶ KN
فرانسوی	۷۴۹ KN	۳۹۵۰ KN	۴۶۹۸/۷ KN
مایرهوف			
اشمارتمن	۸۰۹ KN	۳۵۴۳ KN	۴۳۵۱/۸ KN
تومای-فخرو	۸۰۹ KN	۷۰۵۶ KN	۷۸۶۴/۸ KN

شکل ۸. نمونه‌ی خروجی برنامه‌ی UniCone، خلاصه‌ی نتایج ظرفیت باربری شمع‌ها به‌صورت تفکیک‌شده برای شمع شماره‌ی ۵.[۳۲و۳۳]



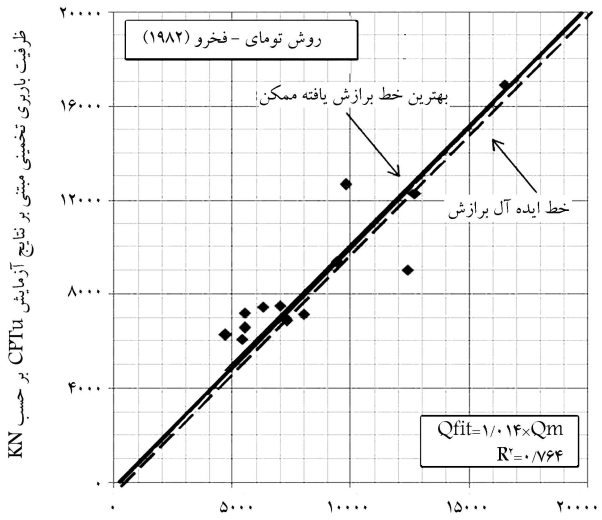
شکل ۹. نمونه خروجی برنامه‌ی UniCone، نمودار ظرفیت باربری شمع برای مقاومت کل و جداره برای شمع شماره ۵ به روش اسلامی- فلنیوس.[۳۲و۳۳]

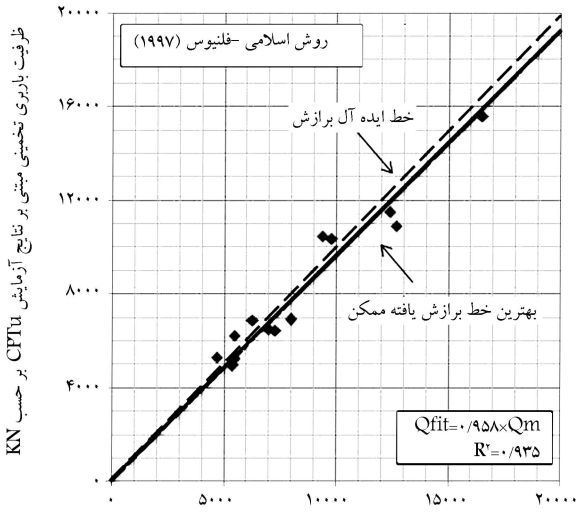
ارزیابی نتایج مبتنی بر آزمایش CPTu [۳۳]

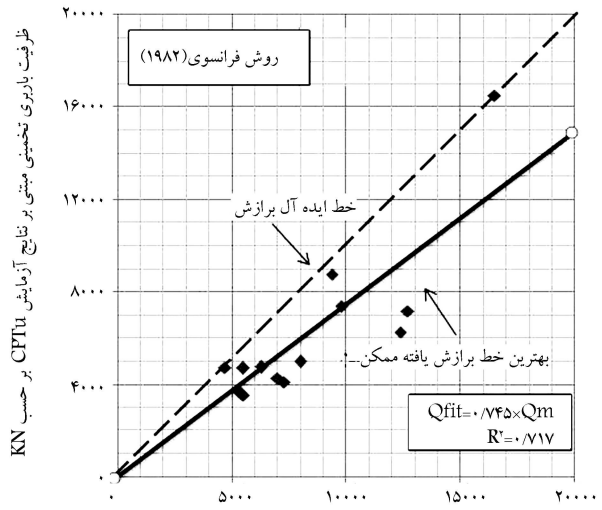
داده‌های آزمایش CPTu اعم از مقاومت نوک (q_c)، مقاومت جداری (f_s) و فشار آب منفذی(U_2)، بعد از دسته‌بندی و بازبینی به‌صورت فایل ورودی تبدیل شد و ظرفیت باربری نهایی شمع‌ها به پنج روش اسلامی ـ فلنیوس (۱۹۹۷)، اشمارتمن (۱۹۷۸)، اروپایی (۱۹۷۹)، فرانسوی (۱۹۸۲) و تومای ـ فخرو (۱۹۸۲) به‌کمک برنامه‌ی UniCone محاسبه شد. برای ارزیابی ظرفیت باربری شمع‌ها با استفاده از نتایج حاصل از آزمایش CPT و CPTu از چهار روش آماری استفاده شد. برای این منظور نتایج ظرفیت باربری حاصل از روش‌های مبتنی بر آزمایش CPT و CPTu، ظرفیت پیش‌بینی شده[۱۶] (Q_p) با نتایج حاصل از آزمایش تحلیل شمع‌کوبی (PDA)، ظرفیت‌اندازه‌گیری شده[۱۷] (Q_m) مورد بررسی و ارزیابی قرارگرفتند: بهترین خط برازش‌یافته‌ی گذرا از مبدأ برای Q_p در مقابل Q_m، میانگین هندسی و انحراف معیار برای نسبت Qp/Qm، میزان احتمال تجمعی در $P_{۵۰}$ و $P_{۹۰}$ برای نسبت Q_P/Q_m، میزان دقت ۲۰٪ اخذ شده از هیستوگرام و نمودار توزیع نرمال برای نسبت Q_p/Q_m. در این راستا در هر مقایسه، روش‌های محاسبه‌ی ظرفیت باربری محاسبه‌شده مطابق روش استفاده‌ی مستقیم از نتایج داده‌های آزمایش پیزوپنترومتر اولویت‌بندی شدند. برای این منظور، در هر مقایسه کم‌ترین تراز ($R۱ = ۱$) به منطبق‌ترین روش در آن مقایسه اختصاص داده شد و سپس به روش‌های باقی‌مانده براساس میزان انطباق‌شان تا تراز $R۱ = ۵$ اختصاص یافت. اندیس ۱ تا ۴ نشان‌گر روش‌های آماری به‌ترتیب ذکر شده است. در نهایت یک اولویت‌بندی نهایی براساس مجموع اولویت‌ها با شاخص رنکینگ[۱۸] $RI = R۱+R۲+R۳+R۴$ برای هر روش محاسبه‌شده که بهترین روش براساس مجموع کم‌ترین اولویت نهایی انتخاب شد.

