

تخمین ظرفیت باربری شمع‌های بتنی در جاریز با استفاده مستقیم از نتایج آزمایش‌های صحرایی CPT، SPT و مقایسه با بارگذاری استاتیکی شمع - مطالعه موردی

داور موسوی^۱، حمید علی‌الهی^{۲*}

^۱ کارشناسی ارشد گروه مهندسی عمران، واحد زنجان، دانشگاه آزاد اسلامی، زنجان
^۲ استادیار گروه مهندسی عمران، واحد زنجان، دانشگاه آزاد اسلامی، زنجان

(دریافت: ۹۷/۱۱/۲۹، پذیرش: ۹۹/۱۱/۴، نشر آنلاین: ۹۹/۱۱/۴)

چکیده

در این پژوهش، از چهار روش پیشنهادی مبتنی بر نتایج آزمایش نفوذ مخروط، CPT، (Cone Penetration Test) و همچنین با دو روش پیشنهادی بر پایه نتایج آزمایش نفوذ استاندارد، SPT، (Standard Penetration Test) به منظور تخمین ظرفیت باربری پنج شمع در جاریز بتن مسلح استفاده شده است. شمع‌های مذکور در پروژه بندر شهید رجایی در غرب شهر بندرعباس، جنوب ایران و شمال خلیج فارس، اجرا شده است. نتایج تخمین ظرفیت باربری با استفاده از آزمایش‌های صحرایی CPT و SPT در مقایسه با نتایج حاصل آزمایش‌های انجام شده استاتیکی در محل بر روی شمع‌های واقعی، مورد بحث و بررسی قرار گرفته است. برای به دست آوردن ظرفیت باربری شمع‌ها با استفاده از داده‌های CPT و SPT از نرم‌افزار Unipile استفاده شده است. برای داده‌های CPT از چهار روش اشماتمن - تاتینگهام (Schmertmann و Nottingham)، برنگن - درویتر (De Ruyter و Beringen)، بوستامانته - جیانسلی (Gianeselli و Bustamante) و اسلامی - فلنیوس (Eslami و Fellenius) و همچنین برای داده‌های SPT، از دو روش مایرهوف (Meyerhof) و اونیل - ریس (Reese و O'Neill) برای تخمین ظرفیت باربری شمع‌ها استفاده شده است. به منظور مقایسه نتایج به دست آمده از تحلیل‌های آماری مختلفی همچون بهترین خط برازش یافته، میانگین هندسی و انحراف معیار، میزان احتمالات تجمعی، میزان دقت ۲۰٪ اخذ شده از هیستوگرام (Histogram) و نمودار توزیع نرمال، استفاده شده است. با اولویت‌بندی هر روش در هر تلاش آماری و در نهایت با جمع‌بندی کل اولویت‌بندی‌ها، بهترین روش تخمین ظرفیت باربری شمع‌ها با استفاده از داده‌های نفوذ مخروط، روش اشماتمن - تاتینگهام و با استفاده از داده‌های نفوذ استاندارد، روش مایرهوف حاصل شده است.

کلیدواژه‌ها: ظرفیت باربری، شمع‌های بتنی در جاریز، آزمایش بارگذاری استاتیکی شمع، آزمایش نفوذ مخروط (CPT)، آزمایش نفوذ استاندارد (SPT).

۱- مقدمه

آزمایش نفوذ مخروط (CPT) یکی از مؤثرترین آزمایش‌های درجا برای توصیف مشخصات خاک است. آزمایش CPT، ساده، سریع، کارآمد و اقتصادی می‌باشد که می‌تواند داده‌های پیوسته‌ای از مشخصات خاک ارائه کند. آزمایش CPT، مقاومت نوک مخروط (q_c) و اصطکاک جداره آن (f_s) را هم‌زمان در طی نفوذ به خاک محاسبه می‌کند. از این محاسبات می‌توان به‌طور مؤثری در توصیف خاک، طبقه‌بندی و ارزیابی مشخصات مختلف خاک همانند مقاومت و تغییر شکل استفاده شود. آزمایش CPT^u با منشأ گرفته آزمایش CPT ولی با محاسبه فشار آب منفذی سبب کارایی بیشتر این آزمایش شده است. به علت شباهت بین مخروط آزمایش CPT و عملکرد شمع‌ها، تعیین ظرفیت باربری شمع، یکی از اصلی‌ترین کاربردهای آزمایش CPT است. مزیت استفاده از داده‌های CPT و

در محیط‌های دریایی همچون سواحل و بندرها اغلب لایه‌های خاک از نوع خاک‌های نرم و نشست‌پذیر تشکیل شده‌اند که به منظور استحکام خاک برای اجرای سازه‌های مختلفی همچون اسکله‌های ساحلی از شمع‌ها استفاده می‌شود. بنابراین، تعیین ظرفیت باربری نهایی شمع‌ها برای طراحی ایمن شالوده‌های عمیق امری ضروری است. هر چند پیش‌بینی دقیق ظرفیت باربری نهایی شمع‌ها همیشه یک چالش برای مهندسان طراح بوده است، ولی می‌توان با روش‌های مختلف همانند آزمایش بارگذاری استاتیکی شمع، آزمایش‌های دینامیکی، روش‌های تحلیلی و استفاده از آزمایش درجا به صورت تقریبی ظرفیت باربری شمع‌ها را به دست آورد (Cai و همکاران، ۲۰۰۹).

1. Cone Penetration Test

* نویسنده مسئول؛ شماره تماس: ۰۳۳۴۲۱۰۰۳-۰۲۴

مستقیم از نتایج آزمایش‌های CPT و CPTu برای تعیین ظرفیت باربری شمع‌های مارپیچی پرداختند. در این پژوهش، داده‌های موردنیاز با جمع‌آوری نتایج آزمایش‌های بارگذاری استاتیکی شمع تحلیل شدند. همچنین آزمایش نفوذ استاندارد (SPT) نیز یکی از آزمایش‌های اقتصادی و متداول در مهندسی ژئوتکنیک می‌باشد. جدا از کاربردهای عمده این آزمایش در تعیین مشخصات خاک، عدد N در آزمایش SPT به‌طور گسترده‌ای برای طراحی فونداسیون‌ها و به‌خصوص برای ظرفیت باربری شمع‌ها مورد استفاده قرار می‌گیرد. بنابراین، روش‌های مبتنی بر آزمایش SPT در اغلب آیین‌نامه‌های طراحی همچون: FHWA (۲۰۱۶)، CFEM (۲۰۰۶)، KGS (۲۰۰۳) و AASHTO (۲۰۰۲) نیز به‌کاربرده شده‌اند. در نیم‌قرن گذشته، تعدادی از تحقیقات به‌منظور ارزیابی کارایی روش SPT و فاکتورهای مؤثر بر آن موردبررسی قرار گرفتند (Dung و همکاران، ۲۰۱۳). تحقیقات نشان دادند، از آنجایی‌که مقدار عدد N آزمایش SPT دارای عدم قطعیت‌هایی است، پس داده‌های این آزمایش بیشتر برای طراحی اولیه مناسب‌تر هستند. مطالعات کمی بر کارایی روش‌های مبتنی بر آزمایش SPT برای تخمین ظرفیت باربری شمع‌ها تمرکز داشته‌اند.

Nevele و Snethe (۲۰۱۴) پیش‌بینی میزان نشست شمع‌های تکی در ماسه را بر اساس نتایج آزمایش نفوذ استاندارد موردبررسی قرار دادند. Zhang و همکاران (۲۰۰۴) به تخمین روانگرایی ناشی از جابه‌جایی‌های جانبی با استفاده از نتایج SPT و CPT پرداختند. Eslami و همکاران (۲۰۰۹) پیش‌بینی نشست شمع را با استفاده از الگوریتم شبکه عصبی و بر پایه داده‌های SPT مورد ارزیابی قرار دادند. Dung و همکاران (۲۰۱۱) کارایی روش‌های مبتنی بر آزمایش SPT را برای تخمین ظرفیت باربری نوک شمع‌های پیش‌تنیده در نهشته‌های ضخیم موردبررسی قرار دادند. حال پس از اشاره‌ای مختصر به مطالعات پیشین، در این مقاله به تخمین ظرفیت باربری شمع‌های بتنی درجاریز با استفاده مستقیم از نتایج آزمایش‌های صحرایی CPT، SPT و مقایسه با بارگذاری استاتیکی شمع در برنامه توسعه فاز دوم بندر شهید رجایی واقع در جنوب ایران پرداخته خواهد شد.

در این پژوهش از بین روش‌های مختلف برای ارزیابی تعیین ظرفیت باربری شمع‌ها، روش‌هایی مورد استفاده قرار گرفته است که بسیار متداول بوده و در ادبیات فنی نیز بیش‌ترین استفاده را داشته است. بنابراین، روش‌های مستقیم مبتنی بر نتایج آزمایش‌های CPT شامل: روش‌های (Schmertmann، ۱۹۷۹؛ De Ruyter و Beringen، ۱۹۷۹؛ Bustamante و Gianeselli، ۱۹۸۲؛ Eslami و Fellenius، ۱۹۹۷) و همچنین روش‌های مستقیم مبتنی بر نتایج آزمایش‌های SPT همچون (Meyerhof، ۱۹۷۶؛ O'Neill و Reese، ۱۹۹۹) مورد استفاده قرار گرفته و با

CPTu برای طراحی شمع، غیر مخرب بودن این آزمایش و نیز عدم استفاده از وسایل آزمایشگاهی پیچیده و هزینه‌بر می‌باشد. در این راستا، روش‌های مختلف تخمین ظرفیت باربری شمع‌های منفرد بر اساس داده‌های مستقیم CPT و CPTu و نیز آزمایش بارگذاری توسط محققین مختلف ارائه شده است (Schmertmann، ۱۹۷۸؛ شوش‌پاشا و سعیدی، ۱۳۹۵).

روش‌های تعیین ظرفیت باربری شمع‌ها مبتنی بر آزمایش‌های بر مبنای CPT و CPTu در ابتدا، برای نواحی و شرایط ژئوتکنیکی مشخص، توسعه داده شده‌اند و کالیبره نمودن این روش‌ها برای سایر نواحی با مشخصات خاک متفاوت امری ضروری تلقی می‌شود. در این راستا، محققان مختلفی به بررسی و مقایسه ظرفیت باربری شمع بر اساس نتایج داده‌های CPT و CPTu با ظرفیت باربری محاسبه‌شده آزمایش استاتیکی انجام‌شده بر روی شمع‌ها، پرداختند.

Eslami و همکاران (۱۹۹۵) ظرفیت باربری اتکایی شمع‌ها را با استفاده از داده‌های آزمایش نفوذ مخروط (CPT) مورد ارزیابی قرار دادند. در این تحقیق از نتایج مستقیم CPT برای تعیین ظرفیت باربری شمع‌های منفرد استفاده شد. Eslami و همکاران (۲۰۰۴) به مروری بر روش‌ها و رویکردهای جدید پیشنهادی برای استفاده از داده‌های آزمایش‌های CPT و CPTu برای تفسیر پروفیل خاک پرداختند.

Abu-Farsakh و Titi (۲۰۰۹)، به ارزیابی روش‌های مستقیم آزمایش نفوذ مخروط برای پیش‌بینی ظرفیت باربری نهایی شمع‌های اصطکاکی پرداختند. در این تحقیق، قابلیت هفت روش مستقیم آزمایش نفوذ مخروط برای پیش‌بینی ظرفیت باربری شمع‌های اصطکاکی پیش‌ساخته پیش‌تنیده بتنی بررسی گردید. Cai و همکاران (۲۰۱۲) به ارزیابی کارایی پیش‌بینی ظرفیت باربری شمع بر اساس داده‌های CPTu در رسوبات رس نرم پرداختند. مقایسه‌های انجام‌شده به‌منظور بررسی مزایا و معایب مختلف CPT برای پیش‌بینی ظرفیت باربری شمع‌ها بود. روشی که بر پایه CPTu پیشنهاد شد، برای پیش‌بینی ظرفیت نهایی شمع با استفاده از مقاومت مؤثر نوک مخروط و اضافه فشار آب منفذی می‌باشد. مقایسه ظرفیت‌های شمع محاسبه‌شده از این روش با مقادیر اندازه‌گیری شده در واقعیت نشان داد که پیش‌بینی‌های روش CPTu اصلاح‌شده، تطابق بیشتری با ظرفیت‌های باربری نهایی به‌دست‌آمده از آزمایش‌های بارگذاری استاتیکی دارد.

Alielahi و Adampira (۲۰۱۵) به مقایسه بین ظرفیت‌های باربری نهایی حاصل از روابط تجربی و نتایج آزمایشگاهی برای شمع‌های بتنی درجا پرداختند. در این تحقیق روش‌های مختلف تفسیر آزمایش بارگذاری شمع برای دستیابی به ظرفیت‌های باربری واقعی شمع‌ها به‌کاربرده شد.