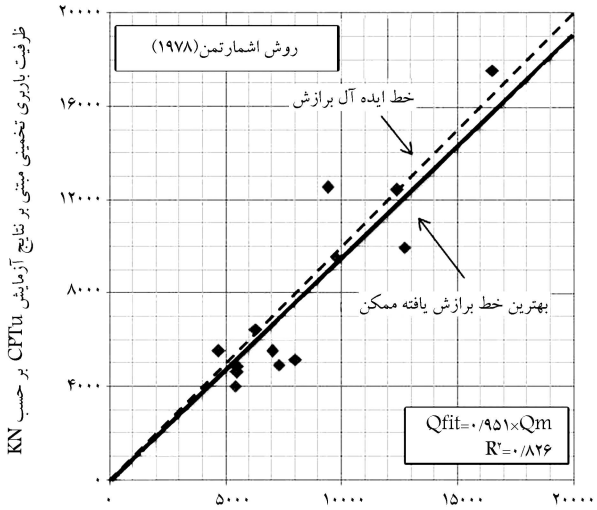
۱. معادله‌ی بهترین خط برازش شده

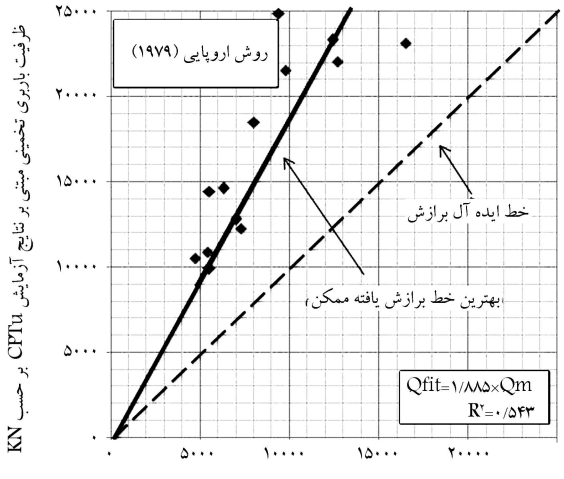
در این روش نتایج ظرفیت باربری محاسبه‌شده، (Q_p)، در مقابل ظرفیت باربری اندازه‌گیری شده از آزمایش دینامیکی، (Q_m)، رسم شده و بهترین خط برازش‌یافته‌ی گذرا از مبدأ، برای داده‌های فوق رسم و خط ایده‌آل برازش‌شده ـ خط گذرا از مبدأ با شیب مساوی ۱ ($Q_{fit} = Q_m$)ـ نیز رسم شده است (شکل ۱۰). سپس نسبت Q_{fit}/Q_m و مقدار ضریب تعیین (R^2) برای هر روش محاسبه شد. با توجه به شکل ۱۰، روش تومای ـ فخرو با نسبت $Q_{fit} = ۱/۰۱۴Q_m$ و نسبت ضریب تعیین $R^2 = ۰/۷۶۴$ بیشترین تطبیق را از خود نشان می‌دهد ($R۱ = ۱$). پس از











شکل ۱۰. نمودارهای برازش شده، مقایسه‌ی مقادیر پیش‌بینی شده و اندازه‌گیری‌شده برای روش‌های مختلف.[۳۳]

جدول ۳. خلاصه نتایج ارزیابی‌های ظرفیت باربری شمع‌ها به روش‌های متداول.[۳۳]

اولویت بندی نهائی		میزان دقت ۲۰٪ در هیستگرام و نمودار توزیع نرمال برای نسبت Qp/Qm			میزان احتمال تجمعی برای نسبت Qp/Qm			انحراف معیار ومیانگین هندسی برای نسبت Qp/Qm			بهترین خط برازش شده برای Qp در مقابل Qm			
رتبه نهائی	RI	R۴	هیستوگرام	لوگ نرمال	R۳	$P_{۹۰}$	$P_{۵۰}$	R۲	σ	μ'	R۱	R۲	$\frac{Q_p}{Q_m}$	روش محاسبه ظرفیت باربری شمع‌ها
۱	۵	۱	۱	۰/۹۴	۱	۱/۱۳	۰/۹۴	۱	۰/۱	۰/۹۸	۲	۰/۹۴	۰/۹۶	اسلامی- فلنیوس (۱۹۹۷)
۲	۷	۲	۰/۶۴	۰/۶۷	۲	۱/۳۱	۱/۰۷	۲	۰/۱۸	۱/۰۶	۱	۰/۷۶	۱/۰۱	تومای- فخرو (۱۹۸۲)
۳	۱۲	۳	۰/۶۲	۰/۶۴	۳	۱/۱۷	۰/۸۸	۳	۰/۲۰	۰/۹۰	۳	۰/۸۳	۰/۹۵	اشمارتمن (۱۹۷۸)
۴	۱۶	۴	۰/۳۱	۰/۳۴	۴	۰/۹۹	۰/۶۷	۴	۰/۱۷	۰/۷۱	۴	۰/۷۲	۰/۷۵	فرانسوی (۱۹۸۲)
۵	۲۰	۵	۰	۰/۰۱	۵	۲/۶۲	۲/۰۰	۵	۰/۳۷	۲/۰۱	۵	۰/۵۳	۱/۸۸	برینگن- درویتر (۱۹۷۹)

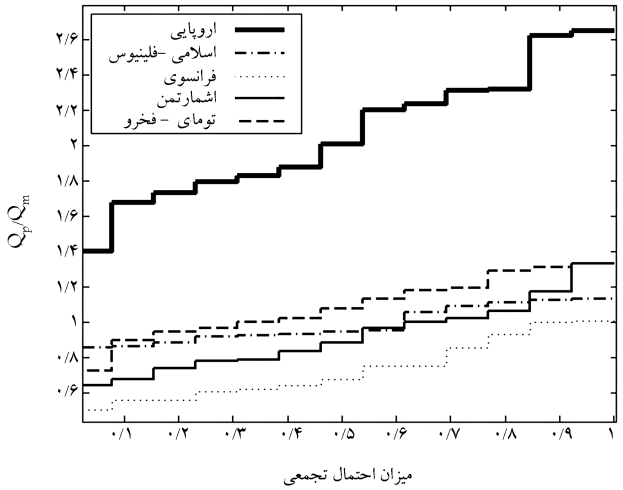
این روش، روش اسلامی ـ فلنیوس ($R۱ = ۲$) و در نهایت روش برینگن ـدرویتر در اولویت آخر قرار دارد ($R۱ = ۵$). روش تومای ـ فخرو به همراه روش برینگن ـ درویتر نتایجی با برآورد دست بالا و روش‌های اسلامی ـ فلنیوس، اشمارتمن و فرانسوی نتایجی با برآورد دست پایین از خود نشان می‌دهند. نتایج و اولویت‌بندی در جدول ۳ در ستون‌های دوم تا چهارم نشان داده شده‌اند.

۲. میانگین هندسی (μ') و انحراف معیار (σ) برای نسبت Q_p/Q_m

در این روش میانگین هندسی نسبت ظرفیت باربری‌های محاسبه‌شده به ظرفیت باربری‌های اندازه‌گیری شده از آزمایش دینامیکی (Q_p/Q_m)، و نیز میزان انحراف معیار این نسبت برای هر روش محاسبه شد. نتایج در جدول ۳ در ستون‌های پنجم تا هفتم ارائه شده است. هرچه مقدار میانگین هندسی به عدد ۱ نزیک‌تر باشد، به این معنی است که نسبت محاسبه‌شده از هم فاصله‌ی کم‌تری دارد و ایده‌آل است. همچنین هرچه مقدار انحراف معیار به سمت صفر میل کند ایده‌آل‌تر خواهد بود؛ یعنی پراکندگی داده‌ها کم‌تر است. بر این اساس روش اسلامی ـ فلنیوس با $\mu' = ۰/۹۷۸$ و $\sigma = ۰/۱۰۳$ کم‌ترین خطا و بیشترین تطبیق را دارد و در اولویت اول قرار می‌گیرد ($R۲ = ۱$). به دنبال آن روش تومای ـ فخرو در اولویت بعدی قرار می‌گیرد ($R۲ = ۲$). روش‌های اشمارتمن، فرانسوی و برینگن ـدرویتر به‌ترتیب در اولویت‌های بعدی جای می‌گیرند. با توجه به ستون پنجم جدول ۳ روش‌های تومای ـ فخرو و برینگن ـ درویتر با ($\mu' > ۱$) نتایجی با پیش‌بینی دست بالا، و روش‌های اسلامی ـ فلنیوس، اشمارتمن و فرانسوی با ($\mu' < ۱$) نتایجی با پیش‌بینی دست‌پایین دارند.