Fateh و همکاران (۲۰۱۷) به ارزیابی روش‌های استفاده

$$q_t = \frac{q_{c1} + q_{c2}}{2} \quad (۲)$$

که q_{c1} کم‌ترین مقاومت میانگین نوک مخروط در ناحیه 0.7D تا 4D زیر نوک شمع (که D قطر شمع است) و q_{c2} میانگین کم‌ترین مقاومت نوک مخروط در فاصله 8D بالای نوک شمع است. همچنین اشماتمن حد بالای 15 MPa را برای ظرفیت باربری نوک (q_t) پیشنهاد داد. بر اساس روش اشماتمن، اصطکاک واحد جدار (بدنه) شمع (f) از رابطه‌ی زیر به دست می‌آید:

$$f = \alpha_c f_s \quad (۳)$$

که α_c فاکتور کاهش بوده که از ۰/۲ تا ۱/۲۵ برای خاک‌های رسی متفاوت است و f_s نیز مقاومت جداره مخروط است. برای شمع‌های واقع در خاک‌های ماسه‌ای، ظرفیت اصطکاک (Q_s) از رابطه زیر به دست می‌آید:

$$Q_s = \alpha_s \left[\sum_{y=0}^{8D} \frac{y}{8D} f_s A_s + \sum_{y=8D}^L f_s A_s \right] \quad (۴)$$

که α_s ضریب اصلاح برای ماسه است. y عمقی است که در آن مقاومت جداره محاسبه می‌شود. L طول شمع است. اشماتمن حد بالای مقاومت جداره را 120 kPa پیشنهاد داده است.

۲-۲-۲ روش De Ruiter و Beringen

این روش به وسیله De Ruiter و Beringen (۱۹۷۹) بر پایه آزمایش‌های صورت گرفته در دریای شمال به دست آمده است. این روش نیز به عنوان روش اروپایی شناخته می‌شود و از روندهای مختلفی برای رس و ماسه استفاده می‌شود. در خاک‌های رسی، ابتدا مقاومت برشی زهکشی نشده (S_u) برای هر لایه خاک از مقاومت نوک مخروط (q_c) به دست می‌آید. سپس ظرفیت باربری واحد نوک و اصطکاک جداره واحد با اعمال فاکتورهای متعدد مناسب محاسبه می‌گردد. ظرفیت باربری واحد نوک از رابطه زیر به دست می‌آید:

$$q_t = N_c S_u(tip) \quad (۵)$$

$$S_u(tip) = \frac{q_c(tip)}{N_K} \quad (۶)$$

که N_c فاکتور ظرفیت باربری است، در این روش $N_c = 9$ در نظر گرفته می‌شود. N_K فاکتور مخروط است که محدوده‌ای از ۱۵ تا ۲۰ دارد و بر اساس آزمایش‌های محلی تعیین می‌گردد. $q_{tu}(tip)$ میانگین مقاومت نوک مخروط CPT محاسبه شده در اطراف نوک شمع همانند روش اشماتمن است. اصطکاک جداره واحد نیز با استفاده از رابطه زیر به دست می‌آید:

کمک این روابط تجربی و بر مبنای نتایج بارگذاری استاتیکی شمع‌ها، میزان دقت پیش‌بینی روابط مذکور برای تعیین ظرفیت باربری استاتیکی شمع‌های درجاریز پروژه بندر شهید رجایی به عنوان مطالعه موردی پرداخته می‌شود.

۲-۲-۱ مروری بر روش‌های استفاده مستقیم از نتایج آزمایش‌های CPT و CPTu برای تعیین ظرفیت باربری محوری شمع‌ها

ظرفیت باربری نهایی محوری شمع (Q_u) شامل ظرفیت باربری اتکایی شمع (Q_t) و ظرفیت اصطکاک جدار آن (Q_s) می‌باشد. رابطه کلی توصیف این بیان به صورت زیر است (Cai و همکارانش، ۲۰۱۲):

$$Q_u = Q_t + Q_s = q_t A_t + f A_s \quad (۱)$$

که در رابطه بالا، q_t ظرفیت باربری واحد نوک شمع، A_t سطح مقطع نوک شمع، f اصطکاک واحد بدنه شمع، A_s سطح بدنه شمع است. اغلب مطالعات و تجربیات به دست آمده نشان داده است که در ماسه‌ها، ظرفیت اتکایی (Q_t) غالب تر است، در حالی که در رس‌های نرم، ظرفیت اصطکاک جدار (Q_s) شمع غالب تر می‌باشد. ظرفیت باربری مجاز (Q_d) شمع از رابطه زیر به دست می‌آید (Cai و همکاران، ۲۰۱۲):

$$Q_d = \frac{Q_u}{F.S} \quad (۲)$$

که Q_u همان ظرفیت باربری نهایی و $F.S$ نیز ضریب اطمینان است. در این پژوهش از روش‌های مستقیم مبتنی بر نتایج آزمایش‌های CPT شامل: روش اشماتمن - تاتینگهام، روش برنگن - درویتر، روش بوستامانته - جیانسلو، روش اسلامی - فلنیوس به منظور پیش‌بینی ظرفیت باربری شمع‌ها استفاده شده است. روش‌های مستقیم CPT، ظرفیت باربری واحد نوک شمع (q_t) را از مقاومت نوک مخروط (q_c) و با استفاده از میانگین‌گیری مقاومت نوک مخروط در ناحیه تأثیر فرض شده، مورد بررسی قرار می‌دهند. مقامت واحد جدار شمع (f) از اصطکاک پیرامونی اندازه‌گیری شده (f_s) مخروط و یا از مقاومت نوک مخروط (q_c) ارزیابی می‌شود. در ادامه شرح مختصری از روش‌های یاد شده ارائه شده است.

۲-۱-۲ روش Nottingham و Schmertmann

Nottingham و Schmertmann (۱۹۷۸) رابطه زیر را برای پیش‌بینی ظرفیت باربری نوک شمع (q_t) با استفاده از مقاومت نوک مخروط (q_c) آزمایش CPT ارائه دادند:

باشد. $0.7q_{eq}$

لازم به ذکر است که در این روش اصطکاک جدارى واحد شمع (f) در هر لایه خاک با استفاده از مقاومت نوک مخروط معادل ($q_{eq}(side)$) لایه خاک، نوع خاک، نوع شمع و نحوه اجرای شمع تخمین زده می‌شود.

۲-۴- روش Fellenius و Eslami

Fellenius و Eslami (۱۹۹۷) بر اساس مطالعه موردی بر روی اطلاعات ۱۰۲ شمع جمع‌آوری شده از کشورهای مختلف بر اساس داده‌های CPTu رابطه تجربی را ارائه نمودند. در این روش مقاومت اصطکاک، برخلاف روش‌های دیگر، از میانگین‌گیری هندسی داده‌ها به جای میانگین‌گیری حسابی استفاده شده است. در این روش مقاومت‌های واحد نوک و جداره شمع تابعی از مقاومت نوک مخروط آزمایش CPTu ارائه شده است. مقاومت واحد نوک شمع با استفاده از میانگین هندسی و با ملاحظه گسترش ناحیه گسیختگی اطراف نوک شمع تعیین می‌شود:

$$q_t = C_t \cdot q_{EG} \quad (11)$$

در این رابطه، C_t ضریب تصحیح بوده و q_{EG} روش از میانگین هندسی تمامی مقادیر مقاومت مؤثر مخروط در مجاورت انتهای شمع در طول ناحیه تحت تأثیر یا گسیختگی شمع حاصل می‌شود. در خاک‌های همگن عمق ناحیه تأثیر در محدوده 8B بالا و 4B انتهای شمع در نظر گرفته می‌شود. در خاک غیر همگن، زمانی که انتهای شمع در خاک متراکم و لایه ضعیف در بالای آن قرار می‌گیرد، ناحیه مؤثر معادل 4B در زیر و 2B در بالای نوک شمع برای میانگین‌گیری استفاده می‌شود. در این روش، مقاومت واحد جداره شمع با استفاده از مقاومت مؤثر نوک مخروط و برحسب درصدی از آن در نظر گرفته می‌شود:

$$f = C_s \cdot q_E \quad (13)$$

در این رابطه، C_s ضریب تصحیح مقاومت جدار شمع است که مقدار آن از ۰/۴ تا ۸ درصد برای خاک‌های مختلف متغیر است. همچنین q_E مقاومت مؤثر نوک مخروط در اعماق مختلف است. در ادامه نیز روش‌های تعیین ظرفیت باربری شمع‌ها بر مبنای استفاده از نتایج مستقیم آزمایش SPT موردبررسی قرار خواهد گرفت. در این پژوهش، کلیه روش‌های مذکور، در نرم‌افزار Unipile که یکی از نرم‌افزارهای معتبر مهندسی ژئوتکنیک در این زمینه می‌باشد، آورده شده است.

۳- مروری بر پیش‌بینی ظرفیت باربری شمع با استفاده از

نتایج داده‌های SPT

آزمایش SPT یکی از آزمایش‌های رایج ژئوتکنیک در بسیاری از

$$f = \beta S_u(side) \quad (7)$$

که β فاکتور چسبندگی، $\beta = 1$ برای رس عادی تحکیم یافته و $\beta = 0.5$ برای رس بیش تحکیم یافته می‌باشد. $S_u(side)$ مقاومت برشی زهکشی نشده برای هر لایه خاک در طول جداره شمع است که با استفاده از رابطه زیر به دست می‌آید:

$$S_u(side) = \frac{q_c(side)}{N_K} \quad (8)$$

که $q_c(side)$ میانگین مقاومت نوک مخروط در طول لایه خاک است. در این مطالعه، فاکتور مخروط $N_K = 20$ ، فاکتور چسبندگی $\beta = 0.5$ در نظر گرفته می‌شود چراکه مقادیر ظرفیت باربری نهایی شمع پیش‌بینی شده بهتری را برای شمع‌ها در نظر می‌گیرد. در خاک‌های ماسه‌ای، ظرفیت باربری واحد نوک شمع (q_t) همانند روش اشماتمن محاسبه می‌شود. اصطکاک جدارى واحد (f) برای هر لایه خاک در طول پیرامون شمع به صورت زیر به دست می‌آید:

$$f = \min \left\{ \begin{array}{l} \frac{q_c(side)}{300} \text{ (فشار)} \\ \frac{q_c(side)}{400} \text{ (کشش)} \\ 120 \text{ kPa} \end{array} \right. \quad (9)$$

در روش برنگن و دروینتر حد نهایی q_t برابر 15 MPa و حد نهایی f 120 kPa در نظر گرفته می‌شود.

۲-۳- روش Ganeselli و Bustamante

Ganeselli و Bustamante (۱۹۸۲) این روش را برای دپارتمان بزرگراه فرانسه بر اساس تحلیل انجام گرفته بر روی ۱۹۷ شمع که بر روی آن‌ها آزمایش‌های بارگذاری شمع انجام شده بود، ارائه دادند. این روش اغلب به عنوان روش فرانسوی و روش LCPC/LCP نیز شناخته می‌شوند. در این روش، ظرفیت باربری واحد نوک (q_t) و اصطکاک جدارى واحد (f) شمع از مقاومت نوک مخروط (q_c) آزمایش CPT به دست می‌آید. در این روش مقاومت جداره مخروط (f_s) مورد استفاده قرار نمی‌گیرد. ظرفیت باربری واحد نوک شمع (q_t) از رابطه زیر پیش‌بینی می‌شود:

$$q_t = k_b q_{eq}(tip) \quad (10)$$

که k_b یک ضریب تجربی مربوط به ظرفیت باربری بوده و در محدوده ۰/۱۵ تا ۰/۱۶ متغیر است که به نوع خاک و نحوه اجرای شمع بستگی دارد. q_{eq} میانگین مقاومت معادل نوک مخروط در اطراف نوک شمع است که به صورت زیر به دست می‌آید:

- متوسط میانگین‌گیری مقاومت نوک شمع با استفاده از متوسط q_c در طول ناحیه 1.5D زیر نوک شمع تا 1.5D بالای نوک شمع (D قطر شمع است).

- حذف مقادیر q_c در ناحیه که بیشتر از $1.3q_{eq}$ و کم‌تر از

σ'_z = تنش مؤثر وارد در عمق نوک شمع
 b = قطر نوک شمع

برای محاسبه مقاومت جداره شمع، اونیل و ریس رابطه β را پیشنهاد دادند که به صورت روابط زیر بیان می‌شود. در این رابطه، مقاومت واحد جداره شمع $\sigma'_z = \beta \sigma'_s$ ، نباید بیشتر از 200kPa شود. اگر $N_{60} \geq 15$ رابطه β اونیل و ریس فقط به عمق بستگی دارد:

$$\beta = \frac{N_{60}}{15} (1.5 - 0.245\sqrt{z}) \quad N_{60} \leq 15 \quad (18)$$

$$\beta = 1.5 - 0.245\sqrt{z} \quad N_{60} \geq 15 \quad (19)$$

z = عمق نمونه SPT

N_{60} = عدد اصلاح شده آزمایش SPT

در ادامه از روش‌های تعیین ظرفیت باربری شمع‌ها بر مبنای استفاده از نتایج مستقیم آزمایش GPT و SPT برای پیش‌بینی ظرفیت باربری شمع‌های درجاریز پروژه شهید رجایی و مقایسه آن با نتایج آزمایش‌های بارگذاری واقعی شمع ارائه شده است.