۳. میزان احتمالات تجمعی برای نسبت Q_p/Q_m

در این روش نمودار میزان احتمال تجمعی نسبت ظرفیت باربری‌های محاسبه‌شده به ظرفیت باربری‌های اندازه‌گیری شده از آزمایش دینامیکی (Q_p/Q_m) رسم شده و میزان احتمال وقوع ۵۰ و ۹۰ درصد اخذ شده است. در هر روشی که میزان احتمال تجمعی ۵۰٪ به عدد ۱ نزدیک‌تر بوده و میزان تفاضل $P_{۹۰} - P_{۵۰}$ کم‌تر باشد، آن روش ایده‌آل‌تر خواهد بود. نمودارهای توزیع احتمال تجمعی برای تمامی روش‌ها به‌طور یک‌جا در شکل ۱۱ نشان داده شده است. خلاصه‌ی نتایج و ترتیب اولویت‌بندی در جدول ۳ در ستون‌های هشتم تا دهم نشان داده شده‌اند. بر این اساس و با توجه به نتایج روش اسلامی ـ فلنیوس با $P_{۵۰} = ۰/۹۴۳$ و $P_{۹۰} = ۱/۱۲۵$ در اولویت اول ($R۳ = ۱$) و به دنبال آن روش‌های تومای ـ فخرو، اشمارتمن، فرانسوی و برینگن ـ درویتر در اولویت‌های بعدی قرار دارند.

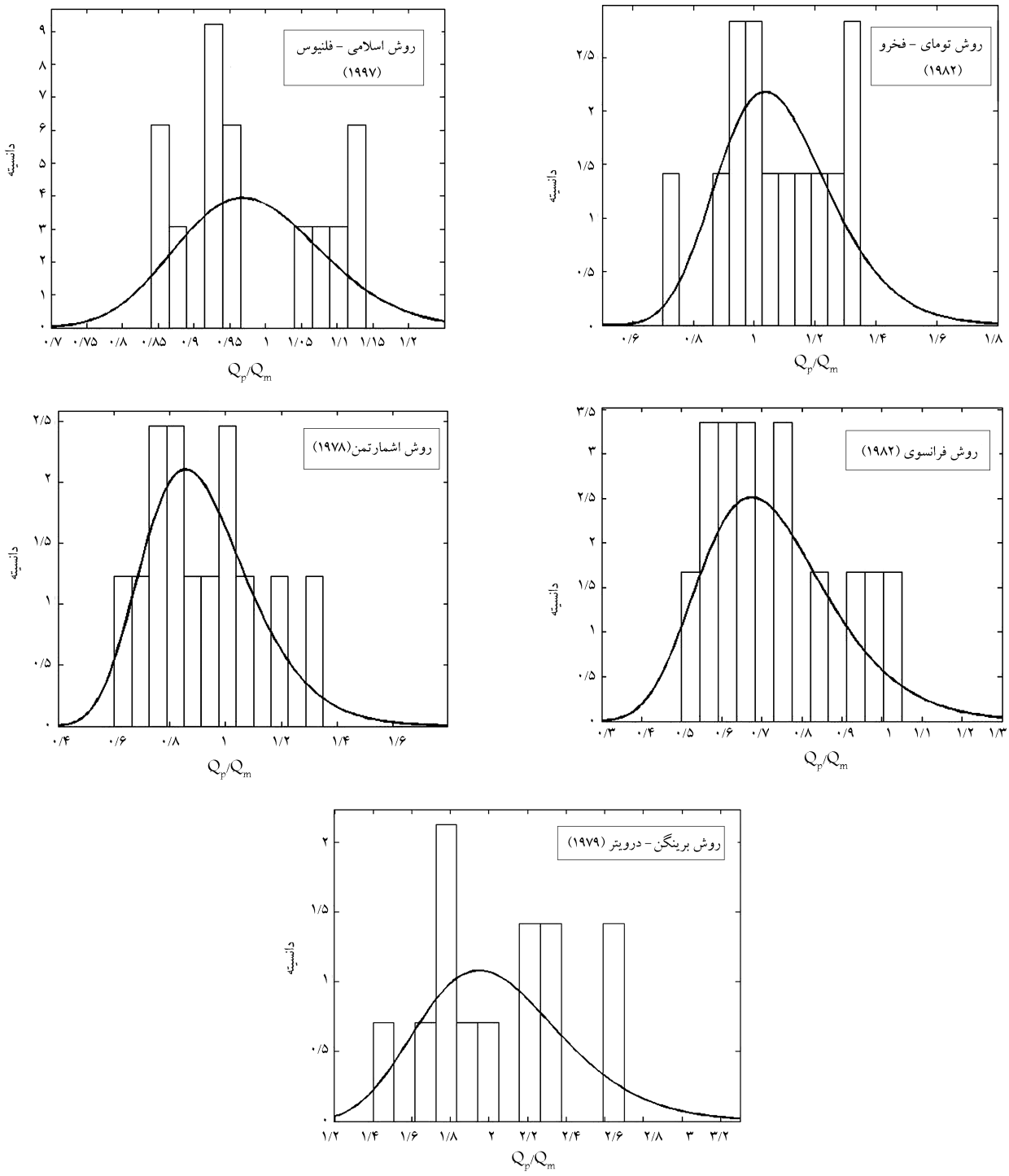


شکل ۱۱. نمودار توزیع احتمال تجمعی برای روش‌های CPT و CPTu در تخمین ظرفیت باربری شمع‌ها.[۳۳]

۴. مبنای دقت ۲۰٪ اخذ شده از هیستوگرام و نمودار توزیع نرمال برای نسبت Q_p/Q_m

حالت ایده‌آل این است که نسبت ظرفیت باربری محاسبه‌شده به ظرفیت باربری اندازه‌گیری‌شده از آزمایش دینامیکی (Q_p/Q_m) برابر ۱ باشد، یعنی هر دو روش پاسخ یکسانی بدهند. ولی عملاً، به‌ویژه در کارهای ژئوتکنیکی که اطلاعات چندان

دقیق نیست، این امر ممکن و میسر نیست. درنتیجه با توجه به میزان دقت آزمایش‌ها و نقصان اطلاعات یک حد بالا و پایین برای نسبت فوق در نظر می‌گیریم، به این صورت که هر قدر میزان تجمع داده‌ها در این محدوده بیشتر باشد، آن روش دارای پراکندگی کم‌تری بوده و روش ایده‌آل‌تری است. برای این منظور، در این تحقیق مبنای میزان دقت ۲۰٪ قرار داده شد، یعنی برای این منظور نمودار هیستوگرام و نمودار احتمال توزیع نرمال برای نسبت Q_p/Q_m برای روش‌های مختلف رسم شده و مساحت دو نمودار در محدوده‌ی نسبت $0/8 < Q_p/Q_m < 1/2$ محاسبه شد. هرقدر مساحت نمودارهای یادشده در محدوده‌ی فوق به عدد ۱ نزدیک‌تر باشد، روش انتخابی دارای دقت بیشتری است و احتمال تطابق دو روش نیز بیشتر خواهد بود. نمودار توزیع نرمال و هیستوگرام برای روش‌های مختلف در شکل ۱۲ ارائه شده است. خلاصه‌ی نتایج نیز در جدول ۳ در ستون‌های دهم تا دوازدهم نشان داده شده است. با توجه به نتایج مبنای دقت ۲۰٪ روش اسلامی ـ فلنیوس با بیشترین

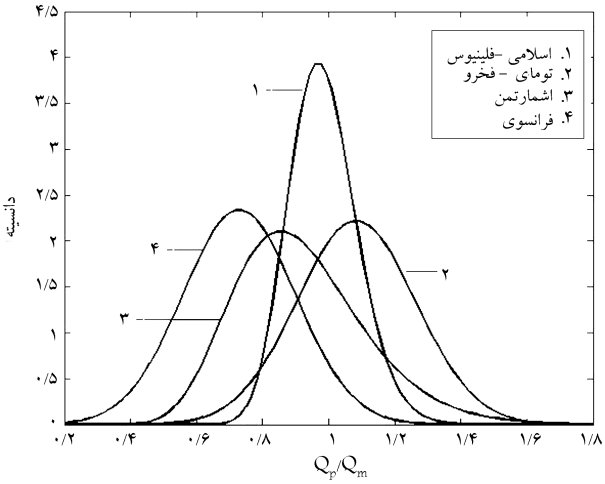


شکل ۱۲. نمودار توزیع نرمال و هیستوگرام برای روش‌های مختلف CPT و CPTu در پیش‌بینی ظرفیت باربری شمع.[۳۳]

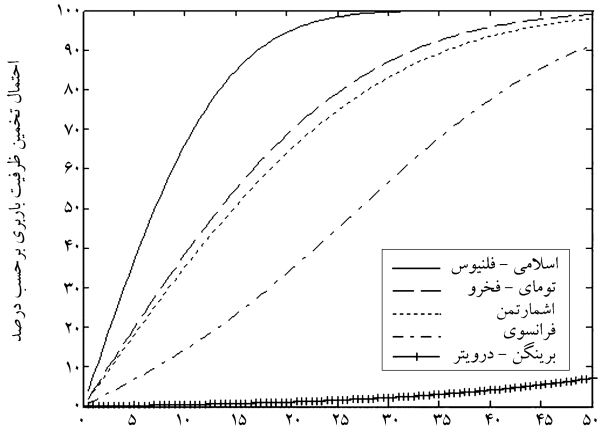
میزان احتمال (۱۰۰٪ از هیستوگرام و ۹۴٫۳۷٪ از نمودار توزیع نرمال) در اولویت اول ($R۴ = ۱$) و روش تومای ـ فخرو در اولویت دوم ($R۴ = ۲$) قرار می‌گیرند. روش‌های اشمارتمن و فرانسوی در اولویت‌های بعدی و روش برینگن ـ درویتر در اولویت آخر قرار می‌گیرد.

نمودارهای توزیع نرمال، به‌طور یک‌جا در شکل ۱۳ ارائه شده است. لازم به ذکر است که با توجه به اختلاف نتایج مربوط به روش اروپایی با دیگر روش‌ها، در این نمودار مقدار مربوط به روش اروپایی نشان داده نشده است. در شکل ۱۴ روش‌های مختلف برحسب دقت محاسبه‌ی ظرفیت باربری با هم مقایسه شده‌اند. چنان که در جدول ۳ مشاهده می‌شود، عموماً بررسی‌های انجام‌گرفته براساس چهار روش آمار و احتمال، پنج روش مبتنی بر نتایج CPT و CPTu روند یکسان و مشخصی طی می‌کنند. درمورد علل پیدایش خطا در روش‌های فوق می‌توان به‌اختصار نکاتی بیان کرد:

در چهار روش سنتی مبتنی بر نتایج CPT، فشار آب حفره‌یی در محاسبات لحاظ نشده و براساس روش بلندمدت عمل می‌کنند. بدیهی است این روش‌ها درمورد خاک‌ها و محیط‌های درشت‌دانه و غیرچسبنده به‌علت محو فشار آب حفره‌یی در زمان بسیارکوتاه، در هر دو حالت پاسخ‌های یکسانی می‌دهند. اما درمورد خاک‌های ریزدانه و چسبنده، مانند محیط‌های بررسی شده در این نوشتار که بیشتر لایه‌بندی



شکل ۱۳. نمودار توزیع نرمال روش‌های CPTu.[۳۳]



شکل ۱۴. مقایسه‌ی دقت روش‌های مختلف در تخمین ظرفیت باربری شمع‌ها.[۳۳]

ساخت‌گاه‌ها از خاک ریزدانه تشکیل شده‌اند، فشار آب حفره‌یی نقش اساسی و تعیین‌کننده‌یی ایفا می‌کند. از آنجا که نتایج آزمایش‌های تحلیل شمع‌کوبی همگی در حین کوبش صورت پذیرفته و فشار آب حفره‌یی محو نشده است، درچهار روش فوق این مورد اساسی لحاظ نشده است. افزون بر این، در تدوین هر چهار روش سنتی همگی براساس دستگاه CPT مکانیکی است که از دقت کم‌تری نسبت به دستگاه CPTu الکتریکی بهره‌مند است. علاوه بر موارد یادشده در روش‌های فوق معیار خاصی برای گسیختگی شمع‌ها ارائه نشده است. تفاوت و محدودبودن ساخت‌گاه‌ها نیز در این روش‌ها مزید بر علت است، برای مثال روش برینگن-درویتر بر پی‌های اجراشده در پروژه‌های سواحل دریای شمال استوار است، که از تنوع ساخت‌گاه کم‌تری برخوردار بوده و ممکن است برای ساخت‌گاه‌های دیگر با شرایط ژئوتکنیکی متفاوت پاسخ‌گو نباشد. کما این که میزان تفاوت ساخت‌گاه‌های مورد مطالعه در این نوشتار با نتایج حاصل از آزمایش تحلیل شمع‌کوبی به‌طور میانگین ۸۸٪ است، که براساس تجربه نمی‌تواند ناشی از محو فشار آب حفره‌یی باشد. استفاده از مقاومت برشی زه‌کشی‌نشده (S_u) نیز در محاسبه‌ی مقاومت جداره و کف در خاک‌های ریزدانه این روش را با تردیدهایی مواجه می‌سازد. درمورد روش‌های فرانسوی و اشمارتمن که هر دو نتایج دست‌پایین ارائه می‌دهند، می‌توان به محدودکردن مقاومت نوک شمع در آنها به ۱۵ مگاپاسکال ـ به‌ویژه در روش فرانسوی به‌علت محدودکردن ناحیه‌ی تأثیر به ۱٫۵B در بالا و پایین نوک شمع که محدوده‌یی بسیارکوچک است و دربرگیرنده‌ی تمامی تأثیرات خاک اطراف نوک شمع در ظرفیت باربری آن نیست ـ اشاره کرد. همچنین استفاده از ضریب کاهش ۵۰٪ برای q_a در محاسبه‌ی مقاومت نوک باعث کاهش ظرفیت باربری محاسباتی می‌شود. مقاومت جداری در این دو روش به ۱۲۰ کیلوپاسکال محدود می‌شود. در روش فرانسوی مقاومت جداری از ۳۵ تا ۱۲۰ کیلوپاسکال متغیر است، که می‌تواند در ارائه‌ی نتایج دست‌پایین بسیار مؤثر باشد.

برخلاف چهار روش سنتی CPT، روش اسلامی ـ فلنیوس بر معیارگسیختگی فرورفت[۱۹] مبتنی است.[۳۴] این روش نیز همچون معیار در نظرگرفته شده در آزمایش PDA از نوع کرنش بزرگ است. در این نوشتار با فرض تقریبی یکسان‌بودن، این دو نوع گسیختگی در شمع انجام پذیرفته است. تطابق نتایج حاصل از دو روش فوق مؤید این فرض است. علاوه بر این میانگین‌گیری منطقی، انتخاب ناحیه‌ی تأثیر مناسب در محل نوک شمع، پالایش مناسب داده‌ها، تأثیر فشار آب حفره‌یی در محاسبات مربوط به ظرفیت شمع‌ها ـ به‌ویژه در خاک‌های ریزدانه ـ در افزایش دقت روش و کاهش چشم‌گیر خطاهای آن بی‌تأثیر نیست.

نتیجه‌گیری

در این نوشتار ظرفیت باربری ۱۳ شمع کوبشی فولادی ته‌باز با مقطع دایره‌یی از سازه‌های فراساحلی اجراشده در محیط‌های دریایی ایران، از ۴ ساخت‌گاه و ۳ منبع شامل ساخت‌گاه‌های پروژه‌ی پل میان‌گذر دریاچه‌ی اورمیه (شهید کلانتری)، حوزه‌ی نفتی ابوذر و میدان گازی پارس جنوبی (فازهای I و VII) مورد بحث و بررسی قرار گرفتند. در کلیه‌ی موارد در نزدیکی محل اجرای شمع‌ها آزمایش پیزوپنترومتر (CPTu) انجام شده و در حین شمع‌کوبی‌ها نیز آزمایش تحلیل شمع‌کوبی (PDA) روی هر ۱۳ شمع انجام گرفت و نتایج ظرفیت باربری نهایی شمع‌ها (Q_m) به دست آمدند. ظرفیت باربری شمع‌ها با استفاده از نتایج آزمایش CPTu با روش‌های مستقیم به‌وسیله‌ی روش‌های اشاره‌شده محاسبه شد (Q_p). برای ارزیابی ظرفیت