۴- اطلاعات مربوط به پروژه بندر شهید رجایی

در پروژه‌های مهم و کاربردی، از هر روشی که برای تخمین ظرفیت باربری شمع‌ها مورد استفاده قرار می‌گیرد، باید با استفاده از آزمایش‌های بارگذاری استاتیکی مورد ارزیابی و تأیید قرار گیرند. آزمایش‌های بارگذاری استاتیکی شمع می‌توانند روند طراحی را تأیید یا نتایج آن‌ها را با توجه به میزان ضرایب اطمینان در نظر گرفته شده مورد اصلاح قرار دهند. هر چند این روش بسیار هزینه‌بر بوده و نمی‌توان آن را برای تعداد زیادی از شمع‌ها در پروژه‌ها به کاربرد. بنابراین، این روش باید همیشه در ارتباط با روابط دیگر نیز ارائه شود. در این پژوهش، نتایج چندین آزمایش بارگذاری شمع ارائه شده است. همچنین نتایج حاصل از انجام آزمایش نفوذ مخروط (CPT) متناسب با تعدادی از آن‌ها نیز ارائه گردیده است. در این راستا، نتایج آزمایش بارگذاری شمع‌های پروژه توسعه بندر شهید رجایی واقع در جنوب ایران به عنوان مورد مطالعاتی در نظر گرفته شده است. همچنین از روش‌های مختلف تفسیر آزمایش بارگذاری شمع برای دستیابی به ظرفیت باربری شمع استفاده شده است. به طور مشخص روش‌های مختلف مبتنی بر استفاده مستقیم آزمایش‌های صحرایی نظیر CPT و SPT، نتایج متفاوتی را برای ظرفیت‌های باربری شمع پیش‌بینی می‌کنند. بنابراین، برای این منظور از روش‌های مختلف و با استفاده از نتایج آزمایش بارگذاری شمع، ظرفیت باربری شمع‌ها محاسبه و در نهایت با میانگین‌گیری وزن دهی، ظرفیت باربری به دست آمده از روابط مربوطه شمع با نتایج آزمایش بارگذاری استاتیکی شمع در محل مورد مقایسه قرار گرفته است.

کشورها است، چراکه اجرای آن آسان و کم‌هزینه بوده و در انجام آن احتیاجی به تجهیزات پیشرفته نیست. روابط مختلفی برای به دست آوردن ظرفیت باربری شمع‌ها با استفاده مستقیم از داده‌های SPT توسط محققین مختلف پیشنهاد شده است. در این پژوهش، به منظور به دست آوردن ظرفیت باربری شمع‌های اجرا شده در پروژه بندر شهید رجایی از دو روش مایرهورف و اونیل-ریس استفاده شده است.

۳-۱- روش Meyerhof (Fellenius, 2017)

Meyerhof در سال ۱۹۷۶ پس از تحلیل‌های نتایج به دست آمده آزمایش‌های انجام شده بر روی شمع‌ها، ظرفیت باربری شمع‌ها را بر اساس عدد نفوذ استاندارد (N_{SPT}) به صورت زیر ارائه نمود:

$$R = R_t + R_s = mN_t A_t + n\bar{N}_s A_s D \quad (14)$$

m = ضریب نوک شمع

n = ضریب جداره‌ی شمع

N_t = عدد SPT در نوک شمع

\bar{N}_s = میانگین عدد SPT در طول جداره شمع

A_t = سطح مقطع شمع در نوک

A_s = سطح مقطع واحد جداره شمع

D = عمق مدفون شمع

در این رابطه:

$m = 400 \times 10^3$ برای شمع‌های کوبشی، 12×10^3 برای شمع‌های درجاریز (N/m^2)

$n = 2 \times 10^3$ برای شمع‌های کوبشی، 1×10^3 برای شمع‌های درجاریز (N/m^2)

۳-۲- روش O'Neill و Reese (Fellenius, 2017)

O'Neill و Reese در سال ۱۹۹۹ رابطه‌ای برای محاسبه مقاومت نوک شمع به صورت زیر پیشنهاد دادند:

$$r_t = 0.59 \left[N_{60} \frac{\sigma_{ref}}{\sigma'_z} \right] \sigma'_z \quad (15)$$

برای شمع‌های با قطر بزرگ‌تر از ۱۲۷۰ میلی‌متر (۵۰ اینچ)، این رابطه باید در یک ضریب کاهش f_t به صورت زیر ضرب شود:

$$f_t = \frac{1270}{b}, \quad b \text{ in millimetre} \quad (16)$$

$$f_t = \frac{50}{b}, \quad b \text{ in inches} \quad (17)$$

N_{60} = عدد اصلاح شده آزمایش SPT

σ_{ref} = تنش مرجع که ثابت بوده و برای اهداف عملی برابر 100kPa است.



شکل ۳- شمع‌های درجاریز بتن مسلح

۴-۲- شرایط ژئوتکنیکی خاک بستر

مطابق شکل (۴) به منظور شناخت لایه‌های خاک برای طراحی‌های لازم، از دوازده گمانه با آزمایش‌های صحرائی SPT به اعماق مختلف به همراه آزمایش‌های CPT و نیز آزمایش‌های آزمایشگاهی استفاده شده است. تشریح گمانه‌های حفر شده نشان می‌دهد که این ناحیه از چهار لایه خاک با ضخامت‌های متفاوت تشکیل شده است که این لایه‌ها شامل توالی لایه‌های عمدتاً ماسه و نیز رس می‌باشند.



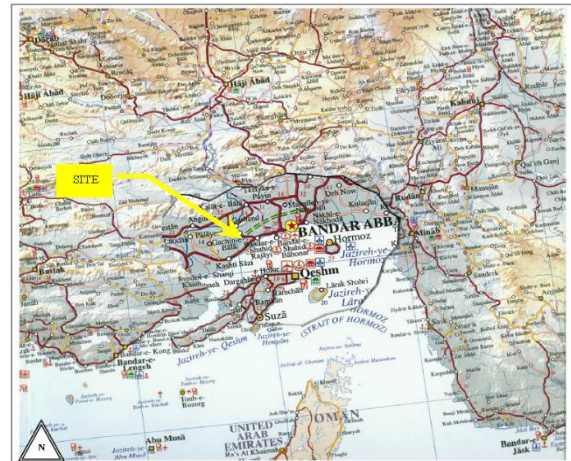
شکل ۴- موقعیت گمانه‌ها (BH) و آزمایش بارگذاری شمع (TP) و آزمایش‌های CPT

در شکل (۵)، مقاومت نوک و جدار مخروط و نسبت مقاومت جدار به نوک چهار داده CPTu مورد بررسی، نشان داده شده است.

۴-۱- معرفی پروژه توسعه بندر شهید رجایی (مطالعه موردی)

پروژه بندر شهید رجایی در غرب شهر بندرعباس، جنوب ایران و شمال خلیج فارس واقع شده است (شکل (۱)). در گذشته، این بندر، به‌طور کامل ساخته نشده بود که در ادامه برنامه توسعه افزایش ظرفیت پروژه بندر شهید رجایی پیشنهاد شد (Alielahi و Adampira، ۲۰۱۶).

برنامه توسعه بندر رجایی در فاز دوم طرح، شامل احداث سه دیوار ساحلی در ناحیه شرقی و غربی و برگشتی می‌باشد. بخش دیوارهای ساحلی شرقی و غربی بندر شهید رجایی در شکل (۲) ارائه شده است. در این پروژه، از شمع‌های درجاریز بتن مسلح با قطر ۱ متر و بافاصله ۲ متر از یکدیگر به‌منظور تأمین باربری تیر زیر ریل جرقیل که در بالای دیوار و شمع‌ها، قرار داده شده است، (شکل (۳)) استفاده شده است (Alielahi و Adampira، ۲۰۱۶). این شمع‌ها و آزمایش بارگذاری انجام شده بر روی آن‌ها و نیز داده‌های CPT و SPT برداشت شده از آن ناحیه، موضوع مطالعه این پژوهش است.



شکل ۱- موقعیت پروژه بندر شهید رجایی



شکل ۲- توسعه بندر شهید رجایی (فاز دوم)

۴-۳- آزمایش بارگذاری شمع

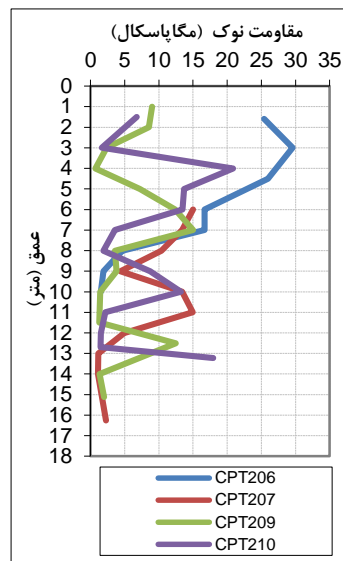
به‌طورمعمول، طراحی شمع‌ها در ابتدا بر اساس بارهای تخمینی و شرایط خاک بستر با کمک روابط کلاسیک انجام می‌شود. آزمایش‌های بارگذاری شمع در طول روند طراحی و به‌منظور کنترل نتایج ظرفیت باربری محاسبه شده، انجام می‌شوند. آزمایش‌های بارگذاری استاتیکی شمع می‌توانند روند طراحی را تأیید کنند یا نتایج آن را اصلاح کنند. در این پروژه، آزمایش‌های بارگذاری شمع بر روی پنج شمع درجاریز در محل دیوارهای ساحلی شرقی و غربی بر طبق استاندارد ASTM D1143 با روش بارگذاری استاندارد مرحله‌ای تا باری معادل ۱۰۰۰ تن بارگذاری در محل شمع‌های زیر ریل جرثقیل انجام شده است (شکل (۶)) موقعیت شمع‌ها به‌گونه‌ای انتخاب شدند که حداقل یک گمانه در نزدیکی هر آزمایش شمع وجود داشته باشد.



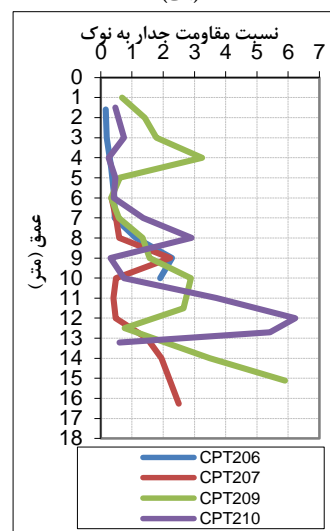
شکل ۶- تیر اصلی و شمع‌های تکیه‌گاهی آزمایش بارگذاری شمع در پروژه بندر شهید رجایی

۴-۴- تفسیر آزمایش‌های بارگذاری استاتیکی شمع

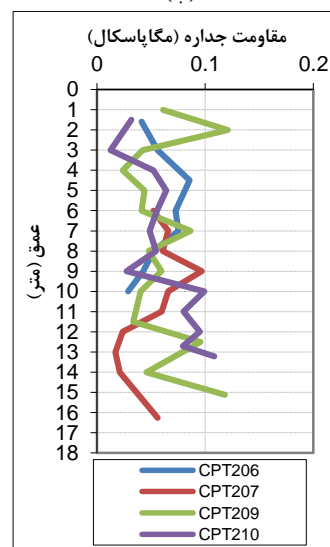
آزمایش بارگذاری استاتیکی به‌عنوان یک روش قابل‌اعتماد می‌تواند در مرحله طراحی و قبل از اجرای شمع‌های اصلی به‌عنوان شمع آزمایشی و یا در حین عملیات اجرا بر روی شمع‌های اصلی برای اطمینان از پیش‌بینی طرح و همچنین کنترل کیفیت اجرا انجام پذیرد. این آزمایش نوعی از آزمایشات با مقیاس واقعی است که ظرفیت باربری شمع را به‌صورت مستقیم به‌دست می‌آورد. تنها مسئله‌ای که در مورد این آزمایشات است، هزینه انجام این آزمایش است، برای همین این آزمایش معمولاً در پروژه‌های عظیم انجام می‌شود. بعد از انجام آزمایش بارگذاری استاتیکی بر روی شمع و اعمال بار و نیز اندازه‌گیری نشست متناسب با آن، نمودار بار-نشست متناسب با هر آزمایش حاصل می‌شود. در نمودار بار-نشست، بار نهایی در نقطه‌ای که منحنی نمودار تقریباً به‌صورت قائم درمی‌آید، نشان داده می‌شود، در حقیقت گسیختگی در نقطه‌ای از نمودار به‌وجود می‌آید که در آزمایش بارگذاری شمع جابه‌جایی افزایش پیدا می‌کند اما بار