باربری شمع‌ها از چهار روش آماری استفاده شده که نتایج آن به شرح زیر است:

- ارزیابی‌ها نشان می‌دهد که نتایج اولیه‌ی آزمایش شمع‌کوبی (PDA) از دقت قابل قبولی بهره‌مند است و از نتایج آن برای تخمین‌های اولیه و ثانویه‌ی ظرفیت باربری نهایی شمع به‌ویژه در محیط‌های دریایی که امکان انجام آزمایش بارگذاری شمع با توجه به شرایط حاکم بر آن به‌لحاظ دسترسی و زمان اجرای آزمایش میسر نیست یک روش جایگزین مطمئن، کارا، آسان و قابل استفاده است.
- آزمایش CPT و CPTu با توجه به فراهم‌آوری اطلاعات دقیق با حجم بالا و نیز تهیه‌ی پروفیل پیوسته و اندازه‌گیری‌های بدون وابستگی به اپراتور، به‌عنوان یک مدل کوچک مقیاس شمع می‌تواند گزینه‌یی مطلوب در ارزیابی‌های ژئوتکنیکی و طراحی پی‌های عمیق برای نهشته‌های نرم و شل و اشباع در محیط‌های دریایی مورد ملاحظه قرار گیرد.
- نسبت تغییرات ظرفیت باربری پیش‌بینی شده توسط روش‌های مختلف CPT و CPTu به کار گرفته شده به ظرفیت باربری اندازه‌گیری شده توسط آزمایش شمع‌کوبی (PDA) در این نوشتار در محدوده‌ی $0.75 < Q_p/Q_m < 1.9$ قرار گرفت. این امر مبین دقت مناسب روش‌های محاسبه‌ی ظرفیت باربری شمع‌ها به‌کمک نتایج آزمایش CPTu در مقایسه با تحلیل‌های استاتیکی است.
- با توجه به نتایج حاصله، روابط اسلامی-فلنیوس، اشمارتمن و فرانسوی متضمن نتایجی با برآورد دست‌پایین، و روابط تومای- فخرو و برینگن - درویتر (اروپایی) متضمن نتایجی با برآورد دست‌بالا هستند. روش اسلامی - فلنیوس، در مجموع بیشترین احتمال تطابق و کم‌ترین انحراف معیار را در برداشته است. علت این امر لحاظ‌کردن فشار آب حفره‌یی، میانگین‌گیری مناسب و به‌کارگیری مدل منطقی در داده‌های CPTu نسبت به روش‌های سنتی CPT است.
- نتایج حاصله از روش‌های برینگن - درویتر (روش اروپایی) و روش فرانسوی تطابق چندانی با روش‌های دینامیکی ندارند. علت این امر نیز استفاده از پنترومتر مکانیکی به جای پیزوپنترومتر است، که از دقت کافی برخوردار نیست و جواب‌های بسیار دست‌بالا یا دست‌پایین ارائه می‌دهند. به‌علاوه تفاوت ساخت‌گاه‌ها و مناطق مورد مطالعه نیز در این باب بی‌تأثیر نیست.

پانوشت

1. cone penetration test (CPT)
2. pile driving analyzer (PDA)
3. Piezocone (CPTU)
4. pore pressure on cone shoulder (U_2)
5. cone tip resistance(q_c)
6. cone sleeve friction(f_s)
7. Case analysis of piles by wave equation program(CAP WAP)
8. Canadian foundation engineering manual(CFEM)
9. American petroleum institute(API)
10. pile unit toe resistance(r_t)
11. pile unit shaft resistance(r_s)
12. over consolidation ratio(OCR)
13. Norwegian geotechnical institute(NGI)
14. wave trace
15. Case method
16. predicted capacity
17. measured capacity
18. Ranking index
19. plunging

منابع

1. Fakharyan, K. and Eslami, A., *Axial Bearing Capacity of Piles*, Transportation Research Institute (TRI), 1St Edition (2004).
2. CFEM, *Canadian Foundation Engineering Manual,* Bitech Publishers Ltd, British Colombia (1992).
3. API, *American Petroleum Institute,* Recommended Practice for Planning Designing and Constructing Fixed Offshore Platforms, 19th Edition, Washington D.C. (1990).
4. Tand, K.E. and Funegard, E.G., *Pile Capacity in Stiff Clays-CPT Methods, Proceeding*, 12th International Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering, Rio de Janeiro, pp. 1349-352 (1982).
5. Titi, H.H. and Abu-Farsakh, M.Y. "Assessment of direct cone penetration test methods for predicting the ultimate capacity of friction driven piles", *Journal of Geotechnical and Geoenviromental Engineering, ASCE,* pp. 935-944 (Sep. 2004).
6. Schmertmann, J.H., Guidelines for cone test, performance and design. FHWA Report-TS-78209, washington, 14SP. (1978).
7. DeRuiter, J. and Beringen, F.L. "Pile foundation for large north sea structure", *Marine Geotechnology,* **3** (1979).
8. Bustamante, M. and Gianeeselli, L., *Pile Bearing Capacity Predictions by Means of Statice Penetrometer CPT, proceeding of 2nd European Symposium on Penetration Testing ESPOT2*, Amesterdam (1982).
9. Tumay, M.Y. and Fakhroo, M. "Pile capacity in soft clays using electric QCPT data", *American Society of Civil Engineering, ASCE,* Proceeding of Conference on Cone penetration Testing and Experience, St Louis (1981).
10. Almeida, M.S.; Danziger, A.B. and Lunne, T. "Use of the pizecone test to predict the axial capacity of driven and

jacked piles in clay", *Canadian Geotechnical Journal,* **33**, pp. 23-41 (1996).