(الف)

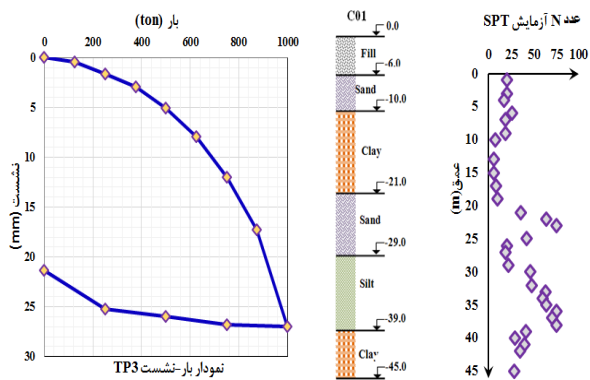


(ب)

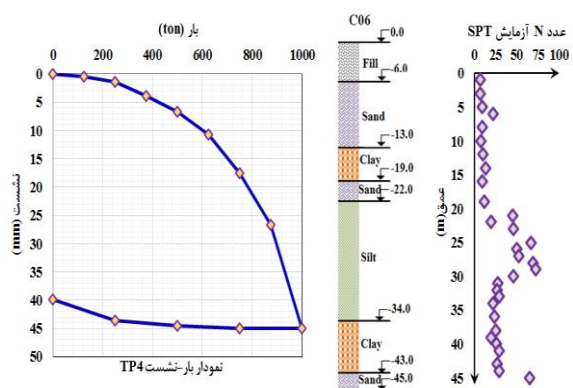


(ج)

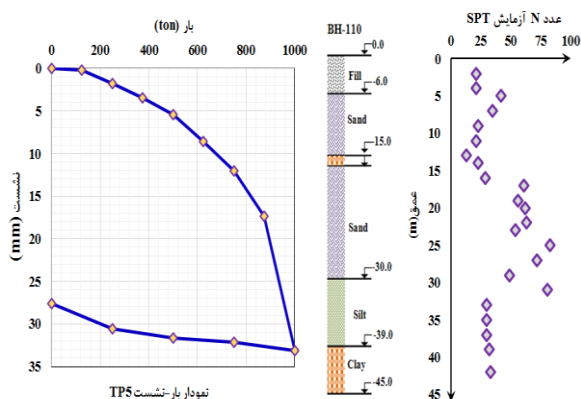
شکل ۵- نتایج آزمایش نفوذ مخروط شامل: (الف) مقاومت نوک، (ب) مقاومت جدار مخروط، (ج) نسبت مقاومت جدار به نوک چهار داده CPTu مورد بررسی



شکل ۹- نتایج SPT متناسب با آزمایش شمع و منحنی بار-جاب‌جایی آزمایش بارگذاری استاتیکی شمع (TP3)



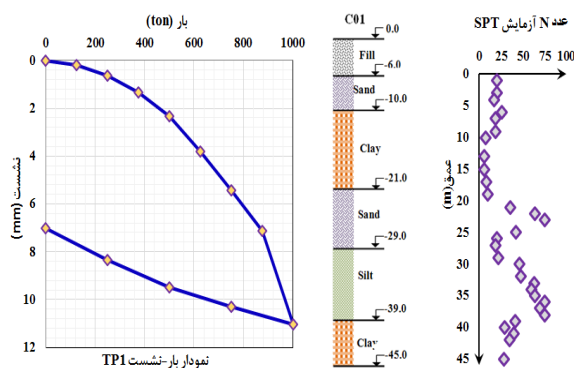
شکل ۱۰- نتایج SPT متناسب با آزمایش شمع و منحنی بار-جاب‌جایی آزمایش بارگذاری استاتیکی شمع (TP4)



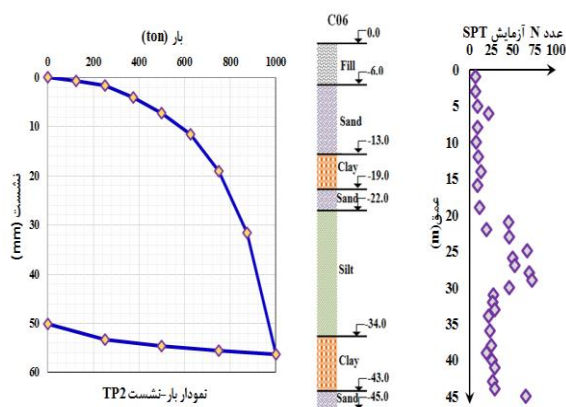
شکل ۱۱- نتایج SPT متناسب با آزمایش شمع و منحنی بار-جاب‌جایی آزمایش بارگذاری استاتیکی شمع (TP5)

همان‌طور که در جدول (۱) مشاهده می‌شود، مرجع (FHWA) فقط برای تخمین ظرفیت باربری شمع‌های TP2 و TP4 مناسب است (Adampira و Alielahi، ۲۰۱۶). خلاصه‌ای از نتایج حاصل از ظرفیت باربری شمع‌های آزمایش‌شده در جدول (۱) جدول ۱ آمده است.

افزایش اندکی دارد. هرچند رسیدن به این نقطه در آزمایش بارگذاری شمع نیازمند نشست قابل توجه شمع می‌باشد که در مواردی که شمع دارای قطر زیاد باشد، کار آسانی نخواهد بود. برای همین منظور روش‌های تفسیر نتایج آزمایش بارگذاری شمع مختلفی پیشنهاد شد. حال در پژوهش حاضر نیز، پنج آزمایش بارگذاری استاتیکی شمع (TP1 تا TP5) در محل دیوارهای ساحلی شرقی و غربی بندر شهید رجایی انجام شده است. منحنی بار-جاب‌جایی این آزمایش‌های شمع همراه با نتایج آزمایشات SPT و نیز لایه‌بندی خاک در اعماق مختلف به ترتیب در شکل‌های (۷) تا (۱۱) نشان داده شده است. بر اساس نتایج آزمایشات بارگذاری شمع، روش‌های مختلفی توسط محققین برای تعیین بارهای گسیختگی در نمودار بار-نشست ارائه شده است. به‌منظور به‌دست آوردن ظرفیت باربری نهایی شمع‌ها، نمودارهای بار-جاب‌جایی با کمک چهار روش تفسیر شده‌اند. این روش‌ها شامل: روش OCDI (Chin؛ ۱۹۸۷)؛ Fellenius؛ (۱۹۸۰)؛ FHWA (۱۹۹۲) می‌باشند (Adampira و Alielahi، ۲۰۱۶).



شکل ۷- نتایج SPT متناسب با آزمایش شمع و منحنی بار-جاب‌جایی آزمایش بارگذاری استاتیکی شمع (TP1)



شکل ۸- نتایج SPT متناسب با آزمایش شمع و منحنی بار-جاب‌جایی آزمایش بارگذاری استاتیکی شمع (TP2)

شمع براساس داده‌های CPTu و SPT استفاده می‌شود. در این راستا در هر مقایسه که براساس تلاش‌های آماری انجام شده است، روش‌های محاسبه ظرفیت باربری شمع‌ها اولویت‌بندی می‌شوند. برای این منظور، در هر مقایسه کم‌ترین تراز ($R1=1$) به منطبق‌ترین روش در آن مقایسه اختصاص داده می‌شود و سپس به روش‌های باقی‌مانده براساس میزان انطباق آن‌ها تا تراز $R1=4$ برای روش‌های مبتنی بر آزمایش‌های CPTu و $R1=2$ برای روش‌های مبتنی بر SPT اختصاص یافته است. اندیس ۱ تا ۶ نشان‌گر روش‌های آماری به‌ترتیب ذکر شده است. همچنین در مورد روش‌هایی که RI یکسان و رتبه متفاوت دارند، باید به این نکته توجه نمود که در تحقیقات پیشین معمولاً روش‌هایی که دارای RI یکسانی بودند، رتبه مشابهی به آن‌ها داده شده است؛ حال در این پژوهش، از بین روش‌هایی که RI یکسانی داشتند، به مقدار Qp/Qm آن‌ها توجه شده است و در صورتی که مقدار Qp/Qm یک روش نسبت به روش دیگر بیشتر باشد، رتبه بهتری داده شده است. چراکه اولین و مهم‌ترین تلاش آماری همان نسبت Qp/Qm است. در نهایت یک اولویت‌بندی نهایی براساس مجموع اولویت‌ها با شاخص رتبه‌بندی $RI=R1+R2+R3+R4+R5+R6$ برای هر روش محاسبه شده که بهترین روش براساس مجموع کم‌ترین اولویت نهایی، انتخاب می‌شود.

۵-۱- معادله بهترین خط برازش شده

در این روش نتایج ظرفیت باربری محاسبه‌شده، (Q_p)، در مقابل ظرفیت باربری اندازه‌گیری شده آزمایش بارگذاری استاتیکی، (Q_m)، رسم شده و بهترین خط برازش یافته گذرا از مبدأ، برای داده‌های فوق رسم و خط ایده‌آل برازش شده است (خط گذرا از مبدأ با شیب مساوی ($Q_{fit}=Q_m$) نیز ترسیم شده است) که در شکل‌های (۱۲) تا (۱۷) قابل مشاهده است. سپس نسبت Q_{fit}/Q_m و مقدار ضریب تعیین (R^2) برای هر روش محاسبه شده است. مقدار Q_{fit}/Q_m و برای روش‌های اسلامی-فلنیوس $Q_{fit}=0.39 \times Q_m$ ($R^2=0.79$)، اشمارتمن-تاتینگهام $Q_{fit}=0.7 \times Q_m$ ($R^2=0.44$)، برنگن-درویت $Q_{fit}=0.53 \times Q_m$ ($R^2=0.28$) و بوستامانته-جیانسلی $Q_{fit}=0.41 \times Q_m$ ($R^2=0.95$) به‌دست آمده‌اند. با توجه به این نتایج به‌دست‌آمده در این بخش، می‌توان اولویت‌بندی روش‌های تعیین ظرفیت باربری شمع‌ها با استفاده از داده‌های CPTu را به این صورت ارائه داد: (۱) اشمارتمن-تاتینگهام، (۲) برنگن-درویت، (۳) بوستامانته-جیانسلی، (۴) اسلامی-فلنیوس که $R1$ آن‌ها به‌ترتیب ۱ تا ۴ است و نتایج اولویت‌بندی در جدول (۲) نشان داده شده است.

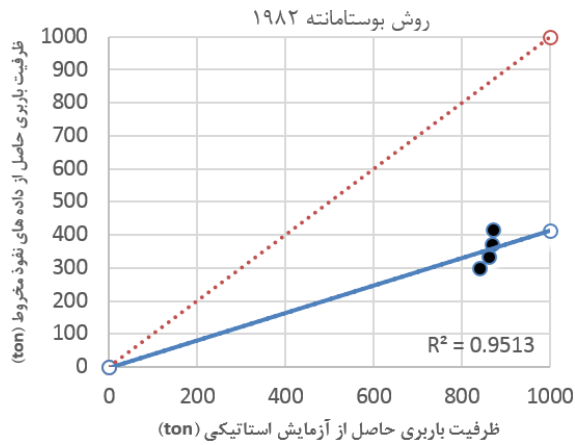
جدول ۱- ظرفیت باربری نهایی شمع‌ها براساس روش‌های مختلف تفسیر آزمایش شمع (Adampira و Alielahi، ۲۰۱۶)

روش تفسیر نتایج	TP1	TP2	TP3	TP4	TP5
OCDI	۸۷۵	۸۷۵	۸۷۵	۸۷۵	۸۷۵
Chin	۸۳۳	۹۰۰	۸۴۶	۹۰۲	۹۰۰
Fellenius	۸۸۰	۸۳۰	۸۰۰	۸۴۰	۸۷۰
FHWA	N.A	۹۱۰	N.A	۹۸۰	N.A

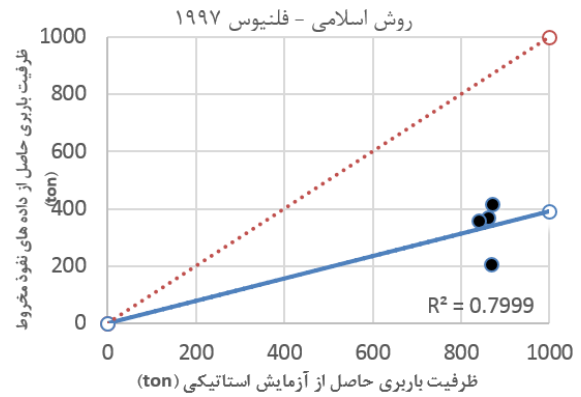
۵- ارزیابی نتایج ظرفیت باربری شمع‌ها مبتنی بر آزمایش‌های CPTu و SPT

برای ارزیابی ظرفیت باربری شمع‌ها با استفاده از نتایج مستقیم آزمایش‌های CPTu و SPT از روش‌های آماری استفاده شده است. برای این منظور نتایج ظرفیت باربری حاصل از روش‌های مبتنی بر آزمایش CPTu و SPT، (ظرفیت پیش‌بینی‌شده (Q_p) با نتایج حاصل از آزمایش بارگذاری استاتیکی شمع، (ظرفیت اندازه‌گیری شده (Q_m)) مورد بررسی و مقایسه قرار گرفته‌اند. به‌منظور محاسبه ظرفیت اندازه‌گیری شده (Q_m) حاصل از آزمایش بارگذاری استاتیکی شمع، از میانگین مقادیر حاصل از روش‌های مختلف تفسیر این آزمایش استفاده شده است. تجزیه و تحلیل‌های آماری در ابتدا توسط براوت و توکر^۲ در سال ۱۹۹۸ و لانگ و یسوکو^۳ در سال ۱۹۹۹ برای ارزیابی عملکرد روش‌های پیش‌بینی بینی ظرفیت باربری شمع مورد استفاده قرار گرفت. تحلیل‌های آماری می‌توانند یک سنجش مناسب برای رتبه‌بندی روش‌های مختلف براساس میزان دقت پیش‌بینی آن‌ها را، ارائه دهند. همچنین استفاده از تنها یک تلاش آماری برای ارزیابی عملکرد روش‌های CPT و SPT می‌تواند سبب نتایج گمراه‌کننده شود. چراکه نتیجه حاصل از هیچ‌کدام از تلاش‌های آماری به‌تنهایی همه جهات را پوشش نمی‌دهند و کاملاً رضایت‌بخش نیستند (Fellenius، ۲۰۱۷). در این راستا ۶ تلاش آماری به‌منظور رتبه‌بندی مناسب روش‌های تعیین ظرفیت باربری شمع‌ها با استفاده از داده‌های CPT و SPT ارائه شده است. هرکدام از این تلاش‌های آماری این روش‌ها را از یک جهت مورد ارزیابی قرار می‌دهند که در نهایت با اعمال همه تلاش‌های آماری مناسب‌ترین رتبه‌بندی به‌دست خواهد آمد.

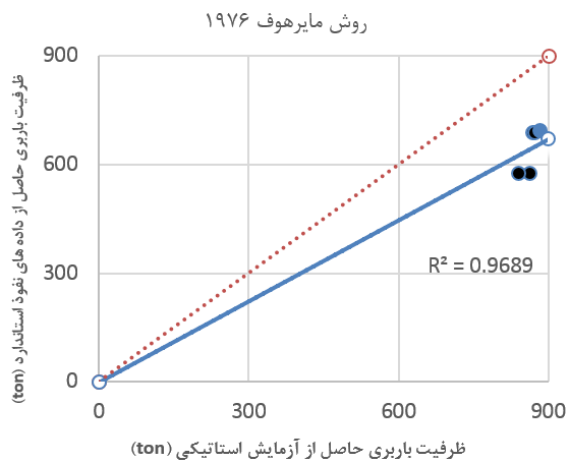
برای این منظور، از تلاش‌های آماری، بهترین خط برازش یافته‌ی گذرا از مبدأ برای Q_p در مقابل Q_m ، میانگین هندسی و انحراف معیار برای نسبت Q_p/Q_m ، میزان احتمال تجمعی در P_{50} و P_{90} برای نسبت Q_p/Q_m ، میزان دقت ۲۰٪ اخذ شده از هیستوگرام و نمودار توزیع نرمال برای نسبت Q_p/Q_m ، برای مقایسه و اولویت‌بندی روش‌های مختلف به‌دست آوردن ظرفیت باربری



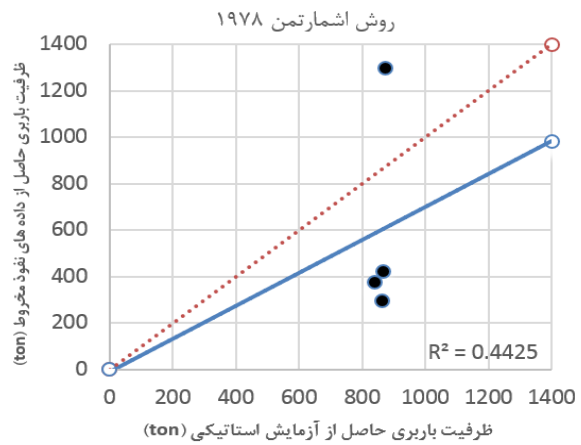
شکل ۱۵- نمودارهای برازش شده، مقایسه مقادیر پیش‌بینی شده و اندازه‌گیری برای روش بوستامانته



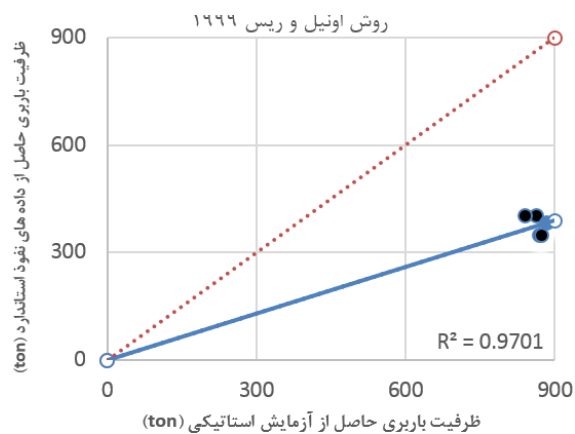
شکل ۱۲- نمودارهای برازش شده، مقایسه مقادیر پیش‌بینی شده و اندازه‌گیری برای روش اسلامی و فلنیوس



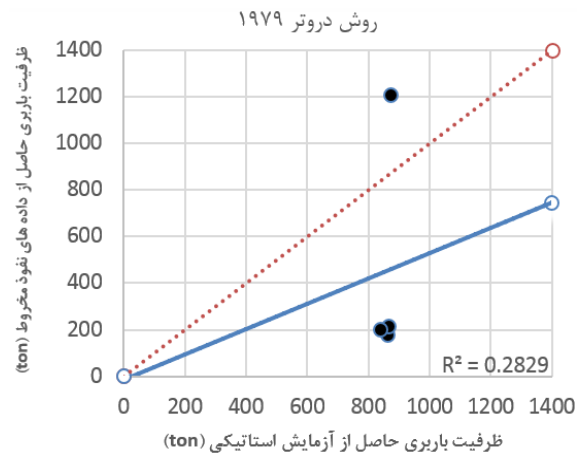
شکل ۱۶- نمودارهای برازش شده، مقایسه مقادیر پیش‌بینی شده و اندازه‌گیری برای روش مایرهورف



شکل ۱۳- نمودارهای برازش شده، مقایسه مقادیر پیش‌بینی شده و اندازه‌گیری برای روش اشمارتمن



شکل ۱۷- نمودارهای برازش شده، مقایسه مقادیر پیش‌بینی شده و اندازه‌گیری برای روش اونیل و ریس



شکل ۱۴- نمودارهای برازش شده، مقایسه مقادیر پیش‌بینی شده و اندازه‌گیری برای روش دروتر

صورت ارائه نمود: (۱) مایرهورف، (۲) اونیل و ریس که R1 آن‌ها به ترتیب ۱ تا ۲ است و نتایج اولویت‌بندی نیز در جدول (۳) و ستون‌های ۲ تا ۴ نشان داده شده است. همچنین می‌توان مشاهده نمود که نتایج ظرفیت باربری شمع‌ها براساس روش اسلامی و بوستامانته (که به صورت داده‌های نتایج ظرفیت باربری محاسبه شده، (Q_p) ، در مقابل ظرفیت باربری اندازه‌گیری شده آزمایش استاتیکی، (Q_m) می‌باشد، دارای پراکندگی کم‌تری نسبت به روش‌های اشمارتمن و دروینتر می‌باشد.

همچنین برای مقایسه روش‌های تعیین ظرفیت باربری براساس داده‌های SPT نیز همانند روند داده‌های CPTu، در اینجا نیز استفاده شده است. در این راستا پس از تعیین نسبت Q_{fit}/Q_m و مقدار ضریب تعیین (R^2) برای هر روش، مقدار Q_{fit}/Q_m و R^2 برای روش مایرهورف $Q_{fit}=0.74 \times Q_m$ ($R^2=0.97$)، اونیل و ریس به دست آمده در این بخش، می‌توان اولویت‌بندی روش‌های تعیین ظرفیت باربری شمع‌ها با استفاده از داده‌های SPT را نیز به این

جدول ۲- خلاصه نتایج ارزیابی روش‌های مختلف ارزیابی ظرفیت باربری شمع‌ها براساس داده‌های CPT

اولویت‌بندی	RI	اختلاف احتمالات			انحراف معیار			میانگین هندسی		بهترین خط برازش			اسلامی	
		R6	R5	ΔP	R4	P_{50}	R3	σ	R2	μ'	R1	R ²		Q_p/Q_m
۳	۱۵	۳	۲	۰/۴۸	۱	۱/۰۹	۲	۰/۰۹	۳	۰/۳۸	۴	۰/۸	۰/۳۹	
۱	۱۳	۱	۴	۱/۴۹	۳	۱/۲۷	۳	۰/۴۶	۱	۰/۵۸	۱	۰/۴۴	۰/۷	اشمارتمن
۴	۱۹	۲	۳	۱/۳۸	۴	۰/۷	۴	۰/۵	۴	۰/۳۶	۲	۰/۲۸	۰/۵۳	دروینتر
۲	۱۳	۴	۱	۰/۴۷	۲	۱/۱۶	۱	۰/۰۵	۲	۰/۴۱	۳	۰/۹۴۵	۰/۴۱	بوستامانته

جدول ۳- خلاصه نتایج ارزیابی روش‌های مختلف ارزیابی ظرفیت باربری شمع‌ها براساس داده‌های SPT

اولویت‌بندی	RI	اختلاف احتمالات			انحراف معیار			میانگین هندسی		بهترین خط برازش			مایرهورف	
		R6	R5	ΔP	R4	P_{50}	R3	σ	R2	μ'	R1	R ²		Q_p/Q_m
۱	۹	۱	۲	۱/۵۸	۲	۲/۱۵	۲	۰/۰۶	۱	۰/۷۴	۱	۰/۹۷	۰/۷۵	
۲	۹	۲	۱	۰/۸۳	۱	۱/۳۵	۱	۰/۰۳	۲	۰/۴۳	۲	۰/۹۷	۰/۴۳	اونیل-ریس

نیز نتایج در ستون‌های ۶ تا ۷ جداول (۲) و (۳) ارائه شده است. همچنین هرچه مقدار انحراف معیار به سمت صفر میل کند ایده-آل تر خواهد بود، یعنی پراکندگی داده‌ها کم‌تر است. در این شرایط نیز با توجه به این نتایج به دست آمده در این بخش، می‌توان اولویت‌بندی روش‌های تعیین ظرفیت باربری شمع‌ها با استفاده از داده‌های CPTu را به این صورت ارائه نمود: (۱) بوستامانته-جیانسلی، (۲) اسلامی-فلنیوس، (۳) اشمارتمن-تاتینگهام، (۴) برنگن-دروینتر. همچنین در ادامه، می‌توان اولویت‌بندی روش‌های تعیین ظرفیت باربری شمع‌ها با استفاده از داده‌های SPT را به این صورت ارائه داد: (۱) اونیل و ریس، (۲) مایرهورف.