11. Eslami, A. and Fellenius, B.H. "Pile capacity by direct CPT and CPTu methods applied to 102 case histories", *Canadian Geotechnical Journal (CGJ),* **6** (1997).
12. Robertson, P.K.; Campanella, R.G.; Davis, M.P. and Sy, A., *Axial Capacity of Driven Piles in Deltaic Soils Using CPT,* Proceeding of the 1st International Symposium on Penetration Testing, ISOPT-1, Orlando, FL, **2**.
13. Briaud, J.L. and Tucker, L.M. "Measured and predicted axial response of 98 piles", *Journal of Geotechnical Engineerin,* **114**(8), pp. 984-1001 (1988).
14. Haustrofer, J.I. and Plesiotis, S. "Instrumented dynamic and static pile load testing at two bridge sites", *proceeding of the 5th Australia-New Zealand Conference on Geomechanics*, Sydney, **1** pp. 514-520 (Aug. 1988).
15. Titi, H.H. and Abu-Farsakh, M.Y. "Probabilistic CPT method for estimating the ultimate capacity of friction piles", *Geotechnical Testing Journal, ASTM,* pp. 387-398 (Feb. 2007).
16. Poulos, H.G. and Davis, E.H., *Pile Foundaition Analysis and Design,* John Wiley and Sons Publication, (1980).
17. Golpasand. M.R, *Investigation on Engineering Properties of Soft Soils in the Urmiyeh Lake and Comparison with Cone Penetration Test (CPTu) Rresults,* M.Sc Thesis in Geology Engineering, Department of Science, TMU University (2004)
18. Conewael Engineering Co, *Pile Monitoring Servises SPD7 Wellhead Platform,* Final Report, South Pars, Stage 6,7 & 8 (2004).
19. Mandro Consulting Engineers, final Report, Site Investigation and Geotchnical Survey for Uremia Lake Bridge (2003).
20. AAS Jakobsen Consulting Engineering, *Design & Construction of the Oromieh Lake Causeway,* Basic Design Report (2004).
21. Iran marine industrial Co.(Sadra), *Design & Construction of the Oromieh Lake Causeway,* Investigation on Pile Bearing Capacity, Final Issued (2003).
22. ISOICO & SLP Engineering Co, SPD7 Pile Jacket Analysis Report (2002).
23. Noble Denton Geotechnical & Ocean Services LTD.- South Pars Phase 11 Field Development Project ,Offshore and Nearshore Geotechnical Survey-Final Engineering Report, SPD12 Location (2005).
24. Noble Denton Geotechnical & Ocean Services LTD, South Pars Phase 11 Field Development Project ,Offshore and Nearshore Geotechnical Survey-Final Engineering Report, SPD13 Location (2005).
25. Noble Denton Geotechnical & Ocean Services LTD, South Pars Phase 11 Field Development Project, Offshore and Nearshore Geotechnical Survey, Final Factual Report, SPD12 & SPD13 Locations (2005).
26. Norwegian Geotechnical Institute (NGI) & AAS Jakobsen Consulting Engineering, Design & Construction of the Urmiyeh Lake Causeway, Final Issued, Main Bridge Pile Driveability Analyses (2004).
27. Norwegian Geotechnical Institute (NGI) Design & Construction of the Urmiyeh Lake Causeway - Technical note, CAPWAP analyses (2006).
28. Seaway Heavy Lifting Engineering Co.(SHL), Installation Jacket SPD7, SPD8 & SPD9- Pile Derivability for SPD7 Wellhead Platform (2003).
29. Campanella, G. and Robertson, P.K. "Current status of the piezocone test," *Proceedings of First International Symposium on Penetration Testing*, ISOPT-1, 1, (93-116) Orlando, (March 22-24 1988).
30. Eslami, A. and Fellenius, B.H. "CPT & CPTu data for soil profile interpretation: Review of methods and proposed new approach", *Iranian Journal of Science and Technology (IJST),* **28** (2004).
31. PDA User Manual Pile Driving Analyzer, Goble Rausche Likins & Associates, Inc Cleveland-Ohio (1997).
32. UniCone User manual, Fellenius, B.; Eslami, A. and Infante, J.A., Unisoft LTD, Canada (2002).
33. Hosseini, B. "Assessment of axial bearing capacity of piles by CPTu data in Iran's Marine environments", M.Sc thesis in Geotechnic, Faculty of Engineering, Islamic Azad University, Tehran Central Branch (2008).
34. Shariatmadari, N.; Eslami, A. and Karimpour-Fard, M. "Bearing capacity of driven piles in sands from SPT-appled to 60 case histories", *Iranian Journal of Science and Technology, Engineering,* **32**(B2), pp. 125-140 (2008).