۴-۵- میزان احتمالات تجمعی برای نسبت Q_p/Q_m

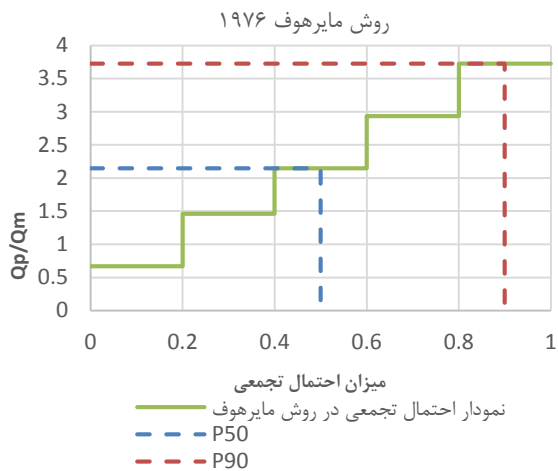
در این روش نمودار میزان احتمال تجمعی نسبت ظرفیت باربری‌های محاسبه شده به ظرفیت باربری‌های اندازه‌گیری شده آزمایش استاتیکی (Q_p/Q_m) رسم شده و میزان احتمال وقوع ۵۰٪ و ۹۰٪ درصد اخذ شده است. هر چه میزان احتمال تجمعی ۵۰٪ به عدد یک نزدیک و میزان تفاضل $P_{50} - P_{90}$ کم‌تر باشد، نتایج بهتر خواهد بود. نمودارهای توزیع احتمال تجمعی برای تمامی روش‌ها در شکل‌های (۱۸) تا (۲۳) نشان داده شده است. بر این اساس و

۲-۵- میانگین هندسی (μ') برای نسبت Q_p/Q_m

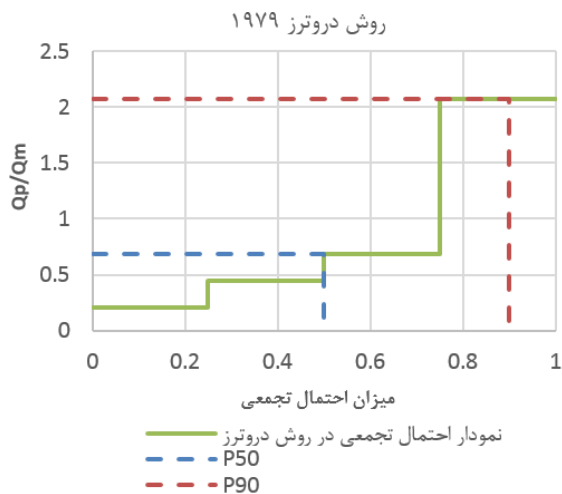
در این روش میانگین هندسی نسبت ظرفیت باربری‌های محاسبه شده به ظرفیت باربری‌های اندازه‌گیری شده آزمایش بارگذاری استاتیکی شمع‌ها (Q_p/Q_m)، برای هر روش محاسبه شده است. نتایج در ستون‌های ۵ تا ۶، جداول (۲) و (۳) ارائه شده است. هرچه مقدار میانگین هندسی به عدد ۱ نزدیک باشند، به این معنی است که نسبت محاسبه شده از هم فاصله کم‌تری دارد و ایدئال است. بر این اساس با توجه به این نتایج به دست آمده در این بخش، می‌توان اولویت‌بندی روش‌های تعیین ظرفیت باربری شمع‌ها با استفاده از داده‌های CPTu را به این صورت ارائه داد: (۱) اشمارتمن-تاتینگهام، (۲) بوستامانته-جیانسلی، (۳) اسلامی-فلنیوس، (۴) برنگن-دروینتر. همچنین اولویت‌بندی روش‌های تعیین ظرفیت باربری شمع‌ها با استفاده از داده‌های SPT نیز به این صورت ارائه می‌شود: (۱) مایرهورف، (۲) اونیل و ریس.

۳-۵- انحراف معیار (σ) برای نسبت Q_p/Q_m

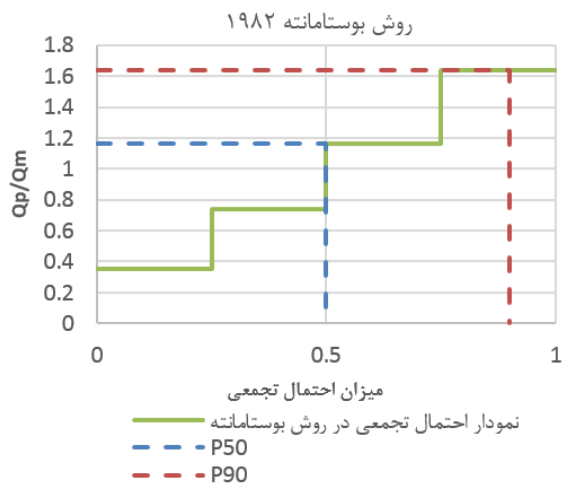
در این بخش میزان انحراف معیار نسبت ظرفیت باربری‌های محاسبه شده به ظرفیت باربری‌های اندازه‌گیری شده آزمایش استاتیکی (Q_p/Q_m)، برای هر روش محاسبه می‌شود. در این حالت



شکل ۲۰- نمودار توزیع احتمال تجمعی برای روش مایرهوف در تخمین ظرفیت باربری شمع‌ها

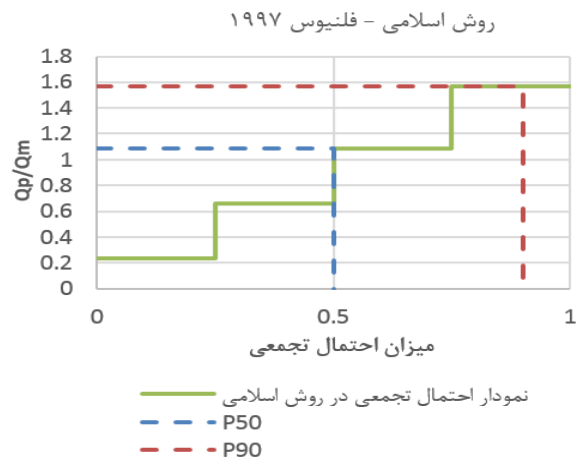


شکل ۲۱- نمودار توزیع احتمال تجمعی برای روش دروترز در تخمین ظرفیت باربری شمع‌ها



شکل ۲۲- نمودار توزیع احتمال تجمعی برای روش بوستامانته در تخمین ظرفیت باربری شمع‌ها

با توجه به نتایج احتمال وقوع ۵۰ درصد، می‌توان اولویت‌بندی روش‌های تعیین ظرفیت باربری شمع‌ها با استفاده از داده‌های CPTu را به این صورت ارائه داد: (۱) اسلامی- فلنیوس، (۲) بوستامانته- جیانسلی، (۳) اشمارتمن- تاتینگهام، (۴) برنگن- درویتر که نتایج در ستون‌های ۸ تا ۹، جدول (۲) نشان داده شده است. همچنین بر این اساس و با توجه به نتایج احتمال وقوع ۵۰ درصد می‌توان اولویت‌بندی روش‌های تعیین ظرفیت باربری شمع‌ها با استفاده از داده‌های SPT به این صورت ارائه داد: (۱) اونیل و ریس، (۲) مایرهوف که نتایج در ستون‌های ۸ تا ۹، جدول (۳) نشان داده شده است. علاوه بر این با توجه به نتایج میزان تفاضل $P_{50} - P_{90}$ ، اولویت‌بندی روش‌های تعیین ظرفیت باربری شمع‌ها با استفاده از داده‌های SPT به این صورت می‌باشد: (۱) اونیل و ریس، (۲) مایرهوف که این نتایج در ستون‌های ۱۰ تا ۱۱، جدول (۳) ارائه شده شد.

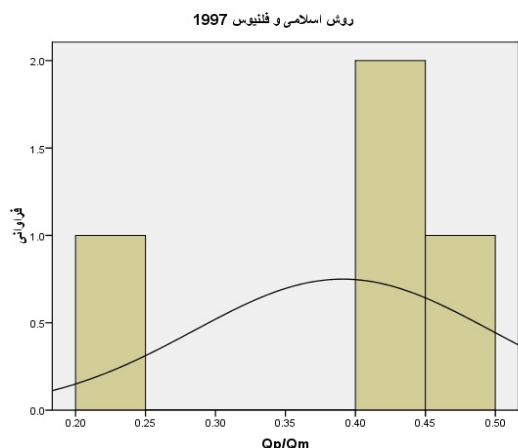


شکل ۱۸- نمودار توزیع احتمال تجمعی برای روش اسلامی و فلنیوس در تخمین ظرفیت باربری شمع‌ها

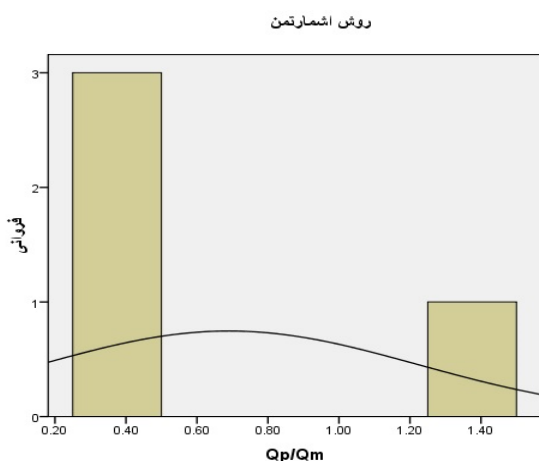


شکل ۱۹- نمودار توزیع احتمال تجمعی برای روش اشمارتمن در تخمین ظرفیت باربری شمع‌ها

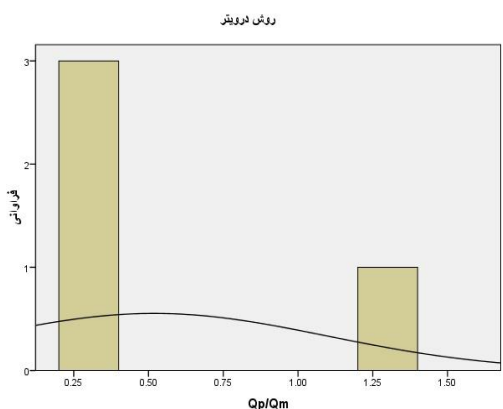
آماري مبناي دقت ۲۰٪ از نمودار هیستوگرام و نمودار احتمال توزیع نرمال برای نسبت Q_p/Q_m بهتر خواهد بود.



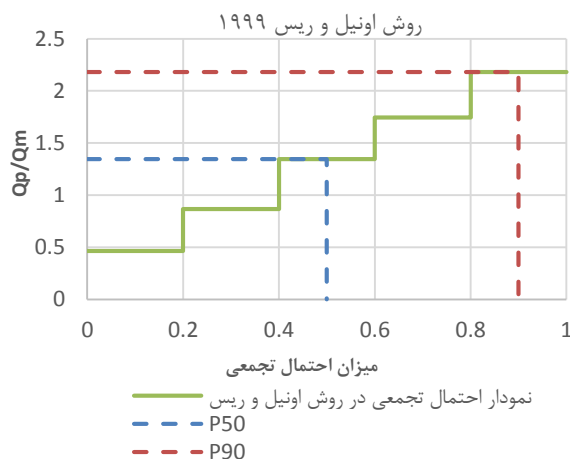
شکل ۲۳- نمودار توزیع نرمال و هیستوگرام برای روشن اسلامی و فنیوس در پیش‌بینی ظرفیت باربری شمع



شکل ۲۴- نمودار توزیع نرمال و هیستوگرام برای روشن اشمارتمن در پیش‌بینی ظرفیت باربری شمع



شکل ۲۵- نمودار توزیع نرمال و هیستوگرام برای روشن درویش در پیش‌بینی ظرفیت باربری شمع

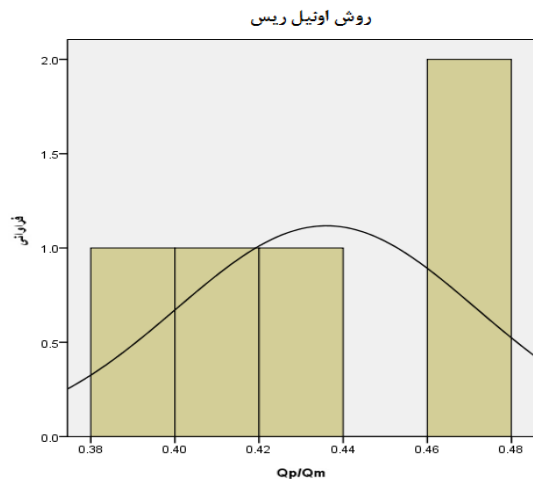


شکل ۲۳- نمودار توزیع احتمال تجمعی برای روشن اونیل و ریس در تخمین ظرفیت باربری شمع‌ها

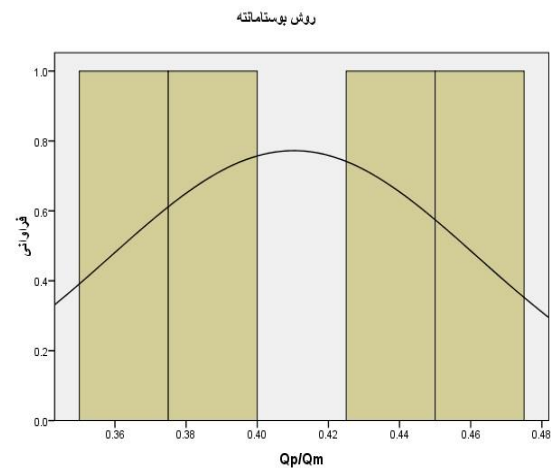
همچنین با توجه به نتایج میزان تفاضل $P_{50} - P_{90}$ اولویت‌بندی روش‌های تعیین ظرفیت باربری شمع‌ها با استفاده از داده‌های CPTu به این صورت می‌باشد: (۱) بوستامانته- جیانسلی، (۲) اسلامی- فنیوس، (۳) برنگن- درویش، (۴) اشمارتمن- تاتینگهام و نتایج نیز در جدول (۲) ارائه شده شد.

۵-۵- مبناي دقت ۲۰٪ اخذ شده از هیستوگرام و نمودار توزیع نرمال برای نسبت Q_p/Q_m

به‌طور کلی حالت ایده‌آل این است که نسبت ظرفیت باربری محاسبه‌شده به ظرفیت باربری اندازه‌گیری آزمایش استاتیکی (Q_p/Q_m) برابر ۱ باشد، یعنی در هر دو روش پاسخ یکسانی بدهند. ولی عملاً، به‌ویژه در مطالعات ژئوتکنیکی که اطلاعات چندان دقیق نمی‌باشد، این امر ممکن و میسر نیست. در نتیجه با توجه به میزان دقت آزمایش‌ها و نقصان اطلاعات یک حد بالا و پایین برای نسبت فوق در نظر گرفته می‌شود. به این صورت که هر قدر میزان تجمع داده‌ها در این محدوده بیشتر باشد، آن روش دارای پراکندگی کم-تری بوده و روش ایده‌آل‌تری است. برای این منظور، در این تحقیق مبناي 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 محدوده $0.8 < Q_p/Q_m < 1.2$ محاسبه شده است. هر قدر مساحت نمودارهای یادشده در محدوده فوق به ۱ نزدیک باشد، روش انتخابی دارای دقت بیشتری بوده و احتمال تطابق دو روش نیز بیشتر خواهد بود. نمودار توزیع نرمال و هیستوگرام برای روش‌های مختلف در شکل-های (۲۴) تا (۲۹) نشان داده شده است. در صورتی که نمودار توزیع نرمال این شکل‌ها را با یکدیگر مقایسه شوند، می‌توان مشاهده نمود که سطح زیر نمودار توزیع نرمال هر روشی که در گستره بازه ۰/۸ تا ۱/۲ بیشتر باشد اولویت‌بندی آن روش بر اساس تلاش



شکل ۲۹- نمودار توزیع نرمال و هیستوگرام برای روش اونیل- ریس در پیش‌بینی ظرفیت باربری شمع



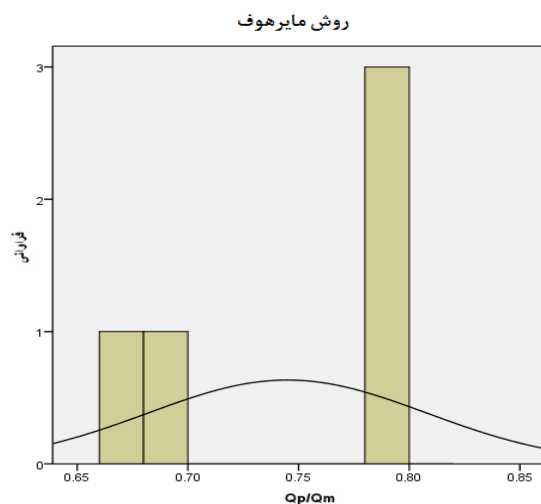
شکل ۲۷- نمودار توزیع نرمال و هیستوگرام برای روش بوستامانته در پیش‌بینی ظرفیت باربری شمع

حال اگر عملکرد روش‌های آزمایش نفوذ مخروط (CPTu) و آزمایش نفوذ استاندارد (SPT) بر اساس تلاش‌های آماری بهترین خط برازش یافته میانگین هندسی و انحراف معیار، میزان احتمالات تجمعی، میزان دقت ۲۰٪ اخذ شده از هیستوگرام و نمودار توزیع نرمال باهم نیز مقایسه شوند و نیز مواردی همچون دقت، که حاکی از میزان نزدیک بودن نتایج به یکدیگر می‌باشد و همچنین تکرارپذیری که قابلیت سیستم اندازه‌گیری در تولید نتایجی بسیار نزدیک به یکدیگر در صورتی که شرایط یکسان باشد را بیان می‌کند، در نظر گرفته شوند؛ بنابراین، اولویت‌بندی کلی روش‌های آزمایش نفوذ مخروط (CPTu) و آزمایش نفوذ استاندارد (SPT) به ترتیب شامل: (۱) اشمارتمن- تاتینگهام، (۲) مایرهوف، (۳) اونیل- ریس، (۴) بوستامانته- جیانسلی، (۵) اسلامی- فلنیوس، (۶) برنگن- درویر می‌باشند. همچنین می‌توان مشاهده نمود که در کل، روش اشمارتمن برای تعیین ظرفیت باربری شمع‌ها در خاک‌های عمدتاً ماسه‌ای جزو بهترین روش بوده و همچنین روش‌های مبتنی بر آزمایش نفوذ استاندارد (SPT) نیز پس از روش اشمارتمن- تاتینگهام نسبت به سایر روش‌های مبتنی بر آزمایش نفوذ مخروط (CPTu) از کارایی بهتری برخوردار است.

۶- مقایسه نتایج با مطالعات مشابه در گذشته تحقیق

در این بخش به مقایسه نتایج حاصل از پژوهش حاضر با تعدادی از مطالعات انجام‌گرفته در این زمینه پرداخته می‌شود. برای این منظور می‌توان به پژوهش انجام‌گرفته شده توسط Abu-Farsakh و Titi (۲۰۰۴) اشاره نمود. آن‌ها روش‌های مختلف اندازه‌گیری ظرفیت باربری شمع در خاک‌های رسی را با استفاده از نتایج آزمایش‌های CPT و CPTu با یکدیگر مقایسه کردند. از میان روش‌های بررسی‌شده سه روش مورد استفاده آن‌ها با

به عبارتی آن روش برای تخمین ظرفیت باربری شمع‌ها براساس داده‌های CPTu و SPT بهتر است. بر این اساس، خلاصه نتایج نیز در ستون ۱۲ در جدول (۲) و (۳) نشان داده شده است. با توجه به نتایج مبنای دقت ۲۰٪ می‌توان اولویت‌بندی روش‌های تعیین ظرفیت باربری شمع‌ها با استفاده از داده‌های CPTu را به این صورت ارائه نمود: (۱) اشمارتمن- تاتینگهام، (۲) برنگن- درویر، (۳) اسلامی- فلنیوس، (۴) بوستامانته- جیانسلی و نیز با توجه به نتایج مبنای دقت ۲۰٪ برای اولویت‌بندی روش‌های تعیین ظرفیت باربری شمع‌ها با استفاده از داده‌های SPT، نتایج اولویت‌بندی در این حالت به این صورت ارائه می‌شود: (۱) مایرهوف، (۲) اونیل ریس.



شکل ۲۸- نمودار توزیع نرمال و هیستوگرام برای روش مایرهوف در پیش‌بینی ظرفیت باربری شمع

مورد در نزدیکی محل اجرای شمع‌های درجاریز، آزمایش نفوذ مخروط (CPTu) و آزمایش نفوذ استاندارد (SPT)، انجام شده و همچنین بر روی شمع‌های درجاریز مذکور آزمایش استاتیکی واقعی شمع انجام شده است و نتایج ظرفیت باربری نهایی شمع‌ها (Q_m) به دست آمده‌اند. ظرفیت باربری شمع‌ها با استفاده از نتایج CPTu و SPT، با روش‌های مستقیم و با استفاده از روش‌های اشاره شده، محاسبه شده‌اند (Q_p). همچنین در این تحقیق برای ارزیابی ظرفیت باربری شمع‌ها از روش‌های آماری مختلفی بهره گرفته شده است.

برای این منظور، از تلاش‌های آماری، بهترین خط برازش یافته گذرا از مبدأ برای Q_p در مقابل Q_m ، میانگین هندسی و انحراف معیار برای نسبت Q_p/Q_m ، میزان احتمال تجمعی در P_{50} و P_{90} برای نسبت Q_p/Q_m ، میزان دقت ۲۰٪ اخذ شده از هیستوگرام و نمودار توزیع نرمال برای نسبت Q_p/Q_m ، برای مقایسه و اولویت‌بندی روش‌های مختلف به دست آوردن ظرفیت باربری شمع بر اساس داده‌های CPTu و SPT استفاده شده است.

با توجه به نتایج به دست آمده در این تحقیق، اولویت‌بندی‌های پیش‌بینی روش‌های مختلف تعیین ظرفیت باربری شمع‌ها با استفاده از داده‌های نفوذ مخروط به ترتیب شامل: (۱) اشمارتمن-تاتینگهام، (۲) بوستامانته-جیانسلی، (۳) اسلامی-فلنیوس، (۴) برنگن-درویتز و همچنین اولویت‌بندی‌ها ترتیب روش‌های تعیین ظرفیت باربری شمع‌ها با استفاده از داده‌های نفوذ استاندارد به صورت: (۱) مایرهورف، (۲) اونیل-ریس حاصل شده است.

در انتها بایستی متذکر شد که استفاده از نتایج مستقیم آزمایش نفوذ مخروط (CPTu) و آزمایش نفوذ استاندارد (SPT) در تخمین ظرفیت باربری شمع‌های بتنی درجاریز (از جمله ظرفیت باربری نوک شمع و همچنین مقاومت جدار شمع و نیز مقدار فشار آب منفذی) در شرایط مختلف ژئوتکنیکی می‌تواند بسیار کارآمد باشد. بنابراین از نتایج به دست آمده در این تحقیق را می‌توان برای سایر شمع‌های این پروژه و پروژه‌های مشابه با توجه به هزینه‌بر آزمایش‌های بزرگ مقیاس بارگذاری استاتیکی شمع، استفاده نمود.

۸- مراجع

شوش‌پاشا ع، سعیدی ب، "ارزیابی مقاومت اصطکاکی شمع و پارامترهای مؤثر بر آن در خاک ماسه‌ای با استفاده از آزمایش بارگذاری"، نشریه مهندسی عمران و محیط‌زیست دانشگاه تبریز، ۱۳۹۵، ۸۴ (۳)، ۳۹-۵۰.

AASHTO, Standard Specifications for Highway Bridges (2002) 17th edition, HB-17. American Association of State Highway and Transportation Officials, Washington, DC.

Abu-Farsakh MY, Titi HH, "Assessment of direct cone penetration test methods for predicting the ultimate capacity of friction driven piles", Journal of

روش‌های مقاله حاضر مشابه بود که پس از رتبه‌بندی آن‌ها، اولویت‌بندی‌ها ترتیب روش‌های تعیین ظرفیت باربری شمع‌ها به-ترتیب: (۱) برنگن-درویتز، (۲) بوستامانته-جیانسلی، (۳) اشمارتمن-تاتینگهام بودند. در ادامه، Cai و همکاران (۲۰۰۹) به بررسی اولویت‌بندی روش‌های مختلف اندازه‌گیری ظرفیت باربری شمع در خاک‌های عمدتاً رسی با استفاده از نتایج آزمایش‌های CPT و CPTu پرداختند. در این پژوهش نیز چهار روش مورد استفاده آن‌ها با روش‌های در نظر گرفته شده در مقاله حاضر مشابه بود که اولویت‌بندی نتایج آن‌ها به ترتیب: (۱) اسلامی-فلنیوس، (۲) برنگن-درویتز، (۳) بوستامانته-جیانسلی، (۴) اشمارتمن-تاتینگهام ارائه شد. در سال ۲۰۱۱ نیز اسلامی و همکاران همانند پژوهشگرهای قبل به ارزیابی روش‌های مختلف اندازه‌گیری ظرفیت باربری شمع در خاک‌های ریزدانه رسی با استفاده از نتایج آزمایش‌های CPT و CPTu پرداختند، که بعد از بررسی و اولویت‌بندی این روش‌ها روش اسلامی-فلنیوس بهترین روش تعیین ظرفیت باربری شمع با استفاده از نتایج آزمایش نفوذ مخروط تشخیصی داده شد.

با توجه به نتایج مطالعات گذشته بر روی روش‌های مختلف تعیین ظرفیت باربری شمع با استفاده از نتایج آزمایش‌های CPT و CPTu می‌توان مشاهده نمود که در صورتی که خاک منطقه عمدتاً از نوع رسی باشد، از میان روش‌های بررسی شده در این پژوهش روش اسلامی-فلنیوس و برنگن-درویتز کارآمدترین روش‌ها می‌باشد. حال در خاک‌های عمدتاً ماسه‌ای می‌توان به پژوهش انجام گرفته توسط Kim و Hung در سال ۲۰۱۵ اشاره داشت که کارایی روش‌های تعیین ظرفیت باربری شمع‌ها را با استفاده از نتایج آزمایش‌های CPT در خاک‌های ماسه‌ای ارزیابی نمودند. در این پژوهش نیز سه روش آن با روش‌های تحقیق حاضر مشابه بود که بعد از اولویت‌بندی نتایج به صورت: (۱) بوستامانته-جیانسلی، (۲) اشمارتمن-تاتینگهام، (۳) اسلامی-فلنیوس بودند که با نتایج این پژوهش و تعیین اولویت‌بندی روش‌های تعیین ظرفیت باربری شمع در خاک‌های عمدتاً ماسه‌ای تطابق دارد. بنابراین، با توجه به نتایج پژوهش‌های پیشین و همچنین پژوهش حاضر، می‌توان ذکر نمود که برای خاک‌های ریزدانه رسی، روش‌های اسلامی-فلنیوس و برنگن-درویتز و برای خاک‌های عمدتاً ماسه‌ای روش‌های بوستامانته-جیانسلی و اشمارتمن-تاتینگهام نسبت به سایر روش‌های پیشنهادی دارای نتایج کارآمدتری می‌باشند.

۷- نتیجه‌گیری

در این پژوهش، ظرفیت باربری پنج شمع درجاریز بتن مسلح به قطر یک متر واقع در فاز دوم پروژه بندر شهید رجایی واقع در غرب شهر بندرعباس، مورد بحث و بررسی قرار گرفته است. در کلیه

- Hung LC, Kim SR, "CPT-based method for toe resistance of driven piles in sand", Proceedings of the Institution of Civil Engineers-Geotechnical Engineering, 2015, 168 (6), 498-513.
- KGS, "Design criteria of structure foundations", Korean Geotechnical Society, 2003.
- Nevels JB, Snethen D, "Comparison of settlement predictions for single piles in sand based on penetration test results", In Vertical and Horizontal Deformations of Foundations and Embankments, ASCE, 1994, 1028-1038.
- Nejad FP, Jaksa MB, Kakhi M, McCabe BA, "Prediction of pile settlement using artificial neural networks based on standard penetration test data", Computers and Geotechnics, 2009, 36 (7), 1125-1133.
- Schmertmann JH, "Guidelines for cone penetration test: performance and design (No. FHWA-TS-78-209)", United States. Federal Highway Administration, 1978.
- Zhang G, Robertson PK, Brachman RWI, "Estimating liquefaction-induced lateral displacements using the standard penetration test or cone penetration test", Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, 2004, 130 (8), 861-871.
- Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, 2004, 130 (9), 935-944.
- Alielahi H, Adampira M, "Comparison between empirical and experimental ultimate bearing capacity of bored piles-a case study", Arabian Journal of Geosciences, 2016, 9 (1), 1-16.
- Bustamante M, Gianceselli L, "Pile bearing capacity prediction by means of static penetrometer CPT", In Proceedings of the 2-nd European symposium on penetration testing, 1982, 493-500.
- Cai G, Liu S, Tong L, Du G, "Assessment of direct CPT and CPTu methods for predicting the ultimate bearing capacity of single piles", Engineering Geology, 2009, 104 (3-4), 211-222.
- Cai G, Liu S, Puppala AJ, "Reliability assessment of CPTu-based pile capacity predictions in soft clay deposits", Engineering Geology, 2012, 141, 84-91.
- Canadian Foundation Engineering Manual (CFEM), 4th Edition, Canadian Geotechnical Society, Bitech Publishers, Vancouver, 2006.
- De Ruyter J, Beringen F, "Pile foundations for large North Sea structures", Marine Georesources and Geotechnology, 1979, 3 (3), 267-314.
- Dung NT, Chung SG, Kim SR, Beak SH, "Applicability of the SPT-based methods for estimating toe bearing capacity of driven PHC piles in the thick deltaic deposits", KSCE Journal of Civil Engineering, 2011, 15 (6), 1023-1031.
- Eslami A, Fellenius BH, "Pile capacity by direct CPT and CPTu methods applied to 102 case histories", Canadian Geotechnical Journal, 1997, 34 (6), 886-904.
- Eslami A, Fellenius BH, "Toe bearing capacity of piles from cone penetration test (CPT) data", In Proceedings of the International Symposium on Cone Penetration Testing, CPT, 1995, 95, 4-5.
- Eslami AA, Fellenius BH, "CPT and CPTu data for soil profile interpretation: review of methods and a proposed new approach", Iranian Journal of Science and Technology Transaction B-Engineering, 2004, 28, B1, 69-86.
- Eslami A, Aflaki E, Hosseini B, "Evaluating CPT and CPTu based pile bearing capacity estimation methods using Urmiyeh Lake Causeway piling records", Scientia Iranica, 2011, 18 (5), 1009-1019.
- Fateh AMA, Eslami A, Fahimifar A, "Direct CPT and CPTu methods for determining bearing capacity of helical piles", Marine Georesources & Geotechnology, 2017, 35 (2), 193-207.
- Fellenius B, "Basics of foundation design", Lulu. com. 2017.
- Goudreault P, Fellenius BH, "Unipile program for unified analysis of piles and pile groups considering capacity, negative skin friction, and settlement", User Manual, Bengt Fellenius Consultants, Inc., Ottawa, 1990.
- Hannigan PJ, Rausche F, Likins GE, Robinson BR, Becker ML, Geotechnical Engineering Circular No. 12, Vol. I. "Design and construction of driven pile foundations", Publication No. FHWA-NHI-16-009, U.S. Department of Transportation, Federal Highway Administration, 2016.

EXTENDED ABSTRACT

Estimation of Bearing Capacity of Bored Piles Using CPT and SPT Direct Results and Compared with Static Pile Load Tests- The Case Study

Davar Mousavi, Hamid Alielahi *

Department of Civil Engineering, Zanjan Branch, Islamic Azad University, Zanjan, Iran

Received: 18 February 2019; Accepted: 23 January 2021

Keywords:

Bearing Capacity, Marine condition, Reinforcement Concrete piles, Static Loading Test, Cone Penetration Test (CPTu), Standard Penetration Test (SPT).

1. Introduction

In marine environments such as beaches and ports, typically, the type of soil layers are soft, thus using piles to retrofit (strengthen) the soil in this area is essential for constructing different structures such as the quay walls. Bored concrete piles are commonly used in these marine areas; consequently, determining the final bearing capacity of this type of pile is necessary for the safe design of deep foundations. Whereas, the exact prediction of the ultimate bearing capacity of the piles is always a challenge for engineering designers who can achieve it by using various approaches, for instance, pile load tests, dynamic analysis, static analysis, and in situ testing. The cone penetration test (CPTu) is the most effective in situ technique for describing soil characteristics. The CPTu is an efficient, simple, fast, reliable, and economical test that can provide continuous data of subsurface soil properties. Besides, the standard Penetration Test (SPT) is one of the most common and economical field tests used during the structures' ground investigations. Not only is it used for main applications in soil characterization, but also SPT N-Value is widely used for the design of structural foundations and other underground structures, especially for the bearing capacity of the piles.

2. Methodology

There are two categories of information about the ShahidRajaei port project in this study. The first category of CPT and SPT testing data are included cone tip resistance (q_c) and sleeve friction (f_s) during penetration and the N- value in the SPT test. The second category of data is included load capacities computed by static tests, which are performed on the piles in situ. In the current survey, the Unipile software was used to calculate the bearing capacity of the piles by using the CPT and the SPT methods. For the CPT methods, the four approaches of Schmertmann- Nottingham (1978), Beringen- De Ruiter (1979), Bustamante- Ganeselli (1982), and Eslami – Fellenius (1997) and for the SPT methods, the two approaches of Meyerhof (2017) and O'Neill- Reese (2011) are used to determine the bearing capacity of the piles. The bearing capacity of the piles is calculated by using the CPT and SPT data for each of the methods as mentioned earlier (Q_m). Furthermore, the bearing capacity of the piles is calculated on a real scale by using the methods performed in situ (Q_p). Then it is plotted in a graph with Q_m and Q_p values on its vertical and horizontal axis, and each point that is determined with the pair (Q_m , Q_p) is shown on this coordinate system. Then the best fit of these points, which passes through the origin of this coordinate system determined (Q_{fit}). Since the ideal state of these results is $Q_p=Q_m$, the ideal fit also passes with a slope equal to one ($Q_p=Q_m$), whether it passes through the origin. In the following, for each proposed method, by comparing these two fittings and obtaining the coefficient of determination, these methods are prioritized, and the best method is found for pile bearing capacity by using CPT and SPT data.

* Corresponding Author

E-mail addresses: ha.alielahi@iau.ac.ir(Hamid Alielahi), davarmousavi@gmail.com (DavarMosavi).

3. Results and discussion

The four statistical methods are used to evaluate the bearing capacity of the piles, which are obtained from CPTu and SPT tests. For this purpose, the predicted bearing capacity of the CPTu and SPT test methods (Q_p) and measured the bearing capacity of the static loading test of the pile (Q_m) were evaluated. The statistical methods such as the best-fitted line which is passed of origin for Q_p versus Q_m , geometric mean and standard deviation for the Q_p/Q_m ratio, the cumulative probability in P50 and P90 for the Q_p/Q_m ratio, the accuracy level of 20 percent derived from the histogram and the normal distribution diagram for the Q_p/Q_m ratio are used to compare and prioritize various methods based on CPTu and SPT data for obtaining the bearing capacity of the piles. The methods for calculating the bearing capacity of the piles are prioritized based on statistical effort. For this purpose, the lowest level (R1=1) is assigned to the most agreement method in each comparison, and then the remained methods based on their compliance are assigned to the levels 4R1 and 2R1 for methods based on CPTu and SPT, respectively. According to each statistical method, assigned an index of 1 to 6 for each method. Finally, a prioritization based on the total priorities with the ranking index $RI=R1+R2+R3+R4+R5+R6$ is calculated for each method. Consequently, the best method is obtained based on the lowest value of the priority sum. The results of these priorities are presented in Table 1 and Table 2, respectively. In these tables, by summing up all priorities, it can be seen priorities of the cone penetration methods for determining the bearing capacity of the piles in the order that 1) Schmertmann- Nottingham, 2) Bustamante- Gianceselli, 3) Eslami- Fellenius, 4) Beringen- De Ruiter, respectively. Also, these priorities of standard penetration methods for determining the capacity of bearing piles are in the order that 1) Meyerhof, 2) O'Neill and Reese, respectively.

Table 1. Summary results of different bearing capacity of pile methods based on CPTu data

	best-fit line			geometric mean		standard deviation			cumulative probabilities50%		cumulative probabilities		accuracy level equals 20%	RI	Final rank
	Q_p/Q_m	R ²	R1	μ'	R2	σ	R3	P ₅₀	R4	ΔP	R5	R6			
Eslami	0.39	0.8	4	0.38	3	0.09	2	0.66	1	0.91	2	3	15	3	
Schmertmann	0.7	0.44	1	0.58	1	0.46	3	0.83	3	1.93	4	1	13	1	
Beringen	0.53	0.28	2	0.36	4	0.5	4	0.45	4	1.63	3	2	19	4	
Bustamante	0.41	0.945	3	0.41	2	0.05	1	0.74	2	0.9	1	4	13	2	

Table 2. Summary results of different bearing capacity of pile methods based on SPT data

	best-fit line			geometric mean		standard deviation			cumulative probabilities50%		cumulative probabilities		accuracy level equals 20%	RI	Final rank
	Q_p/Q_m	R ²	R1	μ'	R2	σ	R3	P ₅₀	R4	ΔP	R5	R6			
Meyerhof	0.75	0.97	1	0.74	1	0.06	2	2.15	2	1.58	2	1	9	1	
O'Neill	0.43	0.97	2	0.43	2	0.03	1	1.35	1	0.83	1	2	9	2	

4. Conclusions

In the current survey, the bearing capacity of five boring reinforced concrete piles with a circular cross-section, which was constructed in Shahid Rajaee Port Complex (SRPC) that is located on the west side of Bandarabbas city, south of Iran, and on the north coast of the Persian Gulf, are investigated.

The bearing capacity is of the piles by using cone penetration test results (CPTu), and the standard penetration test (SPT) methods are the measured bearing capacity of the piles subject to static loads.

In all cases, the Cone Penetration Test (CPTu), the Standard Penetration Test (SPT), and the piles subject to static loads test are conducted on the piles, and the final bearing capacity of the piles (Q_m) is obtained. The bearing capacity of the piles was calculated by using the CPTu and SPT and the aforementioned direct methods (Q_p). In order to evaluate the bearing capacity of the piles, the different above-mentioned statistical methods are used. Finally, by summing up all priorities, the priorities of the cone penetration methods for determining the bearing capacity of the piles are in the order that 1) Schmertmann- Nottingham, 2) Bustamante- Gianceselli, 3) Eslami- Fellenius, 4) Beringen- De Ruiter, respectively. Besides, these priorities of standard penetration methods for determining the capacity of bearing piles are in the order that 1. Meyerhof, 2. O'Neill and Reese, respectively.

5. References

- Alielahi H, Adampira M, "Comparison between empirical and experimental ultimate bearing capacity of bored piles-a case study", *Arabian Journal of Geosciences*, 2016, 9 (1), 78.
- Cai G, Liu S, Tong L, Du G, "Assessment of direct CPT and CPTU methods for predicting the ultimate bearing capacity of single piles", *Engineering Geology*, 2009, 104 (3-4), 211-222.
- Dung NT, Chung SG, Kim SR, Beak SH, "Applicability of the SPT-based methods for estimating toe bearing capacity of driven PHC piles in the thick deltaic deposits", *KSCE Journal of Civil Engineering*, 2011, 15 (6), 1023-1031.